



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



DESIGN OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

# 架空输电线路设计

(第二版)

孟遂民 孔 伟 唐 波 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电工与电子技术基础	彭曙蓉
信号分析与处理(第二版)	崔翔
电机学(第三版)	胡敏强
电机学习题解析(第二版)	胡虔生
走进电世界——电气工程与自动化(专业)概论(第二版)	孙元章
电气工程基础(第二版)上册	陈慈萱
电气工程基础(第二版)下册	陈慈萱
电力系统稳态分析(第四版)	陈珩
电力系统暂态分析(第四版)	方万良
电力系统分析(第二版)	夏道止
发电厂电气部分(第五版)	苗世洪
发电厂变电所电气部分(第二版)	刘宝贵
电力系统规划(第二版)	程浩忠
电力系统继电保护原理(第四版)	贺家李
电力系统自动装置原理(第五版)	杨冠城
高电压工程(第二版)	林福昌
现代供电技术(第二版)	王福忠
现代供电技术学习指导	王福忠
架空输电线路设计(第二版)	孟遂民



中国电力出版社教材中心  
 教材网址 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn>  
 服务热线 010-63412706 63412548





“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 架空输电线路设计

## (第二版)

编著 孟遂民 孔 伟 唐 波

主审 刘观起 杨静波



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书共分十三章，主要内容包括绪论、架空输电线路基本知识、设计用气象条件、架空线的机械物理特性和比载、均布荷载下架空线的计算、气象条件变化时架空线的计算、均布荷载下架空线计算的进一步研究、非均布荷载下架空线的计算、连续档架空线的应力和弧垂、架空线的断线张力和不平衡张力、架空线的振动和防振、路径选择和杆塔定位以及计算机在输电线路设计中的应用。

本书可作为高等学校相关专业课程的教材，也可供从事输电线路设计、运行、检修等有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

架空输电线路设计/孟遂民, 孔伟, 唐波主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2015. 2

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 6984 - 9

I. ①架… II. ①孟… ②孔… ③唐… III. ①架空线路—输电线路—设计—高等学校—教材 IV. ①TM726. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 308607 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 8 月第一版

2015 年 2 月第二版 2015 年 2 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 453 千字

定价 38.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

本书第一版于2007年由中国电力出版社出版以来，得到了广大读者的欢迎，已多次印刷，并入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。在此期间，我国输电线路工程迅猛发展，几乎同时出现了1000kV特高压交流和±800kV特高压直流输电线路，且数量持续增加。同时输电线路方面的科学研究取得了丰硕成果，架空输电线路设计的有关主要规范标准也进行了修订。本书第二版力图反映这些新的变化。

本书第二版对有关章节的内容进行了适当调整，并按最新有关规范标准进行了改写。主要是增加了绪论一章，论述了输电技术与输电线路的研究与发展趋势；增加了导线热平衡的详细计算内容；增加了新的绝缘子结构，绝缘配合介绍了考虑有效系数的爬电比距法；风速的计算增加了梯度高度和截断高度，以利于理解不同地面粗糙度之间风速的关系；对孤立档架空线应力弧垂计算举例的计算过程进行了细化，更利于读者学习和理解；增加了施工基面和长短腿的内容，以提高水土保持和环境保护意识；航片、卫片以及遥感影像等已广泛用于输电线路的选线和定位中，最后一章对此和有关设计软件进行了更新介绍。另外，在有关的章节中增加了1000kV线路的相应规定，对有关的练习题进行了完善和补充。

本书第二版第十三章由三峡大学唐波编写，各章例题由研究生秦坤进行了核算，其余内容由三峡大学孟遂民改写。全书由孟遂民统稿。

在本书的修订过程中，参考了有关文献资料，对其作者一并表示感谢。

编 者

2014年10月于三峡大学

## 第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书介绍了架空输电线路设计方面的有关知识和优化换位方式、紧凑型输电线路等内容,重点阐述了考虑刚度影响、滑轮悬挂等特殊情况下的架空线计算问题,对输电线路 CAD 也作了比较深入的讨论。相关内容曾作为教学讲义在三峡大学、东北电力大学、南京工程学院等学校使用多年,本次出版按照最新国家有关标准和有关研究成果进行了修订。

全书共分十二章。第一章介绍输电线路的基本知识、各组成部分的选用,架空线的排列方式、换位及其优化,紧凑型输电线路以及线路设计的一般内容和步骤。第二、三章介绍线路设计用气象条件和架空线的机械物理特性、安全系数的选取、比载的计算。第四章重点导出均布荷载下的架空线悬链线形式的有关公式,并以此为基础,导出了斜抛物线形式的有关公式,分析了斜抛物线和平抛物线形式有关公式的误差。第五章讲述架空线的状态方程式、临界档距和控制气象条件,研究作图法和列表法判定有效临界档距的原理和方法。第六章对均布荷载下架空线的计算进一步研究,论述刚性架空线的有关计算,给出架空线刚度的测试方法,论述架空线的初伸长及其与时间的关系,介绍常用的初伸长补偿方法,过牵引现象及其计算,水平档距和垂直档距,极大档距和允许档距以及极限档距,研究确定架空线放松系数的方法。第七章研究非均布荷载作用下的架空线计算问题,给出耐张串的比载、水平投影和垂直投影长度的计算公式,分析孤立档施工观测和竣工弧垂的计算特点,讲述判定孤立档控制条件的方法。第八章研究连续档架空线的有关计算,讲述代表档距法和精确算法,并就滑轮悬挂架空线的情况进行比较深入的分析研究,论述连续档架空地线应力的选配方法以及连续倾斜档的架线观测弧垂及线长的调整。第九章研究架空线的断线张力和不平衡张力,给出校验跨越限距时断线档的选取原则,讲述求解断线张力的解析法、图解法以及地线支持力的计算,介绍不均匀覆冰的计算特点。第十章研究架空线的振动和防振,重点讲述架空线振动的基本理论、微风振动的影响因素、微风振动的强度表示和测量方法、微风振动的防振设计。第十一章研究线路路径的选择,介绍对地距离和交叉跨越的有关规定,讲述弧垂曲线模板和杆塔定位方法,重点研究了杆塔定位的校验内容及其方法,并讲述了杆塔中心位移问题。第十二章研究计算机在输电

线路设计中的应用，从数据库、3S技术、CAD技术的角度论述输电线路计算机辅助设计，介绍目前流行的三种输电线路CAD软件。

本书第一、三、四章由东北电力大学孔伟编写，其余章节由三峡大学孟遂民编写，全书由孟遂民教授统稿，由华北电力大学刘观起主审。

由于编者水平的局限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

**编 者**

2007年春节

## 目 录

前言

第一版前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 输电技术与输电线路的发展	3
第三节 架空输电线路设计的一般内容和步骤	9
练习题	12
第二章 架空输电线路基本知识	13
第一节 导线和地线	13
第二节 绝缘子和绝缘子串	21
第三节 常用金具	29
第四节 杆塔	33
第五节 基础	35
第六节 接地装置	36
第七节 导线的排列方式与换位	37
练习题	40
第三章 设计用气象条件	41
第一节 主要的气象参数	41
第二节 气象参数值的选取	42
第三节 设计用气象条件的组合	50
练习题	53
第四章 架空线的机械物理特性和比载	54
第一节 架空线的机械物理特性	54
第二节 架空线的许用应力和安全系数	58
第三节 架空线的比载	59
练习题	64
第五章 均布荷载下架空线的计算	65
第一节 架空线悬链线方程的积分普遍形式	65
第二节 等高悬点架空线的弧垂、线长和应力	66
第三节 不等高悬点架空线的弧垂、线长和应力	69
第四节 架空线弧垂、线长和应力计算公式的简化	75
第五节 架空线的平均高度与平均应力	85

第六节	均布垂直比载和水平比载共同作用下架空线的计算	87
练习题		90
<b>第六章</b>	<b>气象条件变化时架空线的计算</b>	91
第一节	架空线的状态方程式	91
第二节	临界档距	97
第三节	最大弧垂的判定	102
第四节	应力弧垂曲线和安装曲线	104
练习题		109
<b>第七章</b>	<b>均布荷载下架空线计算的进一步研究</b>	111
第一节	考虑刚度影响时架空线的计算	111
第二节	架空线的初伸长及其处理	119
第三节	架空线施工中的过牵引	122
第四节	线路设计中常用的几种档距	124
第五节	架空输电线路的改建	129
练习题		131
<b>第八章</b>	<b>非均布荷载下架空线的计算</b>	132
第一节	架空线悬挂曲线方程的一般形式	132
第二节	非均布荷载下架空线的弧垂、张力和线长	133
第三节	孤立档架空线的弧垂和线长	136
第四节	孤立档架空线的状态方程式	142
第五节	孤立档的控制条件	146
第六节	非均布垂直荷载和水平荷载共同作用下架空线的计算	147
第七节	耐张绝缘子串的水平及垂直投影长度	149
第八节	孤立档架空线应力弧垂计算举例	151
练习题		159
<b>第九章</b>	<b>连续档架空线的应力和弧垂</b>	160
第一节	连续档架空线应力的近似计算——代表档距法	160
第二节	连续档架空线应力的精确计算	164
第三节	采用滑轮线夹时连续档架空线的有关计算	167
第四节	连续档架空地线的应力选配	176
第五节	连续倾斜档的架线观测弧垂及线长的调整	179
练习题		181
<b>第十章</b>	<b>架空线的断线张力和不平衡张力</b>	183
第一节	概述	183
第二节	固定横担固定线夹下单导线的断线张力	184
第三节	分裂导线的断线张力	189
第四节	线路正常运行中的不平衡张力	190
第五节	地线的支持力	191

练习题	193
<b>第十一章 架空线的振动和防振</b>	195
第一节 架空线的振动形式及其产生原因	195
第二节 微风振动的基本理论	198
第三节 微风振动强度的表示方法	202
第四节 用能量平衡原理估算振动幅值	204
第五节 影响微风振动的主要因素	205
第六节 微风振动的防振设计	208
练习题	215
<b>第十二章 路径选择和杆塔定位</b>	217
第一节 输电线路的路径选择	217
第二节 对地距离和交叉跨越的有关规定	222
第三节 杆塔定位	227
第四节 杆塔定位校验	234
第五节 杆塔中心位移及施工基面	245
练习题	247
<b>第十三章 计算机在输电线路设计中的应用</b>	248
第一节 数据库及其在线路设计中的应用	248
第二节 3S 技术及其在线路设计中的应用	251
第三节 输电线路计算机辅助设计	255
附录 A 常用架空导线和地线的规格和性能	265
附录 B 常用杆塔的结构型式和有关尺寸	279
附录 C 公路等级	286
附录 D 弱电线路等级	287
<b>参考文献</b>	288

# 第一章 绪 论

## 第一节 概 述

### 一、输电线路及其任务

输送电能的线路通称为电力线路。电力线路分为输电线路和配电线路。由发电厂向电力负荷中心输送电能的线路以及电力系统之间的联络线路称为输（送）电线路，架设于变电站（开关站）与变电站之间。由电力负荷中心向各个电力用户分配电能的线路称为配电线路。

发电厂发出的电能，通过升压变电站升压后，由输电线路输送到电力负荷中心附近，再通过降压变电站降压后，由配电线路传输到各电力用户的用电设备消耗掉。发电厂、输电线路、升降压变电站以及配电线路和用电设备构成了电力系统。其中，输电线路、升降压变电站和配电线路称为电力网。

目前我国火电和水电发电量合计约占全国发电量的 95%，火电仍基本依靠燃煤发电。而地球上的煤炭和水力等动力资源的分布是自然决定的，通常远离电力负荷中心。火力发电厂可以建在煤炭能源基地，也可以建在负荷中心附近，这取决于远距离输电经济还是运送燃料经济。一座 300 万 kW 的现代化燃煤发电厂，其年耗标准煤约 800 万 t，这么多原煤燃烧必会产生一定程度的污染，而负荷中心往往人口密集。因此从技术上、经济上和环境污染等方面比较，现代化的大型火电厂宜建在煤炭能源基地。水力发电厂则只能建在水力资源处。这些电厂发出的电能通过输电线路向负荷中心输送。

电能的生产和消费须在同一时间内完成，必须时刻保持平衡。发电能力需要满足高峰用电需求。为了减少系统的备用容量，错开高峰负荷，实现跨区域跨流域调节，增强系统的稳定性，提高抗冲击负荷的能力，在电力系统之间采用高压输电线路进行联络（联网）。电力系统联网，既提高了系统的安全性、可靠性和稳定性，又可实现经济调度，使各种能源得到充分利用。起系统联络作用的输电线路，可进行电能的双向输送，实现系统间的电能交换和调节。

因此，输电线路的任务就是输送电能，并联络各发电厂、变电站使之并列运行，实现电力系统联网。

### 二、输电线路的分类

(1) 按电压等级，输电线路分为高压、超高压和特高压线路。35~220kV 的线路为高压 (HV) 线路，330~750kV 的线路为超高压 (EHV) 线路，750kV 以上的是特高压 (UHV) 线路。一般地，输送电能容量越大，线路采用的电压等级就越高。相邻的电压等级通常相差 2~3 倍。根据 GB/T 156—2007《标准电压》，我国交流输电线路的电压等级有 35、66、110、220、330、500、750kV 和 1000kV。

(2) 按架设方式，输电线路分为架空线路和电缆线路。架空线路由于结构简单、施工简便、建设费用低、施工周期短、检修维护方便、技术要求较低等优点，得到广泛的使用。但是架空线路设备长期露置在大自然环境中，易受各种气象条件（如大风、覆冰、气温变化、雷击等）的侵袭、化学气体的腐蚀以及外力的破坏，出现故障的几率较高。电缆线路受外界

环境因素的影响小,但需用特殊加工的电力电缆,费用高,施工及运行检修的技术要求高,目前仅用于城市居民稠密区和跨海输电等特殊情况。

(3) 按电流性质,输电线路分为交流线路和直流线路。最常见的是三相交流线路。在输电线路的送端,交流电经换流站内的换流变压器送到整流器,将高压交流电变为高压直流电后送入直流输电线路;直流电通过输电线路送到受端换流站内的逆变器,将高压直流电又变为高压交流电,再经过换流变压器将电能输送到交流系统。与交流线路相比,在输送相同功率的情况下,直流线路需要的投资较少,主要材料消耗低,线路的走廊宽度也较小;作为两个电网的联络线,改变传送方向迅速方便,可以实现相同频率甚至不同频率交流系统之间的不同步联系,能降低主干线及电网间的短路电流。通常,±600kV 及以下电压等级的线路称为高压直流(HVDC)输电线路,±600kV 以上电压等级的线路称为特高压直流(UHVDC)输电线路。按 GB/T 156—2007《标准电压》的规定,我国高压及以上直流输电线路的电压为±500、±800kV。

(4) 按杆塔上的回路数,输电线路分为单回路、双回路和多回路线路。除架空地线外,单回路杆塔上仅有一回三相导线,双回路杆塔上有两回三相导线,多回路杆塔上有三回及以上的三相导线。

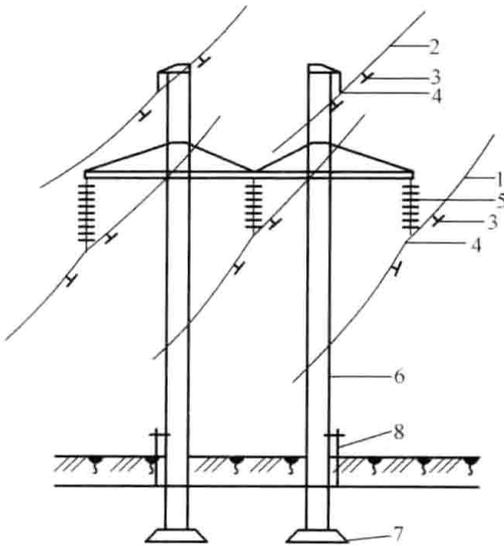


图 1-1 架空输电线路的组成

- 1—导线; 2—地线; 3—防振锤; 4—线夹;  
5—绝缘子(串); 6—杆塔;  
7—基础; 8—接地装置

(5) 按相导线之间的距离,输电线路分为常规型线路和紧凑型线路。紧凑型输电线路是与常规型线路相比较而提出来的。在保证安全运行的前提下,紧凑型线路尽量缩小相间距离,增加相导线的分裂数和间距,优化导线排列,可大幅度提高线路的自然输送功率。

本书重点论述常规型架空交流输电线路设计的有关问题。

### 三、架空输电线路的组成

架空输电线路主要由导线、地线、绝缘子(串)、线路金具、杆塔和拉线、基础以及接地装置等部分组成,如图 1-1 所示。

#### 1. 导线

导线用以传导电流,输送电能。它通过绝缘子串悬挂在杆塔上。导线常年在大气中运行,长期受风、冰、雪和温度变化等气象条件的影响,承受着

变化拉力的作用,同时还受到空气中污物的侵蚀,因此除应具有良好的导电性能外,还必须要有足够的机械强度和防腐性能,并要质轻价廉。

#### 2. 地线

地线的全称为架空地线,又称避雷线,是悬挂在导线上方的一根或两根金属线。它的主要作用是防止雷电直击导线,同时在雷击杆塔时起分流作用,对导线起耦合和屏蔽作用,降低导线上的感应过电压。

#### 3. 绝缘子(串)

绝缘子(串)用来支持或悬挂导线和地线,保证导线与杆塔间不发生闪络,保证地线与

杆塔间的绝缘。绝缘子长期暴露在自然环境中，经受风、雨、冰、霜及气温突变等恶劣气候的考验，有时还受有害气体的污染，因此绝缘子必须具有足够的电气绝缘强度和机械强度，还应具有一定的抗污能力，并应定期检修。

#### 4. 线路金具

线路金具是输电线路所用金属部件（除杆塔外）的总称。线路金具种类繁多，用途各异，常用的有线夹、接续金具、连接金具、保护金具以及拉线金具等。线路金具通常承受较大的荷载，需要有足够的强度。与导线相连的金具，还必须具有良好的电气性能。金具质量的好坏，使用和安装是否正确，对安全输电有很大的影响。在设计线路时，应尽量选择标准金具。

#### 5. 杆塔和拉线

杆塔用来支持导线、地线及其他附件，使导线以及地线之间彼此保持一定的安全距离，并保证导线对地面、交叉跨越物或其他建筑物等具有允许的安全距离。目前常用的杆塔有钢筋混凝土杆塔和铁塔两种。在线路总投资中，杆塔部分约占40%，因此设计时应尽量做到结构简单、材料消耗量少、机械强度高、便于施工安装和维护。

拉线用来平衡杆塔的横向荷载和导线张力，减少杆塔根部的弯矩。使用拉线可减少杆塔材料的消耗量，降低线路的造价。

#### 6. 杆塔基础

杆塔基础的作用是支承杆塔，传递杆塔所受荷载至大地。杆塔基础的型式很多，应根据所用杆塔的型式、沿线地形、工程地质、水文和施工运输等条件综合考虑确定。

#### 7. 接地装置

接地装置的作用是导泄雷电流入地，保证线路具有一定的耐雷水平。

## 第二节 输电技术与输电线路的发展

### 一、发展历史与现状

人们最早应用的是直流电，主要用于照明。1882年爱迪生（Edison）建立了第一座商业化发电厂和直流电力网，能发660kW的电力。随后，社会对电力的需求急剧增大。由于对用户的电压不能太高，因此要输送一定的功率，就要加大电流。而电流愈大，输电线路发热就愈厉害，损失的功率就愈多，同样损失在输电导线上的电压也大，离发电厂愈远的用户得到的电压也就愈低。直流输电的弊端，限制了电力的应用。

为了减少输电的电能损失，只能提高电压。在发电端将电压升高，到用户端再把电压降下来，达到低损耗情况下的远距离送电。而直流输电改变电压困难，只有采用交流输电。1882年前后，英国的费朗蒂（Ferranti）改进了交流发电机，提出了交流高压输电的概念。1888年，伦敦泰晤士河畔的大型发电厂开始交流输电。1889年，俄国的多利沃—多布罗沃利斯基（Dolivo-Dobrovolsky）制成第一台三相交流发电机。1891年德国劳芬电厂安装了第一台三相100kW交流发电机，通过第一条三相交流输电线路送电到法兰克福，线路总长175km，电压为15.2kV。

自发明三相交流输电以来，输电技术朝着高电压、大容量、远距离的目标不断进步。1952年瑞典首先建立了380kV输电线路，采用双分裂，距离960km。1956年前苏联建成

400kV 输电线路, 1964 年美国建成 500kV 输电线路, 1965 年加拿大建成 765kV 输电线路。20 世纪 70 年代, 欧、美各国对交流 1000kV 级特高压输电技术进行了大量研究, 1985 年苏联建成第一条 1150kV 工业性线路, 日本也在 20 世纪 90 年代初建成 1000kV 线路。

在交流超高压输电技术发展的同时, 高压直流输电技术也进入了工程实用阶段。1962 年前苏联建成  $\pm 400\text{kV}$  工业性试验线路, 随后又建设  $\pm 750\text{kV}$  长距离直流线路; 1970 年美国第一条  $\pm 400\text{kV}$  直流线路建成, 1985 年升压到  $\pm 500\text{kV}$ ; 加拿大于 1990 年建成 750kV 级直流线路并向美国延伸。巴西伊泰普水电站用  $\pm 600\text{kV}$  直流线路送出电能。欧洲、非洲、日本、印度、新西兰等地区 and 国家的直流线路也相继投入运行。

此外, 高自然功率的紧凑型线路以及灵活交流输电等多种多样输电新技术的研究也取得很大进展, 有的已进入工程实践。

在我国, 1882 年上海建设了一条低压输电线路。1936 年出现了万伏电压以上的输电线路, 电网初步形成。1937 年日本帝国主义侵略我国, 刚刚发育的我国电网遭受了严重破坏。新中国成立后, 我国电网建设进入了一个统一有序的发展阶段。1952 年自主建设了 110kV 输电线路, 逐步形成了京津唐 110kV 输电网。1954 年建成了吉林丰满水电站至辽宁抚顺李石寨变电站的 220kV 输电线路, 全长 369km。1972 年建成第一条 330kV 刘家峡水电站至关中的超高压线路, 全长 534km。随后 330kV 线路延伸到陕甘宁青 4 个省区, 形成西北跨省联合电网。1981 年第一条 500kV 输电线路——平 (平顶山) 武 (武昌) 线投入运行, 该线路全长 595km, 启动了我国跨省、超高压电网建设的进程。2005 年 9 月, 由青海官亭至甘肃兰州东的“西北 750kV 输变电示范工程”投入运行, 该线路是我国第一条世界上海拔最高的输电线路。2009 年 1 月 6 日, “1000kV 交流特高压试验示范工程”晋东南—南阳—荆门输电线路工程正式投入运行, 该工程起自晋东南 1000kV 变电站, 经南阳 1000kV 开关站, 止于荆门 1000kV 变电站, 全长约 654km。我国成为当今世界商业化交流输电电压等级最高的国家。

1987 年我国自主设计、设备全部国产化的  $\pm 100\text{kV}$  舟山直流输电工程建成。1989 年 9 月我国首条  $\pm 500\text{kV}$  直流输电线路——葛 (葛洲坝) 上 (上海) 线单极建成投运, 1990 年实现双极运行, 该线路长 1045km, 双极容量 120 万 kW, 实现了华中—华东电网的区域直流联网, 拉开了我国跨大区联网的序幕。2009 年 12 月云南—广东  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流输电工程单极投运, 2010 年 6 月实现双极运行, 线路长 1500km, 输电容量达 500 万 kW。2011 年 12 月 9 日, 世界最高海拔、高寒地区建设规模最大、施工难度最大的输变电工程——柴达木至拉萨  $\pm 400\text{kV}$  直流输电工程投入试运行, 线路长 1038km, 输送容量 120 万 kW。我国目前是当今世界直流输电电压等级最高的国家。

1990 年以前, 我国主要以 220kV 为地区骨干网架; 2000 年以后, 除西北等电网外, 基本以 500kV 为各省主网架。同时, 交直流 500kV 线路成为跨省区输电的重要线路。

自 20 世纪 90 年代初起, 我国开始研究并陆续建成了一些紧凑型输电线路。北京安定至河北廊坊的 220kV 紧凑型输电线路, 是我国第一条紧凑型输电线路, 全长 23.6km, 1994 年建成投运。北京昌平至房山的 500kV 紧凑型输电线路, 全长 83km, 1999 年建成投运。2004 年 4 月 26 日江苏政平—宜兴 500kV 同塔双回紧凑型线路建成投运。

同塔多回路技术也已得到普遍应用。德国在其高压和超高压线路中, 同塔四回为常规型线路。日本东京电力公司 110kV 及以上的线路多数为同塔四回, 最多回路数为同塔并架八

回。国内第一条同塔多回线路建于 1990 年，为蓟门—清河的 220、110kV 各二回的同塔四回线路。2007 年江苏利港电厂至梅里输电线路建成，为世界首条 500kV 同塔四回输电线路；同年，全国第一基同塔六回钢管塔（ $4 \times 220\text{kV} + 2 \times 110\text{kV}$ ）成功通过了测试。

除台湾地区外，目前全国已形成东北、华北、华东、华中、西北、南方、西藏等 7 个区域电网，实现了华中电网与华北、华东、西北、南方电网互联，华北电网与东北电网互联，西北电网与西藏电网互联。

## 二、发展趋势

### 1. 特高压交流输电

我国能源和电力负荷分布极不均衡，西部水力和煤炭资源丰富，用电则大多集中在东南沿海，客观上需要远距离、大容量、跨区域输电，大规模、大范围优化配置资源，“西电东送、南北互供”是必然选择。特高压交流输电具有以下优点：

(1) 输送容量大。输电线路的输电能力与电压的平方成正比，1000kV 特高压交流线路的自然输送功率是 500kV 超高压交流线路的 4~5 倍；在采用同型杆塔条件下，单位走廊宽度输送容量约为 500kV 超高压交流线路的 2.5 倍。

(2) 线路损耗小。输送相同功率时，电压越高、电流越小，线路的损耗就小。在导线总截面积和输送容量相同的情况下，1000kV 线路的电阻损耗约是 500kV 线路的 1/4。

(3) 稳定性好。输电电压越高，从电源侧发电机端看去，电路的阻抗就越小，在输电系统中，输电线路和发电机之间同步运行的稳定性就越高。

(4) 经济指标高。输送容量在 1000 万~1500 万 kW，输送距离 2000km 以上，用特高压输电比超高压输电要经济。当需要输送容量 1000 万 kW，采用 500kV 超高压输电需约 10 回线路，投资估计 370 亿元；而采用 1000kV 特高压输电时，仅需二回线路，投资估计 240 亿元。

我国发展 1000kV 特高压交流输电，主要定位于更高一级电压等级的国家骨干网架建设和跨大区域的联网。

### 2. 特高压直流输电

直流输电与交流输电相比，具有以下特点：

(1) 输送相同功率时，线路造价低。直流输电采用两线制，与采用三线制三相交流输电相比，在输送同样功率时，考虑到趋肤效应和各种损耗，直流输电所用的线材几乎只有交流输电的一半。另外，直流输电的杆塔结构比同容量的三相交流输电简单，线路走廊占地面积也少，这些减少了大量的运输、安装费。即使换流站的建设费用比变电站要高，在超过一定距离后，直流输电的整体造价还是更经济。直流输电线路与交流输电线路的总投资与线路距离的关系如图 1-2 所示。

(2) 没有电容电流产生，线路损耗小。在一些特殊场合，必须用电缆输电，例如城市中心地带采用地下电缆，海岛输电要用海底电缆。由于电缆芯线与大地之间构成同轴电容器，在交流高压输电线路中，空载电容电流极为可观；在直流输电线路中，由于电压波动很小，基本上没有电容电流加在电缆上。

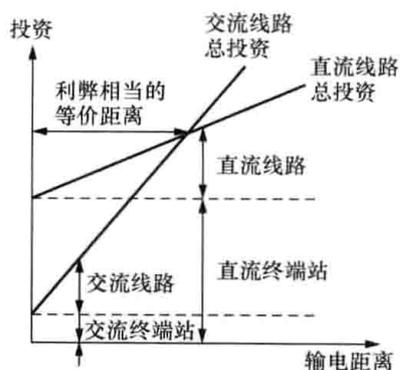


图 1-2 直流输电线路与交流输电线路的总投资与线路距离的关系

(3) 可实现不同频率交流系统之间的不同步联系, 系统更稳定。远距离交流输电时, 电流在交流输电系统的两端会产生显著的相位差。并网的各系统交流电的频率虽然规定统一为 50Hz, 但实际上常产生波动。这两种因素引起交流系统需要用复杂庞大的补偿系统和综合性很强的技术, 保证其同步运行, 否则就可能在设备中形成强大的循环电流, 损坏设备或造成不同步运行的停电事故。而直流输电线路互连时, 两端的交流电网可以用各自的频率和相位运行, 不需进行同步调整。

(4) 输送功率调节方便, 能限制系统的短路电流。两个交流系统用交流线路互连, 当一侧系统发生短路时, 另一侧要向故障一侧输送短路电流, 有可能超过原有断路器的遮断容量, 这就要求更换大容量的设备, 增加大量的投资。若用直流输电将两个交流系统互连, 由于采用可控硅装置, 电路功率能迅速、方便地进行调节。直流输电线路向发生短路的交流系统输送的短路电流不大, 故障侧交流系统的短路电流与没有互连时几乎一样。

(5) 输电可靠性更高。在直流输电线路中, 各极是独立调节和工作的, 彼此没有影响。所以, 当一极发生故障时, 只需停运故障极, 另一极仍可输送不少于一半功率的电能。利用该特点, 直流输电线路可安排分期建设。而在交流输电线路中, 任一相发生永久性故障, 必须全线停电。

(6) 直流换流站比交流变电站的设备多、结构复杂、造价高、损耗大、运行费用高。

(7) 直流输电工程在单极大地回路方式下运行时, 入地电流会对附近的地下金属体造成一定腐蚀, 窜入交流变压器的直流电流会使变压器噪声增加。

(8) 直流输电线路的污秽比交流输电线路严重, 变压不方便, 换流器在整流和逆变过程中的谐波较大。

(9) 若要实现多端输电, 技术比较复杂。

高压直流输电具有线路输电能力强、损耗小、两侧交流系统不需同步运行、发生故障时对电网造成的损失小等优点, 特别适合用于长距离点对点大功率输电, 而采用交流输电便于向多端输电。交流与直流输电配合, 将是现代电力传输系统的发展趋势。

### 3. 紧凑型输电

紧凑型输电是通过对导线的优化排列, 缩小相间距离, 增加相分裂根数, 降低电抗和增大电容, 减少波阻抗, 大幅度提高自然输送功率, 有效压缩线路走廊的一项输电技术。

紧凑型输电线路主要具有如下特点:

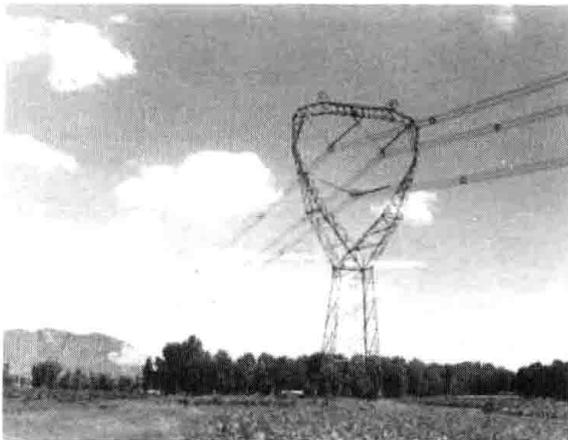


图 1-3 昌房 500kV 紧凑型输电线路

(1) 结构紧凑, 线路走廊占地少。紧凑型输电线路, 为减小波阻抗, 相间距离大幅缩小; 采用封闭式铁塔, 杆塔尺寸缩小; 为限制导线风偏, 多采用“V”形绝缘子串悬挂导线, 必要时使用相间绝缘间隔棒。这些使得线路结构紧凑, 走廊减小, 减轻了对环境的影响和污染。如昌房(北京昌平—房山) 500kV 紧凑型输电线路(见图 1-3), 线路走廊比常规线路缩小约 18m。在线路走廊紧张的地区, 紧凑型输电线路具有无比的优越性。

(2) 自然输送功率增大。输电线路相间距离

的减小对线路波阻抗和自然功率有明显的影响。当大幅度减小相间距离,改变传统布置为紧凑布置时,线路波阻抗明显降低,导线的表面强度、电荷分布趋向均匀一致,最大工作场强可尽量接近允许场强,自然输送功率大幅度提高。如 220kV 安廊线(北京安定—河北廊坊大屯)自然输送功率比常规型线路提高了 60%,500kV 昌房线自然输送功率比常规型线路提高 34.4%。

(3) 综合成本低。紧凑型线路虽因采用 V 形绝缘子串、相间绝缘间隔棒以及特殊型式的杆塔等,使投资增大,但由于线路走廊窄降低了占地费用,自然输送功率大充分发挥了输送能力,从而使得线路的综合成本降低。与常规型线路相比,500kV 昌房线紧凑型线路的输送单位自然功率造价降低约 21.2%,220kV 安廊线紧凑型线路降低约 29.6%。因此在长距离输电工程中,紧凑型输电线路可取得更大的经济效益。

(4) 导线表面平均场强高,电晕损失、无线电干扰较大。与常规型线路相比,紧凑型线路电晕损失高 1.7~3.8 倍,大雨下无线电干扰水平高 1~10dB 左右。

(5) 带电作业的要求提高。紧凑型线路由于结构紧凑,相间距离较小,带电作业必须详尽考虑杆塔的结构,分析带电作业间距,并提出更高的带电作业要求。

紧凑型与常规型输电线路的自然输送功率和走廊宽度的比较见表 1-1。

表 1-1 紧凑型与常规型输电线路的自然输送功率和走廊宽度的比较

电压等级 (kV)	常规型输电线路		紧凑型输电线路	
	功率 (MW)	走廊宽度 (m)	功率 (MW)	走廊宽度 (m)
220	180 (100%)	26~38	300 (167%)	17~29
330	370 (100%)	38~45	550 (149%)	24~33
500	1000 (100%)	45~60	1370 (137%)	28~43

#### 4. 多回路输电

多回路输电将多条线路共架在同一个铁塔上,以提高单位线路走廊的输送能力。在电厂出线端、换流站或变电站出入端以及线路走廊狭窄、土地有限等情况下,不同送电方向或者不同电压等级线路局部采用同一通道架设的同塔多回路输电,是解决线路走廊问题的有效技术。多回路输电线路设计主要解决以下问题:

(1) 导线的布置形式。导线的布置可采用水平、垂直和三角排列,杆塔的横担可以是 3 层、4 层和 6 层等,回路间可以是同相序、逆相序或异相序布置。与单回线路相比,同塔多回线路下的电磁场强度、无线电干扰、噪声等都有所增大。提高杆塔的高度虽然可以降低地面附近的电磁场强度和噪声,但会导致耐雷水平的下降。同塔多回线路的导线间距较小,相互之间的电磁和静电耦合较强,会使线路参数的不对称加大,造成线路的不平衡电流增大。因此,应综合考虑电压等级、回路数量、所处地理环境、气象条件的情况,对各种导线布置形式和相序排列方式,进行工频电磁场、无线电干扰、噪声、不平衡电流等的计算分析,通过比较确定最优导线布置形式。

(2) 耐雷水平和防雷措施。同塔多回线路的杆塔高,雷击的可能性增大。若遭雷击后多回线路同时跳闸,则后果更严重,因此应提高同塔多回路的耐雷水平。在进行塔头布置时,尽可能减少横担层数,降低塔高,减少雷击次数;减小地线保护角,降低绕击率;考虑加挂耦合地线、加装消雷器等防雷措施;采用平衡高绝缘,提高总体耐雷水平;同层横担不同回

路导线, 采用不同类型绝缘子(串), 即采用差异化绝缘, 降低同时跳闸率。

(3) 塔型规划与设计。多回路铁塔导线根数多, 所受荷载大; 导线截面、电压等级的不同组合, 其荷载差异也很大, 使铁塔在选型、断面选择、节点构造等方面的难度加大。通常多回路铁塔主材用单角钢已不能满足要求, 需采用拼合角钢(双拼或四拼)或钢管。钢管断面中心轴对称, 风阻系数较小, 使得多回路钢管塔的应用越来越广。

### 5. 灵活交流输电

灵活交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)又称柔性交流输电, 是基于电力电子技术, 对交流输电系统实施灵活、快速调节控制的交流输电方式。它由美国 N. G. Hingorani 于 1986 年提出, 是现代电力电子技术与电力系统相结合的产物。其主要思想是: 采用具有单独或综合功能的电力电子装置, 对输电系统的主要参数(如电压、相位差、电抗等)进行灵活快速的适时控制, 以期实现较大范围地控制潮流, 使输送功率合理分配; 保证输电容量接近输电线路的热稳定极限, 在控制区域内传输更多的功率, 减少发电机的热备用; 依靠限制短路和设备故障的影响来防止线路串级跳闸, 阻尼电力系统振荡, 大幅度提高系统的稳定性和可靠性; 降低功率损耗和发电成本。目前已成功应用或正在研发的 FACTS 装置有十几种, 主要是:

(1) 静止无功补偿器(SVC)。SVC 使用晶闸管, 快速调整并联电抗器的大小及投切电容器组, 维护系统电压水平, 消除电压闪变、平息系统振荡等。SVC 可以静态或动态地使电压保持在一定范围内, 从而提高电力系统的稳定性。

(2) 静止调相器(Statcon)。Statcon 由三相逆变器构成, 整个装置的无功功率大小或极性均由通过它的电流来调整, 其整体功能类似于同步调相机, 可视为 SVC 的改进装置。但其调节无功的能力比 SVC 强, 因为 Statcon 的输出无功取决于输出端的电流和电压乘积, 而 SVC 的无功量由电压平方除以阻抗决定。因此, 在发生事故、电压降低的情况下, Statcon 比 SVC 可提供更大的无功支持能力, 具有一定的事故过载能力。

(3) 超导蓄能器(SMES)。SMES 由电力电子器件(SCR 或 GTO 等)控制的一个大容量超导蓄能线圈组成, 放电/充电的效率在 95% 以上, 造价昂贵。作为蓄能器, SMES 可快速提供几秒的备用电力, 瞬时产生同步或阻尼功率以提高输电的静态和暂态稳定性, 提高远距离输电的输送能力, 延长发电设备寿命, 提供无功功率以改进电压稳定性, 提高电压质量等。

(4) 固态断路器(SSCB)。采用晶闸管型的断路器, 只能在交流第一次过零时断开, 其开断延时将达几毫秒。如果采用电力电子元件的固态断路器, 则电流可瞬时被切断, 效果将大为提高。美国生产的 SSCB 样机, 已达到 15kV、600A, 可在  $4\mu\text{s}$  内完成开断。

(5) 可控串联电容补偿(TCSC)。TCSC 具有潮流控制、阻尼线路功率振荡、提高暂态稳定性、抑制次同步振荡等功能。TCSC 可以连续改变线路电抗, 因此可用来进行潮流控制, 改变电网中的潮流分布。由于系统阻尼不足或由于系统大扰动引起低频功率振荡时, TCSC 可以阻尼线路功率振荡。在系统受到大的冲击时, TCSC 可迅速调整晶闸管的触发角, 改变串联电容的补偿度, 提高系统的暂态稳定性。当系统发生次同步振荡(SSR)时, TCSC 可迅速调整串联电容器容抗至最小值, 呈现出感抗, 从而对 SSR 起到很强的阻尼作用。

随着电力电子技术的飞速发展, 灵活交流输电技术的发展前景不可估量。

### 6. 分频输电

分频输电系统(fractional frequency transmission system, FFTS)利用较低的频率(如

50/3 Hz) 传输电能, 可提高系统输送能力。众所周知, 交流输电系统的输送功率与电压的平方成正比, 与系统的电抗成反比; 系统的电抗与频率成正比。FFTS 是西安交通大学 1994 年针对水电的远距离输送提出的。由于水电机组转速很低, 适合发出频率较低的电能, 而输送低频电能时, 其线路阻抗与频率成比例地下降, 可大幅度提高线路输送容量。FFTS 的关键问题是大容量变频技术。分析研究表明, FFTS 具有以下特点:

(1) 提高输电容量。频率降低为工频的  $1/3$  时, 输电线路的输送容量大致可提高 3 倍, 接近输电线路的热极限, 从而可充分发挥线路的输能作用。常规 500kV 交流系统在距离为 1000km 时, 输送功率不超过 800MW, 而同样条件下 FFTS 的输送功率可达 1800MW。

(2) 长距离输送电能时, 有明显的经济效益。对 500kV 电压水平, 当输送距离大于 650km 时, 与常规交流输电系统相比, 分频输电的经济效益好。

分频输电的结构简单, 效益显著, 在成倍提高线路输送能力的同时, 还可显著提高系统的稳定运行水平, 减少电压波动和无功补偿容量。

(3) 运行性能指标好。降低频率, 对于输电系统的各项运行指标如末端空载电压、末端补偿容量、压波动率等有显著改善, 系统的暂态稳定性提高。

(4) 更适合于水电、风电等可再生能源发电的输送。由于水电、风电等发电机组的转速较低, 发出的电力频率较低, 采用分频输电, 可使发电机组及其输电系统都能运行在各自较合理的频率下, 提高整个电力系统的运行指标, 获得较大的经济效益。我国水力资源十分丰富, 大多集中在中西部地区, 而电力负荷多在东部沿海, 输电距离一般都达到 1000~2500km, 因此分频输电的研究对我国更具有现实意义。

### 第三节 架空输电线路设计的一般内容和步骤

架空输电线路设计一般分为初步设计和施工图设计两个阶段。大型或复杂地区的线路设计, 还要作工程可行性设计。简单或小型的线路设计, 可将初步设计简化为设计原则报告或设计纲要。

#### 一、初步设计

在初步设计阶段, 着重对线路路径方案进行综合技术经济比较, 取得有关协议, 选择最佳的路径方案; 充分论证导线和地线、绝缘配合及防雷设计的正确性, 确定各种电气距离; 认真选择杆塔及其基础形式; 合理地进行通信保护设计; 对于严重污秽区, 大风和重冰地区, 不良地质和洪水危害地段, 特殊大跨越设计等, 要进行专题调查研究, 提出专题报告; 根据工程的特点及设计的实际情况, 列出新技术的科研专题。从实际出发, 积极慎重地采用新技术。初步设计需编写初步设计书并附有关图纸, 编写设备材料清册, 编写施工组织设计, 编写概算书, 因此常分为相应的四卷。

初步设计书一般分为总论、电力系统、线路路径、气象条件、机电、杆塔和基础、对通信线路的影响和保护、线路的通信维护、线路的运行维护、附图、附件等。有大跨越时, 应作为单独部分提出。总论部分的主要内容包括设计依据、设计规模与范围、建设单位及期限、主要经济和耗材指标; 电力系统部分主要包括线路在电力系统中的地位 and 作用, 输送容量和导线截面, 限制工频过电压和潜供电流的措施, 变电站进出线; 线路路径部分主要是路径方案的比较分析; 气象条件部分主要是气象资料的分析 and 取值, 气象条件的汇总; 机电部

分主要包括导地线及其绝缘, 防振措施, 绝缘配合和防雷接地, 导地线换位, 绝缘子串及组装图, 对地和交叉跨越距离, 无线电干扰及防治措施等; 杆塔和基础部分主要包括杆塔形式和选择原则, 杆塔使用条件, 基础形式及设计原则和选用; 对通信线路的影响和保护部分主要是通信保护的设计原则及依据, 危险影响计算和保护措施, 干扰影响计算和保护措施等; 线路的通信保护主要有通信方式的选择, 通信通道的组织以及主要设备的选择; 线路运行维护涉及运行机构和人员编制, 交通及运维工具器材; 初步设计的附图主要包括电力系统接线图, 路径图, 进出线平面图, 拥挤地段平面图, 大跨越的平、断面图, 导线机械特性曲线, 地线机械特性曲线, 绝缘子串及金具组装图, 全线杆塔一览图, 全线基础一览图, 影响范围内通信保护平面位置图, 单相接地短路电流曲线等。大跨越部分包括跨越点的选择, 气象条件选取, 导地线的选择, 防振措施, 绝缘配合和防雷保护, 绝缘子串及金具, 跨越杆塔及基础, 跨越方案的优选等。

初步设计的流程大体上如图 1-4 所示, 但实际上不可避免地有一定的交叉、反复和充实的过程。

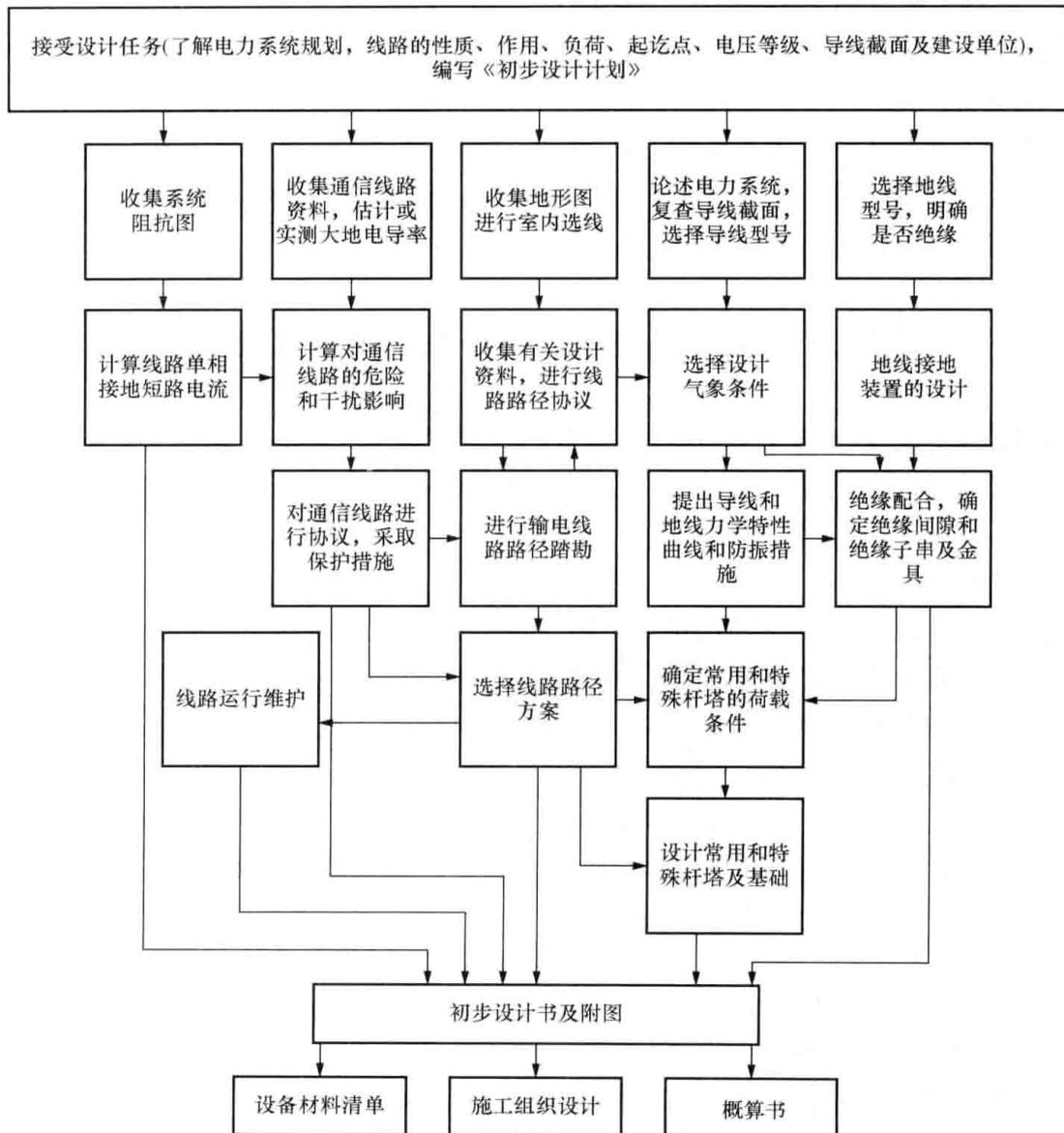


图 1-4 初步设计流程

## 二、施工图设计

施工图设计是按照初步设计原则和审核意见所作的具體设计，由施工图纸和施工说明书、计算书、地面标桩图等组成。施工图设计的主要内容包括施工图总说明书及附图、线路平断面图及杆塔位明细表、机电施工图及说明书、杆塔施工图及说明书、基础施工图及说明书、通信保护施工图及说明书、预算书、线路勘测、工程技术档案资料等。线路有大跨越时还应有大跨越设计施工图及说明书。

施工图总说明书主要包括施工图设计依据和设计范围，对初步设计审核意见的执行情况，列入科研计划的项目，工程技术性能，经济指标，主要设备材料汇总表，设计说明书及卷册目录，线路勘测成果目录，以及文件、会议纪要、协议等附件；线路路径图、全线杆塔一览图、全线基础一览图作为总说明书的附图。在线路平断面图及杆塔位明细表中，要有交叉跨越分图。机电施工图及说明书主要包括架线施工图及说明书、金具施工图及说明书、接地装置施工图及说明书。杆塔施工图及说明书主要包括杆塔施工说明、杆塔图纸说明、杆塔设计图纸等。基础施工图及说明书主要包括基础施工说明、基础图纸说明、基础设计图纸等。通信保护施工图及说明书主要包括设计原则和依据、计算结果及保护措施、通信保护设备材料表、通信保护施工图纸等。预算书主要包括预算编制说明、本体工程预算、辅助设施工程预算等。线路勘测主要包括线路测量、水文测量、地质测量等。施工图设计流程如图 1-5 所示。

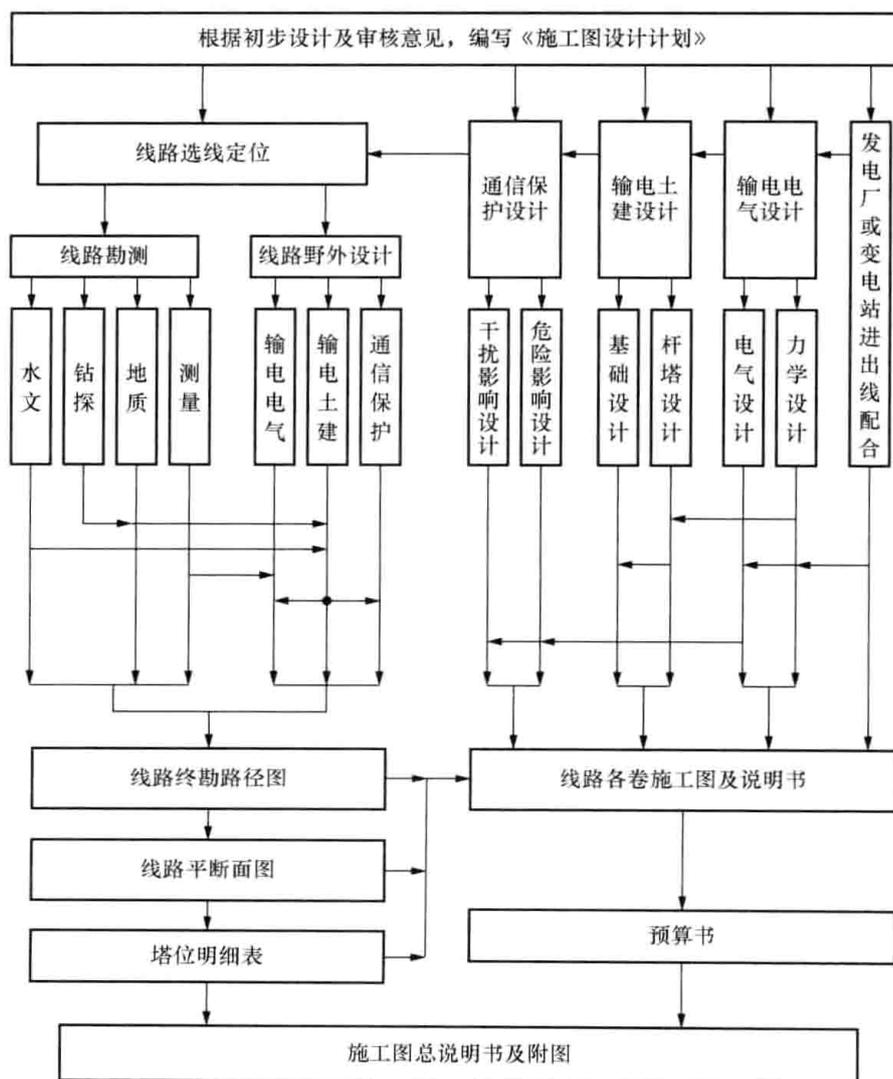


图 1-5 施工图设计流程

 练 习 题

1. 输电线路的任务是什么? 分哪几种电压等级?
2. 架空输电线路主要由哪几部分组成? 各部分有何作用?
3. 与常规交流输电线路相比, 高压直流输电线路主要有什么特点?
4. 与常规交流输电线路相比, 紧凑型输电线路主要有什么特点?
5. 试论述输电线路的发展趋势。
6. 架空输电线路设计一般分哪两个阶段? 主要内容是什么?

## 第二章 架空输电线路基本知识

### 第一节 导线和地线

导线和地线通称架空线。

#### 一、架空线的材料、种类和用途

##### 1. 常用架空线的材料

铜是理想的导线材料，其导电性能和机械强度均好，但价格较贵，除特殊需要外，输电线路一般不使用。

铝质轻价廉，导电性能仅次于铜，但机械强度较低，仅用于两相邻杆塔间水平距离（档距）较小的配电线路。此外，铝的抗腐蚀性也较差，不易在污秽区使用。

铝合金的导电性能与铝相近，机械强度接近铜，价格却比铜低，并具有较好的抗腐蚀性能，不足之处是铝合金受振动断股的现象比较严重，使其使用受到限制。随着断股问题的解决，铝合金已成为一种很有前途的导线材料。

钢具有较高的机械强度，且价格较低，但导电性能差。钢材料的架空线一般作为地线使用，作为导线使用仅用于跨越江河山谷的大档距及其他要求机械强度大的场合。为防腐蚀，钢线需要镀锌处理。

##### 2. 常用架空线的结构及型号规格

各种架空线的结构如图 2-1 所示。

目前输电线路中最常用的导线是钢芯铝绞线。钢芯铝绞线的内芯为单股或多股镀锌钢绞线，外层为单层或多层的铝绞线，如图 2-1 (b) 所示。由于交流电的集肤效应，四周电阻率较小的铝部截面主要起载流作用，机械荷载则主要由芯部的钢线承受，因此钢芯铝绞线既有较高的电导率，又有较好的机械强度。防腐型钢芯铝绞线是为了提高架空线的防腐性能，对部分或全部线股涂以防腐材料，可仅对钢芯施涂、对除外层外的所有线股施涂 [见图 2-1 (c)]、对除外层线股的外表面外均于施涂、对所有线股施涂。

扩径导线 [见图 2-1 (d)] 主要为增大导线外径，以减少线路的电晕和无线电干扰。

图 2-1 (e) 所示的自阻尼导线，其铝线层之间和铝线层与钢芯之间有 0.3~3mm 的间隙，铝线股呈拱形断面以保持层体与间隙的稳定。微风振动时，由于其各层的固有频率不同而产生动态干扰和层间的摩擦、碰击，消耗能量。其阻尼是一般绞线的 3~15 倍，可以不再采取其他抑制微风振动的防振措施，并可以提高导线的平均运行应力，常用于大跨越段。

超高压及以上输电线路中广泛采用了分裂导线。分裂导线使用普通型号的导线，安装间隔棒保持其间隔和形状，如图 2-1 (j) 所示。这相当于大大增加了导线的半径，其表面电位梯度小，临界电晕电压高，单位电抗小，导纳大，且无需专门制造。我国 220kV 和 330kV 线路多用二分裂导线，分裂间距 400mm；500kV 线路除个别大跨越外，均采用四分裂，分裂间距 450mm。

智能电网需要传输的信息量大，可以选用 OPGW 型光纤复合地线 [见图 2-1 (h)、(i)]，作为地线架设。

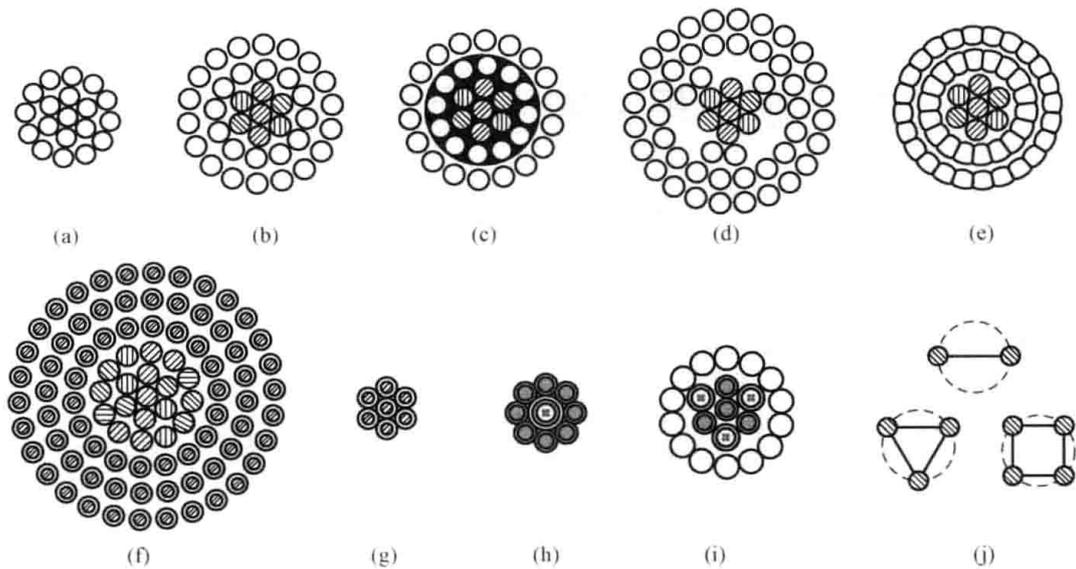


图 2-1 各种导线和地线的断面结构

- (a) 单一金属绞线; (b) 钢芯铝绞线; (c) 防腐钢芯铝绞线; (d) 扩径导线; (e) 自阻尼导线;  
 (f) 钢芯铝包钢绞线; (g) 铝包钢绞线; (h) OPGW 型光纤复合地线 (中心束管式);  
 (i) OPGW 型光纤复合地线 (层绞式); (j) 分裂导线

现行 GB/T 1179—2008《圆线同心绞架空导线》，等效于国际电工委员会的 IEC 61089: 1991。在该标准中，导线产品用型号、标称截面、绞合结构及本标准编号表示，之间用“-”相连。型号第一个字母均用 J，表示同心绞合；J 后面为组成导线的材料代号，单一材料为单线代号，组合材料为外层线（或外包线）和内层线（或线芯）的代号，二者用“/”分开；在型号尾部加防腐代号 F，表示导线采用涂防腐油结构。标称截面以相应导线材料的标称截面积表示，以  $\text{mm}^2$  为单位。绞合结构用构成导线的单线根数表示，单一导线直接用单线根数，组合导线采用前面为外层线根数，后面为内层线根数，中间用“/”分开。性能指标中的规格号，表示以  $\text{mm}^2$  为单位的相当于硬拉圆铝线的导电截面积。绞线常用的单线有硬铝线 (L)、高强度铝合金线 (LHA1、LHA2)、镀锌钢线 (G1A、G1B、G2A、G2B、G3A，其中 1、2、3 分别表示强度级别，A、B 分别表示普通、加厚镀层厚度)、铝包钢线 (LB1A、LB1B、LB2，其中 1、2 分别对应电导率 20.3% IACS、27% IACS，A、B 表示机械性能)。例如，JL/G1A-500/35-45/7 表示由 45 根硬铝线和 7 根 A 级镀层普通强度镀锌钢线绞制成的钢芯铝绞线，硬铝线的标称截面为  $500\text{mm}^2$ ，钢的标称截面为  $35\text{mm}^2$ ；JLHA1/G3A-500/65-54/7 表示由 54 根 1 型高强度铝合金线和 7 根 A 级镀层特高强度镀锌钢线绞制成的钢芯铝合金绞线，铝合金线的标称截面为  $500\text{mm}^2$ ，钢的标称截面为  $65\text{mm}^2$ ；JL/LB1A-485/60-54/7 表示由 54 根硬铝线和 7 根 20.3% IACS 电导率 A 级铝包钢线绞制成的铝包钢芯铝绞线，硬铝线的标称截面为  $485\text{mm}^2$ ，铝包钢的标称截面为  $60\text{mm}^2$ ；JG1A-250-19 表示由 19 根 A 级镀层普通强度镀锌钢线绞制成的镀锌钢绞线，钢的标称截面为  $250\text{mm}^2$ 。

在 YB/T 5004—2012《镀锌钢绞线》中，钢绞线按断面结构分为  $1\times 3$ 、 $1\times 7$ 、 $1\times 19$ 、 $1\times 37$  四种，按公称抗拉强度分为 1270、1370、1470、1570MPa 和 1670MPa 五级，按钢丝锌层级别分为 A、B、C 三级。结构  $1\times 7$ 、公称直径 9.0mm、抗拉强度 1670MPa、B 级锌层的钢绞线标记为  $1\times 7-9.0-1670-B-YB/T 5004-2012$ 。当对导线抗腐蚀性要求较高时，

可考虑使用稀土铝锌合金镀层钢绞线。

目前在架空输电线路中大量使用着按旧标准制造的架空线。在 GB 1179—1983《铝绞线及钢芯铝绞线》中，架空线的型号规格由材料、结构和标称载流面积三部分组成。材料和结构以汉语拼音的第一个字母大写表示，载流面积以  $\text{mm}^2$  为单位表示。如标称截面为  $120\text{mm}^2$  的铝绞线表示为 LJ-120；标称截面铝  $300\text{mm}^2$ 、钢  $50\text{mm}^2$  的钢芯铝绞线表示为 LGJ-300/50；标称截面铝  $150\text{mm}^2$ 、钢  $25\text{mm}^2$  的防腐型钢芯铝绞线则表示为 LGJF-150/25。根据 GB 9329—1988《铝合金绞线及钢芯铝合金绞线》，LH<sub>A</sub>J-400 表示标称截面为  $400\text{mm}^2$  的热处理铝镁硅合金绞线，LH<sub>B</sub>GJ-400/50 表示标称截面为铝合金  $400\text{mm}^2$ 、钢  $50\text{mm}^2$  的钢芯热处理铝镁硅稀土合金绞线。

在 GB 1179—1974 中，按铝钢截面比的不同，将钢芯铝绞线分为正常型 (LGJ)、加强型 (LGJJ) 和轻型 (LGJQ) 三种。

常用架空线的有关数据示于附录 A。

### 3. 常用架空线的用途及技术特性比较

常用架空线的用途及技术特性比较见表 2-1。

表 2-1 常用架空线的用途及技术特性比较

用途	类别	强度	载流量	防腐	允许运行温度	耐振能力	相同载流量单价
普通线路导线	铝合金绞线	一般	高	高	一般	一般	一般
	钢芯铝绞线	一般	较高	一般	一般	一般	一般
	防腐型钢芯铝绞线	一般	较高	高	一般	一般	一般
	铝包钢芯铝绞线	一般	较高	高	一般	一般	一般
	铝合金芯铝绞线	一般	高	高	一般	一般	一般
普通线路地线	钢绞线	高	—	一般	—	高	—
	OPGW 型光纤复合地线	较高	—	高	—	一般	—
大跨越导线	钢芯铝绞线 (大钢比)	较高	较高	一般	一般	一般	较高
	高强度钢芯铝合金绞线	高	较高	一般	一般	一般	高
	铝包钢芯铝合金绞线	高	较高	高	一般	一般	高
	防腐型高强度钢芯铝合金绞线	高	较高	高	一般	一般	高
	高强度钢芯耐热铝合金绞线	高	高	一般	高	一般	高
	防腐型高强度钢芯耐热铝合金绞线	高	高	高	高	一般	高
大跨越地线	铝包钢绞线 (高电导率)	高	一般	高	一般	一般	较高
	钢绞线	高	—	一般	—	高	—
	OPGW 型光纤复合地线	较高	—	高	—	一般	—
重覆冰线路	钢芯铝绞线 (中钢比)	较高	较高	一般	一般	一般	一般
	钢芯铝合金绞线	较高	较高	一般	一般	一般	较高

续表

用途	类别	强度	载流量	防腐	允许运行温度	耐振能力	相同载流量单价
重污染 线路	防腐型钢芯铝绞线	较高	较高	高	一般	一般	一般
	铝包钢芯铝绞线	一般	较高	高	一般	一般	一般
扩容改造 线路导线	铝合金绞线	一般	高	高	一般	一般	一般
	钢芯耐热铝合金绞线	一般	高	一般	高	一般	较高

## 二、导线截面的选择

导线截面和分裂方式的选择应从其电气性能和经济性能两方面考虑, 保证安全经济地输送电能。一般先按经济电流密度初选导线截面, 再按允许电压损失、发热、电晕等条件校验, 且满足可听噪声和无线电干扰指标的要求。大跨越的导线截面宜按允许载流量选择。

### 1. 按经济电流密度选择

输电线路的总投资可分为与导线截面无关和有关两类费用。勘测设计、房屋搬迁、青苗赔偿和土地征用等费用, 可看作与导线截面无关。导线截面越大, 价格越高, 杆塔及基础费用随之增大, 线路建设费用也就越高。线路的投资总费用可表示为

$$Z_1 = (F_0 + aA)L$$

式中  $F_0$ ——与导线截面无关的线路单位长度费用;

$a$ ——与导线截面相关的线路单位长度单位截面的费用;

$A$ ——导线的截面积;

$L$ ——线路长度。

线路的年运行费用包括检修维护费和管理费等, 可用占总投资的百分比  $b$  表示为

$$Z_2 = bZ_1 = b(F_0 + aA)L$$

若不考虑电晕损失, 线路的年电能损耗费用可用下式计算

$$Z_3 = 3I_{\max}^2 \tau C \frac{\rho L}{A}$$

式中  $\tau$ ——最大负荷损耗小时数, 可依据每年最大负荷利用小时数和功率因数, 查表 2-2 得到;

$I_{\max}$ ——线路输送的最大电流;

$C$ ——单位电价;

$\rho$ ——导线的电阻率。

表 2-2

年最大负荷损耗小时数

功率因数	年最大负荷利用小时数 ( $h$ )								
	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
0.8	2000	2350	2750	3150	3600	4100	4650	5250	5950
0.85	1800	2150	2600	3000	3500	4000	4600	5200	5900
0.9	1600	2000	2400	2900	3400	3950	4500	5100	5800
0.95	1400	1800	2200	2700	3200	3750	4350	5000	5700
1.0	1250	1000	2000	2500	3000	3600	4200	4850	5600

若投资回收年限为  $n$ ，则经济分析的年计算费用为

$$Z = \frac{Z_1}{n} + Z_2 + Z_3 = (1 + nb)(F_0 + aA) \frac{L}{n} + 3I_{\max}^2 \tau C \frac{\rho L}{A}$$

令  $\frac{\partial Z}{\partial A} = 0$ ，可得到导线的经济截面为

$$A_n = I_{\max} \sqrt{\frac{3n\rho\tau C}{a(1+nb)}} \quad (2-1)$$

经济电流密度为

$$J_n = \frac{I_{\max}}{A_n} = \sqrt{\frac{a(1+nb)}{3n\rho\tau C}} \quad (2-2)$$

我国 20 世纪 50 年代公布的经济电流密度列在表 2-3 中，可参考使用。得到经济电流密度后，导线的载流面积为

$$A_n = \frac{I_{\max}}{J_n} \quad (2-3)$$

利用式 (2-3) 计算时， $I_{\max}$  一般应根据 5~10 年的电力系统发展规划，进行必要的负荷预测和潮流计算确定。

表 2-3

经济电流密度值

单位：A/mm<sup>2</sup>

导线材料	年最大负荷利用小时数		
	3000h 以下	3000~5000h	5000h 以上
裸铜导线和母线	3.0	2.25	1.75
裸铝导线和母线	1.65	1.15	0.9

## 2. 按电压损耗校验

在不考虑线路电压损耗的横分量时，线路电压、输送功率、功率因数、电压损耗百分数、导线电阻率以及线路长度与导线截面的关系，可用式 (2-4) 表示，即

$$\delta = \frac{P_m L}{U_N^2} (R + X_0 \tan\varphi) \quad (2-4)$$

式中  $\delta$ ——线路允许的电压损耗百分比；

$P_m$ ——线路输送的最大功率，MW；

$U_N$ ——线路额定电压，kV；

$L$ ——线路长度，m；

$R$ ——单位长度导线电阻， $\Omega/m$ ；

$X_0$ ——单位长度线路电抗，可取  $0.4 \times 10^{-3} \Omega/m$ ；

$\tan\varphi$ ——负荷功率因数角的正切。

## 3. 按导线允许载流量校验

控制导线允许载流量的主要依据是导线的最高工作允许温度，该温度主要由导线长期运行后的强度损失和连接金具的发热而定。工作温度越高，运行时间越长，导线的强度损失越大，同时接头部位越易氧化而损坏。我国现行架空输电线路设计规范规定了校验导线允许载流量时的允许温度：对钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线宜采用  $70^\circ\text{C}$ ，必要时可采用  $80^\circ\text{C}$ ，大

跨越可采用 90℃；钢芯铝包钢绞线和铝包钢绞线可采用 80℃，大跨越可采用 100℃，也可由试验决定；镀锌钢绞线采用 125℃。

导线最高允许温度下的允许载流量可用式 (2-5) 计算，即

$$I = \sqrt{(W_R + W_F - W_S)/R_t} \quad (2-5)$$

式中  $I$ ——导线的允许载流量，A；

$W_R$ ——单位长度导线的辐射散热功率，W/m；

$W_F$ ——单位长度导线的对流散热功率，W/m；

$W_S$ ——单位长度导线的日照吸热功率，W/m；

$R_t$ ——允许温度  $t$  时单位长度导线的交流电阻， $\Omega/\text{m}$ 。

辐射散热功率  $W_R$  为

$$W_R = \pi d E_1 S_1 [(t + t_a + 273)^4 - (t_a + 273)^4] \quad (2-6)$$

式中  $d$ ——导线外径，m；

$E_1$ ——导线表面的辐射散热系数，光亮的新线取为 0.23~0.43，旧线或涂黑色防腐剂的线取为 0.90~0.95；

$S_1$ ——斯特凡-包尔茨曼常数，取  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ ；

$t$ ——导线表面的平均温升，℃；

$t_a$ ——环境温度，宜采用最高气温月的平均最高气温，℃。

对流散热功率  $W_F$  为

$$W_F = 0.57 \pi \lambda_i t R_e^{0.485} \quad (2-7)$$

式中  $\lambda_i$ ——导线表面空气层的传热系数， $\lambda_i = 2.42 \times 10^{-2} + 7(t_a + t/2) \times 10^{-5}$ ，W/(m·℃)；

$R_e$ ——空气的雷诺数， $R_e = vd/\nu$ ；

$V$ ——垂直于导线的风速，一般宜取 0.5m/s，大跨越因线路较高宜取 0.6m/s；

$\nu$ ——导线表面空气层的运动黏度， $\nu = 1.32 \times 10^{-5} + 9.6(t_a + t/2) \times 10^{-8}$ ， $\text{m}^2/\text{s}$ 。

日照吸热功率  $W_S$  为

$$W_S = a_s J_s d \quad (2-8)$$

式中  $a_s$ ——导线表面的吸热系数，光亮的新线取为 0.35~0.46，旧线或涂黑色防腐剂的线取为 0.9~0.95；

$J_s$ ——日光对导线的日照强度，当天晴、日光直射导线时，可采用  $1000 \text{ W/m}^2$ 。

#### 4. 按电晕条件校验

超高压及以上输电线路的导线表面电场强度很高，以至超过周围空气的击穿强度，在导线表面形成电晕放电。电晕可引起无线电干扰、可听噪声、导线振动等，还会产生有功功率损耗。导线的电晕随外加电压的升高而出现、加剧。导线表面开始发生局部放电时的电压，称为起始电晕电压。导线表面全面发生电晕时的电压，称为临界电晕电压，相应的电场强度称为临界电晕场强。导线的临界电晕场强，与其直径、表面状况及大气条件等有关。清洁绞线在晴天的临界电晕场强为

$$E_i = 3.03 m \delta^n \left( 1 + \frac{0.298}{\sqrt{r}} \right) \quad (\text{MV/m}) \quad (2-9)$$

式中  $m$ ——导线表面状况系数，表面洁净绞线取 0.966，伤痕且松股绞线取 0.81；

$\delta$ ——相对空气密度；

$n$ ——空气密度指数，一般可取 0.66~0.72；

$r$ ——导线半径，cm。

导线表面的实际电场强度，不宜大于临界电晕场强的 80%~85%。年平均电晕损失，不宜大于线路电阻有功损失的 20%。海拔不超过 1000m (1000kV 线路为 500m) 时，距离线路边导线地面投影外侧 20m 处，湿导线的可听噪声设计控制值不应大于 55dB (A)。

在海拔不超过 1000m 的地区，如导线直径不小于表 2-4 所列数值，一般不必验算电晕。

表 2-4 可不验算电晕的导线最小外径 (海拔不超过 1000m)

标称电压 (kV)	110	220	330			500			750		
导线外径 (mm)	9.60	21.60	33.60	2×21.60	3×17.10	2×36.24	3×26.82	4×21.60	4×36.90	5×30.20	6×25.50

### 三、地线

#### 1. 地线架设的一般规定

输电线路是否架设地线，应根据线路电压等级、负荷性质和系统运行方式，并结合当地已有线路的运行经验、地区雷电活动的强弱、地形地貌特点及土壤电阻率高低等决定。在计算耐雷水平后，通过技术经济比较，采用合理的防雷方式。

110kV 输电线路宜沿全线架设地线，在年平均雷暴日数不超过 15 日或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可不架设地线。无地线的输电线路，宜在变电站或发电厂的进线段架设 1~2km 的地线。220~330kV 输电线路应沿全线架设地线，在年平均雷暴日数超过 15 日的地区或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可架设单地线，山区宜采用双地线。500kV 及以上电压等级的输电线路，应沿全线架设双地线。

杆塔上地线和边导线所在平面与地线所在垂直平面之间形成的夹角，称为保护角，如图 2-2 所示。对于单回路，330kV 及以下线路的保护角不宜大于 15°，500~750kV 线路的保护角不宜大于 10°；1000kV 线路的保护角平原丘陵地区不宜大于 6°，山区不宜大于 4°。对于同塔双回或多回路，110kV 线路的保护角不宜大于 10°，220~750kV 线路的保护角不宜大于 0°；1000kV 线路的保护角平原丘陵地区不宜大于 3°，山区不宜大于 5°。重覆冰线路的保护角可适当加大。

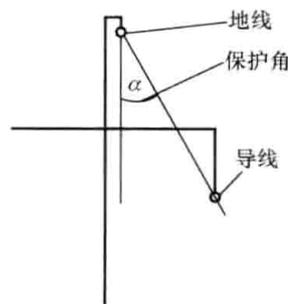


图 2-2 杆塔上的保护角

杆塔上两根地线之间的距离，不应超过地线与导线间垂直距离的 5 倍。

在气温 15°C、无风无冰的气象条件下，档距中央导线与地线之间的距离  $D$  应满足

$$D \geq 0.012l + 1 \quad (\text{m}) \quad (2-10)$$

式中  $l$ ——档距，m。

#### 2. 地线的绝缘

当地线仅用于防雷时，可逐基杆塔接地，以提高防雷的可靠性。但逐基杆塔接地会产生较大的附加电能损失，如一条长 200~300km 的 220kV 输电线路的附加电耗每年可达几十万千瓦·时，一条长 3000km 的 500kV 线路则高达数百万千瓦·时。因此超高

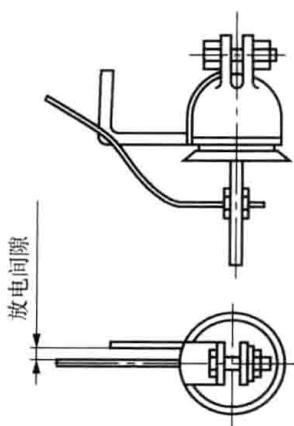


图 2-3 无裙绝缘子  
放电间隙

压及以上等级的输电线路的地线, 即使无综合用途, 也往往将其绝缘架设, 以减少能耗。

绝缘地线利用一只带有放电间隙的无裙绝缘子 (见图 2-3) 与杆塔隔开, 雷击时利用放电间隙击穿接地, 因此绝缘地线具有与一般地线同样的防雷效果。安装时必须对放电间隙进行整定, 使其在雷击前的先导阶段能够预先建弧, 在雷击过后能够及时切断间隙中的工频电弧恢复正常运行状态, 在线路重合闸成功时不致重燃; 在线路发生短路事故时, 间隙也能被击穿, 并保证短路事故消除后, 间隙能熄弧恢复正常。放电间隙值应根据地线上感应电压的续流熄弧条件和继电保护的動作条件确定, 一般为 10~40mm。还应当注意, 绝缘地线上往往感应有较高的对地电压, 在导线和地线都不换位时, 330、500kV 线路绝缘地线的感应电压可分别达到 23kV 和 50kV 左右。因此安装绝缘地线的线路必须进行适当换位, 对其的任何操作都应按带电作业考虑。

### 3. 地线的选择

地线应满足电气和机械强度的要求, 可选用镀锌钢绞线或复合型绞线。当地线选用镀锌钢绞线时, 其与导线的配合宜符合表 2-5 的规定。当地线兼用于减少潜供电流、降低工频过电压、改善对通信设施的干扰影响、作为高频载波通道等时, 可采用良导体架空线, 其截面积应满足综合利用的载流要求。当利用地线进行光纤通信时, 可选用 OPGW 型光纤复合地线。

表 2-5 地线采用镀锌钢绞线时与导线的配合

导线型号		LGJ-185/30 及以下	LGJ-185/45~LGJ-400/35	LGJ-400/50 及以上
镀锌钢绞线 最小标称截面 (mm <sup>2</sup> )	无冰区段	35	50	80
	覆冰区段	50	80	100

注 500kV 及以上线路的地线采用镀锌钢绞线时, 无冰区段和覆冰区段的最小标称截面应分别不小于 80、100mm<sup>2</sup>。

电力系统发生单相接地故障时, 地线要通过返回电流, 由此产生的温升不应超过其允许值, 以免机械强度明显下降。校验短路热稳定时的地线允许温度, 钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线可采用 200℃, 钢芯铝包钢绞线、铝包钢绞线可采用 300℃, 镀锌钢绞线可采用 400℃, 光纤复合地线的允许温度应采用产品试验保证值。地线的短路热稳定允许电流可按下式计算

$$I = \sqrt{\frac{C}{0.24\alpha_0 R_0 T} \ln \frac{\alpha_0(t-20)+1}{\alpha_0(t_a-20)+1}} \quad (2-11)$$

式中  $I$ ——地线的短路热稳定允许电流, A;

$C$ ——载流部分的热容量, cal/(℃·cm);

$\alpha_0$ ——载流部分 20℃时的电阻温度系数, 1/℃;

$R_0$ ——载流部分 20℃时的电阻, Ω/cm;

$T$ ——短路热稳定的计算时间, s;

$t_a$ ——环境温度, 采用最高气温月的平均最高气温, ℃;

$t$ ——地线的短路热稳定允许温度, ℃。

特高压输电线路的地线, 还应按电晕起晕条件进行校验, 地线表面的静电场强, 不宜大于其临界电晕场强的 80%。输电线路的电磁感应对附近通信线路有一定影响, 当对重要通信线路的影响超过规定标准时, 为加强对通信线路的保护, 可以考虑与地线配合架设屏蔽地线。屏蔽地线需要使用良导电线材, 目前多用 LGJ-95/55 钢芯铝绞线。

## 第二节 绝缘子和绝缘子串

### 一、常用绝缘子

架空输电线路常用的绝缘子有针式绝缘子、悬式绝缘子、横担绝缘子、棒形绝缘子和复合绝缘子等，如图 2-4 所示。

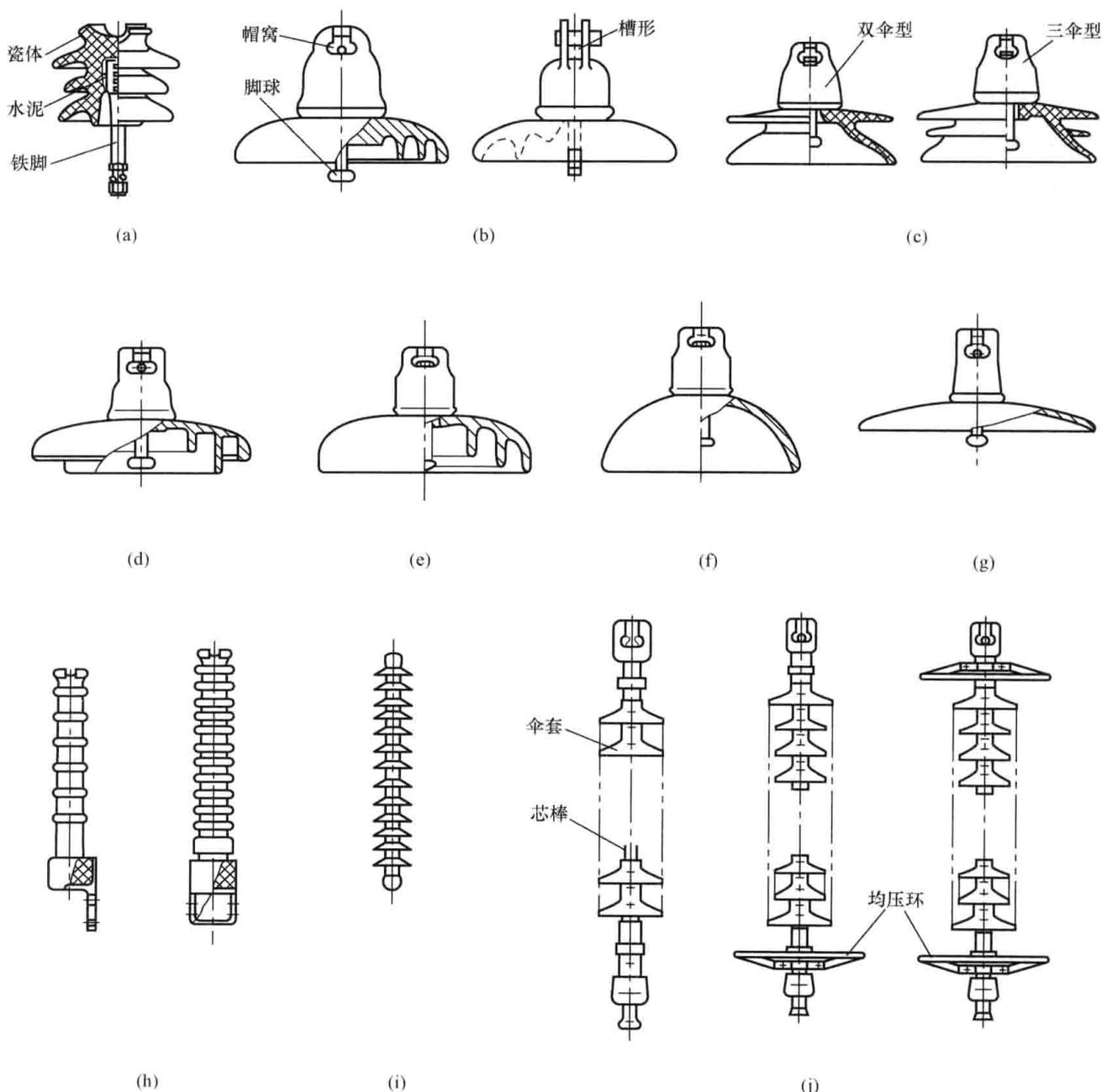


图 2-4 各种绝缘子

- (a) 针式绝缘子；(b) 悬式绝缘子（标准型）；(c) 悬式绝缘子（多伞型）；(d) 悬式绝缘子（深棱型）；  
 (e) 悬式绝缘子（钟罩型）；(f) 悬式绝缘子（球面型）；(g) 悬式绝缘子（草帽型）；  
 (h) 瓷横担绝缘子；(i) 棒形悬式瓷绝缘子；(j) 复合绝缘子

#### 1. 针式绝缘子

针式绝缘子 [见图 2-4 (a)] 制造简单、价格便宜，但耐雷水平不高，易闪络。用金

属线将架空线绑扎在针式绝缘子顶部的槽中。这种绝缘子多用于电压不高 (35kV 以下) 和架空线张力不大的线路。

## 2. 悬式绝缘子

悬式绝缘子形状多为圆盘, 又称盘形绝缘子, 以往均为陶瓷制成, 所以又叫瓷瓶, 在我国已广泛使用钢化玻璃制造。盘形玻璃绝缘子机械强度高, 电气性能好, 寿命长不老化, 并且有故障时自爆破碎, 易于巡线人员查出, 维护方便。

盘形悬式绝缘子类型很多, 如图 2-4 (b) ~ (g) 所示, 连接方式有球窝与槽形之分, 其技术性能见表 2-6。悬式绝缘子型号中, X 表示悬式瓷绝缘子, LX 表示悬式玻璃绝缘子, W 表示防污型, H 表示钟罩防污型, Z 表示直流型, C 表示槽形连接 (球窝连接不表示), D 表示地线用, P 表示机电破坏负荷, 后面的数字是以 kN 为单位的机电破坏负荷数。

表 2-6 常用悬式绝缘子的技术性能

型 号	公称高度 (mm)	公称盘径 (mm)	爬电距离 (mm)	工频电压有效值 (不小于, kV)		雷电全波冲击 耐受电压峰值 (不小于, kV)	机电破坏 负 荷 (kN)
				1min 湿耐受	击穿		
XP-70, LXP-70	146	255	295	40	110	100	70
XP-100, LXP-100	146	255	295	40	110	100	100
XP-120, LXP-120	146	255	295	40	110	100	120
XP1-160, LXP1-160	146	255	305	40	110	100	160
XP-210, LXP-210	170	280	335	42	120	105	210
XP-300, LXP-300	195	320	370	45	120	110	300
XWP-70	146	255	400	45	120	120	70
XWP-100	160	280	450	45	120	120	100
XWP-120	160	280	450	45	120	120	120
XWP-160	155	300	400	50	120	130	160
XHP-210	170	300	470	50	120	130	210
XHP-300	195	320	460	50	120	140	300
LXZP-160	170	320	545	65	130	140	160
LXZP-210	170	320	545	65	130	140	210
LXZP-300	195	400	635	70	140	150	300
LXQP-120	140	255	305	45	120	100	120
XDP-70C XDP-70CN	200	160	160	30	110	可调间隙为 10~30mm 间隙 20mm 时工频放 电电压为 8~30	70
XDP-100C XDP-100CN	210	170	170	30	110	可调间隙为 10~30mm 间隙 20mm 时工频放 电电压为 8~30	100

标准型悬式绝缘子结构简单, 适合在清洁地区使用。耐污悬式绝缘子按伞形结构分为多伞型、钟罩型、深棱形、草帽型等, 主要是增大了绝缘子的爬电距离和自洁性能。多层伞型

耐污悬式绝缘子爬电距离大，伞型开放，裙内外光滑无棱，积灰速率低，风雨自洁性能好，易清扫，适合在重污秽、高海拔和沙漠干燥地区使用。钟罩型耐污悬式绝缘子利用伞内受潮的不同周期性及伞下高棱的抑制放电作用，防污性能较好，适合在沿海、多雾潮湿和盐碱地区使用。草帽型耐污悬式绝缘子为单伞大盘径结构，一般将其穿插在悬式绝缘子串的上部和中部，起抑制线路污闪及贯穿性结冰情况的发生。

### 3. 瓷横担绝缘子

输电线路瓷横担绝缘子起杆塔横担和绝缘子两种作用，形状如图 2-4 (h) 所示。瓷横担绝缘子采用实心不可击穿的瓷件与金属附件胶装而成，具有自洁性好、维护简单、线路材料省、造价低、运行安全可靠等优点。瓷横担绝缘子有水平安装和直立安装两种形式，绝缘子水平安装时导线用细金属丝绑扎在瓷件头部侧槽处，绝缘子直立安装时导线绑扎在瓷件顶槽上。瓷横担绝缘子瓷件头部也可带有连接金具，用以固定导线。目前 110kV 及以下线路已广泛使用瓷横担绝缘子。瓷横担绝缘子的缺点是承受弯矩和拉力的强度低，易发生脆断，引起断线倒杆事故。常用瓷横担绝缘子的技术性能列于表 2-7。

表 2-7 瓷横担绝缘子的技术性能

型 号	线路额定电压 (kV)	额定弯曲 破坏负荷 (kN)	工频湿耐受电压 (有效值, kV)	标准雷电冲击 全波耐受电压 (峰值, kV)	最小公称 爬电距离 (mm)
S-10/2.5	10	2.5	45	165	320
S1-10/2.5	10	2.5	50	185	380
S-10/5.0	10	5.0	45	165	360
S-35/5.0	35	5.0	85	250	700
S2-35/5.0	35	5.0	100	265	1120

### 4. 棒形瓷绝缘子

棒形瓷绝缘子是一个瓷质整体，形状见图 2-4 (i)。其作用相当于若干悬式绝缘子组成的悬垂绝缘子串，但质量较轻，长度短，可节省钢材，还可以降低杆塔高度。棒形瓷绝缘子的缺点是制造工艺复杂，成本较高，且运行中易因振动而断裂。

### 5. 复合绝缘子

复合绝缘子是悬式复合绝缘子的简称，又称合成绝缘子，由伞套、芯棒和端部金具组成，如图 2-4 (j) 所示。伞裙护套由高温硫化硅橡胶制成，具有良好的憎水性，抗污能力强，用来提供必要的爬电距离，并保护芯棒不受气候影响。芯棒由玻璃纤维作增强材料、环氧树脂作基体的玻璃钢制成，具有很高的抗拉强度和良好的减振性、抗蠕变性以及抗疲劳断裂性。端部金具用外表面镀有热镀锌层的碳素钢制成，根据需要其一端或者两端可以制装均压环。复合绝缘子尤其适用于污秽地区，能有效地防止污闪的发生。常用悬式复合绝缘子的主要尺寸和特性见表 2-8。型号中，CS 表示悬式复合绝缘子，SML 表示额定机械负荷，XZ 是按照 IEC 61466-1:1997 的标准连接方式的标记，“-”后的两个数据分别是标准雷电冲击耐受电压和最小爬电距离。例如，CS100S16B16-450/3150 是指额定机械负荷为 100kN、上附件采用 16 标记球窝、下附件采用 16 标记球头、标准雷电冲击耐受电压为 450kV、最小爬电距离为 3150mm 的悬式复合绝缘子。

表 2-8 常用悬式复合绝缘子特性 (GB/T 20876.2—2007)

型 号	额定机械负荷 (SML) (kN)							标准雷电 冲击耐受 电压 (kV)	20mm/kV 和 25mm/kV 爬电 比距所对应的 最小爬电距离 (mm)	最小 电弧 距离 (mm)	均压 装置 数量	绝缘件 的最大 直径 (mm)	设备 最高 电压 (kV)	
	40	70												
CS(SML)XZ - 75/290	40	70						75	230/290	125	无	200	11.5	
CS(SML)XZ - 95/290	40	70						95	230/290	160	无	200	11.5	
CS(SML)XZ - 95/440	40	70						95	350/440	160	无	200	17.5	
CS(SML)XZ - 125/575	40	70						125	460/575	210	无	200	23	
CS(SML)XZ - 145/575	40	70						145	460/575	240	无	200	23	
CS(SML)XZ - 145/900	40	70						145	720/900	240	无	200	36	
CS(SML)XZ - 170/900	40	70						170	720/900	285	无	200	36	
CS(SML)XZ - 185/1015	40	70	100					185	810/1015	315	无	200	40.5	
CS(SML)XZ - 200/1015	40	70	100					200	810/1015	340	无	200	40.5	
CS(SML)XZ - 325/1815	40	70	100	120				325	1450/1815	570	无	200	72.5	
CS(SML)XZ - 450/3150		70	100	120				450	2520/3150	815	无	200	126	
CS(SML)XZ - 480/3150		70	100	120				480	2520/3150	870	无	200	126	
CS(SML)XZ - 850/6300		70	100	120	160			850	5040/6300	1585	单	200	252	
CS(SML)XZ - 950/6300		70	100	120	160			950	5040/6300	1770	单	200	252	
CS(SML)XZ - 1050/6300		70	100	120	160			1050	5040/6300	1900	单	200	252	
CS(SML)XZ - 1175/9075			100	120	160	210		1175	7260/9075	2210	双	200	363	
CS(SML)XZ - 1300/9075			100	120	160	210		1300	7260/9075	2400	双	200	363	
CS(SML)XZ - 1425/13750					160	210	300	1425	11000/13750	2600	双	200	550	
CS(SML)XZ - 1550/13750					160	210	300	1550	11000/13750	2900	双	200	550	
CS(SML)XZ - 1675/13750					160	210	300	1675	11000/13750	3200	双	200	550	
CS(SML)XZ - 1800/13750					160	210	300	1800	11000/13750	3500	双	200	550	
CS(SML)XZ - 1950/20000						210	300	400	1950	16000/20000	3800	双	200	800
CS(SML)XZ - 2100/20000						210	300	400	2100	16000/20000	4200	双	200	800
CS(SML)XZ - 2250/20000						210	300	400	2250	16000/20000	4500	双	200	800
CS(SML)XZ - 2400/20000						210	300	400	2400	16000/20000	4800	双	200	800
CS(SML)XZ - 2550/20000						210	300	400	2550	16000/20000	5100	双	200	800
CS(SML)XZ - 2700/20000						210	300	400	2700	16000/20000	5400	双	200	800

注 设备最高电压为 550kV 电压等级绝缘子的额定机械负荷 (SML) 常用的还有 180kN 和 240kN。

## 二、绝缘子串

架空输电线路的电压等级高, 为保证绝缘水平, 需将数只悬式绝缘子串接起来, 与金具配合组成架空线悬挂体系即绝缘子串。根据受力特点, 在直线型杆塔上组成悬垂串, 耐张杆塔上组成耐张串。输电线路的绝缘配合, 应使线路能在工频电压、操作过电压、雷电过电压

等各种条件下安全可靠地运行。

### 1. 悬垂串

悬垂串在线路正常运行情况下，仅承受垂直线路方向的荷载，如架空线自重、冰重、风荷载等；在断线情况下，还要承受断线拉力。为减少悬垂串的风偏，可采用“V”形或“人”形等悬垂串。图 2-5 所示为悬垂串的几种组装方式。

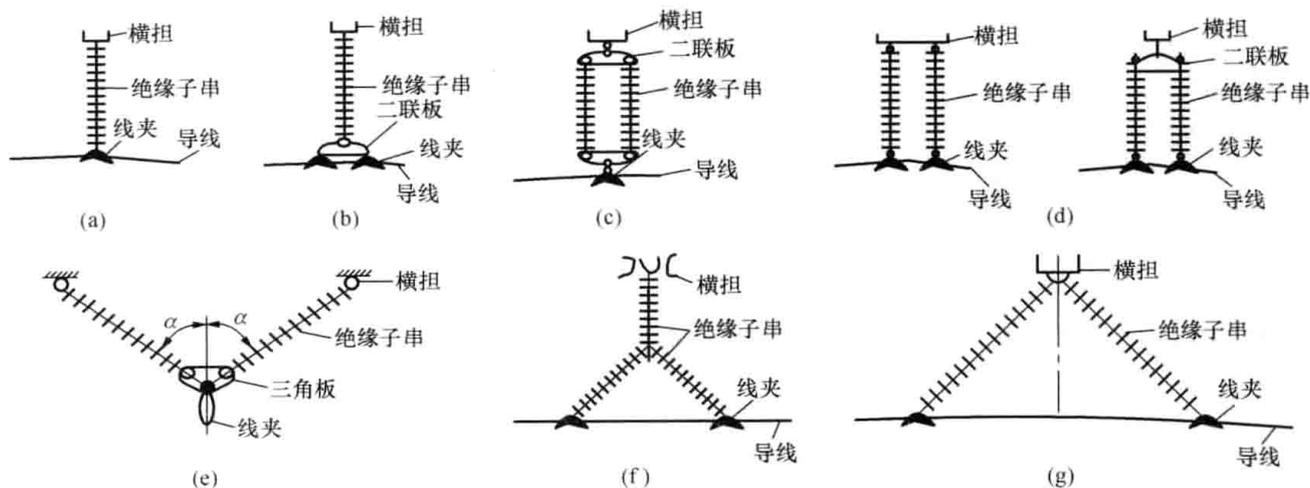


图 2-5 悬垂串的几种组装方式

- (a) 单联单线夹单挂点；(b) 单联双线夹单挂点；(c) 双联单线夹单挂点；(d) 双联双线夹；  
(e) “V”形；(f) “人”形；(g) 八字形

每联悬垂绝缘子的片数，应依据线路电压等级按绝缘配合条件确定，可采用爬电比距法计算。所谓爬电比距是指不同污秽等级下单位工作电压所要求的爬电距离。海拔高度 1000m 以下的地区，每联悬垂绝缘子片数的计算式为

$$n \geq \frac{\lambda U}{K_e L_{01}} \quad (2-12)$$

式中  $n$ ——每联绝缘子的片数；

$U$ ——标称电压，kV；

$\lambda$ ——爬电比距，按表 2-9 选取，cm/kV；

$L_{01}$ ——单片绝缘子的几何爬电距离，cm；

$K_e$ ——绝缘子爬电距离的有效系数，主要由绝缘子几何爬电距离在试验和运行中污秽耐压的有效性确定，以 XP-70、XP-160 型绝缘子为基础，取其  $K_e=1$ ，常见绝缘子的爬电距离有效系数见表 2-10。

表 2-9 高压架空线路污秽分级标准

污秽等级	污秽条件		爬电比距 (cm/kV)	
	污秽特征	盐密 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	220kV 及以下	330kV 及以上
0	大气清洁地区及离海岸盐场 50km 以上无明显污染地区	$\leq 0.03$	1.39 (1.6)	1.45 (1.6)
1	大气轻度污染地区、工业区和人口低密集区、离海岸盐场 10~50km 地区，在污闪季节中干燥少雾（含毛毛雨）或雨量较多时	$> 0.03 \sim 0.06$	1.39~1.74 (1.6~2.0)	1.45~1.82 (1.6~2.0)

续表

污秽等级	污秽条件		爬电比距 (cm/kV)	
	污秽特征	盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	220kV 及以下	330kV 及以上
2	大气中等污染地区、轻盐碱和炉烟污染地区、离海岸盐场 3~10km 地区, 在污闪季节中潮湿多雾 (含毛毛雨) 但雨量较少时	>0.06~0.10	1.74~2.17 (2.0~2.5)	1.82~2.27 (2.0~2.5)
3	大气污染较严重地区、重雾和重盐碱地区、近海岸盐场 1~3km 地区、工业与人口密度较大地区、离化学污染源和炉烟污秽 300~1500m 的较严重污秽地区	>0.10~0.25	2.17~2.78 (2.5~3.2)	2.27~2.91 (2.5~3.2)
4	大气特别严重污染地区, 离海岸盐场 13km 以内, 离化学污染源和炉烟污秽 300m 以内的地区	>0.25~0.35	2.78~3.30 (3.2~3.8)	2.91~3.45 (3.2~3.8)

注 计算爬电距离时, 取系统最高工作电压, 括号内的数字为按标称电压计算的值。

表 2-10 常见绝缘子的爬电距离有效系数

绝缘子形式	盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )			
	0.05	0.10	0.20	0.40
玻璃绝缘子 (普通型 LXP-160)	1.0			
双伞型绝缘子 (XWP2-160)	1.0			
三伞型绝缘子	1.0			
长棒型瓷绝缘子	1.0			
深钟罩玻璃绝缘子	0.8			
浅钟罩型绝缘子	0.9	0.9	0.8	0.8
复合绝缘子	$\leq 2.5\text{cm/kV}$		$\geq 2.5\text{cm/kV}$	
	1.0		1.3	

海拔 1000m 以下的地区, 不同电压等级的操作过电压和雷电过电压要求的悬垂串绝缘子的片数, 不应少于表 2-11 的数值。

表 2-11 操作过电压及雷电过电压要求的悬垂绝缘子串的最少片数

标称电压 (kV)	110	220	330	500
单片绝缘子的高度 (mm)	146	146	146	155
绝缘子片数 (片)	7	13	17	25

高海拔地区悬垂串的绝缘子片数, 宜按式 (2-13) 计算, 即

$$n_H = ne^{0.1215m_1(H-1000)/1000} \quad (2-13)$$

式中  $n_H$ ——高海拔地区悬垂串的每联绝缘子所需片数;

$n$ ——一般地区悬垂串的每联绝缘子所需片数;

$m_1$ ——特征指数, 反映气压对于污闪电压的影响程度, 由试验确定, 常用绝缘子特征指数可参考表 2-12 取值;

$H$ ——海拔高度, m。

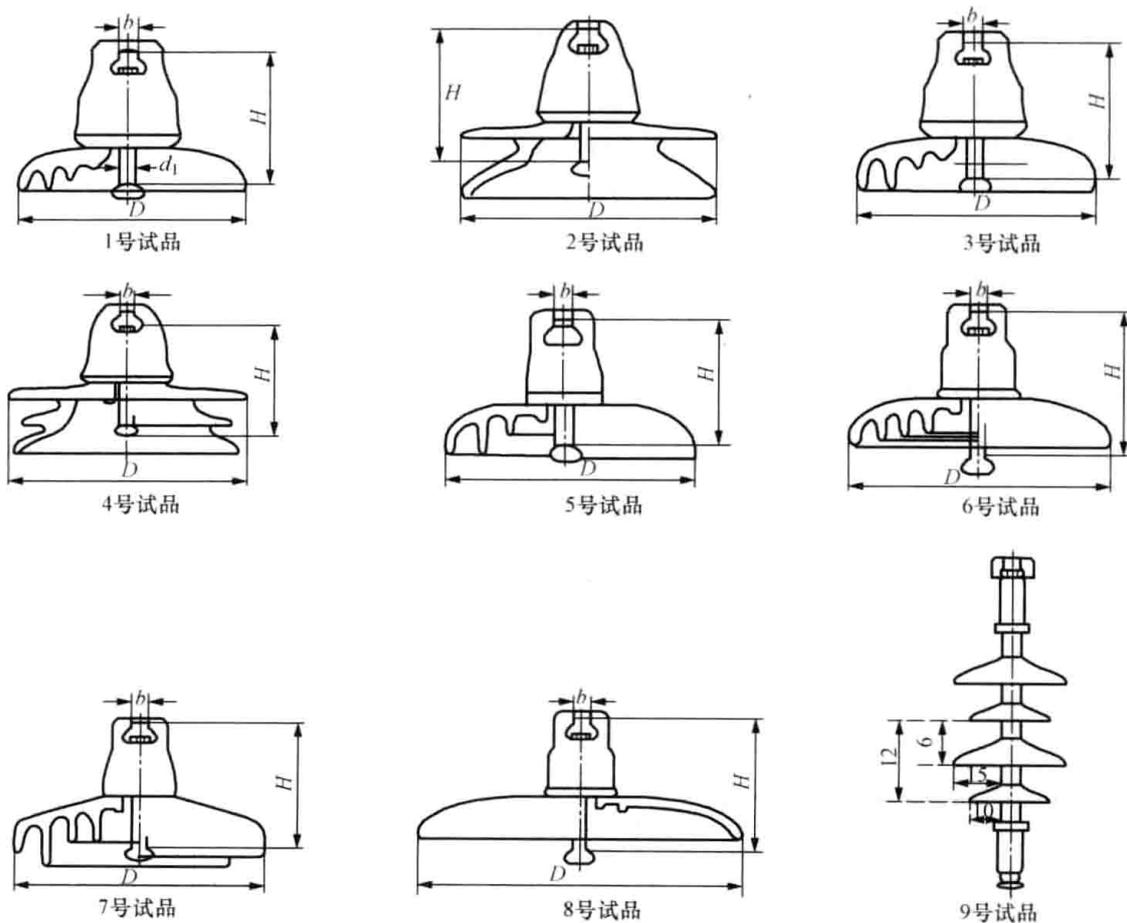
对于全高超过 40m 有地线的杆塔, 为加强防雷, 高度每增加 10m, 应比表 2-11 的数量增加一片高度相当于 146mm 的绝缘子。全高 100m 以上的杆塔, 绝缘子片数应根据运行经

验并结合操作过电压和雷电过电压的计算确定。由于 750kV 的线路采用 32 片结构高度 170mm 绝缘子的耐雷水平已超过 150kA，且西北地区（除陕南外）平均雷暴日一般在 20 天及以下，雷电流幅值较小，因此 750kV 线路的杆塔全高超过 40m 时，根据实际情况进行计算，确定是否增加绝缘子的片数。

线路通过空气污秽地区时，宜采用防污绝缘子，也可增加普通绝缘子的个数。

表 2-12 常用绝缘子串特征系数  $m_1$  的参考值

试品	材料	盘径 (mm)	结构高度 (mm)	爬电距离 (mm)	$m_1$ 值		
					盐密 $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$	盐密 $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$	平均值
1号	瓷	280	170	33.2	0.66	0.64	0.65
2号		300	170	45.9	0.42	0.34	0.38
3号		320	195	45.9	0.28	0.35	0.32
4号		340	170	53.0	0.22	0.40	0.31
5号	玻璃	280	170	40.6	0.54	0.37	0.45
6号		320	195	49.2	0.36	0.36	0.36
7号		320	195	49.3	0.45	0.59	0.52
8号		380	145	36.5	0.30	0.19	0.25
9号	复合				0.18	0.42	0.30



试品结构示意图

## 2. 耐张串

耐张串除承受垂直线路方向的荷载外, 主要承受正常和断线情况下顺线路方向的架空线张力。当架空线张力很大时, 常采用双联或多联耐张绝缘子串, 其组合形式见图 2-6。两边耐张串通过跳线(引流线)连接, 见图 2-7。特高压线路宜采用刚性跳线。

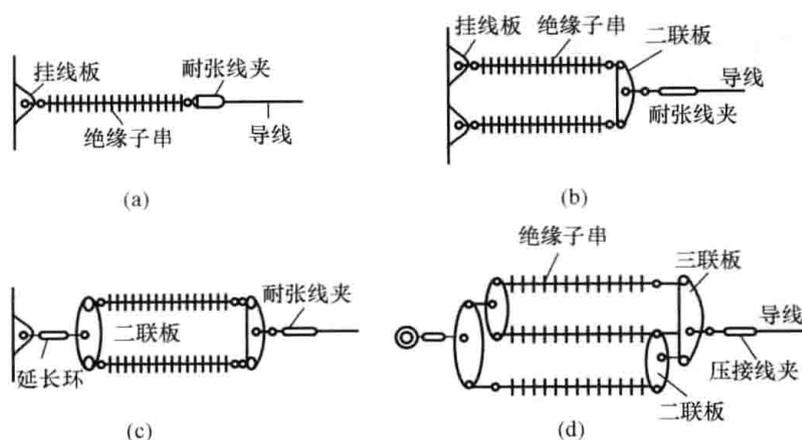


图 2-6 耐张串的几种组合形式

(a) 单联; (b) 双联之一; (c) 双联之二; (d) 三联

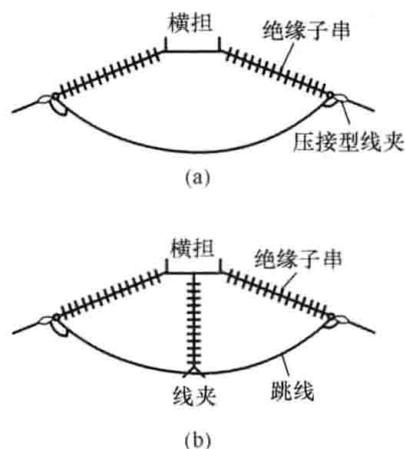


图 2-7 跳线与耐张串的连接

(a) 连接之一; (b) 连接之二

考虑到耐张串在正常运行中承受的架空线张力较大, 绝缘子容易劣化, 所以每联耐张绝缘子的片数应在表 2-11 的基础上增加, 110~330kV 线路应多一片, 500kV 线路应多两片, 750kV 及以上线路不需增加。通过污秽地区的线路, 片数按式 (2-12) 选择。但当悬垂绝缘子的数量已达表 2-11 的规定值时, 耐张绝缘子的数量可不再增加。由于耐张绝缘子串的自洁性能较好, 在同一污秽区, 其爬电比距可根据运行经验比悬垂绝缘子串适当减少。

## 3. 绝缘子串的安全系数和联数

绝缘子串的机械强度安全系数, 根据不同的荷载情况不应小于表 2-13 所列数值。其中, 常年荷载是年平均气温下绝缘子所受的荷载。验算荷载是验算条件下绝缘子所承受的荷载。断线的计算气象条件是无风、有冰、 $-5^{\circ}\text{C}$ 。双联及以上的多联绝缘子串应验算断一联后的机械强度, 断联的计算气象条件是无风、无冰、 $-5^{\circ}\text{C}$ , 1000kV 线路是无风、有冰、 $-5^{\circ}\text{C}$ 。

表 2-13 绝缘子和金具机械强度的最低安全系数

情况	盘型	棒型绝缘子	瓷横担	金具
最大使用荷载	2.7	3.0	3.0	2.5
常年荷载	4.0	4.0	4.0	—
验算荷载	1.5 (1.8)	1.5 (1.8)	1.5 (1.8)	1.5
断线	1.8	1.8	2.0	1.5
断联	1.5	1.5	—	1.5

注 验算荷载一行中括号内的数据用于 1000kV 线路。

绝缘子的相应最大使用荷载  $[T_J]$  计算式为

$$[T_J] = \frac{T_R}{k} \quad (2-14)$$

式中  $T_R$ ——绝缘子的额定机电破坏负荷, kN;

$k$ ——绝缘子的机械强度安全系数。

当绝缘子的机械强度不足时, 除可换用大吨位绝缘子外, 通常采取双联和多联解决, 所需绝缘子串的联数可根据其所受最大荷载确定, 即

$$N \geq \frac{T}{[T_1]} \quad (2-15)$$

式中  $N$ ——绝缘子的联数;

$T$ ——绝缘子串承受的最大荷载。

绝缘子串的联数, 除考虑机械强度外, 还与输电线路的地形条件、工作可靠性要求以及投资和运行费用有关。

单联绝缘子串的绝缘子和金具的耗量少, 串的长度略短, 运行中更换缺陷绝缘子的费用较低; 但当串中某一绝缘子损坏时, 悬挂于其上的导线就要落地, 线路退出运行, 倘若线路是重要用户的唯一电源, 将造成重大损失。双联绝缘子串的绝缘子片数是单联的 2 倍, 当某一绝缘子损坏时, 因未损坏的第二联仍悬挂着, 因而能维持一段时间, 但投资和运行维护费用较高。

采用 V 形绝缘子串时, 其中一联破坏会使导线与杆塔接近到不能允许的程度, 所以要把 V 形绝缘子串当作单联看待。

在重要跨越处, 如跨越 220kV 及以上线路、铁路、高速公路、一级公路、一级和二级通航河流及特殊管道等, 悬垂串宜采用双联串或两个单联串, 500kV 及以上线路并宜采用双挂点。超高压线路的耐张绝缘子串, 通常采用与子导线根数相同的联数, 这样每根子导线都可通过各自的绝缘子串固定在杆塔上, 运行可靠性提高。这在 330~500kV 线路上是合理的。但当电压超过 1000kV 时, 子导线根数很多, 上述做法必将引起杆塔加重、投资和运行维护费用增大, 因此应当减少耐张绝缘子串的联数, 并采用专用连接金具元件。

双联悬垂绝缘子串可纵向布置(两联绝缘子的轴线连成的平面顺着线路方向)或横向布置(两联绝缘子的轴线连成的平面垂直线路方向), 但多采用纵向布置。这是因为, 纵向布置时, 绝缘子串与杆塔的连接简单, 巡检方便, 两串受力比较均匀, 风偏时两串间距离不变; 断联时, 导线的垂直位移小, 支承联受到的冲击力小。横向布置时, 横担较长, 巡查时不易观察, 两串受力难以均衡, 风偏时两串间距离减小, 有发生绝缘子串碰撞的危险; 断联时, 导线的垂直位移大, 要承受转动附加冲力。

### 第三节 常用金具

#### 一、线夹

线夹用来握持架空线。它应具有足够的强度和握持力, 合理的线槽形状, 较小的电磁损失, 并能较好地适应架空线的振动。在直线杆塔上, 与悬垂绝缘子串相配合使用悬垂线夹。在耐张杆塔上, 与耐张绝缘子串相配合使用耐张线夹。还有一类接续跳线用的跳线线夹, 主要是并沟线夹和压缩跳线线夹, 归属接续金具。

##### 1. 悬垂线夹

悬垂线夹根据船体的旋转轴中心与架空线轴线的相对位置, 分为中心回转式、下垂式和

上扛式三类, 如图 2-8 所示。

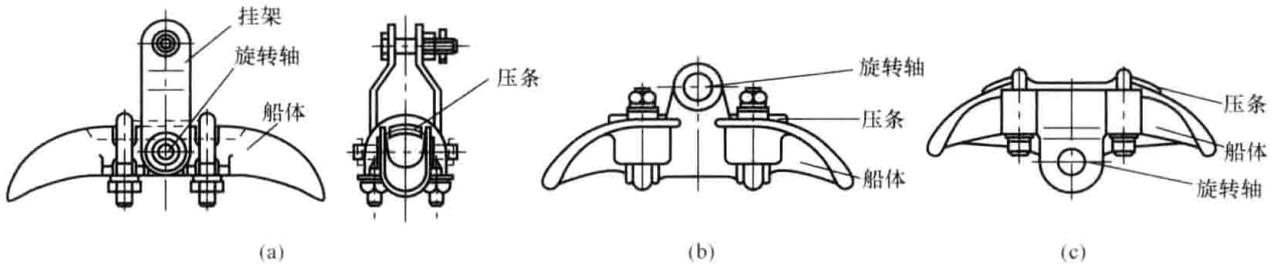


图 2-8 悬垂线夹

(a) 中心回转式; (b) 下垂式; (c) 上扛式

中心回转式线夹的船体旋转轴位于架空线的轴线上, 其旋转与架空线的偏转一致。过去认为, 这种形式的线夹由于能自由灵活地转动, 可以把振动能量传向下一档距, 从而降低悬挂点处架空线的应力, 减少断线事故。实际运行经验否定了这种观点, 因为实际线路中相邻档距的振动频率和相位很难一致, 线夹一般不转动。所以, 此种线夹并不能防振。

下垂式线夹的船体旋转轴位于架空线轴线以上, 其旋转落后于架空线的偏转。这种线夹结构简单, 制造方便, 大多数国家都有应用。

上扛式线夹的船体旋转轴位于架空线轴线以下, 其旋转往往超过架空线的偏转, 有不稳定的趋势。这种线夹只在特殊需要的地方才采用, 例如地线需要顶在塔顶和分裂导线需上扛布置时采用。

悬垂线夹根据对握持力的要求, 可分为固定型、滑动型和有限握力型三类。图 2-8 所示线夹均属于固定型, 依架空线型号和结构的不同规定了最小握持力, 最大握持力不作规定。滑动型线夹规定了最大握持力, 荷载达到该力后, 架空线应在线夹内出现滑动, 以减小线夹两侧架空线的张力差。有限握力型线夹同时规定了最小和最大握持力, 当荷载不大于最小握力值时, 架空线不得在线夹内滑动; 当荷载大于最大握力值时, 架空线应在线夹内出现滑动现象。

若悬垂线夹本身具有防电晕特性, 则称为防晕型线夹, 可用于 330kV 及以上电压等级的线路。

悬垂线夹的选择主要根据所握持架空线的类型、截面和直径以及线路的电压等级确定。

## 2. 耐张线夹

耐张线夹按其结构和安装方式主要分为螺栓型、压缩型和楔型以及预绞式等几种, 其典型结构如图 2-9 所示。

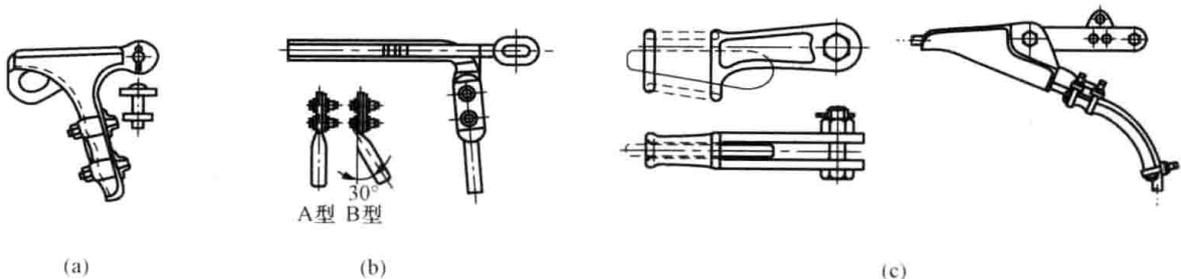


图 2-9 常用耐张线夹

(a) 螺栓型; (b) 压接型; (c) 楔型 (2 种)

螺栓型耐张线夹 [见图 2-9 (a)] 主要靠前面的圆弧段产生的摩擦力滞住架空线, 尾部的 U 型螺栓的正压力引起压条以及线槽对架空线产生摩擦力, 固定住架空线。

如图 2-9 (b) 所示, 压接型耐张线夹一般由铝 (铝合金) 管和钢锚组成, 钢锚用来接续和锚固架空线的钢芯, 铝 (铝合金) 管用来接续架空线的铝线部分。采用液压或爆炸压接的方法使铝 (铝合金) 管和钢锚产生塑性变形, 从而使线夹与架空线结合为一个整体。

楔型线夹利用楔形结构将架空线锁紧在线夹内, 图 2-9 (c) 表示了两种典型结构。

预绞式耐张线夹由金属预绞丝及其配套附件组成, 将架空线预绞在一起张拉在耐张杆塔上。

## 二、接续金具

电线的制造长度是有限的, 架线时需要用接续金具将其连接起来。接续金具按其承受力量的情况分为承力型和非承力型。承力型一般分为压缩型和预绞式。压缩型俗称压接管, 又分为钳压、液压和爆压三种, 修补管也归于此类。钢芯铝绞线用的压接管通常由定型钢管和铝管组成, 压接时钢线部分用钢管, 铝线部分用铝管, 如图 2-10 所示。非承力型接续金具主要用于跳线的接续。

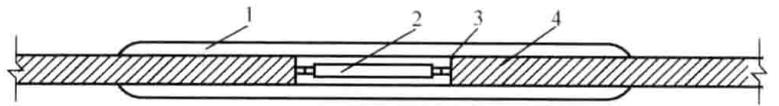


图 2-10 压接管

1—铝管; 2—钢管; 3—钢芯; 4—铝绞线

## 三、连接金具

连接金具主要用于绝缘子串与杆塔和线夹的连接, 也用于拉线。连接金具是输电线路中最为庞杂的一类元件, 可分为球头挂环 (球头挂板)、碗头挂板、U 型挂环、挂环、挂板、延长拉杆、调整板、牵引板、U 型螺丝和联板等。几种常见连接金具的结构如图 2-11 所示。

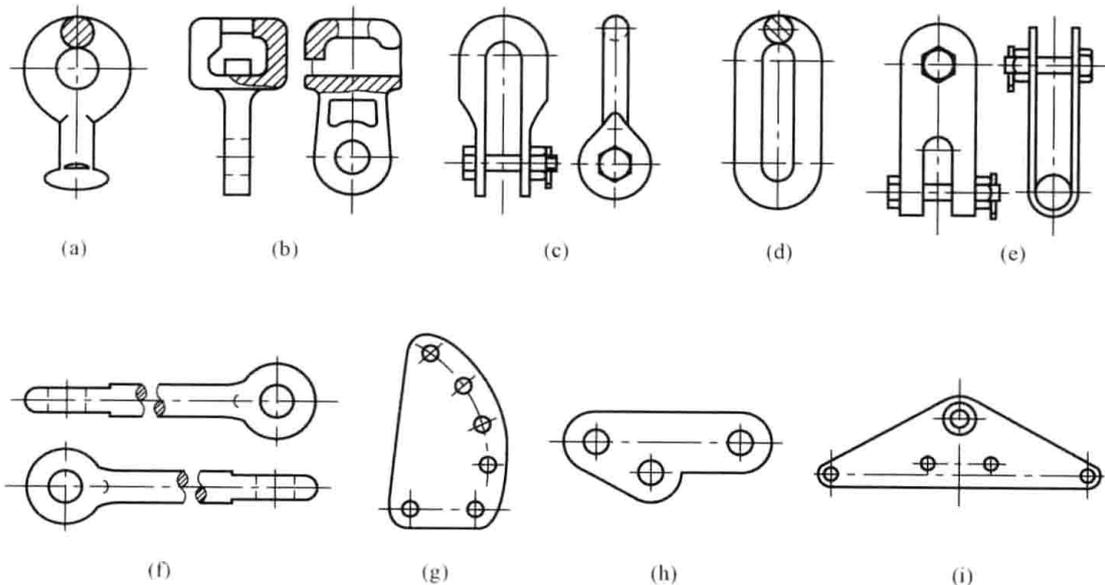


图 2-11 几种常用连接金具的典型结构

(a) 球头挂环; (b) 碗头挂板; (c) U 型挂环; (d) 延长环; (e) Z 型挂板;

(f) 延长拉杆; (g) 调整板; (h) 牵引板; (i) 联板

## 四、保护金具

保护金具可分为机械保护和电气保护两大类。机械保护类主要有防振锤、阻尼线、护线

条、间隔棒等, 电气保护类主要有均压环、屏蔽环、均压屏蔽环以及重锤等。

防振锤用于抑制架空输电线路上的微风振动, 保护线夹出口处的架空线不疲劳破坏。常用防振锤如图 2-12 所示, FD 型用于导线, FG 型用于钢绞线, FF 型用于 500kV 导线, FR 型为多频防振锤。

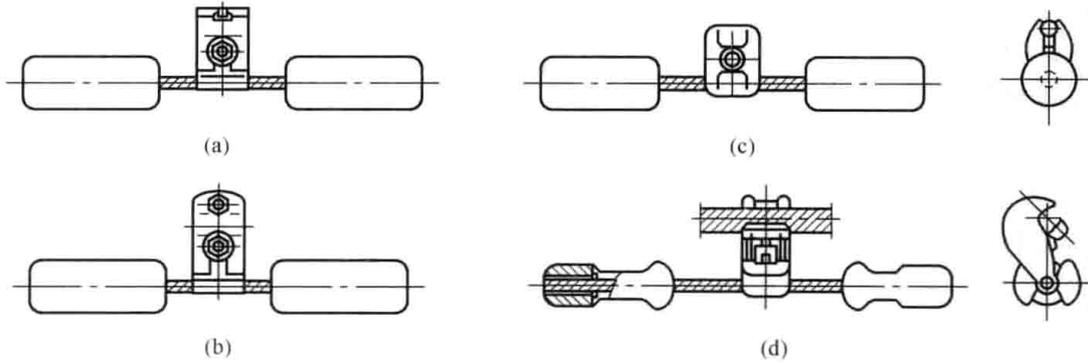


图 2-12 常用防振锤

(a) FD 型防振锤; (b) FG 型防振锤; (c) FF 型防振锤; (d) FR 型防振锤

间隔棒用于维持分裂导线的间距, 防止子导线之间的鞭击, 抑制次档距振荡, 抑制微风振动。常用间隔棒如图 2-13 所示。间隔棒有刚性和阻尼式两大类。刚性间隔棒现只用于线路中的跳线。阻尼式间隔棒的活动关节中嵌有胶垫, 胶垫的阻尼特性能起消振作用。为了降低舞动发生, 间隔棒不应限制子导线绕其自身轴线回转。

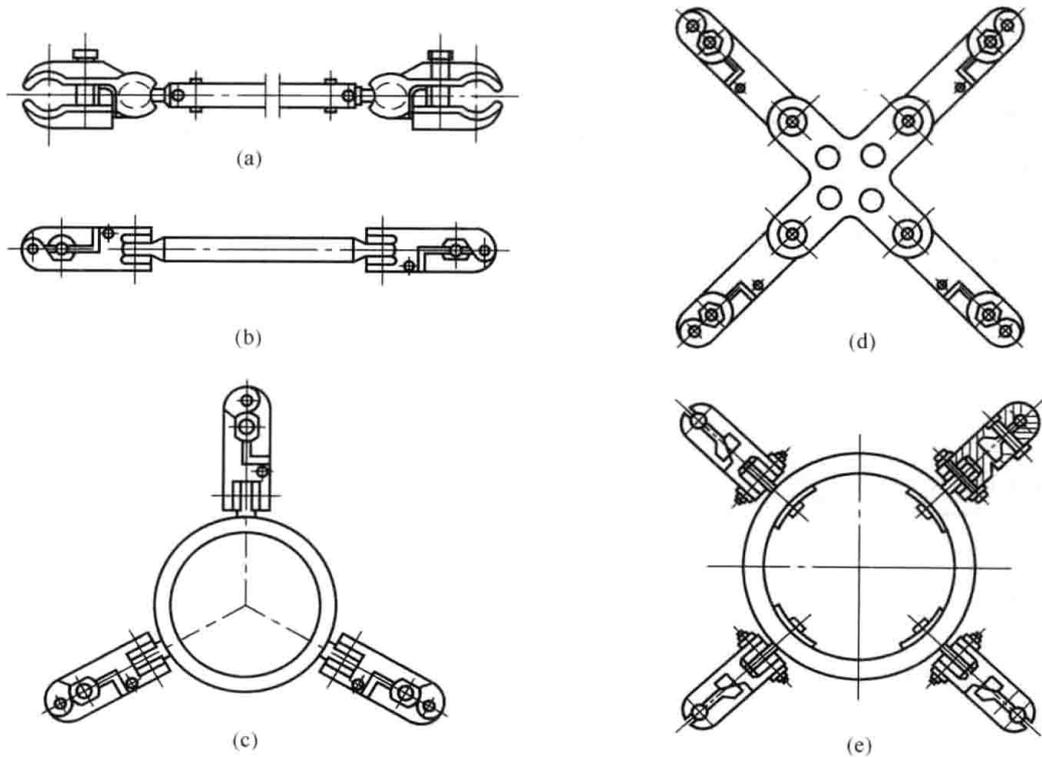


图 2-13 常用间隔棒

(a) FJQ 型刚性双分裂间隔棒; (b) FJZ 型阻尼双分裂间隔棒; (c) FJZ 型阻尼三分裂间隔棒;  
(d) FJZ 型阻尼四分裂间隔棒; (e) JX4 型阻尼四分裂间隔棒

均压屏蔽金具属电气保护金具，用来控制绝缘子和其他金具上的电晕和闪络的发生，常用的有均压环和屏蔽环等。图 2-14 中，均压环 1 控制导线侧第一片绝缘子上的闪络，屏蔽环 2 防止线夹和连接金具上的电晕；虚线部分所示为均压屏蔽环，起均压和屏蔽两种作用。330kV 及以上线路的绝缘子串和金具应考虑均压和防电晕措施，220kV 及以上线路的复合绝缘子的两端都应加均压环。

重锤悬挂于悬垂线夹之下，用于增大垂向荷载，减小悬垂串的偏摆，防止悬垂串上扬，参见图 12-10。

金具的机械强度的最低安全系数见表 2-13。330kV 及以上线路的带电金具应考虑防电晕措施。

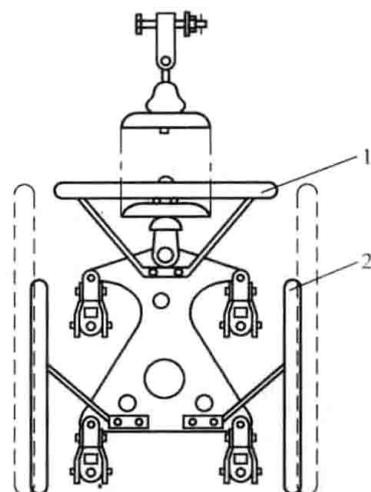


图 2-14 均压屏蔽金具  
1—均压环；2—屏蔽环

## 第四节 杆 塔

杆塔分为电杆和铁塔两大类。附录 B 给出了典型杆塔的结构型式和有关尺寸。

钢筋混凝土电杆结构简单，节约钢材，基础简易，工程量小，工程造价低，施工周期短，且具有较高的强度，经久耐用，运行维护费用低。其缺点是笨重，运输困难。因此对于较高的混凝土电杆均采用分段制造，现场组装，每段电杆的重量在 5000~10000kN 以下。在 35~110kV 线路上大量使用的是钢筋混凝土电杆，新建 330kV 及以下线路，在平地、丘陵等便于运输和施工的地区，应首先考虑采用钢筋混凝土电杆。

近年来城市人均用电量不断增加，110~220kV 变电站开始进入市区，受线路走廊的限制，常规塔型不便使用，人们研制出了占地面积小的钢管杆。钢管杆虽加工工艺复杂，投资较大，但美观大方，适应市区环境，在城市架空输电线路中发展迅速。

常见的铁塔是用型钢经螺栓连接或焊接起来的桁架，少数国家也有铝合金塔或钢管混凝土结构塔。铁塔具有坚固可靠，使用周期长的优点，但钢材消耗量大，造价高，施工工艺复杂，维护工作量大。根据结构型式和受力特点，铁塔可分为拉线塔和自立塔两类。拉线塔能比较充分地利用材料的强度特性，较大幅度地降低钢材消耗量。在空旷地区，采用拉线塔既有良好的承载能力，也有较好的经济效益。自立塔仅使用在 220kV 以上线路或交通不便和地形受限必须使用铁塔的地方。技术经济分析表明，目前 500kV 线路采用铁塔比较合理。

根据其受力性质，杆塔可分为悬垂型和耐张型。悬垂型杆塔又可分为悬垂直线和悬垂转角杆塔，耐张型杆塔又可分为耐张直线、耐张转角和终端杆塔。根据其回路数目，杆塔可分为单回路、双回路和多回路。

悬垂直线杆塔又称中间杆塔，用于线路的直线段，其数量最多，约占杆塔总数的 80%。在正常情况下，悬垂直线杆塔主要承受架空线、绝缘子串、金具等的重量，其上的绝缘子串呈悬垂状态。图 2-15 所示为双回路直线杆塔。悬垂直线杆塔也具有一定的顺线路方向的强度，用以承受断线事故或其他情况下产生的纵向张力。悬垂直线杆塔因所受荷载小，所以材

料消耗量少, 造价亦低。

耐张型杆塔主要用来承受正常运行和断线事故情况下顺线路方向的架空线张力, 保证不倒杆, 限制事故范围的扩大。图 2-16 所示为双回路耐张杆塔。两基耐张杆塔之间构成一个耐张段, 如图 2-17 所示。若线路发生严重断线事故, 使架空线产生很大的纵向不平衡张力时, 悬垂型杆塔因强度较低可能会被逐基拉倒, 但耐张型杆塔强度较高可以承受此不平衡张力, 从而将事故限制在一个耐张段内。所以耐张杆塔又叫锚型杆塔。

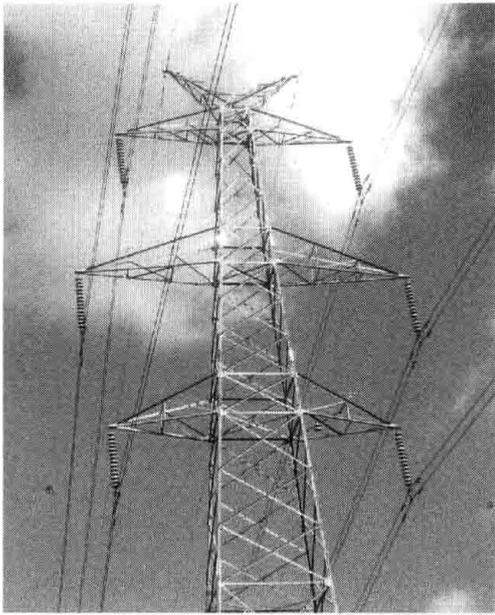


图 2-15 双回路直线杆塔

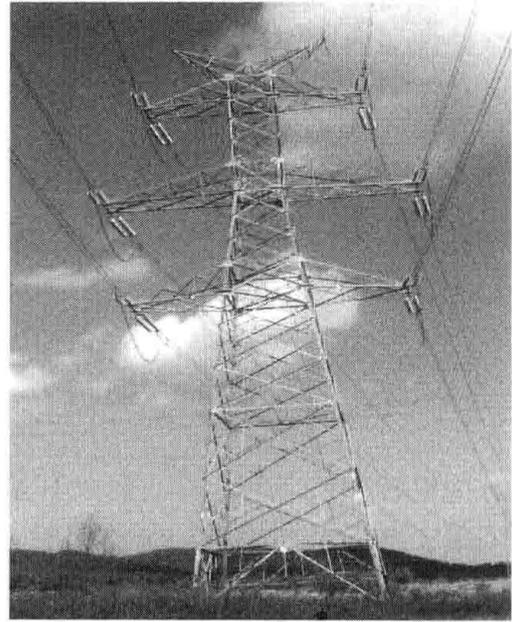


图 2-16 双回路耐张杆塔

转角杆塔用于线路的转角处, 主要承受两侧架空线产生的角度力, 如图 2-18 所示。角度力的大小决定于线路转角的大小和架空线张力的大小。当线路转角不大于  $3^\circ$  时, 角度力较小, 可采用悬垂直线杆塔带转角。悬垂转角杆塔的转角角度, 对 330kV 及以下线路不大于  $10^\circ$ , 对 500kV 及以上线路不大于  $20^\circ$ 。当角度较大时, 宜选用耐张型转角杆塔。

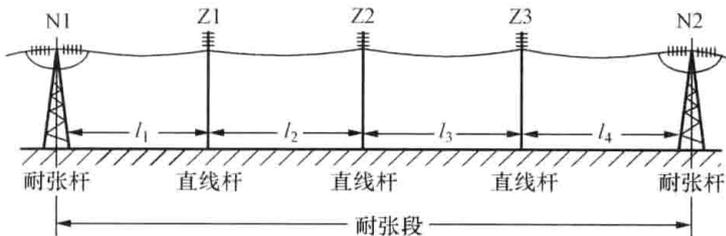


图 2-17 线路的一个耐张段

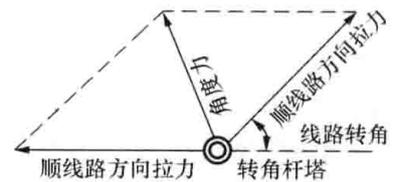


图 2-18 转角杆塔的受力图

终端杆塔是线路进出线的第一基杆塔, 一侧作用的是架空线正常张力, 另一侧是较小的松弛张力。终端杆塔一般还兼作转角塔, 因此承受较大的荷载, 材料消耗量和造价也就较大。

线路跨越河流、湖泊、山谷等时, 两侧杆塔具有悬点高、荷载大、结构复杂、耗钢量大及投资高等特点, 常称为跨越杆塔。国内跨越杆塔目前大多采用组合构件铁塔、钢管塔或独立式钢筋混凝土塔等。为合理分配杆塔荷载, 跨越处常采用耐张杆塔—直线杆塔—直线杆塔—耐张杆塔 (N—Z—Z—N) 的跨越方式, 即采用直线杆塔实现跨越。我国扬州扬东至无

锡斗山 500kV 输电线路江阴长江大跨越，跨宽 2303m，江南塔高 346.5m。舟山 220kV 大猫山大跨越档距 2756m，两个跨越塔高达 370m，质量达 6000t，塔身高度和质量均为全球第一。

根据杆塔的形状，有上字型、三角型、干字型、门型、拉 V 型、猫头型、酒杯型、鼓型杆塔等称谓。

选择杆塔主要应考虑线路的电压等级、线路回数、导线型号、地形地质情况以及使用条件等，并应考虑施工、运行维护方便，通过综合技术经济比较，择优选用，但应注意一条线路采用的杆塔形式不宜过多。

## 第五节 基 础

基础用来支承杆塔，承受所有上部结构的荷载，一般受到下压力、上拔力、倾覆力等作用。其型式应结合线路沿线地质特点、施工条件、杆塔形式等因素综合考虑来选择。根据支承的杆塔类型，基础分为电杆基础和铁塔基础两类。

### 一、电杆基础

电杆基础主要采用装配式预制基础，分为本体基础、卡盘和拉线基础，如图 2-19 所示。本体基础即底盘，用以承受电杆本体传递的下压力。卡盘承受倾覆力，起稳定电杆的作用。拉线基础承受上拔力的作用，可分为拉盘基础、重力式拉线基础和锚杆拉线基础，一般使用拉盘基础。当土质较差、最大一级拉盘基础也满足不了上拔力的要求时，必须使用重力式拉线基础。锚杆基础是将拉线棒用水泥砂浆或细石混凝土直接锚在岩孔内而成，一般用于微风化或中风化的岩石地基。

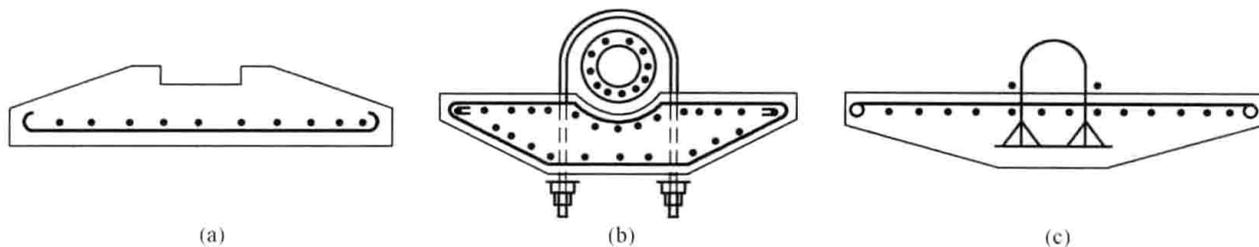


图 2-19 电杆基础

(a) 本体基础；(b) 卡盘；(c) 拉线基础

### 二、铁塔基础

铁塔基础根据铁塔类型、地形地质、施工条件以及承受荷载的不同而不同，常见的有现浇混凝土基础、装配式基础、桩式基础、锚杆基础等，多用现浇混凝土基础。

现浇混凝土基础根据情况可配筋或无筋，塔腿下段主材可直接插入混凝土，或在混凝土内预埋地脚螺栓，以便与塔座连接，如图 2-20 所示。无筋混凝土基础多用于铁塔的上拔腿。

装配式基础（见图 2-21）通常采用镀锌角铁组成格构形基础，铁塔主材下段是基础的一部分。施工时，基坑底层浇制混凝土垫层，装配格构形基础置于其上，回填土夯实即成装配式基础。装配式基础常用于线路基础的抢修。

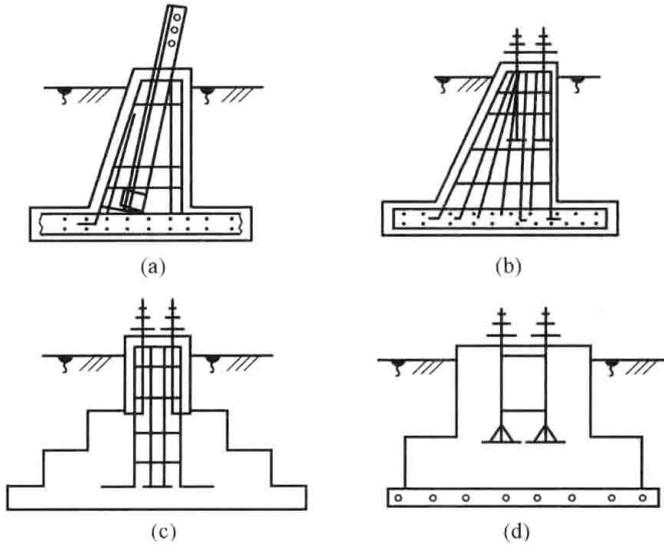


图 2-20 现浇混凝土基础

(a) 主材插入式钢筋混凝土基础；(b) 地脚螺栓式钢筋混凝土基础；  
(c) 直阶式无筋混凝土基础；(d) 无筋混凝土基础

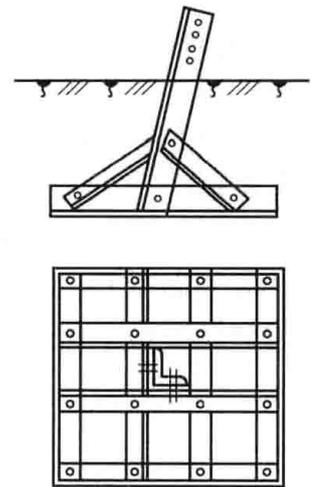


图 2-21 装配式基础

桩式基础（见图 2-22）主要采用钢筋混凝土灌注桩，多用于河滩、淤泥地带等地基为弱土层的塔基以及跨越高塔的基础。

锚杆基础适用于山区岩石地带，利用岩石的整体性和坚固性做成，所以又称为岩石基础。常用锚杆基础如图 2-23 所示。

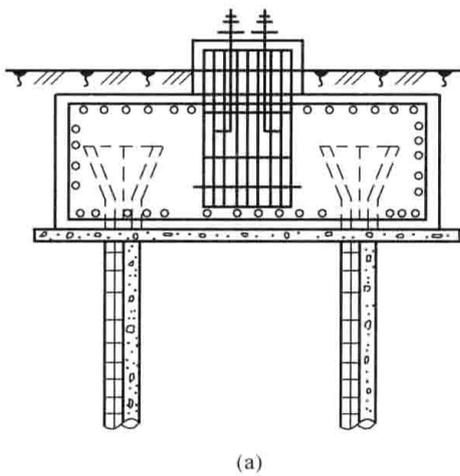


图 2-22 桩式基础

(a) 双桩承台式；(b) 单桩横梁式

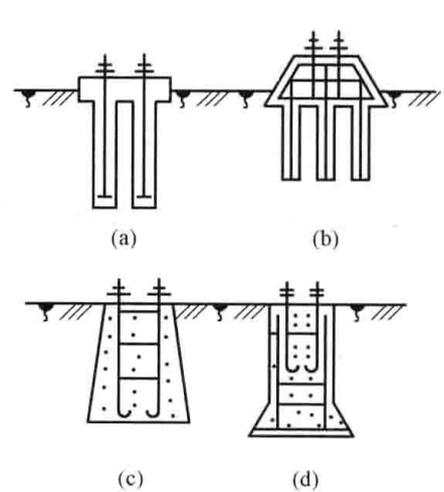


图 2-23 锚杆基础

(a) 直锚式；(b) 承台式；  
(c) 嵌固式；(d) 掏挖式

### 第六节 接 地 装 置

有地线的杆塔应当接地，在雷季干燥季节，杆塔不连地线的工频接地电阻不宜大于表 2-14 所列数值。根据土壤电阻率的大小，接地装置可采用杆塔自然接地或人工设置接地体。土壤电阻率较低的地区，当杆塔的自然接地电阻不大于表 2-14 所列数值时，可不装人工接

地体。如果土壤电阻率超过  $2000\Omega \cdot \text{m}$ ，接地电阻很难降到  $30\Omega$  时，可采用 6~8 根总长不超过 500m 的放射形接地体或连续伸长接地体，其接地电阻不受限制；也可采用物理型降阻剂措施，有效降低接地电阻。放射形接地极每根的最大长度，见表 2-15。

表 2-14 有地线杆塔的工频接地电阻允许值

土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	100 及以下	100 以上至 500	500 以上至 1000	1000 以上至 2000	2000 以上
工频接地电阻 ( $\Omega$ )	10	15	20	25	30

表 2-15 放射形接地极每根的最大长度

土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\leq 500$	$\leq 1000$	$\leq 2000$	$\leq 5000$
最大长度 (m)	40	60	80	100

中性点非直接接地系统的无地线钢筋混凝土电杆和铁塔，在居民区应接地，接地电阻不应超过  $30\Omega$ 。利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆，其钢筋与接地螺母、铁横担或地线支架之间应有可靠的电气连接。外敷的接地引下线可采用镀锌钢绞线，其截面积应按热稳定要求选取且不应小于  $25\text{mm}^2$ 。接地体引出线的截面积不应小于  $50\text{mm}^2$ ，并应进行热稳定验算，引出线的表面应进行有效的防腐处理。

通过耕地的输电线路的接地体，应埋设在耕作深度以下；位于居民区和水田的接地体，应敷成环形，以减小跨步电压。绝缘地线的接地引线和接地装置，长期通电时，必须校验其热稳定，并应设置保护人身安全的防护措施。

## 第七节 导线的排列方式与换位

### 一、导线的排列方式

导线的排列方式主要取决于线路的回路数、线路运行的可靠性、杆塔荷载分布的合理性以及施工安装、带电作业方便，并应使塔头部分结构简单，尺寸小。单回线路的导线常呈三角形、上字形和水平排列，双回线路的导线有伞形、倒伞形、六角形和双三角形排列，如图 2-24 所示。在特殊地段线路导线还有垂直排列等形式。

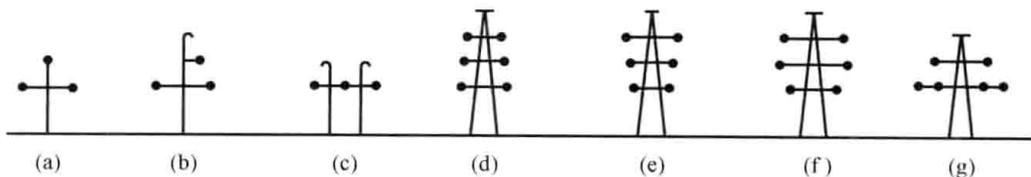


图 2-24 导线的排列方式

- (a) 三角形；(b) 上字形；(c) 水平排列；(d) 伞形；  
(e) 倒伞形；(f) 六角形；(g) 双三角形

运行经验表明，单回线路采用水平排列的运行可靠性比三角形排列好，特别是在重冰区、多雷区和电晕严重的地区。这是因为水平排列的线路杆塔高度较低，雷击机会减少；三角形排列的下层导线因故（如不均匀脱冰时）向上跃起时，易发生相间闪络和导线间相碰事故。但导线水平排列的杆塔比三角形排列的复杂，造价高，并且所需线路走廊也较大。一般

地,普通地区可结合具体情况选择水平排列或三角形排列,重冰区、多雷区宜采用水平排列,电压在 220kV 以下导线截面积不太大的线路采用三角形排列比较经济。

由于伞形排列不便于维护检修,倒伞形排列防雷性比较差,因此目前双回线路同杆架设时多采用六角形排列。这样可以缩短横担长度,减少塔身扭力,获得比较满意的防雷保护角,耐雷水平提高。

## 二、导线的换位

高压输电线路正常运行时,会在架空绝缘地线上感应出静电感应电压和纵感应电动势。静电感应电压是由于三相导线与绝缘地线和大地间的电容耦合产生的。输电线路全线不换位时,220kV 线路的静电感应电压可达 10kV 以上,500kV 线路的静电感应电压在 50~60kV 左右。由于架空地线相对三相导线的空间位置不对称,导线磁通在绝缘地线上产生沿线分布的纵感应电动势。纵感应电动势是沿线叠加的,并与输送容量成正比。220kV 线路输送 150MW·h 时纵感应电动势达 20V/km,500kV 线路输送 1200MW·h 时纵感应电动势达 70V/km。过高的感应电压会造成地线绝缘子间隙放电灼伤损坏,从而造成事故。另外,三相导线的排列不对称时,各相导线的电抗和电纳不相等会造成三相电流不平衡,引起负序电流和零序电流,可能引起系统内电机的过热,并对线路附近的其他弱电线路带来不良影响。解决这些问题的简便途径是输电线路的各相导线在空中轮流交换其位置。

### 1. 换位原理

换位的原理是保证各相导线在空间每一位置的长度总和相等。图 2-25 示出了全线采用一个和两个整循环换位的布置情况。图 2-25 (a) 为一个整循环换位,达到首端和末端相位一致。图 2-25 (b) 为两个整循环换位,达到首端和末端相位一致。与单循环换位相比,多循环换位总的换位处数相对减少,有利于远距离输电线路的安全运行。

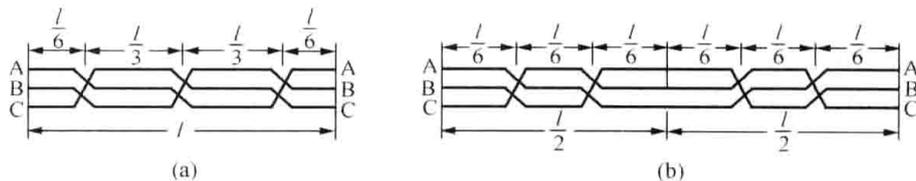


图 2-25 导线换位示意图

(a) 一个循环换位; (b) 两个循环换位

在中性点直接接地的电力网中,长度超过 100km 的输电线路均应换位。换位循环长度不宜大于 200km。如一个变电站某级电压的每回出线虽小于 100km,但其总长度超过 200km,可采用换位或变换各回路的相序排列,以平衡不对称电流。中性点非直接接地的电力网,为降低中性点长期运行中的电位,可用换位或变换线路相序排列的方法来平衡不对称电容电流。

### 2. 换位方式

常见的换位方式有直线杆塔换位(滚式换位)、耐张杆塔换位和悬空换位,如图 2-26 所示。

直线杆塔换位利用三角形排列的直线杆塔实现,在换位处导线有交叉,因而易发生短路现象,因此直线杆塔换位广泛用于冰厚不超过 10mm 的轻冰区。为减小换位处由于排列方式的改变引起的悬垂绝缘子串的偏摆,换位杆塔的中心应偏离线路中心线。

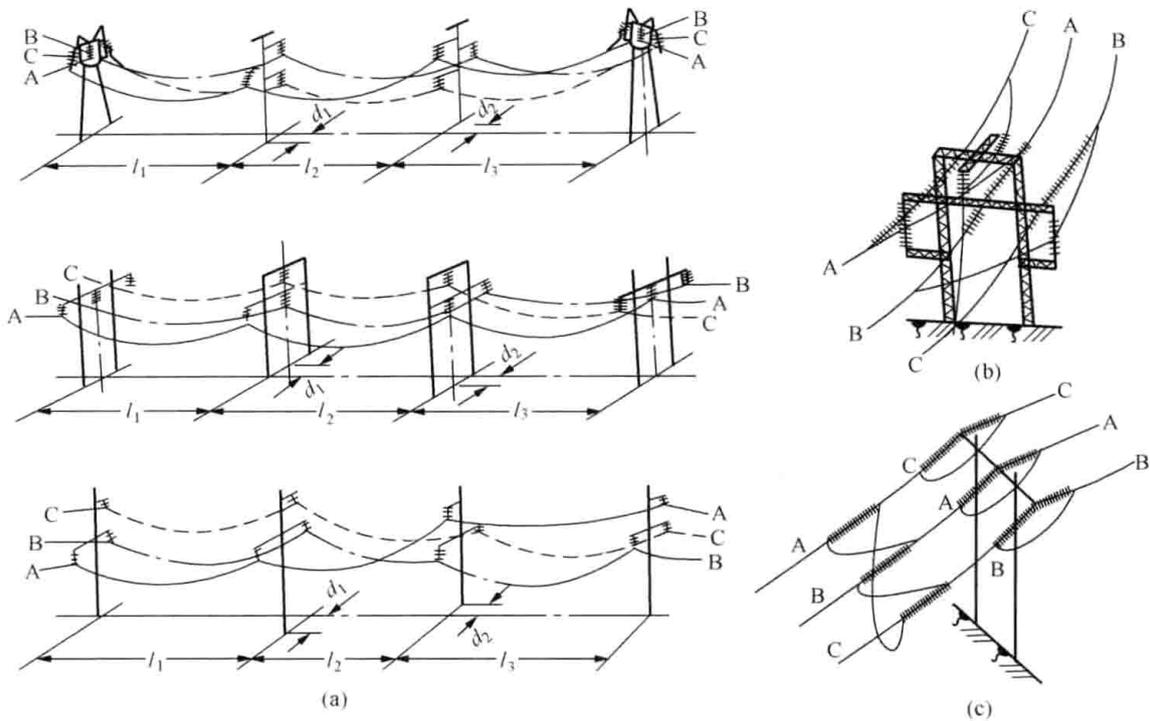


图 2-26 导线的换位方式

(a) 滚式换位；(b) 耐张杆塔换位；(c) 悬空换位

耐张杆塔换位需要特殊的耐张换位杆塔，造价较高，但导线间距比较稳定，运行可靠性高。

悬空换位不需要特殊设计的耐张杆塔，仅在每相导线上再单独串接一组绝缘子串，通过交叉跳接，实现导线的换位。单独串接的绝缘子串承受的是线间电压，其绝缘强度一般应比对地绝缘高 30%~50%。

### 3. 导线换位的优化

导线换位处是线路绝缘的薄弱环节，在满足要求的前提下应尽量简化换位，减少换位处数。由于单回路水平排列线路的对称性，导线 ABC 和 CBA 的排列是等效的，因此只要安排 A、B、C 三相处于中相位置的长度各占线路的 1/3，即可达到换位要求。三角排列线路的换位也可据此进行优化。图 2-27 为两种优化换位方式。图 2-27 (a) 要求  $a+d=b=c=l/3$ ，采用直线杆塔换位时，传统方式需要 5 基换位杆塔，优化方式只需 3 基；图 2-27 (b) 传统方式要求  $a+d=b=c=l/3$ ，优化方式要求  $e+i=f+h=g=l/3$ ，采用直线杆塔换位时，传统方式需要 6 基换位杆塔，优化方式只需 4 基。

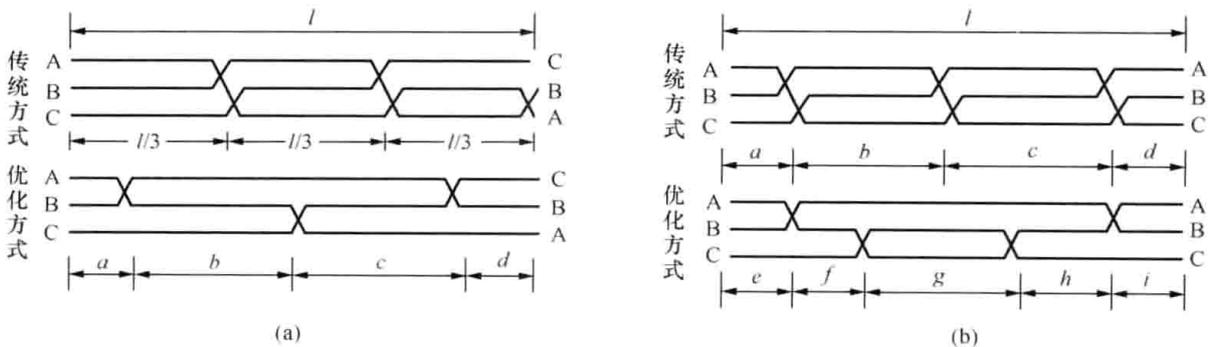


图 2-27 导线的优化换位方式

(a) 换位且倒相；(b) 换位不倒相

### 三、地线的换位

当绝缘地线用作载波通信或屏蔽线，两点及多点接地时，为了降低能量损失，应当进行换位。地线换位应保证对每一种导线排列段，每根地线处于两侧位置的长度相等，并应注意其换位处和导线换位处错开。

地线的换位方式主要有两种：一种是从杆塔顶直接向上或向下交叉绕跳，但要注意地线与杆塔的间隙距离；另一种是在杆塔顶设置针式绝缘子，用以固定交叉跳线，放电间隙制作在针式绝缘子上，这种换位方式工作比较可靠。



### 练 习 题

1. 常用架空导线的型号、规格如何表示？
2. 绝缘子的片数及联数是如何确定的？
3. 架空输电线路的杆塔有哪些类型？
4. 导线为何要进行换位？简述优化换位的基本思想。

## 第三章 设计用气象条件

### 第一节 主要的气象参数

#### 一、主要的气象参数及其对线路的影响

架空输电线路常年在大气中运行，承受着四季气温、风、冰以及雷电等气象变化的影响，主要引起架空线载荷和悬挂曲线长度发生变化，使架空线的张力（应力）、弧垂随之改变，进而影响到杆塔、基础所受荷载大小以及与其他物体间的电气安全距离。一般来说，雨水难以在架空线上停留，雪的密度较小，它们对线路影响不大。雷电对线路的影响，可以用加强防雷措施来解决。风、覆冰和气温对架空输电线路的机械强度和电气间距有较大影响，是线路设计需考虑的主要气象参数，称为气象条件三要素。

风作用于架空线上形成风压，产生水平方向上的荷载。风速越高，风压越大，风载荷也就越大。风载荷使架空线的应力增大，杆塔产生附加弯矩，会引起断线、倒杆事故。微风可以引起架空线的振动，使其疲劳破坏断线。大风可以引起架空线不同步摆动，特殊条件下会引起架空线舞动，造成相间闪络，甚至产生鞭击。风还使悬垂绝缘子串产生偏摆，可造成带电部分与杆塔构件间电气间距减小而发生闪络。

覆冰是一定气象条件下架空线和绝缘子串上出现的冰、霜、雨淞和积雪的通称。覆冰增加了架空线的垂直载荷，使架空线的张力增大；同时也增大了架空线的迎风面积，使其所受水平风载荷增加，加大了断线倒塔的可能。覆冰的垂直载荷使架空线的弧垂增大，造成对地或跨越物的电气距离减小而产生事故。覆冰后，下层架空线脱冰时，弹性能的突然释放使架空线向上跳跃，这种脱冰跳跃可引起与上层架空线之间的闪络。覆冰还使架空线舞动的可能性增大。

气温的变化引起架空线的热胀冷缩。气温降低，架空线线长缩短，张力增大，有可能导致断线。气温升高，线长增加，弧垂变大，有可能保证不了对地或其他跨越物的电气距离。在最高气温下，电流引起的导线温升可能超过允许值，导线因温度升高强度降低而断线。

#### 二、主要气象资料的搜集内容

为了保证架空输电线路的可靠运行，使其机械强度和电气间距满足气象条件变化的要求，必须对沿线地区的气象情况进行全面了解，详细搜集线路设计所需要的气象资料。主要气象资料的搜集内容及用途，见表 3-1。

气象资料应选用线路附近 100km 以内的气象台（站）的记录，当此范围内的气象台（站）较少时，可以扩大搜集范围或向省级气象台搜集。附近已有线路的运行经验，是气象资料的重要来源。邮电、铁路和军事部门等其他非专业气象单位，也是气象资料的重要搜集对象，但其数据应交有关气象单位鉴定。必要时应进行实地考察，访问当地群众。若沿线气象台（站）的记录存在很大差异且线路较长（100km 以上）时，应考虑分为若干气象区段。

表 3-1 主要气象资料及其用途

序号	搜集内容	用途
1	最高气温	计算架空线的最大弧垂, 保证对地或跨越物具有一定的安全距离
2	最低气温	计算架空线可能产生的最大应力, 检查悬垂绝缘子串的上扬等
3	平均气温	微风振动的防振设计条件, 计算内过电压下的电气间距, 耐张绝缘子串的倒挂等
4	最高气温月的最高平均气温	计算导线的发热和温升
5	最大风速及相应月的平均气温	考虑架空线和杆塔强度的基本条件, 也用于检查架空线、悬垂绝缘子串的风偏
6	地区最多风向及其出现频率	用于架空线的防振、防腐及绝缘的防污设计
7	覆冰厚度	架空线和杆塔强度的设计依据, 计算架空线的最大弧垂, 验算不均匀覆(脱)冰时架空线的不平衡张力、上下层架空线间的接近距离等
8	雨天、雾淞天、雪天的持续小时数	计算电晕损失的基本数据
9	平均雷电日数(或小时数)	防雷设计的依据
10	土壤冻结深度	用于杆塔基础设计
11	常年洪水位及最高航行水位、相应气温	用于确定跨越杆塔高度, 验算交叉跨越距离

## 第二节 气象参数值的选取

搜集来的沿线气象资料, 一般需要经过数理统计分析计算, 使其符合线路设计有关标准的要求。

### 一、气象条件的重现期

气象条件的重现期是指该气象条件“多少年一遇”, 如年最大风速超过某一风速  $v_R$  的强风平均每  $R$  年发生一次, 则  $R$  即为风速  $v_R$  的重现期。GB 50545—2010《110~750 kV 架空输电线路设计规范》和 GB 50665—2011《1000kV 架空输电线路设计规范》(统称规范)规定了不同电压等级线路及其大跨越的基本风速和设计冰厚的重现期, 见表 3-2。

表 3-2 设计气象条件的重现期

电压等级 (kV)	110~330	500~750	1000
重现期 (年)	30	50	100

大跨越是指线路跨越通航大河流、湖泊或海峡等, 因档距较大 (1000m 以上) 或杆塔较高 (100m 以上), 导线选型或杆塔设计需特殊考虑, 且发生故障时严重影响航运或修复特别困难的耐张段。

### 二、最大设计风速的确定

风速是划分为等级的, 风速与风级的视力鉴别方法见表 3-3。因 13~17 级风力无名称

和征象对应，故表中未列入。

规范规定了架空输电线路的基本风速。确定基本风速时，应以 10min 时距平均的年最大风速为样本，并宜采用极值 I 型分布作为概率模型；统计风速的高度，对一般线路应取离地面 10m，大跨越应取离历年大风季节平均最低水位以上 10m。

许多气象台（站）早期采用的是风压板一天观测 4 次的 2min 平均风速，需将这种风速值转换成规范要求的自记 10min 时距平均风速值，即要进行风速的次时换算。根据 30 年、50 年或 100 年一遇的年最大风速重现期，需要经过概率计算得到基本风速。由于风速仪的测量高度和规范规定的统计高度不尽相同，线路的平均高度一般也不是统计高度，因此还需要进行风速的高度换算。

表 3-3 风级风速鉴别表

风力等级	名称	相当风速 (m/s)		海面物征象			陆地物征象
		范围	中值	一般浪高 (m)	最高浪高 (m)	海岸渔船动态	
0	无风	0~0.2	0.1			海面平静	静、烟直立
1	软风	0.3~1.5	0.9	0.1	0.1	微波如鱼鳞状，没有浪花。一般渔船正好使舵	烟能表示风向，但风向标不能转动
2	轻风	1.6~3.3	2.5	0.2	0.3	渔船张帆时可行 2~3km/h	人面感觉有风，树叶有微响，风向标能移动
3	微风	3.4~5.4	4.4	0.6	1.0	渔船感觉簸动，可随风移行 5~6km/h	树叶和微枝摇动不息，旌旗展开
4	和风	5.5~7.9	6.7	1.0	1.5	渔船满帆时，可使渔船倾斜一方	能吹起地面尘土和纸张，树的小枝摇动
5	劲风	8~10.7	9.4	2.0	2.5	渔船收帆（即收去帆之一节）	有叶的小树摇摆，内陆的水面有小波
6	强风	10.8~13.8	12.3	3.0	4.0	渔船加倍收帆，捕渔需注意风险	大树枝摇动，电线呼呼有声，举伞困难
7	疾风	13.9~17.1	15.5	4.0	5.5	渔船不再出港，在海里下锚	全树摇动，大树枝弯下来，逆风步行感觉不便
8	大风	17.2~20.7	19.0	5.5	7.5	所有近海渔船都要靠港，停留不出	可折毁树枝，人向前行感觉阻力甚大
9	烈风	20.8~24.4	22.6	7.0	10.0	汽船航行困难	建筑物有小损，烟囱顶盖和平瓦移动
10	狂风	24.5~28.4	26.5	9.0	12.5	汽船航行颇危险	陆上少见，见时可使树木拔出，建筑物损坏较重
11	暴风	28.5~32.6	30.6	11.5	16.0	汽船遇之极危险	陆上很少见，有则必有广泛破坏
12	飓风	32.7~36.9	34.8	14.0	—	海浪滔天，能见度严重受到影响	陆上绝少见，其摧毁力极大

## 1. 风速的次时换算

欲将定时 4 次 2min 平均风速  $v_2$  换算成自记 10min 时距平均风速  $v_{10}$ , 需要有两种观测方法的平行测量记录, 然后通过相关分析建立二者之间的回归方程式。常用的一元线性回归方程式为

$$v_{10} = Av_2 + B \quad (3-1)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n v_{2i} v_{10i} - n \bar{v}_2 \bar{v}_{10}}{\sum_{i=1}^n v_{2i}^2 - n \bar{v}_2^2} \quad (3-2)$$

$$B = \bar{v}_{10} - A \bar{v}_2 \quad (3-3)$$

式中  $A$ ——换算系数;

$B$ ——换算系数, m/s;

$v_{2i}$ 、 $v_{10i}$ ——两种观测方法的第  $i$  对平行观测记录值;

$\bar{v}_2$ 、 $\bar{v}_{10}$ ——分别为两种观测记录的平均值,  $\bar{v}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{2i}$ ,  $\bar{v}_{10} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{10i}$ ;

$n$ ——两种观测方法的平行观测记录的总对数。

由此得到的回归方程, 需经过相关检验才能应用。通常利用相关系数  $\rho$  表示  $v_2$  与  $v_{10}$  之间的密切相关程度,  $\rho$  值在 0~1 之间, 数值越大表示  $v_2$  与  $v_{10}$  关系越密切, 一般认为  $\rho \geq 0.85$  为好。 $\rho$  值接近于 0, 表示不适合采用线性回归, 这时可采用抛物线或其他曲线回归。相关系数  $\rho$  可按下面公式计算

$$\rho = \frac{n \sum_{i=1}^n v_{2i} v_{10i} - \sum_{i=1}^n v_{2i} \sum_{i=1}^n v_{10i}}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n v_{2i}^2 - \left( \sum_{i=1}^n v_{2i} \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n v_{10i}^2 - \left( \sum_{i=1}^n v_{10i} \right)^2 \right]}} \quad (3-4)$$

**【例 3-1】** 某气象台 5 年间的 4 次定时 2min 平均风速和相应的自记 10min 时距平均风速的观测值如表 3-4 所示, 试求  $v_2$  与  $v_{10}$  的关系式。

表 3-4

某气象台  $v_2$  与  $v_{10}$  的观测资料

单位: m/s

年份	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	风别												
1954	自记 $v_{10}$	20.7	28.3	21.0	29.7	25.0	17.7	13.3	13.3	16.3	20.0	15.2	17.7
	风压板 $v_2$	16	20	16	16	21	10	10	10	12	12	18	12
1955	自记 $v_{10}$	16.7	20.8	19.7	26.7	15.7	14.5	11.8	16.7	21.0	18.0	21.0	20.7
	风压板 $v_2$	14	16	18	18	12	12	14	10	10	14	14	14
1956	自记 $v_{10}$	22.2	23.2	22.7	27.5	20.8	20.0	15.5	11.7	13.0	26.3	20.7	13.3
	风压板 $v_2$	18	18	16	24	20	14	12	10	10	12	12	16
1957	自记 $v_{10}$	12.3	12.0	15.0	20.2	20.8	16.0	12.5	13.5	16.8	20.7	16.7	20.7
	风压板 $v_2$	10	9	12	14	16	14	10	12	12	14	12	12
1958	自记 $v_{10}$	17.1	15.2	18.7	17.3	18.0	17.8	17.3	9.2	12.0	13.0	14.3	13.0
	风压板 $v_2$	16	16	20	16	18	16	9	9	14	12	12	12

解 已知  $n = 60$ , 计算得  $\sum_{i=1}^n v_{2i} = 841.0 \text{ m/s}$ ,  $\sum_{i=1}^n v_{10i} = 1082.10 \text{ m/s}$ ,  $\sum_{i=1}^n v_{2i}^2 = 12520 (\text{m/s})^2$ ,  $\sum_{i=1}^n v_{10i}^2 = 20788 (\text{m/s})^2$ ,  $\sum_{i=1}^n v_{2i} v_{10i} = 15761 (\text{m/s})^2$ , 所以

$$\bar{v}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{2i} = \frac{841.0}{60} = 14.02 (\text{m/s}), \quad \bar{v}_{10} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{10i} = \frac{1082.1}{60} = 18.03 (\text{m/s})$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n v_{2i} v_{10i} - n \bar{v}_2 \bar{v}_{10}}{\sum_{i=1}^n v_{2i}^2 - n \bar{v}_2^2} = \frac{15761 - 60 \times 14.02 \times 18.03}{12520 - 60 \times 14.02^2} = 0.818$$

$$B = \bar{v}_{10} - A \bar{v}_2 = 18.03 - 0.818 \times 14.02 = 6.56 (\text{m/s})$$

故当地  $v_2$  与  $v_{10}$  之间的换算关系式为

$$v_{10} = 0.818 v_2 + 6.56$$

相关系数

$$\rho = \frac{60 \times 15761 - 841 \times 1082.1}{\sqrt{(60 \times 12520 - 841^2) \times (60 \times 20788 - 1082.1^2)}} = 0.615$$

由检验得知, 得到的  $v_2$  与  $v_{10}$  的次时换算公式可用。

现将我国各地 4 次定时 2min 平均风速与自记 10min 时距平均风速的次时换算系数  $A$ 、 $B$  的值列于表 3-5, 供参考。

表 3-5 风速的次时换算系数

地 区	$A$	$B(\text{m/s})$	应 用 范 围
华 北	0.822	7.82	北京、天津、河北、山西、河南、内蒙、关中、汉中
东 北	1.04	3.20	辽宁、吉林、黑龙江
西 北	1.004	2.57	陕北、甘肃、宁夏、青海、新疆、西藏
西 南	0.751	6.17	限于贵州、云南
四 川	1.25	0	限于四川
湖 北	0.732	7.00	湖北、江西
湖 南	0.68	9.54	
广 东	1.03	4.15	广东、广西、福建、台湾
江 苏	0.78	8.41	上海、江苏
山 东	0.855	5.44	山东、安徽
浙 江	1.262	0.53	限于浙江

## 2. 基本风速

基本风速是指当地空旷平坦地面上 10m 高度处, 10min 时距平均的年最大风速观测值, 经过概率计算得出的相应重现期下的风速。设年最大风速  $v$  的概率符合极值 I 型分布, 即

$$F(v) = \exp\{-\exp[-a(v-b)]\}$$

式中  $a$ ——分布的尺度参数,  $a = \frac{1.28255}{\sigma}$ ;

$b$ ——分布的位置参数, 即分布的众值,  $b = \mu - \frac{0.57722}{a}$ ;

$\mu$ 、 $\sigma$ ——分别为随机变量  $v$  的均值和标准差。

由于搜集来的年最大风速样本是有限的, 需要用有限样本的均值  $\bar{v}$  和标准差  $s$  作为  $\mu$  和  $\sigma$  的近似估计。均值  $\bar{v}$  和标准差  $s$  分别为

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3-5)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (3-6)$$

此时, 尺度参数和位置参数分别按下式取值

$$a = \frac{c_1}{s} \quad (3-7)$$

$$b = \bar{v} - \frac{c_2}{a} \quad (3-8)$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$ ——与样本中的年最大风速的个数  $n$  有关的系数, 可查表 3-6。

表 3-6 系数  $c_1$  和  $c_2$

$n$	$c_1$	$c_2$	$n$	$c_1$	$c_2$
10	0.9497	0.4952	60	1.17465	0.55208
15	1.02057	0.5182	70	1.18536	0.55477
20	1.06283	0.52355	80	1.19385	0.55688
25	1.09145	0.53086	90	1.20649	0.55860
30	1.11238	0.53622	100	1.20649	0.56002
35	1.12847	0.54034	250	1.24292	0.56878
40	1.14132	0.54362	500	1.25880	0.57240
45	1.15185	0.54630	1000	1.26851	0.57450
50	1.16066	0.54853	$\infty$	1.28255	0.57722

重现期为  $R$  年, 说明大于某一风速  $v_R$  的强风的发生概率为  $\frac{1}{R}$ , 则有

$$1 - F(v_R) = 1 - \exp\{-\exp[-a(v_R - b)]\} = \frac{1}{R}$$

从而

$$v_R = b - \frac{1}{a} \ln \left[ \ln \left( \frac{R}{R-1} \right) \right] \quad (3-9)$$

### 3. 风速的高度换算

在大气边界层内, 风速随离地面高度增加而增大。当气压场不随高度变化时, 风速随高度增大变化的规律, 主要取决于地面粗糙度和温度垂直梯度。GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》将地面粗糙度等级划分为 A、B、C、D 四类: A 类指近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠, B 类指空旷田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇, C 类指有密集建筑群的城市市区, D 类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。当离地面达到一

定高度时，风速不再受地面粗糙度的影响，这一高度称之为梯度风高度，相应风速称为梯度风速。A、B、C、D 四类地面粗糙度地区的梯度高度分别为 300、350、450m 和 550m；四类地区的截断高度分别为 5、10、15m 和 30m，在截断高度以下的风速与截断高度处的风速相同。

(1) 基准风速。基准风速是指风速仪位于标准高度 10m 时测得的风速。当风速仪高度与标准高度相差过大时，需将风速仪高度处的风速换算为标准高度处的基准风速。由于风速仪一般位于空旷平坦的地区，因此可按下式进行换算

$$v_0 = v_f \left( \frac{10}{h_0} \right)^z \quad (3-10)$$

式中  $v_0$ ——标准高度 10m 处的基准风速，m/s；

$v_f$ ——风速仪观测风速，m/s；

$h_0$ ——风速仪实际高度，m；

$z$ ——空旷平坦地区地面粗糙度指数， $z=0.15$ 。

(2) 风速的高度换算。在输电线路涉及的近地面范围内，风速的高度变化基本符合指数律，可用下面公式

$$v = \beta \left( \frac{h}{10} \right)^z v_0 = \alpha v_0 \quad (3-11)$$

$$\alpha = \beta \left( \frac{h}{10} \right)^z \quad (3-12)$$

式中  $v$ ——线路设计高度  $h$  处的风速，m/s；

$v_0$ ——标准高度 10m 处的风速，m/s；

$\alpha$ ——风速高度换算系数；

$z$ 、 $\beta$ ——粗糙度指数和修正系数，二者与地面粗糙度等级有关。

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》折算的  $z$ 、 $\beta$  列于表 3-7。将表中  $\beta$ 、 $z$  代入式 (3-11)，可见式 (3-10) 实际是 B 类地面粗糙度等级的风速高度换算公式。

表 3-7 粗糙度指数  $z$  和修正系数  $\beta$

粗糙度等级	A	B	C	D
$z$	0.12	0.15	0.22	0.30
$\beta$	1.1331	1.000	0.7376	0.5119

架空输电线路的最大设计风速，应按基本风速和线路的设计高度经过高度换算得到。其他工况的风速，无需进行高度换算。线路的设计高度应根据架空线的平均高度确定。设计初期无具体数据时，对 110~330kV 线路下导线的平均高度一般可取 15m，500~750kV 线路下导线的平均高度一般可取 20m，1000kV 线路导线的平均高度一般可取 30m，大跨越除外。

**【例 3-2】** 某地区 1905~1957 年的 48 年（中间缺 5 年）中 20m 高度自记 10min 平均年最大风速值如表 3-8 所示。试求该地区设计高度 15m 处 30 年、50 年重现期的年最大风速。地面粗糙度等级按 B 类考虑。

表 3-8 某地区 20m 高度自记 10min 时距平均年最大风速

年 份	1905	1906	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916	1917	1918	1919	1920
最大风速 (m/s)	16.4	18.1	17.7	20.1	20.3	21.1	19.4	19.7	21.5	20.8	17.7	15.8	15.3	16.1	16.3	15.7
年 份	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936
最大风速 (m/s)	15.4	15.5	17.0	15.4	13.0	14.0	15.2	13.5	15.0	24.1	21.0	20.2	20.9	19.2	22.1	24.6
年 份	1937	1938	1939	1940	1941	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957
最大风速 (m/s)	18.9	21.3	19.5	23.3	19.3	16.8	16.7	18.0	14.6	15.0	16.7	17.0	29.7	26.7	36.6	20.8

解 (1) 计算样本中的 48 个年最大风速的均值  $\bar{v}$  和标准差  $s$  分别为

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i = \frac{909}{48} = 18.9375(\text{m/s})$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} = \sqrt{\frac{885.3525}{48-1}} = 4.3402(\text{m/s})$$

(2) 进行重现期的概率计算。由于风速个数  $n=48$ , 查表 3-6 并进行线性插值, 得到修正系数  $c_1$ 、 $c_2$  为

$$c_1 = 1.15185 + \frac{1.16066 - 1.15185}{50 - 45} \times (48 - 45) = 1.15714$$

$$c_2 = 0.54630 + \frac{0.54853 - 0.54630}{50 - 45} \times (48 - 45) = 0.54764$$

分布的尺度参数  $a$  和位置参数  $b$  为

$$a = \frac{c_1}{s} = \frac{1.15714}{4.3402} = 0.26661(\text{m/s})^{-1}$$

$$b = \bar{v} - \frac{c_2}{a} = 18.9375 - \frac{0.54764}{0.26661} = 16.8834(\text{m/s})$$

重现期  $R=30$  年 20m 高度的年最大风速为

$$v_{30} = b - \frac{1}{a} \ln \left[ \ln \left( \frac{R}{R-1} \right) \right] = 16.8834 - \frac{1}{0.26661} \ln \left[ \ln \left( \frac{30}{30-1} \right) \right] = 29.577(\text{m/s})$$

重现期  $R=50$  年 20m 高度的年最大风速为

$$v_{50} = b - \frac{1}{a} \ln \left[ \ln \left( \frac{R}{R-1} \right) \right] = 16.8834 - \frac{1}{0.26661} \ln \left[ \ln \left( \frac{50}{50-1} \right) \right] = 31.519(\text{m/s})$$

(3) 进行高度换算。理应先将 20m 风速仪高度处的风速换算为 10m 标准高度处的基准风速, 再将基准风速换算为 15m 设计高度处的风速, 但由于 B 类地区二者的换算公式相同, 因此可直接将风速仪高度风速换算为设计高度风速。根据式 (3-12), 风速高度变化系数为

$$\alpha = \beta \left( \frac{h}{h_f} \right)^z = 1.0 \times \left( \frac{15}{20} \right)^{0.15} = 0.9578$$

所以 15m 设计高度处 30 年、50 年重现期的年最大风速分别为

$$v'_{30} = \alpha v_{30} = 0.9578 \times 29.577 = 28.329(\text{m/s})$$

$$v'_{50} = \alpha v_{50} = 0.9578 \times 31.519 = 30.189(\text{m/s})$$

#### 4. 基本风速的一般规定

110~330kV 输电线路的基本风速不宜低于 23.5m/s, 500~1000kV 输电线路的基本风

速不宜低于 27m/s，必要时还宜按稀有风速条件进行验算。

山区输电线路宜采用统计分析和对比观测等方法，由邻近地区气象台、站的气象资料推算山区的基本风速，并结合实际运行经验确定。当无可靠资料时，宜将附近平原地区基本风速的统计值提高 10% 选用。

大跨越的基本风速，当无可靠资料时，宜将附近陆上输电线路的风速统计值换算到跨越处历年大风季节平均最低水位以上 10m 处，并增加 10%，考虑水面影响再增加 10% 后选用。大跨越的基本风速，不应低于相连接的陆上输电线路的基本风速。

设计时应加强对沿线已建线路设计、运行情况的调查，并应考虑微地形、微气象条件以及导线易舞动地区的影响。如输电线路位于河岸、湖岸、高峰以及山谷口等容易产生强风的地带时，其基本风速应较附近一般地区适当增大。

### 三、覆冰厚度的选取

空气中的“过冷却”水滴及湿雪下落过程中碰到温度低于 0℃ 的架空线后，会在架空线表面冻结成冰。覆冰大致可分为雾凇冰和雨凇冰两类。雾凇冰不密实，呈针状或羽毛状结晶，密度较小，约  $(0.1 \sim 0.4) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。雨凇冻结成浑然一体的透明状冰壳，附着力很强，密度较大，约  $(0.5 \sim 0.9) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。架空线覆冰常指雨凇冰而言。

覆冰的形成需要一定的气象条件，一般多在气温  $-10 \sim 0^\circ\text{C}$ 、风速  $5 \sim 15 \text{ m/s}$ 、湿度约 80% 以上时发生。覆冰还与地形、地势条件很有关系。平原上的突出高地、暴露的丘陵、高海拔地区以及迎风山坡等处，覆冰情况相对比较严重。图 3-1 是某线路的覆冰情况。

架空线上的实际覆冰具有不同的断面形状，厚度不均匀。为便于设计计算，需将实际覆冰折算成具有相同圆环形断面、厚度均匀的理想覆冰。架空线的覆冰厚度指的就是这种理想覆冰的厚度。将实际覆冰折算成理想覆冰的方法有多种，常用的有椭圆法和测总重法。

#### 1. 椭圆法

首先测量实际覆冰断面的长径  $D$  和短径  $B$ ，如图 3-2 所示；以长、短径作椭圆，将此椭圆的面积近似作为实际覆冰的断面积，令其等于理想覆冰的断面积，从而求出理想覆冰厚度  $b$ 。

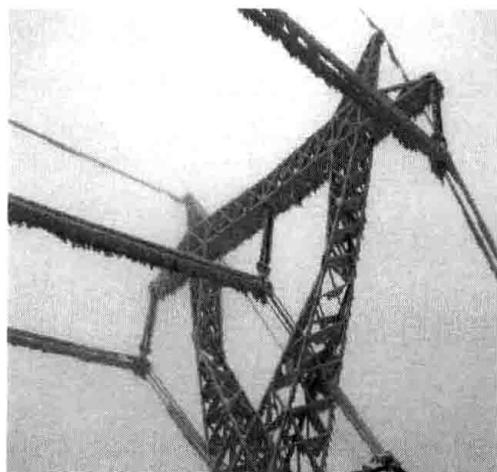


图 3-1 某线路的覆冰情况

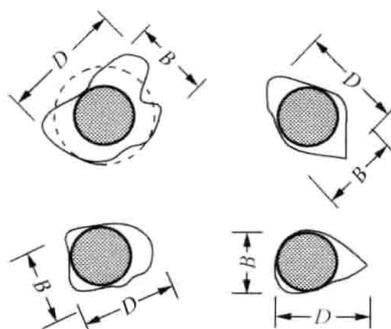


图 3-2 不同断面形状的覆冰

设架空线的半径为  $r$ （无冰时），覆冰厚度为  $b$ ，根据折算前后覆冰断面积相等，有

$$\pi \left( \frac{D}{2} \times \frac{B}{2} - r^2 \right) = \pi [(r+b)^2 - r^2]$$

所以

$$b = \sqrt{\frac{DB}{4}} - r \quad (3-13)$$

## 2. 测总重法

测量架空线覆冰后单位长度的总重量，减去架空线未覆冰时单位长度的重量后，令其与理想覆冰的单位长度圆环形断面的计算重量相等，即可算得覆冰厚度  $b$ 。因为

$$p_3 - p_1 = \pi\gamma[(r+b)^2 - r^2]$$

所以

$$b = \sqrt{r^2 + \frac{p_3 - p_1}{\pi\gamma}} - r \quad (3-14)$$

式中  $p_1$ ——架空线的单位长度自重；

$p_3$ ——架空线覆冰后的单位长度总重；

$\gamma$ ——覆冰比重，对雨淞  $\gamma=0.9$ 。

由于目前对架空线覆冰方面的气象观测资料的积累仍然不多，因此在设计输电线路时，要对已有电力线路、通信线路以及自然物上的覆冰情况给予足够重视，并结合新建线路经过地区的具体特点确定设计用覆冰厚度。同一路通过地区的覆冰情况不同时，可考虑分不同的区段，采用不同的覆冰厚度。

根据理想覆冰厚度的不同，线路通过地区分为轻冰区（无冰或冰厚 5、10mm）、中冰区（冰厚 15、20mm）和重冰区（冰厚 20、30、40、50mm），必要时还宜按稀有覆冰条件进行验算。

除无冰区外，大跨越的设计冰厚宜较附近一般输电线路的设计覆冰增加 5mm。

设计杆塔的地线支架机械强度时，除无冰区外，地线的设计冰厚应较导线增加 5mm。

## 四、气温的选取

架空输电线路设计用气温值，应符合下面的规定：

- (1) 最高气温一般为  $40^{\circ}\text{C}$ ，不考虑个别高于或低于该气温值的记录。
- (2) 最低气温应偏低地取 5 的倍数。如统计得到的最低气温为  $-8^{\circ}\text{C}$  时，应取为  $-10^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 对年平均气温。如该地区其值在  $3\sim 17^{\circ}\text{C}$  之间时，取与此数邻近的 5 的倍数；如该地区其值小于  $3^{\circ}\text{C}$  和大于  $17^{\circ}\text{C}$  时，分别将年平均气温减少  $3^{\circ}\text{C}$  和  $5^{\circ}\text{C}$  后，再取与此数相邻的 5 的倍数。
- (4) 基本风速时的月平均气温，应偏低地取 5 的倍数。

## 第三节 设计用气象条件的组合

### 一、对架空输电线路的要求

风、覆冰和气温三要素对输电线路的安全运行均有很大的影响，其值的选取应符合整个线路的技术经济性的要求，并保证架空输电线路安全地施工和运行检修。架空输电线路应保证：

- (1) 在大风、覆冰和最低气温下，仍能正常运行。
- (2) 在长期的运行中，架空线应具有足够的耐振性能。

(3) 在正常运行情况下, 任何季节(最大风速、最厚覆冰或最高气温)架空线对地、杆塔或其他物体均有足够的安全距离。

(4) 在稀有气象验算条件下, 不发生杆塔倾覆和断线。

(5) 在安装施工过程中, 不发生人身、设备损坏事故。

(6) 在断线事故及不平衡张力情况下, 不倒杆, 事故不扩大。

设计时并不能将三要素出现的最不利情况进行简单叠加, 因为线路运行中的实际气象条件虽然是风、覆冰、气温等气象参数的组合, 但最大风速、最厚覆冰、最低(高)气温通常并不同时出现。因此必须根据线路运行、检修和施工中可能遇到的情况和实际运行经验, 对原始气象资料慎重地分析, 在数理统计分析基础上合理地组合设计用气象条件。

## 二、各种气象条件的组合

### 1. 线路正常运行情况下的气象组合

在正常运行情况下, 最大风速、最厚覆冰或最低气温是架空线和杆塔受到较大荷载时的气象条件。由于最大风速多在夏秋季发生, 最低气温多在冬季无风时出现, 而且最大风速和最低气温时均无覆冰出现, 因此线路正常运行情况下的气象组合有:

(1) 最大风速: 最大设计风速, 无冰, 相应的月平均气温。该气象组合主要用于计算架空线和杆塔的强度或刚度, 校验工作电压下的电气间距。

(2) 最低气温: 最低气温, 无冰, 无风。该气象组合主要用于架空线的强度设计, 悬垂串的上扬校验。

(3) 覆冰有风(最厚覆冰): 最厚覆冰, 相应风速, 气温 $-5^{\circ}\text{C}$ 。根据雨淞形成规律, 相应风速一般为 $10\text{m/s}$ , 当有可靠资料表明需加大风速时可采用 $15\text{m/s}$ 。该气象组合是架空线和杆塔强度、刚度的设计依据, 也是风偏后边导线对地和凸出物电气间距的校验条件。

(4) 覆冰无风(最大垂直比载): 最厚覆冰, 无风, 气温 $-5^{\circ}\text{C}$ 。该气象组合是对地和跨越物电气间距的校验条件。

(5) 最高气温: 最高气温, 无冰, 无风。该气象组合是对地和跨越物电气间距的校验条件, 也是计算导线发热的条件。

### 2. 线路耐振计算用气象组合

线路设计中, 应保证架空线具有足够的耐振能力。架空线的应力越高, 振动疲劳破坏越严重, 因此应将架空线的使用应力控制在一定的限度内。由于线路微风振动一年四季中经常发生, 故控制其平均运行应力的气象组合为无风, 无冰, 年平均气温。

### 3. 雷电过电压气象组合

雷电过电压是指由于雷电的作用在导线上产生的过电压, 也称外过电压。为了保证在雷电活动期间线路不发生闪络, 要求塔头尺寸应能保证相应气象条件下导线风偏后对凸出物的距离, 档距中央应保证导线与架空地线的间距大于规定值。所以, 气象组合如下:

(1) 外过有风: 温度 $15^{\circ}\text{C}$ , 相应风速, 无冰。在最大设计风速小于 $35\text{m/s}$ 的地区, 外过风速宜取 $10\text{m/s}$ , 不小于 $35\text{m/s}$ 的地区宜取 $15\text{m/s}$ 。该气象组合主要用于校验悬垂串风偏后的电气间距。

(2) 外过无风: 温度 $15^{\circ}\text{C}$ , 无风, 无冰。该气象组合主要用于验算架空地线对档距中央导线的保护。

#### 4. 操作过电压气象组合

操作过电压是由于大型设备和系统的投切在导线上产生的过电压, 也称内过电压, 其气象组合为: 年均气温, 无冰, 0.5 倍的最大设计风速 (不低于 15m/s)。该气象组合主要用于校验悬垂串风偏后的电气间距。

#### 5. 线路安装和检修情况下的气象组合

(1) 安装气象: 风速 10m/s, 无冰, 相应气温。相应气温应按表 3-9 取值。对于冰、风中的事故抢修, 安装中途出现大风等其他特殊情况, 要靠采取临时措施来解决。对于 6 级以上大风等严重气象条件, 则应暂停高空作业。

表 3-9 安装气温对应表

最低气温 (°C)	-40、-30	-20	-10	-0
安装气温 (°C)	-15	-10	-5	5

(2) 带电作业: 风速 10m/s, 无冰, 气温 15°C。该气象组合用于带电作业的间距校验。

#### 6. 线路断线事故情况下的气象组合

断线事故一般系外力所致, 与气象条件无明显的规律联系。计算断线情况的目的是, 主要是为了校验杆塔、绝缘子和金具的强度, 校验转动横担、释放型线夹是否动作, 校验邻档断线时跨越档的电气距离等。根据各地的实际运行经验, 断线事故的气象组合是:

(1) 一般情况: 无风, 有冰, 气温 -5°C; 无冰地区按无风, 无冰, 气温 -5°C 考虑。

(2) 校验邻档断线: 无风, 无冰, 气温 15°C。

### 三、典型气象区

为了设计、制造上的标准化和统一性, 考虑我国主要地区的实际气象情况, 设计规范制定了我国典型气象区, 如表 3-10 所示。当所设计线路的实际气象条件同典型气象区中的某区接近时, 一般应采用典型气象区所列气象数据, 以减少工作量, 提高标准化水平。

由于我国幅员辽阔, 气象情况复杂多样, 九个典型气象区不能完全包含各地的实际气象情况, 各地方又根据各地区的气象特点, 划分出各地的气象分区。

表 3-10 全国典型气象条件

典型气象区	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
大气 温度 (°C)	最高温	+40								
	最低温	-5	-10	-10	-20	-10	-20	-40	-20	-20
	覆冰	-5								
	基本风速	+10	+10	-5	-5	+10	-5	-5	-5	-5
	安装	0	0	-5	-10	-5	-10	-15	-10	-10
	雷电过电压	+15								
	操作过电压、 年均气温	+20	+15	+15	+10	+15	+10	-5	+10	+10

续表

典型气象区		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
风速 (m/s)	基本风速	31.5	27.0	23.5	23.5	27.0	23.5	27.0	27.0	27.0
	覆冰	10*							15	
	安装	10								
	雷电过电压	15	10							
	操作过电压	0.5 $v_{\max}$ (不低于 15m/s)								
覆冰厚度 (mm)		0	5	5	5	10	10	10	15	20
冰的密度 (g/cm <sup>3</sup> )		0.9								

\* 一般情况下覆冰风速 10m/s, 当有可靠资料表明需加大风速时可取 15m/s。

### 练 习 题

1. 何为气象条件三要素? 各对架空线路有何影响?
2. 贵州省 2min 平均最大风速是 25m/s, 连续自记 10min 的平均最大风速是多少?
3. 湖北某气象台的风速仪高度为 10m, 2min 平均最大风速  $v_2=25\text{m/s}$ , 该地区为 B 类地区, 试求 15m 高度处的最大设计风速。
4. 求 [例 3-2] 中某地区 100 年一遇的 30m 高度的最大设计风速是多少?
5. 输电线路设计用气象条件组合有哪几种? 各有什么用途? 其相应的气象三要素参数值是如何规定的?
6. 我国设计用气象条件分几个典型气象区? 请列出第 V 典型气象区的气象组合参数表。

## 第四章 架空线的机械物理特性和比载

### 第一节 架空线的机械物理特性

架空输电线路中最广泛使用的架空线是钢芯铝绞线,其结构较复杂,因此着重研究钢芯铝绞线的机械物理特性,其他类型架空线的机械物理特性可类似得到。在架空线的机械物理特性中,与线路设计密切相关的主要有弹性系数、温度膨胀系数、抗拉强度等。

#### 一、钢芯铝绞线的综合弹性系数

钢芯铝绞线由具有不同弹性系数的钢线和铝线两部分组成,在受到拉力  $T$  作用时,钢线部分具有应力  $\sigma_s$ ,铝线部分应力为  $\sigma_a$ ,绞线截面的平均应力为  $\sigma$ ,三者之间并不相等。但由于钢芯与铝股紧密绞合在一起,所以认为钢部与铝部的伸长量相等,即钢线部分和铝线部分的应变相等。根据胡克定律,应力  $\sigma$  与应变  $\epsilon$  成正比,比例系数是弹性系数  $E$ ,即

$$\sigma = E\epsilon, \sigma_s = E_s\epsilon_s, \sigma_a = E_a\epsilon_a$$

式中,下标  $s$  表示钢线部分,  $a$  表示铝线部分。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{T}{EA}, \epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{T_s}{E_s A_s}, \epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} = \frac{T_a}{E_a A_a}$$

上三式中:  $T$ 、 $T_s$  和  $T_a$  分别为架空线的总拉力、钢部承受拉力和铝部承受拉力;  $A$ 、 $A_s$  和  $A_a$  分别为架空线的总截面积、钢线部分截面积和铝线部分截面积。

三者应变相等,即  $\epsilon = \epsilon_s = \epsilon_a$ , 所以

$$\frac{T}{EA} = \frac{T_s}{E_s A_s} = \frac{T_a}{E_a A_a} = \frac{T_s + T_a}{E_s A_s + E_a A_a}$$

而  $T = T_s + T_a$ ,  $A = A_s + A_a$ , 所以有

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_s A_s + E_a A_a}{A} = \frac{E_s A_s + E_a A_a}{A_s + A_a} \\ &= \frac{E_s + E_a A_a / A_s}{1 + A_a / A_s} \end{aligned}$$

令铝钢截面比  $m = A_a / A_s$ , 钢比  $\xi = 1/m = A_s / A_a$ , 所以

$$E = \frac{E_s + mE_a}{1 + m} = \frac{\xi E_s + E_a}{1 + \xi} \quad (4-1)$$

采用式 (4-1) 计算时,钢线的弹性系数可取 196000MPa,铝线可取 59000MPa,铝合金线可取 63000MPa。

由式 (4-1) 可以看出,钢芯铝绞线综合弹性系数的大小不仅与钢、铝两部分的弹性系数有关,而且还与铝钢截面比  $m$  有关。实际上,钢芯铝绞线的弹性系数还与其扭绞角度和使用张力等因素有关,实际值比式 (4-1) 的计算值偏小。工程中一般采用电线产品样本中给出的实验值。无实验值时,钢芯铝绞线的综合弹性系数可采用表 4-1 中数值,铝绞线的综合弹性系数在表 4-2 中列出。钢绞线的弹性系数可取为 181400MPa。

表 4-1 钢芯铝绞线的弹性系数和线膨胀系数

结构 (根数)		铝钢截面比	综合弹性系数 (MPa)	线膨胀系数 (1/°C)
铝	钢			
6	1	6.00	79000	$19.1 \times 10^{-6}$
7	7	5.06	76000	$18.5 \times 10^{-6}$
12	7	1.71	105000	$15.3 \times 10^{-6}$
18	1	18.00	66000	$21.2 \times 10^{-6}$
24	7	7.71	73000	$19.6 \times 10^{-6}$
26	7	6.13	76000	$18.9 \times 10^{-6}$
30	7	4.29	80000	$17.8 \times 10^{-6}$
30	19	4.37	78000	$18.0 \times 10^{-6}$
42	7	19.44	61000	$21.4 \times 10^{-6}$
45	7	14.46	63000	$20.9 \times 10^{-6}$
48	7	11.34	65000	$20.5 \times 10^{-6}$
54	7	7.71	69000	$19.3 \times 10^{-6}$
54	19	7.90	67000	$19.4 \times 10^{-6}$

- 注 1. 弹性系数值的精确度为 $\pm 3000$ MPa;  
2. 弹性系数适用于受力在 15%~50% 计算拉断力的钢芯铝绞线。

表 4-2 铝绞线的弹性系数和线膨胀系数

根数	综合弹性系数 (MPa)	线膨胀系数 (1/°C)
7	59000	$23.0 \times 10^{-6}$
19	56000	$23.0 \times 10^{-6}$
37	56000	$23.0 \times 10^{-6}$
61	54000	$23.0 \times 10^{-6}$

- 注 1. 弹性系数值的精确度为 $\pm 3000$ MPa;  
2. 弹性系数适用于受力在 15%~50% 计算拉断力的铝绞线。

## 二、钢芯铝绞线的温度线膨胀系数

钢芯铝绞线的温度线膨胀系数  $\alpha$ ，指的是温度升高  $1^\circ\text{C}$  时其单位长度的伸长量。在钢芯铝绞线中，铝的线膨胀系数较大约为  $\alpha_a = 23 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ，钢的线膨胀系数较小约为  $\alpha_s = 11.5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ，钢芯铝绞线的温度膨胀系数  $\alpha$  介于  $\alpha_s$  与  $\alpha_a$  之间。

图 4-1 所示钢芯铝绞线，在初始温度下，线端位置为 AB。当温度升高  $\Delta t$ ，如铝部与钢芯之间没有关系，则铝伸长至 EF，钢伸长至 IK，但由于铝部与钢芯紧密结合在一起，所以只能有相同的伸长，设到达 CD。这表明铝部受到了压缩，钢芯受到了拉伸。在平衡位置 CD，铝部承受的压缩力与钢芯的拉伸力相等。不考虑绞线的扭角影响时，有

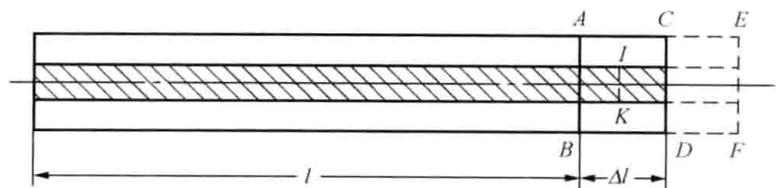


图 4-1 钢芯铝绞线的温度线膨胀示意图

在平衡位置 CD，铝部承受的压缩力与钢芯的拉伸力相等。不考虑绞线的扭角影响时，有

$$E_s(\alpha - \alpha_s)\Delta t A_s = E_a(\alpha_a - \alpha)\Delta t A_a$$

整理并将  $m = A_a/A_s$  代入, 可以得到

$$\alpha = \frac{E_s \alpha_s + m E_a \alpha_a}{E_s + m E_a} \quad (4-2)$$

由式 (4-2) 可以看出, 钢芯铝绞线的温度线膨胀系数大小不仅与钢、铝两部分的温度线膨胀系数有关, 而且还与两部分的弹性系数和铝钢截面比有关。工程中应采用电线产品样本中给出的实验值。无实验值时, 钢芯铝绞线、铝绞线的温度线膨胀系数可分别查表 4-1 和表 4-2, 钢绞线的温度线膨胀系数可取  $11.5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。

### 三、钢芯铝绞线的额定拉断力和抗拉强度

绞线的额定拉断力 (RTS) 是指绞线受拉时其中强度最弱或受力最大的一股或多股出现拉断时承受的总拉力。对于单一绞线 (包括铝绞线、铝合金绞线、镀锌钢绞线、铝包钢绞线等), 其额定拉断力为所有单线最小拉断力的总和。对于钢芯铝 (铝合金) 绞线或铝包钢芯铝 (铝合金) 绞线, 其额定拉断力为铝 (铝合金) 部分的拉断力与钢或铝包钢部分的相应拉断力的总和。钢或铝包钢部分的相应拉断力偏安全地规定为标距 250mm、1% 伸长时的拉断力。对于铝合金芯铝绞线, 其额定拉断力为硬铝线部分的拉断力与铝合金线部分 95% 拉断力的总和。钢芯铝绞线的拉断力由钢部和铝部共同承受, 影响其额定拉断力的因素主要有:

(1) 铝和钢的机械性能不同, 铝的延伸率远低于钢的延伸率, 当铝部被拉断时, 钢部的强度还未得到充分发挥, 通常认为此时钢线的变形量为 1% 左右。

(2) 绞线中各层线之间的应力分布不均匀。

(3) 绞合后的单线与绞线轴线之间形成扭绞角, 综合拉断力与扭绞角有关, 是各单线拉断力在轴线方向的分力构成。

(4) 相邻两层线之间存在正压力和摩擦力, 影响线材的强度和变形, 从而降低了绞线的综合拉断力。

钢芯铝绞线额定拉断力的计算式为

$$T_N = \sigma_a A_a + \sigma_{1\%} A_s \quad (4-3)$$

式中  $\sigma_a$ ——铝线的抗拉强度, 见表 4-3;

$\sigma_{1\%}$ ——钢线伸长 1% 时的应力, 见表 4-4。

表 4-3 架空绞线用硬铝线 (GB/T 17048—2009) 的机械性能

标称直径 $d$ (mm)	抗拉强度 (最小值, MPa)
$d \leq 1.25$	200
$1.25 < d \leq 1.50$	195
$1.50 < d \leq 1.75$	190
$1.75 < d \leq 2.00$	185
$2.00 < d \leq 2.25$	180
$2.25 < d \leq 2.50$	175
$2.50 < d \leq 3.00$	170
$3.00 < d \leq 3.50$	165
$3.50 < d \leq 5.00$	160

表 4-4 架空绞线用镀锌钢线 (GB/T 3428—2012) 的机械性能

强度级别	标称直径 (mm)		抗拉强度 (最小值, MPa)		1%伸长时的应力值 (最小值, MPa)		伸长率 (最小值, %) 标距 $L_0 = 250\text{mm}$	
	大于	小于及等于	A 级镀锌层	B 级镀锌层	A 级镀锌层	B 级镀锌层	A 级镀锌层	B 级镀锌层
1 级强度	1.24	2.25	1340	1240	1170	1100	3.0	4.0
	2.25	2.75	1310	1210	1140	1070	3.0	4.0
	2.75	3.00	1310	1210	1140	1070	3.5	4.0
	3.00	3.50	1290	1190	1100	1000	3.5	4.0
	3.50	4.25	1290	1190	1100	1000	4.0	4.0
	4.25	4.75	1290	1190	1100	1000	4.0	4.0
	4.75	5.50	1290	1190	1100	1000	4.0	4.0
2 级强度	1.24	2.25	1450	1380	1310	1240	2.5	2.5
	2.25	2.75	1410	1340	1280	1210	2.5	2.5
	2.75	3.00	1410	1340	1280	1210	3.0	3.0
	3.00	3.50	1410	1340	1240	1170	3.0	3.0
	3.50	4.25	1380	1280	1170	1100	3.0	3.0
	4.25	4.75	1380	1280	1170	1100	3.0	3.0
	4.75	5.50	1380	1280	1170	1100	3.0	3.0
3 级强度	1.24	2.25	1620		1450		2.0	
	2.25	2.75	1590		1410		2.0	
	2.75	3.00	1590		1410		2.5	
	3.00	3.50	1550	—	1380	—	2.5	—
	3.50	4.25	1520		1340		2.5	
	4.25	4.75	1520		1340		2.5	
	4.75	5.50	1500		1270		2.5	
4 级强度	1.24	2.25	1870		1580		3.0	
	2.25	2.75	1820		1580		3.0	
	2.75	3.00	1820	—	1550	—	3.5	—
	3.00	3.50	1770		1550		3.5	
	3.50	4.25	1720		1500		3.5	
	4.25	4.75	1720		1480		3.5	
5 级强度	1.24	2.25	1960		1600		3.0	
	2.25	2.75	1910		1600		3.0	
	2.75	3.00	1910	—	1580	—	3.5	—
	3.00	3.50	1870		1580		3.5	
	3.50	4.25	1820		1550		3.5	
	4.25	4.75	1820		1500		3.5	

对架空线进行拉断力试验时,要求其应能承受 95% 的额定拉断力,即其综合拉断力  $T_p$  为 95% 额定拉断力。因此架空线的抗拉强度为

$$\sigma_p = \frac{T_p}{A} = 0.95 \frac{T_N}{A} \quad (4-4)$$

## 第二节 架空线的许用应力和安全系数

架空线的许用应力是指架空线弧垂最低点所允许使用的最大应力，工程中称之为最大使用应力，其值由下式确定

$$[\sigma] = \frac{\sigma_p}{k} \quad (4-5)$$

式中  $\sigma_p$ ——架空线的抗拉强度；

$k$ ——架空线的设计安全系数。

影响安全系数的因素很多，如悬挂点的应力大于弧垂最低点的应力，补偿初伸长需增大应力，振动时产生附加应力而且断股后架空线强度降低，因腐蚀、挤压损伤造成强度降低以及设计、施工中的误差等。各因素对架空线许用应力的影响程度示于表 4-5 中，表中同时给出了按下式计算出的最小安全系数值

$$k = \frac{1 + k_1 + k_2 + k_3 + k_6 + k_7}{1 - k_4 - k_5} \quad (4-6)$$

表 4-5 影响架空线安全系数的因素

系数	影响因素	运行期			
		施工	初期	中期 (20 年)	后期 (40 年)
$k_1$	悬挂点应力增加	10%	10%	10%	10%
$k_2$	补偿导线初伸长的应力增加	10%	10%	10%	5%
$k_3$	考虑弧垂施工误差的应力增加	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
$k_4$	因压挤和挤压降低强度	5%	5%	5%	5%
$k_5$	因腐蚀等减低强度	0	0	10%	20%
$k_6$	设计误差	5%	5%	5%	5%
$k_7$	振动断股降低使用应力	0	17%	17%	17%
	悬挂点附加弯曲应力	—	—	—	—
	振动时的附加动应力	—	—	—	—
最小安全系数 $k$		1.34	1.52	1.64	1.86

由表 4-5 可以看出，即使不考虑悬挂点附加弯曲应力和振动时的附加动应力的影响，最小安全系数也要求达到 1.86。若加上上述两个因素，则要求安全系数为 2.0~2.5。为保证架空输电线路的安全运行，设计规范规定导线最大应力下的设计安全系数不应小于 2.5，考虑到地线多采用钢绞线，易腐蚀，其设计安全系数宜大于导线的设计安全系数。

控制微风振动的年均气温气象条件下的年均运行应力，在采取防振措施的情况下，不应超过  $\sigma_p$  的 25%，即此时的设计安全系数不应小于 4.0。

在最大应力情况下，悬挂点的设计安全系数不应小于 2.25。

在校验稀有风速或稀有覆冰气象条件时，弧垂最低点的最大使用张力不应超过综合拉断力的 70%，悬挂点的最大使用张力不应超过综合拉断力的 77%，1000kV 线路则相应要求为 60% 和 66%。

架设在滑轮上的导、地线，还应计算悬挂点局部弯曲引起的附加应力。

在任何气象组合条件下，架空线的使用应力不能大于相应的许用应力。

### 第三节 架空线的比载

作用在架空线上的分布荷载有自重、冰重和风荷载。这些荷载可能是不均匀的，但为方便计算，一般按均匀分布考虑。由于在架空线的有关计算中，常用到单位长度架空线上的荷载折算到单位面积上的数值，就将其定义为架空线的比载，常用单位是  $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$  或  $\text{MPa}/\text{m}$ 。根据架空线上作用荷载的不同，相应比载有自重比载、冰重比载、风压比载等。根据作用方向的不同，比载可分为垂直比载、水平比载和综合比载。

为清楚起见，覆冰厚度为  $b$ 、风速为  $v$  时的比载用符号  $\gamma_i(b, v)$  表示。

#### 一、垂直比载

垂直比载包括自重比载和冰重比载，作用方向垂直向下。

##### 1. 自重比载

自重比载是架空线自身重量引起的比载，其大小可认为不受气象条件变化的影响。自重比载计算式为

$$\gamma_1(0, 0) = \frac{qg}{A} \times 10^{-3} \quad (\text{MPa}/\text{m}) \quad (4-7)$$

式中  $q$ ——架空线的单位长度质量， $\text{kg}/\text{km}$ ；

$A$ ——架空线的截面积， $\text{mm}^2$ ；

$g$ ——重力加速度， $g = 9.80665 \text{m}/\text{s}^2$ 。

##### 2. 冰重比载

冰重比载是架空线的覆冰重量引起的比载。在覆冰厚度为  $b$  时，单位长度架空线上的覆冰体积为

$$V = \frac{\pi}{4} [(d + 2b)^2 - d^2] = \pi b(d + b)$$

若取覆冰的密度  $\rho = 0.9 \times 10^{-3} \text{kg}/\text{cm}^3$ ，则冰重比载为

$$\gamma_2(b, 0) = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho \pi b(d + b) g}{A} = 27.728 \frac{b(d + b)}{A} \times 10^{-3} \quad (\text{MPa}/\text{m}) \quad (4-8)$$

式中  $b$ ——覆冰厚度， $\text{mm}$ ；

$d$ ——架空线的外径， $\text{mm}$ ；

$A$ 、 $g$ ——意义同前。

##### 3. 垂直总比载

垂直总比载是自重比载与冰重比载之和，即

$$\gamma_3(b, 0) = \gamma_1(0, 0) + \gamma_2(b, 0) \quad (4-9)$$

#### 二、水平比载

水平比载包括无冰风压比载和覆冰风压比载，方向垂直于线路且作用在水平面内。风压是空气的动能在迎风体单位面积上产生的压力。当流动气流以速度  $v$  携带着动能吹向迎风物体，速度降为零时，其动能将全部转换为对物体的静压力，根据流体力学中的伯努利方程，基本风压为

$$W_v = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4-10)$$

式中  $W_v$ ——风速  $v$  时的风压标准值,  $\text{N/m}^2$  或  $\text{Pa}$ ;

$v$ ——风速,  $\text{m/s}$ ;

$\rho$ ——空气密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

空气密度  $\rho$  是海拔高度、气温和湿度的函数, 不同地区不同季节的  $\rho$  值存在不同的差异, 一般情况下可采用标准空气密度  $\rho=1.25\text{kg/m}^3$ 。此时的风压计算式为

$$W_v = 0.625v^2 = \frac{v^2}{1.6} \quad (4-11)$$

对高海拔地区以及要求计算精度比较高的特殊情况,  $\rho$  应取当地当时的实际空气密度。无可靠数据时, 可根据所在地的海拔高度, 用下式估算

$$\rho = 1.25e^{-0.0001H} \quad (4-12)$$

式中  $H$ ——海拔高度,  $\text{m}$ 。

另外需要说明的是, 20 世纪 60 年代以前, 国内的风速记录大多是根据风压板的观测结果, 统一根据标准空气密度  $\rho=1.25\text{kg/m}^3$  按式 (4-10) 反算而得, 因此在应用此类风速计算风压时, 采用式 (4-11) 是准确的。

#### 1. 无冰风压比载

考虑到整个档距上的风速通常不一致, 架空线的迎风面积形状 (体型) 对空气流动的影响, 以及风向与线路走向间常存在一定的角度, 无冰时的风压比载计算式为

$$\gamma_1(0, v) = \beta_c \alpha_f \mu_{sc} d \frac{W_v}{A} \sin^2 \theta \times 10^{-3} \quad (\text{MPa/m}) \quad (4-13)$$

式中  $\alpha_f$ ——风速不均匀系数, 根据基本风速按表 4-6 取值, 校验最大设计风速下杆塔的电气距离时, 根据水平档距按表 4-7 取值;

$\beta_c$ ——500kV 及以上线路的架空线风载调整系数, 仅用于强度设计时计算架空线作用于杆塔上的风荷载, 可取表 4-6 中的数值。电压低于 500kV 的线路取 1.0;

$\mu_{sc}$ ——架空线的体型系数 (空气动力系数), 对无冰架空线, 线径  $d < 17\text{mm}$  时  $\mu_{sc} = 1.2$ , 线径  $d \geq 17\text{mm}$  时  $\mu_{sc} = 1.1$ ;

$d$ ——架空线外径,  $\text{mm}$ ;

$W_v$ ——风压,  $\text{Pa}$ ;

$A$ ——架空线截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$\theta$ ——风向与线路方向的夹角。

表 4-6 风速不均匀系数  $\alpha_f$  和风载调整系数  $\beta_c$

风速 $v$ ( $\text{m/s}$ )		$<20$	$20 \leq v < 27$	$27 \leq v < 31.5$	$\geq 31.5$
$\alpha_f$	杆塔荷载 (强度计算用)	1.00	0.85	0.75	0.70
	设计塔头 (风偏计算用)	1.00	0.75	0.61	0.61
$\beta_c$	500kV 及以上杆塔荷载	1.00	1.10	1.20	1.30

注 对跳线计算, 1000kV 线路  $\alpha_f$  宜取 1.2, 其他宜取 1.0。

表 4-7 风速不均匀系数  $\alpha_f$  随水平档距变化取值

水平档距 ( $\text{m}$ )	$200 \leq$	250	300	350	400	450	500	$\geq 550$
$\alpha_f$	0.80	0.74	0.70	0.67	0.65	0.63	0.62	0.61

在 500kV 及以上线路设计中引入风载调整系数, 是考虑 500kV 线路绝缘子串较长, 子导线多, 发生动力放大作用的可能性增大, 且随风速的增大而增加, 因而适当提高 500kV 及以上线路的架空线对杆塔的荷载, 以降低其杆塔事故率。

### 2. 覆冰风压比载

架空线覆冰时, 其直径由  $d$  变为  $d+2b$ , 迎风面积增大。同时风载体型系数也与未覆冰时不同, 规范规定无论线径大小, 覆冰时的风载体型系数一律取为  $\mu_{sc}=1.2$ 。另外, 实际覆冰的厚度要大于理想覆冰的厚度, 实际覆冰的不规则形状加大了对气流的阻力, 需要引入覆冰风载增大系数  $B$ , 对 5mm 冰区取 1.1, 10mm 冰区取 1.2, 15mm 冰区取 1.3, 20mm 及以上冰区取 1.5~2.0。覆冰时的风压比载计算式为

$$\gamma_5(b, v) = \beta_c \alpha_{if} \mu_{sc} B (d + 2b) \frac{W_v}{A} \sin^2 \theta \times 10^{-3} \quad (\text{MPa/m}) \quad (4-14)$$

### 三、综合比载

综合比载有无冰综合比载和覆冰综合比载之分, 分别为相应气象条件下的垂直比载和水平比载的矢量和, 如图 4-2 所示。

#### 1. 无冰综合比载

无冰有风时的综合比载是架空线自重比载和无冰风压比载的矢量和, 即

$$\gamma_6(0, v) = \sqrt{\gamma_1^2(0, 0) + \gamma_4^2(0, v)} \quad (4-15)$$

#### 2. 覆冰综合比载

覆冰综合比载是架空线的垂直总比载和覆冰风压比载的矢量和, 即

$$\gamma_7(b, v) = \sqrt{\gamma_3^2(b, 0) + \gamma_5^2(b, v)} = \sqrt{[\gamma_1(0, 0) + \gamma_2(b, 0)]^2 + \gamma_5^2(b, v)} \quad (4-16)$$

**【例 4-1】** 通过某特殊气象区的一条 220kV 的输电线路, 其地线采用  $1 \times 7-7.8-1270-A-YB/T 5004-2012$  镀锌钢绞线, 试计算地线的比载。气象条件是: 最高气温  $40^\circ\text{C}$ , 最低气温  $-20^\circ\text{C}$ , 覆冰时气温  $-5^\circ\text{C}$ , 基本风速  $23.5\text{m/s}$ , 最大设计风速  $25\text{m/s}$ , 安装时风速  $10\text{m/s}$ , 覆冰时风速  $10\text{m/s}$ , 覆冰厚度  $5\text{mm}$ 。

**解** 查附录 A, 可得镀锌钢绞线  $1 \times 7-7.8-1270-A$  的有关数据为: 截面积  $A = 37.17\text{mm}^2$ , 单位长度质量  $q = 295.00\text{kg/km}$ , 计算直径  $d = 7.8\text{mm}$ 。

(1) 自重比载为

$$\gamma_1(0, 0) = \frac{qg}{A} \times 10^{-3} = \frac{295.00 \times 9.80665}{37.17} \times 10^{-3} = 77.631 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

(2) 冰重比载为

$$\begin{aligned} \gamma_2(5, 0) &= 27.728 \frac{b(d+b)}{A} \times 10^{-3} \\ &= 27.728 \times \frac{5 \times (7.8+5)}{37.17} \times 10^{-3} = 47.743 \times 10^{-3} (\text{MPa/m}) \end{aligned}$$

(3) 垂直总比载为

$$\gamma_3(5, 0) = \gamma_1(0, 0) + \gamma_2(5, 0) = (77.631 + 47.743) \times 10^{-3} = 125.374 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

(4) 无冰风压比载计算最大风速和安装有风两种情况。假设风向垂直于线路方向即  $\theta =$

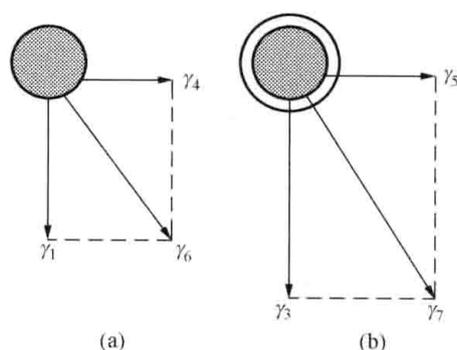


图 4-2 综合比载计算示意图

(a) 无冰综合比载; (b) 覆冰综合比载

90°, 因  $d=7.8\text{mm}<17\text{mm}$ , 则  $\mu_{sc}=1.2$ ; 220kV 线路,  $\beta_c=1.0$ 。

1) 最大设计风速  $v=25\text{m/s}$  时, 风压为

$$W_{25}=0.625v^2=0.625\times 25^2=390.625(\text{Pa})$$

按基本风速查表 4-6, 得计算强度时的  $\alpha_f=0.85$ , 所以

$$\begin{aligned}\gamma_4(0, 25) &= \beta_c \alpha_f \mu_{cs} d \frac{W_{25}}{A} \sin^2 \theta \times 10^{-3} \\ &= 1.0 \times 0.85 \times 1.2 \times 7.8 \times \frac{390.625}{37.17} \times 10^{-3} = 83.611 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})\end{aligned}$$

计算风偏时,  $\alpha_f=0.75$ , 所以

$$\gamma_4(0, 25) = 1.0 \times 0.75 \times 1.2 \times 7.8 \times \frac{390.625}{37.17} \times 10^{-3} = 73.774 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

2) 安装风速  $v=10\text{m/s}$  时, 查表 4-6 得  $\alpha_f=1.0$ , 则

$$W_{10}=0.625v^2=0.625\times 10^2=62.5(\text{Pa})$$

$$\begin{aligned}\gamma_4(0, 10) &= \alpha_f \mu_{cs} d \frac{W_{10}}{A} \sin^2 \theta \times 10^{-3} \\ &= 1.0 \times 1.2 \times 7.8 \times \frac{62.5}{37.17} \times 10^{-3} = 15.738 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})\end{aligned}$$

(5) 覆冰风压比载。因为  $v=10\text{m/s}$ , 查得计算强度和风偏时均有  $\alpha_f=1.0$ 。覆冰厚度 5mm, 覆冰风载增大系数  $B=1.1$ , 所以

$$\begin{aligned}\gamma_5(5, 10) &= \alpha_f \mu_{cs} B(d+2b) \frac{W_{10}}{A} \sin^2 \theta \times 10^{-3} \\ &= 1.0 \times 1.2 \times 1.1 \times (7.8+2\times 5) \frac{62.5}{37.17} \times 10^{-3} = 39.508 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})\end{aligned}$$

(6) 无冰综合比载。

最大设计风速 (计算强度) 时有

$$\begin{aligned}\gamma_6(0, 25) &= \sqrt{\gamma_1^2(0, 0) + \gamma_4^2(0, 25)} \\ &= \sqrt{77.631^2 + 83.611^2} \times 10^{-3} = 114.09 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})\end{aligned}$$

最大设计风速 (计算风偏) 时有

$$\gamma_6(0, 25) = \sqrt{77.631^2 + 73.774^2} \times 10^{-3} = 107.09 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

安装有风时有

$$\begin{aligned}\gamma_6(0, 10) &= \sqrt{\gamma_1^2(0, 0) + \gamma_4^2(0, 10)} \\ &= \sqrt{77.631^2 + 15.738^2} \times 10^{-3} = 79.210 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})\end{aligned}$$

(7) 覆冰综合比载为

$$\begin{aligned}\gamma_7(5, 10) &= \sqrt{\gamma_3^2(5, 0) + \gamma_5^2(5, 10)} \\ &= \sqrt{125.374^2 + 39.508^2} \times 10^{-3} = 131.45 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})\end{aligned}$$

**【例 4-2】** 某 330kV 架空输电线路, 通过典型气象区, 导线采用 LGJ-240/55 钢芯铝绞线, 平均高度 20m, 试计算各种比载。

**解** 查附录 A 得到 LGJ-240/55 钢芯铝绞线的有关数据: 面积  $A=297.57\text{mm}^2$ , 外径  $d=22.4\text{mm}$ , 单位长度质量  $q=1108\text{kg/km}$ 。

查表 3-10 得到典型气象区的有关数据：覆冰厚度  $b=20\text{mm}$ ，外过电压和安装有风时的风速  $10\text{m/s}$ ，覆冰时的风速  $15\text{m/s}$ ，基本风速  $27\text{m/s}$ 。

(1) 自重比载为

$$\gamma_1(0, 0) = \frac{qg}{A} \times 10^{-3} = \frac{1108 \times 9.80665}{297.57} \times 10^{-3} = 36.515 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

(2) 冰重比载为

$$\gamma_2(20, 0) = 27.728 \times \frac{20 \times (22.4 + 20)}{297.57} \times 10^{-3} = 79.018 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

(3) 垂直总比载为

$$\gamma_3(20, 0) = (36.515 + 79.018) \times 10^{-3} = 115.53 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

(4) 风压比载。假设风向垂直于线路方向，即  $\theta=90^\circ$ ， $\sin\theta=\sin90^\circ=1$ ， $330\text{kV}$  线路  $\beta_c=1.0$ ，将式 (4-11) 代入式 (4-13) 得

$$\gamma_4(0, v) = 0.625\alpha_f\mu_{sc}d \frac{v^2}{A} \sin^2\theta \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

1) 外过电压、安装有风： $v=10\text{m/s}$ ， $\alpha_f=1.0$ ， $\mu_{sc}=1.1$ ，所以

$$\gamma_4(0, 10) = 0.625 \times 1.0 \times 1.1 \times 22.4 \times \frac{10^2}{297.57} \times 10^{-3} = 5.1753 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

2) 最大设计风速：按 B 类地区，由基本风速折算的最大设计风速为

$$v = \left(\frac{h}{10}\right)^{0.15} v_0 = \left(\frac{20}{10}\right)^{0.15} \times 27 = 30 \quad (\text{m/s})$$

计算强度时， $\alpha=0.75$ ， $\mu_{sc}=1.1$ ，所以

$$\gamma_4(0, 30) = 0.625 \times 0.75 \times 1.1 \times 22.4 \times \frac{30^2}{297.57} \times 10^{-3} = 34.941 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

计算风偏时， $\alpha_f=0.61$ ，所以

$$\gamma_4(0, 30) = 0.625 \times 0.61 \times 1.1 \times 22.4 \times \frac{30^2}{297.57} \times 10^{-3} = 28.419 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

3) 内过电压：取最大设计风速的一半， $v=15\text{m/s}$ ， $\alpha_f=1.0$ ， $\mu_{sc}=1.1$ ，所以

$$\gamma_4(0, 15) = 0.625 \times 1.0 \times 1.1 \times 22.4 \times \frac{15^2}{297.57} \times 10^{-3} = 11.644 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

4) 覆冰风压比载： $v=15\text{m/s}$ ，计算强度和计算风偏（设计塔头）时均有  $\alpha_f=1.0$ ， $\mu_{sc}=1.2$ ， $B=1.5$ ，所以

$$\begin{aligned} \gamma_5(20, 15) &= 0.625 \times 1.0 \times 1.2 \times 1.5 \times (22.4 + 2 \times 20) \times \frac{15^2}{297.57} \times 10^{-3} \\ &= 53.08 \times 10^{-3} (\text{MPa/m}) \end{aligned}$$

(5) 无冰综合比载：

1) 外过电压、安装有风，有

$$\gamma_6(0, 10) = \sqrt{36.515^2 + 5.1753^2} \times 10^{-3} = 36.880 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

2) 内过电压，有

$$\gamma_6(0, 15) = \sqrt{36.515^2 + 11.644^2} \times 10^{-3} = 38.327 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

3) 最大风速：计算强度时，有

$$\gamma_6(0, 30) = \sqrt{36.515^2 + 34.941^2} \times 10^{-3} = 50.539 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

计算风偏时, 有

$$\gamma_6(0, 30) = \sqrt{36.515^2 + 28.419^2} \times 10^{-3} = 46.271 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$

(6) 覆冰综合比载: 计算强度时, 有

$$\gamma_7(20, 15) = \sqrt{115.51^2 + 53.08^2} \times 10^{-3} = 127.12 \times 10^{-3} (\text{MPa/m})$$



## 练 习 题

1. 架空输电线路中常用的架空线机械物理特性有哪些?
2. 什么是架空线的综合拉断力? 其许用应力的意义是什么?
3. 导线和地线的安全系数应考虑哪些因素? 其大小是怎样规定的?
4. 什么是导线的比载? 共有哪几种? 各用在什么气象条件下?
5. 在输电线路设计中, 计算架空线的风压比载应考虑哪几个系数? 如何选取?
6. 试计算 LGJ - 150/35 钢芯铝绞线的弹性系数、温度线膨胀系数和额定拉断力, 并与查表值进行比较 (以相对误差表示)。
7. 某 330kV 线路通过典型气象区 V 区, 导线为 LGJ - 150/35 钢芯铝绞线, 试计算各种气象组合下的比载 (设风向与线路垂直即  $\theta=90^\circ$ )。
8. 某 500kV 架空输电线路, 通过 VII 区典型气象区, 导线为 LGJ - 400/50 钢芯铝绞线, 计算其比载。

## 第五章 均布荷载下架空线的计算

在架空输电线路的设计中，不同气象条件下架空线的弧垂、应力、线长计算占有十分重要的位置，是输电线路力学研究的主要内容。这是因为架空线的弧垂和应力直接影响着线路的正常安全运行，而架空线线长的微小变化和误差都会引起弧垂和应力相当大的改变。设计弧垂小，架空线的拉应力就大，振动现象加剧，同时杆塔荷载增大因而要求强度提高。设计弧垂过大，满足对地安全距离所需杆塔高度增加，线路投资增大，而且架空线的风摆、舞动和跳跃会造成线路停电事故，若加大塔头尺寸，必然会使投资再度提高。因此，设计合适的弧垂是十分重要的。本章研究垂直均布荷载和水平均布荷载作用下的架空线有关计算问题。

### 第一节 架空线悬链线方程的积分普遍形式

为使问题简化，首先假设架空线是没有刚性的柔性索链。这是因为架空输电线路的档距比架空线的截面尺寸大得多，即整档架空线的线长要远远大于其直径，同时架空线又多采用多股细金属线构成的绞合线，所以架空线的刚性对其悬挂空间曲线形状的影响很小。根据这一假设，架空线只能承受拉力而不能承受弯矩。其次假设作用在架空线上的荷载沿其线长均布。根据这两个假设，悬挂在两基杆塔间的架空线呈悬链线形状。

图 5-1 (b) 所示为某档架空线，A、B 为两悬挂点。沿架空线线长作用有均布比载  $\gamma$ ，方向垂直向下。在比载  $\gamma$  作用下，架空线呈曲线形状，其最低位置在 O 点。在悬挂点 A、B 处，架空线的轴向应力分别为  $\sigma_A$  和  $\sigma_B$ 。选取线路方向（垂直于比载）为坐标系的  $x$  轴，平行于比载方向为  $y$  轴。在架空线上任选一点 C，取长为  $L_{OC}$  的一段架空线作为研究对象，受力分析如图 5-1 (a) 所示。列研究对象的力平衡方程式，有

$$\sum X = 0, \sigma_x \cos\theta = \sigma_0 \quad (5-1)$$

$$\sum Y = 0, \sigma_x \sin\theta = \gamma L_{OC} \quad (5-2)$$

式 (5-1) 表明，架空线上任一点 C 处的轴向应力  $\sigma_x$  的水平分量等于弧垂最低点处的轴向应力  $\sigma_0$ ，即架空线上轴向应力的水平分量处处相等。式 (5-2) 表明，架空线上任一点轴向应力的垂向分量等于该点到弧垂最低点间线长  $L_{OC}$  与比载  $\gamma$  之积。以上两式相除可得

$$\tan\theta = \frac{\gamma}{\sigma_0} L_{OC}$$

或

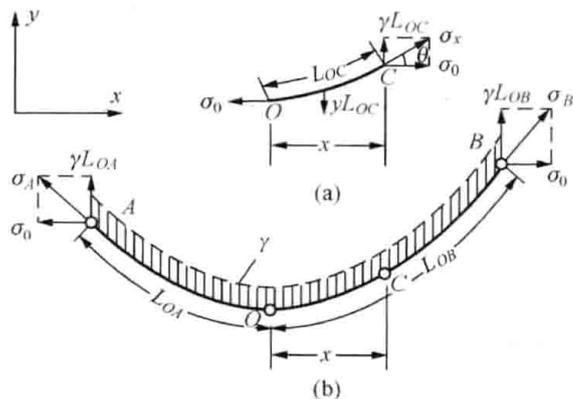


图 5-1 架空线悬挂曲线受力图  
(a) 分离体受力图；(b) 整档架空线受力图

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\gamma}{\sigma_0} L_{OC} \quad (5-3)$$

式(5-3)为悬链线方程的微分形式。从中可以看出,当比值 $\gamma/\sigma_0$ 一定时,架空线上任一点处的斜率与该点至弧垂最低点之间的线长成正比。在弧垂最低点 $O$ 处,曲线的斜率为零,即 $\theta = 0$ 。将式(5-3)写成

$$y' = \frac{\gamma}{\sigma_0} L_{OC}$$

两边微分

$$dy' = \frac{\gamma}{\sigma_0} d(L_{OC}) = \frac{\gamma}{\sigma_0} \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \frac{\gamma}{\sigma_0} \sqrt{1 + y'^2} dx$$

分离变量后两端积分

$$\int \frac{dy'}{\sqrt{1 + y'^2}} = \frac{\gamma}{\sigma_0} \int dx$$

$$\operatorname{arcsch}(y') = \frac{\gamma}{\sigma_0} (x + C_1)$$

或写成

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{sh} \frac{\gamma}{\sigma_0} (x + C_1) \quad (5-4)$$

式(5-4)两端积分,得

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{ch} \frac{\gamma}{\sigma_0} (x + C_1) + C_2 \quad (5-5)$$

式(5-5)是架空线悬链线方程的积分普遍形式。其中 $C_1$ 、 $C_2$ 为积分常数,其值取决于坐标系的原点位置。

## 第二节 等高悬点架空线的弧垂、线长和应力

### 一、等高悬点架空线的悬链线方程

等高悬点是指架空线的两个悬挂点高度相同。由于对称性,等高悬点架空线的弧垂最低点位于档距中央,将坐标原点取在该点,如图5-2所示。

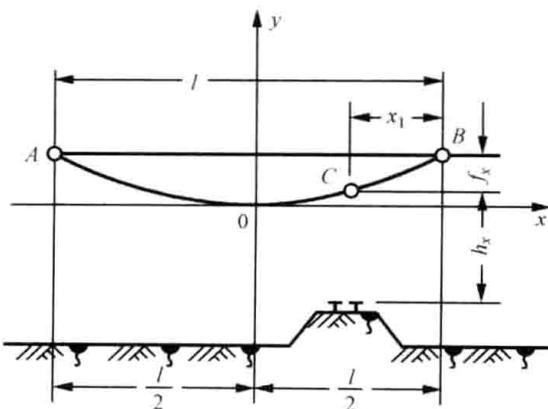


图 5-2 等高悬点架空线的悬链线

当 $x=0$ 时,  $\frac{dy}{dx} = 0$ , 代入式(5-4)可解得 $C_1=0$ ; 当 $x=0$ 时,  $y=0$ , 代入式(5-5)并利用 $C_1=0$ , 解得 $C_2 = -\sigma_0/\gamma$ 。将 $C_1$ 、 $C_2$ 的值代回式(5-5), 并加以整理即可得到架空线的悬链线方程

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma}{\sigma_0} x - 1 \right) \quad (5-6)$$

由式(5-6)可以看出,架空线的悬链线具体形状完全由比值 $\sigma_0/\gamma$ 决定,即无论是何种架空线、何种气象条件,只要 $\sigma_0/\gamma$ 相同,架空线的悬挂曲线形状就相同。在比载 $\gamma$ 一定的情况下,架空线的水平应力 $\sigma_0$ 是决定悬链线形状的唯一因素,

所以架线时的水平张力对架空线的空间形状有着决定性的影响。

在导出式 (5-6) 的过程中, 并没有用到等高悬点的限定条件, 因此式 (5-6) 同样可用于不等高悬点的情况。

## 二、等高悬点架空线的弧垂

架空线上任一点的弧垂是指该点距两悬挂点连线的垂向距离。在架空输电线路设计中, 需计算架空线任一点  $x$  处的弧垂  $f_x$ , 以验算架空线对地安全距离, 参见图 5-2。显然

$$f_x = y_B - y$$

而

$$y_B = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - 1 \right)$$

所以

$$f_x = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{ch} \frac{\gamma x}{\sigma_0} \right) = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-2x_1)}{2\sigma_0} \right]$$

利用恒等式  $\operatorname{ch}\alpha - \operatorname{ch}\beta = 2\operatorname{sh} \frac{\alpha+\beta}{2} \operatorname{sh} \frac{\alpha-\beta}{2}$  对式 (5-7) 进行变换, 可以得到

$$f_x = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x_1}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x_1)}{2\sigma_0} \quad (5-7)$$

在档距中央, 弧垂有最大值  $f$ , 此时  $x=0$  或  $x_1=l/2$ , 所以有

$$f = y_B = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - 1 \right) = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh}^2 \frac{\gamma l}{4\sigma_0} \quad (5-8)$$

除非特别说明, 架空线的弧垂一般指的是最大弧垂。最大弧垂在线路的设计、施工中占有十分重要的位置。

## 三、等高悬点架空线的线长

弧垂最低点  $O$  与任一点  $C$  之间的架空线长度  $L_{OC}$  (参见图 5-1) 可由式 (5-3) 和式 (5-4) 联立求解, 并考虑到  $C_1=0$  而得到。线长  $L_{OC}$  计算式为

$$L_{OC} = \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{\sigma_0}$$

或记为

$$L_x = \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{\sigma_0} \quad (5-9)$$

将  $x=l/2$  代入上式, 可得到半档距架空线的长度  $L_{x=l/2}$ , 整档架空线的线长  $L$  是  $L_{x=l/2}$  的 2 倍, 即

$$L = 2L_{x=l/2} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \quad (5-10)$$

式 (5-10) 表明, 在档距  $l$  一定时, 架空线的线长随比载  $\gamma$  和水平应力  $\sigma_0$  的变化而改变, 即架空线的线长是其比载和应力的函数。应该指出, 式 (5-10) 计算得出的是按架空线的悬挂曲线几何形状的计算长度, 与架空线的制造长度不尽相同。

## 四、等高悬点架空线的应力

架空线上任一点  $C$  处的应力指的是该点的轴向应力, 其方向同该点线轴方向, 如图 5-1 (a) 所示。档内架空线任一点的水平应力  $\sigma_0$  处处相等, 垂向应力  $\sigma_{yx}$  为

$$\sigma_{\gamma x} = \gamma L_{OC} = \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{\sigma_0} \quad (5-11)$$

任一点的应力为

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_0^2 + (\gamma L_{OC})^2} = \sqrt{\sigma_0^2 + \left(\sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{\sigma_0}\right)^2} = \sigma_0 \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{\gamma x}{\sigma_0}}$$

根据恒等变换  $\operatorname{ch} \alpha = \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \alpha}$ , 可得

$$\sigma_x = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma x}{\sigma_0} \quad (5-12)$$

在两等高悬挂点 A、B 处, 有

$$\sigma_A = \sigma_B = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \quad (5-13)$$

如果用弧垂表示, 则为

$$\sigma_A = \sigma_B = \sigma_0 + \gamma f$$

上式表明, 等高悬点处架空线的应力等于其水平应力和作用在其上的比载与中央弧垂的乘积的和。必须指出, 悬挂点处的应力除按式 (5-13) 计算的静态应力外, 还有线夹的横向挤压应力, 考虑刚度时的附加弯曲应力和振动时产生的附加动应力等。

**【例 5-1】** 某档等高悬点架空线, 档距  $l=500\text{m}$ , 导线为 LGJ-150/25 型。在某气象条件下导线的使用应力 (最低点应力)  $\sigma_0=63.504\text{MPa}$ , 比载  $\gamma=34.047 \times 10^{-3} \text{MPa/m}$ , 试求该气象条件下导线的弧垂、线长和悬挂点应力及垂向分量。

**解** 在计算架空线的弧垂、线长和应力的有关公式中, 有许多公用的相同项, 可将这些项单独计算后再利用有关公式, 以减少计算工作量。双曲函数可利用计算机或计算器求解, 若没有相应的内部函数或功能键时, 可采用下面公式

$$\operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \quad \operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

(1) 公用项的计算

$$\frac{\sigma_0}{\gamma} = \frac{63.504}{34.047 \times 10^{-3}} = 1.8652 \times 10^3 (\text{m})$$

$$\frac{\gamma}{\sigma_0} = \frac{1}{1.8652 \times 10^3} = 0.5361 \times 10^{-3} (1/\text{m})$$

$$\operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} = \operatorname{sh} \left( \frac{500 \times 0.5361 \times 10^{-3}}{2} \right) = \operatorname{sh} 0.13403 = 0.13443$$

$$\operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} = \operatorname{ch} \left( \frac{500 \times 0.5361 \times 10^{-3}}{2} \right) = \operatorname{ch} 0.13403 = 1.009$$

(2) 架空线的弧垂、线长和应力

$$\text{弧垂 } f = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - 1 \right) = 1.8652 \times 10^3 \times (1.009 - 1) = 16.787 (\text{m})$$

$$\text{线长 } L = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} = 2 \times 1.8652 \times 10^3 \times 0.13443 = 501.48 (\text{m})$$

$$\text{悬点应力 } \sigma_A = \sigma_B = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} = 63.504 \times 1.009 = 64.08 (\text{MPa})$$

$$\text{悬点垂向应力 } \sigma_{\gamma A} = \sigma_{\gamma B} = \gamma L / 2 = 34.047 \times 10^{-3} \times 501.48 / 2 = 8.537 (\text{MPa})$$

从 [例 5 - 1] 可以看出, 线长仅仅比档距相差 1.48m, 增大约 3.0‰, 但弧垂却达到了 16.787m, 说明线长的微小变化会引起弧垂的很大变化, 对此应给予足够的重视。

### 第三节 不等高悬点架空线的弧垂、线长和应力

地形的起伏不平或杆塔高度的不同, 将造成架空线悬挂高度不相等。同一档距两悬挂点间的高度差简称为高差, 两悬挂点连线间的距离称为斜档距, 该连线与水平面的夹角称为高差角。

#### 一、不等高悬点架空线的悬链线方程

为应用方便起见, 取坐标原点位于左侧悬挂点处, 如图 5 - 3 所示。

在所选坐标系中, 当  $x = a$  时,  $dy/dx = 0$ , 代入式 (5 - 4) 求得  $C_1 = -a$ ; 当  $x = 0$  时,  $y = 0$ , 代入式 (5 - 5) 并注意到  $C_1 = -a$ , 求得  $C_2 =$

$-\frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0}$ 。将  $C_1$ 、 $C_2$  之值再代回到式 (5 - 5), 有

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} - \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right] = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-2a)}{2\sigma_0} \quad (5-14)$$

式 (5 - 14) 即为不等高悬点架空线的悬链线方程, 但式中架空线最低点至左侧低悬挂点的水平距离  $a$  待求。将  $x = l$  时  $y = h$  的边界条件代入式 (5 - 14), 可以得到

$$a = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsch} \frac{h}{\frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0}}$$

上式中反双曲函数一项的分母, 实际上就是式 (5 - 10) 表示的等高悬点架空线的档内悬链线长度, 记为  $L_{h=0}$ , 即

$$L_{h=0} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \quad (5-10')$$

所以

$$a = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \quad (5-15)$$

相应地, 弧垂最低点距右侧高悬挂点的水平距离为

$$b = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \quad (5-16)$$

由于

$$\begin{aligned} \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-2a)}{2\sigma_0} &= \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma x}{2\sigma_0} - \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right] \\ &= \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma(x-l)}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \\ &= \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-l)}{2\sigma_0} \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-l)}{2\sigma_0} \frac{h}{L_{h=0}} \\ &= \frac{h}{L_{h=0}} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} - \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \end{aligned}$$

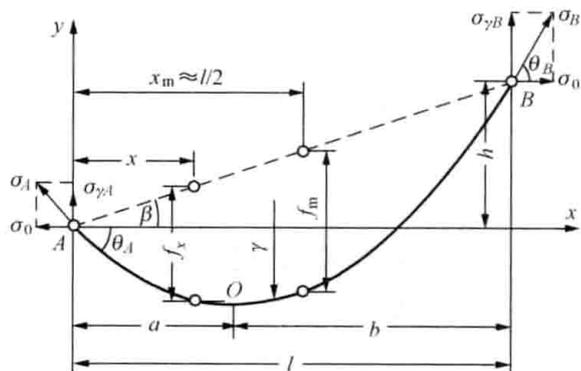


图 5 - 3 不等高悬点架空线的悬链线

上式代入式 (5-14), 便可得到坐标原点位于左悬点时的不等高悬点架空线的悬链线方程为

$$\begin{aligned} y &= \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-2a)}{2\sigma_0} \\ &= \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \left[ \frac{h}{L_{h=0}} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] \\ &= \frac{h}{L_{h=0}} \left[ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \left[ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] \end{aligned} \quad (5-17)$$

当  $h=0$  时, 即得到坐标原点位于左悬挂点时的等高悬点的架空线悬链线方程

$$y = -\frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \quad (5-18)$$

## 二、不等高悬点架空线的弧垂

根据弧垂的定义, 不等高悬点架空线任一点处的弧垂为

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{h}{l}x - y = \frac{h}{l}x - \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-2a)}{2\sigma_0} \\ &= \frac{h}{l}x - \frac{h}{L_{h=0}} \left[ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] + \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \\ &\quad \left[ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] \end{aligned} \quad (5-19)$$

等高悬点  $h=0$  时, 有

$$f_{x(h=0)} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0}$$

这与式 (5-8) 是一致的。

架空输电线路最常用的是档距中央弧垂、最低点弧垂和最大弧垂 (斜切点弧垂)。在档距中央  $x=l/2$ , 代入式 (5-19) 并化简后得到档距中央弧垂的计算式

$$f_{\frac{l}{2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - 1 \right) \quad (5-20)$$

最低点弧垂出现在  $x=a$  处, 代入任一点弧垂公式 (5-19) 并注意到式 (5-15), 适当整理后得

$$f_0 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \frac{h}{l} \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} - 1 \right] \quad (5-21)$$

同式 (5-20) 相比较, 上式可写成

$$f_0 = f_{\frac{l}{2}} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ 1 + \frac{h}{l} \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \right] \quad (5-21')$$

最大弧垂出现在  $\frac{df_x}{dx}=0$  处, 即

$$\begin{aligned} \frac{df_x}{dx} &= \frac{d}{dx} \left( \frac{h}{l}x - y \right) = \frac{d}{dx} \left[ \frac{h}{l}x - \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} - \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right) \right] \\ &= \frac{h}{l} - \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} = 0 \end{aligned}$$

解得出现最大弧垂的位置

$$x_m = a + \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsch} \frac{h}{l} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{arcsch} \frac{h}{l} - \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right) \quad (5-22)$$

从式 (5-22) 可以看出, 不等高悬点架空线的最大弧垂不在档距中央。由于  $L_{h=0} > l$ , 所以  $x_m > l/2$ , 说明最大弧垂位于档距中央稍偏向高悬挂点一侧的位置。将式 (5-22) 代入任一点弧垂公式 (5-19), 可求得不等高悬点的最大弧垂为

$$f_m = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \frac{h}{l} \left( \operatorname{arcsch} \frac{h}{l} - \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right) + \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \sqrt{1 + \left( \frac{h}{l} \right)^2} \right] \quad (5-23)$$

与式 (5-20) 比较, 最大弧垂公式可表示为

$$f_m = f_{\frac{l}{2}} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \frac{h}{l} \left( \operatorname{arcsch} \frac{h}{l} - \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right) - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{h}{l} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \right) \right] \quad (5-23')$$

由于式 (5-23) 两个小括号内的值均为正值且均小, 前者略大于后者, 所以最大弧垂大于档距中央弧垂, 但二者非常接近。

对于等高悬点架空线, 有

$$f_m = f_{\frac{l}{2}} = f_0 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - 1 \right)$$

上式表明, 等高悬点架空线的最大弧垂、档距中央弧垂和最低点弧垂三者重合, 位于档距中央, 这是很明显的。

### 三、不等高悬点架空线的线长

不等高悬点架空线的线长可利用弧长微分公式通过积分求得。根据式 (5-4) 有

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{sh} \frac{\gamma}{\sigma_0} (x + C_1) = \operatorname{sh} \frac{\gamma}{\sigma_0} (x - a)$$

所以

$$dL = \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx = \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0}} dx = \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} dx$$

架空线上任一点至左悬挂点间的线长为

$$\begin{aligned} L_x &= \int_0^x \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} dx = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} + \operatorname{sh} \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right] \\ &= \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-2a)}{2\sigma_0} \end{aligned} \quad (5-24)$$

当  $x = l$  时, 即得到整档线长

$$L = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-2a)}{2\sigma_0} \quad (5-25)$$

将  $x = l$  代入式 (5-14), 有

$$h = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-2a)}{2\sigma_0} \quad (5-26)$$

将式 (5-25) 的平方减去式 (5-26) 的平方

$$L^2 - h^2 = \left(\frac{2\sigma_0}{\gamma}\right)^2 \operatorname{sh}^2 \frac{\gamma l}{2\sigma_0} = L_{h=0}^2$$

所以

$$L = \sqrt{L_{h=0}^2 + h^2} \quad (5-27)$$

由上式可以看出, 高差  $h$  的存在, 使得不等高悬点架空线的线长大于等高悬点时的线长。如果视高差  $h$ 、等高悬点时的线长  $L_{h=0}$  为直角三角形的两条直角边, 那么不等高悬点时的线长就是该直角三角形的斜边, 这样理解三者之间的关系就容易记忆了。

#### 四、不等高悬点架空线的应力

##### 1. 架空线上任一点的应力

在已知架空线的水平应力  $\sigma_0$  时, 任一点的应力可表示为

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\sigma_0}{\cos\theta} = \sigma_0 \sqrt{1 + \tan^2\theta} \\ &= \sigma_0 \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \\ &= \sigma_0 \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0}} \\ &= \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} \\ &= \sigma_0 \operatorname{ch} \left[ \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \end{aligned} \quad (5-28)$$

在档距中央  $x = l/2$  的应力为

$$\sigma_{\frac{l}{2}} = \sigma_0 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} \quad (5-29)$$

##### 2. 架空线上任两点应力之间的关系

架空线最低点  $O$  处的纵坐标值为

$$y_0 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{ch} \frac{\gamma(a-a)}{\sigma_0} - \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right] = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( 1 - \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right)$$

从中解得

$$\operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = 1 - \frac{\gamma y_0}{\sigma_0}$$

由式 (5-14) 可以解得

$$\operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} = \frac{\gamma y}{\sigma_0} + \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = 1 + \frac{\gamma}{\sigma_0} (y - y_0)$$

将上式代入式 (5-28), 有

$$\sigma_x = \sigma_0 + \gamma (y - y_0) \quad (5-30)$$

式 (5-30) 表示了架空线上任一点的应力与最低点的应力和两点间的高差之间的关系。如果已知档距内架空线上的任意两点  $x_1$ 、 $y_1$  和  $x_2$ 、 $y_2$ , 则相应的应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \gamma (y_1 - y_0)$$

$$\sigma_2 = \sigma_0 + \gamma (y_2 - y_0)$$

两式相减可得

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \gamma (y_2 - y_1) \quad (5-31)$$

式(5-31)表明,档内架空线上任意两点的应力差等于该两点间的高度差与比载之乘积。显然,档内相对高度越高,该点架空线的应力就越大。在同一档内,最大应力发生在较高悬挂点处。

### 3. 架空线悬挂点处的应力

悬挂点A、B的横坐标分别为 $x=0$ 、 $x=l$ ,代入式(5-28)求得悬挂点应力 $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A &= \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{ch} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \\ \sigma_B &= \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{ch} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5-32)$$

### 4. 悬挂点架空线的倾斜角和垂向应力

悬挂点处架空线的倾斜角是指该点架空线的切线与 $x$ 轴间的夹角,如图5-3中的 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ 。倾斜角的正切即为该点架空线的斜率。悬挂点处的倾斜角是设计线夹、检验悬挂点附近电气间隙、考虑飞车爬坡等的重要参考数据。将 $x=0$ 和 $x=l$ 分别代入式(5-24)得到

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta_A &= -\operatorname{sh} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = -\operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \\ \tan \theta_B &= \operatorname{sh} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5-33)$$

由式(5-33)可知,低悬挂点处架空线的倾斜角 $\theta_A$ 可正可负,为正值表示该点架空线向上倾斜(上扬),为负值表示向下倾斜。高悬挂点处的倾斜角 $\theta_B$ 则始终为正值。

在架空线的水平应力 $\sigma_0$ 和倾斜角 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ 已知时,悬挂点应力的垂向分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\gamma A} &= -\sigma_0 \tan \theta_A = \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \\ \sigma_{\gamma B} &= \sigma_0 \tan \theta_B = \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5-34)$$

式(5-34)的第一式中的负号,是为保证悬挂点垂向应力向上时为正值而加的。悬挂点的垂向应力正值时,说明该悬挂点承受架空线的拉力。低悬挂点的垂向应力为正值还说明架空线的弧垂最低点位于档内。由于第一式中的双曲函数可能取得负值,因而 $\sigma_{\gamma A}$ 有可能小于零。当低悬挂点的垂向应力 $\sigma_{\gamma A}$ 为负值时,说明该悬挂点承受上拔力,架空线的弧垂最低点落在档距之外。当 $\sigma_{\gamma A}$ 取零值时,说明悬挂点处正好是架空线的最低点,架空线不承受垂向力的作用。高悬挂点的垂向应力总为正值,所以高悬挂点总是承受向下的拉力。顺便指出,悬挂点受到的架空线的总垂向力,是该悬挂点两侧架空线垂向拉力的代数和。

悬挂点处架空线的垂向应力也可根据其比载与该悬点至弧垂最低点间线长的乘积来求得。

**【例5-2】** 某档架空线,档距 $l=400\text{m}$ ,高差 $h=100\text{m}$ ,最大使用应力 $\sigma_0=98.1\text{MPa}$ ,相应的比载 $\gamma=61.34 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$ 。试计算架空线的三种弧垂、线长和档距中央应力、悬挂点应力及其垂向分量。

**解** (1) 先计算公用项的值

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_0}{\gamma} &= \frac{98.1}{61.34 \times 10^{-3}} = 1599.28 \text{ (m)} \\ \frac{\gamma}{\sigma_0} &= \frac{61.34 \times 10^{-3}}{98.1} = 0.62528 \times 10^{-3} \text{ (1/m)} \\ \text{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} &= \text{sh} \left( \frac{400}{2} \times 0.62528 \times 10^{-3} \right) = 0.125382 \\ \text{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} &= \text{ch} \left( \frac{400}{2} \times 0.62528 \times 10^{-3} \right) = 1.00782 \\ L_{h=0} &= \frac{2\sigma_0}{\gamma} \text{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} = 2 \times 1599.28 \times 0.125382 \\ &= 401.043 \text{ (m)} \\ \text{arcsch} \frac{h}{l} &= \ln \left[ \frac{h}{l} + \sqrt{1 + (h/l)^2} \right] \\ &= \ln \left[ \frac{100}{400} + \sqrt{1 + (100/400)^2} \right] = 0.247466 \\ \text{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} &= \ln \left[ \frac{100}{401.043} + \sqrt{1 + (100/401.043)^2} \right] = 0.246836 \\ a &= \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \text{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \\ &= \frac{400}{2} - 1599.28 \times 0.246836 \\ &= -194.76 \text{ (m)} \\ b &= \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \text{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} = \frac{400}{2} + 1599.28 \times 0.246836 = 594.76 \text{ (m)}\end{aligned}$$

$a$  为负值, 说明弧垂最低点落在档距之外。

(2) 计算各种弧垂

$$\begin{aligned}\text{中央弧垂 } f_{\frac{l}{2}} &= \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \text{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - 1 \right) \\ &= \sqrt{1 + \left( \frac{100}{401.043} \right)^2} \times 1599.28 \times (1.00782 - 1) = 12.8894 \text{ (m)}\end{aligned}$$

最大弧垂发生在  $x_m$  处, 有

$$\begin{aligned}x_m &= \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \text{arcsch} \frac{h}{l} - \text{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right) \\ &= \frac{400}{2} + 1599.28 \times (0.247466 - 0.246836) = 201.008 \text{ (m)}\end{aligned}$$

最大弧垂为

$$\begin{aligned}f_m &= f_{\frac{l}{2}} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \frac{h}{l} \left( \text{arcsch} \frac{h}{l} - \text{arcsch} \frac{h}{L_{h=0}} \right) - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{h}{l} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \right) \right] \\ &= 12.8894 + 1599.28 \times \left[ \frac{1}{4} (0.247466 - 0.246836) - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{1}{4} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{100}{401.043} \right)^2} \right) \right] \\ &= 12.8896 \text{ (m)}\end{aligned}$$

由于架空线弧垂最低点位于档距以外，最低点弧垂无实际意义，不再予以计算。

(3) 计算线长：由式 (5-27) 求得全档线长

$$L = \sqrt{L_{h=0}^2 + h^2} = \sqrt{401.043^2 + 100^2} = 413.323(\text{m})$$

(4) 计算应力：

档距中央应力为

$$\sigma_{\frac{l}{2}} = \sigma_0 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}}\right)^2} = 98.1 \times \sqrt{1 + \left(\frac{100}{401.043}\right)^2} = 101.104(\text{MPa})$$

低悬挂点应力为

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = 98.1 \operatorname{ch}[0.62528 \times 10^{-3} \times (-194.76)] \\ &= 98.828(\text{MPa}) \end{aligned}$$

高悬挂点应力为

$$\sigma_B = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = 98.1 \operatorname{ch}[0.62528 \times 10^{-3} \times 594.76] = 104.962(\text{MPa})$$

悬挂点处垂向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{\gamma A} &= \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = 98.1 \operatorname{sh}[0.62528 \times 10^{-3} \times (-194.76)] \\ &= -11.976(\text{MPa}) \end{aligned}$$

$$\sigma_{\gamma B} = \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = 98.1 \operatorname{sh}[0.62528 \times 10^{-3} \times 594.76] = 37.329(\text{MPa})$$

由计算得知，档距中央弧垂与最大弧垂非常接近，相差很小。一般情况下，以中央弧垂近似作为最大弧垂具有足够的精度，工程上常这样做以减少计算工作量。通常也可认为最大弧垂位于档距中央。低悬挂点处的垂向应力  $\sigma_{\gamma A}$  为负值，说明此处架空线上扬，悬挂点受上拔力作用，也说明弧垂最低点在档距以外。

#### 第四节 架空线弧垂、线长和应力计算公式的简化

架空线悬链线方程及其导出的有关公式中，都涉及到双曲函数，计算比较繁琐，必须借助于计算器（机）等计算工具完成。在过去计算手段落后的情况下，为回避双曲函数的计算，工程计算中常使用简化公式。简化公式可通过两种途径得到：一种是将悬链线有关公式中的双曲函数展开成级数和，根据要求的精度取其前若干项作为近似值，加以整理而得到；一种是对架空线的荷载分布给出简化假设，导出一套简化公式——斜抛物线和平抛物线的有关公式。这里仅给出斜抛物线和平抛物线的有关公式推导。

##### 一、斜抛物线法

在假设架空线比载沿线长均布的前提下，其弧垂、线长和应力等有关公式具有悬链线的特点。由于这种假设比较真实，对自重更是如此，因此有关公式被认为是精确的。在工程实际中，架空线的线长与斜档距（两悬点间的距离）非常接近，前者比后者约长千分之几，因而假定架空线的比载沿斜档距均布自然不会产生大的误差。在这种假设下导出的架空线弧垂、线长和应力的有关公式称为斜抛物线公式。

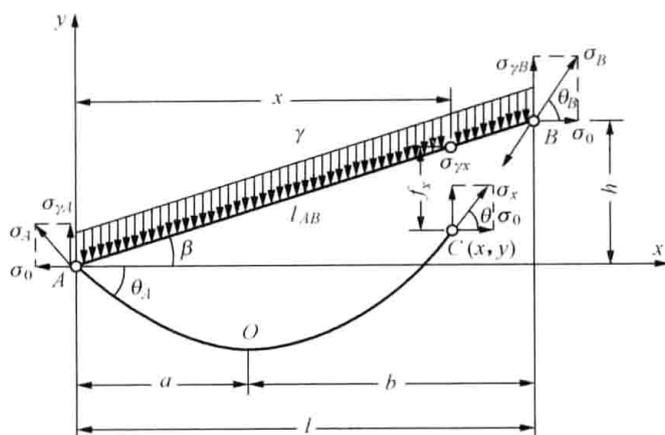


图 5-4 架空线斜抛物线下的受力图

## 1. 斜抛物线悬挂曲线方程

以具有普遍意义的不等高悬点架空线为研究对象。假设比载  $\gamma$  沿斜档距  $l_{AB}$  均布，架空线为理想柔线，选取坐标原点位于较低悬点 A 处， $x$  轴垂直于比载， $y$  轴平行于比载，如图 5-4 所示。

架空线的轴向应力在悬点 A 处为  $\sigma_A$ ，悬点 B 处为  $\sigma_B$ ，任一点  $C(x, y)$  处为  $\sigma_x$ ，三点处应力的水平分量均为  $\sigma_0$ ，垂向分量分别为  $\sigma_{yA}$ 、 $\sigma_{yB}$  和  $\sigma_{yx}$ 。对 AC 段架空线列 A 点的力矩平衡方程式，有

$$\sigma_{yx}x - \sigma_0y - \frac{\gamma x}{\cos\beta} \frac{x}{2} = 0$$

即

$$\sigma_{yx}x - \sigma_0y - \frac{\gamma x^2}{2\cos\beta} = 0 \quad (5-35)$$

对 BC 段架空线 (图 5-4 中未画出) 列 B 点的力矩平衡方程式，有

$$\sigma_{yx}(l-x) - \sigma_0(h-y) + \frac{\gamma(l-x)}{\cos\beta} \frac{l-x}{2} = 0$$

即

$$\sigma_{yx}(l-x) - \sigma_0(h-y) + \frac{\gamma(l-x)^2}{2\cos\beta} = 0 \quad (5-36)$$

式 (5-35) 和式 (5-36) 联立消去未知量  $\sigma_{yx}$ ，解得架空线斜抛物线悬挂曲线方程为

$$y = \frac{h}{l}x - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0\cos\beta} = x\tan\beta - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0\cos\beta} \quad (5-37)$$

式 (5-37) 是在假定比载沿“斜档距”均布的条件下推出的，且为  $x$  的二次函数，图像呈抛物线形状，工程上顾名思义地称为斜抛物线方程，以便与后面将要讲到的平抛物线方程相区别，而并非表示该抛物线是歪斜的。

## 2. 斜抛物线弧垂公式

任一点处的弧垂为

$$f_x = \frac{h}{l}x - y = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0\cos\beta} \quad (5-38)$$

档距中央弧垂为

$$f_{\frac{l}{2}} = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0\cos\beta} \quad (5-39)$$

令式 (5-38) 对  $x$  的导数等于零，可得最大弧垂发生在  $x=l/2$  处即档距中央，其最大弧垂与档距中央弧垂重合，即

$$f_m = f_{\frac{l}{2}} = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0\cos\beta} \quad (5-39')$$

当已知档距中央的最大弧垂后，架空线任一点的弧垂可表示为

$$f_x = 4f_m \left[ \frac{x}{l} - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right] \quad (5-40)$$

令  $x' = l - x$  代入式 (5-40) 仍可得到相同的形式, 说明斜抛物线弧垂是关于档距中央对称的。从式 (5-40) 可以看出, 任一点处的弧垂与高差  $h$  没有直接关系。因此对于同样大小的档距, 在档距中央弧垂相等的情况下, 等高悬点和不等高悬点架空线对应点的弧垂相等, 如图 5-5 所示。

将式 (5-37) 对  $x$  求导数, 可得到架空线上任一点的斜率为

$$\frac{dy}{dx} = \tan\theta = \tan\beta - \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0 \cos\beta} \quad (5-41)$$

令  $dy/dx = 0$ , 解得架空线最低点距悬挂点 A、B 的距离在  $x$  轴上的投影 (水平距离) 分别为

$$a = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \sin\beta = \frac{l}{2} \left( 1 - \frac{h}{4f_m} \right) \quad (5-42)$$

$$b = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \sin\beta = \frac{l}{2} \left( 1 + \frac{h}{4f_m} \right) \quad (5-43)$$

将式 (5-38) 中的  $x$  用式 (5-42) 的  $a$  值代替, 可得到架空线最低点弧垂为

$$f_0 = \frac{\gamma a(l-a)}{2\sigma_0 \cos\beta} = \frac{\gamma ab}{2\sigma_0 \cos\beta} \quad (5-44)$$

或写成

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{\gamma}{2\sigma_0 \cos\beta} \left[ \left( \frac{l}{2} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_0 \sin\beta}{\gamma} \right)^2 \right] = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} - \frac{\sigma_0}{2\gamma} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \cos\beta \\ &= f_m - \frac{h^2}{16f_m} \end{aligned} \quad (5-44')$$

在采用“平视法”观测弧垂时, 需要知道悬挂点与最低点的高差。架空线最低点的纵坐标

$$\begin{aligned} y_0 &= a \tan\beta - \frac{\gamma a(l-a)}{2\sigma_0 \cos\beta} = \frac{h}{2} - \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} - \frac{\sigma_0}{2\gamma} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \cos\beta \\ &= -f_m \left( 1 - \frac{h}{4f_m} \right)^2 \end{aligned} \quad (5-45)$$

低悬挂点 A 与最低点 O 之间的高差为

$$h_{A0} = y_A - y_0 = f_m \left( 1 - \frac{h}{4f_m} \right)^2 \quad (5-46)$$

高悬挂点 B 与最低点 O 之间的高差为

$$h_{B0} = y_B - y_0 = h + f_m \left( 1 - \frac{h}{4f_m} \right)^2 = f_m \left( 1 + \frac{h}{4f_m} \right)^2 \quad (5-47)$$

利用式 (5-46)、式 (5-47) 观测弧垂时, 必须保证最低点落在档内, 即要求  $h \leq 4f_m$ 。当  $h > 4f_m$  时,  $a < 0$ , 最低点位于档外而成为一个“虚点”。

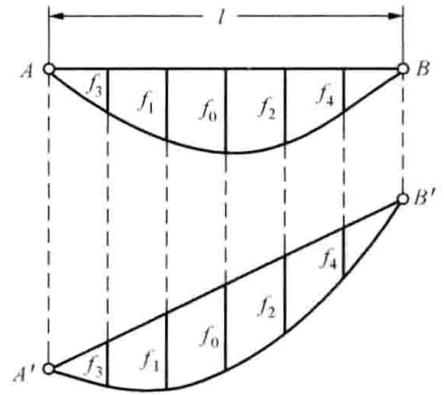


图 5-5 等高悬点与不等高悬点架空线弧垂间的关系

## 3. 斜抛物线应力公式

(1) 任一点处的垂向应力:

联立式 (5-35) 和式 (5-36), 消去纵坐标  $y$ , 可得任一点  $C$  处架空线轴向应力的垂向分量  $\sigma_{\gamma x}$  为

$$\sigma_{\gamma x} = \sigma_0 \tan\beta - \frac{\gamma(l-2x)}{2\cos\beta} \quad (5-48)$$

在架空线最低点  $O$  处,  $\sigma_{\gamma 0} = 0$ 。因此在利用式 (5-48) 计算时, 若任一点  $C$  位于最低点与悬挂点  $A$  之间, 即  $AO$  段时,  $\sigma_{\gamma x}$  的值为负, 说明  $C$  点的垂向应力方向向下。

当  $x=0$  时, 得到低悬挂点  $A$  处的垂向应力为

$$\sigma_{\gamma A} = -\left(\sigma_0 \tan\beta - \frac{\gamma l}{2\cos\beta}\right) = \frac{\gamma}{\cos\beta} \left(\frac{l}{2} - \frac{\sigma_0 h}{\gamma l} \cos\beta\right) = \frac{\gamma a}{\cos\beta} \quad (5-49)$$

当  $x=l$  时, 得到高悬挂点  $B$  处的垂向应力为

$$\sigma_{\gamma B} = \sigma_0 \tan\beta + \frac{\gamma l}{2\cos\beta} = \frac{\gamma}{\cos\beta} \left(\frac{l}{2} + \frac{\sigma_0 h}{\gamma l} \cos\beta\right) = \frac{\gamma b}{\cos\beta} \quad (5-50)$$

式 (5-49) 的负号是为保证悬挂点处垂向应力向上时为正而加的。由  $\sigma_{\gamma A}$ 、 $\sigma_{\gamma B}$  的计算式知道, 悬挂点处的垂向应力等于架空线最低点至悬挂点间的架空线单位截面荷载值。如果视  $\gamma/\cos\beta$  为均匀分布在档距  $l$  上的比载, 则悬点处的垂向应力为该比载与最低点至该悬挂点水平距离的乘积。

(2) 任一点处的轴向应力:

架空线任一点处的轴向应力等于该点处的水平应力和垂向应力的矢量和, 即

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{\gamma x}^2} = \sigma_0 \sqrt{1 + \left(\tan\beta - \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0 \cos\beta}\right)^2} \\ &= \sigma_0 \sqrt{1 + \tan^2\beta + \left(\frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0 \cos\beta}\right)^2 - \frac{\gamma(l-2x)}{\sigma_0 \cos\beta} \tan\beta} \\ &= \frac{\sigma_0}{\cos\beta} \sqrt{1 + \left[\frac{\gamma^2(l-2x)^2}{4\sigma_0^2} - \frac{\gamma(l-2x)}{\sigma_0} \sin\beta\right]} \end{aligned}$$

上式根号下方括号一项的绝对值一般小于 1, 可以应用近似公式  $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$  进行化简, 有

$$\begin{aligned} \sigma_x &\approx \frac{\sigma_0}{\cos\beta} \left[1 + \frac{\gamma^2(l-2x)^2}{8\sigma_0^2} - \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0} \sin\beta\right] \\ &= \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2(l-2x)^2}{8\sigma_0 \cos\beta} - \frac{\gamma(l-2x)}{2} \tan\beta \end{aligned} \quad (5-51)$$

当  $x=l/2$  时, 得到架空线档距中央的轴向应力为

$$\sigma_{\frac{l}{2}} = \frac{\sigma_0}{\cos\beta} \quad (5-52)$$

注意到用倾斜角  $\theta$  表示的任一点处的应力为  $\sigma_x = \sigma_0 / \cos\theta$ , 与式 (5-52) 比较可以看出, 在档距中央, 架空线的倾斜角等于高差角, 即  $\theta = \beta$ 。这说明档距中央架空线的切线与斜档距平行, 该点称为斜切点, 档距中央弧垂也称为斜切点弧垂。将式 (5-51) 经过适当变形, 任一点应力可由档距中央处有关数据表示为

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \gamma \left[ \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos\beta} - \frac{l}{2} \tan\beta + x \tan\beta \right] \\ &= \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \gamma \left\{ \left[ x \tan\beta - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos\beta} \right] - \left[ \frac{l}{2} \tan\beta - \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} \right] \right\} \\ &= \sigma_{\frac{l}{2}} + \gamma(y - y_{\frac{l}{2}})\end{aligned}\quad (5-53)$$

式(5-53)表明, 架空线任一点的应力由两部分组成: 一部分是档距中央应力 $\sigma_{\frac{l}{2}}$ , 一部分是该点与档距中央的高度差引起的应力 $\gamma(y - y_{\frac{l}{2}})$ 。如果架空线上任意两点处的应力为 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ , 相应的纵坐标为 $y_1$ 、 $y_2$ , 根据式(5-53)可得到与式(5-31)相同的架空线任意两点间的应力关系, 即

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \gamma(y_2 - y_1) \quad (5-31')$$

悬挂点 A、B 处的轴向应力可分别令 $x=0$ 和 $x=l$ , 代入式(5-51)得到

$$\sigma_A = \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2 l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} - \frac{\gamma h}{2} = \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \gamma \left( f_m - \frac{h}{2} \right) \quad (5-54)$$

$$\sigma_B = \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2 l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} + \frac{\gamma h}{2} = \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \gamma \left( f_m + \frac{h}{2} \right) \quad (5-55)$$

工程上还采用另一种悬挂点应力简化计算公式。由于 $y_A=0$ ,  $y_B=h$ , 根据两点间的应力关系, 可以得到

$$\sigma_A = \sigma_0 + \gamma(y_A - y_0) = \sigma_0 - \frac{\gamma h}{2} + \frac{\gamma^2 l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} + \frac{\sigma_0}{2} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \cos\beta \quad (5-56)$$

$$\sigma_B = \sigma_0 + \gamma(y_B - y_0) = \sigma_0 + \frac{\gamma h}{2} + \frac{\gamma^2 l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} + \frac{\sigma_0}{2} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \cos\beta \quad (5-57)$$

在高差很大的档距或有高差的特大跨越档中, 悬点应力会比最低点应力大很多, 这时应按高悬挂点处的应力验算架空线的强度。若控制悬挂点应力 $\sigma_B$ 为允许值, 则需要求出最低点的应力。为此将式(5-55)的两端分别乘以 $\sigma_0$ , 整理后得到

$$\frac{1}{\cos\beta} \sigma_0^2 - \left( \sigma_B - \frac{\gamma h}{2} \right) \sigma_0 + \frac{\gamma^2 l^2}{8 \cos\beta} = 0$$

上式是关于 $\sigma_0$ 的一元二次方程, 解之得

$$\sigma_0 = \frac{\cos\beta}{2} \left( \sigma_B - \frac{\gamma h}{2} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \sigma_B - \frac{\gamma h}{2} \right)^2 \cos^2 \beta - \frac{\gamma^2 l^2}{2}} \quad (5-58)$$

对于等高悬点,  $h=0$ , 最低点应力为

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_B}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_B^2 - \frac{\gamma^2 l^2}{2}} \quad (5-59)$$

#### 4. 斜抛物线的线长公式

架空线的线长 $L$ 可由弧长微分公式积分求得

$$\begin{aligned}L &= \int_0^l \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx = \int_0^l \sqrt{1 + \left( \tan\beta - \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0 \cos\beta} \right)^2} dx \\ &= \int_0^l \sqrt{1 + \tan^2 \beta + \left( \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0 \cos\beta} \right)^2 - \frac{\gamma(l-2x)}{\sigma_0 \cos\beta} \tan\beta} dx \\ &= \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0} \right)^2 - \frac{\gamma(l-2x)}{\sigma_0} \sin\beta \right]} dx\end{aligned}$$



表 5-1

架空线弧垂、线长、应力公式一览表

类别 参数	悬链线公式	斜抛物线公式 (大高差 $0.1 < h/l < 0.25$ )	平抛物线公式 (小高差 $h/l < 0.1$ )	
悬挂 曲线 方程	$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} - \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right]$ $= \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-2a)}{2\sigma_0}$ $= \frac{h}{L_{h=0}} \left[ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right]$ $- \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \left[ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right]$	$y = x \tan \beta - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta}$	$y = x \tan \beta - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0}$	
架空 线 弧 垂	任一点 弧垂	$f_x = \frac{h}{l} x - y$ $= x \tan \beta - \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(x-2a)}{2\sigma_0}$	$f_x = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta}$ $= 4f_m \left[ \frac{x}{l} - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right]$	$f_x = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0}$ $= 4f_m \left[ \frac{x}{l} - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right]$
	最大 弧垂	$f_{\frac{l}{2}} = \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - 1 \right)$ $f_m = f_{\frac{l}{2}} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \left\{ \frac{h}{l} \left( \operatorname{arcsh} \frac{h}{l} - \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right) \right.$ $\left. - \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{h}{l} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \right] \right\}$ <p>发生在</p> $x_m = a + \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsh} \frac{h}{l}$ $= \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{arcsh} \frac{h}{l} - \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right)$	$f_m = f_{\frac{l}{2}} = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos \beta}$ <p>发生在档距中央</p>	$f_m = f_{\frac{l}{2}} = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}$ <p>发生在档距中央</p>
档内 线长	$L = \sqrt{L_{h=0}^2 + h^2} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-2a)}{2\sigma_0}$ <p>注: <math>L_{h=0} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0}</math></p>	$L = \frac{l}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2 l^3 \cos \beta}{24\sigma_0^2}$	$L = l + \frac{h^2}{2l} + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma_0^2}$ $L = \frac{l}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma_0^2} \quad (\text{修正式})$	
架空 线 应 力	任一点 应力	$\sigma_x = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0}$ $= \sigma_0 \operatorname{ch} \left[ \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$	$\sigma_x = \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2(l-2x)^2}{8\sigma_0 \cos \beta}$ $- \frac{\gamma(l-2x)}{2} \tan \beta$	$\sigma_x = \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2(l-2x)^2}{8\sigma_0}$ $- \frac{\gamma(l-2x)}{2} \tan \beta$
	悬挂 点 应力	$\sigma_A = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{ch} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$ $\sigma_B = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{ch} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$	$\left. \begin{aligned} \sigma_A \\ \sigma_B \end{aligned} \right\} = \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2 l^2}{8\sigma_0 \cos \beta} \mp \frac{\gamma h}{2}$ $= \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \gamma \left( f_m \mp \frac{h}{2} \right)$	$\left. \begin{aligned} \sigma_A \\ \sigma_B \end{aligned} \right\} = \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2 l^2}{8\sigma_0} \mp \frac{\gamma h}{2}$ $= \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \gamma \left( f_m \mp \frac{h}{2} \right)$
	悬挂 点 垂向 应力	$\sigma_{\gamma A} = \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$ $\sigma_{\gamma B} = \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$	$\sigma_{\gamma A} = \frac{\gamma a}{\cos \beta}$ $\sigma_{\gamma B} = \frac{\gamma b}{\cos \beta}$	$\sigma_{\gamma A} = \gamma a = \gamma \left( \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \tan \beta \right)$ $\sigma_{\gamma B} = \gamma b = \gamma \left( \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \tan \beta \right)$
	两点 应力 关系	$\sigma_2 - \sigma_1 = \gamma (y_2 - y_1)$	$\sigma_2 - \sigma_1 = \gamma (y_2 - y_1)$	$\sigma_2 - \sigma_1 = \gamma (y_2 - y_1)$
最低点至 两悬挂点 的水平 距离	$a = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}}$ $b = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}}$	$a = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \sin \beta$ $b = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \sin \beta$	$a = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma} \tan \beta$ $b = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \tan \beta$	
悬点处架 空线的倾 斜角	$\tan \theta_A = -\operatorname{sh} \frac{\gamma a}{\sigma_0} = -\operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} - \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$ $\tan \theta_B = \operatorname{sh} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = \operatorname{sh} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$	$\tan \theta_A = \tan \beta - \frac{\gamma l}{2\sigma_0 \cos \beta}$ $\tan \theta_B = \tan \beta + \frac{\gamma l}{2\sigma_0 \cos \beta}$	$\tan \theta_A = \tan \beta - \frac{\gamma l}{2\sigma_0}$ $\tan \theta_B = \tan \beta + \frac{\gamma l}{2\sigma_0}$	

### 三、三类计算公式的精度分析

架空线的自重比载是沿线长均布的,冰重比载和风压比载近似认为沿线长均布一般也是接近实际情况的,因此采用悬链线公式进行架空线的有关计算是比较精确的。斜抛物线和平抛物线对比载分布的假设和实际情况存在不同的差异,因而其公式也就存在不同的误差,应用范围受到一定的限制。下面以悬链线有关公式的计算结果为精确值,分析斜抛物线和平抛物线相应公式的精度。

#### 1. 线长公式的精度分析

在架空输电线路的设计中,对线长的精度要求很高,以控制弧垂和应力的误差不致太大,计算线长时的公式选择就显得非常重要。下面以斜抛物线公式为例,说明线长计算公式的误差分析方法。悬链线的线长为

$$L = \sqrt{L_{h=0}^2 + h^2} = \sqrt{\left(\frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0}\right)^2 + h^2} = \sqrt{\left[\frac{l^2}{4} \frac{8\sigma_0}{\gamma l^2} \operatorname{sh}\left(\frac{4}{l} \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}\right)\right]^2 + h^2}$$

斜抛物线的线长为

$$L_1 = \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2 l^3 \cos\beta}{24\sigma_0^2} = l \sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2} + \frac{8}{3l} \left(\frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}\right)^2 / \sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2}$$

所以斜抛物线线长的相对误差为

$$n_1 = \frac{L_1 - L}{L} \times 100\% = \left[ \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2} + \frac{8}{3} \left(\frac{f_0}{l}\right)^2 / \sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{l}{4f_0} \operatorname{sh} \frac{4f_0}{l}\right)^2 + \left(\frac{h}{l}\right)^2}} - 1 \right] \times 100\%$$

式中  $f_0$ ——等高悬点时档距中央的平抛物线弧垂,  $f_0 = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}$ 。

以  $\frac{h}{l}$ 、 $\frac{f_0}{l} = \frac{\gamma l}{8\sigma_0}$  为变量,计算斜抛物线线长误差  $n_1$  的变化情况,示于图 5-7 中。平抛物线线长 [式 (5-61)] 的相对误差  $n_2$  和改进后的平抛物线线长 [式 (5-62)] 的相对误差  $n_3$  的计算式可类似上式导出,一并列入图 5-7 中。

从图 5-7 可以看出,斜抛物线线长的误差  $n_1$  随  $f_0/l$  的增加而增大,但均为负误差,说明计算线长偏小,而且  $n_1$  与高差系数 ( $h/l$ ) 几乎无关。架空输电线路的  $f_0/l$  一般为 0.05 左右,斜抛物线线长公式的误差在十万分之几,精度很高。误差  $n_2$ 、 $n_3$  随  $h/l$ 、 $f_0/l$  而变化,在架空输电线路使用的  $f_0/l$  数值范围内,当  $h/l > 0.2$  时,其误差显著增大;当  $f_0/l$  大到其一值后,正误差反而减少向负误差变化。一般认为  $h/l > 0.15$  时架空输电线路不宜采用平抛物线线长公式。

**【例 5-3】** 条件同 [例 5-2],试利用各种线长公式计算架空线的悬挂曲线长度。

**解** 由 [例 5-2] 得知,由悬链线公式算得的悬挂曲线长度的精确值  $L = 413.323\text{m}$ ,等高悬挂点时精确值  $L_{h=0} = 401.043\text{m}$ 。由斜抛物线线长公式,得

$$L = 400 \sqrt{1 + \left(\frac{100}{400}\right)^2} + \frac{61.34^2 \times 10^{-6} \times 400^3}{24 \times 98.1^2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (100/400)^2}} = 413.322(\text{m})$$

由平抛物线线长公式,得

$$L = 400 + \frac{100^2}{2 \times 400} + \frac{61.34^2 \times 10^{-6} \times 400^3}{24 \times 98.1^2} = 413.543(\text{m})$$

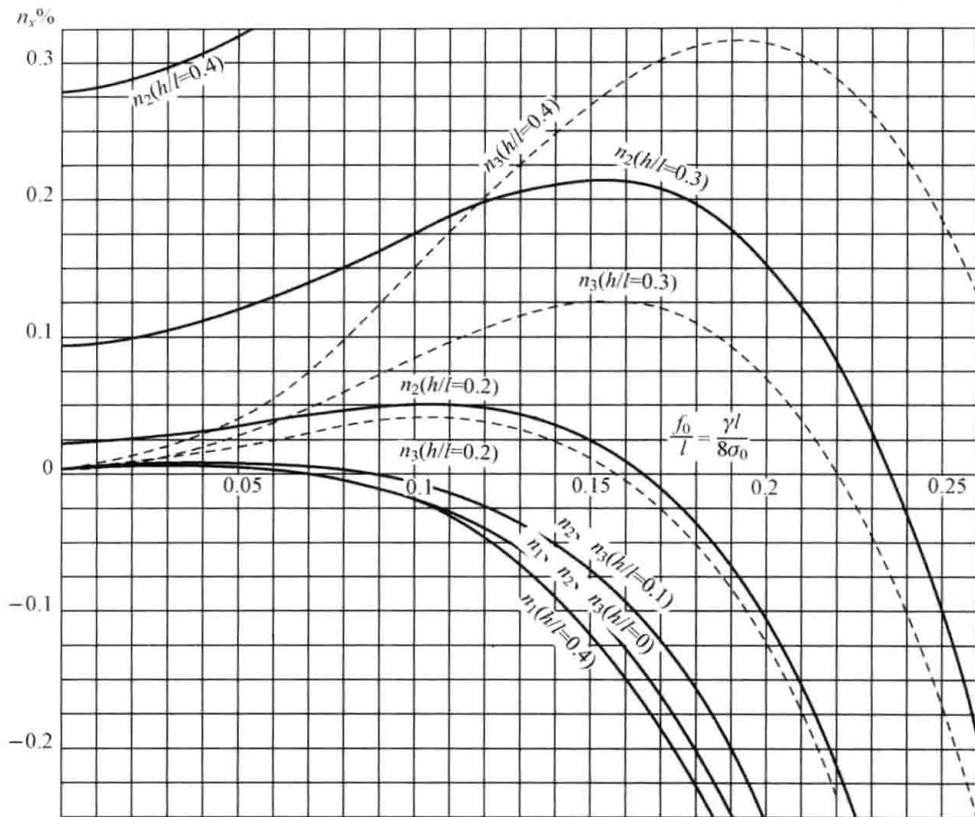


图 5-7 线长计算公式误差曲线

由平抛物线线长的修正公式，得

$$L = 400 \sqrt{1 + \left(\frac{100}{400}\right)^2} + \frac{61.34^2 \times 10^{-6} \times 400^3}{24 \times 98.1^2} = 413.353(\text{m})$$

认为该档为等高悬点时，由线长近似公式（斜抛物线和平抛物线公式）得

$$L = 400 + \frac{61.34^2 \times 10^{-6} \times 400^3}{24 \times 98.1^2} = 401.043(\text{m})$$

上述计算进一步表明，等高悬点时线长近似公式对一般档距具有足够的精度；不等高悬点时斜抛物线线长公式具有很好的精度；对不等高悬点忽略高差影响，会引起不可接受的误差。同时还可以看出，架空线的线长主要决定于两悬挂点间的距离，由弧垂引起的线长变化量是很微小的，一般仅为两悬挂点间距的千分之几（例中为  $1.002/412.31 = 2.4\%$ ）。反过来看，线长的微小改变，将会引起弧垂的很大变化。如果弧垂或应力的误差要求为  $1\% \sim 2\%$ ，则要求线长的误差一般要达到万分之几。如果档距在数百米，线长的计算应精确到厘米以上。因此，线长的计算要求采用甚为精确的公式，这在利用线长调整弧垂和应力时，应该格外注意。

## 2. 弧垂公式的精度分析

与线长的精度分析相类似，取  $h/l$ 、 $f_0/l$  为变量，采用下式计算平抛物线和斜抛物线弧垂误差  $m_1\%$  和  $m_2\%$ ，如图 5-8 所示。

$$m_i \% = \frac{f_m - f_{mi}}{f_m} \times 100\%$$

式中  $f_m$ ——悬链线最大弧垂；

$f_{mi}$ ——平抛物线或斜抛物线最大弧垂。

从图 5-8 可看出,斜抛物线和平抛物线弧垂在任何情况下均偏小,施工时架空线偏于拉紧,使应力偏大。在一般档距和应力下输电线路的  $f/l < 0.1$ , 在  $h/l < 0.1$  时,平抛物线弧垂减小值不超过 2%, 应力增大值也可近似认为不超过 2%。由于架空线使用应力考虑了较大的安全系数,而且 2% 的应力增量同施工测量误差、悬挂点应力增量、振动附加应力、接头强度降低等因素比较并不占显著位置,故可以认为是容许的。然而在实际架线中往往并不能保证每档均以平抛物线弧垂架线,如连续档中有等高悬点档和不等高悬点档,如果在不等高悬点档观测弧垂,等高档的弧垂必然小于平抛物线的计算值,引起应力再次增大。对于大档距和大高差档距,不仅弧垂误差的百分数大,且其绝对值往往大到不能容许的程度。如弧垂为 100m, 误差 2% 就是 2m。从图中可以看到,斜抛物线弧垂公式具有较高的精度,且随着  $h/l$  的增加误差反而减小。当  $h/l > 0.1$  时,一般应考虑采用斜抛物线公式计算弧垂。

平抛物线和斜抛物线应力公式的误差可认为与弧垂公式的误差类似,不再详细分析。

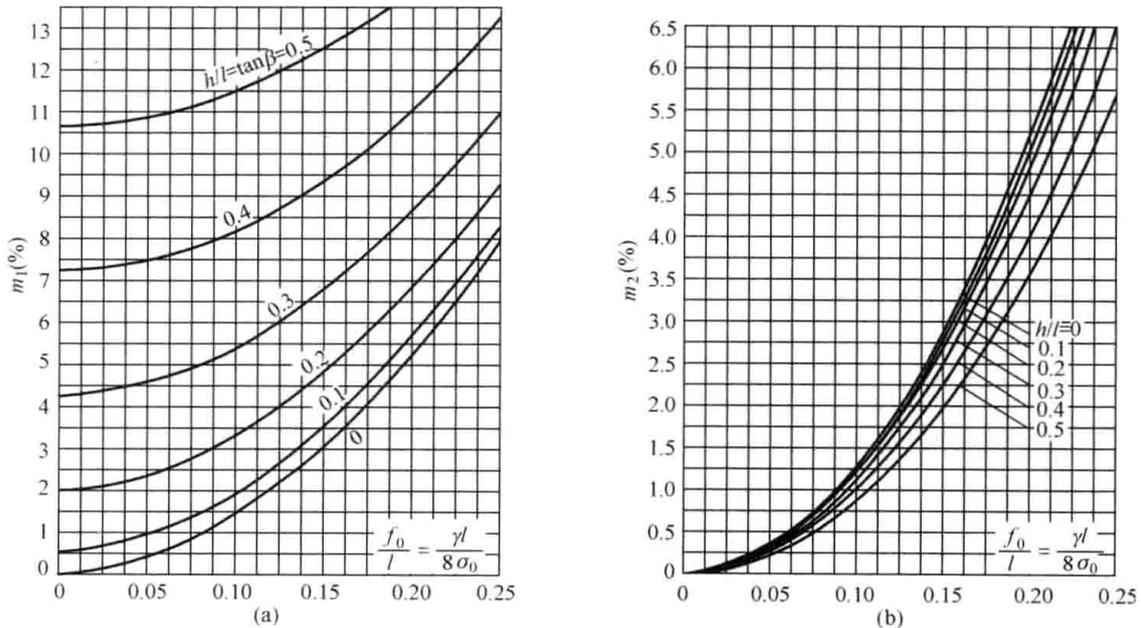


图 5-8 弧垂误差曲线

(a) 平抛物线弧垂误差; (b) 斜抛物线弧垂误差

**【例 5-4】** 某档距  $l=1000\text{m}$ , 高差  $h=300\text{m}$ , 比值  $\gamma/\sigma_0=6\times 10^{-4}/\text{m}$ , 试利用各种弧垂公式计算架空线的档距中央弧垂和最大弧垂。

**解** 采用悬链线精确公式 (5-20) 算得档距中央弧垂  $f_{l/2}=78.8\text{m}$ ;

采用悬链线精确公式 (5-23) 算得最大弧垂  $f_m=78.81\text{m}$ ;

采用斜抛物线公式 (5-39) 算得中央弧垂或最大弧垂  $f_{l/2}=f_m=78.3\text{m}$ ;

若不考虑高差  $h$  的影响即认为  $h=0$ , 用悬链线公式算得  $f_{l/2}=f_m=75.56\text{m}$ ;

采用平抛物线公式计算得到  $f_{l/2}=f_m=75\text{m}$ 。

显然斜抛物线弧垂公式与相应的精确值很接近, 精度较高。忽略高差影响时, 无论是悬链线公式还是平抛物线公式, 都与精确值有较大的误差。因此对于大高差悬点 ( $0.2 < h/l < 0.25$ ) 斜抛物线弧垂公式具有足够精确, 但不可忽视高差角的影响。

总之，在一般情况下，小高差 ( $h/l \leq 0.1$ ) 档距可采用平抛物线公式，大高差 ( $0.1 < h/l \leq 0.25$ ) 档距可采用斜抛物线公式，其他情况下应采用悬链线公式。

### 第五节 架空线的平均高度与平均应力

在架空输电线路的设计中，常常需要计算架空线的平均高度和平均应力。如确定所受风荷载时需要知道架空线的平均高度，计算架空线弹性伸长时则要用到平均应力。

#### 一、架空线的平均高度

架空线的平均高度是指架空线上各点相对弧垂最低点的高度差对于档距的平均值，其大小等于架空线上各点与最低点间的高差沿档距的积分被档距除得的商。如图 5-9 所示，架空线的平均高度  $h_{cp}$  为

$$\begin{aligned} h_{cp} &= \frac{1}{l} \int_0^l (y - y_0) dx = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} - 1 \right] dx \\ &= \frac{\sigma_0}{\gamma l} \left\{ \frac{\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-a)}{\sigma_0} + \operatorname{sh} \frac{\gamma a}{\sigma_0} \right] - l \right\} \\ &= \frac{\sigma_0}{\gamma l} \left\{ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \left[ \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-2a)}{2\sigma_0} \right] - l \right\} \\ &= \frac{\sigma_0}{\gamma l} (L - l) = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \frac{L}{l} - 1 \right) \end{aligned} \quad (5-63)$$

式 (5-63) 表明，架空线的平均高度与架空线的最低点应力  $\sigma_0$ 、比载  $\gamma$ 、档距  $l$  以及档内线长  $L$  有关。式 (5-63) 是计算架空线平均高度的悬链线精确公式。当  $L$  已算出时，利用其计算  $h_{cp}$  既准确又方便。

为说明架空线的平均高度  $h_{cp}$  与最大弧垂  $f_m$  的关系，下面导出平均高度  $h_{cp}$  的斜抛物线形式。

利用式 (5-37)、式 (5-45) 沿档距积分，有

$$\begin{aligned} h_{cp} &= \frac{1}{l} \int_0^l (y - y_0) dx \\ &= \frac{1}{l} \int_0^l \left\{ \left[ x \tan \beta - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta} \right] - \left[ \frac{h}{2} - \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos \beta} - \frac{\sigma_0}{2\gamma} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \cos \beta \right] \right\} dx \\ &= \frac{\gamma l^2}{24\sigma_0 \cos \beta} + \frac{\sigma_0 \cos \beta}{2\gamma} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \\ &= \frac{1}{3} f_m + (y_{\frac{l}{2}} - y_0) \end{aligned} \quad (5-64)$$

式中  $(y_{\frac{l}{2}} - y_0)$  一项为档距中央架空线高出弧垂最低点的距离。从式 (5-64) 可以看出，架空线的平均高度位于档距中央架空线以上  $f_m/3$  处，如图 5-9 所示。

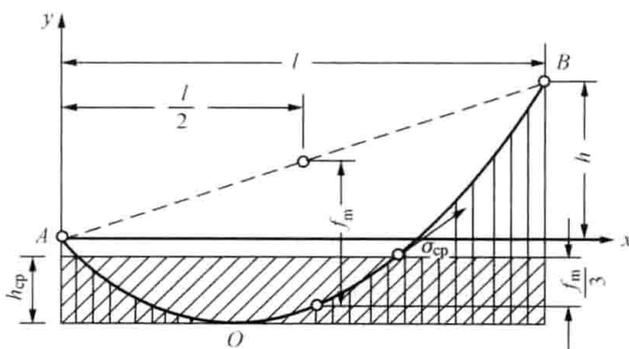


图 5-9 架空线的平均高度

需要指出的是, 架空线的平均高度是相对弧垂最低点而言的, 与架空线对地面的平均高度不同。当档距所在地面为水平面时, 架空线对地的平均高度为其最低点对地高度与  $h_{\text{cp}}$  之和, 或档距中央架空线对地高度与  $f_m/3$  之和。当档距所在地面的断面呈不规则曲线时, 架空线对地的平均高度可采用作图法, 量得架空线数点的对地高度后取其平均值得到。

## 二、架空线的平均应力

架空线的平均应力是指架空线上各点的应力沿线长的积分对于线长的平均值。在平均应力  $\sigma_{\text{cp}}$  作用下, 档内架空线产生的弹性伸长等于其在悬挂状态的实际应力  $\sigma_x$  作用下的全部弹性伸长。由于

$$dL = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \text{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} dx$$

$$\sigma_x = \sigma_0 \text{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0}$$

由平均应力的定义, 有

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{cp}} &= \frac{1}{L} \int_0^l \sigma_x dL = \frac{\sigma_0}{L} \int_0^l \left[ \text{ch} \frac{\gamma(x-a)}{\sigma_0} \right]^2 dx \\ &= \frac{\sigma_0}{2L} \int_0^l \left[ \text{ch} \frac{2\gamma(x-a)}{\sigma_0} + 1 \right] dx = \frac{\sigma_0}{2L} \left[ \frac{\sigma_0}{2\gamma} \int_0^l \text{ch} \frac{2\gamma(x-a)}{\sigma_0} d \frac{2\gamma(x-a)}{\sigma_0} + \int_0^l dx \right] \\ &= \frac{\sigma_0}{2L} \left\{ \frac{\sigma_0}{2\gamma} \left[ \text{sh} \frac{2\gamma(l-a)}{\sigma_0} + \text{sh} \frac{2\gamma a}{\sigma_0} \right] + l \right\} = \frac{\sigma_0}{2L} \left\{ \frac{\sigma_0}{\gamma} \text{sh} \frac{\gamma l}{\sigma_0} \text{ch} \frac{\gamma(l-2a)}{\sigma_0} + l \right\} \\ &= \frac{\sigma_0}{2L} \left\{ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \text{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \text{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \left[ 2 \text{ch}^2 \frac{\gamma(l-2a)}{2\sigma_0} - 1 \right] + l \right\} \\ &= \frac{\sigma_0}{2L} \left\{ L_{h=0} \text{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \left[ 2 \frac{L^2}{L_{h=0}^2} - 1 \right] + l \right\} = \frac{\sigma_0}{2L} \left\{ \text{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \left[ \frac{2L^2}{L_{h=0}} - L_{h=0} \right] + l \right\} \\ &= \frac{\sigma_0}{2L} \left[ l + \frac{L^2 + h^2}{\sqrt{L^2 - h^2}} \text{ch} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \right] \end{aligned} \quad (5-65)$$

式 (5-65) 为用悬链线表示的架空线的平均应力的精确计算公式。该公式显得比较复杂, 工程上常用其斜抛物线形式。将架空线的平均应力视为其上各点应力  $\sigma_x$  沿斜档距  $l_{AB} = l/\cos\beta$  的积分对于斜档距的平均值, 则

$$\sigma_{\text{cp}} = \frac{\cos\beta}{l} \int_0^{l/\cos\beta} \sigma_x d\left(\frac{x}{\cos\beta}\right) = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_x dx$$

将式 (5-51) 代入, 得

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{cp}} &= \frac{1}{l} \int_0^l \left[ \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2(l-2x)^2}{8\sigma_0 \cos\beta} - \frac{\gamma(l-2x)}{2} \tan\beta \right] dx \\ &= \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2 l^2}{24\sigma_0 \cos\beta} = \frac{\sigma_0}{\cos\beta} + \frac{\gamma f_m}{3} \end{aligned} \quad (5-66)$$

式中  $\sigma_0/\cos\beta$ ——档距中央架空线的应力;

$\gamma f_m/3$ ——可看作是由距离档距中央架空线高差  $f_m/3$  引起的应力。

由此得知, 架空线的平均应力实际上就是架空线平均高度处的应力。考虑到  $\gamma f_m/3$  与

$\sigma_0/\cos\beta$  相比甚小, 因此除特大弧垂外, 一般以档距中央应力  $\sigma_{l/2}$  近似代替平均应力以便于计算。

## 第六节 均布垂直比载和水平比载共同作用下架空线的计算

架空线一方面受到自重、冰重产生的垂直比载  $\gamma_v$  的作用, 另一方面还经常受到横向水平比载  $\gamma_h$  的作用。综合比载  $\gamma' = \sqrt{\gamma_v^2 + \gamma_h^2}$  作用的结果, 使原来位于垂直平面内的架空线向风压比载方向偏摆。由于架空线具有弧垂, 即使风向垂直于线路走向, 风偏后沿线各点的风速方向与电线轴线间的夹角亦均不相同, 风压的大小、方向就不相同, 这将使计算大大复杂。由于架空线弧垂相对档距长度来说是很小的, 档内线长与斜档距相差无几, 因此可以假设: 风压水平比载沿斜档距横向均匀分布, 即不考虑弧垂、风偏对水平比载的影响; 同时假设垂直比载沿斜档距垂向均匀分布, 从而综合比载亦沿斜档距均布, 其大小和方向处处相同。在此综合比载作用下, 柔性架空线风偏后, 必然位于综合比载所在平面内。这样, 均布垂直比载和水平比载共同作用下架空线的有关计算, 实际上成为风偏平面内具有沿斜档距均布比载  $\gamma'$  的斜抛物线弧垂、应力和线长的计算问题。

### 一、风偏平面内架空线的弧垂、应力和线长的计算

不等高悬点架空线风偏后的受力情况如图 5-10 所示。图中  $l$  为档距,  $h$  为高差。无风时, 架空线仅受垂直比载  $\gamma_v$  的作用, 位于垂直平面  $AEBD$  内, 悬挂曲线如虚线  $ACB$  所示。有风时, 架空线受综合比载  $\gamma'$  的作用, 绕  $AB$  轴转动, 平衡时位于风偏平面  $AE'BD'$  内, 悬挂曲线为图中实线  $AC'B$ 。风偏平面与垂直平面间的夹角  $\eta$  称为风偏角, 其大小可由  $\gamma'$ 、 $\gamma_v$  和  $\gamma_h$  间的关系得到, 即

$$\left. \begin{aligned} \sin\eta &= \frac{\gamma_h}{\gamma'} \\ \cos\eta &= \frac{\gamma_v}{\gamma'} \\ \tan\eta &= \frac{\gamma_h}{\gamma_v} \end{aligned} \right\} \quad (5-67)$$

由于架空线风偏后受到沿斜档距  $l_{AB}$  均布的综合比载  $\gamma'$  的作用, 若已知风偏平面内的档距  $l'$ 、高差  $h'$ 、最低点  $O'$  的轴向应力  $\sigma'_0$ , 代入有关斜抛物线公式即可得到风偏平面内架空线的弧垂、应力和线长。风偏平面内架空线的弧垂、应力和线长的计算转化为档距  $l'$ 、高差  $h'$  (高差角  $\beta'$ )、均布比载  $\gamma'$  作用下的架空线计算问题。

根据图 5-10 中的几何图形, 可得到风偏平面内各参数与垂直平面内各参数的关系为

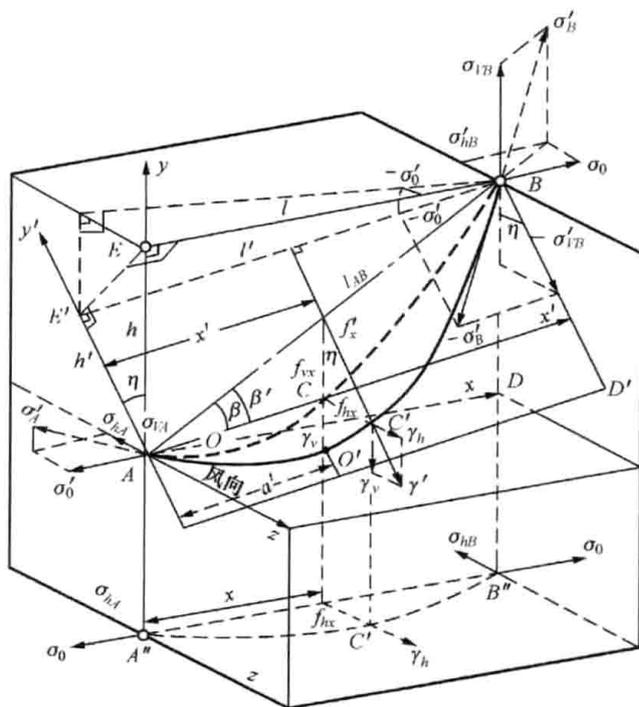


图 5-10 架空线风偏时的受力图

$$\left. \begin{aligned} h' &= h \cos \eta \\ l' &= \sqrt{l^2 + (h \sin \eta)^2} = l \sqrt{1 + (\tan \beta \sin \eta)^2} \\ \sigma'_0 &= \frac{l'}{l} \sigma_0 = \sigma_0 \sqrt{1 + (\tan \beta \sin \eta)^2} \\ \tan \beta' &= \frac{h'}{l'} = \frac{\tan \beta \cos \eta}{\sqrt{1 + (\tan \beta \sin \eta)^2}} \\ \sin \beta' &= \sin \beta \cos \eta \\ \cos \beta' &= \cos \beta \sqrt{1 + (\tan \beta \sin \eta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5-68)$$

风偏平面内架空线上任一点的弧垂  $f'_x$ ，为该点沿综合比载  $\gamma'$  作用方向至斜档距  $l_{AB}$  的距离，其大小为

$$f'_x = \frac{\gamma' x' (l' - x')}{2 \sigma'_0 \cos \beta'} = \frac{\gamma' x (l - x)}{2 \sigma_0 \cos \beta} \quad (5-69)$$

风偏平面内档距中央的最大弧垂为

$$f'_m = \frac{\gamma' l'^2}{8 \sigma'_0 \cos \beta'} = \frac{\gamma' l^2}{8 \sigma_0 \cos \beta} \quad (5-70)$$

风偏平面内任一点的轴向应力为

$$\begin{aligned} \sigma'_x &= \frac{\sigma'_0}{\cos \beta'} + \frac{\gamma'^2 (l' - 2x')^2}{8 \sigma'_0 \cos \beta'} - \frac{\gamma' (l' - 2x')}{2} \tan \beta' \\ &= \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma'^2 (l - 2x)^2}{8 \sigma_0 \cos \beta} - \frac{\gamma' (l - 2x)}{2} \tan \beta \cos \eta \end{aligned} \quad (5-71)$$

将  $x=0$ ， $x=l$  分别代入式 (5-71) 即可得到悬挂点 A、B 处架空线的轴向应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_A &= \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma'^2 l^2}{8 \sigma_0 \cos \beta} - \frac{\gamma' h}{2} \cos \eta \\ \sigma'_B &= \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma'^2 l^2}{8 \sigma_0 \cos \beta} + \frac{\gamma' h}{2} \cos \eta \end{aligned} \right\} \quad (5-72)$$

风偏后，两悬点 A、B 处沿综合比载  $\gamma'$  方向上的应力分量  $\sigma'_{\gamma'A}$ 、 $\sigma'_{\gamma'B}$  与  $\sigma'_0$  相垂直，大小为

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{\gamma'A} &= \frac{\gamma' a'}{\cos \beta'} = \frac{\gamma'}{\cos \beta'} \left( \frac{l'}{2} - \frac{\sigma'_0}{\gamma'} \sin \beta' \right) = \frac{\gamma'}{\cos \beta} \left( \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma'} \sin \beta \cos \eta \right) \\ \sigma'_{\gamma'B} &= \frac{\gamma' b'}{\cos \beta'} = \frac{\gamma'}{\cos \beta'} \left( \frac{l'}{2} + \frac{\sigma'_0}{\gamma'} \sin \beta' \right) = \frac{\gamma'}{\cos \beta} \left( \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma'} \sin \beta \cos \eta \right) \end{aligned} \right\} \quad (5-73)$$

风偏平面内架空线的悬挂曲线长度可将式 (5-68) 代入式 (5-60) 得到

$$L' = \frac{l'}{\cos \beta'} + \frac{\gamma'^2 l'^3 \cos \beta'}{24 \sigma_0'^2} = \frac{l}{\cos \beta} + \frac{\gamma'^2 l^3 \cos \beta}{24 \sigma_0^2} [1 + (\tan \beta \sin \eta)^2] \quad (5-74)$$

## 二、有风时垂直、水平投影面内的弧垂和应力计算

工程中经常需要计算架空线风偏后，在垂直及水平投影平面内的弧垂、应力及悬挂点应力等。如图 5-10 所示，将风偏平面内的架空线向垂直平面  $x-y$  投影，投影曲线  $ACB$  上仅作用有垂直比载  $\gamma_v$ 、悬挂点垂直应力分量  $\sigma_{vA}$  和  $\sigma_{vB}$ 、线路方向的水平应力分量  $\sigma_{0A} = \sigma_{0B} = \sigma_0$ 。将风偏平面内的架空线向水平面  $x-z$  投影，投影曲线  $A''C''B''$  上仅作用有横向水平比载  $\gamma_h$ 、垂直于线路方向的悬挂点水平应力  $\sigma_{hA}$  和  $\sigma_{hB}$ 、顺线路方向的水平应力  $\sigma_0$ 。

## 1. 垂直投影面内架空线的弧垂和应力

在垂直投影面内，档距为  $l$ 、高差为  $h$ 、高差角为  $\beta$ ，垂直比载  $\gamma_v$  沿斜档距均布，水平应力为  $\sigma_0$ ，显然符合斜抛物线公式的导出条件，故可直接写出架空线风偏后在垂直投影面的斜抛物线有关计算式为

$$\begin{aligned}
 y &= x \tan \beta - \frac{\gamma_v x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta} \\
 f_{ux} &= \frac{\gamma_v x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta} \\
 f_{vm} &= \frac{\gamma_v l^2}{8\sigma_0 \cos \beta} \\
 \sigma_{ux} &= \sigma_0 \tan \beta - \frac{\gamma_v (l-2x)}{2\cos \beta} = \sigma_0 \tan \theta_{ux} \\
 \sigma_{wA} &= \frac{\gamma_v a_v}{\cos \beta} = \frac{\gamma_v}{\cos \beta} \left( \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \sin \beta \right) \\
 \sigma_{wB} &= \frac{\gamma_v b_v}{\cos \beta} = \frac{\gamma_v}{\cos \beta} \left( \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \sin \beta \right) \\
 a_v &= \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \sin \beta \\
 b_v &= \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \sin \beta \\
 \tan \theta_{ux} &= \frac{\partial y}{\partial x} = \tan \beta - \frac{\gamma_v (l-2x)}{2\sigma_0 \cos \beta} \\
 \tan \theta_{wA} &= \tan \beta - \frac{\gamma_v l}{2\sigma_0 \cos \beta} \\
 \tan \theta_{wB} &= \tan \beta + \frac{\gamma_v l}{2\sigma_0 \cos \beta}
 \end{aligned}$$

式中  $a_v$ 、 $b_v$ ——垂直投影面内架空线最低点  $O$  分别到悬挂点  $A$ 、 $B$  间的水平距离，需要注意的是  $O$  点并不是风偏平面内架空线最低点  $O'$  的投影。

设  $a'$  在  $x$  轴上的投影值为  $a'_v$ ，则

$$a'_v = \frac{l}{l'} a' = \frac{l}{l'} \left( \frac{l'}{2} - \frac{\sigma'_0}{\gamma'} \sin \beta' \right) = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \sin \beta \cos^2 \eta$$

由于  $a'_v > a_v$ ，说明垂直投影面内的最低点  $O$  比风偏平面内架空线最低点  $O'$  更靠近低悬挂点。

## 2. 水平投影面内架空线的弧垂和应力

在水平投影面内，两悬挂点在水平比载作用线上的投影间距为零，所以为等高悬点。斜档距  $l_{AB}$  的水平投影即为档距  $l$ ，其上作用着均布比载  $\frac{\gamma_h l_{AB}}{l} = \frac{\gamma_h}{\cos \beta}$ 。根据平抛物线公式，可直接写出风偏后架空线在水平投影面内的弧垂和应力计算公式为

$$z = f_{hr} = \frac{\gamma_h x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta}$$

$$f_{hm} = \frac{\gamma_h l^2}{8\sigma_0 \cos\beta}$$

$$\sigma_{hx} = \sigma_0 \tan\theta_{hx} = \frac{\gamma_h (l - 2x)}{2\cos\beta}$$

$$\sigma_{hA} = \sigma_{hB} = \frac{\gamma_h l}{2\cos\beta}$$

$$\tan\theta_{hx} = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\gamma_h (l - 2x)}{2\sigma_0 \cos\beta}$$

$$\tan\theta_{hA} = -\tan\theta_{hB} = \frac{\gamma_h l}{2\sigma_0 \cos\beta}$$

$\sigma_{hA}$ 、 $\sigma_{hB}$  的算式表明, 悬挂点横向水平应力为水平比载与斜档距乘积的一半。

在得到垂直、水平投影面内架空线的有关数值后, 风偏平面内的各具有方向性的数值亦可用分量合成的方法求得。



### 练 习 题

1. 架空线弧垂大小与哪些因素有关? 在一档内, 架空线哪一点的弧垂最大? 哪一点的应力最大?
2. 架空线呈“悬链线”形状的两个假设条件是什么?
3. 某等高悬挂点架空线档距为 400m, 导线为 LGJ - 150/35 型, 最高气温 (40°C) 时弧垂最低点的水平应力  $\sigma_0 = 62.561\text{MPa}$ , 试求该气象条件下导线的弧垂、线长、悬挂点应力及其垂向分量, 并将线长与档距进行比较 (以相对误差表示)。
4. 某档架空线, 档距  $l = 400\text{m}$ , 高差  $h = 100\text{m}$ , 导线为 LGJ - 150/35 型, 最高气温 (40°C) 时弧垂最低点的水平应力  $\sigma_0 = 62.561\text{MPa}$ 。试求该气象条件下导线的三种弧垂、线长、悬挂点应力及其垂向分量, 并将三种弧垂进行比较。若不考虑高差 (即认为  $h = 0$ ), 档距中央弧垂的误差是多少?
5. “斜抛物线公式”及“平抛物线公式”的含义是什么?
6. 试导出平抛物线的悬挂曲线方程、弧垂公式和悬挂点应力公式。
7. 某档架空线, 档距  $l = 400\text{m}$ , 高差  $h = 100\text{m}$ , 导线为 LGJ - 150/35 型, 最高气温 (40°C) 时弧垂最低点的水平应力  $\sigma_0 = 62.561\text{MPa}$ , 以悬链线公式为精确值, 试比较斜抛物线和平抛物线有关公式计算最大弧垂、线长和悬点应力结果的相对误差。

## 第六章 气象条件变化时架空线的计算

### 第一节 架空线的状态方程式

架空线的线长和弧垂是其比载、应力的函数。当气象条件发生变化时, 这些参数将会发生变化。气温的升降引起架空线的热胀冷缩, 使线长、弧垂、应力发生相应变化。大风和覆冰造成架空线比载增加, 应力增大, 由于弹性变形使架空线线长增加。不同气象条件(状态)下架空线的各参数之间存在着一定的关系。揭示架空线从一种气象条件(第Ⅰ状态)改变到另一种气象条件(第Ⅱ状态)下的各参数之间关系的方程, 称为架空线的状态方程式。

#### 一、基本状态方程式

为使问题简化起见, 假设:

(1) 架空线为理想柔线。

(2) 架空线上的荷载均匀分布。

(3) 架空线为完全弹性体, 不考虑长期运行产生的塑性变形, 并认为弹性系数  $E$  保持不变。

若架空线在无应力、制造温度  $t_0$  的原始状态下, 具有原始长度  $L_0$ 。将它悬挂于档距为  $l$ , 高差为  $h$  的两悬挂点  $A$ 、 $B$  上, 此时架空线具有温度  $t$ 、比载  $\gamma$ 、轴向应力  $\sigma_x$ 、悬挂曲线长度  $L$ 。

由于温度变化, 架空线产生热胀冷缩; 由于施加有轴向应力, 架空线产生弹性伸长。若把温度和应力的变化视为  $n$  个阶段逐级加上去的, 则每一阶段温度升高  $(t-t_0)/n$ , 应力变化  $\sigma_x/n$ 。设架空线的温度线膨胀系数为  $\alpha$ 、弹性系数为  $E$ , 那么对原始长度的微元  $dL_0$ , 在新的状态下变为  $dL$ , 即

$$dL = dL_0 \left(1 + \frac{\sigma_x}{nE}\right)^n \left(1 + \alpha \frac{t-t_0}{n}\right)^n$$

当  $n \rightarrow \infty$  时, 上式的极限为

$$dL = e^{\frac{\sigma_x}{E}} e^{\alpha(t-t_0)} dL_0$$

或写成

$$dL_0 = e^{-\frac{\sigma_x}{E}} e^{-\alpha(t-t_0)} dL$$

因  $\left|\frac{\sigma_x}{E}\right| \ll 1$ 、 $|\alpha(t-t_0)| \ll 1$ , 将上式展开为级数并取其前两项, 有

$$\begin{aligned} dL_0 &= \left(1 - \frac{\sigma_x}{E}\right) [1 - \alpha(t-t_0)] dL \\ &= \left[1 - \frac{\sigma_x}{E} - \alpha(t-t_0) + \alpha \frac{\sigma_x}{E}(t-t_0)\right] dL \\ &\approx \left[1 - \frac{\sigma_x}{E} - \alpha(t-t_0)\right] dL \end{aligned}$$

对上式沿架空线线长进行积分

$$L_0 = L \left[ 1 - \frac{\int_0^L \sigma_x dL}{EL} - \alpha(t - t_0) \right] = L \left[ 1 - \frac{\sigma_{cp}}{E} - \alpha(t - t_0) \right] \quad (6-1)$$

式中  $\sigma_{cp}$ ——架空线的平均应力。

从式 (6-1) 可以看出, 从架空线的悬挂长度  $L$  中减去弹性伸长量和温度伸长量, 即可得到档内架空线的原始线长。

若某种气象条件 (第 I 状态) 下架空线所在平面内的各参数为  $l_1$ 、 $h_1$ 、 $t_1$ 、 $\gamma_1$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_{cp1}$ 、 $L_1$ , 另一种气象条件 (第 II 状态) 下的各参数为  $l_2$ 、 $h_2$ 、 $t_2$ 、 $\gamma_2$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_{cp2}$ 、 $L_2$ , 则两种状态下的架空线悬挂曲线长度折算到同一原始状态下的原始线长相等, 所以

$$L_1 \left[ 1 - \frac{\sigma_{cp1}}{E} - \alpha(t_1 - t_0) \right] = L_2 \left[ 1 - \frac{\sigma_{cp2}}{E} - \alpha(t_2 - t_0) \right] \quad (6-2)$$

式 (6-2) 即为架空线的基本状态方程式, 表示了档内原始线长保持不变的情况下, 不同状态下的架空线悬挂曲线长度之间的关系。

## 二、悬链线状态方程式

将线长  $L$ 、平均应力  $\sigma_{cp}$  的悬链线公式 (5-27)、式 (5-65) 代入式 (6-2), 略加整理, 就可得到悬挂点不等高时的悬链线状态方程式为

$$l_1 \left\{ \sqrt{\left( \frac{L_{01}}{l_1} \right)^2 + \tan^2 \beta_1} [1 - \alpha(t_1 - t_0)] - \frac{\sigma_{01}}{2E} \left[ 1 + \left( \frac{L_{01}}{l_1} + \frac{2l_1}{L_{01}} \tan^2 \beta_1 \right) \operatorname{ch} \frac{\gamma_1 l_1}{2\sigma_{01}} \right] \right\} \\ = l_2 \left\{ \sqrt{\left( \frac{L_{02}}{l_2} \right)^2 + \tan^2 \beta_2} [1 - \alpha(t_2 - t_0)] - \frac{\sigma_{02}}{2E} \left[ 1 + \left( \frac{L_{02}}{l_2} + \frac{2l_2}{L_{02}} \tan^2 \beta_2 \right) \operatorname{ch} \frac{\gamma_2 l_2}{2\sigma_{02}} \right] \right\} \quad (6-3)$$

式中  $\sigma_{01}$ 、 $\sigma_{02}$ ——分别为两种状态下架空线弧垂最低点处的应力;

$l_1$ 、 $l_2$ ——分别为两种状态下架空线所在平面内的档距;

$L_{01}$ 、 $L_{02}$ ——分别为两种状态下不考虑高差 (即令  $h_1=0$ 、 $h_2=0$ ) 时的架空线线长, 其值可由式 (5-10) 计算;

$\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——分别为两种状态下架空线所在平面内的高差角,  $\tan \beta_1 = h_1/l_1$ ,  $\tan \beta_2 = h_2/l_2$ ;

$t_1$ 、 $t_2$ ——分别为两种状态下的温度;

$t_0$ ——架空线的制造温度, 一般取  $t_0=15^\circ\text{C}$ 。

悬点等高时,  $h_1=0$ 、 $h_2=0$ ,  $\tan \beta_1=0$ 、 $\tan \beta_2=0$ , 则式 (6-3) 变为

$$L_{01} [1 - \alpha(t_1 - t_0)] - \frac{\sigma_{01} l_1}{2E} - \frac{\sigma_1 L_{01}}{2E} \operatorname{ch} \frac{\gamma_1 l_1}{2\sigma_{01}} = L_{02} [1 - \alpha(t_2 - t_0)] - \frac{\sigma_{02} l_2}{2E} - \frac{\sigma_{02} L_{02}}{2E} \operatorname{ch} \frac{\gamma_2 l_2}{2\sigma_{02}} \quad (6-4)$$

需要考虑风荷载时, 可将式 (6-3)、式 (6-4) 中的各参数代以风偏平面内的参数, 得到有风时的悬链线状态方程式, 感兴趣的读者可自行导出。

利用状态方程式, 可由状态 I 的参数  $l_1$ 、 $h_1$  (或  $\beta_1$ )、 $\gamma_1$ 、 $\sigma_{01}$ 、 $t_1$ , 计算状态 II 的参数  $l_2$ 、 $h_2$  (或  $\beta_2$ )、 $\gamma_2$ 、 $\sigma_{02}$ 、 $t_2$  中的任意一个, 一般是求取应力  $\sigma_{02}$ 。但是悬链线状态方程式比较复杂, 仅适用于计算机求解, 其结果通常作为精确值去评价其他近似公式的精度。

### 三、斜抛物线状态方程式

将式 (5 - 60)、式 (5 - 66) 所表示的斜抛物线线长  $L$  及平均应力  $\sigma_{\text{中}}$  代入式 (6 - 2), 便得到架空线的斜抛物线状态方程式为

$$\begin{aligned} & \left( \frac{l_1}{\cos\beta_1} + \frac{\gamma_1^2 l_1^3 \cos\beta_1}{24\sigma_{01}^2} \right) \left[ 1 - \frac{1}{E} \left( \frac{\sigma_{01}}{\cos\beta_1} + \frac{\gamma_1^2 l_1^2}{24\sigma_{01} \cos\beta_1} \right) - \alpha(t_1 - t_0) \right] \\ & = \left( \frac{l_2}{\cos\beta_2} + \frac{\gamma_2^2 l_2^3 \cos\beta_2}{24\sigma_{02}^2} \right) \left[ 1 - \frac{1}{E} \left( \frac{\sigma_{02}}{\cos\beta_2} + \frac{\gamma_2^2 l_2^2}{24\sigma_{02} \cos\beta_2} \right) - \alpha(t_2 - t_0) \right] \end{aligned} \quad (6 - 5)$$

若档距、高差的大小可认为不变, 即  $l_1 = l_2 = l$ 、 $h_1 = h_2 = h$  ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ) 时, 将上式展开并加以整理后得

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma_2^2 l^3 \cos\beta}{24\sigma_{02}^2} - \frac{\gamma_1^2 l^3 \cos\beta}{24\sigma_{01}^2} - \frac{l}{\cos\beta} \left[ \frac{\sigma_{02} - \sigma_{01}}{E \cos\beta} + \alpha(t_2 - t_1) \right] \\ & = \frac{l^3}{24E \cos^2\beta} \left( \frac{\gamma_2^2}{\sigma_{02}} - \frac{\gamma_1^2}{\sigma_{01}} \right) + \frac{\gamma_2^2 l^3 \cos\beta}{24\sigma_{02}^2} \left[ \frac{\sigma_{02}}{E \cos\beta} + \frac{\gamma_2^2 l^2}{24E \sigma_{02} \cos\beta} + \alpha(t_2 - t_0) \right] \\ & \quad - \frac{\gamma_1^2 l^3 \cos\beta}{24\sigma_{01}^2} \left[ \frac{\sigma_{01}}{E \cos\beta} + \frac{\gamma_1^2 l^2}{24E \sigma_{01} \cos\beta} + \alpha(t_1 - t_0) \right] \end{aligned}$$

计算分析表明, 上式中等号右端各项的结果与左端各项相比可忽略不计, 则有

$$\sigma_{02} - \frac{E\gamma_2^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_{02}^2} = \sigma_{01} - \frac{E\gamma_1^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_{01}^2} - \alpha E \cos\beta (t_2 - t_1) \quad (6 - 6)$$

式中  $\sigma_{01}$ 、 $\sigma_{02}$ ——分别为两种状态下架空线弧垂最低点处的应力;

$\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ ——分别为两种状态下架空线的比载;

$t_1$ 、 $t_2$ ——分别为两种状态下架空线的温度;

$l$ 、 $\beta$ ——分别为该档的档距和高差角;

$\alpha$ 、 $E$ ——分别为架空线的温度膨胀系数和弹性系数。

式 (6 - 6) 虽然是斜抛物线状态方程式的近似式, 但由于近似过程弥补了斜抛物线公式的误差, 因此其精度很高, 与悬链线状态方程式十分接近, 即使对于重要跨越档或高差很大的档距, 也能够满足工程要求。式 (6 - 6) 是最常用的不等高悬点架空线状态方程式, 通常就称为斜抛物线状态方程式, 或简称为状态方程式。

令式 (6 - 6) 中的  $\beta = 0^\circ$ , 就得到等高悬挂点架空线的状态方程式

$$\sigma_{02} - \frac{E\gamma_2^2 l^2}{24\sigma_{02}^2} = \sigma_{01} - \frac{E\gamma_1^2 l^2}{24\sigma_{01}^2} - \alpha E (t_2 - t_1) \quad (6 - 7)$$

式 (6 - 6) 两端除以  $\cos\beta$ , 并注意到档距中央架空线轴向应力的计算式 (5 - 52), 得

$$\sigma_{c2} - \frac{E\gamma_2^2 l^2}{24\sigma_{c2}^2} = \sigma_{c1} - \frac{E\gamma_1^2 l^2}{24\sigma_{c1}^2} - \alpha E (t_2 - t_1) \quad (6 - 8)$$

式中  $\sigma_{c1}$ 、 $\sigma_{c2}$ ——为两种状态下档距中央架空线的轴向应力。

式 (6 - 8) 表明, 若以架空线档距中央应力代替最低点应力, 则不等高悬点和等高悬点架空线的斜抛物线状态方程式具有相同的形式。换句话说, 采用档距中央应力写出的斜抛物线状态方程式消除了高差的影响。

对于需要考虑风压比载作用的架空线, 其斜抛物线状态方程式为

$$\sigma_{02} - \frac{E\gamma_2^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_{02}^2} (1 + \tan^2\beta \sin^2\eta_2)$$

$$= \sigma_{01} - \frac{E\gamma_1'^2 l^2 \cos^3 \beta}{24\sigma_{01}^2} (1 + \tan^2 \beta \sin^2 \eta_1) - \alpha E \cos \beta (t_2 - t_1) \quad (6-9)$$

式中  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ ——分别为两种状态下架空线的风偏角；

$\gamma_1'$ 、 $\gamma_2'$ ——分别为两种状态下架空线的综合比载。

应当指出，虽然式中  $\gamma_1'$ 、 $\gamma_2'$  均为综合比载，但  $\sigma_{01}$ 、 $\sigma_{02}$  仍为架空线顺线路方向的水平应力分量，即垂直平面内的最低点应力，不能把  $\sigma_{01}$ 、 $\sigma_{02}$  误认为风偏平面内架空线最低点的应力。当利用式 (6-9) 求出有风状态下顺线路方向的水平应力  $\sigma_{02}$  后，欲想知道风偏平面内架空线最低点的应力或悬挂点应力，需将  $\sigma_{02}$  代入式 (5-68) 或式 (5-72) 求得。

#### 四、状态方程式的解法

对于待求应力  $\sigma_{c2}$  来说，斜抛物线状态方程式是一个一元三次方程。为方便求解，将式 (6-8) 整理得

$$\sigma_{c2}^3 - \left[ \sigma_{c1} - \frac{E\gamma_1'^2 l^2}{24\sigma_{c1}^2} - \alpha E (t_2 - t_1) \right] \sigma_{c2}^2 - \frac{E\gamma_2'^2 l^2}{24} = 0$$

令

$$A = - \left[ \sigma_{c1} - \frac{E\gamma_1'^2 l^2}{24\sigma_{c1}^2} - \alpha E (t_2 - t_1) \right]$$

$$B = \frac{E\gamma_2'^2 l^2}{24}$$

则

$$\sigma_{c2}^3 + A\sigma_{c2}^2 - B = 0 \quad (6-10)$$

上述一元三次方程中， $A$ 、 $B$  为已知数，且  $A$  可正可负， $B$  永远为正值，其应力  $\sigma_{c2}$  必有一个正的实数解。下面讨论该实数解的求法。

##### 1. 迭代法

将式 (6-10) 变形为

$$\sigma_{c2} = \sqrt{\frac{B}{\sigma_{c2} + A}}$$

以上式作为迭代公式，即写成

$$\sigma_{c2}^{(n+1)} = \sqrt{\frac{B}{\sigma_{c2}^{(n)} + A}} \quad (n=0, 1, 2, \dots)$$

给出一个合适的迭代初值  $\sigma_{c2}^{(0)}$ ，可以计算出一个新的应力值  $\sigma_{c2}^{(1)}$ ；再以此应力值作为新的初值，代入迭代公式求出  $\sigma_{c2}^{(2)}$ ……反复进行下去，直至  $|\sigma_{c2}^{(n+1)} - \sigma_{c2}^{(n)}| < \delta$  ( $\delta$  为一个很小的正数，如  $10^{-4}$ )，即达到一定的精度为止。如果给出的迭代初值合适，采用迭代公式可较快得到其解。

采用迭代法求解时，在  $A$  为负值的情况下，在前后两次迭代值变化较大时，有可能致使迭代式的根号内出现负值，使迭代无法继续下去。这时可减小迭代值的变化量，即以下式作为新的迭代初值

$$\sigma_{c2}'^{(i)} = \sigma_{c2}^{(i-1)} + \frac{\sigma_{c2}^{(i)} - \sigma_{c2}^{(i-1)}}{k}$$

式中， $k$  一般为不小于 2 的整数。

## 2. 牛顿法

牛顿法是一种常用的解方程的数值方法。令

$$y = \sigma_{c2}^3 + A\sigma_{c2}^2 - B$$

其导数为

$$y' = 3\sigma_{c2}^2 + 2A\sigma_{c2}$$

则牛顿迭代式为

$$\sigma_{c2}^{(n+1)} = \sigma_{c2}^{(n)} - \frac{y^{(n)}}{y'^{(n)}}$$

给出迭代初值  $\sigma_{c2}^{(0)}$ ，算出  $y^{(0)}$ 、 $y'^{(0)}$ ，利用上式迭代求出  $\sigma_{c2}^{(1)}$ ，反复进行下去，直至  $|\sigma_{c2}^{(n+1)} - \sigma_{c2}^{(n)}| < \delta$  为止。利用电子计算机运算时，可采用精确公式 (6-3) 或式 (6-6) 编制通用程序求解。

## 五、状态方程式的精度比较

为了说明斜抛物线状态方程式的精度，不考虑高差和风偏影响时的应力计算误差，以便在工程实际中能合理利用上述公式，以悬链线状态方程式 (6-3) 作为精确式，式 (6-6)、式 (6-9) 作为近似式，通过实例进行分析比较。

**【例 6-1】** 架空线采用 LGJ-300 型 (旧型号) 钢芯铝绞线，其综合截面积  $A = 377.21\text{mm}^2$ ，弹性系数  $E = 78480\text{MPa}$ ，温度线膨胀系数  $\alpha = 19 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，架空线自重比载  $\gamma_1 = 35.06 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$ ，风速 40m/s 时的水平风压比载  $\gamma_4 = 49.84 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$ ，有风时的综合比载  $\gamma_6 = 60.94 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$ 。已知最高气温 ( $t_1 = 40^\circ\text{C}$ ) 时架空线的水平应力  $\sigma_{01} = 53.955\text{MPa}$ 。求解不同档距不同高差， $t_2 = -5^\circ\text{C}$  时风偏平面内架空线最低点的应力  $\sigma'_2$ 、顺线路方向的水平应力分量  $\sigma_2$  以及不考虑风偏影响即令  $\eta = 0$  时顺线路方向的水平应力  $\sigma_{02}$  (相当于覆冰无风时垂直比载  $\gamma_3 = 60.94 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$  的情况)。

**解** 对于不同档距不同高差，利用上述各式进行计算的结果列于表 6-1。表中  $\sigma'_2$  的值是利用式 (6-3)、式 (6-9) 解出  $\sigma_2$  后，再由式 (5-68) 算出的。当采用式 (6-3) 计算有风时的  $\sigma_2$  时，需将式中各参数以式 (5-68) 表示的风偏平面内相应参数代入。

表 6-1 状态方程式的精度比较表

无风时的高差系数 $h/l$			0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
档距 $l$ (m)	应力类别	采用公式	架空线应力计算值 (MPa)					
200	$\sigma'_2$	式 (6-3)	107.70	108.15	109.35	111.49	114.23	117.49
		式 (6-9)	107.70	108.15	109.35	111.49	114.23	117.49
	$\sigma_2$	式 (6-3)	107.70	107.78	108.00	108.28	108.57	108.75
		式 (6-9)	107.70	107.78	108.00	108.28	108.57	108.75
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	107.70	107.63	107.39	106.97	106.39	105.60
		式 (6-6)	107.70	107.63	107.39	106.97	106.39	105.60
400	$\sigma'_2$	式 (6-3)	98.87	99.45	101.22	104.10	108.03	112.87
		式 (6-9)	98.87	99.47	101.23	104.12	108.05	112.89
	$\sigma_2$	式 (6-3)	98.87	99.13	99.90	101.10	102.67	104.48
		式 (6-9)	98.87	99.14	99.91	101.12	102.69	104.50
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	98.87	98.87	98.86	98.83	98.87	98.65
		式 (6-6)	98.87	98.87	98.87	98.85	98.80	98.68

续表

无风时的高差系数 $h/l$			0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
档距 $l$ (m)	应力类别	采用公式	架空线应力计算值 (MPa)					
600	$\sigma'_2$	式 (6-3)	96.20	96.81	98.65	101.69	105.87	111.15
		式 (6-9)	96.22	96.83	98.67	101.72	105.91	111.31
	$\sigma_2$	式 (6-3)	96.20	96.49	97.35	98.76	100.62	102.88
		式 (6-9)	96.22	96.51	97.37	98.79	100.66	102.93
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	96.20	96.21	96.21	96.22	96.20	96.18
		式 (6-6)	96.22	96.22	96.23	96.24	96.24	96.22
800	$\sigma'_2$	式 (6-3)	95.17	95.79	97.65	100.72	104.99	110.41
		式 (6-9)	95.19	95.81	97.67	100.76	105.05	110.49
	$\sigma_2$	式 (6-3)	95.17	95.47	96.36	97.82	99.79	102.19
		式 (6-9)	95.19	95.49	96.38	97.85	99.84	102.27
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	95.17	95.17	95.18	95.18	95.18	95.17
		式 (6-6)	95.19	95.19	95.20	95.20	95.21	95.21
1000	$\sigma'_2$	式 (6-3)	94.68	95.29	97.15	100.23	104.53	110.02
		式 (6-9)	94.69	95.31	97.19	100.29	104.62	110.15
	$\sigma_2$	式 (6-3)	94.68	94.98	95.87	97.34	99.35	101.83
		式 (6-9)	94.69	95.00	95.91	97.40	99.43	101.95
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	94.68	94.68	94.68	94.68	94.68	94.67
		式 (6-6)	94.69	94.69	94.70	94.71	94.71	94.71
1200	$\sigma'_2$	式 (6-3)	94.40	95.00	96.87	89.96	104.25	109.76
		式 (6-9)	94.41	95.04	96.92	100.03	104.38	109.94
	$\sigma_2$	式 (6-3)	94.40	94.70	95.60	97.08	99.08	101.59
		式 (6-9)	94.41	94.73	95.65	97.15	99.21	101.76
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	94.40	94.40	94.40	94.40	94.40	94.39
		式 (6-6)	94.41	94.41	94.42	94.42	94.43	94.43
1400	$\sigma'_2$	式 (6-3)	94.23	95.76	96.70	99.78	104.07	109.58
		式 (6-9)	94.24	95.79	96.75	99.87	104.23	109.81
	$\sigma_2$	式 (6-3)	94.23	94.70	95.60	96.90	98.91	101.43
		式 (6-9)	94.24	94.73	95.65	99.99	99.06	101.64
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	94.23	94.23	94.23	94.23	94.23	94.23
		式 (6-6)	94.24	94.24	94.25	94.25	94.26	94.26
1600	$\sigma'_2$	式 (6-3)	94.11	94.75	96.58	99.65	103.94	109.44
		式 (6-9)	94.14	94.76	96.64	99.77	104.13	109.73
	$\sigma_2$	式 (6-3)	94.11	94.42	95.31	96.78	98.79	101.30
		式 (6-9)	94.14	94.45	95.37	96.89	98.97	101.57
	$\sigma_{02}$	式 (6-3)	94.11	94.11	94.11	94.11	94.11	94.11
		式 (6-6)	94.14	94.14	94.15	94.15	94.15	94.15

分析表 6-1 中的数据, 可以看出:

(1) 斜抛物线状态方程式 (6-6)、式 (6-9) 与相应情况下的悬链线状态方程式所得计算结果相差无几, 即使在大档距、大高差角下, 其差别在工程应用上也无意义。因此可以肯定, 式 (6-6)、式 (6-9) 是工程上理想的近似状态方程式。

(2) 计算无风情况下架空线水平应力的变化时, 若档距较大、高差较小, 可以不考虑高差的影响, 如表中数据  $\sigma_{02}$  随  $h/l$  的变化很小; 但当档距很小、高差较大时, 高差对应力的影响不能忽视。

(3) 对于不等高悬点且作用有横向风压荷载的情况, 利用状态方程式计算顺线路的水平

应力分量  $\sigma_2$  时, 工程上常忽略风偏及高差的影响 (即认为  $\eta=0, \beta=0$ )。这实际上是将有风时的综合比载  $\gamma_6$ 、视为垂直比载  $\gamma_3$  作近似计算, 求得的应力对应表中  $h/l=0$  的  $\sigma_{02}$  值。这样近似引起的误差, 随高差角的增加而增大。但表中数据是风速为 40m/s 的严重情况, 当风速及高差角较小时, 用  $\beta=0$  时的  $\sigma_{02}$  来代替顺线路方向的水平应力分量  $\sigma_2$ , 估计不会引起难以容许的误差。

对于悬点变位, 档内架空线原始线长改变, 架空线产生塑性变形, 弹性系数变化以及复合弹性体架空线等特殊情况下的状态方程式, 均可根据“原始线长不变”的原则导出。

## 第二节 临界档距

### 一、临界档距的概念

#### 1. 控制气象条件

架空线的状态方程式给出了各种气象条件下架空线应力之间的关系。气象条件变化, 架空线的应力随之变化。必存在一种气象条件, 在该气象条件下架空线的应力最大, 这一气象条件称为控制气象条件, 简称控制条件。在输电线路的设计中, 必须保证控制气象条件下架空线的应力不超过允许使用应力, 从而保证其他气象条件下架空线的应力均小于许用应力。

架空线的应力除与比载  $\gamma$ 、气温  $t$  有关外, 还与档距  $l$  有关。在其他条件相同的情况下, 档距不同, 出现最大应力的控制气象条件可能不同。在最大风速的气温与最厚覆冰的气温相同的气象区, 二者中比载大者架空线的应力大, 此时架空线的最大应力在最低气温或最大比载条件下出现。气温低时, 架空线收缩拉紧而使应力增大; 比载大时, 架空线荷载增加而使应力增大。究竟最低气温和最大比载哪一种气象条件为控制条件, 取决于档距的大小。

当档距很小趋于零时, 等高悬挂点架空线的状态方程式 (6-7) 变为

$$\sigma_{02} = \sigma_{01} - \alpha E(t_2 - t_1)$$

上式表明, 在档距很小时, 架空线的应力变化仅决定于温度而与比载的大小无关。因此对于小档距架空线, 最低气温将成为控制条件。

当档距很大趋于无限大时, 将等高悬挂点架空线的状态方程式 (6-7) 两端除以  $l^2$ , 并令档距  $l$  趋于无限大, 状态方程式变为

$$\frac{\sigma_{02}}{\gamma_2} = \frac{\sigma_{01}}{\gamma_1}$$

上式表明, 在档距很大时, 架空线的应力变化仅决定于比载而与温度无关。因此对于大档距架空线, 最大比载气象条件将成为控制条件。

#### 2. 临界档距

在仅考虑最低气温和最大比载两种气象情况下, 档距  $l$  由零逐渐增大至无限大的过程中, 必然存在这样一个档距: 气温的作用和比载的作用同等重要, 最低气温和最大比载时架空线的应力相等, 即最低气温和最大比载两个气象条件同时成为控制条件。两个及以上气象条件同时成为控制条件时的档距称为临界档距, 用  $l_{ij}$  表示。当实际档距  $l < l_{ij}$  时, 架空线的最大应力出现在最低气温气象, 最低气温为控制条件; 当  $l > l_{ij}$  时, 最大比载为控制条件。

实际上, 相当一部分气象区的最大风速和最厚覆冰的气温并不相同, 不能只从比载的大小来确定二者哪一个可能成为控制条件。此外, 架空线还应具有足够的耐振能力, 这决定于

年均运行应力的大小, 该应力是根据年均气温计算的, 不能大于年均运行应力规定的上限值。因此, 最低气温、最大风速、最厚覆冰和年均气温四种气象条件都有可能成为控制条件, 是输电线路设计时必须考虑的。

四种气象条件中每两种之间存在一个临界档距, 于是共可得到 6 个临界档距。对于某些特殊要求的档距, 除上述四种气象条件外, 可能还需要考虑其他的控制条件。

## 二、临界档距的计算

计算临界档距  $l_{ij}$  时, 把一种控制条件作为第 I 状态, 其比载为  $\gamma_i$ , 温度为  $t_i$ , 应力达到允许值  $[\sigma_0]_i$ ; 另一种控制条件作为第 II 状态, 相应参数分别为  $\gamma_j$ 、 $t_j$ 、 $[\sigma_0]_j$ 。临界状态下  $l_i = l_j = l_{ij}$ , 代入状态方程式 (6-6) 得

$$[\sigma_0]_j - \frac{E\gamma_j^2 l_{ij}^2 \cos^3 \beta}{24[\sigma_0]_j^2} = [\sigma_0]_i - \frac{E\gamma_i^2 l_{ij}^2 \cos^3 \beta}{24[\sigma_0]_i^2} - \alpha E \cos \beta (t_j - t_i)$$

解之, 得临界档距的计算公式为

$$l_{ij} = \sqrt{\frac{24 [ [\sigma_0]_j - [\sigma_0]_i + \alpha E \cos \beta (t_j - t_i) ]}{E \left[ \left( \frac{\gamma_j}{[\sigma_0]_j} \right)^2 - \left( \frac{\gamma_i}{[\sigma_0]_i} \right)^2 \right] \cos^3 \beta}} \quad (6-11)$$

无高差时

$$l_{ij} = \sqrt{\frac{24 [ [\sigma_0]_j - [\sigma_0]_i + \alpha E (t_j - t_i) ]}{E \left[ \left( \frac{\gamma_j}{[\sigma_0]_j} \right)^2 - \left( \frac{\gamma_i}{[\sigma_0]_i} \right)^2 \right]}} \quad (6-12)$$

若两种控制条件下的架空线许用应力相等, 即  $[\sigma_0]_i = [\sigma_0]_j = [\sigma_0]$ , 则上两式分别为

$$l_{ij} = \frac{[\sigma_0]}{\cos \beta} \sqrt{\frac{24 \alpha (t_j - t_i)}{\gamma_j^2 - \gamma_i^2}} \quad (6-13)$$

和

$$l_{ij} = [\sigma_0] \sqrt{\frac{24 \alpha (t_j - t_i)}{\gamma_j^2 - \gamma_i^2}} \quad (6-14)$$

## 三、有效临界档距的判定与控制气象条件

一般情况下, 可能成为控制条件的最低气温、最大风速、最厚覆冰和年均气温之间, 存在 6 个临界档距, 但真正起作用的有效临界档距最多不超过 3 个。设计时, 需要先判别出有效临界档距, 从而得到实际档距的控制气象条件。判定有效临界档距的方法很多, 这里介绍图解法和列表法。

### 1. 图解法

#### (1) 控制条件与 $F_i$ 值。

设有  $n$  个可能成为控制条件的气象条件, 其相应的比载、气温、水平应力分别为  $\gamma_i$ 、 $t_i$ 、 $\sigma_{0i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。对于等高悬点架空线的同一档距  $l$ , 若将这  $n$  个条件分别作为已知条件, 某个比载  $\gamma$ 、气温  $t$ 、水平应力  $\sigma_{0x}$  的气象条件作为待求条件, 则可列出  $n$  个已知条件和待求条件之间的状态方程式为

$$\sigma_{0x} - \frac{E\gamma^2 l^2}{24\sigma_{0x}^2} = \sigma_{0i} - \frac{E\gamma_i^2 l^2}{24\sigma_{0i}^2} - \alpha E (t - t_i)$$

整理得

$$\sigma_{0,x}^2 \left\{ \sigma_{0,x} - \left( \sigma_{0i} - \frac{E\gamma_i^2 l^2}{24\sigma_{0i}^2} + \alpha Et_i \right) + \alpha Et \right\} = \frac{E\gamma^2 l^2}{24}$$

令

$$F_i = - \left( \sigma_{0i} - \frac{E\gamma_i^2 l^2}{24\sigma_{0i}^2} + \alpha Et_i \right) \quad (6-15)$$

则

$$\sigma_{0,x}^2 \{ \sigma_{0,x} + F_i + \alpha Et \} = \frac{E\gamma^2 l^2}{24} \quad (6-16)$$

若以  $\sigma_{0,x}$  为待求量,  $n$  个可能控制气象条件的应力达到各自的许用应力  $[\sigma_0]_i$ , 利用式 (6-16) 可求出  $n$  个  $\sigma_{0,xi}$ , 其中必有一个最小值, 记为  $\sigma_{0,xk}$ , 与之对应的是第  $k$  个可能控制气象条件。

若视  $\sigma_{0,xk}$  为已知,  $\sigma_{0i}$  为未知, 反求  $n$  个可能控制条件的  $\sigma_{0i}$  时, 必可求得  $\sigma_{0k} = [\sigma_0]_k$ , 而  $\sigma_{0i} < [\sigma_0]_i$  ( $i \neq k$ ),  $k$  可能控制条件下的应力达到许用值, 因此第  $k$  个气象条件为该档距下的控制条件。从式 (6-16) 可以看出, 使  $\sigma_{0,x}$  最小的可能控制气象条件的  $F_i$  最大。

由此得到结论: 当有多种气象条件可能成为控制条件时,  $F_i$  值最大者是该档距下的应力控制条件, 其余气象条件不起控制作用。

(2)  $F_i$  曲线的特点。

第  $i$  个可能控制条件的比载  $\gamma_i$ 、气温  $t_i$  和应力  $[\sigma_0]_i$  已知时,  $F_i$  曲线是档距  $l$  的函数。将式 (6-15) 对  $l$  求导, 得

$$\frac{dF_i}{dl} = \frac{E\gamma_i^2 l}{12[\sigma_0]_i^2} \quad (6-17)$$

从式 (6-17) 可以看出:

1)  $F_i$  曲线对  $l$  的一阶导数与  $l$  成正比, 且始终为正值, 说明  $F_i$  曲线是单调递增的, 且随  $l$  的增大上升得越来越快, 见图 6-1。

2)  $F_i$  曲线对  $l$  的一阶导数仅取决于比值  $\gamma_i/[\sigma_0]_i$ 。由此可知: ①当  $l=0$  时, 所有气象条件的  $dF_i/dl=0$ 。记此时的值  $F_i$  为  $F_{0i} = -([\sigma_0]_i + \alpha Et_i)$ , 则  $F_{0i}$  中最大者所对应的气象条件, 必然为控制条件。②在  $l \rightarrow \infty$  的过程中,  $\gamma_i/[\sigma_0]_i$  较大者的  $F_i$  值上升较快。当  $l$  足够大后, 由于  $\gamma_i/[\sigma_0]_i$  最大者的  $F_i$  必为最大, 所以相应的气象条件必成为控制条件。③如果  $F_{0i}$  和  $\gamma_i/[\sigma_0]_i$  中的最大值对应的是同一气象条件, 该气象条件的  $F_i$  值在所有档距下均为最大, 则该气象条件为所有档距的控制条件。④如果某两种气象条件的  $F_{0i}$  相同, 则二者中  $\gamma_i/[\sigma_0]_i$  较小者对应的气象条件必不为控制条件。⑤如果某两种气象条件的  $\gamma_i/[\sigma_0]_i$  相同, 则二者中  $F_{0i}$  较小者的  $F_i$  值始终小于较大者的  $F_i$  值,  $F_{0i}$  较小者对应的气象条件不可能成为控制条件。

(3) 利用  $F_i$  曲线判定有效临界档距。

假设可能成为控制条件的有最低气温、年均气温、覆冰有风和最大风速四种气象条件, 相应的  $F_i$  曲线为 a、b、c 和 d, 如图 6-1 所示。

可以看出, 曲线族的上包络线的  $F_i$  最大, 为控制气象条件曲线。两两曲线的交点为临界档距, 其中上包络线的交点  $l_{ab}$ 、 $l_{bc}$ 、 $l_{cd}$  为有效临界档距, 其余的交点  $l_{ac}$ 、 $l_{ad}$ 、 $l_{bd}$  为无效临界档距。在图 6-1 中, 当档距  $l \leq l_{ab}$  时, a 气象为控制条件;  $l_{ab} \leq l \leq l_{bc}$  时, b 气象为控

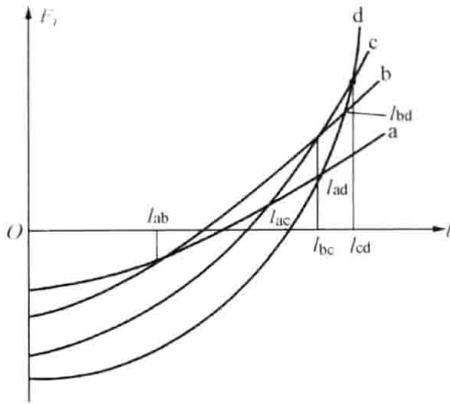


图 6-1 有效临界档距和控制条件

制条件： $l_{bc} \leq l \leq l_{cd}$ 时，c 气象为控制条件； $l \geq l_{cd}$ 时，d 气象为控制条件。

图解法判定有效临界档距直观易行，但受作图比例所限以及曲线间的交叉角太小，不易准确读出有效临界档距的数值，因此通常与利用式 (6-11) 的计算配合起来应用。

## 2. 列表法

利用列表法判定有效临界档距的步骤如下：

(1) 计算各种可能控制条件的  $\gamma_i / [\sigma_0]_i$  值，并按该值由小到大编以序号 a、b、c…，如果存在  $\gamma_i / [\sigma_0]_i$  值相同的条件，则计算其  $F_{0i}$  值，取  $F_{0i}$  值较大者编入顺序，较小者因不起控制作用不参与判别。在这种编号情况下，后面的（序号大的）可能控制条件的  $F_i$  曲线上升得较快。

(2) 计算可能控制条件之间的临界档距，按编号 a、b、c…的顺序排成表 6-2 的形式（表中考虑了四种可能控制条件的情况）。

表 6-2

有效临界档距判别表

a	b	c	d
$l_{nb}$	$l_{bc}$	$l_{cd}$	—
$l_{ac}$	$l_{bd}$		
$l_{ad}$			

### (3) 判别有效临界档距：

1) 先从  $\gamma_i / [\sigma_0]_i$  最小的 a 栏开始，如果该栏的临界档距均为正的实数，则最小的临界档距即为第一个有效临界档距（假设为  $l_{ac}$ ），其余的都应舍去。该有效临界档距  $l_{ac}$  是 a 条件控制档距的上限，c 条件控制档距的下限。这是因为，如果该栏的临界档距均为正的实数，说明  $F_a$  曲线与其他  $F_i$  曲线均相交，在档距较小时  $F_a$  值最大，a 条件为控制条件；最小的临界档距为  $l_{ac}$ ，说明在  $l_{ac}$  附近，小于  $l_{ac}$  的档距下的控制条件是 a 条件，大于  $l_{ac}$  的档距下的控制条件是 c 条件， $l_{ac}$  为第一个有效临界档距。

2) 有效临界档距  $l_{ac}$  两个下标 a、c 之间的条件不起控制作用，即字母 b 代表的条件栏被跨隔，因此对第二个下标代表的条件栏进行判别，方法同 1)。

3) 如果在某条件栏中，存在临界档距值为虚数或 0 的情况，则该栏条件不起控制作用，应当舍去。这与  $F_i$  曲线的特点结合起来考虑是不难理解的。当某栏中的临界档距值有虚数时，说明该栏条件的  $F_i$  曲线与后面某栏条件的  $F_j$  曲线不相交， $F_i$  曲线始终位于  $F_j$  曲线的下方，该栏条件不可能起控制作用。当某栏中的临界档距值有 0 时，说明该栏条件的  $F_i$  曲线与后面某栏条件的  $F_j$  曲线相交于档距  $l=0$  处， $F_i$  曲线同样始终位于  $F_j$  曲线的下方，该栏条件不起控制作用。

**【例 6-2】** 有一条通过非典型气象区的 220kV 线路，导线采用 LGJ-400/35 型钢芯铝绞线，某档距  $l=230\text{m}$ ，试确定此档导线在无高差 ( $h/l=0$ )、小高差 ( $h/l=0.1$ ) 和大高差 ( $h/l=0.2$ ) 情况下的控制条件。

**解** (1) 可能成为控制条件的是最低气温、最大风速、覆冰有风和年均气温，整理该

非典型气象区四种可能控制条件的有关气象参数，列于表 6-3 中。

表 6-3 可能控制气象条件有关参数

气象参数	最低气温	最大风速	覆冰有风	年均气温
气温 (°C)	-20	-5	-5	+15
风速 (m/s)	0	30	10	0
冰厚 (mm)	0	0	10	0

(2) 查附录 A，得到 LGJ-400/35 型导线的有关参数，整理后列于表 6-4 中。

表 6-4 LGJ-400/35 型导线有关参数

截面积 A (mm <sup>2</sup> )	导线直径 d (mm)	弹性系数 E (MPa)	温胀系数 $\alpha$ (1/°C)	计算拉断力 T <sub>j</sub> (N)	单位长度质量 q (kg/km)	强度极限 $\sigma_p$ (MPa)	安全系数 k	许用应力 $[\sigma_0]$ (MPa)	年均应力上限 $[\sigma_{cp}]$ (MPa)
425.24	26.82	65000	$20.5 \times 10^{-6}$	103900	1349	232.11	2.5	92.8	$0.25\sigma_p = 58$

最低气温、最大风速、覆冰有风的许用应力为 92.8MPa，年均气温的许用应力为 58.0MPa。

(3) 计算有关比载和比值  $\gamma/[\sigma_0]$ ，比载的计算结果列于表 6-5 中， $\gamma/[\sigma_0]$  值列于表 6-6 中。由于该气象区的最大风速和覆冰气象的气温相同，二者的许用应力相同，因此二者中比载小的不起控制作用，故不再把最大风速作为可能控制气象条件。

表 6-5 有关比载计算结果 单位: MPa/m

$\gamma_1$ (0, 0)	$\gamma_2$ (10, 0)	$\gamma_3$ (10, 0)	$\gamma_4$ (0, 30)	$\gamma_5$ (10, 10)	$\gamma_6$ (0, 30)	$\gamma_7$ (10, 10)
$31.11 \times 10^{-3}$	$24.01 \times 10^{-3}$	$55.12 \times 10^{-3}$	$29.27 \times 10^{-3}$	$9.91 \times 10^{-3}$	$42.71 \times 10^{-3}$	$56.0 \times 10^{-3}$
			$\alpha_f = 0.75, \mu_{sc} = 1.1$	$\alpha_f = 1.0, \mu_{sc} = 1.2$ $B = 1.2$		

表 6-6 比值  $\gamma/[\sigma_0]$  计算结果及其排序表

气象条件	最低气温	覆冰有风	年均气温
$\gamma$ (MPa/m)	$31.11 \times 10^{-3}$	$56.0 \times 10^{-3}$	$31.11 \times 10^{-3}$
$[\sigma_0]$ (MPa)	92.8	92.8	58
$\gamma/[\sigma_0]$ (1/m)	$0.3351 \times 10^{-3}$	$0.6034 \times 10^{-3}$	$0.5361 \times 10^{-3}$
排序	a	c	b

(4) 计算临界档距:

三种不同的高差情况分别有

$$\cos\beta_0 = 1, \cos\beta_{0.1} = 0.995, \cos\beta_{0.2} = 0.98$$

利用式 (6-11)，可以算得不同高差下的临界档距如表 6-7 所示。

表 6-7

有效临界档距判别表

高差 $h/l$	0			0.1			0.2		
气象条件	a	b	c	a	b	c	a	b	c
临界档距 (m)	$l_{ab}=157.9$ $l_{ac}=171.2$	$l_{bc}=198.4$	—	$l_{ab}=157.5$ $l_{ac}=172.1$	$l_{bc}=201.5$	—	$l_{ab}=156.2$ $l_{ac}=174.7$	$l_{bc}=211.1$	—

(5) 判定有效临界档距, 确定控制条件。

根据列表法可知, 无高差时的有效临界档距为  $l_{ab}=157.9\text{m}$  和  $l_{bc}=198.4\text{m}$ , 当档距  $0 < l \leq 157.9\text{m}$  时, 控制条件为 a 气象 (最低气温); 当档距  $157.9\text{m} \leq l \leq 198.4\text{m}$  时, 控制条件为 b 气象 (年均气温); 当档距  $l \geq 198.4\text{m}$  时, 控制条件为 c 气象 (覆冰有风)。小高差时的有效临界档距为  $l_{ab}=157.5\text{m}$  和  $l_{bc}=201.5\text{m}$ 。大高差时的有效临界档距为  $l_{ab}=156.2\text{m}$  和  $l_{bc}=211.1\text{m}$ 。控制条件的作用档距范围如图 6-2 所示。

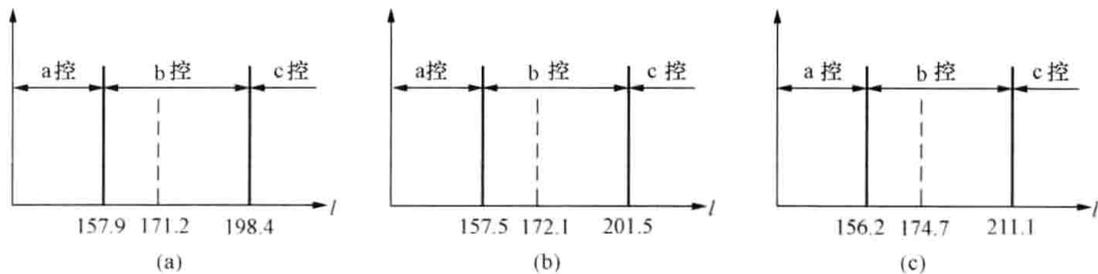


图 6-2 控制条件的控制范围

(a) 无高差; (b) 小高差; (c) 大高差

(6) 由控制条件的控制区知道, 此档距  $l=230\text{m}$  的控制条件是 c 气象 (覆冰有风)。

从 [例 6-2] 可以看出, 档距不同, 控制条件可能不同; 同一档距, 高差不同, 控制条件也可能不同, 高差对临界档距有一定影响。

### 第三节 最大弧垂的判定

这里的最大弧垂, 指的是架空线在无风气象条件下垂直平面内档距中央弧垂的最大值。设计杆塔高度, 校验导线对地面、水面或交叉跨越物间的安全距离, 以及排定杆塔位置等, 都必须知道最大弧垂。出现最大弧垂的气象条件是最高气温或覆冰无风 (最大垂直比载)。为了求得最大弧垂, 可以利用状态方程式分别求得两种气象条件下的应力, 然后再运用弧垂公式计算出各自的弧垂, 加以比较而得到; 也可以先判定出产生最大弧垂的是哪一种气象条件, 再计算该种气象条件下架空线的弧垂即为最大弧垂。常用的判定方法有临界温度判定法和临界比载判定法两种。

#### 一、临界温度判定法

若在某一温度下, 架空线在自重比载 (最高气温时的比载) 作用下产生的弧垂与覆冰无风时产生的弧垂相等, 则此温度称为临界温度。设覆冰无风时气温为  $t_b$ , 比载为  $\gamma_3$ , 架空线水平应力为  $\sigma_{0b}$ , 则相应的弧垂  $f_b$  为

$$f_b = \frac{\gamma_3 l^2}{8\sigma_{0b} \cos\beta}$$

临界温度  $t_j$  时, 比载  $\gamma_1$ 、水平应力  $\sigma_{0j}$ , 则相应的弧垂  $f_j$  为

$$f_j = \frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma_{0j} \cos\beta}$$

根据临界温度的定义, 有

$$\frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma_{0j} \cos\beta} = \frac{\gamma_3 l^2}{8\sigma_{0b} \cos\beta}$$

所以

$$\sigma_{0j} = \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \sigma_{0b}$$

以覆冰无风为第 I 状态, 临界温度为第 II 状态, 并注意到上式, 列出状态方程式为

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_3} \sigma_{0b} - \frac{E\gamma_1^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_{0b}^2} \left(\frac{\gamma_3}{\gamma_1}\right)^2 = \sigma_{0b} - \frac{E\gamma_3^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_{0b}^2} - \alpha E \cos\beta (t_j - t_b)$$

解上式得到临界温度的计算式为

$$t_j = t_b + \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3}\right) \frac{\sigma_{0b}}{\alpha E \cos\beta} \quad (6-18)$$

将计算出的临界温度  $t_j$  与最高气温  $t_{\max}$  进行比较, 若  $t_j > t_{\max}$ , 则最大弧垂发生在覆冰无风气象条件, 反之最大弧垂发生在最高气温气象条件。式 (6-18) 中的应力  $\sigma_{0b}$ , 需要根据架空线的控制气象条件, 利用状态方程式求出。

## 二、临界比载判定法

若架空线在覆冰无风气温  $t_b$  下, 某一垂直比载使其产生的弧垂与最高气温气象下的弧垂相等, 则此比载称为临界比载, 以  $\gamma_j$  表示。若最高气温为  $t_{\max}$ , 比载为  $\gamma_1$ , 架空线水平应力为  $\sigma_{0t}$ , 则相应的弧垂  $f_t$  为

$$f_t = \frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma_{0t} \cos\beta}$$

根据临界比载的定义, 有

$$f_i = \frac{\gamma_j l^2}{8\sigma_{0j} \cos\beta} = \frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma_{0t} \cos\beta}$$

所以

$$\sigma_{0j} = \frac{\gamma_j}{\gamma_1} \sigma_{0t}$$

以最高气温为第 I 状态, 临界比载为第 II 状态, 并注意到上式, 利用状态方程式得

$$\frac{\gamma_j}{\gamma_1} \sigma_{0t} - \frac{E\gamma_j^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_{0t}^2} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_j}\right)^2 = \sigma_{0t} - \frac{E\gamma_1^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_{0t}^2} - \alpha E \cos\beta (t_b - t_{\max})$$

解之得

$$\gamma_j = \gamma_1 + \frac{\gamma_1}{\sigma_{0t}} \alpha E \cos\beta (t_{\max} - t_b) \quad (6-19)$$

将计算出来的临界比载  $\gamma_j$  与最大垂直比载  $\gamma_3$  进行比较, 大者成为最大弧垂的控制条件。若  $\gamma_j > \gamma_3$ , 则最大弧垂发生在最高气温气象条件, 反之最大弧垂发生在覆冰无风气象条件。由于  $\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2$ , 将其与式 (6-19) 对比可以看到, 只要将冰重比载  $\gamma_2$  与上式中的最后一项比较, 即可知最大弧垂出现的气象条件。式 (6-19) 中的最后一项称为临界冰

重比载, 记为  $\gamma_{2j}$ , 所以

$$\gamma_{2j} = \frac{\gamma_1}{\sigma_{0t}} \alpha E \cos \beta (t_{\max} - t_b) \quad (6-20)$$

#### 第四节 应力弧垂曲线和安装曲线

为了使用方便, 常将各种气象条件下架空线的应力和有关弧垂随档距的变化用曲线表示出来, 这种曲线称为应力弧垂曲线, 亦称力学特性曲线。此外, 为方便架线施工, 需要制作各种可能施工温度下架空线在无冰、无风气象下的弧垂随档距变化的曲线, 称为安装曲线, 亦称放线曲线。

##### 一、应力弧垂曲线

架空线的应力弧垂曲线表示了各种气象条件下应力(弧垂)与档距之间的变化关系。在确定出档距以后, 很容易从曲线上得到各种气象条件下的应力和弧垂值。

架空线应力弧垂曲线的制作一般按下列顺序进行:

- (1) 确定工程所采用的气象条件;
- (2) 依据选用的架空线规格, 查取有关参数和机械物理性能, 选定架空线各种气象条件下的许用应力(包括年均运行应力的许用值);
- (3) 计算各种气象条件下的比载;
- (4) 计算临界档距值, 并判定有效临界档距和控制气象条件;
- (5) 判定最大弧垂出现的气象条件;
- (6) 以控制条件为已知状态, 利用状态方程式计算不同档距、各种气象条件下架空线的应力和弧垂值(导线一般只计算最大弧垂气象和外过无风气象下的二条弧垂曲线);
- (7) 按一定比例绘制出应力弧垂曲线。

为保证曲线比较准确而又不使计算量过大, 档距  $l$  的间距一般取为 50m, 但须包括各有效临界档距处的值。由于曲线在有效临界档距附近的变化率较大, 此区间的取值宜密一些。在档距较大时, 曲线一般变化比较平滑, 可根据精确度要求的不同, 适当放大取值间隔。

与导线相比, 地线不输送电力, 故不存在内过电压的气象情况。另外, 地线的应力弧垂曲线也可以档距中央与导线之间的距离  $D \geq 0.012l + 1$  (m) 的防雷要求为控制条件, 在尽量放松的前提下计算, 但应校验地线的最大使用应力是否在允许值范围内。

根据工程的实际需要, 导线和地线的应力弧垂曲线一般按表 6-8 所列各项内容计算。表中符号  $\Delta$  表示需要计算, 符号  $\times$  表示不必计算。

表 6-8 架空线应力弧垂曲线计算项目

计算项目	气象条件	最高	最低	最大风	最大风	覆冰	最厚冰	最厚冰	内过	外过	外过	安装	事故	年均
		气温	气温	(强度)	(风偏)	无风	(强度)	(风偏)	电压	无风	有风	情况	气象	气温
应力曲线	导线	$\Delta$												
	地线	$\times$	$\Delta$	$\Delta$	$\times$	$\times$	$\Delta$	$\times$	$\times$	$\Delta$	$\times$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$
弧垂曲线	导线	$\Delta$	$\times$	$\times$	$\times$	$\Delta$	$\times$	$\times$	$\times$	$\Delta$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$
	地线	$\times$	$\Delta$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$							

注 导线计算最高气温和最大垂直比载二者中最大弧垂气象的值。

**【例 6-3】** 试绘制 220kV 线路通过典型气象区Ⅷ区的 LGJ-500/45 型导线的应力弧垂曲线。已求得最大设计风速为 30m/s。

**解** (1) 整理该气象区的计算用气象条件, 示于表 6-9 中。

**表 6-9** 计算用气象条件

项 目 \ 气 象	最高 气温	最低 气温	最大风	最厚 覆冰	内过 电压	外过 无风	外过 有风	安装 有风	年均 气温
气温 (°C)	+40	-20	-5	-5	+10	+15	+15	-10	+10
风速 (m/s)	0	0	30	15	15	0	10	10	0
冰厚 (mm)	0	0	0	15	0	0	0	0	0

(2) LGJ-500/45 型导线的有关参数和安全系数的取值及相应许用应力, 汇集于表 6-10 中。

**表 6-10** LGJ-500/45 型导线有关参数

截面积 $A(\text{mm}^2)$	导线直径 $d$ (mm)	弹性系数 $E$ (MPa)	温膨系数 $\alpha$ (1/°C)	计算拉断力 (N)	计算质量 (kg/km)	抗拉强度 $\sigma_p$ (MPa)	安全系数 $k$	许用应力 $[\sigma_0]$ (MPa)	年均应力上限 $[\sigma_{cp}]$ (MPa)
531.68	30	65000	$20.5 \times 10^{-6}$	128100	1688	228.89	2.5	91.56	$0.25\sigma_p = 57.22$

(3) 各气象条件下导线比载的计算值, 见表 6-11。

**表 6-11** 比载汇总表 单位: MPa/m

项目	自重 $\gamma_1(0, 0)$	覆冰无风 $\gamma_3(15, 0)$	无冰综合 $\gamma_6(0, 10)$	无冰综合 $\gamma_6(0, 15)$	无冰综合 $\gamma_6(0, 30)$ (用于强度)	无冰综合 $\gamma_6(0, 30)$ (用于风偏)	覆冰综合 $\gamma_7(15, 15)$ (用于强度)	覆冰综合 $\gamma_7(15, 15)$ (用于风偏)
数据	$31.13 \times 10^{-3}$	$66.34 \times 10^{-3}$	$31.38 \times 10^{-3}$	$32.81 \times 10^{-3}$	$40.68 \times 10^{-3}$	$37.72 \times 10^{-3}$	$70.81 \times 10^{-3}$	$68.89 \times 10^{-3}$
备注			$c=1.1$ $\alpha_f=1.0$	$c=1.1$ $\alpha_f=0.75$	$c=1.1$ $\alpha_f=0.75$	$c=1.1$ $\alpha_f=0.61$	$c=1.2$ $\alpha_f=1.0$ $B=1.3$	$c=1.2$ $\alpha_f=0.75$ $B=1.3$

(4) 计算临界档距, 判定控制条件:

1) 可能控制条件的有关参数见表 6-12。

**表 6-12** 可能的应力控制气象条件

条 件 \ 项 目	最大风速	最厚覆冰	最低气温	年均气温
许用应力 $[\sigma_0]$ (MPa)	91.56	91.56	91.56	57.22
比载 $\gamma$ (MPa/m)	$40.68 \times 10^{-3}$	$70.81 \times 10^{-3}$	$31.13 \times 10^{-3}$	$31.13 \times 10^{-3}$
$\gamma/[\sigma_0]$ (1/m)	$0.444 \times 10^{-3}$	$0.773 \times 10^{-3}$	$0.340 \times 10^{-3}$	$0.544 \times 10^{-3}$
温度 $t$ (°C)	-5	-5	-20	+10
$\gamma/[\sigma_0]$ 由小至大编号	b	d	a	c

2) 按等高悬点考虑, 计算各临界档距为

$$l_{ab} = 300.34\text{m}, l_{ac} = 107.47\text{m}, l_{ad} = 123.67\text{m}; l_{bc} = \text{虚数}, l_{bd} = 0\text{m}, l_{cd} = 132.44\text{m}$$

3) 判断有效临界档距, 确定控制气象条件。

将各临界档距值填入有效临界档距判别表 6-13, 容易看出  $l_{ac} = 107.47\text{m}$ 、 $l_{cd} = 132.44\text{m}$  为有效临界档距。实际档距  $l \leq l_{ac}$ , 最低气温为控制条件; 实际档距  $l_{ac} \leq l \leq l_{cd}$  时, 年均气温为控制条件; 实际档距  $l \geq l_{cd}$  时, 最厚覆冰为控制条件。

表 6-13 有效临界档距判别表

可能的控制条件	a (最低气温)	b (最大风速)	c (年均气温)	d (最厚覆冰)
临界档距 (m)	$l_{ab} = 300.34$ $l_{ac} = 107.47$ $l_{ad} = 123.67$	$l_{bc} = \text{虚数}$ $l_{bd} = 0$	$l_{cd} = 132.44$	—

(5) 计算各气象条件的应力和弧垂:

1) 以各档距范围的控制条件为已知条件, 有关数据如表 6-14 所示。

表 6-14 已知条件及参数

已知条件	最低气温	年均气温	最厚覆冰
控制区间	0~107.47	107.47~132.44	132.44~∞
参数			
$t_m$ (°C)	-20	+10	-5
$b_m$ (mm)	0	0	15
$v_m$ (m/s)	0	0	15
$\gamma_m$ ( $\times 10^{-3}$ MPa/m)	31.13	31.13	70.81
$\sigma_m$ (MPa)	91.56	57.22	91.56

2) 以各气象条件为待求条件, 已知参数如表 6-15 所示。

表 6-15 待求条件及已知参数

待求条件	最高气温	最低气温	年均气温	外过有风	外过无风	内过电压	安装	覆冰无风	覆冰有风 (强度用)	覆冰有风 (风偏用)	最大风 (强度用)	最大风 (风偏用)
参数												
$t$ (°C)	+40	-20	10	+15	+15	+10	-10	-5	-5	-5	-5	-5
$b$ (mm)	0	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0
$v$ (m/s)	0	0	0	10	0	15	10	0	15	15	30	30
$\gamma$ ( $\times 10^{-3}$ MPa/m)	31.13	31.13	31.13	31.38	31.13	31.81	31.38	66.34	70.81	68.89	40.68	37.72

3) 利用状态方程式 (6-7), 求得各待求条件下的应力和弧垂, 如表 6-16 所示。根据计算结果很容易看出, 最大弧垂发生在最高气温气象条件。

表 6-16 LGJ-500/45 型导线应力弧垂计算表

气象条件	最高气温		最低气温	年均气温	安装	外过有风	外过无风	
	$\sigma_0$ (MPa)	$f_v$ (m)	$\sigma_0$ (MPa)	$f_v$ (m)				
档距 $l_r$ (m)								
50	23.11	0.42	91.56	53.13	78.53	47.14	47.1	0.21
107.47	34.09	1.32	91.56	57.23	79.49	52.49	52.36	0.86
132.44	36.93	1.85	88.95	57.22	77.58	53.09	52.93	1.29
200	38.32	4.06	68.88	49.55	61.57	47.47	47.21	3.3

续表

气象条件 档距 $l_r$ (m)	最高气温		最低气温	年均气温	安装	外过有风	外过无风	
	$\sigma_0$ (MPa)	$f_v$ (m)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$f_v$ (m)
250	38.88	6.26	58.4	46.43	54.05	45.21	44.93	5.41
300	39.24	8.92	52.26	44.59	49.68	43.86	43.57	8.04
350	39.48	12.07	48.7	43.45	47.09	43.02	42.71	11.16
400	39.64	15.71	46.51	42.7	45.47	42.46	42.15	14.77
450	39.76	19.82	45.08	42.19	44.38	42.07	41.75	18.87
500	39.85	24.41	44.09	41.82	43.62	41.79	41.47	23.46
550	39.91	29.49	43.38	41.55	43.07	41.58	41.26	28.53
600	39.97	35.05	42.86	41.34	42.66	41.42	41.1	34.08
650	40	41.1	42.45	41.18	42.34	41.29	40.98	40.12
700	40.04	47.62	42.14	41.05	42.09	41.2	40.88	46.64

气象条件 档距 $l_r$ (m)	操作过电压	覆冰无风		覆冰有风(强度)	覆冰有风(风偏)	最大风(强度)	最大风(风偏)
	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$f_v$ (m)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)
50	53.22	75.95	0.27	76.58	76.31	72.9	72.62
107.47	57.53	86.4	1.11	88.14	87.39	76.75	75.72
139.46	57.63	89.34	1.63	91.56	90.61	76.56	75.12
200	50.23	88.14	3.76	91.56	90.1	66.86	64.18
250	47.2	87.54	5.92	91.56	89.84	62.36	59.15
300	45.41	87.12	8.57	91.56	89.66	59.54	56.07
350	44.29	86.82	11.7	91.56	89.54	57.75	54.14
400	43.55	86.61	15.32	91.56	89.44	56.56	52.88
450	43.05	86.46	19.42	91.56	89.38	55.73	52.01
500	42.68	86.34	24.01	91.56	89.32	55.14	51.39
550	42.41	86.25	29.08	91.56	89.28	54.7	50.93
600	42.21	86.18	34.64	91.56	89.25	54.36	50.58
650	42.05	86.12	40.68	91.56	89.23	54.1	50.31
700	41.92	86.08	47.2	91.56	89.21	53.9	50.1

(6) 以表 6-16 的数据为依据, 绘制应力弧垂曲线如图 6-3 所示。

## 二、安装曲线

架线施工时, 常以观测弧垂方式确保线路符合设计要求, 因此事先将各种施工气温(无风无冰)下的弧垂绘制成相应的曲线, 以备施工时查用。安装曲线以档距为横坐标, 弧垂为纵坐标, 一般从最高施工气温至最低施工气温每隔  $5^{\circ}\text{C}$  ( $10^{\circ}\text{C}$ ) 绘制一条弧垂曲线。为了使用方便, 提高绘图精度, 对不同的档距, 可根据其应力绘制成百米档距弧垂, 即

$$f_{100} = \frac{\gamma_1 \times 100^2}{8\sigma_0}$$

观测档距  $l$  的弧垂可由下式进行换算

$$f = f_{100} \left( \frac{l}{100} \right)^2 \quad (6-21)$$

**【例 6-4】** 条件同 [例 6-3], 试绘制其安装曲线。

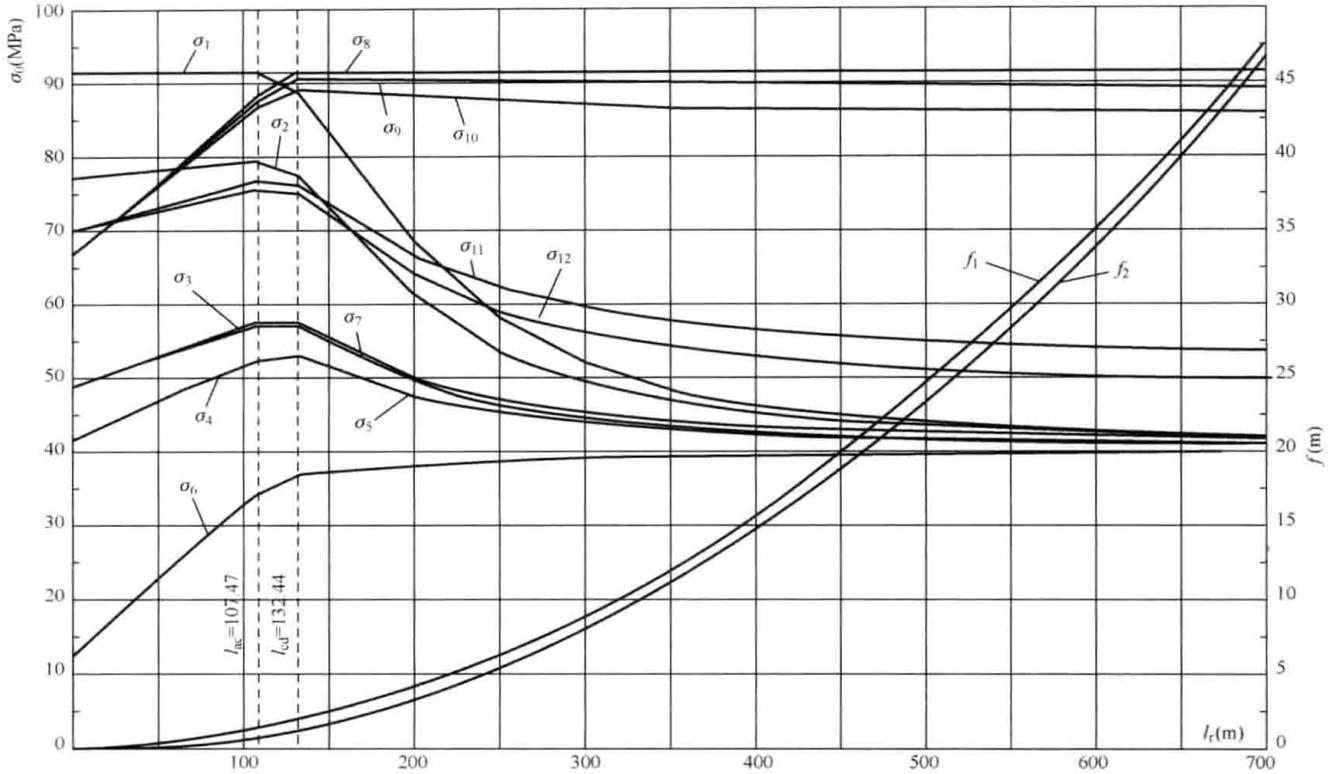


图 6-3 导线应力弧垂曲线

$\sigma_1$ —最低温应力;  $\sigma_2$ —安装有风应力;  $\sigma_3$ —内过电压应力;  $\sigma_4$ —外过有风应力;  $\sigma_5$ —外过无风应力;  
 $\sigma_6$ —最高气温应力;  $\sigma_7$ —一年均气温应力;  $\sigma_8$ —覆冰有风(强度)应力;  $\sigma_9$ —覆冰有风(风偏)应力;  
 $\sigma_{10}$ —覆冰无风应力;  $\sigma_{11}$ —大风(强度)应力;  $\sigma_{12}$ —大风(风偏)应力;  
 $f_1$ —最高气温弧垂;  $f_2$ —外过无风弧垂;  $l_r$ —代表档距

解 (1) 已知条件仍为表 6-14。

(2) 应用状态方程式求解各施工气象(无风、无冰、不同气温)下的安装应力,进而求得相应的弧垂,结果如表 6-17 所示。

(3) 按表 6-17 中的弧垂数据,绘制 40~ -10℃ 百米弧垂安装曲线,如图 6-4 所示。

表 6-17 各种施工气温下的应力和百米档距弧垂

档距 (m)	50		107.47		132.44		200		250		300		350	
	$\sigma_0$ (MPa)	$f_{100}$ (m)												
40	23.1	1.68	34.1	1.14	36.9	1.05	38.3	1.02	38.9	1.00	39.2	0.99	39.5	0.99
35	26.7	1.46	36.9	1.06	39.4	0.99	39.8	0.98	39.9	0.98	40.0	0.97	40.1	0.97
30	31.0	1.26	40.1	0.97	42.3	0.92	41.4	0.94	41.0	0.95	40.8	0.95	40.7	0.96
25	35.9	1.08	43.8	0.89	45.5	0.86	43.2	0.90	42.3	0.92	41.7	0.93	41.3	0.94
20	41.3	0.94	47.9	0.81	49.0	0.79	45.1	0.86	43.5	0.89	42.6	0.91	42.0	0.93
15	47.1	0.83	52.4	0.74	52.9	0.74	47.2	0.82	44.9	0.87	43.6	0.89	42.7	0.91
10	53.1	0.73	57.2	0.68	57.2	0.68	49.5	0.79	46.4	0.84	44.6	0.87	43.4	0.90
5	59.3	0.66	62.4	0.62	61.9	0.63	52.1	0.75	48.1	0.81	45.7	0.85	44.2	0.88
0	65.6	0.59	67.9	0.57	66.8	0.58	54.9	0.71	49.8	0.78	46.8	0.83	45.0	0.86
-5	72.0	0.54	73.6	0.53	72.0	0.54	58.0	0.67	51.7	0.75	48.1	0.81	45.9	0.85
-10	78.5	0.50	79.4	0.49	77.5	0.50	61.3	0.63	53.8	0.72	49.4	0.79	46.8	0.83

续表

档距 (m)	400		450		500		550		600		650		700	
	$\sigma_0$ (MPa)	$f_{100}$ (m)												
40	39.6	0.98	39.8	0.98	39.8	0.98	39.9	0.98	40.0	0.97	40.0	0.97	40.0	0.97
35	40.1	0.97	40.1	0.97	40.2	0.97	40.2	0.97	40.2	0.97	40.2	0.97	40.2	0.97
30	40.6	0.96	40.5	0.96	40.5	0.96	40.4	0.96	40.4	0.96	40.4	0.96	40.4	0.96
25	41.1	0.95	40.9	0.95	40.8	0.95	40.7	0.96	40.6	0.96	40.6	0.96	40.5	0.96
20	41.6	0.94	41.3	0.94	41.1	0.95	41.0	0.95	40.9	0.95	40.8	0.95	40.7	0.96
15	42.2	0.92	41.8	0.93	41.5	0.94	41.3	0.94	41.1	0.95	41.0	0.95	40.9	0.95
10	42.7	0.91	42.2	0.92	41.8	0.93	41.5	0.94	41.3	0.94	41.2	0.94	41.0	0.95
5	43.3	0.90	42.6	0.91	42.2	0.92	41.8	0.93	41.6	0.94	41.4	0.94	41.2	0.94
0	43.9	0.89	43.1	0.90	42.5	0.92	42.1	0.92	41.8	0.93	41.6	0.94	41.4	0.94
-5	44.5	0.88	43.6	0.89	42.9	0.91	42.4	0.92	42.1	0.93	41.8	0.93	41.6	0.94
-10	45.1	0.86	44.1	0.88	43.3	0.90	42.7	0.91	42.3	0.92	42.0	0.93	41.8	0.93

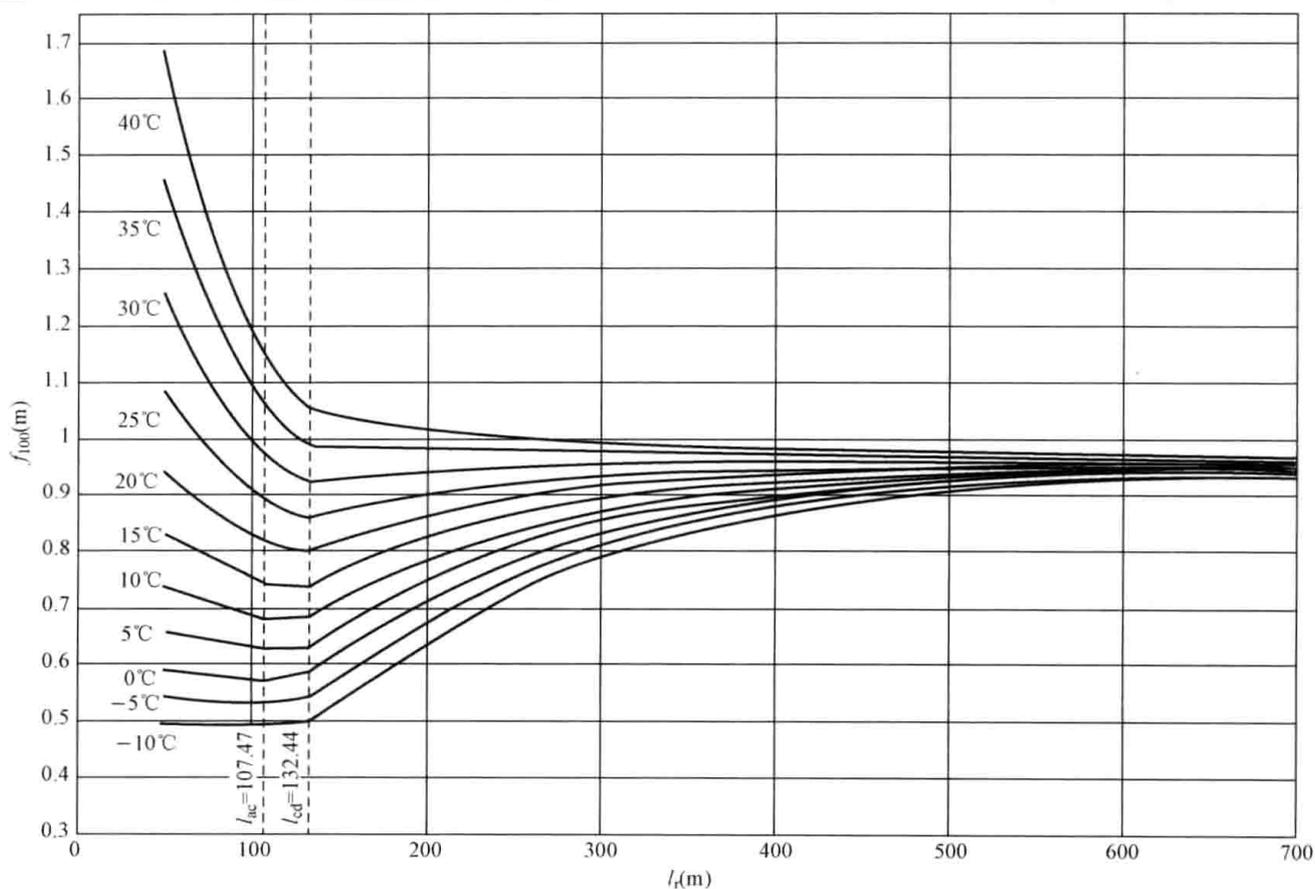


图 6-4 安装曲线

### 练习题

1. 架空线的状态方程式建立的原则是什么？状态方程式的主要用途是什么？
2. 何为临界档距？判定有效临界档距有何意义？试论述一种有效临界档距的判定方法。

3. 简述架空线应力弧垂曲线的制作步骤。

4. 某架空线路通过我国典型气象区 II 区, 一档距为 100m, LGJ - 70/10 型导线, 自重比载  $\gamma_1 = 33.99 \times 10^{-3} \text{MPa/m}$ , 冰重比载  $\gamma_2 = 28.64 \times 10^{-3} \text{MPa/m}$ , 最高气温时导线应力  $\sigma_t = 42.14 \text{MPa}$ , 覆冰无风时导线应力  $\sigma_b = 99.81 \text{MPa}$ 。试判断出现最大弧垂的气象条件, 并计算最大弧垂。

5. 某条 220kV 输电线路通过我国典型气象区 III 区, 采用 LGJ - 300/40 型导线, 安全系数  $k = 2.5$ , 弹性系数  $E = 73000 \text{MPa}$ , 温膨系数  $\alpha = 19.6 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ , 年均许用应力  $[\sigma_{cp}] = 0.25\sigma_p$ 。试确定控制气象条件的档距范围。若某单一档距 450m, 高差 128m, 试确定该档的最大弧垂。

## 第七章 均布荷载下架空线计算的进一步研究

### 第一节 考虑刚度影响时架空线的计算

实际的架空线具有一定的刚度, 在受到弯曲时表现出一定的硬性, 即具有一定的抗弯刚度值  $EJ$ , 因而不是理想的柔线。当其刚度不能忽略时, 其悬挂曲线的形状和应力与柔性架空线也就不同, 有其自身的特点。

#### 一、刚性架空线悬挂曲线方程的普遍形式

柔性架空线仅能承受轴向拉力, 而刚性架空线不仅能承受轴向拉力, 且能承受弯矩, 这是与柔性架空线的根本不同。

图 7-1 是某档刚性架空线的受力图。假定作用在架空线上的比载  $\gamma$  沿斜档距均布, 则单位长度架空线水平投影上的荷载集度  $p_0 = \gamma A / \cos\beta$  ( $A$  为架空线的截面积)。悬挂点处架空线受有水平张力  $T_0$ , 垂向反力  $R_A$ 、 $R_B$ , 约束弯矩  $M_A$ 、 $M_B$  的作用。在架空线任一点处取一微长  $dL$ , 其水平和垂直投影长度分别为  $dx$  和  $dy$ , 如图 7-1 (b) 所示。该微段架空线上的荷载为  $p_0 dx$ , 一端的架空线张力为  $T$ 、张力的水平分量为  $T_0 = T \cos\theta$ 、弯矩为  $M$ , 在另一端上述各量分别为  $T + dT$ 、 $T_0$ 、 $M + dM$ , 显然张力的水平分量处处相等。微段  $y$  方向的力平衡方程式为

$$-T_0 \tan\theta - p_0 dx + T_0 \tan(\theta + d\theta) = 0$$

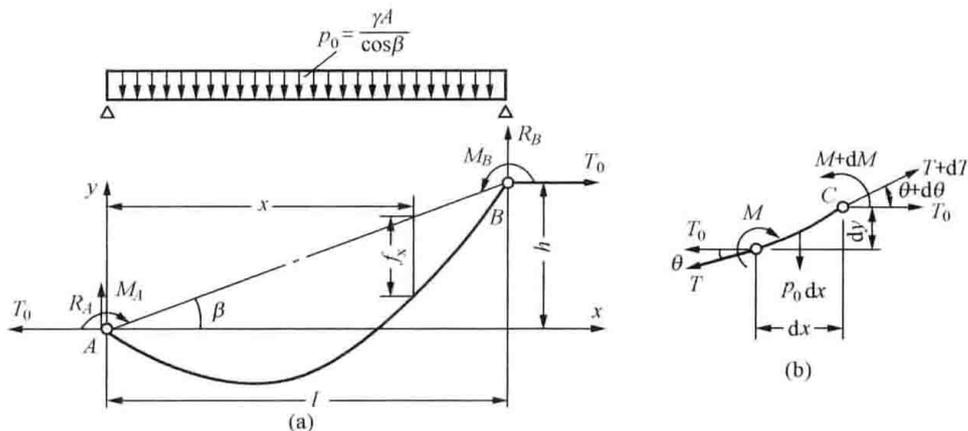


图 7-1 刚性架空线时的受力图

(a) 整档架空线受力图; (b) 架空线单元受力图

整理后得到

$$\frac{\tan(\theta + d\theta) - \tan\theta}{dx} = \frac{p_0}{T_0}$$

即

$$\frac{d(\tan\theta)}{dx} = \frac{p_0}{T_0} \quad (7-1)$$

根据微段对任一点的力矩平衡方程, 有

$$\sum M_C = -T_0 \tan\theta dx + M - p_0 dx \frac{dx}{2} - (M + dM) + T_0 dy = 0$$

略去上式的二阶微量后, 得

$$\tan\theta = -\frac{1}{T_0} \frac{dM}{dx} + \frac{dy}{dx} \quad (7-2)$$

上式对  $x$  求导, 得到

$$\frac{d(\tan\theta)}{dx} = -\frac{1}{T_0} \frac{d^2M}{dx^2} + \frac{d^2y}{dx^2}$$

由梁的挠曲微分方程知

$$M = EJ \frac{d^2y}{dx^2} \quad (7-3)$$

将  $M$  对  $x$  求二阶导数, 得

$$\frac{d^2M}{dx^2} = EJ \frac{d^4y}{dx^4}$$

所以

$$\frac{d(\tan\theta)}{dx} = -\frac{EJ}{T_0} \frac{d^4y}{dx^4} + \frac{d^2y}{dx^2} \quad (7-4)$$

将式 (7-1) 代入整理后, 得

$$\frac{d^4y}{dx^4} - \frac{T_0}{EJ} \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{p_0}{EJ} = 0 \quad (7-5)$$

式 (7-5) 是四阶常系数线性微分方程。令  $\frac{T_0}{EJ} = k^2$ ,  $\frac{d^2y}{dx^2} = u$ , 则式 (7-5) 变形为二阶常系数线性微分方程

$$\frac{d^2u}{dx^2} - k^2u + \frac{k^2p_0}{T_0} = 0 \quad (7-6)$$

其通解为

$$u = A \operatorname{ch}kx + B \operatorname{sh}kx + \frac{p_0}{T_0}$$

即

$$\frac{d^2y}{dx^2} = A \operatorname{ch}kx + B \operatorname{sh}kx + \frac{p_0}{T_0} \quad (7-7)$$

式中  $A$ 、 $B$ ——积分常数。

对式 (7-7) 连续积分, 有

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{A}{k} \operatorname{sh}kx + \frac{B}{k} \operatorname{ch}kx + \frac{p_0}{T_0}x + C_3 \\ y &= \frac{A}{k^2} \operatorname{ch}kx + \frac{B}{k^2} \operatorname{sh}kx + \frac{p_0}{2T_0}x^2 + C_3x + C_4 \end{aligned}$$

令

$$C_1 = \frac{A}{k^2}, \quad C_2 = \frac{B}{k^2} \quad (7-8)$$

则

$$\frac{dy}{dx} = C_1 k \operatorname{sh} kx + C_2 k \operatorname{ch} kx + \frac{p_0}{T_0} x + C_3 \quad (7-9)$$

$$y = C_1 \operatorname{ch} kx + C_2 \operatorname{sh} kx + \frac{p_0}{2T_0} x^2 + C_3 x + C_4 \quad (7-10)$$

上二式是刚性架空线的悬挂曲线方程及其微分方程，含有四个积分常数  $C_1 \sim C_4$ ，需要四个边界条件才能确定。

## 二、刚性架空线在悬挂点水平固定时的弧垂和弯曲应力

### 1. 悬挂曲线方程和弯矩方程

在图 7-1 所选坐标系下，刚性架空线在悬挂点水平固定（相当于线夹无悬垂角）时，在悬挂点 A 处， $x=0$ ， $y=0$ ， $\frac{dy}{dx}=0$ ；在悬挂点 B 处， $x=l$ ， $y=h$ ， $\frac{dy}{dx}=0$ 。将这些参数代入式 (7-9) 和式 (7-10) 可以得到

$$\left. \begin{aligned} C_1 + C_4 &= 0 \\ kC_2 + C_3 &= 0 \\ C_1 \operatorname{ch} kl + C_2 \operatorname{sh} kl + lC_3 + C_4 + \frac{p_0 l^2}{2T_0} &= h \\ C_1 k \operatorname{sh} kl + C_2 k \operatorname{ch} kl + C_3 + \frac{p_0 l}{T_0} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

解之得

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -\frac{p_0 l(1 + \operatorname{ch} kl)}{2kT_0 \operatorname{sh} kl} - \frac{h(1 - \operatorname{ch} kl)}{2(1 - \operatorname{ch} kl) + kl \operatorname{sh} kl} \\ C_2 &= \frac{p_0 l}{2kT_0} - \frac{h \operatorname{sh} kl}{2(1 - \operatorname{ch} kl) + kl \operatorname{sh} kl} \\ C_3 &= -kC_2 \\ C_4 &= -C_1 \end{aligned} \right\}$$

将  $C_1 \sim C_4$  代回式 (7-10)，整理后得到刚性架空线在悬点水平固定时的悬挂曲线方程为

$$\begin{aligned} y &= \frac{h}{kl - 2\operatorname{th} \frac{kl}{2}} \left[ \operatorname{th} \frac{kl}{2} (\operatorname{ch} kx - 1) - \operatorname{sh} kx + kx \right] \\ &+ \frac{p_0 l}{2kT_0} \left[ \operatorname{sh} kx - \frac{\operatorname{ch} kx - 1}{\operatorname{th} \frac{kl}{2}} \right] - \frac{p_0 x}{2T_0} (l - x) \end{aligned} \quad (7-11)$$

式 (7-11) 对  $x$  求导可得到

$$\frac{dy}{dx} = \frac{hk}{kl - 2\operatorname{th} \frac{kl}{2}} \left[ \operatorname{th} \frac{kl}{2} \operatorname{sh} kx - \operatorname{ch} kx + 1 \right] + \frac{p_0 l}{2T_0} \left[ \operatorname{ch} kx - \frac{\operatorname{sh} kx}{\operatorname{th} \frac{kl}{2}} \right] - \frac{p_0}{2T_0} (l - 2x) \quad (7-12)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{hk^2}{kl - 2\operatorname{th} \frac{kl}{2}} \left[ \operatorname{th} \frac{kl}{2} \operatorname{ch} kx - \operatorname{sh} kx \right] + \frac{p_0 lk}{2T_0} \left[ \operatorname{sh} kx - \frac{\operatorname{ch} kx}{\operatorname{th} \frac{kl}{2}} \right] + \frac{p_0}{T_0} \quad (7-13)$$

根据式 (7-3), 可以得到刚性架空线上距低悬挂点 A 任一点  $x$  处的弯矩为

$$M_x = \frac{p_0}{k^2} + \frac{hT_0}{kl - 2\text{th}\frac{kl}{2}} \left[ \text{th}\frac{kl}{2}\text{chk}x - \text{shk}x \right] - \frac{p_0 l}{2k} \left[ \frac{\text{chk}x}{\text{th}\frac{kl}{2}} - \text{shk}x \right] \quad (7-14)$$

将  $x=l-x'$  代入式 (7-14), 可得刚性架空线上距高悬挂点 B 任一点  $x'$  处的弯矩  $M_{x'}$ , 利用双曲函数恒等式化简并加以整理得到

$$M_{x'} = \frac{p_0}{k^2} - \frac{hT_0}{kl - 2\text{th}\frac{kl}{2}} \left[ \text{th}\frac{kl}{2}\text{chk}x' - \text{shk}x' \right] - \frac{p_0 l}{2k} \left[ \frac{\text{chk}x'}{\text{th}\frac{kl}{2}} - \text{shk}x' \right] \quad (7-15)$$

由于  $\frac{kl}{2} \gg 1$ ,  $\text{th}\frac{kl}{2} \approx 1$ , 而  $\frac{p_0}{k^2}$  相对很小可忽略不计, 在两悬点附近  $x$ 、 $x'$  很小, 所以

$$M_x = - \left( \frac{p_0 l}{2k} - \frac{hT_0}{kl - 2} \right) [\text{chk}x - \text{shk}x] \approx - \frac{1}{k} \left( \frac{p_0 l}{2} - \frac{hT_0}{l} \right) e^{-kx} \quad (7-16)$$

$$M_{x'} = - \left( \frac{p_0 l}{2k} + \frac{hT_0}{kl - 2} \right) [\text{chk}x' - \text{shk}x'] \approx - \frac{1}{k} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{hT_0}{l} \right) e^{-kx'} \quad (7-17)$$

从以上二式可以看出, 在悬挂点附近  $M_x$ 、 $M_{x'}$  按指数规律变化, 随着  $x$ 、 $x'$  的增加, 弯矩急剧下降, 因此弯矩引起的弯曲应力对架空线的影响主要表现在悬挂点附近。悬挂点处的最大弯矩为

$$M_A \approx - \frac{1}{k} \left( \frac{p_0 l}{2} - \frac{hT_0}{l} \right) = - \sqrt{\frac{EJ}{T_0}} \left( \frac{p_0 l}{2} - \frac{hT_0}{l} \right) \quad (7-18)$$

$$M_B \approx - \frac{1}{k} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{hT_0}{l} \right) = - \sqrt{\frac{EJ}{T_0}} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{hT_0}{l} \right) \quad (7-19)$$

从式中可以看出, 悬点处的弯矩随张力  $T_0$  的减小而增大, 随刚度  $EJ$  的增大而增大。同一档内, 高悬挂点处的弯矩最大。

## 2. 弧垂和弯曲应力

刚性架空线两悬挂点水平固定时, 任一点处的弧垂为

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{h}{l}x - y \\ &= \frac{h}{kl - 2\text{th}\frac{kl}{2}} \left[ \text{th}\frac{kl}{2} \left( 1 - \frac{2x}{l} - \text{chk}x \right) + \text{shk}x \right] - \frac{p_0 l}{2kT_0} \left[ \text{shk}x - \frac{\text{chk}x - 1}{\text{th}\frac{kl}{2}} \right] + \frac{p_0 x}{2T_0}(l - x) \end{aligned} \quad (7-20)$$

当  $x=l/2$  时, 得到档距中央弧垂为

$$f_{\frac{l}{2}} = \frac{p_0 l^2}{8T_0} - \frac{p_0 l}{2kT_0} \frac{\text{ch}\frac{kl}{2} - 1}{\text{sh}\frac{kl}{2}} \quad (7-21)$$

式 (7-21) 中第一项是柔性架空线的档距中央弧垂。可以看出, 由于考虑了架空线的刚度, 其档距中央弧垂较柔线弧垂有所减小。由于高差  $h$  未出现在公式中, 因此只要  $p_0$  相同, 高差对档距中央弧垂的大小无影响。

根据材料力学知, 梁受到弯曲作用时其截面产生的最大弯曲应力  $\sigma$  由下式计算

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} = \pm \frac{Me}{J} = \pm \left( \frac{M}{EJ} \right) Ee = \pm Ee \frac{d^2 y}{dx^2} = \pm E \frac{e}{\rho} \quad (7-22)$$

式中  $M$ ——架空线某断面处的弯矩;

$W$ ——架空线某断面处的抗弯模量;

$J$ ——架空线某断面对中性轴的惯性矩;

$e$ ——架空线某断面上的最大弯曲应力点到中性轴的距离;

$E$ ——架空线的弹性系数;

$EJ$ ——架空线的抗弯刚度;

$\rho$ ——架空线受弯断面处的弯曲曲率半径。

对于绞线整体来说,  $E$ 、 $J$ 、 $e$  的值与弯曲时股丝间发生的滑动情况有关。一般  $e$  介于绞线整体半径与股丝半径之间。由于悬挂点处弯曲曲率较大, 股间一般要产生滑动, 可以粗略认为各股以同样的曲率绕自身的中性轴弯曲, 即把  $e$  值视为股丝的半径  $r$ , 这将使求得的弯曲应力比实际的要小。 $EJ$  值可由实验得到, 但很难准确分出  $E$  和  $J$  的各自量值。试验表明, 架空线受弯时的  $E$  值小于所用股丝材料弹性系数的一半, 有的文献提出取股丝材料弹性系数的  $3/8$  作为  $E$  之值。另外, 当线股受弯曲率较大时, 材料将产生塑性变形而使最大弯曲应力降低。因此, 使用式 (7-22) 计算弯曲应力是十分粗糙的。即便如此, 该式仍对理论上分析刚性架空线的弯曲应力有很大的指导作用。

将高悬挂点  $B$  处的弯矩计算式 (7-19) 代入式 (7-22), 可以得到刚性架空线悬挂点水平固定时的最大弯曲应力为

$$\sigma_{MB} \approx \frac{k}{T_0} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{h T_0}{l} \right) Ee = \frac{Ee}{T_0} \sqrt{\frac{T_0}{EJ}} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{h T_0}{l} \right) \quad (7-23)$$

**【例 7-1】** 某钢芯铝绞线综合截面积  $A = 494.73 \text{mm}^2$ , 试验求得  $EJ = 143.2 \text{MN} \cdot \text{mm}^2$ 。若架空线单位水平投影长度上的荷载  $p_0 = 18.15 \text{N/m}$ , 取弯曲时的弹性系数  $E = \frac{3}{8} E_0 = 27.44 \text{kN/mm}^2$ ,  $e$  为铝丝半径, 即取  $e = r = 2.068 \times 10^{-3} \text{m}$ , 试求在档距  $l = 1000 \text{m}$ 、高差  $h = 80 \text{m}$ 、水平张力  $T_0 = 36.49 \text{kN}$  时, 刚性架空线的档距中央弧垂和高悬挂点处的最大弯曲应力。

解 由于  $k = \sqrt{\frac{T_0}{EJ}} = \sqrt{\frac{36490}{143.2}} = 16 \text{ (1/m)}$ , 所以

$$\begin{aligned} f_{\frac{l}{2}} &= \frac{p_0 l^2}{8T_0} - \frac{p_0 l}{2kT_0} \frac{\text{ch} \frac{kl}{2} - 1}{\text{sh} \frac{kl}{2}} \\ &= \frac{18.15 \times 1000^2}{8 \times 36490} - \frac{18.15 \times 1000}{2 \times 16 \times 36490} \times \frac{\text{ch}(16 \times 500) - 1}{\text{sh}(16 \times 500)} \\ &= 62.174 - 0.0155 = 62.16 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{MB} &\approx \frac{k}{T_0} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{h T_0}{l} \right) Ee \\ &= \frac{16}{36490} \left( \frac{18.15 \times 1000}{2} + \frac{36490 \times 80}{1000} \right) \times 27.44 \times 10^9 \times 2.068 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 298.44(\text{MPa})$$

[例 7-1] 中  $E$ 、 $e$  的取值虽然理由不是十分充分, 但却有意识地选用了使弯曲应力偏小的数值。尽管如此, 求得的弯曲应力数值仍然很大。即便是在档距  $l=400\text{m}$  且无高差即  $h=0$  的情况下, 悬挂点的弯曲应力也达近  $100\text{MPa}$ , 与架空线的最大使用应力相当。这样大的弯曲附加应力, 将使铝线受拉部分的综合应力超过材料的屈服极限, 必然引起材料产生塑性伸长而使断面上的应力重新分配, 否则架空线承受最大弯曲应力的部分就会断裂。从 [例 7-1] 还可以看到, 即使档距很大, 因架空线刚度所减小的弧垂量也是微不足道的, 它比近似弧垂公式本身的误差还小得多。因此在计算档内弧垂时, 完全可以不考虑架空线刚度的影响。

在实际的高压架空线路中, 并不采用水平固定又无倾角的线夹, 最大弯曲应力并不像 [例 7-1] 中计算的那样大。通常悬挂点处线夹等吊具的曲率半径大于该点处架空线的弯曲曲率半径, 线夹的支持使架空线在该处的曲率半径加大, 从而减小了架空线的弯曲应力。但若在实际工作中不加以注意, 如线夹出口曲率半径小于架空线的弯曲曲率半径, 或施工运行中采用小直径滑轮或双勾紧线器吊钩悬吊架空线等, 就近似于悬挂点水平固定的情况。此时若在大高差悬挂点使用上述吊具, 将会产生极大的弯曲应力, 使架空线在高悬挂点处产生“灯笼”、断股和裂纹。根据理论分析, 这是必然要发生的, 对此应给予足够的重视。

### 三、刚性架空线在悬挂点倾斜固定时的附加弯矩和弯曲应力

由于悬挂点两侧的架空线荷载不尽相同, 该悬挂点处的回转式固定线夹将产生倾斜, 见图 7-2。设悬挂点处线夹向档内下倾角度的斜率,  $A$  悬挂点为  $-m_A$ ,  $B$  悬挂点为  $+m_B$ , 即有边界条件: 当  $x=0$  时,  $y=0$ ,  $\frac{dy}{dx} = -m_A$ ; 当  $x=l$  时,  $y=h$ ,  $\frac{dy}{dx} = +m_B$ 。将其代入式 (7-9) 和式 (7-10), 得到

$$\left. \begin{aligned} C_1 + C_4 &= 0 \\ kC_2 + C_3 &= -m_A \\ C_1 chkl + C_2 shkl + lC_3 + C_4 + \frac{p_0 l^2}{2T_0} &= h \\ C_1 k shkl + C_2 k chkl + C_3 + \frac{p_0 l}{T_0} &= m_B \end{aligned} \right\}$$

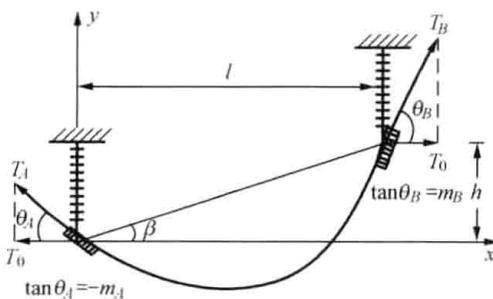


图 7-2 刚性架空线在悬挂点倾斜固定

上述方程组联立可解得  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ , 代回式 (7-10) 可得到刚性架空线在悬挂点倾斜固定时的悬挂曲线方程, 再将该曲线方程对  $x$  求二阶导数, 即可得到架空线的曲率方程。将  $x=0$  和  $x=l$  代入曲率方程, 并作近似和化简, 从而得到悬挂点  $A$ 、 $B$  处刚性架空线的曲率为

$$\left. \frac{d^2 y}{dx^2} \right|_{x=0} = \frac{1}{\rho_A} \approx -\frac{k}{T_0} \left( \frac{p_0 l}{2} - \frac{T_0 h}{l} - m_A T_0 \right) \quad (7-24)$$

$$\left. \frac{d^2 y}{dx^2} \right|_{x=l} = \frac{1}{\rho_B} \approx -\frac{k}{T_0} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{T_0 h}{l} - m_B T_0 \right) \quad (7-25)$$

显然, 悬挂点处线夹向档内下倾, 可使线夹出口处架空线的弯曲曲率减小。将式 (7-24)、式 (7-25) 两端分别乘以抗弯刚度  $EJ$ , 得到刚性架空线在悬挂点倾斜固定时的弯矩为

$$M_A \approx -\frac{1}{k} \left( \frac{p_0 l}{2} - \frac{T_0 h}{l} - m_A T_0 \right) \quad (7-26)$$

$$M_B \approx -\frac{1}{k} \left( \frac{p_0 l}{2} + \frac{T_0 h}{l} - m_B T_0 \right) \quad (7-27)$$

从上二式可以看到, 由于线夹向档内下倾, 使得架空线的弯曲曲率和弯矩都减小了。当下倾角斜率即  $m_A$ 、 $m_B$  达到一定值后, 可使架空线的弯矩为零。因此实际使用中的线夹船体两端出口处均具有一定的下倾角 (悬垂角), 如图 7-3 所示。这样可以保证在线夹出口处  $B'$  点的架空线不承受弯矩, 悬挂点架空线的反力和弯矩转移到了  $B'O$  段内。在线夹  $B'O$  段, 架空线的静弯应力取决于船体的曲率半径  $\rho$  的大小, 其计算公式仍为式 (7-22)。

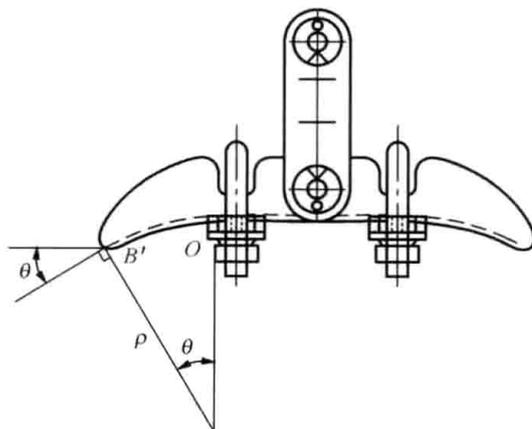


图 7-3 悬垂线夹的悬垂角

#### 四、架空线的抗弯刚度

准确求取架空线所受附加弯矩的关键, 在于获得其抗弯刚度的精确值。对于单一材料的单股导线来说, 其抗弯刚度是材料的弹性模量  $E$  和断面惯性矩  $J$  的乘积。对于常用的多股绞线来说,  $EJ$  值不仅受材料、绞制规格等影响, 而且还受使用张力大小的影响, 因而不宜理论计算得到。为了确定绞线的抗弯刚度  $EJ$ , 可以通过测试档内架空线在已知荷载作用下产生的弧垂 (挠度), 借助理论公式求得。

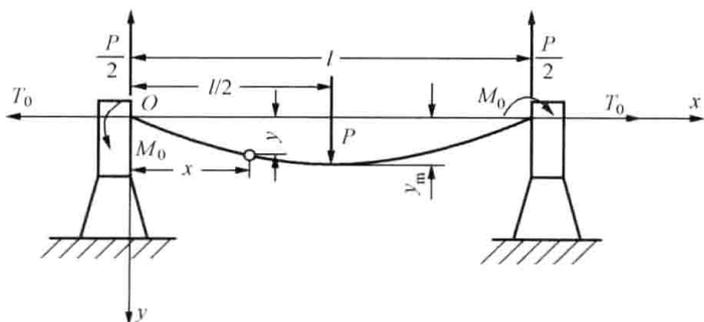


图 7-4 架空线刚度测试装置原理图

架空线刚度测试装置原理如图 7-4 所示。试验支座保证架空线水平悬出,  $P$  为试验档距中央所施加的集中荷载, 由于档距很小, 张力  $T_0$  和荷载  $P$  又大, 相比之下架空线自重可略去不计。设坐标原点位于左端支座架空线出口处,  $x$ 、 $y$  轴方向如图, 架空线两端作用的张力为  $T_0$ , 端点处的支座反力为  $P/2$ , 支座反弯矩为  $M_0$ 。

在距原点  $O$  的任意点  $x$  处架空线截面上的弯矩为

$$M_x = M_0 + T_0 y - \frac{P}{2} x$$

梁的挠曲方程为

$$M_x = EJ \frac{d^2 y}{dx^2}$$

所以

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{T_0}{EJ} y = \frac{1}{EJ} \left( M_0 - \frac{P}{2} x \right)$$

令

$$k^2 = \frac{T_0}{EJ}$$

则

$$\frac{d^2 y}{dx^2} - k^2 y = \frac{1}{EJ} \left( M_0 - \frac{P}{2} x \right)$$

上式为常系数二阶线性非齐次微分方程, 其特解为

$$\bar{y} = -\frac{M_0}{T_0} + \frac{P}{2T_0} x$$

其通解为

$$y = -\frac{M_0}{T_0} + \frac{P}{2T_0} x + A \operatorname{ch} kx + B \operatorname{sh} kx \quad (7-28)$$

式 (7-28) 对  $x$  求一阶导数, 得悬挂曲线的斜率方程为

$$\frac{dy}{dx} = \frac{P}{2T_0} + Ak \operatorname{sh} kx + Bk \operatorname{ch} kx \quad (7-29)$$

将边界条件  $x=0$  时,  $y=0$ ,  $\frac{dy}{dx}=0$ ;  $x=\frac{l}{2}$  时,  $\frac{dy}{dx}=0$  代入式 (7-28) 和式 (7-29),

可以解得

$$A = \frac{P}{2T_0 k} \left[ \frac{\operatorname{ch} \frac{kl}{2} - 1}{\operatorname{sh} \frac{kl}{2}} \right], \quad B = -\frac{P}{2T_0 k}, \quad M_0 = \frac{P}{2k} \left[ \frac{\operatorname{ch} \frac{kl}{2} - 1}{\operatorname{sh} \frac{kl}{2}} \right] \quad (7-30)$$

代回式 (7-28) 即可得到架空线的悬挂曲线方程为

$$y = \frac{P}{2kT_0} \left[ \frac{\operatorname{ch} \frac{kl}{2} - 1}{\operatorname{sh} \frac{kl}{2}} (\operatorname{ch} kx - 1) - \operatorname{sh} kx \right] + \frac{Px}{2T_0} \quad (7-31)$$

当  $x=\frac{l}{2}$  时, 得到档距中央的最大弧垂  $y_m$  为

$$y_m = \frac{P}{T_0} \left[ \frac{l}{4} - \frac{1}{k} \frac{\operatorname{ch} \frac{kl}{2} - 1}{\operatorname{sh} \frac{kl}{2}} \right] \quad (7-32)$$

试验时, 测得  $y_m$  的值, 加上  $P$ 、 $T_0$ 、 $l$  均为已知, 代入上式可试凑解出  $k$  值, 进而由下式求得抗弯刚度  $EJ$

$$EJ = \frac{T_0}{k^2} \quad (7-33)$$

为了对架空线抗弯刚度的量级和影响因素有些初步认识, 表 7-1 列出了国外所作架空线抗弯刚度的部分测试数据。从表中大致可以看出, 张力  $T_0$  增大时, 会使线股间束紧, 抗弯刚度增大。当股数较少且股径较粗时, 分股计算的  $EJ$  值与试验值较为接近, 这可能是因各股趋于同样弯曲曲率的缘故。

表 7-1 架空线抗弯刚度试验数据

电线型号 及截面积 (mm <sup>2</sup> )	铝股数×股径 (mm) 钢股数×股径 (mm)	外加拉应力 $\sigma_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	试验档距 (mm)	最大挠度 与档距比 $y_m/l$	试验解出 的 $EJ$ 值 <sup>①</sup> (MN·mm <sup>2</sup> )	整体计算 的 $EJ$ 值 (MN·mm <sup>2</sup> )	分股计算 $EJ$ 值的和 <sup>②</sup> (MN·mm <sup>2</sup> )	整体弹性 系数 $E_0$ (kN/mm <sup>2</sup> )
A. C. S. R $A_a=402.8$ $A_s=91.9$	$\frac{30 \times 4.135}{19 \times 2.582}$	57.88	1600	0	1059.5	1863.9	37.3	73.16
				0.009	114.8			
		73.76		0	981.0			
				0.007	143.2			
		99.08		0	922.1			
				0.007	157.9			
A. C. S. R 的钢芯 $A_s=91.9$	$\frac{0}{19 \times 2.482}$	223.7	1120	0	95.2	174.6	6.9	186.39
				0.013	30.4			
		366.9		0	101.0			
				0.008	46.1			
A. C. S. R $A_a=427.5$ $A_s=71.3$	$\frac{6 \times 9.525}{1 \times 9.525}$	57.88	1830	0	689.6	1000.6	251.1	76.62
				0.003	250.2			
		86.33		0	1147.8			
				0.002	318.8			
铝绞线 $A_a=498.8$	$\frac{7 \times 9.525}{0}$	20.6	1830	0	—	1530.4	195.2	57.58
				0.016	204.0			
		41.2		0	—			
				0.006	215.8			

注  $A_a$ —铝股截面； $A_s$ —钢股截面。

① 由负荷—挠度曲线初斜率得出  $y_m/l=0$  的  $EJ$  值；

② 分股计算  $EJ$  时，铝股弹性系数取  $E_a \approx 68670\text{MPa}$ ，钢股弹性系数取  $E_s \approx 206000\text{MPa}$ 。

## 第二节 架空线的初伸长及其处理

### 一、架空线的初伸长

架空线实际上并不是完全弹性体，初次受张力作用后不仅产生弹性伸长，还产生永久性的塑蠕伸长。永久性的塑蠕伸长包括四部分：①绞制过程中线股间没有充分张紧，受拉后线股互相挤压，接触点局部变形而产生的挤压变形伸长；②架空线的最终应力应变曲线和初始应力应变曲线不同，形成的塑性伸长；③金属体长时间受拉，内部晶体间的位错和滑移而产生的蠕变伸长；④拉应力超过弹性极限，进入塑性范围而产生的塑性伸长。

蠕变特性主要取决于材料的分子结构、结晶方式，还与外部荷载和温度有关。不同材料的蠕变特性不同。碳素钢在温度  $300^\circ\text{C}$  下蠕变现象极不明显，而铜、铝则比较严重。

架空线产生的永久性塑蠕伸长，在线路运行的初期最为明显，故在线路工程上称之为架空线的“初伸长”。架空线的初伸长使档内线长增加，弧垂增大，使架空线对地或跨越物的安全距离减小而造成事故。所以在线路设计时必须考虑架空线初伸长的影响。

图 7-5 是架空线的应力应变特性曲线。当架空线初受张力逐渐增大时，应力  $\sigma$  与应变  $\epsilon$  沿初始应变曲线  $\widehat{OJMP}$  变化。曲线上的  $\widehat{0a}$  段斜率较小，伸长增加较快，初加张力后很快使股

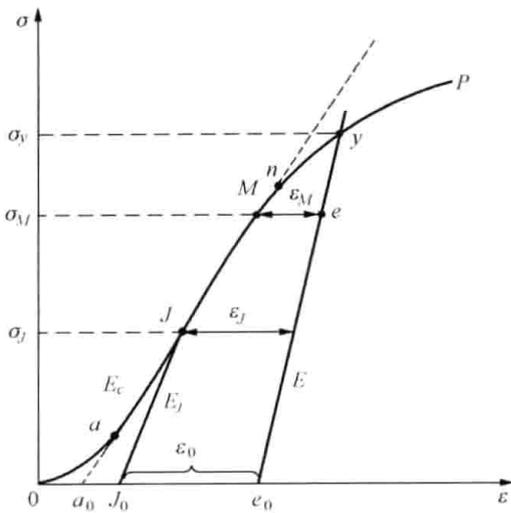


图 7-5 架空线的应力应变特性曲线

间错动束紧, 产生永久变形  $\overline{0a_0}$ 。直线段  $\overline{an}$  为初始弹性线, 其斜率为初始弹性系数  $E_c$ 。曲线段  $\overline{nyP}$  为初始非弹性线。

张力架线时, 架空线初加张拉应力达  $\sigma_J$ , 应变沿初始应变线变化至  $J$ 。此时若将应力降低, 应变不再沿初始应变线  $\widehat{Ja}$  返回, 而沿直线  $\overline{JJ_0}$  变化, 相应的弹性系数  $E_J > E_c$ 。 $\overline{a_0J_0}$  为相应的塑性伸长, 在观测弧垂过程中自然予以消除, 不影响线路的运行。

架空线架设以后, 受气象条件规律性往复变化的影响, 架空线的应力也阶段性的增大、减小, 在最大运行应力  $\sigma_M$  及其以下往复变化。初次达到  $\sigma_M$  时, 应变沿初始弹性线上升。经历若干年若干次循环的积累, 工作点将沿微倾的横线由  $M$  移至  $e$ , 架空线产生塑蠕伸长  $\epsilon_M$ 。此后运行应力变化时, 应变则往返于  $\overline{ee_0}$  应变线, 相应的斜率为最终弹性系数  $E$ 。这样架空线在运行中共产生了  $\epsilon_0 \approx J_0 e_0$  的塑性和蠕变伸长, 即初伸长。

通常将架空线的初伸长定义为架空线在年均运行应力 ( $0.25\sigma_p$ ) 下, 持续 10 年所产生的塑性和蠕变伸长。

## 二、补偿初伸长的方法

补偿架空线初伸长的方法主要采用两种。

### 1. 预拉法

架空线的初伸长随着应力的加大, 可以缩短放出的时间。在自然运行状态下, 图 7-5 中的塑性伸长  $\epsilon_j$  可能需要数年才能发展完毕, 但若将应力加大到  $\sigma_y$ , 则瞬时即能将初伸长拉出。因此, 可在架线观测弧垂前对架空线实施大应力预拉, 将其初伸长拉出, 使架空线架设初期就进入“运行应变状态”, 从而消除初伸长对运行弧垂的影响。

预拉应力  $\sigma_y$  的大小和时间, 因架空线的最大使用应力的大小而异。对于钢芯铝绞线, 可参考表 7-2 中的数值。表中  $\sigma_p$  为架空线的抗拉强度。

表 7-2 消除架空线初伸长所需预拉应力和时间

架空线安全系数	所需预拉应力和时间	
	$\sigma_y = 60\% \sigma_p$	$\sigma_y = 70\% \sigma_p$
2.0	30min	2min
2.5	2min	瞬时

在架线观测弧垂前对架空线进行预拉, 挂线侧的耐张杆塔上会作用有较大的预拉张力, 需要采取措施减小该杆塔承受的张力。在工厂中对架空线进行预拉, 经过松弛状态下的缠绕卷曲等的扰动, 预拉出量会部分缓慢恢复, 预拉效果不好。

### 2. 增大架线应力法

增大架线应力法采用在架线施工时适当增大架空线的架线应力, 减小安装弧垂, 其程度恰好能补偿因其初伸长导致的弧垂增大量, 以达到长期运行的设计弧垂要求。增大架线应力的确定方法有理论计算法和恒定降温法。

## (1) 理论计算法。

理论计算以架空线的实际应力应变特性曲线为依据, 在由长期运行后的悬挂曲线长度求取原始线长的过程中, 考虑减去架空线的单位长度塑性伸长量  $\epsilon_J$ , 不难导出架空线的架线应力状态方程式为

$$\sigma_J - \frac{E\gamma_J^2 l^2 \cos^3 \beta}{24\sigma_J^2} = \sigma_0 - \frac{E\gamma^2 l^2 \cos^3 \beta}{24\sigma_0^2} - \alpha E \cos \beta (t_J - t) + E\epsilon_J \cos \beta \quad (7-34)$$

或写成

$$\sigma_J^2 \left\{ \sigma_J + \left[ \frac{K}{\sigma_0^2} - \sigma_0 + \alpha E \cos \beta (t_J - t) \right] - E\epsilon_J \cos \beta \right\} = K_J \quad (7-34')$$

$$K_J = \frac{E\gamma_J^2 l^2 \cos^3 \beta}{24}, \quad K = \frac{E\gamma^2 l^2 \cos^3 \beta}{24} \quad (7-35)$$

式中  $\sigma_J$ 、 $\sigma_0$ ——分别为考虑初伸长后的架线应力和已知最终运行条件下的架空线应力;

$t_J$ 、 $t$ ——分别为架线时和最终运行条件下的气温;

$\alpha$ 、 $E$ ——分别为架空线的温度线膨胀系数和最终运行条件下的弹性系数;

$\epsilon_J$ ——架空线的初伸长率, 按制造厂家提供的数据或通过试验确定, 如无资料, 可采用表 7-3 所列数值, 北方气候寒冷宜采用较小值, 南方天气暖和宜采用较大值。

$K_J$ 、 $K$ ——分别为架线时和最终运行条件下的线长系数, 对斜抛物线状态方程式而言,  $K_J$ 、 $K$  按式 (7-35) 计算。

表 7-3 架空线的初伸长率

架空线类型	铝钢截面比 $m=11.34\sim 14.46$	铝钢截面比 $m=7.71\sim 7.91$	铝钢截面比 $m=5.05\sim 6.16$	铝钢截面比 $m=4.29\sim 4.38$	钢绞线
初伸长率	$5\times 10^{-4}\sim 6\times 10^{-4}$	$4\times 10^{-4}\sim 5\times 10^{-4}$	$3\times 10^{-4}\sim 4\times 10^{-4}$	$3\times 10^{-4}$	$1\times 10^{-4}$

## (2) 恒定降温法。

在式 (7-34) 中, 由于

$$\alpha E \cos \beta (t_J - t) - E\epsilon_J \cos \beta = \alpha E \cos \beta (t_J - t - \epsilon_J/\alpha) = \alpha E \cos \beta (t_J - t - \Delta t)$$

说明增大架线应力相当于将架线时的气温降低  $\Delta t$ 。当  $\epsilon_J$  确定后,  $\Delta t$  也随之确定。因此架空线的初伸长对弧垂的影响, 可以采用降低架线气温  $\Delta t$  后的应力作为架线应力的方法来补偿, 这就是恒定降温法。降低的温度可查表 7-4, 也可计算, 计算式为

$$\Delta t = \frac{\epsilon_J}{\alpha} \quad (7-36)$$

降温后的架线应力由下式决定

$$\sigma_J^2 \left\{ \sigma_J + \frac{K}{\sigma_0^2} - \sigma_0 + \alpha E \cos \beta [(t_J - \Delta t) - t] \right\} = K_J \quad (7-37)$$

我国规范推荐使用降温法消除架空线初伸长对弧垂的影响。

表 7-4 消除架空线初伸长的降温值

架空线类型	铝钢截面比 $m=11.34\sim 14.46$	铝钢截面比 $m=7.71\sim 7.91$	铝钢截面比 $m=5.05\sim 6.16$	铝钢截面比 $m=4.29\sim 4.38$	钢绞线
降温值 $\Delta t$ (°C)	25 (或经试验确定)	20~25	15~20	15	10

### 三、初伸长与应力、时间的关系

试验与运行经验表明, 架空线在承受张力的初期, 蠕变伸长迅速, 后期则越来越小。图 7-6 表示了某钢芯铝绞线的  $\epsilon$  测试值随时间  $\tau$  变化的关系, 可用公式近似表示为

$$\epsilon = C\tau^m \quad (7-38)$$

式中  $C$ ——某一恒定拉应力下的 1h 塑性伸长率;

$\tau$ ——恒定拉应力下经历的时间;

$m$ ——指数, 在对数坐标图 7-6 中为相应直线的斜率。

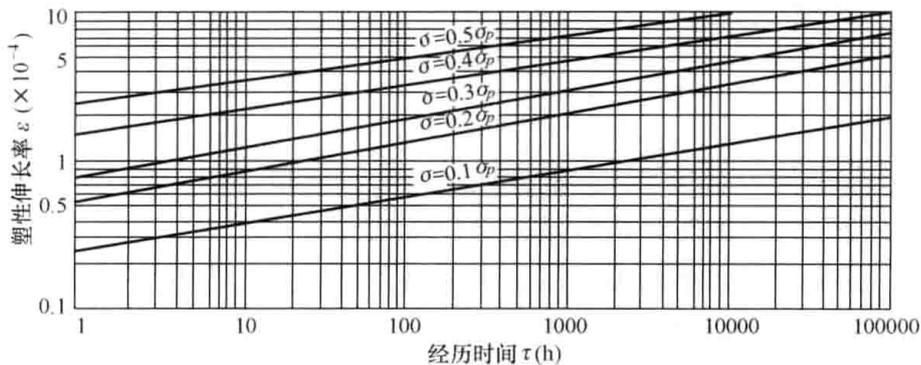


图 7-6 架空线塑性伸长率与时间的关系

如施加于该试验用绞线上的应力为  $0.25\sigma_p$ , 从图 7-6 查得  $C=0.7\times 10^{-4}$ ,  $m\approx 0.185$ , 根据式 (7-38), 算得持续时间  $\tau$  为 1000h、87600h (10 年)、20 年的塑性伸长率  $\epsilon$  分别为  $2.51\times 10^{-4}$ 、 $5.75\times 10^{-4}$ 、 $6.53\times 10^{-4}$ 。从中可以看出, 经历较长时间后, 绞线的塑性放出量已十分小了, 后 10 年的放出量仅为  $0.78\times 10^{-4}$ , 相当于最初 1~2h 的放出量。如果观测弧垂过程中或验收弧垂前架空线承受张力的时间很长, 如经数小时甚至数日, 架空线的初伸长有很大一部分已放出。此时若仍按式 (7-34) 或式 (7-37) 决定的应力  $\sigma_j$  计算出的弧垂作为观测和验收弧垂, 势必导致架空线应力过大。因此应尽量缩短架线观测与验收之间的时间, 若间隔时间过长, 则应考虑已放出初伸长对弧垂的影响。

## 第三节 架空线施工中的过牵引

### 一、过牵引现象

架空线施工紧线时, 一般在紧线杆塔悬挂点的下方悬挂滑轮, 架空线的一端通过耐张串悬挂在锚塔上, 另一端则由紧线滑轮上的牵引绳牵引、提升和拉紧架空线, 然后将该端耐张串挂到紧线塔的挂线孔上, 如图 7-7 所示。

由于紧线滑轮低于挂线孔一定距离, 而耐张串重量大, 在挂线过程中又不可能全部绷直达到设计长度, 因此在挂线 (实为挂耐张串) 时, 就需要将耐张串尾部的连接金具 (如 U 形环) 拉过头一些才能挂得上, 这种现象称为架空线的过牵引。过牵引时的张力 (应力) 称为过牵引张力 (应力), 多拉出的长度称为过牵引长度。

过牵引张力的大小与档距的大小、耐张段的长度以及施工方法有关。连续档的过牵引张力一般不太大, 设计时常取“过牵引系数”为 1.1, 即挂线时架空线的张力允许增加 10%, 有时也按与施工单位商定的允许过牵引长度, 作为紧线施工设计的依据。孤立档的过牵引问

题较为严重，特别是较小档距的孤立档，过牵引张力可能达到很大的数值，甚至会拉断架空线或危及杆塔、横担的安全，对此应予以重视。必要时，可采取专用工具减少过牵引长度，以降低过牵引张力。

## 二、常用施工方法所需的过牵引长度

施工方法不同，需要的过牵引长度也不相同。目前我国主要采用三种施工紧线方法：

(1) 用钢绳绑扎在耐张线夹处牵引。这种施工方法简单、方便，但耐张串未受张力，故所需过牵引长度最长，一般为 150~200mm。

(2) 用专用卡具张紧绝缘子金具牵引。这种施工方法由于耐张串也承受张力，拉得较直，故所需过牵引长度较短，一般为 90~120mm。

(3) 用可调金具补偿过牵引长度。过牵引时，将调节金具调至最长，易于挂线；挂线后，调短调节金具，使架空线达到设计弧垂。调节金具的可调长度一般为 90~120mm。这种施工方法多用于小档距的孤立档或重要交叉跨越处，过牵引长度一般为 60~80mm。

架空地线的过牵引长度可只考虑其末端连接金具的长度，一般为 90~120mm。

## 三、过牵引的计算

过牵引应力应限制在允许值范围内，以保证过牵引时杆塔和架空线的安全。计算时，可按选定的施工方法所需要的过牵引长度，计算相应的过牵引应力，检查杆塔和架空线等是否能承受；也可以按杆塔和架空线等所允许的最大安装应力，计算出相应的允许过牵引长度，选择施工方法。

### 1. 按过牵引长度计算过牵引应力

过牵引长度由架空线的弹性变形量、悬挂曲线的几何形状改变量以及杆塔挠曲变形等组成。

#### (1) 过牵引时的架空线弹性伸长量。

设紧线时架空线的安装应力为  $\sigma_0$ ，过牵引应力为  $\sigma_{0q}$ ，根据虎克定律，得过牵引产生的架空线伸长量为

$$\Delta L_1 = \frac{l}{E \cos \beta} \left( \frac{\sigma_{0q}}{\cos \beta} - \frac{\sigma_0}{\cos \beta} \right) = \frac{\sigma_{0q} - \sigma_0}{E \cos^2 \beta} l$$

#### (2) 过牵引时悬线几何变形产生的长度为

$$\Delta L_2 = \frac{\gamma^2 l^3 \cos \beta}{24} \left( \frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_{0q}^2} \right)$$

#### (3) 过牵引时挂线侧杆塔在挂线点产生的挠度为

$$\Delta L_3 = B \sigma_{0q} A$$

由于耐张杆塔的刚度一般都很大，而且施工紧线时杆塔一般都安装有临时拉线，以平衡紧线张力，因此杆塔挠度很小，工程计算中可以忽略挠度系数  $B$  的影响，即认为  $\Delta L_3 = 0$ 。过牵引计算时，架空线的蠕变伸长量和耐张串的弹性伸长量均较小，可忽略不计。因此过牵引长度近似为

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{\sigma_{0q} - \sigma_0}{E \cos^2 \beta} l + \frac{\gamma^2 l^3 \cos \beta}{24} \left( \frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_{0q}^2} \right) \quad (7-39)$$

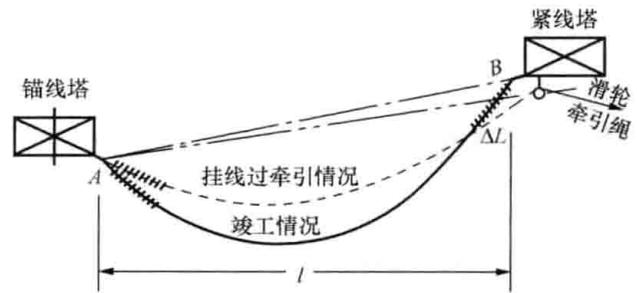


图 7-7 架空线的过牵引现象

所以孤立档过牵引的应力状态方程式为

$$\sigma_{0q} - \frac{E\gamma^2 l^2 \cos^3 \beta}{24\sigma_{0q}^2} = \sigma_0 - \frac{E\gamma^2 l^2 \cos^3 \beta}{24\sigma_0^2} + \frac{\Delta L E \cos^2 \beta}{l} \quad (7-40)$$

若采用线长系数表示, 则状态方程式为

$$\sigma_{0q}^2 \left\{ \sigma_{0q} + \left[ \frac{K_0}{\sigma_0^2} - \sigma_0 - \frac{\Delta L E \cos^2 \beta}{l} \right] \right\} = K \quad (7-41)$$

式中  $K_0$ 、 $K$ ——分别为架空线安装时的线长系数和过牵引线长系数。

## 2. 按允许安装应力计算过牵引长度

如果施工气象条件下架空线的允许安装应力为  $[\sigma_0]$ , 则相应过牵引长度可由上二式反推求得

$$\Delta L = \frac{l}{\cos \beta} \left[ \frac{\gamma^2 l^2 \cos^2 \beta}{24} \left( \frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{[\sigma_0]^2} \right) + \frac{[\sigma_0] - \sigma_0}{E \cos \beta} \right] \quad (7-42)$$

或

$$\Delta L = \frac{l}{E \cos^2 \beta} \left[ \left( \frac{K_0}{\sigma_0^2} - \frac{K}{[\sigma_0]^2} \right) + ([\sigma_0] - \sigma_0) \right] \quad (7-43)$$

由于过牵引为短期荷载, 其架空线的安全系数可以比正常运行时小一些, 一般取 2 即可。

## 第四节 线路设计中常用的几种档距

为了方便有关计算和问题的分析, 输电线路工程中常引进各种档距的概念, 如水平档距、垂直档距、极大档距、极限档距、允许档距等。

### 一、水平档距和垂直档距

#### 1. 水平档距

作用在架空线上的风压荷载, 通过绝缘子串传递到杆塔上, 使绝缘子串产生偏斜, 引起带电部分 (导线、悬垂线夹、均压屏蔽环、防振锤等) 对接地部分 (塔身、横担等) 的空气绝缘间隙减小, 若设计考虑不周就会引起闪络接地故障。直线杆塔两侧的档距愈大, 风压荷载愈大, 绝缘子串的偏斜就愈严重。风压荷载作用于杆塔, 使其产生弯矩, 成为计算杆塔强度和刚度的主要荷载之一。

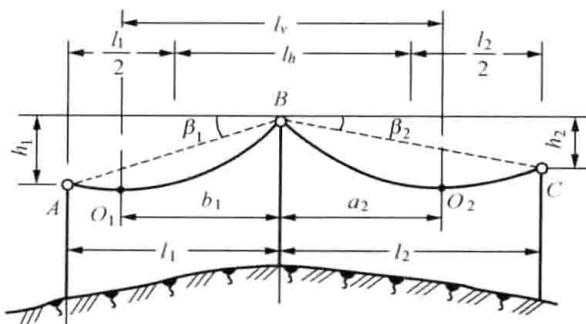


图 7-8 水平档距和垂直档距

图 7-8 示出了相邻的两档架空线, 杆塔 B 左侧档距  $l_1$ 、高差  $h_1$ , 右侧档距  $l_2$ 、高差  $h_2$ 。对水平风压荷载来说, 悬挂点总是“等高”的, 最低点总是位于档距的中央。通常近似认为作用于架空线上的风压荷载沿斜档距均布, 因此架空线作用在杆塔 B 线夹处的水平荷载为架空线单位长度上的风压荷载与该杆塔两侧斜档距乘积的平均值, 即

$$P_h = \gamma_h A \left( \frac{l_1}{2 \cos \beta_1} + \frac{l_2}{2 \cos \beta_2} \right) = \gamma_h A l_h \quad (7-44)$$

$$l_h = \frac{1}{2} \left( \frac{l_1}{\cos\beta_1} + \frac{l_2}{\cos\beta_2} \right) \quad (7-45)$$

式中  $P_h$ ——杆塔  $B$  线夹处所受水平荷载；

$\gamma_h$ ——水平风压比载；

$A$ ——架空线的截面积；

$l_h$ ——杆塔  $B$  的水平档距。

式 (7-44) 表明, 架空线作用于杆塔线夹处水平风荷载的大小等于风压比载与水平档距的乘积; 式 (7-45) 表明, 杆塔的水平档距等于其两侧斜档距之和的一半, 即水平档距等于杆塔两侧斜档距的平均值。该式是在假设风压荷载沿斜档距均布的条件下导出的, 属于斜抛物线公式。在小高差情况下, 杆塔的水平档距 (见图 7-8) 可采用平抛物线公式计算, 有

$$l_h = \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2} \quad (7-46)$$

引入水平档距的概念后, 求取  $P_h$  是很方便的。应该指出, 作用在杆塔绝缘子串悬挂点处的水平荷载, 除架空线通过绝缘子串传递的外, 还有绝缘子串本身的挡风面积产生的水平荷载。

## 2. 垂直档距

架空线作用于线夹处的垂直荷载, 是检验悬垂绝缘子串强度的主要依据, 也是计算杆塔强度和刚度的主要荷载之一。显然, 该垂直荷载等于杆塔两侧垂直平面内弧垂最低点之间架空线的长度与相应荷载集度之乘积。图 7-8 中档距  $l_1$  的架空线弧垂最低点  $O_1$  与悬挂点  $B$  间的线长  $L_{O_1B}$ , 档距  $l_2$  的架空线弧垂最低点  $O_2$  与悬点  $B$  间的线长  $L_{O_2B}$ , 均可根据式 (5-9) 求得, 即有

$$L_{O_1B} = \frac{\sigma_{01}}{\gamma_{v1}} \operatorname{sh} \frac{\gamma_{v1} b_1}{\sigma_{01}}$$

$$L_{O_2B} = \frac{\sigma_{02}}{\gamma_{v2}} \operatorname{sh} \frac{\gamma_{v2} a_2}{\sigma_{02}}$$

则作用于线夹上的垂直荷载为

$$P_v = \gamma_{v1} A L_{O_1B} + \gamma_{v2} A L_{O_2B} = A \left[ \sigma_{01} \operatorname{sh} \frac{\gamma_{v1} b_1}{\sigma_{01}} + \sigma_{02} \operatorname{sh} \frac{\gamma_{v2} a_2}{\sigma_{02}} \right] \quad (7-47)$$

当  $b_1$ 、 $a_2$  采用悬链线公式计算时, 式 (7-47) 即为架空线作用于悬垂线夹的垂直荷载的精确计算式。考虑到对同一耐张段有  $\sigma_{01} = \sigma_{02}$ , 一般情况下  $\gamma_{v1} = \gamma_{v2}$ , 若认为垂直比载沿斜档距均布, 则得到架空线作用于线夹上的垂直荷载的斜抛物线计算式为

$$P_v = \gamma_v A \frac{b_1}{\cos\beta_1} + \gamma_v A \frac{a_2}{\cos\beta_2} = \gamma_v A \left\{ \left( \frac{l_1}{2\cos\beta_1} + \frac{l_2}{2\cos\beta_2} \right) + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \left[ \frac{h_1}{l_1} - \frac{h_2}{l_2} \right] \right\} = \gamma_v A l_v \quad (7-48)$$

其中

$$l_v = \left( \frac{l_1}{2\cos\beta_1} + \frac{l_2}{2\cos\beta_2} \right) + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \left[ \frac{h_1}{l_1} - \frac{h_2}{l_2} \right] = l_h + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \left[ \frac{h_1}{l_1} - \frac{h_2}{l_2} \right] \quad (7-49)$$

式 (7-49) 是垂直档距的斜抛物线计算式。利用该式计算某杆塔的垂直档距时, 如果该杆塔悬挂点高于左侧杆塔的悬挂点, 则  $h_1$  取正值, 反之  $h_1$  取负值; 如果该杆塔悬挂点高于右侧杆塔悬挂点, 则  $h_2$  取负值, 反之取正值。显然, 在一定气象条件下, 垂直档距  $l_v$  愈大, 该杆塔所承受的垂直荷载愈大。若  $l_v$  为负值, 则该处的悬垂绝缘子串上扬, 杆塔受上

拔力作用。同理可得到垂直档距的平抛物线公式为

$$l_v = \frac{l_1 + l_2}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \left[ \frac{h_1}{l_1} - \frac{h_2}{l_2} \right] \quad (7-50)$$

式(7-50)表明,在认为垂直比载沿档距均布的条件下,杆塔的垂直档距等于杆塔两侧架空线弧垂最低点间的水平距离,参见图7-8。

由于应力 $\sigma_0$ 和比载 $\gamma$ 随气象条件变化,所以垂直档距随气象条件的不同而不同。由于架空地线和导线的使用应力和垂直比载一般不相同,因此即使在同一档距、同样高差和相同的气象条件下,地线和导线的垂直档距通常也是不相等的,有时甚至相差非常悬殊,对此应给予充分注意。

## 二、极大档距和极限档距

### 1. 极大档距

档内架空线的最大应力发生在高悬挂点处,且档距越大或高差越大,高悬挂点应力越大。设架空线的许用应力为 $[\sigma_0]$ ,高悬挂点的应力最大允许值为 $[\sigma_B]$ 。由于架空线的许用应力 $[\sigma_0]$ 是以弧垂最低点考虑的,就可能存在虽然最低点应力在许用范围内,但高悬挂点应力超过允许值的情况。这必然限制了档距和高差的使用范围。

在一定的高差下,如果某档距架空线弧垂最低点的应力恰好达到 $[\sigma_0]$ ,高悬挂点应力恰好为 $[\sigma_B]$ ,则称此档距为该高差下的极大档距。无高差时,极大档距达到最大值。

由架空线任意两点应力之间的关系,可得到两悬挂点A、B应力间的关系为

$$\sigma_B = \sigma_A + \gamma(h - 0) = \sigma_A + \gamma h = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma a}{\sigma_0} + \gamma h$$

所以

$$a = \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcch} \frac{\sigma_B - \gamma h}{\sigma_0}$$

又因为

$$\sigma_B = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma b}{\sigma_0}$$

则

$$b = \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcch} \frac{\sigma_B}{\sigma_0}$$

由于 $a$ 、 $b$ 分别为架空线弧垂最低点到A、B悬挂点的水平距离,故档距 $l$ 可表示为

$$l = a + b = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{arcch} \frac{\sigma_B - \gamma h}{\sigma_0} + \operatorname{arcch} \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \right)$$

以 $[\sigma_0]$ 代 $\sigma_0$ 、 $[\sigma_B]$ 代 $\sigma_B$ ,并令 $\epsilon = [\sigma_B] / [\sigma_0]$ ,则得极大档距的计算公式为

$$l_m = \frac{[\sigma_0]}{\gamma} \left[ \operatorname{arcch} \left( \epsilon - \frac{\gamma h}{[\sigma_0]} \right) + \operatorname{arcch} \epsilon \right] \quad (7-51)$$

无高差时

$$l_m = \frac{2[\sigma_0]}{\gamma} \operatorname{arcch} \epsilon \quad (7-52)$$

应用式(7-51)或式(7-52)时,比载 $\gamma$ 应取发生最大应力气象条件下的值(一般为 $\gamma_6$ 或 $\gamma_7$ )。

## 2. 允许档距和极限档距

如果实际线路的档距大于相应高差时的极大档距,则在最低点应力为 $[\sigma_0]$ 时,高悬挂点应力必然超过 $[\sigma_B]$ ,显然是不允许的,可采取放松架空线以降低设计应力的办法解决。若放松后悬挂点应力保持为允许值 $[\sigma_B]$ ,最低点应力 $\sigma_0$ 则低于 $[\sigma_0]$ ,比值 $\sigma_0/[\sigma_0]$ 称为放松系数,用符号 $\mu$ 表示。这种情况下的档距称为 $\mu$ 值下的允许档距。

在式(7-51)中,以 $\mu[\sigma_0]$ 代 $[\sigma_0]$ 、 $\epsilon/\mu$ 代 $\epsilon$ ,即得到 $\mu$ 值下的允许档距为

$$l_y = \frac{\mu[\sigma_0]}{\gamma} \left[ \operatorname{arcch} \left( \frac{\epsilon}{\mu} - \frac{\gamma h}{\mu[\sigma_0]} \right) + \operatorname{arcch} \frac{\epsilon}{\mu} \right] \quad (7-53)$$

无高差时

$$l_y = \frac{2\mu[\sigma_0]}{\gamma} \operatorname{arcch} \frac{\epsilon}{\mu} \quad (7-54)$$

一般地,随放松系数 $\mu$ 的减小,允许档距增大。但当 $\mu$ 减小到一定值后,若继续放松架空线,则由于弧垂的增大使架空线重量迅速增大,超过最低点应力的减小对高悬挂点应力的影响,允许档距不再增大反而减小。由放松架空线所能得到的允许档距的最大值称为极限档距。等高悬挂点时,极限档距达到最大值,该值可由下述方法求得。

将式(7-54)对 $\mu$ 求导,令其等于零,有

$$\frac{dl_y}{d\mu} = \frac{2[\sigma]}{\gamma} \left[ \operatorname{arcch} \frac{\epsilon}{\mu} - \frac{\epsilon/\mu}{\sqrt{(\epsilon/\mu)^2 - 1}} \right] = 0$$

若令 $\epsilon/\mu = x$ ,代入上式,可以解得

$$x = \operatorname{ch} \frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}}$$

将上式视为迭代公式,选一适当初始值(如 $x=1.8$ )进行迭代,可求得 $x=1.81017$ 即 $\mu=0.552\epsilon$ 时,极限档距有最大值

$$l_{lm} = 1.325\epsilon \frac{[\sigma_0]}{\gamma} \quad (7-55)$$

极限档距是允许档距的上限,极大档距是允许档距的下限,允许档距在上、下限间变化。

## 3. 允许档距、高差和放松系数间的关系

由式(7-53)知,允许档距 $l_y$ 与高差 $h$ 和放松系数 $\mu$ 有关。设计线路时,当档距超过允许档距时,除可调整杆塔位置改变 $h$ 、 $l$ 外,还可采用放松架空线的方法来保证悬挂点应力满足要求,放松系数 $\mu$ 由式(7-53)试凑求得。但试凑求解比较麻烦,工程实际中常将其绘成图表,以供查用。由于

$$\sigma_B = \sigma_0 \operatorname{ch} \frac{\gamma b}{\sigma_0} = \sigma_0 \operatorname{ch} \left[ \frac{\gamma l}{2\sigma_0} + \operatorname{arcsh} \frac{h}{L_{h=0}} \right]$$

注意到

$$L_{h=0} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0}$$

解得

$$h = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \left( \operatorname{arcch} \frac{\sigma_B}{\sigma_0} - \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \right)$$

以  $[\sigma_0]$  代  $\sigma_0$ 、 $\epsilon$   $[\sigma_0]$  代  $\sigma_B$ ，代入上式，得极大档距  $l_m$  与该档距下悬挂点间的容许高差  $h_m$  之间的关系为

$$h_m = \frac{2[\sigma_0]}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_m}{2[\sigma_0]} \operatorname{sh} \left( \operatorname{arcch} \epsilon - \frac{\gamma l_m}{2[\sigma_0]} \right) \quad (7-56)$$

若在  $h$  的表达式中以  $\mu$   $[\sigma_0]$  代  $\sigma_0$ ， $\epsilon$   $[\sigma_0]$  代  $\sigma_B$ ，则得到允许档距与该档距下的容许高差及放松系数之间的关系为

$$h_y = \frac{2\mu[\sigma_0]}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_y}{2\mu[\sigma_0]} \operatorname{sh} \left( \operatorname{arcch} \frac{\epsilon}{\mu} - \frac{\gamma l_y}{2\mu[\sigma_0]} \right) \quad (7-57)$$

上式可改写为

$$\frac{h_y}{l_y} = \frac{\operatorname{sh}(C_0/\mu)}{C_0/\mu} \operatorname{sh} \left( \operatorname{arcch} \frac{\epsilon}{\mu} - \frac{C_0}{\mu} \right) \quad (7-57')$$

其中

$$C_0 = \frac{\gamma l_y}{2[\sigma_0]} \quad (7-58)$$

以  $h_y/l_y$  为横坐标， $C_0$  为纵坐标，利用式 (7-57')，对不同的放松系数  $\mu$  值可以作出一组曲线，(如图 7-9 所示)。该图称为架空线应力放松图。利用此图求  $\mu$  值比公式计算方便得多。

**【例 7-2】** 设某档距  $l = 1000\text{m}$ ，高差  $h = 200\text{m}$ ，架空线的许用应力  $[\sigma_0] = 98.1\text{MPa}$ ， $\epsilon = [\sigma_B] / [\sigma_0] = 1.1$ ，发生最大应力气象条件下的最大比载  $\gamma = 61.34 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$ 。试检查悬挂点应力是否超过容许值。若超过容许值，试求其放松系数。

**解** 首先按不放松 ( $\mu = 1.0$ ) 检查  $l$ 、 $h$  是否容许。以  $l_m = l$  及上述数据一并代入式 (7-56) 中，算得容许高差

$$\begin{aligned} h_m &= \frac{2[\sigma_0]}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_m}{2[\sigma_0]} \operatorname{sh} \left( \operatorname{arcch} \epsilon - \frac{\gamma l_m}{2[\sigma_0]} \right) \\ &= \frac{2 \times 98.1}{61.34 \times 10^{-3}} \operatorname{sh} \frac{61.34 \times 10^{-3} \times 1000}{2 \times 98.1} \operatorname{sh} \left( \operatorname{arcch} 1.1 - \frac{61.34 \times 10^{-3} \times 1000}{2 \times 98.1} \right) \\ &= 133.4(\text{m}) < 200\text{m} \end{aligned}$$

由于实际高差  $h$  大于算出的容许高差  $h_m$ ，悬挂点应力必超过容许值，要保持  $l$ 、 $h$  不变，必须放松架空线，降低使用应力。因为

$$\begin{aligned} \frac{h_y}{l_y} &= \frac{h}{l} = \frac{200}{1000} = 0.2 \\ C_0 &= \frac{\gamma l_y}{2[\sigma_0]} = \frac{61.34 \times 10^{-3} \times 1000}{2 \times 98.1} = 0.31264 \end{aligned}$$

代入式 (7-57') 可试凑求得  $\mu = 0.967$ ，即架空线放松后其最低点的最大使用应力  $\sigma_0 = \mu [\sigma_0] = 0.967 \times 98.1 = 94.86$  (MPa)。

若利用架空线应力放松图检查实际的  $l$ 、 $h$  是否允许，方法如下：在图 7-9 中找出横坐标为 0.2，纵坐标为 0.31264 的交点 C，点 C 位于  $\mu = 1.0$  的临界线上方，表明  $l$  或  $h$  超过容许值 (若交点位于该临界线下方，则不超过容许值)，应该放松架空线。点 C 处对应的放松系数  $\mu = 0.967$ 。

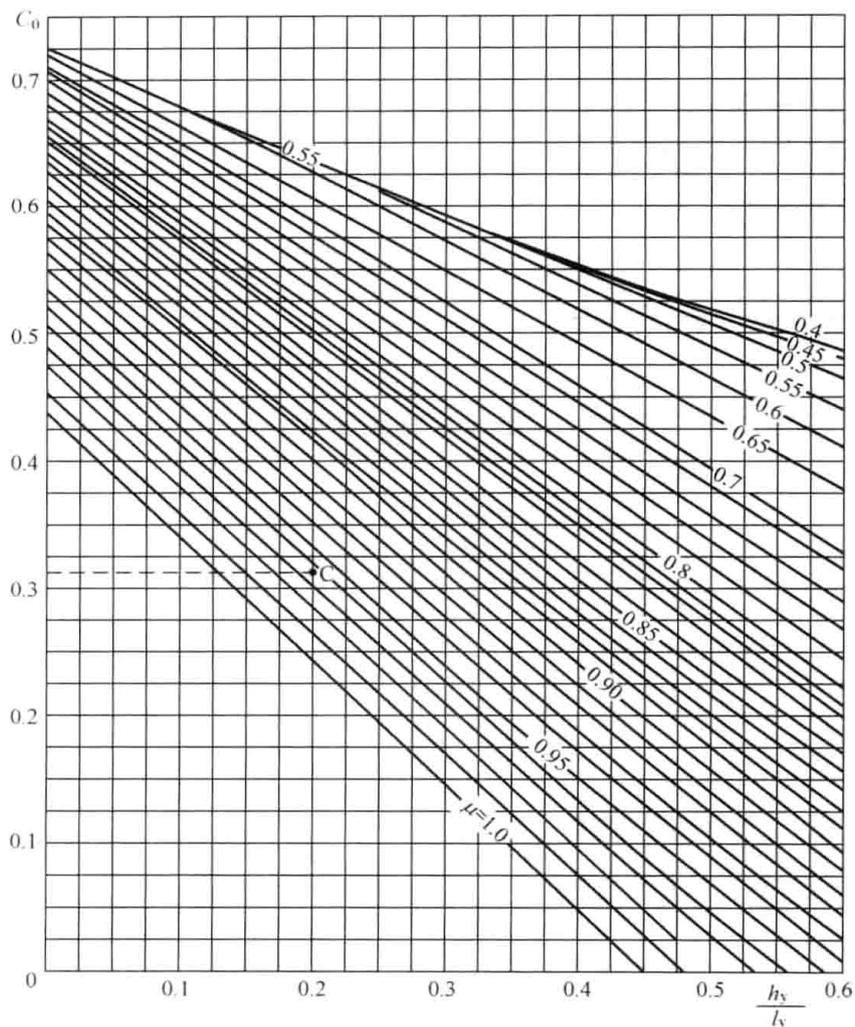


图 7-9 架空线应力放松图

### 第五节 架空输电线路的改建

已架成的架空输电线路，在运行期间往往会出现新的交叉跨越物，或因地质、水文条件的变化及其他原因，需要将线路中的若干基杆塔进行下列改建工作：

- (1) 移动杆塔位置（杆高及数目不变）；
- (2) 增加杆塔高度（杆位及数目不变）；
- (3) 增设杆塔；
- (4) 上述项目的组合。

线路改建要求改建后导线对地距离、架空线应力以及杆塔的受力条件等都应符合原线路的设计要求。改建施工常用方法是将改建的耐张段按新的情况重新紧线，重新安装线夹。这种方法施工比较复杂且不经济，而且导线上原来安装线夹的部位串入档内，将降低架空线的使用张力。另一种方法是不重新紧线，只串动少数几基杆塔上悬垂线夹的位置而完成改建。

#### 一、移动杆塔位置及杆塔加高

某条线路如图 7-10 所示，现需将第  $k$  基杆塔的高度增加  $\Delta h$ ，杆位相应移动  $\Delta l$ ，要求改建前后架空线应力保持  $\sigma_0$  不变。改建前的线长为

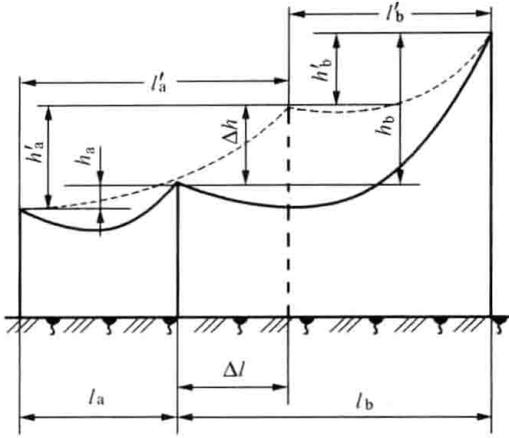


图 7-10 移动杆塔位置

$$\begin{aligned} \Sigma L &= \frac{l_a}{\cos\beta_a} + \frac{\gamma^2 l_a^3 \cos\beta_a}{24\sigma_0^2} \\ &+ \frac{l_b}{\cos\beta_b} + \frac{\gamma^2 l_b^3 \cos\beta_b}{24\sigma_0^2} \end{aligned}$$

改建后的线长为

$$\begin{aligned} \Sigma L' &= \frac{l'_a}{\cos\beta'_a} + \frac{\gamma^2 l'^3_a \cos\beta'_a}{24\sigma_0^2} \\ &+ \frac{l'_b}{\cos\beta'_b} + \frac{\gamma^2 l'^3_b \cos\beta'_b}{24\sigma_0^2} \end{aligned}$$

要求不重新紧线, 故

$$\Sigma L = \Sigma L'$$

因为

$$\begin{aligned} l'_a &= l_a + \Delta l, & l'_b &= l_b - \Delta l, & h'_a &= h_a + \Delta h, & h'_b &= h_b - \Delta h \\ \cos\beta_a &= \frac{l_a}{\sqrt{l_a^2 + h_a^2}}, & \cos\beta'_a &= \frac{l'_a}{\sqrt{l'^2_a + h'^2_a}} = \frac{l_a + \Delta l}{\sqrt{(l_a + \Delta l)^2 + (h_a + \Delta h)^2}} \\ \cos\beta_b &= \frac{l_b}{\sqrt{l_b^2 + h_b^2}}, & \cos\beta'_b &= \frac{l'_b}{\sqrt{l'^2_b + h'^2_b}} = \frac{l_b - \Delta l}{\sqrt{(l_b - \Delta l)^2 + (h_b - \Delta h)^2}} \end{aligned}$$

代入式  $\Sigma L = \Sigma L'$  中, 并加以整理得

$$\begin{aligned} &\sqrt{l_a^2 + h_a^2} + \sqrt{l_b^2 + h_b^2} + \frac{\gamma^2}{24\sigma_0^2} \left[ \frac{l_a^4}{\sqrt{l_a^2 + h_a^2}} + \frac{l_b^4}{\sqrt{l_b^2 + h_b^2}} \right] \\ &= \sqrt{(l_a + \Delta l)^2 + (h_a + \Delta h)^2} + \sqrt{(l_b - \Delta l)^2 + (h_b - \Delta h)^2} \\ &+ \frac{\gamma^2}{24\sigma_0^2} \left[ \frac{(l_a + \Delta l)^4}{\sqrt{(l_a + \Delta l)^2 + (h_a + \Delta h)^2}} + \frac{(l_b - \Delta l)^4}{\sqrt{(l_b - \Delta l)^2 + (h_b - \Delta h)^2}} \right] \quad (7-59) \end{aligned}$$

式中只有  $\Delta h$  和  $\Delta l$  为未知量, 给定其中一个, 便可求得另一个。在符合周边环境的众多  $\Delta h$  和  $\Delta l$  组中, 选出位置合适的一组, 便可以得到改建前后各档应力均为  $\sigma_0$  的改建方案。

## 二、增设一基杆塔

如图 7-11 所示, 原档距为  $l_k$ , 高差为  $h_k$ , 现中间加一基杆塔, 档距变成  $l_a$  和  $l_b$ , 高差为  $h_a$  和  $h_b$ , 保持改建前后应力均为  $\sigma_0$ 。改建前的线长为

$$\Sigma L = \frac{l_k}{\cos\beta_k} + \frac{\gamma^2 l_k^3 \cos\beta_k}{24\sigma_0^2}$$

改建后的线长为

$$\begin{aligned} \Sigma L' &= \frac{l_a}{\cos\beta_a} + \frac{\gamma^2 l_a^3 \cos\beta_a}{24\sigma_0^2} \\ &+ \frac{l_b}{\cos\beta_b} + \frac{\gamma^2 l_b^3 \cos\beta_b}{24\sigma_0^2} \end{aligned}$$

将  $l_b = l_k - l_a$ ,  $h_b = h_k - h_a$  代入上式, 并注意  
到  $\Sigma L = \Sigma L'$  得

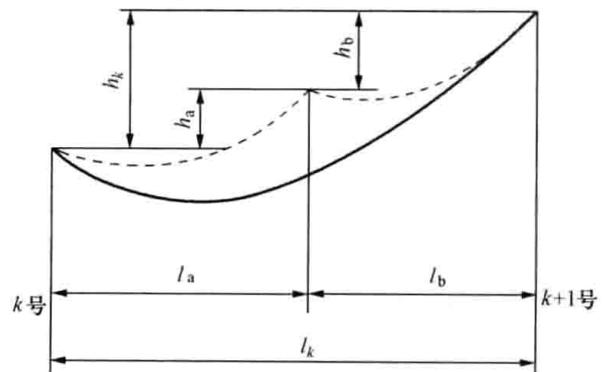


图 7-11 增设一基杆塔

$$\sqrt{l_k^2 + h_k^2} + \frac{\gamma^2}{24\sigma_0^2} \frac{l_k^4}{\sqrt{l_k^2 + h_k^2}} = \sqrt{l_a^2 + h_a^2} + \sqrt{(l_k - l_a)^2 + (h_k - h_a)^2} + \frac{\gamma^2}{24\sigma_0^2} \left[ \frac{l_a^4}{\sqrt{l_a^2 + h_a^2}} + \frac{(l_k - l_a)^4}{\sqrt{(l_k - l_a)^2 + (h_k - h_a)^2}} \right] \quad (7-60)$$

选中一组合适的  $l_a$ 、 $h_a$ ，便可得各档应力为  $\sigma_0$  的改建方案。

### 练习 题

1. 与柔性架空线相比，刚性架空线有何特点？对线路有何影响？
2. 何为架空线的初伸长？它对输电线路有何影响？消除初伸长影响的方法有哪些？
3. 何为过牵引现象？它对输电线路有何影响？如何进行处理？
4. 什么是水平档距、垂直档距？各有什么作用？
5. 如图 7-12 所示， $l_1 = 157\text{m}$ ， $h_1 = 15.8\text{m}$ ， $l_2 = 195\text{m}$ ， $h_2 = 19\text{m}$ ，导线比载  $\gamma = 35.047 \times 10^{-3} \text{MPa/m}$ ，应力  $\sigma_0 = 48.714\text{MPa}$ ，试用斜抛物线公式计算 2 号杆的水平档距和垂直档距。

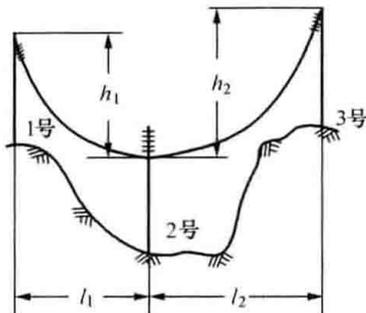


图 7-12 题 5 图

6. 什么是极大档距、允许档距、极限档距？三者之间有何关系？
7. 某 330kV 架空输电线路，通过典型气象区 IX 区，导线为 LGJ-240/55 型钢芯铝绞线，在等高悬挂点下，该导线的极限档距是多少？（安全系数取  $k = 2.5$ ，悬挂点应力安全系数取 2.25。）

## 第八章 非均布荷载下架空线的计算

在架空输电线路的设计中,架空线的自重、覆冰和风压等荷载,一般可视为沿线长或档距均匀分布。但在实际工程中,架空线上也会出现非均布荷载。例如:

(1) 施工人员在安装间隔棒或进行其他检修工作时常采用飞车作业,飞车和施工人员的重量为作用在架空线上的集中荷载。

(2) 运行检修人员修补档距中损坏的导线或检测档距中的压接管时,往往采用绝缘爬梯挂在架空线上进行高空作业,爬梯和施工人员的重量为作用在架空线上的集中荷载。

(3) 两基耐张杆塔相邻形成孤立档时,档距较小的情况下,必须考虑耐张绝缘子串的重量,该重量可视为在某区段上的均布荷载。

(4) 架空线上悬挂的引流线和悬空换位中的跳线,形成集中荷载。

(5) 软横担和采用滑索运送杆塔等情况,也可按作用有集中荷载的架空线考虑。

输电线路中的非均布荷载可分为集中荷载和在某区段上远大于架空线自重的分布荷载两类。在档距较小、架空线截面较小的情况下,非均布荷载与架空线自重相比占有不可忽视的分量,在计算架空线的应力、弧垂和线长时,必须考虑这些荷载的影响,否则将产生不能容许的误差。

### 第一节 架空线悬挂曲线方程的一般形式

某档作用有非均布荷载的架空线,如图 8-1 所示。其上除均布比载  $\gamma$  外,还作用有分布荷载  $p=f(x)$  以及若干集中荷载  $q_i$ 。为使问题简化起见,假设:

(1) 架空线为理想柔索,线上各点弯矩为零;

(2) 各荷载间的水平距离不受架空线变形的影响;

(3) 各荷载的大小不受架空线变形的影响。

在所有荷载作用下,架空线在悬挂点 A、B 处的张力分别为  $T_A$  和  $T_B$ ,其垂向分力相应为  $R_A$  和  $R_B$ ,档距方向的水平分力为  $T_0$ 。

$R_A$ 、 $R_B$  的大小可分别对悬挂点 B、A 列力矩平衡方程式求出,即

$$\left. \begin{aligned} T_0 h + R_A l - \sum M_B &= 0 \\ T_0 h - R_B l + \sum M_A &= 0 \end{aligned} \right\}$$

从而得到

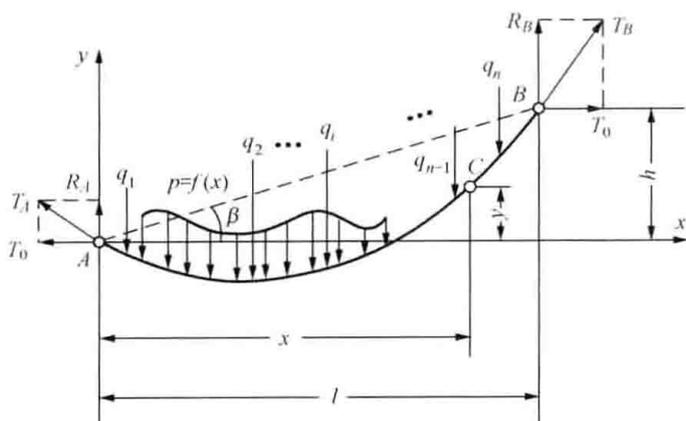


图 8-1 非均布荷载下的架空线受力图

$$R_A = \frac{\sum M_B}{l} - T_0 \frac{h}{l} = Q_A - T_0 \tan\beta \quad (8-1)$$

$$R_B = \frac{\sum M_A}{l} + T_0 \frac{h}{l} = -Q_B + T_0 \tan\beta \quad (8-2)$$

式中  $h$ 、 $l$ 、 $\beta$ ——分别为高差（右悬挂点较高时为正，反之为负）、档距和高差角；

$\sum M_A$ 、 $\sum M_B$ ——分别为档内全部荷载（不包括悬挂点反力）对悬挂点  $A$ 、 $B$  之力矩；

$Q_A$ 、 $Q_B$ ——分别为档内荷载在悬挂点  $A$ 、 $B$  引起的相当于简支梁上的支点剪力，

$$Q_A = \sum M_B / l, \quad Q_B = -\sum M_A / l。$$

相当简支梁指的是两简支点间距为档距  $l$ ，受与档内架空线相同荷载作用的梁。

取架空线  $AC$  段为分析对象，列  $C$  点力矩平衡方程，有

$$T_0 y + R_A x - \sum M_C = 0$$

将式 (8-1) 代入，可得架空线悬挂曲线方程的一般形式为

$$y = x \tan\beta + \frac{1}{T_0} \left( \sum M_C - \frac{\sum M_B}{l} x \right) = x \tan\beta - \frac{M_x}{T_0} \quad (8-3)$$

式中  $\sum M_C$ —— $C$  点左侧档内所有荷载对  $C$  点的力矩；

$M_x$ ——相当简支梁上  $C$  点所在截面的弯矩， $M_x = Q_A x - \sum M_C$ 。

应该指出，柔性架空线实际上并不存在剪力和弯矩，引入“剪力”和“弯矩”的概念，是因为此二量的计算方法与简支梁中的剪力和弯矩的计算方法完全相同，这样悬挂曲线方程变得简练了。

## 第二节 非均布荷载下架空线的弧垂、张力和线长

### 一、非均布荷载下架空线的弧垂

#### 1. 任一点的弧垂

根据弧垂的定义，任一点  $x$  处的弧垂为

$$f_x = x \tan\beta - y = \frac{M_x}{T_0} \quad (8-4)$$

上式表明，架空线任一点  $x$  处的弧垂与相当简支梁上该点弯矩  $M_x$  的大小成正比，与架空线的水平张力  $T_0$  成反比。不论弧垂所在平面内的荷载如何分布，只要求得  $M_x$  和水平张力  $T_0$ ，即可得到该点弧垂。因此可以说式 (8-4) 是计算弧垂的既简单又普遍的公式。

特殊地，若荷载以集度  $p = \gamma A$  沿斜档距均匀分布，则折算到档距上的均布荷载为  $p / \cos\beta$ ，那么

$$M_x = Q_A x - \frac{px^2}{2\cos\beta} = \frac{pl}{2\cos\beta} x - \frac{px^2}{2\cos\beta} = \frac{px(l-x)}{2\cos\beta}$$

于是

$$f_x = \frac{M_x}{T_0} = \frac{p}{T_0} \frac{x(l-x)}{2\cos\beta} = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos\beta}$$

上式即为均布荷载下斜抛物线的任一点弧垂公式，这进一步说明式 (8-4) 是正确的。

#### 2. 以相当剪力表示的弧垂公式

运用式 (8-4) 求弧垂，需要计算弯矩，有时使用起来不太方便，工程实用中最好能用

具体荷载计算。根据材料力学知, 简支梁任一截面处的弯矩等于相应区段剪力图下的面积, 对于分布荷载可视为分段均布的情况 [如图 8-2 (a) 所示] 有

$$f_x = \int_0^x \frac{Q_x}{T_0} dx = \frac{1}{T_0} \sum_{i=0}^k \frac{(Q_i + Q'_i) \Delta l_i}{2} = \frac{1}{T_0} \sum_{i=0}^k \frac{Q_i^2 - Q_i'^2}{2p_i} \quad (8-5)$$

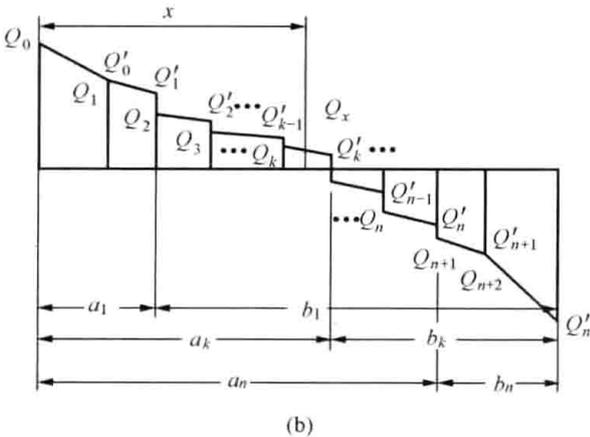
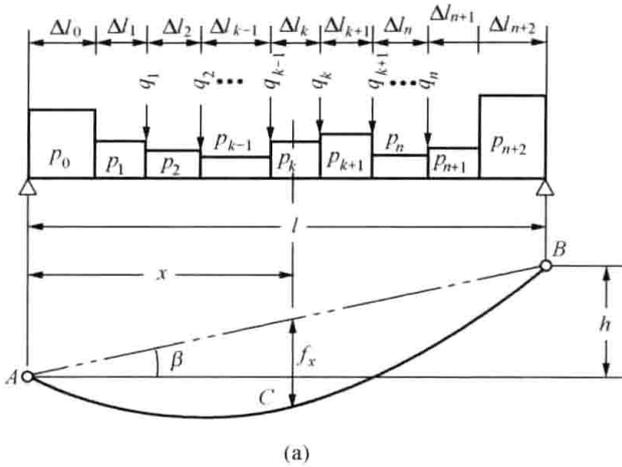


图 8-2 非均布荷载与剪力图

(a) 荷载图; (b) 剪力图

式中  $k$ ——将均布荷载段自左向右依次编号为 0、1、2、……时,  $x$  处的 C 点所在段号, 即在 C 点左侧共有  $k+1$  个均布荷载段;

$\Delta l_i$ ——第  $i$  个均布荷载段的水平长度;

$p_i$ ——第  $i$  个均布荷载段的荷载集度;

$Q_i$ 、 $Q'_i$ ——相当简支梁上第  $i$  个均布荷载段左右端点处的剪力, 当任一点 C 不位于均布荷载段的右端处时,  $Q'_k$  取 C 点处的剪力  $Q_x$ 。

式 (8-5) 表明, 任一点  $x$  处的弧垂, 等于其左侧各个均布荷载段的平均剪力 (该段左、右端处的剪力之和的一半) 与该段长度的乘积之和除以水平张力, 即该点左侧剪力图的总面积除以水平张力。

架空线的最大弧垂发生在最大弯矩处, 即剪力为零的位置。这一位置利用剪力图很容易求得。设剪力为零的点位于区段  $\Delta l_i$  内, 则有

$$Q_x = Q_i - p_i(x - a_{i-1}) = 0$$

从而解得最大弧垂发生的位置

$$x_m = a_{i-1} + \frac{Q_i}{p_i} = a_{i-1} + \Delta l_c \quad (8-6)$$

式中  $a_{i-1}$ ——该均布荷载段  $i$  的首端 (左端) 位置坐标;

$\Delta l_c$ ——该均布荷载段的首端到剪力为零的点之间的距离。

将剪力零点左侧各段长度及首末两端的荷载剪力代入式 (8-5), 即可得到最大弧垂  $f_m$ 。

架空线的最低点位于  $\frac{dy}{dx} = 0$  处, 为此对式 (8-3) 求导, 有

$$\frac{dy}{dx} = \tan\beta - \frac{1}{T_0} \frac{dM_x}{dx} = \tan\beta - \frac{Q_x}{T_0} = 0$$

即最低点弧垂位于下面剪力处

$$Q_x = T_0 \tan\beta = T_0 \frac{h}{l} \quad (8-7)$$

## 二、非均布荷载下架空线的张力

架空线上任一点的斜率为

$$\tan\theta_x = \frac{dy}{dx} = \tan\beta - \frac{1}{T_0} \frac{dM_x}{dx} = \tan\beta - \frac{Q_x}{T_0} \quad (8-8)$$

当架空线的水平张力  $T_0$  已知时, 其轴向张力  $T_x$  的垂向分量  $T_{xv}$  为

$$T_{xv} = T_0 \tan\theta_x = T_0 \tan\beta - Q_x \quad (8-9)$$

因而求得架空线的轴向张力为

$$T_x = \frac{T_0}{\cos\theta_x} = T_0 \sqrt{1 + \tan^2\theta_x} = \sqrt{T_0^2 + (Q_x - T_0 \tan\beta)^2} \quad (8-10)$$

将  $T_0$ 、 $T_{xv}$  和  $T_x$  分别除以架空线的截面积  $A$ , 就得到水平应力  $\sigma_0$ 、垂向应力  $\sigma_{xv}$  和轴向应力  $\sigma_x$ 。

值得注意的是, 在集中荷载作用点上有两个不同的剪力值, 这使得架空线的垂向张力  $T_{xv}$  也有两个不同的值, 二者之差为该集中荷载的大小。集中荷载的存在使轴向应力发生突变。

## 三、非均布荷载下架空线的线长

将式 (8-8) 代入线长积分公式, 得到

$$\begin{aligned} L &= \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\tan\beta - \frac{Q_x}{T_0}\right)^2} dx \\ &= \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \sqrt{1 + \left[\left(\frac{Q_x}{T_0}\right)^2 - 2\frac{Q_x}{T_0}\tan\beta\right] \cos^2\beta} dx \\ &= \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \left\{ 1 + \frac{\cos^2\beta}{2} \left[\left(\frac{Q_x}{T_0}\right)^2 - 2\frac{Q_x}{T_0}\tan\beta\right] - \frac{\cos^4\beta}{8} \left[\left(\frac{Q_x}{T_0}\right)^2 - 2\frac{Q_x}{T_0}\tan\beta\right]^2 + \dots \right\} dx \\ &= \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \left\{ 1 + \frac{\cos^2\beta}{2} \left(\frac{Q_x}{T_0}\right)^2 - \frac{Q_x}{T_0} \sin\beta \cos\beta \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{Q_x}{T_0}\right)^2 \sin^2\beta \cos^2\beta + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_x}{T_0}\right)^3 \sin\beta \cos^3\beta - \dots \right\} dx \end{aligned}$$

忽略  $Q_x/T_0$  的高次方

$$L \approx \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \left[ 1 + \frac{\cos^2\beta}{2} \left(\frac{Q_x}{T_0}\right)^2 - \frac{Q_x}{T_0} \sin\beta \cos\beta \right] dx$$

由材料力学知, 简支梁的剪力图总面积为零, 即  $\int_0^l Q_x dx = 0$ , 同时  $\frac{dQ_x}{dx} = -p_x$  或  $dx = -\frac{dQ_x}{p_x}$ , 代入上式并进行分段积分可以得到

$$\begin{aligned} L &= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\cos^3\beta}{2T_0^2} \int_0^l Q_x^2 dx = \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\cos^3\beta}{2T_0^2} \int_{Q_A}^{Q_B} \frac{Q_x^2}{p_x} dQ_x \\ &= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\cos^3\beta}{6T_0^2} \sum_{i=0}^n \frac{Q_i^3 - Q_i'^3}{p_i} \quad (8-11) \end{aligned}$$

式中:  $Q_i$ 、 $Q_i'$ 、 $p_i$  等的意义与式 (8-5) 的相同; 积分段以不同均布荷载段的分界点和集

中荷载的作用点为界进行划分。

若沿档距均布着集度为  $p_0 = \gamma A / \cos\beta$  的荷载, 则相当简支梁在两悬挂点处的剪力分别为

$$Q_A = \frac{p_0 l}{2}, \quad Q_B = -Q_A = -\frac{p_0 l}{2}$$

代入式 (8-11) 得

$$\begin{aligned} L &= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\cos^3\beta}{6T_0^2} \frac{1}{4p_0} (p_0 l)^3 \\ &= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{p_0^2 l^3 \cos^3\beta}{24T_0^2} = \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\gamma^2 l^3 \cos^3\beta}{24\sigma_0^2} \end{aligned}$$

上式即为斜抛物线的线长公式。

### 第三节 孤立档架空线的弧垂和线长

孤立档的两端为耐张型杆塔, 架空线采用耐张线夹通过耐张绝缘子串悬挂于杆塔横担上。孤立档架空线的应力、弧垂和线长不受相邻档的影响。孤立档两端悬挂的耐张绝缘子串与架空线相比, 一般较重, 其比载与架空线比载有较大不同, 孤立档往往还有“T”接线等集中荷载作用。在较小档距和较小架空线截面情况下, 这些荷载对架空线的影响不能忽略, 应当按非均布荷载计算孤立档架空线。

#### 一、耐张绝缘子串的比载

为了简便起见, 耐张绝缘子串的比载统一以架空线的截面积为基准, 即耐张绝缘子串的比载等于其单位长度上的荷载与架空线截面积之比。仿照架空线比载的定义, 可以写出各种气象条件下耐张绝缘子串的比载计算公式。

##### 1. 耐张串的自重比载

$$\gamma_{J1} = \frac{G_J}{\lambda A} \quad (\text{MPa/m}) \quad (8-12)$$

式中  $G_J$ ——耐张串的重量, N;

$\lambda$ ——耐张串的长度, m;

$A$ ——架空线的截面积,  $\text{mm}^2$ 。

##### 2. 耐张串的冰重比载

$$\gamma_{J2} = \frac{n_1 G_{Jb} + n_2 G_{cb}}{\lambda A} \quad (\text{MPa/m}) \quad (8-13)$$

式中  $G_{Jb}$ ——单片绝缘子覆冰重量, N, 其值查表 8-1;

$G_{cb}$ ——单联绝缘子金具覆冰重量, N, 其值查表 8-1;

$n_1$ ——耐张串中绝缘子的片数;

$n_2$ ——金具联数。

##### 3. 耐张串的总垂直比载

$$\gamma_{J3} = \gamma_{J1} + \gamma_{J2} \quad (8-14)$$

##### 4. 耐张串的冰风压比载

计算耐张绝缘子串上的风压荷载时, 其风速不均匀系数和风载体型系数常取为 1, 所以

耐张串的无冰风压比载为

$$\gamma_{J4} = \frac{n_1 A_J + n_2 A_c}{\lambda A} W_v = 0.625 \frac{n_1 A_J + n_2 A_c}{\lambda A} v^2 \quad (\text{MPa/m}) \quad (8-15)$$

式中  $A_J$ 、 $A_c$ ——分别为一片绝缘子和单联绝缘子金具的迎风面积,  $\text{m}^2$ , 其值查表 8-2;

$W_v$ ——理论风压, Pa;

$v$ ——风速, m/s;

$n_1$ 、 $n_2$ ——分别为绝缘子的片数和金具联数。

表 8-1 绝缘子和金具的覆冰重量

绝缘子型号	一片绝缘子覆冰重 (N)	
	$b=5\text{mm}$	$b=10\text{mm}$
XP-70	5.49	11.66
XP-100	6.57	13.82
单联绝缘子金具	3.53	8.23

表 8-2 绝缘子和金具的迎风面积

绝缘子型号	一片绝缘子迎风面积 ( $\text{m}^2$ )		
	$b=0$	$b=5\text{mm}$	$b=10\text{mm}$
XP-70	0.0203	0.0237	0.0273
XP-100	0.0239	0.0276	0.0316
单联绝缘子金具	单导线: 0.03; 双分裂: 0.04; 4 分裂: 0.05		

5. 耐张串的覆冰风压比载

$$\gamma_{J5} = 0.625B \frac{n_1 A_{Jb} + n_2 A_c}{\lambda A} v^2 \quad (\text{MPa/m}) \quad (8-16)$$

式中  $A_{Jb}$ ——一片绝缘子覆冰后的迎风面积,  $\text{m}^2$ ;

$B$ ——覆冰风载增大系数, 取值同架空线。

其余各符号的意义同前。

6. 耐张串的无冰综合比载

$$\gamma_{J6} = \sqrt{\gamma_{J1}^2 + \gamma_{J4}^2} \quad (8-17)$$

7. 耐张串的覆冰综合比载

$$\gamma_{J7} = \sqrt{\gamma_{J3}^2 + \gamma_{J5}^2} = \sqrt{(\gamma_{J1} + \gamma_{J2})^2 + \gamma_{J5}^2} \quad (8-18)$$

## 二、孤立档架空线的弧垂

设孤立档的档距为  $l$ , 高差为  $h$ , 高差角为  $\beta$  (参见图 8-2); 耐张绝缘子串长度分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ , 重量分别为  $G_{J1}$ 、 $G_{J2}$ , 相应的比载分别为  $\gamma_{J1}$ 、 $\gamma_{J2}$ , 荷载集度分别为  $p_{J1}$ 、 $p_{J2}$  (分别对应图 8-2 中的  $p_0$ 、 $p_{n+2}$ ); 架空线的比载为  $\gamma$ , 其上作用有  $n$  个集中荷载  $q_i$ , 距两悬挂点 A、B 的水平距离分别为  $a_i$  和  $b_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 见图 8-3。

为使问题简化, 进一步假设:

(1) 架空线和耐张串均视为理想柔索, 各点实际弯矩为零。

(2) 耐张串在斜档距上的投影长度等于其实际长度  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ , 则其水平投影长度分别为  $\lambda_{10} = \lambda_1 \cos\beta$ 、 $\lambda_{20} = \lambda_2 \cos\beta$  (分别对应图 8-2 中的  $\Delta l_0$ 、

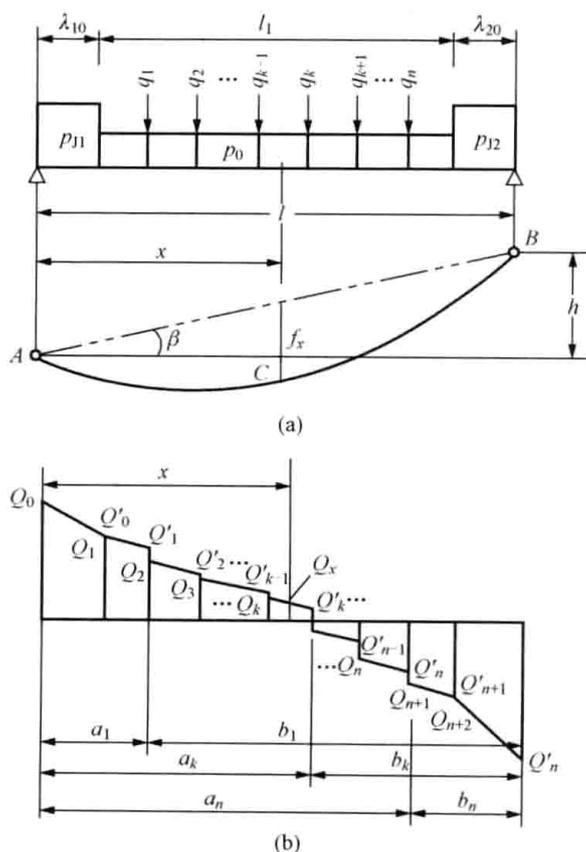


图 8-3 孤立档荷载与剪力图

(a) 荷载图; (b) 剪力图

$\Delta l_{n+2}$ )。

(3) 架空线所占档距为  $l_1 = l - (\lambda_{10} + \lambda_{20})$ 。

(4) 架空线比载  $\gamma$  和耐张绝缘子串比载  $\gamma_{J1}$ 、 $\gamma_{J2}$  沿斜档距均布, 折算到档距  $l$  上的集度

分别为  $p_0 = \frac{\gamma A}{\cos\beta}$ ,  $p_{J1} = \frac{\gamma_{J1} A}{\cos\beta}$ ,  $p_{J2} = \frac{\gamma_{J2} A}{\cos\beta}$ 。

1. 两端具有等长耐张串时的弧垂

通常孤立档两端耐张串的水平投影长度相差很小, 可以认为  $\lambda_{10} = \lambda_{20} = \lambda_0$ , 但其重量仍保持各自的值  $G_{J1}$ 、 $G_{J2}$ , 即认为耐张串等长异重, 这对档中弧垂和支点反力的计算精度影响很小。分别列两悬挂点  $A$ 、 $B$  的力矩平衡方程式, 可得两悬挂点处的支反力  $R_A$ 、 $R_B$  为

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{1}{l} \left[ G_{J1} \left( l - \frac{\lambda_0}{2} \right) + \frac{G_{J2} \lambda_0}{2} + p_0 l_1 \left( \lambda_0 + \frac{l_1}{2} \right) + \sum_{i=1}^n q_i b_i \right] - T_0 \frac{h}{l} \\ &= G_{J1} - \frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 \lambda_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - T_0 \frac{h}{l} \\ R_B &= \frac{1}{l} \left[ \frac{G_{J1} \lambda_0}{2} + G_{J2} \left( l - \frac{\lambda_0}{2} \right) + p_0 l_1 \left( \lambda_0 + \frac{l_1}{2} \right) + \sum_{i=1}^n q_i a_i \right] + T_0 \frac{h}{l} \\ &= G_{J2} + \frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 \lambda_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i a_i + T_0 \frac{h}{l} \end{aligned}$$

相当简支梁上的剪力相应为

$$\begin{aligned} Q_0 &= G_{J1} - \frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 \lambda_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i \\ Q'_0 &= Q_0 - G_{J1} = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 \lambda_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i \\ Q_1 &= Q'_0 \\ Q'_1 &= Q'_0 - p_0 (a_1 - \lambda_0) = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 a_1 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i \\ Q_2 &= Q'_1 - q_1 = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 a_1 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - q_1 \\ Q'_2 &= Q_2 - p_0 (a_2 - a_1) = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 a_2 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - q_1 \\ &\dots\dots \\ Q_j &= Q'_{j-1} - q_{j-1} = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 a_{j-1} + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - \sum_{i=1}^{j-1} q_i \\ Q_{jx} &= Q_j - p_0 (x - a_{j-1}) = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 x + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - \sum_{i=1}^{j-1} q_i \\ Q'_j &= Q_j - p_0 (a_j - a_{j-1}) = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 a_j + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - \sum_{i=1}^{j-1} q_i \\ &\dots\dots \\ Q_{n+1} &= Q'_n - q_n = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l} \lambda_0 + \frac{p_0 l}{2} - p_0 a_n + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - \sum_{i=1}^n q_i \end{aligned}$$

$$Q'_{n+1} = Q_{n+1} - p_0(l - \lambda_0 - a_n) = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l}\lambda_0 - \frac{p_0 l}{2} + p_0 \lambda_0 - \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i a_i$$

$$Q_{n+2} = Q'_{n+1}$$

$$Q'_{n+2} = Q_{n+2} - G_{J2} = -\frac{G_{J1} - G_{J2}}{2l}\lambda_0 - \frac{p_0 l}{2} + p_0 \lambda_0 - \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n q_i a_i - G_{J2} = Q_B$$

(1) 当  $a_{j-1} \leq x \leq a_j$  时, 将上面有关  $Q_i$ 、 $Q'_i$  代入式 (8-5), 整理后可以得到

$$f_x = \frac{1}{T_0} \left[ \frac{p_0 x(l-x)}{2} + \frac{(G_{J1} - p_0 \lambda_0) \lambda_0}{2} - \frac{(G_{J1} - G_{J2}) \lambda_0}{2} \frac{x}{l} + \frac{x}{l} \sum_{i=1}^n q_i b_i - \sum_{i=1}^{j-1} q_i (x - a_i) \right] \quad (8-19)$$

用比载  $\gamma$ 、 $\gamma_{J1}$ 、 $\gamma_{J2}$  表示时, 上式可写为

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2 \cos \beta} + \frac{(\gamma_{J1} - \gamma) \lambda_0^2}{2 \cos \beta} - \frac{(\gamma_{J1} - \gamma_{J2}) \lambda_0^2}{2 \cos \beta} \frac{x}{l} + \frac{x}{l} \sum_{i=1}^n \tau_i b_i - \sum_{i=1}^{j-1} \tau_i (x - a_i) \right] \quad (8-20)$$

其中

$$\tau_i = \frac{q_i}{A} \quad (8-21)$$

式中  $\tau_i$ ——集中荷载单位截面重力, 与应力具有同样的单位。

式 (8-20) 虽然比较复杂, 但物理意义仍比较直观。式中第一项是架空线比载  $\gamma$  产生的斜抛物线弧垂, 第二、三项是耐张串比载对弧垂的影响, 最后两项是集中荷载产生的弧垂。

(2) 当  $\lambda_0 \leq x \leq a_1$  时, 相当于式 (8-20) 中  $j-1=0$  的情况, 此时

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2 \cos \beta} + \frac{(\gamma_{J1} - \gamma) \lambda_0^2}{2 \cos \beta} - \frac{(\gamma_{J1} - \gamma_{J2}) \lambda_0^2}{2 \cos \beta} \frac{x}{l} + \frac{x}{l} \sum_{i=1}^n \tau_i b_i \right] \quad (8-22)$$

(3) 当  $a_n \leq x \leq l - \lambda_0$  时, 相当于式 (8-20) 中  $j-1=n$  的情况, 此时

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2 \cos \beta} + \frac{(\gamma_{J1} - \gamma) \lambda_0^2}{2 \cos \beta} - \frac{(\gamma_{J1} - \gamma_{J2}) \lambda_0^2}{2 \cos \beta} \frac{x}{l} + \frac{(l-x)}{l} \sum_{i=1}^n \tau_i a_i \right] \quad (8-23)$$

(4) 几种特殊情况:

1) 两端耐张串等长等重, 且无集中荷载。

当  $\lambda_0 \leq x \leq l - \lambda_0$  时, 有

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] \quad (8-24)$$

对上式求导, 并令其等于零, 可知在档距中央弧垂达到最大值

$$f_m = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma l^2}{8} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] \quad (8-25)$$

显然, 上式中的第二项是由于耐张串的比载大于架空线的比载引起的弧垂增大。

2) 两端耐张串等长等重, 且有一个集中荷载。

当  $\lambda_0 \leq x \leq a$  时, 有

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2 \cos \beta} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2 \cos \beta} + \frac{\tau b x}{l} \right] \quad (8-26)$$

当  $a \leq x \leq l - \lambda_0$  时, 有

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2\cos\beta} + \frac{(\gamma_1 - \gamma)\lambda_0^2}{2\cos\beta} + \frac{\tau a(l-x)}{l} \right] \quad (8-27)$$

欲求最大弧垂的位置  $x_m$  和最大弧垂  $f_m$ , 可令  $f_x$  对  $x$  的导数等于零, 解得  $x_m$ , 进而求得  $f_m$ 。

3) 只有一个集中荷载。

在孤立档档距较大时, 可将耐张串的比载近似为架空线的比载。在该档有“T”引线或采用飞车、爬梯作业, 即类似于只有一个集中荷载的情况。

当  $0 \leq x \leq a$  时, 有

$$f_x = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos\beta} + \frac{\tau b x}{\sigma_0 l} \quad (8-28)$$

当  $a \leq x \leq l$  时, 有

$$f_x = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos\beta} + \frac{\tau a(l-x)}{\sigma_0 l} \quad (8-29)$$

上两式中的第二项, 是集中荷载引起的弧垂增大。考虑到飞车和爬梯相对架空线悬点的位置  $a$  或  $b$  是经常变化的, 则最大弧垂的位置和最大弧垂值  $f_m$  随之变化。当集中荷载作用在档距中央, 即  $a = b = l/2$  时, 得到所有情形下的最大弧垂

$$f_m = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} + \frac{\tau l}{4\sigma_0} \quad (8-30)$$

2. 仅一端具有耐张串的弧垂

孤立档架线施工观测弧垂时, 往往在挂线侧悬挂有耐张绝缘子串, 而在牵引侧暂时没有耐张绝缘子串, 如图 8-4 所示。

计算仅一端具有耐张串的孤立档弧垂时, 可简单地将两端具有耐张串时的弧垂计算公式中相应的比载  $\gamma_{j1}$  (或  $\gamma_{j2}$ ) 代以架空线比载  $\gamma$  即可。

相应的比载  $\gamma_{j1}$  (或  $\gamma_{j2}$ ) 代以架空线比载  $\gamma$  即可。

(1) 在左悬挂点紧线时, 以  $\gamma$  取代式 (8-20) 中的  $\gamma_{j1}$ , 可得到仅一端具有耐张串时任一点  $x$  ( $a_{j-1} \leq x \leq a_j$ ) 处的弧垂为

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2\cos\beta} + \frac{(\gamma_1 - \gamma)\lambda_0^2}{2\cos\beta} \frac{x}{l} + \frac{x}{l} \sum_{i=1}^n \tau_i b_i - \sum_{i=1}^{j-1} \tau_i (x - a_i) \right] \quad (8-31)$$

式中  $\gamma_1$ ——耐张串的比载。

无集中荷载时, 有

$$f_x = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos\beta} + \frac{(\gamma_1 - \gamma)\lambda_0^2}{2\sigma_0 \cos\beta} \frac{x}{l} \quad (8-32)$$

(2) 在右悬挂点紧线时, 以  $\gamma$  取代式 (8-20) 中的  $\gamma_{j2}$ , 可得到相应的弧垂为

$$f_x = \frac{1}{\sigma_0} \left[ \frac{\gamma x(l-x)}{2\cos\beta} + \frac{(\gamma_1 - \gamma)\lambda_0^2}{2\cos\beta} \left(1 - \frac{x}{l}\right) + \frac{x}{l} \sum_{i=1}^n \tau_i b_i - \sum_{i=1}^{j-1} \tau_i (x - a_i) \right] \quad (8-33)$$

无集中荷载时, 有

$$f_x = \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos\beta} + \frac{(\gamma_1 - \gamma)\lambda_0^2}{2\sigma_0 \cos\beta} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad (8-34)$$

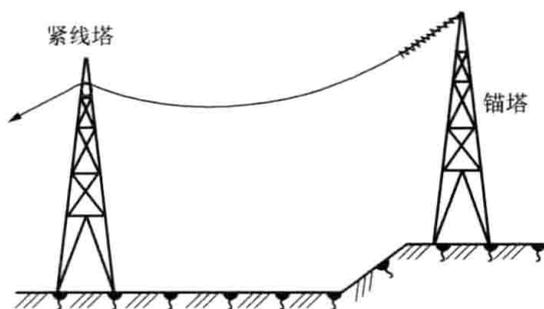


图 8-4 孤立档施工架线情况

(3) 无集中荷载时, 最大弧垂为

$$f_m = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos\beta} + \frac{(\gamma_J - \gamma)\lambda_0^2}{4\sigma_0 \cos\beta} + \frac{(\gamma_J - \gamma)^2 \lambda_0^4}{8\sigma_0 \gamma l^2 \cos\beta} \quad (8-35)$$

发生在  $x_m$  处, 即

$$x_m = \frac{l}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma)\lambda_0^2}{2\gamma l} \quad (8-36)$$

当集中荷载为动荷载时, 如飞车、滑索运输线路器材等情况, 应当考虑冲击的影响。在应用上述有关公式时, 将相应的集中荷载  $q(\tau)$  增大 1.3 倍后计算, 即取冲击系数为 1.3。

### 三、孤立档架空线的线长

采用式 (8-11) 计算孤立档架空线的线长, 需要求得荷载剪力  $Q_i$ 、 $Q'_i$ , 显得复杂。工程上常采用由荷载和档内有关参数直接表示的线长计算式, 这里直接给出而不再推导。

1. 两端具有等长耐张绝缘子串时的线长

$$\begin{aligned} L = & \frac{l}{\cos\beta} + \frac{p_0^2 \cos^3\beta}{24T_0^2} \left\{ l_1^2 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{p_0^2 l} \left[ \lambda_0 l \left( \frac{GG_{J1} + GG_{J2}}{2} \right. \right. \right. \\ & + \frac{G_{J1}^2 + G_{J2}^2}{3} + G_{J1} \sum_{i=1}^n q_i \left. \right) - \frac{(G_{J1} - G_{J2})\lambda_0}{2} \left( \frac{(G_{J1} - G_{J2})\lambda_0}{2} + 2 \sum_{i=1}^n q_i a_i \right) \\ & \left. \left. \left. + \sum_{i=1}^n (p_0 l + q_i) q_i a_i b_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i a_i \sum_{j=i+1}^n q_j b_j) \right] \right\} \quad (8-37) \end{aligned}$$

式中  $l$ 、 $\beta$ ——分别为孤立档的档距和高差角;

$l_1$ 、 $\lambda_0$ ——分别为架空线所占档距和两端耐张串的水平投影长度,  $l_1 = l - 2\lambda_0$ ;

$p_0$ ——架空线荷载集度的水平投影值,  $p_0 = \gamma A / \cos\beta$ ;

$G$ 、 $G_{J1}$ 、 $G_{J2}$ ——分别为架空线的荷载和两端耐张串的荷载,  $G = p_0 l_1$ ;

$q_i$ 、 $a_i$ 、 $b_i$ ——分别为第  $i$  个集中荷载及该荷载至左、右悬挂点  $A$ 、 $B$  的水平距离。

式 (8-37) 与均布荷载的斜抛物线线长公式形式上相似, 这只要将花括号的内容假想为某个档距的立方就可看出。该假想档距大于实际档距, 表明耐张串和集中荷载使档内悬挂曲线长度有所增加。

当两端耐张串等长且等重时, 有

$$\begin{aligned} L = & \frac{l}{\cos\beta} + \frac{p_0^2 \cos^3\beta}{24T_0^2} \left\{ l_1^2 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{p_0^2 l} \left[ \lambda_0 l G_J \left( G + \frac{2}{3} G_J + \sum_{i=1}^n q_i \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{i=1}^n (p_0 l + q_i) q_i a_i b_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i a_i \sum_{j=i+1}^n q_j b_j) \right] \right\} \quad (8-38) \end{aligned}$$

当两端耐张串等长等重且无集中荷载时, 有

$$L = \frac{l}{\cos\beta} + \frac{p_0^2 \cos^3\beta}{24T_0^2} \left\{ l_1^2 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12\lambda_0}{p_0^2} G_J \left( G + \frac{2}{3} G_J \right) \right\} \quad (8-39)$$

式中  $G_J$ ——耐张串的荷载,  $G_{J1} = G_{J2} = G_J$ ;

其他符号的意义同前。

2. 仅一端具有耐张绝缘子串时的线长

假设选在左悬挂点端紧线, 以  $p_0 \lambda_0$  取代式 (8-37) 中的  $G_{J1}$ , 便得到仅右悬挂点悬挂耐张串时的线长。此时架空线所占档距  $l'_1 = l - \lambda_0$ , 悬挂曲线长度的计算公式为

$$\begin{aligned}
L &= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{p_0^2 \cos^3\beta}{24T_0^2} \left\{ (l'_1 - \lambda_0)^2 (l'_1 + 5\lambda_0) + \frac{12}{p_0^2 l} \left[ \lambda_0 l \left( \frac{Gp_0\lambda_0 + GG_{J2}}{2} \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left. + \frac{(p_0\lambda_0)^2 + G_{J2}^2}{3} + p_0\lambda_0 \sum_{i=1}^n q_i \right) - \frac{(p_0\lambda_0 - G_{J2})\lambda_0}{2} \left( \frac{(p_0\lambda_0 - G_{J2})\lambda_0}{2} + 2 \sum_{i=1}^n q_i a_i \right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left. + \sum_{i=1}^n (p_0 l + q_i) q_i a_i b_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i a_i \sum_{j=i+1}^n q_j b_j) \right] \right\} \\
&= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{p_0^2 \cos^3\beta}{24T_0^2} \left\{ (l'_1 - \lambda_0)^2 (l'_1 + 5\lambda_0) + \frac{12}{p_0^2 l} \left[ \lambda_0 l \left( \frac{Gp_0\lambda_0 + GG_{J2}}{2} \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left. + \frac{(p_0\lambda_0)^2 + G_{J2}^2}{3} \right) - \frac{(p_0\lambda_0 - G_{J2})^2 \lambda_0^2}{4} + \lambda_0 (G_{J2} \sum_{i=1}^n q_i a_i + \lambda_0 p_0 \sum_{i=1}^n q_i b_i) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left. + \sum_{i=1}^n (p_0 l + q_i) q_i a_i b_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i a_i \sum_{j=i+1}^n q_j b_j) \right] \right\} \\
&= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{p_0^2 \cos^3\beta}{24T_0^2} \left\{ l_1'^2 (l'_1 + 3\lambda_0) + \frac{12}{p_0^2 l} \left[ \lambda_0 l G_{J2} \left( \frac{p_0 l'_1}{2} + \frac{G_{J2}}{3} \right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{(G_{J2} + p_0 l'_1)^2 \lambda_0^2}{4} + \lambda_0 (G_{J2} \sum_{i=1}^n q_i a_i + \lambda_0 p_0 \sum_{i=1}^n q_i b_i) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left. + \sum_{i=1}^n (p_0 l + q_i) q_i a_i b_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i a_i \sum_{j=i+1}^n q_j b_j) \right] \right\} \tag{8-40}
\end{aligned}$$

选在右悬挂点紧线时, 仅左悬挂点有耐张串, 可仿此方法得到该情况下的线长计算式。

#### 第四节 孤立档架空线的状态方程式

建立孤立档架空线状态方程式的原则, 仍以两种气象条件下档内架空线长度间的关系为基础。假设:

(1) 耐张绝缘子串的长度不受张力和气温变化的影响。一般耐张绝缘子串的长度与档内架空线的长度相比显得很短, 其截面又远大于架空线截面, 因此耐张绝缘子串的弹性伸长远小于架空线在相同张力下的弹性伸长, 耐张绝缘子串的热胀冷缩量也远小于架空线的热胀冷缩量。

(2) 参与弹性变形和热胀冷缩的架空线长度为  $l_1/\cos\beta$ , 其中  $l_1$  为档内架空线所占档距。

(3) 以平均应力的主要部分  $\sigma_0/\cos\beta$  (或张力  $T_0/\cos\beta$ ) 代替平均应力  $\sigma_{cp}$  (或平均张力  $T_{cp}$ ) 计算架空线的全部弹性伸长。

(4) 假定各荷载作用区段的水平位置保持不变。

基于以上假设, 参照式 (6-2) 可写出孤立档架空线的基本状态方程式为

$$L_2 - L_1 = \frac{l_1}{EA \cos^2\beta} (T_{02} - T_{01}) + \frac{\alpha l_1}{\cos\beta} (t_2 - t_1) \tag{8-41}$$

式中  $L_1$ 、 $L_2$ ——分别为已知状态和待求状态下的架空线线长;

$T_{01}$ 、 $T_{02}$ ——分别为已知状态和待求状态下架空线的水平张力;

$t_1$ 、 $t_2$ ——分别为已知状态和待求状态下的气温。

将线长公式 (8-11) 表示的  $L_1$ 、 $L_2$  代入式 (8-41), 得到

$$T_{02} - \frac{1}{T_{02}^2} \left( \frac{EA \cos^5 \beta}{6l_1} \sum \frac{Q_{2i}^3 - Q'_{2i}{}^3}{p_{2i}} \right) = T_{01} - \frac{1}{T_{01}^2} \left( \frac{EA \cos^5 \beta}{6l_1} \sum \frac{Q_{1i}^3 - Q'_{1i}{}^3}{p_{1i}} \right) - \alpha EA \cos \beta (t_2 - t_1) \quad (8-42)$$

或

$$\sigma_{02} - \frac{1}{\sigma_{02}^2} \left( \frac{E \cos^5 \beta}{6l_1 A^2} \sum \frac{Q_{2i}^3 - Q'_{2i}{}^3}{p_{2i}} \right) = \sigma_{01} - \frac{1}{\sigma_{01}^2} \left( \frac{E \cos^5 \beta}{6l_1 A^2} \sum \frac{Q_{1i}^3 - Q'_{1i}{}^3}{p_{1i}} \right) - \alpha E \cos \beta (t_2 - t_1) \quad (8-43)$$

令

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{E \cos^5 \beta}{6l_1 A^2} \sum \frac{Q_{1i}^3 - Q'_{1i}{}^3}{p_{1i}} \\ K_2 &= \frac{E \cos^5 \beta}{6l_1 A^2} \sum \frac{Q_{2i}^3 - Q'_{2i}{}^3}{p_{2i}} \end{aligned} \right\} \quad (8-44)$$

$K_1$ 、 $K_2$  分别为已知状态和未知状态下架空线的线长系数，其值的大小不仅与该气象条件下的荷载大小有关，而且与其作用位置有关。将式 (8-44) 代入式 (8-43)，整理后得到孤立档架空线的应力状态方程式为

$$\sigma_{02}^2 \left\{ \sigma_{02} + \left[ \frac{K_1}{\sigma_{01}^2} - \sigma_{01} + \alpha E \cos \beta (t_2 - t_1) \right] \right\} = K_2 \quad (8-45)$$

从式 (8-45) 可以看出，欲求未知状态下的水平应力  $\sigma_{02}$ ，关键是要计算出两种状态下的线长系数  $K_1$ 、 $K_2$ 。

### 一、两端具有等长耐张绝缘子串时的线长系数

将线长公式 (8-11) 和式 (8-44) 对比，并注意到式 (8-37)，可得两端具有等长耐张绝缘子串时的线长系数为

$$\begin{aligned} K &= \frac{p_0^2 E \cos^5 \beta}{24 A^2 l_1} \left\{ l_1^2 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{p_0^2 l} \left[ \lambda_0 l \left( \frac{GG_{J1} + GG_{J2}}{2} + \frac{G_{J1}^2 + G_{J2}^2}{3} + G_{J1} \sum_{i=1}^n q_i \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{(G_{J1} - G_{J2})\lambda_0}{2} \left( \frac{(G_{J1} - G_{J2})\lambda_0}{2} + 2 \sum_{i=1}^n q_i a_i \right) + \sum_{i=1}^n (p_0 l + q_i) q_i a_i b_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (q_i a_i \sum_{j=i+1}^n q_j b_j) \right] \right\} \\ &= \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{W_1 \gamma_\beta} \left[ \frac{\lambda_0}{A} \left( \frac{W_1 (G_{J1} + G_{J2})}{2} + \frac{G_{J1}^2 + G_{J2}^2}{3A} + G_{J1} \sum_{i=1}^n \tau_i \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{(G_{J1} - G_{J2})\lambda_0}{2A} \left( \frac{(G_{J1} - G_{J2})\lambda_0}{2A} + 2 \sum_{i=1}^n \tau_i a_i \right) + \sum_{i=1}^n \left( \gamma_\beta + \frac{\tau_i}{l} \right) \tau_i a_i b_i \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2}{l} \sum_{i=1}^{n-1} (\tau_i a_i \sum_{j=i+1}^n \tau_j b_j) \right] \right\} \quad (8-46) \end{aligned}$$

式中  $l$ 、 $\beta$ ——分别为孤立档的档距和高差角；

$G$ 、 $G_{J1}$ 、 $G_{J2}$ ——分别为架空线的荷载和两端耐张绝缘子串的荷载， $G = p_0 l_1$ ；

$l_1$ 、 $\lambda_0$ ——分别为架空线所占档距和两端耐张绝缘子串的水平投影长度， $l_1 = l - 2\lambda_0$ ， $\lambda_0 = \lambda \cos \beta$ ， $\lambda$  为耐张绝缘子串的实际长度；

$p_0$ ——架空线荷载集度的水平投影值， $p_0 = \gamma A / \cos \beta$ ；

$q_i$ 、 $a_i$ 、 $b_i$ ——分别为第  $i$  个集中荷载的量值及该荷载至左、右悬挂点  $A$ 、 $B$  的水平距离；

$E$ ——架空线的弹性系数；

$\tau_i$ ——集中荷载的单位截面重力,  $\tau_i = q_i/A$ ;

$n$ ——集中荷载的个数;

$W_1$ ——架空线单位截面荷载,  $W_1 = \gamma l_1/\cos\beta$ ;

$\gamma_\beta$ ——架空线的水平投影比载,  $\gamma_\beta = \gamma/\cos\beta$ 。

若两端耐张绝缘子串等长且等重, 即  $G_{J1} = G_{J2} = G_J$ , 则

$$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{W_1 \gamma_\beta} \left[ \frac{\lambda_0 G_J}{A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} + \sum_{i=1}^n \tau_i \right) + \sum_{i=1}^n \left( \gamma_\beta + \frac{\tau_i}{l} \right) \tau_i a_i b_i + \frac{2}{l} \sum_{i=1}^{n-1} \left( \tau_i a_i \sum_{j=i+1}^n \tau_j b_j \right) \right] \right\} \quad (8-47)$$

若两端耐张绝缘子串等长等重且无集中荷载, 则

$$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left[ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12\lambda_0 G_J}{W_1 \gamma_\beta A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} \right) \right] \quad (8-48)$$

## 二、仅一端具有耐张绝缘子串时的线长系数

作用有  $n$  个集中荷载, 仅右悬挂点悬挂耐张绝缘子串时的线长系数为

$$K = \frac{p_0^2 E \cos^5 \beta}{24 A^2 l_1} \left\{ l_1^2 (l_1 + 3\lambda_0) + \frac{12}{p_0^2 l} \left[ \lambda_0 l G_J \left( \frac{p_0 l_1}{2} + \frac{G_J}{3} \right) - \frac{(G_J + p_0 l_1)^2 \lambda_0^2}{4} + \lambda_0 (G_J \sum_{i=1}^n q_i b_i + \lambda_0 p_0 \sum_{i=1}^n q_i a_i) + \sum_{i=1}^n (p_0 l + q_i) q_i a_i b_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \left( q_i a_i \sum_{j=i+1}^n q_j b_j \right) \right] \right\}$$

$$= \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 3\lambda_0) + \frac{6\lambda_0 G_J}{W_1 \gamma_\beta A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} \right) - \frac{3\lambda_0^2 (W_1 + G_J/A)^2}{W_1 \gamma_\beta l} + \frac{12}{W_1 \gamma_\beta} \left[ \frac{\lambda_0}{l} \left( \frac{G_J}{A} \sum_{i=1}^n \tau_i b_i + \lambda_0 \gamma_\beta \sum_{i=1}^n \tau_i a_i \right) + \sum_{i=1}^n \left( \gamma_\beta + \frac{\tau_i}{l} \right) \tau_i a_i b_i + \frac{2}{l} \sum_{i=1}^{n-1} \left( \tau_i a_i \sum_{j=i+1}^n \tau_j b_j \right) \right] \right\} \quad (8-49)$$

式中  $l_1$ ——架空线所占档距,  $l_1 = l - \lambda_0$ ;

$G_J$ ——耐张绝缘子串的重量;

$W_1$ ——架空线的单位截面荷载,  $W_1 = p_0 l_1/A = \gamma l_1/\cos\beta$ ;

$\gamma_\beta$ ——架空线的水平投影比载,  $\gamma_\beta = \gamma/\cos\beta$ ;

$A$ ——架空线的截面积;

其他符号的意义同前。

当无集中荷载时, 上式变为

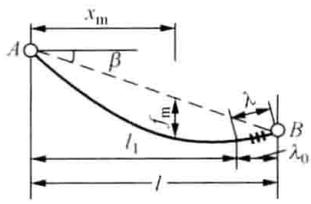
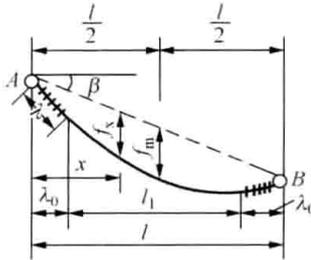
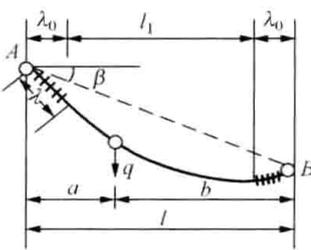
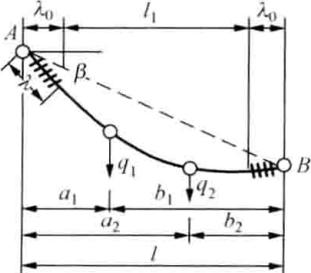
$$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 3\lambda_0) + \frac{6\lambda_0 G_J}{W_1 \gamma_\beta A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} \right) - \frac{3\lambda_0^2 (W_1 + G_J/A)^2}{W_1 \gamma_\beta l} \right\} \quad (8-50)$$

## 三、常见荷载分布情况下的线长系数

几种常见荷载分布情况下的线长系数及有关计算公式示于表 8-3。表中计算公式均是以斜抛物线方程为基础化简而来的, 由于化简近似的方法不同, 还有其他的形式, 这里不再介绍。

表 8-3

孤立档应力、弧垂计算公式汇总表

情况	简图	公式
施工观测弧垂情况 (一侧有绝缘子串, 无集中荷载)		$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 3\lambda_0) + \frac{6\lambda_0 G_J}{W_1 \gamma \beta A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} \right) - \frac{3\lambda_0^2 (W_1 + G_J/A)^2}{W_1 \gamma \beta l} \right\}$ $f_m = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos \beta} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{4\sigma_0 \cos \beta} + \frac{(\gamma_J - \gamma)^2 \lambda_0^4}{8\sigma_0 \gamma l^2 \cos \beta}$ 发生在距左悬挂点 A: $x_m = \frac{l}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2\gamma l}$
竣工情况 (两侧绝缘子串相同, 无集中荷载)		$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left[ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12\lambda_0 G_J}{W_1 \gamma \beta A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} \right) \right]$ $f_m = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma l^2}{8} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right], \text{ 发生在档距中央}$ 当 $\lambda_0 \leq x \leq l - \lambda_0$ 时, 有 $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l - x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right]$
竣工情况 (两侧绝缘子串相同, 一个集中荷载)		$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{W_1 \gamma \beta} \left[ \frac{\lambda_0 G_J}{A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} + \tau \right) + \tau a b \left( \gamma \beta + \frac{\tau}{l} \right) \right] \right\}$ 当 $\lambda_0 \leq x \leq a$ 时, 有 $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l - x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{\tau b x}{\sigma_0 l}$ 当 $a \leq x \leq l - \lambda_0$ 时, 有 $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l - x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{\tau a (l - x)}{\sigma_0 l}$
竣工情况 (两侧绝缘子串相同, 两个集中荷载)		$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{W_1 \gamma \beta} \left[ \frac{\lambda_0 G_J}{A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} + \tau_1 + \tau_2 \right) + \tau_1 a_1 b_1 \left( \gamma \beta + \frac{\tau_1}{l} \right) + \tau_2 a_2 b_2 \left( \gamma \beta + \frac{\tau_2}{l} \right) + \frac{2\tau_1 \tau_2 a_1 b_2}{l} \right] \right\}$ 当 $\lambda_0 \leq x \leq a_1$ 时, 有 $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l - x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{(\tau_1 b_1 + \tau_2 b_2) x}{\sigma_0 l}$ 当 $a_1 \leq x \leq a_2$ 时, 有 $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l - x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{(\tau_1 b_1 + \tau_2 b_2) x}{\sigma_0 l} - \frac{\tau_1 (x - a_1)}{\sigma_0}$ 当 $a_2 \leq x \leq l - \lambda_0$ 时, 有 $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l - x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{(\tau_1 a_1 + \tau_2 a_2) (l - x)}{\sigma_0 l}$

续表

情况	简图	公式
竣工情况 (两侧绝缘子串相同, $n$ 个集中荷载)		$K = \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{W_1 \gamma \beta} \left[ \frac{\lambda_0 G_J}{A} \left( W_1 + \frac{2G_J}{3A} + \sum_{i=1}^n \tau_i \right) + \sum_{i=1}^n \tau_i a_i b_i \left( \gamma \beta + \frac{\tau_i}{l} \right) + \frac{2}{l} \left( \sum_{i=1}^{n-1} (\tau_i a_i \sum_{j=i+1}^n \tau_j b_j) \right) \right] \right\}$ <p>当 <math>\lambda_0 \leq x \leq a_1</math> 时, 有</p> $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l-x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{\sum_{j=1}^n \tau_j b_j}{\sigma_0 l} x$ <p>当 <math>a_{i-1} \leq x \leq a_i</math> 时, 有</p> $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l-x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{(\sum_{j=1}^n \tau_j b_j) x}{\sigma_0 l} - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} \tau_j (x - a_j)}{\sigma_0}$ <p>当 <math>a_n \leq x \leq l - \lambda_0</math> 时, 有</p> $f_x = \frac{1}{\sigma_0 \cos \beta} \left[ \frac{\gamma x (l-x)}{2} + \frac{(\gamma_J - \gamma) \lambda_0^2}{2} \right] + \frac{(\sum_{j=1}^n \tau_j b_j) (l-x)}{\sigma_0 l}$

## 第五节 孤立档的控制条件

孤立档的控制条件要根据档内的具体情况进行具体分析, 选用合适的方法确定。孤立档无非均布荷载作用时, 可采用临界档距判定控制条件。孤立档有非均布荷载作用时, 应以既满足跨越安全间距又不使应力不必要的加大为原则, 确定控制条件。对小孤立档, 在条件允许的情况下, 应适当放松架空线, 降低最大使用应力, 这样不仅有利于运行, 也便于施工挂线。具有非均布荷载的孤立档, 因荷载作用的具体情况不同, 因而不便采用临界档距的方法判定有效控制条件, 通常采用试推比较法或比较折中法逐个档距确定控制条件。这类孤立档在输电线路中并不多。

### 一、试推比较法

首先确定出可能的控制条件, 假定其中某个条件为有效控制条件, 利用状态方程式 (8-45) 推求其他可能控制条件下的应力值。若均不超过各自的应力许用值, 则假定正确。若其中某一个条件下的应力超出其限度值, 则应以该条件作为有效控制条件。若有多个条件的应力超限, 则以超限最多的条件作为假定控制条件, 重新进行计算。必要时, 可改变原假定有效控制条件的应力限度或放宽实际控制条件的应力限度。

### 二、比较折中法

在孤立档的可能控制条件中, 存在有应力达到最大限定应力和最小限定应力相应的两种条件。例如在最大荷载下上人检修时, 为保证架空线和杆塔构架的强度, 应力有一个上限最大值; 在最高温度下上人检修时, 为保证对跨越物的安全距离, 应力有一个下限的最小值。各可能控制条件下的  $F_i$  计算式为

$$F_i = \frac{K_i}{\sigma_{0i}^2} - \sigma_{0i} - \alpha E t_i \cos \beta \quad (8-51)$$

利用上式可以得到最大限定应力条件下的  $F_a$ , 最小限定应力条件下的  $F_b$ 。由最大限定

应力条件推求出的某一气象条件下的应力，必须大于由最小限定应力条件推求出的同一气象条件下的应力，否则各限定条件是相互矛盾的。而  $F_i$  值大者推求出的某一气象条件下的应力小，所以必须有  $F_a \leq F_b$  成立。若  $F_a \leq F_b$  不成立，可采取增加杆塔高度，进一步降低最小限定应力值的方法使  $F_b$  增大；或采用提高杆塔和架空线强度，加大最大限定应力值的方法，使  $F_a$  减小，最终满足  $F_a \leq F_b$  的要求。此时可在  $F_a$  与  $F_b$  之间选定一个折中的  $F_m$  作为控制条件，即

$$F_a \leq F_m \leq F_b \quad (8-52)$$

以  $F_m$  值为已知状态，利用式 (8-45) 即可求解任一状态  $n$  下的架空线应力。其方程为

$$\sigma_{0n}^2 \{ \sigma_{0n} + F_m + \alpha E t_n \cos \beta \} = K_n \quad (8-53)$$

用折中的  $F_m$  作为控制条件，能保证满足最大限定应力和最小限定应力的要求，且具有一定的裕度。当无最小限定应力的条件限制时，应取  $F_i$  中的最大者作为  $F_m$ 。

## 第六节 非均布垂直荷载和水平荷载共同作用下架空线的计算

在非均布垂直荷载作用下，又有横向水平风压荷载作用时，由于架空线、绝缘子串、集中荷载物的迎风面积、体形等不同，使风荷载沿档距亦成非均匀分布，各不同荷载段上的综合荷载的方向可能不一致，因此架空线、绝缘子串和集中荷载物在风偏后可能不在同一个平面内，架空线为一般的空间曲线，其弧垂、应力和线长等的计算趋于复杂。

非均布垂直荷载和水平荷载共同作用下架空线的计算，仍然可用分解法。将风偏后的空间曲线及其作用在其上的荷载投影到两个相互垂直的平面内（一般为水平平面和垂直平面），利用平面力系的平衡条件求出各投影平面内架空线的悬挂曲线方程、弧垂和应力，然后再进行合成。

### 一、风偏后非均布荷载下架空线的弧垂

设架空线上的所有荷载（包括耐张绝缘子串）的垂直分量在相当梁上任一点引起的荷载剪力为  $Q_{vx}$ ，水平分量引起的荷载剪力为  $Q_{hx}$ ，架空线顺线路方向的水平张力为  $T_0$ ，则任一点弧垂的垂直投影可仿式 (8-5) 直接写为

$$f_{vx} = \frac{1}{T_0} \sum_{i=0}^k \frac{(Q_{vi} + Q'_{vi}) \Delta l_i}{2} \quad (8-54)$$

式中  $Q_{vi}$ 、 $Q'_{vi}$ ——分别为第  $i$  区段左、右两端的垂向荷载剪力；

$\Delta l_i$ ——第  $i$  区段荷载的作用长度。

同理，弧垂的水平投影计算式为

$$f_{hx} = \frac{1}{T_0} \sum_{i=0}^k \frac{(Q_{hi} + Q'_{hi}) \Delta l_i}{2} \quad (8-55)$$

式中  $Q_{hi}$ 、 $Q'_{hi}$ ——分别为第  $i$  区段左、右两端的横向水平荷载剪力。

风偏后架空线任一点的综合弧垂是该点垂直投影弧垂和水平投影弧垂的合成，即

$$f_x = \sqrt{f_{vx}^2 + f_{hx}^2} = \frac{1}{2T_0} \sqrt{\left[ \sum_{i=0}^k (Q_{vi} + Q'_{vi}) \Delta l_i \right]^2 + \left[ \sum_{i=0}^k (Q_{hi} + Q'_{hi}) \Delta l_i \right]^2} \quad (8-56)$$

### 二、风偏后非均布荷载下架空线的线长

设  $z$  坐标轴通过左悬挂点  $A$  且位于水平投影平面内，其正向与  $f_{hx}$  同向，则风偏后的档

内线长 (包括耐张绝缘子串) 计算式为

$$L = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2} dx$$

由式 (8-8) 推知

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \tan\beta - \frac{Q_{wr}}{T_0} \quad (8-57)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{Q_{hx}}{T_0} \quad (8-58)$$

所以

$$\begin{aligned} L &= \int_0^l \sqrt{1 + \left(\tan\beta - \frac{Q_{wr}}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{Q_{hx}}{T_0}\right)^2} dx \\ &= \int_0^l \sqrt{1 + \tan^2\beta - 2\tan\beta \frac{Q_{wr}}{T_0} + \left(\frac{Q_{wr}}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{Q_{hx}}{T_0}\right)^2} dx \\ &= \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \sqrt{1 + \cos^2\beta \left[\left(\frac{Q_{wr}}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{Q_{hx}}{T_0}\right)^2 - 2\tan\beta \frac{Q_{wr}}{T_0}\right]} dx \\ &= \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \left\{ 1 + \frac{\cos^2\beta}{2} \left[\left(\frac{Q_{wr}}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{Q_{hx}}{T_0}\right)^2 - 2\tan\beta \frac{Q_{wr}}{T_0}\right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cos^4\beta}{8} \left[\left(\frac{Q_{wr}}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{Q_{hx}}{T_0}\right)^2 - 2\tan\beta \frac{Q_{wr}}{T_0}\right]^2 + \dots \right\} dx \end{aligned}$$

通常  $\frac{Q_{wr}}{T_0} \ll 1$ 、 $\frac{Q_{hx}}{T_0} \ll 1$ ，略去上式微量项，并注意到  $\int_0^l Q_{wr} dx = 0$ ，上式可近似为

$$\begin{aligned} L &\approx \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{hx}}{T_0}\right)^2 \cos^2\beta + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{wr}}{T_0}\right)^2 \cos^2\beta (1 - \sin^2\beta) \right\} dx \\ &= \frac{1}{\cos\beta} \int_0^l \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{hx}}{T_0}\right)^2 \cos^2\beta + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{wr}}{T_0}\right)^2 \cos^4\beta \right\} dx \\ &= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\cos^3\beta}{2T_0^2} \int_0^l Q_{wr}^2 dx + \frac{\cos\beta}{2T_0^2} \int_0^l Q_{hx}^2 dx \\ &= \frac{l}{\cos\beta} + \frac{\cos^3\beta}{6T_0^2} \sum \frac{Q_{vi}^3 - Q_{vi}'^3}{p_{vi}} + \frac{\cos\beta}{6T_0^2} \sum \frac{Q_{hi}^3 - Q_{hi}'^3}{p_{hi}} \quad (8-59) \end{aligned}$$

式中  $p_{vi}$ 、 $p_{hi}$ ——分别为第  $i$  区段上的垂向和横向荷载集度。

显然，风偏后架空线的线长比无风时有所增加。

### 三、风偏后非均布荷载下的架空线状态方程式

架空线受垂直荷载和水平荷载同时作用时，其线路方向的水平张力  $T_0$  仍然处处相等，因而其状态方程式只需将有风时的线长公式 (8-59) 代入式 (8-41) 即可得到，其形式仍与式 (8-45) 相同，只是有风时线长系数采用的计算式为

$$K = \frac{E \cos^5\beta}{6l_1 A^2} \sum \frac{Q_{vi}^3 - Q_{vi}'^3}{p_{vi}} + \frac{E \cos^3\beta}{6l_1 A^2} \sum \frac{Q_{hi}^3 - Q_{hi}'^3}{p_{hi}} \quad (8-60)$$

### 第七节 耐张绝缘子串的水平及垂直投影长度

耐张绝缘子串的水平投影长度  $\lambda_0$  近似取值为  $\lambda \cos\beta$ ，对架空线弧垂和应力的计算影响很小，一般可以满足工程要求的精度。但在某些特殊情况下，如检查绝缘子串末端的间隙或所悬挂设备的位置，以及耐张绝缘子串很长而档距较小下弧垂和应力的计算等，若仍认为  $\lambda_0 = \lambda \cos\beta$ ，可能会产生不能容许的较大误差，这时需要比较精确地计算耐张绝缘子串的水平投影长度  $\lambda_0$  和垂直投影长度  $\lambda_v$ 。

#### 一、耐张绝缘子串水平和垂直投影长度的精确计算

耐张绝缘子串是由一些不易弯曲的金具零件和绝缘子铰接组装而成。其中第  $i$  个部件的长度为  $\lambda_i$ 、荷载为  $g_i$ ，在水平张力  $T_0$  作用下，呈现图 8-5 (a) 所示的弦多边形形状。图中  $A$  为与杆塔连接点， $C$  为与线夹连接点。假定部件数为  $n$ ，各个部件为刚体，其长度不受张力和温度的影响。取第  $i$  个部件为研究对象 [见图 8-5 (b)]，列出其端点的力矩平衡方程式为

$$T_0 \lambda_{iv} - (R_A - \sum_{j=i}^n g_j) \lambda_{i0} - \frac{1}{2} g_i \lambda_{i0} = 0$$

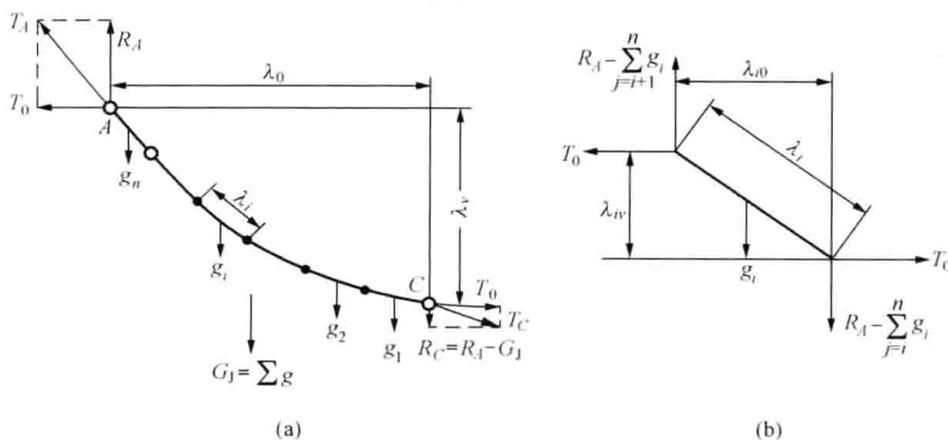


图 8-5 耐张绝缘子串投影长度精确计算示意图

(a) 整串受力图；(b) 单个部件受力图

或

$$T_0 \lambda_{iv} = (R_A - \sum_{j=i}^n g_j + \frac{1}{2} g_i) \lambda_{i0}$$

又

$$\lambda_{iv}^2 = \lambda_i^2 - \lambda_{i0}^2$$

由上二式可解得

$$\lambda_{i0} = \frac{T_0 \lambda_i}{\sqrt{(R_A - \sum_{j=i}^n g_j + \frac{1}{2} g_i)^2 + T_0^2}}$$

$$\lambda_{iv} = \frac{(R_A - \sum_{j=i}^n g_j + \frac{1}{2} g_i) \lambda_i}{\sqrt{(R_A - \sum_{j=i}^n g_j + \frac{1}{2} g_i)^2 + T_0^2}}$$

所以整个耐张绝缘子串的水平投影长度和垂直投影长度分别为

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} = \sum_{i=1}^n \frac{T_0 \lambda_i}{\sqrt{(R_A - \sum_{j=i}^n g_j + \frac{1}{2} g_i)^2 + T_0^2}} \quad (8-61)$$

$$\lambda_v = \sum_{i=1}^n \lambda_{iv} = \sum_{i=1}^n \frac{(R_A - \sum_{j=i}^n g_j + \frac{1}{2} g_i) \lambda_i}{\sqrt{(R_A - \sum_{j=i}^n g_j + \frac{1}{2} g_i)^2 + T_0^2}} \quad (8-62)$$

当利用上述公式计算时,  $R_A$  一般是不知道的, 这时可先假定  $\lambda_0 \approx \lambda \cos \beta$ , 利用本章第三节有关公式算出  $R_A$  的近似值, 再代入式 (8-61)、式 (8-62) 得到较准确的  $\lambda_0$ 、 $\lambda_v$ 。若要求的精度较高时, 可将求得的  $\lambda_0$  再代入有关公式求得新的  $R_A$ , 反复迭代直至达到满意的精度。一般  $R_A$  受  $\lambda_0$  的影响很小, 不必多次反复运算。

## 二、耐张绝缘子串水平投影长度和垂直投影长度的近似计算

### 1. 按悬链线计算

当绝缘子串很长而每个部件长度相对显得很短, 且其荷载沿串长大体均匀分布时, 可将耐张绝缘子串视为处处铰接, 沿串长均布着单位长度荷载  $p_j = G_j / \lambda$  的悬链线, 如图 8-6 所示。根据悬链线上任意两点间的应力 (张力) 关系, 可得垂直投影长度为

$$\begin{aligned} \lambda_v &= \frac{T_A - T_C}{p_j} \\ &= \frac{\lambda}{G_j} [\sqrt{T_0^2 + R_A^2} - \sqrt{T_0^2 + (R_A - G_j)^2}] \end{aligned} \quad (8-63)$$

由于张力沿悬链线的切向方向, 有

$$d\lambda_x = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \sqrt{1 + \left(\frac{R_x}{T_0}\right)^2} dx = \frac{1}{T_0} \sqrt{T_0^2 + R_x^2} dx$$

或写成

$$dx = \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 + R_x^2}} d\lambda_x$$

而

$$R_x = R_A - p_j \lambda_x$$

所以

$$d\lambda_x = -\frac{1}{p_j} dR_x$$

故有

$$dx = -\frac{T_0}{p_j \sqrt{T_0^2 + R_x^2}} dR_x$$

对上式进行积分, 即可求得耐张绝缘子串的水平投影长度为

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \int_0^{x_c} dx = -\frac{T_0}{p_j} \int_{R_A}^{R_C} \frac{1}{\sqrt{T_0^2 + R_x^2}} dR_x = \frac{T_0}{p_j} \left[ \operatorname{arcsch} \frac{R_A}{T_0} - \operatorname{arcsch} \frac{R_C}{T_0} \right] \\ &= \frac{T_0}{p_j} \left[ \operatorname{arcsch} \frac{R_A}{T_0} - \operatorname{arcsch} \frac{R_A - G_j}{T_0} \right] \end{aligned} \quad (8-64)$$

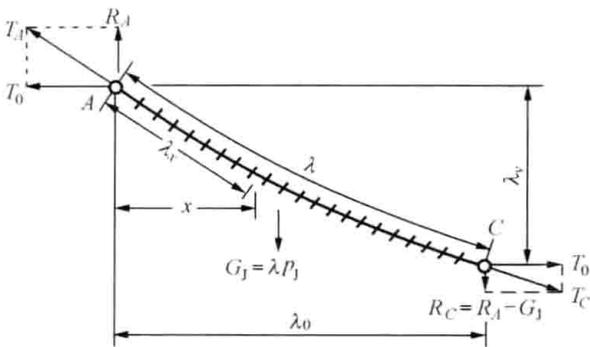


图 8-6 耐张绝缘子串投影长度按悬链线计算示意图

运用式 (8-63)、式 (8-64) 计算时,  $R_A$  的获得方法与式 (8-61) 中的说明相同。式 (8-64) 算得的  $\lambda_0$  比实际的要短一些, 这是由于把弦多边形假定为悬链线的缘故。

## 2. 按直棒计算

在正常张力的档距内, 由于架空线张力很大, 耐张绝缘子串几乎被拉直。工程上计算跳线悬挂点位置时 (相当于图 8-5 中的 C 点), 经常把绝缘子串看作为均布荷载的刚性直棒, 此时相当于式 (8-61)、式 (8-62) 中的部件数  $n=1$  的情况, 则有

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &= \frac{T_0 \lambda}{\sqrt{\left(R_A - \frac{1}{2} G_J\right)^2 + T_0^2}} = \lambda \cos \theta \\ \lambda_v &= \frac{\left(R_A - \frac{1}{2} G_J\right) \lambda}{\sqrt{\left(R_A - \frac{1}{2} G_J\right)^2 + T_0^2}} = \lambda \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (8-65)$$

其中

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_A - G_J/2}{T_0}\right) \quad (8-66)$$

上式中的  $\theta$  为直棒绝缘子串与水平轴间的倾斜角。利用式 (8-65) 算得的  $\lambda_0$  要比实际的长一些。

## 第八节 孤立档架空线应力弧垂计算举例

某 220kV 架空输电线路进变电站的孤立档如图 8-7 所示, 档距  $l=45\text{m}$ , 高差  $h=9\text{m}$ ; 导线采用水平排列, 每相采用单根 LGJQ-300 钢芯铝绞线, 截面积  $A=335\text{mm}^2$ , 弹性系数  $E=72590\text{MPa}$ , 温度膨胀系数  $\alpha=20 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。进线架 (A 侧) 悬挂单联 14 片 XP-70 型耐张绝缘子串, 串长  $\lambda_1=2.6\text{m}$ 。终端塔 (B 侧) 悬挂双联耐张绝缘子串, 每联 14 片 XP-70 型绝缘子, 串长  $\lambda_2=3.0\text{m}$ 。档内距 A 悬点  $a=18\text{m}$  处装有引下线, 重  $q=147.9\text{N}$ 。档内跨越编号为 1、2、3 的旁路母线, 母线高  $D=11\text{m}$ , 间距 4m, 中相距 A 悬点 10m。要求在最高气温 (最大弧垂气象) 和引下线处单相带电上人检修时, 导线距母线的间距  $\delta \geq 2.55\text{m}$ ; 气温  $+15^\circ\text{C}$  上人检修时, 引下线处的集中荷载总重 1643.2N。由于进线架限制, 正常运行时架空线允许张力  $T_0 \leq 6867\text{N}$ , 气温  $-15^\circ\text{C}$  上人检修时允许张力  $T_0 \leq 11770\text{N}$ 。基本数据已整理如表 8-4、表 8-5 所示, 试计算架线观测、竣工时的应力和弧垂。

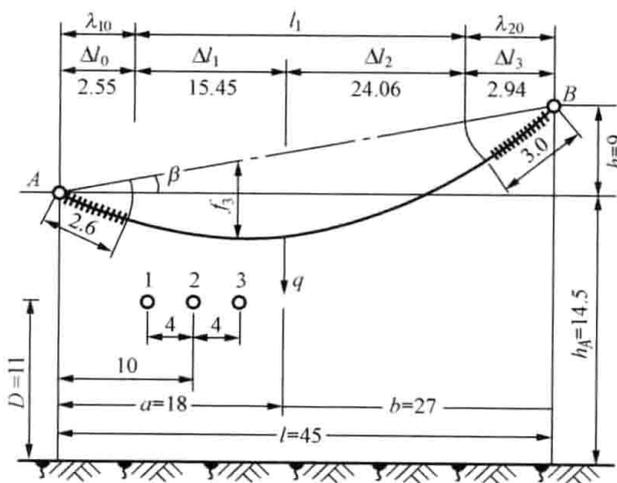


图 8-7 孤立档架空线计算图例 (单位: m)

由于进线架限制, 正常运行时架空线允许张力  $T_0 \leq 6867\text{N}$ , 气温  $-15^\circ\text{C}$  上人检修时允许张力  $T_0 \leq 11770\text{N}$ 。基本数据已整理如表 8-4、表 8-5 所示, 试计算架线观测、竣工时的应力和弧垂。

表 8-4

基本数据表

项目	$l$ (m)	$h$ (m)	$\cos\beta$	$a$ (m)	$b$ (m)	$\lambda_{10}$	$\lambda_{20}$
数据	45	9	0.98058	18	27	2.55	2.94
项目	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$d$ (mm)	$E$ (MPa)	$\alpha$ (1/°C)	$p$ (N/m)	$[\sigma_0]$ (MPa)	$q$ (N)
数据	335	23.7	72590	$20 \times 10^{-6}$	10.95	20.5	147.9

注  $\lambda_{10} = \lambda_1 \cos\beta$ ;  $\lambda_{20} = \lambda_2 \cos\beta$ 。

表 8-5

气象条件数据和相应荷载

项目 气象	气温 (°C)	风速 (m/s)	冰厚 (mm)	绝缘子串荷载 (N)						集中荷载 (N)			架空线荷载集度 (N/m)		
				$G_{v1}$	$G_{h1}$	$G_{J1}$	$G_{v2}$	$G_{h2}$	$G_{J2}$	$q_v$	$q_h$	$q$	$p_v$	$p_h$	$p$
最低气温	-40	0	0	801.9	0	801.9	1643.2	0	1643.2	147.9	0	147.9	10.95	0	10.95
最厚覆冰	-5	10	10	1150.2	42.8	1151.0	2300.4	59.2	2301.2	262.9	39.4	265.8	20.30	3.22	20.55
最大风速	-5	30	0	801.9	220.2	831.6	1643.2	302.3	1670.8	147.9	131.5	197.9	10.95	10.79	15.37
最高气温	+40	0	0	801.9	0	801.9	1643.2	0	1643.2	147.9	0	147.9	10.95	0	10.95
上人检修	-15	0	0	801.9	0	801.9	1643.2	0	1643.2	1643.2	0	1643.2	10.95	0	10.95

### 一、计算各种情况下的线长系数

本孤立档耐张绝缘子串异长异重, 需分别作出无冰无风、最大风速、覆冰有风和上人检修四种气象所对应的相当简支梁和相应的剪力图, 将有关数据代入式 (8-44), 得到各种情况下的线长系数  $K$ 。

#### 1. 无风情况下的线长系数

最低气温、最高气温对应的均为无冰无风情况, 荷载大小与作用位置相同, 线长系数相同, 其计算过程如下:

(1) 计算无风无冰情况下相当简支梁上的荷载, 作出相当简支梁。

$$p_0 = \frac{G_{v1}}{\lambda_{10}} = \frac{801.9}{2.55} = 314.4706(\text{N/m})$$

$$p_1 = p_2 = \frac{p}{\cos\beta} = \frac{10.95}{0.98058} = 11.167(\text{N/m})$$

$$p_3 = \frac{G_{v2}}{\lambda_{20}} = \frac{1643.2}{2.94} = 558.912(\text{N/m})$$

$$q = 147.9(\text{N})$$

相当简支梁如图 8-8 (a) 所示。

(2) 计算无冰无风情况下相当简支梁上各点的剪力, 作出剪力图。

$$R_A = \frac{1}{l} \left[ \sum p_i \Delta l_i \left( \frac{\Delta l_i}{2} + b_i \right) + q b_q \right]$$

$$= \frac{1}{l} \left[ p_0 \lambda_{10} \left( \frac{\lambda_{10}}{2} + b_0 \right) + p_1 \Delta l_1 \left( \frac{\Delta l_1}{2} + b_1 \right) + p_2 \Delta l_2 \left( \frac{\Delta l_2}{2} + b_2 \right) + p_3 \lambda_{20} \left( \frac{\lambda_{20}}{2} + b_3 \right) + q b_q \right]$$

其中

$$p_0 \lambda_{10} \left( \frac{\lambda_{10}}{2} + b_0 \right) = 314.4706 \times 2.55 \times \left[ \frac{2.55}{2} + (45 - 2.55) \right] = 35063.08 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$p_1 \Delta l_1 \left( \frac{\Delta l_1}{2} + b_1 \right) = 11.167 \times 15.45 \times \left( \frac{15.45}{2} + 27 \right) = 5991.035 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$p_2 \Delta l_2 \left( \frac{\Delta l_2}{2} + b_2 \right) = 11.167 \times 24.06 \times \left( \frac{24.06}{2} + 2.94 \right) = 4022.06 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$p_3 \lambda_{20} \left( \frac{\lambda_{20}}{2} + 0 \right) = 558.9116 \times 2.94 \times \left( \frac{2.94}{2} \right) = 2415.504 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$q b_q = 147.9 \times 27 = 3993.30 (\text{N} \cdot \text{m})$$

所以

$$\begin{aligned} Q_A = R_A &= \frac{1}{45} \times [35063.08 + 5991.035 + 4022.06 + 2415.504 + 3993.30] \\ &= 1144.1 (\text{N}) \end{aligned}$$

$$Q_0 = Q_A = 1144.1 (\text{N})$$

$$Q'_0 = Q_A - G_{v1} = 1144.11 - 314.47 \times 2.55 = 342.21 (\text{N})$$

$$Q_1 = Q'_0 = 342.21 (\text{N})$$

$$Q'_1 = Q_1 - p_2 \Delta l_2 = 342.21 - 11.167 \times 15.45 = 169.68 (\text{N})$$

$$Q_2 = Q'_1 - q = 169.68 - 147.9 = 21.78 (\text{N})$$

$$Q'_2 = Q_2 - p_2 \Delta l_2 = 21.78 - 268.67 = -246.89 (\text{N})$$

$$Q_3 = Q'_2 = -246.89 (\text{N})$$

$$Q'_3 = Q_3 - p_3 \lambda_{20} = -246.89 - 1643.20 = -1890.09 (\text{N})$$

相应的剪力图如图 8-8 (b) 所示。

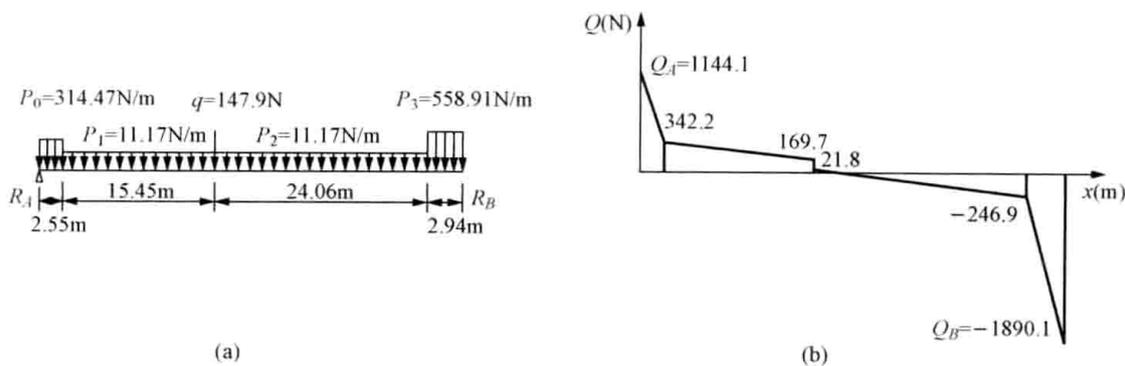


图 8-8 无冰无风下的相当简支梁和剪力图

(a) 相当简支梁; (b) 剪力图

(3) 计算线长系数。对剪力图的第一区段, 有

$$[Q_0^3 - (Q'_0)^3] / p_0 = \frac{1144.11^3 - 342.21^3}{314.47} = 4634940.72 (\text{N}^2 \cdot \text{m})$$

同理, 可得其他区段的  $[Q_i^3 - (Q'_i)^3] / p_i$  分别为 3151296.73, 1348616.78, 12054154.51 ( $\text{N}^2 \cdot \text{m}$ ), 所以

$$K = \frac{E \cos^5 \beta}{6 l_1 A^2} \sum \frac{Q_i^3 - (Q'_i)^3}{p_i}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{72590 \times 0.98058^5}{6 \times 39.51 \times 335^2} (4634940.72 + 3151296.73 + 1348616.78 + 12054154.51) \\
 &= 52414.89(\text{MPa})^3
 \end{aligned}$$

上人检修情况的线长系数的计算过程与上述相同, 仅集中荷载的大小不同。

2. 有风情况下的线长系数

最大风速和覆冰有风情况均有风荷载作用, 需分别绘制垂直投影平面、水平投影平面的相当简支梁和剪力图 (图 8-9 和图 8-10), 方法同上, 然后按式 (8-60) 计算其线长系数。

按相当简支梁剪力图算得的线长系数  $K$  列在表 8-6 中。

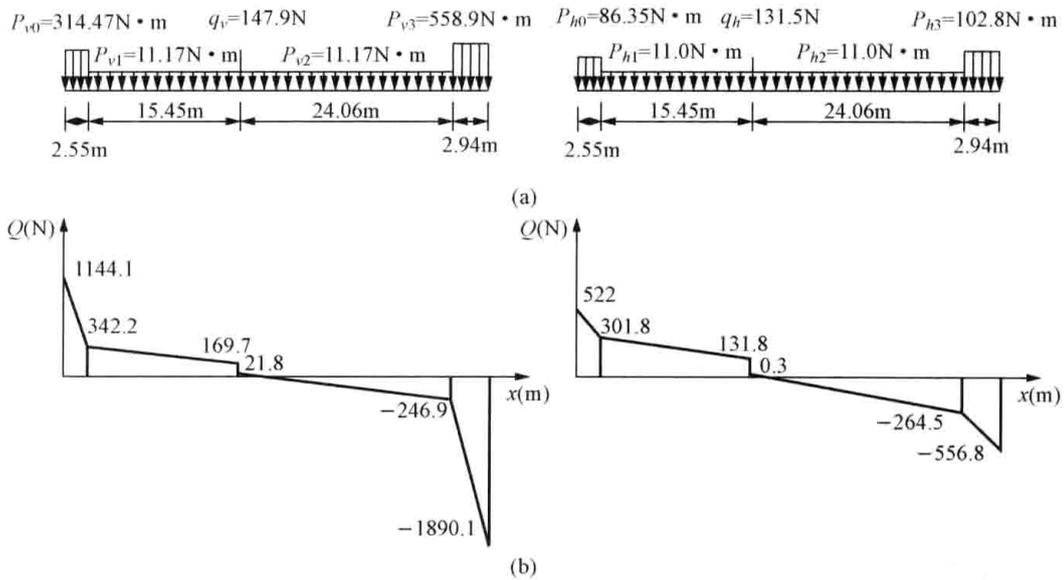


图 8-9 最大风速下的相当简支梁和剪力图  
(a) 相当简支梁; (b) 剪力图

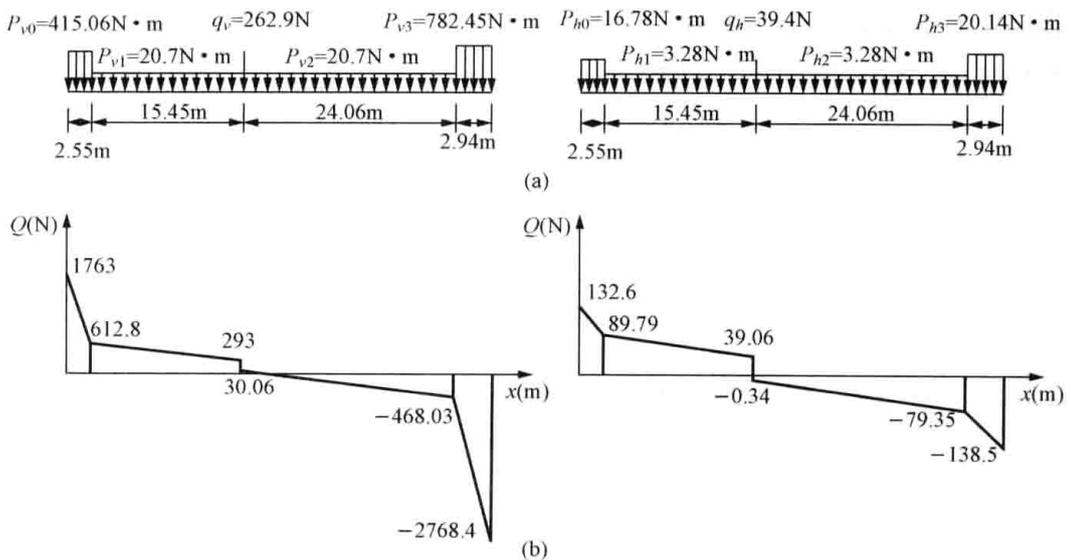


图 8-10 覆冰有风下的相当简支梁和剪力图  
(a) 相当简支梁; (b) 剪力矩

## 3. 线长系数的简化计算

工程上常将两端耐张串视为等长度  $\lambda_0 = (\lambda_{10} + \lambda_{20})/2$ , 此时  $l_1 = l - 2\lambda_0$ ; 有风时, 将综合荷载视为作用于同一平面内, 这样本问题就简化为等长异重、一个集中荷载的孤立档问题, 可以应用式 (8-46) 直接计算求解。对无冰无风情况, 由于

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \frac{\lambda_{10} + \lambda_{20}}{2} = \frac{2.55 + 2.94}{2} = 2.745(\text{m}) \\ l_1 &= l - 2\lambda_0 = 45 - 2 \times 2.745 = 39.51(\text{m}) \\ \gamma &= \frac{p}{A} = \frac{10.95}{335} = 32.687 \times 10^{-3}(\text{MPa/m}) \\ \gamma_\beta &= \frac{\gamma}{\cos\beta} = \frac{32.687 \times 10^{-3}}{0.98058} = 33.334 \times 10^{-3}(\text{MPa/m}) \\ W_1 &= \gamma_\beta l_1 = 33.334 \times 10^{-3} \times 39.51 = 1.317(\text{MPa}) \\ \tau_1 &= \frac{q}{A} = \frac{147.9}{335} = 0.4415(\text{MPa})\end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned}K' &= \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 6\lambda_0) + \frac{12}{W_1 \gamma_\beta} \left[ \frac{\lambda_0}{A} \left( \frac{W_1 (G_{J1} + G_{J2})}{2} + \frac{G_{J1}^2 + G_{J2}^2}{3A} + G_{J1} \sum_{i=1}^n \tau_i \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{(G_{J1} - G_{J2}) \lambda_0}{2Al} \left( \frac{(G_{J1} - G_{J2}) \lambda_0}{2A} + 2 \sum_{i=1}^n \tau_i a_i \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{i=1}^n \left( \gamma_\beta + \frac{\tau_i}{l} \right) \tau_i a_i b_i + \frac{2}{l} \sum_{i=1}^{n-1} \left( \tau_i a_i \sum_{j=i+1}^n \tau_j b_j \right) \right] \right\} \\ &= \frac{32.687^2 \times 10^{-6} \times 72590 \times 0.98058^3}{24} \\ &\quad \times \left\{ 39.51 \times (39.51 + 6 \times 2.745) + \frac{12}{1.317 \times 33.334 \times 10^{-3}} \right. \\ &\quad \times \left[ \frac{2.745}{335} \left( \frac{1.317 \times (801.9 + 1643.2)}{2} + \frac{801.9^2 + 1643.2^2}{3 \times 335} + 801.9 \times 0.4415 \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{(801.9 - 1643.2) \times 2.745}{2 \times 335 \times 45} \left( \frac{(801.9 - 1643.2) \times 2.745}{2 \times 335} + 2 \times 18 \times 0.4415 \right) \right. \\ &\quad \left. \left. + \left( 0.033334 + \frac{0.4415}{45} \right) \times 0.4415 \times 18 \times 27 + 0 \right] \right\} \\ &= 51347.47(\text{MPa})^3\end{aligned}$$

同理, 可得上人检修、最大风速和覆冰有风时的线长系数的近似值  $K'$ , 其值也列入表 8-6 中。表中同时给出了视  $K$  为精确值的  $K'$  的相对误差  $\delta_K$ , 从中可以看出, 二者之间的误差很小。

表 8-6

各种运行情况下的线长系数

气象情况	无冰无风	最大风速	覆冰有风	上人检修
线长系数 $K$ (MPa) <sup>3</sup>	52414.89	70141.35	133726.73	361436.85
线长系数 $K'$ (MPa) <sup>3</sup>	51347.47	71526.83	131868.11	360900.17
误差 $\delta_K$ (%)	-2.037	1.975	-1.390	-0.148

## 二、确定控制条件

### 1. 确定最小限定应力

架空线在最高气温和带电上人检修时, 要求对旁路母线 1、2、3 的间距  $\delta \geq 2.55\text{m}$ , 故存在最小限定应力的要求, 宜用比较折中法确定控制条件。

(1) 最高气温确定的最小限定应力。

根据具体布置情况 (见图 8-6), 母线 1、2、3 距悬挂点 A 的水平距离分别为 6、10、14m, 母线 1 上方对应的架空线允许弧垂为

$$f_1 = h_A + x \tan \beta - D - \delta = 14.5 + 6 \times 9/45 - 11 - 2.55 = 2.15(\text{m})$$

同理, 可得母线 2 允许弧垂  $f_2 = 2.95\text{m}$ , 母线 3 允许弧垂  $f_3 = 3.75\text{m}$ 。

根据无冰无风对应的相当简支梁, 悬挂点 A 处的荷载剪力  $Q_A = 1144.11\text{N}$ , 根据式 (8-4), 可得允许弧垂决定的最小允许应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{01} &= \frac{T_{01}}{A} = \frac{M_x}{Af_1} = \frac{1}{Af_1} \left\{ Q_A x - \left[ G_{11} \left( x - \frac{\lambda_{10}}{2} \right) + \frac{p}{\cos \beta} \frac{(x - \lambda_{10})^2}{2} \right] \right\} \\ &= \frac{1}{335 \times 2.15} \left\{ 1144.11 \times 6 - \left[ 801.9 \times \left( 6 - \frac{2.55}{2} \right) + \frac{10.95}{0.98058} \times \frac{(6 - 2.55)^2}{2} \right] \right\} \\ &= 4.178(\text{MPa}) \end{aligned}$$

同理, 得到  $\sigma_{02} = 4.184\text{MPa}$ ,  $\sigma_{03} = 4.045\text{MPa}$ 。

显然应取三个应力中的最大者, 即  $\sigma_{02} = 4.184\text{MPa}$  作为最高气温时的最小限定应力。

(2) 带电上人检修确定的最小限定应力。

在集中荷载处上人检修时, 对架空线与母线间距的要求和最高气温时相同, 故三个允许弧垂也和最高气温的相同。根据上人检修时的相当简支梁, 悬挂点 A 处的荷载剪力  $Q_A = 2041.29\text{N}$ , 利用式 (8-4), 得到三个允许弧垂决定的最小允许应力分别为  $\sigma_{01} = 11.652\text{MPa}$ ,  $\sigma_{02} = 13.262\text{MPa}$ ,  $\sigma_{03} = 14.043\text{MPa}$ 。取最大者  $\sigma_{03} = 14.043\text{MPa}$ , 作为该情况的最小限定应力。

### 2. 确定最大应力限定条件并选定控制条件

可能的最大应力限定条件有最低气温、覆冰有风、最大风速和上人检修。由式 (8-51) 计算各可能控制条件的  $F_a$  值, 列于表 8-7, 其中  $F_a$  值最大者 (覆冰有风) 为最大应力限制条件。表中同时给出了按式 (8-51) 计算出的两种最小限定应力相应的  $F_b$  值, 其中最小者 (上人检修) 为最小应力限制条件。

表 8-7 各限定条件的  $F$  值

项 目 限定条件	气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	线长系数 $K$ ( $\text{MPa}$ ) <sup>3</sup>	最大限定应力 ( $\text{MPa}$ )	最小限定应力 ( $\text{MPa}$ )	$F_a$ 值 ( $\text{MPa}$ )	$F_b$ 值 ( $\text{MPa}$ )
最低气温	-40	52414.89	20.50	—	161.1674	—
覆冰有风	-5	133726.73	20.50	—	304.8256	—
最大风速	-5	70141.35	20.50	—	153.5219	—
上人检修	-15	361436.85	35.134	—	279.0242	—
上人检修	+15	361436.85	—	14.0433	—	1797.3140
最高气温	+40	52414.89	—	4.1838	—	2933.2930

为使架空线张力和与母线的间距均有裕度, 应取折中的  $F_a \leq F_m \leq F_b$  (如  $F_m = 480\text{MPa}$ ) 作为总的控制条件。本例裕度很大, 可考虑进一步降低终端塔塔高, 使  $F_b$  向  $F_a$  靠近, 则设计更加合理。

### 三、计算各种情况下的实际应力

以  $F_m = 480\text{MPa}$  作为已知控制条件, 利用式 (8-53) 计算各种气象情况下的实际应力, 如表 8-8 所示。可以看出, 架空线的应力既大于所要求的最小限定应力, 又小于最大限定应力。表中同时给出了由近似线长系数算得的应力  $\sigma'_0$  和其相对误差, 误差  $\delta_\sigma$  均明显小于误差  $\delta_K$ , 因此采用平均等长耐张串代替异长耐张串计算线长系数, 在工程上是可行的。

表 8-8 各种运行情况下的实际应力

条件	最高气温	最低气温	覆冰有风	最大风速	上人检修 (计算张力时)	上人检修 (检查间距时)
$\sigma_0$ (MPa)	9.7913	10.9890	16.5300	12.0270	27.2731	26.1754
$\sigma'_0$ (MPa)	9.6919	10.8780	16.4166	12.1437	27.2534	26.1564
误差 $\delta_\sigma$ (%)	-1.0152	-1.0101	-0.6860	0.9703	-0.0722	-0.0726

### 四、计算架线观测应力和弧垂

当采用观测弧垂法架线时, 一般紧线侧不挂绝缘子串, 悬挂或暂时不悬挂引下线。待观测弧垂工作结束后, 将紧线侧端的架空线割去耐张绝缘子串长度, 再加挂耐张绝缘子串和引下线, 此时的竣工弧垂恰好符合设计要求。本例在 B 终端塔侧紧线, 暂不安装引下线。

(1) 计算架线观测情况线长系数  $K''$  (不安装引下线)。架线观测时无冰无风, A 端有耐张串, 所以

$$\gamma = \frac{p}{A} = \frac{10.95}{335} = 32.687 \times 10^{-3} \quad (\text{MPa/m})$$

$$l_1 = l - \lambda_{10} = 45 - 2.55 = 42.45 \quad (\text{m})$$

$$W_1 = \frac{\gamma l_1}{\cos\beta} = \frac{32.687 \times 10^{-3} \times 42.45}{0.98058} = 1.415 \quad (\text{MPa})$$

$$\gamma_\beta = \frac{\gamma}{\cos\beta} = \frac{32.687 \times 10^{-3}}{0.98058} = 33.334 \times 10^{-3} \quad (\text{MPa/m})$$

根据式 (8-50), 有

$$\begin{aligned} K'' &= \frac{\gamma^2 E \cos^3 \beta}{24} \left\{ l_1 (l_1 + 3\lambda_{10}) + \frac{6\lambda_{10} G_{J1}}{W_1 \gamma_\beta A} \left( W_1 + \frac{2G_{J1}}{3A} \right) - \frac{3\lambda_{10}^2 (W_1 + G_{J1}/A)^2}{W_1 \gamma_\beta l} \right\} \\ &= \frac{(32.687 \times 10^{-3})^2 \times 72590 \times 0.98058^3}{24} \left\{ 42.45 \times (42.45 + 3 \times 2.55) \right. \\ &\quad \left. + \frac{6 \times 2.55 \times 801.9}{1.415 \times 33.334 \times 10^{-3} \times 335} \left( 1.415 + \frac{2 \times 801.9}{3 \times 335} \right) - \frac{3 \times 2.55^2 (1.415 + 801.9/335)^2}{1.415 \times 33.334 \times 10^{-3} \times 45} \right\} \\ &= 13196.61 \quad (\text{MPa})^3 \end{aligned}$$

(2) 计算架线弧垂常数。由于

$$\gamma_{J1} = \frac{G_{J1}}{\lambda_{10} A} = \frac{801.9}{2.55 \times 335} = 938.72 \times 10^{-3} \quad (\text{MPa/m})$$

$$\begin{aligned}
 \text{所以 } f'_m &= \frac{\gamma l^2}{8\sigma'_0 \cos\beta} + \frac{(\gamma_{J1} - \gamma)\lambda_{10}^2}{4\sigma'_0 \cos\beta} + \frac{(\gamma_{J1} - \gamma)^2 \lambda_{10}^4}{8\sigma'_0 \gamma l^2 \cos\beta} \\
 &= \frac{1}{\sigma'_0 \cos\beta} \left( \frac{\gamma l^2}{8} + \frac{(\gamma_{J1} - \gamma)\lambda_{10}^2}{4} + \frac{(\gamma_{J1} - \gamma)^2 \lambda_{10}^4}{8\gamma l^2} \right) \\
 &= \frac{1}{0.9805\sigma'_0} \left( \frac{32.687 \times 10^{-3} \times 45^2}{8} + \frac{(938.72 - 32.687) \times 10^{-3} \times 2.55^2}{4} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(938.72 - 32.687)^2 \times 10^{-6} \times 2.55^4}{8 \times 32.687 \times 10^{-3} \times 45^2} \right) \\
 &= \frac{10.0065}{\sigma'_0} (\text{m})
 \end{aligned}$$

(3) 架线观测时的应力与弧垂。

采用降温法补偿初伸长,即以恒定降温  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$  后的应力架线。根据状态方程式 (8-53),有

$$\sigma'_0 \{ \sigma'_0 + F_m + \alpha E (t - 20) \cos\beta \} = K''$$

令

$$\begin{aligned}
 C &= F_m + \alpha E (t - 20) \cos\beta = 480 + 20 \times 10^{-6} \times 72590 (t - 20) \times 0.98058 \\
 &= 451.528 + 1.4236t \quad (\text{MPa})
 \end{aligned}$$

应力计算公式为

$$\sigma'_0 (\sigma'_0 + C) = K''$$

给出不同的施工温度,由上式算得紧线应力  $\sigma'_0$ ,进而可算得  $f'_m$ ,架线观测应力和弧垂的计算结果列于表 8-9。

### 五、计算竣工应力与弧垂

架线竣工时,架空线两侧均悬挂了绝缘子串,且安装了集中荷重(引下线),此时初伸长未放出,档内的最大弧垂作为竣工验收弧垂。首先判定最大弧垂发生位置,设  $x_M > a$ ,根据最大弧垂处剪应力为零,有

$$\begin{aligned}
 Q_A - G_{J1} - \frac{p}{\cos\beta} (x_M - \lambda_{10}) - q &= 0 \\
 x_M &= \lambda_{10} + \frac{\cos\beta}{p} (Q_A - G_{J1} - q) \\
 &= 2.55 + \frac{0.98058}{10.95} \times (1144.11 - 801.9 - 147.9) = 19.95 (\text{m}) > 18\text{m}
 \end{aligned}$$

求得的  $x_M$  值大于  $a$ ,说明假设正确。若求得的  $x_M$  值小于  $a$ ,则需重设  $x_M < a$  再计算。若再计算出的  $x_M$  值大于  $a$ ,则表示最大弧垂在集中荷载处。在  $x_M = 19.95\text{m}$  处相当梁上的弯矩为

$$\begin{aligned}
 M_{x_M} &= Q_A x_M - G_{J1} \left( x_M - \frac{\lambda_{10}}{2} \right) - \frac{p}{\cos\beta} \frac{(x_M - \lambda_{10})^2}{2} - q(x_M - a) \\
 &= 1144.11 \times 19.95 - 801.9 \times \left( 19.95 - \frac{2.55}{2} \right) \\
 &\quad - \frac{10.95 \times (19.95 - 2.55)^2}{2 \times 0.98058} - 147.9 \times (19.95 - 18) \\
 &= 5870.68 \quad (\text{N} \cdot \text{m})
 \end{aligned}$$

竣工弧垂常数为

$$f_m = \frac{Mx_M}{\sigma_0 A} = \frac{5870.68}{335\sigma_0} = \frac{17.5244}{\sigma_0} \quad (\text{m})$$

应力计算公式为

$$\sigma_0^2(\sigma_0 + C) = K$$

上式中的  $K$  应为无风无冰下的线长系数。竣工应力与弧垂的计算结果列于表 8-9。

表 8-9 架线观测和竣工情况的应力与弧垂

气温 (°C)	C (MPa)	架线观测情况 $K''=13196.61 \text{ (MPa)}^3$		竣工情况 $K=52414.89 \text{ (MPa)}^3$	
		$\sigma'_0$ (MPa)	$f'_m$ (m)	$\sigma_0$ (MPa)	$f_m$ (m)
40	508.4721	5.0692	1.9740	10.0541	1.7430
30	494.2361	5.1406	1.9466	10.1936	1.7192
20	480.0000	5.2151	1.9188	10.3390	1.6950
10	465.7639	5.2929	1.8906	10.4908	1.6705
0	451.5279	5.3743	1.8619	10.6493	1.6456
-10	437.2918	5.4595	1.8329	10.8152	1.6203
-20	423.0558	5.5488	1.8034	10.9890	1.5947
-30	408.8197	5.6427	1.7734	11.1714	1.5687
-40	394.5836	5.7415	1.7428	11.3630	1.5422

### 练习 题

1. 导出架空线悬挂曲线方程一般形式的前提条件是什么？何为相当简支梁？
2. 耐张绝缘子串的比载是如何定义的？
3. 为使问题简化，在导出孤立档架空线的弧垂、线长计算公式时，作了哪些假设？在导出孤立档的状态方程式时，作了哪些假设？
4. 判定孤立档控制气象条件的方法有几种？试简述其原理。
5. 从架空线计算角度来看，孤立档架线观测、竣工和长期运行三种状态之间有何主要不同？
6. 通过我国典型气象区 I 区的某 110kV 线路，采用 LGJ-185/30 钢芯铝绞线，孤立档档距  $l=100\text{m}$ ，采用 XP-70 单联耐张绝缘子串，共 8 片重 438.7N，耐张绝缘子串长 1582mm，试分别求架线施工观测和竣工时的应力、弧垂（最大设计风速为 35m/s，考虑初伸长）。
7. 某 220kV 输电线路，通过典型气象区 III 区，其中一个孤立档，导线为 LGJ-240/40 钢芯铝绞线，采用 XP-100 单联耐张绝缘子串，串长  $\lambda=2515\text{mm}$ ，串重 871N，孤立档档距 250m，紧线安装时气温  $-5^\circ\text{C}$ ，考虑耐张绝缘子串和初伸长的影响，试按允许过牵引长度确定施工方法（最大设计风速 25m/s）。

## 第九章 连续档架空线的应力和弧垂

连续档是指包含有若干基直线杆塔构成的耐张段。在一个耐张段内,由于地形、交叉跨越等因素的影响,各个档距多数情况下是不相等的。竣工时,悬垂绝缘子串一般处于铅垂位置,因而各档架空线的水平张力是相等的。运行中气象条件发生变化时,根据状态方程式知道,各档架空线将以各自的参数发生变化,必然使各档水平张力不等,造成悬垂绝缘子串偏斜。如气温由高变低时,小档距的应力增大较多,大档距的应力增大较少;比载增大时,小档距的应力增大较少,大档距的应力增大较多。连续档架空线悬垂绝缘子串偏斜后的情况如图 9-1 所示。悬垂绝缘子串偏斜后,架空线的悬挂点位置发生改变,从而使得各档档距发生变化  $\Delta l_i$ 。但在一个耐张段内,档距变化量的总和为零,即  $\sum \Delta l_i = 0$ 。在计算连续档架空线的应力、弧垂等参数时,必须考虑各档之间的相互影响。

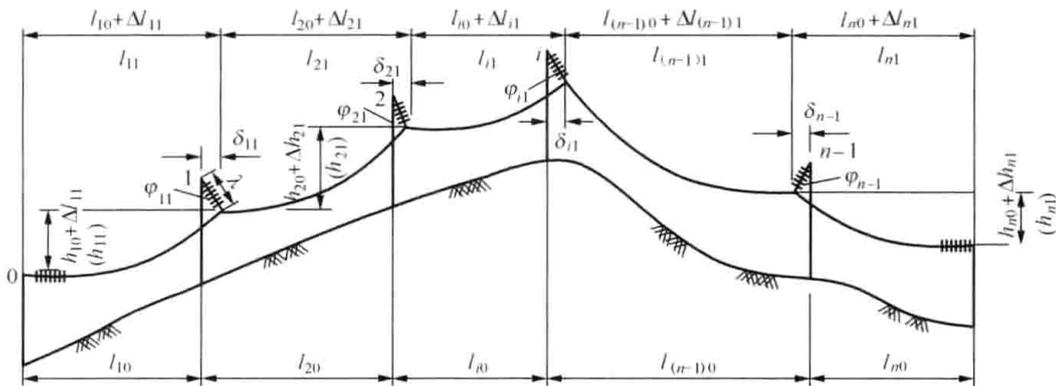


图 9-1 悬垂绝缘子串偏斜后的连续档架空线

### 第一节 连续档架空线应力的近似计算——代表档距法

高压架空输电线路的悬垂绝缘子串一般较长,对架空线应力的补偿能力较强,偏斜后耐张段内各档水平应力差减小。因此可以假设:悬垂绝缘子串偏斜后各档水平应力相等。这时可用某一个档距的架空线应力随气象条件的变化规律,代表连续档的架空线应力随气象条件的变化规律,这个档距称为该连续档的代表档距。代表档距下的高差角,称为代表高差角。

#### 一、无风情况下的代表档距

设有  $n$  个档距构成的连续档,竣工时各悬垂绝缘子串均处于垂直位置,此时的各档档距为  $l_{10}, l_{20}, \dots, l_{n0}$ , 高差为  $h_{10}, h_{20}, \dots, h_{n0}$ , 相应的高差角为  $\beta_{10}, \beta_{20}, \dots, \beta_{n0}$ 。当气象条件异于架线气象变为状态  $n$  时,气温变为  $t_n$ 、比载变为  $\gamma_n$ , 架空线产生不平衡张力使悬垂绝缘子串偏斜。设各个悬垂绝缘子串的偏斜角分别为  $\varphi_{11}, \varphi_{21}, \dots, \varphi_{(n-1)1}$ , 各档档距增量分别为  $\Delta l_{11}, \Delta l_{21}, \dots, \Delta l_{n1}$ , 高差增量为  $\Delta h_{11}, \Delta h_{21}, \dots, \Delta h_{n1}$ , 如图 9-1 所示。

若假设此时连续档内各档水平应力相等且为  $\sigma_{0n}$ ，则根据斜抛物线线长公式，在状态  $n$  下第  $i$  档的线长可写为

$$L_{in} = \frac{l_{i1}}{\cos\beta_{i1}} + \frac{\gamma_n^2 l_{i1}^3 \cos\beta_{i1}}{24\sigma_{0n}^2} \approx \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma_n^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{0n}^2} + \frac{\Delta l_{i1}}{\cos\beta_{i0}} \quad (9-1)$$

这相当于以档距的改变量对应的斜档距代替相应的线长变化量。同样地，当气象条件变至状态  $m$  时，气温为  $t_m$ 、比载为  $\gamma_m$ ，相应的档距增量为  $\Delta l_{12}$ ， $\Delta l_{22}$ ， $\dots$ ， $\Delta l_{n2}$ ，高差增量为  $\Delta h_{12}$ ， $\Delta h_{22}$ ， $\dots$ ， $\Delta h_{n2}$ ，悬垂绝缘子串偏斜后各档水平应力为  $\sigma_{0m}$ ，则有

$$L_{im} = \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma_m^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{0m}^2} + \frac{\Delta l_{i2}}{\cos\beta_{i0}} \quad (9-2)$$

根据两种状态下的线长之差  $L_{im} - L_{in}$  是由于应力和气温不同引起的，仿式 (6-6) 的证明步骤，可写出第  $i$  档的状态方程式为

$$\sigma_{0m} - \frac{E\gamma_m^2 l_{i0}^2 \cos^3\beta_{i0}}{24\sigma_{0m}^2} = \sigma_{0n} - \frac{E\gamma_n^2 l_{i0}^2 \cos^3\beta_{i0}}{24\sigma_{0n}^2} - \alpha E \cos\beta_{i0} (t_m - t_n) + \frac{\Delta l_{i2} - \Delta l_{i1}}{l_{i0}} E \cos\beta_{i0}$$

或写成

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_{0m}}{E} \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} - \frac{\gamma_m^2 l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0}}{24\sigma_{0m}^2} \\ &= \frac{\sigma_{0n}}{E} \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} - \frac{\gamma_n^2 l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0}}{24\sigma_{0n}^2} - \alpha l_{i0} (t_m - t_n) + \Delta l_{i2} - \Delta l_{i1} \end{aligned} \quad (9-3)$$

仿上式可列出  $1 \sim n$  档的  $n$  个状态方程式，将这  $n$  个方程相加，并注意到每一状态下的

$\sum_{i=1}^n \Delta l_{i1} = 0$ ， $\sum_{i=1}^n \Delta l_{i2} = 0$ ，则有

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_{0m}}{E} \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} - \frac{\gamma_m^2}{24\sigma_{0m}^2} \sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0} \\ &= \frac{\sigma_{0n}}{E} \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} - \frac{\gamma_n^2}{24\sigma_{0n}^2} \sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0} - \alpha (t_m - t_n) \sum_{i=1}^n l_{i0} \end{aligned}$$

整理得

$$\sigma_{0m} - \frac{E\gamma_m^2}{24\sigma_{0m}^2} \frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}} = \sigma_{0n} - \frac{E\gamma_n^2}{24\sigma_{0n}^2} \frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}} - \alpha E (t_m - t_n) \frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}} \quad (9-4)$$

上式写成单一档距的斜抛物线状态方程式形式，可令

$$\cos\beta_r = \frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}} \quad (9-5)$$

$$l_r = \sqrt{\frac{1}{\cos^3\beta_r} \frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}}} = \frac{1}{\cos\beta_r} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0}}{\sum_{i=1}^n l_{i0}}} \quad (9-6)$$

则连续档耐张段的状态方程式为

$$\sigma_{0m} - \frac{E\gamma_m^2 l_r^2 \cos^3 \beta_r}{24\sigma_{0m}^2} = \sigma_{0n} - \frac{E\gamma_n^2 l_r^2 \cos^3 \beta_r}{24\sigma_{0n}^2} - \alpha E \cos \beta_r (t_m - t_n) \quad (9-7)$$

式中  $l_r$ ——连续档耐张段的代表档距；

$\beta_r$ ——代表高差角。

引入  $l_r$ 、 $\beta_r$  的概念后，连续档架空线的应力计算就等同于单一档距（代表档距）的计算。当连续档悬挂点均等高时，得到无高差连续档的状态方程式为

$$\sigma_{0m} - \frac{E\gamma_m^2 l_r^2}{24\sigma_{0m}^2} = \sigma_{0n} - \frac{E\gamma_n^2 l_r^2}{24\sigma_{0n}^2} - \alpha E (t_m - t_n) \quad (9-8)$$

其中

$$l_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n l_{i0}}} \quad (9-9)$$

若将式 (9-4) 写成单一档距的平抛物线状态方程式形式，可令

$$l_D = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2 \beta_{i0}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}}}} \quad (9-10)$$

$$\alpha_D = \alpha \frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}}} \quad (9-11)$$

则连续档的平抛物线状态方程式为

$$\sigma_{0m} - \frac{E\gamma_m^2 l_D^2}{24\sigma_{0m}^2} = \sigma_{0n} - \frac{E\gamma_n^2 l_D^2}{24\sigma_{0n}^2} - \alpha_D E (t_m - t_n) \quad (9-12)$$

式中  $l_D$ ——连续档的代表档距；

$\alpha_D$ ——代表温度膨胀系数。

显然，采用代表档距和代表高差角的概念比较容易理解。若将式 (9-1)、式 (9-2) 中的  $\Delta l_{i1}/\cos \beta_{i0}$  换为  $\Delta l_{i1}$ ， $\Delta l_{i2}/\cos \beta_{i0}$  换为  $\Delta l_{i2}$ ，可得到代表档距和代表高差角另一种形式为

$$l_r = \frac{1}{\cos \beta_r} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}}}} \quad (9-13)$$

$$\cos \beta_r = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos^2 \beta_{i0}}} \quad (9-14)$$

应该指出，由于近似方式不同，代表档距还有其他不同的形式，但式 (9-5) 和式

(9-6) 是精度较好且较为简单的一种。

## 二、有风情况下的代表档距

当连续档架空线受到风荷载作用时, 由于各档档距和高差角不尽相同, 各悬垂绝缘子串悬挂点处的架空线应力在垂向、横向和顺线路水平方向的分量不尽相同, 因此各悬挂点可能产生不同的顺线路方向的位移  $\delta_{is}$ 、横向位移  $\delta_{ih}$  和垂向位移  $\delta_{iv}$ , 如图 9-2 所示。

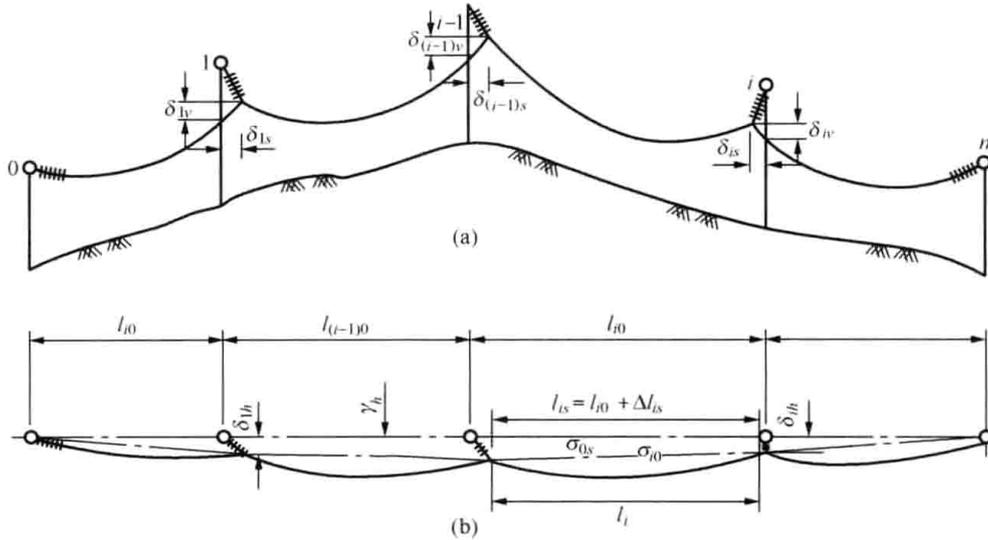


图 9-2 连续档架空线的风偏图  
(a) 线路纵断面图; (b) 线路俯视图

假定各档顺线路方向的水平应力相等, 则各悬挂点处的应力可分解为顺线路方向的水平应力  $\sigma_{i0}$ 、铅垂方向的应力  $\sigma_{iv}$  和横向应力  $\sigma_{ih}$ , 其中  $\sigma_{ih}$  甚小, 可以忽略不计, 这样悬挂点连线方向的水平应力  $\sigma'_0$  就近似等于顺线路方向的水平应力。

风偏后两悬挂点连线的水平投影长度  $l_i$ , 可由其顺线路方向投影长度和横向投影长度表示为

$$\begin{aligned} l_i &= \sqrt{[l_{i0} + (\delta_{is} - \delta_{(i-1)s})]^2 + (\delta_{ih} - \delta_{(i-1)h})^2} = \sqrt{(l_{i0} + \Delta l_{is})^2 + (\delta_{ih} - \delta_{(i-1)h})^2} \\ &= (l_{i0} + \Delta l_{is}) \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_{ih} - \delta_{(i-1)h}}{l_{i0} + \Delta l_{is}}\right)^2} \end{aligned}$$

悬挂点间的横向位移差  $\delta_{ih} - \delta_{(i-1)h}$  很小, 且对  $l_i$  的影响极微, 可以不予考虑, 则上式近似为

$$l_i \approx l_{i0} + \Delta l_{is}$$

若架空线的综合比载为  $\gamma'$ , 气温为  $t$ , 则连续档的第  $i$  档的线长, 仿照式 (9-1) 并考虑到式 (5-74) 可写为

$$L_i \approx \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\Delta l_{is}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma'^2 l_{i0}^3 \cos^3\beta_{i0}}{24\sigma_0^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta) \quad (9-15)$$

若以无风气象条件为已知状态  $n$ , 其相应的线长近似式为式 (9-1), 采用与式 (9-7) 相仿的证明步骤, 可以得到有风气象条件为未知状态  $m$  的状态方程式为

$$\sigma_{0m} - \frac{E\gamma'^2 l_r'^2 \cos^3\beta_r}{24\sigma_{0m}^2} = \sigma_{0n} - \frac{E\gamma_n^2 l_r^2 \cos^3\beta_r}{24\sigma_{0n}^2} - \alpha E \cos\beta_r (t_m - t_n) \quad (9-16)$$

其中

$$l'_r = \frac{1}{\cos\beta_r} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta)}{\sum_{i=1}^n l_{i0}}} \quad (9-17)$$

$$l_r = \frac{1}{\cos\beta_r} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}^3 \cos^2\beta_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}}}, \quad \cos\beta_r = \frac{\sum_{i=1}^n l_{i0}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}}$$

式中  $\sigma_{0m}$ 、 $\sigma_{0n}$ ——分别为有风和无风状态下架空线顺线路方向的水平应力；

$\gamma'$ 、 $\gamma_n$ ——分别为有风和无风状态下架空线的综合比载；

$l'_r$ 、 $l_r$ ——分别为有风和无风状态下耐张段的代表档距；

$\beta_r$ ——无风状态下耐张段的代表高差角；

$\eta$ ——有风状态下的架空线风偏角；

$t_m$ 、 $t_n$ ——分别为有风和无风状态下的气温；

$E$ ——架空线的弹性系数。

从上式可知，有风时的代表档距比无风时的要大些，并且随风偏角的增大而增加。若有风气象下忽略风偏角的影响，即视  $l'_r$  为  $l_r$ ，这样求得的有风情况下的  $\sigma_{0m}$  将会小一些。低风速时作这样的近似对  $\sigma_{0m}$  影响不大。

## 第二节 连续档架空线应力的精确计算

当耐张段内各档间的档距和高差相差悬殊，或档间架空线的比载不同（如覆冰不均），或档间作用有不同的附加荷载（如上人检修）时，各档间架空线的水平应力即使在悬垂串偏斜后仍然会有显著差别，此时就不能采用代表档距法近似计算架空线的应力。为了检查直线杆塔可能承受的不平衡张力或悬垂绝缘子串的偏斜角以及档内弧垂等，往往需要求得耐张段内各档架空线应力的较高精度值。

### 一、各档的档距变化量与架空线应力的关系

架线竣工时，悬垂绝缘子串处于中垂位置，第  $i$  档的档距为  $l_{i0}$ 、高差角为  $\beta_{i0}$ ，补偿架空线初伸长（降温  $\Delta t$ ）后的各档水平应力为  $\sigma_0$ ，比载为  $\gamma_1$ ，架线气温为  $t_0$ 。此时第  $i$  档的悬挂曲线长度为

$$L_{i0} = \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_0^2}$$

线路运行过程中，气象条件发生变化，气温变为  $t$ ，比载变为  $\gamma_i$ ，假定初伸长已释放完毕，各档水平应力为  $\sigma_{i0}$ 。由于各档水平应力  $\sigma_{i0}$  不等，悬垂绝缘子串偏斜使档距增大  $\Delta l_i$ ，高差变化  $\Delta h_i$ ，高差角变为  $\beta_i$ ，此时第  $i$  档的悬挂曲线长度为

$$L_i = \frac{l_{i0} + \Delta l_i}{\cos\beta_i} + \frac{\gamma_i^2 (l_{i0} + \Delta l_i)^3 \cos\beta_i}{24\sigma_{i0}^2}$$

$$= (l_{i0} + \Delta l_i) \sqrt{1 + \left(\frac{h_{i0} + \Delta h_i}{l_{i0} + \Delta l_i}\right)^2} + \frac{\gamma_i^2 (l_{i0} + \Delta l_i)^3}{24\sigma_{i0}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{h_{i0} + \Delta h_i}{l_{i0} + \Delta l_i}\right)^2}}$$

将上式以档距、高差的微分增量形式表示为

$$\begin{aligned} L_i &= \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma_i^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0}^2} + \left[ \cos\beta_{i0} + \frac{\gamma_i^2 l_{i0}^2 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0}^2} (3 + \sin^2\beta_{i0}) \right] \Delta l_i \\ &\quad + \left[ 1 - \frac{\gamma_i^2 l_{i0}^2 \cos^2\beta_{i0}}{24\sigma_{i0}^2} \right] \sin\beta_{i0} \Delta h_i \\ &\approx \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma_i^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0}^2} + \left[ \cos\beta_{i0} + \frac{\gamma_i^2 l_{i0}^2 \cos\beta_{i0}}{8\sigma_{i0}^2} \right] \Delta l_i + \sin\beta_{i0} \Delta h_i \end{aligned} \quad (9-18)$$

两种状态下的线长之差是由于应力、气温的不同以及初伸长的放出引起的, 即

$$L_i - L_{i0} = \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} \left( \frac{\sigma_{i0} - \sigma_0}{E \cos\beta_{i0}} \right) + \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} \alpha (t - t_0 + \Delta t)$$

将  $L_i$ 、 $L_{i0}$  的表达式代入, 整理后得到

$$\begin{aligned} \Delta l_i &= \left\{ \frac{l_{i0}^2 \cos^2\beta_{i0}}{24} \left[ \left(\frac{\gamma_1}{\sigma_0}\right)^2 - \left(\frac{\gamma_i}{\sigma_{i0}}\right)^2 \right] + \frac{\sigma_{i0} - \sigma_0}{E \cos\beta_{i0}} + \alpha (t - t_0 + \Delta t) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin\beta_{i0} \cos\beta_{i0}}{l_{i0}} \Delta h_i \right\} \frac{l_{i0}}{\cos^2\beta_{i0} \left( 1 + \frac{\gamma_i^2 l_{i0}^2}{8\sigma_{i0}^2} \right)} \end{aligned} \quad (9-19)$$

共有  $n$  档, 可列出  $n$  个方程式。

对于整个耐张段, 由于两端为耐张杆塔, 所以各档档距增量  $\Delta l_i$  的总和应为零。

## 二、悬垂绝缘子串偏移量与架空线应力的关系

各档间应力不等时, 悬垂绝缘子串产生偏斜。设悬垂绝缘子串为均布荷载的刚性直棒, 则第  $i$  基杆塔的悬垂绝缘子串受力如图 9-3 所示。图中  $G_j$  为悬垂绝缘子串的垂向荷载,  $\lambda_i$  为其长度, 架空线作用于悬垂绝缘子串下端的垂向荷载为  $P_i$ , 左右两档架空线的不平衡张力差为  $A(\sigma_{(i+1)0} - \sigma_{i0})$ , 在此力作用下悬垂绝缘子串下端偏移量为  $\delta_i$ 。对悬垂绝缘子串上端悬挂点列力矩平衡方程式, 有

$$A(\sigma_{(i+1)0} - \sigma_{i0}) \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2} = P_i \delta_i + G_j \frac{\delta_i}{2}$$

悬垂绝缘子串偏移量与架空线应力的关系为

$$\frac{\delta_i}{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}} = \frac{\sigma_{(i+1)0} - \sigma_{i0}}{\frac{G_j}{2A} + \frac{P_i}{A}} \quad (9-20)$$

其中  $P_i$  可由垂直档距的概念求出。假定架空线比载  $\gamma_i$ 、 $\gamma_{i+1}$  均沿斜档距均布, 则

$$\frac{P_i}{A} = \left( \frac{\gamma_i l_{i0}}{2\cos\beta_{i0}} + \frac{\sigma_{i0} h_{i0}}{l_{i0}} \right) + \left( \frac{\gamma_{(i+1)} l_{(i+1)0}}{2\cos\beta_{(i+1)0}} - \frac{\sigma_{(i+1)0} h_{(i+1)0}}{l_{(i+1)0}} \right) \quad (9-21)$$

## 三、档距和高差变化量与悬垂绝缘子串偏移量的关系

耐张段两端为耐张杆塔, 可以认为耐张绝缘子串偏移量为零, 即  $\delta_0 = 0$ 、 $\delta_n = 0$ 。其他

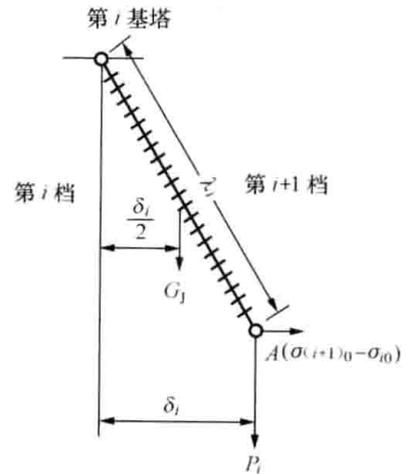


图 9-3 悬垂绝缘子串受力图

各档的档距变化量为

$$\begin{aligned}\Delta l_1 &= \delta_1 - \delta_0 = \delta_1 \\ \Delta l_2 &= \delta_2 - \delta_1 = \delta_2 - \Delta l_1, \quad \delta_2 = \Delta l_2 + \Delta l_1 \\ &\dots\dots\end{aligned}$$

所以

$$\delta_i = \sum_{j=1}^i \Delta l_j \quad (9-22)$$

$$\Delta h_i = (\lambda_i - \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}) - (\lambda_{i-1} - \sqrt{\lambda_{i-1}^2 - \delta_{i-1}^2}) \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_i^2}{\lambda_i} - \frac{\delta_{i-1}^2}{\lambda_{i-1}} \right) \quad (9-23)$$

#### 四、连续档应力精确值的求解步骤

耐张段内共有  $n-1$  基直线杆塔, 可列出形如式 (9-20)、式 (9-22) 各  $n-1$  个方程, 按式 (9-19) 可列  $n$  个方程, 共  $3n-2$  个方程, 已知  $\delta_0=0$ , 因此可以求解  $\sigma_{i0}$ 、 $\Delta l_i$ 、 $\delta_i$  共  $3n-1$  个未知量。求解一般需借助计算机进行, 步骤如下:

(1) 假定一个  $\Delta l_1 = \delta_1$ , 已知  $\delta_0=0$ , 由式 (9-23) 算得  $\Delta h_1$ , 由式 (9-19) 算得  $\sigma_{10}$ 。

(2) 根据  $\sigma_{10}$ 、 $\delta_1$ , 由式 (9-20) 算得  $\sigma_{20}$ 。

(3) 根据  $\sigma_{20}$ , 假设  $\Delta h_2$  (如  $\Delta h_2=0$ ), 由式 (9-19) 算得  $\Delta l_2^{(1)}$ , 由式 (9-22) 算得  $\delta_2^{(1)}$ , 由式 (9-23) 算得  $\Delta h_2^{(1)}$ ; 再由式 (9-19) 算得  $\Delta l_2^{(2)}$ , 由式 (9-22) 算得  $\delta_2^{(2)}$ , 由式 (9-23) 算得  $\Delta h_2^{(2)}$ 。反复进行, 使算得的  $\Delta l_2$ 、 $\delta_2$ 、 $\Delta h_2$  再无明显变化。

(4) 根据  $\sigma_{(i-1)0}$ 、 $\delta_{i-1}$ , 由式 (9-20) 算得  $\sigma_{i0}$ 。假设  $\Delta h_i$  ( $\Delta h_i=0$ ), 按步骤 (3) 进行, 算得  $\Delta l_i$ 、 $\delta_i$ 、 $\Delta h_i$ 。

(5) 根据  $\sigma_{(n-1)0}$ 、 $\delta_{n-1}$ , 由式 (9-20) 算得  $\sigma_{n0}$ ; 已知  $\delta_n=0$ , 由式 (9-23) 算得  $\Delta h_n$ , 由式 (9-19) 算得  $\Delta l_n$ , 再由式 (9-22) 算得  $\delta_n$ 。

(6) 如果算得的  $\delta_n \approx 0$ , 则上面结果即为所求; 否则需返步骤 (1) 重新假定, 直至算出的  $\delta_n \approx 0$  为止。

上述计算中, 由于需迭代逼近求  $\Delta h_i$ , 显得有些复杂, 如果近似认为式 (9-19) 中的  $\Delta h_i=0$ , 则可简化为下面步骤:

(1) 假定一个水平应力  $\sigma_{10}$ 。

(2) 由式 (9-19) 计算  $\Delta l_1$  ( $\Delta l_i$ )。

(3) 由式 (9-22) 计算  $\delta_1$  ( $\delta_i$ )。

(4) 由式 (9-20) 计算  $\sigma_{20}$  ( $\sigma_{(i+1)0}$ )。

(5) 按照步骤 (2) ~ (4), 计算出全部  $\sigma_{i0}$ 、 $\Delta l_i$ 、 $\delta_i$  为止。

(6) 若求得的  $\delta_n$  接近于零, 则满足要求, 上述各结果可以接受; 否则需重新假定  $\sigma_{10}$ , 再由步骤 (1) 开始计算。

上述计算中需知道  $P_1$  ( $P_i$ ), 要先用到应力, 一般可按悬垂绝缘子串铅垂时的应力近似。若需更精确的数值, 可用上面算得的应力结果, 计算新的  $P_i$ , 再按上述步骤循环计算。

#### 五、有集中荷载、风荷载作用时的计算

当第  $i$  档内作用有集中荷载时, 可令式 (8-38) 中的  $\lambda_0$ 、 $G_J$  为零,  $l_1$  变为  $l_{i0}$ , 并将集中荷载表示为架空线单位截面荷载值, 仿式 (9-18) 可写出该档架空线的线长为

$$L_i \approx \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} + \Delta l_i \left( \cos \beta_{i0} + \frac{\gamma_i^2 l_{i0}^2 \cos \beta_{i0}}{8 \sigma_{i0}^2} \right) + \Delta h_i \sin \beta_{i0} + \frac{\gamma_i^2 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i0}^2} \left\{ l_{i0}^3 + \frac{12 \cos^2 \beta_{i0}}{\gamma_i^2 l_{i0}} \right.$$

$$\times \left[ \sum_{j=1}^m \left( \frac{\gamma_i l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} + \tau_j \right) \tau_j a_j b_j + 2 \sum_{j=1}^{m-1} \left( \tau_j a_j \sum_{k=j+1}^m \tau_k b_k \right) \right] \quad (9-24)$$

上式中各符号的意义可参考式(8-37)的说明。根据上式,仿照式(9-19)的导出过程,容易得到第*i*档具有集中荷载时的档距变化与应力间的关系式。此外应当注意,在计算公式(9-20)中的 $P_i/A$ 时,也要计入集中荷载的影响。对于第*i*基杆塔和第*i-1*基杆塔分别有

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_i}{A} &= \left( \frac{\gamma_i l_{i0}}{2 \cos \beta_{i0}} + \frac{\sigma_{i0} h_{i0}}{l_{i0}} \right) + \left( \frac{\gamma_{(i+1)} l_{(i+1)0}}{2 \cos \beta_{(i+1)0}} - \frac{\sigma_{(i+1)0} h_{(i+1)0}}{l_{(i+1)0}} \right) + \frac{1}{l_{i0}} \sum_{j=1}^m \tau_j a_j \\ \frac{P_{i-1}}{A} &= \left( \frac{\gamma_{(i-1)} l_{(i-1)0}}{2 \cos \beta_{(i-1)0}} + \frac{\sigma_{(i-1)0} h_{(i-1)0}}{l_{(i-1)0}} \right) + \left( \frac{\gamma_i l_{i0}}{2 \cos \beta_{i0}} - \frac{\sigma_{i0} h_{i0}}{l_{i0}} \right) + \frac{1}{l_{i0}} \sum_{j=1}^m \tau_j b_j \end{aligned} \right\} \quad (9-25)$$

有风时,架空线既有垂向荷载又有横向荷载作用,悬垂绝缘子串除产生顺线路方向的偏移外,还产生横向偏移 $\delta_{ih}$ ,从而使得计算进一步复杂化。为简化起见,常忽略横向偏移 $\delta_{ih}$ 即假设 $\delta_{ih}=0$ 进行计算。计算中涉及到式(9-19)中的相应部分,应考虑风荷载的影响。

### 第三节 采用滑轮线夹时连续档架空线的有关计算

在架线施工中,架空线的一端通过耐张绝缘子串固定在一端的杆塔上,中间各杆塔上暂用滑轮托起架空线,在另一端的紧线杆塔上进行紧线,同时观测弧垂,调整至设计值;然后进行划印;最后把导线由各滑轮移入线夹中。在高压输电线路的某些大跨越档,为了降低跨越杆塔的高度,改善架空线悬挂点处受力等,有时直接使用滑轮线夹悬挂导线。我国数条长江大跨越采用了这种形式。在采用滑轮线夹的耐张段,导线在耐张杆塔上的悬挂方式一般有两种:两端均通过耐张串锚固在耐张杆塔上;一端锚固在耐张杆塔上,另一端通过耐张杆塔上的支撑滑轮,悬吊一个可运动的平衡锤来拉紧导线(见图9-6)。

#### 一、采用滑轮线夹时悬垂绝缘子串偏移量与应力的关系

假设滑轮无转动摩擦力,则只要滑轮两侧导线的张力不相等,滑轮就要向张力大的一侧转动,通过导线长度的调整,使滑轮两侧张力趋于相等,滑轮停止转动。因此,正常情况下滑轮线夹两侧出口处导线张力总是相等的。但这并不能保证悬垂绝缘子串总处于铅垂状态。当滑轮线夹两侧导线的悬垂角 $\theta_i$ 与 $\theta_{i+1}$ 不相等时,即使两侧出口处的导线张力(应力)相等,但因各自的水平应力分量不等,悬垂绝缘子串仍将向水平应力较大的一侧偏斜,直至达到受力平衡为止。图9-4是将导线应力等效到滑轮轴后的悬垂绝缘子串受力情况。图中 $F$ 为滑轮线夹的重力, $P_i$ 为导线等效在滑轮轴上的垂直荷载, $G_j$ 为悬垂绝缘子串除滑轮外的重力, $R$ 是滑轮的半径, $A$ 是导线的截面积, $\lambda_i$ 是悬垂绝缘子串的长度, $\delta_i$ 是悬垂绝缘子串顺线路方向的偏移量, $\varphi_i$ 是相应的偏斜角。视悬垂绝缘子串为刚性直棒,列上悬挂点的应力矩平衡方程,得

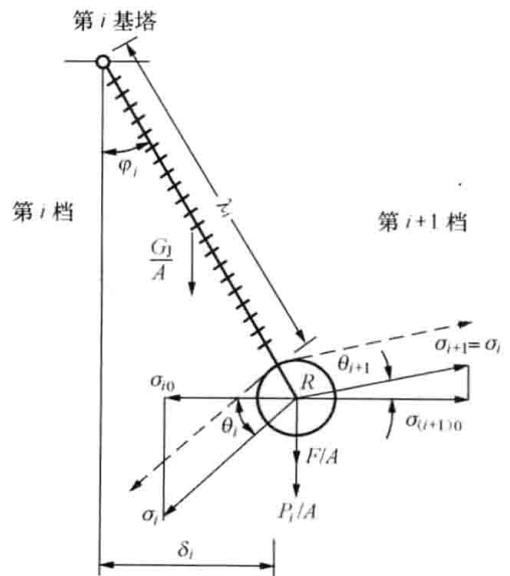


图9-4 采用滑轮线夹时的悬垂绝缘子串受力图

$$(\sigma_{(i+1)0} - \sigma_{i0}) \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2} \frac{\lambda_i + R}{\lambda_i} - \frac{P_i + F}{A} \delta_i \frac{\lambda_i + R}{\lambda_i} - \frac{G_J}{2A} \delta_i = 0$$

整理解得

$$\delta_i = \frac{(\sigma_{(i+1)0} - \sigma_{i0}) \lambda_i}{\sqrt{\left[ \frac{P_i + F}{A} + \frac{G_J}{2A} \frac{\lambda_i + R}{\lambda_i} \right]^2 + (\sigma_{(i+1)0} - \sigma_{i0})^2}} \quad (9-26)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{P_i}{A} &= \sigma_{(i+1)0} \tan \theta_{i+1} + \sigma_{i0} \tan \theta_i \\ &\approx \left( \frac{\gamma_i l_{i0}}{2 \cos \beta_{i0}} + \frac{\sigma_{i0} h_{i0}}{l_{i0}} \right) + \left( \frac{\gamma_{i+1} l_{(i+1)0}}{2 \cos \beta_{(i+1)0}} - \frac{\sigma_{(i+1)0} h_{(i+1)0}}{l_{(i+1)0}} \right) \end{aligned} \quad (9-27)$$

根据架空线悬挂点应力计算公式, 得

$$\begin{aligned} \sigma_{iB} &= \frac{\sigma_{i0}}{\cos \beta_i} + \frac{\gamma_i^2 (l_{i0} + \Delta l_i)^2}{8 \sigma_{i0} \cos \beta_i} + \frac{\gamma_i (h_{i0} + \Delta h_i)}{2} \\ \sigma_{(i+1)A} &= \frac{\sigma_{(i+1)0}}{\cos \beta_{i+1}} + \frac{\gamma_{i+1}^2 (l_{(i+1)0} + \Delta l_{i+1})^2}{8 \sigma_{(i+1)0} \cos \beta_{i+1}} - \frac{\gamma_{i+1} (h_{(i+1)0} + \Delta h_{i+1})}{2} \end{aligned}$$

其中

$$\cos \beta_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{h_{i0} + \Delta h_i}{l_{i0} + \Delta l_i} \right)^2}} \quad (9-28)$$

根据滑轮线夹两侧出口处导线的应力相等, 即  $\sigma_{iB} = \sigma_{(i+1)A}$ , 进而得到

$$\begin{aligned} \sigma_{(i+1)0} &= \cos \beta_{i+1} \left[ \frac{\sigma_{i0}}{\cos \beta_i} + \frac{\gamma_i^2 (l_{i0} + \Delta l_i)^2}{8 \sigma_{i0} \cos \beta_i} + \frac{\gamma_i (h_{i0} + \Delta h_i)}{2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\gamma_{i+1}^2 (l_{(i+1)0} + \Delta l_{i+1})^2}{8 \sigma_{(i+1)0} \cos \beta_{i+1}} + \frac{\gamma_{i+1} (h_{(i+1)0} + \Delta h_{i+1})}{2} \right] \end{aligned} \quad (9-29)$$

对于图 9-5 所示的连续倾斜档, 若用第 1 档的水平应力  $\sigma_{10}$  表示任一档的水平应力  $\sigma_{i0}$ , 其公式为

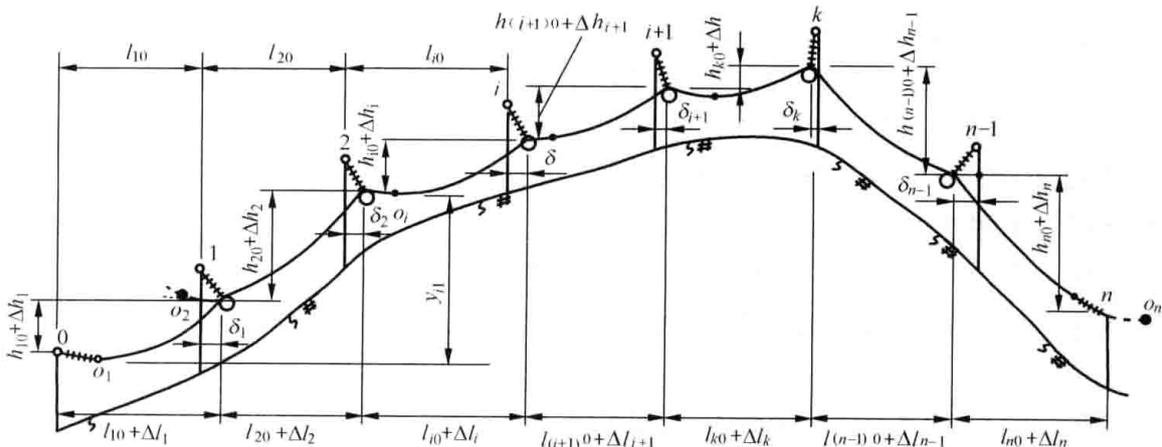


图 9-5 采用滑轮线夹的连续倾斜档

$$\sigma_{i0} = \cos \beta_i \left\{ \frac{\sigma_{10}}{\cos \beta_1} + \gamma_1 \left[ \frac{\gamma_1 (l_{10} + \Delta l_1)^2}{8 \sigma_{10} \cos \beta_1} + \frac{h_{10} + \Delta h_1}{2} \right] \right\}$$

$$+ \sum_{j=2}^i \gamma_j (h_{j0} + \Delta h_j) - \gamma_i \left[ \frac{\gamma_i (l_{i0} + \Delta l_i)^2}{8\sigma_{i0} \cos\beta_i} + \frac{h_{i0} + \Delta h_i}{2} \right] \} \quad (9-30)$$

或写成

$$\frac{\sigma_{i0}}{\cos\beta_i} - \frac{\sigma_{10}}{\cos\beta_1} = \left\{ \gamma_1 \left[ \frac{\gamma_1 (l_{10} + \Delta l_1)^2}{8\sigma_{10} \cos\beta_1} + \frac{h_{10} + \Delta h_1}{2} \right] + \sum_{j=2}^i \gamma_j (h_{j0} + \Delta h_j) \right. \\ \left. - \gamma_i \left[ \frac{\gamma_i (l_{i0} + \Delta l_i)^2}{8\sigma_{i0} \cos\beta_i} + \frac{h_{i0} + \Delta h_i}{2} \right] \right\} \quad (9-31)$$

上式表明,任一档*i*的斜切点(档距中央)应力与第一档斜切点应力之差,等于该档斜切点与第一档斜切点之间的高差与其相应比载之乘积的和。进一步可知,在采用滑轮线夹的连续档内,架空线上任意两点间的应力差等于该两点间的各段高差与相应比载之乘积的和。这与同一档内任意两点间应力关系的结论是一致的。采用固定线夹的连续档不具有上述结论,这是由于固定线夹限制了架空线在连续档内的窜动,线夹两侧架空线的轴向应力一般不相等的缘故。

在采用滑轮线夹的连续倾斜档内,最高悬挂点处架空线的应力最大。为保证该最大应力不超过允许值,可取控制条件下该点应力的最大值等于悬挂点许用应力,以此为已知条件推求各档的水平应力。在图9-5中,第*k*基杆塔的悬挂点在耐张段内相对最高,根据两点间的应力关系,该点应力 $\sigma_k$ 与任一档*i*水平应力 $\sigma_{i0}$ 的关系式为

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{i0}}{\cos\beta_i} + \gamma_i \left[ \frac{\gamma_i (l_{i0} + \Delta l_i)^2}{8\sigma_{i0} \cos\beta_i} + \frac{h_{i0} + \Delta h_i}{2} \right] + \sum_{j=i+1}^k \gamma_j h_j$$

解之得

$$\sigma_{i0} = \frac{1}{2} \left[ \sigma_k - \frac{\gamma_i (h_{i0} + \Delta h_i)}{2} - \sum_{j=i+1}^k \gamma_j h_j \right] \cos\beta_i \\ \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[ \sigma_k - \frac{\gamma_i (h_{i0} + \Delta h_i)}{2} - \sum_{j=i+1}^k \gamma_j h_j \right]^2 \cos^2\beta_i - \frac{\gamma_i^2 (l_{i0} + \Delta l_i)^2}{2}} \quad (9-32)$$

式中的 $h_j = h_{j0} + \Delta h_j$ ,且具有正负号,*k*侧比*i*侧高者为正值,反之为负值。

## 二、架空线锚固于两端耐张杆塔时的应力、线长和状态方程式

悬挂于滑轮线夹中的连续档架空线,各档的水平应力一般会有显著差异,不能采用代表档距法求解,否则其误差将是不可接受的。

### 1. 各档的水平应力

连续档架空线锚固于两端耐张杆塔上,耐张串的偏移量 $\delta_0 = 0$ 、 $\delta_n = 0$ ,连续档的档距变化量之和 $\sum \Delta l_i = 0$ 。

假定 $\sigma_k$ 已知,连续档各档水平应力 $\sigma_{i0}$ 通常采用式(9-32)求得。式中参数 $\gamma_i$ 、 $h_{i0}$ 、 $l_{i0}$ 一般为已知量,而 $\sigma_{i0}$ 、 $\Delta l_i$ 、 $\Delta h_i$ 都是未知量,*n*档共有 $3n$ 个未知量,需要 $3n$ 个方程才能求解。按式(9-32)可列出*n*个方程,式(9-26)可列出*n*-1个方程,式(9-23)可列出*n*个方程,再根据耐张段内档距改变的总和等于零一个方程,总共可列出 $3n$ 个方程,所以 $\sigma_{i0}$ 、 $\Delta l_i$ 和 $\Delta h_i$ 共 $3n$ 个未知量是可以求解的。从式(9-23)可以看出, $\delta_i$ 引起的变化量 $\Delta h_i$ 极微,一般可以认为 $\delta_i$ 的变化对其无影响,这样问题可以得到简化。

求解需借助计算机进行,最直接的方法是采用试凑递推法,具体步骤是:

(1) 自第一档假定一个水平应力 $\sigma_{10}$ ( $\sigma_{i0}$ )之值。

- (2) 利用式 (9-32), 根据控制应力  $\sigma_k$  求解出相应的档距改变量  $\Delta l_1 (\Delta l_i)$ 。
- (3) 由  $\Delta l_i$  按式 (9-22) 求出  $\delta_i$ 。
- (4) 将  $\sigma_{i0}$  和  $\delta_i$  代入式 (9-26) 计算出  $\sigma_{(i+1)0}$ 。
- (5) 反复从步骤 (2) 计算, 直至得到  $\delta_n$  为止。
- (6) 若求得的  $\delta_n$  接近于零, 则可以认为上述求得各值正确; 否则需要重新假定  $\sigma_{10}$  之值, 从步骤 (1) 重新开始。

### 2. 连续档架空线的线长

由于连续档各档架空线可以窜动, 计算各档的线长没有具体意义, 应计算连续档的总线长, 供架线使用。对于具有  $n$  个档距的连续档, 其悬挂总线长为

$$L = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{l_{i0} + \Delta l_i}{\cos \beta_i} + \frac{\gamma_i^2 (l_{i0} + \Delta l_i)^3 \cos \beta_i}{24 \sigma_{i0}^2} \right] \quad (9-33)$$

若近似计算, 可略去档距增量  $\Delta l_i$ , 即认为档距和高差不变, 这样可以根据已知的  $\sigma_k$  直接利用式 (9-32) 解出各档应力  $\sigma_{i0}$ , 再将其代入上式, 即可得到耐张段架空线的悬挂总线长, 精度也能满足一般工程要求。

### 3. 滑轮线夹、架空线两端锚固的连续档状态方程式

由于各档间的架空线可通过滑轮窜动, 连续档的状态方程式需要根据耐张段内架空线总长度的变化规律导出。设已知状态 I 下的气温为  $t_1$ , 各档的垂直比载均为  $\gamma_1$ , 第  $i$  档悬垂串未偏斜时的档距为  $l_{i0}$ , 档距增量为  $\Delta l_{i1}$ , 水平应力为  $\sigma_{i01}$ , 当将档距的改变量近似看作相应的线长变化量时, 档内悬线长度可以表示为

$$L_{i1} = \Delta l_{i1} + \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} + \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i01}^2}$$

当气象条件变至状态 II 时, 气温为  $t_2$ , 第  $i$  档的垂直比载  $\gamma_{i2}$ , 第  $i$  档的档距增量  $\Delta l_{i2}$ , 水平应力  $\sigma_{i02}$ , 相应的档内悬线长度为

$$L_{i2} = \Delta l_{i2} + \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} + \frac{\gamma_{i2}^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i02}^2}$$

两种状态下的悬线长度差等于该档架空线的弹性伸长增量、温度伸长增量与滑进档内的线长增量  $\Delta L_i$  之和, 从而得到

$$\begin{aligned} \Delta l_{i2} - \Delta l_{i1} + \frac{\gamma_{i2}^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i02}^2} - \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i01}^2} \\ = \frac{l_{i0} (\sigma_{i02} - \sigma_{i01})}{E \cos^2 \beta_{i0}} + \alpha \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} (t_2 - t_1) + \Delta L_i \end{aligned} \quad (9-34)$$

$n$  个档距可列出  $n$  个这样的方程, 然后相加, 并注意到  $\sum_{i=1}^n \Delta l_{i1} = \sum_{i=1}^n \Delta l_{i2} = \sum_{i=1}^n \Delta L_i = 0$ , 则

$$\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_{i2}^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i02}^2} - \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i01}^2} = \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0} (\sigma_{i02} - \sigma_{i01})}{E \cos^2 \beta_{i0}} + \alpha (t_2 - t_1) \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}}$$

或

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0} \sigma_{i02}}{\cos^2 \beta_{i0}} - \frac{E}{24} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_{i2}^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{\sigma_{i02}^2} \\ = \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0} \sigma_{i01}}{\cos^2 \beta_{i0}} - \frac{E}{24} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{\sigma_{i01}^2} - \alpha E (t_2 - t_1) \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} \end{aligned} \quad (9-35)$$

上式是采用滑轮线夹时连续档应力变化的状态方程式，式中有  $n$  个未知量  $\sigma_{i02}$ ，不能直接用于求解，一般用于最高悬挂点处的应力  $\sigma_{k02}$  假定值正确与否的判定。仍然可用上述的试凑递推法，即假定最高悬挂点处的应力  $\sigma_{k02}$  为某一值，假设第一档的水平应力  $\sigma_{i02}$ ，试凑递推求出使  $\delta_n = 0$  的各档应力  $\sigma_{i02}$ ，然后代入式 (9-35) 看是否正确。若式 (9-35) 闭合，说明假定的应力  $\sigma_{k02}$  可以接受，解得的  $n$  个水平应力值  $\sigma_{i02}$  正确，否则应重新假定  $\sigma_{k02}$  再计算。

若状态 I 为架线竣工情况时，应考虑初伸长的影响。

#### 4. 同时作用横向风载时各档的应力和状态方程式

当作用有横向风荷载时，若不计滑轮的摩擦力，仍可假定滑轮两侧出口处架空线的轴向应力相等。仿上述各式的推导过程，可得到采用滑轮线夹、垂直荷载和横向荷载同时作用下连续档架空线的有关计算公式。

第  $i$  基杆塔两侧顺线路方向水平应力间的关系为

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \gamma'_i \left( \frac{\gamma'_i l_{i0}^2}{8\sigma_{i0} \cos\beta_{i0}} + \frac{h_{i0} \cos\eta_i}{2} \right) \\ = \frac{\sigma_{(i+1)0}}{\cos\beta_{(i+1)0}} + \gamma'_{i+1} \left[ \frac{\gamma'_{i+1} l_{(i+1)0}^2}{8\sigma_{(i+1)0} \cos\beta_{(i+1)0}} - \frac{h_{(i+1)0} \cos\eta_{i+1}}{2} \right] \end{aligned} \quad (9-36)$$

最高悬挂点  $k$  处的轴向应力  $\sigma_k$  与第  $i$  档顺线路的水平应力分量  $\sigma_{i0}$  间的关系为

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \gamma'_i \left( \frac{\gamma'_i l_{i0}^2}{8\sigma_{i0} \cos\beta_{i0}} + \frac{h_{i0} \cos\eta_i}{2} \right) + \sum_{j=i+1}^k \gamma'_j h_{j0} \cos\eta_j \quad (9-37)$$

悬垂绝缘子串顺线路方向的偏移量  $\delta_i$  仍可用式 (9-26) 计算，但必须注意此时式中的  $P_i$  为有风时悬垂线夹对架空线的垂直作用力， $\sigma_{i0}$ 、 $\sigma_{(i+1)0}$  须满足式 (9-36) 或式 (9-37)。

无风状态 I 与有风状态 II 间的各档顺线路的水平应力状态方程式为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0} \sigma_{i02}}{\cos^2\beta_{i0}} - \frac{E}{24} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i'^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{\sigma_{i02}^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta_i) \\ = \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0} \sigma_{i01}}{\cos^2\beta_{i0}} - \frac{E\gamma_1^2}{24} \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{\sigma_{i01}^2} - \alpha E(t_2 - t_1) \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} \end{aligned} \quad (9-38)$$

上三式中  $\eta_i$ ——第  $i$  档架空线的风偏角；

$\gamma'_i$ ——有风时第  $i$  档架空线的综合比载；

$\gamma_1$ ——无风时架空线的比载。

#### 5. 架空线的窜动长度

气象条件发生变化时，各档架空线应力发生变化，滑轮因两侧张力不等而产生转动，从而使各档线长发生窜动，直至滑轮受力达到新的平衡为止。在某些情况下，各档间架空线的窜动量可能很大，架空线上的防振设施甚至会碰撞滑轮，因此需要检查架空线的窜动长度。

以架线情况为状态 I，相应的比载为  $\gamma_1$ ，气温为  $t_1$ ，第  $i$  档档距  $l_{i0}$ ，高差角  $\beta_{i0}$ ，水平应力  $\sigma_{i01}$ ，悬挂曲线长度为

$$L_{i1} = \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \Delta l_{i1} + \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i01}^2}$$

若平均应力为  $\sigma_{\text{cpi}}$ ，制造温度为  $t_0$ ，相应的原始线长为

$$L_{i01} = L_{i1} \left[ 1 - \frac{\sigma_{\text{cpi}}}{E} - \alpha(t_1 - t_0) \right]$$

$$\approx \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \Delta l_{i1} + \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i01}^2} - \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} \left[ \frac{\sigma_{i01}}{E \cos\beta_{i0}} + \alpha(t_1 - t_0) \right] \quad (9-39)$$

当气象条件变至状态 II 时, 比载为  $\gamma'_{i2}$ , 气温为  $t_2$ , 应力为  $\sigma_{i02}$ , 初伸长 (降温  $\Delta t$ ) 已释放完毕, 则状态 II 下第  $i$  档架空线的原始线长为

$$L_{i02} = \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \Delta l_{i2} + \frac{\gamma'^2_{i2} l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i02}^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta_i) - \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} \left[ \frac{\sigma_{i02}}{E \cos\beta_{i0}} + \alpha(t_2 - \Delta t - t_0) \right] \quad (9-40)$$

以上两式之差值, 就是气象条件由状态 I 变至状态 II 时第  $i$  档原始线长的改变量, 即由其他档滑进该档的原始线长, 其长度为

$$\begin{aligned} \Delta L_{i0} &= L_{i02} - L_{i01} \\ &= (\Delta l_{i2} - \Delta l_{i1}) + \left[ \frac{\gamma'^2_{i2} l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i02}^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta_i) - \frac{\gamma_1^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i01}^2} \right] \\ &\quad - \frac{l_{i0}}{E \cos^2\beta_{i0}} (\sigma_{i02} - \sigma_{i01}) - \frac{\alpha l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} (t_2 - t_1 + \Delta t) \end{aligned} \quad (9-41)$$

经过滑轮  $i$  滑向小号杆塔侧的线长  $\Delta L_{i0\delta}$  为

$$\Delta L_{i0\delta} = \Delta L_{10} + \Delta L_{20} + \cdots + \Delta L_{i0} = \sum_{j=1}^i \Delta L_{j0} \quad (9-42)$$

欲利用式 (9-41) 求得  $\Delta L_{i0}$ , 需要先求出两种状态下的  $\Delta l_{i1}$ 、 $\Delta l_{i2}$  和  $\sigma_{i01}$ 、 $\sigma_{i02}$ , 求解的方法仍然是前述的试凑递推法, 将求得的  $\sigma_{i01}$ 、 $\sigma_{i02}$ 、 $\Delta l_{i1}$ 、 $\Delta l_{i2}$  代入式 (9-41), 可得到第  $i$  档的原始线长改变量  $\Delta L_{i0}$ , 进而由式 (9-42) 得到滑过相应滑轮的原始线长窜动量  $\Delta L_{i0\delta}$ 。将  $\Delta L_{i0\delta}$  折算为状态 II 下的线长窜动量  $\Delta L_{i2\delta}$  的计算式为

$$\Delta L_{i2\delta} = \Delta L_{i0\delta} \left( 1 + \frac{\sigma_{cp2}}{E} + \alpha t_2 \right) \quad (9-43)$$

由于  $\Delta L_{i0\delta}$  数值较小, 工程上可不考虑应力、气温作用引起的伸长量, 而将  $\Delta L_{i0\delta}$  直接视为架空线在滑轮中的实际滑动长度, 即认为  $\Delta L_{i2\delta} \approx \Delta L_{i0\delta}$ 。

本节各计算公式均是在滑轮无摩擦力的假定下得出的, 而实际上滑轮总是存在摩擦力的, 因此上述各式均存在不同程度的误差, 在滑轮润滑条件不好时尤其如此。由于各滑轮摩擦力在零和其最大静摩擦力之间变化, 且摩擦力的方向处于随机状态, 这使得考虑滑轮摩擦力影响时各档应力的计算非常复杂和困难。所幸的是在保证滑轮润滑良好、转动灵活的情况下, 摩擦力对各参数的影响在工程允许范围内, 因此一般可不考虑滑轮摩擦力。对于必须计及滑轮摩擦力影响的特殊情况, 通常只考虑严重边界条件下的参数特定值。如为了检查重要跨越档可能出现的最小对地间距, 要求得最小可能应力, 则可假定各滑轮线夹的摩擦力均达到最大值, 且方向均指向跨越档, 即假定滑向跨越档内的线长增量最大, 再根据气象条件就可求出可能出现的最小应力 (最大弧垂); 为了求得最高悬挂点可能发生的最大应力  $\sigma_{km}$ , 可假定该杆塔两侧各滑轮的摩擦力均达到各自的最大值, 且方向背向  $k$  号杆塔,  $k$  号杆塔自身滑轮的摩擦力可视为零; 为了估算气象条件由架线状态 I 变至运行状态 II 时滑过滑轮线夹的线长最大窜动量, 可以假定各滑轮的摩擦力均达到最大值, 且方向均指向第  $k$  档 (最大窜动量可能发生在耐张段一端靠大档距  $k$  一侧的杆塔上), 按此假定条件求出  $\sigma_{i01}$ 、 $\sigma_{i02}$  和  $\Delta l_{i1}$ 、 $\Delta l_{i2}$  后, 即可求出  $\Delta L_{i0\delta}$ , 并从中找到窜动量最大者。

### 三、架空线一端采用平衡锤时的应力和线长

为了降低跨越杆塔高度，过江大跨越可采用图 9-6 所示的架线方式。其一侧耐张杆塔上通过耐张绝缘子串、耐张线夹锚固架空线，另一端耐张杆塔上通过耐张绝缘子串、滑轮和平衡锤拉紧架空线，中间各直线杆塔上均采用滑轮悬挂。这种架线方式使架空线在经常运行气温下保持较大的基本恒定张力，能够根据气温的变化自动调节跨越档的弧垂。当气温升高时，架空线的应力变小，平衡锤下降拉紧架空线，从而使弧垂减小，直至架空线的轴向拉力与平衡锤重相等为止；

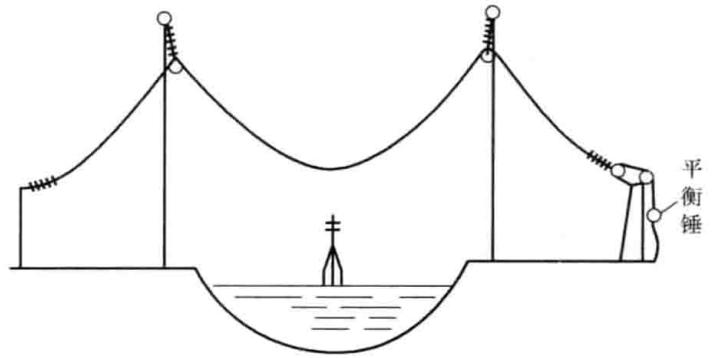


图 9-6 采用平衡锤拉紧架空线

当气温降低或比载增大时，架空线的应力增大，平衡锤上升，保证应力不致过大。若采用架空线两端锚固的架线方式，由于高航行水位多发生于气温较高的夏季，此时水位高，弧垂也大，为保证通航安全距离，必须设立较高的过江杆塔，这势必增大投资。

#### 1. 架空线的运行应力和平衡锤重的选择

在耐张段一端锚固，另一端采用平衡锤拉紧的情况下，最大弧垂不会发生于最高气温气象，而必发生于最大垂直比载气象。这是因为最高气温时，架空线虽然变温伸长使弧垂增大，但张力降低使平衡锤下降，拉紧架空线其弧垂又减小，故最高气温不会使弧垂达到最大值。最大垂直比载（覆冰无风）时，一方面架空线应力增大弹性伸长增加，一方面平衡锤上升增加档内线长，二者都使弧垂增加从而达最大值。

架空线的经常运行应力和平衡锤重一般按下面步骤进行选择：

(1) 根据跨越档档距、最大垂直比载和架空线许用应力，计算该档的弧垂。

(2) 以覆冰无风气象下的水位高度、航船顶高、航道位置以及架空线弧垂，按通航安全间距的要求，确定跨越档两侧的塔高。

(3) 根据确定的塔高，按最高航行水位时航船的通过要求，计算此时容许的弧垂和相应的最小容许应力。若最小容许应力等于或小于平均运行应力许用值，就以它作为跨越档的经常运行应力；若大于平均运行应力许用值，则需要加高跨越塔，加大容许弧垂，使架空线经常运行应力不大于年均运行应力许用值。

(4) 根据求得的跨越档的经常运行应力，计算出最高悬挂点处的轴向应力  $\sigma_k$  以及平衡锤悬挂处的轴向应力  $\sigma_n$  或张力  $T_n$ ， $T_n$  即为平衡锤的重力。

为减轻平衡锤重，其悬挂方式多采用滑轮组形式，图 9-6 中采用了一个动滑轮，所需平衡锤重为直接悬挂时的一半。

平衡锤的位置，应保证在常温下距悬挂滑轮和地面均有一定的距离，以便气象条件变化时能上下移动，对档内线长进行调整。平衡锤上升的最高位置要有所限制，否则随比载的增大，平衡锤任意上升，向档内输送的线长会使弧垂无限制地增大，将无法保证通航安全距离。通常采取锚线的形式限制平衡锤的最高位置。

#### 2. 控制条件的选定

平衡锤在未到达最高位置之前，架空线的应力是基本恒定的。平衡锤到达最高位置并在

此维持时, 架空线应力的变化规律与采用滑轮线夹两端锚固的连续档相同, 应控制架空线的应力不超过许用应力。假设某一气象条件 (如跨越档最大垂直比载下的最大容许弧垂) 作为控制条件, 按照两端锚固中间滑轮悬挂的连续档应力计算方法, 求解其他各种气象条件下的各档水平应力和悬挂点轴向应力, 若这些应力均不超过各自的限定值, 则控制条件假设正确; 若有超过者, 应再以超过最多者作为控制条件, 推求其他各种气象条件下的应力。反复运算, 直至选出最不利的气象条件为止, 此气象条件就是平衡锤最高位置的控制条件。

### 3. 平衡锤的起动气温

平衡锤上升到最高位置时被下方的锚线止住不动, 在实际控制条件  $k$  下, 气温为  $t_k$ , 耐张段内任一档的线长为

$$L_{ik} = \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \Delta l_{ik} + \frac{\gamma'_{ik}{}^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0k}^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta_i)$$

相应的原始线长为

$$L_{i0k} = \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \Delta l_{ik} + \frac{\gamma'_{ik}{}^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0k}^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta_i) - \frac{l_{i0}\sigma_{i0k}}{E \cos^2\beta_{i0}} - \alpha t_k \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}$$

整个耐张段的原始线长为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n L_{i0k} &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma'_{ik}{}^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0k}^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta_i) \right] \\ &\quad - \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}\sigma_{i0k}}{E \cos^2\beta_{i0}} - \alpha t_k \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} \end{aligned}$$

在气象条件变化, 如气温逐渐升高, 比载变为自重比载的过程中, 架空线的应力不断减小。当平衡锤悬挂点处的应力降至平衡锤重产生的相应应力  $\sigma_{nd}$  时, 平衡锤开始动作。此时的温度  $t_d$  称为平衡锤的起动气温。若不考虑  $\Delta l_i$ 、 $\Delta h_i$  的影响, 根据已知的  $\sigma_{nd}$ , 利用式 (9-32) 可以求出各档的水平应力  $\sigma_{i0d}$ 。此状态下耐张段的原始线长为

$$\sum_{i=1}^n L_{i0d} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} + \frac{\gamma_d^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0d}^2} \right] - \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}\sigma_{i0d}}{E \cos^2\beta_{i0}} - \alpha t_d \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}$$

两种状态的原始线长应相等, 即  $\sum_{i=1}^n L_{i0d} = \sum_{i=1}^n L_{i0k}$ , 从而解得

$$\begin{aligned} t_d = t_k + \frac{1}{\alpha \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}}} &\left[ \frac{\gamma_d^2}{24} \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{\sigma_{i0d}^2} - \sum_{i=1}^n \frac{\gamma'_{ik}{}^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{24\sigma_{i0k}^2} (1 + \tan^2\beta_{i0} \sin^2\eta_i) \right. \\ &\left. + \frac{1}{E} \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos\beta_{i0}} (\sigma_{i0k} - \sigma_{i0d}) \right] \end{aligned} \quad (9-44)$$

当实际气温高于起动气温  $t_d$  时, 平衡锤可上下移动, 处于调节位置。当实际气温低于起动气温  $t_d$  时, 平衡锤上升到最高位置, 架空线处于两端锚固状态。

### 4. 架线时的架空线应力与平衡锤的位置

设平衡锤在最高位置时的控制气象为第 I 状态, 各档水平应力为  $\sigma_{i0k}$ 。架线气象为第 II 状态, 并考虑初伸长降温  $\Delta t$ , 各档水平应力为  $\sigma_{i0j}$ 。根据原始线长相等, 可写出两种状态下耐张段的状态方程式为

$$\sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}\sigma_{i0j}}{\cos^2\beta_{i0}} - \frac{E}{24} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_{ij}^2 l_{i0}^3 \cos\beta_{i0}}{\sigma_{i0j}^2} = \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}\sigma_{i0k}}{\cos^2\beta_{i0}}$$

$$-\frac{E}{24} \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_{ik}'^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{\sigma_{i0k}^2} (1 + \tan^2 \beta_{i0} \sin^2 \eta_i) - \alpha E (t_j - t_k - \Delta t) \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}}$$

假定平衡锤悬挂点处架空线的轴向应力为  $\sigma_{nj}$ ，利用式 (9-32) 采用试凑递推法，可逐个求得  $n$  个未知应力  $\sigma_{i0j}$ 。将求得的  $n$  个  $\sigma_{i0j}$  代入上式，若闭合说明假定正确，否则需重新假定  $\sigma_{nj}$  再进行计算。如果满足上式的轴向应力大于或等于平衡锤的起动力即  $\sigma_{nj} > \sigma_{nd}$ ，则架线时平衡锤处于最高位置的锚固状态。如果  $\sigma_{nj} < \sigma_{nd}$ ，则表明架线情况下平衡锤处于动作状态，平衡锤需自最高位置下移一段距离  $S_{jd}$  安装。假设架线时各档的水平应力均为平衡锤动作期间的恒定应力，即  $\sigma_{n0j} = \sigma_{n0d}$ ，则架线状态与平衡锤起动力状态下的线长之差主要是气温的变化引起，平衡锤的下移距离是

$$S_{jd} = \alpha (t_j - t_d - \Delta t) \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} \quad (9-45)$$

中长期运行后，初伸长释放完毕，在同样的气温下平衡锤的下移量要多一些，增加的一段为耐张段内初伸长的总放出量。当架空线达到最高温度  $t_m$ （计入架空线的载流升温），平衡锤的最大下移量为

$$S_{md} = \alpha (t_m - t_d) \sum_{i=1}^n \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} \quad (9-46)$$

采用式 (9-45) 和式 (9-46) 计算平衡锤的下移距离时，应计及动滑轮组倍率的影响。

#### 5. 架空线的窜动长度

当气温降低至最低气温或为最大比载气象时，架空线应力变大，平衡锤上升可能到达最高位置。当气温升高至最高气温气象时，平衡锤下降可能达到最低位置。气象条件发生变化，架空线通过滑轮产生窜动，对各档线长进行调节。

设架线时气温为  $t_j$ ，第  $i$  档比载为  $\gamma_{ij}$ ，水平应力为  $\sigma_{i0j}$ ，平衡锤下移距离为  $S_{jd}$ 。检查架空线滑过滑轮的窜动量时的气温为  $t_c$ ，第  $i$  档比载为  $\gamma_i'$ ，水平应力为  $\sigma_{i0c}$ ，风偏角为  $\eta_i$ ，平衡锤下降距离为  $S_{cd}$ 。两种状态下第  $i$  档的架空线线长之差等于其弹性伸长量、温度膨胀量、初伸长放出量和外档滑进来的线长增量  $\Delta L_{i0}$  之和，即

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} + \frac{\gamma_i'^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i0c}^2} (1 + \tan^2 \beta_{i0} \sin^2 \eta_i) + \Delta l_{ic} \right] - \left( \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} + \frac{\gamma_{ij}'^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i0j}^2} + \Delta l_{ij} \right) \\ & = \frac{l_{i0} (\sigma_{i0c} - \sigma_{i0j})}{E \cos^2 \beta_{i0}} + \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} \alpha (t_c - t_j + \Delta t) + \Delta L_{i0} \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} \Delta L_{i0} & = (\Delta l_{ic} - \Delta l_{ij}) + \frac{\gamma_i'^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i0c}^2} (1 + \tan^2 \beta_{i0} \sin^2 \eta_i) \\ & \quad - \frac{\gamma_{ij}'^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24 \sigma_{i0j}^2} - \frac{l_{i0} (\sigma_{i0c} - \sigma_{i0j})}{E \cos^2 \beta_{i0}} + \alpha (t_c - t_j + \Delta t) \frac{l_{i0}}{\cos \beta_{i0}} \end{aligned} \quad (9-47)$$

第  $i$  基杆塔上通过滑轮的窜动量（滑向小号侧）为

$$\Delta L_{i0\delta} = \sum_{k=1}^i \Delta L_{k0} = \Delta L_{10} + \Delta L_{20} + \cdots + \Delta L_{i0} \quad (9-48)$$

挂平衡锤的第  $n$  基耐张塔，滑向耐张段内的长度为  $\Delta L_{n0\delta}$ 。当两种状态平衡锤均处于最高位置时， $\Delta L_{n0\delta} = 0$ 。当两种状态平衡锤均处于动作状态时， $\Delta L_{n0\delta}$  为两种状态下平衡锤下

移距离之差, 即

$$\Delta L_{n0\delta} = \sum_{i=1}^n \Delta L_{i0} = S_{jd} - S_{cd} \quad (9-49)$$

需要指出, 当采用平衡锤拉紧架空线时, 一定要保证滑轮的摩擦力足够小, 否则将失去平衡锤的有利作用。最不利的情况是滑轮摩擦力很大, 致使其相当于固定线夹状态, 这将使跨越间隙、架空线应力等运行参数变坏。

#### 第四节 连续档架空地线的应力选配

确定架空地线的使用应力, 不仅要考虑最大比载、最低气温、年平均气温等气象条件下其使用应力要满足相应的许用值, 而且还应满足大气过电压下档距中央导线与地线的防雷间距要求。

在过去的线路设计中, 所有耐张段的地线多选用同一使用应力, 只要整条线路中有一档为满足导线和地线间的防雷间距要求需提高地线的使用应力时, 全线地线的使用应力全部提高。这必然使得多数耐张段内的地线应力不必要地增大, 运行、防振条件变坏, 还容易产生地线的“上拔”。目前常用的方法是按耐张段选配地线应力。首先按杆塔塔头导线和地线悬挂点间尺寸, 大气过电压下档距中央导线与地线的防雷间距要求, 推算在大气过电压下各耐张段地线应达到的使用应力, 再以此应力利用状态方程式推求在各种气象条件下各耐张段的最大使用应力 and 平均运行应力, 并检查其是否满足安全系数的要求。这种选配应力的方法, 虽然各代表档距地线的安全系数不同, 但是在满足导线防雷间距要求的前提下尽可能地放松地线, 提高了安全系数, 改善了运行条件。

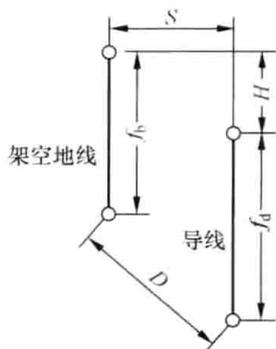


图 9-7 档距中央导线与地线的间距

##### 一、架空地线的应力选配和控制档距

设杆塔上导线与地线悬挂点间的垂直距离为  $H$ , 水平距离为  $S$ , 外过无风气象下导线和地线的比载、水平应力和中央弧垂分别为  $\gamma_d$ 、 $\sigma_d$ 、 $f_d$  和  $\gamma_b$ 、 $\sigma_b$ 、 $f_b$  (见图 9-7), 则档距中央导线与地线间的距离  $D$  为

$$D = \sqrt{[(H + f_d) - f_b]^2 + S^2} \\ = \sqrt{\left[ \frac{l^2}{8} \left( \frac{\gamma_d}{\sigma_d} - \frac{\gamma_b}{\sigma_b} \right) + H \right]^2 + S^2} \quad (9-50)$$

上式中  $f_d$ 、 $f_b$  采用平抛物线公式计算, 一般能满足工程精度要求。在档距中央, 外过无风气象下导线与架空地线的净空距离  $D$  应满足

$$D \geq 0.012l + 1 \quad (\text{m})$$

将式 (9-50) 代入上式, 可解得

$$\sigma_b \geq \frac{\gamma_b}{\frac{\gamma_d}{\sigma_d} - B} = \frac{\gamma_b}{\sigma_d - B} \quad (\text{MPa}) \quad (9-51)$$

其中

$$B = \frac{8[\sqrt{(1 + 0.012l)^2 - S^2} - H]}{l^2} \quad (1/\text{m}) \quad (9-52)$$

上二式中长度尺寸  $l$ 、 $S$ 、 $H$  的单位为  $m$ ，比载  $\gamma_d$ 、 $\gamma_b$  的单位为  $MPa/m$ ，应力的单位为  $MPa$ 。

对一个耐张段而言，导线应力  $\sigma_d$  及塔头尺寸  $S$ 、 $H$  是已知的，耐张段内各档距的大小则是不同的，因此地线应力是档距  $l$  的函数。考虑施工方便起见，耐张段内地线采用同一应力架设。为确保段内每一档地线与导线间的防雷距离， $\sigma_b$  应取每档要求中的最大值。最基本的方法是利用式 (9-51) 求出耐张段内每一档要求的  $\sigma_b$ ，从中选出最大者作为架线应力。这种方法的缺点是计算工作量大。通常的做法是求出出现极大应力值  $\sigma_{bm}$  下的档距  $l_Q$  (控制档距)，将实际档距  $l$  与  $l_Q$  相比较，找出要求最大应力时的档距  $l_m$ ，从而得到需要的地线应力。根据式 (9-51) 知，欲使  $\sigma_b$  最大，则必有  $B$  极大，因此求  $\sigma_b$  极大值问题转化为求  $B$  的极大值  $B_m$  问题。令

$$\frac{dB}{dl} = \frac{1}{l_Q^2} \left[ \frac{8(0.012l_Q + 1) \times 0.012}{\sqrt{(0.012l_Q + 1)^2 - S^2}} - 2B_m l_Q \right] = 0$$

解得

$$B_m = \frac{8 \times 0.012(0.012l_Q + 1)}{2l_Q \sqrt{(0.012l_Q + 1)^2 - S^2}} \quad (9-53)$$

与式 (9-52) 联立，可得

$$H = \frac{(0.012l_Q)^2 + 0.036l_Q - 2(S^2 - 1)}{2\sqrt{(0.012l_Q + 1)^2 - S^2}} \quad (9-54)$$

在已知  $H$ 、 $S$  条件下，利用上式求解  $l_Q$ ，需采用试凑法借助计算机进行。工程上常事先依据式 (9-54)，以  $S$  为参变量，绘制出  $l_Q \sim H$  的关系曲线 (见图 9-8)，供使用时查用。

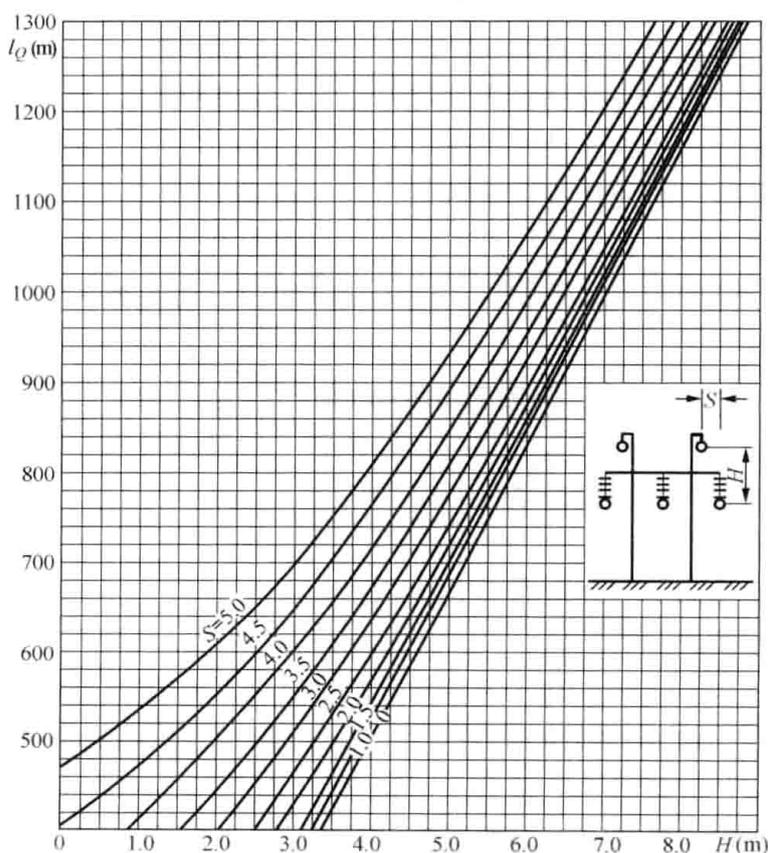


图 9-8 地线的控制档距  $l_Q$  与  $S$ 、 $H$  的关系曲线 (+15°C)

当地线与导线悬挂点间的水平间距  $S$  小得可以忽略时, 式 (9-54) 变为较为简单的直线关系

$$H = 0.006l_Q + 1 \quad (9-55)$$

或

$$l_Q = (H - 1)/0.006 = 166.7(H - 1) \quad (9-56)$$

在某些线路设计中, 在计算  $l_Q$  时不考虑  $S$  的影响, 这实际上是将地线与导线间的垂直间距作为防雷间距, 所以是偏于安全的, 但地线可能会产生不必要的拉紧。

控制档距的意义在于: 按档距  $l_Q$  求出耐张段的地线控制应力  $\sigma_{bm}$ , 以此应力架设地线, 则档距为  $l_Q$  一档的防雷间距恰好满足要求, 而其他大于或小于  $l_Q$  的档距 (即  $l_i \neq l_Q$ ) 中的防雷间距均有富裕。

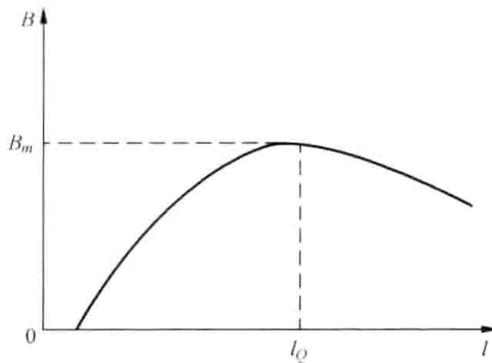


图 9-9 地线的  $B$  值与档距的关系

在  $S$ 、 $H$  确定的条件下, 地线的使用应力  $\sigma_b$  (或  $B$ ) 是档距  $l$  的单峰函数, 其变化如图 9-9 所示。为了尽可能降低地线应力, 避免将地线拉得过紧, 当耐张段的最大档距  $l_{max} < l_Q$  时, 可取  $l_{max}$  对应下的  $\sigma_{bm}$  作为外过电压气象时的地线压力, 此时耐张段所有档的地线与导线间距均能满足设计规范要求; 当耐张段的最小档距  $l_{min} > l_Q$  时, 可取  $l_{min}$  对应下的  $\sigma_{bm}$  作为地线的架线应力, 此时耐张段各档的防雷间距也均能满足设计规范的要求; 当  $l_{min} \leq l_Q \leq l_{max}$  时, 取与  $l_Q$  最接近的档距计算。

需要指出, 利用上述方法得到的  $\sigma_{bm}$  是大气过电压即气温  $+15^\circ\text{C}$ 、无风无冰气象条件下地线的使用应力, 当气象条件不同于大气过电压时, 架空线的应力应按代表档距利用状态方程式转换。欲求得地线的最大使用应力和年均运行应力, 也应以大气过电压气象条件下的各参数为已知状态, 其他气象条件为未知状态, 代入状态方程式求出相应气象条件下的应力, 从中找出最大值, 并应检查各气象条件下的应力是否在其许用范围内, 同时还应保证任何气象条件下地线与导线间的距离大于容许的最小运行间距, 对重冰区不均匀覆冰和脱冰情况尤其应该注意。

由于选配地线应力时, 耐张段内各档的长度和采用的杆塔类型 ( $S$ 、 $H$ ) 尚未最后确定, 且不宜事先估计, 因此常取  $l_Q$  下的  $\sigma_{bm}$ ; 待施工图设计阶段, 再根据耐张段各档的实际长度, 考虑是否放松地线或调整杆塔地线支架尺寸  $S$ 、 $H$ 。

## 二、地线支架高度的选择

地线的支架高度是由下述诸因素综合决定的。

- (1) 地线对边导线的保护角。
- (2) 地线与导线间垂直距离和水平位移。为防止不均匀覆冰和脱冰跳跃引起地线与导线产生鞭击或闪络, 防止地线的脱冰在下落中冲击导线, 以及保证内过电压对地空气间隙等, 地线与导线之间应有一定的垂直距离和水平位移。
- (3) 双地线在导线水平排列时对中导线的保护范围。
- (4) 档距中央导线与地线的间距要求。
- (5) 地线的许用应力。许用应力越大, 需要的支架高度就越低, 反之需要的支架高度就

越高。地线的支架高度必须保证其使用应力在许用应力范围之内。

线路设计中选用的定型杆塔，其地线的支架高度应满足上述五个要求。当档距中央地线对导线的间距恰好满足要求时，地线与导线悬挂点间的高度  $H$  可由式 (9-50) 得到

$$H = \sqrt{(0.012l + 1)^2 - S^2} - \frac{l^2}{8} \left( \frac{\gamma_d}{\sigma_d} - \frac{\gamma_b}{\sigma_b} \right) = \sqrt{(0.012l + 1)^2 - S^2} - \Delta f \quad (9-57)$$

一般  $S$  值比较容易确定，对杆塔重量的影响也小。导线与地线的档距中央弧垂之差  $\Delta f$  一般不为负值，否则地线弧垂大于导线弧垂，会引起档距中央保护角减小等弊病。若取  $\Delta f = 0$ ，则支架高度  $H$  由其使用的最大档距决定，这对定型杆塔的设计来说不够经济合理。若取  $\Delta f > 0$ ，由于  $\Delta f$  随  $l^2$  的增加而增大，在选定合适的  $\sigma_b$  之后， $H$  相对  $l$  有最大值。将  $H$  对  $l$  求导并令其等于零，整理后可得到

$$S = (0.012l + 1) \sqrt{1 - \left[ \frac{0.006l}{\Delta f} \right]^2} \quad (9-58)$$

上式是关于  $l$  的高次方程，在已知  $\gamma_d$ 、 $\gamma_b$  和  $\sigma_d$ 、 $\sigma_b$  及  $S$  下可试凑求解。将解得的  $l$  值代入式 (9-57) 即可求得最大值  $H_{\max}$ ，作为设计定型杆塔的依据。

当  $S$  很小可以忽略时，由式 (9-58) 得

$$l = \frac{0.048}{\frac{\gamma_d}{\sigma_d} - \frac{\gamma_b}{\sigma_b}} \quad (9-59)$$

相应地

$$H_{\max} = 1 + \frac{2.88 \times 10^{-4}}{\frac{\gamma_d}{\sigma_d} - \frac{\gamma_b}{\sigma_b}} \quad (9-60)$$

从上式看到， $H_{\max}$  与档距的大小无关，因而没有必要特别加高大档距塔型的地线支架高度。从经济角度看，总希望  $H_{\max}$  小一些为好，这需要增大  $\sigma_b$ 。但地线的使用应力受其许用应力的限制，因此不能为减小  $H$  过分增大  $\sigma_b$ ，相应的弧垂差  $\Delta f$  通常取导线弧垂的 10% 左右比较适宜。

## 第五节 连续倾斜档的架线观测弧垂及线长的调整

在输电线路上下山中，由于地形的原因，形成连续倾斜档。在紧线架线施工中，架空线悬挂于滑轮中，根据二点间应力的关系，随着线路向山顶方向延伸，架空线的水平应力逐档渐次增加，连续倾斜档的最低档的架空线水平应力最小，最高档的架空线水平应力最大。由于杆塔两侧相邻档架空线的水平张力不等，迫使其上的悬垂绝缘子串及放线滑车向山顶方向偏斜（参见图 9-5）。连续倾斜档架线施工时，需要确定的是各档的水平应力、观测弧垂以及安装悬垂线夹时的移印距离。

### 一、连续倾斜档紧线时各档的水平应力

在图 9-5 中，连续倾斜档由 0 号~ $n$  号杆塔间的  $n$  个档距组成，悬垂串的长度  $\lambda_i$ 。竣工后悬垂绝缘子串铅垂，各档档距  $l_{i0}$ 、高差  $h_{i0}$ 、高差角  $\beta_{i0}$ ，水平应力相等均为  $\sigma_0$ ；紧线施工时悬垂绝缘子串偏斜，顺线路方向的偏移量  $\delta_i$ ，各档参数变为档距  $l_i$ 、高差  $h_i$ 、高差角  $\beta_i$ ，水平应力  $\sigma_{i0}$ 。紧线时导线在滑轮中悬挂，第  $i$  档最低点相对于第 1 档最低点的高度

差  $y_{i1}$  为

$$y_{i1} = \frac{\sigma_{i0}}{\gamma} \left( 1 - \operatorname{ch} \frac{\gamma a_i}{\sigma_{i0}} \right) + \sum_{j=1}^{i-1} h_j - \frac{\sigma_{10}}{\gamma} \left( 1 - \operatorname{ch} \frac{\gamma a_1}{\sigma_{10}} \right) \quad (9-61)$$

式中  $a_i$  ——第  $i$  档最低点距该档左悬挂点的水平距离。

$h_i$  有正负之分, 右悬挂点高者取正值, 反之取负值。

$$a_i = \frac{l_i}{2} - \frac{\sigma_{i0}}{\gamma} \operatorname{arcsch} \frac{h_i}{\frac{2\sigma_{i0}}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_i}{2\sigma_{i0}}} \quad (9-62)$$

$$h_i = h_{i0} + \Delta h_i \approx h_{i0} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_i^2}{\lambda_i} - \frac{\delta_{i-1}^2}{\lambda_{i-1}} \right) \quad (9-63)$$

忽略滑轮的摩擦力, 根据二点之间的应力关系, 第  $i$  档的水平应力  $\sigma_{i0}$  与第 1 档的水平应力  $\sigma_{10}$  之间有关系

$$\sigma_{i0} = \sigma_{10} + \gamma y_{i1} \quad (9-64)$$

紧线施工时一般可认为  $\delta_0 = 0$ ,  $\delta_n = 0$ 。达到紧线要求时, 紧线段架空线在各档水平应力  $\sigma_{i0}$  下的总悬挂曲线长度所对应的总原始线长, 等于竣工后各档水平应力均为  $\sigma_0$  下的总悬挂曲线长度所对应的总原始线长, 所以

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left[ \sqrt{\left[ \frac{2(\sigma_{10} + \gamma y_{i1})}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_i}{2(\sigma_{10} + \gamma y_{i1})} \right]^2 + h_i^2} \times \left( 1 - \frac{\sigma_{10} + \gamma y_{i1}}{E \cos \beta_i} \right) \right] \\ & = \sum_{i=1}^n \left[ \sqrt{\left( \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_{i0}}{2\sigma_0} \right)^2 + h_{i0}^2} \left( 1 - \frac{\sigma_0}{E \cos \beta_{i0}} \right) \right] \end{aligned} \quad (9-65)$$

上式中右端各量为竣工后的值, 紧线时已知, 左端中  $\sigma_{10}$  待求。一般利用计算机采用迭代逼近法求解, 步骤如下:

- (1) 将竣工后的档距参数和设计应力  $\sigma_0$  作为初值;
- (2) 利用式 (9-62)、式 (9-63)、式 (9-61), 计算  $y_{i1}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ );
- (3) 利用式 (9-65), 试算逼近求得  $\sigma_{10}$ ;
- (4) 利用式 (9-64) 求得  $\sigma_{i0}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。
- (5) 利用式 (9-26)、式 (9-63) 和  $l_i = l_{i0} + \Delta l_i = l_{i0} + (\delta_i - \delta_{i-1})$ , 计算悬垂绝缘子串偏斜时的有关参数  $\sigma_i$ 、 $l_i$ 、 $h_i$ 、 $\beta_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。
- (6) 返步骤 (2) 反复迭代计算, 直至相邻二次迭代所得  $\sigma_{10}$  基本不变为止。

## 二、连续倾斜档紧线时各档的观测弧垂

一般情况下, 连续倾斜档紧线时各档的观测弧垂可用斜抛物线弧垂公式求得

$$f_i = \frac{\gamma l_i^2}{8\sigma_{i0} \cos \beta_i}$$

需精确计算时, 可用下式

$$f_i = \frac{\sigma_{i0}}{\gamma} \left[ \sqrt{1 + \left[ \frac{h_i}{\frac{2\sigma_{i0}}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_i}{2\sigma_{i0}}} \right]^2} \operatorname{ch} \frac{\gamma l_i}{2\sigma_{i0}} - \sqrt{1 + \left( \frac{h_i}{l_i} \right)^2} + \frac{h_i}{l_i} \left( \operatorname{arcsch} \frac{h_i}{l_i} - \operatorname{arcsch} \frac{h_i}{\frac{2\sigma_{i0}}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_i}{2\sigma_{i0}}} \right) \right] \quad (9-66)$$

## 三、连续倾斜档的悬垂线夹的安装位置

悬垂线夹的安装位置应保证线夹安装后悬垂串铅垂, 需将紧线时各档的线长调整为竣工

后各档的线长，各档的线长调整量一般可用下式计算

$$\Delta L_i = \frac{\gamma^2 l_{i0}^3 \cos \beta_{i0}}{24} \left( \frac{1}{\sigma_{i0}^2} - \frac{1}{\sigma_0^2} \right) - \frac{(\sigma_{i0} - \sigma_0) l_{i0}}{E \cos^2 \beta_{i0}} \quad (9-67)$$

当连续档含有大高差档或大跨距档，需要对各档的线长调整量精确计算时，可采用下式

$$\begin{aligned} \Delta L_i = & \sqrt{\left( \frac{2\sigma_{i0}}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_i}{2\sigma_{i0}} \right)^2 + h_i^2} \times \left( 1 - \frac{\sigma_{i0}}{E \cos \beta_i} \right) \\ & - \sqrt{\left( \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l_{i0}}{2\sigma_0} \right)^2 + h_{i0}^2} \times \left( 1 - \frac{\sigma_0}{E \cos \beta_i} \right) \end{aligned} \quad (9-68)$$

当  $\Delta L_i$  为正值时，表示为调减量； $\Delta L_i$  为负值时，表示为调增量。以山下端第 1 档 1 号杆塔处为移印的起始点，则第  $i$  号杆塔上安装悬垂线夹时的移印距离为

$$s_i = \sum_{j=1}^i \Delta L_j \quad (9-69)$$

当  $s_i$  为正值时表示自画印点起向左侧移印， $s_i$  为负值时表示自画印点起向右侧移印，如图 9-10 所示。当  $s_i$  中的  $\Delta L_i$  采用式 (9-67) 计算时，垂球线与架空线相交处 A 为画印起点。当  $s_i$  中的  $\Delta L_i$  采用式 (9-68) 计算时，由于在有关线长计算中已计及悬垂绝缘子串的偏斜量  $\delta_i$ ，故应以图 9-10 中滑轮与架空线的接触点 B 点为  $s_i$  的画印起点。

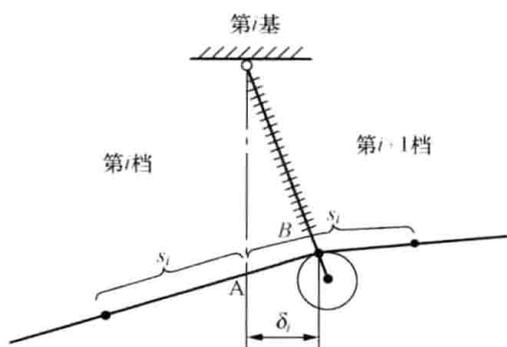


图 9-10 悬垂线夹的安装位置

## 练习 题

1. 何为代表档距？代表档距有什么作用？代表档距的计算公式是在何种假设条件下导出的？

2. 某 220kV 线路通过我国典型气象区 VII 区，导线采用 LGJ-300/25 型，线路的一个耐张段如图 9-11 所示。假定架线竣工时（初伸长未放出）悬垂绝缘子串铅垂，气象条件变化引起悬垂绝缘子串偏斜后各档应力趋于一致，试计算外过无风气象条件下 2 号~3 号杆塔一

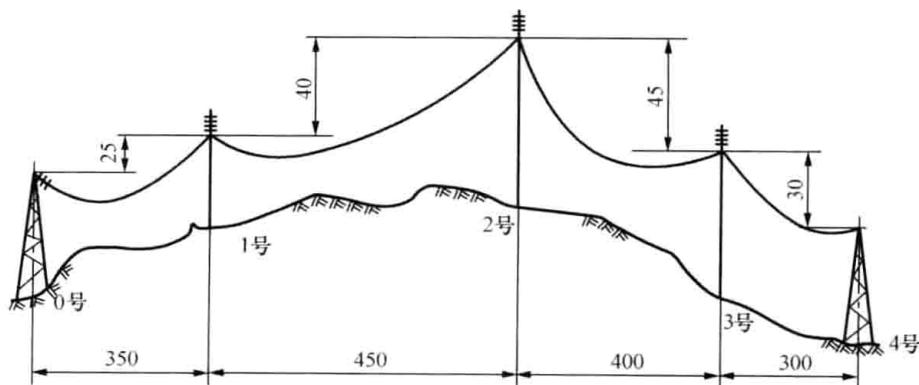


图 9-11 题 2 图 (单位: m)

档导线的弧垂。(导线安全系数取  $k=2.5$ ,  $E=78400\text{MPa}$ ,  $\alpha=18.8\times 10^{-6}1/\text{C}$ , 最大设计风速  $30\text{m/s}$ )。

3. 条件同上题, 试按连续档编写程序精确求解各档的应力和弧垂。已知悬垂绝缘子串串长  $\lambda=1582\text{mm}$ , 串重  $G_j=438.7\text{N}$ 。

4. 何为控制档距? 控制档距有什么作用?

## 第十章 架空线的断线张力和不平衡张力

### 第一节 概 述

架空线由于断线，在断线档的相邻档架空线具有的水平张力，称为架空线的断线张力。架空线的断线事故具有较大的破坏性，不仅使供电中断，还常使杆塔倾覆，甚至影响被跨越设施的正常运行。所以，在线路设计中要从杆塔强度和塔型布置上限制断线后事故的影响范围。

输电线路架设时，一般要求保证直线杆塔上的绝缘子串铅垂，直线杆上不出现不平衡的水平张力。但当气象条件改变时，由于耐张段内各档档距、高差、荷载等的不同，杆塔两侧架空线的水平张力不再相等。因气象条件变化，在杆塔上产生的水平张力差，称为架空线的不平衡张力。

统计分析表明，断线事故多发生于小截面架空线， $300\text{mm}^2$  以上架空线基本无断线，导线断线率较低，地线断线率更低，断线倒杆（塔）的基本是直线杆塔，断线原因大部分是雷击和外力破坏，无规律性可言。

计算架空线断线张力和不平衡张力的目的，是为计算杆塔强度，验算架空线不均匀覆冰、上人检修等情况下的电气间隙，校验邻档断线后跨越档的交叉跨越间距，以及检查转动横担或释放线夹是否能动作等提供依据。

在计算杆塔强度时，现行输电线路设计规范规定：导、地线的断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）取其最大使用张力的百分数，见表 10-1；出现断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）的根数，根据悬垂型杆塔还是耐张型杆塔，是单回路、双回路还是多回路的组合确定；不均匀覆冰情况下的导、地线的不平衡张力的取值见表 10-2，并考虑所有导、地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力。

表 10-1 10mm 及以下冰区的断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）（%）

地形	地线	悬垂塔导线			耐张塔导线	
		单导线	双分裂导线	双分裂以上导线	单导线	双分裂及以上导线
平丘	100	50	25	20	100	70
山地	100	50	30	25	100	70

表 10-2 不均匀覆冰情况的导、地线不平衡张力（%）

悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
导线	地线	导线	地线
10	20	30	40

上述有关断线张力的计算规定，仅用于确定杆塔荷载，用于杆塔设计和强度校验。对于重冰区线路、邻档断线的交叉跨越间距的校验、杆塔试验以及检查转动横担或释放线夹是否

能动作等需要精确地知道断线张力和不平衡张力的情况, 必须依据实际档距、高差、杆塔结构和气象等进行具体计算。

为提高输电线路的运行可靠性, 近年建设的高压架空输电线路多采用固定横担和固定悬垂线夹, 很少采用转动横担、压屈横担和释放线夹, 因此本章仅研究固定横担、固定悬垂线夹下断线张力的计算。

## 第二节 固定横担固定线夹下单导线的断线张力

悬垂型杆塔采用悬垂绝缘子串和固定横担、固定线夹时, 单根导线断落后断线档张力变为零, 在另一侧同相导线拉力的作用下, 杆塔向未断线侧产生挠曲, 悬垂绝缘子串向未断线侧偏斜, 使得未断线侧的导线比断线前松弛, 张力减小。未断线侧的其余悬垂型杆塔也向同一方向挠曲, 其上的悬垂绝缘子串向同一方向偏斜, 但偏斜程度逐基减小, 如图 10-1 所

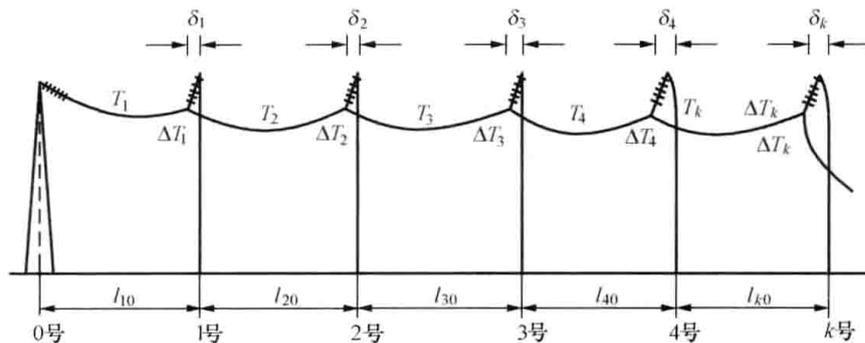


图 10-1 连续档断线后绝缘子串偏斜和杆塔挠曲情况

示。此时断线档杆塔承受的是断线冲击过程稳定后的已经衰减了的“残余张力”。绝缘子串越长, 导线就越松弛, 张力衰减就越多, 残余张力就越小。直线杆塔的挠曲变形进一步增大了导线的松弛量, 因而残余张力更小。

断线引起的悬垂绝缘子串偏斜和杆塔挠曲变形, 还使未断线侧各档的档距向减小的方向变化。紧邻断线档的档距减小得最多, 距断线档越远减小得越少。

残余张力的减小和档距的减小程度与断线后剩余档数有关。剩余档数是指断线档到耐张杆塔之间的档数。剩余档数越少, 绝缘子串的偏斜就越严重, 导线就越松弛, 残余张力就越小, 档距减小得越多。当断线后剩余档数仅有一档时, 悬垂绝缘子串偏斜得像耐张绝缘子串一样。一般情况下, 认为距断线点五档以外的导线受断线的影响很小, 可以不再考虑。断线档的相邻档的残余张力最小, 弧垂最大, 且该力完全由断线档侧的杆塔承受, 故将其定义为断线张力。

### 一、断线张力的有关方程及其求解

设断线前气温为  $t$ , 比载为  $\gamma$ , 各档水平应力为  $\sigma_0$ , 第  $i$  档的档距为  $l_{i0}$ , 高差角  $\beta_{i0}$ 。假设断线后气温、比载不变, 第  $i$  档档距减小了  $\Delta l_i$  变为  $l_i$ , 水平应力变为  $\sigma_{i0}$ , 仿公式 (9-19), 略去高差变化量的影响, 断线后第  $i$  档的档距减小量为

$$\Delta l_i = \left\{ \frac{\gamma^2 l_{i0}^2 \cos^2 \beta_{i0}}{24} \left[ \frac{1}{\sigma_{i0}^2} - \frac{1}{\sigma_0^2} \right] + \frac{\sigma_0 - \sigma_{i0}}{E \cos \beta_{i0}} \right\} \frac{l_{i0}}{\cos^2 \beta_{i0} \left( 1 + \frac{\gamma^2 l_{i0}^2}{8 \sigma_{i0}^2} \right)} \quad (10-1)$$

用张力表示为

$$\Delta l_i = \left\{ \frac{p^2 l_{i0}^2 \cos^2 \beta_{i0}}{24} \left[ \frac{1}{T_i^2} - \frac{1}{T_0^2} \right] + \frac{T_0 - T_i}{EA \cos \beta_{i0}} \right\} \frac{l_{i0}}{\cos^2 \beta_{i0} \left( 1 + \frac{p^2 l_{i0}^2}{8T_i^2} \right)} \quad (10-2)$$

式中  $p$ ——断线前、后斜档距单位长度上的架空线荷载；

$T_0$ 、 $T_i$ ——分别为断线前耐张段内架空线的水平张力和断线后第  $i$  档架空线的水平张力。

断线后由于架空线张力变小，弹性伸长量也减小，故断线后档内悬线长度要比断线前缩短一些。断线后档距缩小， $\Delta l_i$  取为正。

若断线后连续档剩余  $k$  档，则依式 (10-2) 可列出  $k$  个方程，但含有  $T_i$ 、 $\Delta l_i$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ) 共  $2k$  个待求量，需再列出  $k$  个方程才能求解。这可以从  $k$  基直线杆上架空线悬挂点偏移量与两侧张力的关系中得到。当第  $i$  基杆塔架空线悬挂点作用有不平衡张力时，悬垂绝缘子串及杆塔将向大张力侧偏斜，设悬垂绝缘子串悬挂点处的杆塔挠度系数为  $B$ ，可写出架空线悬挂点偏距  $\delta_i$  的计算式为

$$\delta_i = \Delta l_1 + \dots + \Delta l_i = \frac{\lambda (T_i - T_{i+1})}{\sqrt{\left( P_i + \frac{G_J}{2} \right)^2 + (T_i - T_{i+1})^2}} + B(T_i - T_{i+1}) \quad (10-3)$$

式中  $\lambda$ ——悬垂绝缘子串的长度，m；

$G_J$ ——悬垂绝缘子串的荷重，N；

$T_i$ 、 $T_{i+1}$ ——分别为断线后第  $i$  档和第  $i+1$  档架空线的水平张力，N；

$P_i$ ——导线作用于悬挂点的垂直荷载，N。对靠近断线档的第  $k$  基杆塔，由于一侧导线断线落地，垂直荷载  $P_v$  为其近似值。

式 (10-3) 中的杆塔挠度系数  $B$  包括塔身和横担两部分，它不仅与断线的相位、杆塔类型有关，尚与未断导线和地线的支持作用有关。对于刚性较大的铁塔来说，断线后的挠度很小，一般略去不计。对架有地线的直线杆塔来说，由于地线的支持，顺线路方向的挠度较小，一般情况下也可认为  $B=0$ 。这样求得的断线张力要偏大一些。

利用式 (10-2)、式 (10-3) 两组方程，按下面步骤试凑求解，即可得到断线后各档的张力。

设已知  $T_1 \rightarrow$  式 (10-2)  $\rightarrow \Delta l_1$ ； $\delta_1 = \Delta l_1$ ； $\delta_1$ 、 $T_1 \rightarrow$  式 (10-3)  $\rightarrow T_2$ ； $T_2 \rightarrow$  式 (10-2)  $\rightarrow \Delta l_2$ ； $\delta_2 = \delta_1 + \Delta l_2$ ； $\delta_2$ 、 $T_2 \rightarrow$  式 (10-3)  $\rightarrow T_3$ ；……； $T_k \rightarrow$  式 (10-2)  $\rightarrow \Delta l_k$ ； $\delta_k = \delta_{k-1} + \Delta l_k$ ； $\delta_k$ 、 $T_k \rightarrow$  式 (10-2)  $\rightarrow T_{k+1} \equiv 0$ 。

利用上述方法试凑求解时，初值  $T_1$  ( $\Delta l_1$ ) 的取值对计算的反复次数影响很大。残余张力  $T_1$  一定小于未断线前的张力  $T_0 = \sigma_0 A$ ，剩余档数越多， $T_1$  与  $T_0$  的差值越小，档距的变化量  $\Delta l_1$  也越小。

## 二、求解断线张力的作图法

利用计算机采用试凑法求解断线张力是很方便的。在无条件应用时，可采用图解法。固定横担固定线夹断线张力图解法见图 10-2。具体做法如下：

(1) 以  $\delta$  ( $\Delta l$ ) 为横坐标， $T$  ( $\Delta T$ ) 为纵坐标建立直角坐标系。

(2) 利用式 (10-2)，绘制断线后各档档距变化与张力变化的关系曲线 I:  $T = f(\Delta l)$ 。

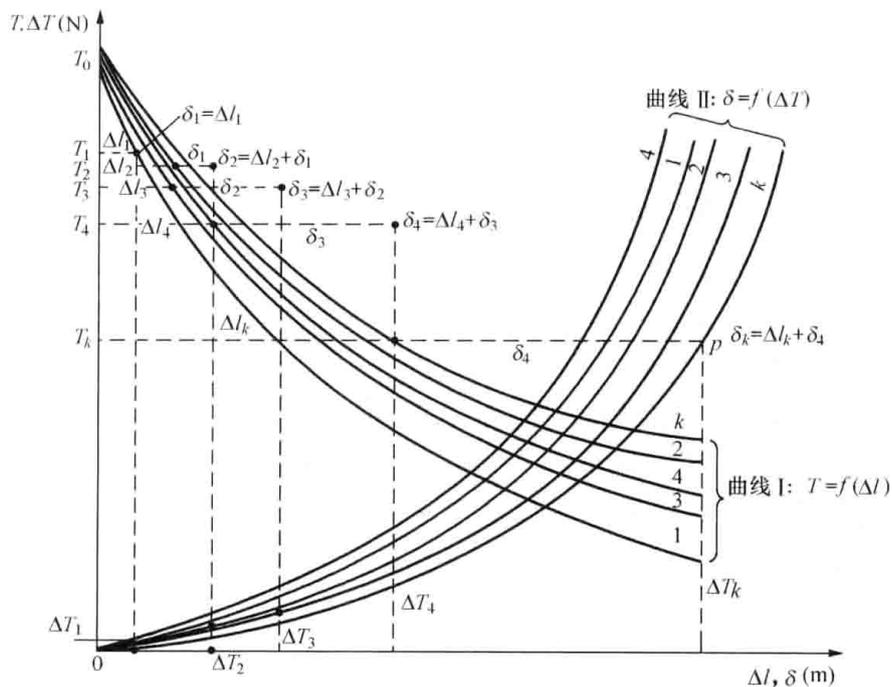


图 10-2 固定横担固定线夹断线张力图解法

(3) 利用式 (10-3), 绘制断线后直线杆塔上架空线悬挂点偏移量  $\delta_i$  与不平衡张力差  $\Delta T_i = T_i - T_{i+1}$  的关系曲线 II:  $\delta = f(\Delta T)$ 。

当悬挂点高等档距时, 曲线 I、II 各仅有一条。

(4) 图解法求解步骤:

假定靠耐张塔一档的架空线张力为  $T_1$  (见图 10-1), 由  $T_1$  查曲线 I 中相应曲线 1, 得到  $\Delta l_1$ 。因  $\delta_1 = \Delta l_1$ , 据此查曲线 II 中相应曲线 1, 得到  $\Delta T_1$ , 计算出  $T_2 = T_1 - \Delta T_1$ 。

由  $T_2$  查曲线 I 中相应曲线 2, 找出  $\Delta l_2$ , 算出  $\delta_2 = \Delta l_2 + \delta_1$ 。由  $\delta_2$  查曲线 II 中相应曲线 2, 得到  $\Delta T_2$ , 算出  $T_3 = T_2 - \Delta T_2$ 。

由  $T_i$  查曲线 I 中相应曲线  $i$ , 找出  $\Delta l_i$ , 算出  $\delta_i = \Delta l_i + \delta_{i-1}$ 。由  $\delta_i$  查曲线 II 中相应曲线  $i$ , 得到  $\Delta T_i$ , 算出  $T_{i+1} = T_i - \Delta T_i$ 。如此类推下去, 直至算出断线相邻档的  $T_k$ , 由  $T_k$  查曲线 I 中相应曲线  $k$ , 得到  $\Delta l_k$ , 算出  $\delta_k = \Delta l_k + \delta_{k-1}$ , 由  $\delta_k$  查曲线 II 中相应曲线  $k$ , 算出  $\Delta T_k$ 。

如果  $T_k = \Delta T_k$ , 或者说  $\delta_k$  的线段末端  $P$  正好落在曲线 II 中相应曲线  $k$  上, 则假定的  $T_1$  正确,  $T_k$  即为所求的断线张力。否则应重新假定  $T_1$ , 重复上述步骤直至  $T_k = \Delta T_k$  为止。

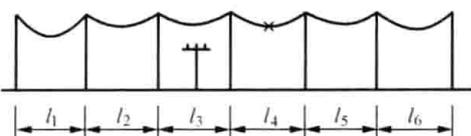
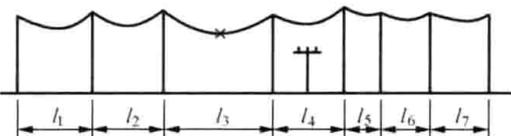
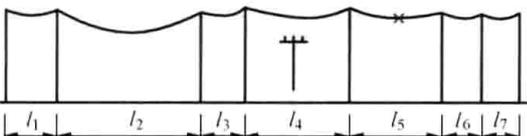
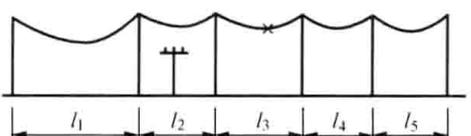
如果  $T_k > \Delta T_k$ , 或者说  $\delta_k$  线末端  $P$  点未到达曲线 II 中相应曲线  $k$ , 表明  $T_1$  设大了。如果  $T_k < \Delta T_k$ , 或者说  $\delta_k$  线末端  $P$  点超过曲线 II 中相应曲线  $k$ , 表明  $T_1$  设小了。

### 三、断线档的选择原则

为保证交叉跨越在断线事故情形下, 仍满足规范规定的跨越限距要求, 进行校验时断线档应选在跨越档的相邻档。由于断线张力与档距大小密切相关, 不同档距分布下的断线档选定原则见表 10-3。

表 10-3

断线档选取原则一览表

档距分布形式	档距特点	断线档选择原则
	各档档距大致相等	选在档距较多的一侧断线
	跨越档两侧的档距分别为一大一小, 即 $l_3 > l_5$	选在大档距内断线
	跨越档两侧的档距一侧较大, 一侧很小, 且小档距的邻档为一大档距, $l_2 > l_5 > l_3$	先选在较大档距 $l_5$ 内断线, 若计算结果裕度不大, 需再选在小档距内断线计算, 取裕度小的情况
	跨越档一侧为大档距, 且靠近非直线杆塔, $l_1 > l_3$	先假定选在多档距一边, 再计算大档距一边

**【例 10-1】** 某 35kV 架空输电线路, 无地线。一耐张段内共有 10 档, 档距基本相等, 代表档距为  $l_r = 273\text{m}$ , 如图 10-3 所示。导线为 LGJ-120/25 型, 截面积  $A = 146.73\text{mm}^2$ , 弹性系数  $E = 76000\text{MPa}$ ; 在档距  $l_8$  内跨越 I 级通信线, 通信线高 7m, 位于距 8 号杆 30m 处; 直线杆塔悬挂点高 13m, 挠度系数  $B = 0.0003\text{m/N}$ , 悬垂绝缘子串长  $\lambda = 0.886\text{m}$ , 重 233.4N。气温  $+15^\circ\text{C}$ 、无风、无冰时架空线应力为  $\sigma_0 = 75\text{MPa}$ , 自重比载  $\gamma_1 = 35.2 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$ 。试核验邻档断线后的交叉垂直距离。

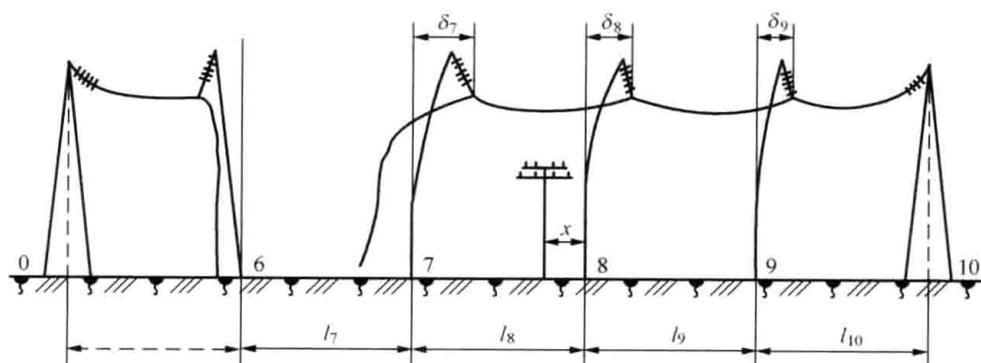


图 10-3 [例 10-1] 耐张段断线示意图

**解** 欲核验跨越间距, 应选取邻档断线进行计算。因断线后剩余档数越少, 张力衰减越严重, 松弛弧垂越大, 所以取档距  $l_7$  为断线档。

(1) 作  $T = f(\Delta l)$  曲线 I。将有关数值代入式 (10-2), 得

$$\Delta l_i = \left\{ 82839.45 \times \left( \frac{1}{T_i^2} - \frac{1}{11004.75^2} \right) + \frac{1}{11151480} (11004.75 - T_i) \right\} \frac{273}{1 + \frac{248518.35}{T_i^2}} \text{ (m)}$$

给出不同的  $T$ , 可求得相应的  $\Delta l$ , 数据示于表 10 - 4 中, 曲线 I 绘制于图 10 - 4 中。

表 10 - 4  $T=f(\Delta l)$  曲线计算表

$T$ (N)	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500
$\Delta l$ (m)	3.501	2.454	1.807	1.378	1.076	0.856	0.690
$T$ (N)	6000	6500	7000	7500	8500	9500	11004.75
$\Delta l$ (m)	0.560	0.456	0.371	0.300	0.187	0.100	0

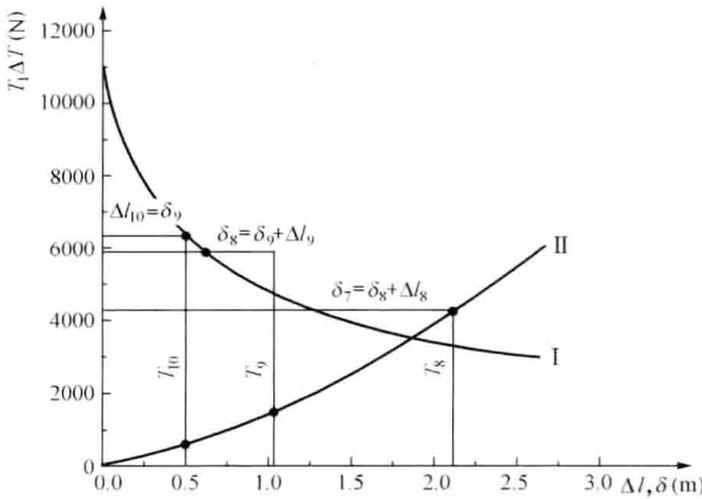


图 10 - 4 作图法求解断线张力

(2) 作  $\delta=f(\Delta T)$  曲线 II。因各档距基本相等, 设垂直档距  $l_v$  等于水平档距  $l_h$ , 则悬挂点的垂直荷载

$$P = \gamma_1 A l_v = 35.20 \times 10^{-3} \times 146.73 \times 273 = 1410 \text{ (N)}$$

将有关数值代入式 (10 - 3), 得

$$\delta = 0.0003 \Delta T + \frac{0.886 \Delta T}{\sqrt{2330812 + \Delta T^2}}$$

给出不同的  $\Delta T$ , 求出相应的悬挂点偏移量  $\delta$ , 如表 10 - 5。利用该组数值作出图 10 - 4 中的曲线 II。

(3) 按照作图法的步骤, 根据图 10 - 4, 求得各档导线的残余张力、直线杆塔承受的平衡张力差以及悬挂点偏移量, 列于表 10 - 6。

表 10 - 5  $\delta=f(\Delta T)$  曲线计算表

$\Delta T$ (N)	250	500	750	1000	1500	2000	2500
$\delta$ (m)	0.2182	0.4258	0.6157	0.7855	1.0709	1.3043	1.5062
$\Delta T$ (N)	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
$\delta$ (m)	1.6896	1.8621	2.0278	2.1890	2.3474	2.5037	2.6586

表 10 - 6 各档导线的残余张力、不平衡张力差和悬挂点偏移量

导线残余张力 (N)				不平衡张力差 (N)			悬挂点偏移量 (m)		
$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$\Delta T_7$	$\Delta T_8$	$\Delta T_9$	$\delta_7$	$\delta_8$	$\delta_9$
0	4413	5907	6450	4413	1459	556	2.15	1.05	0.47

(4) 核验交叉垂直距离。

由于断线张力  $T_8=4413\text{N}$ , 所以断线应力为

$$\sigma_0 = \frac{T_8}{A} = \frac{4413}{146.73} = 30.08 \text{ (MPa)}$$

跨越点处导线的弧垂为

$$f_x = \frac{\gamma_1 x (l_8 - x)}{2\sigma_0} = \frac{35.2 \times 10^{-3} \times 30 \times (273 - 30)}{2 \times 30.08} = 4.265 \quad (\text{m})$$

导线对 I 级通信线的交叉距离为

$$S = 13 - 7 - 4.265 = 1.735 \quad (\text{m})$$

由规范知, 该电压等级的输电线路, 断线时对 I 级通信线交叉跨越距离应不小于 1m, 故本例满足要求。

### 第三节 分裂导线的断线张力

分裂导线一相导线全断的几率很小。考虑一根次导线断线, 由于未断次导线的支持, 杆塔上产生的不平衡张力往往小于线路正常运行和施工紧线时杆塔上出现的最大不平衡张力。当需要比较精确计算相分裂导线的断线张力时, 可采用下述方法。

如图 10-5 所示, 设相分裂有  $n$  根次导线, 耐张段内有连续  $m$  档, 各档等高等档距, 悬垂绝缘子串长  $\lambda$ 、重  $G_J$ , 第  $k$  档相导线断线后尚剩  $n'$  根次导线。当一相内有次导线断裂时, 断线档内的间隔棒由于承受不了断线后的张力差而被拉脱或损坏, 故一般认为断线档内间隔棒不承受张力差, 张力差全部作用在悬挂点上。如果档距为  $l_0$ , 断线前每根次导线的水平张力为  $T_0$ , 断线后第  $i$  档每根次导线的张力为  $T_i$ 。断线后断线档的档距及剩余  $n'$  根次导线的张力均要增加, 其他档的档距及张力均减小。断线后第  $i$  档的档距变化量  $\Delta l_i$  与每根导线张力  $T_i$  的关系, 仍可用式 (10-2) 表示。

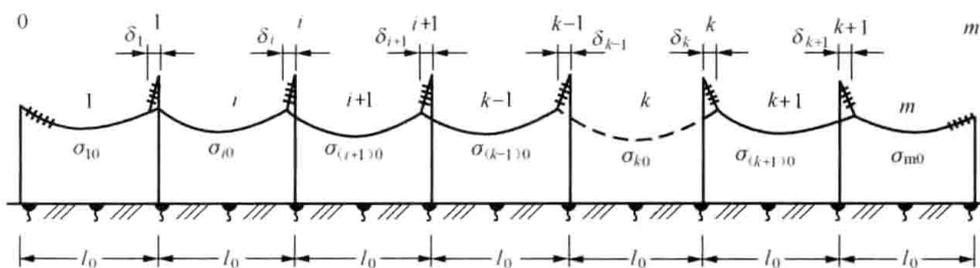


图 10-5 耐张段分裂导线断线示意图

由于分裂导线断线后, 剩余次导线的支持力使杆塔的刚度大为增强, 因此可以忽略杆塔的挠曲变形。断线档的非相邻档的悬挂点偏移量  $\delta_i$  与两侧每根次导线的张力差  $\Delta T_i$  的关系为

$$\delta_i = \frac{\lambda(T_i - T_{i+1})}{\sqrt{\left(P_i + \frac{G_J}{2n}\right)^2 + (T_i - T_{i+1})^2}} = \frac{\lambda \Delta T_i}{\sqrt{\left(P_i + \frac{G_J}{2n}\right)^2 + \Delta T_i^2}} \quad (10-4)$$

断线档两侧直线杆塔上的悬挂点偏移量  $\delta_{k-1}$ 、 $\delta_k$  与其两侧每根次导线张力的关系为

$$\delta_{k-1} = \frac{\lambda(T_{k-1} - T_k n'/n)}{\sqrt{\left(P_{k-1} + \frac{G_J}{2n}\right)^2 + \left(T_{k-1} - \frac{n'}{n} T_k\right)^2}} \quad (10-5)$$

$$\delta_k = \frac{\lambda(T_{k+1} - T_k n'/n)}{\sqrt{\left(P_k + \frac{G_J}{2n}\right)^2 + \left(T_{k+1} - \frac{n'}{n} T_k\right)^2}} \quad (10-6)$$

各档档距改变量  $\Delta l_i$  与悬挂点偏移量  $\delta_i$  的关系为

$$\Delta l_i = \delta_i - \delta_{i-1} \quad (10-7)$$

根据上述各公式即可采用试凑法或图解法求解, 方法同上节。

#### 第四节 线路正常运行中的不平衡张力

输电线路在架线竣工时, 可以认为悬垂绝缘子串处于铅垂位置, 各直线杆塔不承受架空线张力差。但在正常运行中, 由于以下几种情况, 会使耐张段内各档架空线的张力相差悬殊, 致使直线杆塔承受较大的不平衡张力:

- (1) 耐张段中各档距长度、高差相差悬殊, 当气象条件变化后, 引起各档张力不等。
- (2) 耐张段中各档不均匀覆冰或不同时脱冰, 因各档比载不同引起张力不等。

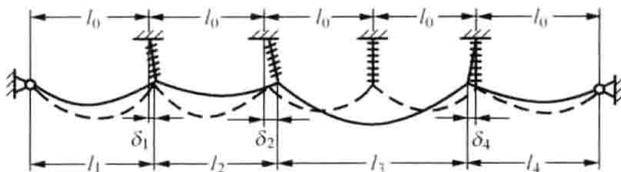


图 10-6 两档合为一档时的悬垂绝缘子串偏移

(3) 线路在检修时, 采取先松下某悬挂点的导线或后挂某悬挂点的导线, 造成两档合为一档, 将引起与相邻各档张力不等, 如图 10-6 所示 (图中虚线为检修前架空线的位置)。

(4) 耐张段某档进行飞车、绝缘爬梯等作业, 集中荷载引起不平衡张力。

- (5) 在高差很大的山区, 尤其是重冰区的连续倾斜档, 山上档和山下档的张力不等。

以上各种情况中, 耐张段各档不均匀覆冰或不同时脱冰是常见的较严重情况, 尤其是重冰区。采用分裂导线的线路, 因断线张力的规定值较小, 应注意使不平衡张力小于断线张力, 为此需根据可能的严重情况, 进行不平衡张力的计算和校验。

架空线的不平衡张力, 可使悬垂绝缘子串产生偏斜, 导线与横担之间的电气间距减小, 严重时靠近横担的第一个绝缘子可能会碰及杆塔构件。

影响不平衡张力的因素很多, 例如耐张段内的档数、档距大小和分布、脱冰和覆冰档的多少和位置以及绝缘子串长度和导线型号等。因此在计算不平衡张力时, 不可能全部情况都加以计算, 只能考虑比较严重的几种情况。

计算不平衡张力时, 以耐张段内连续地有半数档结冰, 另半数档脱冰的情况最严重, 但没有充分的运行资料表明这种情况会发生。因此对不均匀覆脱冰, 通常按以下两种情况考虑: 覆冰时一档为 100%, 而其他档均为 50%; 脱冰时一档脱冰 50%, 而其他档均未脱冰。

对不均匀覆冰时重冰档位于耐张段两端档和耐张段中央档, 不均匀脱冰时轻冰档位于耐张段两端档和耐张段中央档四种情形的计算表明:

(1) 不论不均匀覆冰或脱冰, 重冰档张力最大, 弧垂也最大; 轻冰档张力最小, 弧垂也最小。

(2) 两侧冰载不等的直线杆塔上承受的不平衡张力最大, 其悬垂绝缘子串的偏移量也最大。

(3) 从重冰档和轻冰档所在位置来说, 位于耐张段两端档时, 靠耐张杆塔的直线杆塔所受不平衡张力较大; 位于耐张段中央时, 轻冰档的弧垂变化量较大。

检查上下线的垂直间距时, 一般假定上部导线全部覆冰 (设计冰厚), 下部导线靠耐张

段中间较大的一档全部或部分脱冰，冰厚 10~15mm 时为全部覆冰的 50%，冰厚 20~30mm 时为全部覆冰的 25%。这种情形出现的可能性较大，且上下线间较为接近。

不均匀脱覆冰情况下有关参数的计算，可按照耐张段内各档应力的精确计算方法进行。需要指出，在校验间距时还要考虑覆冰突然脱落，弹性能释放产生的架空线跳跃。跳跃幅度  $H$  可用下面经验公式计算

$$H = (2000 - l)\Delta f \times 10^{-3} \quad (\text{m}) \quad (10-8)$$

式中  $\Delta f$ ——架空线脱冰前后的弧垂差，m；

$l$ ——档距，m。

## 第五节 地线的支持力

断导线时，断线张力使悬垂绝缘子串偏斜，杆塔挠曲，杆塔顶部地线的悬挂点产生位移，地线在断线档被拉紧，起到限制杆塔挠曲的支持作用，此时的断线档的地线张力称为地线的支持力。

地线的支持力与耐张段的长度、档距大小及断线档的位置、杆塔的挠度有关。耐张段较短，档距大，断线档紧靠耐张杆塔，因耐张塔悬挂点不位移，仅有一侧的直线杆塔挠曲，则地线的支持力不大。如果耐张段较长，档距小，断线档在耐张段的中部，由于该档两侧直线杆塔挠曲且方向相反，则地线的支持力最大。对柔性直线杆塔（如无拉线的直线单杆和门型杆），地线的支持力可达导线断线张力的 40%~70%，对地线线夹的握持力要求、杆塔及基础设计的影响不可忽略。

### 一、地线支持力对杆塔的作用

断线档两侧的直线杆塔上作用有导线的不平衡张力  $\Delta T_d$  和地线的支持力  $\Delta T_b$ ，二力的作用方向相反，如图 10-7 (a) 所示。

杆塔可视为一端自由、一端固定的悬臂梁，其弯矩如图 10-7 (b) 所示。曲线 1、2 分别是地线最大支持力和最小支持力情况下杆塔的弯矩。可以看出，地线支持力最小时，杆塔的弯矩在地面处最大，所以计算杆塔根部受弯和基础倾覆时，需用最小的地线支持力。地线支持力最大时，横担处的弯矩最大，所以计算横担受弯受扭时，需用最大的地线支持力。

### 二、地线支持力的计算

地线支持力的精确计算是很复杂的，如果忽略非断线档直线杆塔上导线不平衡张力引起的杆顶挠度，并且不考虑导线不平衡张力与地线支持力的相互影响，则计算大为简化，其精度也可满足工程要求。

假定图 10-8 所示耐张段的第  $n+1$  档导线断线，导线的断线张力已经求得，现求地线对  $n$  号杆塔的支持力。

(1) 确定断线张力和地线支持力作用下的杆顶挠度系数。

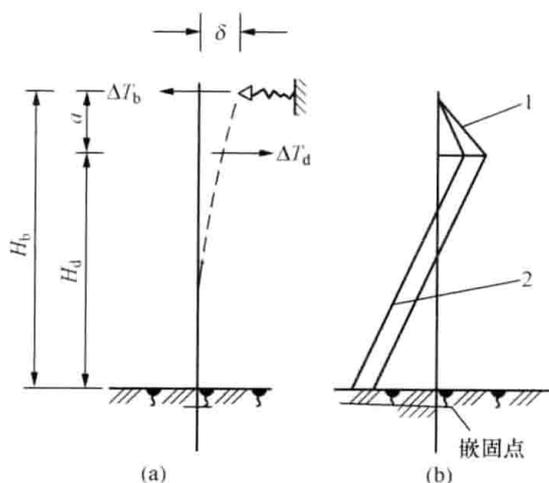


图 10-7 地线支持力对杆塔的作用  
(a) 断线档杆塔的受力；(b) 杆塔的弯矩

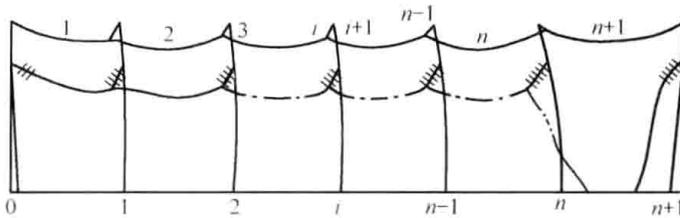


图 10-8 地线支持力在耐张段中的作用

式中  $H_b$ ——地线绝缘子串悬挂点距杆塔根部嵌固处 (一般取埋深的  $1/3$ ) 的高度, m;

$K_0$ ——杆塔根部嵌固处的刚度,  $N \cdot m^2$ ;

$C_d$ 、 $C_b$ ——与作用力位置有关的系数, 对等径

$$\text{杆, } C_d = \frac{3}{2} \left( \frac{H_d}{H_b} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{H_d}{H_b} \right)^3,$$

$C_b = 1$ , 对拔梢杆, 根据高度比  $\frac{H_d}{H_b}$

和刚度比  $\eta = \frac{K_0}{K_b}$ , 从图 10-9 中的

曲线查得;

$H_d$ ——导线悬垂绝缘子串悬挂点到杆塔根部嵌固处的高度, m;

$K_b$ ——地线悬点处的杆塔刚度,  $N \cdot m^2$ 。

(2) 假设地线支持力为  $\Delta T_b$ , 则  $n$  号杆塔上地线线夹的位移为

$$\delta_n = \delta_d - \delta_b - \delta_j = B_d \Delta T_d - B_b \Delta T_b - \frac{\lambda \Delta T_b}{\sqrt{(P_b + G_j/2)^2 + \Delta T_b^2}} \quad (10-11)$$

式中  $\delta_n$ —— $n$  号杆地线线夹的位移, 偏向 0 号杆者为正, m;

$\delta_d$ 、 $\delta_b$ ——分别为导线断线张力  $\Delta T_d$  和地线支持力  $\Delta T_b$  引起的杆顶位移, m;

$\delta_j$ ——地线悬垂绝缘子串的偏移量, m;

$\Delta T_d$ ——导线断线张力, N;

$\Delta T_b$ ——地线的支持力, N;

$\lambda$ ——地线悬垂绝缘子串长, m;

$G_j$ ——地线悬垂绝缘子串的重量, N;

$P_b$ ——地线作用于悬垂绝缘子串上的垂直荷载, N。

按上式计算时, 应判别  $\delta_n$  之正负。断线档的档距增大,  $\delta_n$  应为正值。如果计算出的  $\delta_n$  为负, 表示断线档档距缩短, 那就不会有地线支持力了。原因是  $\Delta T_b$  假定值过大, 应减小后重新计算。

(3) 求第  $n+1$  档地线的张力  $T_{n+1}$ 。

若  $n+1$  号杆为耐张杆 (计算较小的地线支持力), 则该档档距将增加  $\Delta l_{n+1} = \delta_n$ 。若  $n+1$  号杆为直线杆且在长耐张段的中部 (计算较大的地线支持力), 则  $\Delta l_{n+1} = 2\delta_n$ 。

断线张力和地线支持力作用下的杆顶挠度系数  $B_d$  和  $B_b$ , 可分别由下二式计算

$$B_d = \frac{C_d H_b^3}{3K_0} \quad (\text{m/N}) \quad (10-9)$$

$$B_b = \frac{C_b H_b^3}{3K_0} \quad (\text{m/N}) \quad (10-10)$$

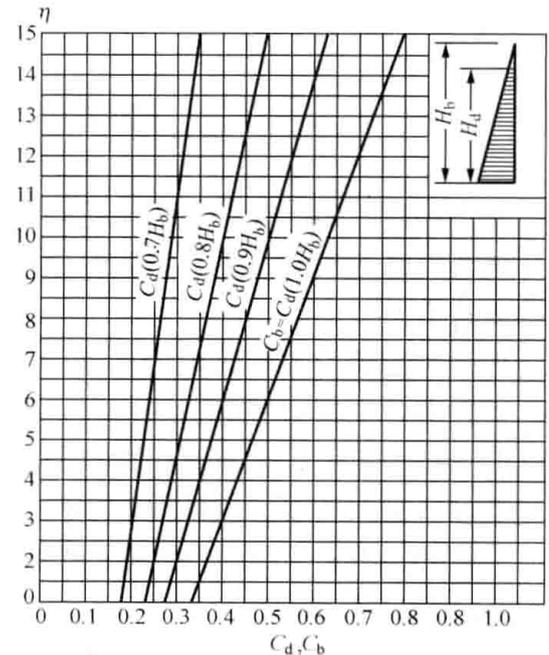


图 10-9 系数  $C_d$ 、 $C_b$  的曲线

设断线前后气温相同, 地线比载不变, 相应单位长度荷载为  $p$ , 第  $i$  档水平张力分别为  $T_0$ 、 $T_i$ , 仿式 (10-2) 得地线张力与档距变化量  $\Delta l_i$  之间的关系为

$$\Delta l_i = \left\{ \frac{p^2 l_{i0}^2 \cos^2 \beta_{i0}}{24} \left[ \frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T_i^2} \right] + \frac{T_i - T_0}{EA \cos \beta_{i0}} \right\} \frac{l_{i0}}{\cos^2 \beta_{i0} \left( 1 + \frac{p^2 l_{i0}^2}{8T_i^2} \right)} \quad (10-12)$$

在确定  $\Delta l_{n+1}$  后, 第  $n+1$  档地线的张力由下式确定

$$\Delta l_{n+1} = \left\{ \frac{p^2 l_{(n+1)0}^2 \cos^2 \beta_{(n+1)0}}{24} \left[ \frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T_{n+1}^2} \right] + \frac{T_{n+1} - T_0}{EA \cos \beta_{i0}} \right\} \frac{l_{(n+1)0}}{\cos^2 \beta_{(n+1)0} \left( 1 + \frac{p^2 l_{(n+1)0}^2}{8T_{n+1}^2} \right)} \quad (10-13)$$

(4) 求第  $n$  档地线的张力  $T_n$

$$T_n = T_{n+1} - \Delta T_n = T_{n+1} - \Delta T_b$$

求得的  $T_n$  应为整个耐张段中地线张力最小的, 当然也不会比断线前的地线水平张力  $T_0$  大。

(5) 利用式 (10-12) 计算第  $n$  档的档距变化量  $\Delta l_n$  ( $\Delta l_i$ ,  $i=n, n-1, \dots, 2, 1$ , 下同), 结果  $\Delta l_i$  应为负值, 因为非断线档的档距减小。

(6) 非断线档的地线线夹位移与档距变化量之间的关系为

$$\delta_{i-1} = \delta_i + \Delta l_i \quad (10-14)$$

(7) 第  $i$  基杆塔的地线张力差由下式确定

$$\delta_i = \frac{\lambda \Delta T_i}{\sqrt{(P_b + G_J/2)^2 + \Delta T_i^2}} + B_b \Delta T_i \quad (10-15)$$

该式适用于自第  $n-1$  基开始递减的杆塔, 式中第二项为地线张力差引起的杆顶挠度, 对某些类型的杆塔 (如拔梢杆) 而言, 其值影响甚大。

(8) 第  $i$  档地线的张力

$$T_i = T_{i+1} + \Delta T_i \quad (10-16)$$

从步骤 (5) 反复进行计算, 直至 0 号耐张杆塔为止, 此时应有  $\delta_0 = 0$ 。如果  $\delta_0 \neq 0$ , 则应修正原假设  $\Delta T_b$ , 重新计算, 直到满足要求为止。

## 练 习 题

1. 何为断线张力? 何为不平衡张力? 在计算杆塔荷载时, 如何确定断线张力和不平衡张力? 在校验跨越间距时, 如何确定断线张力和不平衡张力?

2. 何为地线的支持力? 当需要考虑地线的支持力计算杆塔的荷载时, 校验杆塔根部和校验横担强度各应如何选择导线的断线档?

3. 某 110kV 架空线路, 导线为 LGJ-95/20 型, 某耐张段共有 10 档, 无高差, 档距基本相等为  $l_r = 250\text{m}$ , 在档距  $l_7$  内跨越 I 级通信线, 通信线高 7m, 位于距 6 号杆 40m 处, 如图 10-10 所示。直线杆塔悬挂点高 14m, 挠度系数  $B = 0.0003\text{m/N}$ , 悬垂绝缘子串长  $\lambda = 1.322\text{m}$ , 重 393N。在气温  $+15^\circ\text{C}$ 、无风时的导线应力为  $\sigma_0 = 66\text{MPa}$ , 试核验邻档断线后的交叉垂直距离。

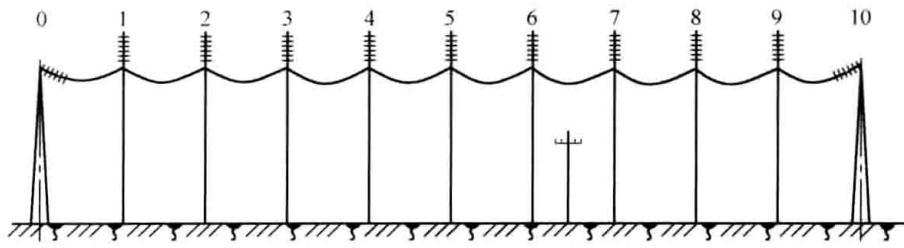


图 10 - 10 题 3 图

## 第十一章 架空线的振动和防振

架空线在风、冰等因素的作用下具有不同特征的运动现象——各种类型的振动。本章介绍架空线各种振动形式，并从架空线振动的基本理论出发，着重研究最为常见、在某些地区成为线路控制条件的微风振动的有关问题。

### 第一节 架空线的振动形式及其产生原因

由风雪作用引起的架空线振动可分为微风振动、舞动、次档距振动、脱冰跳跃和摆动，由电磁力引起的振动可分为短路振动和电晕振动。

#### 一、微风振动

微风振动是架空线在微风作用下产生的高频低幅的垂向振动。微风振动频率较高，一般  $5\sim 120\text{Hz}$ ；振幅不大，峰-峰值一般在架空线直径的 3 倍以下；所需风速较小，通常在  $0.5\sim 10\text{m/s}$  范围内；持续时间较长，一般为数小时，有时可达几天。

当稳定气流以速度  $v$  吹过圆柱体时，在圆柱体的背风侧会产生气流漩涡，它上、下交替产生且旋向相反，并以速度  $v_0$  不断离开圆柱体向后渐渐消失，如图 11-1。当上部 A 点产生旋涡时，下部 B 点的流速大于 A 点而产生负压，圆柱体上出现向下的冲击力，反之会产生向上的冲击力。在上下交替的冲击力作用下，圆柱体会产生上下振动。最早研究旋涡特性的是卡门 (Karman) 和司脱罗哈 (Strouhal) 两人，故称之为“卡门漩涡”。漩涡的交替频率计算式为

$$f_s = S \frac{v}{d} \quad (11-1)$$

式中  $f_s$ ——卡门漩涡频率，Hz；

$v$ ——风速，m/s；

$d$ ——圆柱体（架空线）直径，mm；

$S$ ——司脱罗哈常数， $S=185\sim 210$ ，我国一般采用 200。

当卡门漩涡的频率  $f_s$  与该圆柱体（架空线）的固有频率  $f_n$  接近时，便引起共振，产生微风振动。

实际观测发现，微风振动发生后，尽管风速发生不断变化，但只要不超过某一范围，架空线的振动频率和漩涡频率都不变化，仍保持为架空线的固有频率，这种现象称为锁定效应或同步效应。这是由于架空线以  $f_n$  振动以后，气流受到架空线振动的抑制，卡门漩涡表现出相当好的顺序性，频率也为  $f_n$ 。

微风振动引起架空线疲劳断线、金具磨损和杆塔部件破坏等，必须采取防振措施。微风

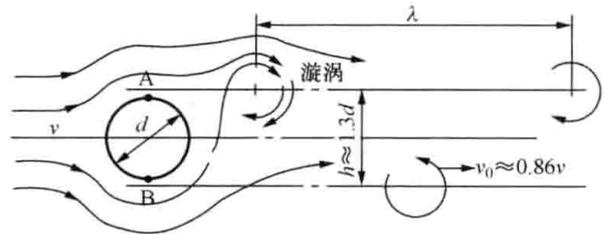


图 11-1 架空线微风振动的产生原理

振动的防振设计是线路设计的一项重要内容。

## 二、舞动

架空线上的覆冰断面常呈带翼状的筒形,此时若遇强风,架空线会产生低阶固有频率的自激振动,振动振幅极大,振荡起来势如野马奔腾,称为奔马型振动,统称舞动。舞动频率低(0.1~3Hz)、振幅大(可达10m以上),多在导线覆冰,且有强风(10~20m/s)时发生。舞动一般较少发生,但一旦发生,持续时间较长,常为数小时。架空线截面积较大(直径>40mm)、分裂导线根数较多、架空线离地较高,舞动较严重且几率增大。

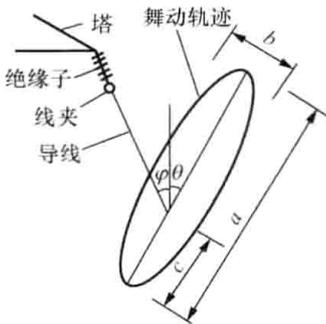


图 11-2 架空线某点的理论舞动轨迹

舞动时,架空线沿水平方向、垂直方向运动,且有扭动。舞动波为进行波,架空线上某点的运动轨迹近似为垂直方向长轴的椭圆,其理论舞动轨迹如图 11-2 所示。舞动产生的机理仍在研究中,现主要有以下几种观点:

(1) 垂直舞动机理。美国 Den. Harton 认为导线产生偏心覆冰时,月牙形的覆冰形成机翼,作用于其上的风力分解为水平分力和垂直分力,垂直的气动升力大于导线的气动阻力时导线发生舞动。

(2) 扭转舞动机理。加拿大 O. Nigol 认为架空线有上下运动,又有扭动,当横向垂直振动频率与架空线固有扭转频率耦合

时,产生舞动。

(3) 动力稳定机理。该理论把舞动看作为一种动力不稳定现象,认为只有不稳定振动才有可能产生像舞动这样大的振幅。防舞就是要提高系统的动力稳定性。在其计算模型中,考虑了垂直、水平和扭转分量以及三者的耦合。

(4) 低阻尼系统共振机理。该理论认为,舞动是在输电线路系统低阻尼条件下,由风力产生的结构共振。该理论不再把架空线两端悬挂点视为静止不动的固定端,而考虑了端点激振。在风作用下,输电线路的各组成单元都产生不同程度的振动,悬垂绝缘子串及线夹也不例外。导线张力增大,多股绞线被雨水浸湿并产生坚硬的覆冰,线路运行数年以后线股滑移能力下降,都会引起多股绞线的结构阻尼降低,容易引发系统共振。风力引发低阻尼系统共振舞动的机理,可以较好地解释薄冰(无冰)导线也产生舞动的现象。

舞动绝大多数发生在覆冰气象,因此有两点可以肯定:风是舞动的必要条件,冰是舞动的主要因素。

舞动产生的危害是多方面的,会造成线路跳闸、导线电弧烧伤、金具损坏、导线断股、断线、倒塔等,导致大面积停电和重大经济损失。2001年1月23~25日,500kV葛风输电线路荆门—潜江段发生了大面积、长时间(持续46h)舞动,最大振幅达10m,致使多基耐张塔螺栓松动、塔材脱落、跳线磨损、金具损坏,随时有倒塔的危险,葛风线被迫中断送电进行抢修。2003年2月10日和3月5日,500kV龙斗、斗双线发生了2次强烈的舞动,最大振幅超过7m,最长持续时间约10h,造成金具(包括铁塔螺栓)严重磨损、断裂、脱落,绝缘子钢脚断裂,导线断股、脱落,线路跳闸。

我国重视舞动并开展专项研究,是在1987年湖北省中山口大跨越发生强烈舞动而导致导线断线以后开始的。研究取得了丰硕的成果,开发出了多种有效的防舞装置,如双摆防舞者、偏心重锤等。防止舞动危害可从避舞、抗舞和抑舞三方面采取措施。设计线路时首先要

考虑避开易舞区，对可能发生舞动的区段可加大相间距离或加装相间绝缘间隔棒等，对发生舞动的区段加装防舞装置等。

### 三、次档距振动

次档距振动为分裂导线的线路所特有。为了保持子导线的间距，档距中每隔一定距离安装一个间隔棒。间隔棒之间的水平距离称为次档距。次档距振动（振荡）是风的尾流效应引起的子导线在次档距内的水平振动，一般频率为  $1\sim 5\text{Hz}$ ，振幅介于舞动和微风振动之间，为架空线直径的  $4\sim 20$  倍。由于同一相中有多条导线，迎风面子导线的尾流效应，会使下风头的子导线产生以水平运动为主加扭转形成的椭圆轨迹振荡，水平方向为椭圆的长轴。背风侧子导线的振荡又激发迎风侧子导线产生相反方向的椭圆振荡。图 11-3 表示了 4 分裂导线的典型次档距振动的运动模式。

次档距振动会造成分裂导线相互碰撞和鞭击，使线股磨损，在间隔棒线夹处产生疲劳断股，使间隔棒线夹松动。次档距振动的解决措施一般是采用阻尼间隔棒，增大分裂导线的间距，缩短次档距长度，合理布置子导线位置等。阻尼间隔棒采取不等距、不对称布置，最大次档距不宜大于  $70\text{m}$ ，端次档距宜控制在  $28\sim 35\text{m}$ 。

### 四、脱冰跳跃型振动

架空线覆冰使架空线荷载增大，产生弹性伸长，弧垂大增。脱冰时，稍借一点外力，架空线的覆冰成片一齐崩落，架空线积蓄的弹性能瞬间释放，使架空线跳起，引起上下振动。脱冰跳跃很容易使上下层导线产生短路。因此，覆冰区导线的排列方式应保证在垂直方向错开足够距离。

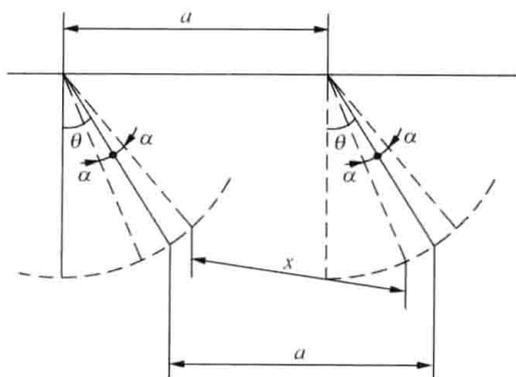


图 11-4 受风摆动型振动

导线受稳定横向风荷作用后，产生风偏角  $\theta$ （见图 11-4）。风速变化，导线便以  $\theta$  为中心在  $\theta-\alpha$  与  $\theta+\alpha$  之间摆动，最不利情形，两相线间距离变为  $x$ ，若  $x$  不能满足相间距离的要求，将会引起相间闪络。加长横担以增大导线间距，是保证受风摆动下安全的常用办法。

### 五、受风摆动型振动

导线受稳定横向风荷作用后，产生风偏角  $\theta$ （见图 11-4）。风速变化，导线便以  $\theta$  为中心在  $\theta-\alpha$  与  $\theta+\alpha$  之间摆动，最不利情形，两相线间距离变为  $x$ ，若  $x$  不能满足相间距离的要求，将会引起相间闪络。加长横担以增大导线间距，是保证受风摆动下安全的常用办法。

### 六、短路电流引起的导线振动

分裂导线在线路短路时，一相中各子导线流过同一方向的大电流，在电磁力作用下，同相的几

根子导线相吸；而切断电流后，导线又在自重和拉力作用下作相反方向的运动，产生振动。

### 七、电晕引起的振动

潮湿环境中，导线会产生电晕放电。随着电晕现象的激化，会将带电的水微粒子射出，反作用力作用于导线上，会引起有规律的振动。电晕振动的频率低，振幅小，危害轻微，因此不是亟待解决的问题。

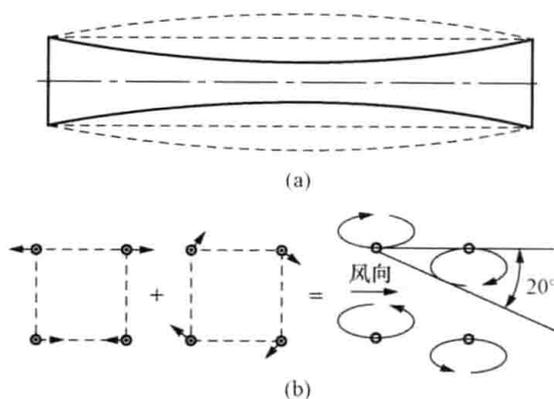


图 11-3 次档距振动的典型模式

(a) 俯视图；(b) 典型运动模式

## 第二节 微风振动的基本理论

### 一、无刚度无阻尼的架空线振动

如图 11-5 所示, 某架空线路的档距为  $l$ , 水平张力为  $T_0$ , 架空线单位长度质量为  $m$ , 在重力作用下, 架空线处于平衡位置。假设在此位置上, 架空线发生振动, 对微段  $dx$ , 忽略重力, 其受力情况如图 11-5 所示, 其中  $-m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx$  为运动惯性力。在  $x$  方向上有

$$T_B \cos \alpha_B = T_A \cos \alpha_A = T_0$$

在  $y$  方向上有

$$T_B \sin \alpha_B - T_A \sin \alpha_A - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx = 0$$

将  $T_A = \frac{T_0}{\cos \alpha_A}$ ,  $T_B = \frac{T_0}{\cos \alpha_B}$ ,  $\tan \alpha_A = \frac{\partial y}{\partial x}$ ,  $\tan \alpha_B = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx$  代入上式, 有

$$T_0 \left[ \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \right] - T_0 \frac{\partial y}{\partial x} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx = 0$$

即

$$T_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (11-2)$$

采用分离变量法求解, 设

$$y(x, t) = U(x)V(t) \quad (11-3)$$

代入式 (11-2) 中, 得

$$T_0 \frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dx^2} = m \frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dt^2}$$

令  $a^2 = T_0/m$ , 则

$$\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{1}{a^2} \frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dt^2}$$

上式左端与时间  $t$  无关, 右端与位置  $x$  无关, 因此必等于同一常数。令这个常数为  $-(\omega/a)^2$ , 则

$$\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{1}{a^2} \frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dt^2} = -\frac{\omega^2}{a^2}$$

于是

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{\omega^2}{a^2} U &= 0 \\ \frac{d^2 V}{dt^2} + \omega^2 V &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11-4)$$

其解为

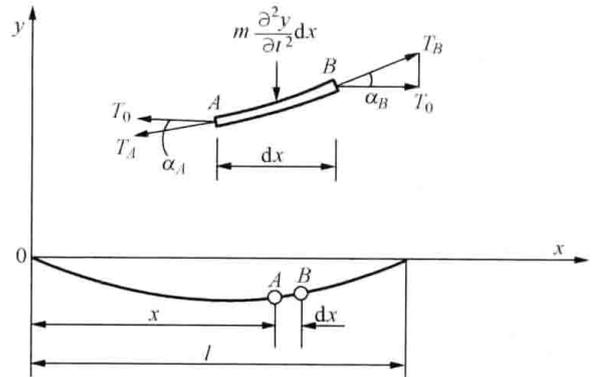


图 11-5 无刚度无阻尼架空线振动受力图

$$U(x) = A \sin \frac{\omega}{a} x + B \cos \frac{\omega}{a} x$$

$$V(t) = C \sin \omega t + D \cos \omega t$$

$U(x)$  是位置  $x$  的函数, 称为主函数。将上二式代入式 (11-3), 得

$$y(x, t) = (A \sin \frac{\omega}{a} x + B \cos \frac{\omega}{a} x)(C \sin \omega t + D \cos \omega t) \quad (11-5)$$

其中, 常数  $A$ 、 $B$  由边界条件确定,  $C$ 、 $D$  由初始条件确定。

假定导线两端固定, 则当  $x=0$  时,  $y(0, t) = 0$ ;  $x=l$  时,  $y(l, t) = 0$ 。代入式 (11-5), 分别得到  $B=0$  和  $\sin(\omega l/a) = 0$ , 由后者知

$$\frac{\omega l}{a} = n\pi \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} a = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{T_0}{m}} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (11-6)$$

上式中的  $\omega_n$  为架空线的固有圆频率, 不同的  $n$  表示不同阶的固有圆频率。以固有振动频率  $f_n$  表示

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T_0}{m}} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{T_0}{m}} \quad (11-7)$$

$$\lambda = \frac{2l}{n} \quad (11-8)$$

式中  $\lambda$ ——振动波波长。

从式 (11-7) 可以看出, 导线的固有频率只与  $n$ 、 $l$ 、 $T_0$  和  $m$  有关, 是由系统所决定的, 与初始条件无关。对应不同的  $n$ , 有不同的频率  $f_n$ , 即固有频率不是一个值, 而是一组值。

根据式 (11-6) 和  $B=0$ , 得主函数为

$$U_n(x) = A_n \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (11-9)$$

上式是  $n$  阶固有频率的振动主模态, 在架空线长度方向上呈正弦曲线变化。当架空线以某阶固有频率振动时, 可以认为

$$y_n(x, t) = \sin \frac{n\pi}{l} x (C_n \sin \omega_n t + D_n \cos \omega_n t) \quad (11-10)$$

假设导线的初始位移为零, 即当  $t=0$  时,  $y_n(x, 0) = 0$ , 代入式 (11-10) 得

$$y(x, 0) = D_n \sin \frac{n\pi}{l} x = 0$$

必有

$$D_n = 0$$

所以

$$y_n(x, t) = C_n \sin \frac{n\pi}{l} x \sin \omega_n t = y_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega_n t \quad (11-11)$$

式中  $y_0$ ——最大振幅, mm;

$\lambda$ ——以圆频率  $\omega_n$  振动时的波长, m;

$x$ ——距架空线悬挂点的水平距离, m。

相应的线上各点的速度为

$$y'_n(x, t) = \omega_n y_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega_n t = \omega_n y_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \left( \omega_n t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (11-12)$$

各点的加速度为

$$y''_n(x, t) = -\omega_n^2 y_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega_n t = \omega_n^2 y_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin(\omega_n t + \pi) \quad (11-13)$$

从式(11-11)~式(11-13)看出, 位移、速度、加速度都是时间的正弦函数, 它们的变化周期相同, 只是相位不同。速度超前位移  $90^\circ$ , 加速度超前或滞后位移  $180^\circ$ , 即与位移方向相反。

从  $\sin \frac{n\pi x}{l}$  看出, 当  $n=1$  时,  $x$  从 0 到  $\frac{l}{2}$  再到  $l$  变化时,  $\sin \frac{n\pi x}{l}$  从 0 到 1 再到 0, 是一个正弦“半波”。当  $n=2$  时,  $x$  从 0 到  $\frac{l}{4}$  再到  $\frac{l}{2}$  变化时,  $\sin \frac{n\pi x}{l}$  从 0 到 1 再到 0, 是一个正弦“半波”;  $x$  从  $\frac{l}{2}$  到  $\frac{3l}{4}$  再到  $l$  变化时,  $\sin \frac{n\pi x}{l}$  从 0 到 -1 再到 0, 是又一个正弦“半波”。所以  $n$  代表档内的半波数。导线振动时, 档内可以有一个半波, 直到无穷多个半波。

对某一确定位置  $x_0$ , 有

$$y_n(x_0, t) = y_0 \sin \frac{n\pi}{l} x_0 \sin \omega_n t = y_x \sin \omega_n t$$

上式表明, 架空线上的某点作简谐振动, 振幅  $y_x = y_0 \sin \frac{n\pi x_0}{l}$ 。当  $x_0 = \frac{kl}{n}$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ ) 时,  $y_x=0$ , 这样的位置称为节点。当  $x_0 = \frac{(2k+1)l}{2n}$  时, 振幅达到最大, 这样的位置称为波腹。

对某一确定时刻  $t_0$ , 有

$$y_n(x, t_0) = y_0 \sin \frac{n\pi}{l} x \sin \omega_n t_0 = y_t \sin \frac{2\pi x}{\lambda}$$

上式表明, 振动波沿档距呈正弦的驻波分布, 波节点、波腹的位置不变, 其振幅为

$$y_t = y_0 \sin \omega_n t_0$$

## 二、有刚度无阻尼的架空线振动

设架空线的刚度为  $EJ$ , 水平张力为  $T_0$ , 单位长度质量为  $m$ 。由于刚度的存在, 微元段  $dx$  上有弯矩, 如图 11-6 所示。列平衡方程有

$$\sum x = 0, T_B \cos \alpha_B - T_A \cos \alpha_A = 0$$

$$\sum y = 0, T_B \sin \alpha_B - T_A \sin \alpha_A - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx + Q - \left( Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) = 0$$

$$\sum M_A = 0, \left( M + \frac{\partial M}{\partial x} dx \right) - M - \left( Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) dx - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \frac{dx}{2}$$

$$+ T_B \sin \alpha_B dx - T_B \cos \alpha_B \frac{\partial y}{\partial x} dx = 0$$

整理并略去高阶微量, 得

$$T_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} - Q = 0$$

由梁的弯曲理论

$$M = EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

所以

$$Q = \frac{\partial M}{\partial x} = EJ \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$$

$$T_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0$$

用分离变量法解此偏微分方程, 设  $y(x, t) = U(x)V(t)$ , 代入上式得

$$EJ \frac{1}{mU} \frac{d^4 U}{dx^4} - \frac{T_0}{mU} \frac{d^2 U}{dx^2} = -\frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dt^2}$$

上式左边为  $x$  的函数, 右边为  $t$  的函数, 左右两边必等于同一个常数。设这个常数为  $\omega^2$ , 可得到两个常微分方程

$$EJ \frac{d^4 U}{dx^4} - T_0 \frac{d^2 U}{dx^2} = mU\omega^2$$

和

$$\frac{d^2 V}{dt^2} = -V\omega^2$$

上式的解为

$$V(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t$$

假设导线两端为铰支, 则当  $x=0$  时,  $U=0$ ,  $\frac{d^2 U}{dx^2}=0$ ; 当  $x=l$  时,  $U=0$ ,  $\frac{d^2 U}{dx^2}=0$ 。设

$$U(x) = U \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

能满足边界条件, 因此

$$EJ \left(\frac{n\pi}{l}\right)^4 \sin \frac{n\pi x}{l} + T_0 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \sin \frac{n\pi x}{l} = m\omega^2 \sin \frac{n\pi x}{l}$$

所以

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{T_0}{m}} \sqrt{1 + \frac{EJ}{T_0} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \quad (11-14)$$

主模态的位移方程为

$$y_n(x, t) = U(x)V(t) = \sin \frac{nx\pi}{l} (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \quad (11-15)$$

其中, 常数  $A_n$ 、 $B_n$  根据初始位移和初始速度确定。

将有刚度架空线的固有频率与无刚度的比较, 其比值为

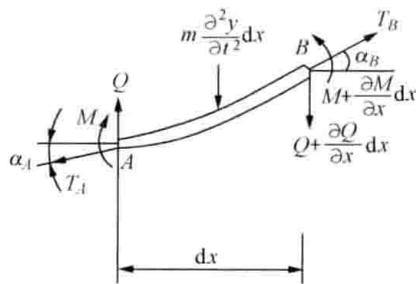


图 11-6 有刚度无阻尼架空线的振动微元

$$\sqrt{1 + \frac{EJ}{T_0} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} > 1 \quad (11-16)$$

可以看出, 刚度架空线的固有频率比无刚度的稍大, 固有频率的阶数越高二者相差得越多。忽略刚度影响时, 其误差一般不超过 5%。

### 第三节 微风振动强度的表示方法

微风振动的强度可用振动角和动弯应变表示。

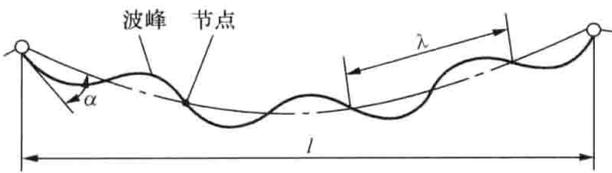


图 11-7 架空线微风振动的驻波

#### 一、采用振动角表示

##### 1. 架空线的振动角

架空线产生稳定的微风振动时, 振动波在整个档距呈驻波形式, 如图 11-7 所示。架空线离开平衡位置的位移大小, 在档距和时间上都近似视为按正弦规律变化。波峰

(波腹) 和节点的位置不变。节点的角度位移称为振动角, 可用节点处的振动波斜率来表示。由于线夹出口处的交变动应力最大, 因此振动强度以线夹出口处的振动角大小来衡量。

架空线上线夹出口附近任一点  $x$  处的振动方程, 根据式 (11-11) 可写为

$$y = y_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t \quad (11-17)$$

式中  $y_0$ ——最大振幅, 即半波中点的位移;

$\lambda$ ——振动波的波长;

$x$ ——距线夹出口处的距离;

$\omega$ ——振动波的角频率。

其斜率即为振动角的正切

$$\tan \alpha = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{2\pi y_0}{\lambda} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t$$

在线夹出口处  $x=0$ , 所以

$$\tan \alpha = \frac{2\pi y_0}{\lambda} \sin \omega t \quad (11-18)$$

从上式看到, 架空线振动角和时间  $t$  有关, 在  $\sin \omega t = 1$  时有最大值

$$\alpha_m = \arctan \frac{2\pi y_0}{\lambda} \quad (11-19)$$

上式决定的振动角  $\alpha_m$  表示了振动的严重情况, 可作为振动强度的表征参数。显然  $\alpha_m$  愈大, 架空线在线夹出口处的弯曲程度愈严重, 弯曲动应力也愈大, 架空线也就愈容易产生断股。在不采用防振措施时, 实际工程中的振动角一般可达  $25' \sim 35'$ 。

在悬挂点附近, 即当  $x$  很小时, 振幅  $y \approx y_0 \frac{2\pi x}{\lambda}$ , 则  $y_0 \approx \frac{\lambda y}{2\pi x}$ , 所以

$$\alpha_m = \arctan \frac{2\pi y_0}{\lambda} \approx \arctan \frac{y}{x} \quad (11-20)$$

测量振动时, 国际上规定以距线夹出口 89mm (3.5in) 处的振幅  $A_{89}$  作为测量标准。此时

$$\alpha_m \approx \arctan \frac{A_{89}}{89} \quad (11-21)$$

## 2. 振动角的允许值

振动角的允许值理应按照动态应力的允许值确定，即应根据架空线线股的疲劳应力极限来确定，但到目前为止，还没有简单实用的二者之间关系的计算公式。因此振动角的允许值是依据运行经验和试验确定的。由于架空线的平均运行应力增大时，线股的疲劳应力极限下降，因此振动角的允许值还因平均运行应力的不同而不同。振动角的允许值可参考表 11-1。

表 11-1 架空线振动角的允许值 (大跨越除外)

平均运行应力 (抗拉强度的%)	振动角允许值
≤25	10'
>25	5'

## 二、采用动弯应变表示

动弯应力与动弯应变成正比，因而动弯应变比振动角更能直接反映出架空线弯曲动应力的的大小。当认为振幅  $A_{89}$  与振动频率、波长、张力、档距和线夹有无转动无关时， $A_{89}$  与动弯应变之间为线性关系。测试结果表明， $A_{89}$  给定时，架空线在线夹处的弯曲斜率与均布荷载  $p$  作用下、末端挠度为  $A_{89}$ 、长为  $l=89\text{mm}$  的悬臂梁接近。根据材料力学有关公式，这种悬臂梁的固定端弯矩  $M=\frac{pl^2}{2}$ ，末端挠度  $A_{89}=\frac{pl^4}{8EJ}$ ，设其外表面到弯曲中性层的距离为  $C$ ，则其固定端的最大弯曲应变为

$$\epsilon = \frac{MC}{EJ} = \frac{4A_{89}C}{l^2} = \frac{4A_{89}C}{89^2} = 505A_{89}C \times 10^{-6} \quad (11-22)$$

架空线外表面到弯曲中性层的距离  $C$  处于架空线半径与线股半径之间。测试表明，在  $A_{89}$  不大于  $0.38\text{mm}$  时，线夹会限制外层线股的自由滑动，若取架空线外层线股的半径即取  $C=0.5d$ ，需在上式中乘以试验因数 1.4，所以测振常用的动弯应变计算式为

$$\epsilon = \pm 1.4 \times 505 \times 0.5dA_{89} \times 10^{-6} = \pm 354dA_{89} \times 10^{-6} \quad (11-23)$$

式中  $d$ ——绞线外层股径，mm；

$A_{89}$ ——距线夹出口 89mm 处测得的相对于线夹的振动单幅值，mm。

国外有文献指出，上式可能会有 50% 的误差。国内有文献指出，常数 354 是随频率、振幅  $A_{89}$ 、架空线张力和刚度等因素变化的，建议对钢芯铝绞线取 540，对大跨越各种导线取 500。

悬垂线夹、间隔棒、防振锤等处架空线微风振动的动弯应变允许值可参考表 11-2。

表 11-2 架空线的微风振动许用动弯应变 ( $\mu\epsilon$ )

导线类型		钢芯 (铝包钢芯) 铝绞线	铝包钢绞线 (导线)	铝包钢绞线 (地线)	钢芯铝合金绞线	铝合金绞线	镀锌钢绞线	OPGW		
								铝合金线	铝合金与铝包钢混绞	铝包钢线
允许动弯应变	大跨越	±100	±100	±150	±120	±120	±200	±120	±120	±150
	普通档	±150	±150	±200	±150	±150	±300	±150	±150	±200

## 第四节 用能量平衡原理估算振动幅值

### 一、能量平衡原理

架空线振动时,一方面由风力输入给系统振动的能量,另一方面体系内的阻尼消耗一部分能量。当两种能量达到平衡状态时,架空线具有稳定的振动幅值。

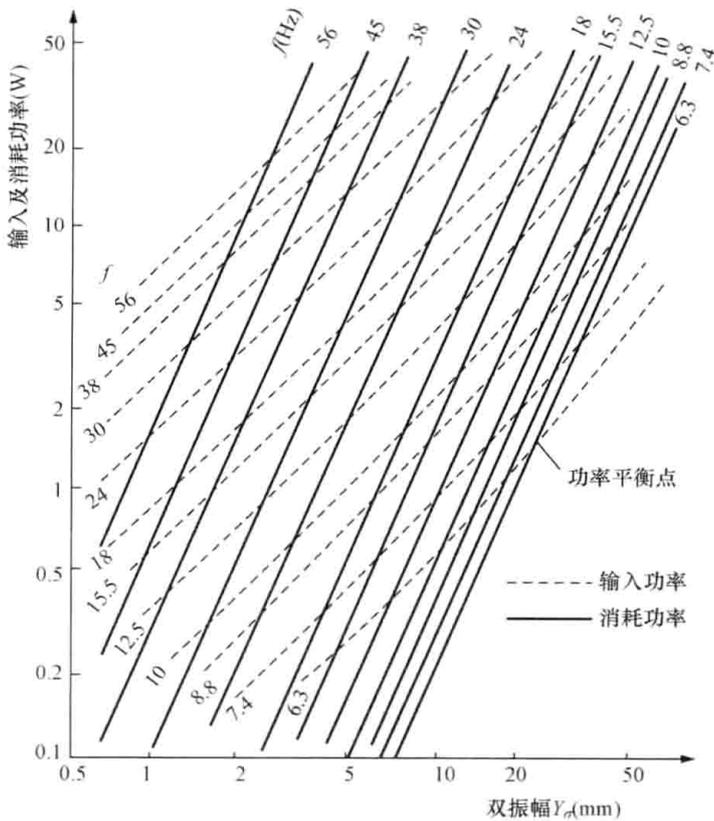


图 11-8 振动功率平衡点

假定架空线的规格型号、张力以及档距长度已知,在整个档距上的风速稳定而均匀,架空线以正弦驻波振动,振动频率  $f$  采用对数坐标,此时风输给架空线的能量与振幅之间的关系如图 11-8 中虚线所示,架空线消耗的能量与振幅之间的关系如图 11-8 中实线所示,其相同频率的交点为能量平衡点,即可知该频率下的架空线稳定振动双振幅  $Y_0$ 。

架空线张力增大时,股间的压力增大,股间难以产生动弯时的滑动摩擦耗能,阻尼作用下降;另外,张力增大时波长变大,阻尼功率会进一步降低,所以功率平衡点的位置随张力的不同而不同。档距不同时,功率平衡点的位置也不同。

### 二、振幅频率曲线

根据图 11-8,给定一个频率,就可找到一个功率平衡点,进而得到双振幅  $Y_0$ 。将各个频率所对应的振幅汇集起来,就可绘出架空线的振幅频率曲线,如图 11-9 中实线所示。从曲线中可以看出,部分低频段上的振幅较大,这是由于低频的阻尼功率较低所致。

若已知架空线悬挂点的允许动弯应变  $\epsilon$  (外层铝股通常为  $\pm 100\mu\epsilon$ ),可以求得相应的允许振幅与频率之间的临界曲线,如图 11-9 中虚线所示。实际振幅高于临界曲线时,表明需要采取防振措施,降低实际振幅至允许振幅以下。

### 三、防振措施下的振幅

架空线在正常的使用张力下,单根普通架空线靠自身的阻尼一般不能使其振幅维持在安全水平之内,需要采取防振措施增加能量消耗,降低振动幅值。

如图 11-10 所示,在某频率下外部风输入给架空线的功率为  $P_w$ ,无防振措施时架空线的自阻尼耗能功率为  $P_z$ ,两者的功率平衡点对应的振幅为较大的  $Y_a$ 。采取防振措施后,防振装置增加了额外的功率消耗  $P_F$ ,总耗能功率曲线  $P_z + P_F$  与输入功率曲线  $P_w$  的平衡点下移至 b,振幅相应降至  $Y_b$  的安全水平。

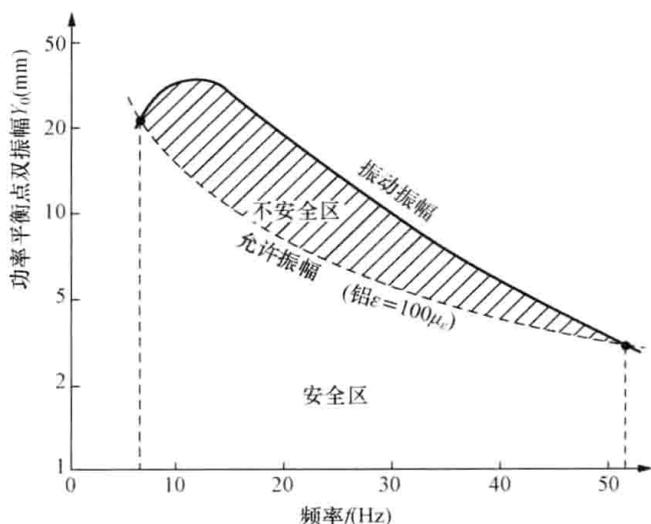


图 11-9 振幅频率曲线

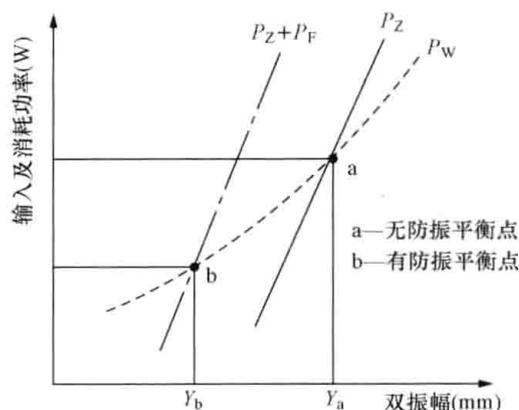


图 11-10 有、无防振措施的振幅

## 第五节 影响微风振动的主要因素

影响微风振动的因素主要有风速和风向、地形和地物、架空线结构和材料、档距长度和悬挂高度、悬挂体系以及架空线使用张力等。

### 一、风速和风向的影响

风作用于架空线上，输入一定的风能，使其发生振动。输入的能量与风速平方成正比。风速较小时，输入的能量不足以克服架空线系统的运动阻力，因此引起架空线振动的风速有一下限值，一般取  $0.5\text{m/s}$ 。当风速增大，其不均匀性增加到一定程度时，由于卡门漩涡的稳定性受到破坏，致使架空线振动减弱甚至停止，因此振动风速有一上限值，一般取  $5\text{m/s}$ ，大跨越和高塔可取  $7\sim 10\text{m/s}$ 。

风向对架空线的振动有很大影响。当风向与架空线的夹角在  $45^\circ\sim 90^\circ$  之间，在微风振动风速范围内，可以观察到架空线的稳定振动。当夹角在  $30^\circ\sim 45^\circ$  之间，振动的时间较短，且时有时无而不持续。当夹角小于  $20^\circ$  时，由于风输入的能量不足，所以基本上观察不到架空线的振动。

### 二、地形和地物的影响

风速的均匀性与方向的恒定性，是保持架空线持续振动的必要条件。当线路通过开阔的平原地区，其地面的粗糙度小，对气流的扰乱作用小，气流的均匀性和方向性均不容易受到破坏，所以容易使架空线持续稳定振动。若地形起伏错综崎岖，或有高低建筑物、森林时，地面粗糙度加大，破坏了气流的均匀性和方向的恒定性，因而架空线不易振动或作持续振动，而且振动强度降低。前苏联地区的地形条件与振动强度的统计资料（见表 11-3），较好地说明了这一问题。

虽有些因素对架空线的振动可起消振作用，但在线路上作为一种有效保护意义不大，而且也很难衡量其影响程度，因而除个别穿过森林或大城市的线路外，一般线路是不考虑这一有利影响的。但是对线路个别档距或一段路径，如果处在风口或江面、湖面、海面等，都要加强防振措施，以保证线路可靠运行。

表 11-3 前苏联地形与振动强度资料统计表

地区地理条件	相对于开阔地带最大振幅的倍数	最大振动角 $\alpha_{\max}$ (′)	一年内振动大于 5′ 相对振动持续时间
大跨越 (档距 500~1500m)	1.3~1.4	35~45	0.35~0.50
平坦开阔地带 (档距 200~500m)	1.0	25~35	0.2~0.35
稀疏的矮树林, 地形崎岖的地区, 或房屋建筑区 (档距 150~300m)	0.5~0.7	15~20	0.08~0.15
树高超过导线悬挂点的森林地区	0.1~0.2	5~10	0.02~0.05

### 三、架空线结构和材料的影响

#### 1. 架空线截面形状和表面状况的影响

当架空线是一个圆形截面的柱体时, 气流在其背面形成上下交替的卡门旋涡, 引起振动。若架空线为非圆形截面, 如三股线制成的绞线, 因这种结构破坏了卡门旋涡的稳定频率, 其振动情况就较轻微, 但这种结构不适于工程使用。

架空线表面愈光滑, 愈易发生微风振动。例如英国塞文河跨越, 跨距 1620m, 为改善运行中出现的严重舞动造成的混线事故, 在导线上缠绕塑料带, 使导线表面更为光滑, 结果虽消除了导线的舞动现象, 但增强了导线的微风振动, 迫使增加防振锤数量, 由 7 个增为 9 个。由此经验来看, 在微风振动严重的地区, 不宜采用光滑导线。

#### 2. 架空线股丝、股数和直径的影响

架空线的股数多和层数多, 有较高的自阻尼作用, 能消耗更多的能量, 使之不易振动或降低振动强度, 因此选用多股多层结构的架空线有利于防振。另一方面, 在同样截面积下, 股数愈多, 股线直径必然愈小。对于同一允许振动应力值, 小的股线直径可允许较大的弯曲幅值, 或者说在同一弯曲幅值下, 有较小的弯曲动应力。

架空线直径对振动的影响, 有关资料的看法不尽一致。一般认为, 在相同振幅下, 直径小的, 风输入的相对功率要大些。统计资料也表明, 架空线的直径越小, 疲劳断股的比例越高。因此在档距条件相同时, 架空线的直径越小越要重视架空线的防振。

#### 3. 架空线材料的影响

通常, 线材的疲劳极限并不按其破坏强度的增大成比例增大, 二者的比值反而随破坏强度的提高而下降, 如高强度钢丝, 其疲劳极限约为其破坏强度的 28%, 而特高强度的钢丝, 这个比值就降到 24%。因而在工程中用相同的平均运行应力安全系数, 从振动方面看并不具有同等的安全性。

另外, 架空线所用材料的重量越小, 其振动越严重。这是由于风速相同时, 输入两个相同直径的圆柱体的能量相同, 或者说两圆柱体产生相同的上扬力, 质量小的获得的加速度大, 振幅必然要大些。从振动频率来看, 其他因素相同时, 单位长度质量大的架空线的振动频率要低一些。所以铝绞线、铝钢比大的钢芯铝绞线的振动, 要比钢绞线、铝钢比小的钢芯铝绞线严重。

#### 4. 分裂导线和间隔棒的影响

与单导线相比, 分裂导线本身的结构特点, 改变了其周围的气流状况, 从而削弱了振动能量; 间隔棒的阻尼, 增大了对导线振动能量的消耗; 间隔棒对子导线的相互牵制, 迫使其

作同步振动, 因此分裂导线的振动强度和持续时间都大为减小。子导线根数越多, 消振效果越好。IEEE 介绍 4 分裂导线的振幅可比单导线的降低 83%~90%。西北电力设计院实测 330kV 水平 2 分裂导线的振幅约为单导线的 33%~60%。东北电力设计院的试验表明, 4 分裂导线安装间隔棒时, 线夹出口处导线的动弯应变为不装间隔棒时的 60%左右。为有效利用间隔棒, 应采取不等距安装, 档内各次档距应不相等, 以免波节点落在间隔棒上。

#### 四、档距长度和悬挂高度的影响

一般认为, 风输给架空线的能量与档距长度成正比, 即档距越大, 风输入能量就越大。同时档距增大, 半波数凑成整数的几率也增加。此外, 档距长度增大, 架空线悬挂高度随之增高, 振动风速范围上限也相应提高。由于这些原因, 架空线振动的几率、频率和持续时间都因档距增大而增大。

架空线离地愈高, 气流的均匀性受地面粗糙度的干扰影响愈小。由于可致振动的风速范围加大, 使得架空线发生振动的几率增加, 同时也使架空线的振频与振幅加大。此风速上限值, 可按下列经验公式计算

$$v_h = 0.0667h + 3.333 \quad (\text{m/s}) \quad (11-24)$$

式中  $h$ ——架空线离地高度, m。

#### 五、悬挂体系的影响

在档距端部, 架空线通过绝缘子串与杆塔横担相连, 这些部件的阻尼对架空线振动的强度有很大影响。架空线振动时, 绝缘子串各元件间产生相对位移和摩擦, 横担产生变形, 消耗掉一部分振动能量, 减轻了振动的危害。运行实践表明, 悬垂绝缘子串和针式绝缘子相比, 刚度较小的木杆和刚度大的铁塔相比, 刚度较小的横担端部和刚度较大的杆顶相比, 酒杯铁塔的边横担和中横担相比, 前者的架空线振动强度小, 断股数少。美国对一条 345kV 线路的实测结果表明, 边相导线的振动强度比中相的要低 10%以上; 另一条水平排列的木杆针式绝缘子线路, 横担上的边相导线的断股为 0.6%, 而杆顶中相导线的断股数竟高达 30%。

#### 六、架空线张力的影响

架空线张力对振动的影响有如下两个方面。

##### 1. 对振动频率的影响

从  $f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T_0}{m}}$  可以明显看出, 张力  $T_0$  增大频率也就增高, 单位时间内振动次数多了。

如果以耐振次数衡量架空线疲劳极限, 则其疲劳寿命短了, 这对线路长期运行是不利的。

##### 2. 对疲劳极限的影响

架空线经常承受静态应力和动态应力的作用。静态应力包括架空线张拉应力, 线股绞制后产生的残余应力, 架空线弯曲所产生的弯曲应力等。动态应力由架空线的振动所引起, 对架空线强度的影响远大于静态应力, 是引起架空线断股继而断线的根本原因, 必须将交变动态应力值限制在架空线的疲劳极限应力以内。架空线所用线材的疲劳极限应力与其材料有关, 还与平均运行应力有关, 其数值可据古德曼 (Goodman) 图算得, 即

$$\sigma_i = \sigma_a \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_p} \right) \quad (11-25)$$

式中  $\sigma_i$ ——线材在静态应力  $\sigma_m$  作用下的疲劳极限应力, MPa;

$\sigma_a$ ——线材静态应力为零时的疲劳极限应力, MPa;

$\sigma_m$ ——线材承受的静态应力, MPa;

$\sigma_p$ ——线材的抗拉强度, MPa。

从上式可以看出, 承受的静态应力越高, 则其疲劳极限应力越低, 在同样振动条件下, 静态应力大的也就更容易发生断股。如果考虑线材绞制成架空线以及架空线安装在悬垂线夹中所受的作用, 其疲劳极限还要进一步降低。如铝线材的抗拉强度  $\sigma_p=169\text{MPa}$ , 无静态应力时疲劳极限应力  $\sigma_a=57\text{MPa}$  (相当于振动  $10^8$  次), 当静态应力  $\sigma_m=0.3\sigma_p$  时, 按式 (11-25) 计算的疲劳应力  $\sigma_i=40\text{MPa}$ , 为原来数值的 70%。考虑绞制成架空线后, 该数值还要降低 20%~50%, 如果再考虑安装于线夹中的影响, 输电线路架空线铝股的疲劳极限只能取 10~20MPa。

结合国内外线路实际运行经验来看, 提高架空线张力, 容易使其过早发生疲劳而导致断股或断线, 对线路运行是不利的。但并不等于说应无限制地降低导线张力, 因为即使张力降到很小, 只要条件适当, 亦会发生振动, 只是振动强度降低和振动时间减少。另外, 导线张力减少将使线路档距减小或杆塔增高, 线路投资增大, 这是不经济的。因此架空线使用的平均运行应力和采用的相应防振措施, 应既使线路运行安全, 又能降低建设投资。

## 第六节 微风振动的防振设计

在整个档距内, 不管架空线以何种波长和频率振动, 都以两端固定点即线夹出口处的架空线受损最为严重。主要原因是:

(1) 线夹出口处的架空线始终是一个节点, 角度位移大。

(2) 线夹本身转动不太灵活, 在悬挂点容易形成死点, 振动波不容易通过线夹传向相邻档, 除部分反射外, 振动的绝大部分能量集中消耗在线夹出口处的架空线上。

(3) 悬挂点处架空线具有较大的静应力, 允许的疲劳极限应力较低, 使线夹出口处的导线最容易疲劳破坏, 引起断股甚至断线, 或造成金具损坏。

当架空线微风振动的强度超过允许水平 (如疲劳寿命 40 年) 时, 必须采取防振措施降低动弯应力和振动持续时间, 以保护线夹出口处的架空线。

### 一、常用防振措施

#### 1. 防振锤

防振锤是目前使用最广泛的一种积极防振措施, 国内外均有几十年的运行经验, 对减弱或消除架空线振动危害的效果显著, 可以将振动的最大双倍振幅降低至十几分之一。使用时, 防振锤通过其线夹固定于架空线上, 当架空线发生振动时, 防振锤上下运动, 利用重锤的惯性, 使其钢绞线产生内摩擦消耗架空线的大部分振动能量, 空气对重锤的阻尼消耗一部分能量, 防振锤线夹处消耗和反射一部分能量。根据能量平衡原理, 防振锤的能量消耗使微风振动的强度降低。

根据对架空线路导线振动的调查, 某线路未装防振锤的悬挂点有 1098 处, 2 年内断股 322 处, 占 29.3%; 加防振锤的悬挂点 1125 处, 断股的仅占 0.44%。另一条线路, 装了防振锤后, 最大双倍振幅降低 14 倍。对某线路进行测振, 档距在 400~566m, 当无防振锤时振幅很大, 一部测振仪达到指示极限, 实际振动角超过  $30'$  以上, 而且持续振动时间长达

18~20h, 可以看出振动是激烈的。当安装一个防振锤后, 振动几乎可以略去。这些充分说明, 安装防振锤是目前防振的有效措施。

但如果选择的防振锤型号不当, 或安装位置不对, 或个数过多或过少, 就不但起不到防振锤应有的作用, 甚至适得其反。例如, 防振锤过重会使该锤安装处架空线出现“死点”, 发生断股; 过轻, 则不仅不能抑制架空线振动, 还将导致防振锤自身破坏。位置不当, 不可能充分发挥防振锤的作用, 达到减轻导线振动的目的。例如某线路地线为 GJ-50 型, 档距 200~260m, 每档每侧装了 2 个防振锤, 只运行了 3~6 个月, 即在档距内侧防振锤线夹处出现了大量断股。因此正确的处理这些问题是非常必要的。

## 2. 阻尼线

在架空线悬垂线夹两侧或耐张线夹出口一侧, 装上与架空线同型号或其他型号的单根线或部分双根线并在一起的连续多个花边, 起阻尼防振作用, 这些花边称为阻尼线。阻尼线通常与防振锤配合, 用于输电线路大跨越。我国大跨越常用的两种阻尼线型式如图 11-11 所示。

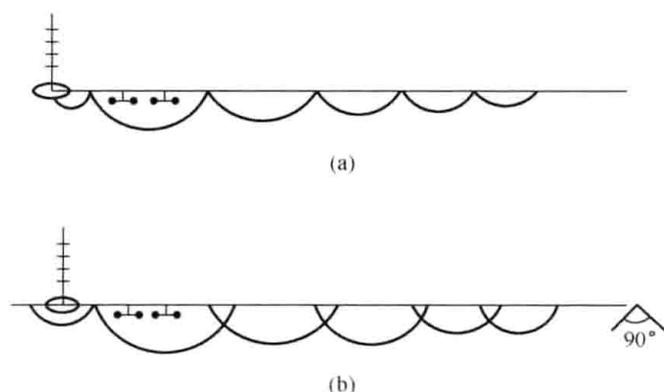


图 11-11 阻尼线的几种形式

(a) 垂直悬挂; (b) 交叉悬挂

阻尼线是一种结构简单但理论计算极为复杂的分布型消振器。架空线振动时, 固定在架空线上的阻尼线相继振动, 架空线及阻尼线本身线股之间产生摩擦, 消耗部分能量; 另一些振动能量由振动波通过阻尼线与架空线的连接点, 发生反复折射, 使档内的稳定振动遭到破坏, 振动能量逐渐消耗掉。同防振锤比较, 阻尼线的主要特点是:

- (1) 重量轻, 不容易在固定点形成“死点”;
- (2) 取材方便, 且便于通过调整花边改变固有频率, 其固有频率较多;
- (3) 在高频时, 其耗能效果较防振锤好, 但在低频时不如防振锤;
- (4) 现场实测表明, 阻尼线的耗能特性曲线随频率变化出现非常凹凸的现象, 在曲线的谷底点上消耗能量相当小, 在小振幅时消耗能量急剧降低。

防振锤和阻尼线防振具有互补性, 因而国内外大跨越多采用防振锤与阻尼线联合防振, 以充分发挥它们各自的优点。

## 3. 护线条

目前导线上广泛采用的护线条, 是用具有良好弹性的铝合金线股制成的螺旋形预绞丝。将护线条缠在导线上, 置于悬垂线夹中。安装护线条后, 由于加大了导线断面惯性矩, 在同样的外力作用下, 挠度减小, 应变和应力减小, 导线受力状况得到改善, 一般可减小动弯应力 20%~50%。现行线路的平均运行应力高, 振动比较严重, 单纯用护线条是不够的。护线条一般以护线为主, 兼起防振作用。

## 4. 合理选择架空线的平均运行应力

限制架空线运行应力, 可以降低悬挂点静应力, 有利于架空线的防振, 因此在线路设计规范中, 对合理选择平均运行应力作了规定。对铝钢截面比不小于 4.29 的钢芯铝绞线和钢绞线, 平均运行应力的上限和防振措施应符合表 11-4 的规定, 当有多年运行经验证明振动

危险很小, 可不受此表限制。

表 11-4 导线和地线平均运行应力的上限和防振措施

情 况	防 振 措 施	平均运行应力的上限 (抗拉强度%)	
		钢芯铝绞线	钢绞线
档距不超过 500m 的开阔地区	不需要	16	12
档距不超过 500m 的非开阔地区	不需要	18	18
档距不超过 120m	不需要	18	18
不论档距大小	护线条	22	—
不论档距大小	防振锤 (阻尼线) 或另加护线条	25	25

注 4 分裂及以上导线采用阻尼间隔棒时, 档距 500m 及以下可不再采用其他防振措施。

虽然较高的架空线平均运行应力可以降低线路造价, 但对防振不利; 应力太低, 则会造成线路造价过高。因此根据实际振动情况和采取的防振措施, 合理地选择架空线平均运行应力是必要的。

还有其他一些防振办法, 如避开易振区, 采用柔性横担、偏心线夹、防振线夹, 打背线, 自阻尼导线等。

## 二、防振锤的安装设计

架空输电线路是否需要采取防振措施, 可根据表 11-4 确定。当采取防振锤防振时, 安装设计的内容是确定防振锤的型号、安装个数和安装位置等。

### 1. 防振锤型号的选择

由于导线和地线的直径和单位质量不同, 在使用中的悬挂高度、应力、档距也不同, 风输入的能量不同, 因此其振动幅值、振频范围等就有差异, 不可能用一种型号的防振锤来解决所有架空线的振动问题。一般来讲, 若锤重过大, 总质量超过半波长架空线的质量, 则防振锤安装点将变成波节点, 防振锤起不到耗能防振作用; 若锤重过轻, 则施加于钢绞线端部的惯性力小, 防振锤耗能将会不足。因此直径大的和单位质量大的架空线, 相应的防振锤尺寸要大些和重些, 反之防振锤就小些和轻些。常用 FD、FG 型防振锤与架空线的配合见表 11-5。

表 11-5 防振锤与架空线的配合表

防振锤型号	FD-1	FD-2	FD-3	FD-4	FD-5
架空线截面 (mm <sup>2</sup> )	35~50	70~95	120~150	185~240	300~400
防振锤型号	FD-6	FG-35	FG-50	FG-70	FG-100
架空线截面 (mm <sup>2</sup> )	500~630	35	50	70	100

### 2. 防振锤个数的选择

当架空线的振幅很小或振动延续时间很短, 对架空线没有危险时, 不需要安装防振锤。随着档距的增大和平均运行应力上限的提高, 振动随之严重, 需要采取相应的防振措施, 一

般是在档距的两端各安装一个防振锤。对于 300m 以上的较大档距，由于风的输入能量较大，有时一端装一个标准防振锤不足以将振幅降低到规定的水平，需要安装多个（一般 1~3 个）防振锤。对于大跨越，有时甚至达到 6~7 个。我国单根导地线的防振锤安装数量见表 11-6。

表 11-6 防振锤个数选择表

档距范围(m) 架空线直径 $d$ (mm)	防振锤个数		
	1	2	3
$d < 12$	$\leq 300$	$> 300 \sim 600$	$> 600 \sim 900$
$12 \leq d \leq 22$	$\leq 350$	$> 350 \sim 700$	$> 700 \sim 1000$
$22 < d < 37.1$	$\leq 450$	$> 450 \sim 800$	$> 800 \sim 1200$

对防振锤的安装个数存在不同的观点。一种观点认为，防振锤的安装数量基本上与档距的长度成正比，再大的档距亦应如此。如英国对大跨越的防振设计规定，防振锤的安装数量可近似的按每 120m 一个防振锤计算。另一种观点认为，不能简单地用增加防振锤数量的办法提高能量消耗，档距每端安装的防振锤数量不应超过 2 个，且频率特性应不同；如果档距很大，仍不能将振幅限制到安全值以下，则应采用“档距中央阻尼”的其他方法解决。例如前苏联规定 1500m 以下的大跨越，每端只需安装 2 个频率特性不同的防振锤，已经有 50 条大跨越的运行经验证实是安全可靠的。其理由是：①防振锤数量超过 2 个时，所消耗的总能量不是代数相加；②输入风能很大时，仅在档距端部集中消耗能量，并不能使整个档距的振幅减小到安全程度，因而增加防振锤数量只不过是振动危险点转移到最外侧防振锤的线夹处；③采用档距中央阻尼，相当于把大档距分割成几个小档距，分别采取防振措施，防振效果更好。还有一种观点认为，应发展一种在档距内总共只安装一个防振锤的半档防振方法。半档防振方法在一些国家已经采用，我国尚无运行经验。

分裂导线系统与单导线系统的阻尼性能和振动模式不同，“背流效应”也改变了次导线的风能量，因此分裂导线的振动水平和持续时间均有显著减小，振动水平可减小到单导线的 50%，持续时间减至 20% 左右，多分裂减小的趋势更加明显。现行规范规定，4 分裂及以上导线采用阻尼间隔棒时，档距在 500m 及以下可不再采用其他防振措施。对 2 分裂导线则大多仍采用表 11-6 给出的数量。

### 3. 防振锤安装位置的计算

防振锤最好安装在波腹点附近位置，这样振动时其重锤的上下位移最大，重锤的惯性使钢绞线的弯曲度增大，能最大限度地消耗振动能量。但架空线的振动频率和波长随风速大小和应力大小而变化，在振动风速范围内，波长在最大值和最小值之间变动。因此防振锤的安装位置应照顾到最长和最短波时都能起到一定的防振作用。如图 11-12 所示，防振锤安装位置为  $S_0$  对最长波和最短波均有防振作用，其他波的第一个节点位

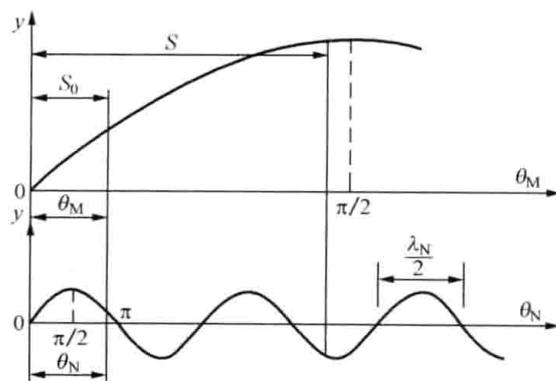


图 11-12 防振锤安装位置示意图

于最短半波长 $\frac{\lambda_N}{2}$ 和最长半波长 $\frac{\lambda_M}{2}$ 之间, 均大于 $S_0$ , 故对其他波而言, 防振锤安装在 $S_0$ 位置将比最长波和最短波更接近于波腹, 防振作用将会更好。如果将防振锤装在对最长波最有利的位 $S$ 点处, 对其他长度的波来讲, 必然有一个波的节点刚好通过 $S$ 点, 对这个波及相邻的波就不起作用或起很小作用, 对防振不利。防振锤的具体安装位置应在最长波波腹的前半部和最短波波腹的后半部, 并使两种波的相角互补, 即

$$\theta_N = \pi - \theta_M \quad (11-26)$$

而

$$\theta_N = \frac{2\pi S_0}{\lambda_N}, \quad \theta_M = \frac{2\pi S_0}{\lambda_M}$$

代入式(11-26), 整理后得

$$S_0 = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{\lambda_M} + \frac{1}{\lambda_N}} = \frac{\frac{\lambda_M}{2} \times \frac{\lambda_N}{2}}{\frac{\lambda_M}{2} + \frac{\lambda_N}{2}} \quad (11-27)$$

令架空线振动频率等于卡门旋涡频率, 得到最长半波长 $\frac{\lambda_M}{2}$ 和最短半波长 $\frac{\lambda_N}{2}$ 为

$$\frac{\lambda_M}{2} = \frac{d}{2Sv_N} \sqrt{\frac{T_M}{m}}, \quad \frac{\lambda_N}{2} = \frac{d}{2Sv_M} \sqrt{\frac{T_N}{m}} \quad (11-28)$$

式中  $v_M$ 、 $v_N$ ——分别为架空线振动的风速上限和下限值, m/s;

$T_M$ 、 $T_N$ ——分别为最低气温和最高气温时架空线的水平张力, N;

$d$ ——架空线的直径, mm;

$m$ ——架空线的单位长度质量, kg/m;

$S$ ——司脱罗哈数。

当 $\frac{\lambda_N}{2} \ll \frac{\lambda_M}{2}$ 时, 式(11-27)变为 $S_0 \approx \frac{\lambda_N}{2}$ , 这意味着置防振锤于最短波的波节点上, 为使防振锤仍有一定作用, 可引入系数进行调整。通常为

$$S_0 = (0.9 \sim 0.95) \frac{\lambda_N}{2} \quad (11-29)$$

在线路的运行中, 出现最高气温和最低气温的时间不多, 且风速远较架空线张力对波长的影响大, 而大档距架空线在最高和最低气温下的张力变化并不很大, 因此有时用架空线的平均运行张力 $T_\varphi$ 代替最高和最低气温下的张力 $T_N$ 和 $T_M$ 计算半波长, 此时防振锤的安装距离为

$$S_0 = \frac{v_M}{v_M + v_N} \frac{\lambda_N}{2} \quad (11-30)$$

防振锤的安装距离 $S_0$ , 通常是指从线夹出口到防振锤固定线夹中心间的距离。悬垂线夹(如图11-13所示), 轻型中心转动式悬垂线夹可以回转中心1为起量点, 船体难以转动时可以2或3为起量点。对轻型耐张线夹, 以线夹连接螺栓中心为起点; 对重型耐张线夹, 则需以线夹出口处为起点。当架空线装有护线条时, 因悬点处刚度增大使波节点略向外移, 此时安装距离可较式(11-27)的计算值增大10%左右。

需要指出, 当上限风速较大时, 频率增大, 最短半波长减小, 安装位置  $S_0$  减小, 防振锤更偏重于对高频侧的保护, 而高频时架空线自阻尼作用强, 振幅小 (图 11-9), 振动强度不大; 此时低频侧是架空线振动最严重的频段, 却未能得到防振锤的充分保护, 因此要慎重提高振动风速的上限值, 同时可考虑对档内每端一个的防振锤采用不等距安装。

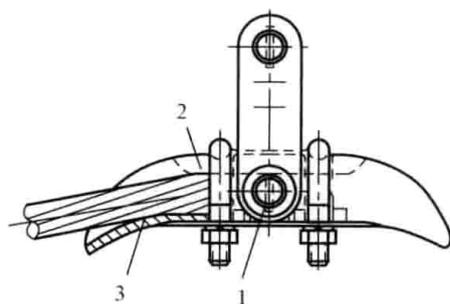


图 11-13 悬垂线夹防振锤  
安装位置起量点

4. 多个防振锤的安装位置

当需安装多个防振锤时, 其安装位置仍以最大限度地抑制振动为原则确定。目前有等距离安装和不等距离安装两种方法。

(1) 等距离安装。

等距离安装即各相邻防振锤的间距均等于  $S_0$ , 第  $i$  个防振锤的中心距线夹出口处的距离  $S_i$  为

$$S_i = iS_0 \tag{11-31}$$

这种安装方式下, 第 1 个防振锤位于最短波的相位  $\pi - \theta_M$  处, 最长波的相位  $\theta_M$  处; 第  $i$  个防振锤位于最短波的相位  $i(\pi - \theta_M)$  处, 最长波的相位  $i\theta_M$  处, 如图 11-14 所示, 防振效果较好。但多个防振锤均位于第 1 个最长半波内, 防振锤的总质量会远大于该段架空线的质量, 从而使该段架空线不再振动, 距悬点最远的防振锤处成为新的危险点, 因此一般多主张端部防振锤的个数不宜超过 2 个。等距离安装简单方便, 是常用的安装方式。

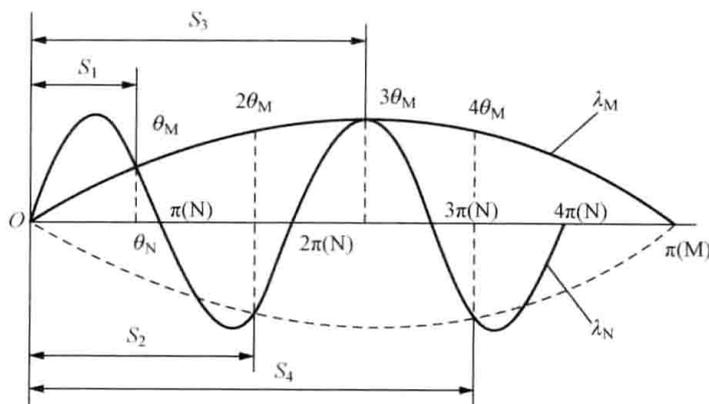


图 11-14 多个防振锤等距安装位置

(2) 不等距安装。

具体的安装方法目前尚未统一。若每端安装  $n$  个同型防振锤, 可将防护范围  $\frac{\lambda_N}{2} \sim \frac{\lambda_M}{2}$  等比例的分为  $n$  段, 即

$$\frac{\lambda_1/2}{\lambda_2/2} = \frac{\lambda_2/2}{\lambda_3/2} = \dots = \frac{\lambda_n/2}{\lambda_{n+1}/2}$$

其中  $\frac{\lambda_1}{2} = \frac{\lambda_N}{2}$ ,  $\frac{\lambda_{n+1}}{2} = \frac{\lambda_M}{2}$ , 对  $\frac{\lambda_i}{2} \sim \frac{\lambda_{i+1}}{2}$  间的安装位置仍按式 (11-27) 的原则计算, 不难导出第  $i$  个防振锤的安装距离为

$$S_i = \frac{\left[ \frac{\lambda_M}{2} / \frac{\lambda_N}{2} \right]^{\frac{i}{n}} \frac{\lambda_N}{2}}{1 + \left[ \frac{\lambda_M}{2} / \frac{\lambda_N}{2} \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (11-32)$$

采用两个同型防振锤时的安装距离, 也可由下式确定

$$S_1 = S_0, \quad S_2 = 1.75S_0 \quad (11-33)$$

### 三、阻尼线的安装设计

#### 1. 阻尼线的选材

阻尼线宜采用比被保护架空线较轻的绞线, 股径细、股数和层数多的较好, 因为这种绞线的自阻尼性能好, 能较多地吸收能量; 弯曲刚度较小, 可以获得较低的共振频率; 各阶振动频率间隔小, 能与更多的架空线固有频率发生共振, 因此其防振效果较好。但为取料方便, 一般采用和被保护架空线相同型号的线材, 远端短花边易对其进行剥层处理。

国外也有采用挠性好的钢丝绳作阻尼线的, 防振效果也很好。但连接点处钢丝绳的质量最好不超过按架空线选配的防振锤的质量, 以防止出现“死点”。

#### 2. 阻尼线花边的固有频率

阻尼线的花边, 可视为档距  $l$  和张力  $T_0$  都很小、刚度为  $EJ$  的悬线。根据公式 (11-14), 其  $n$  阶固有频率为

$$\omega_n = \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (11-34)$$

从上式可以看出, 阻尼线花边的固有频率与花边弦长的平方成反比。因此长花边用于防护低频振动, 中花边用于防护中频振动, 短花边用于防护高频振动。

#### 3. 花边数、花边弧垂和安装位置

花边的个数随档距的增加而增多, 一般最少 3 个, 多则达 5~6 个。花边的弦长一般不等, 由线夹处向档距中央花边弦长递减, 最长 4~6m, 最短 0.5~2m。

花边弧垂的大小对防振效果影响不大, 一般取弦长的 1/10~1/6。

阻尼线的缠扎点位置, 应照顾到在最长波和最短波时均起到较好的消振作用, 位于波腹点或相邻缠扎点的相对位移最大时的效果最好。一般第一个缠扎点布置在最短波的第一个波腹处, 靠近档距中央的最外侧的缠扎点布置在最长波的第一个波腹处, 其余缠扎点按向外侧花边弦长递减布置在其他振动频率下的波腹附近。悬垂线夹下面往往设置防振跳线 [见图 11-11 (b)], 以提高防振效果。当受电气间隙限制时, 防振跳线可连接到悬垂线夹上 [见图 11-11 (a)]。

交叉阻尼线 [见图 11-11 (b)] 不仅有垂直方向的振动, 还兼有转动, 相邻花边交错安装有利于降低安装点的动弯应力, 防振性能好, 但需采取可靠措施长期保持阻尼线 45° 倾斜。

阻尼线与防振锤联合使用时, 防振锤易安装在第一个大花边内, 不宜安装在阻尼线外侧, 以免防振锤夹头处出现较大的动弯应变。

**【例 11-1】** 通过某气象区的一条线路, 导线采用 LGJ-120/25 型钢芯铝绞线, 截面积  $A=146.73\text{mm}^2$ , 直径  $d=15.74\text{mm}$ , 单位长度质量  $m=0.5266\text{kg/m}$ 。线路的一个耐张段如图 11-15 所示, 悬挂点等高, 导线平均离地高度  $H=12\text{m}$ 。若已知架空线的应力弧垂曲

线，欲采用防振锤防振，试进行防振设计。

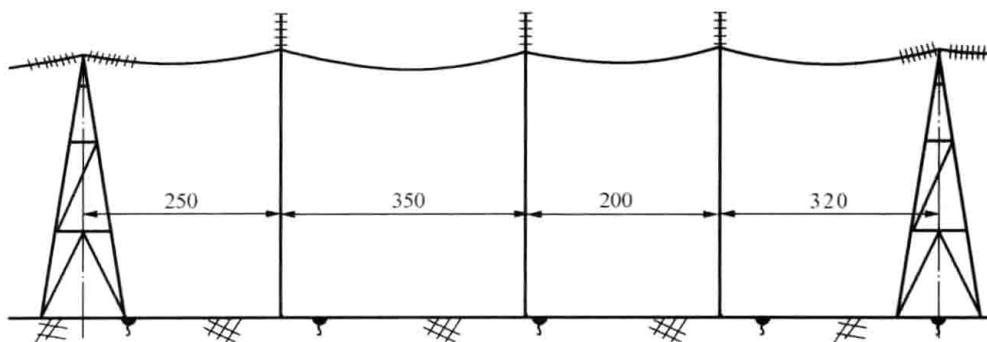


图 11-15 耐张段的架设情况 (单位: m)

解 (1) 求代表档距

$$l_r = \sqrt{\frac{250^3 + 350^3 + 200^3 + 320^3}{250 + 350 + 200 + 320}} = 297.7(\text{m})$$

(2) 由应力弧垂曲线查得:

最低气温时的导线应力  $\sigma_M = 87.8\text{MPa}$ , 相应张力  $T_M = 12.88\text{kN}$ ;

最高气温时的导线应力  $\sigma_N = 58.08\text{MPa}$ , 相应张力  $T_N = 8.52\text{kN}$ 。

(3) 确定振动风速范围:

风速上限值

$$v_M = 0.0667H + 3.333 = 0.0667 \times 12 + 3.333 = 4.13 \approx 4 \quad (\text{m/s})$$

风速下限值取

$$v_N = 0.5 \quad (\text{m/s})$$

(4) 防振装置设计 (设必须采用防振措施):

根据导线的型号查表 11-5 知, 防振锤应采用 FD-3 型。

根据档距长度和导线直径查表 11-6 知, 导线悬挂点两侧应各安装一个防振锤。

导线最大半波长为

$$\frac{\lambda_M}{2} = \frac{d}{400v_N} \sqrt{\frac{T_M}{m}} = \frac{15.74}{400 \times 0.5} \sqrt{\frac{12.88 \times 10^3}{0.5266}} = 12.31(\text{m})$$

导线最小半波长为

$$\frac{\lambda_N}{2} = \frac{d}{400v_M} \sqrt{\frac{T_N}{m}} = \frac{15.74}{400 \times 4} \sqrt{\frac{8.52 \times 10^3}{0.5266}} = 1.251(\text{m})$$

防振锤的安装距离

$$S_0 = \frac{\frac{\lambda_M}{2} \times \frac{\lambda_N}{2}}{\frac{\lambda_M}{2} + \frac{\lambda_N}{2}} = \frac{12.31 \times 1.251}{12.31 + 1.251} = 1.136(\text{m})$$

## 练习题

1. 架空线的振动类型有哪些? 对线路有严重影响的主要是哪些类型?

2. 简述微风振动的机理。
3. 影响架空线微风振动的因素主要有哪些？
4. 导线在什么位置容易断线、断股？为什么？
5. 常用的架空线微风振动的防振措施有哪几种？
6. 防振锤安装在什么位置消振效果比较好？确定其安装位置主要考虑哪些因素？



## 第十二章 路径选择和杆塔定位

### 第一节 输电线路的路径选择

高压输电线路设计，首先需要确定线路起止点间的路径。随着电力工业的日益发展，大批大型发电厂相继投入运行，需要建设大量远距离高压及以上输电线路。输电线路的路径，对高压输电线路的运行可靠性有着举足轻重的影响。

一条输电线路有的经过几个区、县，有的经过几个省（市），通过地区多，涉及面广，与外部的关系复杂。所以在明确起止点后，要充分收集可能路径方案沿线的有关资料，宜采用卫片、航片、全数字摄影测量系统和红外测量等新技术，在滑坡、泥石流、崩塌等地质条件复杂地区宜采用地质遥感技术，综合考虑线路长度、地形地貌、地质、冰区、交通、施工、运行及地方规划等因素，进行多方案技术比较确定线路路径，做到安全可靠，环境友好、经济合理。

#### 一、路径选择的原则

(1) 首先对 5~10 年的电力系统规划进行充分研究，了解在规划中是否出现中间变电站或发电厂，在路径选择时尽量与电力系统规划结合起来，以免造成重复投资，或者给今后的电网改造增加麻烦。

(2) 应避开军事设施、大型工矿企业等重要设施，并应符合城镇规划。当无法避开时，应取得相关协议，并应采取适当措施。宜避开自然保护区、风景名胜区、原始森林等，当无法避让时，应做好评估报批工作。宜避开不良地质地带和采动影响区，宜避开重冰区、易舞区及影响安全运行的其他地区，当无法避让时，应采取必要的措施。

(3) 应考虑与电台、机场、弱电线路等邻近设施的相互影响。

(4) 线路路径宜靠近现有国道、省道、县道及乡镇公路，改善交通条件，充分利用现有的交通条件，方便施工和运行。

(5) 应根据厂、站的总体布置，统一规划大型发电厂和枢纽变电站的进出线，在路径狭窄地段宜采用同杆塔多回架设。

(6) 山区线路在选择路径和定位时，应注意限制档距和相应的高差，避免出现杆塔两侧大小悬殊的档距，当无法避免时应采取必要的措施，提高安全度。

(7) 有大跨越的输电线路，其路径方案应结合大跨越的情况，通过综合技术经济比较确定。大跨越应自成一个耐张段，并力求缩短。大跨越杆塔宜设置在 5 年重现期的洪水淹没区以外，并考虑 50 年河岸冲刷变迁的影响。

(8) 应符合国家环境保护、水土保持、生态环境保护的有关法律法规的要求。

#### 二、图上的选线

图上的选线是在地形图上进行大方案的比较，从多个路径方案中选出较好的方案。图上的选线所用地形图的比例以 1:50000 或 1:100000 为宜，一般在室内进行，又称室内选线。

图上的选线前应充分了解工程概况和系统规划，明确输电线路起止点及中途必经点的位置，以及线路输送容量、电压等级、回路数和架空导线型号等设计条件。选线时，应根据路

径选择的原则, 兼顾电力网的发展规划, 力求使起止点间距离最短, 在地形图上初步拟定出几个可能的路径方案。在已有资料的基础上, 对这些方案进行分析比较, 从中选出 1~2 个较好的方案, 作为进一步搜集沿线资料和初勘的对象。

### 1. 搜集资料的内容

搜集资料的主要目的, 是要取得对线路路径有影响的地上地下障碍物的有关资料以及所属单位对线路通过的意见。搜集资料的内容一般为有关部门所属设施现状及发展规模、占地范围、对线路的技术要求及意见等。资料的搜集内容和来源单位可参考表 12-1。

表 12-1 搜集资料的内容

序号	搜集内容	来源单位
1	邀请空军、作战、通信、炮兵、装甲兵、后勤等有关单位, 了解现有及拟建军事设施的位置、影响范围及对线路在附近通过的有关规定, 取得对路径通过的要求	各军区司令部
2	取得城市现有规划平面图及同意线路走廊的文件	城市建设局或建设规划部门
3	搜集沿线现有及拟建的地上及地下通信设施资料及运行中的风、冰等灾害资料, 征求对通信保护方面的意见	各级邮电局、电信局、邮电设计单位
4	搜集沿线现有及拟建的铁路、通信信号等设施的资料及对保护措施的意见, 并搜集运行中的风、冰等灾害资料	各级铁路局及铁道设计单位
5	搜集现有及拟建的民航与农用机场、导航台的位置、等级、起降方向、气象等资料, 了解影响线路通过的有关规定	民航局
6	搜集设计所需要的气象资料及取得有关气象资料数据的鉴定性意见, 了解沿线有无“微地形”的特殊气象资料	气象局(台)
7	搜集沿线矿藏分布、储量、品位、开采价值及沿线地质构造、地震烈度等资料	地质局及所属勘探队
8	搜集沿线矿藏分布、现有开发单位、远景规划、设计单位等, 并取得对线路通过的意见	煤炭、有色金属管理局
9	搜集矿区矿藏分布、开采情况、采空区范围、深度及沉陷情况; 露天开采时的爆破影响范围, 火药库的位置、储量、库房规格, 事故爆炸时的影响范围; 了解矿区对线路走线有影响的有关技术规定, 取得对线路通过的意见	矿务局
10	搜集江河上现有及规划的水库、电站、排灌系统等水利设施的位置、淹没范围和河流水文资料等, 包括历年最高洪水位、常年洪水位、50 年一遇洪水位、流速、漂浮物、河道变迁等。河流如果浮运或通航, 尚应搜集浮运或航行时的最高水位、船舶种类、桅杆高度、航道位置、封冻期的最高冰面的流冰水位、流速、冰块大小等。若在水库下方通过时还应搜集水坝建设标准, 溢洪道位置和排流方向及水坝的可靠性等资料, 征求对线路跨越的意见	各地水利局、航运管理局
11	搜集沿线现有及拟建的公路走向、等级及重要桥涵等设施资料, 并了解农村简易公路的情况	各地交通(或公路)局
12	搜集线路进出线走廊平面图、走廊内地上地下设施以及所涉及的单位, 征求走线的意见。搜集已有线路的运行与气象资料等	电厂、变电站、电业局、设计单位
13	搜集沿线森林分布及采伐情况, 包括树木种类、密度、高度、直径等资料。如果是果木、桑茶等经济作物, 尚应了解自然生长高度或修剪高度, 以及对线路通过的要求	各地林业局

续表

序号	搜集内容	来源单位
14	搜集现有及拟开发的油田范围、地上地下管线、设备等建设位置以及线路穿过油田时对线路的要求,搜集化工及炼油厂排出气体、水、灰等的扩散范围以及对线路的影响等资料	石油化工管理局、油田、炼油厂
15	搜集现有及拟建电台、电视台天线位置、高度、用途以及对线路通过的要求等资料	电视、广播事业管理局
16	搜集建筑设施的位置,正常及事故时对线路的影响等资料	砂石管理所、采石场、火药库、油库、沿线工矿企业

将搜集到的各路径方案沿线的有关资料补绘于选线地形图上,对各保留方案进行修正,剔除明显不合理和不可行的路径方案。对剩下的路径方案进行更深入细致的分析比较,必要时可再与严重影响路径走向的有关设施所属单位进一步协商,使路径方案更为合理和落实。经过上述过程,确定出可供重点踏勘的路径方案。

### 2. 初勘及路径方案的比较

初勘是按图上选定的路径方案到现场进行实地勘察,验证是否符合实际并决定各方案的取舍,也称踏勘。根据实际需要,可以采取沿线了解、重点勘查或仪器初测的方法进行。初勘结束后,根据获得的新资料修正路径方案,并组织各专业对路径方案进行技术经济比较,填写路径方案技术经济比较表(表12-2)。

表 12-2 路径方案技术经济比较表

序号	项目	方案			备注
		I	II	III	
1	线路总长度(km)				
	其中	平地(km)			
		耕地(km)			
		荒地(km)			
		丘陵(km)			
		耕地(km)			
		荒地(km)			
		山地(km)			
		耕地(km)			
		荒地(km)			
	沼泽(km)				
2	线路转角处数(处)				
	其中	5°以下(处)			
		5°以上至30°(处)			
		30°以上至60°(处)			
		60°以上至90°(处)			

续表

序号	项 目		方 案			备 注
			I	II	III	
3	交叉跨越次数 (次)					
	其中	35kV 以上电力线 (次)				
		I、II 级通信线 (次)				
		公路 (次)				
		铁路 (次)				
		通航河流 (次)				
	其他 (次)					
4	沿线地质情况					
5	沿线水文情况					
6	沿线交通运输情况					
	铁路	平行长度 (km)				
		平行运距 (km)				
	公路	平行长度 (km)				
		平行运距 (km)				
	水路	平行长度 (km)				
平行运距 (km)						
7	修筑道路费用估计 (万元)					
8	施工运行条件					
9	对其他设施影响					
10	通过矿藏情况					
11	通过森林情况					
12	协议情况					
13	线路投资估算 (万元)					
14	材料消耗量					
	其中	有色金属 (t)				
		钢材 (t)				
		水泥 (t)				
木材 (m <sup>3</sup> )						
15	结论					

注 以上比较项目,可根据具体情况增减。

### 三、现场选线

现场选线是将批准的初勘路径在现场具体落实,所以也叫终勘选线。现场选线为定线、定位工作确定线路的最终走向,对线路的经济技术指标和施工运行条件起着决定性作用。

现场选线时,要兼顾杆塔位的经济合理性,对特殊点应该反复比较,做到“以线为主、线中有位”必要时应草绘断面图进行定位比较后优选。线路情况简单时,现场选线可与定线工作合并进行。

#### 1. 转角点选择

最理想的输电线路起止点间连成一条直线,但由于各种障碍物的影响,实际线路不可避

免地要出现转角而成折线，合理的路径只要做到转角数少，转角度数小就可以了。为了施工方便，转角点不宜选在高山顶或深沟、河岸、堤坝、悬崖边缘以及易被洪水冲刷、淹没和低洼积水之处。转角点应选在铁路、公路用地之外。转角点还应照顾到前后相邻档的塔位，避免出现过大或过小档距。

### 2. 跨河点选择

线路跨越江河容易出现大跨越。大跨越是线路中比较重要也比较薄弱的区段，因此跨越点的选择十分重要。跨河点必须力求选择在河道最窄、河床平直、河岸稳定、两岸地形较高、不被冲刷、地质较好的地段，线路与河流尽量垂直。跨河方案一般可采用耐张杆塔—直线杆塔—耐张杆塔的方式，金具采用独立挂点的多联悬垂串。河面较宽时，可考虑在江心岛上立杆；河水较浅时，如果可能可考虑在河中立杆。

### 3. 山区路径选择

山区线路，应避免通过陡坡、悬崖峭壁、滑坡、崩塌区、泥石流、喀斯特溶洞等不良地质带，与山脊交叉时，尽量从平缓处通过。山区间歇性河流多，流速大，冲击力强，应避免从干河沟通过，必须通过时，杆塔位应该在最高洪水水位以上。山区交通运输困难，应从技术经济与施工运行条件上作好方案比较，既保证线路安全可靠的运行，又降低线路投资。

### 4. 覆冰区路径选择

线路经过覆冰区时，应调查该地区覆冰出现的各种情况，特别要注意地形对覆冰的影响，避免从重冰区通过。如必须通过时，应选择有利地形（如利用地势较低的背风坡，靠近湖泊时在上风向侧通过等），尽量避免大档距，并注意交通情况，尽量创造抢修条件。

### 5. 居民区和厂库房附近路径选择

工业企业区、港口、码头、火车站、市镇等人口密集地区属居民区。线路一般应避开或绕过居民区。线路必须在居民区和厂库房附近通过时，所选路径应满足以下几点：

(1) 不应跨越以易燃材料为顶盖的建筑物。对耐火屋顶的建筑物，如需跨越时，应与有关方面协商同意，500kV 及以上输电线路不应跨越长期住人的建筑物。

(2) 线路与甲类火灾危险性的厂房，甲类物品库房，易燃、易爆材料堆场，以及可燃或易燃、易爆液（气）体储罐的防火间距，不应小于杆塔全高加 3m。

(3) 导线与建筑物的最小垂直距离和水平距离应符合设计规范的规定。

### 6. 跨越、接近弱电线路时

为减少对弱电线路的影响，输电线路跨越弱电线路（不包括光缆和埋地电缆）时的交叉角应符合表 12-3 的规定。弱电线路的等级划分见附录 D。输电线路与弱电线路接近时，应计算对弱电线路的干扰和危险影响程度，保证其在允许值范围内，计算方法可参考 DL/T 5033—2006《输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程》。

表 12-3 输电线路与弱电线路的交叉角

弱电线路等级	一级	二级	三级
交叉角	$\geq 45^\circ$	$\geq 30^\circ$	不限制

### 7. 接近无线电台时

当输电线路与调幅广播收音台、监测台、电视差转台、收转台、航空无线电通信台、导航台等接近时，宜从非无线电接收方向通过，利用接近段的地形地物的屏蔽作用。为

防止导线的电晕或其他原因的放电造成对无线电的干扰, 保证无线电台(站)的正常工作, 输电线路的导线与无线电台(站)的天线边缘之间应保持一定的最小距离。根据 DL/T 5040—2006《输电线路对无线电台影响防护技术规定》, 其防护距离如表 12-4 所示。当不能满足规定的防护距离时, 可根据输电线路和无线电台的具体情况, 通过计算、测试或采取一定的防护措施协商解决。海拔不超过 1000m 时, 距边相导线投影线之外 20m 且离地 2m 高处, 无雨、无雪、无雾气象条件下, 输电线路产生的 0.5MHz 无线电干扰限值见表 12-5。

表 12-4 输电线路对无线电台的防护距离 (m)

编号	无线电台名称		线路电压等级 (kV)								
			500			220~330			110		
			无线电台(站)等级								
			I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	调幅广播	收音台	1200	900	500	1000	700	400	800	500	300
		监测台	2000	1000	500	1600	800	400	1400	600	300
2	短波无线电测向台		2000			1600			1000		
3	短波无线电收信台		1800	1100	700	1300	800	600	1000	600	500
4	电视差转台、收转台	VHF (I)	500			400			300		
		VHF (II)	350			250			150		
5	VHF/UHF 航空无线电通信台(站)		500			300			200		
6	对空情报雷达台	VHF (80~300MHz)	1600			1200			1000		
		UHF (300~3000MHz)	1000			800			700		
7	空管雷达站					450					
8	中波导航台					500					
9	超短波定向台					700					
10	对海无线电导航台(站)					400					

表 12-5 无线电干扰限值

标称电压 (kV)	110	220~330	500	750	1000
限值 dB ( $\mu\text{V}/\text{m}$ )	46	53	55	58	58

## 8. 线路出入变电站

为简化变电构架设计, 减少构架受力, 合理出线, 输电线路应尽量垂直于变电构架。

## 第二节 对地距离和交叉跨越的有关规定

### 一、一般规定

为了人身安全, 减轻静电感应产生的暂态电击给人们造成的不舒服感, 减小对被跨越物的影响, 必须保证输电线路对地面和各种跨越物之间的电气距离。

一般情况下,检查电气限距的气象条件是最大弧垂气象(最高气温或覆冰无风)和最大风偏气象(最大风或覆冰有风)。根据导线运行温度 $40^{\circ}\text{C}$ (若导线按允许温度 $80^{\circ}\text{C}$ 设计时,导线运行温度取 $50^{\circ}\text{C}$ )情况或覆冰无风情况,求得最大弧垂计算垂直距离;根据最大风偏情况或覆冰情况,求得最大风偏进行风偏校验。计算中可不考虑由于电流、太阳辐射等引起的弧垂增大,但应计及导线架线后塑性伸长的影响和设计、施工的误差。对重冰区线路,还应计算不均匀覆冰和验算覆冰情况下的导线弧垂增大。

大跨越的电气距离应按导线实际能够达到的最高温度校验。输电线路跨越标准轨距铁路、高速公路和一级公路,当交叉跨越档距超过 $200\text{m}$ 时,最大弧垂应按导线允许温度计算,导线允许温度按不同要求取 $70^{\circ}\text{C}$ 或 $80^{\circ}\text{C}$ 。公路的等级划分参见附录C。

## 二、对地距离和交叉跨越的限距值

(1)导线对地限距。在最大弧垂气象条件下,导线对地面的距离不应小于表12-6所列数值。表中的居民区是指工业企业地区、港口、码头、火车站、城镇等人口密集区。居民区以外地区,均属非居民区。虽然时常有人、车辆或农业机械到达,但未遇房屋或房屋稀少的地区,亦属非居民区。交通困难地区是指车辆、农业机械不能到达的地区。在最大风偏气象条件下,导线与山坡、峭壁、岩石之间的净空距离不应小于表12-7所列数值。

表 12-6 导线对地面的最小距离 (m)

线路经过地区	标称电压 (kV)						
	35~110	220	330	500	750	1000	
						单回	双回 (逆相序)
居民区	7.0	7.5	8.5	14	19.5	27	25
非居民区	6.0	6.5	7.5	11 (水平排列) 10.5 (单回, 三角排列)	15.5 (农耕区) 13.7 (非农耕区)	22 (农耕区) 19 (非农耕区)	21 (农耕区) 18 (非农耕区)
交通困难地区	5.0	5.5	6.5	8.5	11.0	15	

表 12-7 导线与山坡、峭壁、岩石之间的净空距离 (m)

线路经过地区	标称电压 (kV)					
	35~110	220	330	500	750	1000
步行可以到达的山坡	5.0	5.5	6.5	8.5	11.0	13.0
步行不能到达的山坡、峭壁、岩石	3.0	4.0	5.0	6.5	8.5	11.0

(2)导线对建筑物限距。当输电线路跨越建筑物时,在最大弧垂气象情况下,导线与建筑物之间的垂直距离不应小于表12-8所列数值。当输电线路与建筑物接近时,在最大风偏气象情况下,边导线和建筑物之间的最小距离,不应小于表12-9所列数值。与城市多层建筑物或规划建筑物之间的距离是指其水平距离。在无风气象情况下,边导线与建筑物之间的水平距离,不应小于表12-10所列数值。

$500\text{kV}$ 及以上输电线路跨越非长期住人的建筑物或邻近居住建筑时,建筑所在位置距地 $1.5\text{m}$ 高处的未畸变电场不得超过 $4\text{kV}/\text{m}$ 。

表 12-8 导线与建筑物之间的最小垂直距离

标称电压 (kV)	35	110	220	330	500	750	1000
垂直距离 (m)	4.0	5.0	6.0	7.0	9.0	11.5	15.5

表 12-9 导线与建筑物之间的最小净空距离

标称电压 (kV)	35	110	220	330	500	750	1000
允许距离 (m)	3.5	4.0	5.0	6.0	8.5	11.0	15.0

表 12-10

边导线与建筑物之间的水平距离

标称电压 (kV)	35	110	220	330	500	750	1000
水平距离 (m)	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	6.0	7.0

(3) 线路通过森林及绿化区。输电线路通过经济作物和集中林区时,宜采用加高杆塔跨越不砍通道的方案。跨越时,应考虑树木的自然生长高度,导线与树木之间的最小垂直距离应符合表 12-11 的规定。当需要砍伐通道时,通道净宽度不应小于线路宽度加通道附近主要树种自然生长高度的 2 倍。通道附近超过主要树种自然生长高度的个别树木也应砍伐。

线路通过公园、绿化区、防护林带,在最大计算风偏下导线与树木之间的最小净空距离不小于表 12-11 的规定值。

线路通过果林、经济作物林或城市灌木林、行道树不应砍伐通道,导线与这些树木之间的最小垂直距离应符合表 12-11 规定的数值。

表 12-11

导线与树木之间的最小距离

标称电压 (kV)	35~110	220	330	500	750	1000	
						单回	双回 (逆相序)
与树木间的最小垂直距离 (m)	4.0	4.5	5.5	7.0	8.5	14.0	13.0
与树木间的最小净空距离 (m)	3.5	4.0	5.0	7.0	8.5	10.0	
与果林、经济作物、行道树等的最小垂直距离 (m)	3.0	3.5	4.5	7.0	8.5	16.0	15.0

(4) 跨越或接近铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路时的基本要求:输电线路与铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近时,其限距和其他要求应符合表 12-12 的规定。

表 12-12 输电线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近的基本要求

项 目	铁 路	公 路	电车道 (有轨及无轨)	通航河流	不通航河流
导线或地线在跨越档内接头	标准轨距: 不得接头 窄 轨: 不限制	高速公路、一级公路: 不得接头 二、三、四级公路: 不限制	不得接头	一、二级: 不得接头 三级及以下: 不限制	不限制
邻档断线情况的检验	标准轨距: 检 验 窄 轨: 不检验	高速公路、一级公路: 检 验 二、三、四级公路: 不检验	检 验	不检验	不检验

续表

项 目		铁 路			公 路		电车道 (有轨及无轨)		通航河流		不通航河流	
邻档断线 情况的最小垂直距 离 (m)	标称 电压 (kV)	至轨顶			至承力 索或接 触线	至路面	至路面	至承力索 或接触线	—			
	110~ 500	7.0			2.0	6.0	—	2.0	—			
最小 垂直 距离 (m)	标称 电压 (kV)	至轨顶			至承力 索或接 触线	至路面	至路面	至承力索 或接触线	至五年 一遇洪 水位	至最高航 行水位的 最高船 桅顶	至百年 一遇洪 水位	冬季至 冰面
		标准 轨	窄轨	电气 轨								
	110	7.5	7.5	11.5	3.0	7.0	10.0	3.0	6.0	2.0	3.0	6.0
	220	8.5	7.5	12.5	4.0	8.0	11.0	4.0	7.0	3.0	4.0	6.5
	330	9.5	8.5	13.5	5.0	9.0	12.0	5.0	8.0	4.0	5.0	7.5
	500	14.0	13.0	16.0	6.0	14.0	16.0	6.5	9.5	6.0	6.5	11 (水平) 10.5 (三角)
	750	19.5	18.5	21.5	7.0(10)	19.5	21.5	7 (10)	11.5	8.0	8.0	15.5
1000	单 回	27			10 (16)	27			14	10	10	22
	双 回	25			10 (14)	25			13	10	10	21
最小 水平 距离 (m)	标称 电压 (kV)	杆塔外缘至轨道中心			杆塔外缘至路基边缘		杆塔外缘至路基边缘		边导线至斜坡上缘 (线路与拉纤小路平行)			
					开阔地区	路径受 限制地区	开阔地区	路径受 限制地区				
	110	交叉: 塔高加 3.1m, 无法满足时 可适当减小, 但不得 小于 30m (1000kV 线路不小于 40m) 平行: 塔高加 3.1m, 困难时双方 协商确定			交叉: 8、 10m	5.0	交叉: 8、 10m	5.0	最高杆(塔)高。1000kV 线 路的塔位应在河堤保护范围之外 或按协议取值			
	220				(750kV)、 15m或协议 取值 (1000kV)	5.0	8.0 (15)	5.0				
330	6.0					10 (20)						
500	8.0 (15)	8.0	8.0	8.0								
750	10	10	10	10								
1000	15 (单回) 13 (双回)	15 (单回) 13 (双回)	15 (单回) 13 (双回)	15 (单回) 13 (双回)								
附加要求	不宜在铁路出站 信号机以内跨越			括号内数值用于高 速公路。高速公路路 基边缘指公路下缘的 排水沟				最高洪水位时, 有抗洪抢险船 只航行的河流, 垂直距离应协商 确定。对 1000kV 线路, 增加至 最高航行水位的最小垂直距离要 求: 单回路 24m; 双回路逆相 序 23m				
备 注	括号内的数值用 于跨杆顶			公路分级见附录 C, 城市道路分级可参照 公路的规定				(1) 不通航河流指不能通航, 也不能浮运的河流; (2) 次要通航河流对接头不 限制; (3) 需满足航道部门协议的 要求				

续表

项目		弱电线路		电力线路		特殊管道		索道	
导线或地线在跨越档内接头		不限制		110kV 及以上线路: 不得接头 110kV 以下线路: 不限制		不得接头		不得接头	
邻档断线情况的检验		一级: 检验 二、三级: 不检验		不检验		检验		不检验	
邻档断线情况的最小垂直距离 (m)	标称电压 (kV)	至被跨越物		—		至管道任何部分		—	
	110~500	1.0		—		1.0		—	
最小垂直距离 (m)	标称电压 (kV)	至被跨越物		至被跨越物		至管道任何部分		至管道任何部分	
	110	3.0		3.0		4.0		3.0	
	220	4.0		4.0		5.0		4.0	
	330	5.0		5.0		6.0		5.0	
	500	8.5		6.0 (8.5)		7.5		6.5	
	750	12.0		7.0 (12)		9.5		8.5 (顶部)、11.0 (底部)	
1000	单回: 18 双回: 16		10 (16)		单回: 18 双回: 16		单回: 18 双回: 16		
最小水平距离 (m)	标称电压 (kV)	与边导线间		与边导线间		边导线至管、索道任何部分			
		开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区 (在最大风偏情况下)		
	110 220 330 500 750	平行: 最高杆 (塔) 高	4.0	平行: 最高杆 (塔) 高	5.0	平行: 最高杆 (塔) 高	4.0		
			5.0		7.0		5.0		
			6.0		9.0		6.0		
			8.0		13.0		7.5		
1000	单回: 13 双回: 12	20	9.5 (管道)、8.5 (顶部)、11 (底部)						
13									
附加要求		输电线路应架设在上方		电压较高的线路一般架设在电压较低线路的上方。同一等级电压, 电网公用线应架设在专用线上方		(1) 与索道交叉, 且索道在上方, 索道的下方应装保护设施; (2) 交叉点不应选在管道的检查井 (孔) 处; (3) 与管、索道平行、交叉时, 管、索道应接地			

续表

项目	弱电线路	电力线路	特殊管道	索道
备注	弱电线路分级 见附录 D	括号内的数值用于 跨越杆(塔)顶	(1) 管、索道上的附属设施, 均应视为管、索道的一部分; (2) 特殊管道指架设在地面上输送易燃、易爆物的管道	

注 1. 邻档断线情况的计算条件:  $+15^{\circ}\text{C}$ , 无风。

2. 路径狭窄地带, 两线路杆塔位置交错排列时导线在最大风偏情况下, 对相邻线路杆塔的最小水平距离, 不应小于下列数值:

标称电压 (kV)	110	220	330	500	750	1000
距离 (m)	3.0	4.0	5.0	7.0	9.5	13

3. 跨越弱电线路或电力线路, 导线截面按允许载流量选择时应校验最高允许温度时的交叉距离, 其数值不得小于操作过电压间隙, 且不小于 0.8m。

4. 1000kV 线路宜远离低压用电线路和通信线路, 在路径受限地区, 与其平行长度不宜大于 1500m, 与边导线的水平距离宜大于 50m。必要时, 通信线路应采取防护措施, 入户低压线路应给予必要的处理。跨越铁路时, 交叉角不宜小于  $45^{\circ}$ , 但不应小于  $30^{\circ}$ 。跨越 110kV 及以上输电线路时, 交叉角不应小于  $15^{\circ}$ 。

5. 杆塔为固定横担, 且采用分裂导线时, 可不检验邻档断线时的交叉跨越垂直距离。

6. 重要交叉跨越确定的技术条件, 应征求相关部门的意见。

### 第三节 杆塔定位

在选定的线路路径上, 进行定线、平断面测量, 在平断面图上合理配置杆塔位置的工作, 称为杆塔定位。杆塔定位是线路设计的重要组成部分, 定位的质量直接关系到输电线路的造价和施工、运行的方便与安全。杆塔定位工作分为室内定位和室外定位。室内定位是用弧垂曲线模板在线路勘测所取得的平断面图上排定杆塔位置。室外定位是把在平断面图上确定的杆塔位置到现场复核校正, 并用标桩固定下来。

#### 一、定位前的准备工作

定位工作开始前, 应准备好适当比例的线路平断面图, 定位用弧垂曲线模板, 并需要将线路的有关技术资料和要求以及注意事项等汇编成“工程定位手册”。

1. “工程定位手册”的主要内容

(1) 线路特点概要, 如线路起止点、长度及线路主要技术性能等;

(2) 送、受电端的进出线平面图或进、出线构架数据。如构架位置、构架挂线点标高、线间距离、相序排列及允许张力等;

(3) 全线计划换位系统图 (包括换位杆塔分布、距离、换位方式和具体要求), 换相方式和地点;

(4) 不同气象区分段 (如有两种或两种以上气象区时);

(5) 导线和地线的型号及力学特性曲线, 如使用两种或两种以上的不同型号电线或许可应力时, 应标明各自架设的区段;

(6) 绝缘子串组装图; 如有需加强绝缘的区段, 应说明具体位置并给出相应的组装图;

(7) 防振措施的安装规定;

(8) 按档距长度需要安装的间隔棒数量;

- (9) 杆塔及基础使用条件一览表, 基础型式的选用原则;
- (10) 各型杆塔接地装置选配一览表及选配规定;
- (11) 各型杆塔使用的原则 (使用范围, 杆、塔混合使用的原则等);
- (12) 导线对地及各种建筑物的间距及交叉跨越方式的要求;
- (13) 边导线与建筑物等之间距离的规定;
- (14) 耐张段长度的规定;
- (15) 线路纵断面图的比例、图幅、里程及标高的选取、杆塔编号等规定;
- (16) 定位使用的模板  $K$  值, 摇摆角、悬垂角及各种验算曲线及图表等;
- (17) 导线弧垂对地裕度及有关交叉跨越的特殊校验条件;
- (18) 转角杆塔或换位杆塔的杆位中心数据;
- (19) 通信保护要求及明确一、二级通信线的位置;
- (20) 其他特殊要求 (如水淹区、蓄洪区的水位标准和定位原则, 路径协议中有关杆塔定位的特殊事项等)。

## 2. 线路平断面图

线路路径方案选定后, 即可进行详细的勘测工作, 包括定线测量、平面测量和断面测量。

**定线测量:** 根据选定的路径, 定出线路的中心线, 把线路的起止点、转角点、方向点用标桩精确地实地固定下来, 并测出线路路径的实际长度, 钉好里程桩。

**平面测量:** 测量线路中心线两侧各 50m 的带状区域的地物地貌, 绘制成平面图。中心线两侧对线路有影响的地形地物均应在图上标出, 如建筑物的位置和接近距离, 陡坡、冲沟的位置和范围, 耕地、树林沼泽地等的位置和边界, 还应绘出交叉跨越物 (电力线、通信线、铁路、道路、河流、管道、索道等) 与线路的交叉角度、去向或与线路平行接近的位置、长度, 为杆塔定位提供依据。

**断面测量:** 分纵断面测量和横断面测量。沿线路中心线 (及高边线) 测量各断面点的标高、交叉跨越物的位置和高程, 绘制成纵断面图, 供排定杆塔位置使用。高程的误差不超过  $\pm 0.5\text{m}$ 。当边线地面高出中线地面  $0.5\text{m}$  时, 应施测边线断面。当边坡大于  $1:4$  或起伏极不规则时, 进行垂直线路中心线的横断面测量, 测量宽度一般为  $40\text{m}$ , 绘出横断面图, 供校验最大风偏时导线对地安全距离使用。

绘制纵断面图的比例尺, 对平地或起伏不大的丘陵, 水平采用  $1:5000$ , 高差采用  $1:500$ ; 起伏较大的丘陵、山区或交叉跨越地区, 水平采用  $1:2000$ , 高差采用  $1:200$ 。横断面图纵横比例尺一般均为  $1:500$ 。

将线路经过地区的平面图、纵平面图、横断面图绘制在一起, 构成平断面图。在平断面图中, 线路路径中心线展为直线, 线路转向 (左转或右转) 用箭头表示, 并注明转角度数。在平断面图的下方, 填写塔位标高、塔位里程、定位档距和耐张段长度及其代表档距等数据。图 12-1 是线路平断面图的典型例子。

一条输电线路很长, 常需绘制多张平断面图, 最好在转角处、固定桩处分幅。

## 3. 弧垂曲线模板及其选用

要保证导线对地和交叉跨越的电气距离, 为此需依据最大弧垂气象下导线的悬链线形状, 比量档内导线各点对地及跨越物的垂直距离, 来配置杆塔位或杆塔高度。为方便起见, 导线最大弧垂时的形状常制作成模板。

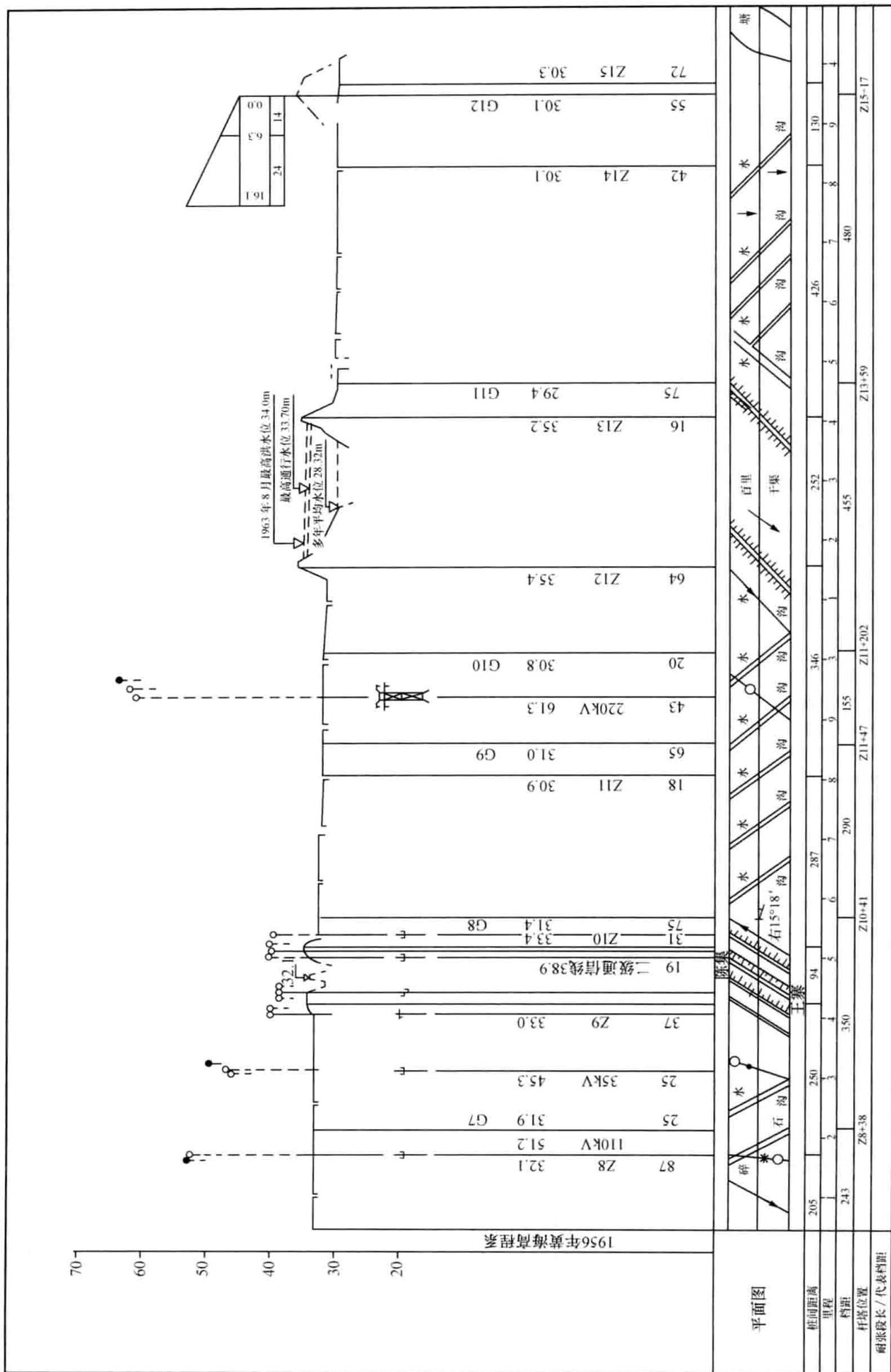


图 12-1 线路断面图示例

(1) 弧垂曲线模板。坐标原点选取在弧垂最低点时, 架空线的悬链线方程为

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{\gamma x}{\sigma_0} - 1 \right) \approx \frac{\gamma x^2}{2\sigma_0} + \frac{\gamma^3 x^4}{24\sigma_0^3}$$

上式中近似等号的右端是将双曲余弦按级数展开, 并取其前三项后化简得到的。若令

$$K = \frac{\gamma}{2\sigma_0} \quad (12-1)$$

则

$$y = \frac{1}{2K} [\operatorname{ch}(2Kx) - 1] \approx Kx^2 + \frac{1}{3}K^3x^4 \quad (12-2)$$

上二式中  $\gamma$ ——导线最大弧垂时的比载;

$\sigma_0$ ——导线最大弧垂时的应力;

$K$ ——弧垂模板  $K$  值。

从式中可以看出, 不论何种导线, 只要  $K$  值相同, 其悬链线 (弧垂) 形状完全相同。因此可按不同的  $K$  值, 以  $x$  为横坐标,  $y$  为纵坐标, 采用与纵断面图相同的纵横比例作出一组弧垂曲线, 并将其刻制在 1~2mm 厚的透明赛璐珞板上, 就形成通用弧垂曲线模板, 如图 12-2 所示。可每隔  $0.1 \times 10^{-4}/\text{m}$  的  $K$  值作一曲线, 每块模板上可作 2~4 条, 模板的刻制范围, 一般平地线路  $-400\text{m} < x < 400\text{m}$ , 山区线路  $-400\text{m} < x < 700\text{m}$ 。

(2) 弧垂曲线模板的选用。由于各耐张段的代表档距不同, 导线最大弧垂时的应力和控制气象条件不同, 对应的弧垂模板  $K$  值也不同。为方便定位时选择模板, 可事先根据不同的代表档距, 得到导线最大弧垂时的应力和比载, 算出相应的  $K$  值, 绘制成模板  $K$  值曲线, 如图 12-3 所示。

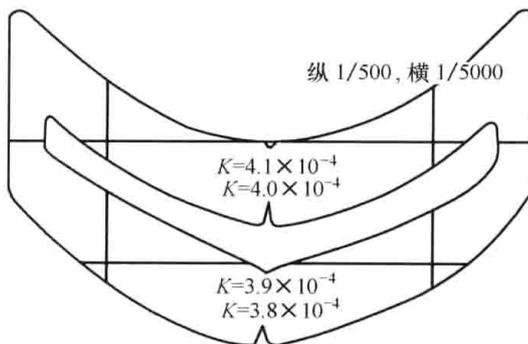


图 12-2 通用弧垂模板

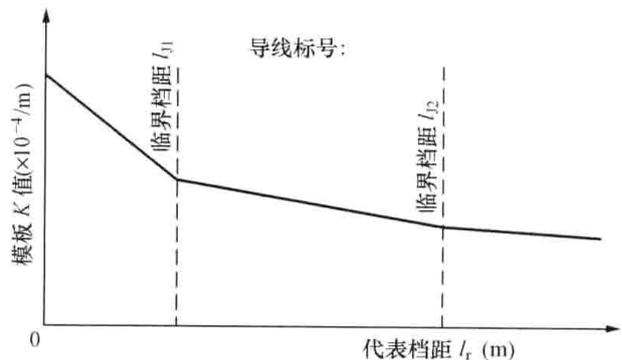


图 12-3 弧垂模板  $K$  值曲线

定位时, 根据待定耐张段的代表档距, 从图 12-3 曲线上查得相应的模板  $K$  值, 选出弧垂曲线模板。

## 二、杆塔定位原则

### 1. 塔位的选择原则

- (1) 尽量少占耕地和农田, 减少对林木的砍伐和房屋的拆迁, 减少土石方量。
- (2) 要充分注意杆 (塔) 位的地形地质条件, 应尽量避免洼地、泥塘、水库、陡坡、冲沟、熔岩、断层、矿脉、滑坡以及对杆塔具有威胁性的滚石、危石等地段。
- (3) 当在陡坡布置杆塔时, 应注意基础可能受到的冲刷, 要采取适当的防护措施, 如挖排水沟、砌护坡等。

(4) 非直线杆塔应立于地势较平坦的地方, 以便于施工紧线、机具运输和运行检修。

(5) 杆(塔)位处应具有较好的组杆、立塔条件。

(6) 在使用拉线杆塔时, 应特别注意拉线位置。在山区, 应避免因斜坡而使拉线过长, 拉线落地点之间高差不应超过 15m, 与主柱基础之间高差不超过 10m; 在平地及丘陵区, 应避免拉线打在公路、河流及泥塘洼地、稻场等地方。

## 2. 档距的配置原则

(1) 排杆(塔)位时应最大限度地利用杆塔的高度和强度。

(2) 避免出现特大和过小的档距。尽量不要使相邻杆塔之间的档距相差太悬殊, 以免在正常运行中杆塔承受过大的纵向不平衡张力。

(3) 应尽量避免出现孤立档, 尤其是档距较小的孤立档, 因其易使杆塔的受力情况变坏, 施工较困难, 检修不便。

(4) 轻、中、重冰区的耐张段长度分别不宜大于 10、5、3km, 且单导线线路不宜大于 5km。当耐张段长度较长时, 应采取防串倒措施。在高差或档距相差悬殊的山区等运行条件较差的地段, 耐张段长度应适当缩短。输电线路与主干铁路、高速公路交叉时, 应采取独立耐张段。

(5) 当不同杆型或不同导线排列方式的杆塔相邻时, 应注意档距中央导线的接近情况。

## 3. 杆塔的选用原则

(1) 尽可能使用经济的杆塔型式和杆塔高度, 充分发挥杆塔的使用条件, 注意尽可能避免使用特殊杆塔和特殊设计的杆塔。

(2) 大转角耐张杆塔应尽可能降低高度, 但在山区要特别注意跳线的对地距离。

(3) 导线布置方式不同的杆塔、不同结构的杆塔(有无拉线、铁塔和钢筋混凝土杆)应结合运输、塔位条件使用。在人口密集区和重要交叉跨越处不采用拉线塔。

## 三、常用定位方法

杆塔定位是一项实践性很强的技术工作, 与勘测工作密切相关。塔位、塔高和塔型需要依据现场的地形地物情况才能作出合理安排。常用的定位方法有院内定位法、现场定位法和现场室内定位法。

### 1. 院内定位法

勘测人员到现场进行勘测, 回设计院后提出勘测资料(包括测量、水文、地质资料), 供设计人员进行排位, 然后再到现场交桩修正部分塔位。

院内定位法的主要特点是测断面、定位、交桩三项工作串接进行, 因而工序流程时间较长, 近年来已很少采用。

### 2. 现场定位法

由测量、地质、水文、设计人员在现场边测断面边定塔位。定位后按塔位进行地质鉴定, 供设计基础及选配接地装置用。

现场定位法的主要特点是测断面、定位、交桩三项工作在一道工序内完成, 工序简单。同时具有“以位正线”的反馈作用, 即在定位过程中发现某些塔位非常不合理时, 可通过修改部分路径来解决。其缺点主要是不易对整个定位段进行方案比较, 经济合理性较差。现场定位法常用于 220kV 以下线路。

### 3. 现场室内定位法

测量人员先在现场测平断面, 完成两转角塔或两死塔位之间够一定位段(一般 3~

8km) 的平断面后, 即交给设计人员在现场住地进行室内定位, 然后共同到现场交桩, 同时由地质、水文人员按塔位进行地质、水文鉴定。

现场室内定位法的主要特点是测断面、定位、交桩三项工作可平行交叉进行, 因而工序流程时间接近于现场定位, 也具有“以位正线”的反馈作用。投资较高的 220kV 及以上线路多采用现场室内定位法。

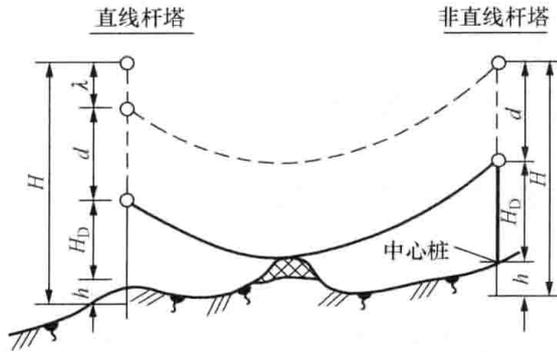


图 12-4 杆塔的定位高度

#### 四、杆塔的定位高度

为了便于检查导线各点对地的距离, 定位时在断面图上绘制的弧垂曲线并非导线的真实高度, 而是导线的对地安全线, 即将导线悬挂点向下移动一段对地距离后画出的悬挂曲线, 只要该线不与地面相交, 即满足对地距离的要求。此时的导线悬挂点对地高度, 称为杆塔定位高度, 如图 12-4 所示。

对直线型杆塔, 杆塔定位高度

$$H_D = H - d - \lambda - h - \delta \quad (12-3)$$

对耐张型杆塔, 杆塔定位高度

$$H_D = H - d - h - \delta \quad (12-4)$$

式中  $H$ ——杆塔的呼称高度, 即杆塔下横担的下弦边线到地面的垂直距离;

$d$ ——导线的对地安全距离;

$\lambda$ ——悬垂绝缘子串的长度;

$h$ ——杆塔的施工基面, 指有坡度的塔位计算基础埋深的起始基面, 也是计算杆塔定位高度的起始基面;

$\delta$ ——考虑勘测、设计和施工误差, 在定位时预留的限距裕度, 一般档距 700m 以下取 1.0m, 大于 700m 以及孤立档取 1.5m, 大跨越取 2~3m。

#### 五、杆塔定位的具体内容和步骤

##### 1. 确定转角杆塔和耐张杆塔位

线路转角处必须要安排一基转角杆塔, 可先行确定。再根据各类交叉跨越物的类别、耐张段长度的规定等, 确定出其他需要立耐张杆塔的地点。在丘陵、山区, 要注意充分利用有利地形, 并尽量使用减低型杆塔。

##### 2. 用弧垂曲线模板排定直线杆塔位

(1) 针对待定耐张段, 根据地形及常用杆塔的排位经验, 估计待定耐张段的代表档距, 计算或查得相应的模板  $K$  值, 初选最大弧垂曲线模板, 并确定杆塔定位高度  $H_D$ 。

(2) 对每一耐张段自耐张杆塔位  $A$  点起进行排位, 如图 12-5 所示。左右平移模板, 使所选的模板曲线经过  $B$  点 ( $AB$  为耐张杆塔的定位高度  $H_{D1}$ ), 并和地面相切, 然后在模板曲线的右侧找出  $C$  点, 使  $CD$  等于所用直线杆塔的定位高度  $H_{D2}$ , 则  $C$  点 (在地形适宜时) 即为所排的第一基直线杆塔的位置。再向右平移模板, 使模板曲线经过  $D$  点, 并和地面相切, 再在模板曲线上找出  $E$  点, 使  $EF$  等于  $E$  点所用杆塔的定位高度  $H_{D3}$ , 此时  $E$  点即为第二基直线杆塔的位置。用同样的方法, 依次排完整个耐张段。



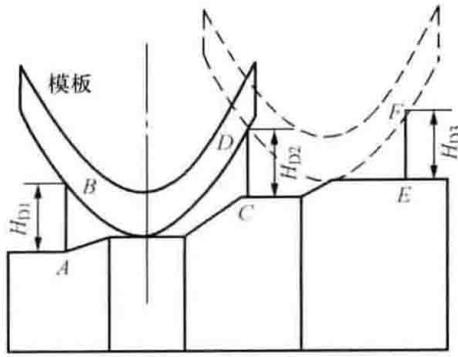


图 12-5 用最大弧垂模板  
排定直线杆塔位

若定位时不能充分利用标准杆塔的设计档距, 可考虑使用减低型杆塔。由于河流、洼地等控制点的限制, 虽采用了减低型杆塔, 但其高度仍不能充分利用时, 应考虑减少杆塔数量后, 重新排位; 或考虑重新布置杆塔位置, 将耐张段内的导线对地距离均匀提高, 避免在同一耐张段内某些档距的导线对地电气间距特别紧, 而另一些档距特别宽裕的不合理现象。

若塔位处地面起伏不平, 应确定一标高, 作为施工基面, 杆塔定位高度从该处算起。

(3) 根据所排的杆塔位置, 算得该耐张段的代表档距, 查取或计算出导线应力, 再求出模板  $K$  值, 检查该值是否与所选用模板  $K$  值相符 (误差应在  $0.05 \times 10^{-4}$  以内)。如果相符, 则表明模板选得恰当, 该段杆塔位置即初步排妥。否则, 应按计算出的  $K$  值再选模板, 重新排位, 直到前后两次的模板  $K$  值相符时为止。

排定杆塔工作应自左向右, 再自右向左在平断面图上反复进行, 通过各种塔位方案的比较和各项校验, 使耐张段内杆塔数量和杆塔型式布排得技术经济比较合理。

(4) 排完一个耐张段以后, 再排下一个耐张段, 直至排完全线路的杆塔。

### 3. 现场落实修正

上述定位工作在平断面图上完成后, 杆塔位和杆塔型式已经基本上确定。但现场的地质、地形是否完全和定位使用的勘测资料一致, 尤其是山地和丘陵地带地形起伏很大, 地质变化复杂, 而定位所掌握的地形情况, 仅为顺线路中心线的纵断面, 有时虽测有横断面可提供垂直线路方向的一些地形变化, 但其范围有限, 平面图的比例又很小, 很难完全掌握塔位现场的地形全貌, 此外塔位不可能完全是地质钻探时钻孔的地点, 所以有必要对定位方案进行现场落实修正。逐基查看塔位的施工、运行条件, 校测和补测危险点和控制点断面。根据实际情况调整定位方案, 埋设塔位标桩, 测量施工基面、高低腿等, 并填绘于断面图上。

### 4. 进行内业整理

在平断面图的下方标注出塔位标高、杆塔档距、耐张段长度、代表档距以及弧垂模板  $K$  值等, 在纵断面图上绘出杆塔位置、定位高度、弧垂安全地面线等, 并标注杆塔编号、型号、呼称高及施工基面等数据。填写杆塔明细表, 如表 12-13 所示。完成其他内业整理。

## 第四节 杆塔定位校验

在初步排定杆塔位置、型式和呼称高度后, 应对线路的使用条件进行全面检查和校验, 以保证各使用条件在规定的允许范围内。

### 一、杆塔使用条件校验

#### 1. 杆塔荷载校验

杆塔荷载校验是检查杆塔所受荷载是否在允许值范围内, 即要求水平档距、垂直档距、最大档距、转角角度等不应超过杆塔相应的设计允许值。

(1) 水平档距校验: 定位后, 杆塔的水平档距可直接从断面图上量得。大高差时, 应量取两档悬挂点连线的平均值。若实际水平档距超过杆塔设计允许值, 则应调整杆塔位置或换

用强度大的杆塔。

(2) 垂直档距校验：杆塔的垂直档距也可在定位图上直接量得，但需注意量得的是最大弧垂时的数值。此值接近或超过杆塔设计条件时，应换算成杆塔设计气象条件（如大风、覆冰或低温）下的数值，换算后的垂直档距值不应超过设计条件。

(3) 转角角度校验：转角杆塔的转角角度略超过设计值时，应校验杆塔的强度，必要时更换杆塔。

(4) 不平衡张力校验：直线型杆塔在两侧档距相差很大、高差亦较大时，风荷或覆冰不均会产生较大的不平衡张力，应予以校验。特别是线路通过覆冰季节的迎风面侧和背风面侧时，对山顶杆塔尤其应注意校验不平衡张力。

耐张型杆塔作为不同气象条件或不同安全系数的分界杆塔，或两侧代表档距相差悬殊时，也应验算不平衡张力。

## 2. 杆塔最大档距校验

在杆塔选定后，杆塔上的线间距离是一定的。为保证最大风速时档距中央导线的相间距离，不同型式的杆塔所能使用的最大档距为

$$l_{\max} = \sqrt{\frac{8\sigma_0 f_{\max}}{\gamma_1}} \quad (12-5)$$

式中  $\sigma_0$ ——最大风速时的导线应力；

$\gamma_1$ ——导线自重比载；

$f_{\max}$ ——杆塔线距所允许的最大弧垂。

对 1000m 以下的档距，导线水平排列时， $f_{\max}$  由下式决定

$$D = 0.4\lambda + \frac{U}{110} + 0.65\sqrt{f_{\max}} \quad (12-6)$$

式中  $D$ ——水平线距，m；

$\lambda$ ——悬垂绝缘子串长度，m；

$U$ ——线路标称电压，kV。

导线三角排列的等效水平线距，可按下式计算

$$D_x = \sqrt{D_h^2 + (4D_v/3)^2} \quad (12-7)$$

式中  $D_x$ ——导线三角排列的等效水平线距，m；

$D_h$ ——导线之间的水平投影距离，m；

$D_v$ ——导线之间的垂直投影距离，m。

若档距两端杆塔的水平线距不等时，可取其平均值计算。杆塔的定位档距应小于最大档距。常用直线杆塔的水平线距与最大档距的关系见表 12-14。

## 3. 悬垂绝缘子串摇摆角（风偏角）校验

在风荷载作用下，悬垂绝缘子串产生摇摆，使带电部分与杆塔构件（包括拉线、脚钉等）间的空气间隙减小，因此需限制其摇摆角在允许值范围内。

### (1) 最大允许摇摆角。

在雷电过电压、操作过电压、工频电压下以及带电上人检修时，输电线路的带电部分与杆塔构件之间应保证一定的电气间距，其最小间隙如表 12-15 所示。校验带电作业空气间隙时，对操作人员需要停留工作的部位，还应考虑人体活动范围 0.5m。

表 12-14 使用悬垂绝缘子串的杆塔的水平线距与档距的关系 (m)

水平线间距离 (m)	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	10	11	13.5	14.0	14.5	15.0
110	300	375	450	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
220	—	—	—	—	440	525	615	700	—	—	—	—	—	—	—	—	—
330	—	—	—	—	—	—	—	—	525	600	700	—	—	—	—	—	—
500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	525	650	—	—	—	—
750	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	600	700	800

注 表中数据不适用于覆冰厚度 15mm 及以上的地区。

表 12-15 带电部分与杆塔构件间的最小间隙

线路标称电压 (kV)	35	110	220	330	500		750		1000					
					海拔高度 $H \leq 500\text{m}$	海拔高度 $500\text{m} < H \leq 1000\text{m}$	海拔高度 $500\text{m}$	海拔高度 $1000\text{m}$	海拔高度 500m		海拔高度 1000m		海拔高度 1500m	
									单回	双回	单回	双回	单回	双回
雷电过电压 $R_1$ (m)	0.45	1.00	1.90	2.30	3.30		4.2 (或按绝缘子串放电电压的 0.8 配合)		—	6.7	—	7.1	—	7.6
操作过电压 $R_2$ (m)	0.25	0.70	1.45	1.95	2.50	2.70	3.8 (4.6)	4.0 (4.8)	5.6 (6.7) (7.9*)	6.0	6.0 (7.2) (8.0*)	6.2	6.4 (7.7) (8.1*)	6.4
工频电压 $R_3$ (m)	0.10	0.25	0.55	0.90	1.25	1.30	1.8	1.9	2.7		2.9		3.1	
带电作业 $R_4$ (m)	0.60	1.00	1.80	2.20	3.20		4.0 (4.3)		5.6 (6.2)	5.5 (塔身) 5.4 (下横担) 6.5 (顶部)	6.0 (6.7)	—	6.4 (7.2)	—

- 注
- 按工频电压校验间隙采用最大风速及相应气温；按操作过电压和雷电过电压校验间隙采用其相应风速和气温；
  - 表中 330kV 及以下电压的数据以及带电作业的数据为海拔高度  $H \leq 1000\text{m}$  时的间隙值，当  $H > 1000\text{m}$  时，每增高 100m，操作过电压和运行工频电压的间隙值应增大 1%。当因高海拔需增加绝缘子数量时，雷电过电压最小间隙也应相应增大；
  - 括号中的数据用于中相 V 串，\* 号标注的数据用于中相 V 串对上横担的最小间隙；
  - 校验带电作业间隙的气象条件是：气温  $+15^\circ\text{C}$ 、风速  $10\text{m/s}$ ；
  - 1000kV 线路为避免塔头尺寸过大，带电作业安全距离加上人体活动范围后不宜大于操作过电压要求的最小间隙。

根据杆塔头部的结构尺寸和允许的最小间隙  $R_1 \sim R_4$ ，作出电气间隙圆，得到相应运行情况下的最大允许摇摆角  $\varphi_1 \sim \varphi_4$ ，如图 12-6 所示。

在求取最大允许摇摆角时，对宽身及拉线杆塔应考虑导线在塔身边缘（如瓶口、横担、

拉线)附近由于上扬和下垂在风偏时对构件接近的影响,预留一定的裕度 $\delta$ (见图12-6、图12-7),一般可取 $\delta=100\sim 300\text{mm}$ 。对拉线杆塔,应根据拉线与导线之间的空间关系确定裕度 $\delta$ 。宽身塔也可按下式计算

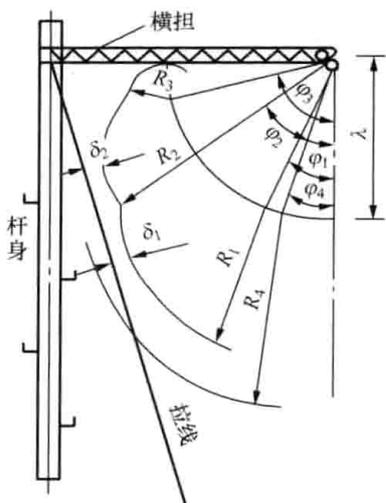


图 12-6 拉线塔的最大允许摇摆角

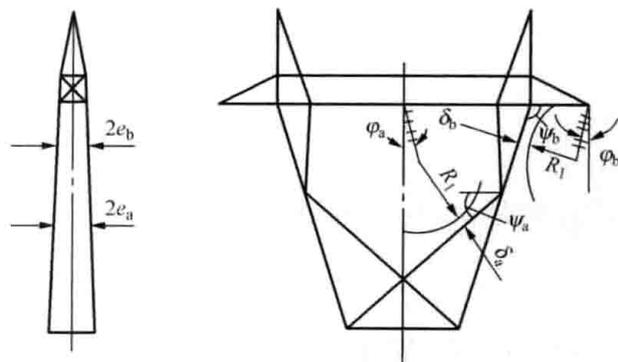


图 12-7 宽身塔的最大允许摇摆角

$$\delta = \alpha_r e \cos \psi + e \frac{\gamma_6 l}{2 \sigma_0} \cos(\psi - \eta) + R \sqrt{1 + \left[ \alpha_r \cos \psi + \frac{\gamma_6 l}{2 \sigma_0} \cos(\psi - \eta) \right]^2} - 1 \quad (12-8)$$

式中  $\alpha_r$ ——杆塔某一侧可能出现较大的高差系数 ( $h/l$ ), 一般山地取  $\alpha_r = \pm 0.1 \sim 0.2$ , 如酒杯型塔对瓶口取正值, 对边线斜材或横担则取负值;

$\psi$ ——塔头外廓构件与水平面的夹角, 当  $\alpha_r$  取正值时  $\psi$  为  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间的锐角,  $\alpha_r$  取负值时  $\psi$  取  $90^\circ \sim 180^\circ$  间的钝角;

$\sigma_0$ 、 $\gamma_6$ 、 $\eta$ ——分别为各种运行条件下的导线应力、比载及风偏角;

$l$ ——与  $\alpha_r$  相应侧的档距,  $\alpha_r$  为正值时取较大的值, 反之取较小值;

$e$ ——与导线接近处的塔身构件侧面宽度之半;

$R$ ——各种运行条件下的允许空气间隙。

(2) 实际摇摆角的计算。

视悬垂绝缘子串为均布荷载的刚性直棒, 设校验气象条件下悬垂绝缘子串的垂向荷载为  $G_J$ , 横向水平风荷载为  $P_J$ , 末端作用的导线荷载为  $G_d$ 、 $P_d$ , 如图 12-8 所示。对 A 点列力矩平衡方程式, 有

$$\left( P_d \lambda + \frac{P_J \lambda}{2} \right) \cos \varphi = \left( G_d \lambda + \frac{G_J \lambda}{2} \right) \sin \varphi$$

所以

$$\varphi = \arctan \frac{P_d + P_J/2}{G_d + G_J/2} = \arctan \frac{\gamma_4 A l_h + P_J/2}{\gamma_1 A l_v + G_J/2}$$

(12-9)

式中  $\gamma_1$ 、 $\gamma_4$ ——分别为导线的自重比载和风压比载;

$l_h$ 、 $l_v$ ——分别为该基杆塔的水平档距和垂直档距;

A——导线的截面积。

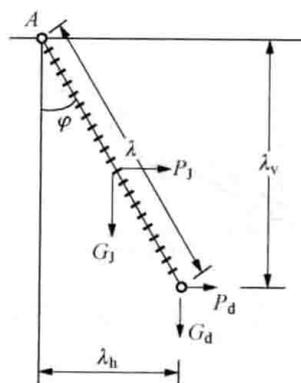


图 12-8 悬垂串风偏受力图

## (3) 摇摆角临界曲线。

显然,在校验气象条件下,悬垂绝缘子串的实际摇摆角应不大于相应的最大允许摇摆角,即  $\varphi_i \leq [\varphi]_i$ 。但采用式(12-9)计算工作量大,工程上为方便起见,常利用杆塔定位图上可以直接得到的垂直档距和水平档距进行校验。为此,需要将校验气象下的垂直档距转换为最大弧垂气象下的数据。若杆塔的水平档距为  $l_h$ ,最大弧垂时的垂直档距为  $l_{vm}$ ,校验气象条件下的垂直档距为  $l_v$ ,由于

$$l_{vm} = l_h + \left( \frac{h_1}{l_1} - \frac{h_2}{l_2} \right) \frac{\sigma_{0m}}{\gamma_m}$$

$$l_v = l_h + \left( \frac{h_1}{l_1} - \frac{h_2}{l_2} \right) \frac{\sigma_0}{\gamma_1}$$

所以垂直档距  $l_{vm}$  与  $l_v$  的关系为

$$l_v = l_h + (l_{vm} - l_h) \frac{\sigma_0 \gamma_m}{\sigma_{0m} \gamma_1} \quad (12-10)$$

令式(12-9)表示的摇摆角达到临界值最大允许摇摆角  $[\varphi]$ ,有

$$l_v = \frac{\gamma_4 A l_h + (P_J - G_J \tan[\varphi])/2}{\gamma_1 A \tan[\varphi]}$$

与式(12-10)联立,求得  $l_{vm}$  的表达式为

$$l_{vm} = \frac{\sigma_{0m}}{\sigma_0 \gamma_m A} \left[ \frac{P_J - G_J \tan[\varphi]}{2 \tan[\varphi]} + l_h A \left( \frac{\gamma_4}{\tan[\varphi]} + \frac{\sigma_0 \gamma_m}{\sigma_{0m}} - \gamma_1 \right) \right] \quad (12-11)$$

若最大弧垂发生在最高气温,  $\gamma_m = \gamma_1$ ,则上式简化为

$$l_{vm} = \frac{\sigma_{0m}}{\sigma_0 \gamma_1 A} \left[ \frac{P_J - G_J \tan[\varphi]}{2 \tan[\varphi]} + \gamma_1 A l_h \left( \frac{\gamma_4}{\gamma_1 \tan[\varphi]} + \frac{\sigma_0}{\sigma_{0m}} - 1 \right) \right] \quad (12-12)$$

式中  $l_{vm}$ ——验算条件要求的最大弧垂气象下的垂直档距;

$\sigma_{0m}$ 、 $\sigma_0$ ——分别为最大弧垂气象下的导线应力和验算条件下的导线应力。

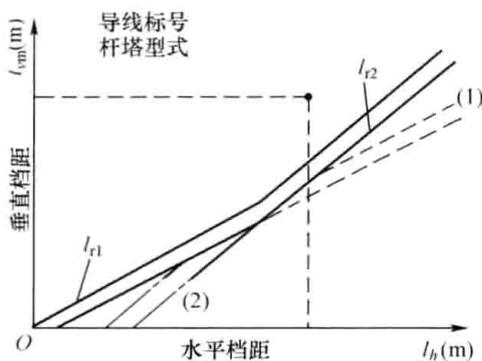


图 12-9 摇摆角临界曲线

- (1) — 第一种运行情况;  
(2) — 第二种运行情况

以  $l_h$  为横坐标,  $l_{vm}$  为纵坐标,在某一代表档距下,利用式(12-11)或式(12-12),四种运行情况可以作出四条曲线,其包络线即为该代表档距下的摇摆角临界曲线。给出一系列代表档距,可得到一簇临界曲线,图12-9所示为两种校验情况下的摇摆角临界曲线。若定位图上某基杆塔的垂直档距和水平档距的交点落在临界曲线以上,说明摇摆角在允许值范围内,否则说明该基杆塔的摇摆角太大,电气间距不足。

## (4) 摇摆角太大时的解决方法。

在山区及丘陵地带,由于地势起伏高差太大,应注意对摇摆角的校验。当摇摆角超过允许值时,可采取以下措施解决:

1) 调整杆塔位置。此方法不增加线路原材料,一般应优先采用。

2) 加挂重锤。悬垂绝缘子串加挂重锤后的情形如图12-10所示,这相当于增大了式(12-9)中的  $G_d$ ,因此可使实际摇摆角减小。加挂不同锤重后,同样可以作出相应的摇摆角临界曲线,如图12-11所示,图中仅绘出了一种运行情况。使用重锤时,应注意重锤的

长度对杆塔电气间隙的影响，必要时应计算使用重锤后的允许摇摆角。加挂重锤是减小摇摆角的常用方法之一。

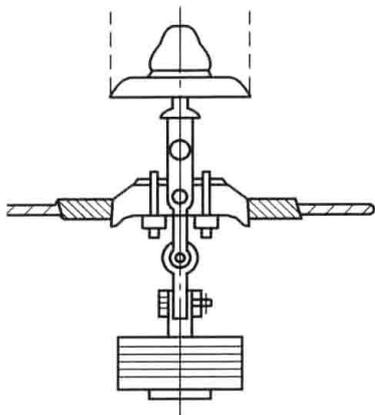


图 12-10 悬垂绝缘子串加挂的重锤

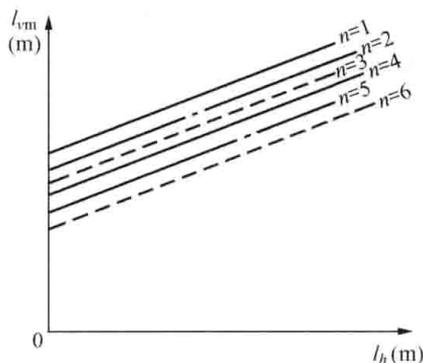


图 12-11 加挂重锤后的临界曲线  
 $n$ —重锤片数

3) 采用其他绝缘子串固定方式。如采用“V”形绝缘子串，缩短其摆动长度或限制其摇摆角。

4) 换用较高杆塔或允许摇摆角较大的杆塔。此方法因增大线路投资，仅在极个别情况下使用。换用的杆塔应是设计中已有的，并非特殊设计的。

5) 降低导线使用应力。这种方法可使档内线长增加，导线对悬垂绝缘子串的垂直荷载增大，从而实际摇摆角减小。由于会影响该耐张段内其他各档的对地安全距离，该方法一般在其他方法不便采用时才考虑。

#### 4. 直线杆塔的上拔校验

杆塔产生上拔的临界条件是其垂直档距等于零。上拔力使悬垂绝缘子串上扬，导线与横担电气距离减小，严重时横担受较大上拔力，甚至电杆受破坏，因此应对上拔进行校验。

在最低气温气象条件下，架空线收缩使应力增大、弧垂减小，弧垂最低点有可能位于低悬挂点之外的延长线上，低悬挂点处的直线杆塔的垂直档距出现负值而产生上拔。所以通常将最低气温作为校验直线杆塔上拔的气象条件。

若定位时发现位于低处的直线杆塔（如图 12-12 中的 3 号杆）在最大弧垂时的垂直档距较小，则在最低气温时其垂直档距可能变为负值，对此应予以校验。校验上拔的常用方法有最小弧垂模板（冷线模板）和上拔临界直线两种。

##### (1) 最小弧垂模板校验。

利用定位时最大弧垂模板采用的代表档距，在应力弧垂曲线上查得最低气温时的架空线应力，计算出模板  $K$  值，选出相应的模板。因该模板是根据最低气温时的架空线应力选出的，即称之为冷线模板或最小弧垂模板。用最小弧垂模板在定位图上进行杆塔上拔校验时，平移该模板，使其曲线通过被校验杆塔的两基相邻杆塔的架空线悬挂点，如图 12-12 中虚线

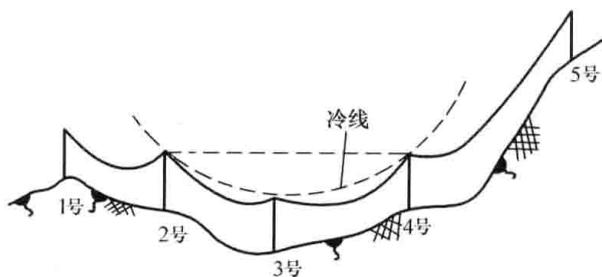


图 12-12 用冷线模板检查上拔

所示, 如被校验杆塔的悬挂点在最小弧垂模板曲线以下, 即表示有上拔力存在, 否则不会产生上拔。

由于导线和地线在最低气温时的应力和比载不同, 所用最小弧垂模板的  $K$  值也就不同, 因此应该采用不同的模板进行校验。

(2) 上拔临界直线校验。同摇摆角临界曲线的制作类似, 需将验算条件下的垂直档距  $l_v$ , 折算为最大弧垂气象下的垂直档距  $l_{vm}$ 。根据式 (12-10), 得

$$l_{vm} = l_h + (l_v - l_h) \frac{\sigma_{0m} \gamma_1}{\sigma_0 \gamma_m}$$

考虑到上拔的临界条件  $l_v = 0$ , 则有

$$l_{vm} = l_h \left( 1 - \frac{\sigma_{0m} \gamma_1}{\sigma_0 \gamma_m} \right) \quad (12-13)$$

式中  $l_h$  —— 水平档距;

$\sigma_{0m}$ 、 $\sigma_0$  —— 分别为最大弧垂时和最低气温时的架空线应力;

$\gamma_m$ 、 $\gamma_1$  —— 分别为最大弧垂时和最低气温时的架空线比载。

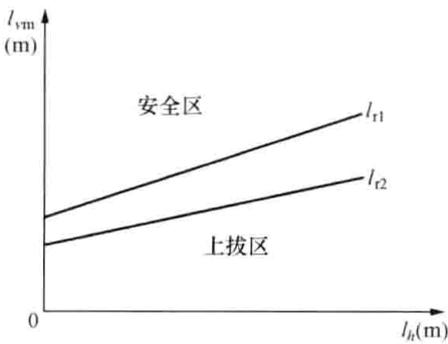


图 12-13 上拔临界直线

以  $l_h$  为横坐标,  $l_{vm}$  为纵坐标, 利用式 (12-13) 即可作出上拔临界直线, 如图 12-13 所示。一种代表档距对应一条临界直线。临界直线的上方为不上拔区, 下方为上拔区。若最大弧垂时杆塔的实际垂直与水平档距的坐标交点落在临界直线下方, 则表示该杆塔在最低气温时产生上拔。

产生上拔时的解决方法和摇摆角的基本相同。若仅地线上拔, 扬起无碍时可不采取措施, 否则可将地线在杆塔处断开, 改为耐张连接。

## 二、架空线运行条件检验

### 1. 架空线悬挂点应力检验

高悬点处的架空线应力最大, 其值不能超过许用值。由高悬点应力决定的容许高差  $h$  可按下式计算

$$h = \frac{2[\sigma_0]}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2[\sigma_0]} \operatorname{sh} \left( \operatorname{arcch} \epsilon - \frac{\gamma l}{2[\sigma_0]} \right) \quad (12-14)$$

式中  $[\sigma_0]$  —— 控制条件下架空线最低点的许用应力;

$\gamma$  —— 与  $[\sigma_0]$  对应气象条件下的架空线比载;

$\epsilon$  —— 架空线的悬挂点许用应力  $[\sigma_B]$  与  $[\sigma_0]$  之比值。

工程上常利用上式作出悬挂点应力临界曲线, 供校验悬挂点应力时使用, 如图 12-14 所示。控制条件不同, 可有多条临界曲线。若被检查档的实际档距和悬挂点高差的交点落在所用曲线的下方, 则表明悬挂点应力未超过许用值; 否则表明超过许用值, 需采取相应措施:

(1) 调整杆塔位置或高度, 以降低悬挂点间高差。

(2) 降低该耐张段架空线的使用应力, 即按照放松系数放松架空线。架空线放松后, 应根据此时的水平应力求出最大弧垂时的应力, 再选弧垂模板重新对该耐张段定位。

### 2. 架空线悬垂角校验

在垂直档距较大的地方，架空线在悬垂线夹出口处的悬垂角（倾斜角）可能会超过线夹的许用值，致使附加弯曲应力增大，架空线在线夹出口处受到损坏，因而需要对架空线的悬垂角进行校验。校验架空线悬垂角的气象条件是最大弧垂气象，相应悬垂角可由下式计算

$$\theta_1 = \arctan\left(\text{sh} \frac{\gamma l_{1v}}{\sigma_0}\right) \approx \arctan \frac{\gamma l_{1v}}{\sigma_0}$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\text{sh} \frac{\gamma l_{2v}}{\sigma_0}\right) \approx \arctan \frac{\gamma l_{2v}}{\sigma_0}$$

对于一般船体能自由转动的悬垂线夹，其临界条件为

$$\theta_1 + \theta_2 = 2[\theta]$$

由以上三式略加整理得

$$l_{1v} = \frac{\sigma_0}{\gamma} \tan \left[ 2[\theta] - \arctan \frac{l_{2v}\gamma}{\sigma_0} \right]$$

利用三角恒等式可进一步简化为

$$l_{1v} = \frac{\frac{\sigma_0}{\gamma} \tan 2[\theta] - l_{2v}}{1 + \frac{\gamma l_{2v}}{\sigma_0} \tan 2[\theta]} \tag{12-15}$$

式中  $[\theta]$  ——悬垂线夹的允许悬垂角，可取  $25^\circ$ ；

$\sigma_0$ 、 $\gamma$  ——分别为架空线最大弧垂时的应力和比载；

$l_{1v}$ 、 $l_{2v}$  ——分别为被验杆塔两侧的垂直档距，即悬挂点距两侧弧垂最低点间的水平距离。

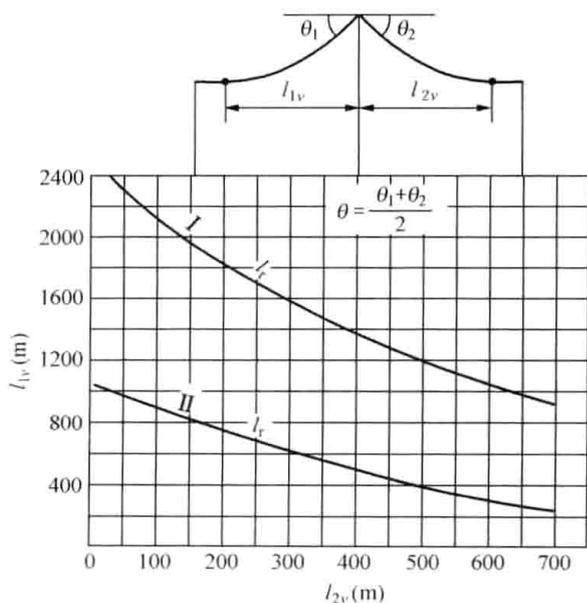


图 12-15 悬垂角临界曲线

$l_r$ —代表档距 (m)；I—导线；II—地线

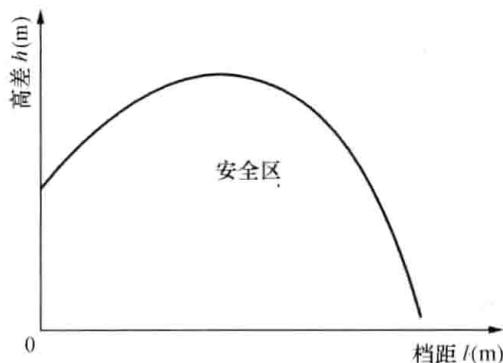


图 12-14 悬挂点应力临界曲线

根据式 (12-15) 作出的悬垂角临界曲线如图 12-15 所示，一种代表档距，对应一条临界曲线。定位时，要注意校验悬挂点最高杆塔的悬垂角。从图上量得被验杆塔两侧的垂直档距  $l_{1v}$  和  $l_{2v}$ ，如交点位于悬垂角临界曲线的下方为安全，否则为不安全。

当悬垂角超过线夹的允许值时，可以通过调整杆塔位置或杆塔高度，以减少一侧或两侧的悬垂角；或改用悬垂角较大的线夹；或用两个悬垂线夹组合在一起悬挂。

### 三、绝缘子串强度和倒挂检查

#### 1. 绝缘子串强度检查

##### (1) 悬垂绝缘子串的强度检查。

在平地线路中，垂直档距与水平档距相差较小，由于设计杆塔时已考虑到绝缘子串的机

械强度, 因此杆塔定位不会发生因垂直荷载过大造成绝缘子串强度不足的问题。但在山区线路中, 由于地势起伏高差大, 垂直档距往往大于水平档距较多, 甚至达 2 倍以上, 这时就会出现垂直荷载超过绝缘子串允许荷载的情况。因此, 定位时必须对绝缘子串所受荷载进行验算。该验算仍可采用制作临界曲线的方法进行。

正常运行情况下, 检查悬垂绝缘子串强度的气象条件是最大比载和年均气温。由于靠近杆塔横担的第一片绝缘子所受荷载最大, 悬垂绝缘子串强度检查的临界状态是其所受综合荷载等于允许机电荷载, 即  $T_J = [T_J]$ , 也就是

$$\sqrt{(G_d + G_J)^2 + (P_d + P_J)^2} - g_1 = [T_J]$$

以水平档距和垂直档距表示为

$$\sqrt{(\gamma_v A l_v + G_J)^2 + (\gamma_h A l_h + P_J)^2} - g_1 = [T_J]$$

所以校验气象下的垂直档距与悬垂绝缘子串允许机电荷载的关系为

$$l_v = \frac{1}{\gamma_v A} \left[ \sqrt{([T_J] + g_1)^2 - (\gamma_h A l_h + P_J)^2} - G_J \right] \quad (12-16)$$

式中  $[T_J]$  ——绝缘子的允许机电荷载;

$G_J$ 、 $P_J$  ——分别为绝缘子串的重量和水平风荷载;

$\gamma_v$ 、 $\gamma_h$  ——分别为校验气象下架空线的垂直比载和水平比载;

$g_1$  ——悬垂串近杆塔横担第 1 片绝缘子及其上部金具的综合荷载;

$A$  ——架空线的截面积。

将式 (12-16) 的垂直档距  $l_v$  转换为定位气象下的垂直档距  $l_{vm}$  表示时, 有

$$\begin{aligned} l_{vm} &= l_h + (l_v - l_h) \frac{\sigma_{0m} \gamma_v}{\sigma_0 \gamma_m} \\ &= l_h + \frac{\sigma_{0m} \gamma_v}{\sigma_0 \gamma_m} \left\{ \frac{1}{\gamma_v A} \left[ \sqrt{([T_J] + g_1)^2 - (\gamma_h A l_h + P_J)^2} - G_J \right] - l_h \right\} \end{aligned} \quad (12-17)$$

式中  $l_h$  ——水平档距;

$\sigma_{0m}$ 、 $\sigma_0$  ——分别为定位气象和校验气象下架空线的应力;

$\gamma_m$ 、 $\gamma_v$  ——分别为定位气象和校验气象下架空线的垂直总比载;

其他符号的意义同前。

根据式 (12-17) 作出悬垂绝缘子串强度临界曲线, 如图 12-16 所示。若  $l_{vm}$  与  $l_h$  交于临界曲线的下方, 表示满足单联绝缘子串机电强度的要求, 否则需采取措施, 如调整杆塔位置、改用双联或多联绝缘子串、换大吨位绝缘子等。

(2) 耐张绝缘子串强度检查。

架空线悬挂点的最大张力不应大于耐张绝缘子串的允许荷载, 否则需要增加耐张绝缘子串联数或改用

较大吨位的绝缘子, 或者放松该耐张段的架空线以降低张力。

## 2. 耐张绝缘子串倒挂检查

山区线路因地形起伏较大, 某些杆塔的耐张绝缘子串可能经常上仰, 如此时仍按正常方式悬挂, 则其裙槽向上, 容易积存雨、污垢, 致使绝缘强度降低, 如图 12-17 所示。因此

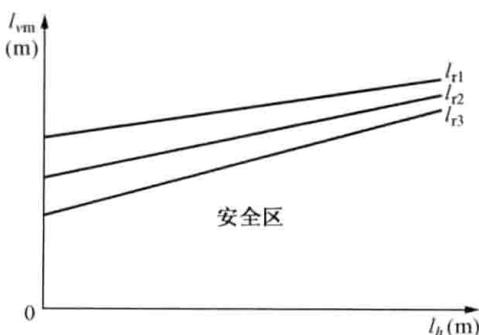


图 12-16 悬垂绝缘子串强度临界曲线

宜将上仰耐张绝缘子串倒挂。

检查耐张绝缘子串是否需要倒挂的气象条件是年平均气温、无风无冰。倒挂的临界条件是架空线产生的上拔力等于耐张绝缘子串重量的一半。根据倒挂的临界条件，有

$$\gamma_1 A l_v = \frac{1}{2} G_J$$

$$l_v = - \left( \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0 h}{\gamma_1 l} \right) = \frac{\sigma_0 h}{\gamma_1 l} - \frac{l}{2}$$

根据上二式得

$$h = \frac{l}{2\sigma_0 A} (G_J + \gamma_1 A l) \tag{12-18}$$

式中  $h$ ——需要倒挂时的临界高差；

$\sigma_0$ ——年均气温、无风无冰时的架空线应力；

$A$ 、 $\gamma_1$ ——分别为架空线的截面积和自重比载；

$G_J$ ——耐张串的重量；

$l$ ——档距。

当定位高差小于式(12-18)的计算值时，耐张串不倒挂，否则需倒挂。若以定位气象条件下的有关参数表示，则由于

$$l_{vm} = \frac{\sigma_{0m} h}{\gamma_m l} - \frac{l}{2}$$

将式(12-18)代入，解得

$$l_{vm} = \frac{\sigma_{0m} \gamma_1}{\sigma_0 \gamma_m} \left( \frac{G_J}{2A\gamma_1} + \frac{l}{2} \right) - \frac{l}{2} \tag{12-19}$$

式中  $l_{vm}$ ——折算到定位气象下的倒挂临界垂直档距；

$\sigma_{0m}$ 、 $\gamma_m$ ——分别为定位气象下(最大弧垂时)架空线的应力和比载；

$l$ 、 $h$ ——档距和高差；

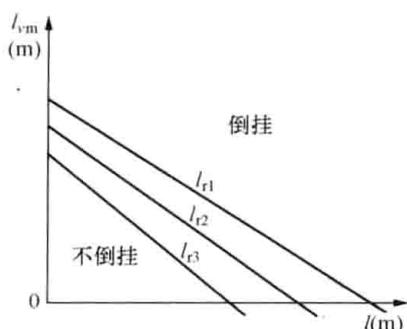


图 12-18 耐张绝缘子串倒挂临界曲线

其他符号意义同式(12-18)的说明。

利用式(12-19)检查耐张绝缘子串是否倒挂时，常事先制成耐张绝缘子串倒挂临界曲线，如图12-18所示。在耐张绝缘子串所在某档距下，若耐张杆塔的负垂直档距大于临界曲线的相应数值，则该耐张绝缘子串需倒挂。

#### 四、对跨越物及对地限距的校验

##### 1. 交叉跨越限距的校验

当线路跨越铁路、公路、通航河流、通信线以及电力线路等时，按照规范规定及有关协议，要保证导线在最大弧垂时对其有足够的电气安全距离  $D$ ，如图12-19所示。

##### (1) 正常情况下的跨越距离校验。

正常运行情况下，跨越间距的最小值发生在最大弧垂气象，其大小一般可由杆塔定位图直接量得。当量得值与规范规定值接近时，为避免因误差造成间距不足，需用公式进行计

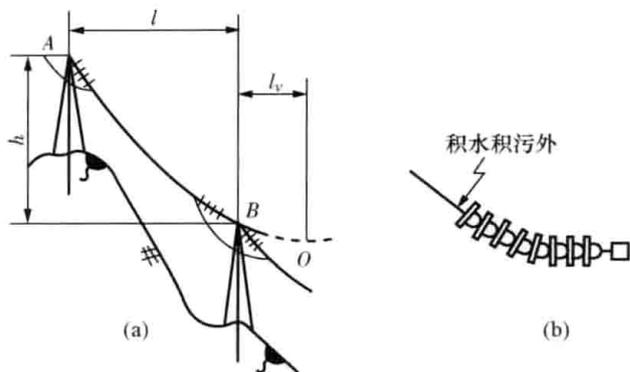


图 12-17 耐张绝缘子串上扬情况

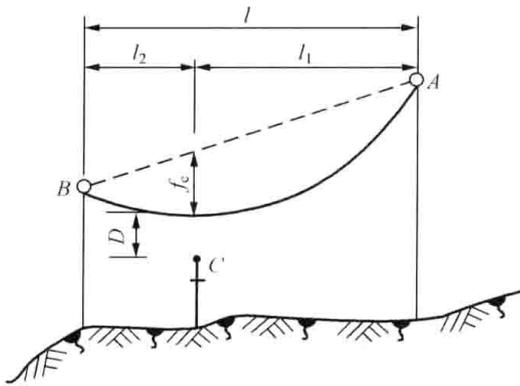


图 12-19 交叉跨越距离示意图

算, 计算式为

$$D = (A - C) - f_c - (A - B) \frac{l_1}{l} \quad (12-20)$$

式中  $f_c$ ——交叉跨越点导线弧垂;

$A$ 、 $B$ ——导线悬挂点标高;

$C$ ——被跨越设施标高;

$l_1$ ——交叉超越点距杆塔  $A$  的水平距离。

(2) 断线情况下跨越距离的校验。

当采用直线杆塔跨越各种设施时, 如需验算邻档断线后导线与被跨越物间的垂直距离, 仍可利用式 (12-20)。但应注意此时的  $f_c$  须使用导线断线后的残余应力和断线时的比载计算, 并按断线后导线与被跨越设施的间距最小为原则选定断线档。

## 2. 边线风偏后对地距离的校验

定位时, 若发生导线对地距离裕度不大, 而且边线断面比线路中心线断面高出许多时, 应验算边线风偏, 尤其应注意山区边线对地或对树的净空距离。这种危险点在线路勘测时不难发现, 应测好横断面备用。校验边线风偏用到的各参数如图 12-20 所示。

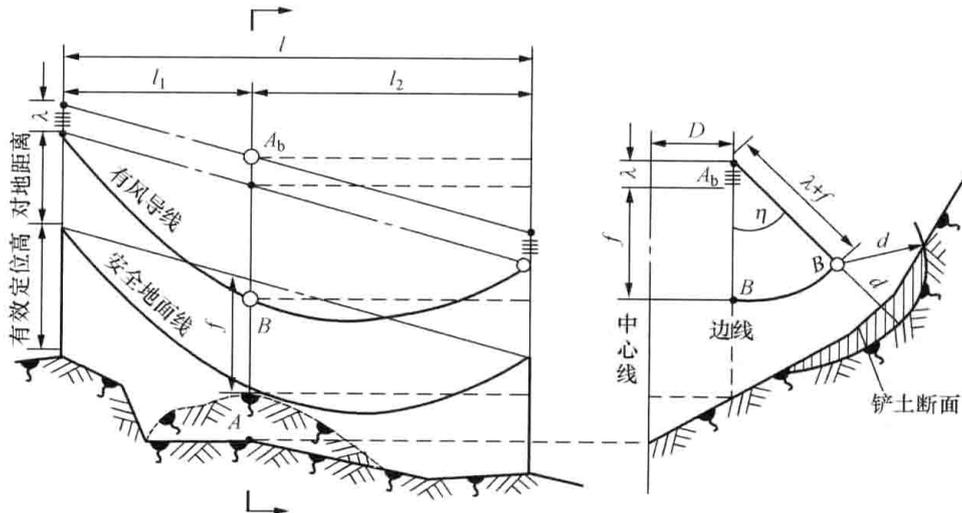


图 12-20 边线风偏后的对地距离

$A$ —被检查横断面处线路中心线地面标高,  $m$ ;  $A_b$ —边导线悬垂绝缘子串悬挂点连线在

被检查横断面处的高度,  $m$ ;  $B$ —被检查横断面处边导线的高度,  $m$ ;

$f$ —导线在最大风偏时的弧垂,  $m$ ;  $\eta$ —导线风偏角, ( $^\circ$ );

$\lambda$ —悬垂绝缘子串长度,  $m$ ;  $d$ —导线风偏后要求的净空距离,  $m$

校验风偏的气象条件, 由覆冰有风和最大风速两种气象条件较严重的一种决定。被检查处的导线弧垂, 可由定位图量得, 然后转换为检查气象条件下的弧垂。转换式为

$$f = \frac{\gamma \sigma_0 m f_m}{\gamma_m \sigma_0} \quad (12-21)$$

式中  $f$ ——校验气象下危险点处的导线弧垂;

$f_m$ ——定位气象下被检查处的导线弧垂;

$\sigma_0$ 、 $\gamma$ ——分别为校验气象下导线的应力和比载；

$\sigma_{0m}$ 、 $\gamma_m$ ——分别为定位气象下导线的应力和比载。

风偏后对地间距不足时，可采取下述措施：

- (1) 土方量较少时，可铲土解决；
- (2) 采用较高杆塔；
- (3) 调整杆位；
- (4) 改变路径。

### 第五节 杆塔中心位移及施工基面

当线路转角时，转角杆塔中心的位置应保证其中相导线在线路的中心线上，以避免与之相邻的直线杆塔受到角度荷载的作用。当利用直线杆塔换位时，应使换位杆塔所受的横向荷载最小。因此，杆塔的结构中心和线路中心不再重合，应考虑转角杆塔和换位杆塔的中心相对线路中心的位移问题。

#### 一、耐张转角杆塔的中心位移

耐张转角杆塔因承受荷载较大，横担往往较宽；大转角时，为解决跳线的电气间隙问题，横担通常采取不对称布置，如图 12-21 所示。为尽量减少转角杆塔两侧相邻直线杆塔受到的角度力，转角杆塔中心  $O$  必须相对线路转角中心桩  $B$  位移一段距离  $S$ 。由图 12-21 可得

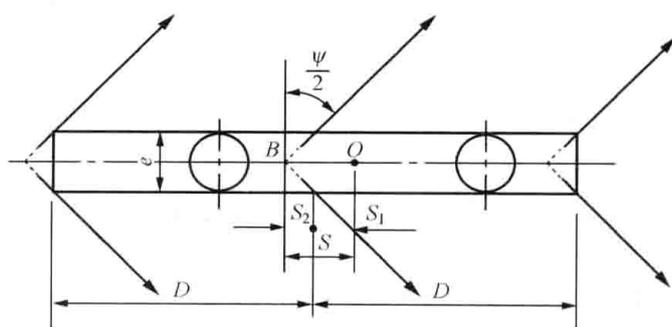


图 12-21 耐张转角杆塔的中心位移

$$S = S_1 + S_2 = S_1 + \frac{e}{2} \tan \frac{\psi}{2} \tag{12-22}$$

式中  $e$ ——横担两侧悬挂点的间距（横担宽度）；

$\psi$ ——线路的转角角度；

$S_1$ ——导线悬挂点预偏距离；

$S_2$ ——横担宽度引起的位移量。

#### 二、直线转角杆塔的中心位移

直线杆塔带小转角时，由于角度力的作用其悬垂绝缘子串产生一定的偏斜。确定具体塔位时应考虑此偏移量，使该转角杆塔两侧相邻直线杆塔上的悬垂绝缘子串不致偏斜。此时的杆塔中心位移大小  $S$  可据图 12-22 得到

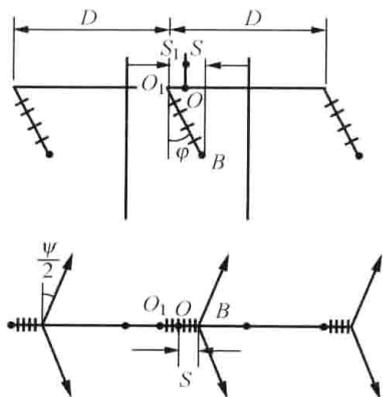


图 12-22 直线转角杆塔的中心位移

$$S = \lambda \sin \varphi - S_1$$

$$\tan \varphi = \frac{2\sigma_{cp} A \sin \frac{\psi}{2}}{\frac{G_J}{2} + \gamma_1 A l_v} \tag{12-23}$$

式中  $\lambda$ ——绝缘子串长度；

$S_1$ ——悬挂点向转角外侧预留距离；

- $\varphi$ ——年平均气温、无风无冰时的悬垂绝缘子串偏斜角;
- $\sigma_{\varphi}$ ——年均气温时的导线应力;
- $\gamma_1$ ——导线的自重比载;
- $A$ ——导线截面积;
- $\psi$ ——线路转角;
- $l_v$ ——年均气温时的垂直档距。

当计算值  $S$  为正时, 杆塔位应向转角外侧位移;  $S$  为负值时, 则应向转角内侧位移。位移量不超过 0.5m 时, 可不位移。

### 三、直线换位杆塔的中心位移

当采用直线杆塔换位时, 为了尽量减少由于导线换位引起的直线杆塔及其绝缘子串上的附加横向分力, 可将换位杆塔中心桩侧向位移一段距离。

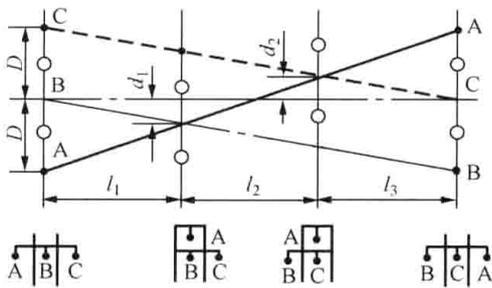


图 12-23 直线换位杆塔的中心位移

直线换位杆塔的中心位移方向和大小, 与档距和采用的杆塔类型有关, 常用的方法是作出如图 12-23 所示的导线换位平面布置图, 试画出换位杆塔的位移方向与距离, 使各杆塔导线悬挂点向杆塔侧向出现的水平分力最小。当导线水平排列时, 根据图 12-23, 可得到换位杆塔的位移量为

$$d_1 = \frac{Dl_1}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (12-24)$$

$$d_2 = \frac{Dl_3}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (12-25)$$

式中  $D$ ——导线的水平间距。

其他导线排列形式的滚式换位, 直线换位杆塔的位移量也可类似得到。

### 四、施工基面及长短腿

施工基面要保证在杆塔基础的上部有足够的土壤体积, 以满足基础受上拔力或倾覆力矩时的稳定要求。受上拔力作用的基础, 其边缘的土壤上拔角  $\alpha$  方向线与天然地面相交, 通过该交线的水平面即为施工基面, 如图 12-24 所示 ( $b$  点为该交线的投影)。施工基面与塔位中心桩之间的高差  $h$ , 称为施工基面值。

施工基面值过大时, 为减少施工铲土量, 保护水土和环境, 一般应采用长短腿和不等高基础。对定型杆塔, 长短腿的设计高差一般为 2m。根据塔位的实际测量数据, 是否采用长短腿, 可分为三种情况:

(1)  $h_1 = h_0$  时, 选用长短腿。此时长短腿的施工基面分别为  $H_4$  和  $H_3$ , 而  $H_3 = H_4 + h_0$ 。

(2)  $h_1 < h_0$  时, 一般可不选用长短腿。若选用, 需将长腿的施工基面标高降低 ( $h_1 - h_0$ ) 值, 定位塔高也降低此值。

(3)  $h_1 > h_0$  时, 选用长短腿。此时长腿的施工基面标高为  $H_4$ , 短腿的施工基面标高降

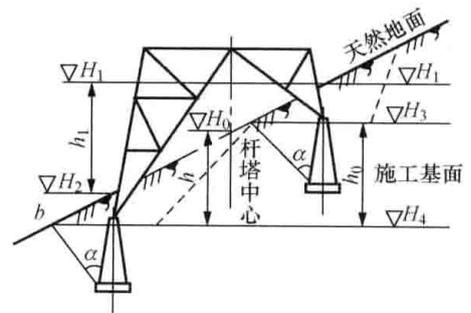


图 12-24 施工基面及长短腿

- $H_0$ —中心桩标高;  $H_1$ —短腿地面标高;
- $H_2$ —长腿地面标高;  $H_3$ —短腿的施工基面标高;  $H_4$ —长腿的施工基面标高;
- $h_0$ —长短腿的设计高差;
- $h_1$ —长短腿之间的地面高差

低 ( $h_1 - h_0$ ) 值。

 练习 题

1. 杆塔定位用平断面图的比例尺，常用的是哪几种？
2. 杆塔定位前的准备工作主要有哪些？
3. 什么是弧垂曲线模板？最大弧垂曲线模板、最小弧垂曲线模板是怎么区分的？
4. 试简述直线杆塔的定位过程。
5. 试给出各种杆塔定位校验临界曲线的临界条件，包括摇摆角、上拔、悬挂点应力、悬垂角、绝缘子串强度、耐张绝缘子串倒挂等临界曲线。
6. 什么叫悬垂绝缘子串的摇摆角？最大允许摇摆角与哪些因素有关？
7. 计算和绘制各种校验曲线时，要将什么气象条件下的垂直档距换算到什么气象情况下的垂直档距？为什么？
8. 为什么要进行杆塔中心位移？何种情况下要进行杆塔中心位移？
9. 某输电线路的最大弧垂出现在最高气温气象，此时一个耐张段的导线应力  $\sigma_0 = 65\text{MPa}$ ，自重比载  $\gamma_1 = 36 \times 10^{-3}\text{MPa/m}$ 。某基杆塔的垂直档距  $l_{1v} = 600\text{m}$ 、 $l_{2v} = 500\text{m}$ ，试校验该基杆塔的悬垂角。
10. 什么是施工基面？为何要采用长短腿？

## 第十三章 计算机在输电线路设计中的应用

随着计算机技术的迅速发展和普及，计算机在各个行业的应用日益广泛和深入，输电线路工程的设计、施工、运行与检修以及管理等方面也普遍使用了计算机。计算机在输电线路设计方面的应用，可归纳为数据管理、3S（RS、GPS、GIS）技术的应用、计算机辅助设计等。

### 第一节 数据库及其在线路设计中的应用

#### 一、数据库及数据库系统

数据库是在传统的文件系统基础上发展起来的，以一定的组织方式存储在计算机内的相互有关的数据整体，能以最佳方式和最少的数据重复为一定范围内所有的可能应用所共享。目前所有的应用程序几乎都必须有数据库的支持。

##### 1. 数据库系统的构成

数据库系统一般由计算机系统、数据库及其描述、数据库管理系统（DBMS）等组成。

计算机系统指的是用于数据库管理的计算机硬件资源和基本软件资源。数据库及其描述指的是存放实际数据的物理数据库和存放数据逻辑结构的描述数据库。描述是通过模型实现的。当前流行的数据模型有层次模型、网状模型和关系模型三种。DBMS是管理和维护数据库数据的一组软件，主要功能是维持数据库系统的正常活动，接收并回答用户提出的访问数据库的各种应用要求，如检索、存储数据等。DBMS在用户和数据库之间架起了桥梁。

##### 2. 数据库系统的主要特性

（1）数据的独立性。是指用户的应用程序对数据的非依赖性，应用程序与存储在设备上的数据彼此分开、各自独立。当数据库的物理性质发生改变时，如更换存储设备、改变组织方式等，不需要修改应用程序——物理独立性；当数据库的逻辑结构发生改变时，不需要修改应用程序——逻辑独立性。反之，应用程序改变时，不要求数据结构作相应改变。

（2）最小的数据冗余度。是指存储在数据库中的数据尽可能少的重复。这样容易保证数据的一致性，节省存储空间，提高搜索速度。

（3）最多的共享性。实现数据共享是数据库最本质的特点。数据的共享体现在：不同的应用可以使用同一个数据库；不同的应用可以在同一时刻存取同一数据，即并发使用；当前存在的应用和未来的新应用均应能使用同一数据库；可以使用多种语言编写应用程序访问同一数据库。

（4）统一管理与控制。对数据资源采用集中统一管理，实现数据资源共享，也是数据库最本质的特点之一。

## 二、输电线路设计基础数据库

基础数据库是指与具体线路工程无关的线路设计通用数据库。输电线路设计的通用数据一般有架空线数据、气象数据、杆塔有关数据、绝缘子及绝缘子串有关数据、金具及附件数据、基础形式及有关数据，通常组成相应的数据库。

由于杆塔、金具、基础等种类多，属性数据差别大，为使数据库具有最小的数据冗余度，应合理划分数据库，将具有大量共同数据的数据库细化分为若干较小的数据库，对共同数据只存储一次。为提高读写和操作效率，可对这些数据库进行统一编码（即给数据库中每条记录唯一的标识），由编码作为关键项索引，各库表之间的关系也更清晰。如对于定型杆塔而言，同一类型不同设计条件的杆塔，其塔头尺寸只有几组固定的数据，但不同的呼称高具有不同的根开。因此可考虑将定型杆塔数据库划分为杆塔设计条件数据库、杆塔根开数据库、塔头数据库 [包括猫头型塔头库、鼓型塔头库、酒杯型塔头库、干字型塔头库、三角型塔（杆）头库、上字型塔（杆）头库、门型塔（杆）头库等]。在存储定型杆塔参数时只需存储编码号，通过编码号在下一级表中查询并显示其具体数据。图 13-1 表示了定型杆塔数据库与其下一级表间的关系。

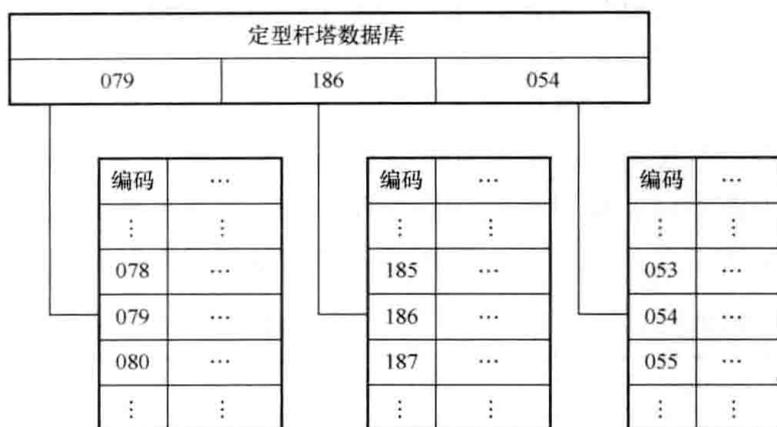


图 13-1 定型杆塔的编码方法

金具及其附件可以根据类别设置悬垂线夹数据库、耐张线夹数据库、联板数据库、防振锤数据库、间隔棒数据库、重锤数据库、护线条数据库、均压屏蔽环数据库等。

基础数据库中的数据一般来源于标准、手册和产品样本等，数据库的结构通常与其一致。如导线基础数据库的结构可如表 13-1 所示。

表 13-1 导线基础数据库的结构

字段	字段名	类型	宽度	小数
1	导线型号	字符型	16	
2	标称截面	字符型	8	
3	铝根数直径	字符型	7	
4	钢根数直径	字符型	7	
5	铝计算截面	数据型	7	2
6	钢计算截面	数据型	7	2
7	总计算截面	数据型	7	2
8	外径	数据型	5	2
9	直流电阻	数据型	7	5

续表

字段	字段名	类型	宽度	小数
10	计算拉断力	数据型	6	0
11	弹性系数	数据型	6	0
12	温膨系数	数据型	4	1
13	单位长度质量	数据型	7	1
14	交货长度	数据型	4	0

### 三、输电线路设计工程数据库

工程数据库是指与某一具体工程有关的设计数据的集合。任何与该工程有关的计算、绘图工作均可利用工程数据库中的数据。工程数据库中的数据大部分由相应应用软件根据基础数据库生成,特殊情况可直接录入。比如可根据基础数据库中的气象区数据库生成设计用气象条件数据库,根据导线基础数据库生成导线参数数据库,根据气象条件数据库和导线参数数据库则可生成导线比载数据库,进一步可生成导线应力数据库,继而得到应力弧垂曲线和安装曲线等。表 13-2 是导线应力数据库的典型结构。

表 13-2 导线应力数据库的典型结构

字段	字段名	类型	宽度	小数
1	代表档距	数据型	7	2
2	最高温应力	数据型	7	2
3	温度 70℃应力	数据型	7	2
4	最大风应力	数据型	7	2
5	最厚冰应力	数据型	7	2
6	最低温应力	数据型	7	2
7	年均温应力	数据型	7	2
8	外过无风应力	数据型	7	2
9	外过有风应力	数据型	7	2
10	内过电压应力	数据型	7	2
11	安装无风应力	数据型	7	2
12	安装有风应力	数据型	7	2
13	事故应力	数据型	7	2

### 四、数据库管理及应用程序

为便于使用和维护,需要为基础数据库选配相应的管理系统。目前较常用的数据库管理系统有 SQL Sever2000,该系统采用了一系列的先进技术,如安全性措施、数据恢复措施、并行查询等,支持故障恢复群集、分布式分区视图及各种格式的转换,具有强大的数据库功能,且几乎可以在所有计算机平台上运行。图 13-2 所示为典型的基础数据库的用户维护管理系统的功能。

工程数据库一般需要相关的管理和计算程序生成,可采用 Visual basic 等可视化语言编写。Visual basic 6.0 不仅具有良好的用户开发界面,而且带有强大的数据库设计工具,可以方便地访问、操作 SQLSever 2000 数据库。

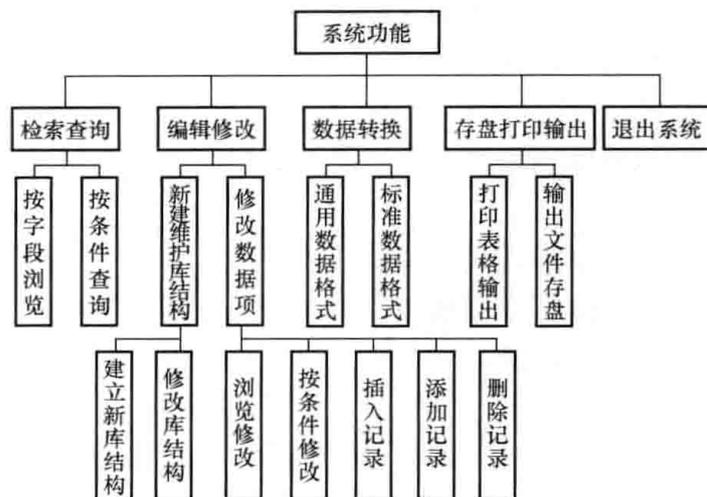


图 13-2 基础数据库的用户维护管理系统的功能

## 第二节 3S 技术及其在线路设计中的应用

近年来 3S (GPS、RS、GIS) 技术已从各自独立发展阶段进入相互融合、共同发展的阶段,并且在车船导航、环境监测、资源调查、区域管理、城市规划等诸多领域得到了迅速广泛的应用。3S 技术在输电线路设计中已得到一定的应用。3S 技术的科学方法和技术手段不仅可为输电线路设计提供及时、可靠的地理基础信息,而且可对输电线路设计和杆塔定位进行综合分析和处理,应用非常广阔。

### 一、3S 技术及其集成

#### 1. 全球定位系统 (GPS)

全球定位系统 (Global Positioning System) 起始于 20 世纪 70 年代初开始研制的卫星导航和定位系统。该系统由 24 颗工作卫星和 3 颗备用卫星组成,工作卫星均匀分布在六个相对于赤道倾角为  $55^\circ$  的近似于圆的轨道面上,轨道面之间的夹角为  $60^\circ$ ,轨道平均高度为 20200km,12 恒星时绕地球一周。这种布局可保证地球上任一点在任一时刻均可收到 4 颗以上卫星的信号,实现瞬时定位。

GPS 的用户设备部分是 GPS 接收机,用于接收 GPS 卫星发射的信号,获得必要的导航信息及观测量,经过数据处理,可完成导航和定位工作。GPS 接收机按用途不同分为导航型、大地型、守时型三大类;按应用场合不同,又分为袖珍式、背负式、车载式、机载式、弹载式、船用式和星载式等。

GPS 具有以下特点:

(1) 定位精度高。我国应用实践表明,在 50km 以内,相对定位精度达  $10^{-6}$ ,100~500km 达  $10^{-7}$ ,1000km 及以上可达  $10^{-9}$ 。实时动态差分定位精度可达厘米级,能满足高精度实时数据采集的精度要求。

(2) 观测时间短。20km 以内相对静态定位仅需 15~20min;快速静态相对定位测量,

每个流动站上观测时间仅需 1~2min; 动态相对定位测量, 流动站出发时观测 1~2min, 然后可随时定位, 每站仅需几秒钟。

(3) 测站间无需通视。GPS 测量不要求测站间通视, 只需测站上空开阔即可。这一点是常规测量根本无法比拟的。由于观测点间无需通视, 点位位置根据需要可稀可密, 使选点工作更为灵活, 由于省去了常规测量的传算点、过渡点, 节省大量经费。GPS 测量已完全可以取代四等水准测量。

近年来, GPS 的技术能力已从地球表面扩展到了航空测量和航天遥感。

## 2. 遥感技术 (RS)

遥感 (Remote Sensing) 技术是指从远距离、高空及外层空间的平台上, 利用可见光、红外、微波等探测仪器, 通过摄影或扫描方式, 对电磁波辐射能量的感应、传输等进行处理, 从而识别出地面物体的几何影像、性质及运动状态的现代化技术。

现代遥感技术具有以下特点:

(1) 新型传感器不断出现。目前, 除了框幅式可见光黑白摄影、多谱摄影、彩色摄影、红外摄影、紫外摄影外, 还有全景摄影机、红外扫描仪、红外辐射计、多谱段扫描仪、成像光谱仪、合成孔径雷达和激光测高仪等。这些传感器采用不同的方式, 对电磁波不同的谱段获得的对地观测数据, 以硬拷贝的返回方式和软拷贝的传输方式提供原始的遥感数据。

(2) 影像分辨率形成多级序列, 可提供从粗到精的对地观测数据。采用多级分辨率, 使人们可以在粗分辨率的影像上快速发现可能发生变化的地区, 进而在精分辨率的影像上详细地分析、研究这些变化。

(3) 以多光谱段获取遥感数据。一方面充分利用能透过大气的各类电磁波谱段, 向红外、远红外和微波方面扩展; 另一方面细分光谱段, 提高识别和区分各种地面目标的能力, 以利于影像自动解释。

现代遥感技术的发展和快捷、多样的商业遥感图像数据的出现, 可以方便地获得所需要的遥感数据。高分辨率商业卫星影像 IKONOS、QuickBird 等的出现, 大大拓宽了遥感的应用范围。现在遥感技术不但用于宏观上的定性分析, 而且也可以对局部地物进行定量分析和规划。遥感图像是地表的真实拷贝, 具有覆盖面大、数据现势和信息直观等特点, 其光谱信息可以反映地质特征, 所以利用高分辨率遥感影像进行线路设计, 能够大大地提高线路设计的效率和质量。在输电线路设计工程中, 地形变化相对缓慢, 利用获得的数字高程模型 (DEM) 数据建立三维模型, 进行通视性分析, 则可以大大减少选线、定位成本。

## 3. 地理信息系统 (GIS)

地理信息系统 (Geographic Information System) 是采集、存储、描述、检索、分析和应用与空间位置相关信息的计算机系统, 是集计算机学、地理学、测绘遥感学、环境科学、空间科学、信息科学、管理科学和现代通信技术为一体的一门新兴边缘学科。GIS 有两个显著特征: 一是可以像传统的数据库管理系统 (DBMS) 那样管理数字和文字 (属性) 信息, 并且可以管理空间 (图形) 信息; 二是可以利用各种空间分析的方法, 对多种不同信息进行综合分析, 寻求空间实体间的相互关系, 分析和处理分布在一定区域内的现象和过程。

GIS 是遥感技术、计算机辅助制图技术在地理学中应用的进一步延伸和发展。目前 GIS 已经从二维发展到了三维。三维 GIS 在场景可视化、实时漫游等方面取得了较好的成果,

通过与虚拟现实、人工智能等技术的结合应用,三维 GIS 能更加真实、生动地表现现实世界。国内外主要的三维 GIS 软件有 Skyline、ArcGIS、Google Earth 和 EV-Globe、IMAGIS、Smartearth 等。GIS 的发展是从应用开始的,在应用中不断开展理论研究,使 GIS 技术不断完善。

GIS 的应用范围极广。在全球范围内,GIS 技术可用于全球变化与监测的研究。在国家范围内,可用来进行全国范围的自然资源调查和宏观决策分析等。在一个城市范围内,可用作土地管理和城市规划等。在一个企业范围内,可用作生产和经营管理。目前 GIS 在科学界、技术界和商业界正得到全面发展和推广应用。

#### 4. RS、GPS、GIS 技术集成

以 GIS 为核心的 3S 技术集成,构成了对空间数据进行实时采集、更新、处理、分析及为各种实际应用提供科学决策的强大技术体系。从实际需要出发,3S 技术的结合一般有以下方式:

(1) GPS+GIS,即利用 GIS 中的电子地图和 GPS 接收机的实时差分定位技术,组成各种电子导航系统,用于车船自驾,航空遥感导航等。

(2) RS+GIS。RS 是各种 GIS 重要的外部信息源,是其数据更新的重要手段。GIS 则可为 RS 的图像处理提供所需要的一切辅助数据,增大遥感图像的信息量和分辨率,提高解释精度。在与 GIS 数据和 DBMS 集成的问题上,当前流行的遥感图像处理软件大都采用了动态连接技术,可以不经格式转换直接读取和处理外部数据,将遥感图像处理结果按照 GIS 要求的格式输出到地理信息系统中。

(3) 3S 技术的整体结合。集 RS、GPS、GIS 技术的功能为一体,可构成高度自动化、实时化和智能化的地理信息系统,为各种应用提供科学的决策咨询,解决用户可能提出的各种复杂问题。典型的 3S 技术的整体结合方式见图 13-3。

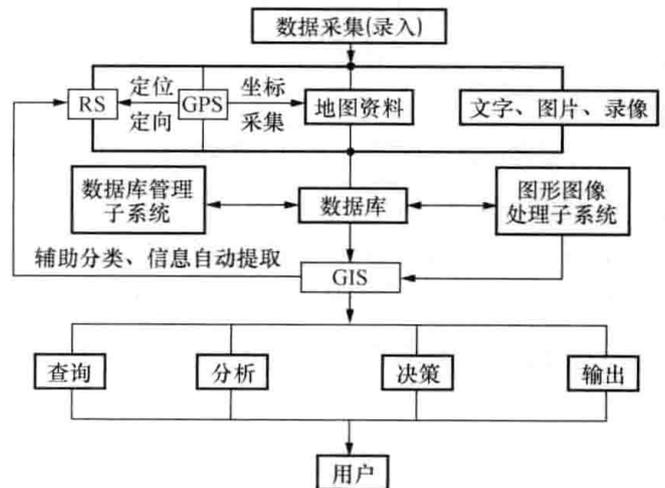


图 13-3 RS、GPS、GIS 的整体结合

作为基于 GIS、RS、GPS 和虚拟现实技术的三维可视化地理信息系统, Skyline 系列软件能够利用数字正射影像、数字高程模型、矢量数据、3D 模型和非空间属性数据等信息源,创建交互式的三维可视化场景;能够迅速创建、编辑、浏览、处理和分析广域范围的真实三维地表景观、建筑物景观等,并且支持大型数据库和实时信息通信技术,从而满足用户对三维可视化和地理信息等的双重要求。

### 二、3S 技术在路径选择及杆塔定位中的应用

输电线路的路径选择即选线是一项复杂的工作,社会的、经济的、环境的以及自然的因素等都对其有重要影响。

路径选择和杆塔定位是以空间地理信息为基础的。目前选线的常用方法是在中、小比例尺地形图上,进行路径粗选,在粗选的基础上利用现势航空相片进行摄影测量处理,再对路径方案进行细化和优化。但成图时间较早的地形图缺乏现势性,不能反映设计时的地面现

状, 而且不直观; 航片幅图的大小有限, 使得设计人员只能在沿线路约 30km 宽的范围内寻找最优路径。

根据具体的输电线路工程的可行性设计、初步设计、施工图设计阶段的不同, 选取合适分辨率的信息数据, 综合运用 3S 技术, 将会极大地提高工作效率和质量。其主要内容和过程如下:

(1) 图像数字化, 建立数字高程模型 (DEM)。常见的图像有遥感影像、光学图像 (航片、卫片) 和雷达图像等, 要对其全要素进行数字化, 包括地理信息的高程数据和地物要素的属性数据。数字化后的数据可以转入 GIS 软件中, 如 ArcGIS, 然后利用 ArcGIS 中的 Topogrid 模块生成一定大小格网的 DEM, 自动获取各种地貌形态参数。作为基础测绘产品, DEM 也可以向有关部门购买。

数字化处理后的有关图像, 需要选取合适的地物点 (地面控制点) 进行几何精度纠正。

(2) 数字图像的处理。图像获取时的搭载平台、传感器、地球曲率和地形起伏等影响, 往往会造成图像的几何畸变; 把影像纳入到特定的制图坐标系统中, 都需要进行图像的几何纠正。电力线路常常超出一景影像的覆盖范围, 因此需要对多景影像进行镶嵌处理, 形成能够覆盖整个线路的大影像。同时为了使得镶嵌后的影像在色调上协调一致, 还要进行色调匹配处理。不同的传感器获取的影像具有不同的特点, 有的几何分辨率高, 有的光谱分辨率高, 为了综合不同影像的几何和光谱优势信息, 需要采用图像融合技术进行处理, 即应用一定的数学模型对相应的像素进行处理, 形成一幅能够反映融合前不同图像优势信息的图像。

(3) 图像的识别与解译。主要是基于图像的形状、大小、纹理等空间结构信息以及以色调为主的光谱信息, 并结合地层岩性及微地貌、植被、水系及景观等特征, 建立不同地物的解译标志。

(4) 进行线路设计。通过地物判读和地质条件分析, 线路设计人员利用专业知识, 可以进行线路选线和杆塔定位工作。在选线过程中, 路径附近的河流、居民地和建筑物、地质灾害、陡崖地貌、限伐林地等作为限制区域或有条件控制区域, 图上可实时显示其与线路的垂直和水平安全距离。利用 GIS 的相关模块, 自动生成路径的纵、横断面图, 并且对线路中心线左右数十米范围内的交叉跨越能够自动进行判断、识别, 包括转角度数等属性的自动计算。

(5) 利用专家系统对路径方案进行评价。专家系统集中线路设计有关方面的专家经验, 其中包括许多非定量因素的子模块, 可对 GIS 选出的路径方案进行技术经济分析和比较。如果 GIS 选择的路径不符合专家系统的要求, 可在计算机上方便地进行修改。必要时, 进行野外实地重点踏勘, 然后修改、优化设计方案。

(6) 输出结果。将 GIS 选线的最终结果, 以图表、图形、数字的形式输出。为了从整体的角度优化设计方案, 可以将遥感影像和线路设计方案叠加在 DEM 上进行三维仿真模拟, 沿着设计线路飞行检查。

经过渲染的三维地表模型十分直观, 山川河流、高程走向一目了然。按选定的路径将杆塔定位其上, 即可直观观察、任意浏览, 达到“不到现场, 胜到现场”的效果。图 13-4 是某软件生成的经渲染的三维地表模型和输电线路及杆塔布置图。

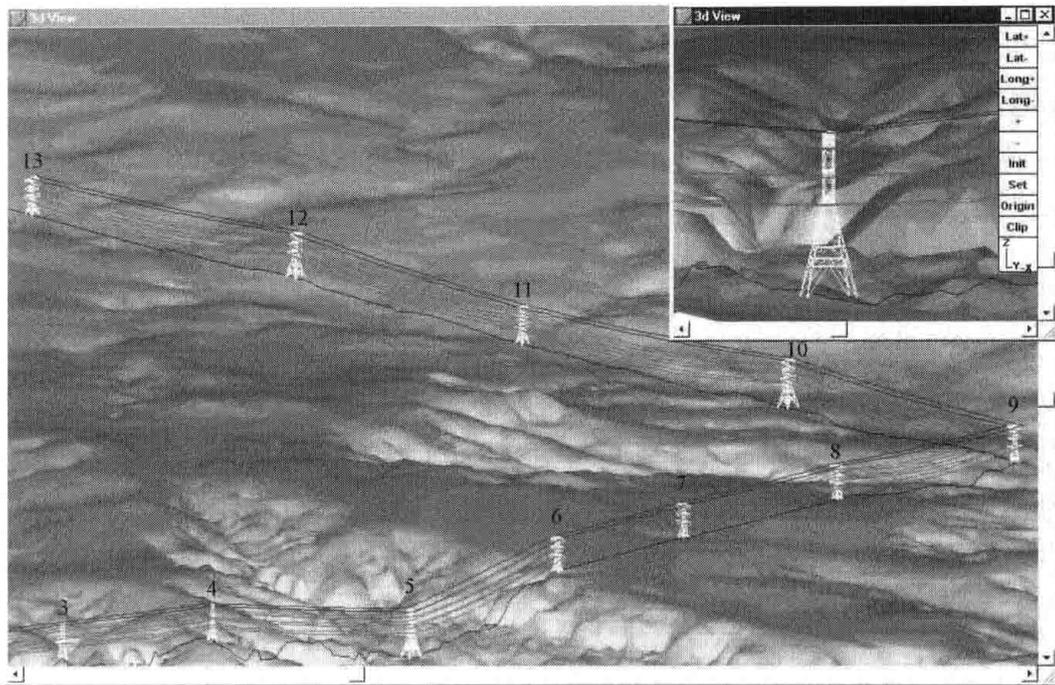


图 13-4 经过渲染的三维地表模型和输电线路及杆塔布置图

### 第三节 输电线路计算机辅助设计

计算机辅助设计 (CAD) 的广义范畴是指所有由计算机参与的设计, 前述的 3S 技术及其应用也可以纳入其中。CAD 的狭义范畴要窄一些, 主要是指工程设计及建模等。目前许多通用和专用 CAD 软件越来越庞大, 三维、渲染、优化设计、专家系统等许多功能往往被集成在同一个软件中。

#### 一、输电线路 CAD 软件的功能

从目前的软硬件技术来看, 一个较为完整的输电线路 CAD 软件可以包括以下功能和模块:

(1) 三维地表模型模块 (包括 TIN 渲染模块)。该模块允许用户用鼠标直接在地表模型上选择或更改路径, 在平面或断面图上移动杆塔位, 自动生成纵断面和横断面, 用唯一的特征编码和符号标识地形和地物, 以各种视角和光照渲染地形, 从各种数据源导入地形数据等。

(2) 输电线路设计模块。该模块允许用户显示各种型式的杆塔、架空线和绝缘子; 选择导线类型及型号; 从用户可编辑的库中, 选出杆塔和架空线; 确定所有设计载荷; 交互的或自动的进行杆塔定位, 并能进行总体成本优化; 交互的或自动的进行挂线; 进行各种情况下的任一点弧垂和应力的计算; 校验导线对地或跨越物的接近净空间距; 校验各种情况下的摇摆角; 通过结构分析程序, 校验杆塔的强度和刚度; 对架空线和绝缘子系统的振动进行三维可视化模拟, 等等。

(3) 允许用户对设计条件的有关参数进行定义, 包括气象条件、线路负荷情况和导线运行情况 (初始时、塑变后、过载时) 等。

(4) 图形系统。该系统允许用户控制绘图比例和图面布局, 直接绘图或将图传送到商业 CAD 系统中绘制, 在平面视图中叠加航空照片或地图, 扫描图纸的矢量化等。

(5) 材料管理系统。该系统允许用户从已存的数据库中获得零部件和劳动量数据, 自动生成杆塔成本和杆塔组立施工的材料清单等。

## 二、输电线路设计软件 PLS-CADD 简介

PLS-CADD (Power Line Systems-Computer Aided Design and Drafting) 软件是世界著名输电线路设计 CAD 软件, 由美国 Power Line Systems Inc 公司开发, 该软件运行在 Windows 系统下, 具有十分友好的图文交互界面, 提供高效、精确的工程计算, 目前有超过 125 个国家、1600 多家机构在使用该软件。感兴趣的读者可以到其主页上查询, URL 为: <http://www.powline.com>。

### 1. 三维工程模型 (3D Engineering Model)

复杂的三维工程模型是 PLS-CADD 的核心, 可将所有地形、杆塔和架空线悬挂曲线以不同的视图进行显示, 包括平面图、断面图、三维视图, 如图 13-5 所示。PLS-CADD 工程模型绝不仅仅是一幅图片或 CAD 图形, 它反映了所有结构元素之间的关系。当你移动一基杆塔的位置时, PLS-CADD 软件会自动生成新位置的断面图, 并更新相应的杆塔和架空线悬挂形状, 而且所有的视图中都将反映这一变化。因此使用 PLS-CADD, 设计者可以将精力集中在线路设计上, 而不用浪费大量的时间进行图形的绘制。

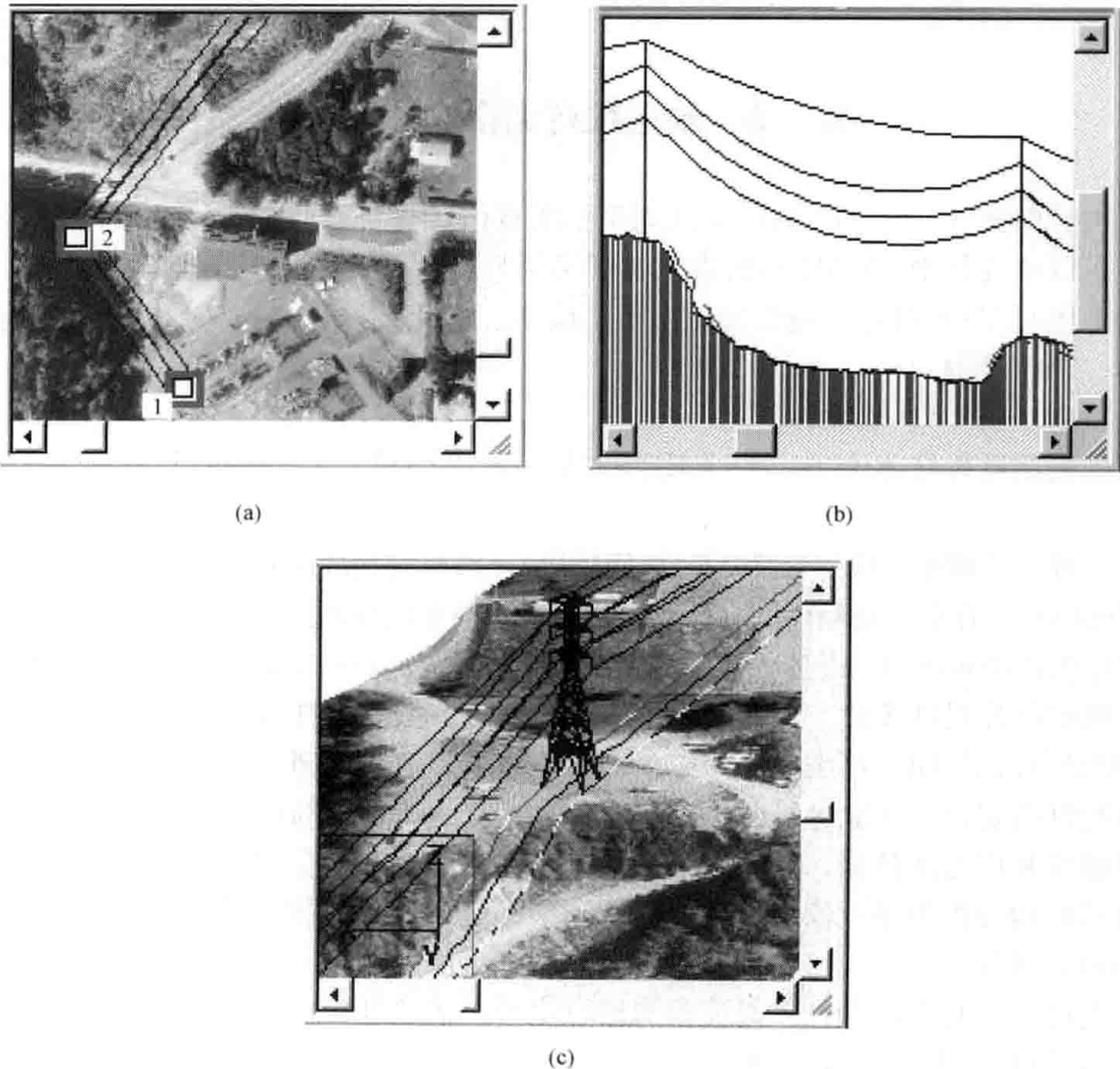


图 13-5 三维工程模型的不同视图  
(a) 平面图; (b) 断面图; (c) 三维视图

## 2. 地表模型 (Terrain Model)

PLS-CADD 可以接受各种地形数据, 包括 GPS、GIS 或遥感处理软件生成的地形, 扫描矢量化软件生成的地形, 现有的电子地形图等, 用户也可以自定义数据输入接口, 以便读取更广泛的数据信息。PLS-CADD 在接收到足够的地形数据后, 可以通过不同处理模块, 如轮廓增强、渲染模块等, 获得更加直观、真实和有层次感的三维地形图。图 13-6 是三维轮廓地形图。图 13-7 是三维三角网格地形图, 处理后的立体效果见图 13-5 (c)。当用户改变线路路径时, 只要移动鼠标, 软件便能实时地显示更改后的各种视图。

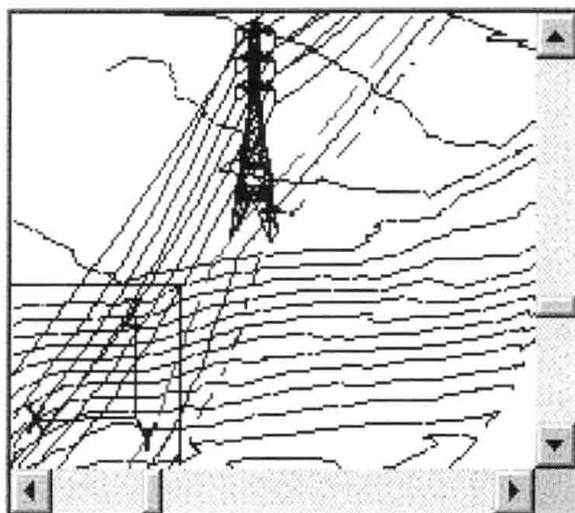


图 13-6 三维轮廓地形图

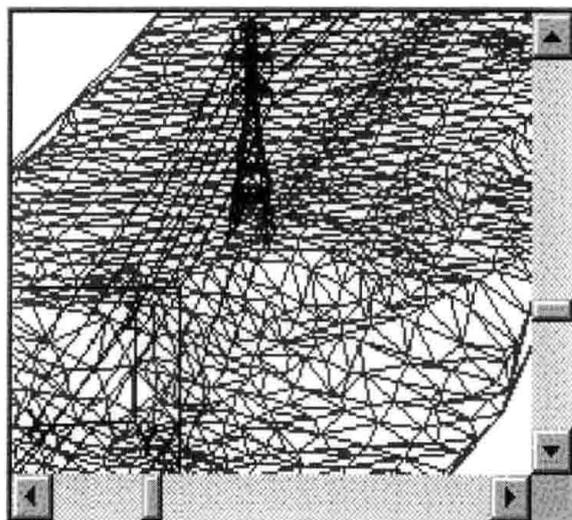


图 13-7 三维三角网格地形图

## 3. 设计参数的设定和各种校验

PLS-CADD 的功能十分灵活, 能适应各种行业标准。利用 PLS-CADD 进行线路设计, 需要先设定一些原始数据参数, 如气象条件 (风速、覆冰、气温)、架空线安全系数等, 然后用户只需指定各种气象组合, 即可进行净空限距、应力和绝缘子串风偏角等的校验, 并可以图形方式表现出来。图 13-8 是架空线在风荷载作用下的纵断面图和三维视图。PLS-CADD 支持手工定位和自动定位, 通过鼠标对定位点或者其他结构进行添加、删除或移动等操作; 在自动定位模式下, 程序将自动计算并找到最佳定位方案。

## 4. 弧垂、应力计算

PLS-CADD 软件包含各种弧垂、应力的计算程序, 用户可以轻易地计算在各种气象条件下的架空线弧垂和应力, 并能在三维模式下显示导线应力弧垂、绝缘子串风偏、导线受风振动等。计算不仅包含传统的代表档距法, 而且还具有多档有限元弧垂张力计算模块, 以满足不适用代表档距法的场合。PLS-CADD 还充分考虑了钢芯铝绞线的铝部在高温下的性能变化。

## 5. 杆塔模型

在超高压输电线路工程中, 杆塔成本的增加将使整个工程的造价大幅上升。PLS-CADD 软件采用先进的优化算法, 充分考虑水平风荷载和垂直载荷的不同工况, 使设计的杆塔既经济又可靠。

PLS-CADD 提供几种杆塔建模方法。最简单的是“水平档距和垂直档距法”, 用户只需要输入允许的水平档距、垂直档距、绝缘子串摇摆角以及架空线悬挂点等参数, 程序会自

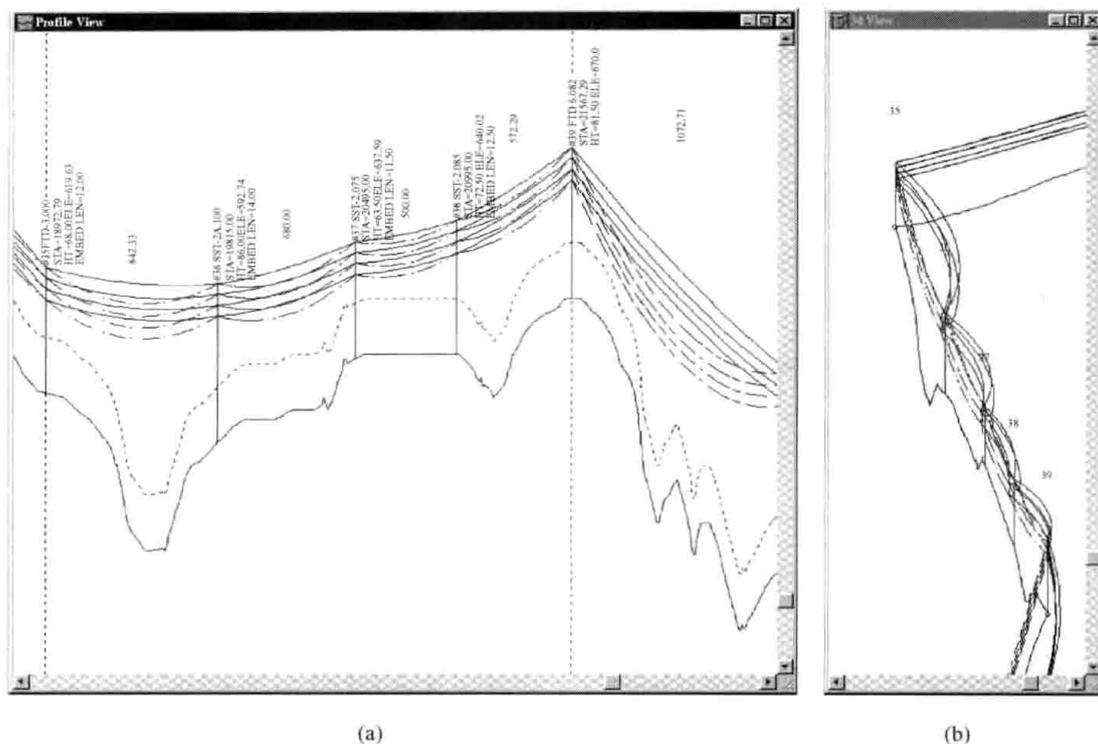


图 13-8 架空线在风荷载作用下的纵断面图和三维视图  
(a) 纵断面图; (b) 三维视图

动生成杆塔的结构模型。复杂的杆塔建模方法是通过一些基本参数建立杆塔的有限元模型, 这些参数包括杆塔高度、杆塔类型、横担尺寸以及拉线的布置等。当程序对生成的杆塔模型进行校核时, 不仅能告诉用户该杆塔是否合适, 而且会以不同的颜色显示出各部分的应力作用强弱; 用户可以灵活地改变其设计, 并可以立刻看到杆塔结构的变化。图 13-9 是实际荷载作用下杆塔的有限元整体结构分析计算图, 其中左上部分是纵断面图, 左下部分是其三维视图。

#### 6. 材料管理子系统

该系统主要的功能是进行工程概预算, 生成材料清单。物料编号、部件描述、相应的费用以及用户自定义项目都能直接输入到 PLS-CADD 软件中; 另外 PLS-CADD 软件还支持所有遵循开放数据库互连 (Open Database Connectivity, ODBC) 协议的软件生成的数据库文件, 比如 Oracle、Access、DB2 等软件生成的数据库文件。材料管理子系统能够输出一系列的材料、部件清单报表, 可使用户比较容易地进行资产管理或者线路预算等。

#### 7. 绘图

PLS-CADD 自动生成平面和剖面图, 且根据用户的设计实时改变。在 PLS-CADD 的设计环境中, 用户可以直接将图形在 Windows 兼容的打印机或绘图仪上绘制出来, 也可以将其送入通用 CAD 系统 (如 AUTOCAD) 中进一步处理后输出。PLS-CADD 支持将用户自定义边界、标题栏和公司商标等嵌入图形中; 诸如页面大小、布局、字体等其他参数都能通过设定以满足不同的行业标准, 为用户节省了大量的绘图时间。

### 三、道亨输电线路设计系列软件简介

北京道亨公司是国内架空输电线路设计领域中具有领先地位的专业软件开发商和解决方案提供商, 拥有自主知识产权的大型图形开发平台, 以及在该平台上开发的系列专用软件产

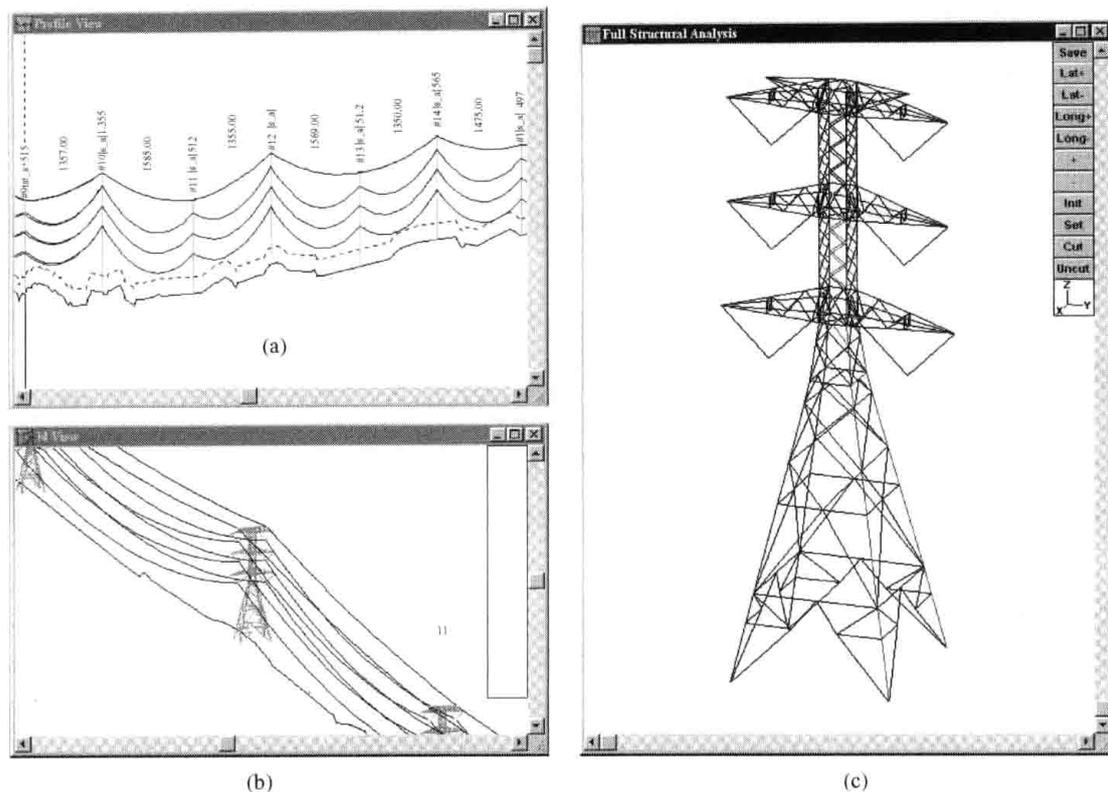


图 13-9 杆塔有限元结构模型  
(a) 纵断面图；(b) 三维视图；(c) 杆塔模型

品，分为道亨选线系列、线路设计系列、杆塔设计系列、基础设计系列、电气分析系列和三维数字化设计平台等。这些软件可以单独运行，也可以捆绑安装使用。

选线系列主要有线路可研、初设卫片选线系统，CAD 数字化选线系统，SLHLW 影像平断面处理系统，SVCAD 电子平板测绘系统。线路设计系列主要有 SLCAD 架空送电线路平断面处理系统，SLCAD 架空送电线路定位 CAD 系统，SLDW 优化排位系统，孤立档及变电母线计算程序，JJCAD 金具组装设计与制图系统，大跨越方案选择计算系统。杆塔设计系列主要有铁塔荷载计算系统，自立式铁塔多塔高、多接腿满应力分析程序，钢管杆优化设计系统，水泥杆设计系统。基础设计系列主要有铁塔长短腿基础自动配置系统，基础优化计算及绘图系统（基础大全），以及各种单一基础型式的优化计算及绘图系统（如掏挖式基础、斜插式基础、桩基础、岩石基础、刚性台阶基础、柔性基础、联合基础、复合沉井式基础、窄基塔独立式基础、素混凝土基础、钢管杆基础、水泥杆基础等）。线路电气分析系列主要是送电线路电磁环境计算软件。三维数字化设计平台主要有三维路径设计模块，三维杆塔定位设计模块，三维杆塔设计模块，三维金具组装模块，三维基础设计模块，三维交叉跨（钻）越计算程序等。

系统大多采用 VC++ 语言编写，为独立平台，无需其他软件支持，对计算机硬件要求低，系统运行速度快，图式一般可根据使用单位定制。现将主要软件介绍如下。

#### 1. 线路可研、初设卫片选线系统

该系统是专门用于卫片选线的软件平台，适用于输电线路可研阶段和初设阶段的路径选择。系统有偿提供现势性 1 年左右的 2.5m 分辨率的卫片，用户也可将自己已有的卫片整合于本系统。2.5m 卫片的成本远远低于航片，对于较短的 10~20km 长度的线路，航飞的成

本相对很高,卫片更具有实用性。该系统的主要功能有:

- (1) 能有效地避开房屋村庄、树林、草场等,减少拆迁,控制工程造价。
- (2) 能将各种格式的卫片集中整合,对海量卫片进行自动优化存储处理,可实现无级缩放、自由平移,可安装到笔记本电脑上,便于野外现场选线。
- (3) 用户在图中标出起始、终止点、禁止穿过的居民区、风景区等范围,系统能自动寻找线路最优路径。
- (4) 能提供高程数字地面模型,可显示等高线。根据预选的路径,能自动生成“道亨 SLCAD 架空送电线路平断面图处理系统”格式的平断面图。
- (5) 配置电子地图数据,可辅助判读公路、村庄等卫片信息;提供有全国地名数据,方便查找定位;可显示国界、省界、市界、县界等。
- (6) 高级版则提供有优化排位功能;能根据典设杆塔库,预排塔位,可比较估算线路造价。

## 2. SLCAD 架空送电线路平断面图处理系统

该系统是一个输电线路平断面图测量 CAD 软件,适用于各种电压等级及各种比例尺的架空输电线路平断面图处理工作。该系统可与全站仪联机,自动记录观测数据,现场自动形成平断面图;也可手工输入原始测量数据,自动成图(有即输即现和批量输入两种方式);还可通过接口程序,自动处理全站仪、GPS 等仪器所采集的数据。该系统具有以下主要功能:

- (1) 与全站仪现场联机工作,自动转换为平断面图;根据手工输入或表单输入的原始测量数据,自动形成平断面图形。
- (2) 比例尺可任意调节,标尺范围可任意确定,且可任意增加标尺、升降标尺,这有利于大高差的山区测量。
- (3) 支持左右边线功能,可任意添加横断面图。
- (4) 用户可直接修改原始的观测数据或编辑图形。原始观测数据变化后,平断面图自动随着变化,无需再进行其他的数据处理。
- (5) 具备生成塔基断面图、拆房平面图等功能。
- (6) 有自动排杆数据输出接口,还可直接生成 dwg 图形文件为后续 CAD 工作服务。

## 3. SLCAD 架空送电线路定位 CAD 系统

该系统可完成从杆塔定位、电气计算到定位校验及最终绘图输出等全部工作,可显著提高线路设计的质量和效率。其主要功能有:

- (1) 内置有杆塔、绝缘子串、导地线、跨越限距等数据库,用户可以进行修改、添加、删除等操作,以适应不同设计要求。
- (2) 可计算导、地线应力弧垂,并输出各种应力弧垂曲线图(表)和放线曲线图(表)。典型应力弧垂曲线如图 13-10 所示。
- (3) 具有多样灵活的杆塔定位方式,包括与应力计算一体的电子弧垂曲线模板立塔、指定桩位立塔、任意累距立塔、指定档距立塔、耐张段等分立塔等。图 13-11 是其典型的杆塔定位图。
- (4) 能自动进行各种电气校核,包括悬垂绝缘子串摇摆角、悬挂点应力、悬挂点悬垂角、悬垂绝缘子串荷载、耐张绝缘子串倒挂计算、导地线上拔、导线风偏角及危险点风偏距离等。

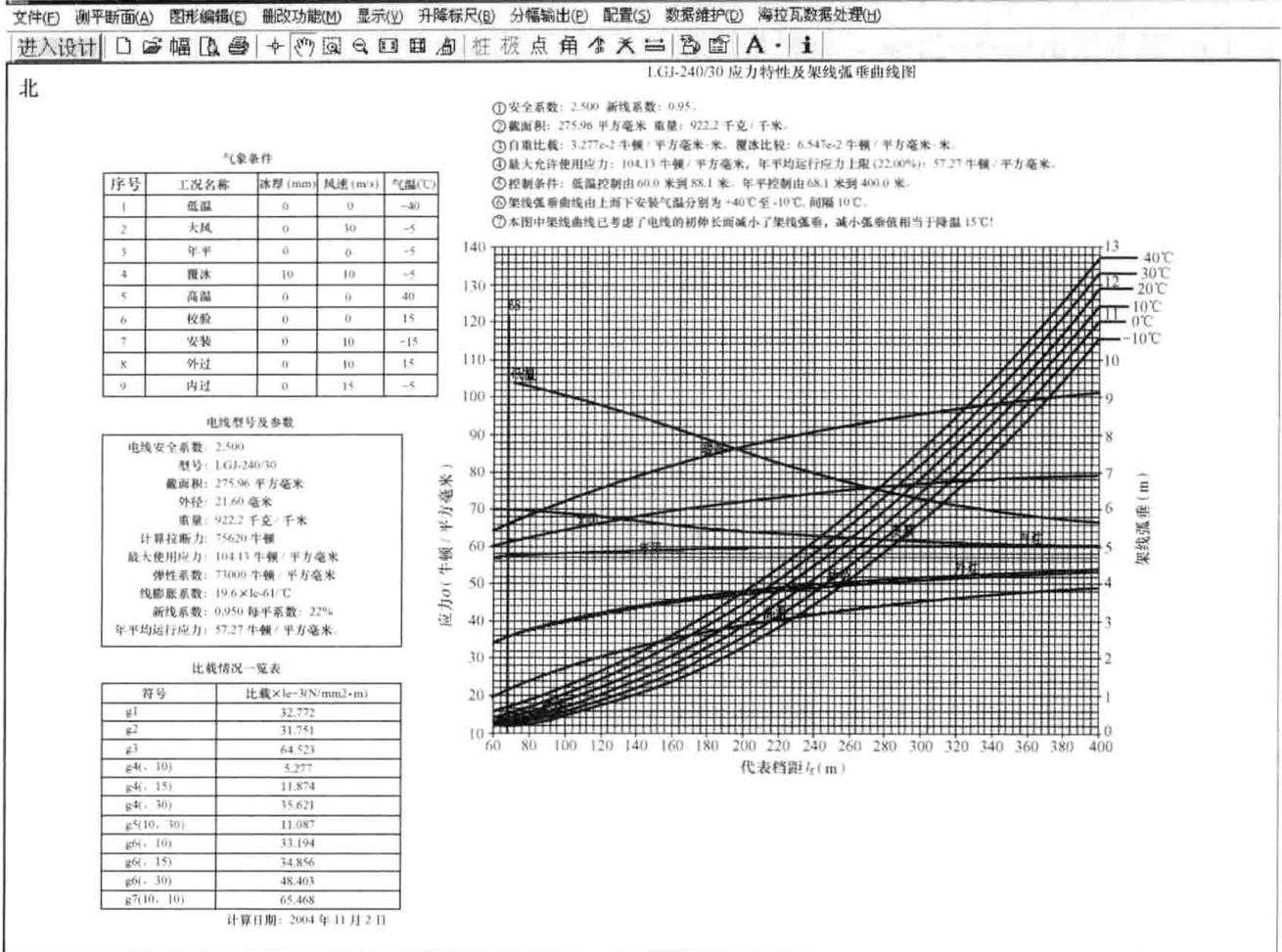


图 13-10 SLCAD 的典型应力弧垂曲线

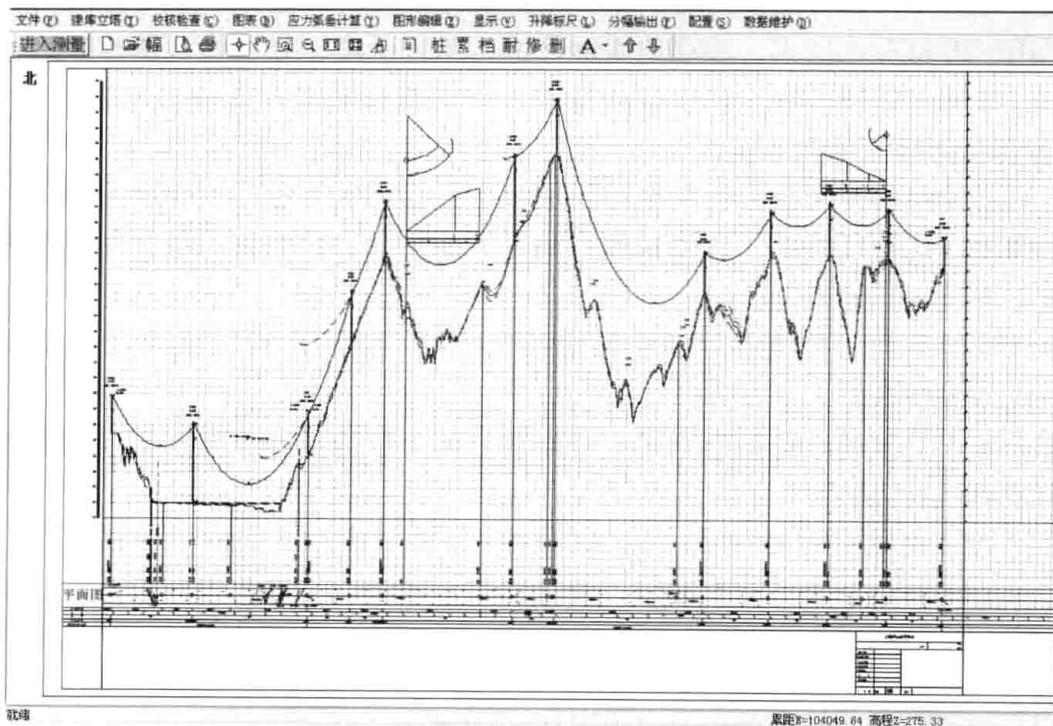


图 13-11 SLCAD 的典型杆塔定位图

- (5) 可输出连续上下山档的调整值, 孤立档、进出线档在竣工及安装时的弧垂。
- (6) 具有输出杆塔明细表、材料统计表、杆塔一览表以及电气设计计算书等功能。

#### 4. SLDW 优化排位系统

该系统在“SLCAD 架空送电线路定位 CAD 系统”的基础上, 采用动态规划模型, 增加了自动加重锤、降基面, 增加耐张杆塔, 增加了穿越校验功能, 可与 SLCAD 系统充分接口并融为一体, 自动辨识 SLCAD 系统中的地物编码, 自动调用交叉跨越数据库进行排位处理, 并允许用户任意干预, 如手工增加跨越点、穿越点、强制立塔点等。该系统操作更为简单, 用户只需选择导、地线型号及安全系数、电压等级、杆塔有关数据后, 就可进行全自动排位和自动电气校验。

#### 5. 孤立档及变电母线计算程序

该计算程序适用于进出线档计算以及变电母线弧垂应力计算。在用户给出孤立档档距、高差、集中荷载、导线型号等已知数据后, 能够准确计算出该孤立档内各种工况下的最大应力(张)力、最大弧垂等, 能够按照构架允许的最大张力控制条件和档内最大弧垂控制条件进行有关验算, 并能够以图形方式显示该档距内电线的形状, 以文本形式输出。

#### 6. JJCAD 金具设计与制图系统

该系统主要用于绝缘子串及金具的组装设计, 能够对各种电压等级的导地线金具进行组装设计、制图及校核计算工作, 包括金具连接检查, 金具配合尺寸检查, 金具碰撞检查, 金具重量计算, 金具破坏荷载计算和最小破坏荷载部件等。对于用户需要的各种型号的金具零件组合, 配合相应数据库, 全部可以用本系统组装实现。系统采用所见即所得的形式, 直观给出用户需要的结果。

#### 7. 线路设计成果三维电子化移交平台

该平台整合各专业设计成果, 为施工提供准确的数据、直观的三维仿真模型, 减少施工误差, 提高工作效率; 也为将来的运行维护提供数据基础。该平台的主要特点有:

- (1) 采用三维可视化技术, 直观地展示杆塔、绝缘子串、导地线、基础、跨越线路以及房屋、树木、池塘等各种地物。提供自动漫游、手工查找功能, 能很快定位到要看的杆塔。图 13-12 是其线路的三维效果图。

- (2) 可调阅线路设计和竣工的平断面图成果。调阅铁塔信息, 查看塔材的应力分布图、放样图、结构图, 接地装置图。调阅基础三维图、施工图, 铁塔长短腿基础配置图。调阅绝缘子串的施工图及三维效果图。

- (3) 设计软件系列均提供有数字化移交接口, 可一键导出设计成果, 无需人工重复输入, 即可生成三维仿真图。

- (4) 结合基于卫片的地理信息系统, 可以规划施工放线场地、施工运输半径等。

### 四、XLCAD 软件简介

输电线路计算机辅助设计系统 XLCAD 是一个共享软件, 别称“蓝精灵”, 可在 Windows9X/2000/NT/XP 系统平台上运行, 可从网络上下载, 是目前国内应用最广泛的输电线路 CAD 软件之一。该软件突出输电线路设计的主要任务, 界面友好, 易于使用。其主要功能有:

- (1) 对全站仪输入的测量数据进行处理, 生成线路设计用平断面图。
- (2) 进行杆塔排位, 并进行电气、基础等配置和定位校验。



图 13-12 线路三维效果图

(3) 自动生成杆塔明细表、基础配置表、杆塔一览图、导线弧垂应力表、材料汇总表等。

(4) 生成相应图纸及图纸目录。

该软件的输电线路数据管理模块用于管理线路辅助设计的各种有关数据，如气象参数、导线型号、绝缘子串型式、杆塔型式、接地装置等，用户可对这些数据进行修改、增加和删除等操作，其菜单如图 13-13 所示。



图 13-13 XLCAD 菜单

该软件设置有“用户定制图”目录，用于存放线路施工图所需封面、说明页的 .DWG 文件，如应力特性说明页、杆型材料表说明页、杆塔一览图封面、杆塔明细表封面、杆塔一览图说明页、基础配置表封面、基础配置表说明页、设计单位名称、平断面图签、标准图

签、材料汇总表封面和说明页等,用户可根据本单位的需要对其进行修改。

使用该软件设计线路时,应先建立该工程项目文件,用于存放该工程项目的有关资料。新建工程项目的对话框如图 13-14 所示。

该软件设置有导航按钮,可显示出相应的导航窗口,使用者可以从中了解到线路设计 CAD 的流程以及当前的进程,如图 13-15 所示。

图 13-14 XLCAD 的工程项目对话框

图 13-15 XLCAD 的导航窗口

## 附录 A 常用架空导线和地线的规格和性能

表 A-1

LGJ 钢芯铝绞线 (GB1179—1983)

标称截面 铝/钢 (mm <sup>2</sup> )	根数/直径 (mm)		计算截面 (mm <sup>2</sup> )			外径 (mm)	直流电阻 (不大于, Ω/km)	计 算 拉断力 (N)	单位长度 质 量 (kg/km)	交货 长度 (m)
	铝	钢	铝	钢	总计					
10/2	6/1.50	1/1.50	10.60	1.77	12.37	4.50	2.706	4120	42.9	3000
16/3	6/1.85	1/1.85	16.13	2.69	18.82	5.55	1.779	6130	65.2	3000
25/4	6/2.32	1/2.32	25.36	4.23	29.59	6.96	1.131	9290	102.6	3000
35/6	6/2.72	1/2.72	34.86	5.81	40.67	8.16	0.8230	12630	141.0	3000
50/8	6/3.20	1/3.20	48.25	8.04	56.29	9.60	0.5946	16870	195.1	2000
50/30	12/2.32	7/2.32	50.73	29.59	80.32	11.60	0.5692	42620	372.0	3000
70/10	6/3.80	1/3.80	68.05	11.34	79.39	11.40	0.4217	23390	275.2	2000
70/40	12/2.72	7/2.72	69.73	40.67	110.40	13.60	0.4141	58300	511.3	2000
95/15	26/2.15	7/1.67	94.39	15.33	109.72	13.61	0.3058	35000	380.8	2000
95/20	7/4.16	7/1.85	95.14	18.82	113.96	13.87	0.3019	37200	408.9	2000
95/55	12/3.20	7/3.20	96.51	56.30	152.81	16.00	0.2992	78110	707.7	2000
120/7	18/2.90	1/2.90	118.89	6.61	125.50	14.50	0.2422	27570	379.0	2000
120/20	26/2.38	7/1.85	115.67	18.82	134.49	15.07	0.2496	41000	466.8	2000
120/25	7/4.72	7/2.10	122.48	24.25	146.73	15.74	0.2345	47880	526.6	2000
120/70	12/3.60	7/3.60	122.15	71.25	193.40	18.00	0.2364	98370	895.6	2000
150/8	18/3.20	1/3.20	144.76	8.04	152.80	16.00	0.1989	32860	461.4	2000
150/20	24/2.78	7/1.85	145.68	18.82	164.50	16.67	0.1980	46630	549.4	2000
150/25	26/2.70	7/2.10	148.86	24.25	173.11	17.10	0.1939	54110	601.0	2000
150/35	30/2.50	7/2.50	147.26	34.36	181.62	17.50	0.1962	65020	676.2	2000
185/10	18/3.60	1/3.60	183.22	10.18	193.40	18.00	0.1572	40880	584.0	2000
185/25	24/3.15	7/2.10	187.04	24.25	211.29	18.90	0.1542	59420	706.1	2000
185/30	26/2.98	7/2.32	181.34	29.59	210.93	18.88	0.1592	64320	732.6	2000
185/45	30/2.80	7/2.80	184.73	43.10	227.83	19.60	0.1564	80190	848.2	2000
210/10	18/3.80	1/3.80	204.14	11.34	215.48	19.00	0.1411	45140	650.7	2000
210/25	24/3.33	7/2.22	209.02	27.10	236.12	19.98	0.1380	65990	789.1	2000
210/35	26/3.22	7/2.50	211.73	34.36	246.09	20.38	0.1363	74250	853.9	2000
210/50	30/2.98	7/2.98	209.24	48.82	258.06	20.86	0.1381	90830	960.8	2000
240/30	24/3.60	7/2.40	244.29	31.67	275.96	21.60	0.1181	75620	922.2	2000
240/40	26/3.42	7/2.66	238.85	38.90	277.75	21.66	0.1209	83370	964.3	2000
240/55	30/3.20	7/3.20	241.27	56.30	297.57	22.40	0.1198	102100	1108	2000
300/15	42/3.00	7/1.67	296.88	15.33	312.21	23.01	0.09724	68060	939.8	2000
300/20	45/2.93	7/1.95	303.42	20.91	324.33	23.43	0.09520	75680	1002	2000
300/25	48/2.85	7/2.22	306.21	27.10	333.31	23.76	0.09433	83410	1058	2000
300/40	24/3.99	7/2.66	300.09	38.90	338.99	23.94	0.09614	92220	1133	2000
300/50	26/3.83	7/2.98	299.54	48.82	348.36	24.26	0.09636	103400	1210	2000
300/70	30/3.60	7/3.60	305.36	71.25	376.61	25.20	0.09463	128000	1402	2000
400/20	42/3.51	7/1.95	406.40	20.91	427.31	26.91	0.07104	88850	1286	1500
400/25	45/3.33	7/2.22	391.91	27.10	419.01	26.64	0.07370	95940	1295	1500
400/35	48/3.22	7/2.50	390.88	34.36	425.24	26.82	0.07389	103900	1349	1500
400/50	54/3.07	7/3.07	399.73	51.82	451.55	27.63	0.07232	123400	1511	1500
400/65	26/4.42	7/3.44	398.94	65.06	464.00	28.00	0.07236	135200	1611	1500
400/95	30/4.16	19/2.50	407.75	93.27	501.02	29.14	0.07087	171300	1860	1500
500/35	45/3.75	7/2.50	497.01	34.36	531.37	30.00	0.05812	119500	1642	1500
500/45	48/3.60	7/2.80	488.58	43.10	531.68	30.00	0.05912	128100	1688	1500
500/65	54/3.44	7/3.44	501.88	65.06	566.94	30.96	0.05760	154000	1897	1500
630/45	45/4.20	7/2.80	623.45	43.10	666.55	33.60	0.04633	148700	2060	1200
630/55	48/4.12	7/3.20	639.92	56.30	696.22	34.32	0.04514	164400	2209	1200
630/80	54/3.87	19/2.32	635.19	80.32	715.51	34.82	0.04551	192900	2388	1200
800/55	45/4.80	7/3.20	814.30	56.30	870.60	38.40	0.03547	191500	2690	1000
800/70	48/4.63	7/3.60	808.15	71.25	879.40	38.58	0.03574	207000	2791	1000
800/100	54/4.33	19/2.60	795.17	100.88	896.05	38.98	0.03635	241100	2991	1000

注 综合拉断力为计算拉断力的95%。

表 A-2 镀锌钢绞线 (YB/T 5004—2012)

结 构	钢绞线用钢丝公称直径 (mm)	钢绞线公称直径 (mm)	钢绞线公称横截面积 (mm <sup>2</sup> )	参考质量 (kg/km)	公称抗拉强度 (MPa)				
					1270	1370	1470	1570	1670
					钢绞线最小破断拉力 (kN)				
1×3	2.90	6.20	19.82	160.00	23.16	24.98	26.80	28.63	30.45
	3.20	6.40	24.13	195.00	28.19	30.41	32.63	34.85	37.07
	3.50	7.50	28.86	233.00	33.72	36.38	39.03	41.69	44.34
	4.00	8.60	37.70	304.00	44.05	47.52	50.99	54.45	57.92
1×7	1.00	3.00	5.50	43.70	6.43	6.93	7.44	7.94	8.45
	1.20	3.60	7.92	62.90	9.25	9.98	10.71	11.44	12.17
	1.40	4.20	10.78	85.60	12.60	13.59	14.58	15.57	16.56
	1.60	4.80	14.07	112.00	16.44	17.73	19.03	20.32	21.62
	1.80	5.40	17.81	141.00	20.81	22.45	24.09	25.72	27.36
	2.00	6.00	21.99	175.00	25.69	27.72	29.74	31.76	33.79
	2.20	6.60	26.61	210.00	31.10	33.55	36.00	38.45	40.88
	2.60	7.80	37.17	295.00	43.43	46.85	50.27	53.69	57.11
	3.00	9.00	49.50	411.90	57.86	62.42	66.98	71.54	76.05
	3.20	9.60	56.30	447.00	65.78	70.96	76.14	81.32	86.50
	3.50	10.50	67.35	535.00	78.69	84.89	91.08	97.28	103.48
	3.80	11.40	79.39	630.00	92.76	100.10	107.40	114.70	121.97
4.00	12.00	87.96	698.00	102.80	110.90	119.00	127.00	135.14	
1×19	1.60	8.00	38.20	304.00	43.66	47.10	50.54	53.98	57.41
	1.80	9.00	48.35	385.00	55.26	59.62	63.97	68.32	72.67
	2.00	10.00	59.69	475.00	68.23	73.60	78.97	84.34	89.71
	2.20	11.00	72.20	569.00	82.58	89.00	95.58	102.09	108.52
	2.30	11.50	78.94	628.00	90.23	97.33	104.40	111.50	118.65
	2.60	13.00	100.90	803.00	115.30	124.40	133.50	142.60	151.65
	2.90	14.50	125.50	999.00	143.40	154.70	166.00	177.30	188.63
	3.20	16.00	152.80	1220.00	174.70	188.40	202.20	215.90	229.66
	3.50	17.50	182.80	1460.00	208.90	225.40	241.80	258.30	274.75
	4.00	20.00	238.80	1900.00	272.90	294.40	315.90	337.40	358.92
1×37	1.60	11.20	74.39	595.00	80.30	86.63	92.95	99.27	105.60
	1.80	12.60	94.15	753.00	101.60	109.60	117.60	125.60	133.65
	2.00	14.00	116.20	930.00	125.40	135.30	145.20	155.10	164.95
	2.30	16.10	153.70	1230.00	165.90	179.000	192.00	205.10	218.18
	2.60	18.20	196.40	1570.00	212.00	228.70	245.40	262.10	278.79
	2.90	20.30	244.40	1950.00	263.80	284.600	305.40	322.20	338.93
	3.20	22.40	297.60	2380.00	321.30	346.60	371.90	397.10	422.44
	3.50	24.50	356.00	3050.00	384.30	414.60	444.80	475.10	505.34
4.00	28.00	465.00	3720.00	502.00	541.50	581.00	620.50	660.07	

- 注 1. 镀锌层厚度分 3 级: A、B、C。  
 2. 标记示例: 结构 1×7、直径 9.0mm、抗拉强度 1670MPa、A 级锌层的钢绞线标记为: 1×7—9.0—1670—A—YB/T 5004—2012。  
 3. 表中未列入的中间规格钢绞线, 最小破断拉力按公式计算。钢绞线最小破断拉力=钢绞线内钢丝破断拉力综合×换算系数。结构 1×3、1×7、1×19、1×37 的换算系数分别为 0.92、0.92、0.9、0.85。  
 4. 镀锌钢丝的密度按 7.79g/cm<sup>3</sup> 计算。

表 A-3 LH<sub>A</sub>GJ、LH<sub>B</sub>GJ 钢芯铝合绞线 (GB 9329—1988)

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	根数/直径 (mm)		计算截面 (mm <sup>2</sup> )		外径 (mm)	单位长度质量 (kg/km)		计算 拉断力 (kN)	直流电阻 (不大于, Ω/km)	交货 长度 (m)	
	铝合金	钢	铝合金	钢		LH <sub>A</sub> GJ LH <sub>B</sub> GJ	LH <sub>A</sub> GJF <sub>1</sub> LH <sub>B</sub> GJF <sub>1</sub>				LH <sub>A</sub> GJF <sub>2</sub> LH <sub>B</sub> GJF <sub>2</sub>
10/2	6/1.50	1/1.50	10.60	1.76	4.50	29.0	13.7	42.8	5.18	3.14026	3000
16/3	6/1.85	1/1.85	16.12	2.68	5.55	44.2	20.9	65.1	7.89	2.06494	3000
25/4	6/2.32	1/2.32	25.36	4.22	6.96	69.5	32.8	102.4	12.26	1.31272	3000
35/6	6/2.72	1/2.72	34.86	5.81	8.16	95.5	45.2	140.7	16.86	0.95487	3000
50/8	6/3.20	1/3.20	48.25	8.04	9.60	132.2	62.5	194.8	23.05	0.68999	2000
50/30	12/2.32	7/2.32	50.72	29.59	11.60	139.9	231.2	371.1	48.58	0.65628	3000
70/10	6/3.80	1/3.80	68.04	11.34	11.40	186.5	88.2	274.7	32.51	0.48930	2000
70/40	12/2.72	7/2.72	69.72	40.67	13.60	192.3	317.7	520.6	66.78	0.47743	2000
95/15	26/2.15	7/1.67	94.39	15.33	13.61	260.4	119.7	380.2	45.72	0.35508	2000
95/55	12/3.20	7/3.20	96.50	56.29	16.00	266.2	439.8	706.0	90.46	0.34494	2000
120/7	18/2.90	1/2.90	118.89	6.60	14.50	327.1	51.3	378.5	42.47	0.28114	2000
120/20	26/2.38	7/1.85	115.66	18.81	15.07	319.1	147.0	466.1	56.05	0.2878	2000
120/70	12/3.60	7/3.60	122.14	71.25	18.00	336.9	556.6	893.6	114.50	0.27253	2000
150/8	18/3.20	1/3.20	144.76	8.04	16.00	398.3	62.5	460.9	51.43	0.23090	2000
150/25	26/2.70	7/2.10	148.86	24.24	17.10	410.7	189.4	606.4	72.18	0.22361	2000
185/10	18/3.60	1/3.60	183.21	10.17	18.00	504.1	79.1	583.3	65.09	0.18244	2000
185/30	26/2.98	7/2.32	181.34	29.59	18.88	500.3	231.2	731.5	86.98	0.18356	2000
210/10	18/3.80	1/3.80	204.14	11.34	19.00	561.7	88.2	649.9	72.52	0.16374	2000
210/35	26/3.22	7/2.50	211.72	34.36	20.38	584.1	268.4	852.6	101.35	0.15722	2000
240/30	24/3.60	7/2.40	244.29	31.66	21.60	673.6	247.4	921.0	107.85	0.13626	2000
240/40	26/3.42	7/2.66	238.84	38.90	21.66	658.9	303.9	962.9	114.48	0.13937	2000
300/20	45/2.93	7/1.95	303.41	20.90	23.43	837.7	163.3	1001.0	113.70	0.10791	2000
300/50	26/3.83	7/2.98	299.54	48.82	24.26	826.4	381.4	1207.9	143.62	0.11189	2000
300/70	30/3.60	7/3.60	305.36	71.25	25.20	843.3	556.6	1400.0	168.36	0.10987	2000
400/25	45/3.33	7/2.22	391.91	27.09	26.64	1082.0	211.6	1293.7	146.97	0.08493	1500
400/50	54/3.07	7/3.07	399.72	51.81	27.63	1104.7	404.8	1509.6	174.67	0.08328	1500
440/95	30/4.16	19/2.50	407.75	93.26	29.14	1126.1	731.2	1857.4	226.01	0.08164	1500
500/35	45/3.75	7/2.50	497.00	34.36	30.00	1372.2	268.4	1640.6	185.22	0.06698	1500
500/65	54/3.44	7/3.44	501.88	65.05	30.96	1387.0	508.3	1895.4	219.31	0.06632	1500
630/45	45/4.20	7/2.80	623.44	43.10	33.60	1721.3	336.7	2058.0	232.34	0.05339	1200
630/80	54/3.87	19/2.32	635.19	80.31	34.82	1755.5	629.7	2385.2	278.14	0.05285	1200
800/55	45/4.80	7/3.20	814.30	56.29	38.40	2248.2	439.8	2688.1	301.50	0.04087	1000
800/100	54/4.33	19/2.60	795.16	100.87	38.98	2197.6	790.8	2988.5	348.57	0.04186	1000
1000/45	72/4.21	7/2.80	1002.7	43.10	42.08	2769.2	336.7	3105.9	343.71	0.03348	1000
1000/125	54/4.84	19/2.90	993.51	125.49	43.54	2745.8	983.9	3729.8	434.91	0.03379	1000

注 1. 钢芯铝合绞线型号: LH<sub>A</sub>GJ 为钢芯热处理铝镁硅合金绞线; LH<sub>B</sub>GJ 为钢芯热处理的铝镁硅合金绞线; LH<sub>A</sub>GJF<sub>1</sub>、LH<sub>A</sub>GJF<sub>2</sub> 分别为轻防腐、防腐钢芯热处理的铝镁硅合金绞线; LH<sub>B</sub>GJF<sub>1</sub>、LH<sub>B</sub>GJF<sub>2</sub> 分别为轻防腐、防腐钢芯热处理的铝镁硅合金绞线。  
 2. 产品型号、规格及标准编号方法举例: 标称截面: 铝合金 400mm<sup>2</sup>、钢 50mm<sup>2</sup> 的钢芯热处理的铝镁硅合金绞线, 表示为 LH<sub>B</sub>GJ-400/50 GB 9329-1988。

表 A-4 LHAJ、LHBJ 铝合金绞线 (GB 9329—1988)

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	根数/直径 (mm)	计算截面 (mm <sup>2</sup> )	外 径 (mm)	单位长度质量 (kg/km)	计算拉断力 (kN)	直流电阻 (不大于, Ω/km)	交货长度 (m)
10	7/1.35	10.02	4.05	27.4	2.80	3.31596	4000
16	7/1.71	16.08	5.13	44.0	4.49	2.06573	4000
25	7/2.13	24.94	6.39	68.2	6.97	1.33204	3000
35	7/2.52	34.91	7.56	95.5	9.75	0.95165	2000
50	7/3.02	50.14	9.06	137.1	14.00	0.66262	1500
70	7/3.57	70.07	10.71	191.6	19.57	0.47418	1250
95	7/4.16	95.14	12.48	260.2	26.57	0.34921	1000
120	19/2.84	120.36	14.20	330.9	33.62	0.27605	1500
150	19/3.17	149.96	15.85	412.2	41.88	0.22269	1250
185	19/3.52	184.90	17.60	508.3	51.64	0.18061	1000
210	19/3.75	209.85	18.75	576.8	58.61	0.15833	1000
240	19/4.01	239.96	20.05	659.6	67.02	0.13847	1000
300	37/3.21	299.43	22.47	825.2	83.63	0.11181	1000
400	37/3.71	399.98	25.97	1102.3	111.71	0.08370	1000
500	37/4.15	500.48	29.05	1379.2	139.78	0.06639	1000
630	61/3.63	631.30	32.67	1742.2	176.32	0.05310	1000
800	61/4.09	801.43	36.81	2211.7	223.84	0.04183	1000
1000	61/4.57	1000.58	41.13	2761.3	279.46	0.03351	1000

注 1. 铝合金绞线型号表示: LHAJ 为热处理铝镁硅合金绞线; JHBJ 为热处理铝镁硅稀土合金绞线。

2. 产品型号、规格及标准编号方法举例: 标称截面为 400mm<sup>2</sup> 的热处理铝镁硅合金绞线, 表示为 LHAJ-400 GB 9329—1988。

表 A-5 JL 铝绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面铝	规格号	计算面积 (mm <sup>2</sup> )	单线根数 <i>n</i>	直径		单位长度 质 量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)	直流电阻 (20℃, Ω/km)
				单线 (mm)	绞线 (mm)			
10	10	10	7	1.35	4.05	27.4	1.95	2.8633
16	16	16		1.71	5.12	43.8	3.04	1.7896
25	25	25		2.13	6.40	68.4	4.50	1.1453
40	40	40		2.70	8.09	109.4	6.80	0.7158
63	63	63		3.39	10.2	172.3	10.39	0.4545
100	100	100	19	2.59	12.9	274.8	17.00	0.2877
125	125	125		2.89	14.5	343.6	21.25	0.2302
160	160	160		3.27	16.4	439.8	26.40	0.1798
200	200	200		3.66	18.3	549.7	32.00	0.1439
250	250	250		4.09	20.5	687.1	40.00	0.1151
315	315	315	37	3.29	23.0	867.9	51.97	0.0916
400	400	400		3.71	26.0	1102.0	64.00	0.0721
450	450	450		3.94	27.5	1239.8	72.00	0.0641
500	500	500		4.15	29.0	1377.6	80.00	0.0577
560	560	560		4.39	30.7	1542.9	89.60	0.0515
630	630	630	61	3.63	32.6	1738.3	100.80	0.0458
710	710	710		3.85	34.6	1959.1	113.60	0.0407
800	800	800		4.09	36.8	2207.4	128.00	0.0361
900	900	900		4.33	39.0	2483.3	144.00	0.0321
1000	1000	1000		4.57	41.1	2759.2	160.00	0.0289
1120	1120	1120	91	3.96	43.5	3093.5	179.20	0.0258
1250	1250	1250		4.18	46.0	3452.6	200.00	0.0231
1400	1400	1400		4.43	48.7	3866.9	224.00	0.0207
1500	1500	1500		4.58	50.4	4143.1	240.00	0.0193

表 A-6 JLHA2 铝合金绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝合金	规格号	面积 (mm <sup>2</sup> )	单线根数 <i>n</i>	直径		单位长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)	直流电阻 (20℃, Ω/km)
				单线 (mm)	绞线 (mm)			
20	16	18.4	7	1.83	5.49	50.4	5.43	1.7896
30	25	28.8		2.29	6.86	78.7	8.49	1.1453
45	40	46.0		2.89	8.68	125.9	13.58	0.7158
75	63	72.5		3.63	10.9	198.3	21.39	0.4545
120	100	115	19	2.78	13.9	316.3	33.95	0.2877
145	125	144		3.10	15.5	395.4	42.44	0.2302
185	160	184		3.51	17.6	506.1	54.32	0.1798
230	200	230		3.93	19.6	632.7	67.91	0.1439
300	250	288		4.39	22.0	790.8	84.88	0.1151
360	315	363	37	3.53	24.7	998.9	106.95	0.0916
465	400	460		3.98	27.9	1268.4	135.81	0.0721
520	450	518		4.22	29.6	1426.9	152.79	0.0641
580	500	575		4.45	31.2	1585.5	169.76	0.0577
650	560	645	61	3.67	33.0	1778.4	190.14	0.0516
720	630	725		3.89	35.0	2000.7	213.90	0.0458
825	710	817		4.13	37.2	2254.8	241.07	0.0407
930	800	921		4.38	39.5	2540.6	271.62	0.0361
1050	900	1036	91	3.81	41.8	2861.1	305.58	0.0321
1150	1000	1151		4.01	44.1	3179.0	339.53	0.0289
1300	1120	1289		4.25	46.7	3560.5	380.27	0.0258
1450	1250	1439		4.49	49.4	3973.7	424.41	0.0231

表 A-7 JLHA1 铝合金绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝合金	规格号	面积 (mm <sup>2</sup> )	单线根数 <i>n</i>	直径		单位长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)	直流电阻 (20℃, Ω/km)
				单线 (mm)	绞线 (mm)			
20	16	18.6	7	1.84	5.52	50.8	6.04	1.7896
30	25	29.0		2.30	6.90	79.5	9.44	1.1453
45	40	46.5		2.91	8.72	127.1	15.10	0.7158
75	63	73.2		3.65	10.9	200.2	23.06	0.4545
120	100	116	19	2.79	14.0	319.3	37.76	0.2877
145	125	145		3.12	15.6	399.2	47.20	0.2302
185	160	186		3.53	17.6	511.0	58.56	0.1798
230	200	232		3.95	19.7	638.7	73.20	0.1439
300	250	290		4.41	22.1	798.4	91.50	0.1151
360	315	366	37	3.55	24.8	1008.4	115.29	0.0916
465	400	465		4.00	28.0	1280.5	146.40	0.0721
520	450	523		4.24	29.7	1440.5	164.70	0.0641
580	500	581		4.47	31.3	1600.6	183.00	0.0577
650	560	651	61	3.69	33.2	1795.3	204.96	0.0516
720	630	732		3.91	35.2	2019.8	230.58	0.0458
825	710	825		4.15	37.3	2276.2	259.86	0.0407
930	800	930		4.40	39.6	2564.8	292.80	0.0361
1050	900	1046	91	3.83	42.1	2888.3	329.40	0.0321
1150	1000	1162		4.03	44.4	3209.3	366.00	0.0289
1300	1120	1301		4.27	46.9	3594.4	409.92	0.0258

表 A-8 JL/G1A、JL/G1B、JL/G2A、JL/G2B、JL/G3A 钢芯铝绞线 (GB/T 1179—2008)

标称截 面铝/钢	规格 号	钢 比 (%)	面积 (mm <sup>2</sup> )		单线根数		单线直径 (mm)		直径 (mm)		单位 长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)					直流 电阻 (20℃, Ω/km)
			铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯		绞线	JL/G1A	JL/G1B	JL/G2A	JL/G2B	
16/3	16	17	16	2.67	18.7	6	1	1.84	1.84	1.84	5.53	6.08	5.89	6.45	6.27	6.83	1.7934
25/4	25	17	25	4.17	29.2	6	1	2.30	2.30	2.30	6.91	9.13	8.83	9.71	9.42	10.25	1.1478
40/6	40	17	40	6.67	46.7	6	1	2.91	2.91	2.91	8.74	14.40	13.93	15.33	14.87	16.20	0.7174
65/10	63	17	63	10.5	73.5	6	1	3.66	3.66	3.66	11.0	254.4	20.58	22.37	21.63	24.15	0.4555
100/17	100	17	100	16.7	117	6	1	4.61	4.61	4.61	13.8	403.8	32.67	35.50	34.33	38.33	0.2869
125/7	125	6	125	6.94	132	18	1	2.97	2.97	2.97	14.9	397.9	28.68	30.14	29.65	31.04	0.2304
125/20	125	16	125	20.4	145	26	7	2.47	1.92	5.77	15.7	503.9	44.27	48.54	47.12	51.39	0.2310
160/9	160	6	160	8.89	169	18	1	3.36	3.36	3.36	16.8	509.3	35.29	37.42	36.80	38.67	0.1800
160/26	160	16	160	26.1	186	26	7	2.80	2.18	6.53	17.7	644.9	55.86	61.34	59.51	64.99	0.1805
200/11	200	6	200	11.1	211	18	1	3.76	3.76	3.76	18.8	636.7	43.11	45.00	44.22	46.89	0.1440
200/32	200	16	200	32.6	233	26	7	3.13	2.43	7.30	19.8	806.2	67.85	74.69	72.41	78.93	0.1444
250/25	250	10	250	24.6	275	22	7	3.80	2.11	6.34	21.6	880.6	67.01	72.16	70.44	75.60	0.1154
250/40	250	16	250	40.7	291	26	7	3.50	2.72	8.16	22.2	1007.7	84.82	93.37	90.52	98.66	0.1155
315/22	315	7	315	21.8	337	45	7	2.99	1.99	5.97	23.9	1039.6	77.51	82.08	80.55	85.13	0.0917
315/50	315	16	315	51.3	366	26	7	3.93	3.05	9.16	24.9	1269.7	101.70	114.02	110.43	121.20	0.0917
400/28	400	7	400	27.7	428	45	7	3.36	2.24	6.73	26.9	1320.1	96.42	102.23	100.29	106.10	0.0722
400/50	400	13	400	51.9	452	54	7	3.07	3.07	9.21	27.6	1510.3	117.85	130.30	126.67	137.56	0.0723
450/30	450	7	450	31.1	481	45	7	3.57	2.38	7.14	28.5	1485.2	107.47	105.29	109.64	115.87	0.0642
450/60	450	13	450	58.3	508	54	7	3.26	3.26	9.77	29.3	1699.1	138.42	132.58	142.50	154.75	0.0643
500/35	500	7	500	34.6	535	45	7	3.76	2.51	7.52	30.1	1650.2	119.41	116.99	121.83	128.74	0.0578
500/65	500	13	500	64.8	565	54	7	3.43	3.43	10.3	30.9	1887.9	153.80	147.31	158.33	171.94	0.0578
560/40	560	7	560	38.7	599	45	7	3.98	2.65	7.96	31.8	1848.2	133.74	131.03	136.45	144.19	0.0516
560/70	560	13	560	70.9	631	54	19	3.63	2.18	10.9	32.7	2103.4	172.59	167.63	182.52	192.45	0.0516
630/45	630	7	630	43.6	674	45	7	4.22	2.81	8.44	33.8	2079.2	150.45	147.40	156.55	162.21	0.0459
630/80	630	13	630	79.8	710	54	19	3.85	2.31	11.6	34.7	2366.3	191.77	186.19	202.94	213.32	0.0459
710/50	710	7	710	49.1	759	45	7	4.48	2.99	8.96	35.9	2343.2	169.56	166.12	176.43	172.99	0.0407
710/90	710	13	710	89.9	800	54	19	4.09	2.45	12.3	36.8	2666.8	216.12	209.83	228.71	222.42	0.0407
800/35	800	4	800	34.6	835	72	7	3.76	2.51	7.52	37.6	2480.2	167.41	164.99	172.25	167.83	0.0361
800/65	800	8	800	66.7	867	84	7	3.48	3.48	10.4	38.3	2732.7	205.33	198.67	214.67	210.00	0.0362
800/100	800	13	800	101	901	54	19	4.34	2.61	13.0	39.1	3004.9	243.52	236.43	257.71	250.61	0.0362
900/40	900	4	900	38.9	939	72	7	3.99	2.66	7.98	39.9	2790.2	188.33	185.61	193.78	191.06	0.0321
900/75	900	8	900	75.0	975	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	3074.2	266.50	219.00	231.75	226.50	0.0322
1000/45	1000	4	1000	43.2	1043	72	7	4.21	2.80	8.41	42.1	3100.3	209.26	206.23	215.31	212.28	0.0289
1120/50	1120	4	1120	47.3	1167	72	19	4.45	1.78	8.90	44.5	3464.9	234.53	231.22	241.15	237.84	0.0258
1120/90	1120	8	1120	91.2	1211	84	19	4.12	2.47	12.4	45.3	3811.5	283.17	276.78	295.94	289.55	0.0258
1250/50	1250	4	1250	52.8	1303	72	19	4.70	1.88	9.40	47.0	3867.1	261.75	258.06	269.14	265.44	0.0231
1250/100	1250	8	1250	102	1352	84	19	4.35	2.61	13.1	47.9	4253.9	316.04	308.91	330.29	323.16	0.0232

注 表中性能同样适用于 JL/G1AF、JL/G2AF、JL/G3AF 防腐型钢芯铝绞线。

表 A-9 JLHA2/G1A、JLHA2/G1B、JLHA2/G3A 钢芯铝合绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝/钢	规格号	钢 比 (%)	面积 (mm <sup>2</sup> )				单线根数		单线直径 (mm)			直径 (mm)		单位 长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)			直流 电阻 (20℃, Ω/km)
			铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢	绞线	JLHA2/G1A	JLHA2/G1B		JLHA2/G3A			
																铝	钢	
18/3	16	17	18.4	3.07	21.5	6	1	1.98	1.98	1.98	5.93	74.4	9.02	8.81	9.88	1.793		
30/5	25	17	28.8	4.80	33.6	6	1	2.47	2.47	2.47	7.41	116.2	13.96	13.62	15.25	1.147		
40/7	40	17	46.0	7.67	53.7	6	1	3.13	3.13	3.13	9.38	185.9	22.02	21.25	24.17	0.717		
70/12	63	17	72.5	12.1	84.6	6	1	3.92	3.92	3.92	11.8	292.8	34.68	33.48	37.58	0.455		
115/6	100	6	115	6.39	121	18	1	2.85	2.85	2.85	14.3	366.4	41.24	40.79	42.97	0.2880		
145/8	125	6	144	7.99	152	18	1	3.19	3.19	3.19	16.0	458.0	51.23	50.43	53.47	0.230		
145/23	125	16	144	23.4	167	26	7	2.65	2.06	2.06	16.8	579.9	69.86	68.22	76.42	0.231		
185/10	160	6	184	10.2	194	18	1	3.61	3.61	3.61	18.0	586.2	65.58	64.56	68.03	0.180		
185/30	160	16	184	30.0	214	26	7	3.00	2.34	2.34	19.0	742.3	88.52	86.42	96.61	0.180		
230/13	200	6	230	12.8	243	18	1	4.04	4.04	4.04	20.2	732.8	81.97	80.69	85.04	0.144		
230/38	200	16	230	37.5	268	26	7	3.36	2.61	2.61	21.3	927.9	110.64	108.02	120.77	0.144		
290/28	250	10	288	28.3	316	22	7	4.08	2.27	2.27	23.1	1013.5	117.09	115.12	124.72	0.115		
290/45	250	16	288	46.9	355	26	7	3.75	2.92	2.92	23.8	1159.8	138.31	135.03	150.96	0.115		
365/25	315	7	363	25.1	388	45	7	3.20	2.14	2.14	25.6	1196.5	136.28	134.52	143.30	0.091		
365/60	315	16	363	59.0	422	26	7	4.21	3.28	3.28	26.7	1461.4	171.90	166.00	188.44	0.091		
460/30	400	7	460	31.8	492	45	7	3.61	2.41	2.41	28.9	1519.4	172.10	169.87	180.69	0.072		
460/60	400	13	460	59.7	520	54	7	3.29	3.29	3.29	29.7	1738.3	201.46	195.49	218.17	0.072		
520/35	450	7	518	35.8	554	45	7	3.83	2.55	2.55	30.6	1709.3	193.61	191.10	203.28	0.064		
520/67	450	13	518	67.1	585	54	7	3.49	3.49	3.49	31.5	1955.6	226.64	219.93	245.44	0.064		
575/40	500	7	575	39.8	615	45	7	4.04	2.69	2.69	32.3	1899.3	215.12	212.33	225.86	0.057		
575/75	500	13	575	74.6	650	54	7	3.68	3.68	3.68	33.2	2172.9	251.82	244.36	269.73	0.057		
645/45	560	7	645	44.6	689	45	7	4.27	2.85	2.85	34.2	2127.2	240.93	237.82	252.97	0.051		
645/80	560	13	645	81.6	726	54	19	3.90	2.34	2.34	35.1	2420.9	283.21	277.49	305.25	0.051		
725/30	630	4	725	31.3	756	72	7	3.58	2.39	2.39	35.8	2248.0	249.62	247.43	258.08	0.045		
725/90	630	13	725	91.8	817	54	19	4.13	2.48	2.48	37.2	2723.5	318.61	312.18	343.4	0.045		
820/35	710	4	817	35.3	852	72	7	3.80	2.53	2.53	38.0	2533.4	281.32	278.85	290.85	0.040		
820/100	710	13	817	104	921	54	19	4.39	2.63	2.63	39.5	3069.4	359.06	351.82	387.01	0.040		
920/40	800	4	921	39.8	961	72	7	4.04	2.69	2.69	40.4	2854.6	316.98	314.19	327.72	0.036		
920/75	800	8	921	76.7	997	84	7	3.74	3.74	3.74	41.1	3145.1	356.03	348.35	374.44	0.036		
1040/45	900	4	1036	44.8	1081	72	7	4.28	2.85	2.85	42.8	3211.4	356.60	353.47	368.69	0.032		
1040/85	900	8	1036	86.3	1122	84	7	3.96	3.96	3.96	43.6	3538.3	400.53	391.90	421.25	0.032		
1150/95	1000	8	1151	93.7	1245	84	19	4.18	2.51	2.51	45.9	3916.8	446.37	439.81	471.67	0.028		
1300/105	1120	8	1289	105	1391	84	19	4.42	2.65	2.65	48.6	4386.8	499.93	492.59	528.27	0.025		

表 A-10 JLHAI/G1A、JLHAI/G1B、JLHAI/G3A 钢芯铝合绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝/钢	规格号	钢 比 (%)	面积 (mm <sup>2</sup> )			单线根数		单线直径 (mm)		直径 (mm)		单位 长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)			直流 电阻 (20℃, Ω/km)
			铝	钢	总和	铝	钢	铝	钢	钢芯	绞线		JLHAI/G1A	JLHAI/G1B	JLHAI/G3A	
18/3	16	17	18.6	3.10	21.7	6	1	1.99	1.99	1.99	5.96	75.1	9.67	9.45	10.53	1.7934
30/5	25	17	29.0	4.84	33.9	6	1	2.48	2.48	2.48	7.45	117.3	14.96	14.62	16.27	1.1478
35/7	40	17	46.5	7.75	54.2	6	1	3.14	3.14	3.14	9.42	187.7	23.63	22.85	25.79	0.7174
70/12	63	17	73.2	12.2	85.4	6	1	3.94	3.94	3.94	11.8	295.6	36.48	35.26	39.41	0.4555
115/6	100	6	116	6.46	123	18	1	2.87	2.87	2.87	14.3	369.9	45.12	44.67	46.86	0.2880
145/8	125	6	145	8.07	153	18	1	3.21	3.21	3.21	16.0	462.3	56.08	55.27	58.34	0.2304
145/23	125	16	145	23.7	169	26	7	2.67	2.07	6.22	16.9	585.4	74.88	73.22	81.50	0.2310
185/10	160	6	186	10.3	196	18	1	3.63	3.63	3.63	18.1	591.8	69.92	68.89	72.40	0.1800
185/30	160	16	186	30.3	216	26	7	3.02	2.35	7.04	19.1	749.4	94.94	92.82	103.11	0.1805
230/13	200	6	232	12.9	245	18	1	4.05	4.05	4.05	20.3	739.8	87.40	86.11	90.50	0.1444
230/38	200	16	232	37.8	270	26	7	3.37	2.62	7.87	21.4	936.7	118.67	116.02	128.89	0.1444
290/28	250	10	290	28.5	319	22	7	4.10	2.28	6.83	23.2	1023.2	124.02	122.02	131.72	0.1154
290/45	250	16	290	47.3	338	26	7	3.77	2.93	8.80	23.9	1170.9	145.43	142.12	158.21	0.1155
365/25	315	7	366	25.3	391	45	7	3.22	2.15	6.44	25.7	1207.9	148.56	146.78	155.64	0.0917
365/60	315	16	366	59.6	426	26	7	4.23	3.29	9.88	26.8	1475.3	180.86	174.90	197.55	0.0917
460/30	400	7	465	32.1	497	45	7	3.63	2.42	7.25	29.0	1533.9	183.03	180.78	191.71	0.0722
460/60	400	13	465	60.2	525	54	7	3.31	3.31	9.93	29.8	1754.9	217.32	211.29	234.19	0.0723
520/35	450	7	523	36.1	559	45	7	3.85	2.56	7.69	30.8	1725.6	205.91	203.38	215.67	0.0642
520/67	450	13	523	67.8	591	54	7	3.51	3.51	10.5	31.6	1974.2	239.26	232.48	255.52	0.0643
575/40	500	7	581	40.2	621	45	7	4.05	2.70	8.11	32.4	1917.3	228.79	225.98	239.63	0.0578
575/75	500	13	581	75.3	656	54	7	3.70	3.70	11.1	33.3	2193.6	265.84	258.31	283.91	0.0578
645/45	560	7	651	45.0	696	45	7	4.29	2.86	8.58	34.3	2147.4	256.24	253.09	268.39	0.0516
645/80	560	13	651	82.4	733	54	19	3.92	2.35	11.8	35.3	2444.0	298.92	293.15	321.17	0.0516
725/30	630	4	732	31.6	764	72	7	3.60	2.40	7.20	36.0	2269.4	266.64	264.42	275.18	0.0459
725/90	630	13	732	92.7	825	54	19	4.15	2.49	12.5	37.4	2749.5	336.28	329.79	361.32	0.0459
820/35	710	4	825	35.6	861	72	7	3.82	2.55	7.64	38.2	2557.6	300.50	298.00	310.12	0.0407
820/100	710	13	825	104	929	54	19	4.41	2.65	13.2	39.7	3098.6	378.98	371.67	407.20	0.0407
920/40	800	4	930	40.2	970	72	7	4.05	2.70	8.11	40.5	2881.8	338.59	335.78	349.43	0.0361
920/75	800	8	930	77.5	1007	84	7	3.75	3.75	11.3	41.3	3175.1	378.01	370.26	396.60	0.0362
1040/45	900	4	1046	45.2	1091	72	7	4.30	2.87	8.60	43.0	3242.0	380.91	377.75	393.11	0.0321
1040/85	900	8	1046	87.1	1133	84	7	3.98	3.98	11.9	43.8	3572.0	425.26	416.54	446.17	0.0322
1150/95	1000	8	1162	94.6	1257	84	19	4.20	2.52	12.6	46.2	3954.1	473.86	467.24	499.40	0.0289
1300/105	1120	8	1301	106	1407	84	19	4.44	2.66	13.3	48.9	4428.6	530.72	523.30	559.33	0.0258

表 A-11 JL/LHA2 铝合金芯铝绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝/铝合金	规格号	直径		单线根数 $n$		面积 (mm <sup>2</sup> )			单位长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)	直流电阻 (20℃, Ω/km)
		单线 (mm)	导体 (mm)	铝	铝合金	铝	铝合金	总			
10/7	16	1.76	5.28	4	3	9.73	7.30	17.0	46.6	3.85	1.7896
15/10	25	2.20	6.60	4	3	15.2	11.4	26.6	72.8	5.93	1.1453
24/20	40	2.78	8.35	4	3	24.3	18.3	42.6	116.5	9.25	0.7158
40/30	63	3.49	10.5	4	3	38.3	28.7	67.1	183.5	14.38	0.4545
60/45	100	4.40	13.2	4	3	60.8	45.6	106	291.2	22.52	0.2863
80/50	125	2.97	14.9	12	7	83.3	48.6	132	362.7	27.79	0.2302
105/60	160	3.36	16.8	12	7	107	62.2	169	464.2	35.04	0.1798
135/80	200	3.76	18.8	12	7	133	77.8	211	580.3	43.13	0.1439
170/95	250	4.21	21.0	12	7	167	97.2	264	725.3	53.92	0.1151
130/140	250	3.04	21.3	18	19	131	138	269	742.2	60.39	0.1154
265/60	315	3.34	23.4	30	7	263	61.3	324	892.6	60.52	0.0916
165/175	315	3.42	23.9	18	19	165	174	339	935.1	76.09	0.0916
335/80	400	3.76	26.3	30	7	334	77.8	411	1133.5	75.19	0.0721
210/220	400	3.85	27.0	18	19	210	221	431	1187.5	95.58	0.0721
375/85	450	3.99	27.9	30	7	375	87.6	463	1275.2	84.59	0.0641
235/250	450	4.08	28.6	18	19	236	249	485	1335.9	107.52	0.0641
415/95	500	4.21	29.4	30	7	417	97.3	514	1416.9	93.98	0.0577
260/275	500	4.31	30.1	18	19	262	277	539	1484.3	119.47	0.0577
465/110	560	4.45	31.2	30	7	467	109	576	1586.9	105.26	0.0515
505/65	560	3.45	31.0	54	7	504	65.4	570	1571.9	101.54	0.0516
455/205	630	3.71	33.4	42	19	454	205	660	1820.0	130.25	0.0458
270/420	630	3.79	34.1	24	37	271	417	688	1897.5	160.19	0.0458
514/230	710	3.94	35.5	42	19	512	232	743	2051.2	146.78	0.0407
307/470	710	4.02	36.2	24	37	305	470	775	2138.4	180.53	0.0407
580/260	800	4.18	37.6	42	19	577	261	838	2311.2	165.39	0.0361
345/530	800	4.27	38.4	24	37	344	530	873	2409.5	203.41	0.0361
650/295	900	4.43	39.9	42	19	649	294	942	2600.1	186.06	0.0321
570/390	900	3.66	40.2	54	37	567	388	955	2638.4	199.54	0.0321
820/215	1000	3.80	41.8	72	19	816	215	1032	2849.1	190.94	0.0289
630/430	1000	3.85	42.4	54	37	630	432	1061	2931.6	221.71	0.0289
915/240	1120	4.02	44.2	72	19	914	241	1155	3191.0	213.85	0.0258
705/485	1120	4.08	44.9	54	37	705	483	1189	3283.4	248.32	0.0258
1020/270	1250	4.25	46.7	72	19	1020	269	1289	3561.4	238.68	0.0231
790/540	1250	4.31	47.4	54	37	787	539	1327	3664.5	277.14	0.0231
1145/300	1400	4.50	49.4	72	19	1143	302	1444	3988.8	267.32	0.0207

表 A-12 JL/LHA1 铝合金芯铝绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝/铝合金	规格号	直径 (mm)		单线根数 $n$		面积 (mm <sup>2</sup> )			单位长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)	直流电阻 (20℃, Ω/km)
		单线	导体	铝	铝合金	铝	铝合金	总			
10/7	16	1.76	5.29	4	3	9.78	7.33	17.1	46.8	4.07	1.7896
15/10	25	2.21	6.62	4	3	15.3	11.5	26.7	73.1	6.29	1.1453
24/20	40	2.79	8.37	4	3	24.4	18.3	42.8	117.0	9.82	0.7158
40/30	63	3.50	10.5	4	3	38.5	28.9	67.4	184.3	14.80	0.4545
60/45	100	4.41	13.2	4	3	61.1	45.8	107	292.5	23.49	0.2863
80/50	125	2.98	14.9	12	7	84	48.8	132	364.1	29.49	0.2302
105/60	160	3.37	16.9	12	7	107	62.5	170	466.0	36.95	0.1798
135/80	200	3.77	18.8	12	7	134	78.1	212	582.5	44.78	0.1439
170/95	250	4.21	21.1	12	7	167	97.6	265	728.1	55.98	0.1151
130/140	250	3.05	21.4	18	19	132	139	271	746	64.67	0.1154
265/60	315	3.34	23.4	30	7	263	61.4	325	894.4	62.40	0.0916
165/175	315	3.43	24.0	18	19	166	175	341	940.0	81.48	0.0916
335/80	400	3.77	26.4	30	7	334	78	412	1135.8	76.82	0.0721
210/220	400	3.86	27.0	18	19	211	222	433	1193.7	100.30	0.0721
375/85	450	3.99	28.0	30	7	376	87.7	464	1277.8	86.42	0.0641
235/250	450	4.10	28.7	18	19	237	250	487	1342.9	112.84	0.0641
415/95	500	4.21	29.5	30	7	418	97.5	515	1419.8	96.03	0.0577
260/275	500	4.32	30.2	18	19	263	278	542	1492.1	125.38	0.0577
465/110	560	4.46	31.2	30	7	468	109	577	1590.1	107.55	0.0515
505/65	560	3.45	31.1	54	7	505	65.5	570	1573.9	103.53	0.0516
455/205	630	3.72	33.4	42	19	456	206	662	1826.0	134.59	0.0458
270/420	630	3.80	34.2	24	37	272	420	692	1909.0	169.14	0.0458
514/230	710	3.95	35.5	42	19	514	232	746	2057.8	151.68	0.0407
307/470	710	4.03	36.3	24	37	307	473	780	2151.4	190.61	0.0407
580/260	800	4.19	37.7	42	19	579	262	840	2318.7	170.9	0.0361
345/530	800	4.28	38.5	24	37	346	533	879	2424.2	214.78	0.0361
650/295	900	4.44	40.0	42	19	651	294	945	2608.5	192.27	0.0321
570/390	900	3.66	40.3	54	37	569	390	959	2649.5	207.79	0.0321
820/215	1000	3.80	41.8	72	19	818	216	1034	2855.4	195.47	0.0289
630/430	1000	3.86	42.5	54	37	632	433	1066	2943.9	230.88	0.0289
915/240	1120	4.02	44.3	72	19	916	242	1158	3198.1	218.92	0.0258
705/485	1120	4.09	45.0	54	37	708	485	1194	3297.2	258.58	0.0258
1020/270	1250	4.25	46.8	72	19	1022	270	1292	3569.3	244.33	0.0231
790/540	1250	4.32	47.5	54	37	791	542	1332	3679.9	288.6	0.0231
1145/300	1400	4.50	49.5	72	19	1145	302	1447	3997.6	273.65	0.0207

表 A-13 JL/LB1A 铝包钢芯铝绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝/铝包钢	规格号	钢比 (%)	面积 (mm <sup>2</sup> )			单线根数		单线直径(mm)		直径 (mm)		单位长度 质量 (kg/km)	额定 抗拉力 (kN)	直流 电阻 (20℃, Ω/km)
			铝	铝包 钢	总	铝	铝包 钢	铝	铝包 钢	铝包 钢芯	绞线			
15/3	16	16.7	15	2.56	17.9	6	1	1.81	1.81	1.81	5.43	59.0	5.91	1.7923
24/4	25	16.7	24	4.00	28.0	6	1	2.26	2.62	2.26	6.78	92.1	9.00	1.1471
38/5	40	16.7	38	6.40	44.8	6	1	2.85	2.85	2.85	8.55	147.4	14.21	0.7169
60/10	63	16.7	60	10.08	70.6	6	1	3.58	3.58	3.58	10.7	232.2	21.17	0.4552
95/15	100	16.7	96	16.00	112	6	1	4.51	4.51	4.51	13.5	368.6	31.84	0.2868
125/5	125	5.6	123	6.85	130	18	1	2.95	2.95	2.95	14.8	384.3	29.18	0.2304
120/20	125	16.3	120	19.6	140	26	7	2.43	1.89	5.66	15.4	460.8	44.49	0.2308
160/10	160	5.6	158	8.77	167	18	1	3.34	3.34	3.34	16.7	491.9	36.38	0.1800
155/25	160	16.3	154	25.00	179	26	7	2.74	2.13	6.40	17.4	589.8	56.18	0.1803
200/10	200	5.6	197	10.96	208	18	1	3.74	3.74	3.74	18.7	614.9	43.62	0.1440
200/30	200	16.3	192	31.3	223	26	7	3.07	2.39	7.16	19.4	737.2	69.27	0.1443
250/25	250	9.8	244	24.0	268	22	7	3.76	2.09	6.26	21.3	830.9	67.80	0.1153
250/40	250	16.3	240	39.1	279	26	7	3.43	2.67	8.00	21.7	921.5	86.58	0.1154
310/20	315	6.9	310	21.4	331	45	7	2.96	1.97	5.92	23.7	996.4	78.33	0.0917
300/50	315	16.3	303	49.3	352	26	7	3.85	2.99	8.98	24.4	1161.1	107.58	0.0916
395/25	400	6.9	393	27.2	420	45	7	3.34	2.22	6.67	26.7	1265.3	97.50	0.0722
387/50	400	13.0	387	50.2	438	54	7	3.02	3.02	9.07	27.2	1402.9	124.20	0.0723
440/30	450	6.9	442	30.6	473	45	7	3.54	2.36	7.08	28.3	1423.4	107.48	0.0642
435/35	450	13.0	436	36.5	492	54	7	3.21	3.21	9.62	28.9	1578.2	139.7	0.0642
490/35	500	6.9	492	34.0	525	45	7	3.73	2.49	7.46	29.8	1581.6	119.4	0.0578
485/60	500	13.0	484	62.8	547	54	7	3.38	3.38	10.14	30.4	1753.6	153.9	0.0578
550/40	560	6.9	550	38.1	589	45	7	3.95	2.63	7.89	31.6	1771.4	133.7	0.0516
545/70	560	12.7	543	68.8	612	54	19	3.58	2.15	10.73	32.2	1956.3	169.3	0.0516
620/40	630	6.9	619	42.8	662	45	7	4.19	2.79	8.37	33.5	1992.8	150.47	0.0458
610/75	630	12.7	611	77.3	688	54	19	3.79	2.28	11.38	34.2	2200.9	190.5	0.0459
700/50	710	6.9	698	48.3	746	45	7	4.44	2.96	8.89	35.6	2245.8	169.5	0.0407
700/85	710	12.7	688	87.2	775	54	19	4.03	2.42	12.08	36.3	2480.3	214.7	0.0407
790/35	800	4.3	791	34.2	826	72	7	3.74	2.49	7.48	37.4	2412.8	167.6	0.0631
785/65	800	8.3	784	65.3	849	84	7	3.45	3.45	10.34	37.9	2598.9	206.3	0.0362
775/100	800	12.7	775	98.2	874	54	19	4.28	2.57	12.83	38.5	2794.7	241.9	0.0361
900/40	900	4.3	890	38.5	929	72	7	3.97	2.65	7.94	39.7	2714.4	188.63	0.0321
880/75	900	8.3	882	73.5	955	84	7	3.66	3.66	10.97	40.2	2923.8	224.8	0.0321
990/45	1000	4.3	989	42.7	1032	72	7	4.18	2.79	8.37	41.8	3016.0	209.5	0.0289
1110/45	1120	4.2	1108	46.8	1155	72	19	4.43	1.77	8.85	44.3	3372.6	233.4	0.0258
1100/90	1120	8.1	1098	89.4	1187	84	19	4.08	2.45	12.24	44.9	3628.4	282.8	0.0258
1235/50	1250	4.2	1237	52.2	1289	72	19	4.68	1.87	9.35	46.8	3764.1	260.5	0.0231
1225/100	1250	8.1	1225	99.8	1325	84	19	4.31	2.59	12.93	47.4	4049.5	315.7	0.0231

表 A-14 JLHA2/LB1A 铝包钢芯铝合金绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝/铝 包钢	规格 号	钢比 (%)	面积 (mm <sup>2</sup> )			单线根数		单线直径(mm)		直径 (mm)		单位长度 质量 (kg/km)	额定 拉断力 (kN)	直流 电阻 (20℃, Ω/km)
			铝	铝包 钢	总	铝	铝包 钢	铝	铝包 钢	铝包 钢芯	绞线			
15/5	16	16.7	17.6	2.93	20.5	6	1	1.93	1.93	1.93	5.79	67.5	8.7	1.7694
25/5	25	16.7	27.5	4.58	32.0	6	1	2.41	2.41	2.41	7.23	105.4	13.59	1.1324
45/10	40	16.7	43.9	7.32	51.2	6	1	3.05	3.05	3.05	9.15	168.7	21.74	0.7077
70/10	63	16.7	69.2	11.5	80.7	6	1	3.83	3.83	3.83	11.5	265.6	33.09	0.4494
110/20	100	16.7	110	18.3	128	6	1	4.83	4.83	4.83	14.5	421.6	50.70	0.2831
140/10	125	5.6	142	7.87	149	18	1	3.16	3.16	6.16	15.8	441.4	51.21	0.2293
135/20	125	16.3	137	22.4	160	26	7	2.59	2.02	6.05	16.4	527.2	67.40	0.2279
180/10	160	5.6	181	10.1	191	18	1	3.58	3.58	3.58	17.9	565.0	64.94	0.1792
175/30	160	16.3	176	28.6	205	26	7	2.93	2.28	6.85	18.6	674.8	86.27	0.1781
227/10	200	5.6	227	12.6	239	18	1	4.00	4.00	4.00	20.0	706.2	80.67	0.1433
220/35	200	16.3	220	35.8	256	26	7	3.28	2.55	7.66	20.8	843.5	107.8	0.1425
280/30	250	9.8	280	27.5	307	22	7	4.02	2.24	6.71	22.8	952.9	115.53	0.1144
275/45	250	16.3	275	44.8	320	26	7	3.67	2.85	8.56	23.2	1054.4	134.7	0.1140
355/25	315	6.9	355	24.6	380	45	7	3.17	2.11	6.34	25.4	1143.9	134.3	0.0912
345/55	315	16.3	346	56.4	403	26	7	4.12	3.20	9.61	26.1	1328.5	169.84	0.0904
450/30	400	6.9	451	31.2	483	45	7	3.57	2.38	7.15	28.6	1452.5	170.62	0.0718
445/60	400	13.0	444	57.5	501	54	7	3.23	3.23	9.70	29.1	1606.8	199.94	0.0715
560/35	450	6.9	508	35.1	543	45	7	3.79	2.53	7.58	30.3	1634.1	191.94	0.0638
500/65	450	13.0	499	64.7	564	54	7	3.43	3.43	10.3	30.9	1807.7	223.6	0.0636
565/40	500	6.9	564	39.0	603	45	7	4.00	2.66	7.99	32.0	1815.7	213.2	0.0574
555/70	500	13.0	555	71.9	627	54	7	3.62	3.62	10.8	32.6	2008.5	245.6	0.0572
630/45	560	6.9	632	43.7	676	45	7	4.23	2.82	8.46	33.8	2033.6	238.8	0.0513
630/75	560	12.7	622	78.8	701	54	19	3.83	2.30	11.5	34.5	2241.0	277.9	0.0511
710/50	630	6.9	711	49.2	760	45	7	4.49	2.99	8.97	35.9	2287.8	268.72	0.0456
700/90	630	12.7	700	88.6	788	54	19	4.06	2.44	12.2	36.5	2521.1	312.6	0.0454
800/55	710	6.9	801	55.4	857	45	7	4.76	3.17	9.52	38.1	2578.3	302.8	0.0405
790/100	710	12.7	788	99.9	888	54	19	4.31	2.59	12.9	38.8	2841.3	352.3	0.0403
910/40	800	4.3	909	39.3	949	72	7	4.01	2.67	8.02	40.1	2772.7	315.4	0.0360
900/75	800	8.3	899	74.9	974	84	7	3.69	3.69	11.1	40.6	2982.3	347.7	0.0359
890/115	800	12.7	888	113	1001	54	19	4.58	2.75	13.7	41.2	3201.5	397.0	0.0358
1025/45	900	4.3	1023	44.2	1067	72	7	4.25	2.84	8.51	42.5	3119.3	354.89	0.0320
1015/85	900	8.3	1012	84.3	1096	84	7	3.92	3.92	11.7	43.1	3355.1	391.1	0.0319
1140/50	1000	4.3	1137	49.1	1186	72	7	4.48	2.99	8.97	44.8	3465.9	394.3	0.0288
1275/55	1120	4.2	1274	53.8	1327	72	19	4.75	1.90	9.49	47.5	3875.8	440.2	0.0257
1260/100	1120	8.1	1260	103	1362	84	19	4.37	2.62	13.1	48.1	4164.0	494.7	0.0257
1420/60	1250	4.2	1421	60.0	1482	72	19	5.01	2.01	10.0	50.1	4325.6	491.3	0.0231
1405/115	1250	8.1	1406	114	1520	84	19	4.62	2.77	13.8	50.8	4647.3	552.1	0.0230

表 A-15 JLHAI/LBIA 铝包钢芯铝合金绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面 铝/铝包钢	规格号	钢比 (%)	面积 (mm <sup>2</sup> )			单线根数		单线直径(mm)		直径 (mm)		单位长度 质量 (kg/km)	额定 拉断力 (kN)	直流 电阻 (20℃, Ω/km)
			铝	铝包 钢	总	铝	铝包 钢	铝	铝包 钢	铝包 钢芯	绞线			
15/5	16	16.7	17.7	2.96	20.7	6	1	1.94	1.94	1.94	5.82	68.1	9.31	1.7691
25/5	25	16.7	27.7	4.62	32.3	6	1	2.42	2.42	2.41	7.26	106.4	14.54	1.1323
45/5	40	16.7	44.3	7.39	51.7	6	1	3.07	3.07	3.07	9.21	170.2	23.27	0.7077
70/10	63	16.7	69.8	11.6	81.4	6	1	3.85	3.85	3.85	11.6	268.0	34.79	0.4493
110/20	100	16.7	110	18.5	129	6	1	4.85	4.85	4.85	14.6	425.5	53.38	0.2831
143/5	125	5.6	143	7.94	151	18	1	3.18	3.18	3.18	15.9	445.5	55.97	0.2293
140/20	125	16.3	139	22.6	161	26	7	2.61	2.03	6.08	16.5	532.0	72.17	0.2279
185/10	160	5.6	183	10.2	193	18	1	3.60	3.60	3.60	18.0	570.3	69.21	0.1792
180/30	160	16.3	178	28.9	206	26	7	2.95	2.29	6.88	18.7	680.9	92.38	0.1781
230/15	200	5.6	229	12.7	241	18	1	4.02	4.02	4.02	20.1	712.8	86.00	0.1433
220/36	200	16.3	222	36.1	358	26	7	3.30	2.56	7.69	20.9	851.2	115.4	0.1424
282/30	250	9.8	282	27.7	310	22	7	4.04	2.25	6.74	22.9	961.7	122.25	0.1144
275/45	250	16.3	277	45.2	323	26	7	3.69	2.87	8.60	23.4	1064.0	141.5	0.1140
360/25	315	6.9	359	24.8	384	45	7	3.19	2.12	6.37	25.5	1154.6	146.3	0.0912
350/55	315	16.3	349	56.9	406	26	7	4.14	3.22	9.65	26.2	1340.6	178.38	0.0904
455/30	400	6.9	456	31.5	487	45	7	3.59	2.39	7.18	28.7	1466.1	181.32	0.0718
450/60	400	13.0	448	58.1	506	54	7	3.25	3.25	9.75	29.3	1621.6	215.22	0.0715
515/35	450	6.9	513	35.4	548	45	7	3.81	2.54	7.62	30.5	1649.4	203.99	0.0638
505/65	450	13.0	504	65.3	569	54	7	3.45	3.45	10.3	31.0	1824.3	240.8	0.0636
570/40	500	6.9	570	39.4	609	45	7	4.01	2.68	8.03	32.1	1832.6	226.6	0.0574
560/70	500	13.0	560	72.6	632	54	7	3.63	3.63	10.9	32.7	2027.0	259.0	0.0572
640/45	560	6.9	638	44.1	682	45	7	4.25	2.83	8.50	34.0	2052.6	253.8	0.0513
630/80	560	12.7	628	79.5	707	54	19	3.85	2.31	11.5	34.6	2261.6	293.0	0.0511
715/50	630	6.9	718	49.6	767	45	7	4.51	3.00	9.01	36.1	2309.1	285.58	0.0456
705/90	630	12.7	706	89.4	795	54	19	4.08	2.45	12.2	36.7	2544.3	329.6	0.0454
810/55	710	6.9	809	55.9	865	45	7	4.78	3.19	9.57	38.3	2602.3	321.8	0.0405
800/100	710	12.7	796	101	896	54	19	4.33	2.60	13.0	39.0	2867.4	371.5	0.0403
920/40	800	4.3	918	39.7	958	72	7	4.03	2.69	8.06	40.3	2798.8	336.7	0.0360
910/75	800	8.3	908	75.6	983	84	7	3.71	3.71	11.1	40.8	3010.0	369.1	0.0359
900/115	800	12.7	896	114	1010	54	19	4.60	2.76	13.8	41.4	3230.9	418.6	0.0358
1035/45	900	4.3	1033	44.6	1077	72	7	4.27	2.85	8.55	42.7	3148.6	378.9	0.0320
1020/85	900	8.3	1021	85.1	1106	84	7	3.9	3.93	11.8	43.2	3386.3	415.2	0.0319
1150/50	1000	4.3	1148	49.6	1197	72	7	4.50	3.00	9.01	45.0	3498.5	420.9	0.0288
1290/55	1120	4.2	1286	54.3	1340	72	19	4.77	1.91	9.54	47.7	3912.3	470.1	0.0257
1270/105	1120	8.1	1271	104	1375	84	19	4.39	2.63	13.2	48.3	4202.7	524.73	0.0257
1435/60	1250	4.2	1435	60.6	1495	72	19	5.04	2.01	10.1	50.4	4366.4	524.6	0.0231
1420/115	1250	8.1	1419	116	1535	84	19	4.64	2.78	13.9	51.0	4690.5	585.6	0.0230

表 A-16 JG1A、JG1B、JG2A、JG3A 钢绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面钢	规格号	面积 (mm <sup>2</sup> )	单线根数 "n"	直径 (mm)		单位长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)				直流 电阻 (20℃, Ω/km)
				单线	绞线		JG1A	JG1B	JG2A	JG3A	
30	4	27.1	7	2.22	6.66	213.3	36.3	33.6	39.3	43.9	7.1445
40	6.3	42.7	7	2.79	8.36	335.9	55.9	51.7	60.2	67.9	4.5362
65	10	67.8	7	3.51	10.53	533.2	87.4	80.7	93.5	103.0	2.8578
85	12.5	84.7	7	3.93	11.78	666.5	109.3	100.8	116.9	128.8	2.2862
100	16	108.4	7	4.44	13.32	853.1	139.9	129.0	199.7	164.8	1.7861
100	16	108.4	19	2.70	13.48	857.0	142.1	131.2	152.9	172.4	1.7944
150	25	169.4	19	3.37	16.85	1339.1	218.6	201.6	238.9	262.6	1.1484
250	40	271.1	19	4.26	21.31	2142.6	349.7	322.6	374.1	412.1	0.7177
250	40	271.1	37	3.05	21.38	2148.1	349.7	322.6	382.3	420.2	0.7196
400	63	427.0	37	3.83	26.83	3383.2	550.8	508.1	589.3	649.0	0.4569

表 A-17 JLB1A、JLB1B 铝包钢绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面钢	规格号	面积 (mm <sup>2</sup> )	单线根数 "n"	直径 (mm)		单位长度质量 (kg/km)		额定拉断力 (kN)		直流 电阻 (20℃, Ω/km)
				单线	绞线	JLB1A	JLB1B	JLB1A	JLB1B	
15	4	12	7	1.48	4.43	80.1	79.4	16.08	15.84	7.1592
20	6.3	18.9	7	1.85	5.56	126.2	125.0	25.33	24.95	4.5455
30	10	30	7	2.34	7.01	200.3	198.5	40.20	39.60	2.8637
35	12.5	37.5	7	2.61	7.84	250.4	248.1	50.25	49.50	2.2910
50	16	48	7	2.95	8.86	320.5	317.5	64.32	63.36	1.7898
75	25	75	7	3.69	11.08	500.7	496.2	93.75	99.00	1.1455
120	40	120	7	4.67	14.02	801.2	793.9	132.00	158.40	0.7159
120	40	120	19	2.84	14.18	805.0	797.7	160.80	158.40	0.7194
200	63	189	19	3.56	17.79	1267.9	1256.4	240.03	249.48	0.4568
300	100	300	37	3.21	22.49	2017.3	1999.0	402.00	396.00	0.2884
350	125	375	37	3.59	25.15	2521.7	2498.3	476.25	495.00	0.2307
450	160	480	37	4.06	28.45	3227.7	3198.3	580.80	633.60	0.1803
600	200	600	37	4.54	31.81	4034.7	3997.9	684.00	792.00	0.1442
600	200	600	61	3.54	31.85	4040.6	4003.8	762.00	792.00	0.1444

表 A-18 JLB2 铝包钢绞线性能 (GB/T 1179—2008)

标称截面钢	规格号	面积 (mm <sup>2</sup> )	单线根数 "n"	直径 (mm)		单位长度 质量 (kg/km)	额定拉断力 (kN)	直流电阻 (20℃, Ω/km)
				单线	绞线			
35	16	36.2	7	2.56	7.69	216.4	39.04	1.7896
55	25	56.5	7	3.21	9.62	338.2	61.00	1.1454
100	40	90.4	7	4.05	12.2	541.1	97.61	0.7159
100	40	90.4	19	2.46	12.3	543.7	97.61	0.7193
150	63	142	19	3.09	15.4	856.4	153.73	0.4567
220	100	226	37	2.79	19.5	1362.6	244.02	0.2884
300	125	282	37	3.12	21.8	1703.2	305.02	0.2307
350	160	362	37	3.53	24.7	2180.1	390.43	0.1803
450	200	452	37	3.94	27.6	2725.1	488.03	0.1442
450	200	452	61	3.07	27.6	2729.1	488.03	0.1444

## 附录 B 常用杆塔的结构型式和有关尺寸

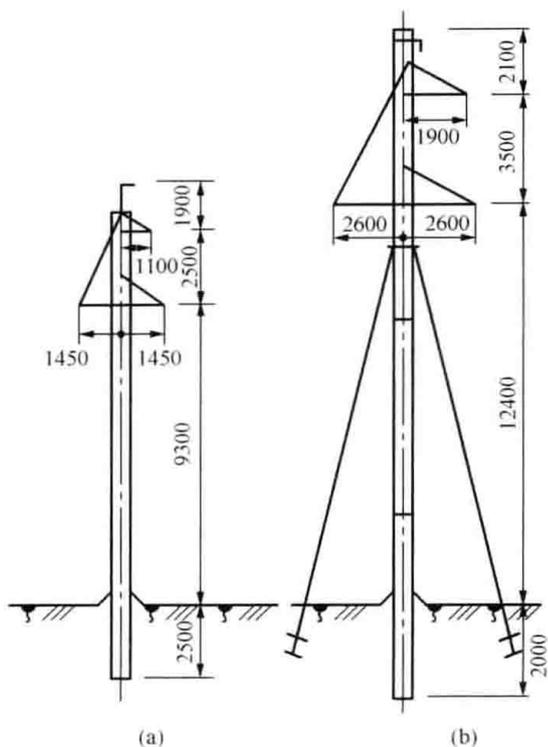


图 B-1 35~110kV 钢筋混凝土直线单杆  
(a) 35kV 单杆; (b) 110kV 单杆

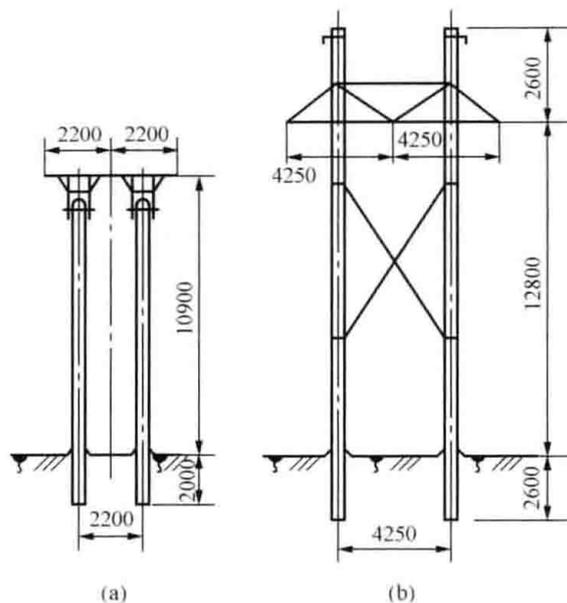


图 B-2 35~110kV 钢筋混凝土直线双杆  
(a) 无地线的 35kV 双杆; (b) 有地线的 110kV 双杆

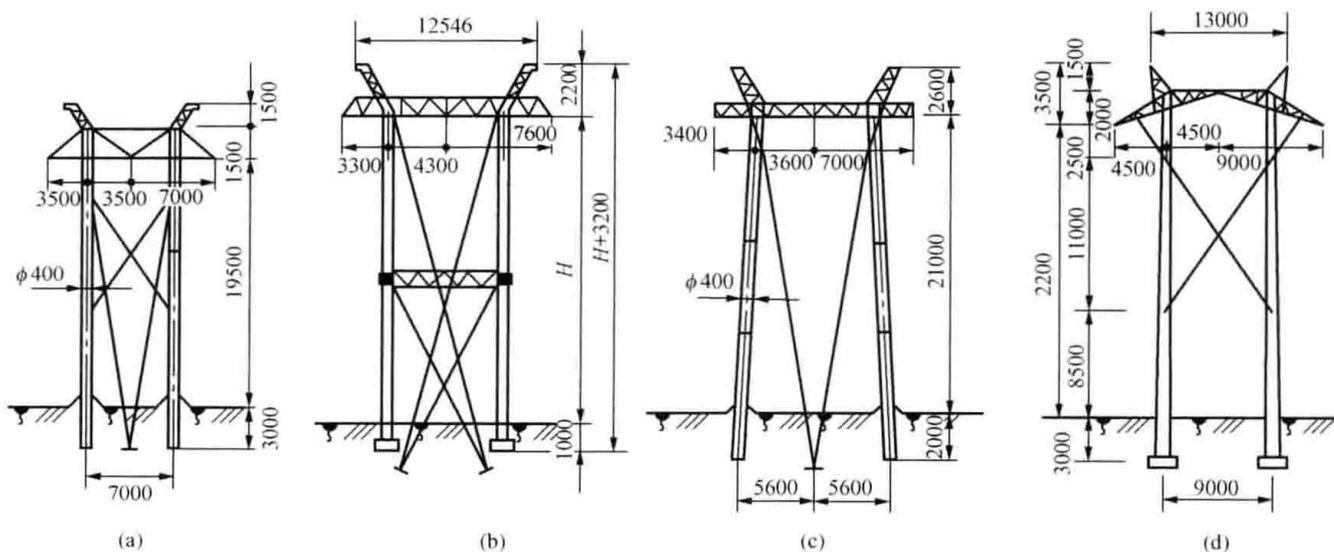


图 B-3 220~330kV 单回路直线双杆  
(a) 220kV 带叉梁、拉线钢筋混凝土直线双杆; (b) 220kV 带横梁、拉线钢筋混凝土直线双杆;  
(c) 220kV 带拉线八字形钢筋混凝土直线双杆; (d) 330kV 钢筋混凝土直线双杆

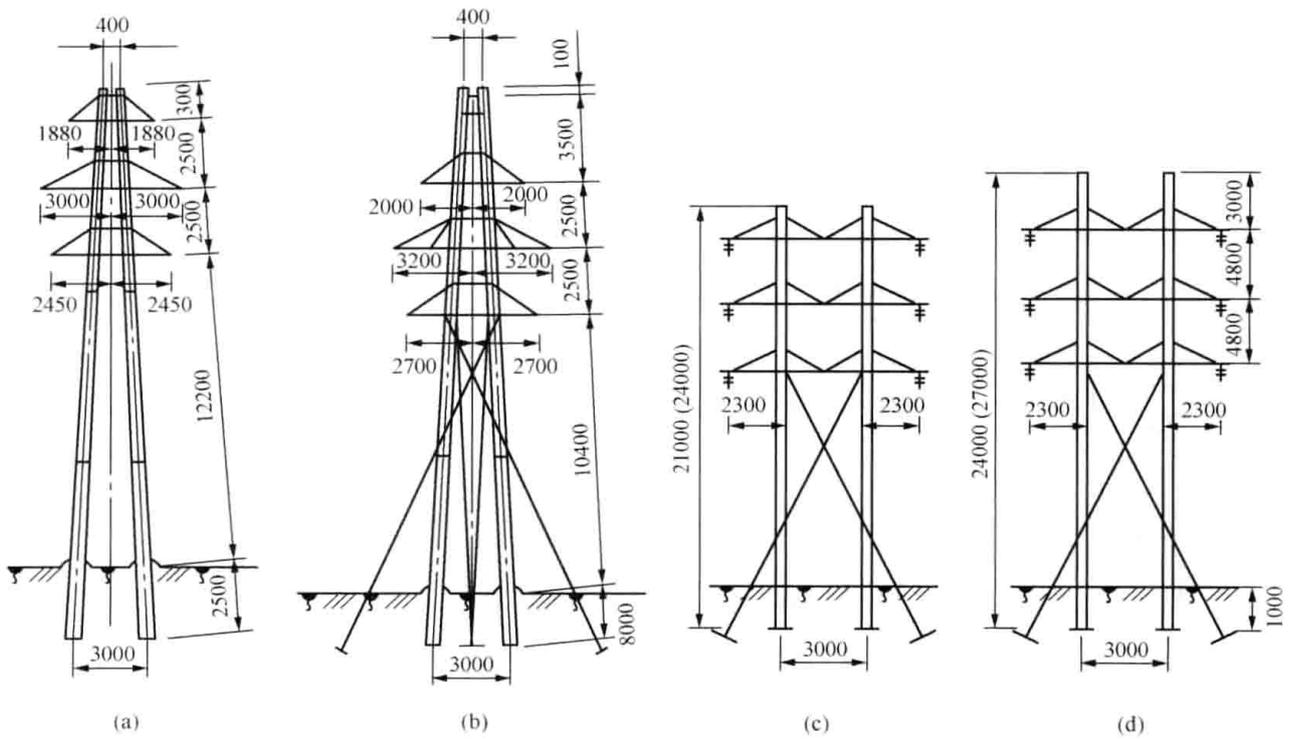


图 B-4 35~110kV 双回路直线杆

- (a) 无地线不带拉线的 A 字型双杆；
- (b) 有地线带叉梁拉线的 A 字型双杆；
- (c) 无地线不带拉线的门型双杆；
- (d) 有地线带拉线的门型双杆

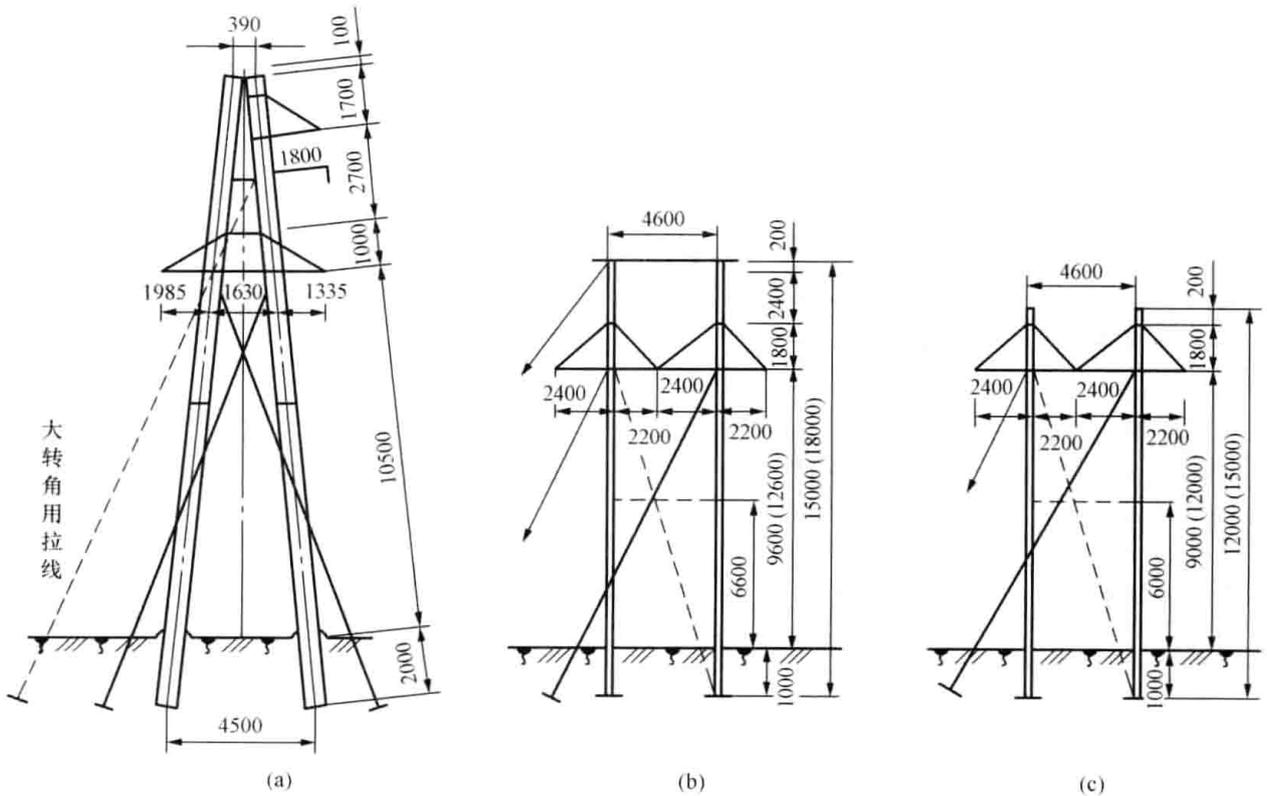


图 B-5 35~110kV 单回路承力杆

- (a) 无地线带叉梁、拉线 A 字型杆；
- (b) 有地线带拉线门型杆；
- (c) 无地线不带拉线门型杆

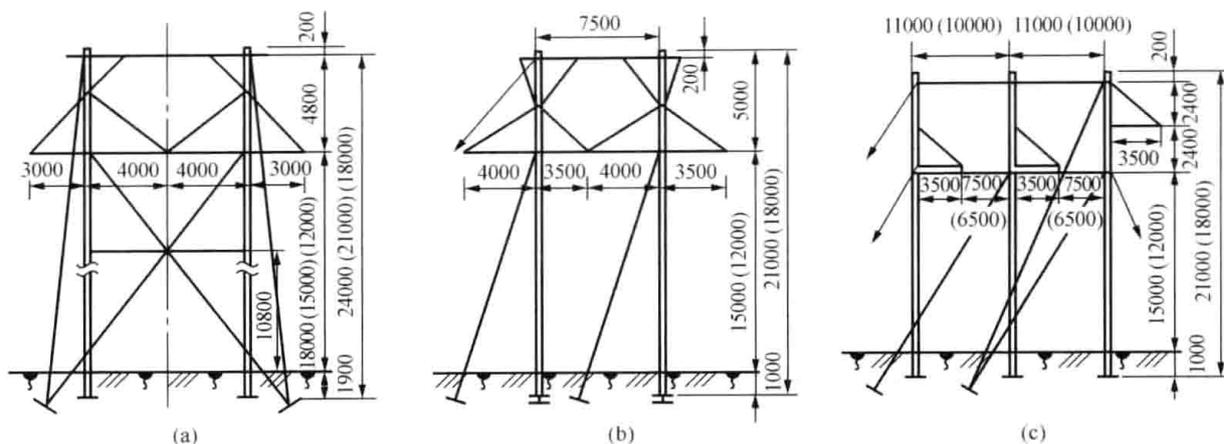


图 B-6 220kV 单回路承力杆

(a) NL0°~5°直线耐张杆；(b) JL5°~25°转角耐张杆；(c) JL60°~90°转角耐张杆（横向尺寸线括号内数字为 25°~60°用）

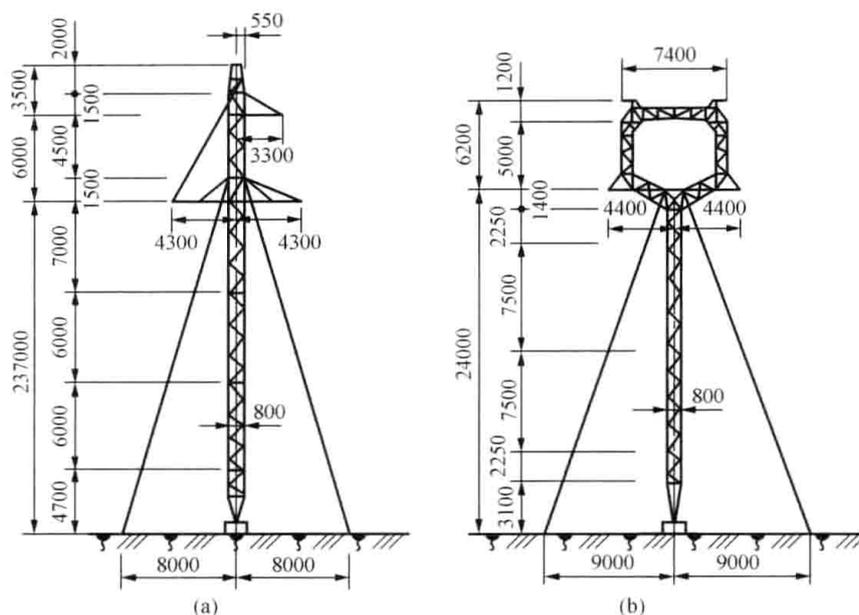


图 B-7 导线呈三角形排列的拉线铁塔

(a) 上字型；(b) 猫头型

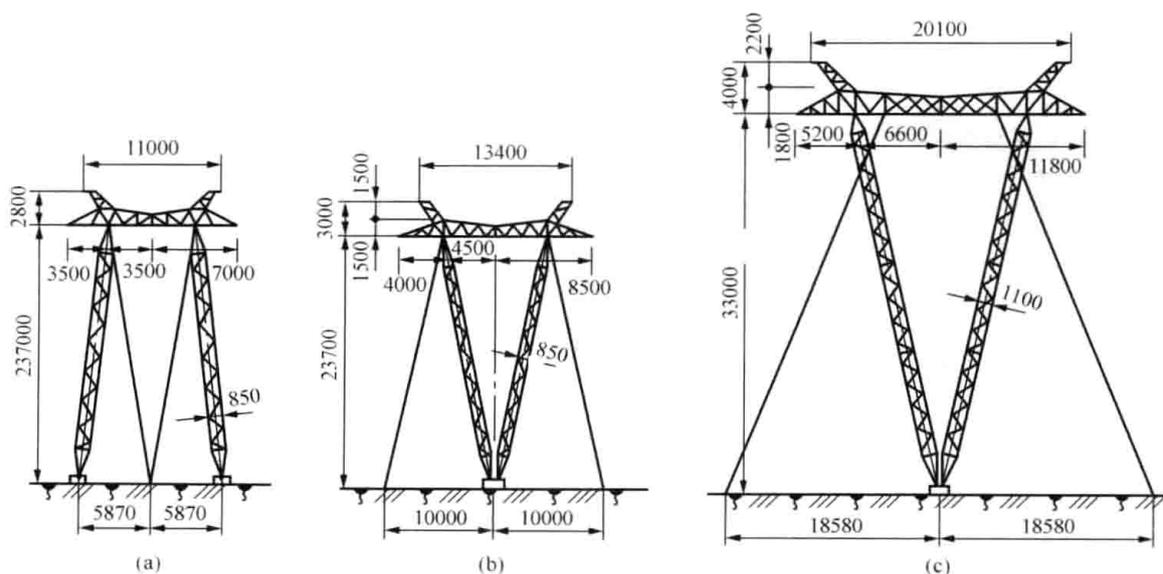


图 B-8 导线呈水平排列的拉线铁塔

(a) 220kV 门型拉线塔；(b) 220kV 拉 V 型拉线塔；(c) 500kV 拉 V 型拉线塔

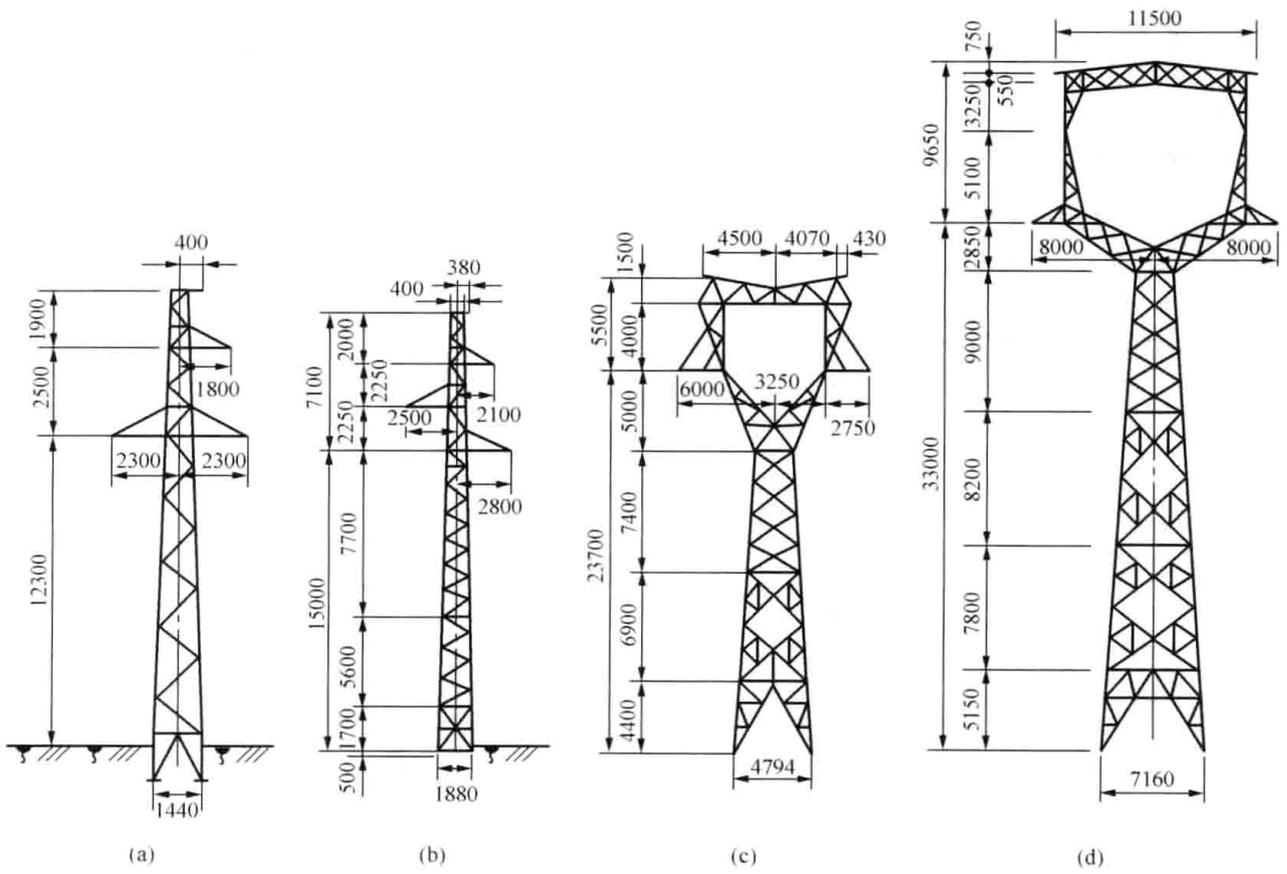


图 B-9 导线呈三角形排列的自立式铁塔  
 (a) 上字型; (b) 鸟骨型; (c) 猫头型; (d) 500kV 猫头型

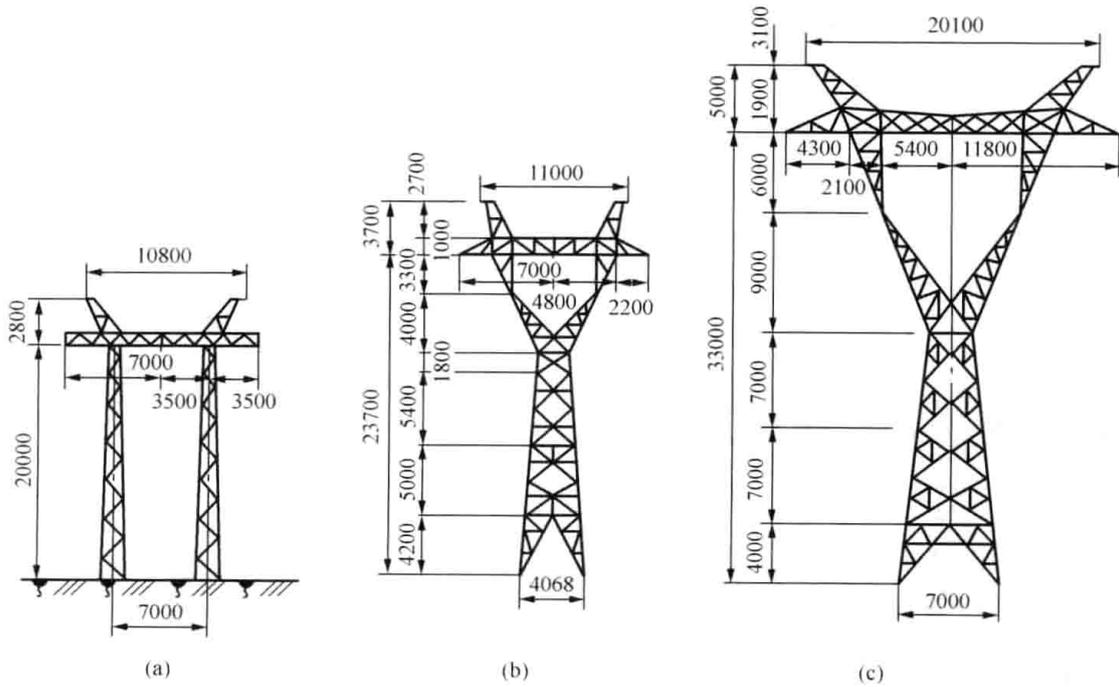


图 B-10 导线呈水平排列的自立式铁塔  
 (a) 门型; (b) 220kV 酒杯型; (c) 500kV 酒杯型

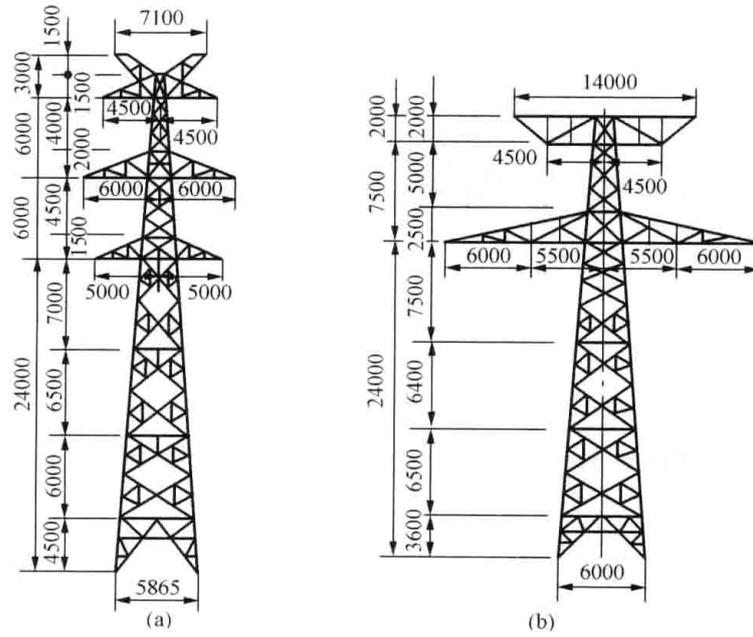


图 B-11 自立式双回路铁塔

(a) 鼓型；(b) 蝴蝶型

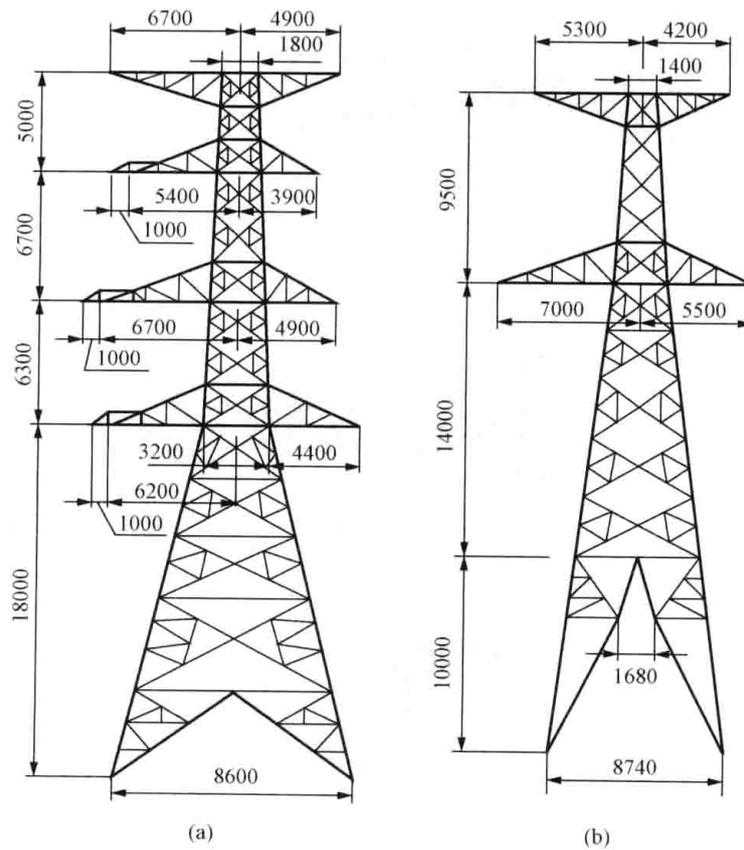


图 B-12 自立式转角塔

(a) 220kV 鼓型塔；(b) 220kV 干字型塔

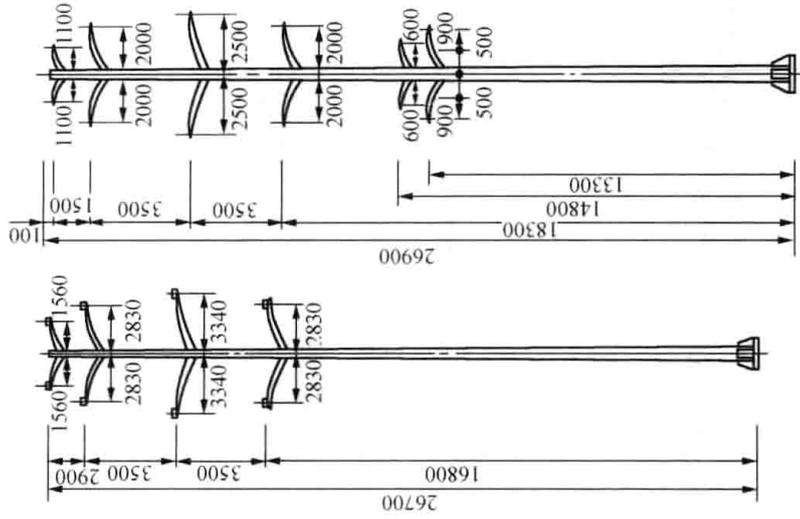


图 B-14 钢管单杆

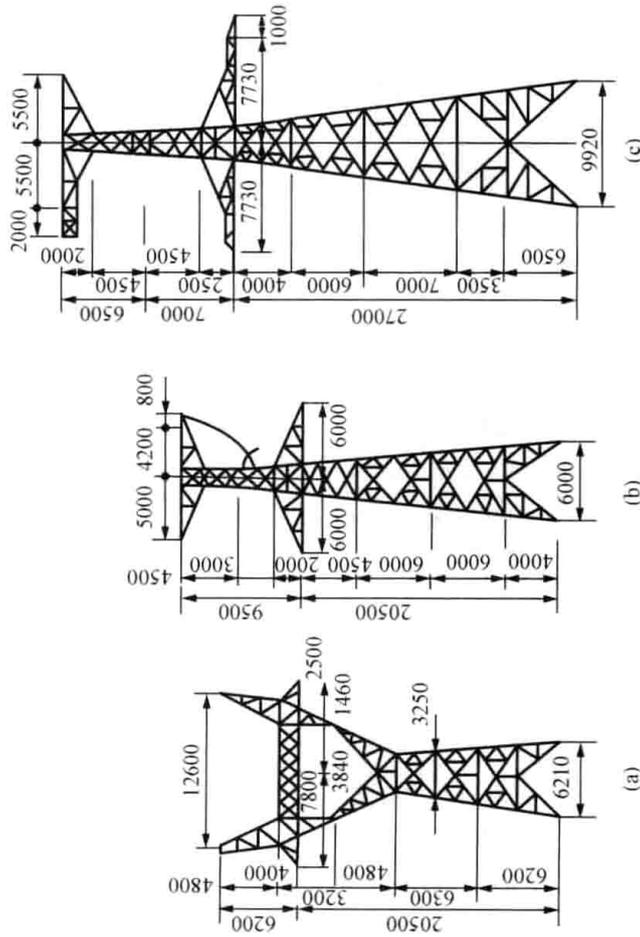


图 B-13 自立式承力塔

(a) 酒杯型; (b) 220kV 干字型; (c) 500kV 干字型



## 附录 C 公路等级

高速公路——专供汽车分向、分车道行驶并应全部控制出入的多车道公路。四车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 25000~55000 辆，六车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 45000~85000 辆，八车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 60000~100000 辆。

一级公路——供汽车分向、分车道行驶，并可根据需要控制出入的多车道公路。四车道一级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 15000~30000 辆，六车道一级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 25000~55000 辆。

二级公路——供汽车行驶的双车道公路。双车道二级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 5000~15000 辆。

三级公路——主要供汽车行驶的双车道公路。双车道三级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 2000~6000 辆。

四级公路——主要供汽车行驶的双车道或单车道公路。双车道四级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 2000 辆以下，单车道四级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为 400 辆以下。

## 附录D 弱电线路等级

一级弱电线路——首都与各省（市）、自治区政府所在地及其相互间联系的主要线路；首都至各重要工矿城市、海港的线路以及由首都通达国外的国际线路，由工业与信息化部指定的其他国际线路和国防线路。铁路总公司与各铁路分公司之间联系用的线路，以及铁路信号自动闭塞装置专用线路。

二级弱电线路——各省（市）、自治区政府所在地与各地（市）、县及相互间的通信线路；相邻两省（自治区）各地（市）、县相互间的通信线路，一般市内电话线路，铁路分公司及各站、段及站段相互间的线路，以及铁路信号闭塞装置的线路。

三级弱电线路——县至区、乡的县内线路和两对以下的城郊线路，铁路的地区线路及有线广播线路。

## 参 考 文 献

- [1] 东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [3] 曾宪凡. 高压架空线路设计基础. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] 汪志俊. 对超高压输电线路换位设计的一点看法. 高电压技术, 1984 年 4 月: 58~61.
- [5] 程慕尧. 架空输电线路导线换位及绝缘地线运行方式的优化方案. 中国电力, 2000 年 1 月: 57~58.
- [6] 孔伟, 甘凤林, 等. 连续倾斜档架线施工的计算. 电力建设, 1999 年 7 月: 49~51.
- [7] 郑玉琪. 架空输电线微风振动. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [8] 陈雄波, 孟遂民, 等. 基于 GIS 的输电线路运行管理系统数据库设计. 电力建设, 2005 年 8 月: 65~67, 70.
- [9] 李光辉, 孟遂民, 等. 利用 VB6.0 与 Access97 开发架空输电线路计算软件. 三峡大学学报 (自然科学版), 2002 年 10 月: 429~432.
- [10] 唐波, 孟遂民, 等. 输电线路地理信息系统数据库的研究与设计. 三峡大学学报 (自然科学版), 2006 年 4 月: 141~146.
- [11] 张晓东, 许邦鑫, 黎景良. 利用卫星遥感技术进行电力线路设计. 测绘通报, 2005 年 7 月: 36~39.

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "MTM2OTc5OTUuemlw",
  "filename_decoded": "13697995.zip",
  "filesize": 53687877,
  "md5": "b7c401dbf42799604074efd49a64cca7",
  "header_md5": "9543efa6d400ec7f38b0a6f0bf200f1b",
  "sha1": "00112bd3426185310c2cf667ca11f50aea628dd3",
  "sha256": "5d075c028c7e007dfe3d4fe86e200dab96976709b3101d219a744f2d7583f46f",
  "crc32": 2261905028,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 66413771,
  "pdg_dir_name": "\u255d\u2584\u2510\u2552\u2569\u03a3\u2561\u03c4\u2567\u2580\u252c\u2556\u2554\u03a6\u255d\u255e\u00fa\u00bf\u2561\u250c\u2591\u00b5\u00fa\u2310_13697995",
  "pdg_main_pages_found": 288,
  "pdg_main_pages_max": 288,
  "total_pages": 298,
  "total_pixels": 1826170522,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```