

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程

水信息技术

主 编 河海大学 谢悦波

主 审 四川大学 丁 晶 杨明江



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程 (同时适用专业)

水力学 (水利水电工程、农业水利工程、港口航道与海岸工程)

自然地理学

气象学与气候学教程

水文学原理

水文统计学

地下水水文学

水资源利用

水环境保护

水环境化学

河流动力学

地下水动力学

水信息技术

水文预报 (第4版)

水文水利计算 (第2版)

水文地质勘察

水灾害防治

地理信息系统原理与应用

中国水利水电出版社·教育出版分社

地址:北京市三里河路6号

邮编:100044

电话:(010) 68311132, 63202266-2511

E-mail: scl@waterpub.com.cn

wll@waterpub.com.cn

销售分类:水利教材/水文水资源

ISBN 978-7-5084-6196-0



9 787508 461960 >

定价: 30.00 元

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程

水信息技术

主 编 河海大学 谢悦波

主 审 四川大学 丁 晶 杨明江



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书除保持传统《水文测验学》的规范内容（水、流、沙、降雨及误差）以外，在测验新理论（如利用放射性同位素技术收集大洪水信息——古洪水研究）、新技术（如 ADCP 测流技术）、新要求（如水质信息采集）等方面进行了扩充，这也是书名从原来一直沿用的《水文测验学》→《水文信息采集与处理》→《水信息采集与处理》，更名为现在的《水信息技术》的主要原因。

本书采用了河海大学水文与水资源工程专业多年来讲课的体系进行了章节的安排。特别强调的是：本书是一本教材，而不是一本工具书；只起到将一个人领进水信息采集与处理之门的作用，而不能把所有方法尽数介绍完全。如要把其中的各种方法都弄清楚，还必须要结合各种规范，进行后期学习才行。

图书在版编目 (CIP) 数据

水信息技术/谢悦波主编. —北京：中国水利水电出版社，2009

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6196 - 0

I. 水… II. 谢… III. 信息技术—应用—水文学—高等学校—教材 IV. P33 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 212198 号

书 名	高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程 水信息技术
作 者	主编 河海大学 谢悦波 主审 四川大学 丁晶 杨明江
出版发行	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号 100044） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn
经 售	电话：(010) 63202266（总机）、68367658（营销中心） 北京科水图书销售中心（零售） 电话：(010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	175mm×245mm 16 开本 18.75 印张 433 千字
版 次	2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	30.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

高等学校水利学科专业规范核心课程教材

编 审 委 员 会

主 任 姜弘道 (河海大学)

副主任 王国仪 (中国水利水电出版社) 谈广鸣 (武汉大学)
李玉柱 (清华大学) 吴胜兴 (河海大学)

委 员

周孝德 (西安理工大学)	李建林 (三峡大学)
刘 超 (扬州大学)	朝伦巴根 (内蒙古农业大学)
任立良 (河海大学)	余锡平 (清华大学)
杨金忠 (武汉大学)	袁 鹏 (四川大学)
梅亚东 (武汉大学)	胡 明 (河海大学)
姜 峰 (大连理工大学)	郑金海 (河海大学)
王元战 (天津大学)	康海贵 (大连理工大学)
张展羽 (河海大学)	黄介生 (武汉大学)
陈建康 (四川大学)	冯 平 (天津大学)
孙明权 (华北水利水电学院)	侍克斌 (新疆农业大学)
陈 楚 (水利部人才资源开发中心)	孙春亮 (中国水利水电出版社)

秘 书 周立新 (河海大学)

丛书总策划 王国仪

水文与水资源工程专业教材编审分委员会

主 任 任立良（河海大学）

副主任 袁 鹏（四川大学）

梅亚东（武汉大学）

委 员

沈 冰（西安理工大学）

吴吉春（南京大学）

刘廷玺（内蒙古农业大学）

方红远（扬州大学）

姜卉芳（新疆农业大学）

靳孟贵（中国地质大学）

吴泽宁（郑州大学）

陈元芳（河海大学）

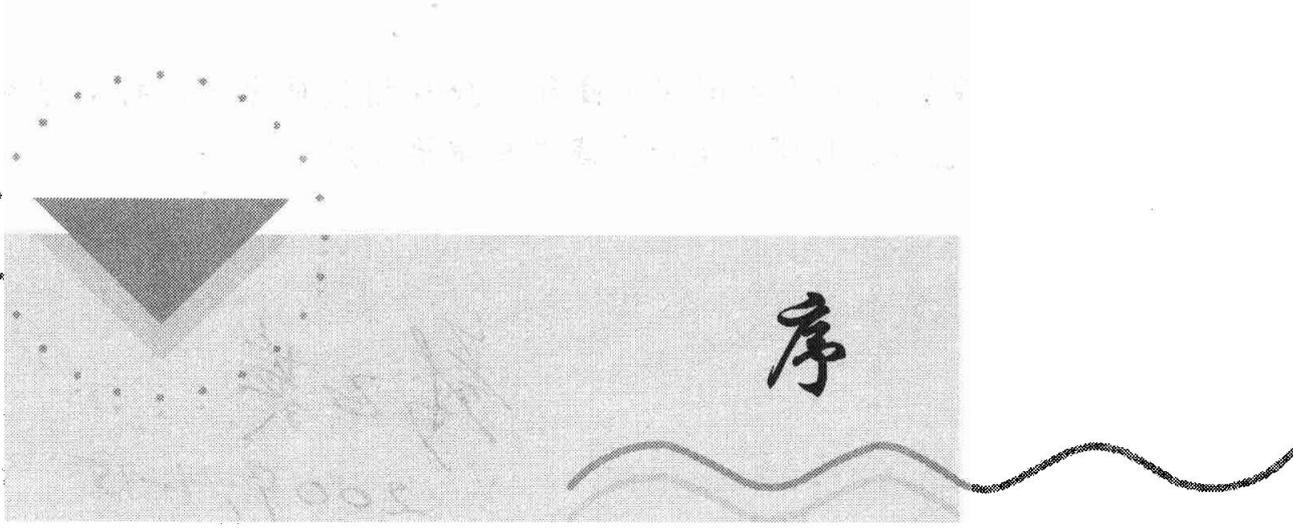
冯 平（天津大学）

纪昌明（华北电力大学）

刘俊民（西北农林科技大学）

金菊良（合肥工业大学）

郭纯青（桂林工学院）



序

水文是水利专业的基础，而水信息技术（水文测验学）又是水文学的基础。没有正确、及时的水信息基本数据，就不可能有正确的水情预报、水质预报、水资源评价以及涉水工程的规划、设计、施工、运行管理及防汛、抗旱的科学决策。

在水文学科分类中，《水信息技术》在 20 世纪 50 年代以前为《水文测验与查勘》；50 年代中期，采用苏联的名称，改为《水文测验学》；90 年代后期，改为《水文信息采集与处理》；21 世纪初，由于信息采集的内容已经扩展到了水质、水环境监测等更广泛的领域，故更改为《水信息采集与处理》；在教育部“十五”教材规划中，定名为《水信息技术》。

水信息是国家经济、社会、资源、环境领域不可缺少的基础信息。在水信息的技术应用过程中，首先要取得各种水要素的数据，然后通过分析、计算与综合，为有关方面的科学决策提供依据。基本的水信息项目主要有水位、流量、泥沙、降水、冰情、蒸发、水温、水质、土壤含水量、地下水等，根据某些特殊要求，还可增设新的项目。《水信息技术》既是水文与水资源工程专业的一门重要技术基础课，课程本身又具备专业课程的性质。

河海大学是中国以水利为特色的重点高等学校。50 多年来，河海大学的水文学及水资源学科培养了 7000 多名水文专业毕业生，其中大部分成为中国水信息采集与处理的骨干力量。

《水信息技术》一书是谢悦波教授 20 多年来在河海大学从事水文测验学课程教学的知识归纳和提炼，也是他长期从事水信息技术应用和研究的

学术总结。《水信息技术》作为国家级高等学校规划教材出版，将对推动我国水信息技术的教学、科研和生产实践发挥重要作用。

特为之序。

舒乙英
2009, 1-15



总 前 言



随着我国水利事业与高等教育事业的快速发展以及教育教学改革的不断深入,水利高等教育也得到很大的发展与提高。与1999年相比,水利学科专业的办学点增加了将近一倍,每年的招生人数增加了将近两倍。通过专业目录调整与面向新世纪的教育教学改革,在水利学科专业的适应面有很大拓宽的同时,水利学科专业的建设也面临着新形势与新任务。

在教育部高教司的领导与组织下,从2003年到2005年,各学科教学指导委员会开展了本学科专业发展战略研究与制定专业规范的工作。在水利部人教司的支持下,水利学科教学指导委员会也组织课题组于2005年底完成了相关的研究工作,制定了水文与水资源工程,水利水电工程,港口、航道与海岸工程以及农业水利工程四个专业规范。这些专业规范较好地总结与体现了近些年来水利学科专业教育教学改革的成果,并能较好地适应不同地区、不同类型高校举办水利学科专业的共性需求与个性特色。为了便于各水利学科专业点参照专业规范组织教学,经水利学科教学指导委员会与中国水利水电出版社共同策划,决定组织编写出版“高等学校水利学科专业规范核心课程教材”。

核心课程是指该课程所包括的专业教育知识单元和知识点,是本专业的每个学生都必须学习、掌握的,或在一组课程中必须选择几门课程学习、掌握的,因而,核心课程教材质量对于保证水利学科各专业的教学质量具有重要的意义。为此,我们不仅提出了坚持“质量第一”的原则,还通过专业教学组讨论、提出,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对核心课程教材选题及其主编、主审和教材编写大纲进行了严格把

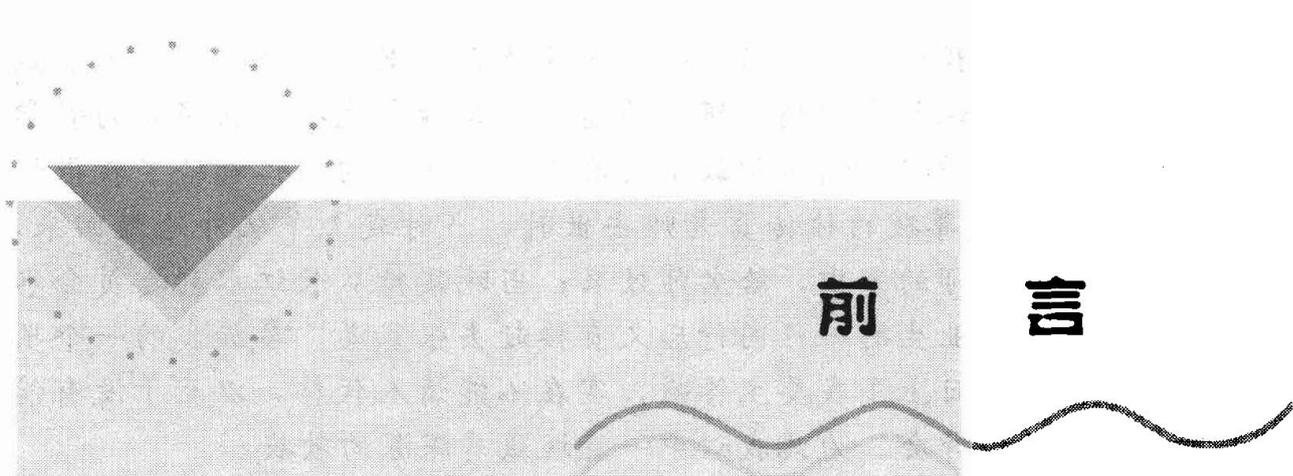
关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好，我们还成立了高等学校水利学科专业规范核心课程教材编审委员会以及各专业教材编审分委员会，对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督。充分依靠各学科专家发挥咨询、评审、决策等作用。

本套教材第一批共规划 52 种，其中水文与水资源工程专业 17 种，水利水电工程专业 17 种，农业水利工程专业 18 种，计划在 2009 年年底之前全部出齐。尽管已有许多人为本套教材作出了许多努力，付出了许多心血，但是，由于专业规范还在修订完善之中，参照专业规范组织教学还需要通过实践不断总结提高，加之，在新形势下如何组织好教材建设还缺乏经验，因此，这套教材一定会有各种不足与缺点，恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材，以利于教、便于学，更希望师生们对此提出建议。

高等学校水利学科教学指导委员会

中国水利水电出版社

2008 年 4 月



前 言

河海大学《水信息技术》课程建设始于1952年成立的水文勘测教研室。56年来，教研室成员（包括教师、专职科研人员、实验人员）在鼎盛时期（20世纪80年代中期至90年代初）达19人。

教研室一贯重视《水信息技术》课程的教学和科研工作，教学上从《水文测验学》课程的奠基者严义顺教授组织创建本课程、编写第一本教材（自编讲义）及第一次授课起，到继任的教研室主任林传真教授，始终把教学工作放在首位，教学认真负责，一丝不苟，有着很好的积淀，为后继者树立良好的教风。

编者于1987年研究生毕业后留校任教有幸走进这个大家庭中的。在这个群体里，为走上讲台讲授这门课程，作为一个新手，除了将这门课程的全部实验、习题、课设重做一遍，而且每个点都要弄通、弄懂之外，还要在听老教师的讲课之后，自己准备讲稿（那个年代没有计算机讲稿，全部要手写，至今还保留着三届当年的讲课手稿）；自己对着镜子练习讲课，然后申请在教研室试讲（当时除了指导实验课的老师 and 教电测基础的老师没有参加以外，其余的老师林传真、林季峰、张家琼、夏佩玉、胡凤彬、周忠远、李春尧、陆桂华全部参加了），一个下午，全部用来对我的讲课提出改进意见了；试讲通过之后，第一次上课堂是1990年上半年，给当时的水文87级讲授水文测验学的前半部分——信息采集，当时的林传真、夏佩玉等老师还随堂听课，给了我很好的建议。尤其是林传真老师，几乎我的每节课他都来听，课堂上还认真记录，下课后把他的记录给我，指出哪些地方肯定，这样讲好；哪些地方可以换个方式讲，效果可能会更好；哪些地方需要改进，建议怎样改进。例如从板书的问题，包括图放的位置都有讲究；哪些图是本次课程后面不再用到的，可以讲完就擦去

的；哪些是本次课程后面还要用到的，应该放在哪里比较合适，从中获益匪浅；还利用从上课教室回到教研室的途中，告诉我这些点点滴滴的教学技巧。因此，在我的水文测验学教学生涯中，教研室的同仁都给了我很好的帮助。2002年我尊敬的林传真老师去世时，当时我上午从外地赶回来，下午匆匆赶到林老师的家中，给老师致哀；当晚接待从长江水利委员会水文局来学校选择毕业生的一行同行后又直接赶去张家港，参加我的一个项目评审会，因为次日上午我要主答辩，实在不能请人代替，以至于没有能够参加林老师的追悼会。为此我心中一直埋藏着深深的歉疚。

这本教材是编者在河海大学长期教学工作、学习、进修及参加相关国际国内会议研讨之后对自己授课讲义的不断修改、同时参考了河海大学水文测验教研室已经出版的水文测验学教材等（参见参考文献）而成为现在的版本。其间于2001年10月申报“十五”国家级教材规划的立项、2002年获得批准；2003年在河海大学气象山上水资源开发利用国家专业实验室的会议室专门邀请了当时的成都科技大学林三益、丁晶，合肥工业大学的张元禧，河海大学的刘新仁等教授对本教材提交的编制目录、体系进行了认真讨论，给出了很好的建议；最后的主审也是四川大学的丁晶和杨明江两位教授。在2004年成都举行的水利教学指导委员会的年会上，当时的丁晶教授对水文测验学课程的重要性阐述得非常透彻。他发言说：虽然我是搞随机水文的，但籍我一生水文教学之经验来看，水文测验学学不好，对其后的水文预报、水文计算等影响很大。所以我最后一次参加水利教学指导委员会年会的告别演说就谈这个问题。

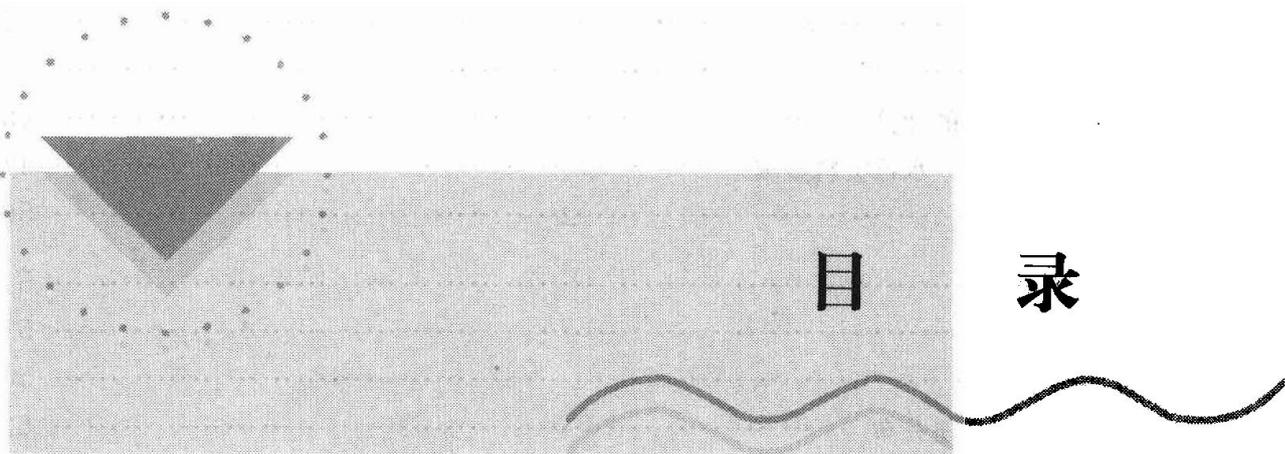
在本书的编写过程中，研究生廖杰、余亮亮做了大量的资料查询、文字排版、校对，图幅制作、编排，表格数据查找、核实等工作；在这门课程的教辅材料中，使用了水文与水资源工程专业2000级学生周波、2002级学生张永兵上交的部分习题成果，水文与水资源工程专业2002级四班学生的课设及实习成果。

限于编者的水平有限，书中难免会有不当之处。恳请读者不吝指出，以便于再版时修改。

同时，借此机会，向所有为本书的出版提供关心、支持和帮助的同仁一并表示诚挚的感谢！

编者

2008年12月15日



目 录

序

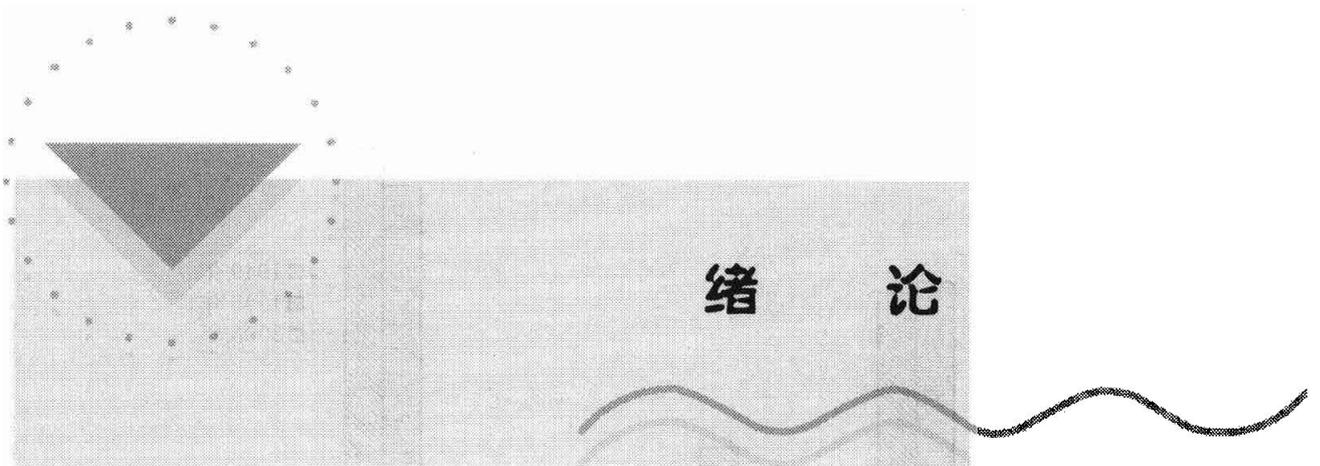
总前言

前言

绪论	1
0.1 水资源现状	1
0.2 全球水资源量短缺的原因	5
0.3 解决办法（水文与水资源工程专业的任务）	6
0.4 本课程研究内容	8
0.5 中国水信息技术的发展	9
0.6 课程内容的安排及特点	10
第1章 测站与站网	11
1.1 测站	11
1.2 站网	12
1.3 水文测站的设立	16
1.4 水质监测站的设立	20
1.5 收集水信息的基本途径	22
复习题	23
第2章 降水观测	24
2.1 概述	24
2.2 雨量站布设及降水量观测场地	24
2.3 仪器及观测	26
2.4 降水量资料整理	32
2.5 降水量观测误差	36
2.6 大气降水监测	38
复习题	40

第3章 水位观测	41
3.1 水位概述	41
3.2 水位观测成果的计算	45
3.3 水位数据处理（水位资料整编）	47
复习题	50
第4章 流量测验	51
4.1 概述	51
4.2 断面测量	54
4.3 流速脉动与流速分布	62
4.4 流速仪	66
4.5 流速仪法测流	67
4.6 介绍几种测流方法	71
4.7 ADCP 河流流量测验原理和方法	80
复习题	91
第5章 泥沙测验	93
5.1 概述	93
5.2 悬移质输沙率的测验	95
5.3 泥沙颗粒分析	100
复习题	102
第6章 地下水监测	104
6.1 地下水资源开发利用现状与问题	104
6.2 地下水监测工作的进展	106
6.3 地下水监测	110
第7章 水质信息采集	114
7.1 地表水采样	114
7.2 地下水采样	116
7.3 水体污染源调查	118
7.4 水质数据处理及整编、汇编	121
复习题	123
第8章 实测期以前水文信息的采集	124
8.1 水文调查	124
8.2 历史洪水调查	128
8.3 古洪水研究	131
复习题	141
第9章 流量数据处理	142
9.1 概述	142

9.2	稳定的 $Z-Q$ 关系及处理方法	143
9.3	不稳定水位流量关系的分析	152
9.4	受人工控制河道的 $Z-Q$ 关系曲线	176
9.5	$Z-Q$ 关系曲线的移用及合理性检查	184
9.6	地下水数据处理	185
9.7	水文数据处理成果的刊布	187
	复习题	187
第 10 章	泥沙数据处理	189
10.1	悬移质输沙率数据处理	189
10.2	推移质输沙率数据处理	201
10.3	泥沙颗粒级配数据处理	203
10.4	泥沙数据的合理性检查	206
	复习题	208
第 11 章	误差	209
11.1	误差的有关基本概念	209
11.2	误差的传播与综合	212
11.3	流速面积法测流的误差估算	216
11.4	流速仪测流方法的精简分析	219
	复习题	222
第 12 章	潮水河水文测验	223
12.1	概述	223
12.2	潮水位观测及数据整理	227
12.3	潮流量测验	229
12.4	潮流量数据处理	238
12.5	潮水河悬移质泥沙测验及数据整理	244
	复习题	247
第 13 章	水信息系统简述	248
13.1	概述	248
13.2	水信息的收集与传输	248
13.3	水文信息的处理	251
13.4	水文信息的存储和检索	267
13.5	水文自动测报系统	271
13.6	水质自动监测系统	278
	复习题	280
	参考文献	282



0.1 水资源现状

0.1.1 全球水资源量

全球水资源量及其分配见图 0-1。

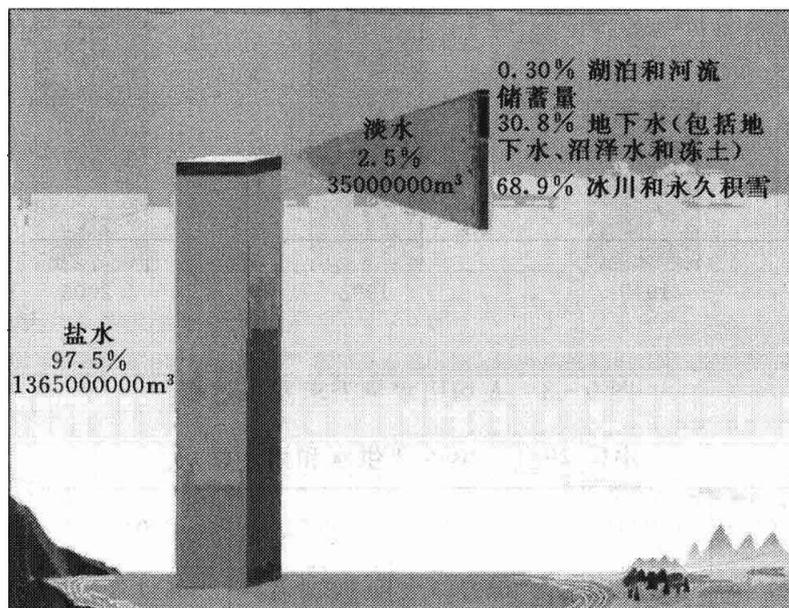


图 0-1 全球水资源量及其分配

0.1.2 中国水资源量的需求

中国水资源用水量的需求发展过程见图 0-2，人均用水量需求发展过程见图 0-3，中国 2001~2006 年供水和用水情况见表 0-1。

0.1.3 中国水资源量短缺情况

中国水资源量短缺情况见表 0-2。

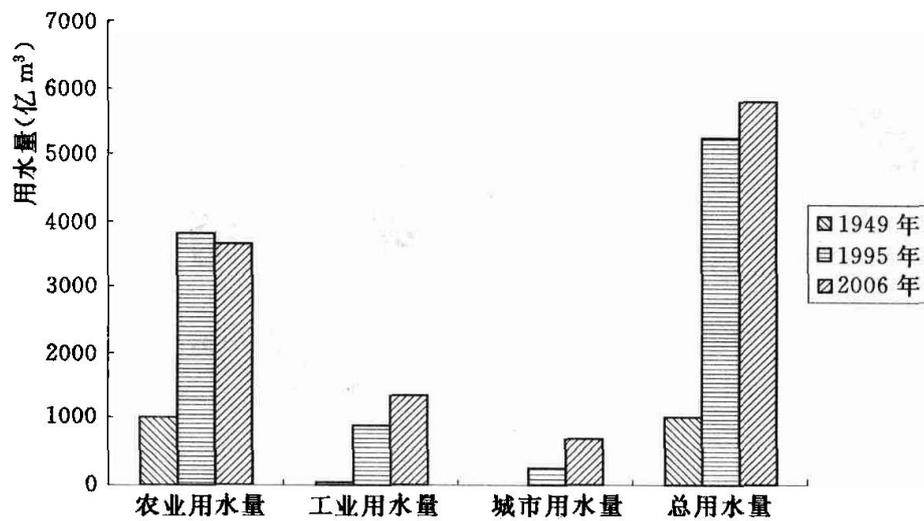


图 0-2 中国水资源用水量的需求发展过程

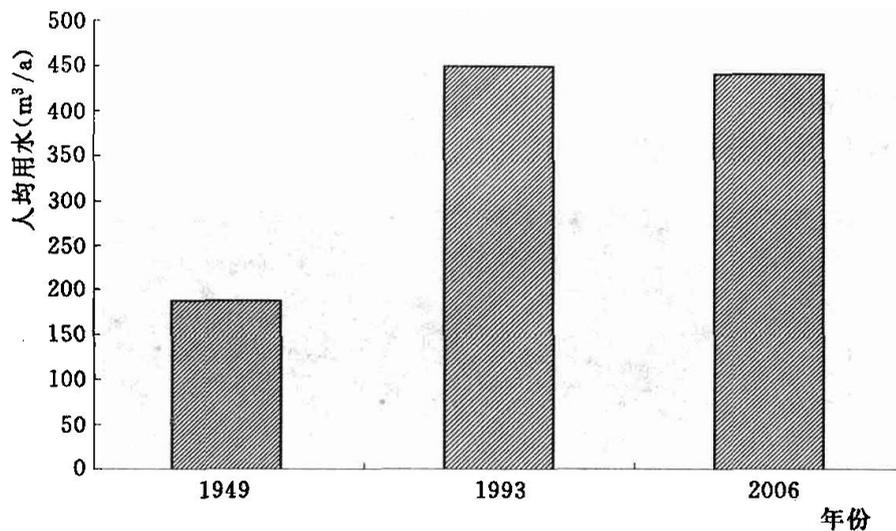


图 0-3 人均用水量需求发展过程

表 0-1

中国 2001~2006 年供水和用水情况

指标 \ 年份		2001	2002	2003	2004	2005	2006
供水	总量 (亿 m³)	5567.4	5497.3	5320.4	5547.8	5633	5795
	地表水水源 (亿 m³)	4450.7	4404.4	4286	4504.2	4572.2	4706.7
	所占比重 (%)	79.9	80.1	80.6	81.2	81.2	81.2
	地下水水源 (亿 m³)	1094.9	1072.4	1018.1	1026.4	1038.8	1065.5
	所占比重 (%)	19.7	19.5	19.1	18.5	18.4	18.4
	其他水源 (亿 m³)	21.9	20.5	16.3	17.2	22.0	22.7
	所占比重 (%)	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4
用水	总量 (亿 m³)	5567.4	5497.3	5320.4	5547.8	5633.0	5795.0
	农业 (亿 m³)	3825.7	3736.2	3432.8	3585.7	3580	3664.4

续表

指标		年份					
		2001	2002	2003	2004	2005	2006
用水	所占比重 (%)	68.7	68	64.5	64.6	63.6	63.2
	工业 (亿 m ³)	1141.8	1142.4	1177.2	1228.9	1285.2	1343.8
	所占比重 (%)	20.5	20.8	22.1	22.2	22.8	23.2
	生活 (亿 m ³)	599.9	618.7	630.9	651.2	675.1	693.8
	所占比重 (%)	10.8	11.3	11.9	11.7	12	12
	生态 (亿 m ³)			79.5	82	92.7	93
	所占比重 (%)			1.5	1.5	1.6	1.6
	全国人均 (m ³ /人)	437.7	429.3	412.9	426.8	432.1	442

表 0-2 “九五”目标下的缺水量

分 类		1995 年		2000 年	
		水量 (亿 m ³)	百分比 (%)	水量 (亿 m ³)	百分比 (%)
地区	黄淮海流域	147	41.06	100.26	24.0
	内陆地区	62	17.32	18.10	4.3
	华南地区	35	9.78	39.42	9.4
	东北地区	20	5.59	54.50	13.0
	长江流域	90	25.14	79.12	18.9
	其他地区	4	1.11	126.82	30.3
行业	农业	300	83.80	322.53	77.12
	工业及城市生活用水	58	16.20	95.69	22.88
总缺水量		358	100	418.22	100

根据 80 年代初水利部对全国水资源进行的评价：我国的多年平均降水总量为 6.2 万亿 m³，除通过土壤水直接利用于天然生态系统与人工生态系统外，还可通过水循环更新的地表水和地下水的多年平均水资源总量为 2.8 万亿 m³。按 1997 年人口统计，我国人均水资源量为 2220m³，预测到 2030 年我国人口增至 16 亿时，人均水资源量将降到 1760m³。按国际上一般承认的标准，人均水资源量少于 1700m³ 为用水紧张的国家，因此，我国未来水资源的形势是严峻的。

除了人均水资源量紧张外，我国水资源的时间分布很不均衡。由于季风气候影响，各地降水主要发生在夏季。雨热同期，是农业发展的一个有利条件，使我国在发展灌溉农业的同时，还有条件发展旱地农业。但由于降水季节过分集中，大部分地区每年汛期连续 4 个月的降水量占全年的 60%~80%，不但容易形成春旱夏涝，而且水资源量中大约有 2/3 左右是洪水径流量，形成江河的汛期洪水和非汛期的枯水。而降水量的年际剧烈变化，更造成江河的特大洪水和严重枯水，甚至发生连续大水年和连续枯水年。

我国的年降水量在东南沿海地区最高，逐渐向西北内陆地区递减。从黑龙江省的呼玛到西藏东南部边界，这条东北—西南走向的斜线，大体与年均降水 400mm 和年

均最大 24 小时降水 50mm 的暴雨等值线一致，这是东南部湿润、半湿润地区和西北部干旱、半干旱地区的分界线。东南部的湿润和半湿润地区也是暴雨洪水的多发区。

2007 年我国有 669 座城市中有 400 多个供水不足，特别是首都和部分大中城市中有 110 个严重缺水；在 32 个百万人口以上的特大城市中，有 30 个长期受缺水困扰。随着全国用水量持续增长，水资源短缺进一步加剧。正常年份全国缺水近 400 亿 m^3 。

近年来，全国废污水排放总量不断增长，农业生产中化肥和农药过量使用，污染了水环境。监测评价的湖泊中有一半处于富营养化状态。2007 年全国还有 2.8 亿农村人口喝不上符合标准的饮用水，一些城市的饮用水问题比较突出。全国 5 万多个乡镇供水不足，7 亿多人使用的饮用水细菌含量超标。中国已到了水质型缺水的时代。

0.1.4 中国水污染情况

2006 年全国废污水排放总量 731 亿 t，其中工业废水占 2/3，第三产业和城镇居民生活污水占 1/3。

污染问题也越来越迫切地摆在了人们眼前，污染从局部的点污染变成全流域的污染，从河流下游向上游进行转移，从干流向支流转移，水污染的影响早已超越局部和“点源”的范围，发展成为流域性污染问题。具体结果见表 0-3。

表 0-3 2006 年主要水系干流水质状况评价结果

主要水系	监测断面 (个)	分类水质断面占全部断面百分比 (%)					
		I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类
长江	31	16.1	67.7	9.7	6.5		
黄河	22		22.7	45.5	31.8		
珠江	15	13.3	53.3	20	13.3		
松花江	11			36.4	63.6		
淮河	14		7.1	35.7	57.1		
海河	2				50		50
辽河	13		15.4	15.4	30.8		38.5

0.1.5 中国近代的洪水事件

自古以来治水防洪就是国家和民族的大事，几千年的治水事业是我们民族精神形成的重要原因，并且造就了极为丰富的治水历史经验。其中 1998 年长江、松花江 800 万军民的抗洪斗争可以说是历史上人类与自然界的斗争中规模最大、最为壮烈的一次。而中华人民共和国成立以后的 50 年与 20 世纪前 50 年相比，中国取得的伟大成就是应当引以为豪的：1915 年珠江大水广州被淹，1931 年长江大水武汉以下大城市被淹，1932 年松花江大水哈尔滨被淹，1938 年黄河流域淹死几十万人，1939 年海河大水天津被淹。而中华人民共和国成立后发生了 1954 年长江大水、1957 年松花江大水、1958 年黄河大水、1963 年海河大水、1991 年淮河大水、1994 年珠江大水、1998 年长江和松花江大水，这七次流域性大洪水都避免了中华人民共和国成立前那样的灭顶之灾^[1]。

0.1.6 中国水情况造成的经济损失

中国水情况造成的经济损失见表 0-4。

据国家统计局发布的一组数据：2003 年中国财政收入首度突破 2 万亿元，2005 年突破 3 万亿元，2006 年接近 4 万亿元，2007 年突破 5 万亿元大关。由此可见，中国水情况造成的经济损失在国家财政收入中所占的比例，因此，从事水情况的工作、降低水情况造成的经济损失是一件非常有意义的事情！

表 0-4 中国水情况造成的经济损失

序号	损失分类	损失金额 (亿元/a)
1	缺水	2500
2	水环境	1785
3	洪水	1600
4	水质污染	400
5	2008 年仅南方冰雪	1516.5

0.1.7 世界缺水情况的统计

世界缺水情况的统计见表 0-5。

表 0-5 世界缺水情况的统计

序号	分类情况	数字统计
1	缺水国家个数	>40
2	淡水不足的国家 and 地区占全世界国家和地区的比例	60%
3	受到污染的水域占全世界总水域的比例 ^①	65%

① 例如美国的密西西比河，几乎所有的已知污染物都可以检测到；前苏联的伏尔加河，河面漂浮废油，曾引起大火；日本甲基汞污染造成水俣病公害事件。

据世界卫生组织 2007 年统计显示，全世界约 20% 的人口生活在缺水或未能利用现有天然水源的国家。目前，有 11 亿人不能获得安全的水，26 亿人不能获得适当的环境卫生。气候变化对发达国家和发展中国家的水资源都在造成影响。结果可能是霍乱、伤寒、疟疾和登革热等病增多。在水的可得性方面，现有的差距很可能会进一步扩大：在北方降雨量不断增多，而在南方干旱时期越来越长。水供应日益受到威胁的国家被称为“缺水”国家。据估计，到 2025 年，18 亿人将生活在绝对缺水的国家或区域，而且世界人口的 2/3 可能处于缺水状况。

0.2 全球水资源量短缺的原因

0.2.1 降水空间上分布不均加上地势高低不同

世界各大陆各种淡水资源分布见表 0-6。

表 0-6 世界各大陆各种淡水资源分布 单位：×10³ km³

序号	项目	欧洲	亚洲	非洲	北美	南美	澳洲	总计
1	降雨	7.17	32.69	20.78	13.91	29.40	6.41	110.36
2	河川	3.11	13.19	4.27	5.96	10.38	1.97	38.88
3	地下水	1.07	3.41	1.47	1.74	3.74	0.47	11.90
4	地表水	2.05	9.78	2.76	4.22	6.64	1.50	26.95
5	总渗透、土壤	5.12	22.91	18.02	9.69	22.72	4.91	83.37
6	蒸发	4.06	19.50	16.56	7.95	18.98	4.44	71.49

据统计,中国淡水资源总量为 28000 亿 m^3 , 占全球水资源的 6%, 仅次于巴西、俄罗斯和加拿大, 居世界第四位, 但人均只有 $2200m^3$, 仅为世界平均水平的 $1/4$ 、美国的 $1/5$, 在世界上名列 121 位, 是全球 13 个人均水资源最贫乏的国家之一 (图 0-4、表 0-7)。

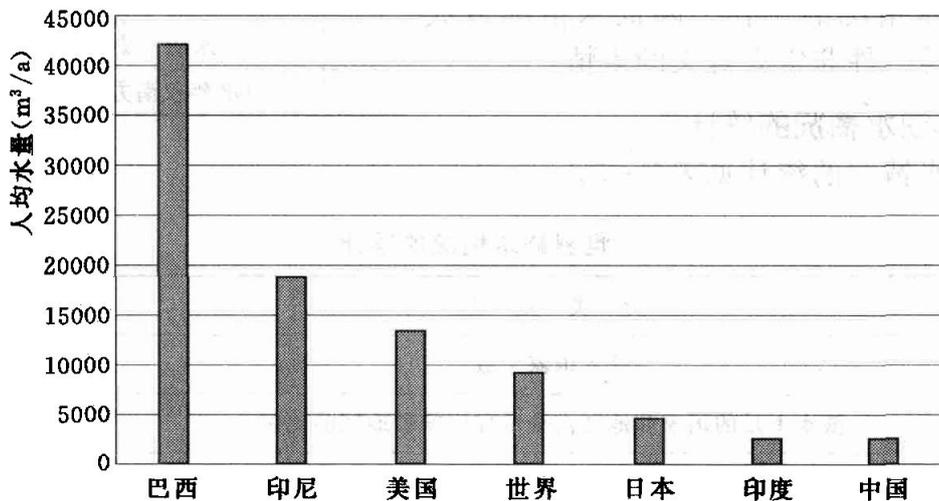


图 0-4 世界一些国家年人均淡水资源量

表 0-7 中国大陆水资源量空间上分布比例

流域位置	耕地比例 (%)	水资源比例 (%)
长江以南	36	81
长江以北	64	19
其中长江以北流域的 19% 水资源中		
黄淮海流域		7.98
辽河流域		1.71

0.2.2 降水时间上分布不均

中国大陆水资源量在时间上分布的比例见表 0-8。

表 0-8 中国大陆水资源量在时间上分布的比例

年内	汛期 (占总量的 $2/3$)	非汛期 (占总量的 $1/3$)	枯季更少
年际	多水年	少水年	枯期更少

0.3 解决办法 (水文与水资源工程专业的的主要任务)

0.3.1 兴修水利

开发水源, 如志士仁人们提出了许多天才的调水方案, 先后都不同程度获得民间、学界、政界、军界的支持。这些方案又分为“内陆引水派”、“海洋派”、“空中引

水派”或“炸山派”。

建造水库和调水工程,如三峡工程、南水北调工程等,可以调剂季节、地区之间水资源的丰枯差异。截至2008年4月,中国大陆已经建成近9万座水库。

目前的防洪工程有4类:堤防、水库、河势控制工程、蓄滞洪区。今后将要增加3类:人工开辟分流利用洪水工程、洪水回灌工程、跨流域调洪水工程。

所有的水利工程都必须适合所在河流的特点。中国的七大江河,要根据各自的特点研究确定不同的防洪对策。

(1) 长江的特点是洪水峰高量大,首先要扩大河道的泄洪能力,加高加固堤防,恢复湖泊和蓄滞洪区的调蓄能力,并逐步修建新的水库。对三峡工程修建以后下游河势的变化和崩岸问题要特别加以研究。

(2) 黄河的特点是丰枯年差别大,洪水总量较小,历时短,但河势游荡,堤防土质差,易出险情。小浪底水库已开始发挥防洪效益,需要尽快完成两岸大堤的淤临淤背工程,加强河势控导工程,加快水土流失治理步伐,攻关研究河道清淤技术措施。

(3) 淮河的特点是洪水频繁,洪水排泄不畅;行蓄洪区运用机遇多,需要尽快修建临淮岗工程,扩大入海通道,逐步迁出行洪区内的人口,扩大现有河道泄洪能力。

(4) 海河的特点是常年干旱,河流源短流急,洪水来得急,预报时间短。防洪应结合抗旱,修建分流洪水的沟道和洪水回灌工程,恢复天然洼地的蓄洪能力,汛期尽量把洪水留住。

(5) 珠江的特点是水量丰沛,上游河道窄深,泄流能力不足,急需修建控制性水库工程,并加高加固堤防,特别是要修好城市段堤防。

(6) 松花江的特点是上游植被较好,洪水缓涨缓落,历时长,但西部常年干旱。河道宽浅,不同频率的洪水水位差别小,加高堤防增加的泄洪能力比其他江河更加明显。嫩江下游两岸有许多洼淀,是调蓄洪水的良好场所,应首先开辟这些洼淀为蓄滞洪区,同时加高加固堤防,结合西部抗旱修建尼尔基水库。

(7) 辽河的特点是中下游工业城市多,又没有洼淀,遇超标准洪水没有出路,上游水土流失比较严重,需要加高加固堤防,清淤除障,加大河道泄洪能力,同时研究开辟新的分洪道或蓄滞洪区,以应付特大洪水。

0.3.2 节约用水

实行水资源的统一管理,实现计划用水、科学用水,达到节约用水的目的。提倡“节流优先”,这不仅是根据我国水资源紧缺情况所应采取的基本国策,也是为了降低供水投资、减少污水排放、提高资源利用效率的最合理选择,是世界各发达国家城市工业用水的发展方向。城市工业用水的70%以上将转化为污水,一些水资源丰富的国家,近年来也大力推行节水,主要是因为不堪承受污水处理的负担。我国工业万元产值取水量是发达国家的5~10倍,城市输配水管网和用水器具的漏水损失高达20%以上,公共用水浪费惊人。因此,必须调整产业结构和工业布局,大力开发和推广节水器具和节水的工业生产技术,创建节水型工业和节水型城市,力争将城市人均综合需水量控制在 $160\text{m}^3/\text{年}$ 以内,使我国城市总需水量在城市人口达到最大值后得到稳定。为了建立节水型的体制,不仅需要提高公众认识,还要投入相当的资金和高

新技术。根据分析预测, 2010 年供水设施的单位投资约为 8 元/m³, 污水处理约为 10 元/m³, 而节水仅需 3 元/m³ 左右。因此, 增加节水的资金投入不但为可持续发展所必需, 而且具有明显的经济效益。

如黄河上游的甘肃、宁夏等地区有水, 但几立方米水才生长 1kg 粮食; 而黄河下游的山东威海等地, 1m³ 水可生长 1.1kg 粮食却没水。这就需要国家发挥管理的职能, 实行统筹规划、优化管理和调度, 使有限的水资源得到最好的利用, 使其政治、经济效益得到最大的发挥。

0.3.3 把用水推向市场

长期以来, 我国的水价政策极不合理, 几乎与我们所不断提倡的节水、治污和统一调配水资源的战略反向而行。一些城市的地下水超采已经十分严重, 但至今这些城市的企业和单位仍可无偿开采地下水, 导致引用地表水的自来水厂难以运营。虽然不断提倡节水, 但至今工业和城市生活的水价不但不能调动有关方面进行节水改造的积极性, 甚至不能按市场经济的要求, 维持良性运行。水污染也已到了十分严重的程度, 但至今许多地方污水处理厂的运行费用没有着落, 许多已建的污水处理厂不按设计标准运行, 甚至根本不运行。对于处理后回用的污水, 至今没有合理的定价, 难以推行污水的再生利用。许多地方由于农民的负担能力有限, 政府没有明确的补贴办法, 灌溉水价不能反映实际的运行成本, 致使许多灌区不但不能按期更新改造, 而且不能维持简单再生产。

种种情况说明, 水价是水资源管理中的主要经济杠杆, 对水资源的配置和管理起重要的导向作用。必须在国家水资源管理机构的统一领导下, 根据国家的水资源战略, 明确制定我国现阶段的相应水价政策和水价系统。

0.3.4 水信息数据的重要性

中国的防洪科技应当是世界上最先进的, 因为我国的防洪任务比国外更迫切。但无论是兴修水利、节约用水, 还是把用水推向市场等解决水问题的措施, 首先都离不开水信息数据。因为所有的解决办法都是根据现有的基本情况、采用合理的技术路线去解决, 而现有的基本情况都是由实时的水信息数据提供的, 否则就是“巧妇难为无米之炊”。

0.4 本课程研究内容

0.4.1 水信息技术的定义

研究各种水文要素、水质要素的测量、计算与资料整编原理和方法的一门学科。或者是研究水信息采集、处理、存储与检索的一门学科。

0.4.2 水信息技术研究的目的

为一个国家的水资源及水环境的开发利用、评价、管理等提供依据。

0.4.3 水信息技术研究的意义

仅举 3 个例子作为说明。

(1) 水库的防洪、调蓄、发电、灌溉等四大主要功能的作用大家皆知，但水库设计的依据是什么？水文的基本数据。

(2) 军事上的用途：《三国演义》中的关公放水淹七军的故事；河北省黄壁庄水库下游忽冻村的由来；电影《巍巍昆仑》中国国民党指挥官追击中央红军时遇山洪暴发说“天不绝毛，我有何法？”；1969年珍宝岛战斗时，前苏军入侵珍宝岛地区的坦克没有一辆掉入河中的原因等，都说明了水文数据的重要性。

(3) 2005年松花江水质大污染、导致前国家环保总局局长辞职的揭秘——水文、水质数据给出了最好的说明。

0.4.4 水信息技术研究的具体任务

- (1) 研究站网规划与测站设立的理论与方法。
- (2) 各种水要素的观测技术。
- (3) 各种观测数据的处理技术。
- (4) 误差分析理论与方法。
- (5) 水文调查方法。
- (6) 现代水信息系统的组成与功能等。

0.5 中国水信息技术的发展

0.5.1 从历史回顾来看水信息技术的发展

1. 萌芽时期（远古~1400年）

(1) 开始了原始的水文观测（中国，埃及，大禹治水，李冰父子设于都江堰上的石人，隋代的石刻水则碑）。

(2) 开始积累原始的水文知识（水经注，成书于6世纪，记述了125条中国境内的河流）。

2. 奠基时期（1400~1900年）

(1) 近代水文仪器的发明使水文观测进入科学定量观测阶段（1663年，C. 雷恩，翻斗式自记雨量计；1687年，E. 哈雷，水面蒸发器；1790年，Woltmann，流速仪；1870年，T.G. 埃利斯，旋桨式流速仪；1882年，W.G. 普赖斯，旋杯式流速仪）。

(2) 近代水文科学理论逐步形成（1762年，意大利P. 弗里西著《河流水文测验方法》；19世纪末，一些国家出版年鉴）。

3. 应用水文学时期（1900~1950年）

在观测方法、理论体系及研究领域（实用方面）取得新成就。

4. 现代水文学时期（1950年至今）

- (1) 水资源领域。
- (2) 水环境领域。
- (3) 应用现代科学技术获取水信息。
- (4) 全球合作。

0.5.2 水质信息技术的发展

(1) 1929年,最早的水质观测——杭州自来水筹委会对钱塘江水进行的含盐度化验分析。

(2) 我国水质自动监测系统的研究始于20世纪80年代,主要用于重点水域的监测和管理,水质自动监测系统的数据通讯大多采用RS-232/RS-485总线、Internet、CAN总线来实现。发达国家已经广泛使用GSM、GPS及计算机网络技术来进行水质自动监测,而我国还处于初步研究阶段,环保、水利等相关部门目前还没有这样的大型水质自动监测和辅助决策支持系统,水质信息的巨大作用没有得到很好的发挥。

(3) 传统的水质监测与管理方式已经不能适应当前水质监测自动化、信息化的需要。将现代电子技术、通信技术及计算机技术融入其中,是实现水质信息化的一条必由之路。

0.5.3 与世界先进水平的差距

- (1) 测验基本理论的研究薄弱。
- (2) 站网较稀而用人较多。
- (3) 仪器比较落后。
- (4) 新技术在水信息技术中的应用起步不久。

0.6 课程内容的安排及特点

(1) 课程课堂内授课学分数2.0,实验课授课学分数0.5,水文测验教学实习学分数2.0,数据处理课程设计学分数1.0。由此可见,本课程实践性强。

(2) 安排习题作业,实验、实习及课程设计,提交报告,参见辅助教材内容。

(3) 水信息采集与数据处理项目多、方法多,易混淆,要求做笔记以及进行适当的归纳、总结;习题、报告中数据多,重复工作多,按照有效数字计算;达到真正弄懂概念,掌握方法,达到初步运用的程度。

第 1 章

测 站 与 站 网

水信息，受气象、地理、各地工农业生产发展情况等多方面因素的影响，存在着地区性、不重复性及周期性的特点。要研究和掌握水文要素、水质要素在不同时期、不同地区及不同条件下的变化规律，就必须对其进行采集。采集方式可以选择欧拉法或拉格朗日法。但要长期收集这些要素，拉格朗日法则有着明显的优势。因而，无论对过去的、现在的、还是未来的水信息进行采集，都需要有采集的场所，即测站。许多测站组成站网。

1.1 测 站

1.1.1 定义

在流域内一定地点（或断面）按统一标准对指定的水要素进行系统、规范的观测以获取所需水信息而设立的观测场所称为测站。图 1-1 是长江荆江段的一个水文测站水位自记台。

1.1.2 测站的分类

按观测的项目测站可分为以下几种。

(1) 水文测站。为经常收集水文数据而在河、渠、湖、库上或流域内设立的各种水文观测场所的总称。

(2) 水质监测站。为掌握水质动态，收集和积累水质基本资料而设置的水质信息测站。因为有监视、监管的内涵，所以取名监测站。

(3) 气象观测站。对气象诸要素进行观测的场所的总称。

按观测的方式分测站可分为以下几种。

(1) 人工观测站。

(2) 自动监测站。

(3) 遥感遥测站。

(4) 卫星监测站。



图 1-1 长江荆江段的一个水文测站水位自记台

上述测站还可进一步划分，如水文测站按所观测的项目分水位、流量、泥沙、降水、蒸发、水温、冰凌、水质、地下水位等。只观测上述项目中的一项或少数几项的测站，按其主要观测项目分别称为水位站、流量站（也称水文站）、雨量站、蒸发站等。气象观测站可以按其主要观测项目分别称为雨量站、蒸发站、高空风观测站、风速观测站、露点观测站等。

若根据测站性质划分，水文测站又可分为基本站、专用站两大类。基本站是水文主管部门为掌握全国各地的水文情况而设立的，是为国民经济各方面的需要服务的。专用站是为某种专门目的或用途由各部门自行设立的。这两类测站是相辅相成的，专用站在面上辅助基本站，而基本站在时间系列上辅助了专用站。

1.2 站 网

1.2.1 定义

测站在地理上的分布网称为站网。广义的站网是指测站及其管理机构所组成的信息采集与处理体系。

1.2.2 目的

测站设立的数目与当时当地经济发展情况有关。如何以最少站数来控制广大地区水文、水质要素的变化，这与测站布设位置是否恰当有着密切关系。站网规划就是将测站按照一定的科学原则布设在流域的合适位置上。站网布设后可以把测站有机地联系起来，使测站发挥出比孤立存在时更大的作用。通过所设站网采集到的水信息经过整理分析后，达到可以内插流域内任何地点水文或水质要素的特征值。

1.2.3 站网规划的任务

研究测站在地区上分布的科学性、合理性、最优化等问题。

例如,按站网规划的原则对水文站网中河道流量站进行布设:当流域面积超过 $3000\sim 5000\text{km}^2$,应考虑能够利用设站地点的资料,把干流上没有测站地点的径流特性插补出来;预计将修建水利工程的地段,一般应布站观测;对于较小流域,虽然不可能全部设站观测,但应在水文特征分区的基础上,选择有代表性的河流进行观测;在中、小河流上布站时还应当考虑暴雨洪水分析的需要,如对小河应按地质、土壤、植被、河网密集程度等下垫面因素分类布站,布站时还应注意雨量站与流量站的配合;对于平原水网区和建有水利工程的地区,应注意按水量平衡的原则布站。也可以根据实际需要,安排部分测站每年只在部分时期(如汛期或枯水期)进行观测。又如水质监测站的布设,应以监测目标、人类活动对水环境的影响程度和经济条件这3个因素作为考虑的基础。

我国1949年各类水文测站总数仅有353处,其中水文站148处;1984年各类水文测站总数已达21618处,其中水文站3396处,水位站1425处,雨量站16734处,实验站63处。在上述测站中,共计观测流量3396处,水位4821处,泥沙1583处,冰情1103处,雨量16734处,天然水化学分析977处,水质污染监测1752处。1999年,水文站达3683个。到2006年,除台湾省外,据全国水文站网年报统计,全国有国家基本水文站共2936处,水位站1160处,雨量站14373处,水质站4557处,地下水观测井12313处。2005年各类水文站网在保持基本稳定的同时,逐步进行了优化调整,雨量站、水质站、地下水监测站点有所增加。1956年开始统一规划布站,经过多次调整,布局已比较合理,对国民经济发展起到了积极作用。但随着我国水利水电的发展,大规模人类活动的影响不断改变着天然河流产汇流、蓄水及来水量等条件,因此对水文站网要进行适当调整、补充。

1.2.4 站网的分类

(1)按测验项目分类。站网分为水位站网、流量站网、雨量站网、蒸发站网、泥沙站网、水质站网、地下水观测井网等以及实验站网。

(2)按经办机构分类。站网分为国家站网、群众站网。

(3)按测站性质分类。站网分为基本站网、专用站网。

基本站网是综合国家经济各方面需要,由国家统一规划建立的。要求以最经济的测站数目,能达到内插任何地点的特征值为目的。基本站网中,站与站之间有密切的联系,一个站的站址变动会影响到邻近测站的布局。因此,一旦基本站网建立了,再变动站址就应慎重考虑。要提交变动论据,并需经流域、省或区相应部门领导机关审定。基本站的工作应根据颁布的各类测验技术规程进行观测、测验,获取数据必须统一整编刊印或以其他方式长期存储。

按水文基本站网的性质和任务,又分为控制站、区域代表站、小河站和实验站。
①控制站是为探索特征值及其沿河长的变化规律和防汛需要而在大河上布设的测站;
②区域代表站是为探索中等河流水文特征地区规律而在有代表性的中等河流上布设的水文站,用以解决中等河流水文资料在地区上的移用问题;
③小河站是为探索各种下

垫面条件下的小河径流变化规律而在有代表性的小河流上布设的水文测站,用以解决小河水文资料在地区上的移用问题;④实验站,为对某种水文现象的变化过程或某些水体进行全面深入的实验研究而设立的一个或一组水文测站,如径流实验站、蒸发实验站、水库湖泊实验站、河床演变实验站、沼泽实验站、河口实验站、水土流失实验站、雨量站网密度实验站等。在国外,还有实验性流域和水文基准站。实验性流域是研究一个天然流域经过不同程度不同措施的人工治理后对水循环的影响;水文基准站是研究在自然情况下水循环各因素长期变化的趋势。

专用站网是为科学研究、工程建设、管理运用等特定目的而设立的,它的观测项目、要求及测站的撤销与转移,依设站目的而定,可由该部门自行规定。

基本站网与专用站网,它们的作用是相辅相成的。专用站在面上补充基本站,而基本站在时间系列上辅助专用站。群众站网主要是雨量站,它是对国家站网的补充,对及时指导当地生产建设、防汛抗旱起积极作用。

站网(主要指基本站网)建成后并不是一成不变的,而是应当根据经济发展的需要和测站的实际作用不断加以补充和调整,以满足经济建设和科学研究对水文、水质资料的需要。因此,对布设的站网,需要不断地做下列工作。

(1) 站网分析,指为了充分发挥站网整体功能,对现有站网资料进行的分析研究工作。

(2) 站网检验,指按一定的原则和方法对现有测站进行设站目的任务在站网整体功能中的作用等的检查和验证。

(3) 站网优化,指在一个地区或流域内使站网能以较少的站点控制基本水要素在时间和空间上的变化且投资少、效率高、整体功能强的分析工作。

(4) 站网调整,指为使站网不断优化及随着情况的变化对测站进行增、撤、迁的工作。

1.2.5 基本流量站网布设的原则

1. 线的布设

(1) 定义。沿大河干流每隔适当距离就布设一个测站,站间距离应满足沿河长内插径流特征值的精度要求以及沿河长发布水文情报、预报的需要见图1-2。

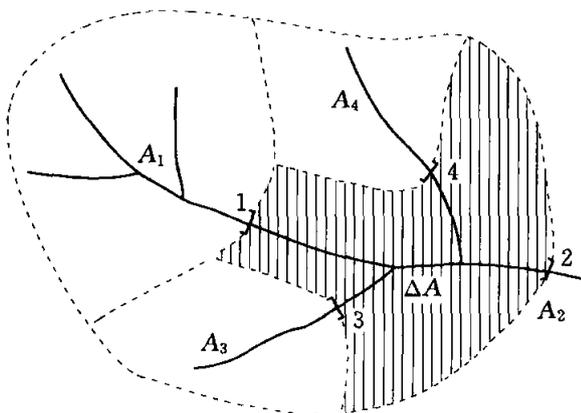


图1-2 线的布设原则示意

(2) 公式表达。考虑到流量误差,相邻站间距离应使得径流量(或流域面积)沿河长有一定的递增率(λ),一般规定为

$$\frac{R_2 - (R_1 + R_3 + R_4)}{R_1 + R_3 + R_4} \geq 10\% \sim 15\% \quad (1-1)$$

(3) 适用条件。流域面积不小于5000km²(南方为3000km²)的大河干流。

(4) 规划应用。上游至下游:上游稀,下游密;河流水量最大处或沿河长水量有显著变化的地方:如河流下游、在入汇口处

等要设站。

2. 区域的布设

(1) 定义。根据气候、下垫面等自然地理因素进行水文分区，在分区内选择有代表性的流域布设测站。利用这些站的资料可以进行相似河流的水文计算，而不必在每条中小河流布站。

(2) 适用条件。流域面积为 $200\sim 5000\text{km}^2$ (南方为 3000km^2) 的中等河流。

(3) 注意事项：

- 1) 流域面积对水文特征值影响很大，一般要按不同面积分级布站。
- 2) 区域原则主要是控制水文特征值在面上的变化，布站在面上要分布均匀。
- 3) 布站在高度上要分布均匀。
- 4) 考虑土壤、植被等对产流的影响，流域形状、坡度对河道汇流的影响。

3. 分类原则

(1) 原因。对流域面积小于 200km^2 的河流，因这类河流数目很多，如采用区域布设代表站则数量过多。这类小河的流域特性差异较大，但小河流域的植被、土壤、地质等因素比较单一，占主导地位的某单项因素，可较灵敏地直接影响支流的形成和变化。且流域越小，单项因素的影响越显著。因此，按下垫面分类原则来布站，即按自然地理条件如湿润地区、沙漠、黄土高原等划分大区；按植被、土壤、地质、河床质组成等下垫面因素进行分类；同一类型按流域面积大小分级，并考虑流域坡度、形状等因素进行布站。

(2) 目的。在布站的数量上，以能妥善确定产流汇流参数的要求为准。由此原则布设的小河流所搜集的资料，可以应用到相似的、无水文资料的小流域上。

(3) 适用条件。流域面积小于 200km^2 的小河流。

1.2.6 水环境监测站网的布设

水环境监测站网是按一定的目的与要求，由适量的各类水质站组成的水环境监测网络。水环境监测站网可分为地表水、地下水和大气降水 3 种基本类型。根据监测目的或服务对象的不同，各类水质站可组成不同类型的专业监测网或专用监测网。

水环境监测站网规划应遵循以下原则。

- (1) 以流域为单元进行统一规划。
- (2) 与水文站网、地下水水位观测井网、雨量观测站网相结合。
- (3) 各行政区站网规划应与流域站网规划相结合。
- (4) 站网应不断进行优化调整，力求做到多用途、多功能，具有较强的代表性。

流域机构和各省（自治区、直辖市）水行政主管部门应根据水环境监测工作的需要，建立、健全本流域、本地区水环境监测站网。

1.2.7 中国站网布设存在的问题

(1) 站网稀且分布不均。世界气象组织 (WMO) 建议容许最稀站网密度的水平是：一般平原区每站面积 $1000\sim 2500\text{km}^2$ ，山区每站面积 $300\sim 1000\text{km}^2$ 。我国水文站平均每站面积约为 2600km^2 ，特别是西部地区小于 $1/10000$ (站/ km^2)。世界各大洲水文站网密度状况见表 1-1，中国、美国、前苏联三国水文测站数比较见表 1-2。

表 1-1 世界各大洲水文站网密度状况

地区	欧洲	北美洲	大洋洲	亚洲	世界平均
密度 (km ² /站)	1750	1000	2600	3600	2650

表 1-2 中国、美国、前苏联三国水文测站数比较

国名	统计年份	水位站	流量站	泥沙站	水质站
中 国	1984	4821	3396	1583	1752
	2006	4914	3615	2048	5140
美 国	1980	9491	8300	1400	8900
	2006	34079	7000~7400		9954
前苏联	1985	8520	6832	2647	6055

注 美国另有 8200 处不连续观测流量站未计入。另外，因为 1991 年 12 月 26 日苏联宣布解体，所以就没有 2006 年苏联水文测站的统计数据。

(2) 全国的站网各自成一体。水文、水质、环境、气象、地下水等观测项目，分属不同的部门管理，不能统一设站，造成资源浪费。

(3) 经济条件制约。一段期间内，政府不可能有较多的经费投入，造成流域上游暴雨区缺少雨量站，湖区、平原区站少，使得水量不清、环境监测不及时，突发事件监测信息缺失或是不完整等。

(4) 人类活动对站网的影响。涉及到站网调整、资料还原等问题。

(5) 测验实施落后。在一定程度上，落后于国际上发达国家的水平。

1.3 水文测站的设立

水文测站的建站包括测验河段的选择和观测断面的布设。

1.3.1 水文测验河段选择

1. 选择条件

(1) 满足设站目的的要求。

(2) 稀遇洪水和枯水季节，均能测得所要信息。

(3) 在保证工作安全和测验精度的前提下，尽可能有利于简化水信息要素的观测和观测数据的整理分析工作。如具体对水文测站来说，就是要求测站的水位与流量之间呈良好的稳定关系（单一关系），从而可由水位过程推求出流量过程，大大减轻流量测验及资料整编的工作量。为此，要求水文站具有良好的测站控制。

(4) 交通方便，测站易于到达。

2. 考虑因素

要根据设站的目的要求和河流特性综合考虑，灵活掌握，慎重选择。如水文测站选择一般从以下几个方面考虑。

(1) 平原河流。应尽量选择河道顺直、匀整、稳定的河段，其顺直长度应不小于洪水时主横河宽的 3~5 倍，以保证比降一致。河段最好是窄深的单式断面，并尽可能避开不稳定的沙洲和冲淤变化过大的断面。河段内应不易生长水草，不受变动回水

影响。目的是尽量保证测验河段内，其断面、糙率、比降保持稳定。

(2) 山区河流。应选在石梁、急滩、卡口、弯道的上游附近规整的河段上，避开乱石阻塞、斜流、分流影响处。

石梁、急滩，一般在中、低水起控制作用，高水时失去控制；而卡口、急弯则在高水时起控制作用。在选择断面控制时，应综合考虑。

(3) 其他因素。避开受人为干扰的码头、渡口等处。对北方河流还应尽量避开易发生冰坝、冰塞的河段。选择测验河段还应尽可能靠近居民点。

总之，在选择水文测站时，最理想的是选择在各级水位均具备较好控制的河段。

3. 勘测调查

选择测验河段，应进行现场勘测调查。为了能充分了解河道情况和测量工作的方便，查勘工作最好在枯水期进行。勘测调查工作的主要内容有以下几个。

(1) 勘测前的准备工作。明确设站的目的任务，查阅有关文件资料，尤其是有关地形图、水准点、洪水情况等，确定勘测内容与调查大纲，制定工作计划，然后到现场调查。

为全面了解河道概况，对测验河段进行现场调查，调查内容包括以下几点。

1) 河流控制情况的调查。了解测站控制情况，控制断面位置，顺直河段长度，漫滩宽度，分流串沟等情况。

2) 河流水情的调查。了解历年最高、最低水位情况，估算最大流量、最小流量；了解变动回水的起源和影响范围、时间，估算变动回水向上游传播的距离；调查沙情、水草生长情况和冰凌情况。

3) 河床组成，河道的变迁及冲淤情况的调查。

4) 流域自然地理情况、水利工程、测站工作条件的调查。

(2) 野外测量。在勘测中，应进行简易地形测量、大断面测量、流向测量、瞬时水面纵比降测量等工作。

(3) 编写勘测报告。把调查的情况及测量出的成果分析整理，提出意见，为选择站址提供依据。

1.3.2 水文测站控制

1. 定义

对测站的水位与流量关系起控制作用的断面或河段的水力因素总称。前者称为断面控制，后者称为河槽控制。

2. 断面控制

(1) 控制原理。在天然河道中，由于地质或人工的原因，造成河段中局部地形突起，如石梁、卡口等，使得水面曲线发生明显转折，形成临界流，出现临界水深 h_k ，从而构成断面控制（图 1-3）。

(2) 公式表达。由水力学得知，产生临界流处，弗劳德数 $F_r=1$ ，即

$$F_r = \frac{V_k^2}{gh_k} = 1$$

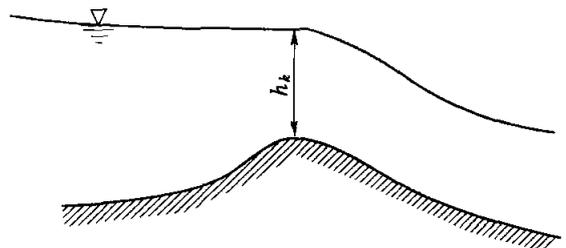


图 1-3 低水断面控制示意

$$V_k = \sqrt{gh_k}$$

设临界水深处河道横断面为矩形断面，断面面积 $A = Bh_k$ ，则临界流量为

$$Q_k = AV_k = A \sqrt{gh_k} = (B\sqrt{g})h_k^{3/2} \quad (1-2)$$

式中： B 为矩形河道横断面宽度，m； h_k 为临界水深，m； V_k 为临界流速，m/s。

石梁无冲淤，所以，临界水深 h_k 随临界水位 Z_k 而变，故 Q 为

$$Q = f_1(h_k) = f(Z_k) \quad (1-3)$$

(3) 控制灵敏度。对式 (1-2) 两边取对数为

$$\ln Q_k = \ln(B\sqrt{g}) + \frac{3}{2} \ln Z_k$$

两边取微分为

$$\delta Q_k = \frac{dQ_k}{Q_k} = \frac{3}{2} \frac{dh_k}{h_k} = \frac{3}{2} \delta h_k \quad (1-4)$$

式 (1-4) 说明，产生临界流时，其临界流量 Q_k 的相对误差是临界水深 h_k 相对误差的 1.5 倍。

[思考题 1-1] 若河道中同时有两处河段可以进行断面控制，但临界水深 $h_{k_2} = 2h_{k_1}$ ，应选何处作为断面控制？

解：由式 (1-4) 计算为

$$\frac{\delta Q_{k_1}}{\delta Q_{k_2}} = \frac{\frac{3}{2} \frac{dh_{k_1}}{h_{k_1}}}{\frac{3}{2} \frac{dh_{k_2}}{h_{k_2}}} = \frac{h_{k_2}}{h_{k_1}} = 2$$

即

$$\delta Q_{k_1} = 2\delta Q_{k_2} \quad (1-5)$$

由此引出推论：在河道中同时有两处河段可以进行断面控制时，断面窄深的控制灵敏度高。

3. 河槽控制

(1) 控制原理。当水位流量关系要靠一段河槽所发生的阻力作用来控制，如该河段的底坡、断面形状、糙率等因素比较稳定，则水位流量关系也比较稳定。这就属于河槽控制。

(2) 公式表达。天然河道中的水流近似为缓变不均匀流，其平均流速为

$$\bar{V} = \frac{1}{n} R^{2/3} S_e^{1/2} \quad (1-6)$$

式中： n 为糙率； R 为水力半径，m， $R = \frac{A}{P}$ ，对宽浅河道，有： $R \approx \bar{h}$ ， \bar{h} 为断面平均水深； A 为河道过水断面面积， m^2 ； P 为河道过水断面湿周长，m； S_e 为能面比降，对缓变不均匀流，可用水面比降 S 代替。

于是，通过断面的流量为

$$Q = AV = A \frac{1}{n} R^{2/3} S_e^{1/2} = f_1(A, n, \bar{h}, S) = f(\Omega, n, Z, S) \quad (1-7)$$

要使式 (1-7) 最终能够成为 $Q = f(Z)$ ，只可能有两种情况：

- 1) 同一 Z 时, 断面因素、糙率、水面比降均不变。
- 2) 同一 Z 时, 断面因素、糙率、水面比降均变化, 但对流量的影响作用恰好互相补偿。

[思考题 1-2] 上述两种情况中, 哪一种比较容易发生? 给出理由。

- (3) 灵敏度。取宽浅河道, 水深 h 取断面平均水深 \bar{h} , 则

$$A = B\bar{h}$$

$$Q = A\bar{V} = \left(\frac{1}{n}BS^{1/2}\right)\bar{h}^{5/3} \quad (1-8)$$

同断面控制灵敏度的推求相同, 最后为

$$\delta_Q = \frac{5}{3}\delta_h \quad (1-9)$$

[思考题 1-3] 在河道中同时有两段河槽 (深度不同) 可以进行控制时, 选何处?

1.3.3 水文测站设立

1. 设立内容

(1) 埋设水准点, 并引测其高程。水准点分为基本水准点和校核水准点, 均应设在基岩或稳定的永久性建筑物上, 也可埋设于土中的石柱或混凝土桩上。前者是测定测站上各种高程的基本依据, 后者是经常用来校核水尺零点的高程。

- (2) 测量河段地形。
- (3) 绘制地形图和水流平面图。
- (4) 依据地形图和水流平面图确定断面布设方向。
- (5) 布设测验断面、基线、高程基点、各种测量标志。
- (6) 设立各种观测设备 (水位、流量等)。
- (7) 填写测站考证簿。

2. 断面布设

- (1) 基本水尺断面。
- (2) 流速仪测流断面。流速仪测流断面应与基本水尺断面重合, 且与断面平均流向垂直。若不能重合时, 亦不能相距过远。
- (3) 浮标测流断面。浮标测流断面有上、中、下 3 个断面, 一般中断面应与流速仪测流断面重合。上、下断面之间的间距不宜太短, 其距离应为断面最大流速的 50~80 倍。
- (4) 比降测流断面。比降断面设立比降水尺, 用来观测河流的水面比降和分析河床的糙率。上、下比降断面间的河底和水面比降, 不应有明显的转折, 其间距应使得所测比降的误差能在 $\pm 15\%$ 以内。

3. 基线布设

在测验河段进行水文测验时, 为用测角交会法推求测验垂线在断面上的位置 (起点距 L) 而在岸上布设的线段, 称为基线 (图 1-4)。

基线宜垂直于测流横断面; 基线的起点应在测流断面线上。

从测定起点距的精度出发, 基线的长度应使测角仪器瞄准测流断面上最远点的方向线与横断面线的夹角不小于 30° (即应使基线长度 l 不小于河宽 B 的 0.6 倍); 在受

地形限制的个别情况下，基线长度最短也应使其夹角大于 15° 。

基线的长度及丈量误差，都直接影响断面测量精度，间接影响到流沙率、输沙率测验的精度。因此，基线除要求有一定长度外，基线长度的丈量误差不得大于 $1/1500$ 。视河宽 B 而定，一般应为 $0.6B$ 。在受地形限制的情况下，基线长度最短也应为 $0.3B$ 。基线长度的丈量误差不得大于 $1/1000$ 。

图 1-4 是水文测站基线、断面布设示意。

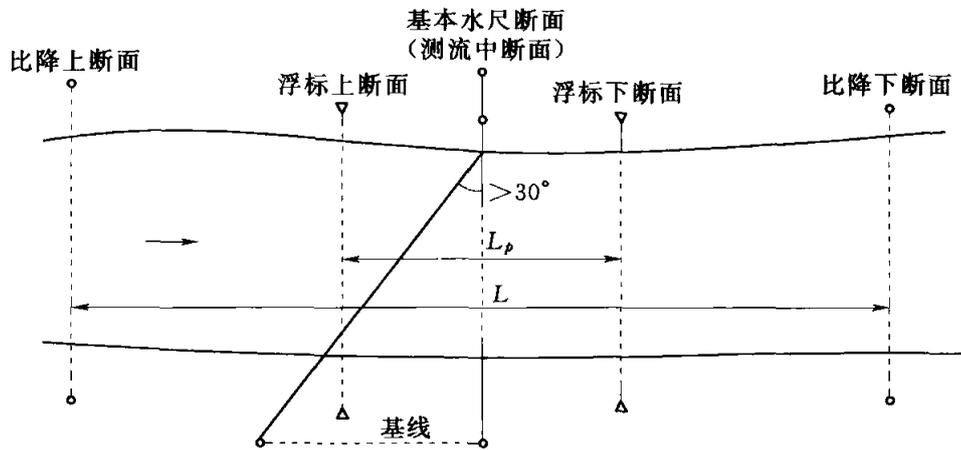


图 1-4 水文测站基线、断面布设示意

1.4 水质监测站的设立

水质监测站是进行水环境监测采样和现场测定，定期收集和提供水质、水量等水环境资料的基本单元，可由一个或多个采样断面或采样点组成。

1.4.1 设立原则

1. 源头背景水质站

应设置在各水系上游，接近源头且未受人为活动影响的河段。

2. 干、支流水质站

应设置在下列水域、区域。

(1) 干流控制河段，包括主要一二级支流汇入处、重要水源地和主要退水区。

(2) 大中城市河段、主要城市河段和工矿企业集中区。

(3) 已建或将建大型水利设施河段，大型灌区或引水工程渠首处。

(4) 入海河口水域。

(5) 不同水文地质或植被区、土壤盐碱化区、地方病发病区、地球化学异常区、总矿化度或总硬度变化率超过 50% 的地区。

3. 湖泊（水库）水质站

应按下列原则设置。

(1) 面积大于 100km^2 的湖泊。

(2) 梯级水库和库容大于 1 亿 m^3 的水库。

(3) 具有重要供水、水产养殖、旅游等功能或污染严重的湖泊（水库）。

4. 界河（湖、库）水质站

重要国际河流、湖泊，流入、流出行政区界的主要河流、湖泊（水库），以及水环境敏感水域，应布设界河（湖、库）水质站。

1.4.2 分类

根据目的与作用，水质站可分为以下几种。

(1) 基本站是为水资源开发、利用与保护提供水质、水量基本资料，并与水文站、雨量站、地下水水位观测井等统一规划设置的站。基本站应保持相对稳定，其监测项目与频次应满足水环境质量评价和水资源开发、利用与保护的基本要求。基本站长期掌握水系水质变化动态，搜集和积累水质基本信息。

(2) 辅助站是配合基本站，进一步掌握污染状况的。

(3) 专用站是为某种特定目的提供服务而设置的站，其采样断面（点）布设、监测项目与频次等视设站目的而定。

(4) 背景站（又叫本底站）是用于确定水系自然基本底值（即未受人为直接污染影响的水体质量状况）。

(5) 水污染流动监测站是将监测仪器、采样装置以及用于数据处理的计算机等安装在适当的运载工具上的流动性监测设施，如水污染监测车（或船）。它具有灵活机动且监测项目比较齐全的优点。

按水体类型水质站可分为地表水水质站、地下水水质站与大气降水水质站等。

设置水质站前，应调查并收集本地区有关基本资料，如水质、水量、地质、地理、工业、城市规划布局，主要污染源与入河排污口以及水利工程和水产等，用作设置具有代表性水质站的依据。

1.4.3 存在问题

我国的水质监测站仍有较大不足。主要表现在以下几个方面。

(1) 水质自动监测站数量较少，缺乏自动测报能力。水质监测信息主要依附于实验室，无法获得对重点水功能区水质监测的实时数据。而美国，新设备、新技术已普遍应用于水质水量的自动监测，如水质自动监测设备（多参数）以及采用 GSM 进行数据通信的水质自动测报系统等。国内虽有且已达到国际水平的水质自动监测系统（如黄河花园口配置的 XHWS-90A 型地表水质连续自动监测系统），但数量较少。

(2) 移动水质分析实验室配备数量太少，机动监测能力不足，掌握突发性水污染事故能力差。而国外在完善实验室监测的同时，水质移动监测设备已得到了较大的发展。

(3) 部分水质监测中心的采样能力不足，监测频率低，水质监测实验室的监测设备老化，大型分析仪器配备不平衡，不适应水质监测管理的要求。

(4) 水质监测站点多以掌握地表水水资源质量功能为主，缺乏对地下水、大气降水的监测。并且部分区域水质监测站点总数少于功能区数量，地域分布不均匀、布局不合理。水质信息没有统一联网，共享程度差。

因此，在国内建设水资源监测和信息采集系统时，随着水污染的日益严重，应针对区域水资源具体特点，因地制宜，全面统一地对水文、水质进行监测，以实现流域或区域水资源的统一管理，提高水资源管理的效果。

1.5 收集水信息的基本途径

1.5.1 驻测

1. 定义

在河流或流域内的固定点上对水文、水质要素所进行的观测，这是我国收集水信息的最基本方式。

2. 缺点

驻测的缺点是用人多、站点不足、效益低等。

1.5.2 巡测

1. 定义

观测人员以巡回流动的方式定期或不定期地对一地区或流域内各观测点进行流量等水文、水质要素的观测。

2. 缺点

巡测的缺点是增加了漏测的可能性。

1.5.3 间测

1. 定义

间测是中小河流水文站有10年以上资料分析证明其历年水位流量关系稳定，或其变化在允许误差范围内，对其中一要素（如流量）停测一时期再施测的测停相间的测验方式。停测期间，其值由另一要素（水位）的实测值来推算。

2. 缺点

间测的缺点是适用面窄。

1.5.4 水文调查

1. 定义

水文调查是为弥补水文基本站网定位观测的不足或其他特定目的，采用勘测、调查、考证等手段进行水文信息收集的工作。

2. 缺点

水文调查的缺点是准确度不如实测信息高。

1.5.5 水质调查

1. 定义

非长期定点的水质监测及调查工作。目的是在较短时期内，获取水体污染现状（包括兴建大型水利工程所造成的影响）和危害程度的数据，寻觅和测定造成水体污染的根源，认识影响水体污染（和净化）的环境条件，揭示水体污染的发展趋势。一般都为专门任务而进行。

2. 缺点

水质调查的缺点是事后调查，有些参数无法复原。

复 习 题

1-1 什么叫测站、站网规划？基本流量站网布设的原则是什么？

1-2 为什么必须对站网进行调整？如何调整？

1-3 结合实际经验体会，说明我国站网布设中存在哪些问题？

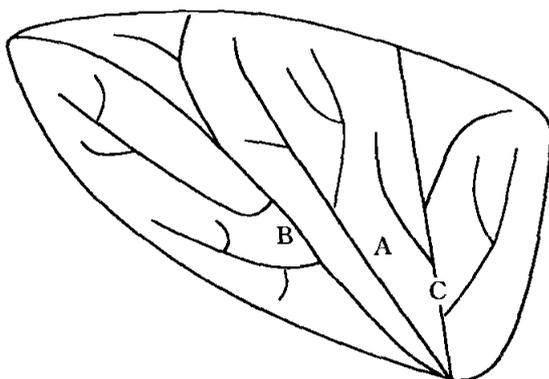
1-4 水文测验河段选择的原则是什么？

1-5 什么叫水文测站控制（包括断面控制及河槽控制）？测流断面为什么最好要选择在下游有石梁、急滩、卡口、急弯和堰坝的地方？是否能选择在发生临界流的断面上？

1-6 在测验河段上怎样合理布设各种水文断面？根据是什么？

1-7 水文站基线布设的原则是什么？为什么？（结合流量测验的有关部分来思考）

1-8 南京某流域， $A = 7500\text{km}^2$ ，分为上游山区、中游丘陵区、下游平原区，并有一级支流 A、B、C 3 条河流。其中 $A_a = 600\text{km}^2$ 、 $A_b = 2500\text{km}^2$ 、 $A_c = 1580\text{km}^2$ ，另有二级支流若干条，如下图所示。



根据站网布设的规划原则，至少应设几个站，分别设在何处？

1-9 在有河槽控制与断面控制时，根据什么理由来选择？（给出推导公式）

1-10 当某条河流查勘的水文测验河段上有两处位置能够同时满足断面控制，且 $dh_{k1} = dh_{k2}$ ， $h_{k1} = 2h_{k2}$ ，那么，仅从水文测站的控制条件来讲，应该选哪一处控制（给出具体数学表达式）？

第 2 章

降水观测

2.1 概 述

为更好地服务于防汛抗旱、水资源管理等，搜集降水的基本资料，称为降水量观测。降水量观测一般包括测记降雨、降雪、降雹的水量。单纯的雾、露、霜可不测记（有水面蒸发任务的测站除外）。必要时，部分测站还应测记雪深、冰雹直径、初霜和终霜日期等特殊观测项目。

降水量单位以 mm 表示，其观测记载的最小量（以下简称记录精度），应符合下列规定。

- (1) 需要控制雨日地区分布变化的雨量站必须记至 0.1mm。
- (2) 蒸发站的记录精度必须与蒸发观测的记录精度相匹配。
- (3) 不需要雨日资料的雨量站，可记至 0.2mm；多年平均降水量大于 800mm 地区，可记至 0.5mm；多年平均降水量大于 400mm，小于 800mm 地区，如果汛期雨强特别大，且降水量占全年 60% 以上，亦可记至 0.5mm。
- (4) 多年平均降水量大于 800mm 地区，可记至 1mm。

降水量的观测时间以北京时间为准。记起止时间者，观测时间记至 min；不记起止时间者，记至 h。每日降水以北京时间 8 时为日分界，即从昨日 8 时至今日 8 时的降水为昨日降水量。观测员观测所用的钟表或手机的走时误差每 24h 不应超过 2min，并应每日与北京时间对时校正。

2.2 雨量站布设及降水量观测场地

2.2.1 站地布设及场地查勘

降水量观测是水文要素观测的重要组成部分。降水量观测站点的布设是根据各流域的气候、水文特征和自然地理条件所划分成的不同水文分区，在水文分区内布设降水量观测站点。该站点的布设应能控制月、年降水量和暴雨特征值在大范围内的分布规律以及暴雨

的时空变化,以满足水资源评估调度及涉水工程规划、洪水和旱情监测预报,降水径流关系的确定等使用要求。降水量观测站网的布设不能按行政区划进行布设;雨量站网的布设密度按 SL 34-92《水文站网规划技术导则》执行;雨量站应长期稳定;降水量观测资料应进行整编后作为水文年鉴的重要组成部分长期存档;降水量观测场地的查勘工作应由有经验的技术人员进行;查勘前应了解设站目的,收集设站地区自然地理环境、交通和通讯等资料,并结合地形图确定查勘范围,做好查勘设站的各项准备工作。

降水量观测误差受风的影响最大。因此,观测场地应避开强风区,其周围应空旷、平坦、不受突变地形、树木和建筑物以及烟尘的影响。观测场地不能完全避开建筑物、树木等障碍物的影响时,雨量计离开障碍物边缘的距离不应小于障碍物顶部与仪器高差的2倍。在山区,观测场不宜设在陡坡上、峡谷内和风口处,应选择相对平坦的场地,使承雨器口至山顶的仰角不大于 30° 。难以找到符合上述要求的观测场时,可设置杆式雨量器。杆式雨量器应设置在当地雨期常年盛行风向的障碍物的侧风区,杆位离开障碍物边缘的距离不应小于障碍物高度的1.5倍。在多风的高山、出山口、近海岸地区的雨量站,不宜设置杆式雨量器。原有观测场地如受各种建设影响已经不符合要求时,应重新选择。在城镇、人口稠密等地区设置的专用雨量站,观测场选择可适当放宽。

此外,还需进行观测场地查勘。查勘范围为 $2\sim 3\text{km}^2$ 。主要内容包括:地貌特征,障碍物分布,河流、湖泊、水工程的分布,地形高差及其平均高程;森林、草地和农作物分布;气候特征、降水和气温的年内变化及其地区分布,初终霜、雪和结冰融冰的大致日期,常年风向风力及狂风暴雨、冰雹等情况,当地河流、村庄名称和交通、邮电通讯条件等。

2.2.2 场地设置

除试验和比测需要外,观测场最多设置两套不同观测设备。仅设一台雨量器(计)时,观测场地面积为 $4\text{m}\times 4\text{m}$;同时设置雨量器和自记雨量计时面积为 $4\text{m}\times 6\text{m}$;如试验和比测需要、雨量器(计)上加防风圈测雪及设置测雪板、或设置地面雨量器(计)的雨量站,应根据需要或 SD 265-88《水面蒸发观测规范》的规定加大观测场面积。

观测场地应平整,地面种草或作物,其高度不宜超过20cm。场地四周设置栏栅防护,场内铺设观测人行小路。栏栅条的疏密以不阻滞空气流通又能削弱通过观测场的风力为准,在多雪地区还应考虑在近地面不致形成雪堆。有条件的地区,可利用灌木防护。栏栅或灌木的高度一般为 $1.2\sim 1.5\text{m}$,并应常年保持一定的高度。杆式雨量器(计),可在其周围半径1.0m的范围内设置栏栅防护。观测场内的仪器安置要使仪器相互不受影响,观测场内的小路及门的设置方向,要便于进行观测工作。观测场地布置可如图2-1所示,水面蒸发站的降水量观测仪器按 SD 265-88《水面蒸发观测规范》的要求布置。

2.2.3 场地保护

在观测场四周按前面规定的障碍物距仪器最小限制距离内,属于保护范围,不应兴建建筑物,不应栽种树木和高秆植物。应保持观测场内平整清洁,经常清除杂物杂草。对有可能积水的场地,应在场地周围开挖窄浅排水沟,以防止场内积水。保持栏栅完整、牢固,定期油漆,及时更换废损的栏栅。

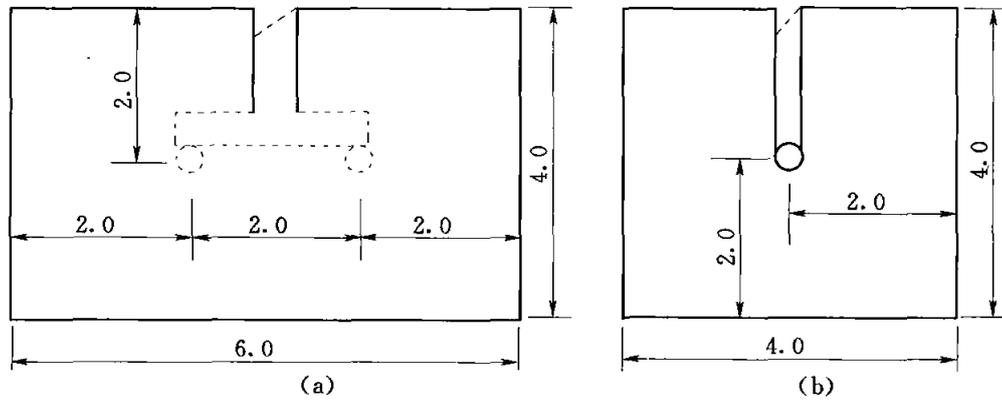


图 2-1 降水量观测场平面布置示意 (单位: m)

(a) 安置两台仪器; (b) 安置一台仪器

2.2.4 雨量站考证簿的编制

考证簿是雨量站最基本的技术档案, 是使用降水量资料必需的考证资料, 应在查勘设站任务完成后编制。以后如有变动, 应将变动情况及时填入考证簿。考证簿内容包括: 测站沿革, 观测场地的自然地理环境, 平面图, 观测仪器, 委托观测员的姓名、住址, 通讯和交通等。包括考证簿编制一式四份 (或三份) 和电子文档, 分别存本站 (委托雨量站可不保存考证簿)、指导站、地区 (市) 水文领导部门, 省 (自治区、直辖市) 或流域水文领导机关。公历逢“5”的年份, 应全面考证雨量站情况, 修订考证簿; 公历逢“10”的年份也可重新进行考证。雨量站考证内容有变化或迁移时, 应随即补充或另行建立考证簿。

2.3 仪器及观测

2.3.1 仪器组成、分类及适用范围

降水量观测仪器由传感、测量控制、显示与记录、数据传输和数据处理等部分组成。各种类型的降水量观测仪器, 可根据需要, 选取上述组成单元, 组成具备一定功能的降水量观测仪器。降水量观测仪器按传感原理分类, 常用的可分为直接计量 (雨量器) (图 2-2)、液柱测量 (主要为虹吸式, 少数是浮子式)、翻斗测量 (单翻斗与多翻斗) 等传统仪器, 还有采用新技术的光学雨量计和雷达雨量计等。按记录周期分类, 可分为日记和长期自记。

常用降水量观测仪器适用范围见表 2-1。

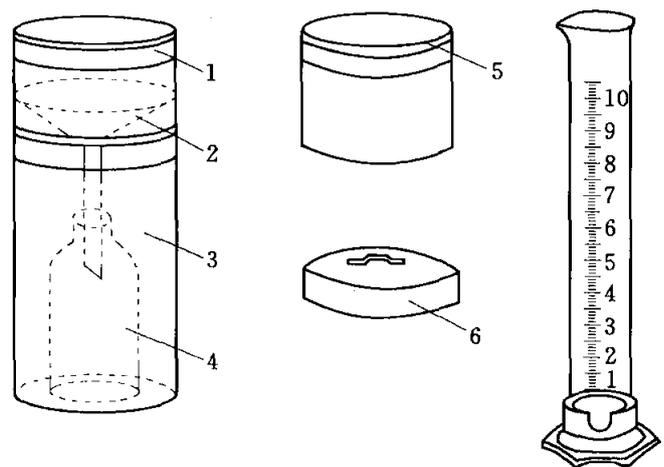


图 2-2 雨量器及量雨杯

1—承雨器; 2—漏斗; 3—储水桶; 4—储水器; 5—承雪器; 6—器盖

表 2-1 常用降水量观测仪器及适用范围

名 称		适 用 范 围
雨量器		适用于驻守观测的雨量站
虹吸式自记雨量计		适用于驻守观测液态降水量
翻斗式 自记雨量计	日记型	适用于驻守观测液态降水量
	长期 自记型	用于驻守和无人驻守的雨量站观测液态降水量，特别适用于边远偏僻地区无人驻守的雨量站观测液态降水量

2.3.2 雨量器观测降水量

1. 观测时段

用雨量器观测降水量，可采用定时分段观测，段次及相应时间见表 2-2。

各雨量站的降水量观测段次，一般少雨季节采用 1 段或 2 段次，遇暴雨时应随时增加观测段次；多雨季节应选用自记雨量计。

表 2-2 降水量分段次观测时间

段次	观测时间
1 段	8:00
2 段	20:00, 8:00
4 段	14:00, 20:00, 2:00, 8:00
8 段	11:00, 14:00, 17:00, 20:00, 23:00, 2:00, 5:00, 8:00
12 段	10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 18:00, 20:00, 22:00, 24:00, 2:00, 4:00, 6:00, 8:00
24 段	从本日 9 时至次日 8 时，每小时观测一次

2. 液态降水量观测

在观测时间若有降雨，则取出储水筒内的储水器，放入备用储水器，然后到室内用量雨杯测记降水量。如降水很小或已停止，可携带量雨杯到观测场测记降水量。为减少蒸发损失，应在降水停止后及时观测降水量，并记录在“降水量观测记

载簿”中与降雨停止时相应的时段降水量栏。使用量雨杯，读数时视线与水面凹面最低处平齐，观读至量雨杯的最小刻度，并立即记录，然后校对读数一次。降水量很大时，可分数次量取，并分别记在备用纸上，然后累加得其总量并记录。

3. 固态降水量观测

在降雪或雹时，应取掉雨量器的漏斗和储水器，或换成承雪器，用储水筒承接雪或雹，在规定的观测时间以备用储水筒替换，并将换下来的储水筒加盖带回室内。

待取回室内的储水筒内的雪或雹融化后（禁止用火烤），倒入量雨杯量测。取定量温水加入储水筒融化雪或雹，用量雨杯测出总量，减去加入的温水量，即得雪或雹量。配有感量不大于 1g 台秤的站，可用称重法。称重前应将附着在筒外的降水物和泥土等清除干净。

4. 特殊观测

有特殊观测任务的测站，用自记雨量计观测降水时，如遇固态降水物或测记雾、露、霜时，应记录降水物符号。降水物符号记于降水量数值的右侧，单纯降雨和无人驻守雨量站不注记降水物符号。降水物符号如下：

- * —— 雪；
- * —— 有雨，也有雪；
- A * —— 有雹，也有雪；

- A——雹或雨夹雹；
 U——霜（规定记载初、终霜日期或规定观测霜量的雨量站用）；
 ≡——雾（规定观测雾量的雨量站用）；
 Ω——露（规定观测露量的雨量站用）。

当观测场四周视野地面被雪覆盖超过一半时，测记雪深。可在观测场安置面积为 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的测雪板进行雪深测量，亦可在观测场附近选择一块平坦、开阔地面，于入冬前平整好，并做上标志作为测记雪深的场地。每次测量雪深须分别测3点，求其平均值作为该次测量的值，记至 cm 。在测雪板上观测，3点相距 0.5m ；在附近场地上观测，3点相距 $5\sim 10\text{m}$ ，且每次测点位置应不重复。

为了将雪深正确折算成降水量，当雪深超过 5cm 时，可用体积法或称重法测量与雪深相应的雪压（记至 $0.1\text{g}/\text{cm}^2$ ），同时注意观测降雪形态，作为建立雪深和雪压关系的参数。未测雪压者，可将雪深与同期用雨量器观测的降雪量建立关系（亦应考虑降雪形态），必要时也可乘以 0.1 系数将雪深折算成降水量。

雪深和雪压都只观测当日或连续数日降雪的新积雪。一日或连续数日降雪停止后，应将测雪板上或测记雪深场地上的积雪清除。冬季降雪量很大且在冬季不消融的地区，可采用压实并平整场地上积雪的办法测新雪深。

遇降较大冰雹时，应选测几颗能代表为数最多的冰雹粒径作为平均直径，并挑选测量最大冰雹直径。被测冰雹的直径，为3个不同方向直径的平均值，记至 mm 。

5. 观测注意事项

每日观测时，注意检查雨量器是否受碰撞变形，检查漏斗有无裂纹，储水筒是否漏水。暴雨时，采取加测的办法，防止降水溢出储水器。如已溢流，应同时更换储水筒，并量测筒内降水量。如遇特大暴雨灾害，无法进行正常观测工作时，应尽可能及时进行暴雨调查，调查估算值应记入降水量观测记载簿的备注栏，并加文字说明。每次观测后，储水筒和量雨杯内不可有积水。

2.3.3 虹吸式自记雨量计观测降水量

1. 观测时间和程序

每日8时观测一次，有降水之日应在20时巡视仪器运行情况，暴雨时适当增加巡视次数，以便及时发现和排除故障，防止漏记降雨过程。

每日8时整时，立即对着记录笔尖所在位置，在记录纸零线上划一短垂线，作为检查自记钟快慢的时间记号。用笔挡将自记笔拨离纸面，换装记录纸。给笔尖加墨水，拨回笔挡对时，对准记录笔开始记录时间，划时间记号。有降雨之日，应在20时巡视仪器时，划注20时记录笔尖所在位置的时间记号。

换纸时无雨或仅降小雨，应在换纸前，慢慢注入一定量清水，使其发生人工虹吸，检查注入量与记录量之差是否在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内，虹吸历时是否小于 14s ，虹吸作用是否正常，检查或调整合格后才能换纸。

(1) 观测时，若有自然虹吸水量，应更换储水器，然后用量雨杯测量储水器内降水，并记载在该日降水量观测记录统计表中。

(2) 暴雨时，估计降雨量有可能溢出储水器时，应及时用备用储水器更换测记。换装在钟筒上的记录纸，其底边必须与钟筒下缘对齐，纸面平整，纸头纸尾的纵

横坐标衔接。连续无雨或降雨量小于 5mm 之日，一般不换纸，可在 8 时观测时，向承雨器注入清水，使笔尖升高至整毫米处开始记录，但每张记录纸连续使用日数一般不超过 5 日，并应在各日记录线的末端注明日期。每月 1 日必须换纸，以便按月装订。降水量记录发生自然虹吸之日，应换纸。8 时换纸时，若遇大雨，可等到雨小或雨停时换纸。若记录笔尖已到达记录纸末端，雨强还是很大，则应拨开笔挡，转动钟筒，转动笔尖越过压纸条，将笔尖对准纵坐标线继续记录，待雨强小时才换纸。

虹吸式自记雨量计（图 2-3）有下列情况之一者，需使用雨量器按照雨量器观测降水量要求观测降水量。

- (1) 少雨季节和固态降水期。
- (2) 当自记雨量计发生故障不能迅速排除时，用雨量器观测降水量，可根据雨量大小选择观测段次。
- (3) 需要同时用雨量器进行对比观测时，可按两段次观测。

2. 雨量记录的检查

正常的虹吸式雨量计的雨量记录线应是累积记录到 10mm 时即发生虹吸（允许误差 $\pm 0.05\text{mm}$ ），虹吸终止点恰好落到记录纸的零线上，虹吸线与纵坐标线平行，记录线粗细适当、清晰、连续光滑无跳动现象，无雨时必须呈水平线。每日时间误差应符合机械钟 3min/d，石英晶体钟应为 1min/d 的要求。若检查出不正常的记录线或时间超差，应分析查找故障原因，并进行排除。

3. 观测注意事项

- (1) 每日 8 时观测（或其他换纸时间）对准北京时间开始记录时，应先顺时针后逆时针方向旋转自记钟筒，以避免钟筒的输出齿轮和钟筒支撑杆上的固定齿轮的配合产生间隙，给走时带来误差。
- (2) 降雨过程中巡视仪器时，如发现虹吸不正常，在 10mm 处出现平头或波动线，即将笔尖拨离纸面，用手握住笔架部件向下压，迫使仪器发生虹吸，虹吸终止后，使笔尖对准时间和零线的交点继续记录，待雨停后才对仪器进行检查和调整。
- (3) 经常用酒精洗涤自记笔尖，使墨水流畅。
- (4) 自记纸应平放在干燥清洁的橱柜中保存。不应使用潮湿、脏污或纸边发毛的记录纸。
- (5) 量雨杯和备用储水器应保持干燥清洁。

2.3.4 翻斗式自记雨量计观测降水量

1. 自记周期的选择

使用划线模拟记录时，自记周期可选用 1 日、1 个月或 3 个月。每日观测的雨量站，可用日记式；低山丘陵、平原地区、人口稠密、交通方便的雨量站，以及不计雨日的委托雨量站，实行间测或巡测的水文站、水位站的降水量观测宜选用 1 个月；对

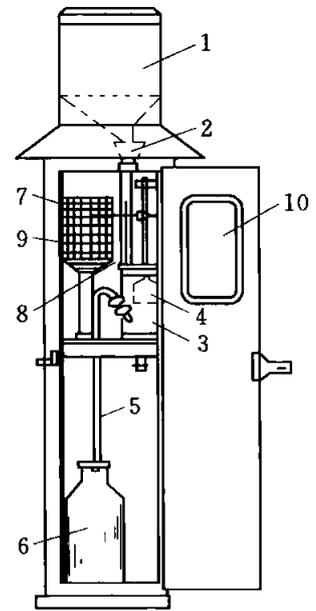


图 2-3 虹吸式雨量器
1—承雨器；2—小漏斗；3—浮子室；4—浮子；5—虹吸管；
6—储水器；7—记录笔；
8—笔挡；9—自记钟；
10—观测窗

高山偏僻、人烟稀少、交通极不方便地区的雨量站，宜选用3个月。

使用固态存储记录时，自记周期一般可选3个月、6个月或1年，由测站条件和系统配置而定。若数据传输采用无线或有线 PSTN 方式，则不受其限制，可根据降水量情况和测验需要决定数据传输的频度。

自记雨量计中的双翻斗式雨量计传感器见图 2-4，单翻斗式雨量计传感器见图 2-5。

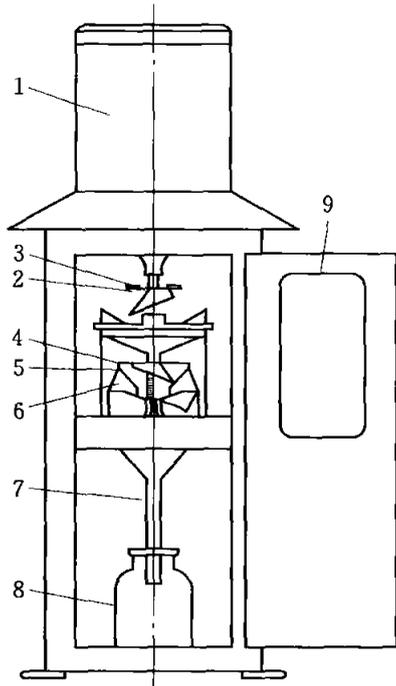


图 2-4 双翻斗式雨量计传感器

1—承雨器；2、4—定位螺钉；3—上翻斗；5—计量翻斗；6—计数翻斗；7—乳胶管；8—储水器；9—外壳

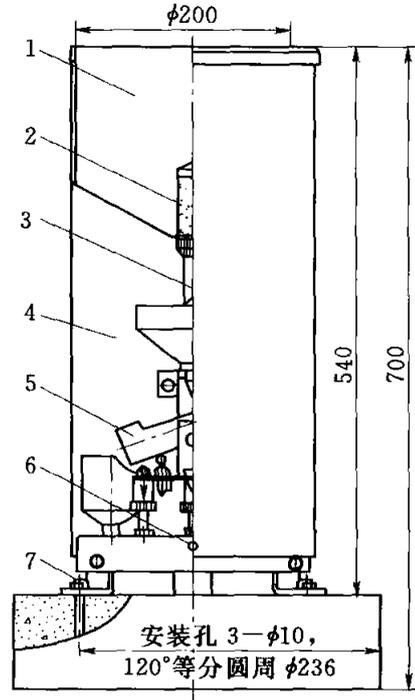


图 2-5 单翻斗式雨量计传感器

1—承雨器；2—防虫网；3—漏嘴；4—筒身；5—翻斗；6—M6 固定螺钉；7—M8 地脚螺钉

2. 观测（换纸）时间

每日 8 时观测一次，有降水之日应在 20 时巡视仪器运行情况，暴雨时适当增加巡视次数，以便及时发现和排除故障，防止漏记降雨过程。用长期自记记录方式观测的观测（换纸）时间，可选在自记周期末 1~3 日内无雨时进行。

为了便于巡测工作安排，指导站可按巡测路线，逐站安排日期。考虑两个周期始末记录的衔接、连续，一般不允许任意改变观测（换纸）日期，以免引起资料混乱。

3. 观测方法

每日观测前在记录纸正面填写观测日期和月份，背面印上降水量观测记录统计表（表 2-2）。每日 8 时整时，立即对着记录笔尖所在位置，在记录纸零线上划一短垂线，作为检查自记钟快慢的时间记号。用笔挡将自记笔拨离纸面，换装记录纸。给笔尖加墨水，拨回笔挡对时，对准记录笔开始记录时间，划时间记号。有降雨之日，应在 20 时巡视仪器时，划注 20 时记录笔尖所在位置的时间记号。到观测场巡视传感器工作是否正常，若有自然排水量，应更换储水器，然后用量雨杯测量储水器内降水，并记载在该日降水量观测记录统计表中。暴雨时应及时更换储水器，以免降水溢出。

换装在钟筒上的记录纸，其底边必须与钟筒下缘对齐，纸面平整，纸头纸尾的纵横坐标衔接。连续无雨或降雨量小于 5mm 之日，一般不换纸，可在 8 时观测时，向承雨器注入清水，使笔尖升高至整毫米处开始记录，但每张记录纸连续使用日数一般不超过 5 日，并应在各日记录线的末端注明日期。每月 1 日必须换纸，以便按月装订。

8 时换纸时，若遇大雨，可等到雨小或雨停时换纸。若记录笔尖已到达记录纸末端，雨强还是很大，则应拨开笔挡，转动钟筒，转动笔尖越过压纸条，将笔尖对准纵坐标线继续记录，待雨强小时才换纸。换纸时若无雨，可按动底板上的回零按钮，使笔尖调至零线上，然后换纸。有必要对记录器和计数器对比观测时，有降水之日，应在 8 时读计数器上显示的日降水量，然后按动按钮，将计数器字盘上显示的 5 个数字全部回复到零。如只为报讯需要，则按报讯要求时段读记，每次观读后，应将计数器全部复零。

长期自记观测雨量器在换纸前先对时，对准记录笔位在记录纸零线上划注时间记号线，注记年、月、日、时分和时差。按仪器说明书要求更换记录纸、记录笔和石英钟电池。

固态存储记录观测，先完成安装和检查的仪器，在正式投入使用前，清除以前存储的试验数据，对固态存储器进行必要的设置和初始化。设置的内容有站号、日期、时钟、仪器分辨力、采样间隔、通讯方式、通讯波特率等，应根据现场情况选择。其中采样间隔一般设置为 5min，需要时也可设置为 1min，对时误差应小于 60s。

仪器经过 1 个自记周期，读取降水量数据后，均要对仪器重新进行功能检查。复核初始化设置是否正确，清除已被读出的数据，重新开始下一个自记周期的运行。配置在水文自动测报系统中的长期自记雨量计，若采用按中心站随机指令或终端定时进行数据传输时，应结合系统测站的巡视维护安排，定期去测点，检查仪器工作情况。

4. 雨量记录的检查

划线模拟记录的检查要求：正常翻斗式雨量计的记录笔跳动 100 次，即上升到 10mm（分辨力为 0.2mm 者为 20mm），同步齿轮履带推条与记录笔脱开，靠笔架滑动套管自身重力，记录笔快速下落到记录纸的零线上，下降线与纵坐标线平行。记录笔无漏跳、连跳或一次跳两小格的现象，呈 0.1mm（或 0.2mm）一个阶梯形或连续（雨强大时）的清晰迹线，无雨时必须呈水平线。记录笔每跳一次满量程，允许有 ±1 次误差，即记录笔跳动 99 次或 101 次，与推条脱开，视为正常。对每日观测的记录器记录的降水量与自然排水量的差值，应符合传感器的测量准确度要求，其计算公式为

$$E(\%) = [(P_i - P_s) / P_s] \times 100\% \quad (2-1)$$

式中：E 为计量误差，%； P_i 为仪器记录降水量，mm； P_s 为仪器排出水量，mm。

记录时间日误差符合表 2-3 要求。对固态存储记录，在长周期内，时间精度要求较高时，应具有人工或自动定期校时的功能。

表 2-3 计时机构综合误差

记录周期 (d)	精密度 (min/d)	普通级 (min/d)	持续运行时间 (d)
1	±1/1	±5/1	≥1.5
31	±4/31		≥35
92	±9/92		≥100
185	±12/185		≥200
365	±15/365		≥400

如查出与上述要求不符之处，应分析查找故障原因，并进行排除。

固态存储记录的检查要求：用于每日观测的固态存储器，其记录降水量与自然排水量的差值，应符合传感器的测量准确度要求，其计算公式仍为式(2-1)。

记录时间误差应符合表2-3的要求。如查出与上述要求不符之处，应分析查找故障原因，并进行排除。

5. 观测注意事项

保持翻斗内壁清洁无油污，翻斗内如有脏物，可用水冲洗，禁止用手或其他物体抹拭。计数翻斗与计量翻斗在无雨时应保持同倾于一侧，以便有雨时，计数翻斗与计量翻斗同时启动，第一斗即送出脉冲信号。

保持基点长期不变，调节翻斗容量的两对调节定位螺钉的锁紧螺帽应拧紧。观测检查时，如发现任何一只有松动现象，应注水检查仪器基点是否正确。

定期检查干电池电压，如电压低于允许值，应更换全部电池，以保证仪器正常工作。

2.4 降水量资料整理

2.4.1 一般规定

审核原始记录，在自记记录的时间误差和降水量误差超过规定时，分别进行时间订正和降水量订正，有故障时进行故障期的降水量处理。统计日、月降水量，在规定时间内，按月编制降水量摘录表。用自记记录整理者，在自记记录线上统计和注记按规定摘录期间的时段降水量。

用计算机整编的雨量站，根据计算机整编的规定，进行降水量数据加工整理。测站同时有固态存储器记录和其他形式记录时，如固态存储器记录无故障，则以固态存储器记录为准，固态存储器记录的降水量资料应直接进入计算机整编。

指导站应按月或按长期自记周期进行合理性检查。

(1) 对照检查指导区域内各雨量站日、月、年降水量、暴雨期的时段降水量以及不正常的记录线。

(2) 同时有蒸发观测的站应与蒸发量进行对照检查。

(3) 同时用雨量器与自记雨量计进行对比观测的雨量站，相互校对检查。

按月装订人工观测记载簿和日记型记录纸，降水稀少季节，也可数月合并装订。

长期记录纸，按每一自记周期逐日折叠，用厚纸板夹夹住，时段始末之日分别贴在厚纸板夹上。指导站负责编写降水量资料整理说明。

兼用地面雨量器（计）观测的降水量资料，应同时进行整理。资料整理必须坚持随测、随算、随整理、随分析，以便及时发现观测中的差错和不合理记录，及时进行处理、改正，并备注说明。对逐日测记仪器的记录资料，于每日8时观测后，随即进行昨日8时至今日8时的资料整理，月初完成上月的资料整理。对长期自记雨量计或累积雨量器的观测记录，在每次观测更换记录纸或固态存储器后，随即进行资料整理，或将固态存储器的数据进行存盘处理。

各项整理计算分析工作，必须坚持一算两校，即委托雨量站完成原始记录资料的校正，故障处理和说明，统计日、月降水量，并于每月上旬将降水量观测记载簿或记录纸复印或抄录备份，以免丢失，同时将原件用挂号邮寄指导站，由指导站进行一校、二校及合理性检查。独立完成资料整理有困难的委托雨量站，由指导站协助进行。降水量观测记载簿、记录纸及整理成果表中的各项目应填写齐全，不得遗漏，不做记载的项目，一般任其空白。资料如有缺测、插补、可疑、改正、不全或合并时，应加注统一规定的整编符号。各项资料必须保持表面整洁，字迹工整清晰、数据正确，如有影响降水量资料精度或其他特殊情况，应在备注栏说明。

2.4.2 雨量器观测记载资料的整理

有降水之日于8时观测完毕后，立即检查观测记载是否正确、齐全。如检查发现问题，应加注统一规定的整编符号。

计算日降水量，当某日内任一时段观测的降水量注有降水物或降水整编符号时，则该日降水量也注相应符号。每月初统计填制上月观测记载表的月统计栏各项目。

2.4.3 虹吸式自记雨量计记录资料的整理

有降水之日于8时观测更换记录纸和量测自然虹吸量或排水量后，立刻检查核算记录雨量误差和计时误差，若超差应进行订正，然后计算日降水量和摘录时段雨量，月末进行月降水量统计。

1d内使用机械钟的记录时间误差超过10min，且对时段雨量有影响时，进行时间订正。如时差影响暴雨极值和日降水量者，时间误差超过5min，即进行时间订正。

订正方法：以20时、8时观测注记的时间记号为依据，当记号与自记纸上的相应纵坐标不重合时，算出时差，以两记号间的时间数（以h为单位）除以两记号间的时差（以min为单位），得每小时的时差数，然后用累积分配的方法订正于需摘录的整点时间上，并用铅笔划出订正后的正点纵坐标线。

下面介绍一下虹吸式雨量计记录雨量的订正。

(1) 虹吸量的订正。

1) 当自然虹吸雨量大于记录量，且按每次虹吸平均差值达到0.2mm，或1日内自然虹吸量累积差值大于记录量达2.0mm时，应进行虹吸订正。订正方法是将自然虹吸量与相应记录的累积降水量之差值平均（或者按降水强度大小）分配在每次自然虹吸时的降水量内。

2) 自然虹吸雨量不应小于记录量，否则应分析偏小的原因。若偏小不多，可能

是蒸发或湿润损失；若偏小较多，应检查储水器是否漏水，或仪器是否有其他故障等。

(2) 虹吸记录线进行倾斜订正（倾斜值达到 5min 时）。

1) 以放纸时笔尖所在位置为起点，画平行于横坐标的直线，作为基准线。

2) 通过基准线上正点时间各点，作平行于虹吸线的直线，作为“纵坐标订正线”。基准线起点位置在零线的，如图 2-6、图 2-7 所示；起点位置不在零线的，如图 2-8 所示。

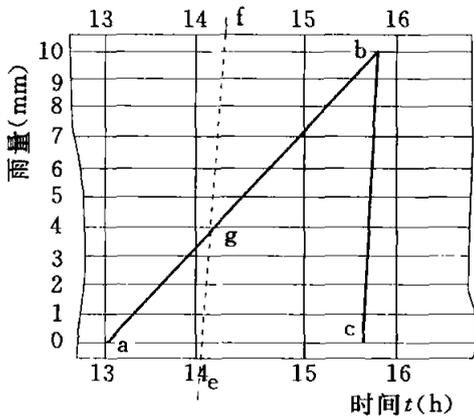


图 2-6 虹吸线倾斜订正示意
(起点位置在零线，右斜)

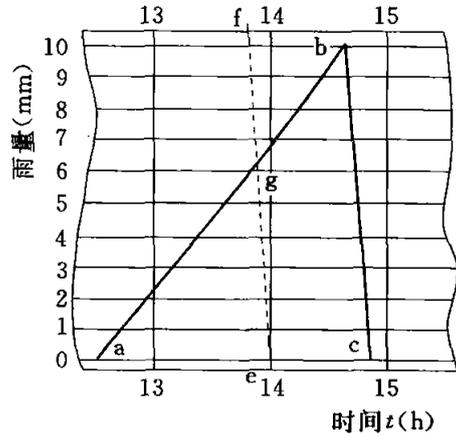


图 2-7 虹吸线倾斜订正示意
(起点位置在零线，左斜)

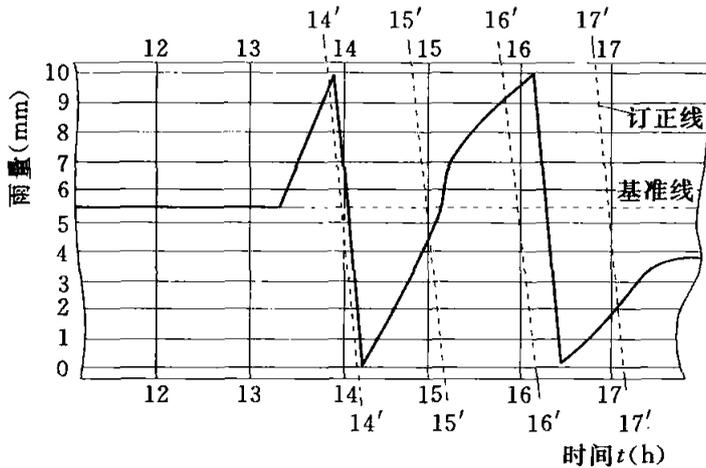


图 2-8 虹吸线倾斜订正示意 (起点位置不在零线)

通过订正后的正确时间，做虹吸倾斜线的平行线（即纵坐标订正线），再求订正后的雨量值。

(3) 以储水器收集的降水量为准订正。

1) 记录线在 10mm 处呈水平线并带有波浪状，则此时段记录雨量比实际降水量偏小。

2) 记录线到 10mm 或 10mm 以上等一段时间后才虹吸，记录线呈平顶状，则从开始平顶处顺趋势延长至与虹吸线上部延长部分相交为止，延长部分的降水量不应大

3) 纵坐标订正线与记录线交点的纵坐标雨量，即所求之值。如在图 2-6 中要摘录 14 时正确的雨量读数，则通过基准线 14 时坐标点，作一直线 ef 平行于虹吸线 bc，交记录线 ab 于 g 点，g 点纵坐标读数（图中 g 点为 3.5mm）即 14 时订正后的雨量读数。其他时间的订正值依此类推。

4) 如果遇到虹吸倾斜和时钟快慢同时存在，则先在基准线上做时钟快慢订正（即时间订正），再

于按储水器水量算得的订正值。

3) 大雨时, 记录笔不能很快回到零位, 致使一次虹吸时间过长。

(4) 按实际记录线查算降水量。

1) 虹吸时记录笔不能降至零线, 中途上升。

2) 记录笔不到 10mm 就发生虹吸。

3) 记录线低于零线或高于 10mm 部分。

4) 记录笔跳动上升, 记录线呈台阶形, 可通过中心绘一条光滑曲线作为正式记录。

(5) 器差订正。使用有器差的虹吸式自记雨量计观测时, 其记录应进行器差订正。

2.4.4 翻斗式自记雨量计记录资料的整理

1. 每日观测雨量记录的整理

当记录降水量与自然排水量之差达 $\pm 2\%$ 且达 $\pm 0.2\text{mm}$, 或记录日降水量与自然排水量之差达 $\pm 2.0\text{mm}$, 应进行记录量订正。记录量超差, 但计数误差在允许范围以内时, 可用计数器显示的时段和日降水量数值。如用机械钟, 则 1d 内使用机械钟的记录时间误差超过 10min, 且对时段雨量有影响时, 应进行时间校正。若时差影响暴雨极值和日降水量者, 时间误差超过 5min, 应进行时间校正。

翻斗式雨量计的量测误差随降水强度而变化, 有条件的站, 可进行试验, 建立量测误差与降水强度的关系, 作为记录雨量超差时, 判断订正时段的依据之一。无试验依据的站, 有以下订正方法。

(1) 1d 内降水强度变化不大, 则将差值按小时平均分配到降水时段内, 但订正值不足 1 个分辨力的小时不予订正, 而将订正值累积订正到达 1 个分辨力的小时内。

(2) 1d 内降水强度相差悬殊, 一般将差值订正到降水强度大的时段内。

(3) 若根据降水期间巡视记录能认定偏差出现时段, 则只订正该时段内雨量。

翻斗式自记雨量计降水量观测记录统计见表 2-4。

每日 8 时观测后, 将量测到的自然排水量填入表 2-4 (1) 栏, 然后根据记录纸依序查算表中各项数值, 但计数器累计的日降水量, 只在记录器发生故障时填入, 否则任其空白。若需计数器和记录器记录值进行比较时, 将计数器显示的日降水量 (或时段显示量的累计值) 填入, 并计算出相应的订正值。当记录器或计数器出现故障, 表中有关各栏记缺测符号, 并加备注说明。

表 2-4 年 月 日 8 时至 日 8 时降水量观测记录统计

(1)	自然排水量 (储水器内水量)	= mm
(2)	记录纸上查得的日降水量	= mm
(3)	计数器累计的日降水量	= mm
(4)	订正值 = (1) - (2) 或 (1) - (3)	= mm
(5)	日降水量	= mm
(6)	时钟误差	8 时至 20 时 分 20 时至 8 时 分
备注		

2. 长期自记记录资料的整理

在每个自记周期末观测后, 应立即检查记录是否连续正常, 计算计时误差。若超差, 应进行时间订正, 然后计算日降水量、摘录时段雨量。统计自记周期内各月降水

量。如条件许可, 在每场暴雨后应检查记录是否正常, 如发现异常, 应及时处理, 并记录处理时间, 以保证后续记录正常。

(1) 当计时误差达到或超过每月 10min, 且对日、月雨量有影响时, 进行时间订正。当计时出现故障时, 不进行时间订正。

(2) 订正方法为以自记周期内日数除以周期内时差 (以 min 为单位) 得每日的时差数, 然后从周期开始逐日累计时差达 5min 之日, 即将累计值订正于该日 8 时处, 从该日起每日时间订正 5min, 并继续累计时差, 至逐日累计值达 10min 之日起, 每日时间订正 10min, 依此类推, 直到将自记周期内的时差分配完毕为止。对于划线模拟记录, 在记录纸上用铅笔画出订正后的每日 8 时纵坐标线; 在需作降水量摘录期间或影响暴雨极值摘录时, 时间订正达 5min 之日, 应逐时画出订正后的纵坐标线。对于固态存储器记录, 可用电算程序订正。

2.5 降水量观测误差

用雨量器 (计) 观测降水量, 由于受观测场环境、气象、仪器性能、安装方式和人为因素等影响, 使降水量观测值存在系统误差和随机误差, 其组成为

$$p = p_m + \Delta p \quad (2-2)$$

$$\Delta p = \Delta p_a + \Delta p_w + \Delta p_e + \Delta p_s - \Delta p_b \pm \Delta p_g \pm \Delta p_j \pm \Delta p_r \quad (2-3)$$

式中: p 为降水量真值; p_m 为降水量观测值; Δp 为降水量观测误差; Δp_a 为风力误差; Δp_w 为湿润误差; Δp_e 为蒸发误差; Δp_s 为溅水误差; Δp_b 为积雪漂移误差; Δp_g 为仪器误差; Δp_j 为仪器计量误差; Δp_r 为测记误差。

误差的来源和控制应符合以下的规定。

2.5.1 风力误差

风力误差又称作空气动力损失, 在观测场环境合乎降水量观测要求的条件下, 风力误差主要因高出地面安装的雨量器 (计) 在有风时阻碍空气流动, 引起风场变形, 在器口形成涡流和上升气流, 器口上方风速增大, 使降水迹线偏离, 导致仪器承接的降水量系统偏小。 Δp_a 值的大小与风速、器口安装高度成增函数关系, 与雨滴大小成减函数关系, 降雪 Δp_a 值大于降雨。动力损失是降水量观测系统误差的主要来源, 一般可使年降雨量偏小 2%~10%, 降雪量偏小 10%~50%。应按下列要求将年降水量的动力损失控制在 3% 以内。

(1) 观测场地周围有障碍物阻碍气流运动, 会致使降水量观测值偏大或偏小, 且误差很难确定, 故应重视场地查勘, 使勘选的观测场地环境符合前面所讲规定。如能在森林、果园内的空旷区或灌木丛中建立观测场, 则更能削弱风的影响。

(2) 为了减少动力损失, 雨量器 (计) 安装高度越低越好。地面雨量器 (计) 的观测值, 近似降水量真值, 将器口离地面高度控制在 0.7~1.2m 以内, 可以将年降水量观测误差控制在 3% 以内。特殊情况下安装器口高度不超过 3.0m 的杆式雨量器 (计), 亦能使年降水量误差控制在 3% 以内。

(3) 降雪量符合前面所述规定的地区, 用于观测降雪量的雨量器 (计), 应安装防风圈。

(4) 不宜将雨量器(计)安装在房顶上观测降水量,因其观测值比实际降水量偏小很多,一般可使年降水量平均偏小10%左右。

2.5.2 湿润误差

湿润误差又称作湿润损失,在干燥情况下,降水开始时,雨量器(计)有关构件要黏滞一些降水,致使降水量系统偏小。 Δp_w 值的大小与仪器结构、观测操作方法、风速、空气湿度和气温有关。

每次降水量的湿润损失,一般为0.05~0.3mm,1年累积湿润损失量,可使年降水量偏小2%左右;降微量小雨次数多的干旱地区,年 Δp_w 值可达10%左右。应按下列要求尽可能地将湿润误差控制在1%~2%以内。

(1) 提高雨量器(计)各雨水通道、储水器和量雨杯的光洁度,保持仪器各部件洁净、无油污、杂物,以减少器壁黏滞水量。

(2) 预知即将降水之前,用少许清水细心润湿雨量器(计)各部件,抵偿湿润损失。但必须注意,不使储水器、浮子室、翻斗等因润湿仪器而积水。

2.5.3 蒸发误差

蒸发误差又称作蒸发损失,降水汇集入储水器、雨停后截留在翻斗内的降水量,会因蒸发作用而损失。 Δp_e 值与风速、气温、空气湿度以及仪器封闭性能有关。

蒸发损失量可占年降水量的1%~4%,应按下列要求,将蒸发误差控制在1%~2%以内。

(1) 用小口径的储水器承接雨水。

(2) 每次降水停止后,及时观测储水器承接的降水量。

(3) 尽量提高仪器各接水部件的密封性能。

2.5.4 溅水误差

较大雨滴降落到地面上,可溅起0.3~0.4m高,并形成一层雨雾随风流动降入地面雨量器。正好落在器口边缘的雨滴及降落在防风圈上的雨滴也可能溅入器口。 Δp_s 与雨滴和风力大小成增函数关系。溅水误差导致降水量偏大,防风圈的溅水误差可使年降水量偏大1%左右;地面雨量器的溅水误差可使年降水量偏大0.5%~1.0%。应按下列要求控制溅水误差。

(1) 防风圈叶片上部的弯曲度和圈径,应使雨滴不能溅入器口,并在防风圈叶片上部加防溅设施。

(2) 在地面雨量器周围大于0.5m范围内,加网格防止溅水,并种植草皮。

2.5.5 积雪漂移误差

有积雪地区,风常常将积雪吹起漂入承雪器口,造成伪降雪,致使降雪量观测值偏大。根据雨量站所在地区的积雪深度和风力大小,将器口安装高度提高至2~3m,可基本避免 Δp_b 值的影响。

2.5.6 仪器误差

来源于仪器调试不合格、器口安装不水平、仪器受碰撞变形等引起的偶然误差(如果这些问题得不到及时纠正,就成为系统误差),属于人为误差,应力求避免。可

通过选用合格仪器，精心安装调试，经常校正仪器，减少 Δp_g 值。

2.5.7 测记误差

由于观测人员的视差，错读错记、操作不当和其他事故造成的偶然误差。一般通过训练，提高观测人员的操作水平和责任心，可减少 Δp_r 值至忽略不计。

2.5.8 仪器计量误差

调试合格的仪器测量降水时，也会存在误差，其大小取决于该仪器的测量精度，不同的仪器其计量误差可能是系统误差，也可能是随机误差。

降水量观测值的各项误差中， Δp_g 和 Δp_r 属于随机误差，具有抵偿性，由观测人员严格执行控制条件，这两项随机误差对月、年降水量的影响可忽略不计。 Δp_j 比较复杂，可通过使用比测，决定其是系统误差还是随机误差，对系统误差可以进行订正。 Δp_b 和 Δp_s 为系统正误差，但误差量小，且比较容易在安装仪器时采取措施防止。 Δp_a 、 Δp_w 、 Δp_e 为系统负误差，是使 p_m 值系统偏小的主要误差来源，故一般可将式 (2-3) 简化为

$$\Delta p' = \Delta p_a + \Delta p_w + \Delta p_e \quad (2-4)$$

式中： $\Delta p'$ 为系统误差，由动力损失 Δp_a 、湿润损失 Δp_w 、蒸发损失 Δp_e 组成。

在这 3 项误差得不到控制的条件下，宜通过比较试验求得月、年降水量的 $\Delta p'$ 值，并在该站逐日降水量表的备注栏注明。

2.6 大气降水监测

2.6.1 采样点布设

(1) 大气降水采样点布设应符合以下原则。根据本地区气象、水文、植被、地貌等自然条件，以及城市、工业布局、大气污染源位置与排污强度等进行布设；污染严重区布设密集，非污染区布设稀疏；并与现有雨量观测站相结合进行规划。

(2) 采样点布设要求。采样点四周 (25m×25m) 无遮挡雨、雪、风的高大树木或建筑物，并考虑风向 (顺风、背风)、地形等因素，避开大气中酸碱物质和粉尘的主要污染源及主要交通污染源。位于本地区盛行风上风向一侧，设置一个背景对照采样点。50 万人口以上的城市，按区各设一个采样点；50 万人口以下的城市设两个采样点。库容在 1 亿 m^3 以上或水面面积在 50 km^2 以上的水库、湖泊，根据水面大小，设置 1~3 个采样点。尽量与现有雨量站相结合，按现有雨量站的 1%~3% 进行布设。专用站采样点布设按监测目的与要求设置。

(3) 采样点布设方法。采样点布设可选用网格法或放射式法。布设时，网格大小应根据当地自然环境条件、待测区域污染状况等确定；放射式法用以掌握污染状况、分布范围的变化规律为重点，按布设方式可分为同心圆布点法和扇形布点法。

2.6.2 采样

(1) 采样器。采样器可分为降雨和降雪两种类型，容器由聚乙烯、搪瓷和玻璃材质制成。聚乙烯适用于无机项目监测分析，搪瓷和玻璃适用于有机项目监测分析。

降雨采样器按采样方式可分为人工采样器和自动采样器，前者为上口直径 40cm 的聚乙烯桶，后者带有湿度传感器，降水时自动打开，降水停后自动关闭。降雪采样器，可使用上口直径大于 60cm 的聚乙烯桶或洁净聚乙烯塑料布平铺在水泥地或桌面上进行。用塑料布取样时，只取中间 15cm×15cm 范围内雪样，装入采样桶内，在室温下融化。

(2) 采样注意事项。降水出现有其偶然性，且降水水质随降水历时而变化，应特别注意采样代表性；降雨采样时，采样器应距地面相对高度 1.2m 以上，以避免样品受到玷污；样品量应满足监测项目与采用的分析方法所需水样量以及备用量的要求；采样过程中应避免干沉降物污染样品；采样时应记录降水类型、降水量、气温、风向、风速、风力、降水起止时间等。

(3) 采样时间和频次要求。降水水样在降水初期采集，特别是干旱后的第一次降水；不同季节盛行风向不同时，需在不同季节采样；当降水量在非汛期大于 5mm；汛期大于 10mm；雪大于 2mm 时采样。

采样的频次为全国重点基本站每年采样 4 次，每季度各 1 次；大气污染严重地区每年 12 次，每月 1 次；专用站按监测目的与要求确定。

(4) 监测项目的选择。应遵守以下原则：全国重点基本站监测项目要求应符合表 2-5；专用站按监测目的与要求确定；选测项目按本地区降水水质特征选择；分析方法应符合国家、行业现行有关标准或相关国际标准要求。

(5) 采样质量控制与样品保存要求。采样器具在使用前，用 10% (V/V) HCl 浸泡 24h 后，再用纯水洗净。样品采集后，尽快过滤 (0.45 μ m)，再于 4℃ 下保存。测试电导率、pH 值的样品不需过滤；应先进行电导率测定，然后再测定 pH 值。

样品保存按表 2-5 要求进行。

表 2-5 降水样品保存及分析方法

检测项目	容器	保存方法	保存期限	分析方法
电导率	P	4℃，冷藏	尽快测定	电极法
pH 值	P	4℃，冷藏	尽快测定	电极法
NO ₂ ⁻	P	4℃，冷藏	尽快测定	离子色谱法，盐酸萘己二胺比色法
NO ₃ ⁻	P	4℃，冷藏	尽快测定	离子色谱法，紫外比色法
NH ₄ ⁺	P	4℃，冷藏	尽快测定	离子色谱法，纳氏比色法
F ⁻	P	4℃，冷藏	1 个月	离子色谱法，氟试剂比色法
Cl ⁻	P	4℃，冷藏	1 个月	离子色谱法，硫氰酸汞比色法
SO ₄ ²⁻	P	4℃，冷藏	1 个月	离子色谱法，铬酸钡比色法
K ⁺	P	4℃，冷藏	1 个月	原子吸收分光光度法
Na ⁺	P	4℃，冷藏	1 个月	原子吸收分光光度法
Ca ²⁺	P	4℃，冷藏	1 个月	原子吸收分光光度法
Mg ²⁺	P	4℃，冷藏	1 个月	原子吸收分光光度法

注 P 为聚乙烯。

复 习 题

- 2-1 选择降水量观测场地有哪些具体要求？降水量观测场地如何设置？
- 2-2 安装雨量仪器的要求有哪些？如何检查和维护雨量仪器？
- 2-3 液态降水量如何观测？怎样控制降水量观测误差？
- 2-4 虹吸式雨量计记录雨量如何订正？
- 2-5 如何用日记型自记雨量计观测降水量？如何观测空气温度与湿度？
- 2-6 长期自记雨量计的记录量在什么情况下应进行订正、怎样订正？
- 2-7 怎样观测蒸发量辅助风速和风向？如何观测蒸发器内的水温？
- 2-8 怎样插补缺测之日的降水量？
- 2-9 如何理解采样时间和频次要求规定的意义？
- 2-10 降水量观测与大气降水监测的差别在哪里？

第 3 章

水位观测

3.1 水位概述

3.1.1 水位

1. 定义

河流、湖泊、水库及海洋等水体的自由水面离固定基面的高程，以 m 计。

2. 内涵

水位的内涵是水流势能变化的标志之一（图 3-1）。例如发电功率为

$$N=9.8\eta QH$$

式中： η 为效率系数，0.8~0.9； H 为水头，m。

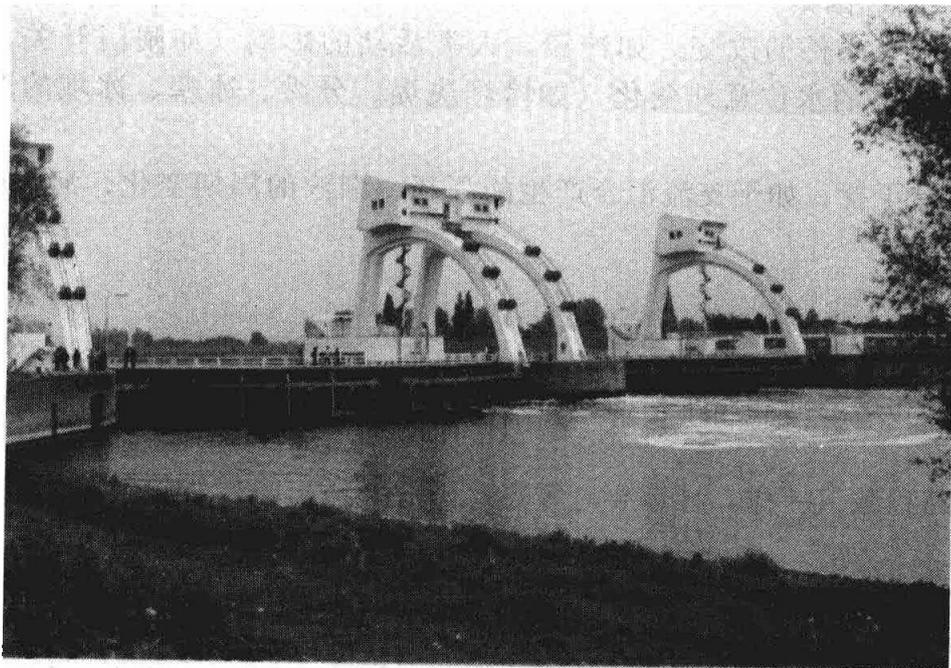


图 3-1 荷兰的水坝（仅有 5.0m 水头）

中国在2000年底,发电总装机容量达到3.19亿kW,发电量达到13685亿kW·h,两项均居世界第二。水电总装机总量从1949年的0.00163亿kW(占发电总装机容量的0.05%),增加到2000年底的0.7935亿kW(占发电总装机容量的24.9%)。我国已建成0.01亿kW以上的大型水电站20余个。2005年、2010年和2015年水电装机容量将分别达到0.95亿kW、1.25亿kW和1.50亿kW。届时将占发电总装机容量的29.81%、39.22%、47.07%。

3. 作用

(1) 直接使用。为水利、水运、防洪、防涝提供具有单独使用价值的资料,如堤防、坝高、桥梁及涵洞、公路路面标高的确定。

(2) 间接使用。为推求其他水文数据而提供以下间接运用资料。

1) 流量计算

$$Q=f(Z)$$

2) 比降计算

$$S=\frac{Z_2-Z_1}{L}$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; S 为比降, 以‰或‱表示; Z_2 , Z_1 分别为上、下比降断面的水位, m ; L 为上、下比降断面的间距, m 。

3) 水资源计算。

4) 水文预报中的上、下游水位相关法等。

4. 影响因素

(1) 直接引起因素。由水体自身水量变化直接引起,如降水、融雪、融冰、蒸发、渗漏等。

(2) 间接引起因素。

1) 水体约束条件的改变。如冲淤、人类活动的影响(如闸门开关、河道工程等)、特殊情况下的水位意外变化(如垮坝决堤、分洪、冰塞、冰坝的产生与消失等)等。

2) 水体受干扰。如干支流汇合产生的顶托、潮汐的周期变化、河道横比降、风浪作用等。

3.1.2 基面

1. 定义

确定水位和高程的起始水平面。

2. 作用

水位与高程数值一样,计算要有零点,因此必须指明其所用基面才有意义。

3. 分类

(1) 绝对基面。以河口海滨地点的特征海水面(多年平均海水面)为准,记为0.0000m。如黄海、大沽、废黄河口、吴淞、珠江、罗星塔等标准基面。我国的统一基面为青岛黄海基面。优点是各站水位值可以直接比较。缺点是数字串长,如西藏某站的水位为3312.87m。

(2) 假定基面。假定某特定点高程数值，则此高程的零点就是假定基面。优点是—时无法与国家水准点连接时，如 1989 年 11 月在黄壁庄水库测悬浮质沉积物高程时，由于天津市水利勘测设计院在整个流域重新布设水准点，其平差结果要到 1990 年 2 月才公布，这时，只好先用他们设立的水准点，但必须假定其高程。缺点是无法通用。

(3) 测站基面。测站选河流历年最低水位或河床最低点以下 0.5~1.0m 处的水平面为基面，是水文测站一种专用基面。优点是数字简单，克服了绝对基面的缺点。缺点是不同测站的水位之间无法直接比较，需要进行基面换算。

(4) 冻结基面。取测站第一次使用的基面，一直沿用不再变动（称冻结）。优点是位置不会变动，资料具有历史连续性，且同站水位值之间可以直接比较。也是水文测站一种专用基面。缺点与测站基面缺点相同。

[思考题 3-1] 上述 4 种基面是否相容？

3.1.3 观测水位的设备和方法

1. 直接观测

人工不同时间读取水尺数，基准时为 8 时，全国统一。

水尺是测站观测水位的基本设施，方法简单而准确，其他水位计均以它为基准来衡量精度。按水尺型式可分为直立式（图 3-2）、倾斜式、短桩式和悬锤式 4 种。其中以直立式水尺构造最简单，且经济，使用方便，为一般测站所普遍采用。

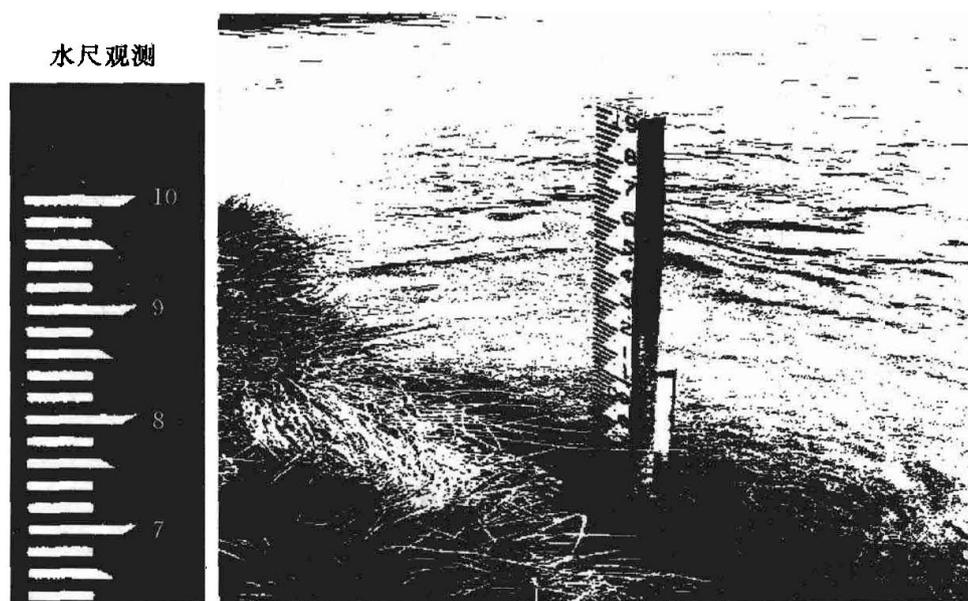


图 3-2 水尺观测水位

水尺布设的原则是满足使用要求，保证观测精度，经济安全。

水尺所测读的水位范围，一般应高于历年最高水位 0.5m，低于历年最低水位 0.5m；同一组的各支水尺应尽量设在同一断面线上，若受地形限制或其他原因不能设置在同一断面线上时，其最上游与最下游两支水尺间的水位差应不超过 1cm；同一组的各支比降水尺，若不能设在同一断面线上时，偏离断面的距离不得超过 5m，同

时任何两支水尺的顺流向间距应不超过上、下比降水尺间距的1%，直立式水尺设置同一组水尺时，应使两相邻水尺有0.1~0.2m的重合部分；一组水尺编号应从岸上向河心依次排列，如 P_1 、 P_2 、...

2. 间接观测

浮子式、压力式、超声波等传递方式，曲线或数字记录型的自记水位计。如图3-3和图3-4所示。

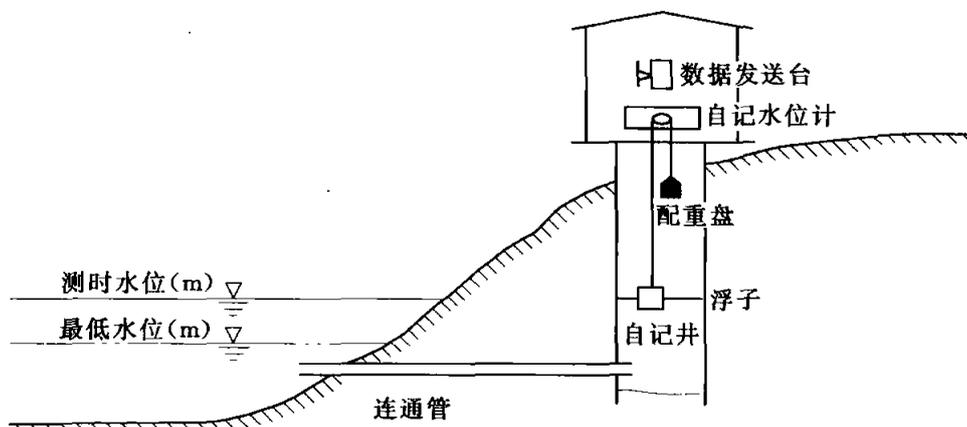


图3-3 自记水位计观测水位

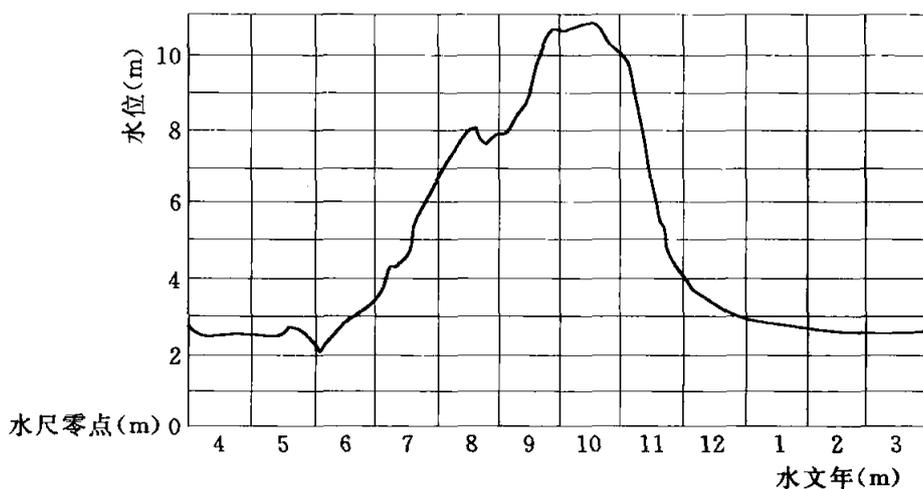


图3-4 自记水位计观测水位记录

3. 国内外水位计进展简况

从水位计的传感型式看，浮子式水位计精度高，结构简单、可靠，是国内外使用最多的。压力式水位计在国外占有一定地位，早在20世纪50年代美国地质调查局已开始使用，西德、澳大利亚、捷克等在60年代也开始使用，前苏联已生产装有穿孔记录装置的压力水位计。国外压力式水位计的精度达到了 $\pm 1\text{cm}$ 。我国于1978年在长江首次使用第一台国产压力式水位计。安装压力式水位计不需建造测井，对不适合建井的地方特别有利。超声波水位计也不需要测井，观测迅速、方便，但需要消除温度、含沙量等因素的影响。我国在70年代后期开始试制、试点应用，现有少数站使用。我国水位计传感方式太单一，不能满足各种水位测量的要求，在现有基础上，参

照国际标准制订出水位计国家标准，统一仪器的技术要求，并根据需要使水位传感方式多样化。可以预计，压力式、超声波式等无测井水位计将会达到实用化。

从水位观读、记录方式看，已有的水位计可分为数字显示式、模拟记录式（水位过程曲线）、数字打印式、穿孔式、磁带记录式及固态存储等。在国外，凡是使用计算机处理水文数据的国家大都采用水位计直接提供穿孔带或磁带记录。在我国对磁带记录及固态存储水位记录还处于刚开始应用阶段，记录方式的发展在我国将越过国外目前使用较多的穿孔纸带和磁带记录方式，直接开始半导体固态存储器的研制。使用固态存储器存取数据，并与计算机配合使用，将使水位数据的采集、整理、记录产生很大的变化。

从水文水利事业发展的需要看，遥测水位计和适用于无人水文站使用的水位计将成为近期发展的主要领域。随着计算机的普遍使用，水位计将愈来愈密切地与计算机——主要是单片机、微型机结合起来，向自动化、智能化方向发展。记录部分也将采用半导体存储器、磁泡等固态元件。应用计算机技术的智能化水位计还将解决某些传感器难以解决的问题，使仪器性能大大提高、完善。（选修课程《现代水信息技术》中将介绍这方面的内容）

3.2 水位观测成果的计算

3.2.1 观测水位计算

1. 直接观测水位计算

直接观测水位 = 直接观测水尺读数 + 该水尺零点高程（各水尺不同）

2. 间接观测水位计算

间接观测水位 = 校核时刻直接观测水位 + 水位记录中的水位变动量（注意时间修正）

3.2.2 日平均水位计算

1. 算术平均法

(1) 适用条件（两个条件有一个满足即可）。

1) 1日内水位变化缓慢（水位日变幅小于0.12m）。

2) 水位变化虽大，但属等时距人工观测或自记水位计摘录。

a. 等时距的定义。

本日第一次观测至次日第一次观测的整24h内，各测次之间时距相等（注意：此时并不要求一定从本日0时到次日0时，2时、8时、14时、20时、2时也可）。

b. 等时距的图示，见图3-5。

(2) 计算公式。

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (3-1)$$

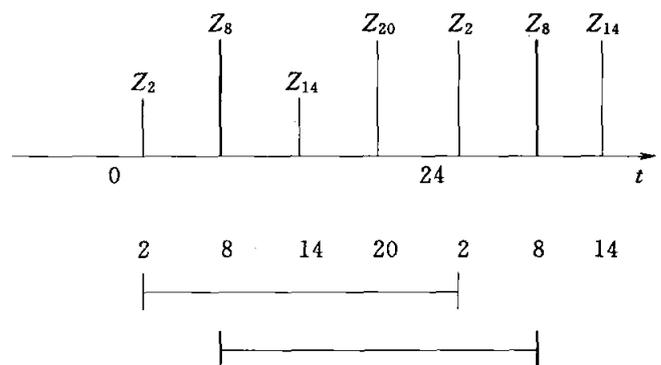


图3-5 算术平均法中的等时距示意

2. 面积包围法

(1) 适用条件。不能用算术平均法计算的所有情况。

(2) 计算方法。将 1 日内 0~24h 水位过程线所包围的面积 A 除以 24h。A 用各梯形面积求和而得，如图 3-6 所示。

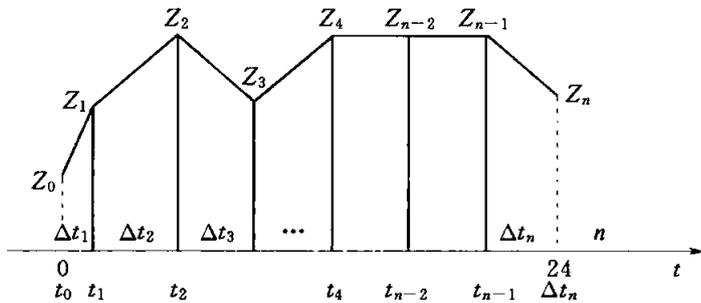


图 3-6 面积包围法计算的示意

(3) 计算公式。

$$\bar{Z} = \frac{1}{48} [Z_0 \Delta t_1 + Z_1 (\Delta t_1 + \Delta t_2) + \dots + Z_{n-1} (\Delta t_{n-1} + \Delta t_n) + Z_n \Delta t_n] \quad (3-2)$$

(4) 计算图示。

计算见图 3-6, Δt_i 为

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$$

计算时需注意与算术平均法的计算公式不同的地方之一是 Z_0 、 Z_{24} 必须参加计算，如无这两个时刻的观测数据，则须通过直线内插的方法先求出来。

3.2.3 判断水位变化缓急的依据

1. 推导

(1) 计算依据。日平均水位的计算误差控制分析。

(2) 计算示意图。

计算示意图见图 3-7。

(3) 计算过程。如图 3-7 所示 1 日内水位变化呈直线上涨，由相似三角形的相似原理计算为

$$Z_8 = Z_0 + \frac{1}{3} \Delta Z$$

$$Z_{20} = Z_0 + \frac{5}{6} \Delta Z$$

$$Z_{24} = Z_0 + \Delta Z$$

算术平均法计算的结果为

$$\bar{Z}_{\text{算}} = \frac{1}{2} [Z_8 + Z_{20}] = Z_0 + \frac{7}{12} \Delta Z$$

面积包围法计算的结果为

$$\bar{Z}_{\text{面}} = \frac{1}{48} [24Z_0 + 24Z_{24}] = Z_0 + \frac{6}{12} \Delta Z$$

以面积包围法计算的结果为准，算术平均法计算结果的绝对误差为

$$\Delta \bar{Z}_{\text{算}} = \frac{1}{12} \Delta Z$$

取上述绝对误差值不大于 0.01m (规范中有推导证明) 计算为

$$\Delta Z \leq 0.12\text{m}$$

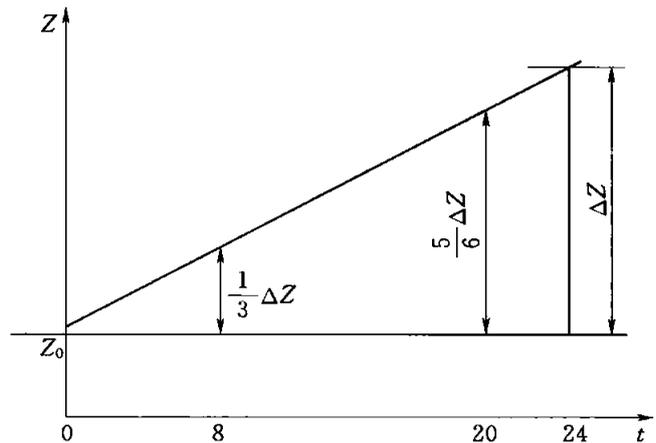


图 3-7 判断水位变化缓急的依据示意

2. 结论

(1) 水位日变幅 $\Delta Z \leq 0.12\text{m}$, 每日观测两次, 8 时、20 时。

(2) $0.12\text{m} < \text{水位日变幅 } \Delta Z \leq 0.24\text{m}$, 每日观测 4 次, 2 时、8 时、14 时、20 时。

(3) $0.24\text{m} < \text{水位日变幅 } \Delta Z \leq 0.48\text{m}$, 每日观测 8 次, 2 时、5 时、8 时、11 时、14 时、17 时、20 时、23 时。

(4) 水位日变幅 $\Delta Z \leq 0.06\text{m}$, 每日观测 1 次, 8 时。

(5) 水位日变幅 $\Delta Z \geq 0.48\text{m}$, 增加观测次数, 每小时 1 次或 2 次; 有洪峰、洪谷出现时要增加测峰、谷两边的测次。

3.2.4 比降的观测与计算

1. 比降的观测

上、下游水尺同时观测。

2. 比降的计算

$$S = \frac{Z_2 - Z_1}{L} (\text{‰或万分率})$$

3.3 水位数据处理 (水位资料整编)

3.3.1 校核原始记录及各项特征值

1. 目的

使全部水位记载及统计数据不发生数值上的错误。

2. 原因

水位是最基本的资料, 流量、含沙量、水质参数等都以此为依据。

3. 依据

水文情势的规律性。

4. 重点

水情变化加剧、水尺更换时的水位数值。

5. 内容

在测站考证的基础上, 对原始数据进行校核, 以使全部水位和统计数据不发生数值上的错误, 并对测验河段及断面河干、断流及结冰等有关情况考查清楚。校核所计算的逐时水位, 日平均水位及所挑选的月、年最高最低水位及其发生日期, 标注的冰情、河干、断流等情况是否正确, 并按数据出错的具体情况, 进行复核或全面校核。对水情变化较急剧, 更换水尺时的水位数值尤其需加注意, 对每月的特征水位、日平均水位及冰情的起止日期等须逐个校核。

3.3.2 水位数据处理

1. 水位资料的插补 (缺测、错误的数值)

(1) 直线插补法。

1) 应用条件。水位变化平缓或水位变化大, 但呈一致 (上涨或下落) 趋势。

2) 插补计算。

$$\Delta Z = \frac{Z_2 - Z_1}{n+1} \quad (3-3)$$

式中： ΔZ 为每日插补水位值，m； Z_1 为缺测前一日水位值，m； Z_2 为缺测后一日水位值，m； n 为缺测日数。

(2) 水位关系曲线法。

1) 应用条件。缺测时间较长。

2) 插补方法。用本站与邻站的同時水位或相应水位的相关曲线插补。绘相关曲线时，最好用当年的实测资料，如果当年资料不够或关系曲线并非简单的直线，而是在涨、落水过程各有不同的趋势时，可利用往年的水位过程相似时期的资料。当河道冲淤剧烈时，此法难以得到满意的结果。

(3) 插补注意事项。插补所得的数据，无论是采用哪种方法，都应在逐日平均水位表附注栏加以说明。

2. 逐日平均水位表的编制

(1) 计算月、年平均水位。将逐日平均水位值填入表中，在结冰河流的测站，应将每日主要冰情按技术规定的符号记在每日水位值之右侧。并统计月、年的特征值，包括月、年平均水位，最高、最低水位及其出现日期。其中月、年平均水位按式(3-4)、式(3-5)计算为

$$\text{月平均水位} = \frac{\text{月每日平均水位之和}}{\text{月总日数}} \quad (3-4)$$

$$\text{年平均水位} = \frac{\text{年每日平均水位之和}}{\text{年总日数}} \quad (3-5)$$

〔注意〕年每日平均水位之和不等于各月平均水位 $\times 12$ ，因为各月天数不同。

(2) 各种保证率水位的计算。

1) 定义。1年中有多少天的日平均水位是高于或等于某一水位，则该水位值就是多少天的保证率水位（如180天保证率水位）；或1年中日平均水位高于或等于某一水位天数与该年总日数相除得保证率，该水位即是此保证率水位（如90%保证率水位）。

2) 意义。如通航，考虑船底吃水深度的设计；桥梁高度的设计；引水渠底的设计等。

3) 挑选方法。现在采用计算机排队法，过去采用列表法、图解法（图3-8）。

3. 水位流量过程线的绘制

水位过程线是以水位 Z 为纵轴，时间 t 为横轴点绘的水位与时间的关系图，即 $Z=f(t)$ ，有逐日平均水位过程线与逐时水位过程线两种。逐时水位过程线是水位观测后随时点绘的，供进行流量数据处理时掌握和分析水文情势时使用，也是流量数据处理时的一项重要参考资料。逐日平均水位过程线为水位数据处理成果之一，它简明地反映了全年的水情变化，在图上应标明最高、最低水位，河干、断流、冰情等有关的重要情况。

〔注意〕逐日水位是日平均水位，而最高、最低水位是瞬时水位，并且要用特定

的符号表示出来;图幅名称、坐标要正确、完整,图幅比例恰当、绘制的曲线要粗细均匀、光滑,见图3-8。

4. 洪水水位摘录表的编制

它包括在洪水水文要素摘录表中,对洪水涨落比较急剧,日平均水位不能准确表示其变化过程的,需编制此表。摘录时应注意保持洪峰过程的原状。对水位测次不太多的站,可以

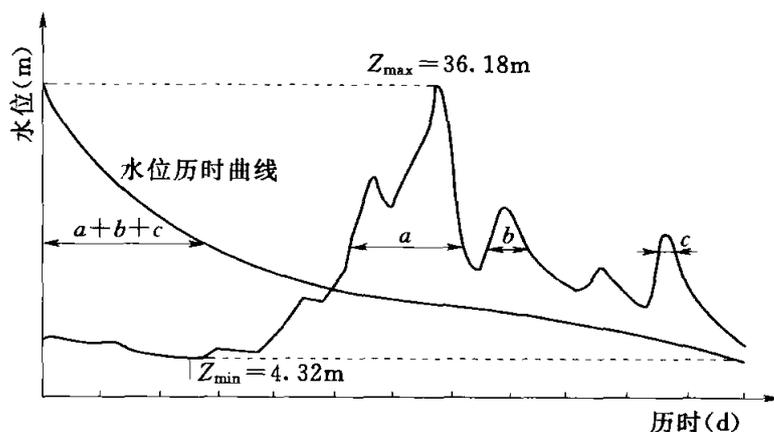


图3-8 某站某年逐日水位过程线及保证率水位曲线

直接取用全部水位记录;水位测次很多的站,可选摘。摘录时,对每年的主要大峰,最好在一个相当长的河段内都相应地加以摘录,以能使上、下游配套,便于做合理性检查;而对一般洪峰,则要求相邻站能配套。暴雨形成的洪峰能与相应的降雨量摘录配套。为了满足水文预报和水文分析计算的需要,一般应摘录以下各种类型的洪峰:洪峰流量和洪峰总量最大的峰;含沙量和输沙的洪峰量最大的峰;孤立的洪峰;连续的洪峰;汛期开始的第一个洪峰;较大的凌汛和春汛的洪峰;久旱以后的洪峰。

摘录时应完整地摘录几次主要洪水的各种要素。摘录期间均自涨水前起至该次洪水落平时止。为了上下游,干支流对照分析方便,尽量摘录相应的峰与相应的时段,同时要尽量精简摘录点数,以节省刊印表长。

5. 水位的合理性检查

(1) 单站合理性检查。根据本年逐日或逐时水位过程线,检查水位变化的连续性,有无突涨突落现象,峰形变化是否正常,年头年尾是否与前、后年衔接。还应检查一年中洪水期、平水期、枯水期(或冰期)的变化趋势是否符合测站特性。

必要时,可与历年水位过程线比较,或与雨量、冰凌资料对照检查。

当水位过程线有不合理或反常现象,应分析其原因。如水位不连续,是由于水准点或水尺零点高程的变动;观测、记载或计算的错误;水尺断面迁移或换尺时横比降的影响;突然决堤;数据处理时抄表绘图错误等原因。又如洪峰前、后水位相差较大,是由于断面冲淤;测站控制的变化;下游拦河坝倒坍等原因。

(2) 综合合理性检查。

1) 上下游水位过程线对照。在无支流加入的河段上,相邻测站水位变化是相应的。若发现水位变化过程不相应,要检查原因。在有支流汇入的河段,下游站要与上游干、支流站同时对照、比较,必要时可参照区间降水量资料。

2) 上下游水位相关图检查。此法适用的条件是上下游水流条件相似,河床无严重冲淤,无闸坝影响,水位关系密切。

3) 特征水位沿河长演变图检查。当一条河流,测站较密、比降平缓、各站绝对基面一致时,可用此法检查。其特征水位沿河长演变应是从河源平滑递降至河口。

6. 编写水位数据处理说明

简要地说明本年水位资料观测、处理的成果和问题,水情有特殊变化的应做说

明。其内容包括：全年使用的水尺名称、编号、形式、位置；引据水准点、基本水准点及校核水准点的高程，并对经改正后肯定了的水尺零点高程进行备注说明；水位观测方法及各个时期的观测次数；处理水位数据中发现的问题及解决的办法；初步分析和检查的结果以及数据中存在的问题；对数据准确程度的说明及其他有关问题。

[思考题 3-2] 按照上述要求进行水位观测数据的整理及水位数据的处理。

复 习 题

3-1 水位与基面有什么关系？绝对基面、假定基面、测站基面及冻结基面等有何联系和区别？

3-2 采用水尺观读水位，如何保证水位观测的正确？

3-3 水位观测设备设置安装的误差来源有哪些？水位变化的原因及一般特性分别有哪些？

3-4 在什么情况下，应对水位记录进行校正？如何校正？

3-5 自记水位计如何防淤和清淤以及如何防冻？

3-6 水面比降如何计算？在观读比降时应注意什么问题？

3-7 为什么必须进行测站考证？考证内容有哪些？

3-8 日平均水位计算方法有几种？各在什么情况下适用？

3-9 水位数据处理（水位资料整编）包括哪些内容？什么叫保证率水位？如何挑选保证率水位？

3-10 结合自己的经验，谈谈水位的用途。

第 4 章

流 量 测 验

4.1 概 述

4.1.1 目的

1. 定义

流量是单位时间内流过江河某一横断面的水量， m^3/s 。流量是根据河流水情变化的特点，在水文站上用适当测流方法进行流量测验取得实测数据，经过分析、计算和整理而得的重要水情信息。

2. 意义

它是反映水资源和江河、湖泊、水库等水体水量变化的基本数据，也是河流最重要的水文特征值。

3. 目的

用于研究掌握江河流量变化的规律，为国民经济各部门服务。

4.1.2 测流方法分类

测流方法很多，按其工作原理，可分为下列几种类型。

1. 流速面积法

是一种最基本的方法，由测定流速和测量过水断面面积两部分工作组成，通过断面测量借以推算流量，即 $Q=AV$ 。流速面积法包括以下几种。

- (1) 流速仪法（积点法、积深法）。
- (2) 航空法（航测水面流速法、航空积深法、航空化学法）。
- (3) 比降面积法（简化比降面积法）。
- (4) 积宽法（动车法、动船法和索道积宽法）。
- (5) 浮标法（按浮标的形式可分为水面浮标法、小浮标法、深水浮标法等）。

2. 水力学法

- (1) 方法原理。通过测量量水建筑物和水工建筑物的有关水力因素，并事先率定

出流量系数，利用水力学中的出流公式计算流量。例如三角形剖面堰为

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} C_D C_V \sqrt{g} b h^{\frac{3}{2}} \quad (4-1)$$

(2) 方法优点。较物理法简便，适合遥测和计算机控制进行数据处理。

3. 物理法

(1) 方法原理。利用声、光、电、磁等物理学原理测定流量。

(2) 方法种类。有超声波法、电磁法和光学法。

(3) 方法优点。

1) 仪器不干扰原来的水流结构。

2) 快速、连续地测流。

3) 操作安全。

4. 化学法（又称溶液法、稀释法、混合法）

(1) 方法原理。在测验河段上游施放一种已知浓度的化学指示剂，水流的紊动作用能够使之在水中稀释扩散并充分混合，其稀释的程度与水流流量成正比。测出下游充分混合后的化学指示剂浓度，计算出流量。

(2) 方法种类。一次性注入法、连续注入法。

(3) 方法优点。不需要测定断面、流速，因而野外工作量小，所需时间短。

5. 直接法

有容积法和重量法，适用于流量极小的沟涧。

4.1.3 测站精度类别的划分及测验方式

1. 测站精度类别划分的标准

依据现有国家站网的实际条件，从以下3个原则来考虑。

(1) 大、中、小河测验误差规律和各站高、中、低水时的特性及当前可能达到的精度。

(2) 防洪预报、工程设计、水文科学研究等方面对水文资料的不同要求。

(3) 水文体制新模式——站队结合测验方式的客观需要。

2. 测站精度类别划分

根据上述原则，对国家基本水文站，按流量测验精度分为三类，其要求如下。

(1) 一类精度站。长期连续收集水位、流量数据，满足为探索水文特征值在时间上的变化规律所需的长系列样本的要求；为探索水文特征值沿河长的变化规律和满足防汛需要的干流水文站。

(2) 二类精度站。长期连续收集水位、流量数据或连续收集了30年以上的数据，满足水文特征值的系列样本具有代表性的要求；为探索水文特征值沿河长和区域的变化规律，具有代表性的区域代表站。

(3) 三类精度站。连续收集20年以上的水位、流量数据，基本满足水文分析计算对系列代表性的要求；为探索小河在各种下垫面条件下的产流、汇流规律和径流变化规律，具有代表性的小河站。

这三类精度站的流域面积、控制精度及任务等如表4-1所示。

表 4-1 三类精度站的流域面积、控制精度及任务

类别	测验精度要求	测站主要任务	集水面积 (km ²)	
			湿润地区	干旱、半干旱地区
一类	应达到按现有测验手段和方法能取得的可能精度	收集探索水文特征值在时间上和沿河长的变化规律所需长系列样本和防洪需要的资料	≥3000	≥5000
二类	可按测验条件拟定	收集探索水文特征值沿河长和区域的变化规律所需具有代表性的系列样本资料	<10000 ≥200	<10000 ≥500
三类	应达到设站任务对使用精度的要求	收集探索小河在各种下垫面条件下的产汇流规律和径流变化规律,以及水文分析计算对系列代表性要求所需资料	<200	<500

对已设各类精度站流量测验的精度要求,并非不可改变。当有的测站由于工程管理运用和科学试验研究等特殊目的而需要提高精度要求或因测站控制、测验条件的限制而需要降低精度要求时,报请上级主管部门同意后可适当调整精度的类别。

3. 水位级的划分

高、中、低水位界限的划分,可根据现在有关标准的建议,采用年特征值频率分析法或典型年频率分析法。运用这些方法对 180 余站年次进行分析、验证,确定出划分高、中、低水的水位级标准。具体为以下做法。

以频率分析计算作为水位级划分的基本依据,频率可计算为

$$P = \frac{m}{n+1} 100\%$$

式中: P 为频率,%; m 为排队位数; n 为数据序列数。

对一类精度站采用年特征值法,即分别取测站各年瞬时最高水位 Z_{\max} 、瞬时最低水位 Z_{\min} 及各年平均水位 Z_m 计算频率,分别得到 $Z_{\max}-P$ 、 $Z_{\min}-P$ 、及 Z_m-P 3 条频率曲线。在 3 条频率曲线上分别截取 $P=90\%$ 的 Z_{\max} 为高水位, $P=10\%$ 的 Z_{\min} 为低水位, $P=50\%$ 的 Z_m 为中水位,借以划分水位级。

对二类、三类精度站,宜采用典型年法,即取各年汛期总水量 $W_{\text{汛}}$ 计算频率,得到 $W_{\text{汛}}-P$ 频率曲线,在其上分别取与 $P=10\%$ 、 50% 、 90% 的 $W_{\text{汛}}$ 相应的年份作为丰、平、枯水典型年,再将 3 个典型年的汛期本站逐日最高水位 Z'_{\max} 计算频率,得到 $Z'_{\max}-P$ 频率曲线,分别取 $P=10\%$ 、 50% 、 90% 的相应水位为高、中、低水位,据此划分水位级。

根据上述划分水位级的方法,可将测站水情特征划分为 4 个时期,如表 4-2 所示。

由表 4-2 可见,按这种划分水位级的标准,概念明确,而且能考虑到大、中、小河洪水的不同水文特征。

表 4-2 测站水情特征划分

水位级	标准	站类	
		一类精度站	二类、三类精度站
高水期		$Z \geq Z_{\max(90\%)}$	$Z \geq Z'_{\max(10\%)}$
中水期		$\bar{Z}_{50\%} \leq Z < Z_{\max(90\%)}$	$Z'_{\max(10\%)} > Z > Z'_{\max(50\%)}$
低水期		$Z_{\min(10\%)} < Z < \bar{Z}_{(50\%)}$	$Z'_{\max(50\%)} > Z > Z'_{\max(90\%)}$
枯水期		$Z \leq Z_{\min(10\%)}$	$Z \leq Z'_{\max(90\%)}$

4. 测次的布置

流量的变化是很复杂的，为了研究和探求河流流量变化的规律，必须进行长期、连续的流量测验。目前的测流方法，不可能无限制增加测次来获得大量流量数据，而是以一定数量测次的流量数据与水位或其他水力要素建立相关关系来探求其变化规律，并以水位或其他水力要素的数据来推算逐时逐日流量。

确定测次的基本原则是：一年中的流量测次，应根据高、中、低各级水位的水流特性、测站控制情况和测验精度的要求，掌握各个时期的水情变化，合理地分布于各级水位和水情变化过程的转折点处；对水位流量关系稳定的测站，每年不应少于 15 次；对水位流量关系不稳定的测站，其测次应满足确定各时期水位流量关系变化的需要。

对新设的测站，其测次应适当增加。结冰河流测次的分布，应以控制流量变化过程或冰期改正系数变化过程为原则。

5. 测流方法选用原则

- (1) 满足精度要求。
- (2) 保证测流安全。
- (3) 尽可能达到经济、方便。

4.2 断面测量

4.2.1 概述

1. 测量目的

- (1) 计算流量， $Q=AV$ 。
- (2) 计算河流的输沙量 W_s 。

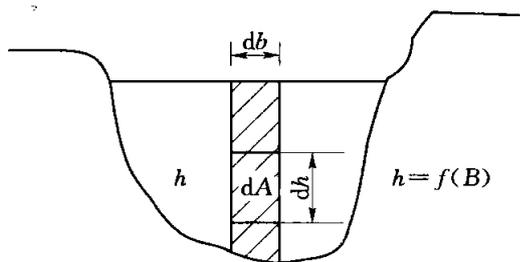


图 4-1 传统断面测量方法的示意

- (3) 研究河床演变，提供防洪数据。
- (4) 航道整治。
- (5) 为流量测验及数据处理提供依据（如合理布设测速垂线、分析测站特性、选择数据处理方法等）。

2. 传统断面测量要解决的问题

传统断面测量方法见图 4-1。

断面测量要解决的是

$$A = \int_0^A dA = \int_0^h dh \int_0^B db = \int_0^h \int_0^B db dh \quad (4-2)$$

一个二重积分的问题。由于被积函数存在但是不易求得，因此工程上将其转化为

$$A = \int_0^A dA = \int_0^h dh \int_0^B db = \int_c^B h db = \sum_{i=1}^n (h_i \times \Delta b_i) = \sum_{i=1}^n A_i \quad (4-3)$$

这样，原来的连续问题就转变为一个求部分面积和的问题，后者就是多年来一直采用的传统断面测量方法，这也是理论与实际之间的差别之一斑。

传统断面测量方法要解决以下问题。

- (1) 水深测量的问题。
- (2) 水深在测深断面上的分布，即在测深断面上布设测深垂线的问题。

3. 传统断面测量方法

- (1) 在测深断面上布设测深垂线，并确定其在测深断面上的位置。
- (2) 测定测深垂线的水深。

4. 传统断面测量内容

- (1) 水深。从水面到河底的垂直距离。
- (2) 起点距。测深断面上测深垂线到起点桩之间的距离。
- (3) 水位。

5. 传统断面测量术语

- (1) 测得水深。从测深器具上直接读出的、未经任何改正的水深。
- (2) 实际水深。水体自由表面到其固体床面之间的垂直距离，简称水深。
- (3) 有效水深。畅流期即水深，冰期则是冰盖底至河底的垂直距离。
- (4) 河底高程。河床上某一点相对于某一基面的高度。
- (5) 横断面。垂直于水流方向的、由河床与两岸边坡组成的横截面。
- (6) 纵断面。顺河流方向的河床最低点连线与其水面线组成的纵截面。
- (7) 水道断面。自由水面线与河床线之间的范围，包括过水面积和死水面积。
- (8) 大断面。历年最高水位以上 0.5~1.0m 的水面线、岸线和河床线之间的范围。
- (9) 复式横断面。由至少两个河槽组成的河道断面。

上述情况如图 4-2 所示。

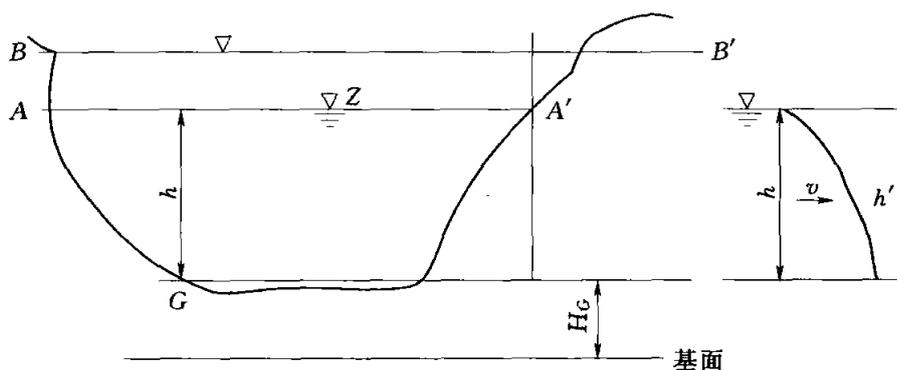


图 4-2 大断面示意

AA'为水面线；BB'为历年最高水位以上0.5~1.0m的水面线；G为河床点；h为实际水深；h'为测得水深；AGA'为水道断面；BAGA'B'为大断面。

6. 大断面测量要求

- (1) 水道断面测量（水下部分）。
- (2) 水上部分（水准仪测量）。
- (3) 测量次数。

1) 河床稳定测站（Z—A关系点据偏离平均曲线不大于|3%|）。每年汛前或汛后施测一次。

2) 河床不稳定测站。每年汛前、汛后、每次较大洪水后，均要施测1次；例如滹沱河黄壁庄水文站，1956年8月1日18时施测断面2900m²，与洪峰过后的8月6日施测断面面积相差达680m²，占23%，平均冲刷深度为2.0m，最大冲刷处达3.6m，而该场洪水平均水深也只有4.0m。

4.2.2 水深测量

1. 测深垂线的布设

- (1) 原则。能控制断面形状的变化，可正确绘出断面图。
- (2) 分布。能控制河床变化的转折点，且主槽部分比滩地密。
- (3) 数目。大断面测量时水下部分的最少测深垂线数目如表4-3所示。

表4-3 大断面测量时水下部分的最少测深垂线数目

水面宽 (m)		<5	6	50	100	300	1000	>1000
最少测深垂线数	窄深河道	5	6	10	12	15	15	15
	宽浅河道			10	15	20	25	>25

(4) 测深垂线数目与分布对断面测量误差的影响为

$$\delta_Q = \frac{Q' - Q}{Q} = \frac{A'\bar{V} - A\bar{V}}{A\bar{V}} = \frac{A' - A}{A} = \delta_A \quad (4-4)$$

式中： \bar{V} 为断面平均流速，m/s； A' ， A 分别为测量不准确和准确的断面面积，m²； Q' ， Q 分别为相应的测量不准确和准确的断面流量，m³/s； δ_Q ， δ_A 分别为相应的流量、面积的相对误差。

2. 水深测量的方法

(1) 直接用测深器具。

1) 测深杆。适用于水深小于10m（国际标准为5~6m）、流速小于3.0m/s的河流。其测深精度较高，当流速、水深都较小时，应尽量使用。在河底较平整的测站，每条垂线应连测两次，两次测深的不符值如不超过最小读数的2%，则取其平均值；超过2%，应增加测次。

2) 测深锤。当水深、流速较大时，可用测深锤测深。测深锤重量一般为5~10kg，视水深、流速大小而定。每条垂线施测两次水深，取其平均值，两次测量的不符值不应超过最小读数的3%；河道不平稳时，不应超过5%。否则，应适当增加

测次，取多次测量的平均值。

3) 测深铅鱼。有缆道或水文绞车设备的测站，可将铅鱼悬吊在缆道或水文绞车上测水深。水深读数可在绞车的计数器上读取。铅鱼的重量及钢丝悬索的直径应根据水深、流速的大小及过河、起重设备的荷载能力确定。其测深精度与测深锤测深的精度相同。

(2) 间接测深——回声测深仪。超声波具有定向反射的功能，根据超声波在水中的传播速度 c 和测得的往返时间 t 计算出水深 h 。

如图 4-3 所示，超声波自换能器 A 发射到达河底又反射回到换能器 B，声波所经过的距离为 $2L$ ，超声波的传播速度 c 用式 (4-5) 计算为

$$c = 1410 + 4.21T - 0.037T^2 + 1.14s \quad (4-5)$$

当测得超声波往返的传播时间为 t 时，可得

$$L = \frac{ct}{2}。从图 4-3 中得到水深 h 为$$

$$h = (L^2 - b^2)^{1/2} + a \quad (4-6)$$

式中： h 为水深，m； a 为换能器吃水深，m； L 为换能器至河底的直线距离，m。

超声波测深仪适用于水深较大，含沙量较小，泡漩、可溶固体、悬浮物不多时的江河湖库的水深测量。使用超声波测深仪前应进行现场比测，测点应不少于 30 个，并均匀分布在所需测深变幅内，比测随机不确定度不大于 2%，系统误差不大于 1% 时，方可使用。在使用过程中，还应定期比测，每年不少于 2~3 次。

超声波测深仪具有精度好、工效高，且不易受天气、潮汐和流速大小的限制等优点。但在含沙量大或河床是淤泥质组成时，记录不清晰，不宜使用。

(3) 双频回声测深仪 (Double Frequency System, 简称 DFS)。

利用不同频率发射超声波会有什么事发生？高频，灵敏度高；低频，能量大，穿透力强。

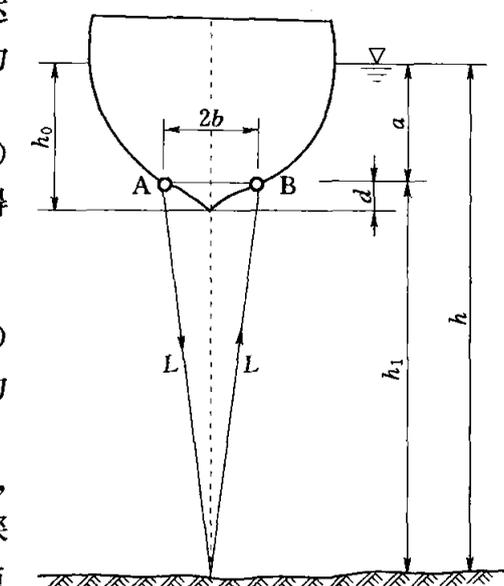


图 4-3 回声测深仪测深示意

A—发射声波；B—接收声波

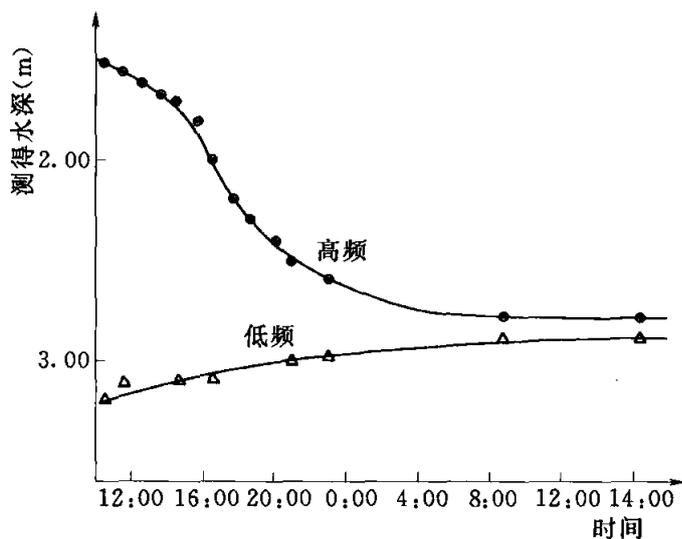


图 4-4 双频回声测深仪测深示意

双频回声测深仪测深示意图 4-4。

4.2.3 起点距的确定

起点距是指测验断面上某一垂线至断面上的固定起始点的水平距离。大断面和水道断面上各垂线的起点距，均以高水时的断面桩（一般为左岸桩）作为起算零点。两岸断面桩之间的总距离，两次测量的不符值应小于 1/500；在测量水道断面时，两水边线间距（即河宽）的误差也应在 1/500 以内。

测定起点距的方法很多，有直接量距法、断面索法、建筑物标志法、

地面标志法、计数器测距法、仪器测角交会法（如经纬仪、平板仪、六分仪）等。这里仅对无线电定位法、全球定位仪法进行介绍。

1. 无线电定位法

(1) 原理。利用在岸上两个固定点的电台发射脉冲无线电波到达测船上接收机的时间先后，测出其时间差来确定测船的位置。

(2) 方法。由岸上固定的发射台 A、B 发射脉冲电波，其信号被船上 P 点的接收机（定位仪）所接收。当同时收到两台脉冲信号时，则 P 与 A、B 是等距的；若不等距，则 P 收到 A、B 脉冲信号的时间便有先后，近台先收到，远台后收到，精确测出两台发射脉冲信号到接收机的时间差 ΔT （以 μs 计），则

$$\Delta L = c\Delta T \quad (4-7)$$

式中： ΔL 为两发射台到接收机的距离之差，m； ΔT 为接收机先后收到两台信号时的时差， $\times 10^{-6} \mu\text{s}$ ； c 为电磁波传播速度（其值为 3 亿 m/s）。

实际应用时，定位系统是由在岸上安设的 A、B、C 3 个电台及船上安装的定位仪组成的。根据几何原理知，当一动点到两定点的距离之差为一定值时，动点的几何轨迹就是双曲线。利用两组电台，如 AB 与 BC，将每隔一定时差（或距离差）的曲线绘出，即可获得两簇双曲线。当船在某一位置 P 时，分别测得 AB 及 BC 的时差为 Δt_{AB} 及 Δt_{BC} ，此两条双曲线的交点 P 即为测船的位置。

(3) 优点。受地形、天气的影响小。测量范围广，精度能满足小比例尺测图要求，常用于海上或江面宽阔的大江河及河口的定位。1988 年河海大学水文 1985 级全体同学在长江上海吴淞口的水文测验生产任务实习中使用此法，400 人同时合作进行多条垂线同步观测就是使用的这种定位方法。

2. 全球定位仪法（Global Position System，简称 GPS）

(1) 组成。由 3 大部分组成。

1) 卫星空间星座。

a. 由 24 颗人造地球卫星组成，其中 3 颗为备用卫星，它们分布在 6 个等间隔的轨道面内。

b. 卫星倾角为 55° ，近圆形轨道平均轨道高度为 20200km。

c. 卫星运行周期为 12 恒星时（11h58min）。

d. 3 个主要功能。①通过原子钟产生基准信号和提供精确的时间标准；②发送导航定位信号；③接受、存储、发送地面监控系统的导航信号、调度命令等。

2) 地面监控系统。其组成为 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监测站。其主要功能是跟踪观测卫星，计算编制描述卫星运动轨道的信息（包括计算出任一时刻的卫星位置及其速度）的卫星星历；监测和控制卫星的运行状况；保持精确的 GPS 时间系统；向卫星注入导航电文和控制指令等。其中导航电文是用户用来定位和导航的数据基础，它包括卫星星历、时钟改正、电离层时延改正、工作状态信息等。

3) 用户设备。用户设备即 GPS 接收机，用来接收 GPS 卫星信号。GPS 卫星信号是一种用于导航定位的调制波。这种调制波经过变换、放大和处理，以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间，从而解译出 GPS 卫星所发送的导航电文，适时地计算出接收机所处位置的三维坐标，甚至三维速度和时间。

(2) 工作原理。采用距离交会法，利用全球定位系统仪接收天空视场中的 3 颗人造 GPS 定点卫星(A、B、C)的特定信号来确定其在地球上所处位置的坐标。

用户 P 在某一时刻 t_i 用 GPS 接收机同时测得接收机至上述 3 颗 GPS 定点卫星(A、B、C) 的距离 S_{AP} 、 S_{BP} 、 S_{CP} ，而且该时刻卫星在空间的位置也是已知 [其坐标分别为 (X_A, Y_A, Z_A) 、 (X_B, Y_B, Z_B) 、 (X_C, Y_C, Z_C)] (图 4-5)。这样就得到距离为

$$\left. \begin{aligned} S_{AP} &= \sqrt{(X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2 + (Z_P - Z_A)^2} \\ S_{BP} &= \sqrt{(X_P - X_B)^2 + (Y_P - Y_B)^2 + (Z_P - Z_B)^2} \\ S_{CP} &= \sqrt{(X_P - X_C)^2 + (Y_P - Y_C)^2 + (Z_P - Z_C)^2} \end{aligned} \right\} \quad (4-8)$$

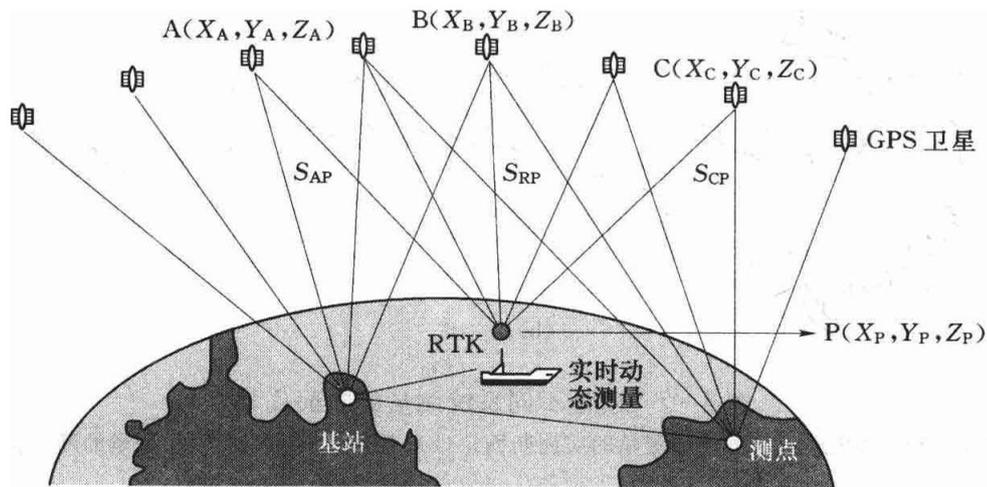


图 4-5 DGPS 测量系统原理示意

(3) 优点。使用和携带都很方便；定位快速、准确；不受天气情况的干扰。定位的现代技术手段在军事上用途更广泛，1991 年海湾战争、1999 年巴尔干地区北约空袭南斯拉夫等 GPS 得到了广泛的使用。

(4) 缺点。人为的封锁以及观测点处于卫星盲区时精度不高。

(5) 应用。图 4-6、图 4-7、表 4-4 是河海大学 GPS-DFS 系统在龙羊峡水库

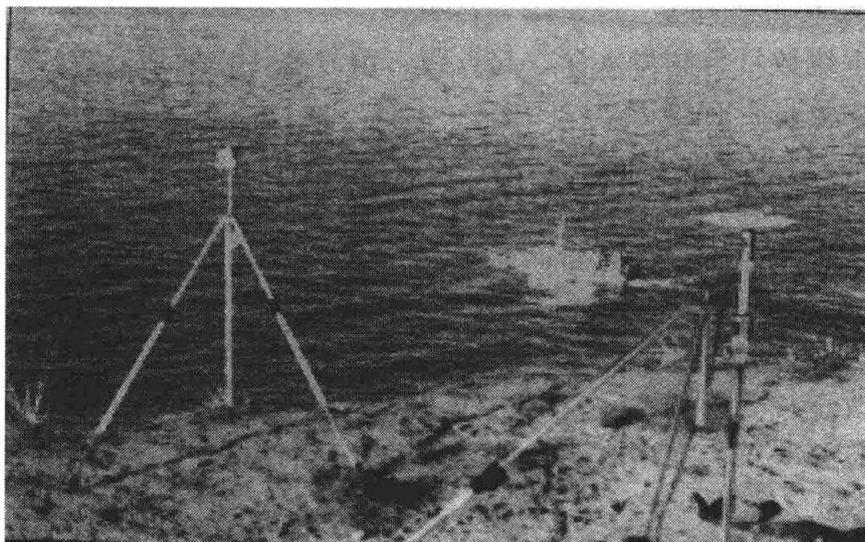


图 4-6 GPS-DFS 系统在龙羊峡水库水下地形测量中的应用

水下地形测量中的应用以及两种不同系统测量的几种效益对比。

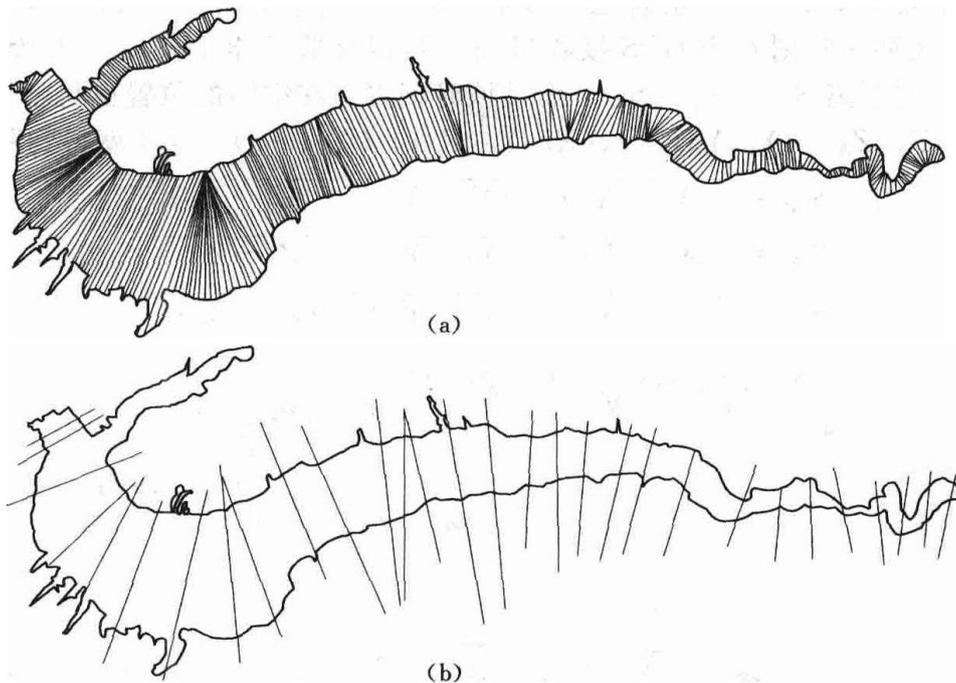


图 4-7 两种不同系统测量的断面比较

(a) GPS—DFS 系统进行水下地形测量的实测断面；(b) 常规仪器采用断面法测量的断面位置示意

表 4-4 两种不同系统测量的效益对比

测量系统	施测方法	实测断面	历时	施测人数	测量经费
常规方法	断面法	31	8 年	35	400 万元
GPS—DFS 系统	1:1 万水下地形	400	2 个月	6	150 万元

4.2.4 断面测深数据的整理

1. 断面测深数据的检查

- (1) 测深垂线数目与测得水深、起点距、编号要一一对应。
- (2) 测深偏角是否有改正。
- (3) 水位是否有改正。
- (4) 计算河底高程。
- (5) 计算水道断面面积、大断面面积。

2. 测深偏角、水位改正

- (1) 湿绳改正 (图 4-8)。
- (2) 干绳改正。
- (3) 悬索位移改正。上述改正数由查表和计算而得。
- (4) 水位改正。

1) 改正条件。一般河流,变化的面积不小于 5% 开始测流时的面积;中小河流,平均水深不大于 0.5m,水位变化不小于 5cm。

2) 改正方法。时间直线插补法内插见式 (3-3)。

3. 水道断面面积计算

水道断面面积计算见图 4-9。

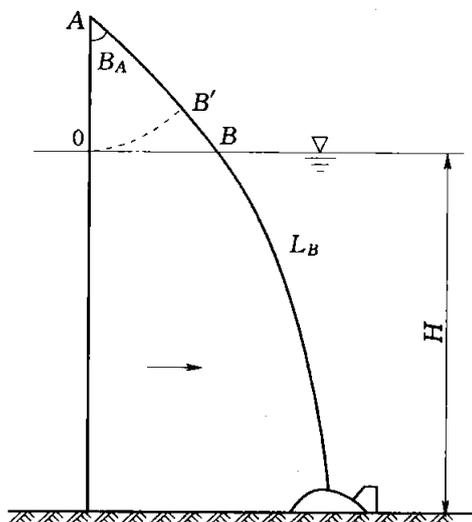


图 4-8 测绳改正示意

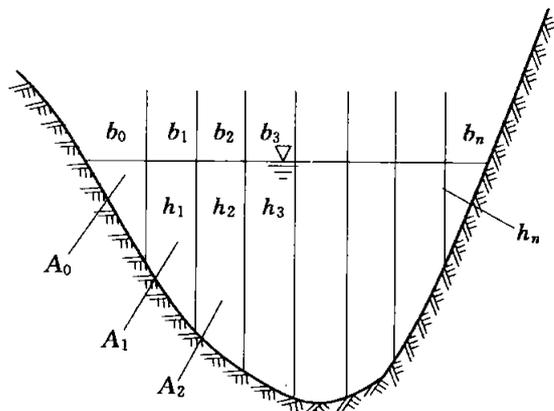


图 4-9 水道断面面积计算示意

(1) 将经过上述整理后的数据按一定的比例绘出预留水上部分位置的水道断面图。

(2) 两个岸边部分按三角形面积计算为

$$A_0 = \frac{1}{2} b_0 h_1$$

$$A_n = \frac{1}{2} b_n h_n$$

(3) 其余部分按梯形面积计算为

$$A_i = \frac{1}{2} b_i (h_i + h_{i+1}), i = 1, 2, \dots, n-1$$

(4) 累加求和为

$$A = \sum_{i=0}^n A_i$$

4. 大断面面积计算

(1) 目的。推求 $Z-A$ 关系曲线。

(2) 方法。分为水道断面面积计算和水上断面面积计算两部分。

(3) 水上断面面积计算。自水面以上开始水平分层，左右岸每个折点处内插出起点距，梯形面积求和计算。

(4) 计算机计算。水平分层，采用水道断面面积计算的方法计算全部大断面面积 (图 4-10)。

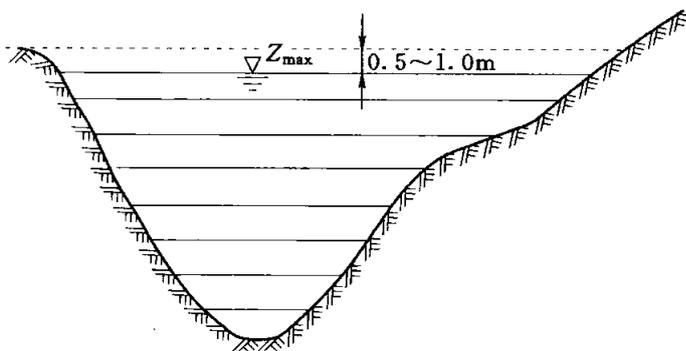


图 4-10 计算机方法进行大断面面积计算示意

(5) 绘 $Z-A$ 关系曲线。由历年最低水位开始 (为什么?), Z 始终是纵轴。
[思考题 4-1] 大断面的计算。

4.3 流速脉动与流速分布

4.3.1 流速脉动

1. 现象

水体在河槽中运动, 受到诸如断面形状、坡度、糙率、水深、弯道、风、气压、潮汐等因素的影响而产生紊流。由水力学知: 紊流内部水质点的瞬时流速, 其大小、方向都随时间变化, 即 $v = f(t)$, 见图 4-11。

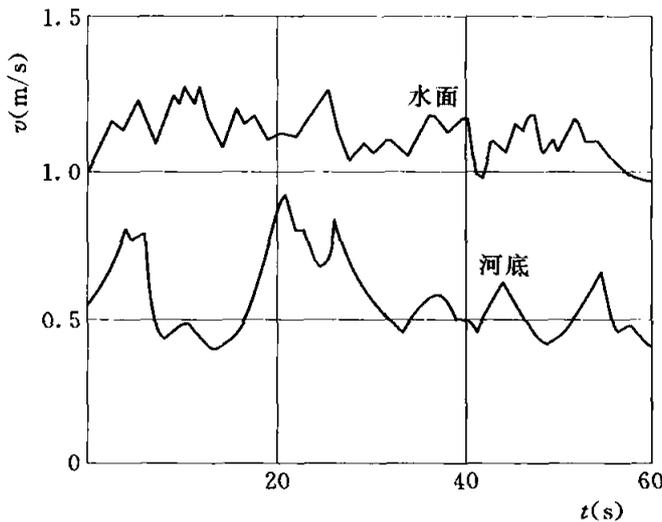


图 4-11 水面及河底流速脉动示意

2. 特性

脉动流速随时间不断变化, 时大时小, 时正时负, 但足够长时段平均流速值 (时均流速 \bar{V}) 是稳定的。

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (4-9)$$

任一点的流速可另外表示为

$$v = \bar{V} + \Delta v \quad (4-10)$$

且满足 $\lim_{T \rightarrow \infty} \sum_0^T \Delta v = 0$

3. 脉动强度 y

(1) 计算公式。

$$y = \frac{1}{\bar{V}^2} (v_{\max}^2 - v_{\min}^2) \quad (4-11)$$

式中: v_{\max} , v_{\min} 分别为测点瞬时最大、最小流速。

(2) 规律。在横断面图上点绘各点的 y 值并连出其等值线, 见图 4-12。

由图 4-12 可以发现以下特点。

1) 河底大于河面, 岸边大于中泓 (粗糙度引起)。

2) 山区河流大于平原河流 (坡度大、流速急引起)。

3) 封冻时盖面冰下 y 值也很大 (边界约束、摩擦增加引起)。

(3) 研究脉动的意义。掌握流速随时间变化规律, 据以合理控制测速

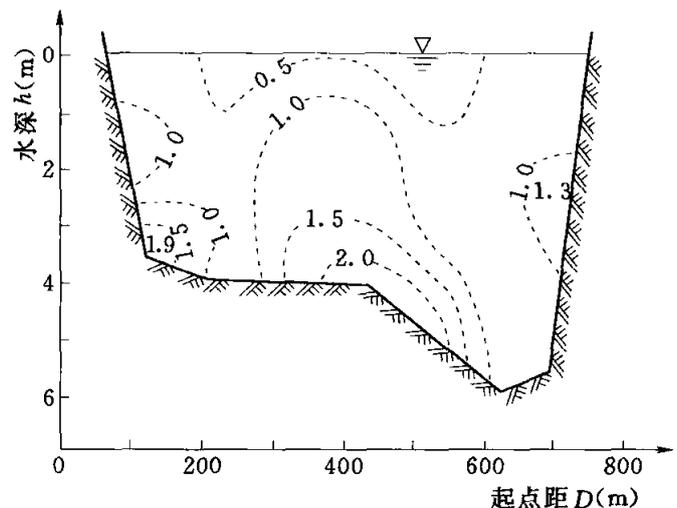


图 4-12 横断面图上 y 值等值线示意

历时，消除脉动影响，测得能代表实际情况的流速。它对于进行流量测验具有重大意义。

4.3.2 河道中的流速分布

1. 概述

(1) 定义。流速在断面上沿水深和横断面方向的变化规律。

(2) 作用。解决泥沙运动、河床演变及水文测验本身（如怎样布设测速垂线和垂线上测速点位置）等问题。

(3) 影响因素。糙率、冰冻、气流、水深、水草生长情况、河床地形、河床组成物、潮汐、上下游河道形势等。

2. 垂线上的流速分布

研究河流的垂线平均流速，确定垂线上测速点的位置（图 4-13）。

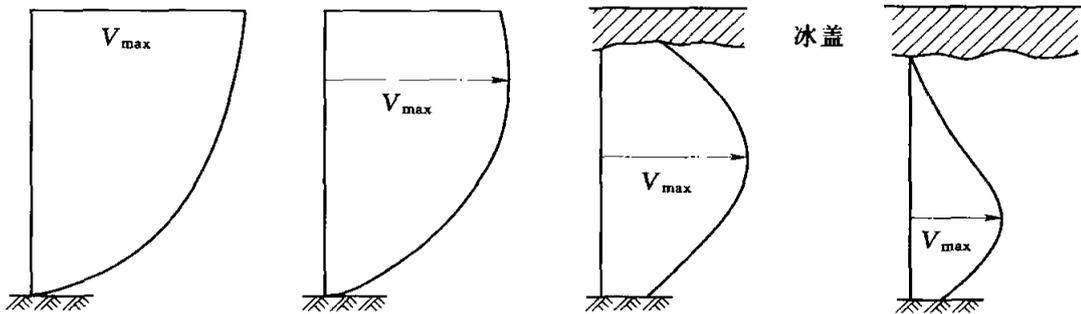


图 4-13 河流的垂线流速分布示意

(1) 抛物线型。

$$v = v_{\max} - \frac{1}{2P}(h_x - h_m)^2 \quad (4-12)$$

(2) 对数型。

$$v = v_{\max} + \frac{v_*}{K} \ln \eta \quad (4-13)$$

(3) 椭圆型。

$$v = v_0 \sqrt{1 - P\eta^2} \quad (4-14)$$

(4) 指数型。

$$v = v_0 \eta^{1/m} \quad (4-15)$$

式中： v 为分布曲线上任意一点的流速； v_{\max} 为垂线上的最大测点流速； v_0 为垂线上的水面流速； v_* 为动力流速； h_x 为垂线上的任意点水深； h_m 为垂线上最大测点流速处的水深； $\eta = \frac{y}{h}$ 为由河底向水面起算的相对水深； P 为抛物线焦点的坐标，常数；

K 为卡尔曼常数。

3. 横断面上的流速分布

(1) 绘等流速线，找出分布规律。图 4-14 给出了某河流的断面流速脉动分布。

1) 河底与岸边流速最小。

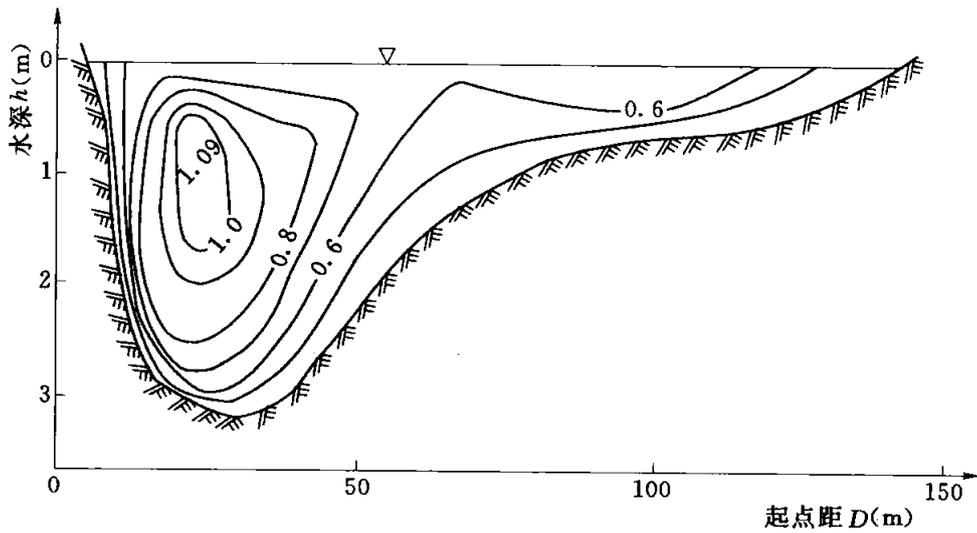


图 4-14 断面流速脉动分布

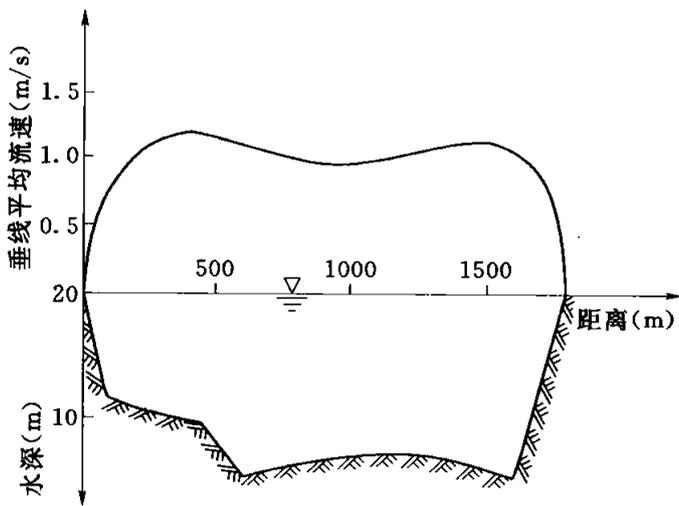


图 4-15 某河流窄深河道上的垂线平均流速沿河宽分布

2) 水面流速、近两岸边的流速小于中泓流速。

3) 水深最大处水面流速最大。

4) 垂线上最大流速、畅流期出现在水面至相对水深 0.2 的范围；封冻期向下移至半深处（盖面冰使水面摩擦阻力增大的原因）。

(2) 绘垂线平均流速沿河宽分布图，找出分布规律。图 4-15 给出了某河流窄深河道上的垂线平均流速沿河宽分布，由图 4-15 可见，它与断面形状相似。

4. 流量模型

(1) 设想。将流速在横断面上的分布以一个立体图形来表示（图 4-16）。

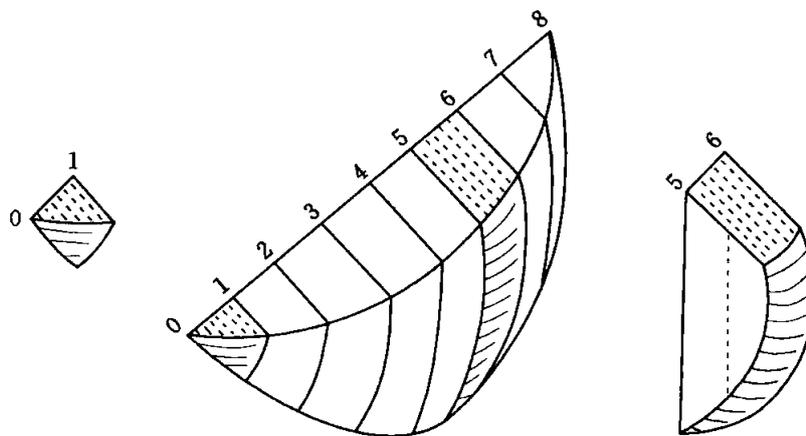


图 4-16 流量模型示意

(2) 定义。以水流横断面、水面和流速矢端曲面（双重曲面）所包围的体积，表示单位时间内通过水道横断面之水的体积。

(3) 作用。直观、容易理解流速仪法测流时测速点和测速垂线布设的意义。

4.3.3 流向测量

1. 概述

(1) 定义。水平方向的流速方位角。

(2) 目的。流速是个矢量，应有大小和方向。流向也是水流重要特征之一。

(3) 流向误差。

$$\delta_Q = \frac{Q' - Q}{Q} = \frac{|\vec{V}|A - |\vec{V}|A\cos\alpha}{|\vec{V}|A\cos\alpha} = \frac{1 - \cos\alpha}{\cos\alpha} = \sec\alpha - 1 \quad (4-16)$$

$\alpha = 10^\circ$ 时

$$\delta_Q = (\sec 10^\circ - 1) \times 100\% = 1.54\%$$

$\alpha = 15^\circ$ 时

$$\delta_Q = (\sec 15^\circ - 1) \times 100\% = 3.52\%$$

$\alpha = 30^\circ$ 时

$$\delta_Q = (\sec 30^\circ - 1) \times 100\% = 15.5\%$$

由此可见，当 $\alpha \geq 10^\circ$ 时，必须观测流向并且加以改正。

(4) 作用。

- 1) 研究河道测流断面。
- 2) 研究水工建筑物的布置（定轴向）。
- 3) 研究河道中冲淤变化及河床变形。
- 4) 海洋、湖泊、感潮河段上测流。
- (5) 仪器。

流向仪。

2. 流向测量数据的整理

(1) 垂线平均流向。

1) 根据测点流速流向数据，绘垂线流速图和垂线流向图。

2) 在上述两个图上都按水深数值分成几个等深的部分，并分别查出部分流速 v_i 和部分流向方位角 α_i 。

3) 计算垂线平均流向为

$$\tan\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sin\alpha_i}{\sum_{i=1}^n v_i \cos\alpha_i} \quad (4-17)$$

(2) 断面平均流向。以各测速垂线为中心的部分流量为大小，以垂线平均流向为

方位，逐个进行矢量叠加，其和矢量方向即断面平均流向。

4.4 流速仪

4.4.1 非转子式流速仪

1. 工作原理

利用声、光、力、电、磁作用于水流的效应测定水流通过的速度。

2. 分类

按传感部分的工作原理划分为以下几类。

- (1) 水压测速仪。
- (2) 采样流速仪。
- (3) 声学流速仪。
- (4) 光学流速仪（作为例子，简单介绍）。
- (5) 电学流速仪。

4.4.2 转子式流速仪

1. 工作原理

利用水流作用到水中流速仪的迎水面，由于感应元件（转子）的各部分所受水压力不同，产生压力差而使流速仪转子转动。转子的转速与水流速度成正比，测定转子的转速即可推求得水流速度。

2. 分类

按转动部分的形状划分。

- (1) 旋杯式流速仪。
- (2) 旋桨式流速仪。

上述为实验四的内容，见图 4-17。

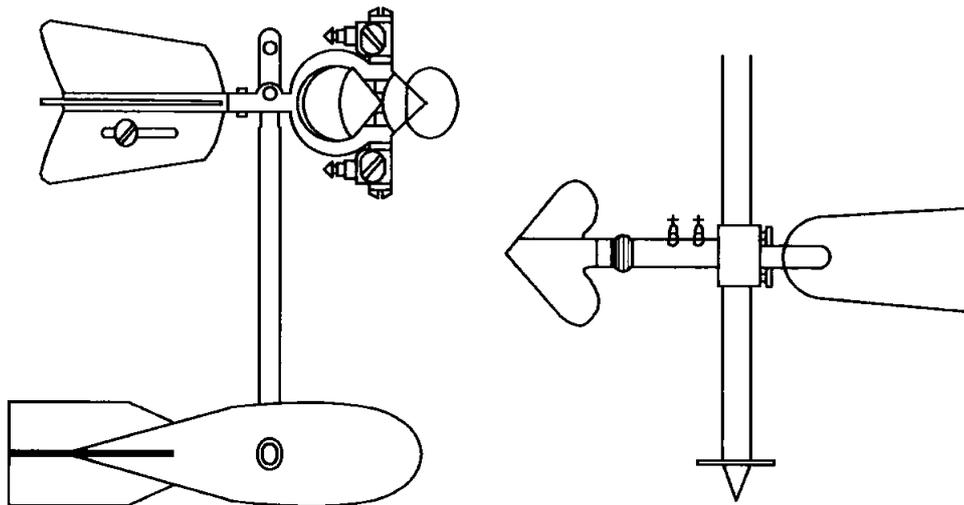


图 4-17 旋杯式流速仪及旋桨式流速仪

4.5 流速仪法测流

4.5.1 测流原理

1. 理论上

$$v = f(h, b) \quad (4-18)$$

$$Q = \int_0^A v dA = \int_0^B \int_0^h v dh db = \int_0^B v_m h db \quad (4-19)$$

2. 实用上

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (4-20)$$

3. 注意事项

- (1) n 不可能无限, 因而, 所求流量只可能是实际流量的逼近值, 而非真值。
- (2) 因河道测流时间长, 因此, 实测流量是一个时段平均值, 而非瞬时值。
- (3) 流速面积法 $Q = A \bar{V}$, 其中的 \bar{V} 是由 $\frac{Q}{A}$ 计算出来的。

4.5.2 工作内容

- (1) 测量水深, 起点距。
- (2) 观测测速垂线上各测速点的流速, 有斜流时要测流向。
- (3) 水位观测, 以及其他影响测流的有关因素, 如风。
- (4) 检查、分析实测成果, 进行断面流量计算。

4.5.3 流速测量

1. 测速垂线的数目与布设

(1) 问题的提出。

由式 (4-18), 实用的流量测验方法为

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n V_i A_i \quad (4-21)$$

式中: V_i , A_i 分别为部分流速和部分面积。

矛盾: 水情较平稳时, n 越大, Q 越精确, 但所花费时间越多, Q 的瞬时性越差。

(2) 解决办法。测流方案优化。在保证满足一定测验精度要求或使测流历时最短的情况下, 研究断面测速垂线数目、测点数目和测点测速历时等之间的最佳组合方案。我国新相关标准在测流精简分析实验的基础上, 采用非线性规划寻优方法和正交试验设计优选方法对测流方案进行优选, 以确定测流方案。

(3) 布设原则。

1) 根据所要求的流量精度及断面的形状, 测速垂线布设: 应能控制断面地形和流速沿河宽分布的主要转折点。

2) 测速垂线布设位置应大致均匀, 但主槽应较河滩为密。在测流断面内, 大于总流量 1% 的独股分流、串沟应布设测速垂线。

3) 测速垂线的位置应尽可能固定, 以便于测流成果的比较, 了解断面冲淤与流速变化情况, 研究测速垂线与测速点数目之精简等。

4) 当断面形状或流速横向分布随水位级不同而有较明显的变化规律时, 可分高、中、低水位级分别布设测速垂线。

2. 测速方法的选择

(1) 根据垂线数目、测点多少、繁易程度分类。

1) 精测法。多线多点, 为精简测流提供依据。

2) 常测法。较少的垂线和测点数目, 正常情况下采用的方法。

3) 简测法。特殊水情时, 如抢测洪峰、垮坝洪水, 在保证精度的前提下, 用尽可能少(或少到一条都不能再少的程度)的垂线和测点数目测流的方法。

(2) 根据测速方法的不同分类。

1) 积点法。指在断面的各条垂线上将流速仪放在不同水深点处逐点测速, 然后计算流速和流量。测速垂线上测速点的数目, 根据流量精度的要求、水深及悬吊流速仪的方式等情况而定。测速点的数目越少, 流速测验误差越大。按测速点的不同, 有十一点法、六点法、五点法、三点法、两点法和一点法。

2) 积深法。流速仪在垂线上均匀升降而测定流速。

3) 积宽法。将一架特制的一转多信号旋浆流速仪固定在水下某一深度沿测流横断面匀速移动进行连续施测流速。

3. 测速历时的确定

(1) 测速历时长短的原因。控制流速脉动对测速精度的影响。

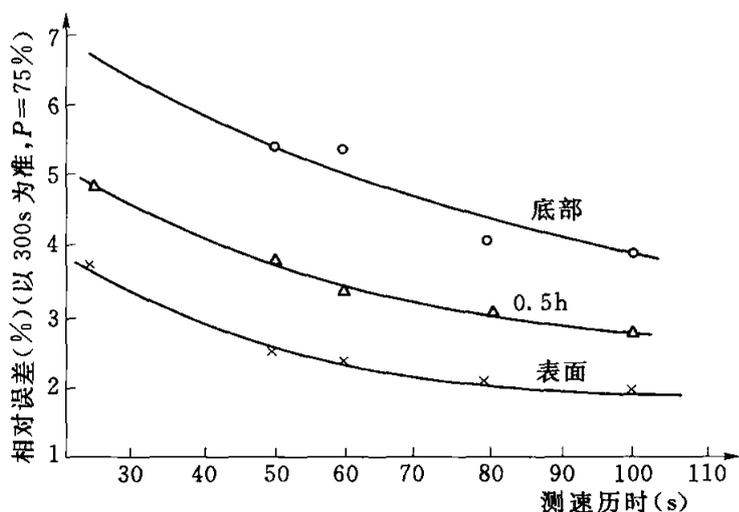


图 4-18 不同水深处测速历时情况下的测速相对误差

(2) 测速历时长短影响的实验结果。图 4-18 给出了某河流的测站断面上不同水深处测速历时情况下的测速相对误差。

由图 4-18 可以看出。

1) 在某测点上测速历时愈长, 实测的时均流速愈接近真值。

2) 流速脉动越大, 测速的误差也越大。

3) 历时越短, 流速脉动产生的误差递增率也越大。

(3) 应用结论。

1) 精测法以 100s 为基准。

2) 常测法、简测法用 50s。

3) 特殊情况不能少于 20s。

各测站进行试验分析, 根据黑龙江、广东、山东、吉林、江西、四川等省水文部门及长江水利委员会的分析试验, 其所得结果大致相同。如以测速历时 300s 为准: 累积频率 75% 的相对误差, 在水面时, 测速历时 100s 误差为 $\pm 1.9\%$, 50s 为 $\pm 2.5\%$, 30s 为 $\pm 3.6\%$ 。

4.5.4 流量计算（采用分析法）

基本思想是假定相邻两测点之间、相邻两测速垂线之间、相邻两测深垂线之间的流速、面积均呈直线变化。具体为以下步骤。

1. 计算垂线平均流速

(1) 积深法的结果即垂线平均流速。

(2) 积点法根据垂线流速分布采用下列计算公式。

一点法

$$V_m = V_{0.6} \quad (4-22)$$

二点法

$$V_m = \frac{1}{2}(V_{0.2} + V_{0.8}) \quad (4-23)$$

三点法

$$V_m = \frac{1}{3}(V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8})$$

或

$$V_m = \frac{1}{4}(V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8}) \quad (4-24)$$

五点法

$$V_m = \frac{1}{10}(V_{0.0} + 3V_{0.2} + 3V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_{1.0}) \quad (4-25)$$

六点法

$$V_m = \frac{1}{10}(V_{0.0} + 2V_{0.2} + 2V_{0.4} + 2V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_{1.0}) \quad (4-26)$$

十一点法

$$V_m = \frac{1}{10}\left(\frac{1}{2}V_{0.0} + \sum_{i=1}^9 V_{0,i} + \frac{1}{2}V_{1.0}\right) \quad (4-27)$$

式中： V_m 为垂线平均流速， $V_{0.0}$ ， $V_{0.2}$ ， $V_{0.4}$ ， $V_{0.6}$ ， $V_{0.8}$ ， $V_{1.0}$ 均为与脚标数值相应的相对水深处的测点流速。

2. 计算部分面积、流速、流量（采用平均分割法）

(1) 部分面积的计算。

1) 岸边部分。由岸和距岸第一条测速垂线所构成的岸边部分（两个，左岸和右岸）面积，至少包括一个岸边块。

2) 中间部分。以相邻两条测速垂线划分部分、将各个部分内的测深垂线间的断面面积（块面积）相加，得出各个部分的部分面积。

若两条测速垂线（同时也是测深垂线）间无另外的测深垂线，则该部分面积就是这两条测深（同时是测速垂线）间的面积（即块面积），见图 4-19。

(2) 部分平均流速的计算。

1) 岸边部分。由距岸第一条测速垂线所构成的岸边部分（两个，左岸和右岸，多为三角形）

$$V_1 = \alpha V_{m_1} \quad (4-28)$$

$$V_{n+1} = \alpha V_m \quad (4-29)$$

式中： α 为岸边流速系数，其值视岸边情况而定。斜坡岸边 $\alpha=0.67\sim 0.75$ ，一般取 0.70 ，陡岸 $\alpha=0.80\sim 0.90$ ，死水边 $\alpha=0.60$ 。

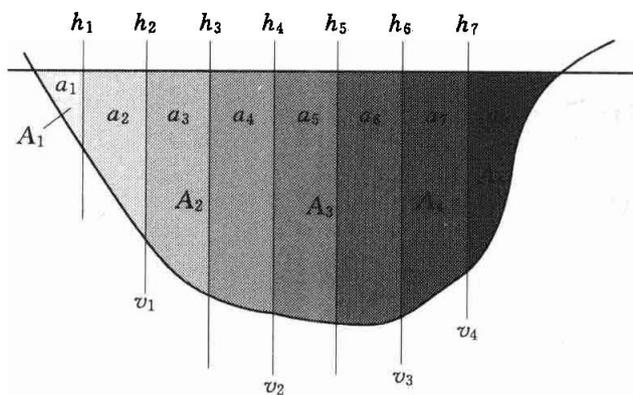


图 4-19 部分面积计算示意

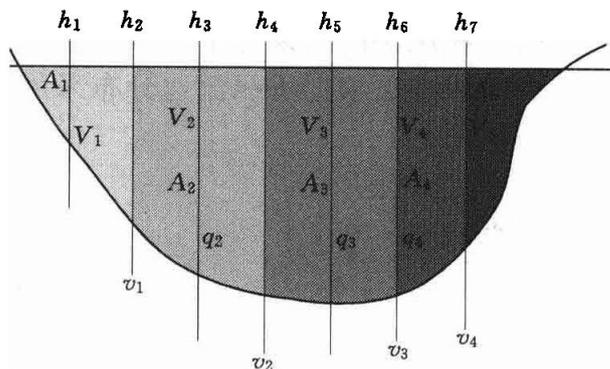


图 4-20 部分流速及部分流量计算示意

2) 中间部分。由相邻两条测速垂线与河底及水面所组成的部分，部分平均流速为相邻两垂线平均流速的平均值，即

$$V_i = \frac{1}{2}(V_{m_{i-1}} + V_{m_i}) \quad (4-30)$$

(3) 部分流量的计算。图 4-20 给出了部分流速及部分流量计算的直观示意。

由上述所求各部分的部分平均流速与部分面积之积得到部分流量，即

$$q_i = V_i A_i \quad (4-31)$$

式中： q_i ， V_i ， A_i 分别为第*i*个部分的流量、平均流速和断面积。

(4) 断面流量及其他水力要素的计算

Q 为断面流量，用式(4-18)计算。

断面平均流速为

$$V = \frac{Q}{A} \quad (4-32)$$

断面平均水深为

$$H = \frac{A}{B} \quad (4-33)$$

图 4-21 给出了断面平均水深计算及其直观意义示意。

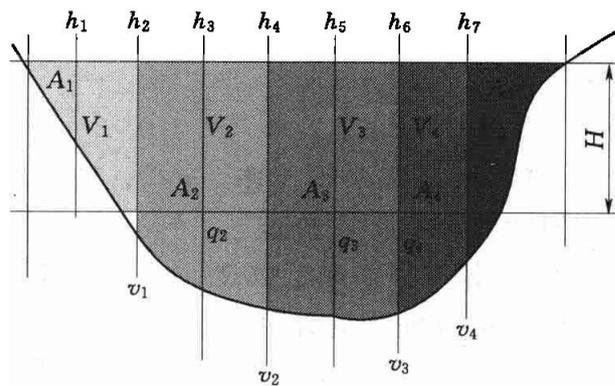


图 4-21 断面平均水深计算及其直观意义示意

3. 计算部分流速、面积、流量(采用中间分割法)

图 4-22 给出了中间分割法部分流量的计算示意，部分流量计算如下。

$$q_1 = v_1 \times h_2 \times b'_1, b'_1 = (b_1 + b_2)/2$$

$$q_2 = v_2 \times h_4 \times b'_2, b'_2 = (b_2 + b_3)/2$$

$$q_3 = v_3 \times h_6 \times b'_3, b'_3 = (b_3 + b_4)/2$$

$$q_4 = v_4 \times h_7 \times b'_4, b'_4 = (b_4 + b_5)/2$$

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

式中： b'_1 、 b'_2 、 b'_3 、 b'_4 称作部分宽。

[思考题 4-2] 中间分割法与平均分割法得到的结果有什么不同？原因何在？

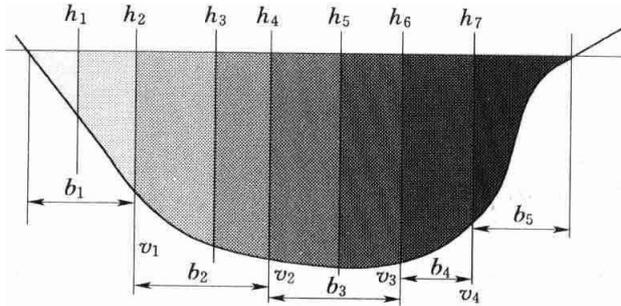


图 4-22 中间分割法部分流量计算示意

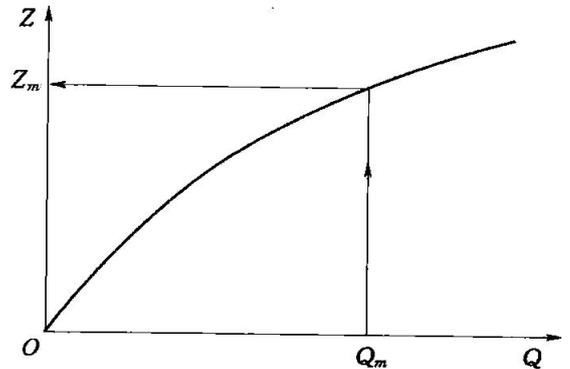


图 4-23 相应水位定义的示意

4.5.5 相应水位计算

1. 定义

在一次测流过程中，与该次实测流量值相等的瞬时流量所对应的水位（图 4-23）。

2. 计算

根据测流时水位涨落不同情况可分别采用算术平均法或加权平均法计算。

(1) 算术平均法。

$$Z_m = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad (4-34)$$

(2) $b'V_m$ 加权法。

$$Z_m = \frac{\sum_{i=1}^n b'_i V_{m_i} Z_i}{\sum_{i=1}^n b'_i V_{m_i}} \quad (4-35)$$

(3) 部分流量加权法。

$$Z_m = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \bar{Z}_i}{Q} \quad (4-36)$$

式中： Z_m 为相应水位，m； b'_i 为第 i 条测速垂线所代表的水面宽，m； V_{m_i} 为第 i 条测速垂线的平均流速，m/s； Z_i 为第 i 条测速垂线测速时的水位，m； q_i 为第 i 个部分流量， m^3/s 。

[思考题 4-3] 流速仪法测流的流量计算。

4.6 介绍几种测流方法

4.6.1 浮标法测流

1. 适用条件

水面漂浮物多，流速仪无法施测时。

2. 测流原理

将流速的指数分布关系式

$$v = v_0 \eta^{1/m} \quad (4-37)$$

代入到流量计算公式为

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^A v dA = \int_0^B \int_0^h v dh db \\ &= \int_0^B \int_0^h v_0 \eta^{1/m} dh db = \int_0^B \int_0^1 v_0 \eta^{1/m} h d\eta db \\ &= v_0 \frac{1}{\left(\frac{1}{m} + 1\right)} \int_0^B h \left[\eta^{\left(\frac{1}{m} + 1\right)} \right]_0^1 db \\ &= \frac{v_0 m}{m + 1} \int_0^B h db = \frac{m}{m + 1} v_0 \bar{h} B \\ &= K_f Q_f \end{aligned} \quad (4-38)$$

式中： Q_f 为浮标虚流量； K_f 为浮标系数；其余符号意义同前。

3. 测定 Q_f

各类浮标示意图 4-24。

(1) 施放浮标。

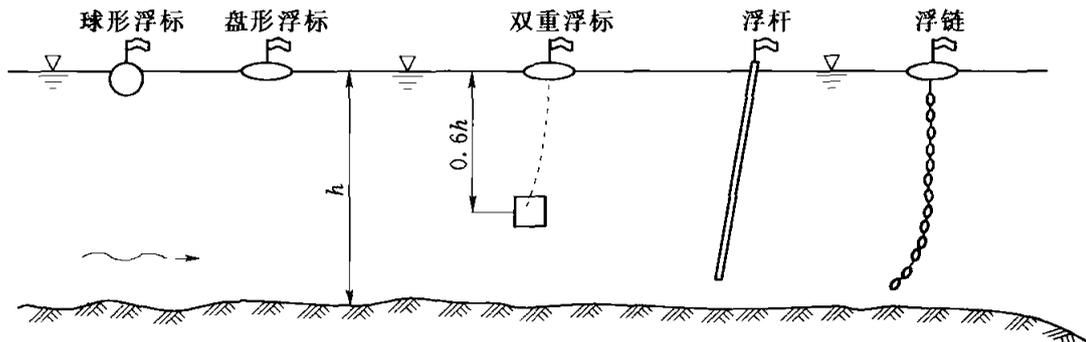


图 4-24 各类浮标示意

- (2) 观测浮标流速 V_f 并确定其在测流断面上的位置。
- (3) 施测浮标测流断面面积。
- (4) 观测水位。
- (5) 图解法计算浮标虚流量 Q_f (图 4-25)。(同流速仪法测流计算流量)

$$q_{f_i} = v_{f_i} A_i$$

$$Q_f = \sum_{i=1}^n q_{f_i}$$

4. 推求 K_f

- (1) 实验法。采用同流量比测数据计算 (不同水位、风向、风力等参数情况)

$$K_f = \frac{Q_{\text{流速仪}}}{Q_f} \quad (4-39)$$

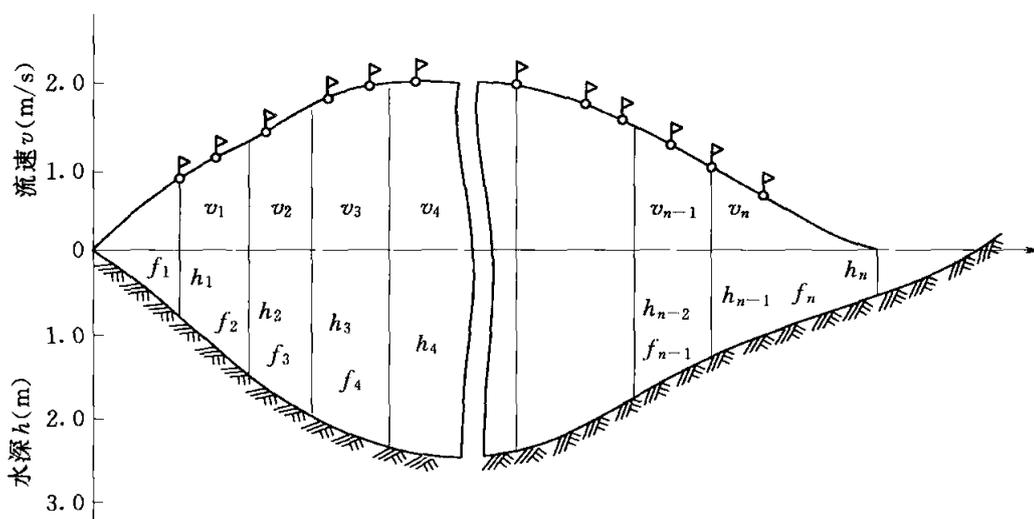


图 4-25 图解法计算浮标虚流量

(2) 经验法。引用典型有代表性站的观测数据，给出适用同类分区的半经验、半理论公式为

$$\bar{K}_f = \bar{K}_0 (1 + A \bar{K}_v) \quad (4-40)$$

式中： \bar{K}_f 为断面平均浮标系数； \bar{K}_0 为断面平均水面流速系数； A 为浮标阻力分布系数； \bar{K}_v 为断面平均空气阻力参数。

(3) 水位流量关系曲线法。将流速仪不同测流方案分别绘制水位流量关系曲线，用浮标测量其相应水位，从这些水位流量关系曲线上查读流量 Q ， Q 与 Q_f 的比值即 K_f 。

(4) 水面流速系数法。由水面流速系数的试验数据间接确定 K_f 。

5. 计算流量

$$Q = K_f Q_f \quad (4-41)$$

4.6.2 超声波法测流

1. 原理

超声波法是利用超声波在水中的传播特性（如穿透性、方向性、多普勒效应等）测定层平均流速，并结合断面资料来推求流量的方法。

2. 应用分类

(1) 利用超声波在顺、逆水传播时间的变化来反映流速的变化，包括时差法、频差法及相位差法。

(2) 利用声波束偏移测定流速，即声束偏移法。

(3) 利用多普勒原理测定流速，多普勒法。

3. 时差法（脉冲时差法）

(1) 测流方法。在河流两岸边水下某深度处，相对地装置一对电声可逆换能器 A、B，其间距为 L 。如图 4-26 所

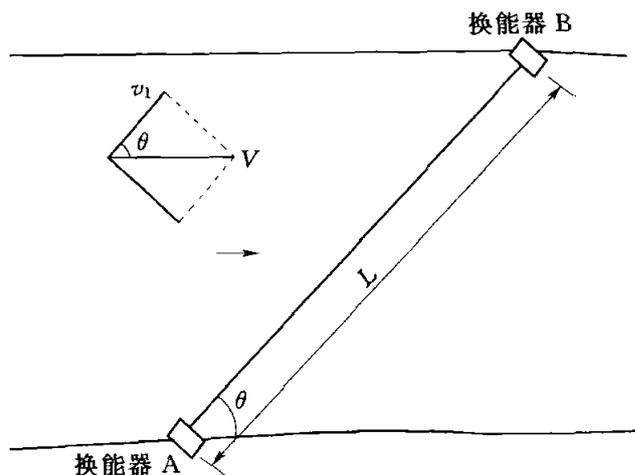


图 4-26 时差法测流原理示意

示。开启超声波发射机和接收机，分别测出超声波顺流（A→B）和逆流（B→A）传播时间 T_1 和 T_2 。

(2) 流速计算。设水层平均流速为 V ，水流方向与 B 的夹角为 θ ，水流在 AB 方向的分速为 v_1 ， $v_1 = v \cos \theta$ ，超声波在静水中传播速度为 C 。当由 A 向 B（顺流）及反过来由 B 向 A（逆流）发射超声波，声波顺流与逆流传播时间分别为

$$T_1 = \frac{L}{C + v_1}$$

$$T_2 = \frac{L}{C - v_1}$$

则

$$v_1 = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$$v = \frac{v_1}{\cos \theta} = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (4-42)$$

4. 频差法（重复脉冲频率法、环路法）

(1) 测流方法。通过测定顺水、逆水循环发声、收声的频差来确定水层平均流速和断面的流量。如上游换能器作送波器向对岸发射超声波，当下游换能器接收到声波后通过专门电路系统，使上游送波器立即再次发射，如此便可形成电—声—电的环路。单位时间声波循环的次数就是频率，则顺水与逆水发声的频率分别为

$$f_1 = \frac{1}{T_1}$$

$$f_2 = \frac{1}{T_2}$$

顺水与逆水发声的频差 Δf 为

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \quad (4-43)$$

(2) 流速计算。

从式 (4-42) 得

$$v = \frac{v_1}{\cos \theta} = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \frac{L}{2 \cos \theta} \Delta f \quad (4-44)$$

5. 流量计算

(1) 多层测流法。沿河流两边不同深度上相对安设多对换能器，在断面上测出各水层的平均流速 v_i ，用 v_i 乘以对应河宽 b_i 得单深流量 $v_i b_i$ ，以纵坐标为水深，横坐标为单深流量，绘制垂直流量分布图（图 4-27）。用求积仪量出垂直流量分布曲线图的面积，即全断面的流量，以公式表示为

$$Q = \int_0^h v_i b_i dh \quad (4-45)$$

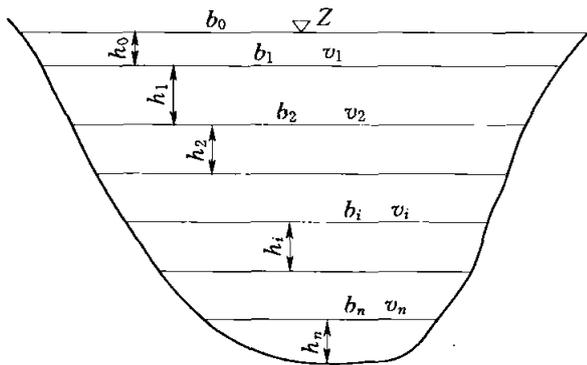


图 4-27 多层超声波法测流流量计算示意

(2) 单层测流法。沿河流两边分别选

择一个合适的固定位置，安放一对换能器，以换能器测得的该层平均流速 v_1 ，用 v_1 代表全断面平均流速 \bar{v} ，则 $Q = v_1 A$ ， A 为断面面积。

必须选择一个安装换能器的位置，使得 $v_1 = \bar{v}$ 。（或使 $\bar{v} = av_1 + c$ ）

我国朗梨水文站经比测得出下列关系。

0.2h 单层法：

$$\bar{v} = 0.913v_{0.2} + 0.005$$

0.6h 单层法：

$$\bar{v} = v_{0.6}$$

1973 年英国在泰晤士河上游某站用多层（7 层）法测速的 15 次资料分析结果表明 h 换能器的位置应放在 $0.641\bar{h}$ 处， \bar{h} 为断面平均水深。

6. 方法评述

(1) 优点。

1) 能够测得全断面的瞬时流速、流量及其连续变化过程，并可直接以数字或过程线的形式显示结果。

2) 方法简单，内、外业工作量小。

3) 不需要过河设备，操作安全，劳动强度大大改善。

4) 不破坏天然水流状态，不妨碍通航。

5) 测速历时短，不仅对抢测洪峰提供了有利条件，还适用于受回水顶托、冰凌、潮汐和受水工建筑物影响的河段的测流。

6) 测速范围大，有测低速和高速的能力。

7) 便于遥测遥控，为迅速提供江河水情、及时做出洪水预报、指挥防洪抢险创造了有利条件。

(2) 缺点。

1) 超声波在静水中传播速度为 C ，在河道流水中受到水温、压力、水中杂质的影响。在水位变化急剧、含沙量大，水中漂浮物和气泡很多的情况下，将带来较大的误差。

2) 超声波法测流对站址的选择和技术要求都比较严格。

[思考题 4-4] 频差法与时差法哪个更好一点？

其实两种方法水温的影响都反映在 T_1 、 T_2 之中。另外，频差法中还存在声环不断流动的“时延”问题，且 Δf 很小，实用上需要采用“频率倍增”技术。

7. 方法应用

目前一些国家如日本、英国、美国、法国、前苏联、德国、加拿大、瑞士、荷兰和中国等已经使用超声波法测流，其中美国、英国、日本、德国等国已有定型产品。英国在泰晤士河上游某站用流速仪精测法和超声波法（多层法）比测，全部测次误差均在 $\pm 10\%$ 以内，其中 89% 测次的误差在 $\pm 5\%$ 以内。日本测到最大水层平均流速为 2.50m/s ，最大含沙量为 1.0kg/m^3 ，测速精度为 0.01m/s 。英国测到最大流量为 $8940\text{m}^3/\text{s}$ ，最大水深为 13m ，最大河宽为 600m 。瑞士从 1975 年起就将超声波法测流的资料编入年鉴。

我国朗梨水文站用超声波法测流，施测到的最大水层平均流速为 1.70m/s ，最大

流量为 $2370\text{m}^3/\text{s}$ 。该站于 1975~1977 年，用超声波法测流与流速仪法测流进行了 174 次比测，84% 测次的误差在 $\pm 5\%$ 以内，98% 测次的误差在 $\pm 10\%$ 以内。

4.6.3 电磁法测流

1. 原理

英国物理学家法拉第在他发现电磁感应现象的次年（1832 年）就已指出：当河中水流切割地球磁场的垂直分量时，两岸间水流中将产生感应电动势，其大小与流速成正比。法拉第的这一发现奠定了现代电磁法测流的理论基础。

电磁法测流是用检测两岸间水流的感应电动势等参数来测定流速和推求流量的方法。由于地球磁场很弱，实际电磁法测流需采用人工交变强磁场。根据电磁感应定律，运动水体（导体）切割磁力线而产生的感应电动势为

$$E = HBv \quad (4-46)$$

式中： E 为感应电动势，V； H 为磁场强度，T（特斯拉）； B 为河宽（即导体长度），m； v 为断面平均流速，m/s。

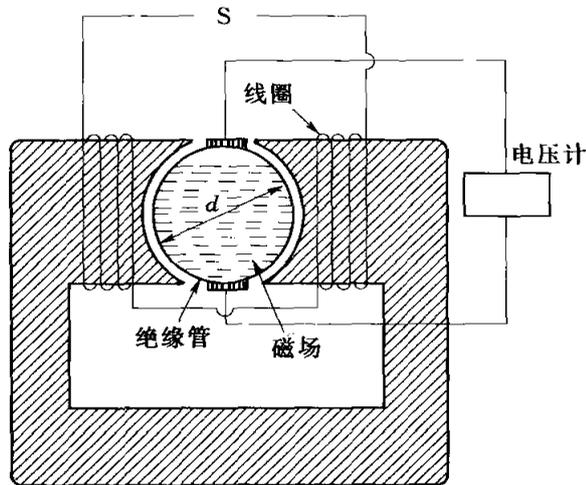


图 4-28 管道电磁法测流示意

根据这一原理，只要能准确地测出水流的感应电动势 E ，便能求得断面平均流速 v ，再乘以过水面积 A ，即可算出流量 Q （图 4-28）。

2. 优点

- (1) 不破坏水流结构，测流精度高（比一般方法高 2% 左右）。
- (2) 能自动测得流量过程，便于遥测。
- (3) 有测低速的能力，可测到 0.001m/s ，且能测顺流、逆流以及在小河及潮水河中使用。
- (4) 不受水草丛生、漂浮物、河床冲淤严重、悬沙、水中掺气、温度分层现象及强烈涡流等影响。

(5) 能解决现行方法和超声波法不能克服的一些问题。

3. 缺点

- (1) 电磁法测流施工工作量大，造价昂贵，因此其应用范围受到了限制。
- (2) 技术复杂，用于江河测流时，需特别考虑其现场布置形式，需要更复杂得多的测量系统和非常先进的电子技术，才能准确地从严重的噪声背景中检测出感应电压信号。
- (3) 测流的精度取决于多种因素，尤其至关重要的是选择一个能满足要求的河段。

4. 应用

目前，使用电磁法测流的国家有英国、德国、法国、美国、日本、荷兰、加拿大、澳大利亚等国。据英国两个站的电磁法测流资料分析，测速误差小于 $\pm 10\%$ 的次数占 95%。

4.6.4 光学法测流

利用光学原理研制的流速仪（如激光流速仪、光学流速仪）来测量流速以推求流量的方法。激光流速仪只用于实验室水槽的测试，光学流速仪用于江河测速。

光学流速仪是一种测量水面流速的仪器，其结构由一个低倍望远镜，一组转镜，一个变速马达和一个转速仪组成。仪器装有一个轻型电池电源和频闪装置，见图 4-29。

当测量流速时，观测者通过岸上观测点的仪器俯视水面，调节转镜的角速度，逐渐增大转速，此时从目镜中可以看到一个接一个的水面运动图像。当调节转镜的转速与水面流速同步时，目镜中水面的运动就渐渐慢下来，最后停止，这时说明转镜已经正好跟踪上水流。从转速器上读出转镜的角速度 ω ，并用钢尺量出仪器的光轴至水面的垂直距离 h ， ω 和 h 是计算水面流速 v_0 的两个要素。计算公式为

$$v_x = 2.188h\bar{\omega}$$

或者

$$v_x = 2h\bar{\omega}/0.914$$

用光学流速仪测速适用于水浅流急河底不平的河道，可以测量高达 15m/s 的流速。光学流速仪也适于在有浮冰或其他漂浮物而又不能使用流速仪的高浑浊水流中测速。目前，在测定水面流速时使用了一种国产新仪器——电波（多普勒）流速仪，在流动查测（巡测）中发挥了重要作用。

4.6.5 溶液法测流

溶液法测流又称稀释法、化学法测流。它是在稳定流条件下测量流量的方法。

1. 原理

溶液法测流是在测验河段的上游施放一种已知浓度和已知质量的化学指示剂，由于水流的紊动混合作用使指示剂在水中扩散，当到达下游取样断面时，指示剂被稀释并充分混合，其稀释的程度与水流流量成正比。因此，可根据取样断面所测定的水中指示剂浓度来推算流量。

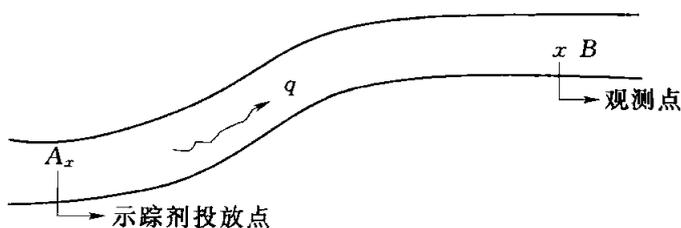


图 4-30 等速注入法示意

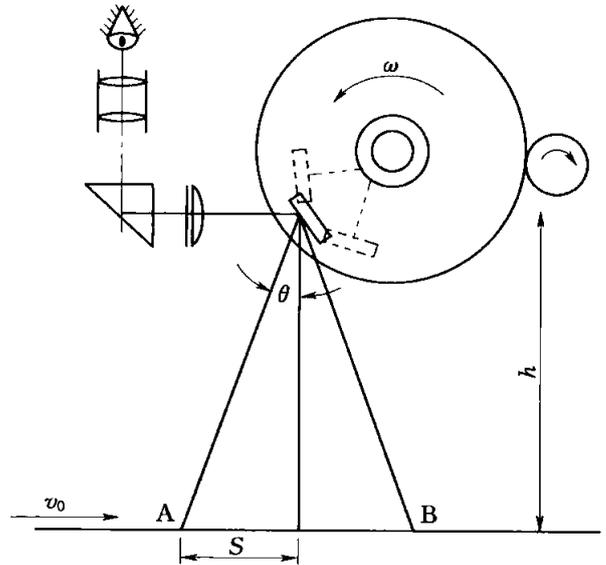


图 4-29 光学法测流示意

2. 分类

依施放指示剂方法的不同又可分为等速注入法和积分（突然注入）法两种。

(1) 等速注入法（图 4-30）。

1) 方法。

将浓度为 C_1 的指示剂，以流量 q 在一定时段内等速地注入上游断面（图 4-30）。经过一定时间，指示剂浓度在下游取样断面达到稳定，在稳定时段 T_p 内测得取样断面指示剂浓度为 C_2 。取样断面处天然状态下河水的水样所含指示剂浓度为 C_0 ，则在单位时间内，流入测验河段的指示剂数量 P_1 ，其值为

$$P_1 = qC_1 + QC_0$$

流出测验河段的指示剂数量 P_2 ，其值为

$$P_2 = (q+Q)C_2$$

根据质量守恒定律， $P_1 = P_2$ ，故有

$$qC_1 + QC_0 = (Q+q)C_2$$

$$Q = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_1} q \quad (4-47)$$

式 (4-47) 就是等速注入法推算流量的基本公式。

2) 注意点。等速注入法最重要的是所注入的指示剂到达下游取样断面时，应在整个取样过程中全断面保持相等的浓度。如图 4-31 所示，假设每隔很短时段施放一次，连续施放 n 次，对于每次施放而言都将在取样断面处相应有一条指示剂浓度过程线，称为单元过程线（历时为 t ）。相互重叠的单元过程线的总和即合成过程线。当第一个单元过程线流过取样断面后，即经过 T 时段后取样断面流出的指示剂必须由后继各单元过程线相应时段的指示剂来补充，这时取样断面指示剂浓度开始稳定。同理，此时整个测验河段的指示剂浓度也是稳定的。因此， $P_1 = P_2$ 。为使浓度在 T_p 时段内保持稳定，在上游注入指示剂至少有 $T + T_p$ 时间，一般为 10~20min（图 4-31）。

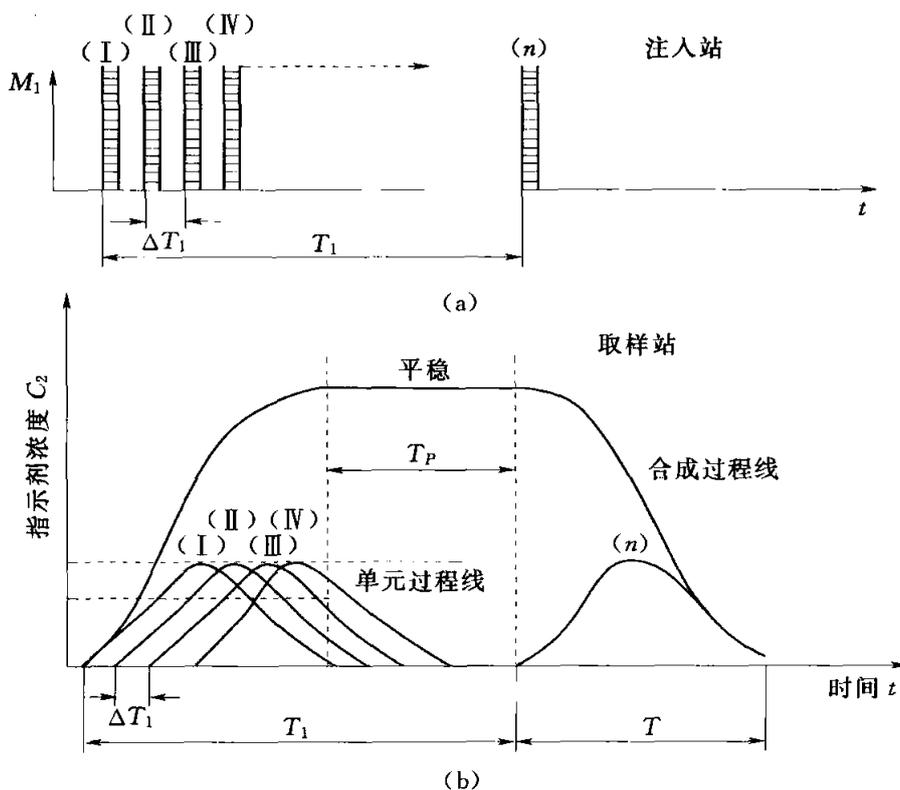


图 4-31 等速注入法测流注意点示意

(2) 积分（突然注入）法。

在短历时内一次将浓度为 C_1 、体积为 V_1 的指示剂注入上游断面，当指示剂溶液到达取样断面后，测量指示剂浓度随时间的连续变化过程，便可计算流量。

投入上游全部指示剂的质量 $M_1 = C_1 v_1$ ，通过取样断面指示剂的全部质量 M 为

$$M = Q \int_0^T (C_2 - C_0) dt \quad (4-48)$$

式中： C_2 为不同时间在取样断面处测得的指示剂浓度； T 为指示剂在取样断面出现至消失的总历时；其余符号意义同前。

由质量守恒定律知 $M = M_1$ ，故有

$$C_1 v_1 = Q \int_0^T (C_2 - C_0) dt$$

于是

$$Q = \frac{C_1 v_1}{\int_0^T (C_2 - C_0) dt} = \frac{c_1 v_1}{(\bar{c}_2 - c_0) T} \quad (4-49)$$

式 (4-49) 即积分法推算流量的基本方程。从式 (4-49) 中可见，只要测出 C_2 的变化过程，便可求出指示剂的平均浓度 \bar{C}_2 ，从而计算出流量 Q (图 4-32)。

3. 使用条件

(1) 对河段选择的基本要求。使用溶液法测流的河段选择应满足河段内水流有很高的紊流程度，以使指示剂溶液与全部水流充分混合。因此，

应选择河床狭窄或弯道、峡谷等使水流尽可能紊动的河段。在满足水流充分混合的条件下，河段应尽量缩短以节省指示剂和缩短测流历时。在河段内无死水区、无支流汇入、无分流岔道，避免水生植物，以使指示剂沿流程没有收入、支出及停滞状态。

(2) 指示剂的选用。溶液法测流所采用的指示剂主要有食盐、重铬酸钠、同位素、食用染料及荧光染料（洛丹明）等几种，它们各有优缺点。其中荧光染料作指示剂是近年来发展起来的，它的优点是观测仪器采用荧光光度计，其灵敏度高，染料花费少，毒性很小。由于它有明显的光亮，在河流中成云状传播，可以目测指示剂随水流的运动情况。

4. 优点

(1) 不要装配测流断面的过河设备，也不必人工整治河道或修筑测流建筑物。

(2) 施测流速、水道断面面积，避免了山溪性河道积石壅塞，水势湍急时使用流速仪和浮标法测流所发生的困难，且能保证测流精度。

(3) 野外测量工作量小，测流历时短，若不计准备工作时间，一般只需 10~20min 即可测流一次。

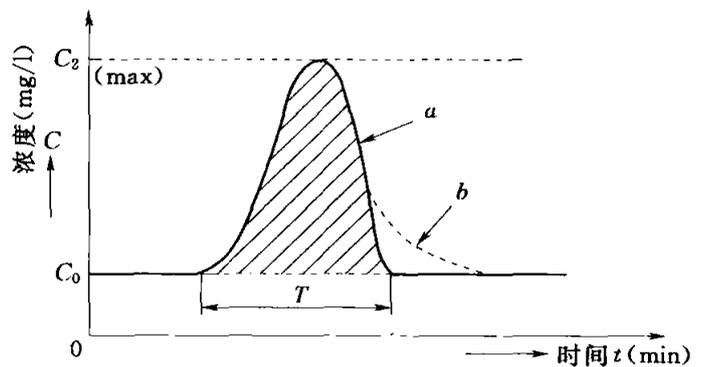


图 4-32 突然注入法测流法示意

5. 缺点

- (1) 指示剂的选择中，不能造成水体污染的要求条件较高。
- (2) 大江大河、湖流的流量测验，此法难以使用。

6. 适用

- (1) 山区乱石壅塞，水流湍急的河道。
- (2) 水电站管道的流量测验。

7. 应用

在流量大至 $1000\sim 2000\text{m}^3/\text{s}$ 或流速小至 $0.10\sim 0.50\text{m}/\text{s}$ 的河流，已有许多国家采用溶液法测流都能得到较好的成果，其中法国 60% 的测站使用。

此外，除以上简单介绍的测流方法外，航空测流法、电波多普勒法、遥感法等也已在一些国家开始应用。

4.7 ADCP 河流流量测验原理和方法

4.7.1 引言

河流流量测验是水文工作者的重要任务之一。传统的河流流量测验主要采用单点流速仪，故称为流速仪法。流速仪法广泛应用于人工船测、桥测、缆道，涉水测验等。它费工、费时、效率不高。

用 ADCP 进行河流流量测验是自 20 世纪 80 年代初开始发展和应用的新的流量测验方法。ADCP 流量测验方法的发明被认为是河流流量测验领域的一次革命。当装备有 ADCP 的测船从测流断面一侧航行至另一侧时，ADCP 即刻测出河流流量。它比传统的河流流量测验方法效率提高十几倍。它标志着河流流量测验的现代化。

4.7.2 ADCP (Acoustic Doppler Corrent Profiler) 简介

顾名思义，ADCP 是一种利用声学多普勒原理测验水流速度剖面的仪器，ADCP 一般配备有 4 个（或 3 个）换能器，换能器与 ADCP 轴线成一定夹角。每个换能器既是发射器又是接收器。换能器发射的声波具有指向性，即声波能量集中于较窄的方向范围内（称为声束，类似于探照灯发射的光束）。换能器发射某一固定频率的声波，然后聆听被水体中颗粒物散射回来的声波。假定颗粒物的运动速度与水体流速相同，当颗粒物的运动方向接近换能器时，换能器听到的回波频率比发射波频率高；当颗粒物的运动方向背离换能器时，换能器听到的回波频率比发射波频率低。声学多普勒频移，即回波频率与发射波频率之差，式（4-50）确定为

$$F_D = 2F \frac{V}{C} \quad (4-50)$$

式中： F_D 为声学多普勒频移； F 为发射波频率； V 为颗粒物沿声束方向的移动速度（即沿声束方向的水流速度）； C 为声波在水中的传播速度。

式（4-50）中的系数 2 是因为 ADCP 既发射声波又接收回波，因此多普勒频移加倍（Gordon, 1996）。

ADCP 每个声束轴线即一个声束坐标。每个换能器测验的流速是水流沿其声束坐

标方向的流速分量。任意 3 个声束轴线组成一组相互独立的空间声束坐标系。另外, ADCP 又自身定义直角坐标系(局部坐标系): $x-y-z$ 。 z 方向与 ADCP 轴线方向一致。 ADCP 首先测出沿每一声束坐标的流速分量, 然后利用声束坐标与 $x-y-z$ 坐标之间的变换关系(取决于声束角)将声束坐标系下的流速分量转换为 $x-y-z$ 坐标系下的流速分量, 再利用罗盘和倾斜计提供的方向和倾斜数据将 $x-y-z$ 坐标系下的流速分量转换为地球坐标系下的流速分量。

如前所述, 假定水体中颗粒物的运动速度与水体流速相同, ADCP 通过跟踪颗粒物的运动(称为水跟踪)所测验的速度是水流相对于 ADCP(也即 ADCP 安装平台)的速度。当 ADCP 安装在固定平台上, 水跟踪测验的流速即水流的绝对速度。当 ADCP 安装在船上(移动平台), 在水跟踪测验的相对速度中扣除船速(平台的移动速度)后即得到水流的绝对速度。

有两种方法可以测验船速。第一种方法称为底跟踪, 底跟踪是指 ADCP 通过接收和处理由河底或海底的回波信号跟踪河底或海底的运动。如果河底或海底没有移动的推移质, 底跟踪所测验的速度即船速。第二种方法是利用 GPS 测验船速, 由航迹上任意两点的 GPS 坐标值可以得到两点间的位移, 再除以相对应的时间步长即得到船速。

与机械式或电磁式流速仪不同, ADCP 是一种遥测仪器。即 ADCP 流速测验点不在 ADCP 所处的位置。而且, ADCP 通过分时接收回波信号将水体划分为许多测验单元。因此, ADCP 可以测验距其一定范围内许多点的流速。也就是说, 一台 ADCP 可以替代许多机械式或电磁式流速仪。

第一台商品 ADCP 诞生于 20 世纪 70 年代中期, 它是由声学多普勒计程仪演变而来的, 因此是船载式 ADCP (Gordon, 1996)。1982 年, 美国 RDI 公司开发出它的第一代 ADCP——窄带 ADCP; 1991 年, RDI 公司第二代 ADCP——宽带 ADCP 问世; 1995 年, RDI 公司开始生产第三代 ADCP——“骏马”系列 ADCP。第一代和第二代 ADCP 尺寸和重量都很大, 价格昂贵。第三代 ADCP 尺寸和重量都大大减小, 价格也大大降低。它的诞生标志着 ADCP 技术已经成熟并进入普及应用的阶段。

1982 年, 美国地质调查局(简称 USGS)在密西西比河试用 ADCP 测验流量(Christensen 和 Herrick, 1982), 证明了 ADCP 流量测验的可行性。之后, 美国地质调查局与 RDI 公司合作, 使 ADCP 流量测验方法不断完善。RDI 公司第一代、第二代、第三代 ADCP 都是专门用于河流流量测验的河流型 ADCP。图 4-33 显示了“骏马”系列瑞江牌河流型 ADCP。图 4-34 为安装在测船上的 ADCP, 整个测验系统包括 ADCP、电脑、数据采集软件 3 个主要部分, 软件功能包括实时数据采集、显示以及流量计算。图 4-35 为 RDI 公司河流型 ADCP 系统软件(WinRiver)屏幕显示, 图下部分窗口显示的是测船航迹和流速矢量, 图上部分窗口显示的是沿测船航迹河流断面流速分布及水深。

4.7.3 ADCP 流量测验原理

1. 概述

从理论上讲, ADCP 流量测验原理与传统流速仪法(人工船测、桥测、缆道测量和涉水测量)相同。 ADCP 方法和传统流速仪法都将测流断面分成若干个子断面, 在每个子断面内测验垂线上一点或多点流速并测验水深, 从而得到子断面内的平均流速



图 4-33 “骏马”系列瑞江牌 ADCP



图 4-34 安装在测船上的 ADCP

和流量，再将各个子断面的流量叠加得到整个断面的流量。然而，与传统流速仪法相比，ADCP 方法有如下不同。

(1) 传统流速仪法是静态方法，流速仪是固定的；ADCP 方法是动态方法，ADCP 在随测验船运动过程中进行测验。

(2) 由于采样费时，应用传统流速仪法时通常不会将子断面划分得很细，垂线流速测验点也不可能很多。而应用 ADCP 时，由于 ADCP 采样速度很高，可以将子断面划分得很细（所以在以下的叙述中称子断面为微断面），垂线流速测验点（即测验单元）也可以很多。

(3) 传统流速仪法要求测流断面垂直于平均流向。ADCP 方法不必这样，测船航

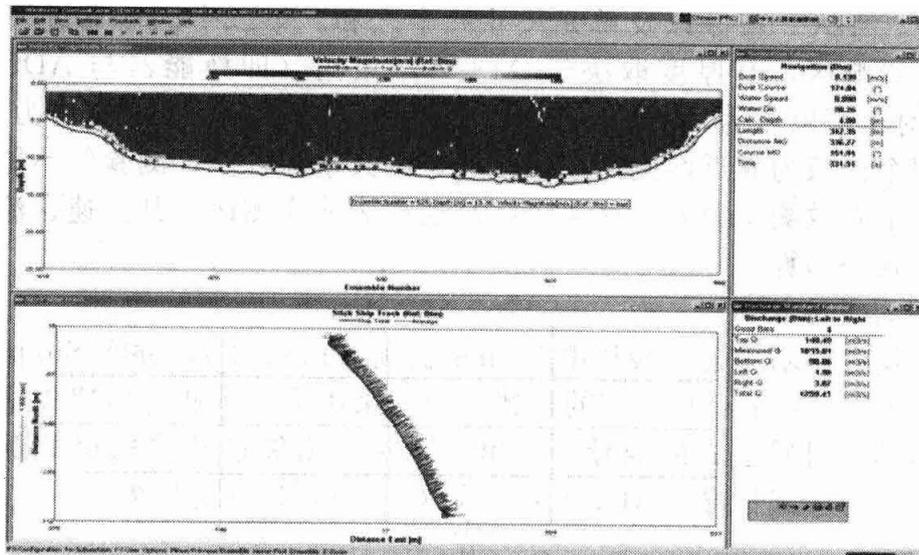


图 4-35 ADCP 系统软件屏幕显示 (WinRiver)

行的轨迹可以是斜线或曲线。

为了计算流量，ADCP 在走航中测验如下数据。

- (1) 相对流速 (由水跟踪测出)。
- (2) 船速 (由底跟踪测出, 或由 GPS 测验数据算出)。
- (3) 水深 (由底跟踪测出)。
- (4) 测船航行轨迹 (由船速数据得出, 或由 GPS 测出)。

必须指出, 在进行断面流量测验过程中, 测船航行实际测验的区域为断面的中层区域 (图 4-36)。这个区域称为 ADCP 实测区。而在四个边缘区域内 ADCP 不能提供测验数据或有效测验数据。第一个区域靠近水面 (表层), 其厚度大约为 ADCP 换

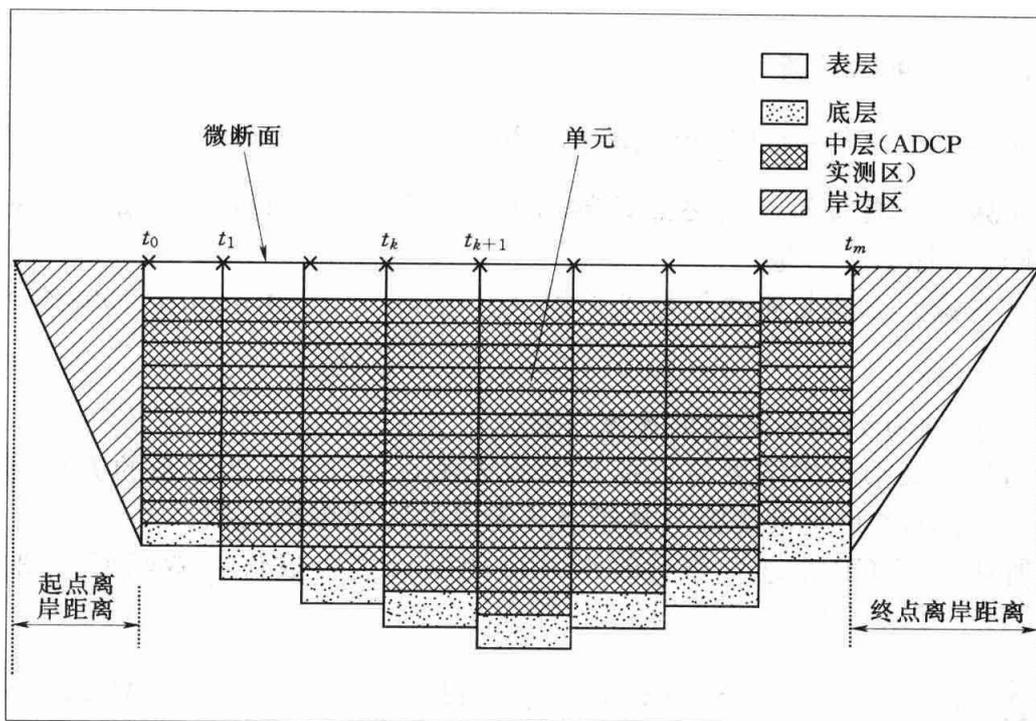


图 4-36 ADCP 实测区、非实测区、微断面及单元示意

能器入水深度、ADCP 盲区以及单元尺寸一半之和。第二个区域靠近河底（底层），称为“旁瓣”影响区，其厚度取决于 ADCP 声束角（即换能器与 ADCP 轴线的夹角）。例如，对于声束角为 20° 的 ADCP，“旁瓣”影响区的厚度大约为水深的 6%。第三个和第四个区域为靠近两侧河岸的区域，因其水深较浅，测验船不能靠近垂线且垂线上少于两个有效测验单元。这 4 个区域通称为非实测区。其流速、流量需要通过实测区数据外延来估算。

2. 流量计算基本公式

ADCP 流量计算基本公式最早由 Deines 提出（1982 年），并在 Simpson and Oltmann 报告（1993 年）中有较详细的描述。他们采用单元流速与船速矢量叉乘积（称为 f 值）进行流量计算公式的推导。这里，同时采用矢量叉乘积和微断面的深度平均流速矢量来进行公式推导。ADCP 给予式（4-51）计算流量为

$$Q = \iint_S \bar{u} \bar{\epsilon} dS \quad (4-51)$$

式中： Q 为流量； S 为沿测船航迹断面面积（对应于测验起点与终点之间的过水断面，不包括岸边非实测区的面积）； \bar{u} 为测船航迹断面某微元处流速矢量； $\bar{\epsilon}$ 为测船航迹断面上微元面积； dS 由式（4-52）确定。

$$dS = |\vec{V}_b| dz dt \quad (4-52)$$

式中： dz 为垂向微元长度； dt 为时间微元； \vec{V}_b 为测船速度矢量； $|\vec{V}_b|$ 为测船速度幅值（即沿航迹船速）。

$|\vec{V}_b|$ 由式（4-53）确定为

$$|\vec{V}_b| = \sqrt{V_{bx}^2 + V_{by}^2} \quad (4-53)$$

式中： V_{bx} ， V_{by} 分别为 x 和 y 方向的测船速度分量， (x, y) 为水平面上的总体坐标系。

式（4-51）可以重新写为

$$Q = \int_0^T \left[\int_0^H \bar{u} dz \right] \bar{\epsilon} |\vec{V}_b| dt = \int_0^T \int_0^H (\bar{u} \vec{V}_b) \bar{k} dz dt \quad (4-54)$$

式中： T 为测船从测验起点至终点的航行时间（见图 4-35， $T = t_m - t_0$ ）； H 为水深； \bar{k} 为垂向坐标单位矢量。

定义 f 为微元流速与船速矢量叉乘积（Simpson and Oltmann, 1993 年）。

$$f = (\bar{u} \vec{V}_b) \bar{k} = u_x V_{bx} - u_y V_{by} \quad (4-55)$$

式中： x ， y 分别为 x 和 y 方向的速度分量。

注意到矢量叉乘积的结果与坐标系方向无关，即 $x-y$ 坐标系的方向可以任意。式（4-55）是 ADCP 流量测验与测船船迹无关的数学理论依据。

如前所述，ADCP 在进行测验时沿航迹的断面划分成许多微断面（图 4-36），则式（4-54）可以写为

$$Q = \sum_{i=1}^m \left[\int_0^{H_i} f_i dz \right] \Delta t = \sum_{i=1}^m [(\vec{V} \vec{V}_b) \cdot \bar{k}]_i H_i \Delta t = \sum_{i=1}^m [V_x V_{by} - V_y V_{bx}]_i H_i \Delta t \quad (4-56)$$

式中： m 为微断面总数； H_i 为微断面处水深； Δt 为呼集合（对应于微断面测验采样）时间平均步长； \bar{V} 为微断面深度平均流速矢量，由式（4-57）计算：

$$\bar{V} = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{u} dz \quad (4-57)$$

H 由下式确定：

$$H = D_{\text{ADCP}} + d_{\text{实测}} \quad (4-58)$$

式中： D_{ADCP} 为 ADCP 的入水深度，m； $d_{\text{实测}}$ 为 ADCP 的实测水深，m。

式（4-56）中下标 i 表示与微断面 i 有关的参数。以下的公式推导及参数都是针对微断面 i 的。为了简洁起见，省略下标 i 。

ADCP 在进行测验时，不但将沿航迹断面划分为许多微断面，同时也将每一微断面划分为许多小单元（即深度单元）。在某一微断面内（即垂线上），ADCP 测验有效单元的数目 n 由式（4-59）确定为

$$n = (d_{\text{实测}} \lambda - \text{盲区} - \Delta) / D_c \quad (4-59)$$

式中： D_c 为单元长度，m。

参数 λ 取决于“旁瓣”影响区的厚度。如果“旁瓣”影响区厚度大约为水深的 6%， $\lambda = 0.94$ 。参数 Δ 取决于 ADCP 类型，对于窄带型 ADCP， $\Delta = 0$ ；对于宽带型 ADCP， Δ 由式（4-60）确定为

$$\Delta = \frac{1}{2} (D_p + D_0 - D_c) \quad (4-60)$$

式中： D_p 为脉冲长度； D_0 为脉冲延迟长度。

如图 4-37 所示，设 D_f 为微断面内第一个（有效）单元（靠近换能器）的深度，则

$$D_f = D_{\text{ADCP}} + \text{盲区} + D_c + \Delta \quad (4-61)$$

设 D_l 为微断面内最后一个有效单元（靠近河底且未受“旁瓣”影响的单元）的深度，则

$$D_l = D_f + nD_c \quad (4-62)$$

设 Z_1 为河底至最后一个有效单元下边界的高度， Z_2 为河底至第一个（有效）单元上边界的高度，则

$$Z_1 = H - D_l - \frac{1}{2} D_c \quad (4-63)$$

$$Z_2 = H - D_f + \frac{1}{2} D_c \quad (4-64)$$

则微断面深度平均流速的 x 方向分量由式（4-65）算出（ y 方向分量类似）。

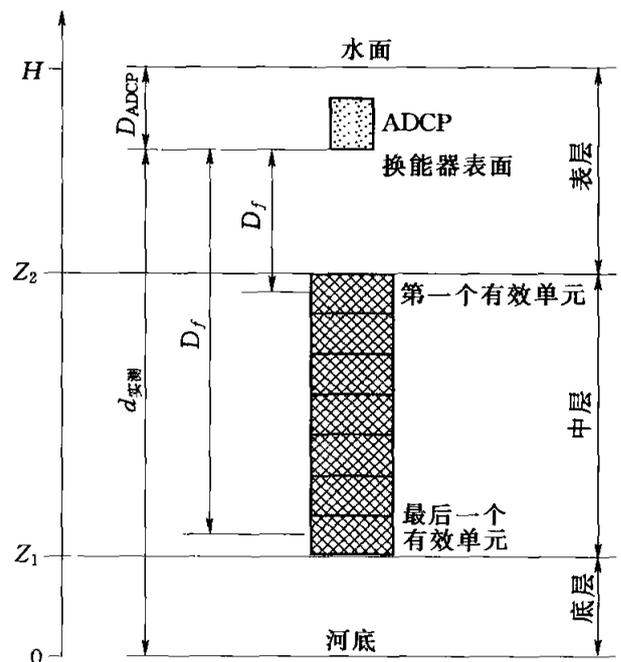


图 4-37 ADCP 流量计算有关参数定义示意

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{1}{H} \int_0^H u_x dz = \frac{1}{H} \left[\int_0^{Z_1} u_x dz + \int_{Z_1}^{Z_2} u_x dz + \int_{Z_2}^H u_x dz \right] \\ &= \frac{1}{H} [Z_1 V_{xB} + (Z_2 - Z_1) V_{xM} + (H - Z_2) V_{xT}] \end{aligned} \quad (4-65)$$

式中： V_{xT} 为表层平均流速 x 方向分量； V_{xM} 为中层平均流速 x 方向分量； V_{xB} 为底层平均流速 x 方向分量。

3. 中层平均流速和流量

每一微断面内中层平均流速由 ADCP 直接测出，其值为所有有效单元实测流速之平均。 x 方向分量由式 (4-66) 算出 (y 方向分量类似)。

$$V_{xM} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (4-66)$$

式中： u_{xj} 为单元 j 实测 x 方向流速分量。

则对应于 ADCP 走航测验起点和终点之间断面的中层流量由式 (4-67) 给出。

$$Q_M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_j D_c \Delta t = \sum_{i=1}^m [(V_{xM} V_{by} - V_{yM} V_{bx})]_i (Z_2 - Z_1)_i \Delta t \quad (4-67)$$

4. 表层和底层平均流速及流量

通常借助于幂函数流速剖面的假定来推算表层或底层平均流速及流量。根据 Chen (1991)，明渠均匀流速沿垂线分布可以由如下的幂函数公式来表示。

$$\frac{u}{u^*} = 9.5 \left(\frac{z}{z_0} \right)^b \quad (4-68)$$

式中： u 为离河底高度 z 处的流速； u^* 为河底摩阻流速； z_0 为河底粗糙高度； b 为经验常数（通常取 $b = \frac{1}{6}$ ）。

Simpson 和 Oltmann (1993) 假定矢量叉乘积 (f 值) 也遵循幂函数分布。

$$f = a'' z^b \quad (4-69)$$

式中： a'' 为经验常数。

式 (4-69) 可以写为

$$u_x V_{by} - u_y V_{bx} = a'' z^b \quad (4-70)$$

因为船速假定为常数，由式 (4-70)，流速分量 u_x 和 u_y 也必须遵循幂函数分布。则 x 方向流速分量沿垂线分布为 (y 方向流速分量类似)

$$u_x = a_x z^b \quad (4-71)$$

式中： a_x 为经验常数。

对式 (4-71) 从 Z_1 至 Z_2 进行积分并与微断面中层实测流速相等：

$$\int_{Z_1}^{Z_2} u_x dz = \int_{Z_1}^{Z_2} a_x z^b dz = a_x \frac{(Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1})}{b+1} = \frac{Z_2 - Z_1}{n} \sum_{j=1}^n u_{xj} = D_c \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (4-72)$$

整理后为

$$a_x = \frac{D_c (b+1)}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (4-73)$$

类似地，也可以得到另一经验常数 a_y 。则 a'' 可由式 (4-74) 得到。

$$a'' = a_x V_{by} - a_y V_{bx} = \frac{D_c(b+1)}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \sum_{j=1}^n f_j \quad (4-74)$$

则微断面内表层平均流速 x 方向分量可由式 (4-75) 算出。

$$V_{xT} = \frac{D_c(H^{b+1} - Z_2^{b+1})}{(H - Z_2)(Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (4-75)$$

类似地，微断面内底层平均流速 x 方向分量的计算公式为

$$V_{xB} = \frac{D_c Z_1^{b+1}}{Z_1(Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (4-76)$$

则对应于 ADCP 走航测验起点和终点之间断面的表层流量由式 (4-77) 算出。

$$\begin{aligned} Q_T &= \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta t D_c (H^{b+1} - Z_2^{b+1})}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \sum_{j=1}^n f_j \right]_i \\ &= \sum_{i=1}^m [(V_{xT} V_{by} - V_{yT} V_{bx})]_i (H - Z_2)_i \Delta t \end{aligned} \quad (4-77)$$

类似地，底层流量由式 (4-78) 算出。

$$Q_B = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta t D_c Z_1^{b+1}}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \sum_{j=1}^n f_j \right]_i = \sum_{i=1}^m [(V_{xB} V_{by} - V_{yB} V_{bx})]_i (Z_1)_i \Delta t \quad (4-78)$$

另外，微断面深度平均流速 x 方向分量为 (y 方向分量类似)

$$V_x = \left[\frac{Z_1^{b+1}}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} + 1 + \frac{H^{b+1} - Z_1^{b+1}}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \right] \frac{D_c}{H} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (4-79)$$

5. 岸边流量估算

对于岸边非实测区域，可以利用经验方法估算流速和流量。这与应用流速仪法是相同的。岸边区域平均流速的计算公式为

$$V_a = \alpha V_m \quad (4-80)$$

式中： V_a 为岸边区域平均流速； V_m 为起点微断面（或终点微断面）平均流速； α 为岸边流速系数。

岸边流量由式 (4-81) 估算为

$$Q_{ab} = \alpha A_a V_m \quad (4-81)$$

式中： Q_{ab} 为岸边流量； A_a 为岸边区域面积。

岸边流速系数的选择可以借用流速仪法的规定（GB 50179—93《河流流量测验规范》，1993）。美国地质调查局对于三角形岸边区域（即水深均匀地变浅至零的斜坡岸边）采用的岸边流速系数为 0.707（Simpson 和 Oltmann, 1993），矩形岸边区域（即陡岸）的岸边流速系数通常为 0.91。

4.7.4 ADCP 流量测验基本规则

为了保证测验精度或数据质量，ADCP 流量测验必须遵循一些基本规则。本节主要根据美国地质调查局（USGS）的规范（Lipscomb, 1995；USGS, 2001、2001b）简要介绍这些基本规则。

1. 安装

ADCP 通常安装在船舷一侧的支架上。安装支架应具有一定的灵活度，容易升降

或翘离水面。支架要有足够的刚性，在水流冲击下不会发生振动或弯曲。安装支架位置应尽可能远离磁性物体（比如发动机），以避免外界磁场对 ADCP 内置罗盘的影响。

ADCP 换能器应没入水中至少 8cm。如果水面有波浪，换能器要没入水中更深一些，以保证在整个测试过程中换能器不会露出水面或发生空蚀。

2. 参数设定

在每次测验前，用户需要根据现场条件和 ADCP 性能对 ADCP 进行参数设定。主要设定的基本参数如下。

(1) 深度单元尺寸。

(2) 深度单元数目。

(3) 每个呼集中（对应于微断面测验采样）水跟踪和底跟踪呼采样数目或呼集合时间平均步长。

(4) 盲区。

(5) 换能器深度（即 ADCP 入水深度）。

(6) 盐度（用来修正声速）。

深度单元数目可由式（4-82）确定：

$$\text{深度单元数目} = \frac{\text{最大水深}}{\text{单元尺寸}} + \text{两个单元} \quad (4-82)$$

如果深度单元数目与单元尺寸的乘积（即设定的剖面深度）超过最大水深过多，会增加无用数据。另外，深度单元数目过多会降低 ADCP 呼（ping，即一次采样过程）速率。

厂家通常在技术指标中规定 ADCP 的最小盲区。用户设定的盲区应不小于厂家规定的最小盲区，否则第一个深度单元的流速可能会有误差。

3. 测验

在施测前通常需确定测验起点和终点位置。其确定准则是起点和终点处的水深应保证垂线上至少有两个有效单元。起点和终点应做明显标记，以保证每次断面流量测验的起点或终点是相同的。应采用电子测距仪器、测绳或者其他能够精确测验距离的仪器测验起点和终点的离岸距离。

在正式测验前应进行一次“动底”（即河底推移质）检测。做法是将测船保持在某一固定位置上至少 10min，用底跟踪测验船速和位移。如果没有“动底”，由底跟踪测出的船速应为零，测船的位移近于零。如果有“动底”，由底跟踪测出的船速不为零，具有一向上游的伪船速。

为了保证流量测验精度，测验中测船平均速度应不大于平均流速。这是美国地质调查局的规定。但是许多用户的经验表明，这个规定过于严格，在很多情况下难以实行。并且，流量测验精度不仅仅与船速和流速的比值有关。河流断面面积是影响 ADCP 流量测验的重要参数之一。经验表明，对于较大的河流（即断面面积较大的河流），即使船速超过流速也能得到精确的流量数据。

为了减小流量测验的不确定性，对于流量在短时间内变化不大的河流，至少进行 4 次断面流量测验，来回各 2 次。取 4 次测验的平均值作为实测流量值。如果 4 次测

验值中任一个与平均值之差大于 5%，首先应分析造成该次测验误差大的原因。如果可以找到原因，该次测验结果可以去掉，再补测 1 次；如果找不到原因，应再进行另外 4 次测验。然后取 8 次测验结果的平均值。

对于流量在短时间内变化较大的河流，如感潮河段，只能采用 1 次测验的流量值。

4.7.5 讨论

1. 深度单元尺寸的选择

深度单元尺寸将影响流速测验垂向分辨率、测验精度、剖面深度及实测区范围。单元尺寸越小，流速测验垂向分辨率越高（即垂线上数据点多），而单元流速测验精度越低；并且，采用小尺寸单元会使剖面深度降低。因此，当水较深时，应采用较大的单元。然而，当水较浅时，应尽量采用较小的单元，以增大实测区范围。垂向第一个数据点的位置与单元尺寸呈线性关系。单元尺寸越大，表层非实测区的厚度越大。另外，在底层非实测区（“旁瓣”区），至少要去掉一个单元。单元尺寸越大，底层非实测区的厚度越大。

2. 单呼数据输出与多呼平均数据输出

所谓单呼数据输出是指对于 ADCP 的每一个呼，就有一套测验数据（包括流速剖面、水深、船速、微断面流量等）输出。而多呼平均数据输出是 ADCP 内部将多次呼采样的流速剖面、船速、水深等数据进行平均，得到呼套平均后的数据（即呼集合数据）后输出。

采用单呼数据输出的好处是所有的单呼测验数据都得到保留。用户在数据后处理时如果发现个别单呼数据有问题，可以剔除。但是，与多呼平均数据输出相比，单呼数据输出有以下两个缺点。

(1) 单呼数据输出降低了 ADCP 单位时间内呼采样个数，即呼采样速率降低，从而流速和流量测验精度降低。这是因为单呼数据输出时一个呼消耗的时间远大于多呼平均数据输出时每个呼平均消耗的时间。

(2) 在高含沙水流条件下，底跟踪可能不稳定。这时单呼数据输入可能造成流速数据丢失。因为当采用单呼数据输入时，ADCP 需要利用每次呼采样测得的底跟踪速度和相对流速来计算绝对流速。而这时底跟踪呼失效的概率远大于水跟踪。如果底跟踪失效，尽管水跟踪呼测出的相对流速仍然有效，绝对流速还是不能得到。而当采用多呼采样平均数据输出时，底跟踪速度是多次底跟踪呼采样的平均值，只要有一次底跟踪呼有效，即可得到绝对流速数据。

3. “动底”（河底推移质运动）

河底泥沙在高流速时会随水流迁移形成推移质运动，俗称“动底”。当出现“动底”时，ADCP 所测流速将小于实际流速；ADCP 所测流量将小于实际流量。为了消除或减少“动底”的影响，可采取如下措施。

(1) 选用频率较低的 ADCP。低频系统声波穿透能力强较，有可能穿透推移质层。

(2) 减小底跟踪脉冲长度（Simpson, 2001）。如果以上措施无效，只好采用差分 GPS 代替底跟踪来测验船速。为了保证船速测验精度，差分 GPS 的精度至少应在

亚米级，或采用 RTK 技术。另外，应使 GPS 天线尽可能位于 ADCP 上方且与 ADCP 越接近越好，以保证 ADCP 位置与 GPS 实测坐标重合。

当采用差分 GPS 时，ADCP 必须利用罗盘数据将 ADCP 坐标系下的流速分量转化成为 GPS 坐标系（即地球坐标系）下的流速分量，这时对罗盘精度要求很高，任何微小的罗盘数据偏差会造成较大的流速即流量测验误差。因此，ADCP 内部罗盘需要精确标定，当地磁偏角也需要精确测定。通常 ADCP 内部罗盘为磁罗盘，其测验精度受环境磁场影响较大。因此，当外接差分 GPS 时，最好采用木船测验。如果测船为铁壳船，最好采用外接电罗盘，其精度高且不受铁壳船体磁场的影响。

4. 高含沙量

高含沙量的水体对声波能量的反射和吸收都增强。在离换能器较近的区域，回波强度增大。但在离换能器较远的区域，由于能量被水体吸收使回波强度衰减很快至仪器本底噪音，从而使 ADCP 剖面深度（或范围）减小。ADCP 技术指标中规定的最大剖面深度（或范围）是理想条件下的指标。所谓理想条件是指水体中含有一定悬浮物但含沙量较低的情况。需要指出的是，在高含沙水流中，相对流速测验仍然有效，测验精度也不受影响。

高含沙量的另一重要影响是可能使底跟踪和水跟踪测验失败。ADCP 是根据回波强度沿深度变化曲线在河底处突起的峰值来识别河底。由于河底沉积物介质密度较高，当水体中含沙量较低时，通常河底处的回波强度会大大高于水体中颗粒的回波强度。然而当水体中含沙量高到一定程度时，水体中颗粒的回波强度会增大到与河底处的回波强度相接近。这时，回波强度沿深度变化曲线在河底处不出现突起的峰值，ADCP 不能从该曲线上识别河底。

高含沙量的影响程度与 ADCP 的系统频率有很大的关系。系统频率越高，声波穿透能力越差，对含沙量越不敏感。系统频率越低，声波穿透能力越强，对含沙量越敏感。例如，在美国密西西比河的试验表明（Gordon, 1992）：在试验期间，1200kHz ADCP 和 300kHz ADCP 对河底的回波强度基本相同；但 300kHz ADCP 对高含沙量的回波强度比 1200kHz ADCP 低 12~20dB。试验期间，300kHz ADCP 能够正常进行底跟踪，而 1200kHz ADCP 则不能。因此，对于含沙量高的河流，应选用频率较低的 ADCP。可是通常低频系统分辨率较低（即深度单元尺寸较大），不适合较浅的河流。这时宽带 ADCP 比窄带 ADCP 有较大的优越性，因为宽带 ADCP 的分辨率比相同频率的窄带 ADCP 要高。

另外，ADCP 生产厂家通常无法提供底跟踪和水跟踪测验有效范围与含沙量之间关系的资料。根据一些用户的经验，当含沙量为 $3\sim 5\text{kg}/\text{m}^3$ 时，ADCP 能够正常进行测验的最大水深（剖面深度或范围）为厂家标称技术指标的 $1/3\sim 1/2$ 。

如果含沙量太高以至于 ADCP 不能正常进行底跟踪和水跟踪测验，只有采用差分 GPS 测验船速，采用测深仪测验水深。ADCP 操作软件通常也可以采集和处理 GPS 和测深仪数据。

5. 流量测验精度

ADCP 流量测验精度取决于许多因素。

- (1) ADCP 流速测验误差 (由噪声引起的随机误差以及仪器系统误差)。
- (2) ADCP 水深测验误差。
- (3) 测船速度测验误差 (底跟踪误差或 DGPS 误差)。
- (4) ADCP 测验起点和终点至岸边距离测验误差。
- (5) 船速与流速的比值过大引起的误差。
- (6) 非实测区 (表层、底层、岸边区) 流量推算误差。
- (7) 河流断面面积测验误差。
- (8) 水流环境包括脉动或紊流、水面波浪、剪切流、河底推移质、极慢流速等引起的误差。
- (9) 人为因素引起的误差。

在全球各地许多应用宽带 ADCP 的测验结果表明, 如果严格按照测验规则并排除人为因素, 宽带 ADCP 流量测验的重复性精度一般为 0.5%~2%、比测精度 (与传统流速仪方法比测) 一般为 2%~5%。所谓重复性精度是指对流量稳定的河流实施多次测验, 其中任一次测验值与平均值之比的百分数。关于 ADCP 流量测验精度的详细讨论请参见 Simpson (2001)。

复 习 题

- 4-1 测深垂线布设的原则是什么?
- 4-2 确定起点距的方法有哪几种? 根据实践中体会, 这些方法各有哪些优缺点?
- 4-3 一般怎样合理布置基线? 为什么?
- 4-4 为什么要进行偏角改正? 如何进行偏角改正?
- 4-5 测得水深、实际水深和有效水深的含义, 它们互相之间有何联系?
- 4-6 为什么要施测大断面? 施测大断面应注意什么问题? 如何进行大断面计算?
- 4-7 对一测站, 确定测流次数的原则是什么? 如何布置测次?
- 4-8 流量、单宽流量、单深流量的含义, 它们有何联系? 什么叫流量模?
- 4-9 什么叫流速脉动现象? 天然河道中脉动现象的一般规律是什么? 测速时采取什么措施能减少流速的脉动影响?
- 4-10 测速历时如何确定? δ_v-h-t 关系曲线是如何制作的?
- 4-11 常用的垂线流速分布曲线有几种? 公式中各符号的含义是什么?
- 4-12 流速仪法测流的基本原理是什么? 如何合理布设测速垂线?
- 4-13 流速仪法测流的流量如何计算 (分析法)? 与图解法比较, 你认为有何优缺点?
- 4-14 部分流量计算公式有几种? 它们之间有何差别?
- 4-15 什么叫相应水位? 为什么要计算相应水位? 如何计算?
- 4-16 水面浮标法测流的流量怎样计算? 与流速仪分析法的计算有何异同?
- 4-17 在洪水涨落急剧、洪峰历时短暂的情况下, 采用何种浮标法测流?

- 4 - 18 比降面积法的基本原理是什么？适用在什么情况下？
- 4 - 19 溶液法测流的基本原理是什么？
- 4 - 20 除了本章介绍的测流方法以外，大胆设想一下还有什么测流的方法？
- 4 - 21 如何进行单次流量测验成果的检查和分析？

第 5 章

泥 沙 测 验

5.1 概 述

5.1.1 泥沙测验的意义

1. 河流泥沙的现状

世界著名河流泥沙的数据见表 5-1。

表 5-1 世界著名河流泥沙的数据

序号	河流名称	流域面积 ($\times 10^6 \text{ km}^2$)	流量 (m^3/s)	输沙量		
				$\times 10^6 \text{ t/a}$	mm/a	ppm
1	Congo	3.7	44000	70	0.015	50
2	Nile	2.9	3000	80	0.015	630
3	Wolga	1.5	8400	25	0.010	100
4	Niger	1.1	5700	40	0.025	220
5	Meking	0.8	1500	80	0.070	170
6	Gauges	1.0	1400	1500	1.000	3600
7	Rhine	0.36	2200	0.72	0.001	10
8	Huanghe	0.752	4000	1900	1.750	15000

注 $\text{ppm} = \frac{\text{干沙重} (\times \mu\text{kg})}{\text{水沙混合样重} (\text{kg})}$

2. 河流泥沙的危害

(1) 泥沙在河渠、湖泊、水库和取水口淤积，常给防洪、发电、灌溉、航运和供水等造成困难。

(2) 泥沙淤积及泥沙对水工建筑物和水力机械的磨损对有关工程的建设 and 运用影响很大，不仅会增加工程造价和维护费用，而且会降低工程效益，缩短工程寿命。

(3) 水土流失对生态环境的影响也很大，举例如下。

1) 自来水中充满泥沙。

- 2) 黄河、长江护岸工程修建原因。
- 3) 洞庭湖、鄱阳湖的淤积速度。
- 4) 黄河有一段天上河。
- 5) 三门峡水库的教训。
- 6) 江苏仪征自来水厂取水口、南京热电厂卸灰码头淤死的例子。

3. 研究河流泥沙的意义

- (1) 水库、湖泊的淤积问题，估算其寿命。
- (2) 河道变迁、河床整治。
- (3) 为水土保持提供依据。
- (4) 黄万里教授（黄炎培的儿子）1978年提出的治黄建议。

(5) 泥沙测验，系统地收集泥沙数据，探明河流泥沙的来源、数量、特性和运动变化的规律，对于流域治理、河流开发和有关工程的规划设计与运行管理等，提供依据。

5.1.2 河流泥沙特性

1. 泥沙分类

河流向下游输移的各种泥沙总称全沙。

(1) 按泥沙输移的方式，全沙的分类。

- 1) 悬移质。悬浮于水中，以与水流基本相同的速度运动的细颗粒泥沙。
- 2) 推移质。在河床上以滚动、滑动或跳跃的方式运动的粗颗粒泥沙。

此外，组成河床表面活动层的泥沙称为床沙。

(2) 按河流泥沙的来源，全沙的分类。

1) 冲泻质。悬移质中不参与造床作用的那部分细颗粒泥沙，来源于径流对流域表面的侵蚀。

2) 床沙质。全沙中参与造床作用的那部分较粗颗粒泥沙，主要是由床沙补给的。

应当指出，由于泥沙运动同时受水力因素和泥沙特性的影响，各类泥沙之间并无严格的界限。随着水力条件的变化，悬移质、推移质、床沙三者之间都会发生相互交换。各类泥沙的划分是由当时的运动状态决定的。

2. 泥沙的脉动现象

与流速的脉动相似，但强度比流速的脉动大。

[思考题 5-1] 为什么泥沙的脉动强度比流速的脉动大？

3. 悬移质泥沙的断面分布

悬移质泥沙的垂线分布、横向分布与流速的垂线分布、横向分布均有不同（比较两者的分布图即可看出其中的明显区别）。然而悬移质泥沙的垂线平均沿河道横断面分布 $C_s(B)$ 与流速的垂线平均沿河道横断面分布 $V_m(B)$ 相似，仅有一关键点不同。

[思考题 5-2] 悬移质泥沙的垂线平均沿河道横断面分布 $C_s(B)$ 与流速的垂线平均沿河道横断面分布 $V_m(B)$ 有哪一个关键点？为什么？

5.1.3 泥沙测验术语

- (1) 全沙输沙量 S (kg, t)。

$$S = W_s + W_b = (Q_s + Q_b)t \quad (5-1)$$

式中： W_s 为某一时段内通过测验断面的悬移质输沙干沙重量，kg，t； W_b 为某一时段内通过测验断面的推移质输沙干沙重量，kg，t。

(2) 悬移质含沙量 C_s (g/m^3 , kg/m^3)。单位体积浑水中所含悬移质干沙的重量，即

$$C_s = \frac{W_s}{V} \quad (5-2)$$

(3) 输沙率 Q_s 、 Q_b (kg/s)。单位时间内通过河流某一横断面的悬移质或推移质的重量，分别称为悬移质输沙率 Q_s 和推移质输沙率 Q_b ，二者之和即为全沙输沙率。

(4) 断沙 \bar{C}_s (kg/m^3)。悬移质断面平均含沙量。

(5) 单样含沙量 (单沙) C_{su} (kg/m^3)。断面上有代表性的垂线或测点的悬移质含沙量。

(6) 侵蚀模数 M_s [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] 流域内单位面积上每年的输沙总量。

$$M_s = \frac{S}{A} \quad (5-3)$$

5.2 悬移质输沙率的测验

5.2.1 概述

1. 目的

断面输沙率测验的目的主要是为了建立单沙与断沙的关系或悬移质输沙率与流量等水文要素的关系，以便由单沙和流量资料推求悬移质输沙率变化过程。

$$Q_s \rightarrow S$$

2. 原理

$$Q_s = \int_0^B \int_0^h C_{s_i} v_i dh db = \int_0^B q_{su} db = \int_0^B C_{sm} q_u db \quad (5-4)$$

式中： B 、 h 分别为水面宽和水深； v_i 、 C_{s_i} 分别为测点的流速和含沙量； $C_{s_i} v_i$ 为测点输沙率或单位输沙率； q_u 、 q_{su} 分别为单宽流量和单宽输沙率； C_{sm} 为垂线平均含沙量。

3. 实用

$$Q_s = \sum_{i=1}^n \bar{C}_{sm_i} q_i = \sum_{i=1}^n q_{s_i} \quad (5-5)$$

式中： n 、 m_i 分别为垂线数目和垂线上测点数目； \bar{C}_{sm_i} 、 q_i 、 q_{s_i} 分别为相邻两条测沙垂线间的部分平均含沙量和部分流量、部分输沙率。

5.2.2 步骤

1. 布设测沙垂线

(1) 原则。能控制含沙量沿河宽的转折变化；满足输沙率测验精度要求。

1) $B \geq 50\text{m}$ ， $n \geq 5$ 条。

2) $B < 50\text{m}$, $n \geq 3$ 条。

数目比测速垂线少。

[思考题 5-3] 为什么数目比测速垂线少?

(2) 方法。

1) 控制单宽输沙率转折点布线法。

2) 等部分流量中心线布线法 ($n = \frac{Q}{q}$)。

$$\bar{C}_s = \frac{Q_s}{Q} = \frac{qC_{sm1} + qC_{sm2} + \dots + qC_{smn}}{nq} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{smi}}{n} \quad (5-6)$$

3) 等部分宽中心线布线法 ($n = \frac{B}{b}$)。

4) 等部分面积中心线布线法 ($n = \frac{B}{a}$)。

2. 垂线悬移质含沙量的测验方法

垂线平均含沙量的测定, 可根据含沙量的垂线分布特性、水沙情况、仪器设备、测验目的和精度要求, 选用下列方法。

(1) 积点法 (选点法)。在垂线上选定的测点测定含沙量和流速, 各点水样分别处理, 按流速加权平均法计算垂线平均含沙量。与测速相同, 积点法测沙分畅流期一点法、二点法、三点法、五点法及试验用七点法, 封冻期一点法、二点法和六点法。多点法精度较高, 并可测得含沙量和颗粒级配的断面分布情况, 也是检验其他取样方法的依据。设站初期宜采用多点法。

(2) 积深法。用积时式采样器以适当速度沿垂线匀速投放, 连续采集垂线水样 (一般同时测速)。这样取得的水样含沙量即垂线平均含沙量。积深法取样分单程积深和双程积深两种。此法的水样处理工作量小, 但不能测得含沙量和颗粒级配的垂线分布。积深法取样时, 仪器投放速度 R_T 可按 $R_T < (0.1 \sim 0.3)v_m$ (垂线平均流速) 且不致灌满水样舱的要求确定。这种方法主要适用于流速较小、悬沙颗粒较细的情况。

(3) 垂线混合法。在垂线上用选点法按一定比例采集各测点水样并混合为一个水样处理, 其含沙量即垂线平均含沙量。实用中有两种混合方法。

1) 取样历时定比混合法。适用于积时式采样器取样, 各测点的取样历时占垂线取样总历时的比例, 按标准的规定。

2) 取样容积定比混合法。适用于横式采样器取样。各测点按一定容积比例取样作垂线混合。如畅流期 3 点法 (0.2h、0.6h、0.8h) 按 2:1:1 取样混合。这类混合法常对粗沙部分造成较大系统误差。不同选点混合法的取样容积比例应经试验资料分析确定。

用垂线混合法取样时一般也需测速, 但测速点和测沙点可以不一致。

悬移质输沙率常测法的垂线取样方法、垂线数目及其布设位置, 均应根据多线多点法试验资料, 在满足一定精度的前提下, 通过精简分析加以确定。

(4) 全断面混合法。

1) 等流量等容积取样全断面混合法。这种方法主要适用于河床比较稳定和使用横式采样器的测站。测沙垂线按等流量中线法布设, 在每条垂线上取相等容积的水样(相差不超过 10%), 作全断面混合处理, 按式(5-6)计算断面平均含沙量。

2) 等宽等速积深取样全断面混合法。这种方法主要适用于水深较大的单式河槽和使用积时式采样器的测站。测沙垂线按等宽中线法布设, 在各条垂线上以同一管嘴和同一提放速度用积深法取样, 作全断面混合处理。根据流量加权原理可以证明, 混合水样的含沙量即断面平均含沙量。

3) 等面积等历时取样全断面混合法。这种方法主要适用于河床稳定、可以固定测沙垂线和使用积时式采样器的测站。测沙垂线按等面积中线法布设, 在每条垂线上用同一管嘴和同一选点法取样, 且各垂线取样历时相等。全断面混合水样的含沙量即断面平均含沙量。

4) 面积历时加权全断面混合法。这种方法主要适用于稳定河床、固定垂线和使用积时式采样器的测站。

根据测沙垂线数和固定的垂线位置, 将断面划分成若干部分, 按不同水位级算出各条垂线所代表的部分面积 A_i 占全断面面积 A 的权重系数 C_i , ($C_i = \frac{A_i}{A}$)。根据水样舱总容积 V 、管嘴截面积 a 和断面平均流速 \bar{v} , 确定全断面取样总历时 T , 并按 C_i 值分配各垂线取样历时 t_i 。

3. 相应单沙的测验

(1) 定义。与断面输沙率测验同时施测的对应单样含沙量。

(2) 目的。通过建立 $C_m - \bar{C}_s$ 的关系, 简化泥沙测验工作。

(3) 测站选择。凡拟用单断沙关系法和单断沙颗粒级配关系法整编悬沙资料的测站, 均应在施测断面输沙率或断面平均含沙量的同时施测相应单沙。

(4) 测验要求。

1) 相应单沙应具有足够的精度和代表性。其测验位置、施测方法和仪器应与日常单沙测验相同。

2) 取样次数视沙情、水情的变化而定。一般在断沙测验的开始和终了时各取一次; 水沙情况平稳时可只取一次; 测验历时较长或含沙量变化急剧时, 应大致等时距地取样几次, 并能控制沙峰的转折变化。

3) 取样容积应足够大, 以保证精度。

4. 悬移质水样的处理

采取水样后, 应在现场及时量取水样体积, 并送泥沙室静置沉淀足够时间。吸出表层清水后得浓缩水样, 然后用适当方法加以处理, 测出水样中的干沙重量。再除以水样体积, 即得水样含沙量。以下为常用的水样处理方法:

(1) 烘干法。将浓缩水样移入烘杯, 放入烘箱内烘干。根据沙量多少, 用适当感量的天平称出杯沙总重, 减去杯重即得干沙重。此法精度较高, 可用于低含沙量情况。

(2) 过滤烘干法。将浓缩水样用滤纸过滤后, 连同滤纸一起烘干。称出沙包总重量, 减去滤纸重量即得干沙重。这种方法产生误差的环节较多。适用于含沙量较大的

情况。

(3) 置换法。将浓缩水样装入比重瓶，并用澄清河水将残沙洗净，加满至一定刻度，测出瓶内水温，称出瓶加浑水重，按式(5-7)计算水样中的干沙重 W_s 。

$$W_s = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} (W_{us} - W_w) = K(W_{us} - W_w) \quad (5-7)$$

式中： W_{us} 为瓶加浑水重，g； W_w 为瓶加清水重，g，由水温在比重瓶检定曲线上查读； ρ_w 为水的密度，g/cm³，由水温查表得； ρ_s 为泥沙密度，g/cm³，采用本站试验值； K 为置换系数，可查表或计算求得。

置换法可省去过滤、烘干等工作，简便快速。主要适用于含沙量较大的情况。低含沙量时，所需水样较多。

5.2.3 实测悬移质输沙率的计算（积点法施测，分析法计算）

1. 计算垂线平均含沙量 C_{smi} （流速加权）

(1) 畅流期。

一点法

$$C_{sm} = C_1 C_{s0.6} \quad (5-8)$$

二点法

$$C_{sm} = \frac{q_{s0.2} + q_{s0.8}}{v_{0.2} + v_{0.8}} \quad (5-9)$$

三点法

$$C_{sm} = \frac{q_{s0.2} + q_{s0.6} + q_{s0.8}}{v_{0.2} + v_{0.6} + v_{0.8}} \quad (5-10)$$

五点法

$$C_{sm} = \frac{1}{10v_m} (q_{s0.0} + 3q_{s0.2} + 3q_{s0.6} + 2q_{s0.8} + q_{s0.8}) \quad (5-11)$$

(2) 封冻期。

一点法

$$C_{sm} = C_2 C_{s0.6} \quad (5-12)$$

二点法

$$C_{sm} = \frac{q_{s0.15} + q_{s0.85}}{v_{0.15} + v_{0.85}} \quad (5-13)$$

六点法

$$C_{sm} = \frac{1}{10v_m} (q_{s0.0} + 2q_{s0.2} + 2q_{s0.4} + 2q_{s0.6} + 2q_{s0.8} + q_{s0.8}) \quad (5-14)$$

式中： C_{sm} 为垂线平均含沙量； C_1 、 C_2 分别为一点法系数，由多点法资料确定； $C_{s0.6}$ 为0.6相对水深（或有效水深）处的测点含沙量，余类推； $q_{s0.8}$ 为0.8相对水深（或有效水深）处的测点（单位）输沙率， $q_{s0.8} = C_{s0.8} v_{0.8}$ ，余类推。

2. 计算断面输沙率 Q_s

$$Q_s = C_{sm1} q_0 + C_{smn} q_n + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (C_{smi-1} + C_{smi}) q_i$$

$$= C_{sm1}(q_0 + \frac{1}{2}q_1) + C_{smn}(\frac{1}{2}q_{n-1} + q_n) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(q_{i-1} + q_i)C_{smi} \quad (5-15)$$

式中： C_{smi} 为各测沙垂线的垂线平均含沙量； q_i 为以测沙垂线为分界的部分流量。

3. 计算断面平均含沙量 \bar{C}_s

$$\bar{C}_s = \frac{Q_s}{Q} \quad (5-16)$$

4. 计算相应单沙 C_{su}

(1) 算术平均法（含沙量变化不大且均匀施测的情况下）。

$$C_{sur} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{sui}}{n} \quad (5-17)$$

(2) 加权法（含沙量变化大且测次多的情况下）。

$$C_{sur} = \frac{1}{Q} \left[\frac{q_0 C_{sm1}}{C_{su1}} + \frac{q_n C_{smn}}{C_{sun}} + \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{2}q_1(C_{smi-1} + C_{smi})}{\frac{1}{2}(C_{sui-1} + C_{sui})} \right] \quad (5-18)$$

5.2.4 悬移质单样含沙量测验

1. 单沙测验位置的确定

(1) 要求。在各种水沙条件下收集 30 次以上的精测输沙率之后，根据测站特性和单断沙关系分析而定。

(2) 对于断面比较稳定、主流摆动不大的测站。选择几次能代表各级水位和含沙量的实测输沙率资料，绘制各垂线平均含沙量与断面平均含沙量比值 $\frac{C_{sm}}{C_s}$ 沿河宽的分布曲线，选择各测次的 $\frac{C_{sm}}{C_s}$ 值密集在 1.0 附近的垂线作为初选的代表垂线。然后，利用全部输沙率资料，点绘代表垂线的平均含沙量与断面平均含沙量的关系图，进行统计分析。

如果关系点群偏离平均关系线的相对标准差不超过 $\pm 8\%$ ，该垂线即可作为固定的单沙测验位置。一般应选择几个位置作方案比较，优选出误差最小、关系线形式简单、测验方便的最佳位置。如果选不出一条合适的垂线，可采用某两条垂线的组合作为代表位置进行分析。如果各级水位下含沙量横向分布变化较大，可按不同水位级分别确定单沙测验位置。

如果关系点群偏离平均关系线的相对标准差不超过 $\pm 8\%$ ，该垂线即可作为固定的单沙测验位置。一般应选择几个位置作方案比较，优选出误差最小、关系线形式简单、测验方便的最佳位置。如果选不出一条合适的垂线，可采用某两条垂线的组合作为代表位置进行分析。如果各级水位下含沙量横向分布变化较大，可按不同水位级分别确定单沙测验位置。

(3) 对断面不稳定、主流摆动大，无法采用固定单沙垂线的测站。

1) 选取中泓 2~3 条垂线，按上述方法作单断沙关系分析，确定出随主流摆动而变的单沙测验位置。

2) 根据测站条件和精度要求，按全断面混合的原理和方法，采用 3~5 条垂线的断面混合法，按相应的测沙垂线精简分析方法，进行误差分析，如符合要求，即可作为日常单沙测验方法。

2. 单沙垂线上的取样方法

与输沙率测验的垂线取样方法一致，一类站不得采用一点法。用横式采样器取样

时，应特别注意泥沙脉动影响。

3. 单沙测次的布置

(1) 要求。能基本控制含沙量变化过程，满足推求逐日平均含沙量和输沙率的规范要求。

(2) 布置。在洪水多沙期、平水期、枯季各布置一定测次；采用比色法、沉淀量高法、简易比重法或简易置换法等估测含沙量，及时了解含沙量的变化，掌握测验时机。

5.3 泥沙颗粒分析

5.3.1 概述

1. 定义

确定泥沙沙样中各一个粒径组的干沙重占总沙重的百分数，包括测定泥沙粒径和各粒径组泥沙重量，给出泥沙的颗粒级配曲线。

2. 用途

取得泥沙颗粒级配的断面分布和变化过程的资料。泥沙粒径是反映泥沙几何及力学性质最重要的特征，是影响泥沙运动的重要因素。在研究泥沙运动规律（如泥沙推移力、启动止动条件、推移质输沙率和水流挟沙能力等），合理解决各类工程泥沙问题（如水利枢纽布置、水库淤积等），以及泥沙测验中有关分析计算问题时，都需要泥沙粒径和颗粒级配资料。

3. 术语

(1) 颗粒级配。将泥沙粒径从大到小分成若干粒径组，沙样中各一个粒径组内泥沙重量占沙样总重量的百分比的分配情况。

(2) 泥沙粒径的表示（由于泥沙颗粒形状不规则）。

1) 中数粒径。小于某粒径的沙重百分数为 50% 的粒径。

2) 平均粒径（几何平均粒径）。根据组平均粒径为粒径组上下限粒径几何平均值。样品的平均粒径为各粒径组平均粒径按各粒径组相应沙重百分数加权的平均值。

3) 等容粒径。和给定泥沙颗粒体积相等的球体直径。

4) 投影粒径。和给定泥沙颗粒最稳定的平面投影图像相一致的圆的直径。

5) 三轴平均粒径（算术平均粒径、几何平均粒径）。泥沙颗粒在相互垂直的长、中、短三个轴方向量得长度的算术或几何平均值。

6) 筛析粒径。泥沙颗粒能够通过最小筛孔的筛孔尺寸。

7) 沉降粒径。在同一沉降介质中，与给定颗粒具有同一密度和同一沉速的球体直径。

(3) 泥沙粒径的分级。采用国际通用的 ϕ 分级法：

$$\phi = -\log_2 D \quad (D = 2^{-\phi}) \quad (5-19)$$

式中： D 为泥沙颗粒粒径，mm； ϕ 为土（0，1，2，…，10）。

5.3.2 泥沙颗粒分析

1. 内容

- (1) 测定泥沙粒径。
- (2) 测定各粒径组泥沙重量。

2. 方法

(1) 直接测定法。

1) 卵石粒径测量法 ($D \geq 20\text{mm}$)。以 a 、 b 、 c 分别表示直接量测的卵石长、中、短轴的长度, 则

算术平均粒径

$$D = \frac{1}{3}(a+b+c) \quad (5-20)$$

几何平均粒径

$$D = (abc)^{\frac{1}{3}} \quad (5-21)$$

等容粒径

$$D = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (5-22)$$

2) 筛分析法 ($D = 0.062 \sim 32\text{mm}$)。

利用不同孔径的标准筛作为分析工具, 泥沙粒径以筛析粒径表示。

3) 显微镜法。在显微镜下直接测定粒径和级配。

4) 称重法。样品粒径大的颗粒, 依大小排列称其最大颗粒及各组的粒径及质量, 按等容粒径确定颗粒粒径的方法。

(2) 水分析法 ($D = 0.002 \sim 0.1\text{mm}$)。 $D > 0.1\text{mm}$, 泥沙下沉时产生紊动; $D < 0.002\text{mm}$, 颗粒产生布朗运动, 无法计算沉速)。该法又称间接分析法。利用测得的泥沙在静水中的沉降速度, 采用有关的沉速计算公式, 计算相应于该沉速的球体直径。

如斯托克斯公式为

$$D = \sqrt{\frac{1800\mu}{\gamma_s - \gamma_w} \frac{L}{t}} \quad (5-23)$$

其中

式中: $\omega = \frac{L}{t}$ 为泥沙沉速, cm/s ; D 为泥沙沉降粒径, mm ; μ 为水的运动黏滞系数, cm^2/s ; γ_w 为水的容重, g/cm^3 ; T 为试验时的水温, $^{\circ}\text{C}$; γ_s 为泥沙容重, g/cm^3 。

具体方法有: 粒径计法、移液管法(吸管法)、消光法(上述三个方法将在实验课五、实验课六讲解并操作)、比重法(密度计法)、离心沉降法等。

粒径 $D = 0.1 \sim 1.5\text{mm}$ 时, 用 $D \sim \omega$ 关系曲线的过渡曲线内插。

5.3.3 泥沙颗粒分析资料的计算和整理

1. 悬移质垂线平均颗粒级配的计算

(1) 采用积深法、垂线混合法或一点法取样作颗粒分析者, 其结果即作为垂线平

均颗粒级配。

(2) 采用积点法的计算公式 (测点输沙率加权平均)

$$P_m(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n C_i C_{s_i} v_i P_i}{\sum_{i=1}^n C_i C_{s_i} v_i} \quad (5-24)$$

式中: P_m 为垂线平均小于某粒径沙重的百分数; P_i 为各测点沙样中小于某粒径沙重的百分数; C_i 为各测点流速权重系数; C_{s_i} , v_i 分别为各测点含沙量和流速。

2. 悬移质断面平均颗粒级配的计算

(1) 用全断面混合法取样作颗粒分析者, 其结果即断面平均颗粒级配。

(2) 各垂线水样分别作颗粒分析者, 断面平均颗粒级配用垂线输沙率加权平均法计算为

$$\bar{P}(\%) = \frac{(2q_{s0} + q_{s1}) \bar{P}_{m1} + (q_{sn-1} + 2q_{sn}) \bar{P}_{mn} + \sum_{i=1}^n (q_{s_{i-1}} + q_{s_i}) \bar{P}_{mi}}{2Q_s} \quad (5-25)$$

式中: \bar{P} 为断面平均小于某粒径沙重的百分数; \bar{P}_{mi} 为第 i 条取样垂线平均小于某粒径沙重的百分数; q_{s_i} 为以取样垂线分界的第 i 个部分输沙率, kg/s; Q_s 为全断面输沙率, kg/s。

3. 断面平均粒径 D 的计算

悬移质、推移质、河床质的断面平均粒径 \bar{D} 分别根据各自的断面平均颗粒级配曲线用各粒径组沙重百分数加权平均法计算。

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i \bar{D}_i}{100} \quad (5-26)$$

$$\bar{D}_i = \frac{1}{3} (D_u + D_d + \sqrt{D_u D_d}) \quad (5-27)$$

式中: \bar{D}_i 为某粒径组平均粒径, mm; D_u , D_d 分别为某粒径组上限、下限粒径, mm; ΔP_i 为某粒径组沙重百分数。

4. 悬移质断面平均沉速 $\bar{\omega}$ 的计算

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i \bar{\omega}_i}{100} \quad (5-28)$$

$$\bar{\omega}_i = \frac{1}{3} (\omega_u + \omega_d + \sqrt{\omega_u \omega_d}) \quad (5-29)$$

式中: $\bar{\omega}_i$ 为某粒径组泥沙平均沉速, cm/s; P_i 为某粒径组沙重百分数; ω_u , ω_d 分别为某粒径上限、下限粒径对应的沉速, cm/s。

复 习 题

5-1 什么叫全沙、含沙量、输沙率?

- 5-2 河流泥沙的来源及影响因素有哪些？它们与泥沙测验有何联系？
- 5-3 悬移质泥沙在垂线上及横断面上的分布规律如何？试与流速分布比较，有何不同？
- 5-4 悬移质输沙率测验的原理和方法。在布设取样垂线时，应考虑哪些问题？
- 5-5 什么叫“单沙”？什么叫“断沙”？如何选择单沙的取样位置？
- 5-6 相应单沙的概念是什么？为什么要测相应单沙？如何合理地布置相应单沙的测次？
- 5-7 如何计算断面输沙率？它与计算断面流量有何异同？
- 5-8 采取泥沙颗粒分析沙样，其测次布置的原则是什么？
- 5-9 采用分析法进行泥沙颗粒分析基本原理是什么？粒径计法与移液管法其工作原理有何不同？
- 5-10 如何计算悬移质垂线平均颗粒级配、断面平均颗粒级配及断面平均粒径？

第 6 章

地下水监测

地下水是水资源的重要组成部分，是战略性资源的主要部分，在保障城乡居民生活、支持经济社会发展和维护生态平衡等方面具有十分重要的作用。在北方地区，尤其是在地表水资源短缺的黄淮海平原区，地下水具有不可替代的作用。

人们通常所称的地下水，系指矿化度不大于 2g/L 的浅层地下水。浅层地下水是指与降水和地表水有直接水力联系且具有自由水面的潜水和与潜水有较密切水力联系的弱承压水。地下水资源是指浅层地下水中参与水循环且可以更新的动态水量，可用多年平均年补给量（不包括井灌回归补给）表示。

地下水动态监测是地下水资源评价及生态与环境评价必不可少的基础工作。开展地下水动态监测工作的目的是为水利建设规划、抗旱除涝、治沙治碱、合理开发利用和保护地下水资源提供依据。

6.1 地下水资源开发利用现状与问题

6.1.1 地下水资源开发利用现状

我国农村用水通常为地下水，地下水灌溉面积占全国耕地面积的 40%；全国 669 个城市中，利用地下水供水的有 400 多个；全国多年平均地下水供水量达 1106 亿 m^3 ，接近总供水量的 20%。

我国大规模的地下水开发始于 20 世纪 70 年代初，1980 年底全国地下水开采量为 647 亿 m^3 ，占当时全国总供水量的 14%。到 2002 年底全国地下水供水量达 1106 亿 m^3 ，约占总供水量的 20%，其中浅层地下水供水 946 亿 m^3 ，约占地下水供水量的 86%；深层地下水 160 亿 m^3 ，约占地下水供水量的 14%。海河流域地下水供水量占其总供水量的 66%，黄河和淮河流域地下水供水量均占其总供水量的 1/3。河北省和山东省地下水供水量分别为 164.2 亿 m^3 和 132 亿 m^3 ，占其总供水量的 77% 和 68%。

黄淮海流域地表水资源贫乏，地下水资源超采严重。2000 年，黄淮海平原地下水开采量为 606.2 亿 m^3 ，分别占地下水资源量和地下水可开采量的 102% 和 135%，

尤其是海河平原区，地下水开采量分别占地下水资源量和地下水可开采量的 164% 和 173%，见表 6-1。从一定意义上说，黄淮海流域目前的社会经济发展主要是依靠超采地下水来支撑的。长此以往，地下水将无以为继，不仅生态环境遭到破坏，而且可持续发展也将无从谈起。

淮河以北平原区的广大农村，农业灌溉主要开发利用浅层地下水，北部开发程度高，愈往北地下水开发利用程度愈高，如 2004 年，海河区地下水供水量占总供水量的 67%，其中河北占 81%。黄淮海平原区地下水超采严重，2002 年，地下水开采率为 102%，其中海河平原区地下水开采率为 164%，河南省为 101%，山东省淮河流域境内为 102%，山东半岛为 172%，其他小范围的超采情况还要严重得多。全国水资源分区地下水供水量见表 6-2，2000 年全国地下水开发利用情况见表 6-3。

表 6-1 黄淮海平原区地下水资源量及 2000 年开采现状

流域片	多年平均		2000 年地下水开采状况		
	地下水资源量 (亿 m ³)	地下水可开采量 (亿 m ³)	开采量 (亿 m ³)	占地下水资源量比 (%)	占可开采量比 (%)
海河	160.36	152.03	263.6	164.38	173.39
黄河	154.57	119.39	145.5	94.13	121.87
淮河	279.88	178.09	197.1	70.42	110.67
合计	594.81	448.51	606.2	101.91	134.86

表 6-2 全国水资源分区地下水供水量 单位：亿 m³

水资源一级区	平均 (1956~2000 年)			2004 年		
	总供水量	地下水	份额 (%)	总供水量	地下水	份额 (%)
全国	5632.7	1105.8	19.6	5547.8	1026.4	18.5
松花江	395.6	163.8	41.4	369.6	150.0	40.6
辽河	203.2	111.9	55.1	189.0	109.7	58.0
海河	402.3	263.6	65.5	370.0	247.2	66.8
黄河	418.8	145.5	34.7	372.1	132.1	35.5
淮河	587.1	197.1	33.6	556.4	161.0	28.9
长江	1829.2	90.5	4.9	1815.4	78.3	4.3
东南诸河	315.8	8.7	2.8	316.3	12.1	3.8
珠江	822.1	38.5	4.7	862.3	42.2	4.9
西南诸河	86.1	1.2	1.4	96.9	2.5	2.6
西北诸河	572.5	85.2	14.9	599.7	91.3	15.2

表 6-3 2000 年全国地下水开发利用情况

水资源分区	总补给量 (亿 m ³)	可开采量 (亿 m ³)	可开采率 (%)	实开采量 (亿 m ³)	实开采率 (%)
全国	1826	1235	67.6	1106.0	89.6
松花江	256	204	79.7	163.8	80.3

续表

水资源分区	总补给量 (亿 m ³)	可开采量 (亿 m ³)	可开采率 (%)	实开采量 (亿 m ³)	实开采率 (%)
辽河	126	95	75.4	111.9	117.8
海河	174	152	87.4	263.6	173.4
黄河	162	119	73.5	145.5	122.3
淮河	289	203	70.2	197.1	97.1
长江	248	150	60.5	90.5	60.3
东南诸河	56	42	75.0	8.7	20.7
珠江	78	47	60.3	38.5	81.9
西北诸河	437	222	50.8	85.2	38.4
北方地区	1443	995	69.0	967.1	97.2
南方地区	383	240	62.7	138.9	57.9

6.1.2 地下水超采引发严重的生态环境问题

(1) 地下水位大幅下降，出现大面积“永久性”漏斗区。比较严重的主要有唐山漏斗、天津漏斗、廊坊漏斗、冀枣衡漏斗、沧州漏斗、杭嘉湖漏斗等。

(2) 地面沉降、塌陷、地裂缝。超采地下水引发了地面变形、塌陷，导致建筑物基础下沉、房屋倒塌、路基裂缝、大坝裂缝，雨季积水难排，防洪能力降低等严重后果。除直接经济损失外，间接经济损失更大，潜在威胁严重且难以消除。

(3) 海（咸）水入侵。由于过量开采地下淡水，使许多城市滨海地带出现海水入侵，危害着人民生活和经济建设，严重地威胁着城市地下水资源开采利用，直接影响沿海城市的发展。

(4) 地下水超采，还导致了許多泉水和湖泊干涸、湿地萎缩，加剧了海河等流域的河道断流趋势，使一些河流入海水量减少，河口生态恶化。

6.2 地下水监测工作的进展

6.2.1 地下水监测现状

地下水的基本类型区可以划分为三级，根据区域地形地貌特征，分为山丘区和平原区两类，称一级基本类型区；根据次级地形地貌特征及岩性特征，将山丘区分为一般基岩山丘区、岩溶山区和黄土丘陵区三类，将平原区分为冲洪积平原区、内陆盆地平原区、山间平原区、黄土台塬区和荒漠区五类，称二级基本类型区；根据水文地质条件，将各二级基本类型区分为若干水文地质单元，称三级基本类型区。特殊类型区包括建制市城市建成区、大型及特大型地下水水源地、超采区、次生盐渍化区和地下水污染区等五类。基本类型区与特殊类型区可相互包含或交叉。

根据地下水开采强度，在各地下水类型区中划分超采区、强开采区、中等开采区和弱开采区四种开采强度分区。

根据监测目的，将监测站分为以下3类。

(1) 基本监测站，包括水位基本监测站、开采量基本监测站、泉流量基本监测站、水质基本监测站和水温基本监测站。其中，水位基本监测站和水质基本监测站分别由国家级监测站、省级行政区重点监测站和普通基本监测站组成。

(2) 统测站，由水位统测站和水质统测站组成。

(3) 试验站，由不同试验项目的监测站组成。

根据监测方式，将基本监测站分为人工监测站和自动监测站两类。

欧洲大多数国家地下水监测是从 20 世纪 70~80 年代开始的。地下水水质监测网的发展一般根据国家需要和水文地质条件决定，除德国外，欧洲其他国家监测网都是全国范围的，各国监测目的变化很大，监测变量一般可以分为 5 种：描述性参数、主要离子、重金属、农药和氯化溶剂。所有国家都有关于水质监测取样点的数量、地点、站点高度、记录时间、测量参数和地质条件等详细资料。地下水量监测网由多种类型的观测点组成，大部分为钻井和挖掘井，还有管井和泉水井。观测变量大多数相同，主要有地下水位、地下水温、泉水位和泉水流量。观测质量和取样方法由不同国家的技术标准决定。监测目的通常反映不同国家具体的需求，如：对于荷兰浅层地下水资源，如果水位下降，将危害到日常生活、工业和农业，因此有必要建立专门的地下水

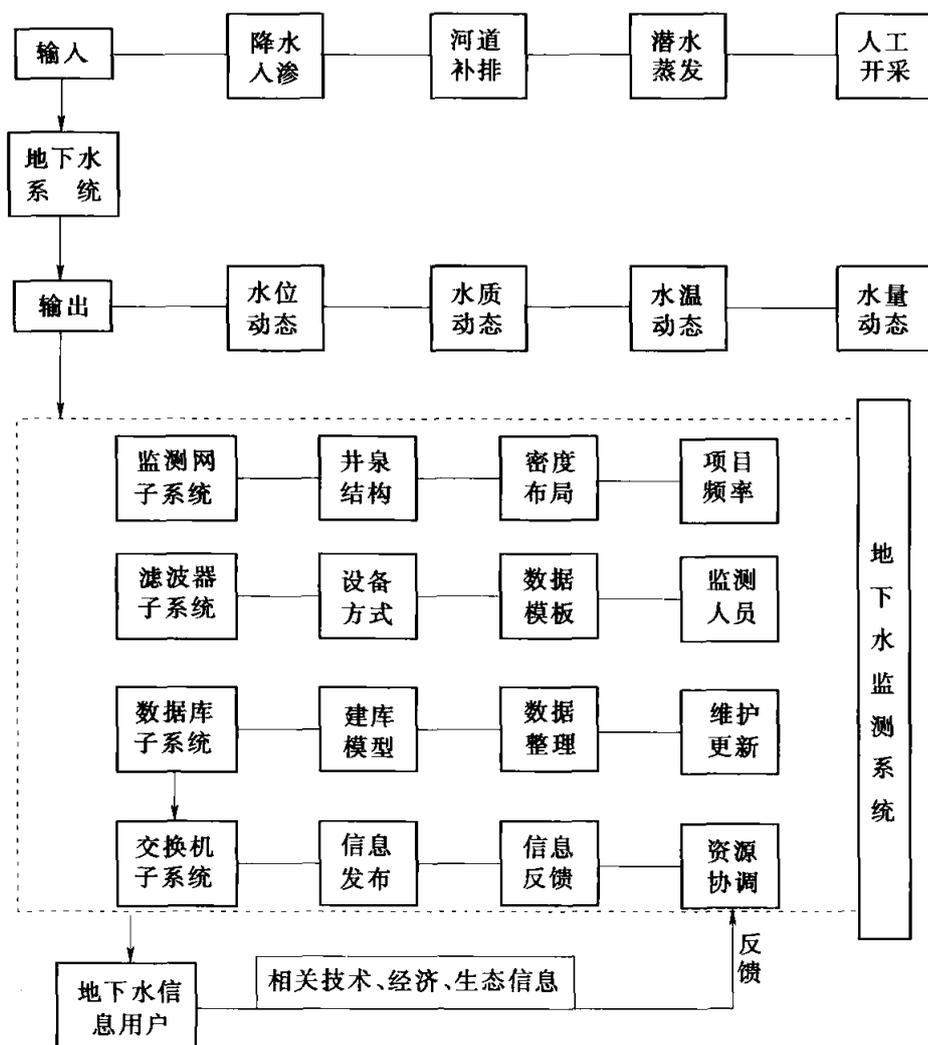


图 6-1 地下水监测系统逻辑模型

监测网；在葡萄牙和英国，地下水受到海水入侵的影响，因此地下水量监测网同样适用于这类特殊问题。数据管理和储存是由不同国家的数据库完成，通常的数据库包括如 Oracle、Ingres、Rdbms 等，常用的操作系统是 Unix、Windows 等，硬件设备有 HP、Digital、Bull、Sun 等，软件有 Fortran、Pascal、Cobol、C++、SQL、SAS 等，相关数据可以从纸张、软盘、报告及 Internet 上获得，在大多数情况下数据是免费提供的。主管部门负责项目协调、编写报告、地方取样和数据库管理等工作。

美国从 20 世纪 50 年代开始设置地下水数据的存储与检索系统，70 年代进行了地下水水质观测网优化设计研究，80 年代成立了官方的地下水水质监测网设计工作委员会，其任务是调查有关地下水水质监测网设计方面的科技成果，评价最有前景的观测网设计方法，同时研究地下水位观测网的优化设计，目前数据库中已存储全国大部分井泉的长期观测数据。我国地下水监测网分属原地质部、建设部、水利部、地震局、环保局规划和管理。20 世纪 60 年代以来，水利部门开始监测地下水水位、开采量、水质和水温等要素；1998 年，国务院在国办发〔1998〕87 号《水利部职能配置、内设机构和人员编制规定》文件中明确将原地质矿产部承担的地下水行政管理职能和原由建设部承担的指导城市规划区地下水资源的管理保护职能交给水利部承担。针对各地地下水监测工作发展不平衡；地下水委托监测经费过低，影响了地下水监测资料质量；在一些重要水源地和大型漏斗区缺少地下水监测井，不能满足掌握地下水动态的要求；地下水监测手段落后；信息传输不及时，时效性差等问题，2001 年末，水利部印发了水文〔2001〕479 号《关于加强地下水监测工作的通知》文件，强调必须改变地下水监测的落后现状，加强地下水监测工作。

据统计，截至 2002 年底，全国共有为控制区域地下水动态的基本监测站（井）12679 处（眼），为补充基本监测站（井）不足设置的统测井 9806 眼和为分析确定水文地质参数而设置的试验井 11 眼，监测站（井）的数量共为 22496 处（眼），监测项目包括地下水水位、水量、水质、水温等要素，见表 6-4。

表 6-4 2002 年水利部门地下水监测站（井）网现状情况统计表

序号	省（自治区、直辖市）	基本监测井	统测井	试验井	小计
1	北京市	423			423
2	天津市	415			415
3	河北省	752			752
4	山西省	780	2650		3430
5	内蒙古自治区	958			958
6	辽宁省	606	2612	5	3223
7	吉林省	1285	2000		3285
8	黑龙江省	718	700		1418
9	江苏省	1224			1224
10	安徽省	183		6	189
11	山东省	2670	776		3446
12	河南省	1356			1356

续表

序号	省(自治区、直辖市)	基本监测井	统测井	试验井	小计
13	陕西省	504	530		1034
14	甘肃省	174			174
15	青海省	33	200		233
16	宁夏回族自治区	207			207
17	新疆维吾尔自治区	329	338		667
18	上海市	7			7
19	西藏自治区	21			21
20	浙江省	25			25
21	湖北省	9			9
合计		12679	9806	11	22496

我国台湾省地下水资源丰富,尤其在台北盆地、浊水溪冲积扇、屏东平原与宜兰平原等地。由于地下水超采产生了地面沉降、海水入侵等环境地质问题,1966年区域地下水监测网包括339口地下水观测井,由于经费不足、井径小、洗井效果不好、观测井的布设未配合水文地质分层等问题,管理困难,监测效果不佳。为此,台湾省水利局于1990年制订“台湾地区地下水观测网整体计划”,从筹资、管理到监测和数据分析进行了全面的规划。

6.2.2 地下水监测存在的问题

现有的地下水监测系统,无论对国家及流域的宏观监控管理,还是对省区或地市的开发利用管理均存在很大差距,主要表现在以下几个方面。

(1) 地下水监测专用井不足,观测数据代表性差。现有的地下水监测井大多为农用生产井,专用监测站井很少,因此生产井混合开采和抽水时的临时局部降落漏斗的影响,不能反映真实的地下水状况,造成观测数据代表性差。另外,生产井经常因淤积或其他原因报废,导致地下水监测井更换较频繁,观测资料不连续。

(2) 监测及传输手段落后,数据的可靠性和时效性差。从监测方式上看,目前采取的委托农民观测方式已不能满足现代管理要求。一是观测员的文化技术素质普遍低,部分人员责任心不强,同时由于委托观测费还维持在20世纪七八十年代的水平,委托人员积极性不高,造成缺测、野外记录及报表不规范,人为造假数等现象时有发生,资料精度难以保证。加上地下水埋深的不断增加,增加了人工监测的难度也影响到监测的准确。二是对于埋深较大的监测井,人工观测的误差比较大。

从观测数据的传输方式看,人工观测数据上报一般是采用普通信函、电话报送到地市,地市再通过信函、电话、传真、网络报送至省市,经过观测员人工整理和逐级上报,月报动态信息传输周期至少十天以上,信息传输十分缓慢。从时效性看,目前的传输方式与现在的信息化管理要求尚存在差距。从国内外发展趋势看,实现地下水的自动观测和传输是解决数据观测的可靠性和传输的时效性的有效手段。

(3) 地下水监测站网布局不完善。目前的地下水监测井网是在20世纪六七十年代水利为农业灌溉服务的基础上形成的,主要监测农村浅层地下水,而在城市城区、

大型地下水水源地、地下水超采区和深层地下水监测方面站井不足，因此监测站网不能准确掌握关键地区的地下水动态。

另外，由于经费投入不足等原因，近年来地下水监测井数量呈减少趋势，使得原本井网密度不足的情况更加严重。

6.3 地下水监测

6.3.1 地下水站网规划与布设

(1) 地下水监测站网规划原则。地下水监测站站网规划应在地下水类型区划分、开采强度分区和监测站分类的基础上进行。基本类型区中的冲洪积平原区、内陆盆地平原区和山间平原区，以及特殊类型区，是站网规划的重点，应全面布设监测站；基本类型区中的山丘区及平原区中的黄土台塬区和荒漠区，可根据地下水开发利用情况，选择典型代表区布设监测站。应根据监测目的和精度要求，分别布设基本监测站、统测站和试验站。

地下水监测站站网规划应符合以下布设原则：合理布设监测站，做到平面上点、线、面结合，垂向上层次分明，以浅层地下水监测站规划为重点，尽可能做到一站多用；优先选用符合监测条件的已有井孔；兼顾与水文监测站的统一规划与配套监测；尽可能避免部门间重复布设目的相同或相近的监测站。

地下水自动监测系统规划应符合以下要求：地下水自动监测系统规划应遵循技术先进、质量可靠、管理方便的原则；地下水自动监测系统规划应根据自动监测系统当前和长远建设目标、任务，在科学论证的基础上确定地下水自动监测系统功能和建设规模及技术要求；根据地下水预测、预报及各特殊类型区监测的需要，确定地下水自动监测站；地下水自动监测站的监测项目和监测频次应按不同监测目的和要求，由各省级行政区地下水监测主管部门确定。

(2) 基本监测站布设。水位基本监测站应分别沿着平行和垂直于地下水流向的监测线布设，各基本类型区、开采强度分区的水位基本监测站布设密度可参照表 6-5 布设。

表 6-5

水位基本监测站布设密度

单位：眼/ 10^3 km²

基本类型区名称		监测站布设形式	开采强度分区			
			超采区	强开采区	中等开采区	弱开采区
平原区	冲洪积平原区	全面布设	8~14	6~12	4~10	2~6
	内陆盆地平原区		10~16	8~14	6~12	4~8
	山间平原区		12~16	10~14	8~12	6~10
	黄土台塬区	选择典型代表区布设	宜参照冲洪积平原区内弱开采区水位基本监测站布设密度布设			
荒漠区						
一般基岩山丘区						
山丘区	岩溶山区					
	黄土丘陵区					

各特殊类型区的水位基本监测站布设密度可在表 6-5 的基础上适当加密；冲洪积平原区中的山前地带，水位监测站布设密度宜采用表 6-5 相应开采强度分区布设密度的上限值。国家级水位基本监测站要占水位基本监测站总数的 20% 左右，省级行政区重点水位基本监测站宜占水位基本监测站总数的 30% 左右。国家级水位基本监测站和省级行政区重点水位基本监测站主要布设在特殊类型区内和三级基本类型区的边界附近。国家级水位基本监测站应采用专用水位监测井并实行自动监测；省级行政区重点水位基本监测站宜采用专用水位监测井，宜实行自动监测；试验站监测井宜采用自动监测。生产井不宜作为水位基本监测站的监测井。

开采量基本监测站的布设要符合以下要求：针对各水文地质单元的各地下水开发利用目标含水层组，分别布设开采量基本监测站；在基本类型区内的各开采强度分区，应分别选择 1 组或 2 组有代表性的生产井群，布设开采量基本监测站；每组井群的分布面积宜控制在 $5\sim 10\text{km}^2$ ，开采量基本监测站数不宜少于 5 个；特殊类型区内的生产井，均应作为开采量基本监测站。

泉流量基本监测站的布设应符合以下要求：山丘区流量大于 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ 、平原区流量大于 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 的泉，均应布设为泉流量基本监测站；山丘区流量不大于 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ 、平原区流量不大于 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 的泉，可选择少数具有较大供水意义者，布设为泉流量基本监测站；具有特殊观赏价值的名泉，宜布设为泉流量基本监测站。

水质基本监测站的布设应符合以下要求：水质基本监测站布设应符合 SL 219—98《水环境监测规范》的相关要求；水质基本监测站宜从经常使用的民井、生产井及泉流量基本监测站中选择布设，不足时可从水位基本监测站中选择布设；水质基本监测站的布设密度，宜控制在同一地下水类型区内水位基本监测站布设密度的 10% 左右，地下水水化学成分复杂的区域或地下水污染区应适当加密；国家级水质基本监测站宜占水质基本监测站总数的 20% 左右，省级行政区重点水质基本监测站宜占水质基本监测站总数的 30% 左右。

水温基本监测站的布设应符合以下要求：沿经线方向布设水温基本监测站；水温基本监测站宜从水质基本监测站中选择布设，不足时可从开采量基本监测站或泉流量基本监测站中选择布设；水温基本监测站的布设密度宜控制在同一区域内水位基本监测站布设密度的 5% 左右，地下水水温异常区应适当加密。

(3) 监测站维护与管理。国家级监测站和省级行政区重点监测站的设备、设施应有专门技术人员进行维护与管理。普通基本监测站的设施应进行经常性维护，每年末应对水位基本监测站进行一次井深测量，当井内淤积物超过沉淀管或井内水深小于 2m 时，应及时进行洗井、清淤。水位基本监测站应设立监测站保护标志。国家级监测站应每年进行一次透水灵敏度试验；省级行政区重点监测站应每两年进行一次透水灵敏度试验；普通基本监测站每 3~5 年进行一次透水灵敏度试验。当向监测井内注入 1m 井管容积的水量、水位恢复时间超过 15min 时，应进行洗井。井口固定点标志、校核水准点及基本水准点因人为或自然灾害发生位移或损坏时，应及时修复并重新引测高程，并记入该监测站的技术档案。

根据地下水监测资料分析及国民经济发展对地下水监测工作的需要，可提出局部站网调整意见，每 5~10 年制定一次整体站网调整计划。站网调整计划包括撤销代表

性差或已完成监测任务的基本监测站，根据工作需要增设基本监测站及调整监测站的类别，增、减监测项目或更改监测频次。

6.3.2 地下水测验

建立随监测、随记载、随整理、随分析的工作制度，各项原始监测数据均应经过记载、校核、复核三道工序。监测人员应掌握有关测具的使用、保护和检测技能，测具应准确、耐用并定期检定。不合格者，应及时校正或更换，否则不得使用。现场监测应做到准时监测，用铅笔记载；监测数据准确，记载的字体工整、清晰，不得涂抹、擦拭。应将本次监测的数据与前一次监测的数据进行对照，发现异常应分析原因，同时检查测具和进行复测，并在备注栏内做出说明。

监测数据应及时进行检查和整理，点绘单项和综合监测资料过程线。进行单项和综合监测资料的合理性检查，分析监测数据发生异常的原因，必要时采取补救措施，对原始记载资料进行校核、复核，原始记载资料不得毁坏和丢失，并按时上报。

测站的水准基面采用1985年国家高程基准。基本水准点高程，应从不低于国家三等水准点按三等水准测量标准接测，据以引测的国家水准点，在复测或校测时，不宜更换。校核水准点高程，应从不低于国家三等水准点或基本水准点按四等水准测量标准接测。各水位基本监测站井口固定点高程和监测站附近地面高程，应从不低于国家三等水准点或基本水准点或校核水准点按四等水准测量标准接测；各统测站固定点高程和地面高程，可从不低于四等的水准点按五等水准测量标准接测；监测站附近地面高程，可采用监测站附近不少于四个地面点高程的算术平均值。基本水准点高程，每10年校测一次；校核水准点高程，每5年校测一次；基本监测站固定点高程和地面高程，每1~2年校测一次；统测站固定点高程和地面高程，每3~5年校测一次。各水准点如有变动迹象，应随时校测。

国家级水位基本监测站实行自动监测，每日定时采集6次监测数据，省级行政区重点水位基本监测站每日监测一次，普通水位基本监测站汛期宜每日监测一次，非汛期宜每5日监测一次，水位统测站每年监测3次，试验站的水位监测频次，可根据试验目的自行确定。

自动监测站，每日4时、8时、12时、16时、20时、24时应有监测记录，并记录日内最高水位、最低水位及其发生的时、分。每日监测一次的测站，监测时间为每日的8时。每5日监测一次的测站，监测时间为每月1日、6日、11日、16日、21日、26日的8时。统测站每年监测3次，监测时间为每年汛前、汛后和年末，监测日从每5日监测一次的监测日中选定，统测时间为相应选定监测日的8时。新疆维吾尔自治区、西藏自治区、甘肃省、青海省、四川省、云南省和内蒙古自治区的阿拉善盟，可根据具体条件将其中规定的8时改成10时。

地下水水位监测数值以m为单位，精确到小数点后第二位。人工监测水位，应测量两次，间隔时间不应少于1min，取两次水位的平均值，两次测量允许偏差为 $\pm 0.02\text{m}$ 。当两次测量的偏差超过 $\pm 0.02\text{m}$ 时，应重复测量，水位自动监测仪允许精度误差为 $\pm 0.01\text{m}$ 。每次测量结果应当场核查，发现反常及时补测，保证监测资料真实、准确、完整、可靠。

自动监测仪器每月检查、校测一次，当校测的水位监测误差的绝对值大于 0.01m

时,应对自动监测仪器进行校正。布卷尺、钢卷尺、测绳、导线等测具的精度必须符合国家计量检定规程允许的误差规定,每半年检定一次。

水量监测包括开采量和泉流量两项监测。对建制市城市建成区、大型和特大型地下水水源地、超采区、大型以上矿山和大型以上农业区,应分别进行水量监测。其中建制市城市建成区水量监测应包括用于生活、生产、生态的水量和建设工程排水量;大型以上矿山水量监测应包括用于矿山生产、生活的水量和矿坑排水量;大型以上农业区水量监测应包括用于农田灌溉、乡镇工业生产和农村生活的水量,均要求按月监测。

开采量监测可采用水表法、水泵出水量统计法和用水定额调查统计法等方法监测。泉流量监测可采用堰槽法或流速流量仪法。水表、水泵、堰槽、流速流量仪等测具需每年检定一次。

水质监测采集水样的频次、分析项目、分析时限、程序、方法、质量控制,水样的存放与运送,水样编号、送样单的填写,分析结果记载表和测具检定要求,均按 SL 219—98《水环境监测规范》执行。

水温基本监测站的监测频次为每年4次,分别为每年3月、6月、9月、12月的26日8时。水温监测的同时应监测气温及地下水水位,监测水温、气温的测具,最小分度值应不小于 0.2°C ,允许误差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。水温监测应符合以下要求:监测水温的测具应放置在地下水水面以下1.0m处,或放置在泉水、正在开采的生产井出水水流中心处,静置5min后读数;连续进行两次水温监测,当这两次监测数值之差的绝对值不大于 0.4°C 时,将这两次监测数值及其算术平均值计入相应原始水温监测记载表中;当两次监测数值之差的绝对值大于 0.4°C 时,应重复监测。水温测具和气温测具应每年检定一次,检定测具的允许误差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

第 7 章

水质信息采集

7.1 地表水采样

7.1.1 采样断面、采样垂线和采样点的设置

1. 准备工作

(1) 调查研究和收集资料。主要收集水文、气候、地质、地貌、水体沿岸城市工业分布、污染源和排污情况、水资源的用途及沿岸资源等资料。

(2) 综合分析。根据监测目的、监测项目和样品类型，结合调查的有关资料进行综合分析，确定采样断面和采样点。

2. 布设总原则

以最小的断面、测点数，取得科学合理的水质状况的信息。

3. 关键

取得有代表性的水样。

4. 考虑对象

(1) 在大量废水排入河流的主要居民区，工业区的上游、下游。

(2) 湖泊、水库、河口的主要出入口。

(3) 河流主流、河口、湖泊水库的代表性位置，如主要的用水地区等。

(4) 主要支流汇入主流、河流或沿海水域的汇合口。

在河段上一般应设置对照断面（又称背景断面）、消减断面各一个，并根据具体情况设若干监测断面。

5. 采样垂线与采样点位置的确定

(1) 考虑因素。纳污口的位置、水流状况、水生物的分布，水质参数特性等（各种水质参数的浓度在水体中分布的不均匀性）。

(2) 河流上采样垂线的布置。

1) 在污染物完全混合的河段中，断面上的任一位置，都是理想的采样点。

2) 若各水质参数在采样断面上，各点之间有较好的相关关系，可选取一适当的

采样点，据此推算断面上其他各点的水质参数值，并由此获得水质参数在断面上的分布资料及断面的平均值。

3) 更一般的情况则按表 7-1 的规定布设。

表 7-1 江河采样垂线布设

水面宽度 (m)	采样垂线布设	岸边有污染带	相对范围
<50	1 条 (中泓处)	如一边有污染带, 增设 1 条垂线	
50~100	左、中、右 3 条	3 条	左、右设在距湿岸 5~10m 处
100~1000	左、中、右 3 条	5 条 (增加岸边两条)	岸边垂线距湿岸边 5~10m 处
>1000	3~5 条	7 条	

(3) 湖泊 (水库) 采样垂线的分布。SL 219—98《水环境监测规范》规定的湖泊中应设采样垂线的数量是以湖泊的面积为依据的, 见表 7-2。

表 7-2 湖泊 (水库) 采样垂线设置

水面宽度 (m)	垂线数量	说明
≤50	1 条 (中泓线)	(1) 面上垂线的布设应避开岸边污染带。有必要对岸边污染带进行监测时, 可在污染带内酌情增设垂线; (2) 无排污河段并有充分数据证明断面上水质均匀时, 可只设中泓 1 条垂线
50~100	2 条 (左、右近岸有明显水流处)	
>100	3 条 (左、中、右)	

(4) 采样垂线上采样点的布置。垂线上水质参数浓度分布决定于水深、水流情况及水质参数的特性等因素。具体布置规定见表 7-3。为避免采集到漂浮的固体和河底沉积物, 并规定在至少水面以下, 河底以上 50cm 处采样。

表 7-3 垂线上采样点布置

水深 (m)	采样点数	位置	说明
<5	1	水面下 0.5m	(1) 不足 1m 时, 取 1/2 水深; (2) 如沿垂线水质分布均匀, 可减少中层采样点; (3) 潮汐河流应设置分层采样点
5~10	2	水面下 0.5m, 河底上 0.5m	
>10	3	水面下 0.5m, 1/2 水深, 河底以上 0.5m	

7.1.2 采样时间和采样频率

采集的水样要具有代表性, 并能同时反映出空间和时间上的变化规律。因此, 要掌握时间上的周期性变化或非周期性变化以确定合理的采样频率。

为便于进行资料分析, 同一江河 (湖、库) 应力求同步采样, 但不宜在大雨时采样。在工业区或城镇附近的河段应在汛前一次大雨和久旱后第一次大雨产流后, 增加一次采样。具体测次, 应根据不同水体、水情变化、污染情况等确定。

7.1.3 采样准备工作

1. 采样容器材质的选择

因容器材质对水样在存储期间的稳定性影响很大,要求容器材质具有化学稳定性好、可保证水样的各组成成分在存储期间不发生变化;抗极端温度性能好,抗震,大小、形状和重量适宜,能严密封口,且容易打开;材料易得,价格低;容易清洗且可反复使用。如高压低密聚乙烯塑料和硼硅玻璃可满足上述要求。

2. 采样器的准备

根据监测要求不同,选用不同采样器。若采集表层水样,可用桶、瓶等直接采取,通常情况下选用常用采水器;当采样地段流量大、水层深时应选用急流采水器;当采集具有溶解气体的水样时应选用双瓶溶解气体采水器。

按容器材质所需要的洗涤方法将选定合适的采水器洗净待用。

3. 水上交通工具的准备

一般河流、湖泊、水库采样可用小船。小船经济、灵活,可达到任一采样位置。最好有专用的监测船或采样船。

7.1.4 采样方法

1. 自来水的采集

先放水数分钟,使积累在水管中的杂质及陈旧水排除后再取样。采样器须用采集水样洗涤3次。

2. 河湖水库水的采集

考虑其水深和流量。表层水样可直接将采样器放入水面下0.3~0.5m处采样,采样后立即加盖塞紧,避免接触空气。深层水可用抽吸泵采样,并利用船等乘具行驶至特定采样点,将采水管沉降至所规定的深度,用泵抽取水样即可。采集底层水样时,切勿搅动沉积层。

3. 工业废水和生活污水的采集

(1) 常用采样方法。

- 1) 瞬时个别水样法。
- 2) 平均水样法。
- 3) 比例组合水样法。

(2) 注意事项。

- 1) 有条件在现场测定的项目应尽量在现场测定,如水温、pH值、电导率等。
- 2) 不能在现场处理的,在水样采集后的运输和实验室管理过程中,为保证水样的完整性、代表性,使之不受污染、损坏和丢失以及由于微生物新陈代谢活动和化学作用影响引起水样组分的变化,必须遵守各项保证措施。

7.2 地下水采样

7.2.1 采样井布设

1. 布设原则

- (1) 全面掌握地下水水资源质量状况,对地下水污染进行监视、控制。

(2) 根据地下水类型分区与开采强度分区,以主要开采层为主布设,兼顾深层和自流地下水。

(3) 尽量与现有地下水水位观测井网相结合。

(4) 采样井布设密度为主要供水区密,一般地区稀;城区密,农村稀;污染严重区密,非污染区稀。

(5) 不同水质特征的地下水区域应布设采样井。

(6) 专用站按监测目的与要求布设。

2. 布设方法与要求

(1) 在布设地下水采样井之前,应收集本地区有关资料,包括区域自然水文地质单元特征、地下水补给条件、地下水流向及开发利用、污染源及污水排放特征、城镇及工业区分布、土地利用与水利工程状况等。

(2) 在下列地区应布设采样井。以地下水为主要供水水源的地区;饮水型地方病(如高氟病)高发地区;污水灌溉区,垃圾堆积处理场地区及地下水回灌区;污染严重区。

(3) 平原(含盆地)地区地下水采样井布设密度一般为 $200\text{km}^2/\text{眼}$,重要水源地或污染严重地区可适当加密;沙漠区、山丘区、岩溶山区等可根据需要,选择典型代表区布设采样井。

(4) 采样井布设方法与要求。一般水资源质量监测及污染控制井根据区域水文地质单元状况,视地下水主要补给来源,可在垂直于地下水流的方向上,设置一个至数个背景值监测井;根据本地区地下水流向及污染源分布状况,采用网格法或放射法布设;根据产生地下水污染的活动类型与分布特征,采用网格法或放射法布设。

(5) 多级深度井应沿不同深度布设数个采样点。

7.2.2 采样时间和采样频率

(1) 背景井点每年采样1次。

(2) 全国重点基本站每年采样2次,丰、枯水期各1次。

(3) 地下水污染严重的控制井,每季度采样1次。

(4) 在以地下水作生活饮用水源的地区每月采样1次。

(5) 专用监测井按设置目的与要求确定。

7.2.3 采样准备工作

采样器材质与贮样容器要求同地表水采样中的一样(见7.1.3)。

地下水水质采样器分为自动式与人工式,自动式用电动泵进行采样,人工式分活塞式与隔膜式,可按要求选用。采样器在测井中应能准确定位,并能取到足够量的代表性水样。

7.2.4 采样方法与要求

(1) 采样时采样器放下与提升时动作要轻,避免搅动井水及底部沉积物。

(2) 用机井泵采样时,应待管道中的积水排净后再采样。

(3) 自流地下水样品应在水流流出处或水流汇集处采集。

(4) 水样采集量应满足监测项目与分析方法所需量及备用量要求。

7.3 水体污染源调查

7.3.1 定义

1. 水体污染源

向水体排放污染物的场所、设备、装置和途径等。

2. 分类

水体污染物按污染源释放有害物种类分类及其来源归纳于表 7-4 中。

3. 水体污染源的调查

根据控制污染、改善环境质量的要求，对某一地区水体污染造成的原因进行调查，建立各类污染源档案；在综合分析的基础上选定评价标准，估量并比较各污染源对环境的危害程度及其潜在危险，确定该地区的重点控制对象（主要污染源和主要污染物）和控制方法的过程。

表 7-4 水体中主要污染物分类和来源

类别	来源
无机无毒物	酸、碱、一般无机盐、氮、磷等植物营养物质
无机有毒物	重金属、砷、氰化物、氟化物等
有机无毒物	碳水化合物、脂肪、蛋白质等
有机有毒物	苯酚、多环芳烃、PCB、有机氯农药等

7.3.2 水体污染源调查的主要内容

1. 水体污染源调查

(1) 污废水直接排入河道等水域的工业污染源。应调查以下内容：①企业名称、厂址、企业性质、生产规模、产品、产量、生产水平等；②工艺流程、工艺原理、工艺水平、能源和原材料种类及分耗量、消耗量；③供水类型、水源、供水量、水的重复利用率；④生产布局、污水排放系统和排放规律、主要污染物种类，排放浓度和排放量、排污口位置和控制方式以及污水处理工艺及设施运行状况。

(2) 城镇生活污染源。应调查以下内容：①城镇人口、居民区布局和用水量；②医院分布和医疗用水量；③城市污水处理厂设施、日处理能力及运行状况；④城市下水道管网分布状况；⑤生活垃圾处置状况。

(3) 农业污染源。应调查以下内容：①农药的品种、品名、有效成分、含量、使用方法、使用量和使用年限及农作物品种等；②化肥的使用品种、数量和方式；③其他农业废弃物。

2. 污水量及其所含污染物质的量

包括其随时间变化的过程。污水量测量频次应符合以下要求。

(1) 连续排放的排污口，每隔 6~8h 测量 1 次，连续施测 3 天。

(2) 间歇排放的排污口，每隔 2~4h 测量 1 次，连续施测 3 天。

(3) 季节性排放的排污口，应调查了解排污周期和排放规律，在排放期间，每隔 6~8h 测量 1 次，连续施测 3 天。

(4) 脉冲型排放的排污口，每隔 2h 测量 1 次，连续施测 3 天。

- (5) 排污口发生事故性排污时, 每隔 1h 施测 1 次, 延续时间可视具体情况而定。
- (6) 对污水排放稳定或有明显排放规律的排污口, 可适当降低测量频次。
- (7) 潮汐河段应根据污水排放规律及潮汐周期确定测量频率。

3. 污染治理情况

- (1) 污水处理设施对污水中所含成分及污水量处理的能力、效果。
- (2) 污水处理过程中产生的污泥、干渣等的处理方式。
- (3) 设施停止运行期间污水的去向及监测设施和监测结果等。

4. 污水排放方式和去向以及纳污水体的性状

- (1) 污水排放通道及其排放路径、排污口的位置及排入纳污水体的方式(岸边自流、喷排及其他方式)。
- (2) 排污口所在河段的水文水力学特征、水质状况, 附近水域的环境功能污水对地下水水质的影响等。

5. 污染危害

- (1) 污染物对污染源所在单位和社会的危害。单位内主要是工作人员的健康状况; 社会上指接触或使用污水后的人群的身体健康。
- (2) 有关生物群落的组成, 生物体内有毒有害物质积累的情况。
- (3) 发生污染事故的情况, 发生的原因、时间, 造成的危害等。

6. 污染发展趋势

- (1) 污染物河流、湖泊和社会的危害有增加趋势。
- (2) 污染物致使生物群落产生部分种群的变异、消亡, 生物体内有毒有害物质的积累有增加的趋势。

7.3.3 水体污染源调查的方法

1. 表格普查法

- (1) 方法。由调查的主管部门设计调查表格, 发至被调查单位或地区, 请他们如实填写后收取。
- (2) 优点。花费少, 调查信息量大。

2. 现场调查法

- (1) 方法。对污染源有关资料的实地调查, 包括现场勘测, 设点采样和分析等。现场调查可以是大规模的, 也可以是区域性的、行业性的或个别污染源的所在单位调查。

- (2) 优点。现场调查法的结果, 比其他调查方法都准确, 但缺陷是短时间的, 总体代表性不好, 花费大。

3. 经验估算法

- (1) 方法。用典型调查和研究中所得到的某种函数关系对污染源的排放量进行估算的办法。
- (2) 使用条件。当要求不高或无法直接获取数据时。

7.3.4 水污染事故调查

1. 调查内容

- (1) 一般水污染事故应调查发生的时间、水域、污染物数量、人员受害和经济损

失情况。

(2) 重大水污染事故应调查事故发生的原因、过程,采取的应急措施,处理结果,事故直接、潜在或间接的危害,社会影响,遗留问题和防范措施等。

2. 调查方式与要求

(1) 一般水污染事故由当地水环境监测中心协同有关部门进行调查。

(2) 跨地、市和重大水污染事故由省水环境监测中心协同有关部门进行调查或经授权由省级水环境监测中心组织调查。

(3) 跨省河流和重要江、河干流发生水污染事故由流域水环境监测中心组织调查。

(4) 对污染事故可能影响的水域,应组织实施监视性监测。

(5) 对大污水团集中下泄造成的污染事故,当地水环境监测中心应跟踪调查和监测。

发生水污染事故后,当地水环境监测中心应尽快向有关主管部门和上一级水环境监测中心报告。对重大水污染事故,应有全面调查报告。

7.3.5 水污染动态监测

1. 任务、方式与要求

(1) 动态监测是在常规水质监测的基础上,根据各河道污染的主要水质指标,分河段按不同水情和污染状况,采取不同的监测次,对河道水污染进行跟踪性或监视性监测,以确定污染的影响范围与程度。

(2) 动态监测可采取河段(闸坝)定点监测和干支流河道、上下游间追踪监测相结合;河道水量水质同步监测和入河排污口水量水质同步监测相结合;现场测定和室内测定相结合等监测方式。

(3) 动态监测的任务是及时掌握河道水量水质变化,对大量高浓度污废水的排入、积蓄和下泄,有毒物质大量泄漏或翻沉,以及易出现水质恶化或突发性水污染事故提出预警,为当地政府和有关单位制定或采取防治应急措施提供依据。

2. 采样点布设原则

(1) 枯水期易发生水质严重恶化危及沿岸城市供水安全的河段。

(2) 受严重污染的主要河流出入境处。

(3) 受严重污染的主要支流入干流河口处。

(4) 有大量污废水积蓄的闸坝。

(5) 其他重要控制河段。

3. 应进行动态监测的情况

(1) 发生人畜饮用水中毒。

(2) 水体受到严重污染,河道(湖、库)出现大面积死鱼。

(3) 有大量高浓度污废水入境。

(4) 有大量高浓度污水蓄积的水闸运行前后,或在运行中泄量有大的改变。

(5) 发生污水坝垮坝、有毒物质大量泄漏。

(6) 因水质污染使城市生活、生产正常供水受到影响。

4. 监测要求与信息传递应符合的原则

(1) 流域和省级水环境监测中心可根据辖区内河道的实际情况，因地制宜地组织实施水污染动态监测。

(2) 重要江、河干流和有水污染等水事纠纷的跨省界河流动态监测由流域水环境监测中心负责，其他河流由省级或地市级水环境监测中心负责。

(3) 水污染动态监测信息可利用现有水利系统水文报讯设施或其他通讯工具等迅速、准确传递。

(4) 各动态水质站点的水质、水量监测信息应及时向上级水环境监测中心传报；上游水质站点应向下游水质站点或有关单位传报。

(5) 各级水环境监测中心可根据监测结果，编制或发布水质公报、简报。

7.4 水质数据处理及整编、汇编

7.4.1 数据记录与处理

1. 数据记录要求

(1) 用钢笔或档案圆珠笔及时填写在原始记录表格中，不得记在纸片或其他本子上再誊抄。

(2) 填写记录字迹应端正，内容真实、准确、完整，不得随意涂改。

(3) 改正时应在原数据上划一横线，再将正确数据填写在其上方，不得涂擦、挖补。

(4) 对带数据自动记录和处理功能的仪器，将测试数据转抄在记录表上，并同时附上仪器记录纸；若记录纸不能长期保存（如热敏纸），采用复印件，并做必要的注解。

(5) 原始记录应有测试、校核等人员签名，校核人要求具有5年以上分析测试工作经验。

(6) 记录内容包括检测过程中出现的问题、异常现象及处理方法等说明。

2. 数据记录中有效位数的确定原则

(1) 根据计量器具的精度和仪器刻度来确定，不得任意增删。

(2) 按所用分析方法最低检出浓度的有效位数确定。

(3) 来自同一个正态分布的数据量多于4个时，其均值的有效数字位数可比原位数增加1位。

(4) 精密度按所用分析方法最低检出浓度的有效位数确定，只有当测次超过8次时，统计值可多取1位。

(5) 极差、平均偏差、标准偏差按方法最低检出浓度确定有效数字的位数。

(6) 相对平均偏差、相对标准偏差、检出率、超标率等以百分数表示，视数值大小，取至小数点后1~2位。

3. 数据检查与处理以及运算规则

(1) 测定数据中如有可疑值，经检查由非操作失误引起，可采用Dixon法或Grubbs法等检验同组测定数据的一致性后，再决定其取舍。

(2) 数据的运算应按以下规则进行：当数据加减时，其结果的小数点后保留位数

与各数中小数最少者相同；当各数相乘、相除时，其结果的小数点后保留位数与各数中有效数字最少者相同；尾数的取舍按“四舍六入五单双”原则处理，当尾数左边一个数为5，其右的数字不全为零时则进一，其右边全部数字为零时，以保留数的末位的奇偶决定进舍，奇进偶（含零）舍；数据的修约只能进行1次，计算过程中的中间结果不必修约。

4. 分析结果的表示应符合以下要求

- (1) 使用法定计量单位及符号等。
- (2) 水质项目中除水温（℃），电导率 [$\mu\text{s}/\text{cm}$ （25℃）]、氧化还原电位（mV）、细菌总数（个/mL）、大肠菌群（个/L）、透明度（cm）外，其余单位均为 mg/L。
- (3) 底质、悬移质及生物体中的含量均用 mg/kg 表示。
- (4) 平行样测定结果用均值表示。
- (5) 当测定结果低于分析方法的最低检出浓度时，用“<DL”表示，并按 1/2 最低检出浓度值参加统计处理。
- (6) 测定精密度、准确度用偏（误）差值表示。
- (7) 检出率、超标率用百分数表示。

7.4.2 资料整编、汇编

1. 资料整编、汇编一般规定

(1) 各级水环境监测中心对监测原始资料，均应进行系统、规范化整理分析，按分级管理要求进行整编、汇编，并向上级水环境监测中心报送成果。

(2) 水环境监测中心应按检测流程与质量管理体系对原始测试结果进行核查，发现问题应及时处理，以确保检测成果质量。

(3) 原始资料检查内容包括样品的采集、保存、运送过程、分析方法的选用及检测过程、自控结果和各种原始记录（如试剂、基准、标准溶液、试剂配制与标定记录、样品测试记录、校正曲线等），并对资料合理性进行检查。

(4) 本节仅列出地表水监测资料的整编、汇编要求，地下水、大气降水和排污口等调查与监测资料的整编、汇编，可参照执行。

2. 资料整编

(1) 原始资料整编。

1) 原始资料的初步整编工作以基层水环境监测中心为单位进行。

2) 原始资料自检测任务书、采样记录、送样单至最终检测报告及有关说明等原始记录，经检查审核后，应装订成册，以便于保管备查。

3) 资料按省、自治区和直辖市等进行分类整编，填制或绘制有关整编、汇编用图表；编制有关说明材料及检查初步整编成果。

(2) 整编内容。

1) 编制水质站监测情况说明表及位置图。

2) 编制监测成果表。

3) 编制监测成果特征值年统计表。

3. 资料汇编方式与要求

(1) 资料汇编以流域为单位进行，各省、自治区、直辖市水环境监测中心应于次

年4月底前完成资料整编汇编工作。

(2) 汇编单位组织对资料进行复审, 复审方式可采取集中式或分寄式等, 一般抽审5%~15%的成果表和部分原始资料, 如发现错误, 需进行全面检查。

(3) 汇编内容主要包括: ①资料合理性检查及审核; ②编制汇编图表: 如水质站及断面一览表、水质站及断面分布图、资料索引、其他图表。

(4) 送交汇编的图表, 应经过校(初校、复校)、审并达到项目齐全, 图表完整, 方法正确, 资料可靠, 说明完备, 字迹清晰, 要求成果表中无大错, 一般错误率不得大于1/10000。

(5) 汇编成果应包括: ①资料索引表; ②编制说明; ③水质站及断面一览表; ④水质站及断面分布图; ⑤水质站监测情况说明表及位置图; ⑥监测成果表; ⑦监测成果特征值年统计表。

监测资料计算机整编、汇编应统一采用水利系统水环境监测资料整编、汇编程序。整编、汇编的成果资料以纸质文字和磁盘、光盘等载体存储与传递。

7.4.3 资料保存与要求

资料包括纸质文字资料及磁盘、光盘等其他介质记录的资料。主要保存内容如下。

- (1) 各种原始记录。
- (2) 整编、汇编成果图表。
- (3) 整编、汇编情况说明书。

资料保存应符合以下要求。

(1) 按档案管理规定对资料进行系统归档保存, 原始资料保存期限5年; 整编、汇编成果资料长期保存; 注意安全。

(2) 磁介质资料存放有防潮、防磁措施, 并按载体保存限期及时转录。

(3) 除原始资料外, 整编、汇编成果资料有备份并存放于不同地点。

复 习 题

7-1 水质信息采集与水文信息采集的异同点有哪些? 为什么在采集水质信息时要同时采集水文信息?

7-2 河流污染源监测的方法有哪些? 设想一下针对国内的现状, 采用何种监测手段更为有效?

7-3 为什么在工业区或城镇附近的河段应在汛前一次大雨和久旱后第一次大雨产流后, 要增加一次采样?

7-4 需要对××河流的水环境容量进行计算, 首先要去收集这条河流的相关信息。那么需要收集哪些信息? 如何收集? 试做一份“××河流的水环境容量计算所需信息及获取这些信息的项目计划书”。

7-5 试做一份“××流域水质信息采集项目计划书”。

第 8 章

实测期以前水文信息的采集

水利工程的设计需要进行洪水峰量频率计算，其计算成果的可信程度是与所用资料的代表性密切相关的，而资料的代表性又主要受到资料系列长短的制约。绪论中介绍了我国 96% 的水文测站都是新中国成立后设立的，至今仅有不足 60 年的实测资料系列。重要水利工程如长江三峡、黄河小浪底等都需要千年设计、万年校核洪水，设计洪水年最大值取样法每年的实测值才提供一个最大值。显然，这仅有不足 60 年的实测资料系列远远不够充分，而再等 100 年仍然不充分。所以对洪水峰量频率计算来说，一方面，要开展在仅有短系列资料时洪水计算方法的研究；另一方面，要设法获取实测资料以前的大洪水资料。本章简单介绍后者。

8.1 水 文 调 查

8.1.1 目的和意义

为了研究各种水体的运动规律，目前广泛地采用定点观测、流动查勘（水文查勘）和实验研究 3 种方法。

基本水文站网的定位观测工作，是目前观察水文现象、搜集水文资料的主要途径。但是，定位观测受到时间和空间的限制，往往不能满足生产的需要，因此必须通过水文调查来补充定位观测的不足，使水文资料更加系统完整，更好地满足水文、水资源开发利用、水利水电建设以及其他国民经济建设的需要。

只有定位观测的水文资料，流域面上的资料很少，给分析水文规律带来困难。特别是人类活动影响很大，每年情况都不一样，不调查清楚，定位观测资料就失去意义。在我国，群众性治山治水的运动日益深入，水利建设的迅速发展，许多地区的河流状况、水文现象发生了变化。例如，在水利工程较多的地区，流域内大量的水被引用或拦蓄起来，平原河流互相串通，或从外流域引进客水。因此，水文站断面上测得的水量，无论在数值上以及分配规律上均不能代表河道径流的实况，定位观测资料就不能满足应用。所以，必须把定位观测和流域水文调查结合起来，通过调查，弄清水

利工程对河道洪、枯水流量的影响程度，为水利工程地区水文资料的还原计算、水文规律的分析提供依据。

我国幅员辽阔，河流众多。多数河流，定位观测所搜集的水文资料，系列较短。而且，水文资料的累积，无论在资料的系列上或是测站的地区分布上，都还不能满足生产发展的需要。特别是稀遇的暴雨洪水，是进行规划的宝贵资料。这种暴雨洪水，有的出现在建水文站之前，有的出现在无水文站的地区，有的虽出现在有水文站的河流上，但由于测洪能力不足或其他原因未能测得完整的资料等。因此，必须通过水文调查，搜集这些宝贵水文资料或插补延长水文资料系列，以满足规划、设计和分析研究工作的需要。

在较短的时间里，对整个或部分水体，在面上（流域内）的一系列测点进行水文现象的观测或调查，以研究水文现象的方法，称为流动查勘或水文查勘。如将查勘内容扩大到地形测量、地质和水文地质查勘、水利工程及社会经济情况的调查等方面，则称为水文调查。所以，水文调查是全面搜集与实地查明水文要素及其影响因素如自然地理条件、气候因素及人类活动的影响等的变化（包括数量及性质）的资料，以供水文分析研究和应用。由此可见，水文调查是水文测验工作的重要组成部分，是水文、水资源开发利用以及各项水利水电工程建设中不可缺少的工作。

总之，凡是水文站的定位观测没有搜集到的水文资料，都可以通过水文调查加以补充。所以，水文调查是水文测验工作的组成部分，是掌握水文情况、搜集水文资料的重要环节，应当有计划有组织地开展。目前，在大量兴建引、蓄水工程的流域内，能否逐年地定期进行水文调查，已是衡量水文工作优劣、水文资料质量高低的一项主要内容。

8.1.2 任务和范围

水文调查的主要任务是搜集水体（河流、湖泊水库等）的全部特征资料及流域上影响径流的有关自然地理因素、水文气象因素等基本资料，包括受人类活动影响而改变的自然地理、径流、泥沙等方面的资料，作为定点观测的补充，以供揭露水资源的规律，研究水资源的综合开发利用的可能性及方法之用；同时也为水利规划设计、各种水利措施和水工建筑物搜集所需的专门水文水资源基本资料，并为工程的规划设计施工及管理应用提供水文、水资源方面的科学依据。

根据上述任务，水文调查可分为以下几种。

1. 流域调查

流域调查是设立新水文站、进行水资源考察和水文区划等工作时必须进行的基础工作。调查的目的是查明流域上影响径流的自然地理因素、气候因素及人类活动的因素，为水文预报、水文分析计算和水资源估算与评价提供资料。调查时应根据不同的需要，突出不同的重点。

2. 水文专门调查

水文专门调查主要是对洪水、暴雨及枯水等水文要素的调查。重点为调查测站以外的其他必要的地点的特大洪水流量、暴雨及最小枯水流量等水文要素。如在测站上因故漏测了这些水文要素，也应进行调查。对于历史洪水、枯水调查应有计划地与有

关部门配合进行。在资料较完整时，可按流域或地区单独整编刊印。当遇年特大洪水、暴雨时，也应组织调查，其成果应列入水文年鉴刊印。

3. 水文站定位观测的补充调查

水文站定位观测的补充调查是为了弄清水文站定位观测资料受到水利设施和分洪决口等因素影响的情况，为使用水文资料和分析水文规律提供重要依据而进行的。这类调查应普遍在测站受水利设施、分洪决口影响显著的河流进行。其成果应列入水文年鉴刊印。

4. 其他调查

其他调查是为当地当时的生产建设服务而进行的专项调查，例如在以下一些情况进行的调查。

为了防汛需要而进行的可能淹没范围的调查：调查测站上下游各次较大洪水的沿河水面线及厂矿、机关、村庄、田地等高程，弄清淹没范围，编制图表，以便在洪水时，预报出各地各单位可能受到洪水威胁的具体情况，给防汛斗争当好参谋。

为了抗旱需要进行的水源调查：调查各江河枯水流量，水库、塘坝的蓄水情况，弄清抗旱可利用的水源。

为了弄清江河湖库污染原因而进行的污染调查；河网地区为了算清水账而进行的一定区域的进、出水量与河网蓄水量的调查；此外，还有河流调查、盐碱调查、大潮调查以及冰凌调查等。

以上4种情况的调查，第一至第三类调查一般在水文站控制的流域范围内进行调查。第四类调查，其范围根据需要而确定。

8.1.3 组织准备工作

1. 明确任务，确定查勘原则

每个调查组成员应了解调查的任务和要求，明确调查的目的，学习调查方法和有关规定。由于查勘任务不同，查勘的范围及人力、物力、时间的限制也不同，因此查勘的内容和要求就有差异。应根据不同任务要求，确定查勘原则。查勘原则有以下几种。

(1) 线的查勘原则：实质上是沿河道进行查勘，适当地结合全面资料的搜集，这对范围大，人力及时间较少时比较适合。

(2) 点面结合原则：当查勘范围较大时，点面结合的调查既能满足要求又比较经济。

(3) 面的调查原则：对调查范围不大且需要详细了解全面的资料时，采用面的调查原则。

2. 搜集资料，编制调查大纲

搜集资料包括以下几种。

(1) 流域及调查河段的详细地形图（特别注意搜集1/5万、1/10万以及较大比例尺的地形图，这是查勘时不可缺少的资料），河道纵、横断面图等，有可能的，还应搜集航测照片、卫星照片。

(2) 沿河水准点高程、位置的记载表及其所采用的水准基面。

(3) 流域的水利规划资料，水利工程设施情况，水文气象图集、手册等资料。

(4) 有关的流域河段的查勘报告、地方志及水利历史文献等；摘录有关洪水、暴雨、干旱情况及流域自然地理特征等资料。

(5) 有关调查河段附近水文测站的考证图表，历史洪水位、洪峰流量，水位流量关系曲线，比降、糙率以及上下游水文站洪水预报图表等资料。

(6) 了解调查地区的交通情况，以便选择交通路线。

对搜集的资料进行初步整理、摘录，以便在编制调查大纲、制定工作计划及最后编写报告时使用。

编制查勘大纲应包括：查勘的目的要求，查勘原则及查勘范围，查勘的内容、方法，查勘报告中所需要的图表、资料、数据等。

3. 准备必要的仪器工具及用品

一般应携带的测绘、计算工具有：水准仪、经纬仪、望远镜、照相机、罗盘、气压计、秒表、水准尺、测杆、皮尺、求积仪、计算器等，必要时还应携带救生设备。还需准备各种文具、有关的表、簿等。

4. 编制预算，拟定工作计划

在上述准备工作的基础上，根据调查目的任务及人力物力情况，编制预算，拟定调查的工作计划。

查勘出发前应预制必要图表，以备野外校核。调查工作计划应包括查勘路线的确定，日程的安排以及工作方法等。当然，工作计划必须在实际执行过程中进行修改补充。

8.1.4 调查方法

由于进行水文调查的目的要求不同，内容也有差异，因此调查方法也会有所不同。归纳起来大致从如下几方面进行调查。

(1) 到达调查地区后，应依靠当地政府机关，向他们汇报调查工作的目的意义，请他们协助解决有关调查中的问题，介绍有关情况。

(2) 深入调查访问，向有关的技术人员或群众进行调查访问。例如洪水调查，可请熟悉洪水情况的群众到现场指认洪水痕迹，并按调查内容，细致、深入、全面地访问。又如灌溉定额、灌溉面积等情况，可向当地技术人员或群众调查了解。召开座谈会，这也是调查访问的一种形式。例如进行洪水、枯水调查时，尤其是历史上发生的洪水、枯水的调查，可以组织有关的群众座谈，以便共同回忆，互相启发，彼此印证，以求得比较正确的结论。

(3) 向有关部门和群众搜集有关的调查资料、文献。例如，在调查地区，可向抗旱防汛、施工、管理、交通等部门，乡镇以及群众搜集有关的水文资料。

(4) 野外调查与测量。在对调查地区的概况有初步了解后，应进行现场的查勘和调查。例如洪水调查时应到现场了解各段河道顺直情况，河床、断面、河滩的覆盖物情况，中间有无支流、分流等。进一步了解河流水流情势，洪水发生情况，河道变化情况，搜集洪水痕迹的地点、标志等，以作为选择调查测量河段的根据。又如对分洪、决口等情况，也应到现场进行野外调查。

在上述各种调查的基础上，根据调查的要求进行现场测量。

以上调查方法，可以穿插进行。

8.2 历史洪水调查

8.2.1 可能性

中国有 5000 多年的文明史，不少地方志中记载了洪、涝、旱等自然灾害，还有一些有关最高洪水位及洪水发生日期的碑记、石刻或痕迹，从中可以查到一些大洪水资料的记录，如公元前约 22 世纪，传说中的大禹治水，已经“随山刊木”（立木于河中），观测河水涨落；战国时李冰设于都江堰的石人；隋代的石刻水则；宋代的水则碑；最早成书于公元 6 世纪的《水经注》中，就记录了当时中国境内 1252 条河流的概况；此外，在我国多数河流沿岸，多伴有历史悠久的居民点和世代在那里定居的人民，根据他们的亲身经历和从祖辈流传下来的传说，都是取得历史洪水资料的重要来源。

8.2.2 调查方法

1. 实地调查

进行历史洪水调查时，不仅要调查最高洪水位、洪水涨落过程和洪水发生日期，还应注意调查洪水成因，对特殊原因造成的洪水（溃坝、冰湖溃决等）应加以说明，以便在设计洪水计算时确定处理办法。另外，还应调查了解与估算流量有关的各项要素。历史洪水年代较远，有的河道自然条件的变化和人类活动的影响，可能使河道的泄洪能力发生变化，在调查洪水中所施测的横断面、河床质的组成等情况，都只反映调查时的状况，与历史洪水发生时期的情况可能有较大的差别，因而影响流量计算的精度。如黄河龙门河段，近 100 年来河床淤高近 10m，这种变化对于合理确定计算参数有很大影响，因此应引起足够重视。对调查到的大洪水，还应从流域雨情、水情、灾情等方面进行综合分析。

平原地区地势平坦，河网密布，湖沼甚多，流向往复，洪水时溃堤破坏，造成洪水过程严重变形。因此，平原地区的洪水调查，应充分了解分洪或滞洪、蓄洪的地点、时间、过程及分洪水流的去向等，以便进行还原计算。涝渍地区还应注意了解成灾雨型的特点、最高积水水位和相应影响范围、积水排泄所需时间，以及涝渍地区洪水与承泄区最高水位的遭遇情况等。

滨海及河口感潮段历史潮位的调查，应看重调查最高、最低潮水位及发生日期、持续时间及过程，同时宜收集台风（热带气旋）路径、风向风速、浪高等资料，调查分析天文潮与风暴潮的组合情况。对感潮河段还应调查上游洪水与高潮位的遭遇情况。

通过现场调查测量，一般可以取得调查期内若干次历史大洪水的定量资料。调查期的长度在我国人口稠密的中部和东部地区一般可达 200 年，西部以及边远地区约可达 100 年。

2. 文献考证

我国历史文献较为丰富，通过文献和文物资料的考证，可以了解到更远年代的大洪水和高潮位情况。文献记载多属于描述性质，大多难以定量，但可以了解到在文献

考证期内大洪水和高潮位发生的年份、次数、量级及大小顺位。根据文献记载中有关洪水淹没地物、建筑物的破坏程度等与已有的文字描述及有定量的调查洪水与潮位的对比,可以分析各次洪水和潮位的量级范围与大小序位,以合理确定历史洪水的重现期。

8.2.3 在我国的进展情况

(1) 我国的历史洪水调查测量,始于1915年督办广东治河事宜处为西江流域防洪规划进行的洪水调查。

(2) 我国的水利水电工程设计中,普遍考虑了历史调查洪水。据20世纪60年代中期设计的50座大型水库资料统计,在设计时所使用的实测资料系列长度平均仅28年,其中55%短于30年;使用了可以定量的历史洪水资料150个,平均每个工程3个;历史洪水的平均重现期为143年,为实测系列平均长度的5倍。

(3) 现已完成了长江、黄河、辽河、海河、淮河、珠江及全国各中小河流共11000个河段上的历史洪水调查测量;自1979年开始了全国性的历史洪水调查资料整编工作,已汇编成《中华人民共和国洪水调查资料》;在此基础上,选择了全国有代表性的自1842年以来的91场历史大洪水进行场次汇编,将每场洪水的雨情、水情、灾情编辑成既有实际资料又有科学分析的、可供参考应用的《中国历史大洪水》。

8.2.4 我国历史上的洪水灾害

我国位于世界上著名的季风气候区,受太平洋和印度洋季风的影响,冬春季雨量稀少,气候干旱,夏秋季温湿多雨,洪涝灾害频繁。据不完全统计,自公元前206年到1949年的2155年间,全国各地较大的洪水灾害有1092次,平均每两年一次。20世纪以来,我国先后发生多次重大洪水,造成严重的灾害。

1915年珠江流域的西江、北江发生特大洪水,西江梧州站洪峰流量达 $54500\text{m}^3/\text{s}$,北江横石站洪峰流量达 $21000\text{m}^3/\text{s}$,为近200年来的最大洪水。由于洪水很大,广西、广东两省受灾人口达600万,淹没农田1400万亩。其中珠江三角洲地区水灾最为严重,有379万人受灾,648万亩农田被淹,广州市区大部分被淹,西关一带,水深丈余。

1931年长江淮河发生特大洪水,长江汉口站最高水位28.28m,自江陵至汉口段决口17处,汉口至南京沿江超过警戒水位时间长达2~3个月,沿江城市尽被水淹,武汉三镇水淹达百日之久。淮河中渡站洪峰流量达 $16200\text{m}^3/\text{s}$,蚌埠上下淮北大堤100余里尽行溃决。与此同时,珠江、黄河中游也发生大洪水,北江横石站洪峰流量 $17200\text{m}^3/\text{s}$,仅次于1915年和1982年。黄河支流伊洛河发生百年来最大洪水,伊河龙门镇和洛河洛阳站洪峰流量分别达到 $10400\text{m}^3/\text{s}$ 和 $11100\text{m}^3/\text{s}$ 。该年洪水水灾范围极广,全国有16个省(自治区),659个县市受灾。灾情最重的湘、鄂、皖、赣、苏、鲁、豫、浙等8省,据统计受灾人口达6330万人,受灾农田1.73亿亩,死亡人口45.5万,各地直接经济损失达24.38亿银元。

1932年松花江特大洪水,干流哈尔滨站洪峰流量 $16200\text{m}^3/\text{s}$ (还原),为1898年有实测资料以来最大一次洪水,嫩江中下游以及松花江干流沿岸形成大范围的洪泛区,淹没耕地约3000万亩。灾情最重的哈尔滨市,水淹达1月之久,全市30万居民

中有 23.8 万人遭灾, 2 万多人死亡。

1933 年黄河大水, 陕县洪峰流量 $22000\text{m}^3/\text{s}$ 。为 1919 年有记录以来最大的一次洪水。黄河下游南北两岸大堤决口 50 多处, 陕、豫、鲁、皖、苏 5 省 67 个县受灾, 1000 万亩农田受淹, 灾民 400 万。

1935 年长江中下游地区发生特大暴雨, 暴雨中心五峰站连续 5 天降雨量达 1281.8mm , 5 天雨量大于 200mm 的笼罩面积 119400km^2 。澧水三江口洪峰流量 $31100\text{m}^3/\text{s}$, 汉江襄阳洪峰流量 $53000\text{m}^3/\text{s}$, 均为近百年来最大洪水, 长江干流汉口站洪峰流量 $64600\text{m}^3/\text{s}$, 超过 1931 年。湘、鄂、赣、皖四省造成严重的洪涝灾害, 有 152 个县受灾, 灾情最重的湘、鄂两省, 淹没农田 1700 万亩, 灾民 1000 万, 11 万人丧生。

1939 年海滦河大水, 7 月、8 月两月洪水总量约 304亿 m^3 , 仅次于 1963 年的水量, 为 1924 年以来第二大洪水。159 个县 900 万人受灾, 淹没农田 5200 万亩, 13300 人死亡。天津市 78% 市区被洪水淹没, 1 个月之后才渐次涸出, 城乡水灾损失 11.69 亿银元。

此外如 1904 年黄河、长江上游洪水, 1921 年淮河洪水, 1926 年长江中游洪水, 1930 年大凌河地区洪水, 1949 年长江洪水和珠江的西江洪水等, 也都造成了严重的水灾。

新中国成立以后, 国家组织广大人民群众进行大规模的水利建设, 主要江河的防洪能力有了很大提高, 但防洪标准仍然较低, 洪水灾害仍多次发生。

1954 年长江特大洪水, 干流最高水位普遍超过 1931 年, 经大力抗洪抢险, 保证了荆江大堤和武汉、南京市的安全, 但仍然淹没农田 4700 万亩, 3.3 万人死亡, 京广铁路近百日不能正常运行。

1958 年 7 月黄河发生大洪水, 花园口站洪峰流量达 $22300\text{m}^3/\text{s}$, 与 1933 年洪水相近, 经大力抗洪抢险, 勉强保住了黄河大堤免遭决口。

1963 年 8 月海河发生了历史上罕见的特大洪水, 6600 万亩耕地被淹, 受灾人口达 2200 万, 京广、津浦两大南北铁路一度中断, 直接损失达 60 亿元。

1975 年 8 月淮河上游洪汝河、沙颍河发生特大暴雨, 暴雨中心林庄 3 天 (8 月 5~7 日) 雨量达 1605mm , 5 天 (8 月 4~8 日) 雨量达 1631mm , 5 天降雨超过 200mm 的面积为 43800km^2 , 位于暴雨中心区的板桥、石漫滩两座大型水库漫坝失事, 造成极为惨重的灾难。据统计, 河南省有 29 个县市, 1700 万亩农田被淹, 其中 1100 万亩农田受到毁灭性的灾害, 1100 万人受灾, 85600 多人死难, 京广线冲毁 102km , 中断行车 18 天。

1981 年 7 月四川沱江、嘉陵江发生大洪水, 嘉陵江北碛洪峰流量 $44800\text{m}^3/\text{s}$, 约为 30 年一遇洪水。119 个县受灾, 53 个县市被淹, 受灾人口 1584 万人, 受灾农田 1300 万亩, 成渝、宝成、成昆铁路中断 10~20 天。

再如 1953 年第二松花江、辽河地区洪水, 1960 年浑河太子河地区洪水, 1969 年长江中下游及淮南山区洪水, 1968 年闽赣洪水, 1982 年闽赣洪水等均造成一省或数省严重水灾。至于局地性的洪灾, 更为频繁, 损失也很严重。

据统计, 1950~1983 年 34 年中我国平均每年洪涝受灾面积约 1.1 亿亩, 其中 3/4 以上集中在黄淮海和长江中下游平原, 为我国洪涝灾害最为严重的地区。随着城乡社会经济的发展, 人民生活水平的提高, 洪涝灾害造成的损失越来越大, 成为我国

国民经济发展和社会安定的一个严重问题。据联合国救灾协作局的统计，全球洪涝灾害造成的损失和人员伤亡，在 15 种自然灾害中居于首位，我国也是如此。

8.3 古洪水研究

8.3.1 古洪水概述

古洪水指的是第四纪全新世以来至可考证的历史洪水期以前这一时期内流域上已发生的大洪水。古洪水研究是利用第四纪地质学、沉积学、地层学、地貌学、年代学、水力学、水文学等多学科理论和方法，寻找全新世以来（距今约 10000aBP）发生的大洪水在流域上的河流及湖泊某些部位留下的洪水沉积物，进而根据洪水沉积物的沉积特征和对其中有机物进行放射性同位素测年，以确定洪水的流量和发生的年代，并依据所得的古地理、古气候、古环境的资料对流域第四纪环境演变规律进行恢复构建。因为洪水沉积物是特大洪水留下的真实物理信息，而放射性同位素测年技术已具有相当的精度，所以在河流及湖泊地貌基本稳定的情况下，用古洪水研究方法取得古洪水信息不失为一条有坚实物理根据的途径。古洪水研究方法可以给出流域上的河流及湖泊全新世以来发生过的多场古洪水信息，因此它可以较为真实地给出流域上大洪水的编年史。

8.3.2 原理和方法

洪水时期的河流及湖泊水面上漂流着由流域面上带来的孢子、花粉、草木、碎叶、根茎及有机质较多的泥沙等组成的悬浮质。因为洪水过程从涨水至退水，其间有一个洪峰，而洪峰时刻产生短暂的平流，此时的悬浮质漂流物在河流两岸水位达到最高且流速近乎 0 的水流停滞处所如洞穴、平缓岸坡、支流河口的回水末端等逐渐沉积。退水之后这些沉积如遇有利的自然崩坍泥土或坡积物（指高处基岩风化物质，由于重力作用，沿斜坡向下运动，堆积在山坡和坡脚下的堆积物）所覆盖掩埋，得以长久保存下来，这就是洪水平流沉积物。图 8-1 是峡谷和基岩河谷中各种洪水沉积物的典型分布横断面，由多种沉积类型叠加的情况，除洞穴、支流河口或支流回水末端有洪水平流沉积外，刷痕、沙线也是特大洪水造成的。图 8-2 是河流洪水沉积的平

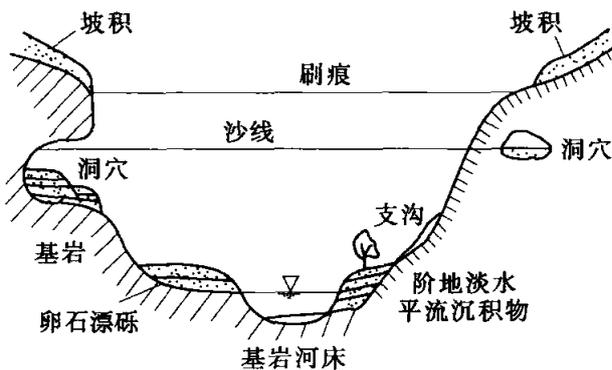


图 8-1 峡谷基岩河谷中的各种沉积物



图 8-2 河流洪水平流沉积物分布平面图

面分布，图 8-2 中提供了多种有利洪水平流沉积物沉积的处所和沉积环境，如河岸的洞穴、支流（或支沟）河口回水处，弯道凹岸顶冲处的支沟内，凸岸、矾头的上、下游回水处，河道束狭上游两侧回水处，河道突然展宽的下游回水处等。相对河流而言，湖泊周边的洪水平流沉积物沉积的处所和沉积环境更为有利。

如若能在上述洪水平流沉积物顶面采取样品，可以得到如下几种信息。

(1) 对沉积物顶面的高程和沉积环境加以分析研究，特别是未经污染的洞穴和支流（或支沟）回水末端尖灭点等处，可望求得古洪水水位。

(2) 根据年代学原理，采用现代测年技术，如¹⁴C 年代测定等，可以根据所取样品中有机物的放射性强度，按衰变原理推求洪水事件的发生年代。

(3) 洪水在河段中某一处因条件不具备而无沉积或沉积后因种种原因而未能够保存下来，但可能在河段中的其他处所留有沉积物，因而同次洪水沉积物可能在河段中多处发现，借此可以定出洪水水面比降。然后采用水力学模型或水位流量关系推出洪水流量。

(4) 由多次洪水水面线可以推得多次洪水，从而求得古洪水系列，见图 8-3。

(5) 由地层上钻孔所取得的沉积资料，进行第四纪环境研究的分析化验，提供流域第四纪环境演变规律进行恢复构建所需的古地理、古气候、古环境的信息。

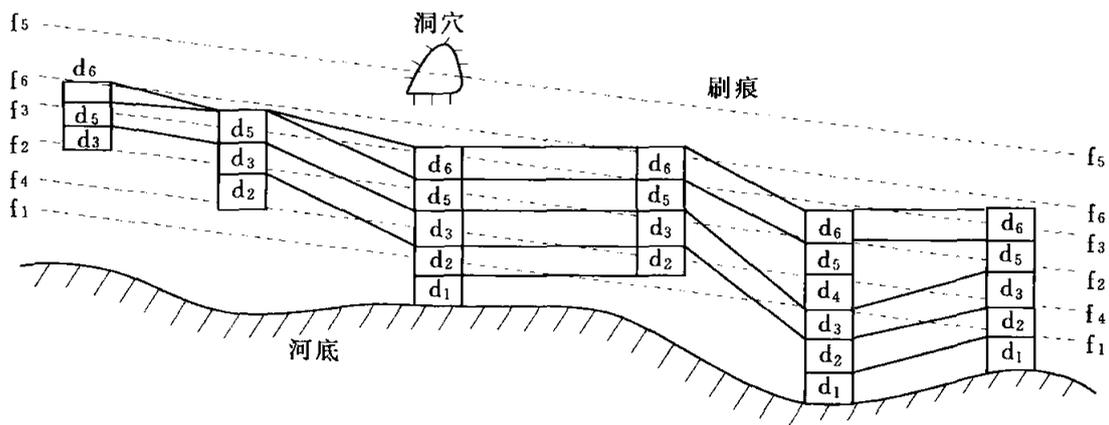


图 8-3 沿研究河段纵向的多断面及垂向上的多次洪水

d—沉积物顶面；f 洪水水面曲线

利用上述信息可以求得年代久远的古洪水，一般可得到距今 1 万年（全新世）的大洪水资料及恢复构建流域第四纪环境演变规律的资料。

8.3.3 古洪水沉积学

古洪水信息的取得，皆来源于大洪水信息的载体——古洪水平流沉积物。因此，如何准确判定和取得古洪水平流沉积物，是古洪水研究过程中的关键点之一。

1. 古洪水平流沉积物的野外特征

(1) 沉积环境。国外的研究者们经过模型实验和野外观测认为洪水平流沉积物极可能产生于如下支流河口：与主流夹角在 $50^{\circ} \sim 130^{\circ}$ 之间，在主流河道相对较直且坡度较小河段上，所在流域无山洪暴发，自身坡度也较小。

从淮河流域西淝河响洪甸河段、长江三峡太平溪至南津关段、黄河三门峡至小浪

底坝下及滹沱河岗南至黄壁庄、冶河平山段等处已发现的近 200 处的古洪水平流沉积，多分布在山地丘陵区长数十公里狭窄河段内相对展宽段的一侧，或两侧的部分缓倾斜岸坡的平台上，不仅该缓倾斜岸坡平台必定曾被古洪水漫淹并留下平流沉积，而且只有该平流沉积很快被其他碎屑物质堆积掩埋起来，才得以长久地保存下来。

在上述已进行了古洪水研究的河段，已发现的赋存古洪水平流沉积的缓倾斜岸坡平台，大体可分为以下 4 种地貌类型。

- 1) 长期风化剥蚀形成的或较厚残坡积物掩覆的倾斜平缓的岸坡阶地。
- 2) 小支流沟谷沟口的锥状堆积体，有的地方称为（古）溪口滩或冲出堆。
- 3) 陡岸坡前的重力堆积体。
- 4) 残余高漫滩后缘或低阶地前缘。

掩埋缓倾斜岸坡平台上的古洪水平流沉积，主要是顺坡下来的碎屑洪水坡积物，它们的显著特点是，层理不清，分选性差，并含有小岩块碎石。

一般情况下，能在缓倾斜岸坡平台前缘的垂直剖面上找出古洪水平流沉积夹层，少数情况下需布置开挖剖面的工程才得以揭示。

(2) 沉积构造。上述研究河段的部分样品，取自于缓倾斜岸坡平台剖面中的古洪水平流沉积夹层，具有如下特征。

1) 一般厚度几厘米到数十厘米，粒度较细且均匀。这是因为近岸边处的洪水流速近乎为 0，此时水流携带悬浮质泥沙的能力大大减小，稍微粗一点的悬浮质泥沙已在此前离岸边较远处沉积，因此近岸边处的悬浮质泥沙含量少而且均匀。

2) 沉积夹层的结构较紧实。这是因为这些泥沙颗粒较细，因而相互之间的空隙小，加之沉积时间长，自身重力作用加上覆盖在其上的覆盖物重力作用，使得沉积逐渐压实，从而形成较紧实的结构。

3) 沉积夹层具有发育极微薄的近水平层理或波状纹理，这是因为洪水平流及其后的退水过程中，由于逐步分层，或受到风、波浪的扰动影响而形成的，层理是洪水平流沉积判断的重要依据之一。

4) 沉积物的颜色由图 8-4 可以清晰地看到黄河古洪水平流沉积物与当地坡积物的颜色有明显的差异。这主要是因为两种物质的来源不同、组成成分不同所致。图 8-4 中干流上带来的沉积物呈浅白色，而当地坡积物的颜色较深。长江三峡河段三

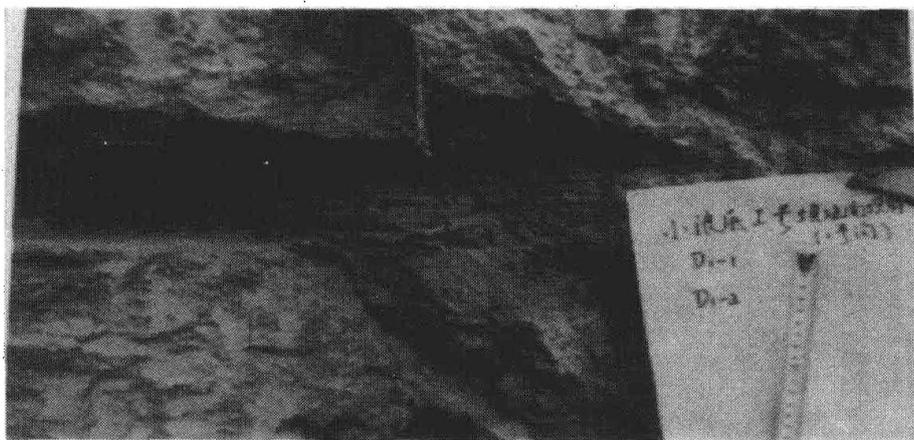


图 8-4 河南孟津赤河滩村东 1 号沟口锥状堆积体中的古洪水平流沉积夹层

斗坪处的干流古洪水平流沉积却颜色偏深，呈褐红色，当地老人称之为“陈江泥”，意为陈年江中所带来的泥。而当地坡积物主要是由富含角闪石的岩石风化碎屑物质，呈浅黄色，差异十分明显。

5) 在古洪水平流沉积的沉积构造特征中存在着发育极微薄近水平层理的分层标志亦是颜色的深浅或粒度的差别。如黄河三门峡至小浪底河段的古洪水平流沉积的微薄层理(图8-5)，黏土质层颜色偏深，粉沙质层颜色偏浅，单层厚度小于1~2mm不等，有的是颜色偏红的胶状土质膜。

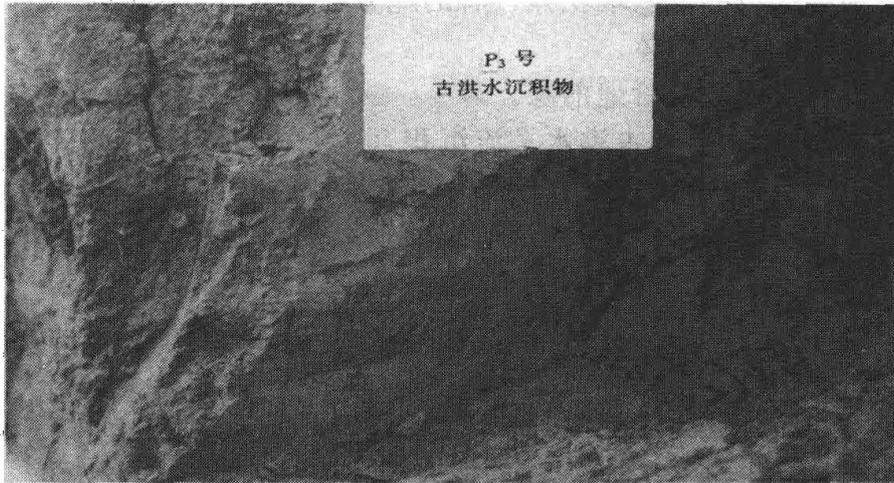


图8-5 河南孟津赤河滩村前高漫滩后缘上的古洪水平流沉积层

上述4条河流研究河段的古洪水平流沉积物与当地洪水沉积物是有明显差别的。

(3) 沉积末端。上述研究河段所取样品中匍匐在缓倾斜岸坡平台上的这类古洪水平流沉积，还具有随地形起伏末端翘起的特点。图8-6所示的PD-03点古洪水平流沉积物的尖灭点翘起端延伸的水平距离约45~50cm，末端翘起高度5~10cm不等；而长江三峡河段、西淅河响洪甸河段则由于两边河岸较陡，即使支流冲沟一样，也使得古洪水平流沉积尖灭点翘起端延伸的水平距离较短，有些地方仅有20cm。



图8-6 河南孟津赤河滩村前高漫滩后缘上的古洪水平流沉积层 PD-03点

2. 古洪水平流沉积物的室内分析特征

为进一步确定按前面所述的古洪水平流沉积特征经野外鉴别后取得的样品以及相应于沉积样品的洪水大致发生时期、洪水来源等, 还需利用现代科技手段, 对样品进行实验室分析。

(1) 粒度特征。对沉积物分析研究的最基本手段之一是粒度分析, 研究组成沉积物中各种粗细颗粒的机械组成, 也就是沉积物的粒度大小及各粒级所占百分数, 并计算分选参数等。这种分析有助于推断沉积物的搬运动力及沉积环境, 从而推断其成因类型。

按照粒级分类, 粉砂粒径 D 应在 $0.0039 \sim 0.00625\text{mm}$ 之间, 其相应的中值 $D_{50} = 4 \sim 8\Phi$ ($\Phi = -\log_2 D$), 黏土粒级 $D < 0.0039\text{mm}$, 相应的中值为 8Φ , 中值粒径是量度沉积物颗粒平均大小的一种指标。

分选性指沉积物颗粒粗细的均匀程度。不同成因类型的沉积物分选大不相同。经过流水长距离搬运后再沉积的物质, 分选性较好, 短程急流搬运的物质如泥石流、坡积物、溪口滩等分选性差。分选性的求算在古洪水研究中采用克伦宾公式, 即根据颗粒大小划分粒级及其各粒级的百分含量, 取其在总含量中达 25% 的颗粒粒径值为 D_{25} (第 1 分位数) 和 75% 颗粒粒径值 D_{75} (第 3 分位数) 进行比较, 按式 (8-1) 计算得分选系数。

$$Q_{D\Phi} = \frac{\Phi_{75} - \Phi_{25}}{2} \quad (8-1)$$

颗粒粗细较均匀者, 即 $Q_{D\Phi} = 0 \sim 1.4$ 者, 称分选性好; 当主要粒级的颗粒百分含量占到 75% ~ 50%, 即 $Q_{D\Phi} = 1.4 \sim 2.2$ 者, 称分选中等; 当没有一种粒级的颗粒含量超过 50% 或颗粒粗细相差很大时, 即 $Q_{D\Phi} > 2.2$, 则称分选性差。

前已述及, 根据古洪水平流沉积的机理, 悬浮质在水流流速近乎为 0 (而不完全为 0) 的岸边沉积, 因而颗粒较细且分选性较好。

在黄河三门峡至小浪底河段进行的古洪水平流沉积调查中, 特地做了沉积样品的对比分析, 发现缓倾斜岸坡平台上被埋藏的古洪水平流沉积, 与现代滩地表层沉积及滩面上浅坑中滞水沉积相比, 在沉积粒度多项指标方面均有明显的特殊性。其中平流沉积的含沙量仅占 2% ~ 3%, 含黏土颗粒 10% 左右, 比滩地表层的含沙量 (9% ~ 10%) 低, 而含黏土较偏高; 中值粒径 5.5Φ 左右, 分选系数 $0.6 \sim 1.2$ 左右, 比滩地表层沉积中值粒径较小而分选程度稍差, 与滩面上浅坑中的滞水沉积相比又正好相反。另外, 值得一提的是对于滩地沉积还具有平均粒度越粗者与洪水位距离越大的特点。

但就长江三峡与黄河小浪底研究河段的沉积样品相比较, 前者黏土较多, 粒径较细; 分选系数也比后者的差。

(2) 重矿物组成特征。矿物组合指沉积样品的矿物种类及其百分含量特征。当沉积物用重液分离之后, 一般把比重大于 2.89 [为常用重液三溴甲烷 (CHBr_3) 的比重] 的矿物称为重矿物。重矿物的种类繁多, 但物源的母岩不同, 沉积物的矿物组合也就不同。此外, 重矿物被搬运距离的远近, 与矿物的稳定程度有关。搬运的距离越远, 矿物的绝对含量越少, 其中不稳定矿物更少, 而稳定矿物的相对含量增高。因

此,利用沉积物中的特征矿物(又称指示矿物)来划分沉积,推测其物质来源,是一种很有效的方法。大河冲积物的物质来源比较广,因而出现种类比较多,并且百分含量比较稳定。另外大河冲积物多经流水远距离搬运,沉积物中不稳定矿物比较少见。某些特殊矿物的出现是支流汇入或当地基岩风化物质渗入的标志,而不稳定矿物的出现是近源物质渗入的标志,如橄榄石、斜方辉石、普通辉石、普通角闪石、黄铁矿、辰砂、闪锌矿、黄铜矿、蛇纹石、青砂等。不同的河流由于其所在地域的关系,上述不稳定矿物会有所不同。

洪水平流沉积样品的重矿物含量和组合特征与沉积的物质来源及其沉积特征密切相关。河流相沉积的重矿物含量一般比较高,且重矿种类较多。残坡积物的重矿含量一般较低,且种类单调,并与母岩关系密切。

古洪水平流沉积,与当地现代的滩地表层沉积相比,在所含重矿物种类或重矿物组合类型方面几乎完全一致,不同的是各种重矿物的百分含量及其重矿物的总含量在古洪水平流沉积中均较偏低;就长江三峡与黄河小浪底研究河段上所取洪水平流沉积物样品中所含重矿物的各自种类,说明在各自河段上从上至下有比较明显的一致性。个别样品缺失个别种类,可能与取样部位有关;而两条河流的平流沉积物样品相比较,由于其来源不同,其组成成分及含量上存在明显差别。如绿帘石、角闪石、木屑石、磷灰石等矿物的含量,前者是后者的数倍之多,而石榴石却又相反。也有部分矿物如磁铁矿、钻石相差不多。由于矿物组成成分上的差别,导致了沉积物颜色上的差别。总体说来,长江三峡研究河段所取样品的重矿物含量及几种主要重矿物含量的稳定性不如后者。

(3) 孢子花粉组合特征。孢子花粉分析的目的在于积累大量分析资料的基础上,对孢粉资料所反映的事件进行科学合理的解释。如应用孢粉组合划分地层相对时代,就是根据组合中一些典型的标志孢粉科属,甚至特有种为依据的。如早更新世孢粉组合中常含一定数量的孑遗种,这些孑遗种,到中更新世时所占百分比相对减少,甚至消失等。

应用孢粉组合还可再造古地理、恢复古气候。特别注意那些具有代表气候变化和环境变迁的科、属孢粉的消长变化,例如热带、亚热带植物出现较多,一般代表间冰期气候;如果孢粉组合中出现较多的耐寒冷成分,特别出现以喜冷成分占优势的组合,就有可能反映为冰期气候。水生植物的孢粉大量出现,无疑反映的代表水域扩大;相反,草本植物,尤其是耐干旱、喜盐碱的草本植物大量涌现,则准确反映地表干燥等。

应用孢粉资料还可直接进行地层层序和相对时代的对比工作,并可直接观察地层中各种变化情况。此外,松科和柔荑花序各科属花粉具有飞翔较远、散布范围很大、产量又相当丰富等特点,具有较大范围内的区域对比意义。而草本、小灌木和蕨类植物等孢粉散布较近,局限于较小范围内,虽不具有大范围区域对比意义,却具有足以说明自然环境的作用。从黄河小浪底部分沉积样品的孢子花粉分析鉴定结果得到以下结论。

1) 所含孢子花粉的总量比较少,尤其是粗颗粒沉积样品中所含孢子花粉的总量较稀少,这显然与洪水的沉积速率和沉积环境有关。颗粒偏粗的洪水沉积已接近于河床相或滨岸沉积,沉积物质来量较丰富且水流速度也较大。

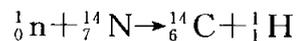
2) 所含孢子花粉种类较多, 已鉴定出的种类达 56 种。说明大河古洪水平流沉积的来源广泛。

3) 样品中所出现的孢子花粉均以耐干旱草本和蕨类为主, 经常出现水生草本和藻类, 而木本植物的花粉比较少。这些来自干旱或偏干旱河滩的孢子花粉, 也许能够说明恰恰是在流域气候比较偏干的时期发生了特大暴雨洪水。

4) 再沉积孢子花粉的出现, 即某地沉积体中的孢子花粉, 再次被冲蚀出来, 迁移到另外地方再沉积, 这些样品的年代就有可能比沉积物样品的实际年代偏老一些。

(4) 年代特征。现代科学技术条件下测定洪水平流沉积物的方法主要有以下 6 种: ^{14}C 法, 不平衡铀系法、钾-氩法、热释光法、电子自旋共振法、裂变径迹法。在上述 4 大江河的古洪水研究中, 主要采用 ^{14}C 测年法, 部分采用 TL 方法。为了进行验证, 也选送数个样品作加速器质谱仪法。

自然界中的 ^{14}C 主要是由于宇宙射线的中子 (^1_0n) 与大气中的氮 ($^{14}_7\text{N}$) 核发生核反应而形成的。其反应式为



新生的 ^{14}C 遇氧即被氧化成含有 ^{14}C 的 CO_2 。大气含有 CO_2 通过自然界碳的交换与循环而使大气圈、生物圈和水圈中含碳物质都具有 ^{14}C 放射性。这些物质中的 ^{14}C 含量一方面不断地获得新补充, 另一方面又按放射性衰变规律而不断减少。补充和衰减的结果, 使 ^{14}C 含量在所有含碳物质中保持动态平衡, 即 ^{14}C 在碳元素中所占比例几乎保持稳定值。

如果某含碳物质一旦停止了与大气的交换关系, 如生物死亡、碳酸盐的沉淀埋藏等, 则该物质中的 ^{14}C 得不到新的补充, 而原来含有的 ^{14}C 却按衰变指数减少, 每隔 5730 年 (^{14}C 的半衰期) 则减少为原来的一半。间隔年代越久, 则含量越少, 因此, 只要测出与大气发生过交换平衡的含碳样品中 ^{14}C 的比度, 就可以按公式 $T = \tau \ln \frac{A_0}{A}$ 计算出该样品与外界停止交换 ^{14}C 以来所经历的年代 T , 其中, A 为物质残留的 ^{14}C 放射性, A_0 为物质处于交换平衡状态的 ^{14}C 放射性; τ 为 ^{14}C 的平均寿命, $\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$, $T_{1/2}$ 为 ^{14}C 的半衰期。由于目前常规的 ^{14}C 测定年代方法, 无论是用正比计数管, 还是用液体闪烁计数器, 包括新发展的加速器质谱仪, 都是用粒子计数器对 ^{14}C 原子进行计数来测量 ^{14}C 原子的放射性衰变实验的。计数这种对离散型物理量的测量必然带有随机性, 因此测量结果也就带有统计误差, 见表 8-1。

表 8-1 不同本底水平的仪器测不同年代样品时年代值标准误差

样品年代 (a)	5730	11460	17190	22920	28650	34380	40110
本底 (cpm)	年代值标准误差 (a)						
5	84	128	216	391	741	1441	2840
2	76	108	167	281	505	949	1835
0.5	72	97	138	206	328	560	1008

从表8-1可见,样品年代愈老,年代误差值愈大,而且测量年代越久远的老样品,测量仪器本底对年代误差的影响越为明显。

常规 ^{14}C 测定年代是采用记录一定时间间隔内一定样品中 ^{14}C 原子衰变数目的方法,称衰变计数法。虽然这种方法在技术上已相当完善,一般用1~10g的样品碳测量精度可达到0.2%~0.5%,可测最高年限达4万~5万年,但此法对样品受限制时就有许多难以克服的困难。样品少了就意味着要花更长的计数时间和不可避免地会增加误差,在许多情况下甚至根本就无法测定。古洪水样品由于沉积物很薄及沉积部位保存等原因,样品中取得1~10g碳是一件很难的事情,有时少到无法做的情况,这时就得另辟途径。

长期以来,人们考虑到如果能直接清数样品中的 ^{14}C 原子数,这比等待记录 ^{14}C 原子衰变要灵敏得多。 ^{14}C 原子平均寿命是8000多年,假定样品碳中有8000个 ^{14}C 原子,人们大约等上1年才能记录到一次 ^{14}C 原子衰变。如能把原子从样品中直接挑出来清数,那么探测灵敏度可大大提高,这一方法称作原子计数(即加速器质谱计数)法。

此法是将 ^{14}C 样品经化学制备后引入加速器离子源,即电离后加速到高能,再应用近代核物理实验中发展起来的电荷剥离技术、射程过滤技术,以及 $\Delta E-E$ 探测技术等粒子分离鉴别技术,把 ^{14}C 离子挑选出来,实现对单个 ^{14}C 原子进行计数。其实质是将加速器质谱仪联合改进而成的超高灵敏质谱仪。它比普通最灵敏质谱仪的灵敏度至少要高5个数量级。故样品含碳量只要有1mg即可精确测定其年代,并且时间短,测定一个样品一般不超过1hr,而普通常规方法则需半个月。

8.3.4 古洪水水位确定

当确定符合条件特征的古洪水平流沉积样品之后,通过水准测量,即可得到沉积物顶面高程,有的还可直接得到沉积尖灭点高程,进而可以确定该沉积物相应的古洪水水位。

1. 国外模型实验成果

(1) 模型设计。目前国外关于这一问题的研究成果多以室内模型实验的数据为成果加以应用。Ritter D. F. 和 Kochel R. C. 设计并建造了一条与Texas河道相似的水泥河道模型来模拟一段无侵蚀的岩石河床,河两岸近乎是垂直的,形成一个矩形断面,平均宽度30cm,平均深度25cm。因为野外大多数平流沉积在支流河口,所以这条水槽就建了20条与干流相交角度各不相同且可调整的支流。

(2) 实验结果。

1) 在上述模型水流比降的组合情况下,沉积物都出现在支流河口,这是因为人工支流的水流不流动的缘故。

2) 在各支流上,离主干道越远,沉积的粒度越细。这与野外观测结果一致。

3) 大多数沉积在支流河口的横断面上是不对称的,其中较厚的部分位于支流河口沿主流方向下游的一侧。这一点可通过进入支流河口的回水类型来解释:示踪剂注入水槽的水流中,显示出在主流下游方向一侧的支流河口产生回水。此时的回水因流速减小,携沙能力减小,所以导致出现这一观测结果。

4) 支流与主流之间的夹角影响洪水平流沉积物的形成。大多数平流沉积发生在

夹角为 $50^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 之间。当夹角小于 50° 时, 主流洪水从支流河口旁边通过, 仅在支流河口产生一个微小的回水。而当夹角大于 130° 时, 主流在支流河口产生的回水剧烈运动, 形成显著的沉积。然而, 后继的洪水将彻底改变原先的沉积, 因为这一夹角之下进入支流河口的水流速度非常大。因此, 在这种夹角之下想进行古洪水层位分析是不可能的。

5) 水槽中主流的比降也影响平流沉积的厚度。组合情况中的情况 3 和情况 4 是大比降, 其沉积物厚度都非常薄。这是因为当主流流量保持常数时, 主河道的水流是通过比降的增加而增加流速的。这些高流速的主河道水流在支流河口边上通过时, 就会降低支流河口回水的水位以及与此相应的平流沉积。这项结果在 Pecos 河流的野外也常观测到。

6) 当水槽主河道的比降保持不变而流量增加时, 平流沉积物的厚度直接增加。各处沉积厚度的不同是因为其地貌条件、支流与主流夹角、支流本身比降等不同, 而同一地点沉积物厚度的变化则取决于洪峰流量的大小和洪峰历时的长短。

7) 水槽实验提供了验证古洪水水文学主要假定——洪水平流沉积物的尖灭点高程与洪峰水位紧密相联系的一种手段。在这次的水槽实验中, 当水流的比降组合情况为小流量小比降时, 几乎全部支流河口的洪水平流沉积物尖灭点高程与支流河口观测到的洪峰水位差值仅有几 mm。

2. 国内研究成果

徐润滋等在红水河阶地极限洪水研究中, 直接取阶地和高漫滩顶面高程作为相应的万年和 3000 年洪水位高程, 但作者承认其上应加一个高差 Δh 。詹道江等在淮河、海河、长江、黄河这 4 条河流的古洪水研究中, 对这一问题的认识也有不断深化的过程。

在超覆缓倾斜岸坡平台的细颗粒洪水沉积, 即洪水平流沉积的顶面, 特别是平流沉积尖灭点高程, 与洪水位十分接近, 尤其像黄河三门峡至小浪底河段那样的高含沙量河流, 其洪水平流沉积物尖灭点高程与洪痕高程基本一致 (见图 8-6, 1994 年 8 月 2 日出现洪峰水位, 8 月 4 日在现场拍摄的图片)。这一结果, 将起到验证并修正过去室内模型实验结果的作用。

8.3.5 古洪水行洪断面推求

依据古洪水平流沉积物取得古洪水水位之后, 还需推求相应的流量, 这就必须解决古洪水当时的行洪断面问题。

古洪水当时的行洪断面与现在的实际断面之间的差值可视为由两个部分组成: ①根据研究河段的区域地质、河床演变、河流阶地、滩地等结构及 ^{14}C 测年资料, 确定古代某一时期 (具体说某场古洪水发生时期) 河床相对稳定或正常的均衡断面, 从而解决年际的断面冲淤变化量问题; ②确定一次洪水过程中的断面冲淤变化量。

1. 古洪水均衡断面确定

(1) 现代均衡断面的确定。根据所研究区域各主要断面近三四十年实测期以及近一二百年调查期内同步时间 (如都是汛前) 的分析结果, 确定近现代时期内各年间相对稳定正常的断面, 以此作为恢复古代河床断面和修正行洪断面的基础。

(2) 古洪水行洪时的均衡断面。依据现代均衡断面和河段地质钻孔所取样品的¹⁴C测年数据,即可在平缓变化的新构造运动地区按线性内插的办法估算出古洪水当时的均衡断面。

(3) 次洪水行洪时增加的冲刷面积确定。因为古洪水研究的是洪峰流量 Q_m ,而洪峰时期洪水携沙能力增加,自然对河床有冲刷作用(长江三峡三斗坪花岗岩河床除外),因此在相对稳定的古洪水均衡断面的基础上,必须考虑次洪水冲刷所增加的面积。

如在岗南、黄壁庄古洪水研究中,对黄壁庄水文站1956年8月洪水进行了次洪水冲刷量的分析。

1) “56·8”大洪水,最高水位已达100.33m(大沽基面),流量 $13100\text{m}^3/\text{s}$,河宽650m,平均水深已近4.0m,属满槽大洪水。

2) 大水时深水河槽向中部摆动,冲刷较剧,左岸也有冲刷,但右岸淤积,虽总趋势为冲刷,但仍有此冲彼淤现象。

3) 最大冲刷深度3.6m,平均刷深1.0m,其中起点距为150~450m的主槽部位一般刷深达2.0m。

4) 按8月6日与8月1日两次实测断面比较,冲刷面积为 680m^2 。整编时按这两次断面最深点连线,且根据断面形状将左右岸适当加深,从而提出了“56·8”大洪水、“假定最大断面线”,又增加了冲刷面积 300m^2 ,即以往采用的洪水冲刷总面积 980m^2 。

5) 因8月1日18时所测断面,已受“56·8”大洪水前4次中、小洪水的冲刷影响,比1921年所测地形图断面加大了 380m^2 的面积,因此“56·8”大洪水冲刷面积是在上述 380m^2 基础上再增加 980m^2 ,即该段较年际正常面积共增大 1360m^2 。

6) 从本断面的钻孔资料分析,断面深槽宽度仅350m,“56·8”大洪水冲刷基本上在这350m宽度内发生。该宽度内最大埋深约为7m,平均埋深为5m,其下便是基岩。即使大洪水将基岩以上砂层全部冲刷掉(由于断面上冲淤同时存在,实际上要全部冲光不太可能),其最大冲刷面积也只有 1750m^2 。如以此面积作为次洪水冲刷控制面积,自然无偏小之虞。

2. 历史洪水、古洪水的流量确定

根据历史洪水调查洪痕的位置高程或古洪水的水位,行洪断面面积及河道的糙率等,即可推算该次洪水的洪峰流量。

(1) 水位流量关系曲线法。当所调查到的历史洪水洪痕的位置或古洪水的水位在水文站附近时,可依据该水文站的水位流量关系曲线推算洪峰流量(见第9章的内容)。

(2) 比降面积法。近似作为稳定流计算,即采用曼宁公式 $C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}$,用取得的关于洪水 A 、 R 、 S 、 n 等数值代入,求得洪峰流量。

(3) 控制断面法。当所调查到的历史洪水洪痕的位置或古洪水的水位在堰坝、急滩或卡口上游不远处,可以利用堰坝、急滩或卡口等相应的临界流速公式推算洪峰流量。

(4) 古洪水研究在重要水利水电工程的应用举例。用地层学方法推求古洪水只有 20 余年的历史, 国外尚无成熟的方法, 国内也无先例。目前已经运用古洪水研究的方法在长江三峡工程、黄河小浪底水利枢纽、淮河流域西淝河响洪甸水库、海河流域滹沱河岗南水库、黄壁庄水库、沁河河口村水库、雅鲁藏布江藏木水电站、新疆恰浦其海水库、哈拉塑克水库等开展了工作。研究过程中, 创造、总结和归纳了一套有着自己特色的、具有普遍应用价值的研究方法和指标体系, 以及各条河流自身特性导致古洪水流量推求中具有的各自特点, 所推求的结果在工程实际中具有重大实际意义。

如在黄河小浪底水利枢纽的古洪水研究中, 按古洪水平流沉积指标体系, 在判定的 23 个有效沉积样品中, 求得研究河段在 6180aBP 和 8200aBP 时各有一场大洪水发生, 7260aBP 可能有一场大洪水发生。在对工程建设有实际意义的 3000aBP 以内, 发生 2360aBP 一场大洪水, 其流量为 $38000\text{m}^3/\text{s}$, 已超过 1843 年历史调查洪水 ($32500\text{m}^3/\text{s}$, 古洪水研究工作以前一直排在首项, 但其重现期从 1976 年定的 210a, 1980 年变动为 600a, 后经三门峡人门岛上保留的唐宋灰尘推断为 1000a)。该场古洪水资料的取得, “既为论证施工中的小浪底工程设计的可靠性及安全性提供了重要依据, 也为小浪底工程应用方式研究和黄河下游防洪决策提供了依据” (黄委河务局, 1997)。

其中根据沉积的粒度、矿物组成、孢子花粉等的分析, 结合古生物和其他考古资料, 一方面对中、晚全新世黄河中游水文环境的变化, 如水系与河网格局的变化、黄土高原植被的变化等作了较深入的研究, 同时还对该研究河段的河谷地貌特征、河道及断面变化等也给出了比 1843 年历史调查洪水成果更进一步的研究成果。

复 习 题

- 8-1 举一实例说明历史洪水调查成果在我国设计洪水过程中的作用。
- 8-2 古洪水研究成果的误差包含哪些? 如何降低古洪水研究成果的误差?
- 8-3 在设计洪水中如何使用古洪水研究成果?
- 8-4 试做一份“雅鲁藏布江藏木水电站古洪水研究项目计划书”。

第 9 章

流量数据处理

9.1 概 述

9.1.1 问题的提出

目前对流量、输沙率、水质等的施测不可能逐日逐时连续进行，实测水信息数据是一种不连续的原始数据，因而现状条件下的水信息数据是零星的、不连续的、可能含有错误的原始数据。如流量测验，少则一年测十多次、或几十次；多也就是一二百次（如湖北清江上的高坝洲水文站，一年测流 220 次）；测沙，则更少；类似这样的数据，不能反映水流或某一水要素的完整变化过程和变化规律，自然不能满足国民经济各部门对这种资料的要求。

9.1.2 定义

水信息数据处理就是对原始水信息数据按科学的方法和统一的技术标准与格式进行整理、分析、统计、审查、汇编和刊印的全部技术工作。

9.1.3 目的

- (1) 利用少数实测数据，寻找 $Z-Q$ 关系的变化规律，借以推求逐时流量资料。
- (2) 得到具有足够精度的、系统的、连续的水信息资料，供有关部门使用。
- (3) 通过处理，发现测验工作的问题，指导测验工作。

9.1.4 流量数据处理的一般方法—— $Z-Q$ 关系

流量数据处理工作的方法很多，大体可以归纳为两类，一类为常用的基本方法，另一类为辅助方法。

水位流量关系曲线法是流量数据处理中最常用、最基本的方法。

河渠中水位与流量关系密切，一般都有一定的规律；又因水位过程易于观测，而施测流量较观测水位要困难。因此，建立水位流量关系，用水位过程来推求流量过程是可行的，也是经济的，同时也是采用测站控制、选择站点的首要目的。

除水位流量关系曲线法外，连实测流量过程线法在水位变化大，而流量变化不大

的个别测站亦作为流量推求的基本方法。

上下游测站水文要素相关法、降水径流关系法等也是流量数据处理中的常用方法，但这些方法是流量数据处理中的辅助方法。它们主要用于缺测数据的插补和延长或数据的合理性检查。

流量数据处理的主要工作环节有两个，一个是定线，一个是推流。

定线工作就是根据实测的流量数据率定出与流量关系密切的水文要素之间的关系，用其水文要素和率定的关系推求流量的工作叫推流。很显然，对于水位流量关系曲线法，就是根据实测流量与相应水位，按照一定的水力规律定出水位流量关系曲线，根据水位过程，在率定的水位流量关系曲线上，推求流量过程，从而可以计算出各种流量的特征值。

9.1.5 数据处理的工作内容

- (1) 收集校核原始资料。
- (2) 编制实测成果表。
- (3) 确定关系曲线，推求逐时、逐日值。
- (4) 编制逐日表及洪水水文要素摘录表。
- (5) 合理性检查。
- (6) 编制数据处理说明书。

9.2 稳定的 Z-Q 关系及处理方法

9.2.1 人工渠道 Z-Q 关系

1. 宽浅矩形断面 ($b \geq h$ 、 $h \approx R$)

$$A = bh = K_1 h \quad (9-1)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} = K_2 h^{\frac{2}{3}} \quad (9-2)$$

$$Q = AV = K_1 h K_2 h^{\frac{2}{3}} = K_3 h^{\frac{5}{3}} \quad (9-3)$$

2. 各种断面的综合

(三角形、梯形、抛物线形等，考虑一般形式，作概化处理)

- (1) $A = K_1 h^\alpha$ ($\alpha \geq 1$)，呈凹向下方的单调增值曲线。
- (2) $V = K_2 h^\beta$ ($0 < \beta < 1$)，呈凹向上方的单调增值曲线。
- (3) $Q = K_3 h^\gamma$ ($\gamma > 1$)，呈凹向下方的单调增值曲线。

上述特性可进行数学一阶和二阶的微分推导来证明。

以上概化关系可以推广用于天然河道的稳定水位流量关系的分析。

9.2.2 天然河道稳定的 Z-Q 关系分析

1. Z-A 关系曲线分析

(1) 曲线特性分析。因为 $\alpha \geq 1$ ，所以 $\frac{dA}{dh} > 0$ ，表示面积随水深的增加而增大，即：

1) 同增 dz 时， $dA_1 \leq dA_2$ 。

$$2) \quad dA = BdZ, \quad \frac{dZ}{dA} = \frac{1}{B} \quad (9-4)$$

$\frac{d^2 A}{dh^2} \geq 0$, 表示 $Z-A$ 关系曲线凹向下方。

(2) 推论。

- 1) 河槽为矩形或 U 形, $Z-A$ 关系曲线为一直线 (图 9-1)。
- 2) 河槽处于两岸悬崖突出处 (瓶口式), $Z-A$ 关系曲线发生反曲。
- 3) 河槽为复式断面, 当水位漫滩时, $Z-A$ 关系曲线发生突变。

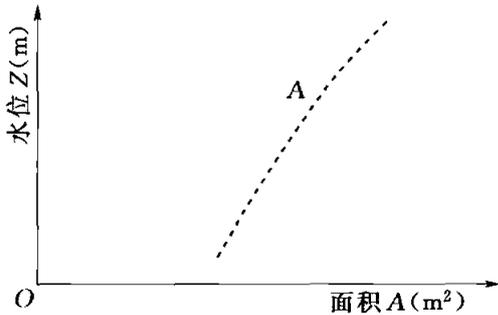


图 9-1 天然河道稳定的 $Z-A$ 关系

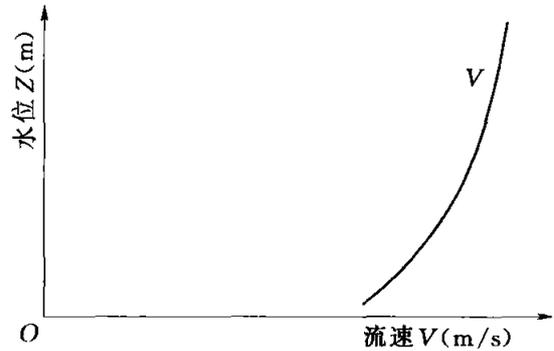


图 9-2 天然河道稳定的 $Z-V$ 关系

2. $Z-V$ 关系曲线分析

(1) 不难看出, 因为 $\beta < 1$ 。

1) 故 $\frac{dV}{dh} > 0$, 表示流速随水深的增加而增大。

2) $\frac{d^2 V}{dh^2} < 0$, 即 $Z-V$ 关系曲线为一条凹向上方的曲线。

3) 考虑到当 $h \rightarrow \infty$ 时, 其 $\frac{dV}{dh} \rightarrow 0$, 说明当水深增加到一定程度后, 流速随水深的增加增大甚微, 因此高水位时流速近于常数。

因此, $Z-V$ 关系曲线为一条以铅垂线为渐近线的凹向上方的曲线, 见图 9-2。

(2) 推论。

- 1) 在漫滩时, $Z-V$ 关系曲线有明显反曲 (图 9-3)。
- 2) 在断流水位下有深潭时, $Z-V$ 关系曲线也发生反曲 (图 9-4)。

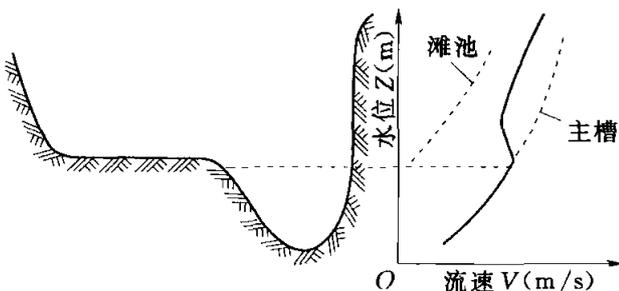


图 9-3 天然河道漫滩时的 $Z-V$ 关系

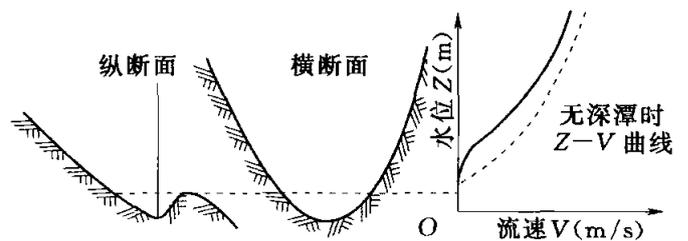


图 9-4 天然河道断流水位下有深潭时的 $Z-V$ 关系

设深潭面积为 A_0 , $A = A_0 + A_1$, $\bar{V} = \frac{Q}{(A_0 + A_1)}$, 若 A_1 很小, A_0 占比重大, 对 V 影响大; 若 A_1 很大, A_0 占比重小, 对 V 影响小。

3) 由于 V 与 S 、 n 等因素有关, 因而当这些因素或测站控制条件发生变化时, 也会造成 $Z-V$ 关系曲线的反曲。

3. Z-Q 关系曲线分析

(1) 因为 $\gamma > 1$, 得出以下结论。

- 1) $\frac{dQ}{dh} > 0$, 说明 Q 随 h 的增加而增大。
- 2) $\frac{d^2V}{dh^2} > 0$, 即 $Z-Q$ 关系曲线为一条凹向下方的曲线。

(2) 推论。

1) 在漫滩时, 由 $Z-A$ 和 $Z-V$ 两关系线共同作用决定, 判断 $Z-Q$ 关系曲线是否有反曲 (图 9-6)。其原因为

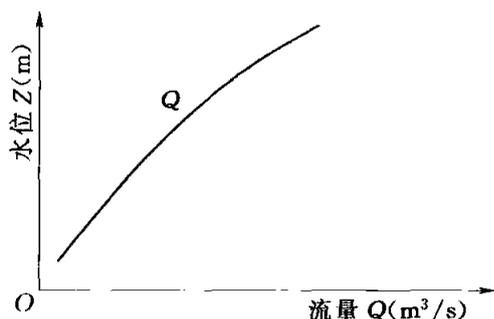


图 9-5 天然河道稳定的 Z-Q 关系

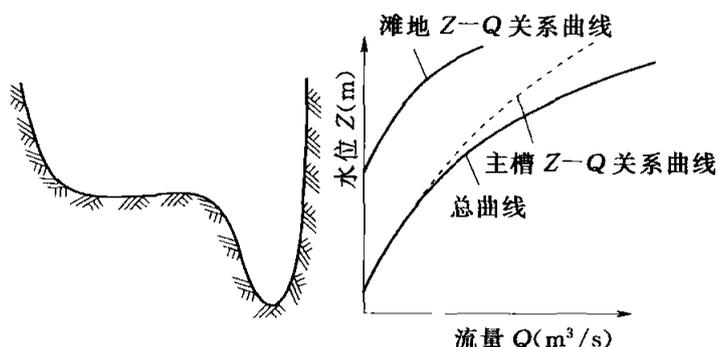


图 9-6 天然河道漫滩时的 Z-Q 关系

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial A} dA + \frac{\partial Q}{\partial V} dV$$

漫滩时, $dA > 0$, $dV < 0$, 上式的右边两项之和可以为“+”、也可以为“-”, 所以曲线是否反曲, 取决于 dQ 的结果。

2) 当水力原因使 $Z-A$ 、 $Z-V$ 关系不稳定而发生反曲或转折时, $Z-Q$ 关系曲线也发生反曲或转折 (图 9-7)。

4. Z-A、Z-V、Z-Q 关系曲线分析目的

三线反映了测站特定河道水力、水文特性, 处理定线时应考虑这些特性。

9.2.3 稳定 Z-Q 关系的数据处理方法——单一曲线法

1. 判断单一曲线的标准

在普通方格纸上, 纵坐标是水位, 横坐标是流量。

(1) 点绘的 $Z-Q$ 关系点据密集地分布成一狭窄带状, 且 75% 以上的中高水流速仪测流点据与平均关系线的偏离不超过 $\pm 5\%$, 75% 的低水点或浮标测流点据偏离不超过 $\pm 8\%$ (流量很小时可适当放宽)。

(2) 关系点没有明显的系统偏离 (图 9-8)。

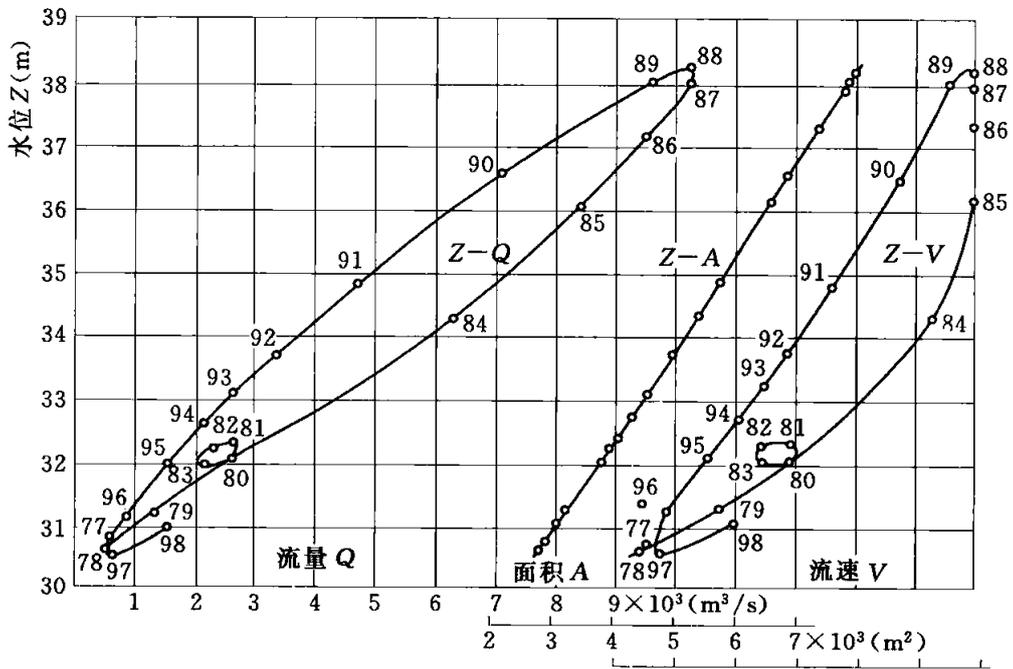


图 9-7 天然河道当 Z-A、Z-V 发生反曲或转折时的 Z-Q 关系

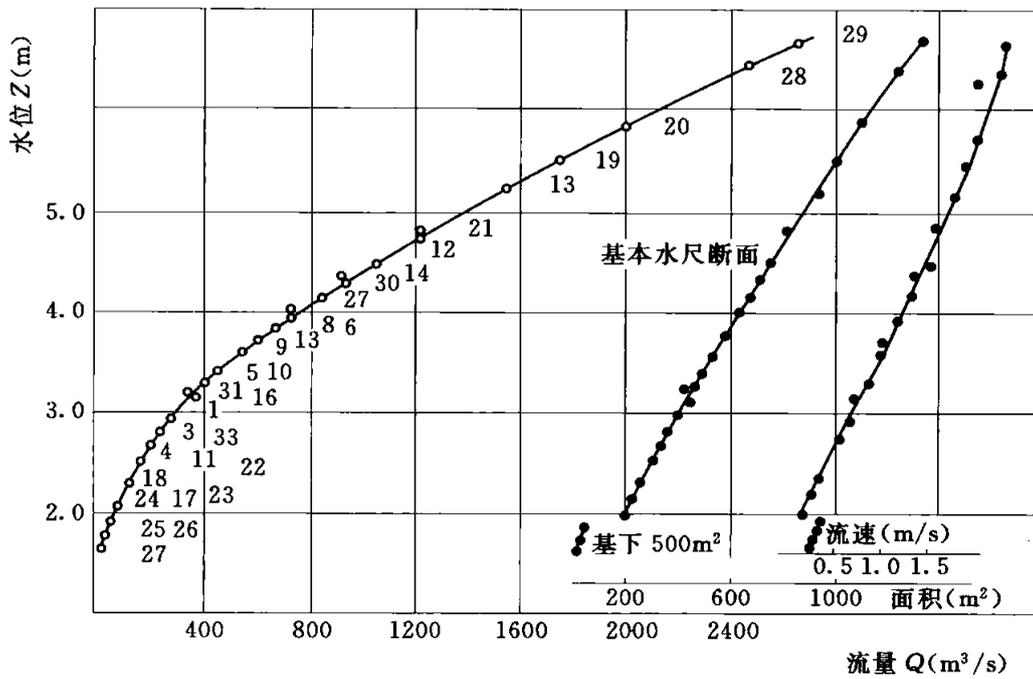


图 9-8 浙江衢州水文站某年 Z-Q 关系

2. 单一曲线法的定线方法

- (1) 图解法——人工定线。
- (2) 解析法——人工或计算机选配方程定线。

3. 单一曲线法的定线步骤

- (1) 在同一张图纸上依次点绘 Z-Q、Z-A、Z-V 关系曲线。
- 1) 3 条曲线的比例尺选择，应使它们与横轴的夹角分别近似为 45°、60°、60°，

且互不相交。

- 2) 测点右侧注明测次号。
- 3) 3 条曲线左右顺序为 $Z-Q$ 、 $Z-A$ 、 $Z-V$ (为什么)。

(2) 分析 $Z-Q$ 、 $Z-A$ 、 $Z-V$ 的曲线特征。

- 1) 符合单一曲线的标准。
- 2) 有无特殊情况出现。
- 3) 突出点分析。

a. 定义：明显偏离所定平均曲线的反常关系点。

b. 原因：①测验和数据处理各环节中出现差错；②因特殊水情造成关系点的突然变化。

c. 判别标准：ISO 标准用 2 倍标准差。

d. 处理：①系水力因素变化所致，则应作可靠资料看待；②系测算错误造成，则应设法予以改正；③无法改正者，暂时不用，留待核实之后再确定是否舍弃。

(3) 通过点群中心定一条单一线。

- 1) 误差最小原则。
- 2) 光滑无反曲 (否则，就有特殊情况出现)。
- (4) 进行曲线检验 (仅对 $Z-Q$ 关系曲线)。

- 1) 符号检验。
- 2) 适线检验。
- 3) 偏离数值检验。
- 4) 两条曲线 (或两列数组) 需要合并定线时，还要进行 t 检验。

(5) 高低水延长。

1) 必要性。测站测流时，由于施测条件限制或其他种种原因，致使最高水位或最低水位的流量缺测或漏测。为取得全年完整的流量过程，必须进行高低水时 $Z-Q$ 关系的延长。

2) 重要性。

a. 高水延长的结果，对洪水期流量过程的主要部分，包括洪峰流量在内，有重大的影响。

b. 低水流量虽小，但如延长不当，相对误差可能较大且影响历时较长。因此延长均需慎重。

3) 幅度。

- a. 高水部分的延长幅度一般不应超过当年实测流量所占水位变幅的 30%。
- b. 低水部分延长的幅度一般不应超过 10%。

4) 方法 (见本章 9.2.4 中偏离数值检验的方法)。

5) 年头年尾衔接 (光滑曲线过渡)。

(6) 编制流率表。

1) 目的。读数方便、统一，不会因人而异，规范化。

2) 注意点。 $Z-Q$ 关系的递增性 ($Z_2 \geq Z_1$, $\Delta Q_2 \geq \Delta Q_1$)。

3) 流率表统一格式。

(7) 推流。

- 1) 直接在流率表上查读, 由 $Z_1 \rightarrow Q_1 \rightarrow \bar{Q}$ 。
- 2) \bar{Q} 的计算 (与日平均水位计算方法相同)。

9.2.4 Z-Q 关系曲线的检验

1. 统计检验的基本概念

(1) 术语。

1) 不确定度。在一定置信概率下, 测量值可能出现的误差上界值 X 。

2) 置信水平。测量值出现在统计容许区间内的概率值 P , 即测量值出现在其真值 $X_0 \pm X$ 的统计区间内的可能性, 即测量值误差不超过某一上界值 X 的可能性 (概率)。

3) 显著性水平。当原假设正确时, 被拒绝概率的最大值 α , 即测量值误差在超过误差上界值 X 的可能性 (概率), $\alpha = 1 - P$, 属小概率。

4) 临界值。确定 α 值的位置 (误差上界值); 正态分布: u_K ; t 分布: t_K 。

5) 双侧检验。小概率出现在分布曲线的两侧, 需检验两侧值。例: 糖果厂出厂袋装糖果, (500 ± 5) g; 国庆 50 周年天安门广场阅兵, 受阅方队战士身高, (178 ± 2) cm 等, 见图 9-9 ($u_K = u_{1-\alpha/2}$)。

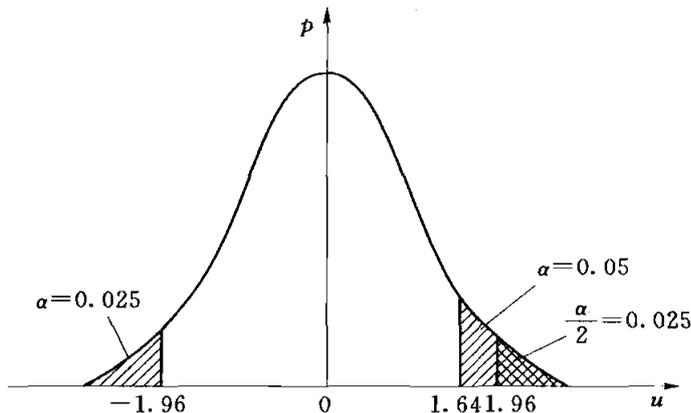


图 9-9 双侧检验与单侧检验

6) 单侧检验。小概率仅出现在分布曲线的一侧, 只需检验这一侧值, 见图 9-9。例: 自由市场购物, 什么情况下复称? (只检验称少了, 而不检验称多了)

(2) 假设检验的一般步骤。

1) 建立原假设 H_0 。

2) 根据测量值的分布, 选择适当统计量。

3) 由给定的 α , 计算临界值 (u_K 或 t_K)。

4) 计算样本统计量 u 或 t 。

5) 比较。

a. $|u| \geq u_K$, 属小概率, 所以拒绝原假设。

b. $|u| < u_K$, 不属小概率, 即接受原假设 (t 和 t_K 同样)。

2. 符号检验

(1) 目的。判断两随机变量 X 和 Y 的概率分布是否存在显著性差异。

(2) 内容。检验所定 $Z-Q$ 关系曲线两侧测点数目的分配是否均衡合理。

(3) 公式。

$$u = \frac{|K - 0.5n| - 0.5}{0.5\sqrt{n}} \quad (9-5)$$

(4) 方法。查表法和计算法 (介绍计算法)。

将全部点据按照从低水位到高水位的顺序编号, 把分布在 $Z-Q$ 关系曲线左侧的点据记为 “-”, 右侧的点据记为 “+”, 线上的点可平均分配于关系曲线的两边各

0.05。统计出现“+”、“-”号的点据个数 n_+ 和 n_- ，原假设为“+”、“-”出现的概率相等。

1) 取 $K = \max(n_+, n_-)$ [或取 $K = \min(n_+, n_-)$]，计算 u 值。

2) 根据相关标准要求所指定的显著性水平 α ，查表得 u_K ： $\alpha = 0.05$ ， $u_K = u_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。

3) 计算 u 并与 u_K 相比较。

a. $|u| \geq u_K$ ，拒绝原假设，定线不合理，需修改、重新定线。

b. $|u| < u_K$ ，接受原假设，定线合理，通过。

(5) 说明。符号检验是双侧检验，因为“+”太多或“-”太多，都将被拒绝。

3. 适线检验

(1) 目的。检查定线有无系统偏离。

(2) 内容。检验各级 Z-Q 关系曲线两侧测点数目的分布是否均衡合理。

(3) 公式。

$$u = \frac{|k - 0.5(n-1)| - 0.5}{0.5 \sqrt{n-1}} \quad (9-6)$$

(4) 方法。列表统计计算法。

1) 按照水位从低到高、依次将分布在 Z-Q 关系曲线旁相邻两个点据的偏离符号（“+”、“-”）进行逐个对比，把“+”、“-”变号的记为“1”，同号的记为“0”（曲线上点据平均分配在两侧的有利分配原则：线上的点平均分配在曲线左侧、右侧时首先尽可能使得异号的个数为多，目的是保证适线检验能够通过；其次要使符号检验中的“+”、“-”总体大致均衡，也要在符号检验允许的差值内），共 $n-1$ 个。原假设为“1”、“0”出现的概率相等。

2) 列表统计异号个数 K （表 9-1），计算 u 。

表 9-1 符号、适线检验表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	$n-1$	n
符号	+	+	-	-	-	+	+	-	+	-	+	...	+	-
适线	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1

3) 根据相关标准要求所指定的显著性水平 α ，查表得 u_K ， $\alpha = 0.05$ ，查表时用 $\alpha = 0.10$ ， $u_K = 1.64$ 。

4) 比较 u 与 u_K 。

a. $|u| \geq u_K$ ，拒绝原假设，定线不合理，需修改、重新定线。

b. $|u| < u_K$ ，接受原假设，定线合理，通过。

(5) 说明。适线符号检验是单侧检验，因为“+”、“-”变化少，即各级 Z-Q 关系曲线两侧测点数目的分布不均衡将被拒绝。

4. 偏离数值检验

(1) 目的。检验测点偏离关系线的平均偏离值（即平均相对误差）是否在合理范围内，借以用数据论证曲线定得是否合理。

(2) 方法。设测点与关系线的相对偏离值为

$$X_i = \frac{Q_i - Q_{ci}}{Q_{ci}} \quad (9-7)$$

式中： Q_i 为实测流量； Q_{ci} 为与同 Q_i 水位下关系曲线上的流量。

则平均相对偏离值（即平均相对误差）为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (9-8)$$

\bar{X} 的标准差为

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (9-9)$$

将 \bar{X} 与 $S_{\bar{X}}$ 进行比较，若 $\bar{X} < S_{\bar{X}}$ ，则认为关系曲线定得合理。

用最小二乘法定线时，因为 $\bar{X} = 0$ ，故此项检验可以不做。

5. t 检验

(1) 目的。判断稳定的 $Z-Q$ 关系是否发生了显著变化（即测站条件是否发生变动）、定线是否有明显偏离等。通过此检验，可以正确绘制和使用 $Z-Q$ 关系曲线。

(2) 内容。假定两组变量的总体方差（标准差 S ）相同，总体均值相等的条件下，进行两组样本均值的比较。

(3) 公式。

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (9-10)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (X_{1i} - \bar{X}_1)^2 + \sum_{j=1}^{n_2} (X_{2j} - \bar{X}_2)^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (9-11)$$

式中： X_{1i} ， X_{2j} 分别为一、二数组测点对 $Z-Q$ 关系曲线相对偏差； \bar{X}_1 ， \bar{X}_2 分别为一、二数组测点系列的平均相对偏离值； n_1 ， n_2 分别为一、二数组测点数； S 为一、二数组测点数的综合标准差； t 为统计量。

(4) 方法。

1) 求两数列的 X_{1i} ， X_{2j} 。

2) 求 \bar{X}_1 ， \bar{X}_2 。

3) 计算 S 及 t 。

4) 由 α 及 $(n = n_1 + n_2 - 2) \rightarrow t_K$ 。

5) 比较 t 与 t_K 。

a. $|t| \geq t_K$ ，拒绝原假设，原定曲线已发生明显变化，必须分别定线。

b. $|t| < t_K$ ，接受原假设，原定曲线无明显变化，可合并定线或原定曲线可继续使用。

9.2.5 $Z-Q$ 关系曲线的延长和流量插补

1. 水位面积、水位流速关系高水延长

适用于河床稳定， $Z-A$ 、 $Z-V$ 关系点集中，曲线趋势明显的测站。其中，高水时

的 Z-A 关系曲线可以根据实测大断面资料确定, 高水时 Z-V 关系曲线常趋近于常数, 可按趋势延长。于是, 某一高水位下的流量, 便可由该水位的断面面积和流速的乘积来确定。这样, 可延长 Z-Q 关系曲线, 见图 9-10。

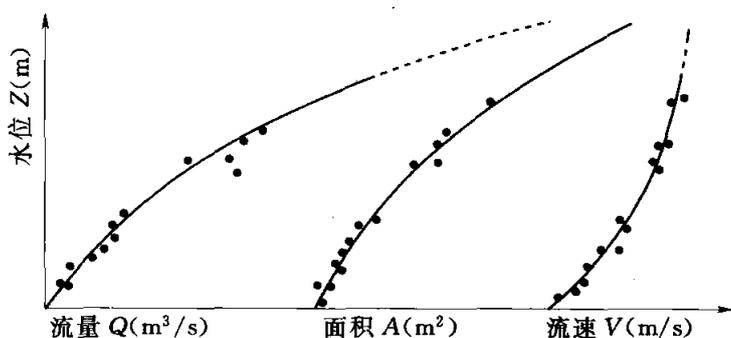


图 9-10 Z-Q、Z-A、Z-V 关系高水延长

2. 用水力学公式高水延长

此法可避免 Z-A、Z-V 关系高水延长中 Z-V 顺趋势延长的任意性, 用水力学公式计算出外延部分的流速值来辅助定线。

(1) 曼宁公式外延。

曼宁公式:
$$V = \frac{1}{n} (R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}) \quad (9-12)$$

延长时, 用式 (9-12) 计算流速, 用实测大断面资料延长 Z-A 关系曲线, 从而达到延长 Z-Q 关系的目的。

计算流速时, 因水力半径 R 可用大断面资料求得, 故关键在于确定水面比降 S 和糙率 n 值。根据实际资料, 如 S、n 均有资料时, 直接由公式计算并延长; 当二者缺一时, 通过点绘 Z-n (或 Z-S) 关系曲线并延长之, 再算出 V; 如两者都没有时, 则将 $\frac{1}{nS^{\frac{1}{2}}}$ 看成一个未知数, 因 $\frac{1}{nS^{\frac{1}{2}}} = \frac{Q}{AR^{\frac{2}{3}}}$, 依据实测资料的流量、面积、水力半径计算出 $\frac{1}{nS^{\frac{1}{2}}}$, 点绘 Z- $\frac{1}{nS^{\frac{1}{2}}}$ 曲线, 因高水部分 $\frac{1}{nS^{\frac{1}{2}}}$ 接近于常数, 故可按趋势延长。

(2) 斯蒂文斯 (Stevens) 法。由谢才流速公式导出流量为

$$Q = CA(RS)^{\frac{1}{2}} \quad (9-13)$$

式中: C 为谢才系数; 其余符号意义同前。

对断面无明显冲淤、水深不大但水面较宽的河槽, 以断面平均水深 \bar{h} 代替 R, 则式 (9-13) 可改写为

$$Q = KA\bar{h}^{\frac{1}{2}} \quad (9-14)$$

式中: $K = CS^{\frac{1}{2}}$, 高水时其值接近常数。

故高水时 $Q - A\bar{h}^{\frac{1}{2}}$ 呈线性关系, 据此外延。由大断面资料计算 $A\bar{h}^{\frac{1}{2}}$ 并点绘不同高水位 Z, 在 Z- $A\bar{h}^{\frac{1}{2}}$ 曲线上查得 $A\bar{h}^{\frac{1}{2}}$ 值, 并以 Q- $A\bar{h}^{\frac{1}{2}}$ 曲线上查得 Q 值, 根据对应的 (Z, Q) 点据, 便可实现 Z-Q 关系曲线的高水延长。

3. Z-Q 关系曲线的低水延长法

低水延长一般是以断流水位作控制进行 Z-Q 关系曲线向断流水位方向所作的延长。断流水位是指流量为零时的相应水位。

假定关系曲线的低水部分用式 (9-15) 表示为

$$Q = K(Z - Z_0)^n \quad (9-15)$$

式中： Z_0 为断流水位，m； n ， K 分别为固定的指数和系数。

在 $Z-Q$ 曲线中的中、低水弯曲部分，依次选取 a 、 b 、 c 三点，它们的水位和流量分别为 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 及 Q_a 、 Q_b 、 Q_c 。并令其满足 $Q_b^2 = Q_a Q_c$ ，代入式 (9-15)，求解得断流水位为

$$Z_0 = \frac{Z_a Z_c - Z_b^2}{Z_a + Z_c - 2Z_b} \quad (9-16)$$

求得断流水位 Z_0 后，以坐标 $(Z_0, 0)$ 为控制点，将关系曲线向下延长至当年最低水位即可。

[思考题 9-1] 单一线法流量数据处理。

9.3 不稳定水位流量关系的分析

不稳定的 $Z-Q$ 关系，是指测验河段受断面冲淤、洪水涨落、变动回水或其他因素的个别或综合影响，使水位与流量间的关系不呈单值函数关系。分析这种 $Z-Q$ 关系的特征，是流量资料数据处理中的基本课题之一。

9.3.1 受洪水涨落影响的 $Z-Q$ 关系

1. 受洪水涨落影响的流量公式

由水力学知，当洪水波在顺直、匀整的河道中传播时，其水流流态为渐变不稳定流，运动方程为

$$S = \frac{Q^2}{K^2} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial S} \quad (9-17)$$

式中： $\frac{Q^2}{K^2}$ 为摩阻项； $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$ 为波动项； $\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial S}$ 为动能项； $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial S}$ 为惯性项，约占 1%。

渐变流时，动能项 $\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial S}$ 比摩阻项 $\frac{Q^2}{K^2}$ 小得多，可忽略不计。对于平原河流中的洪水，波动项 $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$ 也只有摩阻项 $\frac{Q^2}{K^2}$ 的百分之几，甚至更小，即使在一般河流中、下游，它所占比重也很有限，也可略去不计。于是，运动方程简化为

$$S = \frac{Q^2}{K^2} \quad (9-18)$$

$$Q = K \sqrt{S} \quad (9-19)$$

实践表明，水面比降 S 可以看作由三部分组成，即河道纵比降、水深的沿程变化和洪水波引起的附加比降。前两部分之和为稳定流时的水面比降，以 S_c 表示。可以证明，附加比降 ΔS 可表示为

$$\Delta S = \frac{1}{U} \frac{dZ}{dt} \quad (9-20)$$

$$S = S_c + \frac{1}{U} \frac{dZ}{dt} \quad (9-21)$$

式中： U 为洪水波的传播速度，m/s； $\frac{dZ}{dt}$ 为水位的涨落率，即单位时间内水位的变化，m/s。

将式 (9-21) 代入式 (9-19) 中，并以 Q_m 表示实测流量，整理后得

$$\begin{aligned} Q_m &= K \sqrt{S_c + \frac{1}{U} \frac{dZ}{dt}} \\ &= K \sqrt{S_c} \sqrt{1 + \frac{1}{S_c U} \frac{dZ}{dt}} \\ &= Q_c \sqrt{1 + \frac{1}{S_c U} \frac{dZ}{dt}} \end{aligned} \quad (9-22)$$

式中： Q_c 为稳定流的流量 $Q_c = K \sqrt{S_c}$ ； $\sqrt{1 + \frac{1}{S_c U} \frac{dZ}{dt}}$ 为校正因素。

式 (9-22) 即受洪水涨落影响的流量公式。

2. 受洪水涨落影响的 $Z-Q$ 关系分析

洪水涨落影响，是指在涨落水过程中因洪水波传播引起不同的附加比降，使断面流量与同水位下稳定流流量相比，呈现有规律的增大或减小， $Z-Q$ 关系呈逆时针绳套曲线（简称洪水绳套曲线）。

(1) 点绘 $Z-Q$ 、 $Z-A$ 、 $Z-V$ 关系曲线分析。

见图 9-7，从图 9-7 中可见如下关系。

1) $Z-A$ 关系单一， $Z-V$ 、 $Z-Q$ 关系散乱，但一一对应。

2) 一次洪水中，涨水点在落水点右边，依时序可连成逆时针走向的绳套曲线。

3) 洪水绳套曲线与水位过程线关系密切。将各测点的涨落率 $\frac{dZ}{dt}$ 标注在测点旁，

涨水点 $\frac{dZ}{dt} > 0$ ，落水点 $\frac{dZ}{dt} < 0$ ，峰顶、谷底处 $\frac{dZ}{dt} = 0$ ； $\left| \frac{dZ}{dt} \right|$ 越大，绳套越宽；反之，越窄。表现为对同一测站的各次洪水而言，水位涨落急剧者，所形成的绳套曲线较胖。对应于水位过程线的峰、谷点，因其涨落率为零，故其流量应与同水位下稳定流的流量相同。

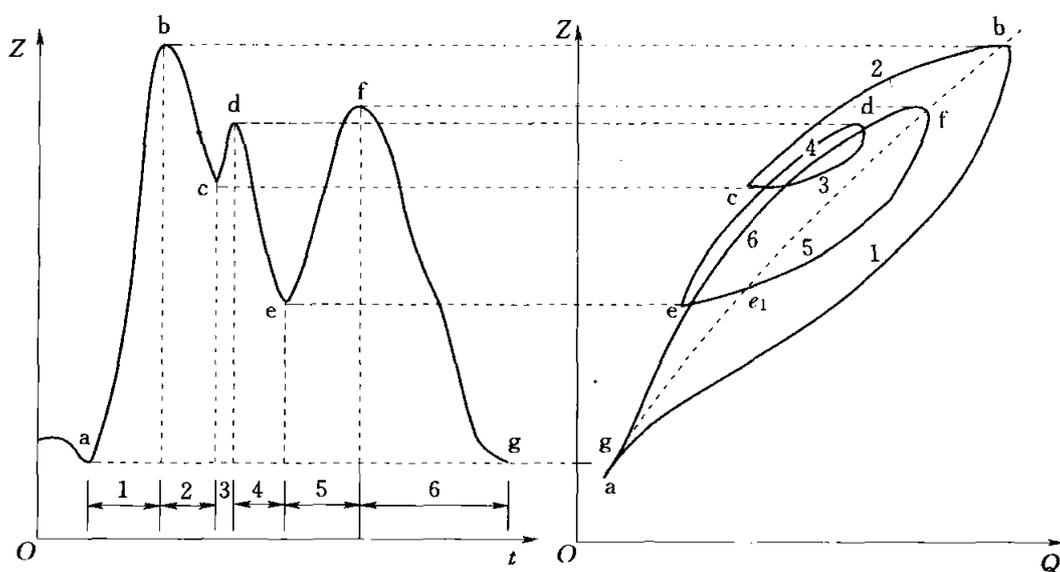
(2) 洪水绳套曲线上各水力要素极值出现次序。各水力要素极值出现的顺序是：最大比降（最大涨率）、最大流速、最大流量、最高水位，即 $S_{\max} \rightarrow V_{\max} \rightarrow Q_{\max} \rightarrow Z_{\max}$ 。

(3) 洪水绳套曲线分类。

1) 单式绳套。单次洪水所形成的绳套。

2) 复式绳套。若一次洪水上涨后尚未退完，另一次洪水又接踵而至，形成连续洪峰所形成的绳套。特点是后一个绳套较前一个绳套稍为偏左，其原因是出现连续洪水时，因河槽调蓄作用使河谷壅水，导致后一次洪水的稳定比降减小。因此，同水位稳定流的流量也较前一次洪水时小（图 9-11）。

顺便指出，由于复式洪水的后一次洪水受到洪水涨落与河槽调蓄的双重影响，所以可将它作为受洪水涨落与变动回水的混合影响来进行分析。

图 9-11 复式绳套情况下的 $Z-Q$ 关系

9.3.2 受变动回水影响的 $Z-Q$ 关系

1. 一般概念

测流断面下游水体水位的变化，将导致该断面水面比降和流量的变化，在 $Z-Q$ 关系图上使同水位下比降或落差大的关系点偏右、小的偏左，下游水体水位的变化对 $Z-Q$ 关系的这种影响，称为变动回水影响。

天然河流中，产生变动回水的原因一般有：洪水期干、支流的相互顶托，下游湖、库或海洋等水体水位的变化，下游渠道闸门的启闭，下游河道壅水或水草丛生与冰凌壅塞等。

由于下游水体水位变化与由此引起的测流断面比降的变化是一个缓变过程，因此受变动回水影响的水流一般可认为是恒定渐变流，其流量与各水力要素间的关系可用曼宁公式表示，即

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_e^{\frac{1}{2}}$$

在断面稳定、河道顺直时，式中的糙率 n 、断面面积 A 和水力半径 R 一般均为水位 Z 的函数，且流速水头的沿程变化也可忽略，因此能面比降 S_e 便可用水面比降 S 来代替。

如上所述，在某水位时因变动回水影响程度不同，则流量也随之不同，两流量之比为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_1^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_2^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9-23)$$

实际上，河流纵比降指数的平均值只是近似等于 $1/2$ ，为适应不同河流特性，将式 (9-23) 写成普遍形式为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^e \quad (9-24)$$

式中： e 表示水流的沿程能量损失与流速之间的指数关系。

一般河流的水面比降等于河段上下游两断面之间的水位差 ΔZ （即落差）与断面间距的比值，故式（9-24）也可用落差的形式来表示。为区别起见，指数 e 改用 β 来代替，表示为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2} \right)^\beta \quad (9-25)$$

可见，受变动回水影响的河流流量不仅与测流断面的水位有关，还与测验河段的比降或落差有关，因此也可将流量表示为

$$Q = f(Z, \Delta Z) \quad (9-26)$$

式（9-25）、式（9-26）即受变动回水影响的流量数据处理的基本关系式，对应的数据处理方法便称为落差法。

2. 比降代表性分析

比降的代表性，是指用落差法对受变动回水影响的流量数据进行处理时，由于上、下比降断面的位置不同，用所测落差代表数据处理断面处水面比降的一致程度。分析的目的在于研究在不同一致程度下，反映在式（9-25）中落差指数 β 的具体含义。下面分两种情况进行分析。

（1）落差所代表的比降与数据处理断面处比降一致时。当基本水尺断面处于两比降水尺断面中间，且河道整齐、断面均匀时，则可认为所测比降与中断面比降近似相等，此时为

$$S_{em} \approx S_m \approx \bar{S} \approx \frac{\Delta Z}{L}$$

式中： S_{em} ， S_m ， \bar{S} 分别为中断面的能面比降、水面比降及河段平均比降（图 9-12）。

由于 \bar{S} 与 ΔZ 成正比，故流量比公式可写为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{S_{e1}}{S_{e2}} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

（2）落差所代表的比降与数据处理断面处比降不一致时。在图 9-12 中，若数据处理断面位于上比降断面，则各断面水面比降的关系为

$$S_u > S_m > S_l$$

式中： S_u ， S_m ， S_l 分别为上、中、下断面的水面比降。

对于顺直的宽浅河流，当某一水位时，设不同比降所对应的落差分别为 ΔZ_1 、 ΔZ_2 ，对应的流量分别为 Q_1 、 Q_2 ，则

$$Q_1 = \frac{1}{n} A_u R_u^{\frac{2}{3}} S_{u1} \approx \frac{B_1}{nL^{1/2}} h_1^{\frac{5}{3}} \Delta Z_1^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_2 = \frac{1}{n} A_l R_l^{\frac{2}{3}} S_{l2} \approx \frac{B_2}{nL^{1/2}} h_2^{\frac{5}{3}} \Delta Z_2^{\frac{1}{2}}$$

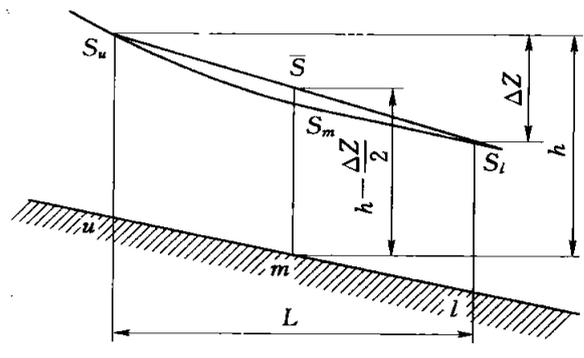


图 9-12 测流断面位置与水面比降的关系

式中： B_1 、 B_2 分别对应于落差 ΔZ_1 、 ΔZ_2 时的中断面水面宽。当比降变化不大、两比降断面相距不远时，可以认为 $B_1 \approx B_2$ ； h_1 、 h_2 分别对应于 ΔZ_1 、 ΔZ_2 时中断面的平均水深； L 为两比降水尺之间的距离。

两流量之比为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{S_{u1}}{S_{u2}} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

由图 9-12 可知，当水面曲线的曲率很小时计算为

$$h_1 \approx h - \frac{\Delta Z_1}{2}$$

$$h_2 \approx h - \frac{\Delta Z_2}{2}$$

如图 9-12 所示。计算为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left[\frac{h - \frac{\Delta Z_1}{2}}{h - \frac{\Delta Z_2}{2}} \right]^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9-27)$$

式 (9-27) 中，等式右端第一项与水位和落差有关，称为断面改正因数。若将它对流量的影响反映到落差指数中去，计算为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2} \right)^{\beta} \quad (9-28)$$

可见，式 (9-28) 与式 (9-25) 相同，只是这时的 β 除含有前述的摩阻损失与流速的指数关系“1/2”外，还包括断面改正因数的影响。因此，这时的 β 值可能与“1/2”有较大的差别。只有当 h 很大或 ΔZ_1 与 ΔZ_2 相差很小时，断面改正因数才接近于 1，也才有 $\beta \approx 1/2$ 。

同理，若数据处理断面在下比降断面时，分析方法与上面完全相似，不同的是这时的断面改正因数应表示为 $\left[\left(h + \frac{\Delta Z_1}{2} \right) / \left(h + \frac{\Delta Z_2}{2} \right) \right]^{\frac{5}{3}}$ 。

3. 受变动回水影响的 $Z-Q$ 关系分析

对于受变动回水影响的 $Z-Q$ 关系，由于同水位下流量的大小受到落差变化的影响，而落差的变化又主要是下游水体水位变化的结果，因此其 $Z-Q$ 关系除与本站水情变化有关外，还与下游水体水情的变化有关。随着下游水体对测验河段的影响程度和时间的不同， $Z-Q$ 关系曲线的走向也不相同，有的呈逆时针绳套，有的呈顺时针绳套，有的呈“8”字形，有的呈反“8”字形（图 9-13）。

分析受变动回水影响与受洪水涨落影响两种 $Z-Q$ 关系曲线，便可发现：两者的共同点都是因水面比降的变化而影响流速、进而影响流量的。若把各实测点的水面比降（或落差）标注在 $Z-Q$ 关系图上，都可发现右侧点比降大、左侧点比降小。因此，有些 $Z-Q$ 关系，既可当成受洪水涨落影响，也可被视为受变动回水影响。特别是因河槽调蓄作用引起的变动回水影响与洪水涨落影响，往往更难区分。这时，在数据处理方法的选择上就有较大的灵活性。例如，有时把复式洪水绳套当成受变动回水影响来处理，采用落差法进行流量的数据处理。

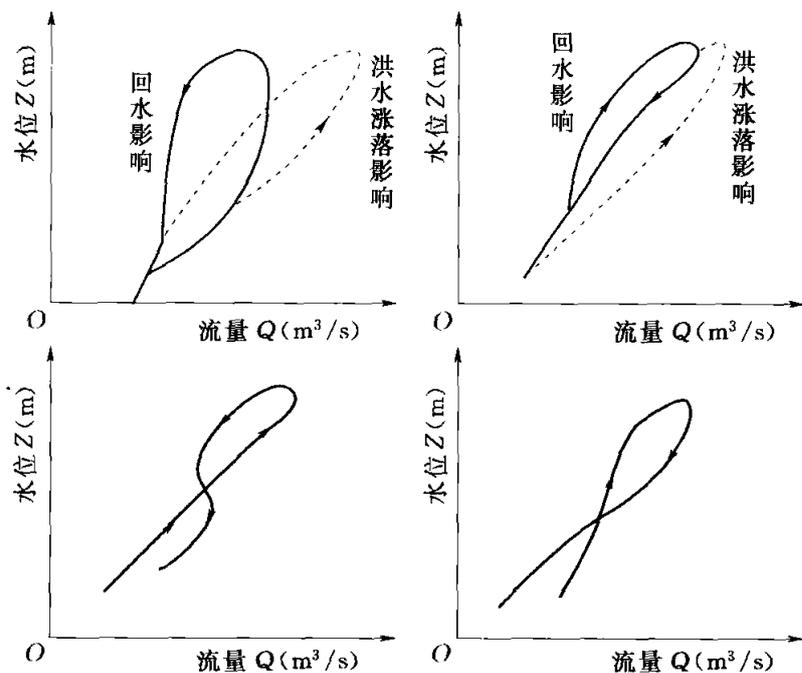


图 9-13 受变动回水影响的 Z-Q 关系

然而，变动回水影响与洪水涨落影响两者之间也存在着明显的差异，主要表现在：①水流流态不同。前者被视为缓变恒定流，后者被当作渐变非恒定流。②反映比降变化的因素不同。前者主要是分析落差，而后者着重分析洪水特性，通常用涨落率来反映比降的变化。③影响源地不同。变动回水影响来自下游水体水位的变化，洪水涨落影响乃源于上游洪水波的运动。④Z-Q 关系曲线的特征不同。受洪水涨落影响时，关系线可按时序连成逆时针绳套曲线，变动回水影响却没有这种特征。

9.3.3 受断面冲淤影响的 Z-Q 关系

测站受冲淤影响时，Z-A 关系曲线将发生变动，从而使 Z-V、Z-Q 关系曲线亦发生变动。

1. 冲淤情况分类

(1) 经常性冲淤。表现为冲淤变化频繁，冲淤虽有程度不同之分，但分不出相对稳定的阶段，反映在关系曲线图上，测点分布非常散乱。

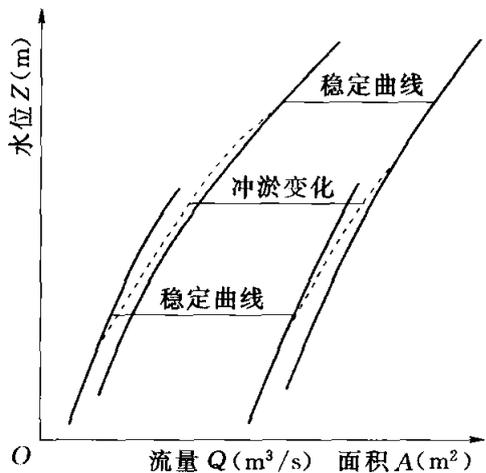


图 9-14 不经常性冲淤

(2) 不经常性冲淤。这种冲淤只发生在几次较短的时间里，两次冲淤之间，有较长的稳定时间，关系测点随时间可分成几条有规律的带组，冲淤变化期间，测点表现为从一带组过渡到另一个带组，见图 9-14。

(3) 普遍冲淤。测流断面与测流河段冲淤变化一致，即冲淤前后的河底坡降及断面形态基本相似。此时，冲淤前后的关系曲线呈纵移状态。见图 9-15。

(4) 局部冲淤。冲淤前后断面形状及测验河

段剧烈改变，河底比降明显变化。反映在关系曲线上，冲淤前后的趋势大幅度改变，无一定规律可循。

有时测流断面虽有冲淤，但高水时控制良好，或因冲淤增减的面积占高水面积的比重很小，常使关系曲线上部为单一线，下部呈扫帚形，见图 9-16。

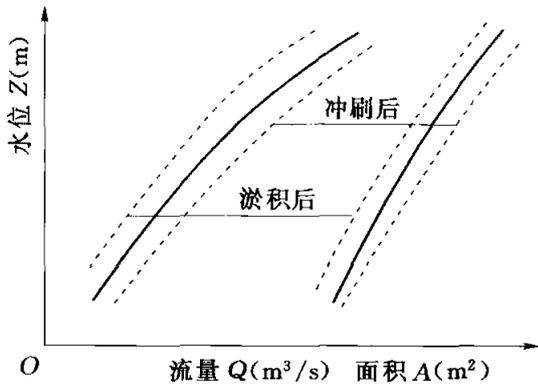


图 9-15 普通冲淤受断面冲淤影响的 Z-Q 关系

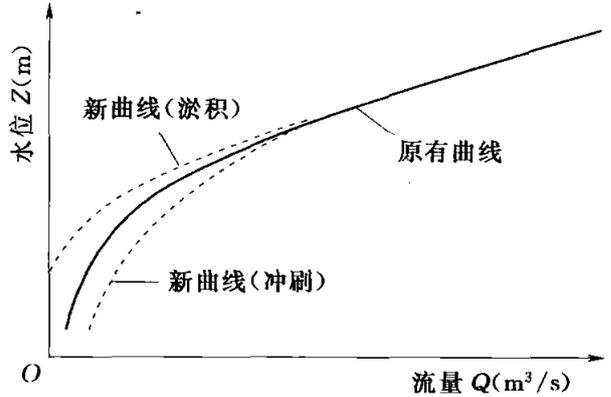


图 9-16 局部冲淤 Z-Q 关系曲线

2. 冲淤情况的分析

为了正确的制定 Z-A、Z-Q 关系曲线，应对冲淤情况进行分析，分析方法有：切线比较法、冲淤过程线及横断面图比较法等。

(1) 切线比较法。此法适用于底部冲淤的情形。此时各级水位下河面宽基本上是固定的。由以前分析知：稳定面积曲线的斜率等于水面宽的倒数。当河底有冲淤时，上述关系发生变化。见图 9-17，当水位增加 ΔZ ，引起面积增大 ΔA_1 ，河底部分因冲刷又增大 ΔA_2 ，在 Z-A 关系曲线上，两点连线的斜率为

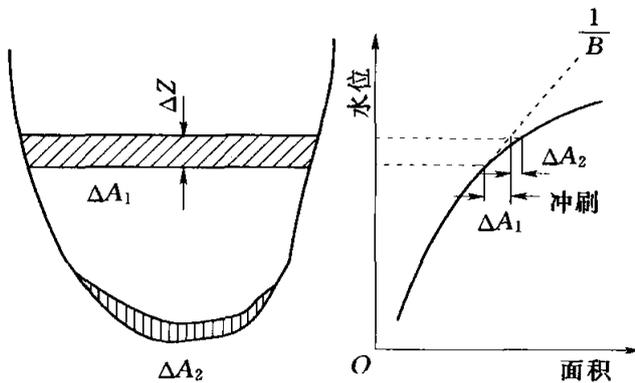


图 9-17 切线比较法冲淤分析示意图

$$\frac{\Delta Z}{\Delta A} = \frac{\Delta Z}{\Delta A_1 + \Delta A_2}$$

若断面没有冲淤，其斜率为 $\frac{\Delta Z}{\Delta A_1} =$

$\frac{1}{B}$ ，二者相等，其关系为

$$\frac{\Delta Z}{\Delta A} < \frac{\Delta Z}{\Delta A_1} = \frac{1}{B} \tag{9-29}$$

用 Z-A 两相邻测点的连线作为实测斜率，与稳定斜率相比较，若两者重合，表示不发生冲淤；若相互交叉，说明断面发生冲淤变化。判断的标准是用后一个测点与前一个测点相比较。

由式 (9-29)，可得出如下结论。

在实测斜率小于河宽倒数时，涨水表示冲刷，落水表示淤积；反之，实测斜率大于河宽倒数时，涨水表示淤积，落水表示冲刷。

利用上述方法，可对下述曲线冲淤进行分析，在图 9-18 中，序号表示时间先

后，短虚线为用河宽倒数表示的斜率。短实线为面积曲线的斜率。

从图 9-17 可以看出：若以标准 Z-A 曲线为准，标准线的左半部，即 1、2、3、B 连线，属于淤积阶段；右半部，即 B、4、5、6、7 连线，属于冲刷阶段。若不以标准曲线为准，而以时间顺序分析冲淤情况，可用切线比较法，判断出各点或各时段的冲淤情况。其方法是将同水位河面宽倒数绘到实测面积曲线点处，与各点处切线进行比较，如 1、2、3、…、7 等点处的短虚线与短实线所示。

分析时，从 A 点开始。A~2 点，实测曲线斜率大于各点的河宽倒数，为涨水段，由上述法则，此段属于淤积，2 点处两短线重合，属不冲不淤，实际上该点达到淤积最大处。

2~3 点，实测曲线斜率小于河宽倒数，仍为涨水段，根据法则判断属冲刷，即后一时间的断面与前一时间相比都在冲刷，但都还没有恢复到涨水的标准 Z-A 线上，在 3 点达最高水位，此处的斜率为最小值，趋于零。

3~4 点，斜率均为负值，上述判断冲淤性质的法则不适用，但可直观看出，该阶段水位在降落，断面面积反而增大，故可判断出属于冲刷。在 B 点，实际面积曲线与标准面积曲线相交，说明断面面积已回到与标准断面面积相等的程度，在 4 点处面积曲线斜率达最大值，为无限大。

4~5 点，实测曲线斜率大于河宽倒数，为落水段，故仍属冲刷，由图 9-18 上看出，冲刷的势头在减小，在 5 点处，两种斜率重合，此处处于不冲不淤的稳定阶段，实际上是冲刷最小处。

5~7 点，实测曲线斜率小于河宽倒数，仍为落水段，由法则判断属淤积。

由以上分析，利用切线比较法，以判断任何点处和任何阶段的冲淤变化情况。在分析过程中均需要绘制稳定状态下的 Z-A 曲线的斜率。

稳定斜率（河宽倒数）的绘制：先找出该点的河面宽，则稳定斜率 $= \frac{1}{B} = \frac{1}{B} \frac{\Delta Z}{\Delta Z}$ ，设 ΔZ 为 1m，可求出 $B\Delta Z$ 表示的面积。在图 9-1 的空白处，按关系曲线图的纵横比例，横坐标上取 $B\Delta Z$ 面积数字的长度，纵坐标取 1m 的长度，连斜线即稳定的斜率线，再用推平等线的办法将其平移到测点处，即得虚线表示的斜率线。

(2) 冲淤过程线法。用表示冲淤的某一指标为纵坐标，时间为横坐标，依时序绘制变化过程线，能明显的表示出冲淤变化情况。其绘制方法有以下几种。

1) 平均河底高程过程线法。此法是将实测断面相应水位减去平均水深，得平均河底高程；以平均河底高程为纵坐标，测流平均时间为横坐标。该过程线上升变为淤积期，下降变为冲刷期，水平变为稳定期。此法适用于矩形或 U 形断面，发生普遍

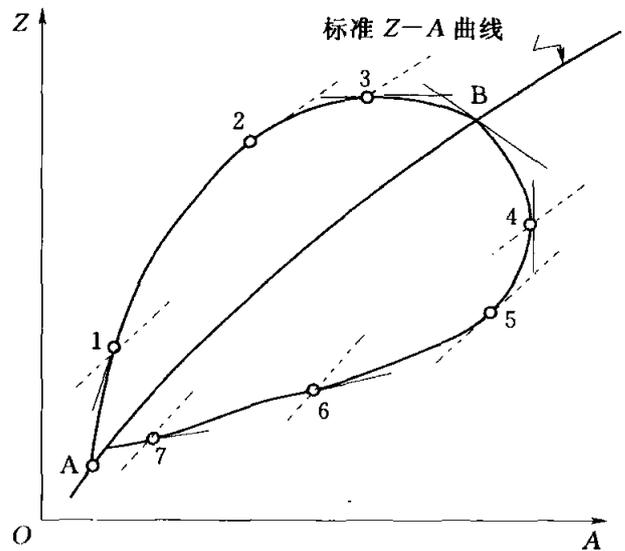


图 9-18 Z-A 曲线冲淤分析

冲淤的情形，见图 9-19。

2) 同 $Z-A$ 过程线法。选择一标准水位，此水位以上，面积无冲淤变化。将各实测断面面积，加减一条形面积，都换算到标准水位下的面积数值，此面积称同水位下的面积，将其作为纵坐标，时间为横坐标，绘制过程线，也能直观地反映冲淤变化过程。该过程线上升变为冲刷期，下降变为淤积期，水平变为稳定期，见图 9-20。

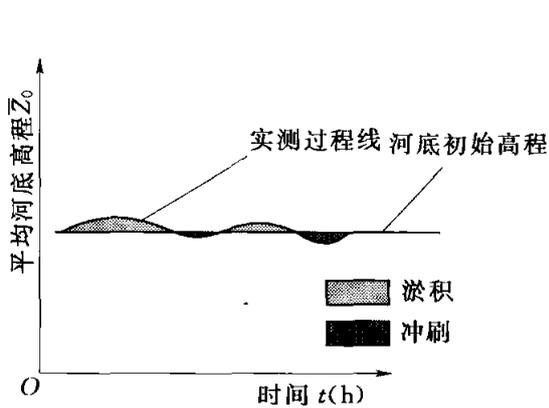


图 9-19 平均河底高程过程线法分析

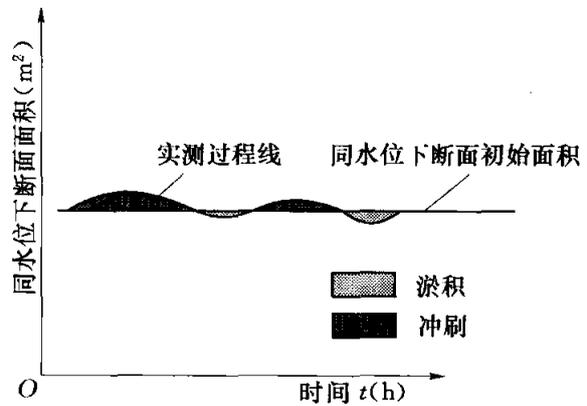


图 9-20 同 $Z-A$ 过程线法分析

(3) 横断面图比较法。对一次洪峰断面冲淤变化进行分析时，将各实测断面套绘在一起，可以看出断面内冲淤变化的部位和演变方向。此法工作量大，主要在分析突出点时使用，绘图时，纵坐标以河底高程表示，横坐标以起点距表示，见图 9-21。

9.3.4 受水草生长、结冰及混合因素影响的 $Z-Q$ 关系

(1) 水草影响。在平原地区，某些气温较高，雨量丰沛的河流，水草生长茂盛。

水草生长的主要影响，是使过水面积减小，糙率增大，因塞水使比降减小，从而导致流量减小。反映在 $Z-Q$ 关系图上，受水草影响的各关系点都分布在畅流期 $Z-Q$ 关系曲线的左侧。

分析受水草生长影响时，应注意：①水草生长的时期。例如，有的测站水草生长发生在中低水位时期，随水草生长的盛衰不同， $Z-Q$ 关系曲线分成几条，而高水时因其影响甚小，使 $Z-Q$ 关系曲线又合成一条。②水草生长的位置。水草生长位置不同，对 $Z-Q$ 关系的影响也不同，如果控制断面及其附近生长水草，则其影响与河道淤积或河底结冰相似；若水草生长在河道两侧或滩地，则仅高水时才有影响；若测验河段内或其附近水草丛生，则对 $Z-Q$ 关系影响更大。

(2) 结冰影响。在我国北方的结冰河流，当测站受结冰影响时，有时发生水位大幅度上涨，而流量反而有减小现象，造成冰期流量关系曲线反常， $Z-Q$ 关系成反比

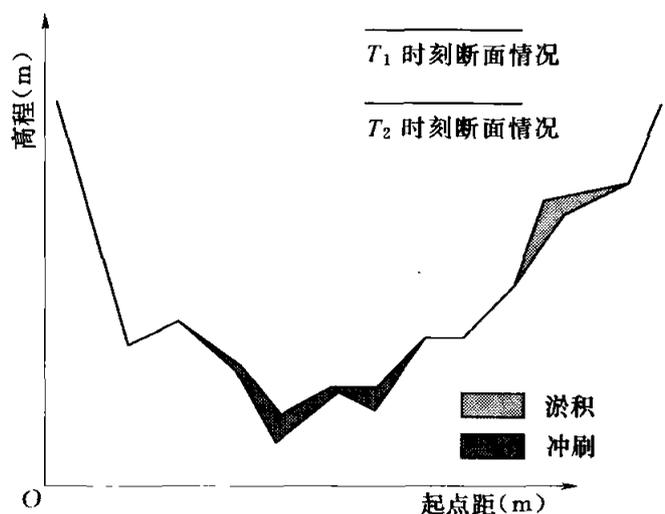


图 9-21 横断面图比较法分析

变化。这是因为冰期水流的过水断面面积减小,糙率增大,使得相同水位下的流量减小,关系点偏于畅流期 $Z-Q$ 关系曲线的左侧。冰情不同,对流量的影响程度也不同。例如,下游发生冰塞、冰坝时使水位上升,形成回水顶托影响。又如有些小河,其冰期流量随气温的日变化而发生相应的变化。

(3) 混合因素影响。同一测站的 $Z-Q$ 关系,同时受到两种或两种以上因素的明显影响,称为受混合影响。例如,冲淤与洪水涨落,冲淤与变动回水,洪水涨落与变动回水混合影响等。

在混合因素影响下,关系曲线更加复杂,测点分布更加散乱,给制定关系曲线带来很大难度。但仔细分析各因素在不同时期的消长过程,并从中探求某种主要因素的变化规律,找出各个时期的主要影响因素,还是可以制定出比较合理的关系曲线的。

9.3.5 时序型流量数据处理方法

时序型流量数据处理(资料整编)方法,主要根据流量变化的连续性,按照实测的 $Z-Q$ 关系点的时序连成关系曲线的数据处理方法。

1. 连时序法

连时序法适用于受某一因素或综合因素影响而连续变化时。本法要求测流次数较多、并能控制 $Z-Q$ 关系的转折点。

定线时,先绘制 $Z-Q$ 、 $Z-A$ 、 $Z-V$ 关系图,并依测点时序进行分析,找出各个时段的影响因素,按照各种因素影响下的 $Z-Q$ 关系曲线特性,以参证因素的变化作参考,连绘 $Z-Q$ 关系曲线。

连线时,主要依据是实测 $Z-Q$ 关系点,因此要求测次能控制流量变化的转折处。但是,连线时并不一定全部通过实测点,因为实测 $Z-Q$ 关系点是有误差的,甚至可能会有错误,因此连线时一定要分析定线。特别是实测 $Z-Q$ 关系点与分析的影响因素有较大出入时,同时又涉及到本站流量的极值,则更要深入分析。

分析定线时,水位过程线是必不可少的。在水位过程线上,要醒目地注明各实测流量测次位置,特别是峰、谷附近。因为实测点在峰谷前后的位置,有时会对 $Z-Q$ 关系线有较大影响。

分析受断面冲淤或结冰影响时,还应参考用连时序法绘出 $Z-A$ 关系曲线变化趋势,帮助绘 $Z-Q$ 关系曲线。如高水时缺测断面资料,须结合测站特性,分析冲淤变化规律,先就面积曲线进行插补,再根据插补的面积曲线与 $Z-V$ 关系曲线求出 $Z-Q$ 关系曲线。

图 9-22 为主要受冲淤影响连时序法绘制的 $Z-Q$ 关系曲线。

对于受洪水涨落影响的 $Z-Q$ 关系曲线,主要是按洪水绳套曲线的特性进行连线,这时,连时序法也称为绳套曲线法。

洪水绳套曲线的分析主要是水位过程线,因为水位过程线的斜率是水位的涨落率。从式(9-23)中知,对于同一测站,涨落率是反映洪水特性的重要参数。根据受洪水涨落影响的 $Z-Q$ 关系特性洪水绳套一定是逆时针绳套;同一测站,大致相似的洪水过程,形成的绳套曲线大致相似;不同的涨落率绳套的幅度不同,一般涨落率大者,绳套的宽度亦大;复式绳套一般较前一个绳套偏左,如图 9-23 所示。

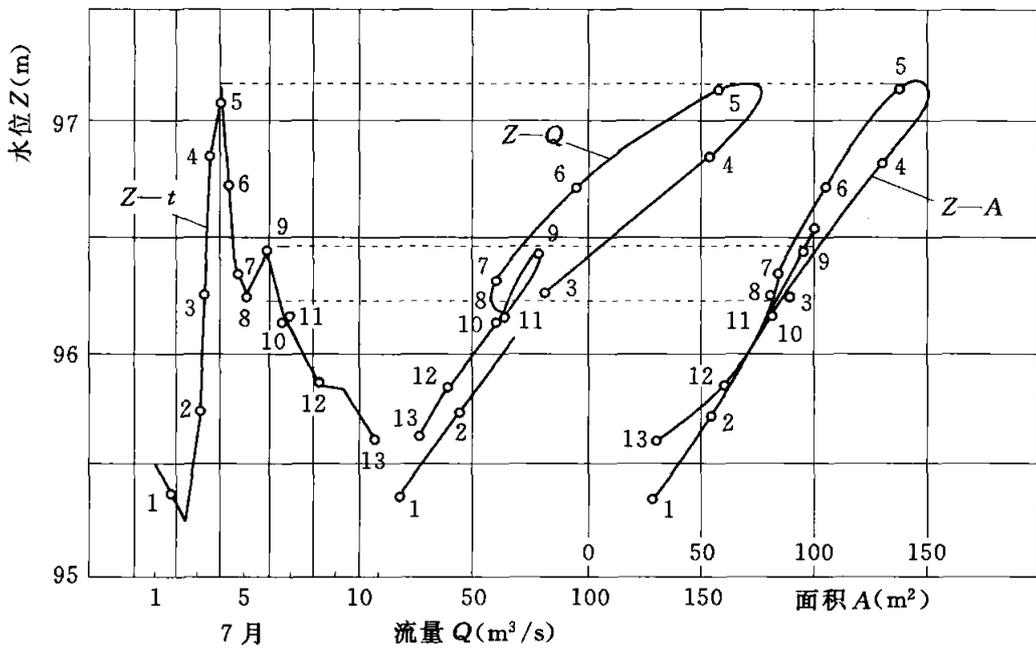


图 9-22 连时序法所绘 Z-Q 关系曲线

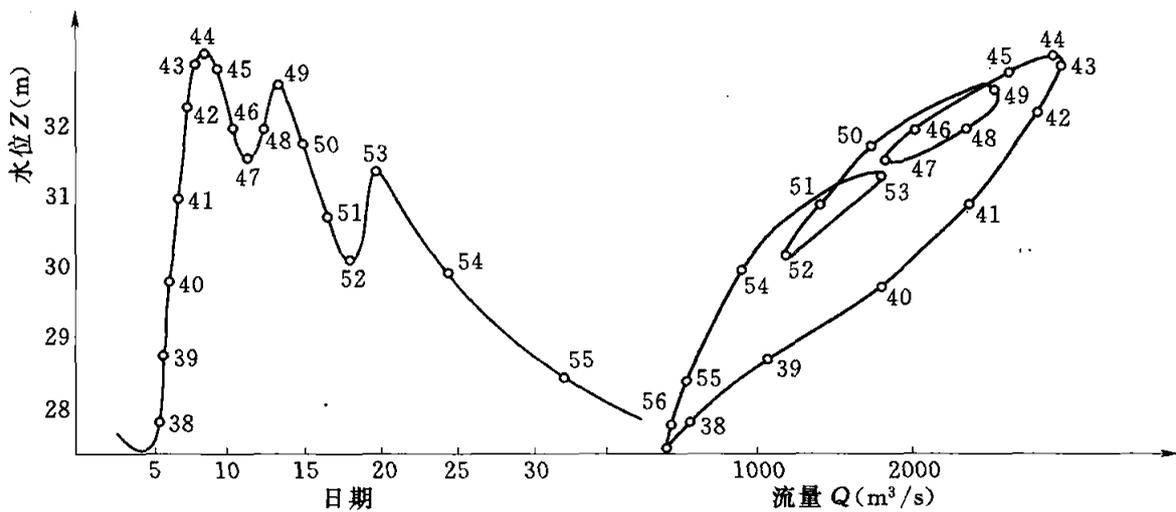


图 9-23 绳套曲线法所定 Z-Q 关系曲线

分析受变动回水影响时，主要参考比降的变化。在同水位下，一般比降大者流量大，Z-Q 关系点在右边。对于实测流量点较少或者对实测点有怀疑的地方，特别是 Z-Q 关系曲线的走向难以确定时，必须分析比降（落差）来确定 Z-Q 关系曲线。

图 9-24 为受变动回水影响时连时序曲线的实例。从与 48 测次同水位落差的分析知，图中所定连时序线基本上是合理的。

受混合影响时，应选其主要的一种影响因素（同时也照顾其他次要因素）的变化趋势作参考。在这种情况下，曲线的变化将更复杂，绘制曲线时，须进行深入分析，分别处理。

流量的推求是用水位在不同时段相应的水位流关系曲线上查读，因此各段曲线适用时间必须清楚。

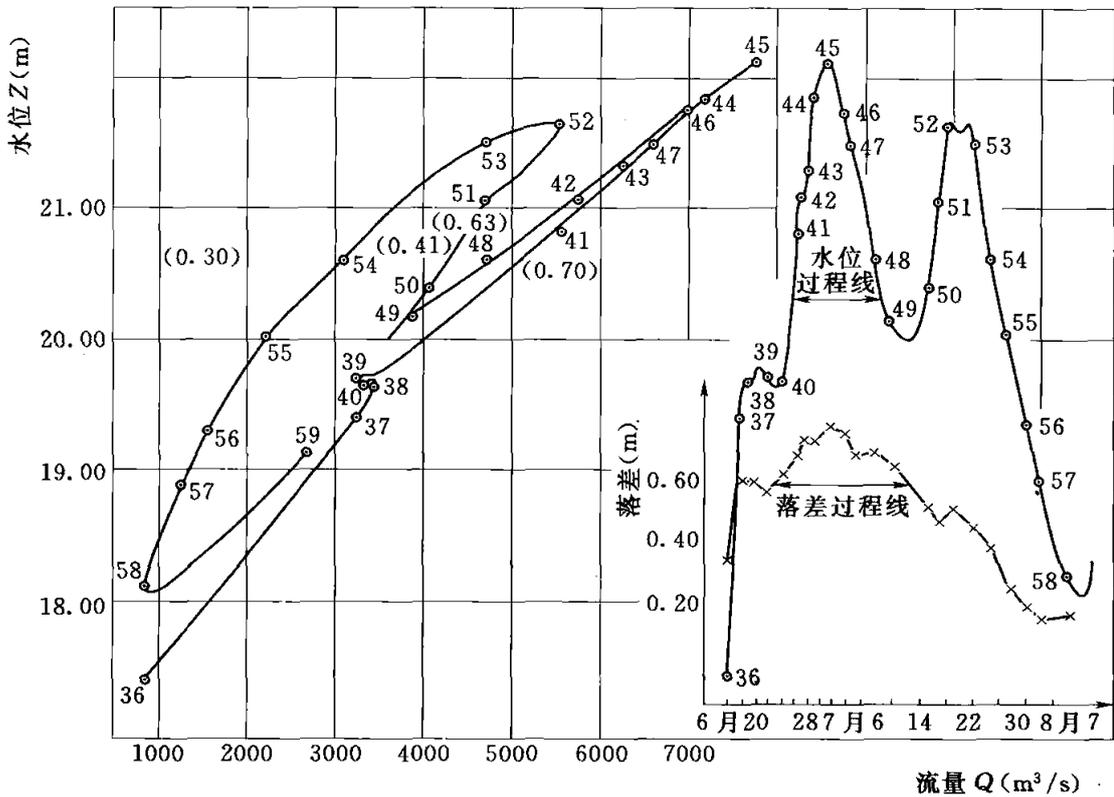


图 9-24 变动回水影响时的连时序线

2. 临时曲线法

临时曲线法主要适用于不经常性冲淤的测站，有时也用于处理结冰、水草生长影响的测站。在 $Z-Q$ 相对稳定的时段内各自定出一条曲线，称为临时曲线。

对于受冲淤影响的测站，定线时，首先在 $Z-A$ 、 $Z-Q$ 关系图上，依时序了解测点的分布规律；结合水位过程线，了解水情发生重大变化的时期，分析确定相对稳定时段和测点分组；通过各稳定时段 $Z-Q$ 关系点的点群中心，定出各稳定时段的 $Z-Q$ 关系曲线，方法同单一曲线法。

结冰影响时，冰期的流量与畅流期同水位流量相比偏小，其断面变化与受冲淤影响相似，稳定期定线方法亦与上述受冲淤影响相似。

受水草生长影响时，其流量与不受水草生长影响的流量相比偏小，各影响程度相对稳定的时段形成的 $Z-Q$ 关系为各自的临时曲线。

两条稳定的临时曲线之间的时期称为过渡期。过渡期 $Z-Q$ 关系的处理方法有以下几种。

(1) 自然过渡。常见于冲淤程度不大和受水草生长影响的测站。两条曲线有一部分重合。两条曲线间的过渡期就在重合部分，如图 9-25 所示。对于受冲淤影响的测站，若高水时发生冲淤，但冲淤影响不大，甚至对流量的影响不及测验误差大，因此水位流量关系的差异不明显，低水时，冲淤的影响才显现出来，对水草生长的影响也主要是对低水影响。由于影响是逐渐地，所以就有一段时期，两条 $Z-Q$ 关系曲线自然衔接起来。

(2) 连时序过渡。在过渡时段时，可参照水位趋势与该时段内的实测点用连时序

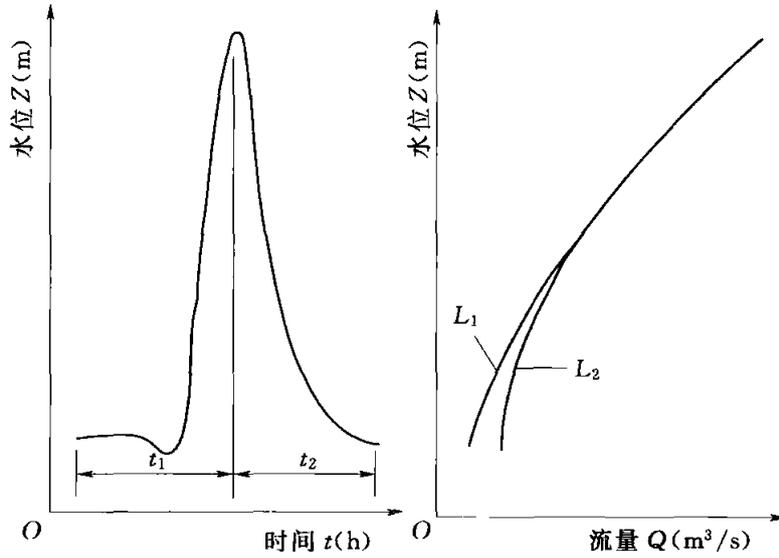


图 9-25 自然过渡

法连出。过渡线可以反曲，但在开始与终了都应与临时曲线相切。如过渡时段跨过峰顶，则应与峰顶水位相切，如图 9-26 所示。

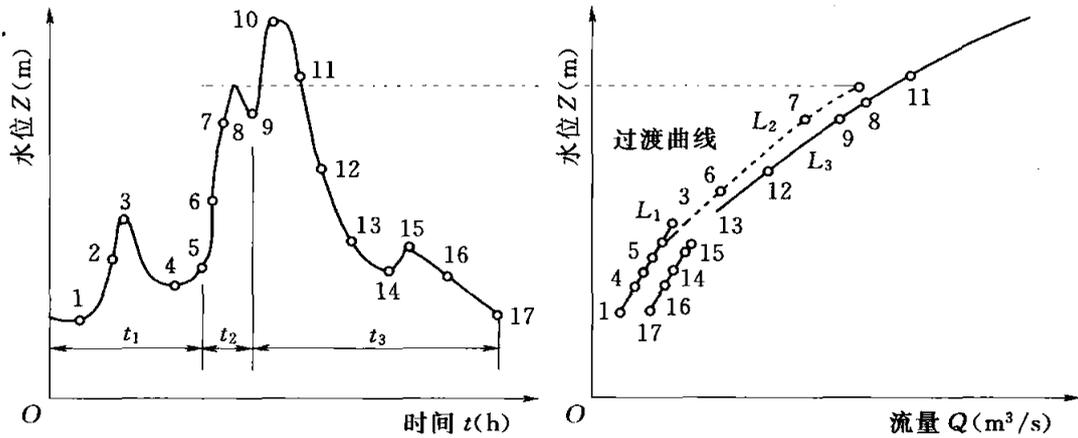


图 9-26 连时序过渡

(3) 内插曲线过渡。在过渡段水位平缓或有小起伏等情况下绘过渡线不便时，可采用几条均匀内插曲线推流，如图 9-27 所示，内插曲线应尽量通过相应的实测点，并注明每条内插曲线的使用日期。

定线后，应将各条曲线依时序编号，并注明每条曲线的使用时间和水位的上下界限。推流时，用水位在各相应的临时曲线上推求流量。

3. 改正水位法和改正系数法

(1) 改正水位法。改正水位法可用于受经常性冲淤但变化较均匀缓慢的测站，

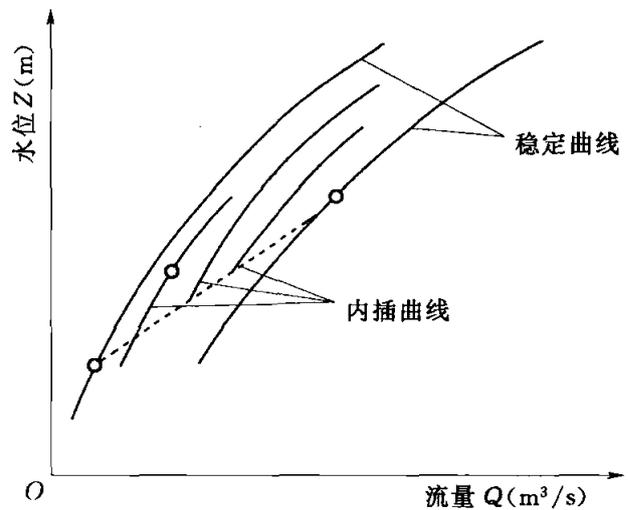


图 9-27 内插曲线过渡

并用于受水草生长影响或结冰影响的时期。本法要求有足够的实测流量点，影响因素变化过程的转折处要求有实测点加以控制。

定线时，先绘制标准曲线。在点绘的 $Z-Q$ 关系图上，绘制一条单一的 $Z-Q$ 关系曲线，称为标准曲线，如图 9-28 所示。

量取各测次点子与标准曲线的纵差，即水位改正数。测点在标准曲线上方者，水位改正数为负值，反之为正值。

以时间为横坐标，水位改正数为纵坐标，点绘水位改正数过程线，连线时宜连成平滑连续的曲线。

流量的推求是根据不同的时间在水位改正数过程线查得水位改正数，以水位加水位改正数得改正水位后，再从标准曲线（或已编制的 $Z-Q$ 关系表）上查读流量。

标准曲线的确定可以根据不同的情况选用不同的方法。

受普遍冲淤的河段，可用导向原断面法定标准曲线。如河床纵横断面变化前后大致相似，即认为冲淤前后整个控制河段（包括测流断面）呈纵移状态， $Z-A$ 、 $Z-Q$ 关系点子也是等距纵移的。如图 9-29 所示，先在 $Z-A$ 关系图中选择居中的一次大断面或实测水道断面作为标准，绘出其 $Z-A$ 关系曲线作为面积的标准曲线，然后自第一测次的点子向标准曲线作垂直线，求得其纵差。将相应测次的流量点子向同方向移动相同的纵差距离，就得到全部导向原断面后的水位流量关系点子，如图 9-29 中“+”点所示。这些点子已较原实测点集中，可通过点群中心绘出 $Z-Q$ 关系标准曲线。

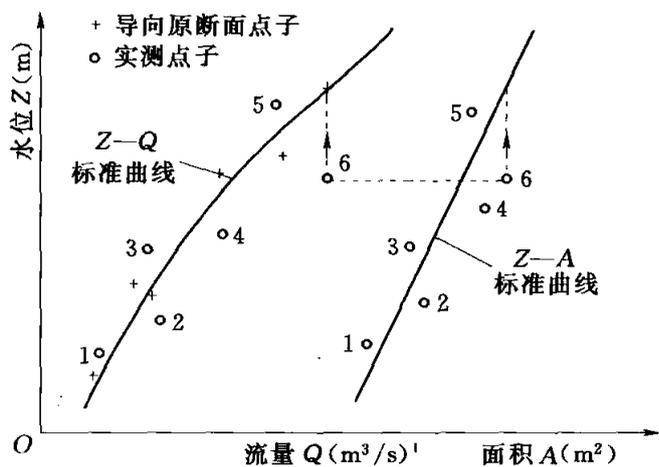


图 9-29 导向原断面法确定标准曲线

也可在各 $Z-A$ 关系点上，绘出其斜率等于河宽倒数的短斜线，即该点的 $Z-A$ 关系曲线的切线，然后顺各点的切线方向，居中定出一条 $Z-A$ 关系的标准曲线。

在某次洪水涨落期间，河槽断面发生突变现象，冲淤前后两断面形状不同，采用一条 $Z-A$ 关系曲线效果不好。这时最好选择突变前后两个实测断面作为标准，将突变前后的流量点子分别导向两个断面，定出两条 $Z-Q$ 关系的标准曲线。

当断面受局部冲淤影响，或者冲淤程度小，其水位流量关系点子分布成一条明显条状时，可直接通过点群中心定一条 $Z-Q$ 关系标准曲线，这时得到的水位改正数过程线，则不能完全代表冲淤变化过程的性质。

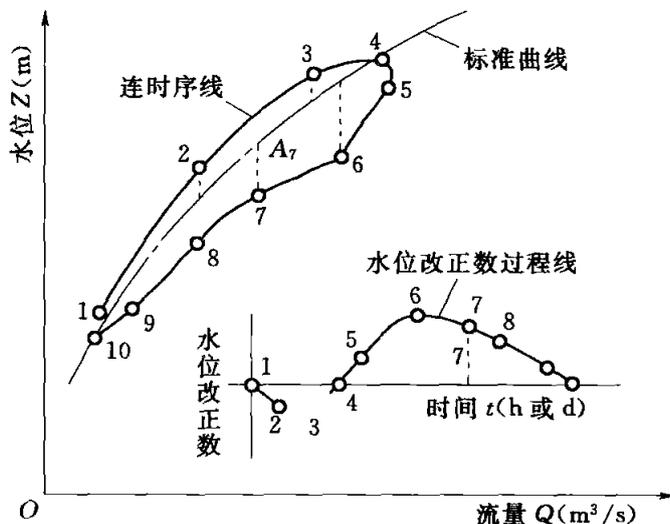


图 9-28 改正水位法 $Z-Q$ 关系

对于受水草生长影响时，是以不受水草生长影响时的 $Z-Q$ 关系曲线为标准曲线；对结冰期的标准曲线，一般选用畅流期的 $Z-Q$ 关系曲线。两者的水位改正数，应全部为负值。当改正数等于零时，表示流量不受水草生长或结冰影响。

(2) 改正系数法。改正系数法主要适用于冰期 $Z-Q$ 关系不稳定，但没有冰塞、冰坝、壅水现象时，或河槽中受水草生长影响时。

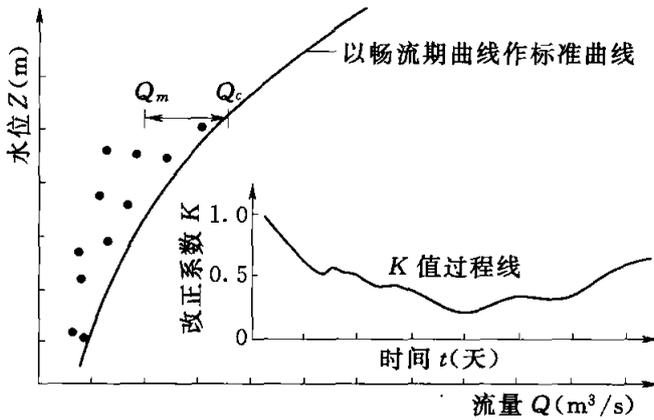


图 9-30 改正系数法

定线与推流方法与改正水位法相似，现以本法用于冰期推流情况为例说明。

改正系数法亦要定出标准曲线，如图 9-30 所示，其标准曲线为畅流期的 $Z-Q$ 曲线；计算实测冰期流量 Q_m 与其同水位标准曲线上查得流量 Q_c 的比值 K ，即 $K = \frac{Q_m}{Q_c}$ ；参考水位过程，点绘改正系数过程线。图 9-30 即改正系数法的标准曲线和 K 值过程线。

推求流量时，从水位查得标准曲线上的流量 Q_c ，由时间在过程线上查得 K ， Q_c 与 K 相乘即得该时刻相应的流量。

4. 连实测流量过程线法

连实测流量过程线法是一种撇开水位、直接连接各次实测流量点成过程线，从而推求逐时、逐日流量的方法。

在畅流期，当受断面冲淤、变动回水等因素影响，使 $Z-Q$ 关系紊乱，流量变化不甚剧烈，流量测次较多、能控制流量变化过程，即可用此法。

在封冻期，当 $Z-Q$ 关系紊乱，流量变化平缓、测次较多时，宜用此法。

流冰期，测验困难使用其他方法受到限制时也可使用此法。

连绘流量过程线时，应参照水位过程线，见图 9-31。从中可发现突出点并插补出峰、谷点，必要时还应点绘出缺测部分的局部 $Z-Q$ 、 $Z-A$ 关系曲线进行分析，绘出连时序线以插补流量值。

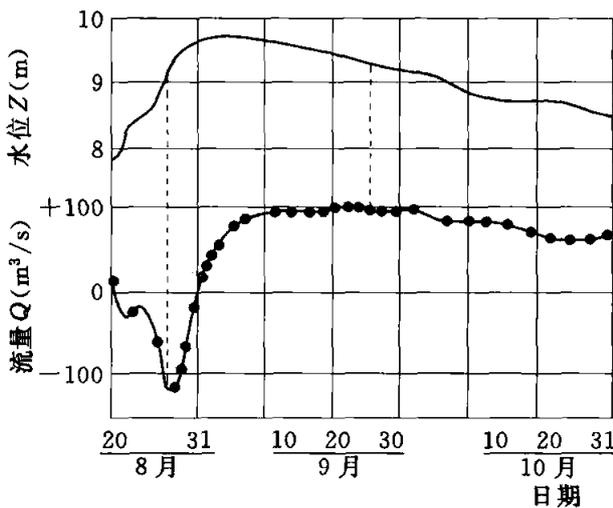


图 9-31 畅流期连实测流量过程线法

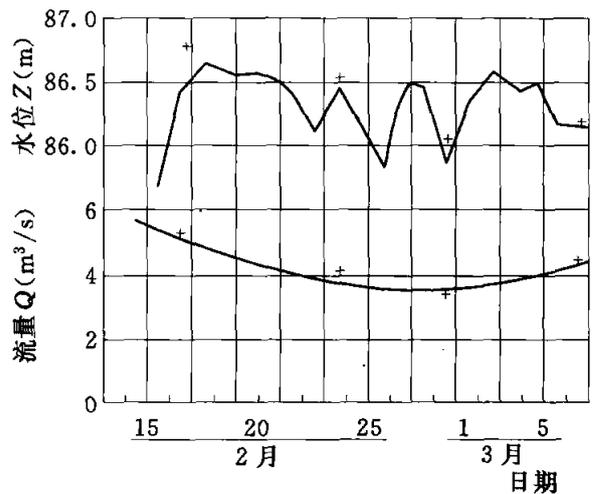


图 9-32 封冻期连实测流量过程线法

冰期用此法定线推流时，可直接连接各实测点为过程线。从图 9-32 中可以看出水位虽有起伏变化，但流量变化甚微。

在冰期与畅流期的过渡时段，在流量测点稀少或没有测点时，应考虑水位过程线的趋势，才能连出流量过程线，如图 9-33 所示。

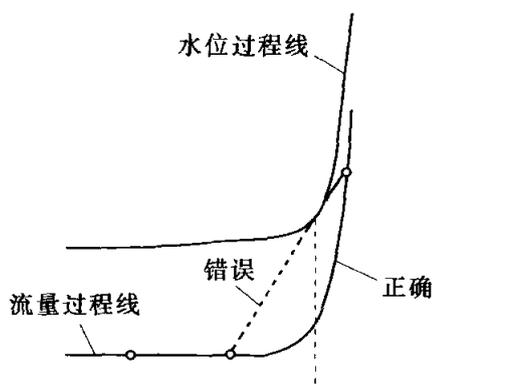


图 9-33 融冰时的流量过程线连法

9.3.6 水力因素型流量数据处理方法

1. 校正因素法

将受洪水涨落影响的实测流量通过校正因素的校正后，便可转化成同水位下稳定流的流量。

(1) 已知： Z 、 Q_m 、 $\frac{\Delta Z}{\Delta t}$ 。

(2) 求： Q_c 、 $\frac{1}{US_c}$ 。

(3) 解：试算。

1) 通过 $\frac{\Delta Z}{\Delta t} = 0$ 的点，（峰顶、谷底是已知的，而其余 $\frac{\Delta Z}{\Delta t}$ 有正有负，其间必有 $\frac{\Delta Z}{\Delta t} = 0$ 的点），初定 $Z-Q_c$ 关系曲线。

2) 在初定的 $Z-Q_c$ 关系曲线上，根据各测点的水位 Z_i ，查出其相应的 Q_{ci} 。

3) 计算各测点的 $\left(\frac{1}{US_c}\right)_i$ 。

$$\left(\frac{1}{US_c}\right)_i = \frac{\left[\left(\frac{Q_{mi}}{Q_{ci}}\right)^2 - 1\right]}{\left(\frac{\Delta Z}{\Delta t}\right)_i} \quad (9-30)$$

4) 点绘 $Z_i - \left(\frac{1}{US_c}\right)_i$ 的关系点据，并通过点群中心定线 $Z - \frac{1}{US_c}$ 。

5) 检验 $Z - \frac{1}{US_c}$ ，有以下方法。

a. 根据各测点的水位 Z_i ，在 $Z - \frac{1}{US_c}$ 查出其相应的 $\frac{1}{US_c}$ 。

b. 计算 $Q_{ci} = \frac{Q_{mi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{S_c U}\right)_i \left(\frac{\Delta Z}{\Delta t}\right)_i}}$ （称为校正点）。

c. 根据各测点的水位 Z_i 、校正点 Q_{ci} ，点绘在初定 $Z-Q_c$ 关系图中，并判断：
 ①若这些点据集中在初定 $Z-Q_c$ 关系曲线两侧，符合定单一线要求，则通过；
 ②若这些点据散乱，不符合定单一线要求，则修正；
 ③若这些点据仍然涨水点在落水点右边，依时序仍可连成逆时针走向的绳套曲线，只是绳套幅度变小，则将 $Z - \frac{1}{US_c}$ 修大，直至符合定单一线要求；
 ④若这些点据落水点在涨水点右边，依时序可连成顺时

针走向的绳套曲线, 则将 $Z - \frac{1}{US_c}$ 修小, 直至符合定单一线要求; ⑤若这些点据无论怎样调整, 都无法达到符合定单一线的要求, 则重新定 $Z - Q_c$ 关系曲线 (图 9-34)。

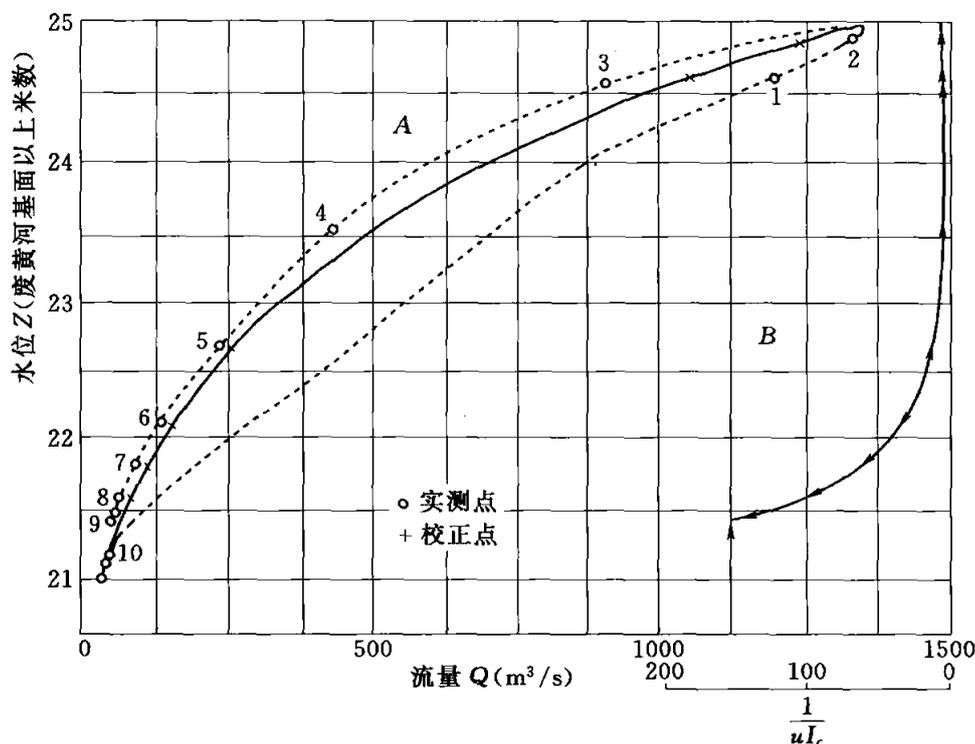


图 9-34 校正因素法 $Z - Q$ 关系

[思考题 9-2] 上述情况, 为什么通过修大或修小 $Z - \frac{1}{US_c}$ 曲线, 能够使校正点集中在初定 $Z - Q_c$ 关系曲线两侧?

(4) 推流。

1) 已知: Z 、 $\frac{\Delta Z}{\Delta t}$ 、 $Z - Q_c$ 、 $Z - \frac{1}{US_c}$ 。

2) 求: Q_m 。

3) 解为

a. 由 Z , 从 $Z - \frac{1}{US_c}$ 关系线上查得 $\frac{1}{US_c}$ 。

b. 由 Z , 从 $Z - Q_c$ 关系线上查得 Q_c 。

c. 代入式 (9-22), 求得 Q_m 。

(5) 适用条件。单式绳套, 测次较少。

(6) 关键。 $\frac{\Delta Z}{\Delta t}$ 选取不准确, 对定线推

流都有影响 (选弦线 ac' 的斜率与测点 b 的斜率相当, 代表性较好), 见图 9-35。

2. 涨落比例法

当校正因素法中的 $\frac{1}{US_c} = K$ 为常数时,

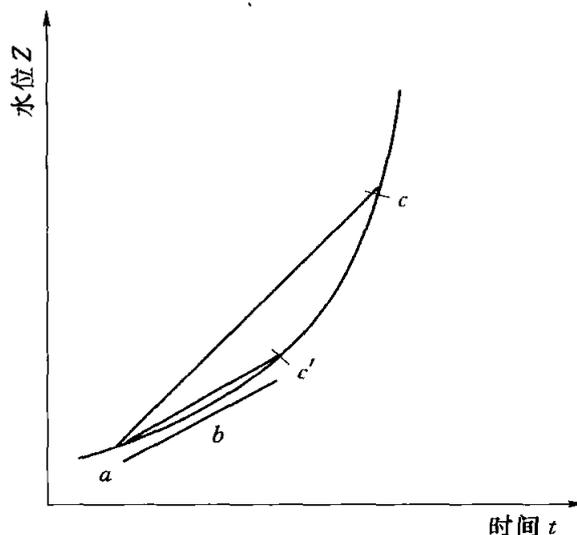


图 9-35 水位涨落率计算

式 (9-28) 为

$$Q_m = Q_c \sqrt{1 + K \frac{dZ}{dt}} \quad (9-31)$$

定线、推流方法同校正因素法。

3. 特征河长法

(1) 基本原理。天然河流的某一河段中，当水流为恒定流时，有 $Q=f(Z)$ 、 $W=f(Z)$ ，水位与流量、槽蓄量均呈单值函数关系。

受洪水涨落影响，水流为非稳定流时， $Q=f(Z, X)$ ， $W=f(Z, X)$ ，非单值函数关系。

特征河长法就是建立在特征河长概念上的方法，是处理受洪水涨落影响的水位流量关系的方法。特征河长，是指能使河段中断面水位、河槽蓄量和下断面流量三者之间保持单值函数关系所对应的这一河段的长度，如图 9-36 所示。可以看出，当中断面水位不变时，槽蓄量也不变，当出现附加比降时，虽下游水位减小，但因比降增大，使下断流量仍保持不变。这样，便为建立中断面水位与下断面流量或上断面水位与中断面流量之间的单值函数关系奠定了可靠的理论基础。

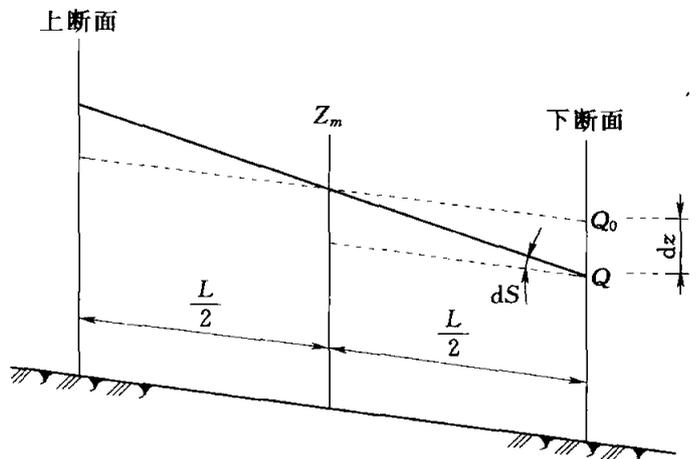


图 9-36 特征河长

对于天然河段的水流，若呈稳定流时，河段中各断面的水位之间都有固定的关系，并且对应于一个固定的河槽蓄量，河段内各断面的流量都相等。因此，稳定流时水位、流量、蓄量互呈单值函数关系。但在不稳定流时，上述关系就不成立了。

(2) 适用条件。受洪水涨落影响，断面与河段均较稳定，断面附近的上游无支流入汇。它能使绳套形水位流量关系转换成单值关系。

(3) 特征河长 L 的确定。设下断面水位流量关系为 $Q=f(Z, S)$ ，则

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial S} dS + \frac{\partial Q}{\partial Z} dZ \quad (9-32)$$

从前面分析知，因下断面流量为常数，故 $dQ=0$ 。又 $dZ = -\frac{L}{2} dS$ ，应用谢才公式 $Q=K\sqrt{S}$ ，代入式 (9-32) 为

$$L = \frac{Q_0}{S} \left(\frac{\partial Z}{\partial Q} \right)_0$$

假定 $S=S_0$ ，则 L 为

$$L = \frac{Q_0}{S_0} \left(\frac{\partial Z}{\partial Q} \right)_0 \quad (9-33)$$

式中： Q_0 为水位为 Z 时恒定流的流量； S_0 为相应于 Q_0 时的水面比降； $\left(\frac{\partial Z}{\partial Q} \right)_0$ 为恒

定流时 $Z-Q$ 关系曲线在水位 Z 下处的斜率。

由式 (9-33) 可见, 特征河长只是由恒定流下的参数所决定。显然, 这一结果具有一定的近似性, 实际上 L 还应与洪水波的附加比降有关。

(4) 定线与推流方法。由于使用特征河长法的角度不同, 定线、推流的具体做法有两种。

1) 上游站水位法。此法是特征河长概念的直接应用, 上游站距测流断面的距离为特征河长的一半。

特征河长的长度可用式 (9-38) 估算。实际上, 上游站的位置还需通过试错较准确的确定。所谓试错, 就是在上游站设立若干组水尺, 分别建立上游各水尺断面的水位与测流断面流量的关系, 找出 $Z_{\perp}-Q$ 关系为单一线的上游站。

推流时, 用上游站水位 Z 直接在建立的 $Z_{\perp}-Q$ 关系曲线上查读流量。这种方法由于所设水尺组较多, 观测工作量大, 因此实际应用不多。

2) 本站水位后移法。本站水位后移法是用本站实测流量, 与本站测流时间后移一个时段的水位建立关系, 使绳套曲线转化成单一的 $Z-Q$ 关系曲线。后移时间为洪水波在 $1/2$ 特征河长的传播时间, $\Delta T = \frac{\tau}{2}$ 。

τ 值大小取决于特征河长的大小和洪水波传播速度 U 。由于特征河长、洪水波速并不是常数, 因此 $\frac{\tau}{2}$ 并不是常数。当实际的 $\frac{\tau}{2}$ 较所取后移时间 ΔT 长时, 后移之后的 $Z-Q$ 关系点的分布仍为逆时序绳套, 只是此时的绳套幅度较原绳套曲线为小。当后移时间大于 $\frac{\tau}{2}$ 时, 则后移之后的 $Z-Q$ 关系点为顺时序绳套。根据此规律来试算和调整 后移时间。

为初步定出后移时间, 可以在实际 $Z-Q$ 关系图中, 选取几个具有代表性的、涨落率较大的测点, 分别量出各测点距离稳定的 $Z-Q$ 关系曲线的水位差 ΔZ , 除以相应的涨落率 $\frac{dZ}{dt}$, 即 $\Delta Z / \frac{dZ}{dt} = \Delta T$, 并取几点平均值即可作为初试值。图 9-37 中, ΔT_1 、 ΔT_2 分别为 2、5 测次相应初算 $1/2$ 的特征河长传播时间。几点初算后移时间的平均值, 即可作为后移时间的初试值。

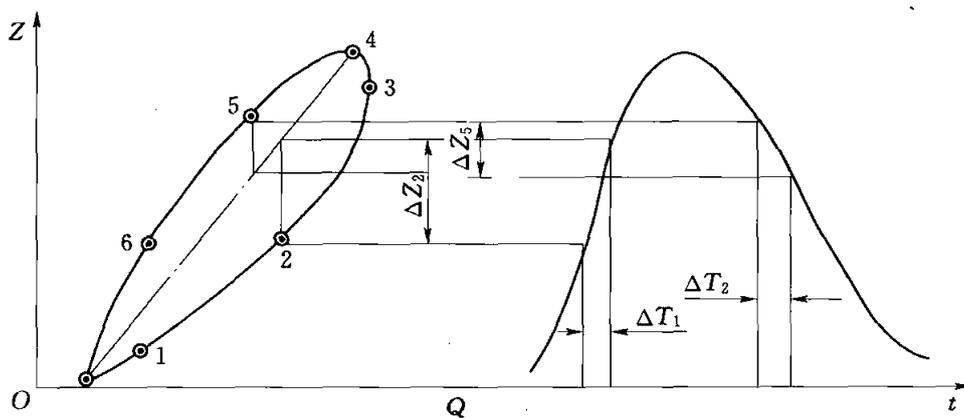


图 9-37 后移时间估算方法

定线时，把实测流量与实测流量相应的平均测流时间后移 ΔT 之后的水位，点绘关系图或拟合曲线。若选几个后移时间进行试算，则选取关系点平均关系线相对偏差的标准差最小时的后移时间为最终确定的后移时间。若关系线符合精度要求，则此关系线即为所求的实测流量与本站后移时间 ΔT 的水位关系曲线， ΔT 即所求 $\frac{\tau}{2}$ 。图 9-38 为长江奉节水文站用本站水位后移法定线实例。

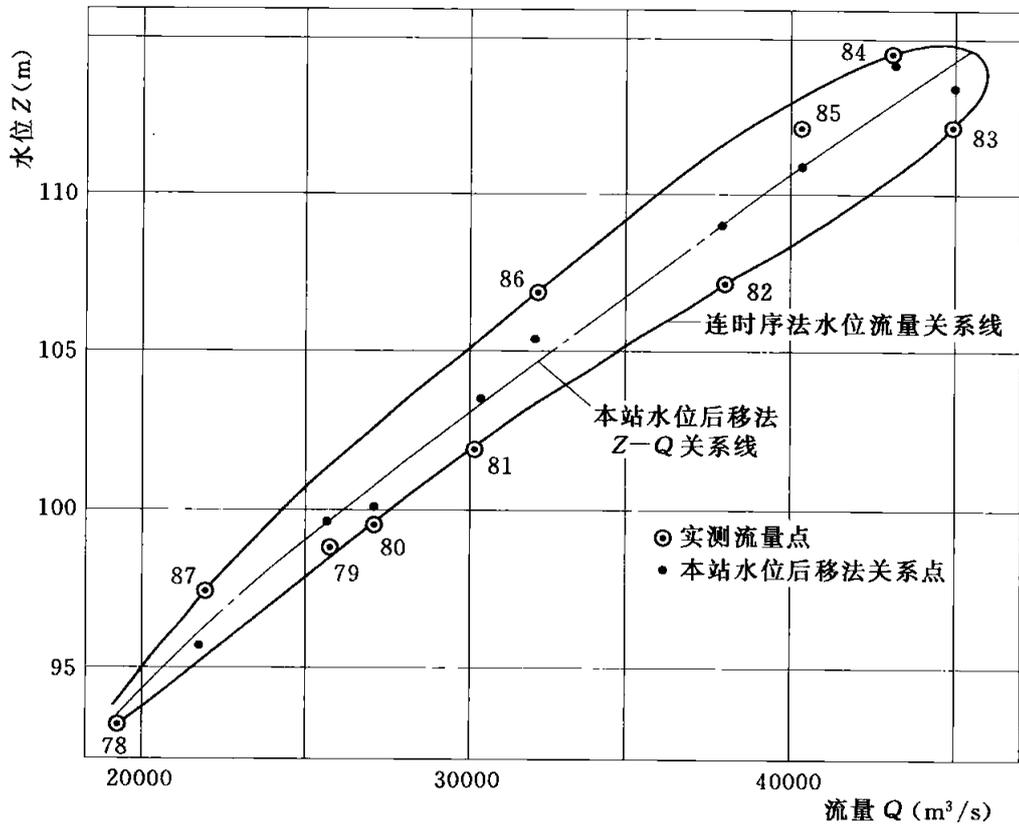


图 9-38 长江奉节水文站水位后移法定线实例

推流时，只需将水位后移 $\Delta T = \frac{\tau}{2}$ ，即可在所率定的关系曲线上推求出流量。例如，若已确定 $\frac{\tau}{2} = 5\text{h}$ ，用 13 时的水位，在已定的 $Z-Q$ 关系上查得流量为 8 时的流量。

4. 定落差法

定落差法适用于断面比降均匀，河底比较平坦，在不受回水影响时，水面比降接近河底坡底的测站。同水位下，不同的落差与流量之间关系符合 $\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2}\right)^\beta$ ，也可写为

$$\frac{Q_m}{Q_c} = \left(\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_c}\right)^\beta \quad (9-34)$$

式中： Q_m 为实测流量， m^3/s ； Q_c 为与实测流量同水位时定落差的流量， m^3/s ； ΔZ_m 为实测流量时相应实测落差， m ； ΔZ_c 为定落差， m 。

定线时, 已知实测流量 Q_m 、落差 ΔZ_m 及相应水位 Z , 未知量为 ΔZ_c 、 Q_c 和落差指数 β 。3 个未知数仅用式 (9-34) 是无法求解的, 需再建立两方程才能解出全部未知数。

一般选定实测落差的较大者作为定落差 ΔZ_c , 与定落差相应的定落差流量和水位呈单值关系。定落差法所用到的方程式为

$$\Delta Z_c = C$$

$$Q_c = f_1(Z)$$

$$\frac{Q_m}{Q_c} = f_2\left(\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_c}\right)$$

3 个方程有 3 个未知数, 有唯一解。但落差指数 β 是隐含在 $\frac{Q_m}{Q_c} = f_2\left(\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_c}\right)$ 关系之中的; 而 $Q_c = f_1(Z)$ 仅知道为单一线, 但不知道具体方程形式, 因此两方程都以隐函数形式出现, 通常用试算法求解。

定落差法定线工作步骤及所定定落差 $Z-Q$ 关系, 如图 9-39、图 9-40 所示。

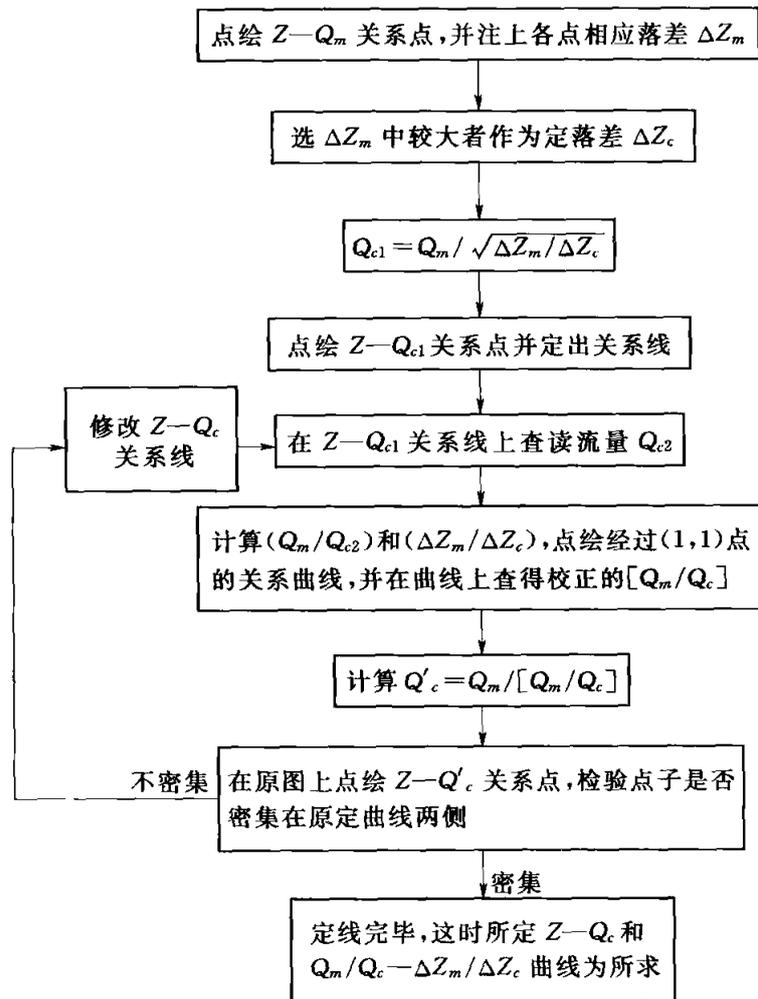


图 9-39 定落差法定线流程

推流时, 已知 Z 、 ΔZ_c 、 ΔZ_m 及所定的 $Z-Q_c$, $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_c} - \frac{Q_m}{Q_c}$ 两关系曲线, 由 Z 在

$Z-Q_c$ 曲线上查出 Q_c ，计算 $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_c}$ 并在 $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_c} - \frac{Q_m}{Q_c}$ 曲线查出对应的 $\frac{Q_m}{Q_c}$ 值，则 Z 所相应的流量 $Q_m = Q_c \left(\frac{Q_m}{Q_c} \right)$ 。

5. 正常落差法

对于河段不平整，有时受到回水影响，有时又不受回水影响，正常情况下落差并非定值的测站，可用正常落差法进行数据处理。其数据处理公式为

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \left(\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_n} \right)^\beta \quad (9-35)$$

式中： ΔZ_n 为正常落差，即不受回水影响的落差； Q_n 为正常落差流量； ΔZ_m ， Q_m 意义同定落差法。

正常落差法与定落差法的主要差别在于，正常落差法的正常落差不是一定值，而是随水位变化的，因此要定出水位 Z 与正常落差 ΔZ_n 的关系曲线。

定线时，已知实测流量 Q_m 与相应的落差 ΔZ_m ；未知量为正常落差 ΔZ_n 及相应流量 Q_n 和落差指数 β 。

定线步骤和定落差法相似，用试错法。首先要在水位流量图上的靠右边的测点点群中心定出一条 $Z-Q_n$ 关系曲线，即 $Z-Q_n$ ；暂设 $\beta=0.5$ ，在图上查得各实测点相应的 Q_n ，用式 (9-35) 求出各实测点相应的 ΔZ_n ，并点绘 $Z-\Delta Z_n$ 关系点；通过点群中心，定出 $Z-\Delta Z_n$ 关系曲线，并在线上查读各实测点相应的 ΔZ_n ，计算 $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_n}$ 和 $\frac{Q_m}{Q_n}$ 关系点；点绘 $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_n} - \frac{Q_m}{Q_n}$ 关系图，并在图上查读 $\frac{Q_m}{Q_n}$ ，求出各实测点相应的 Q_n ；点绘 $Z-Q_n$ 关系点，看关系点是否密布原曲线两侧，并与规范规定的标准进行比较。若符合标准，则定线结束，此时 $Z-\Delta Z_n$ 、 $Z-Q_n$ 、 $\frac{Q_m}{Q_n} - \frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_n}$ 3 条关系线即为所求，见图 9-41，否则要修改 $Z-Q_n$ 关系线重新试算。

推流时，已知水位 Z 及落差 ΔZ_m ；在 $Z-\Delta Z_n$ 和 $Z-Q_n$ 关系曲线上查得 ΔZ_n 和 Q_n ；计算 $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_n}$ ，在曲线上查得 $\frac{Q_m}{Q_n}$ ，并由 Q_n 计算出 Q_m 。

6. 落差指数法

落差指数法适用于断面基本稳定，受变动回水或变动回水及洪水涨落综合影响的测站。

落差指数法亦是根据落差法的基本公式来进行数据处理的。将

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{\Delta Z_1}{\Delta Z_2} \right)^\beta$$

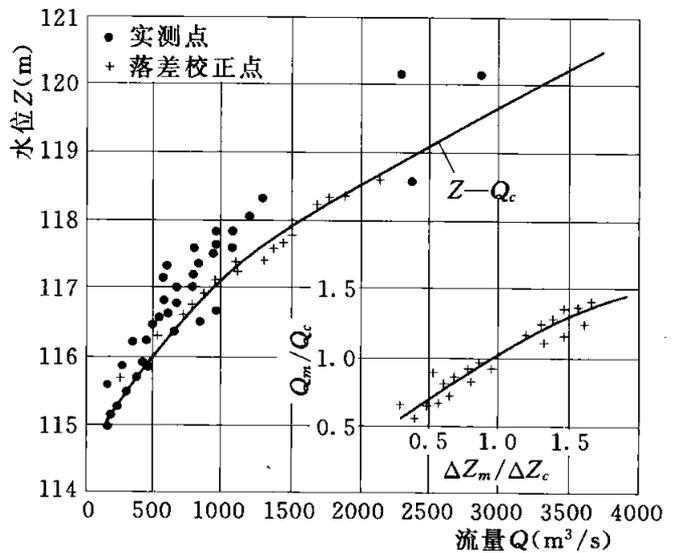


图 9-40 定落差法 $Z-Q$ 关系

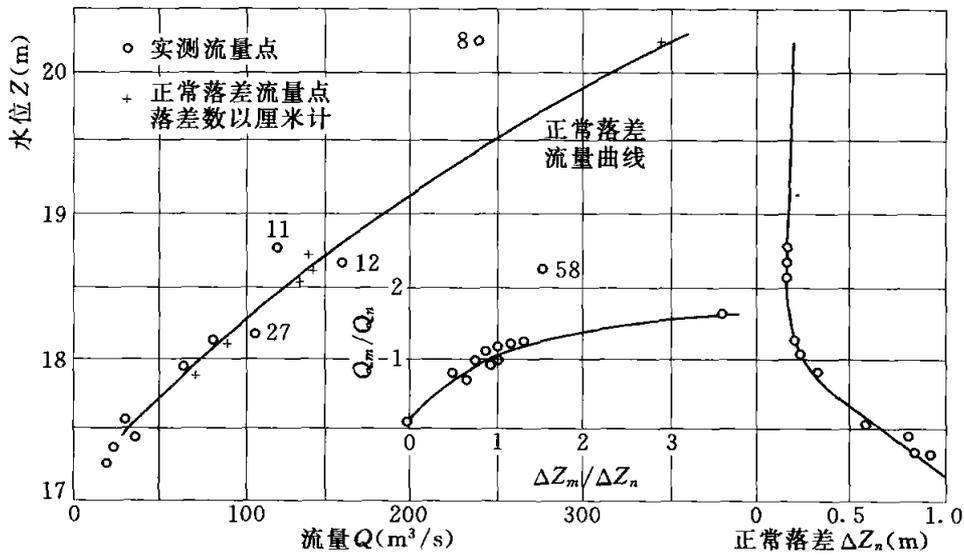


图 9-41 正常落差法 Z-Q 关系

变换为

$$\frac{Q_1}{(\Delta Z_1)^\beta} = \frac{Q_2}{(\Delta Z_2)^\beta} = \dots$$

在同水位下， $\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 为一常数，即 $\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 是水位的单值函数， $\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta} = f(Z)$ 为单一关系。

在率定 $\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta} = f(Z)$ 的关系曲线时，由于 Z、Q、 ΔZ 都为实测值，因此关键是 β 值的求解。

定落差法，正常落差法都是把落差指数 β 假设为 0.5，然后点绘 $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_c}$ (或 $\frac{\Delta Z_m}{\Delta Z_n}$) - $\frac{Q_m}{Q_c}$ 关系点，通过点群中心定线来修正原假设的 0.5 的办法求解 β 值的。而落差指数

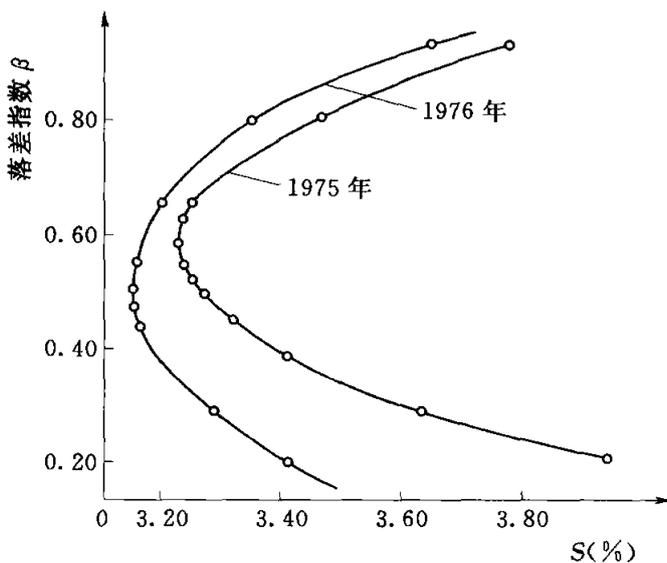


图 9-42 某站落差指数与标准差关系

法是通过试算，根据方差或标准差最小的原则来优选 β 值。一般测站的 β 与实测关系点偏高关系线的标准差 S 的关系如图 9-41 所示。

图中， $\frac{ds}{d\beta} = 0$ 的点，即为标准差最小的点，此点相应的 β 值即为最优的 β 值。可以根据图 9-42 关系，较快地优选出 β 值来。

在率定水位 Z 与 $\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 关系 (定线) 时，已知实测流量 Q_m 及相应水位 Z_m 和落差 ΔZ_m ，求解落差指数 β 和

$Z - \frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 关系曲线。

求解时，首先假设 $\beta_{初}$ ，然后根据实测流量及相应落差，计算 $q_m = \frac{Q_m}{(\Delta Z)^{\beta_{初}}}$ 值；点绘 $Z_m - q_m$ 关系线，或选配 $Z_m - q_m$ 关系方程；求出关系点偏离关系线的标准差 S_1 (或方差)。再假设 β ，重复上面步骤，又求出标准差 S_2 。 S_1 与 S_2 比较，根据图9-33所示的规律，在假设几个 β 之后，就可以优选出最小的 S 相应的 β 值。此时的 S 再与相关标准规定的水力因数型方法定线标准比较，若符合规定标准，则此时的 β 值和 $Z - q_m$ 关系曲线即为所求，如图9-43所示。

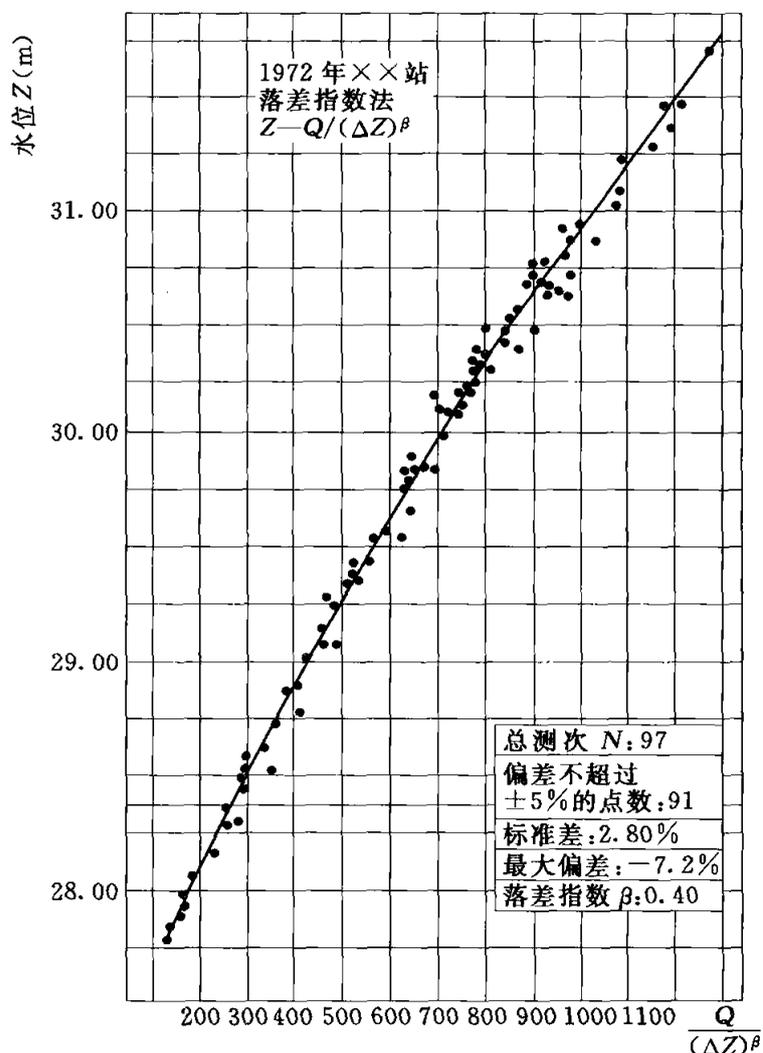


图9-43 落差指数法所定 $Z - \frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 关系曲线

推流时，根据水位与 $Z - \frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 关系，求出 $\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ ，再根据 β 与 ΔZ 即可计算出 Q 来。

对于受洪水涨落影响的测站，只要比降与落差的关系较好，亦可以用落差法进行流量数据处理。

对于受混合因素影响的测站，须具体分析。

9.3.7 流量数据处理方法小结

流量数据处理的基本方法是 $Z-Q$ 关系曲线法。一般把 $Z-Q$ 关系分为“稳定”和“不稳定”两大类，“稳定”的 $Z-Q$ 关系直接用单一线法 $Q=f(Z)$ 进行数据处理；而“不稳定”的 $Z-Q$ 关系数据处理方法归纳起来分为以下两种形式：①水力因素型，这一型式的方法均可表示为 $Q=f(Z, x)$ 的形式， x 为某一水力因素。其方法的原理都来自于水力学的推导，故理论性强，所要求的测点少，且适于计算机作单值化处理。②时序型，表示为 $Q=f(Z, t)$ ， t 为时间。时序型的方法其原理是以水流的连续性为基础，因而要求测点多且准确，能控制流量的变化转折。方法适用范围较广，但有时间性。表 9-2 给出了各种流量数据处理方法及其适用情况。

表 9-2 流量数据处理适用情况

使用范围		影响因素	稳定 $Z-Q$ 关系	不稳定 $Z-Q$ 关系					
				洪水涨落	变动回水	冲淤	水草	结冰	综合
方 法		影 响							
水力因素型	单一曲线法	√						√	
	校正因数法		√						
	涨落比例法		√						
	特征河长法		√						
	落差法（定落差、等落差、正常落差法）			√					
	落差指数法		√	√					√
时序型	连时序法		√	√	√	√	√	√	√
	临时曲线法				√	√	√		
	改正水位法				√	√	√	√	√
	改正系数法					√	√		
	连 $Q-t$ 过程线法			√	√		√	√	√

当满足时序型的要求条件时，连时序法是按实测流量点子的时间顺序来连接 $Z-Q$ 关系曲线，故应用范围较广。连线时，应参照水位过程线的起伏变动的情况定线，有时还应参照其他的辅助曲线如落差过程线、冲淤过程线等定线。受洪水涨落影响的 $Z-Q$ 关系线用连时序法定线往往成逆时针绳套形。绳套的顶部必须与洪峰水位相切，绳套的底部应与水位过程线中相应的低谷点相切。受断面冲淤或结冰影响时，还应参考用连时序法绘出的 $Z-A$ 关系变化趋势，帮助绘制 $Z-Q$ 关系曲线，见图 9-22。

9.4 受人工控制河道的 $Z-Q$ 关系曲线

9.4.1 利用水工建筑物推流方法概述

堰、闸、涵管、水力发电站、抽水机站等水工建筑物亦是很好的量水建筑物。这些

水工建筑物都有一定的流量计算公式，但这些流量计算公式随着水工建筑物类型不同，出流方式的不同，其公式的形式也不同。图 9-44 为一般堰闸类型、流态的分类示意。

类别	出流状态		自由堰流	淹没堰流	自由孔流	淹没孔流
	堰闸类型					
1	平底闸					
2	宽顶堰闸					
3	实用堰闸					
4	跌水壁闸					

图 9-44 一般堰闸类型、流态的分类

h_k —临界水深, m; h_c —收缩断面处水深, m; h' —闸底 (或堰顶) 处水深, m; P_1 、 P_2 —堰顶高度, m (其他符号见表 9-2)

对于堰闸诸形式出流方式的判别及流量计算公式, 见表 9-3。

表 9-3 堰闸流态的分类及其流量计算公式、定线形式比较

名称	自由式堰流	沉溺式堰流	自由式孔流	沉溺式孔流	半沉溺式孔流
流量系数计算公式	$c_1 = \frac{Q}{BH^{3/2}}$	$c_2 = Q/(Bh) \sqrt{\Delta Z}$ $\sigma c_1 = Q/(BH^{3/2})$	$M = Q/(\omega \sqrt{H-h_c})$ $M = Q/(\omega \sqrt{H})$	$M = \frac{Q}{\omega \sqrt{\Delta Z}}$	$\sigma' M = \frac{Q}{\omega \sqrt{H}}$
系数的相关因素	$c_1 - H$ 或 $c_1 - Z_u$	$c_2 - \Delta Z$ 或 $c_2' - \frac{\Delta Z}{H}$ $\sigma c_1 - \frac{\Delta Z}{H}$ 或 $\sigma - \frac{\Delta Z}{H}$	$M - \frac{e}{H}$	$M - \frac{e}{\Delta Z}$	$\sigma' - \frac{h}{H}$
流量计算曲线的形式	$Z_u - Q$	$Z_u - Z_d - Q$ 或 $Z_u - \Delta Z - Q$	$Z_u - e - Q$	$\Delta Z - e - Q$	同自由式孔流 乘以系数 σ'

注 符号说明: Q —流量; h_c —收缩断面处水深, $h_c = ee$; e —闸门开启高度; Z_u —上游水位; e —垂直收缩系数; ω —堰闸过水面积; Z_d —下游水位; ΔZ —上下游水位差 = $Z_u - Z_d$; B —闸孔宽度或开启净宽; H —上游水头 = $Z_u - H_a$; h —下游水头 = $Z_d - H_a$; M —孔流流量系数; σ —沉溺系数; h_k —临界水深; P —堰顶高度; H_a —闸底或堰顶高程; h' —闸底 (或堰顶) 水深; σ' —半沉溺系数; c_1 —自由式堰流流量系数; δ —宽顶堰厚度; c_2 —沉溺式堰流流量系数。

从表 9-3 可以看出各种堰闸的出流方式流量公式是不同的,但其中都有一流量系数。从水力学知,此系数带有一定的经验性,取值都有一定的变化范围。利用水工建筑物测流的目的就是确切地率定各种水力条件下此系数大小。

对于水力发电站、抽水机站等,它们亦有一定的流量计算公式,其形式为

$$N_s = 9.8 \eta QH \quad (9-36)$$

式中: N_s 为电功率, kW; η 为效率系数, %; Q 为流量, m^3/s ; H 为水头, m。

水力发电站是势能转变成电能,而电力抽水机站是电能转换成势能。但不论怎样转换,都有效率问题,效率系数 η 是需要率定的系数。

利用水工建筑物推求流量就是用各种水力条件下的实测流量,来率定出其相应的流量系数或效率系数,利用水力学的流量公式把各个时刻的流量推求出来。

利用水工建筑物推求流量,通常采用以下 3 个步骤。

(1) 计算流量系数。根据水工建筑物的形式、出流方式、实测流量和水位等,选择条件适合的流量计算公式反算流量系数或效率系数。

(2) 建立流量系数或效率系数与相关因素的关系。影响流量系数或效率系数的因素很复杂,可选取一两个能经常观测的主要因素和流量系数或效率系数建立关系。

(3) 推求各时刻的流量。率定出流量系数或效率系数与相关因素的关系后,就可利用此关系,查出各种情况下的流量系数或效率系数,代入各自公式推求各时刻的流量。

为推流方便,经常是绘制查算流量的工作曲线或推流查数表来进行推流。

9.4.2 堰闸站流量推求方法

堰闸的出流形式,按照有无闸门设备和闸门启闭情况,可分为堰流、孔流;按其下游水位对出流的影响,可分为自由式、淹没式(沉溺式)和半淹没式(半沉溺式)。它们的流量公式见表 9-3。下面分类分析介绍它们的数据处理方法。

(1) 堰流。指无闸门设备或闸门已提出水面的堰坝出流。

1) 自由式堰流。下游水位不影响出流量大小的堰流。其流量公式为

$$Q = c_1 B H^{\frac{3}{2}}$$

$$c_1 = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} \quad (9-37)$$

式中: c_1 为堰流流量系数; $\mu = \varphi \epsilon$; φ 为流速系数; ϵ 为垂直收缩系数。

对于 c_1 和 B , 它们都是上游水位 Z_u 的单值函数,而上游水头 H 为上游水位减一常数(堰顶高程),因此流量与上游水位 Z_u 是单值关系。这样上游水位与流量可直接建立关系,同河道站的单一曲线法。所以可以把这样的水工建筑物看作为良好的测站控制。

但是,直接建立 $Z_u - Q$ 的关系,要求实测点资料充分,且分布较均匀。此条件往往不易满足,因此,可用一般堰闸站的数据处理方法来进行数据处理。数据处理有以下步骤。

a. 用实测流量 Q 及相应的上游水头和 B 资料,按式 (9-37) 计算 c_1 为

$$c_1 = \frac{Q}{BH^{\frac{3}{2}}}$$

b. 相关因素选为上游水位 Z_u (或上游水头 H), 建立 $Z_u - c_1$ 关系, 见图 9-45 中的 a 曲线。

c. 在 $Z_u - c_1$ 上查出各级上游水位下的 c_1 代入式 (9-42), 算出流量, 绘 $Z_u - Q$ 图即工作曲线, 见图 9-45 中的 c 曲线。

推流时, 可根据 Z_u (或 H) 直接在图 9-45 上查得流量。

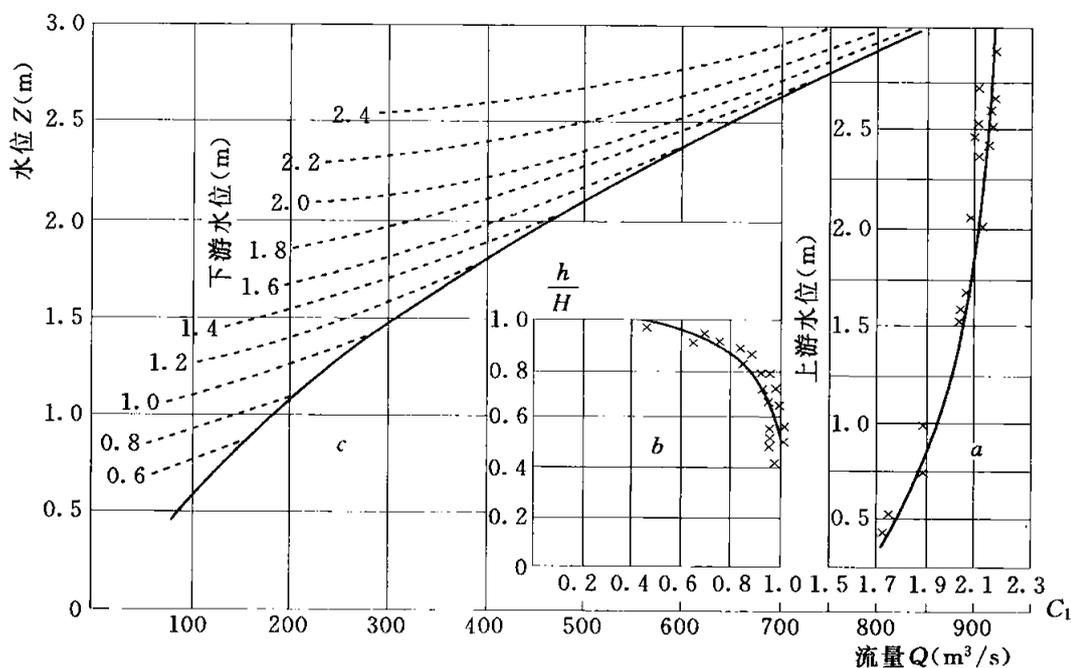


图 9-45 堰流 Z-Q 关系曲线

2) 淹没式堰流。淹没式堰流为下游水位高于堰顶, 并影响出流时的堰流。其流量公式有两种分别为

$$Q = c_1 \sigma B H^{3/2} \quad (9-38)$$

$$Q = c_2 B h \sqrt{\Delta Z} \quad (9-39)$$

式中: σ 为淹没系数; c_2 为淹没堰流流量系数; 其余符号见表 9-3。

式 (9-38) 适用于自由式堰流和淹没式堰流都有发生的测站; 式 (9-39) 适用于平底闸, 宽顶堰的淹没式堰流。

当仅发生淹没流时, 不论是用式 (9-38) 或式 (9-39), 把 c_2 、 $c_1 \sigma$ 作为要率定的系数, 其数据处理步骤通常为 3 个步骤, 只是相关因素要选为与上下游水位都有关的 $\frac{h}{\Delta Z}$ 或 ΔZ , 见图 9-46、图 9-47。

当两种流态都有发生时, 在自由式堰流数据处理的基础上, 再做如下工作。

由于自由式出流时 $\sigma = 1$, 不同的淹没度 $\frac{h}{H}$ 时, $\sigma < 1$, σ 值随 $\frac{h}{H}$ 而变, 故应较自由式堰流多建立一条 $\frac{h}{H} - \sigma$ 关系曲线, 见图 9-46 (b)。

淹没式出流时, 若实测流量 Q , 相应的自由式堰流的流量为 Q_0 , 则

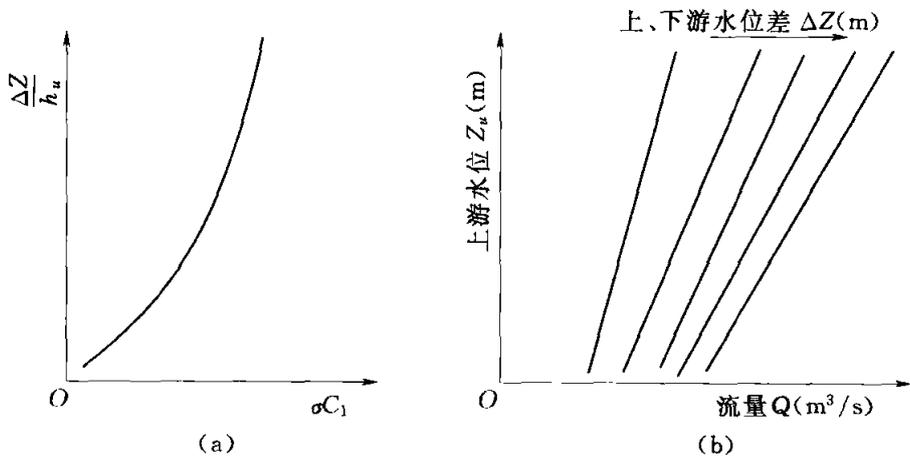


图 9-46 淹没式堰流 Z-Q 关系曲线

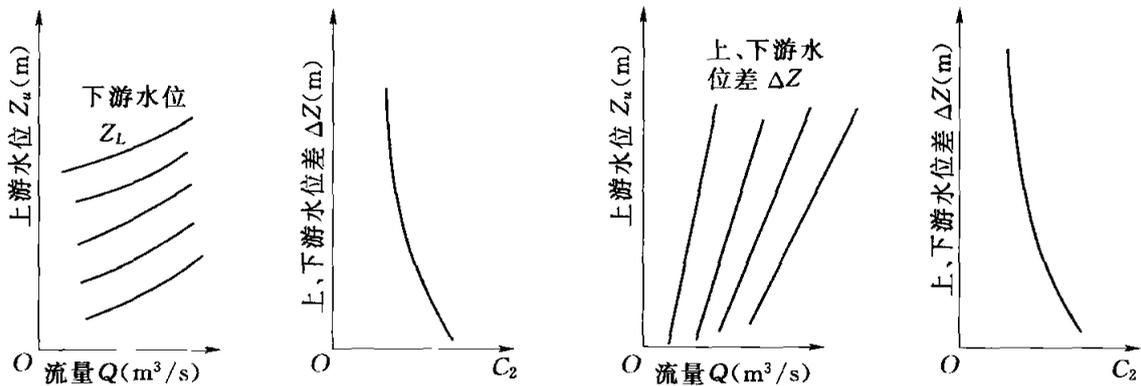


图 9-47 淹没式堰流 $Z_u - Z_L - Q$ 和 $Z_u - \Delta Z - Q$ 关系曲线

$$\sigma = \frac{Q}{Q_0} \tag{9-40}$$

根据各次实测流量及相应的 $\frac{h}{H}$ 值，则就可建立 $\frac{h}{H} - \sigma$ 关系。

推流时的工作曲线一般为以下游水位 Z_L 作参数的上游水位 Z_u 与流量之间关系即 $Z_u - Z_L - Q$ 关系曲线簇，见图 9-45 (c)。此曲线簇建立时，是利用式 (9-38)，假定各种 Z_u 、 Z_L ，计算出 Q ，点在图上即为此曲线簇。

(2) 孔流。水流通过闸孔时，其流量大小受闸门或胸墙约束的出流。

1) 自由式孔流。闸下水位未淹没闸孔，闸孔出流不受下游水位影响的出流。

自由式孔流有两种公式，适用于宽顶堰闸和平底闸的，其公式为

$$Q = M_w \sqrt{H - h_c} \tag{9-41}$$

适用于实用堰和跌水壁闸的公式为

$$Q = M_w \sqrt{H} \tag{9-42}$$

其中

$$h_c = \epsilon e$$

式中： h_c 为收缩断面处水深； ϵ 为垂直收缩系数，其值可由 $\frac{e}{H} - \epsilon$ 关系表 (表 9-4)

查得； e 为闸门开启高度。

表 9-4 $\frac{e}{H}-\varepsilon$ 关系

$\frac{e}{H}$	ε	$\frac{e}{H}$	ε	$\frac{e}{H}$	ε	$\frac{e}{H}$	ε
0.00	0.611	0.30	0.625	0.55	0.650	0.80	0.720
0.10	0.615	0.35	0.628	0.60	0.660	0.85	0.745
0.15	0.618	0.40	0.632	0.65	0.675	0.90	0.780
0.20	0.620	0.45	0.638	0.70	0.690	0.95	0.885
0.25	0.622	0.50	0.645	0.75	0.705	1.00	1.000

定线推流步骤同于一般水工建筑物数据处理的 3 个步骤。

相关因素一般取 $\frac{e}{H}$ ；工作曲线为 Z_u-e-Q 。图 9-48 为平底闸自由式孔流数据处理所得 $\frac{e}{H}-M$ 和工作曲线图。

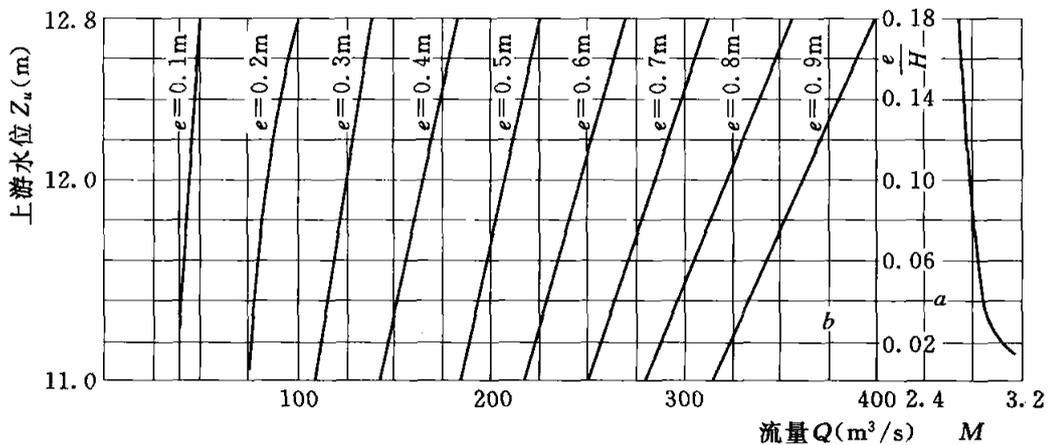


图 9-48 自由式孔流 Z_u-e-Q 关系曲线

2) 淹没式孔流。闸下水位淹没闸孔，其出流量受到下游水位影响。其流量公式为

$$Q = M\omega \sqrt{\Delta Z} \quad (9-43)$$

式中： ΔZ 为上游水位与下游收缩断面处水位之差，但由于受水跃、波浪等影响，收缩断面的水面极不稳定，观测较困难，故实用中仍采用下游水面平稳处的水位。

淹没式孔流的相关因素取为 $\frac{e}{\Delta Z}$ ，其 $\frac{e}{\Delta Z}-M$ 相关曲线和工作曲线 $\Delta Z-e-Q$ 曲线簇为图 9-49 所示。

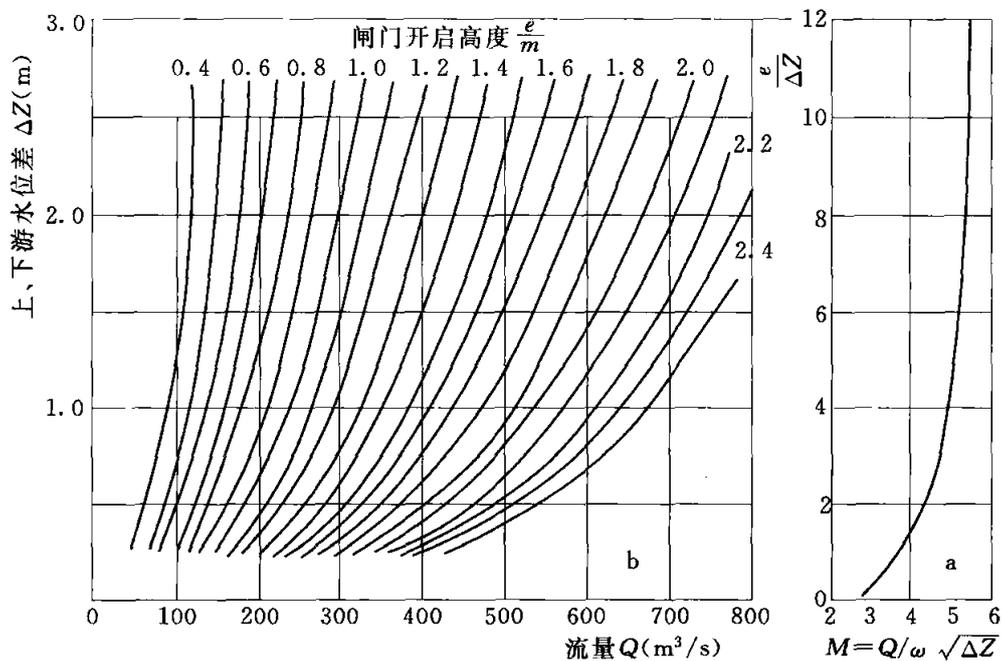
3) 半淹没式孔流。下游水位淹没堰顶，但未淹没闸孔的出流。其流量公式为

$$Q = \sigma' M\omega \sqrt{H} \quad (9-44)$$

式中： σ' 为半淹没系数。

定线时，先利用实测流量资料，代入式 (9-45) 为

$$\sigma' M = Q / (\omega \sqrt{H}) \quad (9-45)$$

图 9-49 沉溺式孔流 $\Delta Z-e-Q$ 关系曲线

计算出 $\sigma'M$ 值；在自由式孔流的 $\frac{e}{H}-M$ 关系曲线上用实测流量值相应的 $\frac{e}{H}$ 查得 M 值；求 $\sigma' = \frac{\sigma'M}{M}$ ，并点绘 $\frac{h}{H}-\sigma'$ 关系曲线。推流时，先用 $\frac{e}{H}$ 查得 M ，代入式 (9-42)，求得自由式孔流流量；再由 $\frac{h}{H}$ ，查得 σ' ，自由式孔流流量乘以 σ' 即半沉溺式孔流流量。

(3) 堰闸站流量推求方法小结。各种出流方法的数据处理方法是相似的，但是各种方法所取相关因素是不同的，不过相关因素的选取有其规律性。

- 1) 各种出流都与上游水位（或上游水头）有关。
- 2) 淹没式出流还与下游水位（体现在下游水头、上下游水位差）有关。
- 3) 所有孔流都与开启高度有关。

影响堰流精度的主要因素是水位，特别是淹没式堰流。由于水流紊动，水尺观读不准。有时水尺断面选的不当，其代表性不好，特别是上下游水位差较小时，水位的误差对流量影响就更大。

影响孔流推求流量精度的因素有以下几方面。闸门开启高度 e 的误差对流量的推求影响很大。有时因 e 较小，相对误差较大，而使 $\frac{e}{\Delta Z}-M$ 关系点散乱。闸门漏水也会影响孔流的推流精度。例如对于同一 $\frac{e}{\Delta Z}$ 值，由于上下游水位差的不同，或由于闸门浸水面积的不同，漏水量占总出水量的比重就会有差异，算得的流量系数 M 可能相差较大，反映在 $\frac{e}{\Delta Z}-M$ 关系上，会因漏水使关系点散乱，推求流量也会有较大误差。为水尺的观读方便，上下水尺断面的位置不是理论上的位置。下游水尺断面不是在收缩断面，上

游水尺断面与闸门也有相当长的距离，因此所用水力学公式会因水尺断面的代表性不好产生误差，在闸门开启高度不一致时影响更甚。平原地区上下游水位差 Z 很小，水尺的观读误差对 ΔZ 影响相对较大，对流量推求的精度也会有较大的影响。

9.4.3 水力发电站与电力抽水站流量推算方法

水力发电站是利用水能转变为电能的水工建筑物；电力抽水站是利用电能来提水的水工建筑物。发电时，可从电工仪表上读出发电功率。在建站后，施测一个时期的流量，将它与电功率、水头（水位差）建立关系曲线，就可以用经常观测的水位资料和电功率记录来推求通过水轮机的流量。而电力抽水站的工作恰恰是发电站的逆运转，因此它的推算流量方法与水电站相似，都可采用式（9-36）来求得流量，把式（9-36）变换为

$$Q = \frac{N_s}{9.8\eta H}$$

或

$$q = \frac{N}{9.8\eta H}$$

式中： N_s 为各机组总电功率，kW； N 为单机电功率，kW； η 为效率，即 $\frac{\text{有效功率}}{\text{理论功率}} \times 100\%$ ，%； H 为总水头，即上下游水位差，m； Q 为总流量， m^3/s ； q 为单机流量， m^3/s 。

(1) 水电站的定线推流方法。先计算效率系数：

$$\eta = \frac{N_s}{9.8QH}$$

点绘单机功率 N 与效率系数 η 的关系点，并通过点群中心定 $N-\eta$ 关系曲线，如图 9-49 中的 a 曲线所示；再绘制以 N 为参数的 $H-q$ 关系曲线簇上，如图 9-51 中的 c 曲线所示；当实测点不够时，可补点进行计算，其方法是取若干个 N 值，从 $N-\eta$ 曲线上查得相应的 η 值，按公式 $qH = \frac{N}{9.8\eta}$ 计算出各个 qH 值、点绘 $N-qH$ 关系曲线，如图 9-50 中 b 曲线所示；要根据 $N-qH$ 关系曲线，算出各种 N 、 H 值时的单机流量 q ，并据以绘制水头 H 与 q 的关系曲线，以 N 为参数，即 $H-N-q$ 关系曲线簇，如图 9-50 中的 c 曲线所示。

推流时，可根据单机电功率和水头 H ，从图 9-50 中的 b 曲线查读单机瞬时流量 q ，乘以开机台数即得总流量 Q 。

(2) 电力抽水站的定线推流方法。把式（9-34）稍作变动即采用的公式为

$$\eta' N_s = 9.8QH \quad (9-46)$$

或

$$Q = \frac{\eta' N_s}{9.8H}$$

$$q = \frac{\eta' N}{9.8H} = 0.102\eta' N/H$$

式中： η' 为效率，即 $\frac{\text{有效功率}}{\text{耗用电功率}} \times 100\%$ ，%； H 为水头或扬程，m；其余符号意义同前。

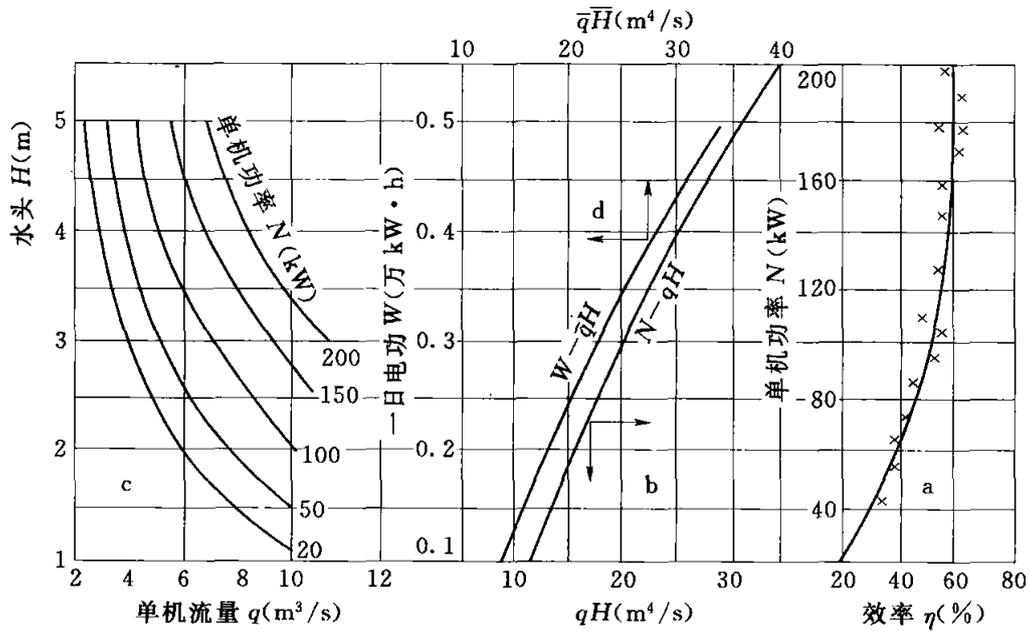


图 9-50 水电站 $H-N-q$ 关系曲线

定线推流方法与水电站相类似，如图 9-51 所示。

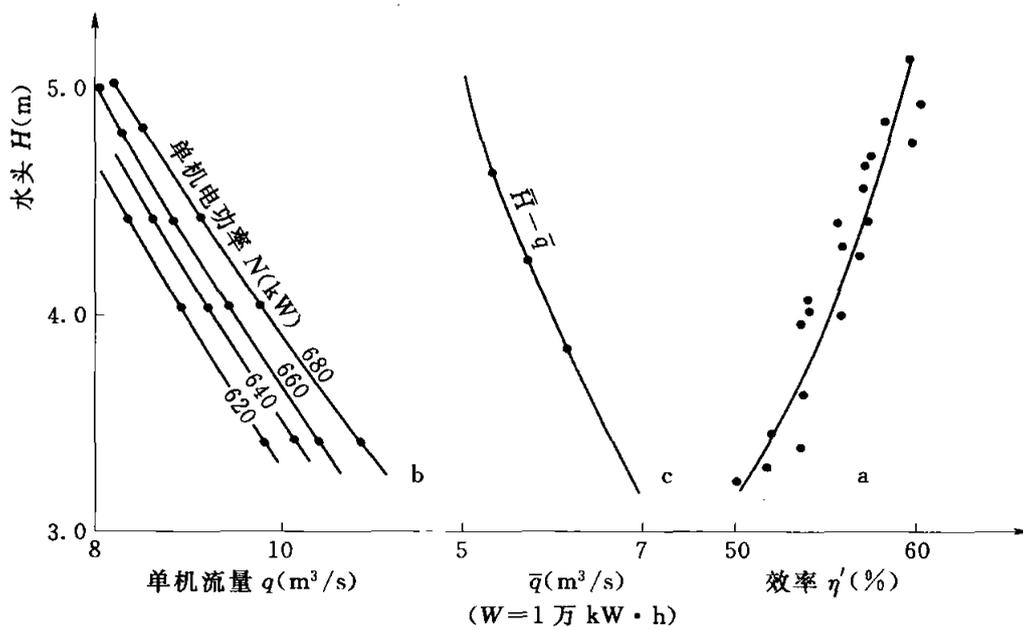


图 9-51 排灌站 $H-N-q$ 关系曲线

9.5 $Z-Q$ 关系曲线的移用及合理性检查

规划设计工作中，常常遇到设计断面处缺乏实测数据。这时就需要将邻近水文站的 $Z-Q$ 关系移用到设计断面上。

当设计断面与水文站相距不远且两断面间的区间流域面积不大、河段内无明显的出流与入流的情况下，在设计断面上设立临时水尺，与水文站同步观测水位。因两断面中、低

水时同一时刻的流量大致相等,所以可用设计断面的水位与水文站断面同时刻水位所得的流量点绘关系曲线,再将高水部分进行延长,即得设计断面的 $Z-Q$ 关系曲线。

当设计断面距水文站较远,且区间入流、出流近乎为零,则必须采用水位变化中位相相同的水位来移用。

若设计断面的水位观测数据不足,或甚至等不及设立临时水尺进行观测后再推求其 $Z-Q$ 关系,则用计算水面曲线的方法来移用。方法是在设计断面和水文站之间选择若干个计算断面,假定若干个流量,分别从水文站基本水尺断面起计算水面曲线,从而求出各个计算流量相对应的设计断面水位。

而当设计断面与水文站的河道有出流或入流时,则主要依靠水力学的办法来推算设计断面的 $Z-Q$ 关系。

合理性检查:单站检查可用历年 $Z-Q$ 关系对照检查;综合性检查以水量平衡为基础,对上游、下游或干流、支流上的测站与本站数据处理成果进行对照分析,以提高数据处理成果的可靠性。本站数据处理成果经检查确认无误后,才能作为正式资料提供使用。

9.6 地下水数据处理

地下水数据处理(资料整编)应按以下步骤依次进行:考证基本资料;审核原始监测资料;编制成果图、成果表;编写数据处理说明;数据处理成果的审查验收、存储与归档。

统计数值时,平均值采用算术平均法计算,尾数按四舍六入处理;挑选极值时,若多次出现同一极值,则记录首次出现者的发生时间。年度数据处理工作应于次年6月底以前完成。

基本资料的考证包括监测站的位置、编号;监测站附近影响监测精度的环境变化情况;监测站布设、停测、更换的时间,监测站类别、监测项目、频次的变动情况;监测井深、淤积、洗井、灵敏度试验情况;高程测量(包括引测、复测和校测)记录;测具的检定情况。

经考证,有下列情况的监测站,相应监测期间的监测数据不予处理:监测站附近环境变化,导致监测项目不符合布设目的者;测具检定不符合要求者。

校核水准点或井口固定点未按要求进行高程测量的水位监测站,监测数据只参加地下水埋深资料的处理。考证后,应对各监测站的技术档案进行整理。

原始监测数据的审核内容包括:监测方法、误差;原始记载表的填写格式;测具检定和高程校测的结果及由此导致的监测数值的修正;单站监测数据的合理性检查,同一含水层组各监测站之间监测数据的合理性检查。

经审核,有下列情况的监测站,相应监测期间的监测数据不予处理:监测方法错误;监测误差超过允许范围;监测数据有伪造成分;缺测和可疑的监测数据超过应监测资料的 $1/3$ 。

水位数据的插补应符合以下要求:逐日监测数据,每月缺测不超过两次,且缺测前、后均有不少于连续3个监测数值者可插补;5日监测数据,每月缺测不超过一次

且缺测前、后均有不少于连续3个监测数值者可插补，统测数据不得插补；“井干”、“井冻”、“可疑”数值在插补时均按“缺测”对待；插补方法可采用相关法、趋势法或内插法；插补的数值参加数值统计。

水位监测数据的数值统计内容包括：月平均水位值，月内最高、最低水位值及其发生日期；年平均水位值，年变幅，年末差，年内最高、最低水位值及其发生月、日。

数值统计应符合以下要求：月内无缺测数据，进行月完全统计；年内无缺测数据，进行年完全统计；逐日水位数据，月内缺测不超过4次者，进行月不完全统计，超过4次者，不进行月统计；5日水位数据，月内缺测一次者，进行月不完全统计，超过一次者，不进行月统计；年内月不完全统计不超过两个或仅有一个不进行月统计者，进行年不完全统计，年内月不完全统计超过两个或不进行月统计者超过一个，不进行年统计。

水量数据处理时，缺测水量数据不得插补；经审核定为“可疑”的水量监测数据，按“缺测”对待。水量监测数据只进行年统计，数值统计内容包括：单站年开采量（流量），年内最大、最小月开采量（流量）及其发生的月份；井群年开采量，年内最大、最小月开采量（流量）及其发生的月份，最大、最小单站年开采量（流量）及该监测站的编号。

数值统计应符合以下要求：无缺测数据，进行年完全统计；单站缺测一个月开采量（流量）时，可进行年不完全统计；缺测超过一个月时，不进行年统计；单站年开采量（流量）不完全统计不超过井群监测站总数的20%时，可进行井群的年不完全统计；年开采量（流量）不完全统计超过相关监测井群监测站总数的20%或有不进行年单站开采量（流量）年统计时，均不进行井群的年统计。

缺测水温数据不得插补；经审核定为“可疑”的水温监测数据按“缺测”对待。水温监测数据只进行年统计，包括年平均水温值，年最高、年最低水温值及其发生的月份，年内水温变幅，当年末与上年末的水温差。年内缺测一次者，进行年不完全统计；超过一次者，不进行年统计。

编写数据处理说明应包括以下内容：数据处理的组织、时间、方法、内容及工作量概况；监测站的调整、变更情况；监测方法、精度、高程测量、校测和测具检定概况；监测数据的质量评价；存在问题及改进意见。数据处理成果的审查验收要求包括以下3个方面。

(1) 送交审查的数据内容。

- 1) 各监测站基本数据及考证意见。
- 2) 各项原始监测记载数据及审核意见。
- 3) 数据处理成果图、成果表。
- 4) 数据处理说明。

(2) 审查方法。

1) 经考证，发生了变动的基本数据应全部进行审查；未发生变动的基本数据应进行抽查，抽查率不得少于20%。

2) 对各项原始监测数据分别进行抽查，抽查率不得少于30%。

- 3) 对处理成果的数据应全部进行审查。
- (3) 经审查, 不符合下列质量标准之一者, 不予验收。
 - 1) 项目完整, 图表齐全, 规格统一。
 - 2) 各监测站基本数据考证清楚。
 - 3) 测验及数据处理方法正确。
 - 4) 无系统错误和特征值统计错误, 其他数据的错误率不大于 $1/10000$ 。
 - 5) 数据处理说明的内容完整、准确、客观。

9.7 水文数据处理成果的刊布

水文资料的来源, 主要是由国家水文站网按全国统一规定进行数据观测以及处理后得到的资料, 即由主管单位分流域、干支流及上下游, 每年刊布一次的水文年鉴。1986年起陆续实行计算机存储、检索。

年鉴中载有: 测站分布图, 水文站说明表及位置图, 各站的水位、流量、泥沙、水温、冰凌、水化学、地下水、降水量、蒸发量等资料。

当需要使用近期尚未刊布的资料, 或需查阅更详细的原始记录时, 可向各有关机构收集。水文年鉴中不刊布专用站和实验站的观测资料及数据处理、分析成果, 需要时可向有关部门收集。

水文年鉴仅刊布各水文测站的基本资料。各地区水文部门编制的水文手册和水文图集, 以及历史洪水调查、暴雨调查、历史枯水调查等调查资料, 是在分析研究该地区所有水文站的资料基础上编制出来的。它载有该地区的各种水文特征值等值线图及计算各种径流特征值的经验公式。利用水文手册和水文图集便可以估算无水文观测资料地区的水文特征值。由于编制各种水文特征的等值线图及各径流特征的经验公式时, 依据的小河资料少, 当利用手册及图集估算小流域的径流特征值时, 应根据实际情况作必要的修正。

当上述年鉴、手册、图集所载资料不能满足要求时, 可向其他单位收集。例如, 有关水质方面的更详细的资料, 可向环境监测部门收集, 有关水文气象方面的资料, 可向气象台站收集。

复 习 题

- 9-1 单一曲线法的适用条件如何? 怎样理解单一曲线法定线标准的含义?
- 9-2 单一曲线法推求流量的一般步骤如何?
- 9-3 国际标准中, 对于单一 $Z-Q$ 关系曲线有几种检验? 它们检验的实质是什么?
- 9-4 校正因数法的适用条件如何? 方法步骤如何?
- 9-5 抵偿河长法的原理及适用条件如何? 它有什么优点?
- 9-6 落差法的原理及适用条件如何?
- 9-7 定落差法及正常落差法有哪些相似的地方?

- 9-8 落差指数法的使用条件如何？它有何优点？
- 9-9 试总结水力因素法的一般特点。
- 9-10 连时序法适用条件及一般步骤如何？为什么连时序法要分析定线，而不能见点连线？
- 9-11 临时曲线法的适用条件如何？临时曲线的过渡形式有哪几种？
- 9-12 改正水位法与改正系数法有哪些相似的地方？
- 9-13 连实测流量过程线法的适用条件如何？
- 9-14 试比较时序型的数据处理方法与水力因素型的数据处理方法有哪些不同？
- 9-15 利用水工建筑物推求流量的特点是什么？推求流量的一般步骤是什么？
- 9-16 什么是堰流？什么是自由式堰流？什么是淹没式堰流？
- 9-17 淹没式堰流与自由式堰流数据处理方法有何异同点？
- 9-18 孔流的出流方式有哪几种？它们的数据处理方法有何异同点？
- 9-19 相关因素的选取有何规律？
- 9-20 影响水工建筑物流量推求精度的因素有哪些？
- 9-21 水电站、电力抽水机站流量推求有何不同？它们与堰闸站流量的推求有何相似之处？
- 9-22 比较地下水监测与地表水监测的异同点。
- 9-23 为什么水量数据处理时，缺测水量数据不得插补？
- 9-24 缺测水温数据不得插补的依据是什么？

第 10 章

泥沙数据处理

10.1 悬移质输沙率数据处理

泥沙资料在多沙河流上显得异常重要，在开发利用河流、流域规划、河道治理、工程设计、水利科学研究等方面，都离不开泥沙资料，因为忽略了泥沙问题，往往遭致失败。悬移质泥沙数据处理的主要内容有：搜集有关数据，对实测输沙率和含沙量数据进行分析；编制实测输沙率成果表；决定推求输沙率、含沙量的方法；插补单样含沙量的方法；推求逐日平均输沙率、含沙量；悬移质泥沙的合理性检查等，最终使得所测的泥沙数据成为可供使用的泥沙资料。

10.1.1 搜集数据

在泥沙数据处理工作开始以前，应搜集与泥沙数据处理有关的数据和图表。了解泥沙测验的仪器测具、计算等方面的情况；并应了解测站特性、河道及流域自然地理情况、泥沙来源和水土保持的作用及水利化的影响等。

10.1.2 实测悬移质输沙数据的分析

天然河流的含沙量是经常变化的，又由于泥沙测验仪器的性能差，处理手续繁多，实测悬移质数据常有一定误差，有时还可能出现错误。因此，在进行数据处理之前，应对原始数据进行全面审查分析。审查分析重点应为各种水情下的数据及计算方法，校核各个时期有代表性的关键数据。通常绘单样含沙量（简称单沙）过程线、单沙与断沙（即断面平均含沙量）关系图进行分析。

1. 单沙过程线的分析

单沙反映含沙量随时间变化的过程，是推求断沙的依据，如单沙出现问题，必将造成断沙以及以后推求输沙率和输沙量等一系列的错误，故单沙是基础，应认真地分析检查，检查方法是利用测站在平时绘制的逐时三种过程线。三种过程线是在同一张过程线图上，以上下错开的方式将水位、流量、单沙绘出，北方多沙河流的大河可每月绘一张，少沙河流或小河上可只绘洪峰部分。有输沙率数据时，还应将相应的断沙，以醒目的颜色点在单沙过程线上，然后将单沙过程线与水位、流量过程线进行对

照,一般情况下,三者常有一定的关系。如发现某个或某几个单沙测点有突出或不合理现象时,应认真检查分析原因。

通常造成测点突出的原因有以下几个。

(1) 测验方面的原因。如沙样称重错误或计算错误,会使含沙量突出偏大或偏小;取样位置不当或单位水样受脉动影响很大,会使含沙量成锯齿形跳动等。

(2) 天然方面的原因。如季节、洪水来源、暴雨特性等因素会使水位、含沙量发生不相应的变化。

通过上述分析检查,突出点若属于自然现象的应予保留,否则应予改正。通过上述工序,保证单沙数据的正确性,为推求断沙作好准备。

2. 单沙、断沙关系图的分析

点绘的单沙、断沙关系,常呈现一定的规律性,但少数测点可能出现突出或反常,应进行分析判定,经过分析评判突出点后所定的单沙、断沙关系,将是可靠的关系,将利用这一关系进行断沙的推求。

(1) 单沙、断沙关系的形态。单沙、断沙关系常有以下几种形态。

1) 单沙、断沙关系良好。测点在图上的分布,没有随时间或水位有系统偏离,测点密集成一带状,可以定出稳定的单一曲线。

2) 单沙、断沙关系基本良好。关系测点在图上的分布随水位或时间而有系统偏离,一年内单沙、断沙关系不能用一条相关曲线代表,而需定出数条线才能完成。前者可能是由于水位高低影响含沙量的横向分布,使单沙、断沙关系变化。后者可能是由于测验方法的改变,也可能由于中泓移动、断面冲淤、水工建筑物变迁等原因造成。

3) 单沙、断沙关系不好。关系点分布散乱、无规律可循。这可能是主流摆动频繁、河段和断面冲淤剧烈或断面上游支流大量来沙所致,也可能是测验精度低造成。

(2) 突出点的分析。在点绘的单沙、断沙关系图上,常发现一些测点脱离点群或带组,偏离较远,这些偏离较远的测点,称为突出点。突出点会给定线工作带来一定的困难,不进行分析评判,就难以确定关系曲线。偏离多少算突出点呢?在相关标准中没有严格的规定,但它与测验精度的高低,单沙、断沙关系的好坏有关。定单一曲线的条件是测点无系统偏离,且有75%以上点子与关系曲线偏离的相对误差满足中沙、高沙不超过 $\pm 10\%$,低沙不超过 $\pm 15\%$ 。说明中沙、高沙偏离 $\pm 10\%$,低沙偏离 $\pm 15\%$ 以外的点子都属于突出点,若这些测点较多,可从中选择(删除)相对误差较大的几个测点进行分析。分析方法多用点绘流速,含沙量横向分布图,与其他正常测次比较,检查突出原因。必要时也可点绘含沙量垂线分布图,审查合理性。造成突出点偏离的可能原因有以下几种。

1) 相应单沙代表性差或在测验计算中出错。如在输沙率测验期间,含沙量变化甚大而仅取一次单沙者;单沙取样位置或取样方法发生变动,前后不一样;计算错误等。

2) 断沙测验或计算中出错。如测沙垂线不足,布置不当;含沙量、流量、输沙率计算中有错误等。

3) 特殊水情影响。河段断面冲淤严重;河道游荡,主流摆动;来水来沙不同及

特殊原因造成等。

经过分析，凡属测验或计算方面的错误，应予以改正；错误过大而又无法改正者，应予以舍弃。改正与舍弃都要有确切的证据。如经查实，突出点是出于特殊水情造成，则应与正常点一样，参加数据处理。

10.1.3 推求断面平均含沙量的方法

由于河流的输沙率是在不断的变化中，而输沙率的测次是很少的，很难反映河流输沙率随时间的变化情况，因此须经过数据的分析研究，找出其他因素如单沙（或流量）与断沙（或输沙率）之间的关系，然后，推求断沙和输沙率数据。经过反复实践，其中单沙、断沙关系法是较好的方法，已获得广泛应用。但有时限于数据条件，可分情况，采用其他近似方法。

1. 单沙、断沙关系曲线法

单沙、断沙关系曲线法是我国应用比较广泛的一种方法，它适用于单沙、断沙关系比较稳定的测站，关系线的形式有单一线型和多线型。

(1) 单沙、断沙关系的单一线法。如单沙、断沙关系点子密集成一带状，点子不依时序或水位系统偏离，且有 75% 以上测次的点子与平均关系线的偏离在中高沙时不超过 $\pm 10\%$ ，低沙时不超过 $\pm 15\%$ ，可采用此法。

在定线时，可通过点群中心定出一条光滑曲线，使曲线两旁点子的数目差不多。关系线可定为直线或曲线，视测点分布趋势而定。绘出平均关系线后，在其两侧分别做出 $\pm 10\%$ （或 15% ）的两条线，数出这两条线范围内的点子数目，计算其与总点数的比值（即偏差小于 $\pm 10\%$ 的占总数的百分数），这比值应大于 75%，如图 10-1 所示。

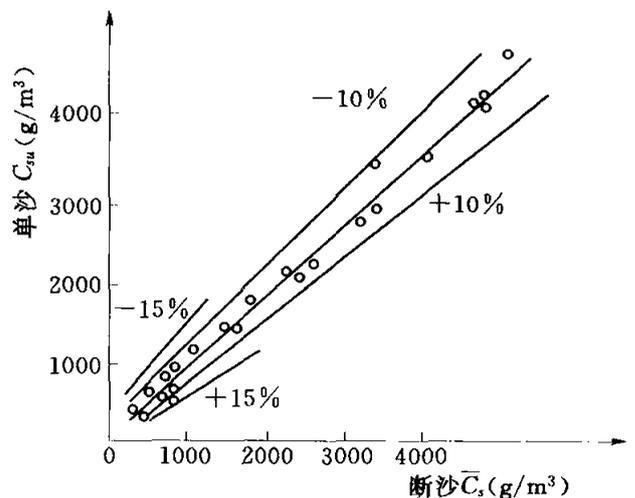


图 10-1 单断沙关系线

(2) 单沙断沙关系的多线法。单沙、断沙测点依水位、时间或单沙测取位置和方法，明显分布成几个独立带组时，可分别用水位、时间、单沙取样位置、方法作参数，绘制多条单沙、断沙关系曲线。

1) 以水位作参数定线。在测站断面比较稳定，而在某一水位以上河流有漫滩现象或分流现象，使含沙量的横向分布随水位而改变时，如果单沙是在固定垂线位置取样，则可用水位作参数，定出几条关系线来推算断沙，如图 10-2 所示。

2) 以时间作参数定线。当河道主流摆动，断面有冲淤变化，使含沙量的横向分布随时间不同而有变化时，如单沙在固定垂线取样，则可分时段定出多条单沙、断沙关系线，如图 10-3 所示，并在关系线上注明线号和推沙时间。推求断沙时，根据水位或时间，在相应关系线上由单沙推得断沙。

(3) 单沙、断沙的比例系数法。单沙、断沙关系不好，无法制定相关曲线时，则

可采用比例系数法：即用实测输沙率的断沙 \bar{C}_s 与其相应单沙 C_u 之比，得出比例系数。

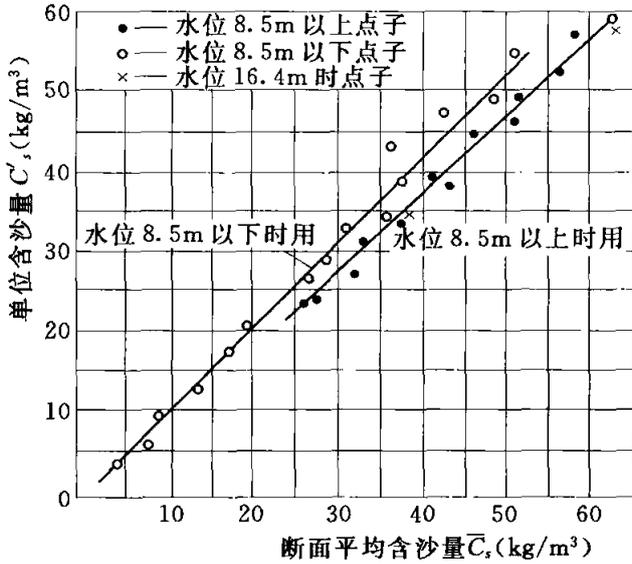


图 10-2 以水位作参数的单沙、断沙关系
计算比例系数为

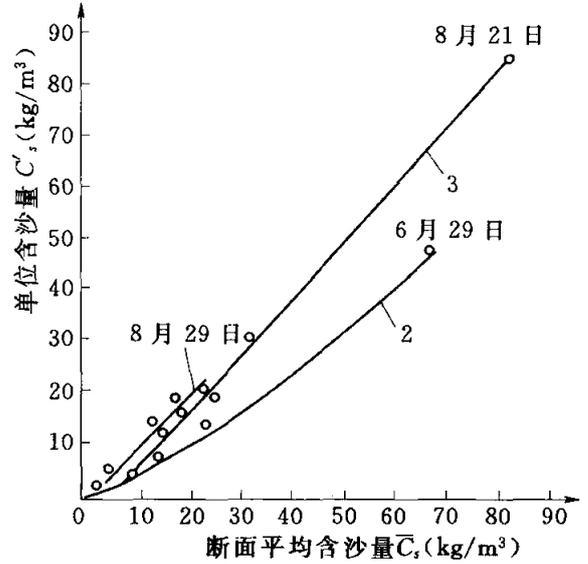


图 10-3 以时间作参数的单沙、断沙关系

$$m = \frac{\bar{C}_s}{C_u} \quad (10-1)$$

式中： m 为比例系数； \bar{C}_s 为实测断面平均含沙量， kg/m^3 ； C_u 为相应单样含沙量 kg/m^3 。

用比例系数法推求断沙，又分以下两种方法。

1) 水位与比例系数关系曲线法。适用于主流随水位增高而逐渐移动，单沙取样垂线位置固定，而比例系数与水位的关系点子密集成带状，定出的关系曲线符合精度要求，可用此法，如图 10-4 所示。

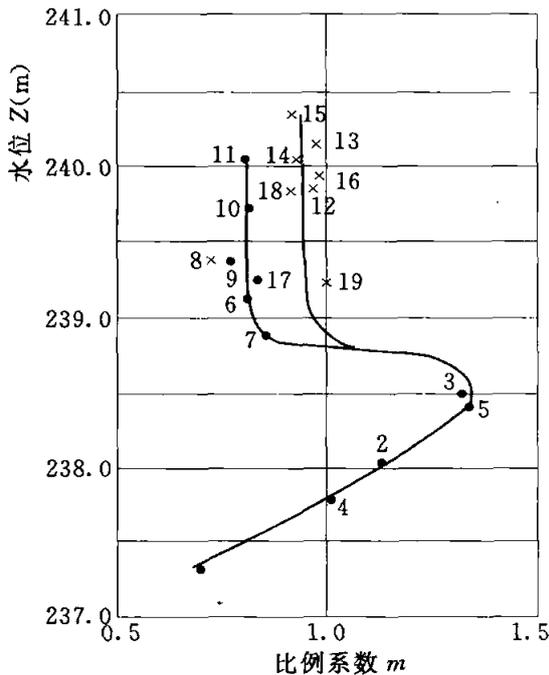


图 10-4 水位与比例系数关系线

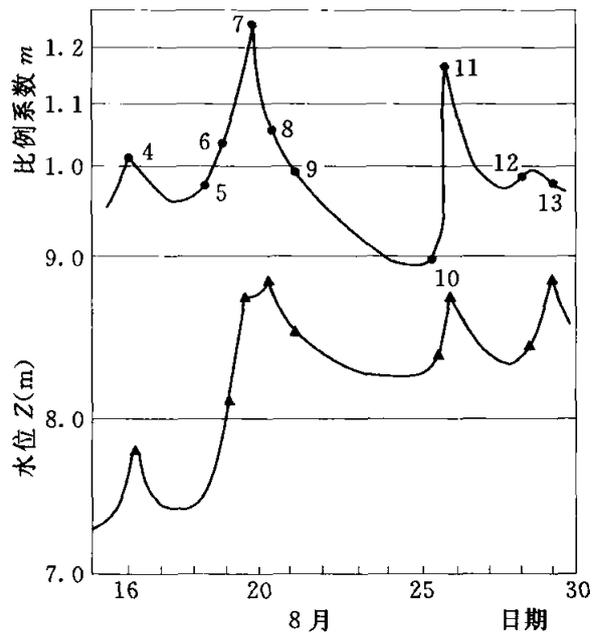


图 10-5 比例系数过程线与水位过程线

2) 比例系数过程线法。如断面冲淤不定, 主流摆动频繁, 单沙、断沙关系点子散乱, 可参考水位过程线、流量过程线的变化趋势, 绘制光滑的比例系数过程线, 如图 10-5 所示。此法要求输沙率测次较多, 测次分布比较均匀, 且单沙、断沙关系转折变化处均有测点控制。

从关系线或过程线上查读比例系数, 乘以此时实测单沙, 即得该次的断面平均含沙量。

2. 流量与输沙率关系曲线法

天然河流的流量和输沙率(或断沙)之间存在一定的关系, 在未开展经常性的单沙测验之前, 常用流量和断沙建立关系, 进行数据处理。但是由于影响含沙量变化的因素复杂, 流量与断沙之间关系一般是不密切的, 因此这种方法现在已很少采用。但在有些情况下, 可以作为辅助性的数据处理方法。这些情况包括以下几种。

(1) 对历史数据, 不能应用单沙、断沙关系法进行数据处理时。

(2) 单沙数据零星分散, 残缺不全, 代表性差, 不能反映河流含沙量变化情况时。

(3) 河床变化十分剧烈, 沙滩出没无常, 主流经常摆动, 用少数垂线施测单沙不能反映横断面含沙量的分布情况, 这种测站可以适当增加输沙率测次, 直接用流量与输沙率关系法进行数据处理。

3. 近似法

当输沙率测次太少或单沙、断沙关系不好, 不可能应用上述各种方法, 以及只测单沙与流量不测输沙率的测站, 可用近似法进行数据处理。即直接以单沙代替断沙, 推求逐日平均含沙量。

10.1.4 单样含沙量的插补方法

为了求得完整的数据处理成果, 对缺测单沙, 在条件许可时应进行插补。但须注意, 影响含沙量的因素十分复杂, 在选用插补方法时, 须对测站特性、洪水来源、沙量来源等情况深入分析, 了解含沙量的变化和有关因素(如水位、流量、暴雨、冲淤影响)间的关系。如插补重要沙峰, 更应多方对照比较研究。

1. 直线插补法

在水位变化平缓, 含沙量变化不大, 或水位含沙量变化虽较大, 但单沙测次间隔时间不长, 且未跨过峰、谷时, 可用未测时段两端的实测单沙, 按时间(日或小时)比例内插缺测时段的单沙。

2. 连过程线插补法

此法是根据含沙量过程线与水位、流量过程线有一定的规律而得。适用于水位、流量变化不大, 或虽大但缺测时间不长的时期。插补时, 先绘出水位、流量过程线, 再根据上述规律连绘缺测时期的单沙过程线, 据以插补缺测时段的单沙。

如缺洪峰起涨点含沙量, 而在起涨点以前的退水段含沙量变化很小时, 即可以起涨点前一次实测单沙作为起涨点单沙。

3. 流量与含沙量关系插补法

山区河流源短流急, 一般洪峰与沙峰同时出现, 流量与含沙量关系曲线常成一条或几条单一曲线。可以点绘流量与含沙量关系曲线, 据以插补缺测的单沙。

4. 上下游站含沙量相关插补法

在没有支流汇人和冲淤变化小的河段,可以根据相邻站含沙量的起伏变化连绘本站缺测时段含沙量过程线;也可以用上下游站同时实测单沙点绘相关图,通过点群中心定出关系曲线,如果精度符合要求,即可用来插补。

10.1.5 单沙、断沙关系曲线的延长

在沙峰期间,因各种原因未能施测输沙率,从而在单沙、断沙关系的高沙部分缺少测点而难以定线。当条件允许时,可作单沙、断沙关系曲线的高沙延长。

若单沙、断沙关系测点比较散乱,规律性较难掌握,为了不使外延的曲线出现较大的问题,对高沙曲线延长的规定比较严格。当单沙、断沙关系为直线时,测点不少于10个,最大相应单沙的数值为最大实测单沙数值的50%以上时,可作高沙延长。

若单断沙关系为曲线型或折线型,测取单沙的位置及方法与历年不一致,或断面形状有较大变化时,均不宜作高沙延长。

延长方法为顺原单沙、断沙关系曲线中、低沙部分的趋势,并参照历年单沙、断沙关系,作直线延长。

10.1.6 单沙、断沙关系曲线检验

单沙、断沙关系曲线检验内容包括关系曲线检验和实测点标准差计算,具体方法与流量的检验方法一样。

1. 关系曲线的检验

对输沙率实行间测的站,本年有校测数据时,应作 t 检验,以判定历年综合单沙、断沙关系曲线是否发生了变化。对单沙、断沙关系为单一线(或多线中的主要曲线)的情况,应进行符号检验、适线检验和偏离数值检验,以判定曲线是否正确。

2. 实测点标准差计算

为了解关系点的离散程度,应计算单一线及多线中主要曲线的标准差。

10.1.7 日平均输沙率、含沙量的推求方法

要准确地求出逐日平均含沙量,首先要求单沙(或断沙)测次分布适当,测验成果的质量好;其次要求计算方法正确,否则也会引起较大误差。

1. 计算日平均值的数据

计算日平均值的数据,根据情况分别选用以下数据。

(1) 实测点数据,直接使用实测单沙、断沙或经过换算后的断沙,进行日平均值的计算。当转折点有缺测或两点间流量、含沙量变化很大时,应采用合适的方法予以插补。

(2) 过程线摘录数据,根据绘制的单沙或断沙过程线,在过程线上摘录足够的,能控制流量、含沙量变化的点子,计算日平均值。

2. 使用单沙推求断沙时,日平均值的计算方法

(1) 日平均值的推算方法。

1) 一日仅取一次单沙者,即以该次单沙推求的断沙作为日平均含沙量,再乘以日平均流量得该日的日平均输沙率。

2) 几日取一次单沙者,在未测单沙期间,各日平均含沙量以前后测取之日的断沙,用直线内插求得,分别乘以各日平均流量,得各日的日平均输沙率。

3) 因含沙量很小, 采用若干天水样混合处理时, 以混合水样的相应断沙作为各日的日平均含沙量, 并用以推算日平均输沙率。

4) 一日内取多次单沙者, 根据情况分别采用算术平均法、面积包围法、流量加权法或积分法计算日平均含沙量, 一般可按以下几种情况处理。

a. 算术平均法。流量变化不大、单沙测次分布均匀时, 将一日内单沙推得的断沙算术平均值, 作为日平均含沙量, 据以推求日平均输沙率。

b. 面积包围法。流量变化不大, 但含沙量变化较大且点次分布不均匀者, 可用各次断沙以时间加权求平均值, 作为日平均含沙量, 然后再用上述方法计算日平均输沙率。

日平均含沙量的计算公式为

$$\bar{C}_s = \frac{1}{48} C_{s0} \Delta t_1 + C_{s1} (\Delta t_1 + \Delta t_2) + C_{s2} (\Delta t_2 + \Delta t_3) + \dots + C_{sn-1} (\Delta t_{n-1} + \Delta t_n) + C_{sn} \Delta t_n \quad (10-2)$$

式中: \bar{C}_s 为日平均含沙量, kg/m^3 ; C_{s0} , C_{sn} 分别为 0 时及 24 时的含沙量, kg/m^3 ; C_{s1} , C_{s2} , \dots , C_{sn-1} 分别为日中各瞬时的含沙量, kg/m^3 ; Δt_1 , Δt_2 , \dots , Δt_n 分别为相邻两瞬时含沙量间的时距, h。

c. 流量加权法。流量和含沙量变化都比较大, 采用流量加权法计算日平均输沙率, 然后除以日平均流量得日平均含沙量。计算方法有: “第一法”、“第二法”、“积分法”。

“第一法”是以瞬时流量乘以相应时间的断沙, 得瞬时输沙率, 再用时间加权求出日平均输沙率, 然后, 再用日平均输沙率除以日平均流量得日平均含沙量。其计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{Q}_s &= \frac{1}{24} \left[\frac{1}{2} (q_0 C_{s0} + q_1 C_{s1}) \Delta t_1 + \frac{1}{2} (q_1 C_{s1} + q_2 C_{s2}) \Delta t_2 \right. \\ &\quad \left. + \dots + \frac{1}{2} (q_{n-1} C_{sn-1} + q_n C_{sn}) \Delta t_n \right] \\ &= \frac{1}{48} [q_0 C_{s0} \Delta t_1 + q_1 C_{s1} (\Delta t_1 + \Delta t_2) + q_2 C_{s2} (\Delta t_2 + \Delta t_3) \\ &\quad + \dots + q_n C_{sn} \Delta t_n] \end{aligned} \quad (10-3)$$

式中: \bar{Q}_s 为日平均输沙率, kg/s ; q_0 , q_n 分别为 0 时及 24 时流量, m^3/s ; C_{s0} , C_{sn} 分别为 0 时及 24 时的含沙量, kg/m^3 ; q_1 , q_2 , \dots , q_{n-1} 分别为各瞬时流量, m^3/s ; C_{s1} , C_{s2} , \dots , C_{sn-1} 分别为相应各瞬时流量的断沙, kg/m^3 ; Δt_1 , Δt_2 , \dots , Δt_n 分别为相邻两瞬时含沙量间的时距, h。

计算可列表进行, 表格格式见表 10-1。

表 10-1 $\times\times$ 站流量加权法“第一法”日平均含沙量计算

时 间		流 量 (m^3/s)	含沙量 (kg/m^3)	输沙率 (kg/s)	权 重 ($\Delta t_i + \Delta t_{i+1}$)h	积 数 (输沙率 \times 权重)	日平均 输沙率 (kg/s)	日平均 含沙量 (kg/m^3)
日	时:分							
(1)		(2)	(3)	(4)=(2) \times (3)	(5)	(6)=(4) \times (5)	(7)= $\frac{1}{48}$ Σ (6)	(8)= (7)/ \bar{Q}

续表

时 间		流 量 (m ³ /s)	含沙量 (kg/m ³)	输沙率 (kg/s)	权 重 (Δt _i + Δt _{i+1})h	积 数 (输沙率 ×权重)	日平均 输沙率 (kg/s)	日平均 含沙量 (kg/m ³)
日	时:分							
2	00:00	2.33	18.3	42.64	8	341.1	7230	375
	08:00	1.96	16.2	31.75	18	571.5		
	18:00	1.5	43.2	64.8	12	777.6		
	20:00	69.5	332	23070	3	69210		
	21:00	47.9	476	22800	1.7	38760		
	21:40	36.8	467	17190	1	17190		
	22:00	69.5	463	32180	1.3	41830		
	23:00	150	502	75300	2	150600		
	24:00	143	195	27890	1	27890		

“第二法”是以相邻瞬时断沙的平均值与瞬时流量平均值的乘积，得时段平均输沙率，再用时间加权，计算日平均输沙率。然后，再用日平均输沙率除以日平均流量得日平均含沙量。其计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{Q}_s &= \frac{1}{24} \left[\frac{1}{2} (q_0 + q_1) \times \frac{(C_{s0} + C_{s1})}{2} \Delta t_1 + \frac{1}{2} (q_1 + q_2) \times \frac{(C_{s1} + C_{s2})}{2} \Delta t_2 \right. \\ &\quad \left. + \dots + \frac{1}{2} (q_{n-1} + q_n) \times (C_{s_{n-1}} + C_{s_n}) \Delta t_n \right] \\ &= \frac{1}{96} [(q_0 + q_1)(C_{s0} + C_{s1}) \Delta t_1 + (q_1 + q_2)(C_{s1} + C_{s2}) \Delta t_2 \\ &\quad + \dots + (q_{n-1} + q_n)(C_{s_{n-1}} + C_{s_n}) \Delta t_n] \end{aligned} \quad (10-4)$$

式中符号的含义与式(10-3)相同。

计算可列表进行，表格格式见表10-2。

为了比较两种方法的差别，假定在某时段 Δt 内，流量与含沙量皆呈直线变化，从其组合可分成4种类型，即：①流量和含沙量均稳定不变；②一个因子稳定不变，另一因子上涨或下降；③流量与含沙量两个因子同时上涨或同时下降；④一个因子上涨，而另一因子下降。

表 10-2 ××站流量加权法(第二法)日平均含沙量计算

时 间		流 量 (m ³ /s)	时段 平均	含沙量 (kg/m ³)	时段 平均	时段 输沙率 (kg/s)	时段 Δt,h	积 数	日平均 输沙率 (kg/s)	日平均 含沙量 (kg/m ³)
日	时:分	瞬 时		瞬 时						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)=(3) ×(5)	(7)	(8)= (6)×(7)	(9)=Σ (8)/24	(10)= (9)×Q̄	

续表

时 间		流量 (m ³ /s)	时段 平均	含沙量 (kg/m ³)	时段 平均	时段 输沙率 (kg/s)	时段 $\Delta t, h$	积 数	日平均 输沙率 (kg/s)	日平均 含沙量 (kg/m ³)
日	时:分	瞬 时		瞬 时						
2	00:00	2.33	2.15	18.3	17.3	37.2	8	297.6	6820	353
	08:00	1.96		16.2						
	18:00	1.5	1.73	43.2	29.7	51.38	10.0	513.8		
			35.5	188	6647	2	13350			
	20:00	69.5	58.7	332	404	23710	1	23710		
	21:00	47.9	42.4	476	472	20010	0.7	14010		
	21:40	36.8	53.2	467	465	24740	0.3	7422		
	22:00	69.5	110	463	483	53130	1	53130		
	23:00	150	147	502	349	51300	1	51300		
	00:00	143		198						

显然类型①用两种方法计算结果完全一样，不必证明，其他类型用简单数字对比两种方法结果见表 10-3。

表 10-3 两种流量加权法计算日平均含沙量的比较

类 型	流 量		含 沙 量		“第一法”公式	比 较	“第二法”公式
	q_1	q_2	C_{s1}	C_{s2}	$\frac{1}{2}(q_1 C_{s1} + q_2 C_{s2}) \Delta t$		$\frac{1}{2}(q_1 + q_2) \frac{1}{2}(C_{s1} + C_{s2}) \Delta t$
②	8	4	2	2	$12\Delta t$	=	$12\Delta t$
③	3	5	2	4	$13\Delta t$	>	$12\Delta t$
④	2	6	7	3	$16\Delta t$	<	$20\Delta t$

由此可见类型②，用两种方法计算结果相同。后两种类型的计算结果不同，有大有小。现以泾河东川庆阳站 1956 年 7 月 21 日数据，用不同方法计算日平均含沙量为例，用逐时含沙量的面积包围法求得日平均含沙量为 105kg/m³；用流量加权法得日平均含沙量为 375kg/m³ 或 356kg/m³。可见计算方法不容忽视。

“积分法”：在 Δt 时段内流量、含沙量均呈直线变化时，计算时段 Δt 初的流量与含沙量分别为 q_1 和 C_{s1} ，输沙率 $Q_{s1} = q_1 C_{s1}$ ；时段末的流量与含沙量分别为 q_2 和 C_{s2} ，输沙率 $Q_{s2} = q_2 C_{s2}$ 。流量和含沙量的变化率分别为 k_1 和 k_2 ，如图 10-6 所示。

在 Δt 时段内的任一微分时段 dt 的输沙量 $dW_s(t)$ 可表示为

$$dW_s(t) = (q_1 + k_1 t)(C_{s1} + k_2 t) dt$$

任一时刻的输沙率为

$$Q_s(t) = \frac{dW_s(t)}{dt} = (q_1 + k_1 t)(C_{s1} + k_2 t)$$

$$= q_1 C_{s1} + k_2 q_1 t + k_1 C_{s1} t + k_1 k_2 t^2 \quad (10-5)$$

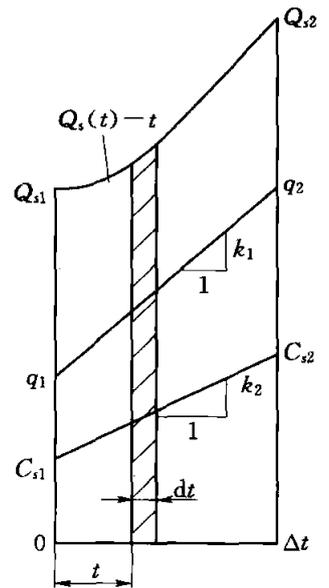


图 10-6 输沙率计算

Δt 时段内的输沙量为

$$W_s = \int_0^{\Delta t} Q_s(t) dt = \int_0^{\Delta t} (q_1 C_{s1} + k_2 q_1 t + k_1 C_{s1} t + k_1 k_2 t^2) dt$$

$$= q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{3} (\Delta t)^3 \quad (10-6)$$

这是用严格的数学推导求得的 Δt 时段的输沙量，即“积分法”的结果。用这种方法计算起来比较麻烦，利用“第一法”计算比较方便，下面来分析一下“积分法”与“第一法”的关系：

按相同条件“第一法”，计算 Δt 时段的输沙量为

$$W_{s1} = \frac{1}{2} [q_1 C_{s1} + (q_1 + k_1 \Delta t) (C_{s1} + k_2 \Delta t)] \Delta t$$

$$= q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{2} (\Delta t)^3 \quad (10-7)$$

$$W_s - W_{s1} = q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{3} (\Delta t)^3$$

$$- [q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{2} (\Delta t)^3]$$

$$= -\frac{k_1 k_2}{6} (\Delta t)^3$$

比较式 (10-6) 和式 (10-7) 可知，每个时段“第一法”比“积分法”大 $\frac{k_1 k_2}{6} (\Delta t)^3$ ，只要第一法中把多出的这一部分扣掉，便可以得到积分法的结果，计算表格见表 10-4。

表 10-4 ××站流量加权法（积分法）日平均含沙量计算

时 间	时段 Δt_i (h)	流量 Q (m^3/s)	含沙量 C_s (kg/m^3)	输沙率 Q_s (kg/s)	权重 ($\Delta t_i + \Delta t_{i+1}$)	积 数	流量 变率 k_1	含沙量 变率 k_2	差 值	$\Sigma(7)/2 - \Sigma$ (10)	日平均 输沙率 (kg/s)	日平均 含沙量 (kg/m^3)	
													(1)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3) × (4)	(6)	(7) = (5) × (4)	(8)	(9)	(10) = $\frac{k_1 k_2}{6} (\Delta t)^3$	(11)	(12) = $\frac{(11)}{24}$	(13) = $\frac{(12)}{Q}$	
2	00:00	8.00	2.33	18.3	42.46	8.0	341.1	-0.046	-0.263	1.03	166835	6951.5	357.8
	08:00	10.00	1.96	16.2	31.75	18.0	571.5	-0.046	2.700	-20.7			
	18:00		1.50	43.2	64.80	12.0	777.6	34.000	144.40	6546			
	20:00	1.00	69.50	332	23070	3.0	69222.0	-21.600	144.00	-518.4			
	21:00		47.90	476	22800	1.67	38076.7	-16.567	-13.43	11.2			
	21:40	0.33	36.80	467	17190	1.0	17190.0	99.091	-12.12	-7.2			
	22:00		69.50	463	32180	1.33	42797.4	80.500	39.00	523.3			
	23:00	1.00	150.00	502	75300	2.0	15060.0	-7.000	-307.00	358.2			
	24:00		143.00	195	27885	1.0	27885.0						

(2) 计算精度分析。对比两种计算方法,二者在相同条件下,主要区别是计算时段输沙量采用的简化方法不同。下面以一个计算时段为研究对象,对两种计算方法进行对比分析。

采用与“第一法”相同的方法,推得“第二法”与“积分法”结果有以下区别。

“第二法”,计算 Δt 时段的输沙量为

$$W_{s2} = \frac{1}{2} [q_1 + (q_1 + k_1 \Delta t)] \frac{1}{2} [C_{s1} + (C_{s1} + k_2 \Delta t)] \Delta t$$

整理得

$$W_{s2} = q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{4} (\Delta t)^3 \quad (10-8)$$

与“积分法”的差为

$$\begin{aligned} W_s - W_{s1} &= q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{3} (\Delta t)^3 \\ &\quad - [q_1 C_{s1} \Delta t + \frac{k_2}{2} q_1 (\Delta t)^2 + \frac{k_1}{2} C_{s1} (\Delta t)^2 + \frac{k_1 k_2}{2} (\Delta t)^3] \\ &= \frac{k_1 k_2}{12} (\Delta t)^3 \end{aligned}$$

通过以上分析清楚地看到,“第一法”计算的结果比“积分法”计算的结果系统偏大 $\frac{k_1 k_2}{6} (\Delta t)^3$, 而“第二法”计算的结果比“积分法”计算的结果系统偏小 $\frac{k_1 k_2}{12} (\Delta t)^3$ 。

通过对两种计算方法的分析有以下几点认识。

1) 一日内当流量、含沙量变化较大的情况下,无论采用“第一法”还是“第二法”都可能会产生误差,只有当流量和含沙量均不变化,或者至少有一个不变化时 (k_1 和 k_2 至少有一个为零),“第一法”、“第二法”的计算结果才与“积分法”一致。

2) 在流量和含沙量同向变化时 (k_1 和 k_2 同号),即涨水涨沙或落水落沙,“第一法”计算出的时段输沙量系统偏大,“第二法”计算出的时段输沙量系统偏小;当流量和含沙量异向变化 (k_1 和 k_2 异号),即涨水落沙或落水涨沙,“第一法”计算出的时段输沙量系统偏小,“第二法”计算出的时段输出量系统偏大。在生产实践中,一般情况下涨水涨沙或落水落沙的情况较多,涨水落沙或落水涨沙出现的情况相对少(尤其大河),因此系统误差不可能抵消,误差的大小又不易控制,特别当流量、含沙量变化较大时,由此产生的日平均输沙率的计算误差可能比较大。

3) 采用“积分法”计算时,在流量、含沙量最大涨落段,无需再进行直线内插即可求出精确的计算结果。

为减少“第一法”计算误差,应在流量、含沙量最大涨落段,直线内插 1~2 个点子再进行计算。这种内插点子的方法,实际上是为了让“第一法”的计算结果更接近“积分法”,以减少误差。如图 10-7 所示,在 Δt 时段内,用“积分法”求得的时段输沙量为凹形面积 abcd,用“第一法”求得的时段输

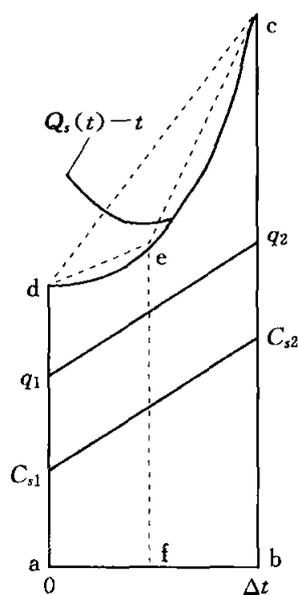


图 10-7 积分法与第一法分析

沙量为梯形面积 abcd, 其误差比较大, 当内插 1 个点子后, 时段输沙量为梯形面积 afed 和 fbce 之和, 这样比梯形面积 abcd 更接近凹形面积 abcd, 减小了误差。而采用“积分法”就没有必要了, 直接可以得到凹形面积 abcd 的结果。

10.1.8 悬移质泥沙的月、年统计值计算

悬移质泥沙的主要月、年统计值有月、年平均输沙率; 月、年平均含沙量; 月、年输沙量; 流域侵蚀模数等。

(1) 月、年平均输沙率。用全月或全年逐日平均输沙率的总和除以相应的月、年总日数。

$$\bar{Q}_{s, \text{月或年}} = \frac{\sum_1^n \bar{Q}_s}{n} \quad (10-9)$$

(2) 年输沙量。为通过河流中某一过水断面的悬移质泥沙总重量, 以全年逐日平均输沙率之和, 乘以 1 日之秒数得到, 单位以 t、万 t、亿 t 表示。

$$W_s = \sum_1^n \bar{Q}_s \cdot 86400 \quad (10-10)$$

(3) 流域侵蚀模数或输沙模数。以年输沙量除以集水面积得, 单位以 t/(a · km²) 表示。

$$M_s = \frac{W_{s, \text{年}}}{A} \quad (10-11)$$

式中: M_s 为蚀模数, t/km²; $W_{s, \text{年}}$ 为年输沙总量, t; A 为测站所控制的集水面积, km²。

(4) 月、年平均含沙量。用月、年平均输沙率除以月、年平均流量得之。

$$\bar{C}_{s, \text{月或年}} = \frac{\sum_1^n \bar{Q}_{s, \text{月或年}}}{Q_{\text{月或年}}} \quad (10-12)$$

10.1.9 合理性检查

悬移质泥沙数据的合理性检查分单站检查和上下游站综合检查两部分, 通过检查, 对发现的矛盾和问题应进行认真的处理, 以提高数据处理成果的质量。

1. 单站合理性检查

(1) 历年关系曲线对照。当单沙取样位置、取样方法没有大的变化, 断沙的推求也与往年一致时, 可用历年单沙、断沙关系或水位比例系数关系曲线, 进行对照, 其曲线的趋势基本一致, 且变化范围不应过大, 当发现异常时, 应查明原因。检查是否因流域自然地理情况或本站水沙特性的改变而造成(如水土保持、垦荒、河段冲淤变化等), 还是测算错误所引起。

(2) 含沙量变化过程的检查。全年分月在同一张图上, 绘制逐日流量、含沙量、输沙率过程线进行对照, 洪峰期间, 应加绘瞬时过程线对照。含沙量的变化与流量的变化常有一定的关系, 可从历年流量, 含沙量数据的比较中, 找出规律性, 据以检查本年数据的合理性。如有反常, 应查明是由于人为因素, 还是由于洪水来源、暴雨特性、季节性等因素影响所造成。

2. 综合合理性检查

(1) 上下游含沙量、输沙率过程线对照。在同一张图上，用同一纵横坐标，将上下游各站逐日平均含沙量、输沙率（或瞬时含沙量、输沙率）以不同的颜色或符号点绘过程线进行对照检查。

当没有支流汇入或支流来沙影响较小时，上下游站之间，常有一定的对应关系，利用这一特性检查过程线的形状，峰、谷传播时间，沙峰历时等是否对应、合理，如图 10-8 所示为我国辽河铁岭至巨流河站 1963 年 6 月下旬的含沙量过程线。从图 10-8 上可以看出，过程线形状相似，峰顶、峰谷相应，峰顶沙量自上游向下游递减，起涨及峰顶时间上游先于下游，沙峰历时由上游向下游递增，是合理的。

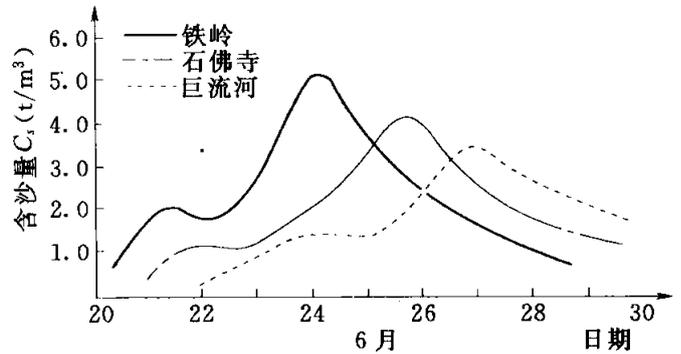


图 10-8 辽河铁岭至巨流河站的部分含沙量过程线（无支流汇入）

在支流入汇影响较大或区间经常发生冲淤变化的河段，上下游含沙量的关系就不同了，图 10-9 是某河流甲、乙、丙 3 站含沙量过程线图，从图 10-9 上看出，上下游站含沙量变化过程不相应，例如 7 月 12~16 日甲站含沙量很小，但乙站却有较大的沙峰出现，查其原因，是由于支流来沙量很大引起的。

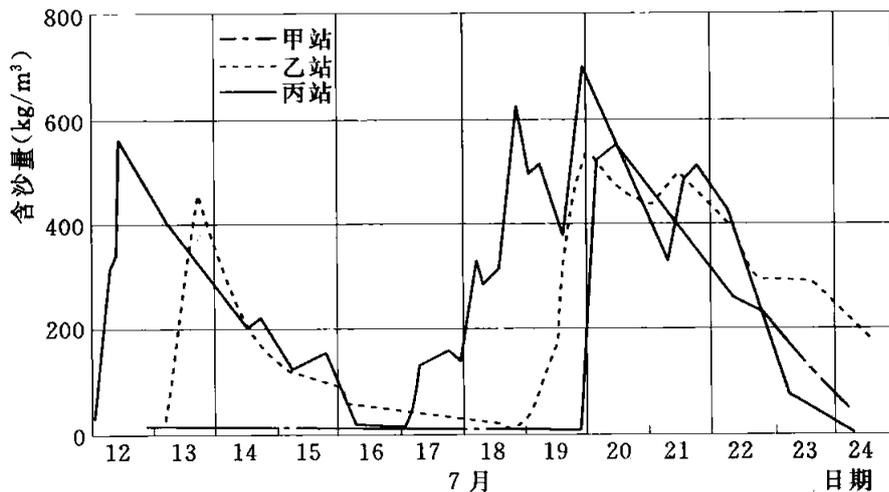


图 10-9 某河流甲、乙、丙 3 站含沙量过程线（有支流汇入）

(2) 上、下游月、年平均输沙率对照。编制上下游月、年平均输沙率对照表；检查输沙率沿河长的变化是否合理，当洪峰跨月时，可用两月的月平均输沙率之和作比较；区间支流有来沙影响时，应将上游站与支流站输沙率之和列入与下游站比较。

10.2 推移质输沙率数据处理

推移质输沙率数据处理的内容有：审查和分析原始数据；编制实测推移质输沙率

成果表；确定推移质输沙率的推求方法；编制逐日平均推移质输沙率表以及编写数据处理说明书等。

10.2.1 实测数据的分析

推移质泥沙运动非常复杂，其脉动现象远比悬移质大得多，尤其是卵石推移质。推移质输沙率在断面内的分布很不均匀，一般情况下，推移质的数量与流速的大小有密切关系，主流摆动的测站，推移质的横向变化大。

推移质输沙率一般随悬移质输沙率以及流速（流量、水位）的增减而增减。在山溪性比降很大的河流，平水期虽流量、含沙量并不大，但推移质输沙率仍有相当的数量。

根据测站特性和数据情况，可进行以下几种分析。

(1) 推移质输沙率与某种水力因素（流速、水位、流量、悬移质输沙率等）过程线对照。

(2) 推移质输沙率与某种水力因素（流速、水位、流量、悬移质输沙率等）相关曲线分析。

10.2.2 逐日推移质输沙率的推求方法

当前推移质输沙率测验和数据处理正处于探索阶段，推求逐日平均推移质输沙率的方法，可在数据分析后选定。当实测数据很少，也可积累数年数据后，合并进行数据处理。进行数据处理时，可选择以下几种方法。

1. 推移质输沙率与水力因素关系曲线法

点绘推移质输沙率与某水力因素（流速、流量、水位、悬移质输沙率等）相关曲线，当关系密切时，可以用此法。图 10-10 是用断面平均流速与推移质输沙率点绘的关系图，相关图采用的坐标是双对数坐标。从图 10-10 中看出：关系线呈两条相交的直线，分上、下两个系统，因每次实测推移质输沙率时，均实测流量和悬移质输沙率，故可找出与推移质输沙率同时的断面平均流速与之点绘关系曲线的模型为

$$Q_b = a\bar{V}^n \quad (10-13)$$

式中： Q_b 为推移质输沙率，kg/s； \bar{V} 为断面平均流速，m/s； a ， n 分别为系数、

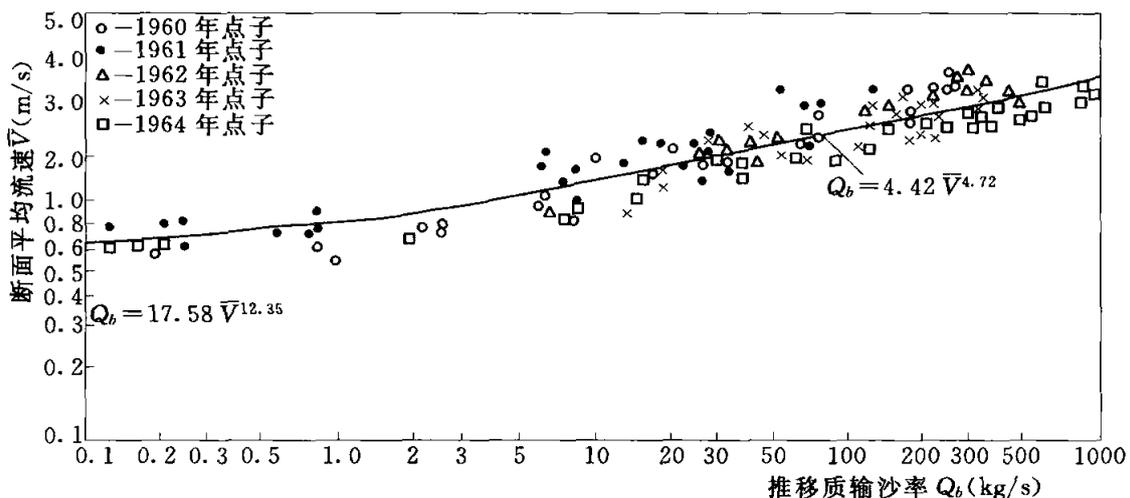


图 10-10 推移质输沙率与断面平均流速关系曲线

指数。

为了与推移质输沙率与断面平均流速关系曲线图配合，还点绘流量与断面平均流速相关图，可用实测数据在双对数纸上点绘，一般也呈线性关系，如图 10-11 所示。

推求日平均推移质输沙率时，可先用日平均流量在图 10-11 中查得相应的日平均流速，再用日平均流速在图 10-10 中查读日平均推移质输沙率。

当流量与推移质输沙率关系较好时，也可以直接点绘流量与推移质输沙率相关曲线，用日平均流量直接在相关曲线上推读日平均推移质输沙率。

2. 实测推移质输沙率过程线法

当推移质输沙率与其他水力因素关系不好，但测次较多时，可点绘实测推移质输沙率过程线。图的上方绘制逐日平均流量，逐日平均悬移质输沙率过程线，供连绘推移质输沙率过程线参考。

推求日平均推移质输沙率时，直接在过程线上查读。

3. 推移质输沙率与悬移质输沙率比值过程线法

当推移质输沙率不能与其他水力因素建立相关关系，但测点较多时，也可用实测推移质输沙率与实测的悬移质输沙率的比值，绘制过程线，在连此过程线时应参照悬移质输沙率过程线的趋势，推沙时，在过程线上查读比值，乘以同时的悬移质输沙率，即得推移质输沙率。

4. 单推、断推关系曲线法

对单样推移质基本输沙率与断面推移质输沙率关系比较稳定的沙质河床的测站，可绘制单推、断推关系曲线，通过点群中心定出相关线，然后利用平时观测的单推数据在相关线上查读断推数据。

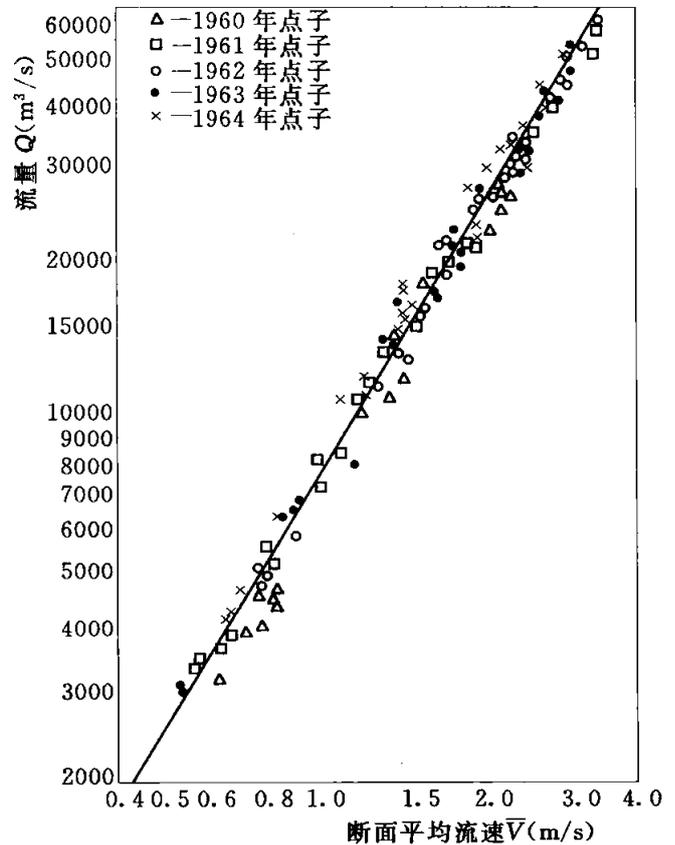


图 10-11 流量与断面平均流速关系曲线

10.3 泥沙颗粒级配数据处理

泥沙颗粒级配数据包括悬移质、推移质、河床质 3 种，数据处理方法基本相似。均需由实测颗粒级配数据，推算出月、年平均颗粒级配数据。

10.3.1 实测颗粒级配数据的分析

对原始数据进行重点检查和校核，以了解数据的正确性和合理性。以同时实测的悬移质、推移质、河床质断面平均颗粒级配曲线绘于同一图上，纵坐标为 $\lg D$ ，横坐标 P 以几率分格，检查三者相互关系。悬移质最细，曲线居于下方；河床质最粗，曲线居于

上方；推移质曲线介于两者之间。如有反常现象，须进一步检查分析其原因。

以单样颗粒级配（简称单颗）小于某粒径沙重百分数为纵坐标，相应的断面平均颗粒级配（简称断颗）小于某粒径沙重百分数为横坐标，点绘于方格纸上，以供分析。如发现关系点有系统偏离，分布散乱，或有少数突出点时，可能由下述原因造成。

关系点系统偏离，可能是单颗取样方法或取样位置不当所致。例如单样用 0.6 一点法取样，单颗可能系统偏细；用主流一线法取样，也可能有系统偏粗的现象。单颗在一段时期内系统偏粗或偏细也可能是各时期河道变化、主流摆动的影响。

关系点分布散乱，可能是单颗代表性差，或者分析操作上误差太大，沙重太小，分析精度不高等影响；还有可能是洪水来源不同和河道变化等因素的影响。应设法予以改正，属测验分析精度不高或其他自然因素影响者，应在数据处理成果中予以说明。

10.3.2 悬移质断面平均颗粒级配的推求

没有实测断颗时期的断颗数据，可视情况分别采用下述方法推求。

1. 单颗断颗关系曲线法

适用于单颗断颗关系比较稳定，关系点子密集成一狭窄带状，一般可用目估定出一条光滑曲线，通过纵坐标为零和 100% 的两点，使点子均匀分布于曲线两旁。定线时可与历年的单颗断颗关系曲线比较，必要时也可参照历年关系曲线趋势确定。

关系曲线定出后，在其两旁分别绘出允许偏差（粗粒径为 $\pm 5\%$ ，细粒径为 $\pm 10\%$ ）的两条平行线，据以计算各粒径组点子的保证率，见图 10-12。

利用单颗断颗关系曲线，以单颗各粒径沙重百分数直接在曲线上查读，得相应的断颗各粒径级的百分数。

1 日测 1 次单颗者，经换算后即作为该日平均断颗；若 1 日内

实测数次单颗者，先换算成断颗，视输沙率变化大小，采用算术平均法或输沙率加权法计算某日平均值。

推求断颗时当单颗断颗关系上端通过纵横坐标为 100% 点，可直接以单颗各粒径级百分数在关系曲线上查取相应断颗各粒径百分数；当单颗比断颗系统偏细时，先以单颗为 100% 的粒径级在关系线上查读相应粒径级的断颗百分数，按规定向上再增加一个粒径级，作为断颗 100% 的粒径级；当单颗比断颗偏粗时，只推求相应于断颗为 100% 及其以下的单颗各粒径部分，以上部分不再使用。

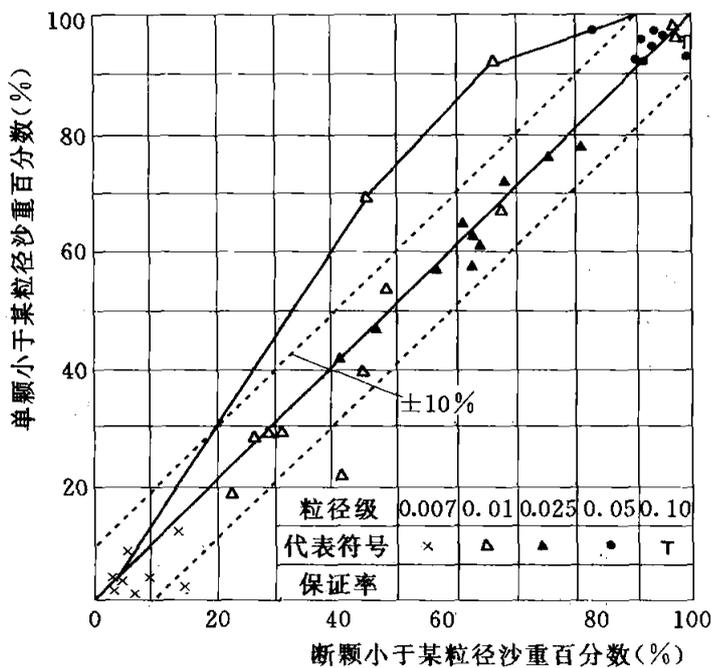


图 10-12 单断颗小于某粒径沙重百分数相关图

2. 其他方法

当单颗断颗关系散乱, 不能用关系曲线法进行数据处理时, 可用近似法。即用实测单颗代替断颗进行月、年平均颗粒级配的计算。有实测断颗数据之日, 应使用实测断颗数据, 其相应单颗不参加计算。

10.3.3 悬移质日平均、月平均、年平均颗粒级配的计算

1. 悬移质日平均颗粒级配的计算

- (1) 1日实测1次单颗或断颗者, 经推算或直接作为该日的平均颗粒级配。
- (2) 1日内实测两次以上者, 其中任一粒径级(小于某粒径)的沙重百分数最大值与最小值之差不大于20%(绝对值)者, 用算术平均法计算; 大于20%且日平均输沙率未用流量加权法计算者, 应采用输沙率加权法计算。

2. 悬移质月平均颗粒级配的计算

- (1) 1月内只有一次实测颗粒级配数据者, 即以该次作为该月平均颗粒级配。
- (2) 1月内有2次以上实测颗粒级配者, 则视该月输沙率变化情况, 采用下述方法计算。

- 1) 月内输沙率变化较小或平缓时, 用算术平均法计算为

$$P_{月} = \frac{\sum P_i}{n} \quad (10-14)$$

- 2) 月内输沙率变化较大时, 用时段输沙量(或输沙率)加权计算为

$$P_{月} = \frac{\sum (P_i Q_{s,ii})}{\sum Q_{s,ii}} \quad (10-15)$$

式中: $P_{月}$ 为月平均小于某粒径沙重百分数, %; P_i 为月内各日(或测次)断面平均小于某粒径沙重百分数, %; n 为月内颗粒分析的日(或测次)数; $Q_{s,ii}$ 为各日(或测次)代表时段的输沙量(kg或t)或各日[测次代表时段的日平均输沙率(kg/s或t/s)]之和。

各日(测次)代表时段的划分方法如下为1月内两测次间输沙率变化较小时, 以相邻两测次间中点为分界; 1月内两测次间输沙率变化较显著时, 以输沙率变化的转折点为分界。

3. 悬移质年平均颗粒级配的计算

年平均颗粒级配用输沙量(或输沙率)加权法计算。

$$P_{年} = \frac{\sum (P_{月} Q_{s,月})}{\sum Q_{s,月}} \quad (10-16)$$

式中: $P_{年}$, $P_{月}$ 分别为年、月平均小于某粒径沙重百分数, %; $Q_{s,月}$ 为月输沙量(kg或t), 或1月内各日的平均输沙率(kg/s或t/s)之和。

4. 悬移质月、年平均颗粒级配的计算

月年平均粒径是根据相应的级配曲线分组, 用沙重百分数加权法计算。

$$\bar{D} = \frac{\sum \Delta P_i D_i}{100}$$

$$D_i = \frac{D_{上} + D_{下} + \sqrt{D_{上} D_{下}}}{3} \quad (10-17)$$

式中： \bar{D} 为月或年的平均粒径，mm； ΔP_i 为月或年平均颗粒级配中某组沙重百分数，%； D_i 为某组平均粒径，mm； $D_{上}$ ， $D_{下}$ 分别为某组沙的上限或下限粒径，mm。

10.4 泥沙数据的合理性检查

10.4.1 悬移质泥沙的合理性检查

1. 悬移质泥沙数据单站合理性检查

悬移质输沙率、含沙量的单站合理性检查的内容，除检查数据处理方法是否正确合理外，着重进行以下两方面的对照检查。

(1) 数据处理成果的历年对照。当采取单样水样的位置、方法没有大的变化，推算的方法也与往年一致时，可与历年推算断沙的关系线对照检查。例如历年单沙与断沙关系曲线趋势应大致相仿，且变动范围不大，如果反常应当研究原因。当流域自然特性改变（如水土保持、垦荒、河段冲淤变化、塘坝的溃决等），可能使上述关系发生变化。

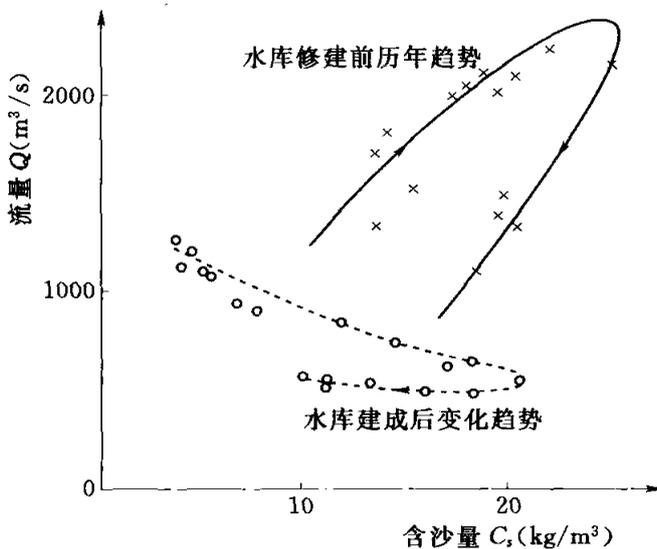


图 10-13 黄河某水库下游水文站历年流量与含沙量关系趋势的对照

例如图 10-13 是黄河某水库下游水文站历年流量与含沙量关系趋势的对照。1958 年以前水库尚未建成系天然河道，沙峰与洪峰通常在同一天出现，基本是水大沙大，水小沙小，如图 10-13 中实线表示的流量与含沙量变化趋势。1962 年水库建成以后，则曲线变化趋势改变为图 10-13 中虚线所示的形式，与建库前历年关系略呈垂直，在洪峰期间呈水大沙小、水小沙大的反常关系。因此，检查时必须结合工程的作用进行研究。由于该水文站处在水库下游，当流量增大时，坝前产生回水，泥沙淤积在库内，排沙量减小，即水大沙小。流量逐渐减小时，坝上水位逐渐降低，库

内淤积泥沙就会被冲刷，流量小含沙量反而增大，在洪峰即将落平时，出现最大含沙量，以致沙峰落后洪峰几天之久。

(2) 含沙量变化过程对照检查。可绘制逐日平均流量、含沙量、输沙率过程线对照检查。含沙量的变化与流量的变化常有一定的关系，可先从历年数据中找出这种关系的一般规律性，据以检查本年数据的合理性。如有反常现象，即应检查是人为的差错，还是由于洪水来源、暴雨特性、季节等因素影响所造成。

2. 悬移质输沙率、含沙量数据综合合理性检查

(1) 上下游含沙量、输沙率过程线对照。上下游测站的含沙量过程线之间常有一定的关系，利用这种特性，检查各站含沙量数据。检查时要注意含沙量过程线的形状、峰谷、传播时间、沙峰历时等是否合理。另外，还可参看历年各种洪水形式中含沙量的变化情况，作为验证本年变化过程的参考。

(2) 沙量平衡的对照。和水量平衡一样，在某时段内沙量平衡方程式可写为

$$V_{\text{上}} + V_{\text{区}} \pm V = V_{\text{下}} \quad (10-18)$$

式中： $V_{\text{上}}$ 为上游站来沙量； $V_{\text{下}}$ 为下游站排沙量； $V_{\text{区}}$ 为区间流域来沙量； V 为上、下游测站间河段内河床冲淤量；“+”号表示河床冲刷；“-”号表示河床淤积。

确定冲淤量通常用横断面测量法或河段地形测量法，需时较长，所以沙量平衡法适用于一年或一个汛期的对照检查。

上下游站月、年平均输沙率的对照，就是利用沙量平衡的原理来检查。这种方法可发现泥沙测验和数据处理中的系统性问题和大问题。

在短时期而含沙量相差很大的河段，冲淤量的测量数据缺少，可利用黄河水利委员会设计大队的浑水水量平衡公式作合理性检查。

$$Q_{\text{上}} - Q_{\text{下}} = \frac{1}{\gamma_s} (Q_{\text{上}} C_{s\text{上}} - Q_{\text{下}} C_{s\text{下}}) \quad (10-19)$$

式中： $Q_{\text{上}}$ ， $Q_{\text{下}}$ 分别为上游、下游断面的流量； $C_{s\text{上}}$ ， $C_{s\text{下}}$ 分别为上游、下游断面的含沙量； γ_s 为河床上新冲淤泥沙的干容重（其数值一般为 $1 \sim 1.3 \text{t/m}^3$ ）。

例如无定河上游汨城水库 1965 年 8 月 3~4 日洪水，入库断面宋大湾站平均流量 $\bar{Q}_{\text{上}} = 1.21 \text{m}^3/\text{s}$ ，平均含沙量 $\bar{C}_{s\text{上}} = 926 \text{kg/m}^3$ 。经库首淤积，在库区断面房滩站平均流量 $\bar{Q}_{\text{下}} = 0.26 \text{m}^3/\text{s}$ ，平均含沙量 $\bar{C}_{s\text{下}} = 47 \text{kg/m}^3$ ，据分析淤积体的干容重 $\gamma_s = 1.17 \text{t/m}^3$ 。将以上数据代入上式，左右两端基本相等，公式右边表示上下游测站间河床的淤积量。

10.4.2 泥沙颗粒级配数据的合理性检查

1. 历年悬移质颗粒级配曲线对照

以本年和历年的年平均颗粒级配曲线进行对照，一般是曲线形状大致相似，且密集成一狭窄带状分布。如发现本年曲线形状特殊，或某时段前后曲线偏离成另一系统，应深入分析，找出变化原因。例如：受自然因素变化影响，如特大洪水、特别枯水、洪水来源不同等；受人类活动影响，如流域内垦荒、水土保持、水利工程施工、河道疏浚、水库拦洪、灌溉引水等；受各时期测验、颗粒分析、水样处理的方法不同的影响等。

例如我国某些站颗分曲线的历年对照，发现 1960 年以后粗颗粒增加，细颗粒减少，有人认为河流泥沙粗化了。经检查，我国颗分方法在 1960 年以前用底漏管法与比重计法，1960 年改用粒径计法。最近几年经过大量比较试验说明：底漏管法、比重计法、移液管法分析成果是接近的，无系统偏离；而粒径计法颗分成果，粒径小于 0.1mm 的泥沙系统偏粗，如图 10-14 所示。所以 1960 年前后颗分曲线的改变是

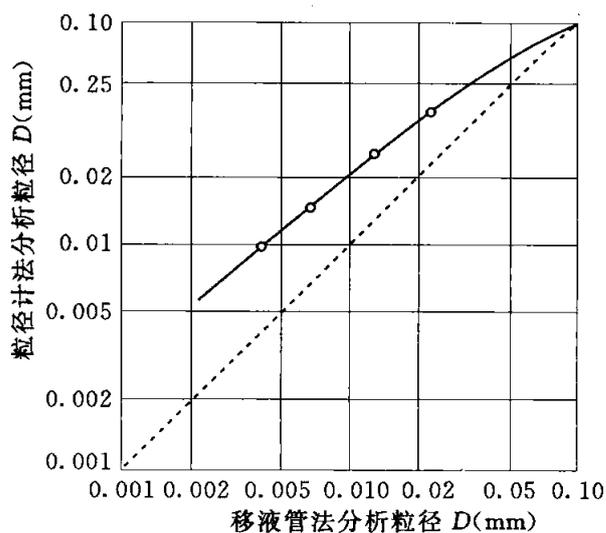


图 10-14 粒径计法、移液管法分析粒径相关

分析方法改变的原因，不是河流泥沙粗化了。

2. 悬移质颗粒级配随时间变化与流量、含沙量过程线对照

用年历格纸绘制各有关因素综合过程线。在图的上部绘出逐日平均流量、含沙量（或输沙率）过程线；图的下部绘出各次实验断颗各粒径的小于某粒径沙重百分数过程线。分析各种过程线之间的相应关系和变化规律，借以发现数据有无问题。

一般情况下：各粒径百分数沿时间变化是渐变的。在某些多沙河流上，往往是洪水期粗颗粒泥沙比重减少，细颗粒泥沙比重增加，枯水期则相反。由于各流域自然地理、气候情况不同，这一规律不一定在各河流都相同，应根据历年数据找出本站泥沙级配变化规律，进行检查。

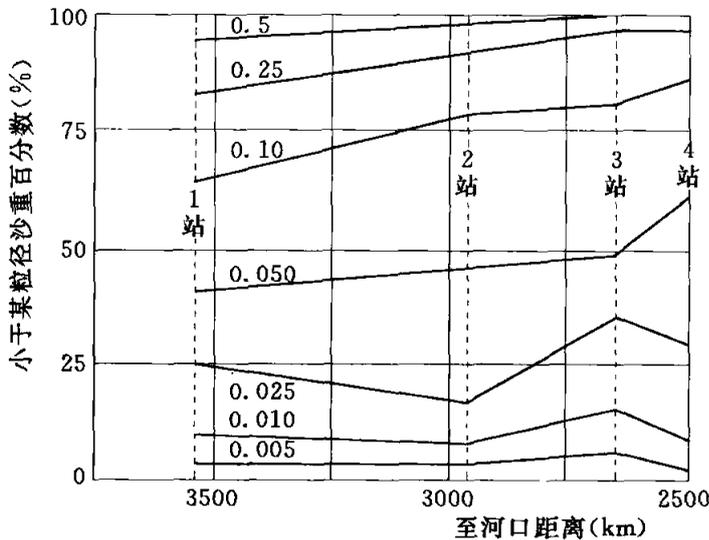


图 10-15 小于某粒径的沙重百分数沿河长演变

进行上游对照

3. 悬移质颗粒级配数据的上下游对照

绘制悬沙小于某粒径的沙重百分数沿河长演变图（图 10-15），据以分析颗粒沿程分布是否合理。流域内土壤地质等自然地理条件基本相同，而河段内又没有严重冲淤时，一般是悬移颗粒沿程变细，即较细的泥沙沿程相对增多，较粗泥沙沿程相对减少。如有反常情况，应分析其原因。

例如：河流经过不同的土壤地质地带，某河段有严重的冲淤现象，支流的汇入，流域内局部地区暴雨的影响等，都可能出现反常现象。

复 习 题

10-1 实测悬移质泥沙数据分析的方法有哪些？

10-2 悬移质泥沙单沙、断沙关系如何定线？造成单沙、断沙关系点子偏离的原因有哪些？

10-3 单沙、断沙比例系数法及流量输沙率关系曲线法适用条件如何？

10-4 为什么要进行单沙过程的插补？插补方法有哪些？

10-5 日平均输沙率、日平均含沙量的推算方法有哪些？

10-6 推移质输沙率推算方法有哪些？

10-7 悬移质泥沙颗粒级配的推求方法有哪些？

10-8 怎样进行悬移质泥沙含沙量、输沙率、颗粒分析的合理性检查？

第 11 章

误差

地形测量属于静态观测， $P=f(x, y, z)$ ，这类误差的研究在 20 世纪已取得显著的成绩，如测量平差理论等。

水文观测属动态观测， $P=f(x, y, z, t)$ ，被观测对象如水位、流量、含沙量等都是随时间而变的，因而难以在相同条件下进行多次观测，所以这类误差的研究开始较迟。随着水力水工试验日渐发展，用体积法测流与其他方法测流对比，才能较准确地确定小流量的误差，为流量误差研究提供了途径。

在天然河流中一般用几种方法同步比测来评估精度低的方法的误差。但是次数不多的比测往往难以得出比较中肯的结论，有时会得出相互矛盾的结果，因此以数理统计为基础的水文测验误差的研究被日益重视。

我国是国际标准化组织的成员国。在该组织制定的国际标准和编拟的技术报告中，误差理论是“标准”和“报告”的重要理论基础。在水信息采集与处理范畴，没有经过误差评定的观测数据或计算结果是没有任何意义的。

11.1 误差的有关基本概念

测量误差有计量器具和设备误差、环境条件误差、测量方法误差、人员误差和被测量对象误差 5 种。

11.1.1 绝对误差与相对误差

观测值与真值之差称为绝对误差。用公式表示为

$$\Delta_i = A_i - A \quad (11-1)$$

真值 A 往往无法得到，因此往往用多次观测的平均值 \bar{A} 代替真值来计算误差。其绝对误差的计算公式为

$$\Delta_i = A_i - \bar{A} \quad (11-2)$$

绝对误差的量纲与观测值的量纲相同。在水文观测值中，有些水文要素的误差必须用绝对误差，例如水位；有些水文要素的误差则可用绝对误差也可用相对误差，例

如流量等。

相对误差为绝对误差与真值之比值。在实际应用中，一般真值用均值代替。其公式为

$$\delta_i = \frac{\Delta_i}{A} \quad (11-3)$$

相对误差是一无量纲的量，一般用百分率表示。

在水文测验中，用相对误差来表示的水文要素很多，例如：流量、流速、面积等。

11.1.2 随机误差、系统误差和伪误差

1. 随机误差

随机误差是观测者无法控制的各种因素共同影响的，其大小和符号都不固定的误差。因此，随机误差是不可避免的误差。

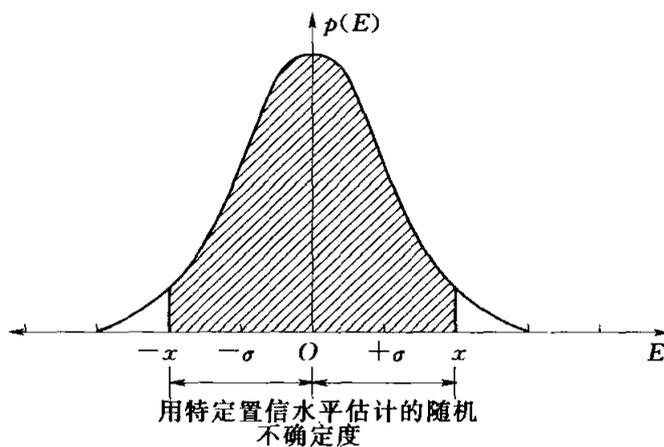


图 11-1 随机误差分布曲线

从表面上看，随机误差并没有任何规律，但从大量资料的误差统计中，却能发现一定的规律性。随机误差的分布一般为正态分布，其误差分布曲线如图 11-1 所示，其密度函数的表达式为

$$p(E) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(E-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (11-4)$$

式中： $p(E)$ 为误差 E 的概率密度函数； σ 为标准差； μ 为数学期望值。

随机误差有如下重要特征。

- (1) 随机误差的独立性。各次误差正、负和大、小彼此无关，完全独立。
- (2) 随机误差的对称性。即随机误差中正、负误差出现的概率相等。
- (3) 随机误差的单峰性。根据误差概率分布密度函数，当 $E=0$ 时， $P(E) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$ 为最大值，即 $P(\pm E) < P(0)$ ，随机误差的分布是单峰的。

(4) 随机误差的抵偿性。当观测的次数很多时，由于正、负误差相互抵消，因此，正、负误差的代数和有趋于零的趋势。这时可认为数学期望值即均值为零。

(5) 随机误差的有界性。虽然函数 $p(E)$ 的存在区间是 $[-\infty, +\infty]$ ，但实际上，随机误差只是出现在一个有限区间内，这一区间一般认为是 $[-3\sigma, +3\sigma]$ ，这就是随机误差的有限性， $\pm 3\sigma$ 则称为随机误差的极限误差。

2. 系统误差

在相同条件下，同一项目进行多次观测，不管其误差数值是否相等，如果各次误差的符号相同，且不能用增加测次来减小的误差称为系统误差。

系统误差有两类，一类是常系统误差；另一类是变系统误差。

常系统误差是各次测量中都共同存在并数值相等的误差。这类误差的分布一般为

均匀分布。例如水尺零点高程不准引起水位的误差等。

变系统误差是在各次测量中，有相同符号但数值不等的误差。例如：流向不垂直于断面而不进行流向改正时流量计算的误差；流速仪使用时间较长，摩阻增大而又未及时检定引起的测速误差等。

3. 伪误差

因人为因素及仪器失灵而又未及时发现引起的“误差”。这类“误差”其实应为错误，一旦发现应及时改正或舍弃。

11.1.3 精度

精度的高低是用误差来衡量的，误差大则精度低，误差小则精度高。精度可以按系统误差和随机误差相应地分为准确度和精密度。准确度是由系统误差引起的测量值与真值的偏离程度，系统误差越小，测量结果越准确。精密度是由随机误差引起的测得值与真值的偏离程度，随机误差越小，测量结果越精密。精确度（精度）是由系统误差和随机误差共同引起的测量值与真值的偏离程度。综合误差越小，测量结果的精度越高。因此，测量值的精度大小应用系统误差和随机误差两方面数值来体现或用其两方面的综合误差来衡量。

关于精度还有两个重要概念，即测量的重复性和复现性。重复性是同一观测者用同一测量方法和测量仪器，在同一测量条件下，用很短时间对同一量作连续测量时，其测量结果的接近程度。测量的复现性是不同测量条件下用较长时间对同一量作多次测量时，其测量结果的接近程度。对于某一量的测量，若其重复性和复现性都很好，则测量精度高，测量结果准确可靠。

11.1.4 标准差

在正态分布密度函数的公式中，标准差是一个很重要的参数。

对于绝对误差，样本的标准误差计算公式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (11-5)$$

当测次 n 少于 30 时，贝塞尔推导的计算公式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \quad (11-6)$$

从公式可以看出，标准差 S 的量纲和观测值相同。

相对标准差为绝对标准差与真值（一般以均值代替）的比值。

$$m_x = \frac{S}{x} \quad (11-7)$$

在统计学中相对标准差又称变差系数或离差系数。相对标准差是一无量纲的量，一般以百分率表示。

当测次 n 很大时，其样本标准差 S 接近于总体标准差 σ 。 σ 的大小取决于具体的测量条件，表征着结果的离散程度。图 11-2 反映了 3 种 σ 正态分布曲线的情况。从

图 11-2 中可知, σ 值越小则分布曲线越尖瘦, 这意味着小误差出现的概率越大, 大误差出现的概率越小, 因此可以用参数 σ 来表示测量的精密度。 σ 愈小, 表明测量的精密度愈高。

11.1.5 不确定度与置信水平

由于测量值的真值不知, 因此测量值的误差也是无法知道的。然而我们可以应用数理统计和概率论的方法估计误差值的上界。既然是估计值, 那就有一个置信概率的问题。

也就是说误差不超过这个上界有多大的可能性? 例如, 进行流速仪流量测验, 若有人问及测验精度, 可以这样说: “有 75% 的把握误差不会超过 $\pm 5\%$ 。” 这样虽然没有肯定地回答所进行的流速仪测量的测验误差到底有多少, 但这种回答已经非常明确地表达了流量测验的精度情况。因此, 一般对于测量值精度的情况的描述应有两层意思: ① 误差的范围或误差的上界; ② 不超过这一范围的置信概率。

不确定度是指在一定置信概率下, 测量值可能出现的误差上界值 X , 被测量的真值能以规定概率落入其 (测量值 $\pm X$) 所包围的区间之内。此规定的概率称为置信水平。随机不确定度如图 11-1 所示, 可用 $\pm c\sigma$ 表示 (c 为置信系数, σ 为标准差)。其置信水平, 亦如图 11-1 所示, 为 $\pm c\sigma$ 范围内随机误差分布曲线下的阴影面积, 即

$$P(\Delta) = \int_{-c\sigma}^{c\sigma} p(\Delta) d\Delta \quad (11-8)$$

根据正态分布函数积分可知, 对于随机误差 x , 不同的随机不确定度其置信水平为

$$P\{|x| \leq 0.67\sigma\} = 0.50$$

$$P\{|x| \leq \sigma\} = 0.68$$

$$P\{|x| \leq 1.15\sigma\} = 0.75$$

$$P\{|x| \leq 2\sigma\} = 0.95$$

$$P\{|x| \leq 3\sigma\} = 0.997$$

因此, 当置信水平为 68% 时, 不确定度为 $\pm\sigma$; 当置信水平为 75% 时, 不确定度为 $\pm 1.15\sigma$; 当置信水平为 95% 时, 不确定度为 $\pm 2\sigma$ 。

在国际标准中, 随机不确定的置信水平取用 95%。我国编制的水位、流量测验国家标准将采用国际标准的取用值。

11.2 误差的传播与综合

11.2.1 随机误差的传播

水文测验中, 有些测量值是通过测定某些因素间接计算出来的。如一次流量测验其成果是通过测定各垂线水深、起点距及各测点流速后间接计算出来的。输沙率亦是通

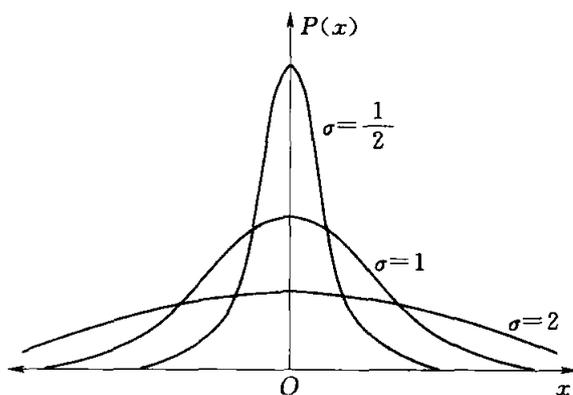


图 11-2 标准差与误差分布

流量和含沙量间接计算出来的。说明各直接观测值的随机误差与间接计算成果的随机误差之间的关系称为随机误差的传播。

设有函数 $Q=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, 其中, x_1, x_2, \dots, x_k 为独立的直接观测值, Q 为间接计算值。 x_1, x_2, \dots, x_k 的误差分别为 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_k$; Q 的误差为 ΔQ , 则

$$Q+\Delta Q=f(x_1+\Delta_1, x_2+\Delta_2, \dots, x_k+\Delta_k) \quad (11-9)$$

当 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_k$ 数值很小时, 将式 (11-9) 用泰勒公式展开, 并仅取其中一次项为

$$Q+\Delta Q=f(x_1, x_2, \dots, x_k)+\frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta_1+\frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta_2+\dots+\frac{\partial f}{\partial x_k}\Delta_k$$

$$\text{即} \quad \Delta Q=\frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta_1+\frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta_2+\dots+\frac{\partial f}{\partial x_k}\Delta_k \quad (11-10)$$

$$\text{令} \quad \frac{\partial f}{\partial x_1}=a_1, \frac{\partial f}{\partial x_2}=a_2, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_k}=a_k$$

a_1, a_2, \dots, a_k 称为灵敏度, 它们反映了 x_1, x_2, \dots, x_k 的误差对 Q 误差贡献大小的权重。式 (11-10) 的形式为

$$\Delta Q=a_1\Delta_1+a_2\Delta_2+\dots+a_k\Delta_k \quad (11-11)$$

其相对误差的公式为

$$\frac{\Delta Q}{Q}=\frac{a_1}{Q}\Delta_1+\frac{a_2}{Q}\Delta_2+\dots+\frac{a_k}{Q}\Delta_k \quad (11-12)$$

以上误差的传播公式为某一具体误差的传播计算。例如用此公式, 通过最大误差来估算上下浮标断面间距等。但是对于测验误差的估计最常用到的还是误差的统计特征值, 是不确定度的传播公式, 为此首先来计算 Q 的标准差。

对于一次观测值为

$$\begin{aligned} (\Delta Q)^2 &= (a_1\Delta_1)^2 + (a_2\Delta_2)^2 + \dots + (a_k\Delta_k)^2 + 2a_1a_2\Delta_1\Delta_2 \\ &\quad + 2a_1a_3\Delta_1\Delta_3 + \dots + 2a_{k-1}\Delta_k \end{aligned}$$

对于 N 次观测资料可以统计出标准误差, 表达式为

$$\begin{aligned} \sigma_Q^2 &= \sum_{i=1}^K (a_i\sigma_i)^2 + \left[2a_1a_2 \sum_{i=1}^N \Delta_{1,i}\Delta_{2,i} + 2a_1a_3 \sum_{i=1}^N \Delta_{1,i}\Delta_{3,i} \right. \\ &\quad \left. + \dots + 2a_{k-1}a_k \sum_{i=1}^N \Delta_{k-1,i}\Delta_{k,i} \right] / N \quad (11-13) \\ &= \sum_{i=1}^K (a_i\sigma_i)^2 + 2a_1a_2\rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2 + 2a_1a_3\rho_{1,3}\sigma_1\sigma_3 \\ &\quad + \dots + 2a_{k-1}a_k\rho_{k-1,k}\sigma_{k-1}\sigma_k \end{aligned}$$

式中: 协方差 $\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta_{1,j}\Delta_{2,j} = \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2$; $\rho_{1,2}, \dots, \rho_{k-1,k}$ 分别为两组数列间的相关系数; $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$ 分别为直接测量值 x_1, x_2, \dots, x_k 的标准差。

把式(11-13)整理为

$$\sigma_Q^2 = \sum_{i=1}^K (a_i\sigma_i)^2 + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K 2a_i a_j \rho_{i,j} \sigma_i \sigma_j \quad (11-14)$$

如各因素测量误差之间基本上是独立的, 则可略去带有协方差的各项, 即认为 $\rho_{ij}=0$, 式 (11-14) 为

$$\sigma_Q^2 = \sum_{i=1}^K (a_i \sigma_i)^2 \quad (11-15)$$

很显然, 式 (11-15) 是在略去各测量值误差的高阶项和认为各因素测量误差相互无关的情况下推导出来的。在误差值较小, 各因素误差关系不大的情况下, 用式 (11-15) 计算, 对结果不会发生明显影响。

相对均方误差的传播公式为

$$m_Q^2 = \frac{1}{Q^2} \sum_{i=1}^K (a_i m_i x_i)^2 \quad (11-16)$$

其中

$$m_Q = \frac{\sigma_Q}{Q}$$

$$m_i = \frac{\sigma_i}{x_i}$$

为了便于上述公式的应用, 现将水文测验中经常出现的运算形式简介如下。

(1) 积的误差公式。以 $Q=bhv$ 为例。 $a_1 = \frac{\partial Q}{\partial b} = hv$; $a_2 = \frac{\partial Q}{\partial h} = bv$; $a_3 = \frac{\partial Q}{\partial v} = bh$,

代入式 (11-15) 为

$$\sigma_Q^2 = (hv\sigma_b)^2 + (bv\sigma_h)^2 + (bh\sigma_v)^2$$

代入式 (11-16) 相对均方误差的公式为

$$m_Q = \sqrt{m_b^2 + m_h^2 + m_v^2} \quad (11-17)$$

(2) 和的误差公式。由各部分流量计算整个断面流量的公式是和的运算, 其公式为

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

由于 $\frac{\partial Q}{\partial q_1} = 1$, $\frac{\partial Q}{\partial q_2} = 1$, ..., $\frac{\partial Q}{\partial q_n} = 1$ 所以

$$\sigma_\sigma^2 = \sigma_{q_1}^2 + \sigma_{q_2}^2 + \dots + \sigma_{q_n}^2 \quad (11-18)$$

$$m_\sigma^2 = \frac{1}{Q^2} \sum_{i=1}^n (m_i q_i)^2 \quad (11-19)$$

若各部分流量及其误差皆大致相等, 即

$$m_1 = m_2 = \dots = m_n = m_q$$

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n = \bar{q} = Q/n$$

则

$$m_\sigma^2 = \frac{1}{Q^2} n (m_q \bar{q})^2 = \frac{1}{n} m_q^2$$

$$m_Q = \frac{m_q}{\sqrt{n}} \quad (11-20)$$

若各部分流量不等, 应引入不等权系数 α , 则

$$m_Q = \frac{m_q}{\sqrt{\alpha n}} \quad (11-21)$$

不等权系数 α 的取值范围为

$$\frac{\bar{q}}{q_{\max}} < \alpha < 1.0$$

11.2.2 误差的综合

从单项误差求得总误差的过程称为误差的综合。有明确函数关系的误差的传播是一种误差的综合问题；不同种类、不同类型的误差亦有误差的综合问题。例如系统误差与随机误差的综合；脉动引起的流速的误差和仪器引起的流速误差的综合问题等。

1. 随机误差的综合

有一定函数关系各单项随机误差的综合，其公式即为误差的传播公式。若各单项误差相互独立，其公式为

$$\sigma_Q^2 = \sum_{i=1}^K (a_i \sigma_i)^2$$

$$m_Q^2 = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^K (a_i \sigma_i)^2 = \frac{1}{Q^2} \sum_{i=1}^K (a_i m_i x_i)^2$$

对于无一定函数关系，各单项随机相对误差的综合，一般用公式，即

$$m_Q^2 = m_{x_1}^2 + m_{x_2}^2 + \cdots + m_{x_K}^2 \quad (11-22)$$

进行综合。例如垂线平均流速的误差一般认为由于仪器、脉动、垂线平均流速计算方法等因素引起，因此垂线平均流速的误差的综合公式为

$$m_v^2 = m_{\text{仪}}^2 + m_{\text{脉}}^2 + m_{\text{垂计}}^2 \quad (11-23)$$

2. 系统误差的综合

对于较大的系统的误差，且符号已知，其系统误差的综合一般用代数和公式，即

$$X_Q'' = X_1'' + X_2'' + \cdots + X_K'' \quad (11-24)$$

若系统误差的符号不知，且数值很小，其综合公式可用方和根公式，即

$$X_Q''^2 = X_1''^2 + X_2''^2 + \cdots + X_K''^2 \quad (11-25)$$

3. 系统误差与随机误差的综合

当测量误差受随机误差与系统误差共同影响时，若要确定结果的误差，就需要对两类不同性质的误差进行综合。

设有一系列测量值，其随机相对误差为 $\delta_1, \delta_2, \cdots, \delta_n$ ，系统相对误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \cdots, \epsilon_n$ ，则各次测量结果的相对误差为

$$e_1 = \delta_1 + \epsilon_1$$

$$e_2 = \delta_2 + \epsilon_2$$

$$\vdots$$

$$e_n = \delta_n + \epsilon_n$$

将以上各式两端平方后相加为

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 + \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \delta_i \epsilon_i$$

其均方差 m_e 为

$$m_e = \sqrt{m_\delta^2 + m_\epsilon^2 + \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \epsilon_i} \quad (11-26)$$

由于 δ_i 为随机误差, 有正有负, 因此 $\delta_i \epsilon_i$ 亦有随机性。当 n 很大时, 可以认为协方差项, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \epsilon_i}{n} \rightarrow 0$$

则式 (11-26) 可写为相对标准差的简化综合公式, 即

$$m_e^2 = m_s^2 + m_i^2 \quad (11-27)$$

当测次不多时, δ_i 正、负次数相差较大, 则协方差项不能忽略。

对于一定置信水平的不确定度的综合, 由于不确定度 $X = c\sigma$ (或 cm), 因此, 把上面所有标准差改写成不确定度 X 即可。例如, 可用式 (11-28) 来综合随机不确定度和系统不确定度:

$$X^2 = X'^2 + X''^2 \quad (11-28)$$

式中: X 为总的确定度; X' 为随机不确定度; X'' 为系统不确定度。

11.3 流速面积法测流的误差估算

11.3.1 流速面积法测流的误差估算公式

从流量模型的概念出发, 流量计算的精确公式为

$$Q = \iint v(B, h) dB dh$$

由部分流量有限差累加得的断面流量计算的近似值即

$$Q_n = \sum_{i=1}^n q_i$$

按中间分割法计算部分流量 $q = bhv$, 则 n 为垂线数目。

按赫尔西的推导, 令 $Q = F_n Q_n$, F_n 称为流量改正因素。由积的随机误差传播公式得流量的标准差为

$$m_Q^2 = m_{F_n}^2 + m_{Q_n}^2 \quad (11-29)$$

由和的随机误差传播公式, 即

$$m_{Q_n}^2 = \frac{1}{Q_n^2} \sum_{i=1}^n m_{q_i}^2 q_i^2 = \frac{1}{Q_n^2} \sum_{i=1}^n (m_b^2 + m_h^2 + m_v^2) q_i^2$$

若各部分起点距、水深、流速的测量精度相同, 且各部分流量大体相等, 则

$$m_{Q_n}^2 = \frac{nq^2}{Q_n^2} (m_b^2 + m_h^2 + m_v^2) = \frac{1}{n} (m_b^2 + m_h^2 + m_v^2)$$

式 (11-29) 可改写为

$$m_Q^2 = m_{F_n}^2 + \frac{1}{n} (m_b^2 + m_h^2 + m_v^2) \quad (11-30)$$

流速的误差 m_v 可认为由脉动、仪器及垂线平均流速计算几个方面误差的综合, 即

$$m_v^2 = m_{脉动}^2 + m_{仪器}^2 + m_{垂均}^2$$

代入式 (11-30), 即

$$m_Q^2 = m_{F_n}^2 + \frac{1}{n} (m_b^2 + m_h^2 + m_{脉动}^2 + m_{仪器}^2 + m_{垂均}^2) \quad (11-31)$$

在国际标准中，一般置信水平取 95%，随机不确定度公式形式为

$$X'_Q = X'_{F_n} + \frac{1}{n} (X'_b + X'_h + X'_{脉动} + X'_{仪器} + X'_{垂均}) \quad (11-32)$$

系统误差的估算应分情况处理。若系统误差较大，且符号已知，应分项按一次方公式修正，然后再进行随机误差不确定度的计算。

其流量系统不确定度的综合公式为

$$X''_Q = X''_b + X''_h + X''_v \quad (11-33)$$

若系统误差的符号不知，且系统误差的数值较小，其流量系统不确定度可用下面公式进行综合，即

$$X''^2_Q = X''^2_b + X''^2_h + X''^2_v \quad (11-34)$$

流量随机不确定度与系统不确定度的综合公式为

$$X^2_Q = X'^2_Q + X''^2_Q \quad (11-35)$$

11.3.2 流速面积法各单项随机误差的估算

(1) X'_b ：测距的随机不确定度。其大小与测距仪器的精度有关，与所测距离的长短有关，与测距时所用基线的长度与精度有关。一般此数值不大，在赫尔西著《水文测验学》中估计置信水平 95% 的 X'_b 在 $\pm (0.1\% \sim 0.5\%)$ 。

(2) X'_h ：测深的不确定度。其大小与水深有关，与所用的测量工具有关。其置信水平 95% 的 X'_h 的大小一般在 $\pm (1\% \sim 3\%)$ (引自赫尔西《水文测验学》)。

(3) $X'_{脉动}$ ：流速脉动引起的垂线平均流速不确定度。 $X'_{脉动}$ 主要取决于测速历时，式 (11-32) 中的 $X'_{脉动}$ 是脉动对垂线平均流速误差的影响，因此 $X'_{脉动}$ 的大小与垂线平均流速的计算公式有关。 $X'_{脉动}$ 还与流速的大小、水深、河流断面形状与河床组成有关。表 11-1 为国际标准化组织介绍的置信水平 95% 流速脉动影响的测点流速不确定度。对于 $X'_{脉动}$ 应该根据垂线平均流速的计算公式从测点计算到垂线上来。

表 11-1

脉动影响下的测点流速不确定度

单位：%

不 确 定 度	项 目	测速垂线上的测速点位置							
		0.2、0.4 或 0.6 相对水深				0.8 或 0.9 相对水深			
		一点法测速历时							
		(min)							
流 速	0.5	1	2	3	0.5	1	2	3	
0.05	50	40	30	22	80	60	50	40	
0.10	27	22	16	13	33	27	20	17	
0.15	19	16	12	9	22	20	14	12	
0.20	15	12	9	7	17	14	10	8	
0.25	12	9	7	6	13	10	7	6	
0.30	10	7	6	5	10	7	6	5	

续表

不 确 定 度	项 目	测速垂线上的测速点位置							
		0.2、0.4 或 0.6 相对水深				0.8 或 0.9 相对水深			
		一点法测速历时 (min)							
		0.5	1	2	3	0.5	1	2	3
流 速									
0.40	8	6	6	5	8	6	6	5	
0.50	8	6	6	4	8	6	6	4	
0.5~1.0	7	6	6	4	7	6	6	4	
>1.0	7	6	5	4	7	6	5	4	

(4) $X'_{\text{仪器}}$: 流速仪检定的不确定度是通过在检定槽中率定检定曲线(公式)来确定的。其大小与流速大小有关,与仪器的精密程度有关。我国的流速仪检定时一般可达到置信水平 95% 的不确定度为 3.0%; 国际标准所列置信水平 95% 的不确定度见表 11-2 所示。

表 11-2 不 确 定 度 $X'_{\text{仪器}}$

流 速 (m/s)	0.03	0.10	0.15	≥ 0.5
$X'_{\text{仪器}}$	20	5	2.5	1.5

(5) $X'_{\text{垂均}}$: 垂线平均流速的不确定度。其大小与所用的垂线流速的计算方法有关。 $X'_{\text{垂均}}$ 的确定可以用多点法资料统计求得,亦可用实际资料配出一定流速分布曲线积分求得垂线平均流速作为真值来统计各计算垂线平均流速方法的不确定度。国际标准中通过大量资料统计出置信水平 95% 的各垂线平均流速计算方法的不确定度如表 11-3 所示。

表 11-3 垂线平均流速计算的不确定度 $X'_{\text{垂均}}$

测 速 方 法	流 速 分 布 法	五 点 法	二 点 法	一 点 法
$X'_{\text{垂均}}$	1	5	7	15

(6) X'_{F_n} : 测速垂线数 n 引起流量改正因素的随机不确定度。从公式结构形式判别,以上各不确定度都要除以测速垂线数 n , 而 X'_{F_n} 是没有除以 n 的项, 因此它是流量随机不确定度中最重要的组成项。

X'_{F_n} 的确定是用多测速垂线的资料推求的。计算时以多垂线测速资料算得的流量为真值, 同时计算用 n 根垂线计算的流量 Q'_i , 并计算与 Q_i 的相对误差: $\delta_i = \frac{Q_i - Q'_i}{Q_i}$; 若有 K 次资料则会计算出 K 个相对误差。

首先要检查是否有较大的系统误差。一般认为,误差的算术平均值就是其常系统误差。亦可统计累积频率 50% 的误差作为常系统误差。若系统误差较大,则从 m 个 δ_i 中减去常系统误差,则认为此时的误差 δ' 为排除了系统误差的随机误差,见图 11-3。这样就可计算出流量随机误差的相对标准差 m_Q 。若置信水平为 95%,其不确定度 $X'_Q=2m_Q$ 。

在国际标准中 (ISO748) 介绍的 X'_{F_n} 数值见表 11-4。

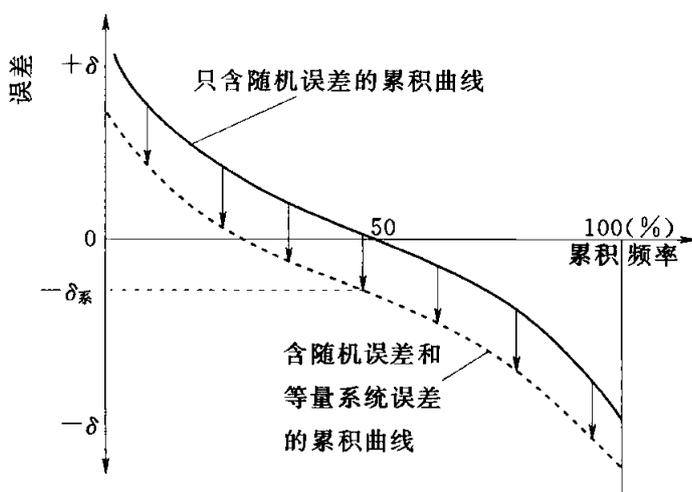


图 11-3 累积频率曲线法推求系统误差

表 11-4

不确定度 X'_{F_n}

垂线数 N	5	10	15	20	25	30	40	45
X'_{F_n} (%)	20	10	7	5	5	3	3	3

我国自 1978 年以来,长江委水文局,四川、湖南、广西、黑龙江等省水文局,在大、中、小各类河流的水文站上做了大量的长历时 (1000~2000s) 的脉动实验,以及有限测点数和有限垂线数对流量误差影响的实验,长江委还在室内模型中做了实验。根据这些,结合我国河流实际的试验资料进行综合,所得的各单项不确定指标,将列入我国流量测验的国家标准,它与国际标准化组织的不确定度指标有所差异。

11.4 流速仪测流方法的精简分析

流速仪测流方法的精简分析有:流速仪测流常测法分析、简测法分析、流量间测分析。

精简分析是用流速仪进行了一定时期的水文测验后,在保证测验成果有一定精度的前提下,为减少测流的工作量,缩短测验历时而进行的分析工作。通过精简分析,制定各种比较合理的测流方案,以适应不同水情时测流工作的需要。

精简分析工作内容和程序一般包括以下几项。

- (1) 搜集足够多次的、有代表性的、精度高的实测流量资料,作为分析基础。
- (2) 根据需要,绘制有关图表,进行分析,初步拟定精简方案。
- (3) 根据初定的精简方案,计算各方案精简前后相对误差,统计一定置信水平下的随机不确定度和系统不确定度,与水文测验相关规范所定指标比较,从而检验方案成立与否,并比较方案的优劣。

11.4.1 有精测法流量资料时,常测法的精简分析

新设的测站,在最初一两年里,用流速仪作多线多点的精测法测流 30 测次以上,

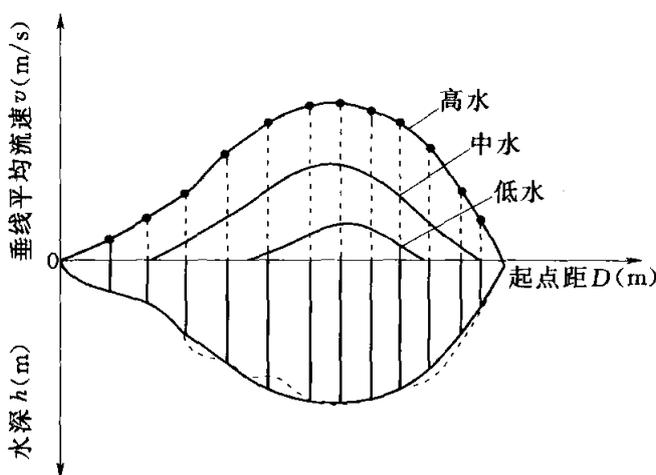


图 11-4 垂线平均流速横向分布曲线及综合断面

且分布于不同水位。便可做精简测速、测点的分析。

在制定常测法方案时，首先要选择典型的中、高、低水位级垂线平均流速横向分布图进行分析，如图 11-4 所示。若高、中、低水位级的垂线平均流速横向分布曲线大致相似，可考虑通用的精简方案。若高、中、低水位流速分布相差甚大，则可以考虑不同的精简方案。如测悬移质输沙率的站，最好同时绘出垂线平均含沙量的横向分布曲线，以便同时考虑泥沙测验垂线的精简。

精简分析中，垂线的精简是重要内容。抽减垂线时根据垂线平均流速的横向分布进行。根据垂线流速横向分布变化趋势，抽减流速变化缓慢的测速垂线，保留横向分布曲线的转折点垂线，并在测速垂线上抽减流速测点。

在选定了精简方案后应分别计算精简垂线测点后的断面流量及其以精测法流量为假定真值的相对误差。

点绘所有精简分析测次的水位与流量误差关系图，分析流量误差沿水位级的变化情况，据以判断精简方案在高、中、低水位时的适用范围。统计置信水平 75% 和 95% 的随机不确定度和系统不确定度，与水文测验规范的规定进行比较，以确定精简方案是否可以启用。

如果精简后的流量误差在一部分水位级（在高水位或低水位时）超过规定的限度，而其余部分是合格的，则在不超过规定误差的水位变幅内，可采用原确定的垂线，测点精简方案，超过规定误差的部分水位级，应重新选择合适的精简方案。

如同时考虑缩短测速历时，即用较少的垂线，测点同时用较短的测速历时，能达到上列精度要求者，常测法的测速历时可以缩短，但一点的测速历时不宜少于 50s。

11.4.2 无精测法测流资料时，常测法的精简分析

各级水位的精测法资料有时是很难全部收集到的，生产上的需要往往不是在全部分收集好足够多的精测法资料才进行分析。在相当数量的多垂线和多测点的测速资料后，分别求出一定频率的单项误差，用误差传播公式计算流量的综合误差，只要其误差符合流量测验规范的规定即可。

从流速面积法流量随机误差公式中得到

$$m_Q^2 = m_{F_n}^2 + \frac{1}{\alpha n} (m_b^2 + m_h^2 + m_{脉动}^2 + m_{仪器}^2 + m_{垂均}^2) \quad (11-36)$$

精测法与常测法比较，主要是 m_{F_n} 和 $m_{垂均}$ 两项误差较大，因此我们可以用多线少点法的资料计算仅由精简垂线而引起的流量误差 m_x 来近似代替 m_{F_n} ，由垂线多点法资料计算精简测点后垂线平均流速的误差 m_d ，这样流量误差的计算公式可简化为

$$m_Q^2 = m_x^2 + \frac{1}{\alpha n} m_d^2 \quad (11-37)$$

式中： m_Q 为流量的综合随机误差； m_x 为用多线少点资料精简垂线后的流量误差； m_d 为用垂线多点法资料简测点后垂线平均流速的误差； n 为各多线资料中测速垂线数的平均值； α 为各部分流量不等的权重系数。

以上误差皆为一定累积频率的误差统计值，即一定置信水平不确定度。因此，在搜集资料时要搜集不同水位按精测法测速垂线数目多线少点法测流，累计不少于 30 次的流量资料；还要搜集 30 次以上各级水位多点法施测垂线流速的资料。

综合系统误差按下式计算为

$$X''_Q = X''_p + X''_x \quad (11-38)$$

式中： X''_Q 为断面流量综合系统误差； X''_x 为精简垂线使流量产生的系统误差； X''_p 为精简测速点使流量产生的系统误差。

以上常测法的精简分析，都依精测法为依据。事实上精测法亦含有误差，此误差称为基准资料误差 $m_{基}$ ，只有更精密的测流方法才能对比确定。所以常测流流量的最近似误差的公式为

$$m_{常}^2 = m_Q^2 + m_{基}^2 \quad (11-39)$$

东德于 1962~1968 年曾在柏林附近 Spree 河段上进行过试验。其水面宽为 18~31m，测速垂线为 10 条，在每条垂线上用 6 点法测速，于稳定流时期在河段上很多横断面连续测流量 51 次，以 51 次的流量的均值为真值，统计得到以下结论。

(1) 精简法 (60 个测速点) 流量的标准差 $m_{基} = \pm 3.6\%$ 。

(2) 常测法 (10 个测速点) 流量的标准差 $m_{常} = \pm 5.3\%$ 。

由式 (11-39) 估算出以精测法为准的常测法精简分析中的流量误差为

$$m_Q = \sqrt{m_{常}^2 - m_{基}^2} = \sqrt{5.3^2 - 3.6^2} = \pm 3.9\% \quad (11-40)$$

11.4.3 简测法的精简分析

简测法选择尽可能少的垂线和测点的测流方法，用简测法测出的流速称为代表流速。通过分析，建立代表流速和断面平均流速的关系。利用这种关系，测得代表流速即可推求断面平均流速与断面流量。

分析过程简单介绍如下。

(1) 搜集 30 次以上精测法 (或常测法) 流量资料，通过绘制断面图及 $\frac{v_m}{v}$ 沿河宽的分布曲线 (v_m 代表垂线平均流速， v 代表断面平均流速)，选择 $\frac{v_m}{v}$ 比较密集稳定的测速垂线，作为分析对象。

(2) 根据初选的垂线，从各次精测法 (或常测法) 测流成果中，摘出该垂线和测点的实测流速，并计算出代表流速。

(3) 以各次精测法 (或常测法) 的断面平均流速与代表流速点绘相关图，通过点群中心定一关系线或公式，并计算和统计由关系线查出流速的误差，对照表 11-5 所规定的允许误差限。从几个方案中进行比较，选配最优方案。

表 11-5 各种测速垂线数对数量的标准差

测速垂线数	8~11	12~15	16~20	21~25	26~30	31~35	104
标准差	4.2	4.1	2.1	2.0	1.6	1.6	0

例如：浙江沙湾水文站，流量变化一日内有几次起伏，用一般测流方法的测流历时太长，精度难以保证。为此，经初步分析得出两种方案，与常测法为准的精简误差如下所示。

(1) 低水时 ($L=140\text{m}$)

$$v=0.944v_{代}+0.02$$

$$m=\pm 3.5\%$$

(2) 高水时 ($L=200\text{m}$)

$$v=0.897v_{代}-0.07$$

$$m=\pm 3.9\%$$

式中： v 为断面平均流速； $v_{代}$ 为代表垂线的代表流速； L 代表垂线的起点距。

计算出断面平均流速 v ，即可算出断面流量。

若断面比较稳定，可选一条或两条测速垂线作为代表垂线。若断面冲淤较大的河段，简测法方案可采用多线一点法，同样可以分析统计其误差，以便抉择。

复 习 题

11-1 水文测验中为什么有时用绝对误差表示？有时用相对误差表示？试举例说明。

11-2 什么是随机误差？随机误差有哪些特性？

11-3 系统误差有哪两类？举例说明之。

11-4 什么是不确定度？什么是置信水平？

11-5 不确定度与标准差有什么关系？为什么用 $c\sigma$ 表示不确定度？

11-6 什么是随机误差的传播？

11-7 和的误差公式和积的误差公式的形式如何？

11-8 随机误差和系统误差是怎样综合的？

11-9 写出流速面积法测流的误差估算公式及其符号的意义。

11-10 流速面积法各单项误差是怎样计算的？

11-11 流速仪测流方法的精简分析的一般步骤如何？常测法和简测法是怎样进行精简分析的？

第 12 章

潮水河水文测验

12.1 概 述

我国海岸线长达 14000 多千米，拥有无数的河流沟通着大陆和海洋。这些河流下游入海的河口段，不仅受上游河道径流的影响，还受不同程度的潮汐、潮流的影响，致使河口的水文情势发生了错综复杂的变化。为了探求这些河流水文要素变化的规律，以满足航运、港口码头、发电、灌溉、盐业、渔业及水利工程建设、环境保护等部门的需要，必须设站进行潮水河水文要素的观测。为掌握潮汐对河道及径流的影响，还应组织不定期的潮水河水文测验。

海水做周期性的升降运动，这种现象称潮汐。一般情况下，海水每昼夜有两次涨落变化。有关潮汐的术语如图 12-1 所示。根据大量观测数据的长期分析发现，潮汐

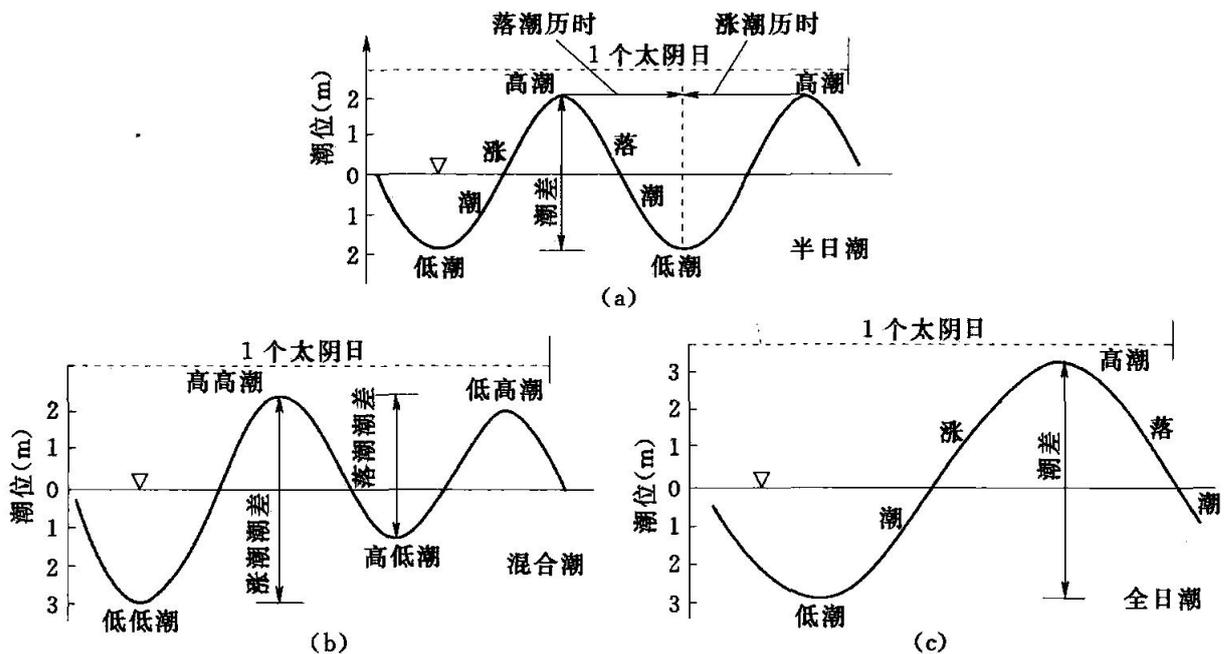


图 12-1 潮汐示意

(a) 半日潮；(b) 混合潮；(c) 全日潮

的涨落现象平均 24h50min (天文上称为 1 个太阴日) 为 1 周期。潮汐在 1 个太阴日的变化, 可分为 3 种类型。

半日潮。每 1 太阴日中有两次高潮和两次低潮, 且两相邻的高、低潮的潮高几乎相等。

全日潮。在 1 太阴日中只有 1 次高潮和 1 次低潮。

混合潮。它是介于半日潮和全日潮之间的一种形式, 有时接近半日潮型, 有时又具有全日潮特征。

潮汐不仅有半日周期、全日周期的变化, 还有半月周期、1 月周期、年周期及多年周期的变化。它不是完全依次重复, 而是因时而变, 因地制宜。

产生潮汐的原因有两种: ①由天体引力所产生潮汐, 称天文潮汐; ②气象要素(如风、降水、气压、蒸发等)影响引起的潮汐称气象潮汐。后者比前者小得多, 几乎不能用肉眼加以判别。所以, 潮汐现象是以天文潮汐为主的。天文潮汐主要是月球和太阳的引力造成的。

从“万有引力定律”知, 宇宙中一切物体之间都是互相吸引的, 引力的大小与这两个物体的质量的乘积成正比, 同它们之间距离的平方成反比。因此, 月球对地球上不同地点单位水质点的引力大小是不同的, 引力的方向指向月球的中心。

地球表面的水质点除受其他星球的引力之外, 尚受地球的引力、地球自转的离心力及绕地球与月球公共质心运动的离心力等作用。但是地球的引力和地球自转的离心力对于潮汐的作用可以互相抵消。引潮力主要来自于月球, 月球的引潮力主要取决于月球的引力和地球绕地 1 个月公共质心运动的离心力。

地球表面任何地方单位水质点绕地 1 个月公共质心运动的离心力大小等于地球中心绕地 1 个月公共质心运动的离心力和大小 (证明从略), 其方向同于地球中心离心力的方向。对于地心, 绕地一个月公共质心运动的离心力, 等于月球对地心的引力, 其方向相反。

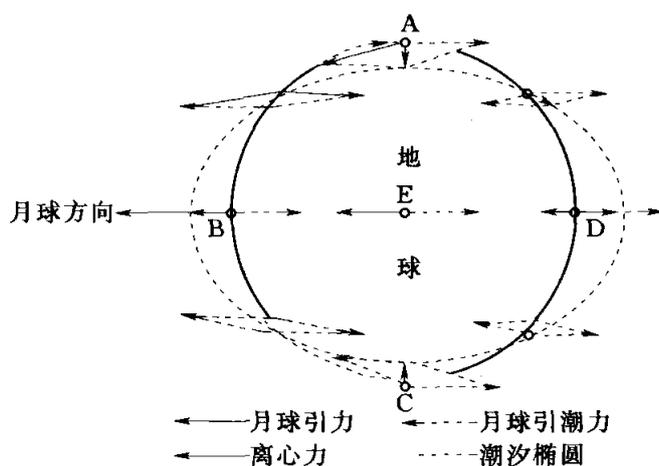


图 12-2 月球引潮力示意

月球的引潮力等于月球对地表面水质点的引力和水质点绕地月中心运动离心力的合力。由于后者在地球各处相等而且是常数, 而前者随着水质点距月球的距离不同而不同, 因此引潮力的大小由于地球自转引起距月球距离变化的日周期而呈现日的周期变化。见图 12-2, 地球表面的水质点, 在地球自转过程中, 经过 B 点时, 其距月球最近, 月球的引力最大, 合力指向月球; D 点时, 水质点距月球最远, 月球的引力最小, 合力背离月球。

A、C 两点的引潮力指向地球中心。这样在 B、D 点引潮力向上, 使海水向上运动, 即涨潮; A、C 位置, 引潮力向下, 使海水向下运动, 造成海水下降, 即落潮。因此, 在 1 个太阴日内, 潮汐有两涨两落的现象。

太阳质量比月球质量大 2700 万倍，距地球的距离为月球到地球的距离的 389 倍。经分析，引潮力的大小与天体的质量成正比，与天体中心到地球中心的距离立方成反比。因此，宇宙中天体虽多，但对地球能引起巨大引潮力的不多。综合考虑质量与距离两因素知：月球对地球的引潮力最大，约为太阳引潮力的 2.2 倍，太阳次之。

太阳、月球和地球三体位置是相对变化的，月球和太阳对地球的引潮力的大小和方向也不断变化，所形成的潮汐大小也不同。每逢朔望日（农历初一、十五），太阳、月球和地球三者几乎成一直线，月球和太阳的引潮力作用在同一方向，海水涨得最高，落得最低，潮差最大，形成“大潮”。在上、下弦，三者位置呈直角，太阳潮最大限度削弱太阴潮，形成“小潮”，这就是潮汐半月周期变化的原因。

根据天体运动的规律及引潮力概念，同理可以说明潮的月周期、年周期及多年周期变化。

随着潮汐升降引起海水的水平运动，称为潮流。潮流也呈周期变化，且与潮汐的周期是相应的，也分半日型、全日型及混合型 3 种。潮流受地形的影响十分显著。由于发生潮流地点不同，潮流运动形式分为两种：一种往复流；另一种旋转流。在潮水河段，潮流一般在两相反的方向上作直线式的往复运动。

潮波在大洋发生后，带着巨大的能量向近海传播，沿入海河道溯流向上。因断面缩窄，水深变浅，使潮波速度逐渐减小，加上摩擦作用和下泄径流的影响，潮波发生变形，前波增陡，后波减缓，愈向上游，涨潮历时愈短，落潮历时愈长，发生高潮时刻愈落后，潮差愈小。潮波到了一定地段，涨潮流速恰与河水下泄流速相抵，潮水停止倒灌，此处称为潮流界。潮流界以上，潮水虽然停止倒灌，但水面仍有壅高现象，潮波继续上溯，因各种摩擦阻力作用，波能不断消耗，波高逐渐降低，当传播到某一地点，波幅等于零，水位不再受潮汐影响，此处称为潮区界。潮流界与潮区界如图 12-3 所示。因各河流的水力条件不同，潮流界和潮区界离河口的远近也

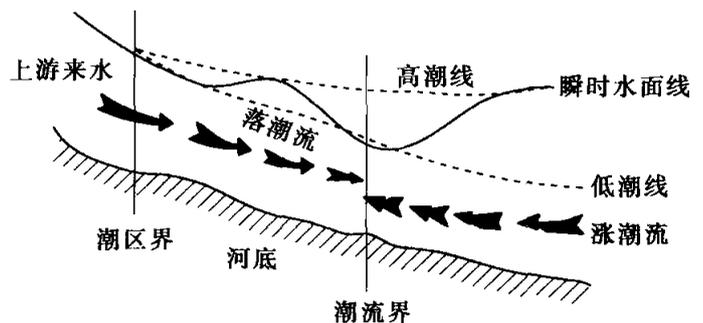


图 12-3 潮流界与潮区界示意

各不相同；同一条河流的潮流界和潮区界地点也是随时间而变化的。例如，洪水期又遇小潮汛，河水作用强，潮流界和潮区界可能大幅度下移；在枯水期又遇大潮汛，潮流界和潮区界就又推向上游。

海洋潮汐的周期变化规律接近于正弦曲线。潮水河段由于不仅受潮汐影响，同时受上游径流及风浪的影响，其潮水位变化过程是非正弦曲线。又因同一地方潮水、河水及风浪三者的组合每天是不同的，所以其潮位过程线形状也各不相同。

潮水河流量也呈周期性变化。涨潮时，潮水自海洋沿河道流向内陆，称涨潮流；落潮时，河水由内陆向海洋，称落潮流。在涨落潮流交替时，水流转换方向，有一个较短时间水流停止流动，称憩流。前后两次落潮憩流的间隔时距称潮流期。其他有关潮流的术语见图 12-4。随着潮水位、潮流速的周期性变化，在一个潮流期内，悬移质含沙量也出现两个沙峰。

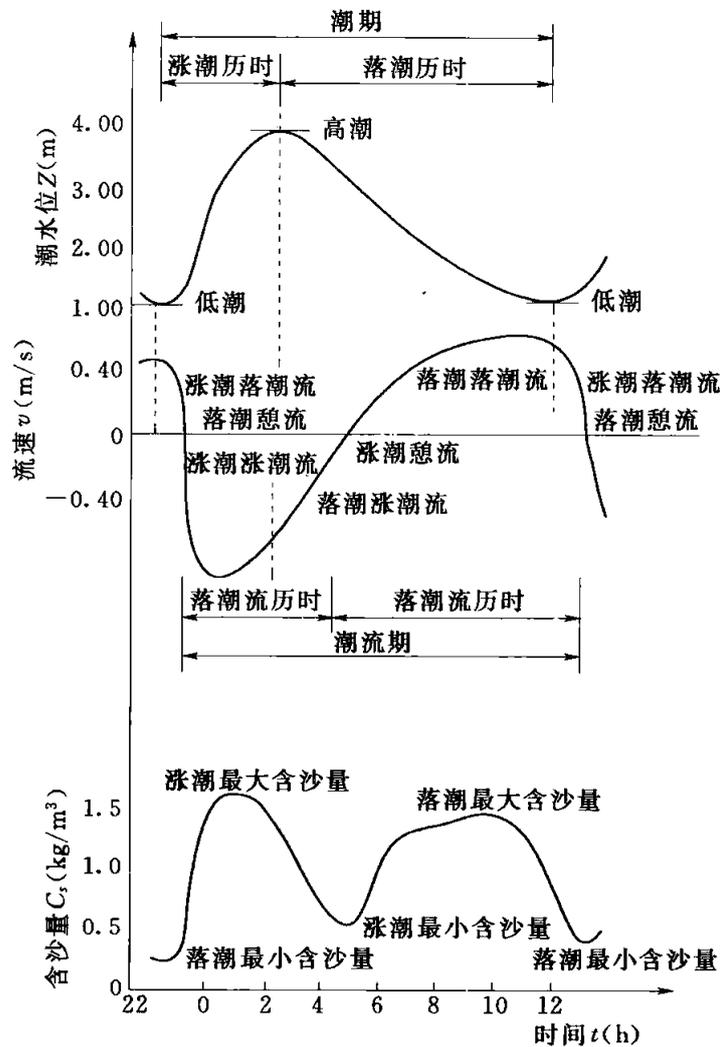


图 12-4 潮水河水位、流速及含沙量过程线对照

可见，潮水河的水文要素变化要比一般的河流复杂。

为了适应国民经济各部门的需要，我国一些较大的潮水河都布设了潮水位站，有的设立了基本潮流量站，长期地测流测沙，为生产建设提供了宝贵的水文数据。

潮水河水文站也分为基本站、专用站和实验站，设立各种不同类别的测站是根据河道自然情况、经济开发远景及建站的目的任务而定的。

基本站布设的原则是既考虑当前又考虑长远而进行长期观测，累积可靠的水文数据为综合利用服务。它以满足在潮区界下游任何地点任何时间的潮水位及潮流量内插的要求为原则。

基本潮水位站一般布设在：潮水河水文情势转折点附近，如潮流界、潮区界；为了防汛防潮需要的工农业中心附近；为了掌握潮波沿程变化而均匀布设一些潮位站。根据这些潮位站的同时观测数据，能绘出任何时间的水面曲线，以推算出任何时间任何地点的流量。

基本流量站一般应设立在潮区界，以控制流域的来水、来沙的情况，例如长江的大通站、瓯江的圩仁站。潮区界下游一般只设基本潮水位站，不设基本潮流量站。当然，特殊需要如为了分析掌握河口演变的规律，在河口处也可布设基本流量站，长期

地测流、测沙。

专用站及实验站布设应根据综合利用的方针，以服务于当前或近期生产建设及科学实验研究为主，能满足沿海的港口航道、河口治理、潮汐发电、海塘护理及中小河河口的建闸堵坝等工程对水文资料的需要。

12.2 潮水位观测及数据整理

12.2.1 潮水位观测

海洋潮水位变化近似正弦曲线，潮水进入河口后，其水位变化过程由于受到海洋潮位、河流水位及河道自然情况的影响而变得复杂。因此，潮水位观测要求能得到潮水涨落的完整过程。

当用水尺观测时，为了掌握潮汐全部变化过程，必须日夜连续观测，根据涨落的缓急合理分布测次。一般每隔 0.5~1h 观测 1 次，在接近高、低潮前后，每 5~15min 观测 1 次，以便测得最高、最低潮水位。受到台风或浅海分潮影响时，应适当地加密测次。在掌握该站潮型变化基本规律情况下，长期日夜连续观测有困难时，也可以只在高潮水位和低潮水位附近进行观测。

当采用自记水位计时，根据自记水位计的形式，如日记式、周记式等，定时地更换自记纸，同时观测校验水尺的读数，以校正自记水位计的水位读数。

12.2.2 潮水位观测数据的订正

1. 时差订正

潮水位变化很快，必须重视时间的准确性，使观测成果不致因时间欠准而与实际情况不符，甚至造成数据不合理或找不出变化规律。所以对于时钟误差每天允许的时差不超过±5min。若发现观测所用的钟表与准确时间的时差超过上述范围，则需要将前后两次对时范围内的潮时给予订正。若数据用于潮汐预报时，时间误差超过 1min 则应进行订正。

假定两次时间间隔的时差为直线变化，可用直线比例分配的办法订正，其计算公式为

$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + (t_2 - t_3) \frac{(t_0 - t_1)}{(t_3 - t_1)} \quad (12-1)$$

式中： t 为订正后的潮水位出现时间； t_0 为钟表上所示潮水位出现时间； Δt 为时间订正值； t_1 为上次对时的准确时间； t_2 为本次对时的准确时间； t_3 为本次对时钟表上所示时间。

2. 水位订正

用自记水位计的测站，每天至少校测潮水位一次。若校测时发现记录纸上的潮水位与实际观测的数值不符，应立即调整记录笔的高度。若水位误差日记式超过 2cm，周记式超过 3cm 或超过自记纸上水位坐标的最小刻划时，应将前后两次校测时段内的高、低潮水位按直线比例分配的方法予以订正。在摘录潮水位变化过程时，还应将正点和其他转折点的水位予以订正。订正公式为

$$Z = Z_0 + \Delta Z = Z_0 + (Z' - Z'') \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \quad (12-2)$$

式中： Z 为 t 时的实际高（低）潮水位，m； Z_0 为 t 时自记纸上记录的高（低）潮水位，m； Z' 为 t_2 时校核水尺观测的潮水位，m； Z'' 为 t_2 时自记纸上记录的潮水位，m； t 为高（低）潮出现的时间； t_1 为上次校测潮水位的时间； t_2 为本次校测潮水位的时间。

12.2.3 潮水位数据的处理

与无潮河流相似，潮水位数据的处理工作内容也包括考证测站基面、水准点和水尺零点高程，审核原始记录及各项特征值统计，绘制潮水位过程线，进行合理性检查，制作“逐日潮水位表”、“潮水位月年统计表”，在常年通航和农田排灌频繁的潮水河，还要制作“高低潮潮水位频率表”，最后编写“潮水位数据说明书”。现把有别于无潮河的潮水位整理工作介绍如下。

1. 各项潮水位特征数值的统计

潮水位的特征数值主要包括：各次高、低潮水位及其出现的时间，高、低潮间隙，涨、落潮差，涨、落潮历时及平均潮水位差。统计方法类似无潮河，这里仅作如下说明。

一般潮水河的潮汐为半日周期变化，平均潮期约为12h25min，每个潮日（太阴日）出现高潮或低潮各两次。但统计时都以太阳日来进行的，因此在一天里出现高、低潮的次数有时不一定为两次。同时，因气象及洪水等因素影响，各次出现的时分有超前、落后现象时，仍以实测为准，应注明原因。

高（低）潮间隙系指月中天（月球通过某地子午圈天顶或地底的时刻称为月中天）至第一次高、低潮的时间间隔，统称月潮间隙。高、低潮间隙是由各地逐日的月上（下）中天时与该地各次高、低潮出现时分计算出。月中天是随时随地而不同的，一般也可根据格林尼治的月上（下）中天时推算。

中国人民解放军海军司令部海道测量部每年刊布的潮汐表中，刊有“月球在东经120°月上（下）中天时刻表”和“月球在东经120°的月中天时刻改正至某地月中天时刻（北京标准时）用表”，适合我国沿海各港口及根据北京标准时区的测站推算所在地的月中天时间查用。各地月上（下）中天时刻根据格林尼治的月上（下）中天推算，公式为

$$T_c = T_n - \frac{T_n - T'_n}{24} \left(\frac{L_c}{15} \right) - \frac{L_c - L_n}{15} \quad (12-3)$$

式中： T_c 为某地某日月上（下）中天时刻； T_n 为格林尼治同日相应的月上（下）中天时刻； T'_n 为格林尼治相应的前一日月上（下）中天时刻； L_c 为某站所在地的经度； L_n 为某站所根据的标准时区经度。

【例12-1】 19××年12月4日，格林尼治月上中天时间 $T'_n = 20:39$ ；12月5日格林尼治月上中天时间 $T_n = 21:21$ ；北京时区（标准时区）经度 $L_n = 120^\circ$ （东经）；南京的经度 $L_c = 118.8^\circ$ （东经）。

南京12月5日月上中天出现的时间（按北京标准时计） T_c 为

$$T_c = 21:21 - \left(\frac{21:21 - 20:39}{24} \times \frac{118.8^\circ}{15} \right) - \frac{118.8^\circ - 120^\circ}{15} = 21:12$$

一般沿海或靠近河口的测站，在正常情况下各个高潮均出现在邻近的月上（下）中天时区后，因此高潮间隙为正值。但个别站会因风及其他因素影响或离河口很远，受河水流量影响，高潮有时会出现于月中天时之前，变成不合理的负值。若负值次数少，只要全月的平均高潮间隙仍为正值即可。若大多数为负值，应根据前一个相距时间较长的月中天时计算高潮间隙。

2. 潮水位插补

有些测站因各种原因未能掌握全部涨、落水位的过 程，对缺测部分需要参照相邻潮的变化或上、下游站潮水位相应变化加以插补。插补方法有以下几种。

(1) 比例插补法。根据相似潮汐的水位涨落比例进行插补。

(2) 直线插补法。潮水位在缺测部分接近直线变化时，可采用直线插补法。

(3) 相关插补法。当缺测的站与相邻站的相应高（低）潮位及其出现时分存在密切的相互关系时，可根据两站同时期（包括缺测前、后一段时期，以及与缺测的潮期相隔半个月或 1 个月的时间内）的实测数据，分别点绘相应高潮潮位、低潮潮位及其出现时分的相关曲线，据以进行插补缺测的数值。

(4) 综合过程线插补法。若测站与相邻站相距较近，涨落过程线形状基本相似，可以用邻近站的同期实际过程线来描绘本站缺测部分潮位变化。

12.3 潮流量测验

潮流的周期变化和河槽的限制，使得潮水河一般为往复流。但是河槽的复杂变化，特别是河口区有大量的沙洲发育，使得潮水河的流速变化异常复杂。潮汐、径流、河道形势的综合影响，使得流速、流向瞬息变化，并且因地制宜，因此在可能的情况下，潮水河流量测验，一般都应同时施测流速、流向。

潮流的周期性变化，使得单独的某一瞬时的流量值意义不大，因此，潮流量测验，应测得每一个潮流期内涨、落潮的流速分布和变化过程，据以计算出涨、落潮的流量过程和净进（泄）水量，以便研究潮流的变化规律。

12.3.1 潮水河流速分布

潮水河流速分布，是随时间周期性变化的。潮汐、径流及河道形势的影响，特别是对流向的影响，使流速分布异常复杂。

1. 垂线分布

在涨潮流或落潮流比较强，流速比较大时，其垂线流速分布同于无潮河流，其分布曲线与无潮河流相似，如图 12-5 (a) 和 (c) 所示。

随着涨、落潮流的减弱，流速分布发生了变化。一般河底流速最先转变方向，逐渐地整个垂线发生流向的变化。在流向转变的过程中，流速分布如图 12-5 (b)、(d) 所示。

在涨落潮相互转换的过程中，垂线上流向的变化有两种情况：①变化在较短时间内完成，流向变化是突变的，这在比较规整的河段常见；②流向的变化是旋转变

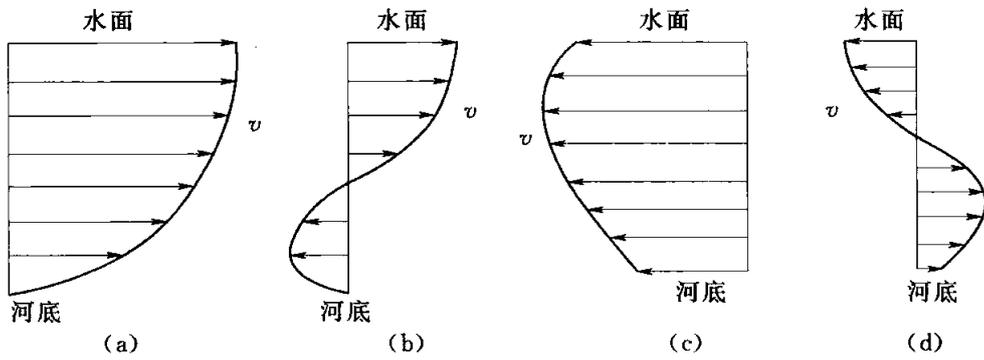


图 12-5 潮水河流速分步

的，垂线上各测点流向是渐变的。表 12-1 是两个河段流速、流向垂线分布的实例。

表 12-1 憩流附近流速、流向分布实例

河段位置	水深 (m)	项目	相对水深 (m)					
			0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
长江如皋河段	21.0	流速 (m/s)	0.23	0.21	0.14	0.11	0.075	0.040
		流向向 (°)	345	126	115	81	32	27
长江口北港河段	8.7	流速 (m/s)	0.28	0.18	0.28	0.27	0.15	0.31
		流向 (°)	331	264	331	262	239	215

从表 12-1 中可以看出，垂线上测点流向是逐渐旋转变化的，这种情况一般在水下地形比较复杂的河道经常发生（水面流向易受风向、船行波、测船船体影响）。

在河口附近的河道涨、落潮流时，海水经常可以倒灌入内，这时在落潮流与涨潮流相互转换的过程中，由于咸淡水的比重不同，咸水呈楔状形侵入淡水之中，楔状体与淡水的紊动混合不明显，楔状物的流动称为异重流。在有异重流流动的垂线上，其流速在垂线上的分布会有突变。

2. 流速沿横断面的分布

流速沿横断面的分布在涨、落潮流速比较大时，其流速分布与无潮流河流差不多。在憩流附近，一般岸边首先转流，并形成一段时期内涨落潮流同时存在的情况，有的断面，特别是涨潮流较弱的小潮，这种涨落潮流可相持两三个小时。图 12-6 为潮水河流速沿横断面分布的实例。

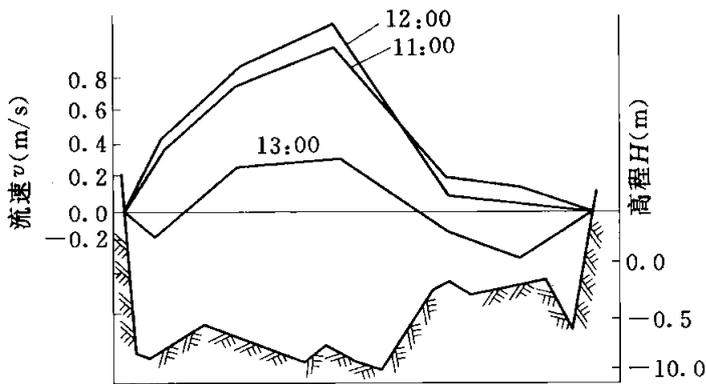


图 12-6 潮水河流速沿横断面分布

在涨落潮流流速较大的时段，流向沿横断面的分布主要受断面形状和河道形势的影响。在憩流前后，断面上流向变化紊乱，其除受断面

和河道形势的影响外，还与潮流、径流的强弱等因素有关。

3. 流速随时间的变化

流速随时间呈周期性变化，一般涨落潮流交替出现，涨落潮历时的长短主要取决于潮流与径流的强弱对比，潮流强时，对于河口区涨落潮流历时相差不大；径流强时，则落潮流历时会大大地超过涨潮历时。

河口区一般涨潮流来势较猛，流速过程的斜率较陡；落潮流过程相对较缓，特别是径流较强、落潮流历时较长时，一段时间流速变化不大，图 12-7 为潮水河河口区某垂线各测点流速变化过程线。

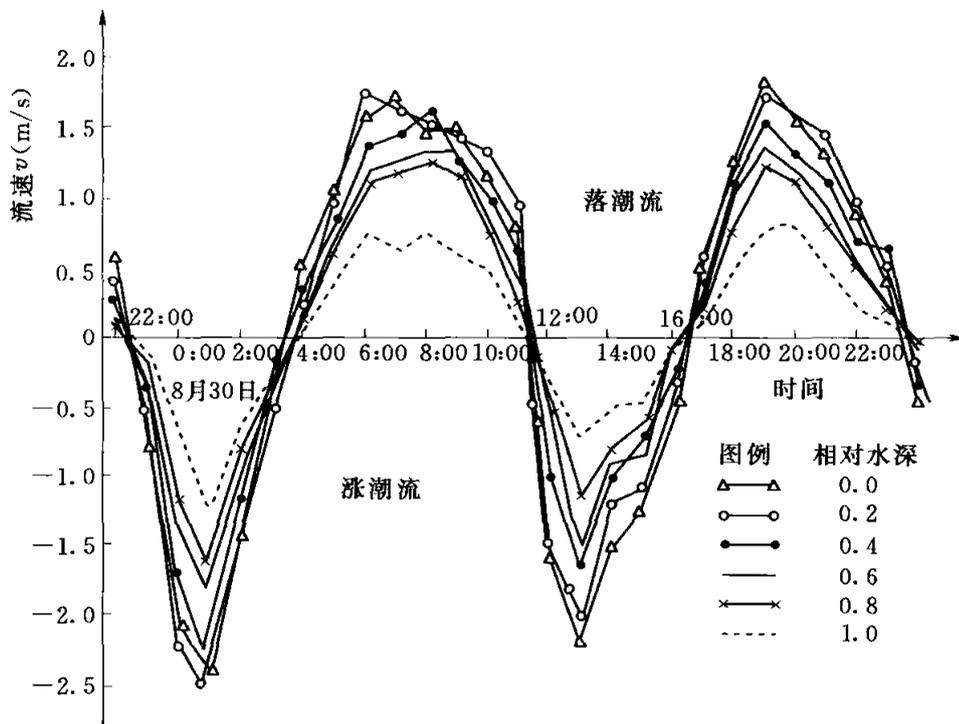


图 12-7 潮水河测点流速过程线

12.3.2 测验期距

对半日潮，平均每一潮流期约为 12h25min，为了掌握在一个月的周期变化，新设站在一年中的不同时期，如枯水期、平水期、洪水期等，应连续进行半个月以上的潮流量测验。

潮水河测验所需的人力、物力很多，一般测站不可能长期连续的施测。新设站大规模进行观测，初步掌握变化特点之后，一般采用代表潮法进行测流，即通过施测少数具有代表性的潮流期，如每月的大潮、小潮、寻常潮（介于大潮、小潮之间）进行施测，来掌握它的月、年变化特征，并推算月、年总潮量。

代表潮的选择采用经验分析法。在进行较长时期的连续施测后，将每个月的实测全月总潮流量或平均潮流量作为标准，再选各种组次的代表潮，例如选 8 次（两大、两小、四常）、6 次（大、小、常各两次）及每次施测一个或两个潮流期个数，便得全月涨（落）潮流的总量与全月实测的总量进行比较，若相对误差不超过 5%~10% 则可作为测验的代表潮。

12.3.3 潮流期内流速测次的分布

潮流期内流速测次应根据各站流速的大小缓急适当分布，以能准确掌握全潮过程中流速变化的转折点为原则。流速变化较大或特征值（如最大、最小流速，憩流前后等）处，测次应增加，时距应缩短。这是由于落潮憩流前后，流速变化急剧，在很短的时间内，由大骤减为零或由零激增变大，而且流向改变，所以必须加密测次才能准确地掌握其转折变化；涨潮憩流前后，因流向改变，亦须适当加测；涨、落潮最大流速附近，流速变化虽已趋平缓，但因它是流速变化的转折和潮流的特征值，故亦应加测。其余时间的测次，可均匀分布，定时施测。每一定时测次的时距和加测时距的大小，对潮量精度是有影响的，见表12-2，相对误差以图解法为标准。

从表12-2中可见，如定时测次的时距拉长到每1h 1次，则必须在憩流，最大流速，高、低潮的附近适当加测，其流量误差才能较小。若不加测，流量误差较大。具体的测次分布可参照的规定为一般情况每隔1h施测1次，在落潮憩流，涨潮憩流及涨、落潮最大流速前后，每隔0.5h施测1次。在潮流较强的河段，涨潮流仍每隔1h施测1次，在特征值出现前后，应每15~30min加测1次。

表 12-2 江苏省××站不同测次时距计算潮量误差统计

流量测量方法		潮流区别	潮量 (km ³)	误差 (km ³)	相对误差 (%)
图解法	每10min施测1次	涨	1352		
		落	622		
分析法 (不加测)	每10min施测1次	涨	1347	-5	-0.4
		落	619	-3	-0.5
	每20min施测1次	涨	1341	-11	-0.8
		落	616	-6	-1.0
	每30min施测1次	涨	1339	-13	-1.0
		落	611	-11	-1.8
	每1h施测1次	涨	1317	-35	-2.6
		落	578	-44	-7.1
分析法 (加测)	平时每1h施测1次，憩流附近，最大流速、高低潮时每0.5h加测1次	涨	1338	-14	-1.0
		落	605	-17	-2.7
	平时每1h施测1次，憩流附近，最大流速、高低潮时每20min加测1次	涨	1339	-13	-1.0
		落	609	-13	-2.1

12.3.4 潮流速、流向的施测

从潮流速分布中可知，潮流速受潮汐、径流，河床形势、异重流等影响，流速、流向都随时变化，因此，在潮流量测验中，一般地都应同时施测流速、流向。

1. 测速垂线的布设及测点的分布

潮流速变化很快，若在断面上布设较多测速垂线，一架流速仪依次施测的需时较

长, 往往不能准确掌握全断面流速过程的转折变化; 若用多架流速仪同时施测, 所需人员和仪器设备又很多, 一般难以做到。因此, 潮水河流速垂线的数目, 一般为 5~7 条, 特别宽大或狭窄的河道可酌情增减, 最少不得少于 3 条。

测速垂线分布的位置, 一般根据河宽、水深、河道地形、流速的横向分布及河床稳定程度等予以确定。具体要求垂线分布应大致均匀, 中泓比两岸稍密, 主槽比河滩密, 能控制地形和流速横向分布的主要转折点。

测速点的分布一般以六点法为主, 即水面及相对水深 0.2、0.4、0.6、0.8 和河底, 对于水深较浅或通过数据分析得出三点法及两点法测速仍有足够的精度时, 也可用三点法或两点法施测。

2. 垂线流速、流向的施测方法

若用多架流速、流向仪同时施测各相对水深的测点流速, 一般在技术上比较困难, 特别是水深较大时。潮水河垂线流速、流向一般是用一架流速、流向仪施测。常用的方法为流速过程线改正法、等深点流速平均改正法。

(1) 等深点流速平均改正法。用一架流速仪要施测同时流速、流向, 就必须在同一深度, 施测两次流速、流向, 用平均的方法计算出同时流速、流向来。

对于六点法, 从水面开始施测, 依次向下施测水面及相对水深 0.2、0.4、0.6、0.8 和河底处流速、流向, 然后再依次向上测到水面, 各测点的时距要大致相等。河底一点的流速、流向施测 1 次, 此点的时间为此测次施测的时间; 其余各测点的流速、流向各施测两次, 共测 11 点次, 如图 12-8 所示。

对于同时测点流速、流向的计算, 若等深点二次施测流向变化不大时, 可假定等深点流速流向的变化为线性变化, 用算术平均法求出同时流速、流向, 其公式为

$$\left. \begin{aligned} v_{0.0} &= \frac{1}{2}(v'_{0.0} + v''_{0.0}), \beta_{0.0} = \frac{1}{2}(\beta'_{0.0} + \beta''_{0.0}) \\ v_{0.2} &= \frac{1}{2}(v'_{0.2} + v''_{0.2}), \beta_{0.2} = \frac{1}{2}(\beta'_{0.2} + \beta''_{0.2}) \\ &\vdots \\ v_{1.0} &= v'_{1.0}, \beta_{1.0} = \beta'_{1.0} \end{aligned} \right\} \quad (12-4)$$

式中: $v_{0.0}, v_{0.2}, \dots, v_{1.0}$ 分别为同时测点流速; $\beta_{0.0}, \beta_{0.2}, \dots, \beta_{1.0}$ 分别为同时测点流向; $v'_{0.0}, v'_{0.2}, \dots, v'_{1.0}$ 分别为由上到下施测到的各相对水深测点流速; $\beta'_{0.0}, \beta'_{0.2}, \dots, \beta'_{1.0}$ 分别为与 $v'_{0.0}, v'_{0.2}, \dots, v'_{1.0}$ 相应的流向; $v''_{0.0}, v''_{0.2}, \dots, v''_{0.8}$ 分别为由下向上施测到的各相对水深测点流速; $\beta''_{0.0}, \beta''_{0.2}, \dots, \beta''_{0.8}$ 分别为与 $v''_{0.0}, v''_{0.2}, \dots, v''_{0.8}$ 各点相应的流向。

式 (12-4) 在 β' 与 β'' 相差小于 30° 时, 流速计算误差一般不会超过 $\pm 3.5\%$ 。但是在断面不规整、水深较大的垂线, 有时施测一根垂线上的流速、流向要用 15min

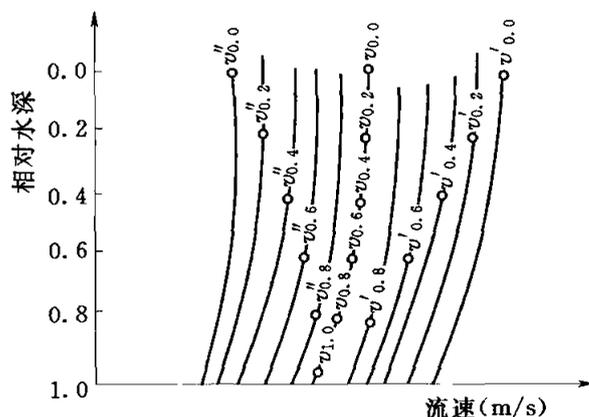


图 12-8 等深点流速平均改正法示意

以上,在憩流前后,等深点流速、流向相差很大,流向相差 30° 以上是常见的,甚至会相差 180° ,这时用以上的公式会有很大的计算误差。建议使用的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{v' \sin \beta' + v'' \sin \beta''}{2} \\ v_y &= \frac{v' \cos \beta' + v'' \cos \beta''}{2} \\ v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ \tan \beta &= v_x / v_y \end{aligned} \right\} \quad (12-5)$$

式中: v' , v'' 分别为某相对水深等深点流速; β' , β'' 分别为与 v' 、 v'' 相应的流向; v , β 分别为某相对水深同时流速、流向。

等深点流速平均改正法,由于垂线上施测测点流速、流向较多,所以是一个精度较高的施测垂线流速、流向的方法。但是此法外业工作量大,施测要求高,一根垂线施测历时长,这些对流速的精度是非常不利的。

(2) 流速过程线改正法。此法是自河底向水面依次施测各相对水深测点流速、流向的方法。施测时,各点都应记下施测时间,以便绘出测点流速过程线。此法各相对水深处的流速、流向仅施测一次,一般最好在“同时时间”之前开始施测,相对水深0.6处的施测时间正好是“同时时间”。

若各测点流向基本上垂直于断面方向时,可用测点流速绘出过程线,以便查出各时刻的测点流速,如图12-7所示。若测点流速与垂直于断面方向的偏角较大时,应把测点流速在垂直于断面的流速分量求出,绘出过程线,求出各时刻垂直于断面方向的流速分量,以便进行潮流量的计算。这时同时流速、流向可用式(12-6)计算为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= (v_2 \sin \alpha_2 - v_1 \sin \alpha_1) \times \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} + v_1 \sin \alpha_1 \\ v_y &= (v_2 \cos \alpha_2 - v_1 \cos \alpha_1) \times \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} + v_1 \cos \alpha_1 \\ v_t &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ \tan \alpha_t &= v_x / v_y \end{aligned} \right\} \quad (12-6)$$

式中: v_2 , v_1 分别为两次相同相对水深相邻测次测得测点流速; t_2 , t_1 分别为与 v_2 、 v_1 相应的时间; α_2 , α_1 分别为 v_2 、 v_1 的流向与垂直于断面方向的夹角; v_t 为内插出的 t 时的某相对水深流速; α_t 为 v_t 的流向与垂于断面方向的夹角。根据断面方向即可用 α_t 算出 v_t 的流向。

各相对水深 t 时的流速、流向都可用式(12-6)算出。

3. 垂线平均流速、流向的计算

流速场的分析研究需要求出垂线平均流速、流向;流量的计算需要算出垂线平均流速在垂直于断面方向的分量。

根据各测点的流向,可以算出流向与垂直于断面方向的夹角,继而可能算出垂直于断面方向流速的垂线平均值,对于六点法其公式为

$$v_{my} = \sum_{i=1}^6 \alpha_i v_i \cos \beta_i \quad (12-7)$$

式中： v_i 为各相对水深测点流速； β_i 为各测点流向与垂直于断面方向的夹角； α_i 为各测点流速的权重。对于六点法公式，各相对水深流速的权重分别为 0.1、0.2、0.2、0.2、0.2、0.1。

流量计算时，其垂线平均流速即 v_{my} 。

垂线平均流速流向的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} v_m &= \sqrt{v_{mx}^2 + v_{my}^2} \\ \tan\beta_m &= v_{mx}/v_{my} \end{aligned} \right\} \quad (12-8)$$

$$v_{my} = \sum_{i=1}^6 \alpha_i v_i \sin\beta_i$$

式中： v_m 为垂线平均流速； β_m 为垂直于平均流向与垂直于断面方向的夹角。

4. 测点的测速历时

潮水河中流速瞬息变化，为减少流速变化所引起的误差，测点的测速历时宜短，但为克服流速脉动的影响，测速历时宜长。因此，每个测点的测速历时，应视潮流的强弱，流速脉动的大小，垂线上测点的多少及测流操作的难易而定，最好通过试验予以决定。从大量的试验数据分析可得出以下几点建议。

(1) 在流速变率较大时（如涨、落潮憩流前后）或垂线上测点多，只有一架流速仪施测时，为了减少流速随时间变化而引起的误差，测速历时可采用 30~60s。

(2) 流速变率较缓，测点又少，操作迅速时，为了减少脉动的影响，则每点测速历时可取 60~90s。

因此，在未经试验时，可参照上述办法进行施测。

5. 断面流速的施测方法

(1) 多船同时测流法。断面每条垂线分别固定 1 只测船同时进行施测，故各条垂线的平均流速均为同时的。

(2) 一船多线法。全断面多条垂线只用 1 只测船，1 组人员及仪器设备依次施测。对一般河宽小，测线少，测船移动方便，流速变化缓慢的测站可采用这一方法。施测时需往返施测，有两种办法，如图 12-9 所示，一种为积深法；另一种为积点法。前者以测流往测最后 1 条垂线的时间作为全断面测速平均时间；后者以施测往测最后 1 条垂线上离河底最近 1 个测点的时间作为全断面测速平均时间。

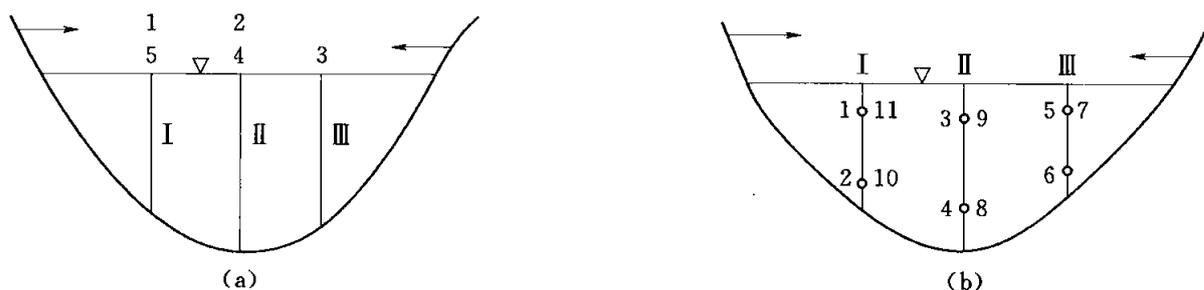


图 12-9 断面流速施测示意

(a) 积深法；(b) 积点法

(3) 代表线法。代表线法是以极少数的垂线所测算的代表线流速与断面平均流速

建立一定的关系，借以推求断面流量。许多潮流站历年进行精简垂线的试验和数据分析结果证明，一般测站都有可能找到与断面平均流速有较稳定良好关系的1条或2条代表测速线。例如，当断面大致平整规则，主流靠近中泓，断面流速分布与断面形状大致相应，其流速较为稳定，有可能在中泓主流处找到1根垂线作为代表线。

代表线的分析方法类同无潮河的垂线精简分析，所不同的有以下几点。

涨、落潮流时段平均水位不一，加上流向的改变，所以涨、落潮流的代表垂线流速与断面平均流速的关系不同，因此必须分别涨、落潮流情况探求代表线流速 v_m 与断面平均流速 \bar{v} 的关系。还应在不同季节、潮位、流速进行多次校核试验，校验和订正原来代表线与断面平均流速的关系。

潮流量测验时影响流速变化和可能引起各种误差的因素较多，因此其精度要求比无潮河有较大幅度的放宽。分析结果有75%以上测次的偏差不超过 $\pm(5\% \sim 7\%)$ 即可。

垂线精简后只有一条代表线时，可直接固定测船进行施测。若有2条或2条以上的代表线时，可根据河宽、流速、测点数目以及其他施测条件采用多船同时施测或一船多线法施测。

12.3.5 潮流量及潮量的计算

潮流量计算的方法，与无潮河流的计算方法类同。这里应注意的是：潮水河水流流向有顺逆变化，所以当垂线上各测点的流向顺逆不一致时，则应用各测点流速的代数和计算垂线平均流速，而断面流量则为断面上所有各部分流量的代数和。此外，还必须计算潮量及净进（泄）量。

潮流量测验以每个潮流期为单位，当潮流往复变化时，计算潮流量应以憩流出现时间为分界。从落憩至涨憩之间，流量过程线与时间坐标所包围的面积，称为涨潮潮量；从涨憩至落憩，流量过程线与时间坐标所包围的面积，称为落潮潮量，如图12-10所示。

设 $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 为落潮憩流开始依次测得流量，即涨潮流量，以 m^3/s

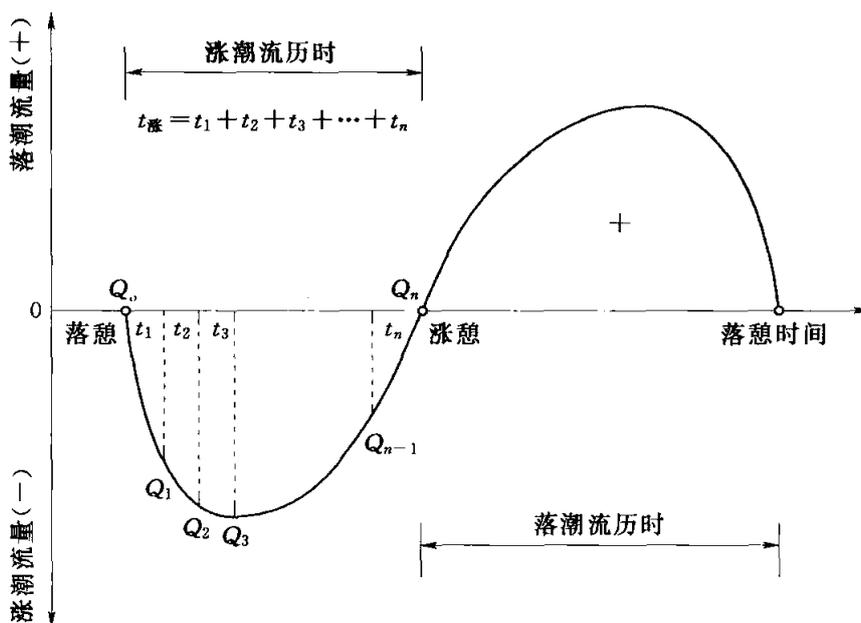


图 12-10 涨落潮量计算示意

计。 t_1, t_2, \dots, t_n 为两次施测时相隔的时间, 以 s 计。则涨潮潮量 W' 为

$$W' = \frac{1}{2}(Q_0 + Q_1)t_1 + \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2)t_2 + \dots \\ + \frac{1}{2}(Q_{n-2} + Q_{n-1})t_{n-1} + \frac{1}{2}(Q_{n-1} + Q_n)t_n$$

因 $Q_0 = 0, Q_n = 0$

故 $W' = \frac{1}{2}Q_1t_1 + \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2)t_2 + \dots + \frac{1}{2}(Q_{n-2} + Q_{n-1})t_{n-1} + \frac{1}{2}Q_{n-1}t_n$

落潮潮量的计算方法与此相同。设 W'' 为落潮潮量, 则同一潮流期的净进 (泄) 量 ΔW 为

$$\Delta W = W'' - W' \quad (12-9)$$

当 ΔW 的值为正值, 表示净泄量; 若 ΔW 的值为负值, 则表示净进量。

12.3.6 体积法推求潮流量及潮量

体积法是从河道中根据短时间内水量的变化来推求流量的。要求从潮区界至河口的沿程各站, 在适当的时距内同时观测水位和相应的水面宽, 相应于不同水位的水面面积由每个河段来确定, 这样, 可以推求水量的变化, 借以计算流量。

设 A_{1-2} 为时段起始 1 站和 2 站间的水面面积; A'_{1-2} 为时段末 1 站和 2 站间的水面面积; h_1, h_2 分别为 1 站、2 站时段起始的水深; h'_1, h'_2 分别为时段末了 1 站、2 站的水深。在时段 t 内, 1 站和 2 站之间体积变量 V_{1-2} 为

$$V_{1-2} = \frac{1}{2}(A_{1-2} + A'_{1-2}) \frac{1}{2}[(h'_1 - h_1) + (h'_2 - h_2)]$$

若从河口的 1 站向上游依次经 2, 3, \dots, n (潮区界处) 站, t 时段内流过测站 1 断面的水量 V 为

$$V = [V_{1-2} + V_{2-3} + \dots + V_{(n-1)-n}] - Qt$$

若 Q 为潮区界测得的上游流量, 那么, t 时段内的平均流量 Q_t 为

$$Q_t = \frac{V}{t} = \frac{1}{t} \sum V_{i,j} - Q \quad (12-10)$$

$$(i=1, 2, \dots, n-1; j=2, 3, \dots, n)$$

可见, 这里求出的 Q_t 不是瞬时流量, 而是时段 t 内的平均流量。应当注意的是, 式中 $V_{i,j}$ 有正、负之分。正表示涨潮水量, 负表示落潮水量, 所以 V 是各段水量的代数和。

潮量则由各时段的平均流量 Q_t 来确定, 即涨、落潮量 W , 可按式 (12-11) 计算为

$$W = \sum Q_t t \quad (12-11)$$

从落憩至涨憩为涨潮流量, Q_t 大于 0; 从涨憩至落憩为落潮流量, Q_t 小于 0 进行累计。

体积法虽是早已有过的测验方法, 但在我国规范中未被采用。在国际标准中作为感潮河的测验方法加以介绍, 有其可取之处。本法除在潮区界断面需测流量以控制上游来水外, 仅沿程观测水位, 观测简便, 有利于加密测次提高测验精度。因此, 对于河底纵坡不太平缓, 断面较稳定, 漫滩情况不多, 支流河汊较小, 潮区界距河口不太远的河流, 还是较好的测验方法。

12.4 潮流量数据处理

12.4.1 潮流与潮汐要素关系的分析

潮流与潮汐主要是由于月球和太阳的引潮力而产生的，因此，潮水位的涨落与潮流速的增减变化有着密切的关系，由此寻求潮流量推求方法的途径。

1. 潮差与潮流要素关系的理论分析

在理想的水平矩形渠道中，假设潮水位与潮流速随时间的变化均为正弦曲线，如图 12-11 所示，则其上某一瞬时 t 的潮水位 Z 可用式 (12-12) 表示为

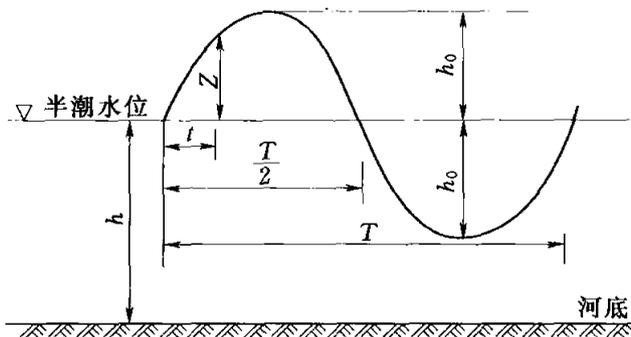


图 12-11 正弦曲线的潮水位过程线

图 12-11 所示，则其上某一瞬时 t 的潮水位 Z 可用式 (12-12) 表示为

$$Z = h_0 \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (12-12)$$

由于潮波推进时的水平运动产生潮流，其某一瞬时 t 的潮流速 v 为

$$v = Z \frac{c}{h}$$

从水力可知 $c = \sqrt{gh}$

故
$$v = h_0 \sin \frac{2\pi t}{T} \frac{\sqrt{gh}}{h} = h_0 \frac{\sqrt{g}}{h} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (12-13)$$

式中： h_0 为 $\frac{1}{2}$ 潮差或称为半潮水位的波高，m； T 为潮期； c 为潮波速度，m/s； h 为半潮水位时的水深，m； g 为重力加速度。

将式 (12-13) 微分，使 $\frac{dv}{dt} = 0$ ，并解之，得最大潮流速为

$$v_{\max} = h_0 \sqrt{g/h} \quad (12-14)$$

由式 (12-13) 积分，使 $v = \int_0^{T/2} v dt / \frac{T}{2}$ ，并解之，则涨、落潮平均流速为

$$\bar{v} = \frac{2h_0}{T} \cdot \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (12-15)$$

从式 (12-13)、式 (12-15) 可得出共同规律，作一瞬时 t 的潮流速，涨、落潮最大流速，涨、落潮平均流速都与涨、落潮差成正比，与半潮水位时的水深成反比。

$$Q = AV = B(h + Z)V$$

$$= B \left(h + h_0 \sin \frac{2\pi t}{T} \right) h_0 \sqrt{\frac{g}{h}} \sin \frac{2\pi t}{T}$$

$$= h_0 B \sqrt{\frac{g}{h}} \left(h \sin \frac{2\pi t}{T} + h_0 \sin^2 \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (12-16)$$

式中： A 为水断面面积；其余符号意义同上。

将式 (12-16) 微分, 使 $\frac{dQ}{dt}=0$, 并解之, 得最大涨、落潮流量为

$$Q_{\max} = h_0 B \sqrt{g/h} + h_0^2 B \sqrt{g/h} \quad (12-17)$$

将式 (12-16) 积分, 得涨、落潮的潮量为

$$\begin{aligned} W &= \int_0^T Q dt \\ &= h_0 B \sqrt{g/h} \int_0^T \left(h \sin \frac{2\pi t}{T} + h_0 \sin^2 \right) \\ &= h_0 B T \sqrt{g/h} \left(\frac{h}{\pi} + \frac{h_0}{4} \right) \end{aligned} \quad (12-18)$$

涨、落潮平均流量

$$\bar{Q} = W / \frac{T}{2} = 2h_0 B \sqrt{g/h} \left(\frac{h}{\pi} + \frac{h_0}{4} \right) \quad (12-19)$$

上述假定断面为矩形, 所以河宽 B 为常数。因此, 在式 (12-16) ~ 式 (12-19) 中, 除 T 外, 只有 h_0 、 h 为变数。根据许多数据分析, h 对 Q 、 Q_{\max} 、 W 及 \bar{Q} 的影响很小, 几乎可视为常数, 则式 (12-16) ~ 式 (12-19) 中, 瞬时潮流量、最大潮流量、涨潮或落潮的潮量、涨潮或落潮的平均流量均为潮差的二次二项方程式。

必须说明, 上述理论分析是假定在理想的矩形河道中潮汐变化过程均是正弦曲线, 未考虑河床阻力和上游来水的影响。天然河道不同于理想渠道, 潮流受河床地形及上游来水等影响, 故不能用上述一系列公式来计算各个潮流要素。但从公式可见, 潮差是影响潮流的主要因素。根据江苏、浙江、广东、上海等省 (直辖市) 不同类型潮流量站实测成果的分析, 证明潮差与潮流有密切关系, 如图 12-12 所示。

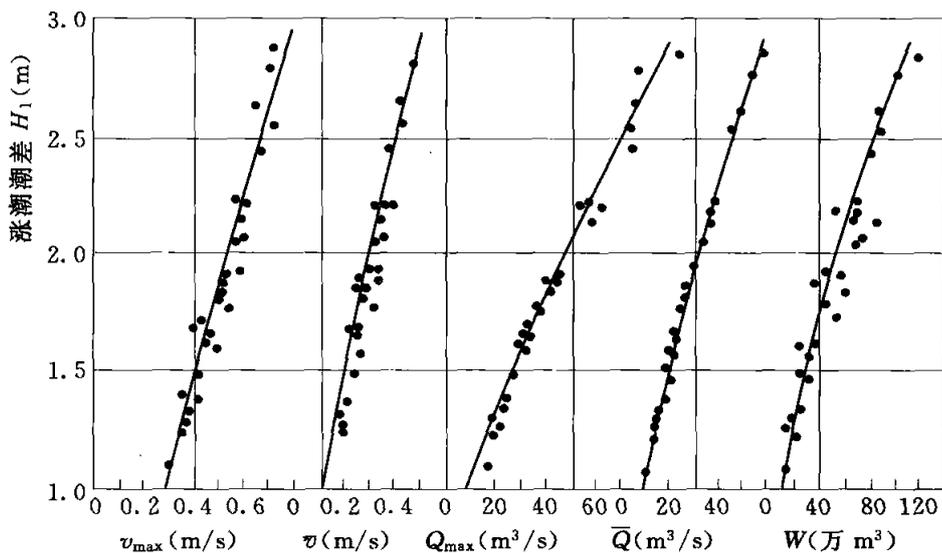


图 12-12 某站涨潮流的潮差与潮流要素关系曲线

2. 影响潮流变化的其他因素

影响潮流变化的其他因素有河水流量、河床冲淤和潮流历时等。因此, 若不考虑这些因素, 仅以潮差与潮流要素点绘关系图, 一般难以获得良好的结果。

河水流量的多寡、潮流强度的大小及潮流历时的长短，一般可以用测站的高、低潮水位（或高潮和低潮的平均潮水位），涨、落憩流水位及出现时间，上、下游相邻两个站的高、低潮位较差等潮汐要素来反映，并且它们之间互相有联系。如河水流量大，河床容蓄多，使低潮位抬高，涨、落潮潮差有一定程度的减少。落潮憩流的出现时间延迟，落憩水位亦抬高，涨潮憩流的出现时间提前，涨潮流的历时缩短，潮流强度亦减弱，落潮流的历时则加长，流速亦相应增强。河水流量小，则反之。

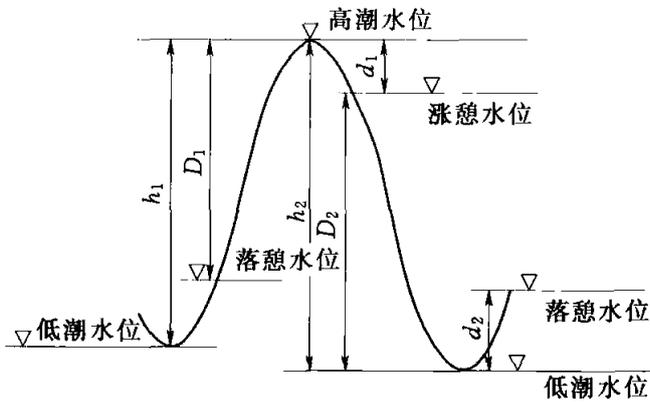


图 12-13 有效波高和负波高示意

期，则反之。

以上可知，为了消除上游来水对潮流的影响，除了以潮差作为主要相关因素外，一般须根据测站具体情况，选择适合于本站潮流变化特性的一个或几个潮汐要素作为参数进行改正。

涨、落潮憩流水位及出现时间是反映河水流量与潮流量相互影响变化的因素之一，除作为改正参数外，有时用落憩至高潮及涨憩至低潮的水位较差（简称有效波高或称有效潮差，如图 12-13 的 D_1 、 D_2 ）代替涨、落潮潮差，作为与潮量或平均流量

相关的主要因素；有时用平均有效波高或称平均有效潮差，即 $\bar{D}_1 = \frac{1}{2}(D_1 + d_1)$ 、 $\bar{D}_2 = \frac{1}{2}(D_2 + d_2)$ 来代替涨、落潮潮差作为相关因素。

涨、落潮流历时亦是反映潮水与河水影响变化的因素之一，也应是处理潮量的重要辅助因素。因潮量为潮流历时与平均流量的乘积，即 $W = \bar{Q}T$ 。如采用潮汐要素与平均流量相关，则不必再用潮流历时作为改正参数。

河床冲淤变化的大小，主要反映在断面面积的增减变化，因此在河床冲淤显著的测站，可用断面面积作为改正参数。

从以上分析可知，进行潮流量数据处理时，应分别根据各站情况，抓住影响潮流变化的一些主要因素进行相关分析或改正。

12.4.2 潮流量推求方法

应用潮汐要素与潮量（或平均流量）相关进行数据处理推流，目前用于实际工作中的有定潮汐要素法、合轴相关法及感潮闸坝站采用的一潮推流法等。

潮水河涨、落潮流的来水及影响潮流变化的因素各不相同，因此不论采用何种方法，涨、落潮流均应分别点绘相关关系图。潮流的年内变化亦随影响因素而定，点绘相关图时也可以不同时期（汛期、枯期）分别用不同的潮汐要素建立相关，但应注意

度亦减弱，落潮流的历时则加长，流速亦相应增强。河水流量小，则反之。又如上游来水保持不变，则潮流强度较大的潮流期，因进入河口的潮流增多，使得高潮水位亦增高，落潮后又因水能面坡降大，使低潮水位亦落得较低，故涨、落的潮差均增大。同时，高潮后至涨憩及低潮后至落憩的水位较差（简称负波高，如图 12-13 的 d_1 、 d_2 ）亦加大。潮流强度较小的潮流

不同曲线推流成果的前后衔接。

现将各种方法介绍如下。

1. 合轴相关法

影响潮流变化的因素较多，采用单一关系不能满足要求，必须经一两个参数改正，并以多个象限相关的方式进行定线，称为合轴相关。用合轴相关法进行潮流量的数据处理，首先分别以涨、落潮潮差作为主要因素与涨、落潮平均流量建立相关，根据该站的具体情况，选择一两个参数进行改正。

定线有以下方法。

(1) 在第一象限内以平均流量为纵坐标，潮差为横坐标，按实测数据点绘相关点，点据旁注明参数值，根据参数值绘等值线。

(2) 第一象限的等值线大致确定后，即可根据各个测点所注参数的数值垂直导致该值相应的等值线上，再水平移至纵坐标上截取读数得改正后的平均流量 Q_1 。

(3) 在第二象限内以 Q_1 为纵坐标，实际平均流量 Q 为横坐标，点绘出 Q_1-Q 关系图。如测点集中在 45° 线的两侧，表示关系良好，即可据此推流，如图 12-14 所示。

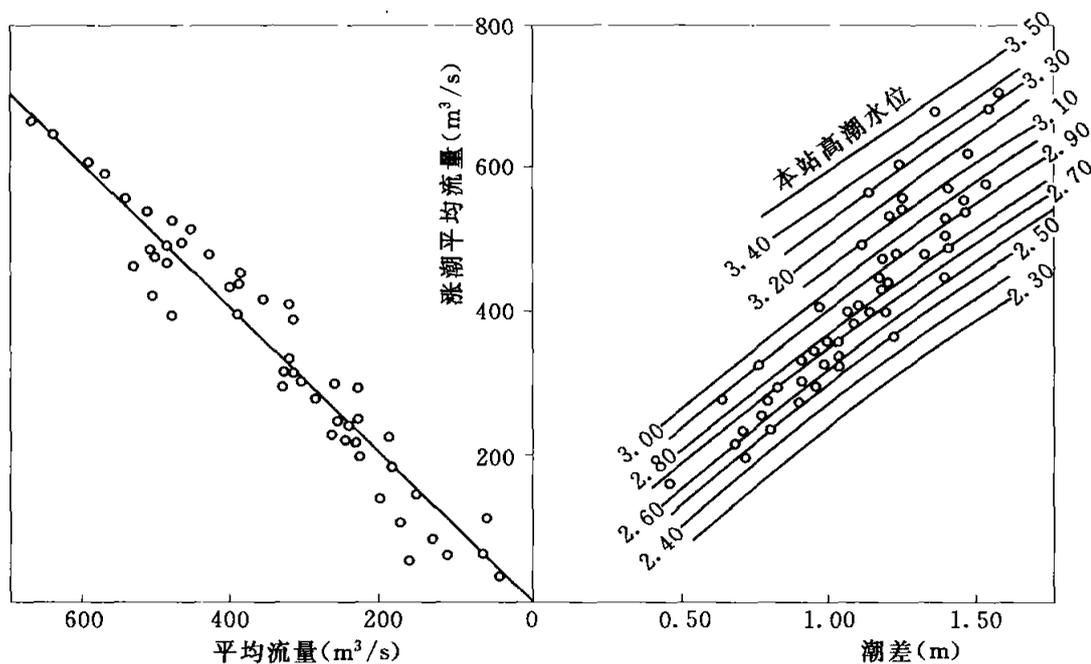


图 12-14 太湖××站涨潮流相关曲线

如 Q_1-Q 关系点子不集中，则在每个点子旁再注上第二个改正参数，并绘等值线，如图 12-15 所示。根据各点所注参数数值，按等值线改正得第二次改正后的平均流量 Q_2 。

(4) 在第二象限内以实测平均流量 Q 为纵坐标， Q_2 为横坐标点绘 Q_2-Q 关系图。如点子能集中在 45° 线附近，各点偏离大都不超过 $\pm 10\%$ ，表示关系良好，可据以推流，如图 12-15 所示。

如点子仍散乱，则应修正第一、第二象限的等值线，或试用其他因素改正。

推流方法为当只有一个参数时（即两象限的合轴相关）根据该站各个潮流期的

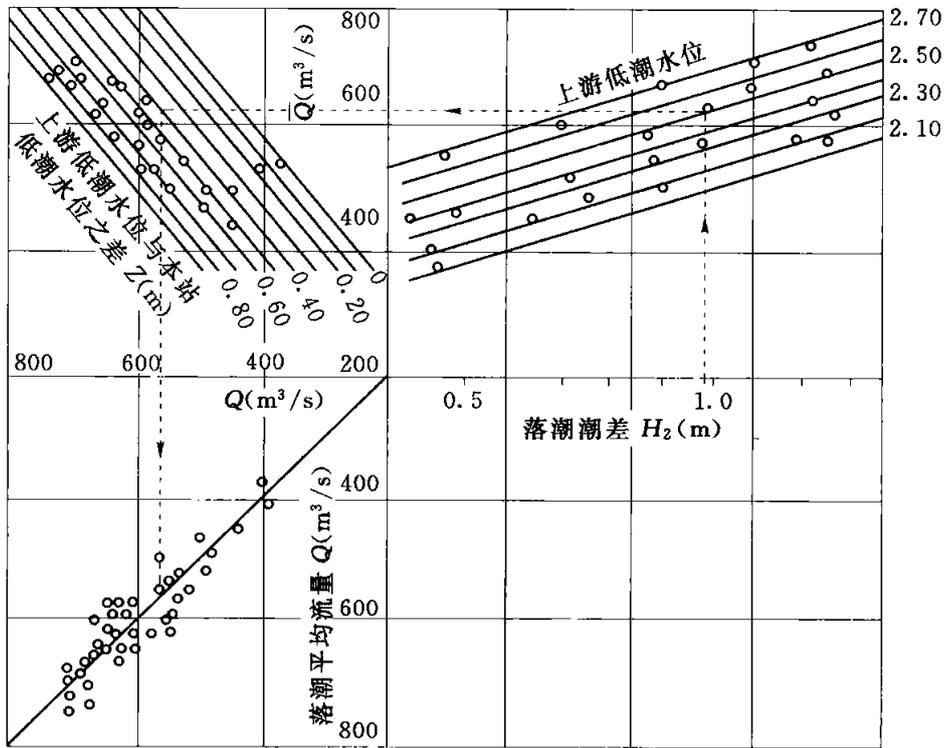


图 12-15 太湖××站落潮流合轴相关

涨、落潮潮差及已知改正参数值，可直接在等值线上查得平均流量；若有两个参数时，首先在第一象限内查得相应的平均流量 Q_1 ，再以 Q_1 及第二个已知改正参数值，在第二象限内查得相应的平均流量 Q_2 。根据所求得平均流量 \bar{Q} ，乘以涨（落）潮流历时 T ，得到涨（落）潮潮量 W ，即 $W = QT$ 。

2. 感潮闸坝站的一潮推流法

(1) 感潮闸坝站水流特性的分析。沿海、河口附近的感潮闸坝站的水流情况除了一般潮水河的特点外，还随闸门启闭而变化。如在关闸期间，内河来水互相调蓄，管理运用又需要控制一定水位，故闸内水位变幅一般不大；开闸期间，因受潮汐的涨落变化，上游来水及堰闸调节控制等影响，水流情况比较复杂。其开闸排涝、泄洪或引潮灌溉时，引、排流量的大小和变化，主要随潮汐和潮流的涨、落，上游来水及闸门开启情况而定，其中以潮流的变化为主。按一般堰闸管理养护的要求，感潮闸坝的闸门启闭，应在闸内外水位相平或接近相等时进行，即 $v=0$ 或 $v \rightarrow 0$ 时。此时启闭闸门的力最小，因此每次开闸和关闸的开始水位 $Z_{开}$ 和 $Z_{关}$ ，实际上相当于憩流水位，而高、低潮水位 $Z_{高}$ 和 $Z_{低}$ 与开闸开始水位的较差相当于有效波高，如图 12-13 中的 D_1 、 D_2 ，即

$$D_1 = Z_{高} - Z_{开}$$

或

$$D_2 = Z_{开} - Z_{低}$$

由此可见，感潮闸坝影响出流的主要水力因素有：

- 1) 有效波高。反映闸下游潮流变化的主要因素，引水时为 D_1 ，排水时为 D_2 。
- 2) 高、低潮水位。反映不同潮汐的潮汐大小和潮流强度。

3) 开闸开始水位。反映受闸门控制情况下, 闸上游内河水位的高低。

4) 闸门开启情况。反映闸门开启的情况, 包括开启孔数、高度、宽度等。

对某一测点, 上述几个主要水力因素对该站引、排流量大小变化的影响又各不相同, 应根据具体情况分析、选用。

(2) 感潮闸坝站的一潮推流法。近来, 江苏试用潮汐要素与一次开闸(引水或排水)的平均流量建立相关关系来推流, 简称“一潮推流法”, 获得初步成效, 其定线推流方法介绍如下。

1) 建立 $DZ_{\text{开}}^n - \bar{Q}$

$$\bar{Q} = f(DZ_{\text{开}}^n) \quad (12-20)$$

引水时可用

$$\bar{Q} = f(DZ_{\text{高}}^n)$$

排水时可用

$$\bar{Q} = f(DZ_{\text{低}}^n)$$

式中: \bar{Q} 为一次开闸平均流量, m^3/s ; D 为有效波高, 涨潮流引水时为 D_1 , 落潮流排水时为 D_2 ; $Z_{\text{开}}$ 为开闸开始水位, m ; $Z_{\text{高}}$ 或 $Z_{\text{低}}$ 为高潮或低潮水位, m ; n 为指数, 各站不同, 可由试错法确定。当采用 $Z_{\text{开}}$ 为相关因素时, 引水时 n 采用 1, 排水时 n 采用 2.5。若采用 $Z_{\text{高}}$ 或 $Z_{\text{低}}$ 为相关因素时 n 可在 1~2.5 的范围内试错确定。

当所建立的关系线符合精度要求时, 即可用以推流, 如图 12-16 为引水时建立的 $D_1 Z_{\text{开}} - \bar{Q}$ 的相关曲线。

2) 建立 $D - Z_{\text{开}} - \bar{Q}$ 相关曲线。此法系以开闸开始水位 $Z_{\text{开}}$ 为参数, 建立 $D - \bar{Q}$ 相关曲线。

在选定开闸开始水位 $Z_{\text{开}}$ 时, 定出 $D - \bar{Q}$ 相关曲线, 如图 12-17 所示。然后由实测点的 D 值在 $D - \bar{Q}$ 曲线上查得相应的流量 Q_c , 再计算出各实测流量 \bar{Q} 与相应于曲

线上查得的流量 Q_c 的比值 (即 \bar{Q}/Q_c) 点绘对应的 $Z_{\text{开}} - \frac{\bar{Q}}{Q_c}$ 关系图, 并通过点群中心定一关系曲线, 如图 12-17 所示。

当上述各步都成立, 则定线结束, 推流时, 以实测有效波高 D , 从图 12-17 曲线查得 Q_c , 又以实测 $Z_{\text{开}}$, 从图 12-17 查得 \bar{Q}/Q_c , 则

$$\bar{Q} = \frac{\bar{Q}}{Q_c} Q_c$$

一潮推流法适用于闸门控制较正常, 能按潮引水或排水, 且每次均在 $v \rightarrow 0$ 时开

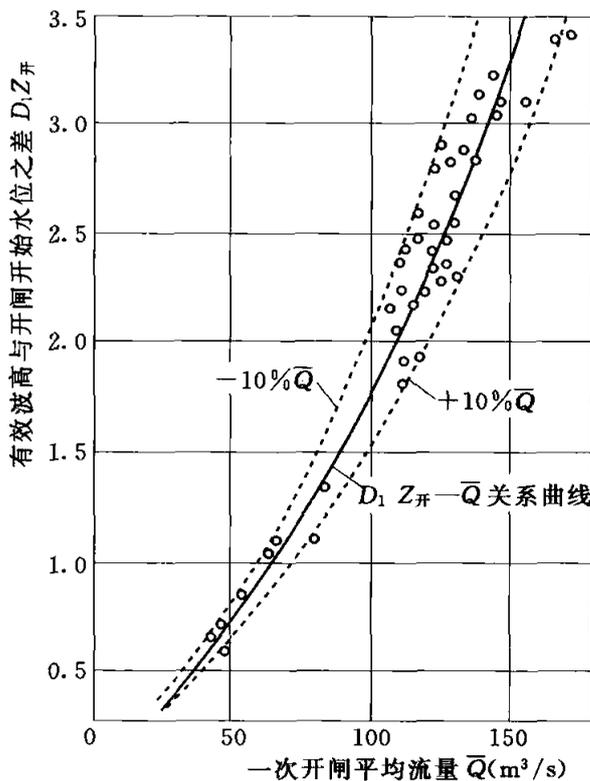
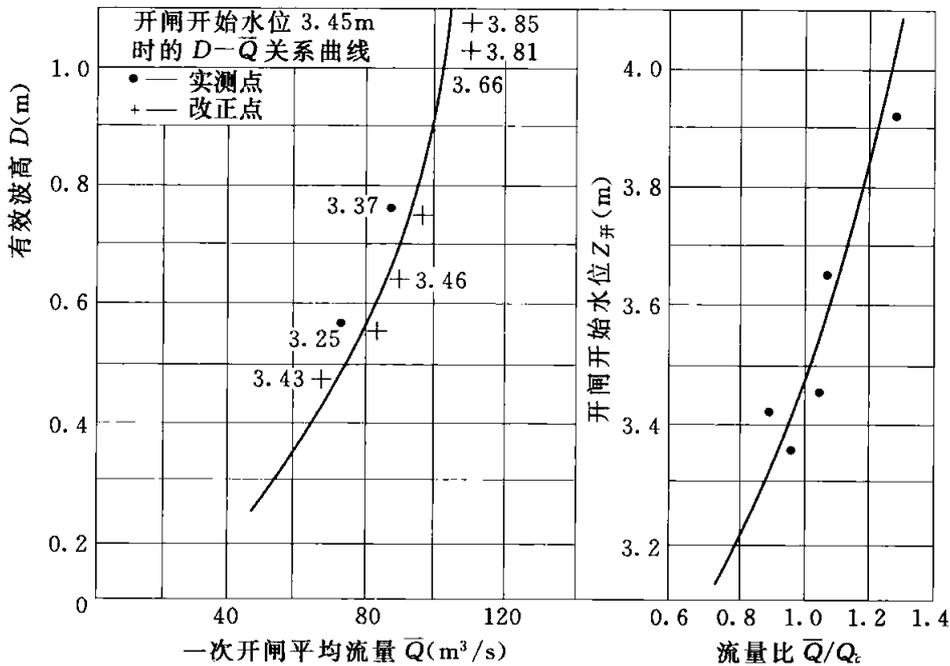


图 12-16 $D_1 Z_{\text{开}} - \bar{Q}$ 关系曲线

图 12-17 $D-Z_{\#}-\bar{Q}$ 关系曲线

闸、关闸的站。若控制管理不善，开、关闸迟早不一或一次开闸过程中有几种开启情况时，不宜使用。

12.5 潮水河悬移质泥沙测验及数据整理

潮水河泥沙的运动方向随着潮流方向的周期性变化亦呈周期性改变。由于流速时大时小，其水流的挟沙能力忽强忽弱，因此泥沙有时沉积，有时又被掀起，悬移质泥沙分布一般比较均匀。在一个潮流期中所取的沙样，憩流附近颗粒较细、含沙量较小，而最大流速附近颗粒较粗、含沙量较大。悬移质含沙量过程线上一般有两个沙峰，涨潮流沙峰高而陡，落潮流沙峰低而平，如图 12-4 所示。

12.5.1 潮水河悬移质泥沙测验

1. 测验期距

潮水河悬移质含沙量与流速一样随潮汐作周期变化，潮输沙率则随流速和含沙量的变化而变。为掌握泥沙变化过程，必须同时施测流速和含沙量。因此，输沙率测验的期距（包括一次连续施测的时间，每月施测的次数，每次含沙量测次分布等）都应与流量测验的期距相同，并在全部测速垂线上同时测沙。潮流量一次至少施测一个潮流期，潮输沙率也应施测相应时间内涨、落潮流不同流向的含沙量变化过程和峰谷特征，这样才能算出该潮流期的涨、落潮输沙量。但为插补憩流而加测流速时，不必测沙，只需在憩流附近测沙一次。

2. 取样方法

悬移质含沙量测验也要求以能测到垂线上各点的同时含沙量为原则。在实践中，真正的同时含沙量是不易测到的，所以只能把测到的含沙量通过改正之后求得同时含

沙量。取样有以下两种方法。

(1) 积深法。用瓶式采样器进行。施测时把采样器等速由水面逐渐下放至河底，又沿原程同样速度上提至水面，所取的水样的含沙量为采样器到达河底时刻的垂线平均含沙量。此法操作简便，并可减少室内处理的工作量。但采样器进口流速和沉放速度不易控制，另外仪器进水口不能达到水底时，必然漏测垂线底层的高含沙量，从而导致测沙成果偏小，因此对精度有一定影响。

(2) 积点法。用横式采样器逐点取样。取样方法有单程及往返双程取样。单程取样是自水面开始逐点依次取到河底，并记下每点取样的时间，以便点绘各测点的含沙量过程线，求出各测点的同时含沙量。双程取样是自水面开始逐点依次取到河底，再从河底取到水面，把往返两次同一测点的含沙量加以平均，或两次取样混合，作为河底取样瞬时的含沙量。在泥沙比较大时，双程取样由于操作时间长，一般不宜采用。

3. 输沙率的计算

(1) 垂线平均含沙量的计算。对于积点法取样，垂线平均含沙量的计算，一般与无潮河流相同，即

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i C_{si}}{v_m} \quad (12-21)$$

式中： C_m 为垂线平均含沙量； C_{si} 为垂线上测点含沙量； n 为测点数； α_i 为各测点含沙量的权重； v_i 为测点流速； v_m 为垂线平均流速。

应该指出的是，式(12-21)的物理意义是通过单位面积的单位体积水量所含的干沙重。按照式(12-21)，在憩流时的含沙量是无法计算的，因为此时 v_m 为零，在流速分布与含沙量分布很不一致时，有时用式(12-21)计算会出现分子分母异号，算出含沙量为负值的极不合理的情况。当垂线上测点同时流速有正负的时候，建议用式(12-22)计算垂线平均含沙量：

$$C_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i C_{si} \quad (12-22)$$

式中各符号同于式(12-21)。

(2) 潮输沙率的计算。输沙率的计算同于非潮河流输沙率的计算，只是断面输沙率为断面上各部分同时输沙率的代数和。

(3) 断面平均含沙量的计算。一般情况下，断面平均含沙量与非潮河流的计算相同，即断面输沙率与流量的比值。但是，正如垂线平均含沙量的计算中出现的问题一样，当含沙量的分布与流速分布不一致时，在憩流前后，则可算出断面平均含沙量出现负值，或出现比所有垂线平均含沙量都大、都小的极不合理现象。这时，断面平均含沙量计算建议用式(12-23)计算为

$$\bar{C}_s = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \bar{C}_{si}}{A} \quad (12-23)$$

式中： a_i 为部分面积； \bar{C}_{si} 为部分平均含沙量； n 为部分面积个数； A 为断面面积。

12.5.2 潮输沙量的计算

潮输沙量的计算包括潮流期内的涨落潮输沙量及净泄（进）沙量的计算。计算的原理，即在一个潮流期内的输沙量为输沙率对时间的积分。实际计算时，用有限差法计算。

设 $Q_{s0}, Q_{s1}, Q_{s2}, \dots, Q_{sn}$ 为落潮流开始与终了测次测得的潮输沙率， $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 为前后顺序相邻测次间的时距，则落潮输沙量 W_{s1} 为

$$W_{s1} = \frac{1}{2}(Q_{s0} + Q_{s1})t_1 + \frac{1}{2}(Q_{s1} + Q_{s2})t_2 + \dots + \frac{1}{2}(Q_{s_{n-1}} + Q_{sn})t_n$$

因 $Q_{0s} = 0, Q_{ns} = 0$

$$W_{s1} = \frac{1}{2}Q_{s1}t_1 + \frac{1}{2}(Q_{s1} + Q_{s2})t_2 + \dots + \frac{1}{2}Q_{s_{n-1}}t_n \quad (12-24)$$

同理，也可计算涨潮输沙量 W_{s2} 。则在一测流期内，净泄（进）沙量 ΔW_s 为

$$\Delta W_s = W_{s1} - W_{s2} \quad (12-25)$$

其值若为正值，则为净泄沙量；若为负值，则为净进沙量。

12.5.3 悬移质潮输沙量的数据处理途径

潮水河悬移质含沙量的大小受到涨潮海水挟带的泥沙、上游河流的来沙及河口段泥沙运动三方面的制约，还受潮汐、潮流的影响而随时做周期性的剧烈变化，它比无潮河泥沙处理复杂得多。用瞬时的潮流、潮汐要素与悬移质泥沙建立关系，难于获得较好的结果。一般以一个潮流期分别对涨、落潮流分析它们的关系较合适。

涨、落潮输沙量大小决定于河水流量，潮流量的变幅，涨、落潮流速及涨、落潮来沙量的大小。这些因素的变化越大，输沙量的变化也越大。从输沙率公式得到的关系为

$$Q = \bar{C}_s Q$$

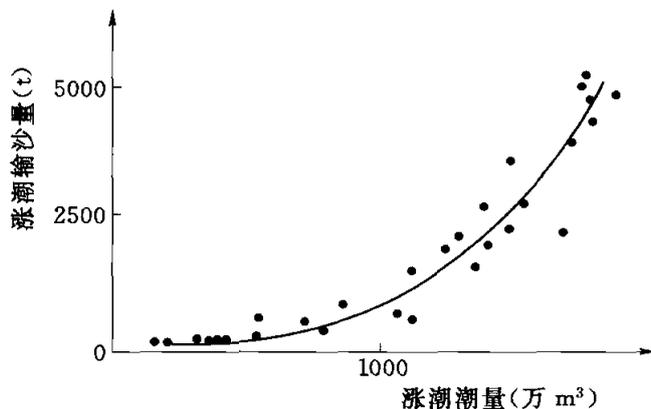


图 12-18 潮输沙量—潮量关系曲线

当 \bar{C}_s 变化比较稳定时，各次涨、落潮的平均含沙量变化很小，则输沙量 (Q_s 反映输沙量) 与潮量 (Q 反映潮量) 有一定的相关关系，如图 12-18 所示。曲线趋势下段较缓，上端较陡，即当潮量较小时，水流挟沙能力小，输沙量也小，即使潮量增减变化，对潮输沙率的增减影响不显著；当潮量较大时，挟沙能力随着增大，潮输沙量也增大，潮量的增减使输沙量有明显的变化。同理，当含沙量变化比较稳定时，涨、落潮平均输沙率与平均流量也有较好的关系。

潮流与悬移质泥沙有一定关系。本章已述潮差等潮汐要素与潮流有密切的关系，如果河水流量变化不大，潮差或有效波高与悬移质泥沙之间也存在一定关系。根据一些站的实测数据点绘涨、落潮潮差与平均含沙量、平均输沙率及输沙量的关系曲线，

说明点子是比较集中的,如图 12-19 所示。

潮水河悬移质泥沙数据处理方法在相关标准中未作介绍和规定,但从上述分析说明,潮水河悬移质泥沙数据的处理也可以与潮流或潮汐要素相关,当然,由于潮水河的悬移质泥沙运行及变化极为复杂,其影响因素除潮汐、潮流要素之外,还与上游来水来沙情况、测站的特性等因素有关,一般不可能只用单一的潮汐、潮流要素建立相关关系,而需根据各站的具体情况,如一两个参数进行改正。如夏字圩站曾用涨潮潮差—潮输沙量建立相关关系,并以涨潮潮量作参数进行改正。

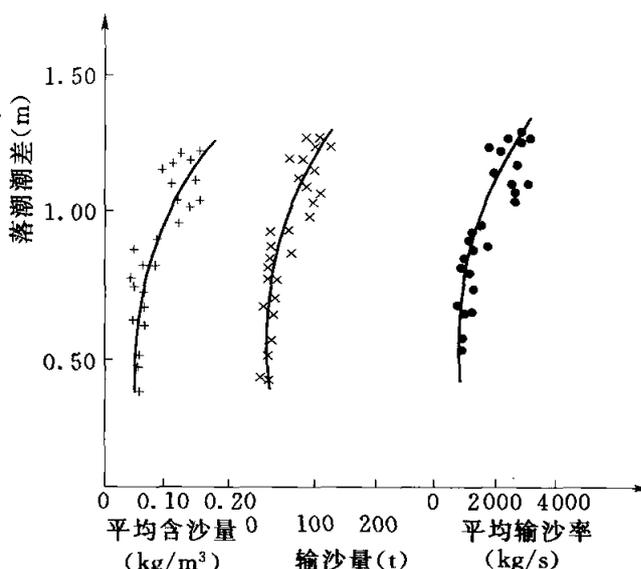


图 12-19 潮差与平均含沙量、平均输沙率及输沙量关系曲线

复 习 题

- 12-1 什么叫潮汐? 什么叫潮流? 为什么潮水河的水文要素会有周期性变化?
- 12-2 什么叫潮流界? 什么叫潮区界? 为什么基本流量站要布置在潮区界?
- 12-3 潮水位的观测与数据整理与一般河流有什么不同?
- 12-4 潮水河流速分布与一般河流有什么不同?
- 12-5 潮水河的流量测验的测次布置与一般河流有何不同? 为什么要用代表潮法测流? 怎样选择代表潮?
- 12-6 为什么潮水河流量测验一般要测流向? 垂线平均流速流向的施测和计算方法如何?
- 12-7 潮水河潮量如何计算? 为什么要计算净泄量?
- 12-8 潮流与哪些潮汐要素有关?
- 12-9 潮流量的推求方法有哪些?
- 12-10 潮水河垂线平均含沙量与断面平均含沙量计算与一般河流有何不同?

第 13 章

水信息系统简述

13.1 概 述

随着当今科学技术的发展，完整的水信息系统应是水文、水质数据的收集、传输、整理、存储、检索，以及水质自动监测和水文自动测报系统的统一体。

建立水信息系统的目的是对工程设计与水资源的勘测、规划、利用、管理和洪涝灾害的预测、预报及突发性灾害的决策以及科学研究提供所需要的、可靠完整的水信息和情报。要达到此目的，需要有收集、处理信息的设备；有快速、准确的传输手段；有科学、规范的管理，有一系列可靠的存储、检索软件和硬件。为此，各国水文工作者做出了不懈的努力。目前，一些国家和地区，已有了可以对水位、雨量、水质等水信息要素进行自动化观测并使之信息化的仪器，可以用有线、无线甚至卫星进行信息传输。在对水信息的处理方面，已经有功能齐全的各种程序，一些国家已建立了各种水信息数据库，对用户进行各种有效的服务。

我国在建立水信息系统方面也做了不少的工作。一些自动化、信息化的仪器正在研制，并广泛开展了计算机处理水文数据工作，水位、流量、含沙量及降水量处理的全国通用程序已通过鉴定并在全国生产中运用。大部分流域、地区已建成水信息数据库，全国正在规划和筹建全国水信息数据库网络。

13.2 水信息的收集与传输

水信息收集与传输包括水文信息和水质信息的收集与传输。（水质信息的收集已在第 5 章里详述，本章仅简要介绍水文信息的收集与传输）

水文信息的收集有两个基本目的：①确定某地区的水文情势，为规划、设计以及掌握水资源的情况进行方向性的决策；②预报洪水动态及长短期供需水的趋势。由于信息收集的目的不同，信息收集的形式及传输的方式也不同。后者对得到水文信息的时间将更为重要。

13.2.1 水文信息的收集形式

水文信息的收集形式与水文数据观测的发展阶段有关，一般有以下4种。

- (1) 由人工直接观测，其成果是书写的各种数据报表。
- (2) 由一般老式记录仪器进行自记观测，其成果为表明水文要素变化过程的过程线图，例如自记水位计得到的过程线，自记雨量计画的雨量记录图等。
- (3) 用较新的非传送自记化仪器进行观测，其成果为能输入至计算机的水文信息，例如穿孔纸带、磁带、等固态存储器记录。
- (4) 用完全自动化的记录仪和传送器的仪器来收集水文信息，它可以通过有线或无线，甚至用人造地球卫星直接传输。

13.2.2 观测数据的信息化处理

观测数据的信息化处理是指将实测或记录的观测数据或曲线转换成计算机能够识别的数据信息。对于人工观测数据输入至信息系统的最常用方法是用计算机终端输入至计算机。有些国家的水文数据中心有各种不同的人工转换装置。例如，有一种装置叫符号读识卡片，把观测结果写在卡片上，转换装置就会自动地将它转换成计算机能够识别的信息。

把记录图纸信息化处理的最常用手段是采用数字化仪。数字化仪可以给出等时距的读数，沿着曲线的轨迹等增量地连续读入符号，从而把观测到的曲线记录下来，信息化地存储起来或者直接输入至计算机。

13.2.3 水文数据的信息化收集

水文数据的信息化收集，是采用适当仪器，使所收集的水文数据信息能直接为计算机识别，这是水文仪器发展的一个方向。

水位观测通常使用浮子式或气压式自记水位计，其记录部分可采用能将水位代码穿孔于纸带上的水位记录器。目前，已对纸带数字记录器作了改进，较多地采用磁带数字记录器。

水位记录纸带（磁带）可直接输入至计算机，亦可通过一定信息转换装置变换成计算机可识别的信息存储起来。

降水数据对于洪水预报是非常重要的信息。尤其对于暴雨区，增大雨量站的密度，加快雨量信息传播的速度，对于加长洪水预报的预见期，提高洪水预报的精确度更有现实意义。我国暴雨区较多，因此，很多地区对于建立自动测报水文信息系统具有很高的积极性。

带有记录器的自记雨量器的感应器，最常用的是虹吸式和翻斗式雨量器，后者把雨量信息化比较方便。

磁带雨量记录器、传送式雨量器是直接把雨量信息记录（存储）或传送出去的装置。其中，有一种形式是仪器可以通过公众电话系统接受询问，另一种形式是按照一定的准则用无线电来启动或传动信息，还有是直接连续向数据处理中心传送信息。

对于流量信息的收集，一般是通过在水文站上进行流量测验来率定水位流量关系，通过水位过程来推求流量过程。因此，对于流量过程的信息收集，最好的办法是

确定水位流量关系的稳定过程,这样便可以用信息化的水位过程来推求任何时候的流量。若能确定出一定的流量计算公式,也可用便于信息化的其他水文要素来计算出流量。用较为灵便的流量测验方法,如用溶液法、超声波法等进行经常性的、信息化的流量测验,也可得到流量过程。

13.2.4 遥感用于水文信息的收集

遥感就是不通过直接接触来探测一个物体的特征。遥感器可以是在地面上的、空间的或卫星上的。已在水文工作中试验过的遥感技术包括有近红外线摄影、远红外线扫描、雷达扫描以及紫外线扫描等。在扫描方法中,为输入信号用电子操纵来产生类似照片的影像。

不同波段的影像,所显示物体间影像效果是不一样的,因此各不同波段相片上所产生的解象能力也不同。流域状况表示水文要素形成的下垫面条件,水系状况则反映了河道特征。利用遥感技术进行流域及水系状况的调查,可以准确地查清流域的范围、面积、河长、河网密度、河宽、河流弯曲度等情况。这是因为不同的地理、地貌情况,在不同波段的图片上,其光谱效应是不同的,利用图片对各种地物加以判释,即可得出流域及水系的特征。例如卫星照片MSS4对水体有一定的透视能力,根据水体清澈状况的不同,可以不同程度地透视水下地形,MSS6卫片的光谱特征与河流的含沙量几乎呈线性关系;MSS4的图像则能判断水质污染引起的生态平衡失常,采用MSS6、MSS7可以研究土壤水量的情况等。

13.2.5 水文信息的传输

水文信息传输的可靠性及传送速度对于水文信息自动测报系统是非常重要的,因为时间对于水文预报而言,有时就意味着生命和财富。

民用有线通讯线路有时被用作水文信息的传输工具。但是这种传输方式,遇到特大暴雨时会被破坏,平时也容易被干扰,因此可靠性不高。另外,在传输时,人的干预无法避免,而用较先进的信息化仪器得到的信息又无法传输,因此,这种传输方式是仅适用于人工观测的较低级的传输方式。

无线电无线传输也是一种常用的传输方式。一般人工观测测站可以借助于一般无线电台传输水文信息。特别重要的测站,可以专设无线电台,汛期专门输送水文信息。无线电信息可以通过专门的译报程序,翻译成人们能直接识别的报表,加快了水文信息的传送速度。但是,一般电报接收装置与专门水文信息系统的计算机网络联网多有不便。因此,一些重要地区都建立有自己单独的微波传输系统,与水文信息处理的计算机形成网络,专门为水文预报、工程调度服务。微波传输提高了水文信息传送的可靠性,加快了水文信息处理及服务速度,但是这样的测报系统需要较多的资金及较高级的管理人员,且微波传输的距离不宜太长,因此其广泛建立与使用受到了限制。

对于远距离传输,人造地球资源卫星是一种更先进的传输工具。它可以有大量的信息通道,同时传输和处理多种水文信息,并可把测到的一些信息化的水文信息传输到水文信息处理中心(中心计算机),尽快地处理、决策,为国民经济各部门服务。

13.3 水文信息的处理

13.3.1 单一关系线的拟合

在水文数据处理中,经常用一些水文要素间的关系来推求难以观测到的水文要素的变化过程。例如,用水位流量关系来推求流量过程,用单断沙关系推求断沙过程等。在这些关系中,最常见到的基本关系线为单一关系线。在率定这些水文要素间的关系时,人工处理一般是通过关系点的点群中心,用适线法定出关系曲线。用计算机进行处理时,一般用一定的关系方程对实测的关系点进行拟合。

1. 曲线拟合中的数学模型简介

用一定的数学模型来拟合单一曲线的工作,过去做过不少的尝试。人们所用过的数学模型有幂指数型、抛物线型、双曲线型、线性逐步回归及浮动多项式等。

幂指数方程是流量数据处理中最常用的方程,其形式为

$$Q=C(h+\alpha)^\beta$$

式中: Q 为流量; h 为反映水位高低的变量; C , α , β 为常数。

抛物线方程是最早用来拟合水位流量关系的方程之一,其形式为

$$Q=A_0+A_1Z+A_2Z^2$$

式中: Q 为流量; Z 为水位; A_0 , A_1 , A_2 为待定常数。

双曲线方程,其形式为

$$\frac{(Q-d)^2}{a^2}-\frac{(Z-c)^2}{b^2}=1$$

式中: a , b , c , d 为待定常数; Z , Q 分别为水位与流量。

大家知道,一些函数可以展开为幂级数,通过展开整理,其级数的形式相同,一般形式为

$$Q=A_0+A_1h+A_2h^2+\dots+A_mh^m+\dots$$

式中: A_0 , A_1 , \dots , A_m , \dots 为常数; h 为反映水位高低的变量。

若取上式的 $m+1$ 项对原函数进行逼近,则以上级数可以用最高次为 m 的多项式表示,即

$$Q=A_0+A_1h+A_2h^2+\dots+A_mh^m \quad (13-1)$$

多项式方程是精度较高、通用性较强、目前应用较多的方程形式。

线性逐步回归数学模型的方程形式为 $Q=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots+b_nx_n$ 。它是应用最小二乘法原理,对所形成的正规方程组进行线性变换,成为标准化正规方程。在求解标准正规方程组时,不是直接求解,而是根据其对因变量有无显著贡献,把那些贡献不大的自变量函数剔除掉。为达到此目的,首先从只包括一个自变量函数的回归方程开始,接着是有两个自变量函数的回归方程,并反复进行。①对已在回归方程中的自变量函数进行显著性检验,显著者保留;②对不在回归方程中的其余自变量函数挑选最重要的一个自变量函数进入回归方程,直到最后回归方程中再不能剔除任一自变量函数,也不能再引入自变量函数为止。

由于这一方法是通过自变量函数逐步筛选来完成的,故称为逐步回归。

2. 浮动多项式配方程模型

浮动多项式配方程模型是用最小二乘法选配项数不等的若干个多项式方程,根据《水文年鉴编印规范》规定的单一线精度指标及单一曲线的水文特性,从若干个方程中选取符合水文特性的最优多项式作为最终选配的方程。

(1) 最小二乘法选配多项式方程。若有 n 个观测点,选配 $m+1$ 项的多项式方程,其自变量为 h ,因变量为 Q ,则每一个测点都应有一关系式, n 个测点有 n 个关系式 ($n > m+1$),即

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= A_0 + A_1 h_1 + A_2 h_1^2 + \cdots + A_m h_1^m \\ Q_2 &= A_0 + A_1 h_2 + A_2 h_2^2 + \cdots + A_m h_2^m \\ &\vdots \\ Q_n &= A_0 + A_1 h_n + A_2 h_n^2 + \cdots + A_m h_n^m \end{aligned} \right\} \quad (13-2)$$

由于各个测点都有误差,各个测点并不严格满足式 (13-2),因此式 (13-2) 为一矛盾方程组。最小二乘方原理,就是使所配方程与每一实测点的离差平方和为最小,即

$$\sum_{i=1}^N [Q_i - (A_0 + A_1 h_i + A_2 h_i^2 + \cdots + A_m h_i^m)]^2 = S$$

取极小值。要满足此条件,只需对各待定系数求偏导数,并使其等于零,即

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sum_{i=1}^N [Q_i - (A_0 + A_1 h_i + A_2 h_i^2 + \cdots + A_m h_i^m)]^2}{\partial A_0} &= 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^N [Q_i - (A_0 + A_1 h_i + A_2 h_i^2 + \cdots + A_m h_i^m)]^2}{\partial A_1} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^N [Q_i - (A_0 + A_1 h_i + A_2 h_i^2 + \cdots + A_m h_i^m)]^2}{\partial A_m} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13-3)$$

该方程组有 $m+1$ 个待定系数,有 $m+1$ 个方程,有唯一解。方程组 (13-3) 求出偏导数后的形式为

$$\left. \begin{aligned} A_0 \sum_{i=1}^N h_i^0 + A_1 \sum_{i=1}^N h_i + A_2 \sum_{i=1}^N h_i^2 + \cdots + A_m \sum_{i=1}^N h_i^m &= \sum_{i=1}^N Q_i h_i^0 \\ A_0 \sum_{i=1}^N h_i + A_1 \sum_{i=1}^N h_i^2 + A_2 \sum_{i=1}^N h_i^3 + \cdots + A_m \sum_{i=1}^N h_i^{m+1} &= \sum_{i=1}^N Q_i h_i \\ &\vdots \\ A_0 \sum_{i=1}^N h_i^m + A_1 \sum_{i=1}^N h_i^{m+1} + A_2 \sum_{i=1}^N h_i^{m+2} + \cdots + A_m \sum_{i=1}^N h_i^{2m} &= \sum_{i=1}^N Q_i h_i^m \end{aligned} \right\} \quad (13-4)$$

方程组 (13-4) 称为正规方程组。此方程组为一线性方程组,其系数矩阵与自由项组成方程组的增广矩阵。解方程组 (13-4) 便可求出各待定系数 A_0, A_1, \dots ,

A_m ，即求出了有一确定项数的多项式方程。

(2) 浮动多项式。如上所述，解方程组 (13-4)，仅求出一项数确定的一个多项式方程，改变多项式的项数，则可用上述方法求出多个方程。因此，要建立浮动多项式首先要确定多项式的最多项数。实践表明，一般多项式最多项数取 12 项就足够了，而对数浮动多项式的最多项数取 8 项即可。

要选取最优多项式，应有一个精度指标。关系方程的精度可以用一定置信水平的关系方程的不确定度来衡量。

一定置信水平的关系方程的不确定度与实测关系点对关系方程的标准差、选用关系方程的形式、水位的高低和实测点的测次等因素有关。

在反映关系方程精度情况的诸因素中，对于测次一定的数据，其关系点偏离关系方程的相对标准差是最重要的指标。在项数不等的多个多项式方程中，实测点偏离关系线的标准差 S_y 建议用式 (13-5) 计算为

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_{ci} - Q_i}{Q_{ci}} \right)^2 / (N - f)} \quad (13-5)$$

式中： Q_i 为实测值； Q_{ci} 为关系方程推算值； N 为测次数； f 为自由度损失值，一般等于多项式的项数。

项数不等的多个多项式方程中，相对标准差小者为优。

(3) 方程检验。SD244-87《水文年鉴编印规范》对单一关系线的定线有着具体规定。例如对于单一水位流量关系规定为水位流量关系点的分布，若 75% 以上的点与关系曲线的偏离相对误差：流速仪高、中水不超过 $\pm 5\%$ ，流速仪法低水及水面浮标法不超过 $\pm 8\%$ ，可定为单一线。同时 SD 244-87《水文年鉴编印规范》还规定进行符号检验、适线性检验、偏离数字检验等。对于单一水位流量关系，一般测站为一下凹的增值曲线，因此不允许曲线反曲。计算机所拟合的水位流量关系方程应从以上几方面来检验所定方程的合理性。

由于计算机拟合方程时用的是最小二乘法，一般情况下符号检验与偏离数字检验作用不明显，而适线性检验比较有效，其检验公式为

$$u = \frac{|K - 0.5(n-1)| - 0.5}{0.5 \sqrt{n-1}} \quad (13-6)$$

式中： n 为测次数； K 为水位按高低排序后，相邻点偏离关系方程的符号异号的次数。

适线性检验为单侧检验，否定域仅在相邻点同号一侧，因此，若置信水平取 95% 时 ($\alpha=0.05$)，则 $u < 1.64$ 为合格。

单一曲线，其线型一般应符合一定的水文特性。例如，单一水位流量关系方程一般不允许出现反曲。而用计算机拟合多项式方程时，有时会出现反曲。这是因为用最小二乘法拟合多项式方程时，其线型主要取决于测点分布。出现反曲现象的测点分布特点是：一般测次较少，且分布不均，流量偏小的测点较多或有流量特别偏小的测点。图 13-1 为高水出现反曲的实例。

造成方程反曲测点分布的原因，有水文测验方面的，也有洪水本身特性造成的。例如，有的测站涨水历时很短，且测验条件困难，水位流量关系本身为一幅度很小的

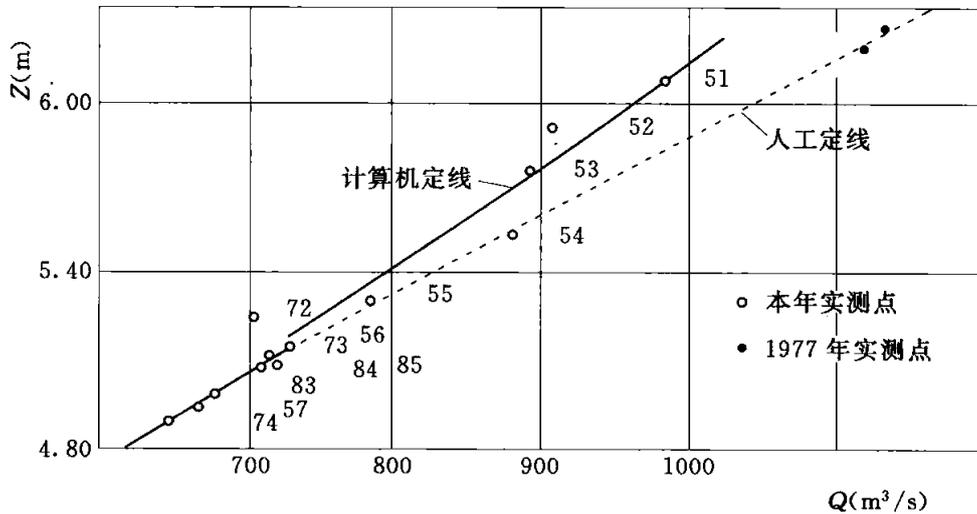


图 13-1 某站 1980 年高水部分水位流量关系

绳套曲线，这样就会造成落水测点较多、且流量偏小，用多项式定线时出现反曲的现象。

造成方程反曲的另一个原因是所用多项式的项数太多。直线方程谈不上反曲，二次三项式，其二阶导数为一常数也不会出现反曲，四项式其二阶导数为一直线方程，可能出现一次反曲（反曲处二阶导数为 0）。项数越多，反曲的可能性越大，若 n 个测点，选配 n 项的多项式（各个测点相互独立），将配出通过每个测点的多项式，画出曲线将为扭曲很大的曲线。

由于选配的多项式方程会出现反曲现象，因此，在使用浮动多项式时，对明显可造成反曲的测点分布，在定线时应加以处理。例如，加进一些历史上的高水控制点，如图 13-1 中所示，加进了 1977 年两控制点，即可使方程改观。

对于有些方程可能造成的反曲，在浮动多项式中加进反曲检查来加以排除。

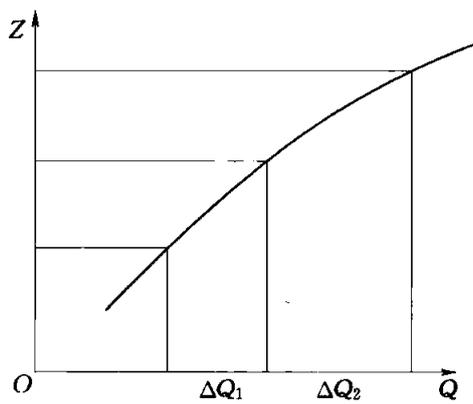


图 13-2 反曲的检查示意

反曲检查的方法可以根据方程的形式，求其二阶导数，其小于零者为反曲。亦可按一定的水位间隔推求流量，若相邻点水位差 ΔZ 为一常数，其相应推出的流量差为 ΔQ ，若 ΔQ 随着水位的增高逐渐增大，则属正常，反之，则为反曲。如图 13-2 所示， ΔZ 为常数时， $\Delta Q_2 < \Delta Q_1$ 为反曲。反曲的多项式为不优的多项式。

综上所述，若所拟合的方程能通过适线性检验且反曲检查标准差合格，即得到一个合格的单一关系方程。

(4) 浮动多项式配方程模型。浮动多项式配方程模型是以上“(1)、(2)、(3)”，部分的综合，即用最小二乘法选配多个多项式方程，并计算关系点偏离关系方程的相对标准差，相对标准差小者为优，从多个多项式方程中，挑选出精度最高，并能通过适线性检验、反曲检查及标准差合格的单一关系方程。

图 13-3 即浮动多项式配方程模型所定的单一水位流量关系曲线。

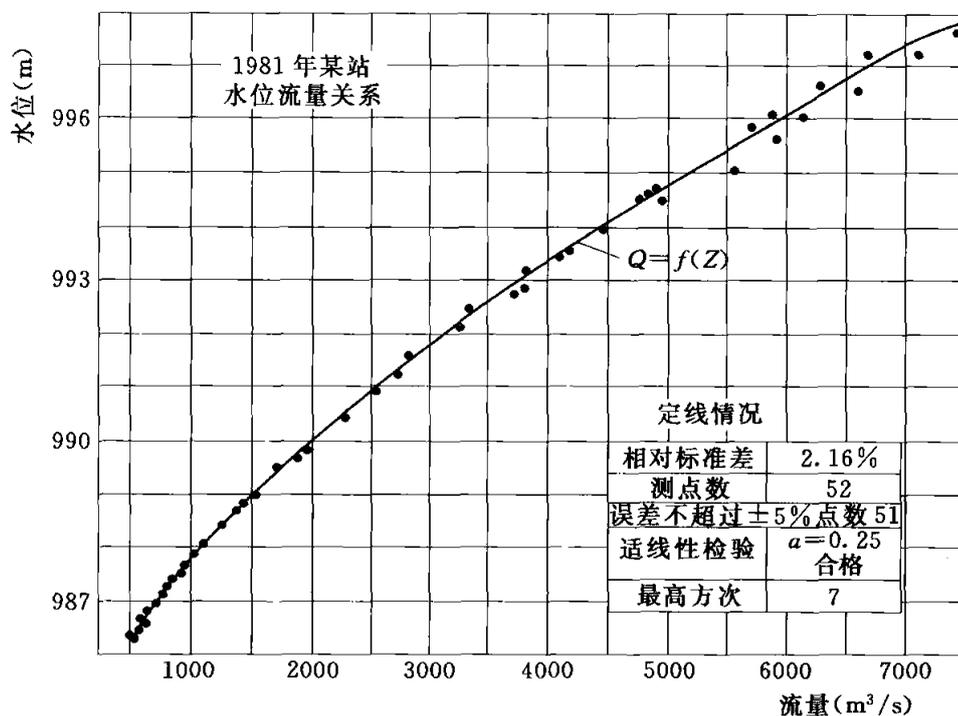


图 13-3 浮动多项式拟合的某站水位流量关系

图 13-4 为浮动多项式配方程模型的框图。其功能是，一组实测点据总测次为 N ，自变量为 h ，因变量为 Q ，从直线方程逐次加 1，选配最多项为 MN 的 $MN-1$ 个多项式方程，经最优比较和反曲检查、适线性检查，从 $MN-1$ 个多项式中选出最优多项式作为选配的方程。其多项式的系数，存放于数组 Ax 之中，最优多项式的项数存放于之 KK 中。

13.3.2 不稳定水位流量关系的处理

1. 单值化处理

不稳定的水位流量关系是非单值的，这给使用计算机定线带来一些不便。把不稳定的水位流量关系通过一定的水力因数处理，使之成为单值关系，这是用计算机进行定线最常用的方法。

(1) 抵偿河长法。由第 6 章可知，抵偿河长法是利用 $\frac{1}{2}$ 抵偿河长处的水位与下断面流量之间的单值关系，使复杂的水位流量关系成为单一关系的方法。其中，本站水位后移法是把本站的实测流量与本站测流时的平均时间后移 $\frac{1}{2}$ 抵偿河长传播时间的水位建立关系，从而使受洪水涨落影响下的绳套曲线变成单一关系。

后移时间的确定，可以发挥计算机运算速度快的特点，对后移时间进行优选。对于受洪水涨落影响的测站，若有一后移时间 Δt ，它可以使 t 时流量与 $t+\Delta t$ 时本站水位有最小二乘意义上的最佳拟合，且有最小的相对标准差，则认为 Δt 为此测站的最佳后移时间，即 $\frac{1}{2}$ 抵偿河长的传播时间。由于一个测站的后移时间变化不大，而不同

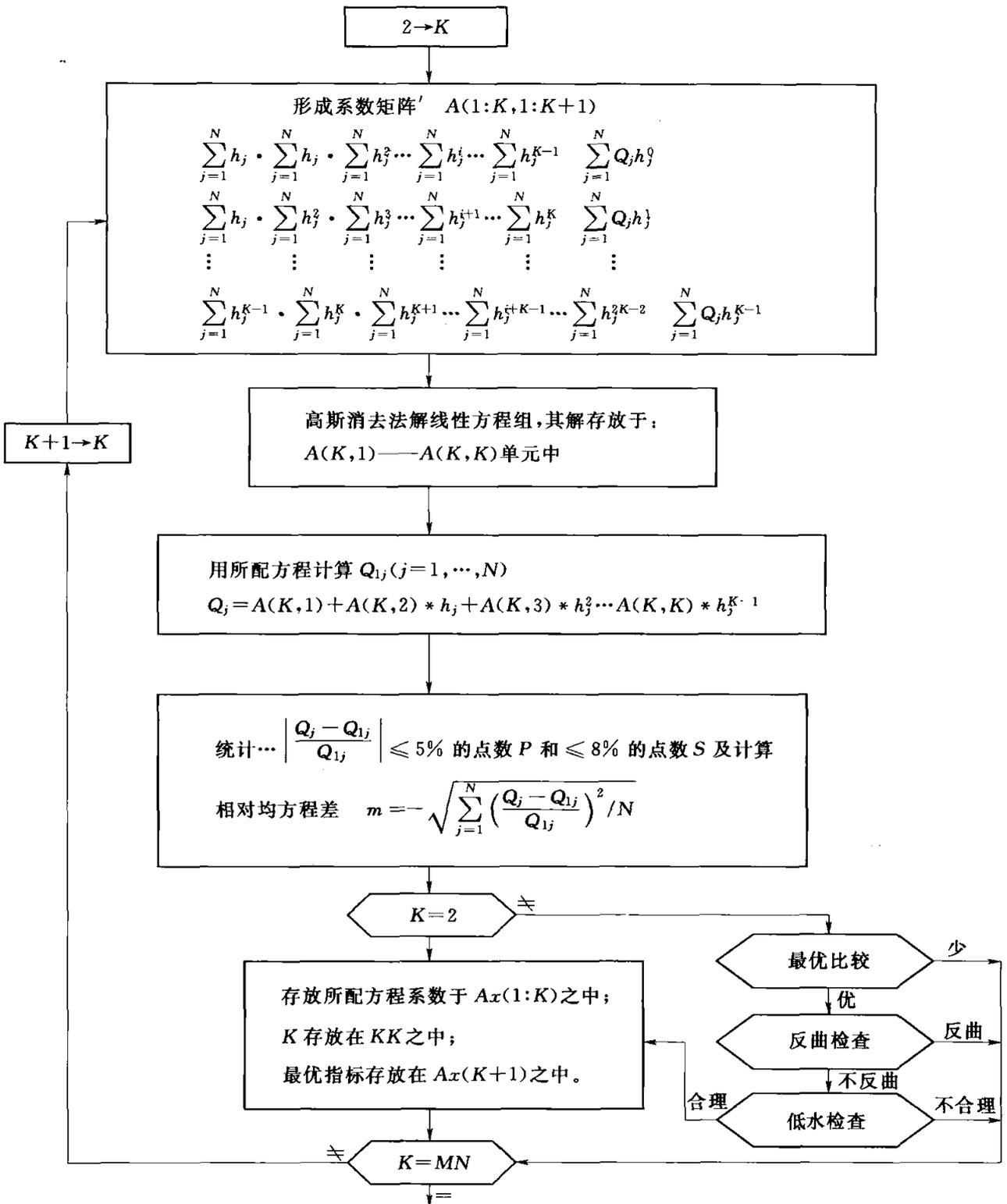


图 13-4 “浮动多项式配方程模型” 框图

测站的后移时间相差较大, 因此优选时, 最好能输入一个接近于本站最佳后移时间的初值。

综上所述, 本站水位后移法用计算机处理的步骤如下。

- 1) 给后移时间以初值 Δt , 计算各实测流量后移时间 Δt 后的水位 $Z_{t+\Delta t}$ 。

2) 用浮动多项式拟合 $Z_{t+\Delta t} - Q_{t实}$ 关系方程, 并计算实测关系点偏离关系方程的相对标准差 S_e 。

3) 变换 Δt 重复前两步骤的计算, 并比较相对标准差 S_e , 小者为优, 把较优的 S_e 及相应的方程存放起来。

4) 在一有限的区间内进行优选, 并得出最优的 S_e 及相应的后移时间。此后移时间则认为是 $\frac{1}{2}$ 抵偿河长的传播时间。相应的关系方程即所求的本站后移水位与流量的关系方程。

5) 由优选出的后移时间, 在已知的本站水位过程中求得后移水位, 代入关系方程, 即可推求出各个时刻的瞬时流量。

本站水位后移法简单方便, 利用计算机优选后移时间, 对于主要受洪水涨落影响的测站可以取得良好的效果。但是对于复式洪水绳套流量明显偏小的测站, 应对复式洪水进行校正处理后方能应用。

(2) 落差指数法。根据落差法的原理, 即

$$\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta} = f(Z) \tag{13-7}$$

呈单值关系, 通过优选落差指数 β , 建立 $\frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 与水位的关系方程。因此, 落差指数法的关键是优选落差指数。

通过一些测站的研究, 落差指数 β 与所定关系方程的标准差有如图 13-5 的关系。

优选落差指数 β 时, 可用图 13-5 所示特点, 经几次试算即可求出标准差最小时相应的 β 值来。这样可以大大提高优选速度。

0.618 法是目前常用的优选 β 的方法。其优选区间在事先确定的 β 可能出现的极大值与极小值之间。按照一定的计算公式, 在优选区间计算出两个 β 值来。

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \beta_{min} + 0.382(\beta_{max} - \beta_{min}) \\ \beta'_1 &= \beta_{min} + 0.618(\beta_{max} - \beta_{min}) \end{aligned} \right\} \tag{13-8}$$

用 β 与 β'_1 分别计算出与各实测流量点相

应的 $\frac{Q_i}{(\Delta Z_i)^{\beta_1}}$ 和 $\frac{Q_i}{(\Delta Z_i)^{\beta'_1}}$ 值来, 并分别选配 $Z_i - \frac{Q_i}{(\Delta Z_i)^{\beta_1}}$ 与 $Z_i - \frac{Q_i}{(\Delta Z_i)^{\beta'_1}}$ 两个关系方程并

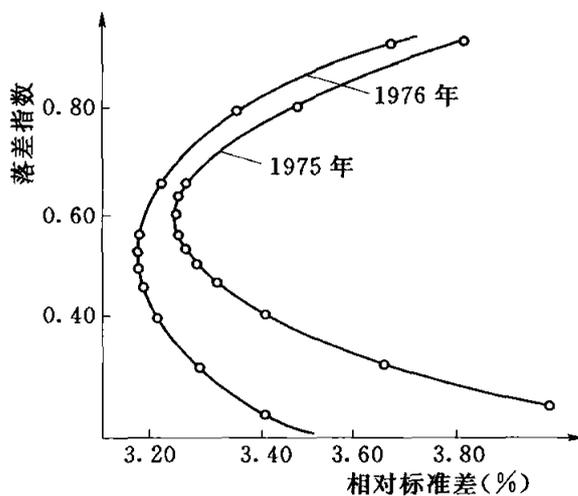


图 13-5 某站落差指数与相对标准差关系

算出相应的标准差 S_1 和 S'_1 。比较 S_1 与 S'_1 的大小, 若 $S_1 > S'_1$ 时, 则认为最优的 β 在 β_1 与 β_{max} 之间。反之, 如图 13-6, 则认为最优的 β 在 β'_1 与 B_{min} 之间。

当 $S_1 > S'_1$ 时, 如图 13-6 所示, 第二次优选时, 根据式 (13-9) 算出 β_2 与 β'_2 :

$$\left. \begin{aligned} \beta_2 &= \beta_1 + 0.382(\beta_{max} - \beta_1) \\ \beta'_2 &= \beta_1 + 0.618(\beta_{max} - \beta_1) \end{aligned} \right\} \tag{13-9}$$

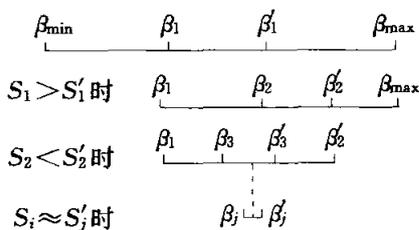


图 13-6 0.618 法优选过程

同时算出 β_2 与 β'_2 相应的标准差 S_2 与 S'_2 。反复比较、截取，直至 $|S_j - S'_j| < \delta$ 即 $S_j \approx S'_j$ 时为止。此时的 β 即为所求，其相应的 $Z_i - \frac{Q}{(\Delta Z_i)^\beta}$ 关系方程为推求流量所用的关系方程。

推流时，应算出各瞬时水位相应的落差，由优选出落差指数 β 及 $Z - \frac{Q}{(\Delta Z)^\beta}$ 关系方程，即可计算出各瞬时流量。有些测站，落差的计算是通过两个水位参证站计算出来的，而两个参证站是通过式 (13-10) 来计算出综合落差。

$$\Delta Z = \alpha \Delta Z_1 + (1 - \alpha) \Delta Z_2 \quad (13-10)$$

式中： ΔZ 为综合落差； ΔZ_1 ， ΔZ_2 分别为两个参证站算出的落差； α 为第一个参证站的落差权重。

α 的确定也可通过计算机优选计算出来。 α 与相对标准差亦有类似图 13-5 的关系，因此可根据这种关系求出相对标准差最小时的 α 值。

α 也可以用 0.618 法进行优选。但是，由于 α 和 β 的变化范围并不是很大，因此 0.618 法在此处是一种并不优的算法。

2. 洪水绳套曲线的模拟

对于一个测站，往往在不同时期受多种因素的影响，因此，单纯用一种水力因素型方法来推求流量往往得不到很好的效果。人工定线时，一般用连时序法来解决这种复杂的问题。

使用计算机处理可以吸取人工连时序法的优点，同时利用计算机运算速度快的特点，对一些水力因数进行定量计算与分析。洪水绳套曲线的模拟就是用水力因数“+”时序型计算分析的定线推流方法。

对洪水曲线模拟时，首先要用水力因数法求解一标准洪水绳套。标准绳套是能反映测站洪水特性的单式洪水的水位流量关系。所用公式为式 (9-28)，即

$$Q_m = Q_c \sqrt{1 + \frac{1}{S_c U} \frac{dZ}{dt}}$$

标准洪水绳套主要体现在 $Z - Q_c$ 、 $Z - \frac{1}{S_c U}$ 两个关系方程上。求解两个方程时，可用校正因素法试算求解单式洪水绳套，即用浮动多项式选配两个关系方程。在有些测站也可用涨落比例法，用平均的水位流量关系代替 $Z - Q_c$ 关系，用平均的 $Z - \frac{1}{S_c U}$ 来代替 $Z - \frac{1}{S_c U}$ 关系方程。

标准洪水绳套求出后，就可用式 (9-28) 来推求全年的洪水流量过程。但推出的过程只能反映一次孤立洪水情况下的洪水涨落影响，对于因河槽调蓄影响下的复式洪水绳套和洪水涨落与变动回水共同影响下的流量推求则会产生系统误差。这时，可吸取连时序法的优点，利用实测流量点对已推出的流量过程进行动态校正。这是因为：实测流量反映了各种因素对流量的综合影响，且流量测点一般有较高的精度，因此，动态地考虑实测点，可以保证推求的流量有一定的精度。

考虑到同一测站相同水力条件下所形成的洪水绳套形状相似，因此，动态校正时

的洪水绳套形状以标准洪水绳套为基础。

校正时,把单纯用标准绳套推出的流量过程,校正到通过每一实测流量点。图 13-7 为两测次不跨峰谷时动态校正的示意图。图中 $K+1$ 、 $K+2$ 、 $K+3$ 为实测水位流量关系点, $K'+1$ 、 $K'+2$ 、 $K'+3$ 为与实测点同水位用标准洪水绳套推得的流量点。通过 $K'+1$ 、 $K'+2$ 、 $K'+3$ 的绳套曲线即用标准绳套曲线推得的水位流量关系曲线。动态校正的目的,就是把通过 $K'+1$ 、 $K'+2$ 、 $K'+3$ 的绳套曲线校正成为通过 $K+1$ 、 $K+2$ 、 $K+3$ 的绳套曲线。校正时,逐段逐点地进行校正,例如,为将 I' 校正为 I ,需进行如下的计算。

$$BI' = a \left(\frac{H'}{H} \right)$$

$$a = Q_{K+2} - Q'_{K+2} - \Delta Q_0$$

$$\Delta Q_0 = Q_{K+1} - Q'_{K+1}$$

I' 的校正值为

$$\Delta Q = \Delta Q_0 + BI' \quad (13-11)$$

式中各符号如图 13-7 所示。

当两实测点跨峰、谷时,由于两测次水位差可能很小,甚至两测次水位相等,使校正误差很大,甚至出现计算溢出,这时应改为随时间进行内插校正。 I' 的校正值为

$$\Delta Q = \Delta Q_0 + a \left(\frac{\Delta T'}{\Delta T} \right) \quad (13-12)$$

式中: ΔT 为两测次时间差; $\Delta T'$ 为校正点时间与前一测次时间差。

显然,以上校正使推求的流量消除不了实测点的偶然误差。因此,推求流量时,事先应对测点进行初步分析,避免个别错误测点对成果的影响。

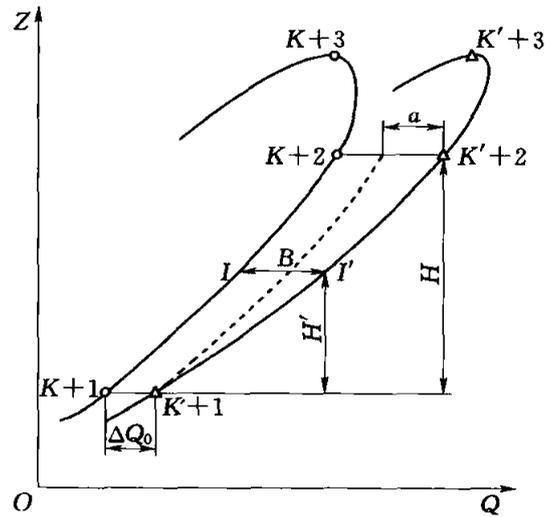


图 13-7 实测点校正示意

13.3.3 插值法

目前我国计算机处理中,很多是用人工定线,输入节点,把曲线转换成数字,用插值公式进行推流、推沙和其他方面的计算。目前所用的插值公式有拉格朗日插值公式中的抛物线插值公式和三阶样条函数插值公式。在此,将着重讨论拉格朗日插值公式及其在计算机处理中的应用。

1. 拉格朗日插值公式

假定已知函数 $y=f(x)$ 在 $n+1$ 个相异点 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ 处的函数值 $y_0=f(x_0), y_1=f(x_1), y_2=f(x_2), \dots, y_n=f(x_n)$, 插值的目的是求一个简单的函数 $\varphi(x)$, 它在给定的 $n+1$ 个点 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ 上取值 $\varphi(x_0)=y_0, \varphi(x_1)=y_1, \varphi(x_2)=y_2, \dots, \varphi(x_n)=y_n$, 而在其他点上, $\varphi(x)$ 可以近似地代替 $f(x)$, 函数 $\varphi(x)$ 叫作 $f(x)$ 的插值函数。通常插值函数用多项式表示, 所以插值函数又叫插值多项式。 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ 叫作插值点或节点。用拉格朗日方法建立起来的插值公式称为拉格朗日插值多项式。拉格朗日插值多项式的形式为

$$\begin{aligned}\varphi(x) &= \frac{(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\cdots(x_0-x_n)}y_0 \\ &+ \frac{(x-x_0)(x-x_2)\cdots(x-x_n)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)\cdots(x_1-x_n)}y_1 + \cdots \\ &+ \frac{(x-x_0)(x-x_1)\cdots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_0)(x_n-x_1)\cdots(x_n-x_{n-1})}y_n\end{aligned}$$

若拉格朗日插值多项式中 $n=2$ ，拉格朗日多项式是最高次为 2 的抛物线，此时的插值公式叫抛物线插值公式。

2. 单一曲线插值公式的应用

水文数据处理中所遇到的线型，一般为直线的不多，高次方的多项式太繁，且无

必要，因此计算机处理中最常用到的是抛物线插值。

对于一条水位流量关系曲线，水位 Z 表示自变量，

流量 Q 表示因变量，若选取有 n 个节点 ($n>3$)，

其曲线的一段如图 13-8 所示，水位 Z 所对应的流量

Q 式 (13-13) 计算为

$$\begin{aligned}Q &= \frac{(Z-Z_i)(Z-Z_{i+1})}{(Z_{i-1}-Z_i)(Z_{i-1}-Z_{i+1})}Q_{i-1} \\ &+ \frac{(Z-Z_{i-1})(Z-Z_{i+1})}{(Z_i-Z_{i-1})(Z_i-Z_{i+1})}Q_i \\ &+ \frac{(Z-Z_{i-1})(Z-Z_i)}{(Z_{i+1}-Z_{i-1})(Z_{i+1}-Z_i)}Q_{i+1}\end{aligned}$$

(13-13)

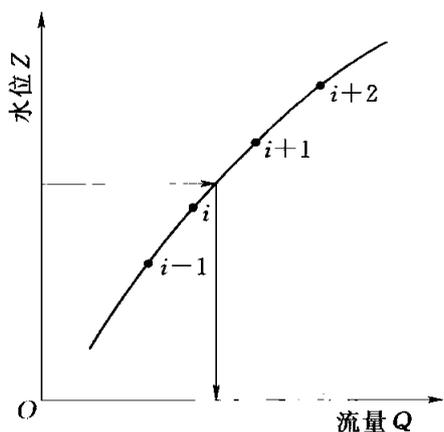


图 13-8 一元三点插值公式使用示意

式 (13-13) 需要三个节点，又称为一元三点插值公式。

一条曲线一般选取若干个节点，插值时选取最靠近插值点的三点代入插值公式，因此对于一条曲线并不是一个插值公式，而是采取分段连续插值的方法把曲线所使用范围的每一水位对应的流量计算出来。

一条曲线插值时，若选取较多的点，可以保证插值的质量。但节点太多，所占用的内存较多，数据加工的工作量大，则不经济。为此要求在保证精度的前提下，尽量地减少节点数目，但最少不得少于 3 个节点。

节点密度的大小，一般与所求水文要素的精度有关，与曲线的曲率变化情况有关。对于一固定曲线，精度要求得越高，节点数目应越多。由于抛物线插值公式的一阶导数为直线方程，在曲率变化较大，曲线变化可能不为直线变化时应加密节点，来减少曲线曲率的不均匀变化引起的误差。

3. 在处理复杂的水位流量关系时插值公式的应用

复杂的水位流量关系曲线可以看作若干条单一曲线的组合。因此，用插值法处理复杂的水位流量关系，就是把复杂的水位流量关系曲线分解成若干条单一曲线之后分别插值。

用临时曲线法进行数据处理的测站，各个时段的临时曲线可以看作为一条条的单一曲线。而用绳套曲线法进行数据处理的测站，则应把绳套曲线分解成涨水支线和落

水支线，分解时一般以峰顶峰谷作分界点，分解出的涨水、落水曲线则当成单独的单一曲线进行插值。如图 13-9 中的绳套曲线，可以作为 6 条单一曲线来推求流量。

复杂的水位流量关系使用插值法推流的关键是分解出的一条一条的单一曲线间的过渡与连接，即从一条曲线到另一条曲线的自动跳线问题。

实现自动跳线的方法很多。可以输入用每条曲线推流的次数，用某条曲线推流时，当推流次数达到给定的次数后，则自动地跳向另一条曲线推流。也可以给出每条曲线使用的时间，这样和人工进行数据处理的思路一样，在曲线使用的时段内用给定的曲线节点进行插值。也可以给予跳线的第一个水位或时间数据加上一定的信息，当用水位推求流量时判别水位含此信息，则自动地跳向下一条曲线进行推流。

通过较多数据的对比分析，一般一元三点插值基本上能满足推流的精度要求。但在曲线曲率变化较大时，两节点的中点会出现流量不连续的现象。这是因为，中点处若用两组节点代入插值公式，计算出同水位的流量数值经常不等，因此在选取节点时应尽量避免这种现象。

采用三阶样条函数插值，也可以避免不连续现象。该法的基本概念是：在用曲线板绘制曲线时，往往只知道曲线上若干点的位置，用曲线板先连几个点，然后移动曲线板再把另外几个点连接起来，最后把这些点全部连成一条光滑曲线。施工放样时把这样的曲线称为样条曲线。受此启发，对这样的曲线进行数学模拟，得到的函数称为样条函数。

若已知某函数的若干节点及其函数值，而用样条函数作为插值函数对节点范围内所有区间进行插值，这样的样条函数称为样条插值函数。

当样条插值函数在节点上具有一阶到二阶的连续导数，而在各段内它是一个不高于三阶的多项式时，则称此函数为三阶样条函数。很显然，三阶样条函数，把一曲线的各段当作不高于三阶的多项式，而整个曲线由各段多项式“装配”而成，同时由一阶、二阶的连续导数来保证曲线接头处具有一定的光滑性，从而使整个曲线连续光滑。具体方法可参阅有关文献和书籍。

13.3.4 排队技术

数据的排队又叫数据的排序，是水文信息处理中常常碰到的问题。排序的方法很多，亦有各种不同的分类，现简要介绍几种，供应用时参考。

要在多种排序算法中，简单地判断哪一种最好，有时是困难的。因为所用排序的场合、所排数据原来的顺序、数据数目不同，排序方法的优劣标准也会不同。但评价算法好坏总应有一个大多数人能够接受的标准。对于排序，最重要的是算法执行时所需的时间，因此，排序的时间开销可以作为排序技术优劣的标志。排序的时间开销主要可以用算法执行中的比较次数和移动交换次数来衡量，因此，在介绍各种算法时尽

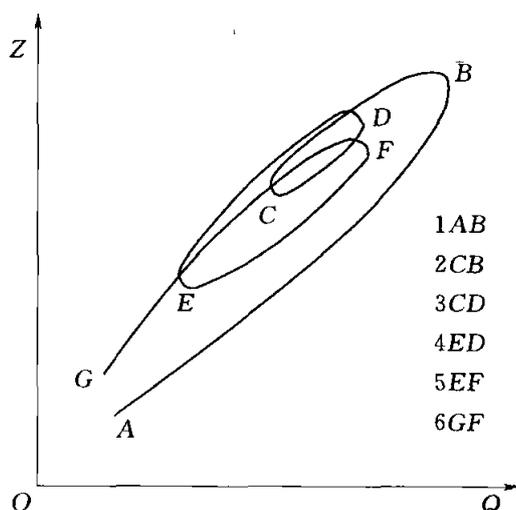


图 13-9 绳套型水位流量关系曲线用插值法推流处理示意

量给出这些参数。

为了能对各种算法的速度有一粗略认识,下面给出河海大学李春尧、吴涌虎同志所做的比较实验,其数据都为随机产生。表13-1即比较实验的结果,从表13-1中可看出,随数据增多,时间的增加为非线性,各种方法排序时间开销的差别很大。因此,对于较多数据的排序或大宗数据的检索,一定要考虑用较优的算法。

表 13-1 各种排序方法所需时间对照

所需时间 数据个数 方法	50	100	150	200	250
起泡法	1'03"	5'28"	13'10"	24'06"	36'50"
直接插入法	1'21"	2'01"	2'38"	3'07"	7'47"
折半插入法	57"	1'49"	2'45"	3'41"	6'17"
选择法	55"	3'21"	7'22"	12'53"	20'12"
希尔法	19"	52"	1'40"	2'18"	3'05"

下面,分别对以上几种排序方法加以简介。

1. 起泡法

起泡法又叫气泡上升法或浮点法,它是一种常用的简单排序方法。

设有一组待排序数 x_1, x_2, \dots, x_n 起泡法排序时是先比较 x_1 与 x_2 , 若 $x_2 < x_1$, 则交换 x_1 与 x_2 , 然后比较 x_2 与 x_3 , 若 $x_3 > x_2$, 则再比较 x_3 与 x_4 , 直到比较到 x_{n-1} 与 x_n , 经 $n-1$ 次比较和若干次交换, 最大的数传到了最后的位置, 这叫第一次起泡。再从头开始, 比较 $n-2$ 次时, 把第二大的数移到 $n-1$ 的位置, 叫第二次起泡。每次减 1, 重复进行直到排序结束。但是对于仅做有限次起泡后已完全排好序的数据, 无需每次都做到最后, 例如原数据本来就是排好的数据, 仅需做 $n-1$ 次比较就达到全部排序。具体实现时, 可以用一特征位 flag 表示本次起泡是否出现交换, 若没有交换, 则说明已排序完成, 故可停止处理。

很显然, 起泡法的比较次数与交换次数都与原数据的顺序有关。若初始状态为逆排序时, 比较次数和交换次数都达最大, 比较次数为 $\frac{1}{2}n(n-1)$ 次, 交换次数为 $\frac{3}{2}n(n-1)$ 次。若初始状态为顺排序时, 比较次数为 $n-1$ 次, 交换次数为 0, 都为最小值。

2. 直接插入法

直接插入法是把一个数据在已经排好序的系列中, 插入到应列的位置, 下面以实例说明之。见表 13-2。

从 $I=2$ 开始, 逐次加 1, 当 $I=4$ 时, 5 的位置应为第 3 个, 则 5 插入到位, 而后面数依次后移。当 $I=7$ 时, 排序结束。

直接插入法的最小比较次数为 $n-1$ 次, 最小移动次数为 $2n$ 次, 最大比较次数为 $\frac{1}{2}(n-1)(n+2)$ 次, 最大移动次数为 $\frac{1}{2}n^2$ 次。

表 13-2

直接插入法示例

初始系列	[8]	3	2	5	9	1	6
I=2	[3	8]	2	5	9	1	6
I=3	[2	3	8]	5	9	1	6
I=4	[2	3	5	8]	9	1	6
I=5	[2	3	5	8	9]	1	6
I=6	[1	2	3	5	8	9]	6
I=7	[1	2	3	5	6	8	9]

3. 折半插入法

折半插入法是插入法的一种，它挑选插入位置时，不是逐一比较，而是首先与排好序的中间序号的数比较。例如，有 a_1, a_2, \dots, a_j 为已排好序的数，欲插入数为 a_{j+1} ，首先求出 $i = \frac{j+1}{2}$ 序号所对应的 a_i 与 a_{j+1} 比较，看 a_{j+1} 在 a_i 之前还是 a_i 之后，然后再折半比较，直至找出 a_{j+1} 所应在的位置。插入的方法同直接插入法。

很显然，折半插入法比较是挑着比较的，对于绝大多数数据，比较次数可大大减少，因此提高了运算的速度。

对于 n 个记录，折半插入法总的比较次数大约为 $n \log_2 n$ 。当 n 较大时，显然比直接插入法最大比较次数少得多，但大于直接插入法的最小比较次数。

4. 选择法

选择法也是一种简单的排序方法。它的作法是先在所有记录中选出最小的数，把它与第一个记录交换，然后在其余的记录中再选出最小的数，与第二个记录交换，以此类推，直至排序完成。

选择法总比较次数为 $\frac{1}{2}n(n-1)$ ，其移动次数最小时为零，最多时为 $3(n-1)$ 。

5. 希尔排序法

希尔排序法又称缩小增量法，它是插入法的一种，是由 D. L. Shell 在 1959 年提出的。它的作法是首先算出待排数据的序号增量 d ，使 x_i 与 x_{i+d} 进行比较，然后缩小增量，使 $d_j = \text{INT}\left(\frac{d_{j-1}+1}{2}\right)$ ，直至 $d_j = 1$ 。下面以实例说明之。 $d_0 = 8$ ，各趟排序过程如图 13-10 所示。

希尔排序法是以不同增量进行插入排序的。本例第一趟增量为 4，第二趟增量为 2，第三趟增量为 1。为了控制一趟中的反复次数，从第二趟开始，由左向右进行比较时，若需进行交换，则交换后的数据要再向左与左边第 d 项比较，直至找到应在的位置。

由于希尔排序法不需要逐项进行比较，故使数据作跳跃式移动，因此就提高了排序的速度。

对希尔排序法算法的分析在数学上尚是一个难题。Knuth 给出希尔法平均比较次数和平均移动交换次数都为 $n^{1.3}$ 左右。

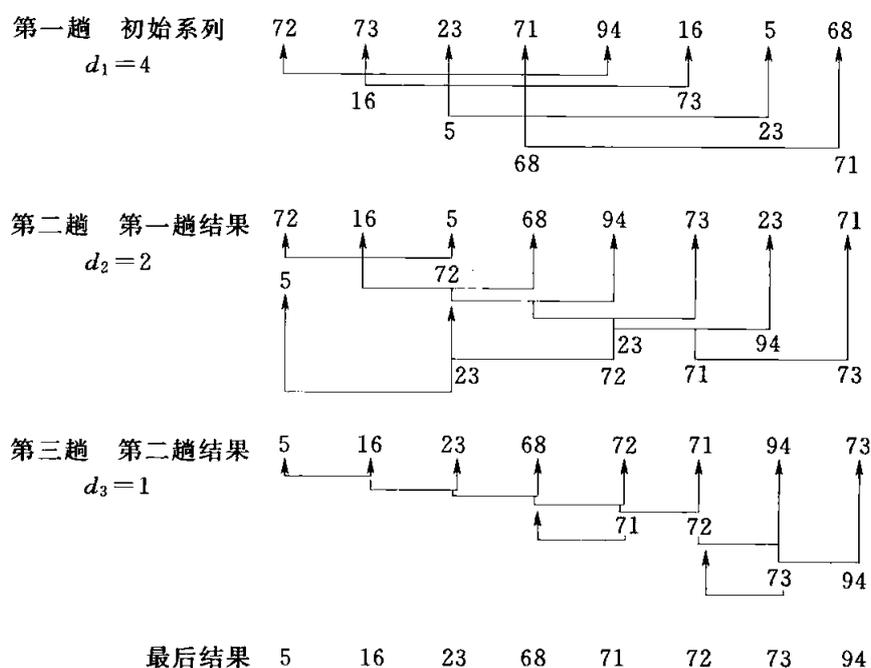


图 13-10 希尔排序法示例

6. 快速排序法

快速排序法又称分区交换排序法，在排序的各种方法中，它也是较快的一种。它的基本思路是通过分部排序来完成整个表的排序。下面给出示例，以了解快速排序法的排序过程。

从图 13-11 中看出，在第一趟排序时，首先给出 $x_1=82$ 为标准，依次比较，把比 x_1 大者排在后面，把比 x_1 小者排在前面。为了节省空间，采用从两头向中间夹入的方式，最后找出 x_1 应在的位置。其前都小于 x_1 ，其后都大于 x_1 。第二趟则以 x_1 为分界，分两部分，各部分分别重复第一趟的工作，直至全部排序完成。图 13-11 即快速排序法的排序过程。

快速排序的执行时间：当待排数据为已排好的数据时，其用时最长，第一趟为 $n-1$ ，第二趟为 $n-2$ ，总次数 $\frac{1}{2}n(n+1)$ 次。另一极端情况是，每递归调用一次，给定的记录正好为中间，从而把原数据分成两个大小相等的子文件，这时总比较次数为 $n\log_2 n$ 。

一般交换次数总小于比较次数。

13.3.5 逐日平均值的计算和洪水水文要素摘录的模拟

1. 时间数据的处理

在水文信息中，时间是各水文要素都要用到的信息。因此，在信息处理中，时间信息是工作量最大、花时最多的一种信息量。

我国计算机进行数据处理、水文数据库等软件中，时间数据的最基本形式为

×× ×× ××·××
月 日 时 分

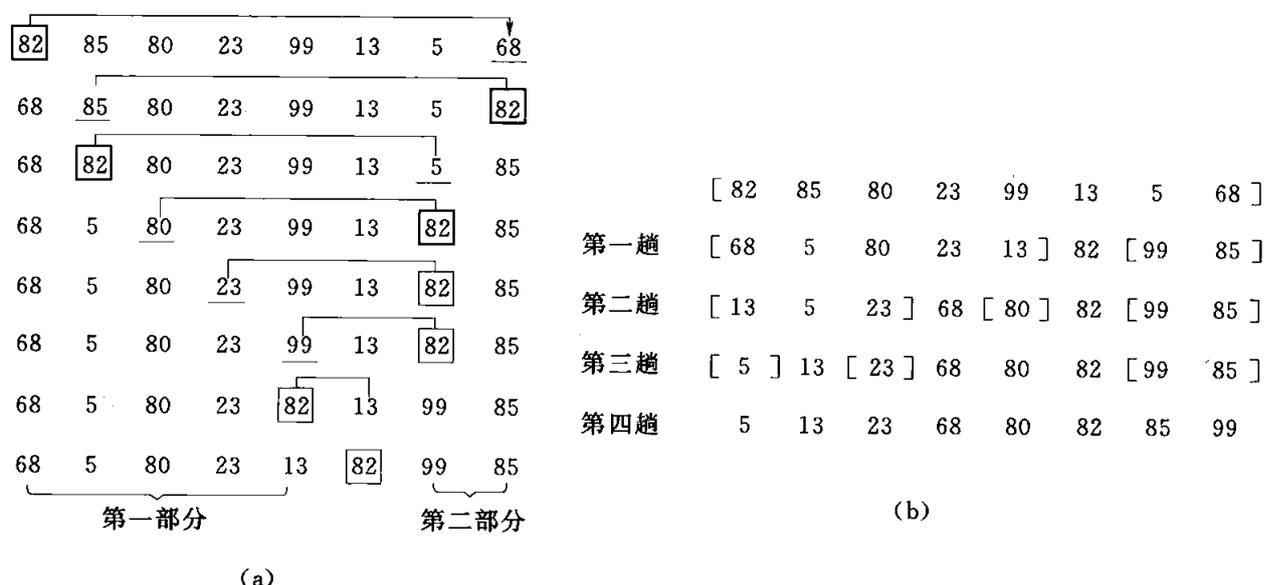


图 13-11 示例

(a) 第一趟排序示例；(b) 各趟排序示例

此数据不同于一般数据，其最大的特点是一种非单一进制、非十进制的综合信息。但是，各种进制及月、日、时、分之间有着基本固定的内在联系。例如，各月的日数基本固定，1 日为 24h，1h 为 60min，在没有缺测的数据中，日数与月数是逐 1 递增的，而在后一个日数小于前一个日数时，两者间必有月分界；在每日 8 时都进行观测的情况下，在后一个时分不大于前一个时分时，其间必有日分界。因此，在时间信息的处理和输入时，都可根据这些规律，以便减少数据加工的工作量。

在连续观测的水文信息中，时间输入往往只输入时分，此时，应进行如下处理。

(1) 时分数据进制的转换。时分间为六十进制。为了方便，输入时分形式为 $\times \times \cdot \times \times$ ，即小数后为分，计算机一般运算时，对于高级语言习惯用十进制运算，因此首先要将六十进制的时分处理成十进制的时分。

(2) 在不缺测每日 8 时观测的顺序时间数据中，可根据 $t_{t+1} \leq t_i$ 的判别式来判断日分界。

(3) 根据固有的每月的天数和日、月逐 1 递增的特点，可以把每一时间数据都补成为 $\times \times \times \times \times \times \cdot \times \times$ 的形式。

(4) 时间进行运算时，必须把 $\times \times \times \times \times \times \cdot \times \times$ 形式的数据进行分解，然后变成十进制的形式方可运算。把时间数据全部变成累加形式的数据形式进行运算亦有可取之处。

有些测站，较长时间使用相同段次观测水位，为输入方便，把时间数据进行压缩。例如输入时间为 23, 2, 8, 14, 11520, 20808, ... 其意思为从 1 月 15 日开始，观测段次为 2, 8, 14, 20 四段制到 2 月 8 日 8 时结束压缩。相应的程序应把此恢复成每日四个观测时间，以便时间与水位个数相同。

2. 逐日平均值的计算

由前可知，逐日平均值的计算方法有面积包围法和算术平均法，两者比较，前者

精度较高，为程序的方便，目前我国计算机进行数据处理全部用面积包围法。

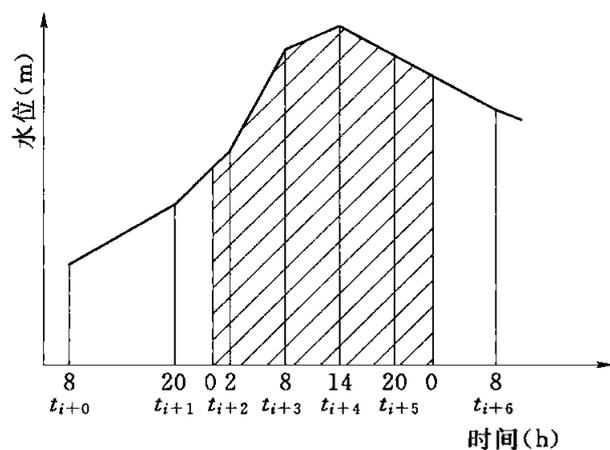


图 13-12 日平均计算示意

计算日平均值至少需要水文要素值和时间两组数据。为尽量减少时间数据加工的工作量，时间数据一般只输入时、分，根据时间数据的规律，就可算出各个数据的月、日、时分来。这样处理必须应有这样的条件，即每日 8 时都要有数据，这样就可以把每日零时的水文要素值内插出来，从而用面积包围法算出日平均值。例如图 13-12 为日平均水位计算示意，图中 t_{i+1} 与 t_{i+2} 之间和 t_{i+5} 与 t_{i+6} 之间有日分界。确定了日分界，就可以内插出零时的水文数值来。其计算公式为

$$Z_0 = \frac{Z_{i+2} - Z_{i+1}}{24 + t_{i+2} - t_{i+1}} (24 - t_{i+1}) + Z_{i+1} \quad (13-14)$$

零时水位算出后，即可用面积包围法计算出日平均水位。其计算公式为

$$\bar{Z} = \frac{F}{24} \quad (13-15)$$

式中： F 为图中阴影的面积； \bar{Z} 为日平均水位。

对于月分界，一年中由于每月的天数是基本固定的，因此可以根据每月的天数来确定月分界。只是碰到闰年时，要给予一定的信息来确定二月的天数。

对于缺测、河干、连底冻等情况，在程序中可作特殊处理。处理的办法是：要确定它们的开始和结束时间或持续的天数，给其对应的水位赋予某一信息量，作为这些现象的特殊标记。

3. 洪水水文要素摘录的模拟

人工对洪水水文要素摘录时，一般要求经摘录的过程线与原过程线相似，峰形相吻合，峰顶、峰谷相符，峰量基本相等。在以上条件基本满足时要尽量精简摘录点次。这些原则没有严格的数字界限，很难规定一数字指标，因此用计算机进行洪水水文要素摘录时，必须对摘录的一些原则进行概化。

分析洪水水文要素摘录的要求，可以进行这样的概括，即洪水水文要素摘录的测点，应为过程线上斜率变化较大的段次中的测点，并连续地计算各段次的斜率变化，找出这样的指标，就可以既满足过程线相似、峰形相吻合等条件，又能使摘录的测点不是太多。

当考虑到不同测点洪水水文要素摘录标准的统一，计算过程线的斜率变化时，用斜率变化的相对值。令斜率的相对变化率为 δ ，其计算公式为

$$\delta = \left(\frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} - \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} \right) / \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} \quad (13-16)$$

式中： $\frac{\Delta x_2}{\Delta t_2}$ 为测点 i 到测点 $i+1$ 过程线的斜率； $\frac{\Delta x_1}{\Delta t_1}$ 为测点 $i-1$ 到测点 i 过程线的斜率； Δx_2 ， Δx_1 分别为某水文要素的相邻两测点 ($i-1$ 到 i 及 i 到 $i+1$ 测点) 间的

差值； Δt_2 ， Δt_1 分别为 Δx_2 ， Δx_1 对应的时段，如图 13-13 所示。

算出 $i-1 \rightarrow i+1$ 过程线斜率的相对变化，用摘录标准 δ' 与之比较。当 $|\delta| \geq \delta'$ 时，说明水文要素的变化已经达到了摘录标准，这时便对相应点的水文要素进行摘录，否则不予摘录。

考虑到式 (13-16) 中 $\frac{\Delta x_1}{\Delta t_1}$ 可能出现零值，为此对洪水水文要素摘录判别式进行变换。若式 (13-17) 成立，即

$$\left| \Delta x_2 - \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} \Delta t_2 \right| \geq \left| \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} \Delta t_2 \right| \delta' \quad (13-17)$$

则对 i 点的水文要素进行摘录 (图 13-13)。式 (13-17) 为程序中用到的洪水水文要素摘录判别式。

摘录标准 δ' 的确定，一般可以根据测点数据分析定出。长江水利委员会根据我国一些水文站的验算，选用 $\delta' = 0.4$ 进行摘录，成果一般能满足要求。

由于各水文要素间的关系是非常复杂的，因此，一个测站所要摘录的几个要素，在同一时段内的斜率变化也不相同。为了使摘录的水文要素使用时配套，要求几个要素同步摘录，即同时判断，只要有一个水文要素被摘取，其他要素则同时被摘录。

由上述可见，只需用一个判别式来模拟人工对洪水水文要素的摘录。但由于我国各河流洪水特性差异甚大，而且观测段次疏密不一，有时机器摘录与人工摘录差别较大，因此，可以根据本站特点通过试算调整摘录标准或摘录判别式，或改用其他方法进行摘录的判别。

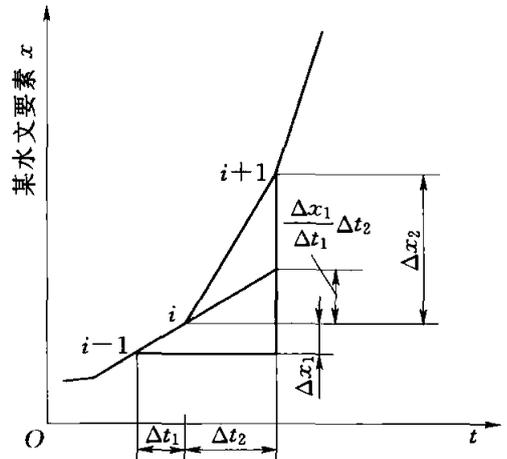


图 13-13 洪水水文要素摘录示意

13.4 水文信息的存储和检索

水文信息服务，是水文工作的重要内容。为满足国民经济各方面的要求，我国目前每年刊布水文年鉴 74 册。这些系统的、全面的水文数据正在为我国经济建设及科学研究服务。水文年鉴是目前我国水文信息存储的主要形式，同时也是进行水文信息服务的主要工具。随着科学技术的发展，为进一步做好水文信息的存储与服务，目前正在进行着水文数据库的规划、研究和建设工作。因此，下面从水文年鉴与水文数据库系统两方面来简单地介绍水文信息的存储与检索。

13.4.1 水文年鉴

水文年鉴是按照统一要求和规格并按流域、水系统一编排卷册，逐年刊印的基本水文资料。

水文年鉴的内容有正文资料与附录资料。其正文资料的内容有：刊印说明（含各类测站一览表、资料索引及水文要素综合图表）、测站考证、水位与潮位、流量与潮流量、输沙率及泥沙颗粒级配、水温、冰凌、降水量及水面蒸发量等资料和已刊印资料的更正和补充等。

水文年鉴的用途主要是根据需要查阅年鉴中的各水文要素资料。使用时，同一年的不同水文要素可在该年一本水文年鉴中查到，而不同年份的各水文要素，则需查阅不同年份的多本年鉴才能得到。

13.4.2 水文数据库系统

早期的计算机主要应用于数值计算领域。在数值计算中，数据的类型和结构都比较简单，程序设计的重点主要放在算法的表达方面。随着计算机技术的发展，计算机在信息处理领域得到了广泛的应用。信息处理问题的特点是数据量很大，数据类型多，结构复杂，对数据的存储、检索、分类、统计处理要求高。为满足信息处理的要求，把数据从附属于程序的做法改变为数据与程序的相互独立，对数据加以组织管理，使之能为许多不同的程序所共享，这就是数据库系统的出发点。

水文资料的数量是大量的且类型很多，建立水文数据库系统对水文数据进行管理非常必要。水文数据库系统的建立应有一定的条件，首先应有一定容量和一定运算速度的计算机，有容量很大的外存储器，还有一定数量和质量从事这方面工作的科技人员。

目前我国正进行着水文数据库的规划、设计及部分建库工作。

我国水文数据库系统分核心数据库与外层数据库。其核心级存储水文年鉴的水位、流量、含沙量、降水量、蒸发量、泥沙颗粒级配、温度、潮水位、潮流量等内容。它是水文年鉴的数据结构为基础，并参照数据库文件结构加以确定的。外层数据库为其他水文专用数据库，例如有专门为水资源开发利用的水资源数据库，为水文预报用的水文预报专用库、地下水专用库、水质专用库等。

我国水文数据库将分三级建立：第一级为国家水文数据库，第二级为大的流域机构、院校等重要的科研机构所建立的水文数据库，第三级为大部分省区所建立的水文数据库。

为使各级水文数据库的资料高度共享，避免资料存储的重复或脱节，数据录入时应按严格的录入格式进行。其提供的成果亦按一定的格式提供。水文数据库数据文件命名规划如图 13-14 所示。

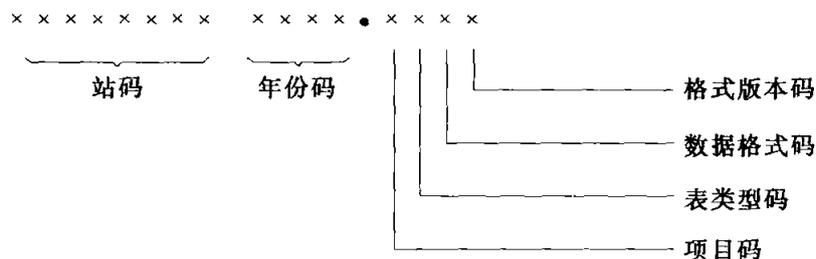


图 13-14 水文数据库文件名结构

数据库数据文件名由主文件和扩展名两部分组成，主文件 12 个字符，扩展名 4 个字符，主文件名与扩展名之间用小数点隔开，各种码的含义如图 13-14 所示，其中站码采用水利部统一制定的 8 位顺序数字码表示。

水文数据库的存储和检索都以汉字菜单作为用户界面，采用交互方式。数据库中所采用的各种符号尽量地向习惯性的符号靠拢并根据计算机设备情况调整。

我国水文数据库主要考虑 VAX11 系列计算机作为数据库的中心计算机的基础上,目前已开发出的数据库语言 DATATRIEVE、RDB、ORACLE 等。

13.4.3 数据在计算机中的存储方式

数据是计算机化的信息。计算机通过对数据的存储、检索来达到实现水文信息存储与服务的目的。

计算机所处理的数据决不是杂乱无章的堆积,而是有着内在的联系,只有分析清楚它们的内在联系,对大量的数据才能有效地进行处理。例如对一个线性表,应知道哪一个元素是表中的第一个元素?哪一个元素是表中最后一个元素?哪些元素在一个给定元素之前或之后?它的存储方式是顺序地邻接存放,还是用指针连在一起的?知道了这些就可以对此线性表中的数据进行处理。

在数据库中存储方式有以下几种。

1. 顺序存储

这种方式主要用于线性的数据结构。结点之间的关系由存储单元的邻接关系来体现。所谓结点是数据结构中的基本单位,对于线性表,表中的每一行称为一个结点。

顺序存储的特点是存储区域被结点的值稠密地填满。在一般情况下,每个结点所占的存储单元并不是一个,而且所占单元数也可以不一定相等,这时顺序存储存放时就不一定那么整齐,但仍然是一个接一个地填满整个区域。

2. 链接存储

这种方法是给结点附加上指针字段。即将结点所在的存储单元分为两部分,一部分存放结点本身的信息,称数据项;另一部分存放结点的后继续点所对应的存储单元的地址,称为指针项。指针项可以包括一个或多个指针,以指向结点的一个或多个后继,或记录其他信息。

3. 索引存储

在线性的结构里,结点可以排成一个序列: K_1, K_2, \dots, K_n ,每个结点 K_i 在序列里都有对应的位置数 i ,这个位置数就是结点的索引。索引的存储结构就是用结点的索引号 i 来确定结点的存储地址。

4. 散列存储

这种方法的主要思想是根据结点的值来确定它的存储地址。

散列存储中,在结点 K 的字段里取一个或几个字段的值作为关键码 W_K ,结点 K 所对应的存储地址由函数 $f(Q_K)$ 来确定。所以,散列法存储的关键问题是选择散列函数。

以上简单介绍的是 4 种基本存储方法,这些基本的方法还可以组合起来对数据进行存储。

13.4.4 数据的检索

所谓数据的检索就是在数据结构中查找满足某种条件的结点。例如查找某站某年某月某日的日平均流量等。

不同的存储结构,检索的方法也不相同。下面仅简单介绍线性表的检索方法。

1. 顺序检索

顺序检索是一种最简单的检索方法,检索时用待查的关键码值与线性表里各结点

的关键码值逐个比较,直到找出相等的结点,则检索成功,或者找遍所有结点都不相等,则检索失败。执行顺序检索时存储方式可以是顺序的,也可以是链接的。

顺序检索非常简单,检索前对结点之间并没有排序要求,因此实用中经常采用顺序检索。顺序检索的缺点是检索时间长,其检索的长度与表中结点个数 n 成正比。

2. 二分法检索

二分法检索是一种效率较高的检索方法。检索时要求结点按关键码值的大小排序,并要求线性表顺序存储。

采用二分法检索,首先用检索的关键码值与中间位置结点的关键码相比较,这个中间结点把线性表分成两个子表,比较结果如果相等则检索完成,若不相等,再根据要检索的关键码比该中间结点关键码的大小确定下一步检索在哪个子表中进行,这样递归地进行下去,直到找到满足条件的结点或者确定表里没有这样的结点。

3. 分块检索

若要处理的线性表既希望较快地检索,又需要动态变化,则可以采用分块检索的方法。

分块检索要求线性表分成若干块,在每一块中结点的存放是任意的,但块与块之间必须排序。假设这种排序是按关键码值递增的,也就是在第一块中任一结点的关键码都小于第二块中所有结点的关键码,第二块所有结点中的关键码都小于第三块所有结点的关键码……另外,还要建立一个索引表,把每块中最大的关键码值,按块的顺序存放在一个辅助数组中。显然这个数组也按上升次序排序。检索时,首先用要检索的关键码在索引中查找,确定如果满足条件的结点存在时它应在哪一块中,检索的方法既可以采用二分法,也可以采用顺序检索,然后再到相应的块中顺序检索,便可以得到检索的结果。

4. 散列表的检索

散列表是一种重要的存储方式,也是一种常见的检索方法,它的基本思想是以关键码的值为自变量,通过一定的函数关系(称为散列函数),计算出对应的函数值来,把这个值解释为结点存储地址,将结点存入这样得到的存储单元里去。检索时再根据要检索的关键码用同样的函数计算地址,然后到相应单元里去取要找的结点。所以又称关键码—地址转换法。用散列法存储的线性表叫做“散列表”。在散列表里可以对结点进行快速检索。

在散列表中的检索过程与建立散列表的过程相似,若结点关键码为 key ,首先计算散列函数 $h(key)$ 的值,以该值为地址到基本区去查找。如果该地址对应的空间未被占用,则说明检索失败,否则用该结点的关键码值与要找的 key 比较,如果相等则检索成功,否则用函数 I 计算 $I[h(key)]$ 的值。如此反复到某步,或者求出的空间未被占用(检索失败),或比较相等(检索成功)。

5. 基于属性的检索

在实际应用中,常常要检索结果中某个或者若干个属性满足一定条件的结点,我们把这类检索称为基于属性的检索。

例如要检索某个流域、某一年、流域面积大于 500km^2 测站的最大流量。可以把每个站的数据作为结点,以站码作关键字进行检索。这里某年、流域面积大于

500km²等都是基于属性的检索。当然前面的检索方法也可以处理这些要求，但花费太大，因为要根据前面要求顺序扫描所有结点。

为有效地处理基于属性的检索，应有特殊的存储形式相配合。用“倒排序”和“多重表”的特殊存储形式可解决基于属性的检索问题。

13.5 水文自动测报系统

13.5.1 系统的组成

水文自动测报系统属于应用遥测、通信、计算机技术，完成江河流域降水量、水位、流量、闸门开度等数据的实时采集、报送和处理的信息系统。

按水文自动测报系统规模和性质的不同可分为水文自动测报基本系统和水文自动测报网。水文自动测报基本系统由中心站（包括监测站）、遥测站、信道（包括中继站）组成。水文自动测报网是通过计算机的标准接口和各种信道，把若干个基本系统连接起来，组成进行数据交换的自动测报网络。

1. 设备组成

水文自动测报系统的设备主要由下列几部分组成。

(1) 传感器。完成系统需采集的各种参数的原始测量，并将测量值变换成机械或电信号输出。

(2) 编码。包括信源编码和信道编码。其中，信源编码的功能是在一定的保真度条件下，将测得的参数值变换成数字信号；信道编码的功能是将信源编码器输出的数字信号转换成符合一定规则的数码，以达到适合于信道传输，便于纠、检错等要求。

(3) 解码。解码过程是编码过程的逆变换。信道解码是根据信道编码规则，将收到的信道码变换为信源码，并检查和纠正数据传输中的差错；信源解码是将信源码复原成测量的参数值。

(4) 存储/记录。用于按时间顺序存储记录所采集的参数值。存储/记录装置可接在信源编码器的输出端口。

(5) 键盘/显示。用于显示所采集的参数值，以及用于工作模式的设定和人工观测参数置入等。

(6) 调制解调。调制的作用是把数字信号变成适合信道传输的已调载波信号，解调则是把接收到的已调载波信号恢复成数字信号。在使用数字信道时，应按数字信道的接口要求进行数据传输，无需进行调制解调。

(7) 扩展通信口。作为终端和其他数字设备的接口，用于编程或数据下载、发送水情报文等。

(8) 信道。包括传输电信号的媒质和通信设备。

(9) 传输控制。对数据的发送和接收全过程进行时序和路径控制。

(10) 差错控制。检查和纠正数据在传输过程中可能产生的差错。

(11) 数据处理。包括对接收到的数据进行合理性检查、整理，并存入数据库，生成各种数据文件等。

(12) 数据输出。数据显示、打印、报警和数据转发等。

水文自动测报系统的基本功能框图如图 13-15 所示。系统组成应由各实际系统的功能要求确定。

2. 站点功能

水文自动测报系统包含以下 4 类站点，各类站点有以下功能。

(1) 遥测站。在遥测终端控制下，自动完成被测参数的采集，将取得的数据经预处理后存入存储器，并完成数据传输。遥测站的设备按照需要增加人工置数和超限主动加报等功能。

(2) 集合转发站。在某些水文自动测报系统中，为组网需要，由集合转发站接收处理若干个遥测站的数据，再合并转发到中心站。

(3) 中继站。用于沟通无线通信电路，以满足数据传输的要求。

(4) 中心站。主要完成各站遥测数据的实时收集、存储以及数据处理任务，并负责将所收集的实时数据报送给上级和有关部门。在系统规模较大时，根据需要可以设置若干分中心站。

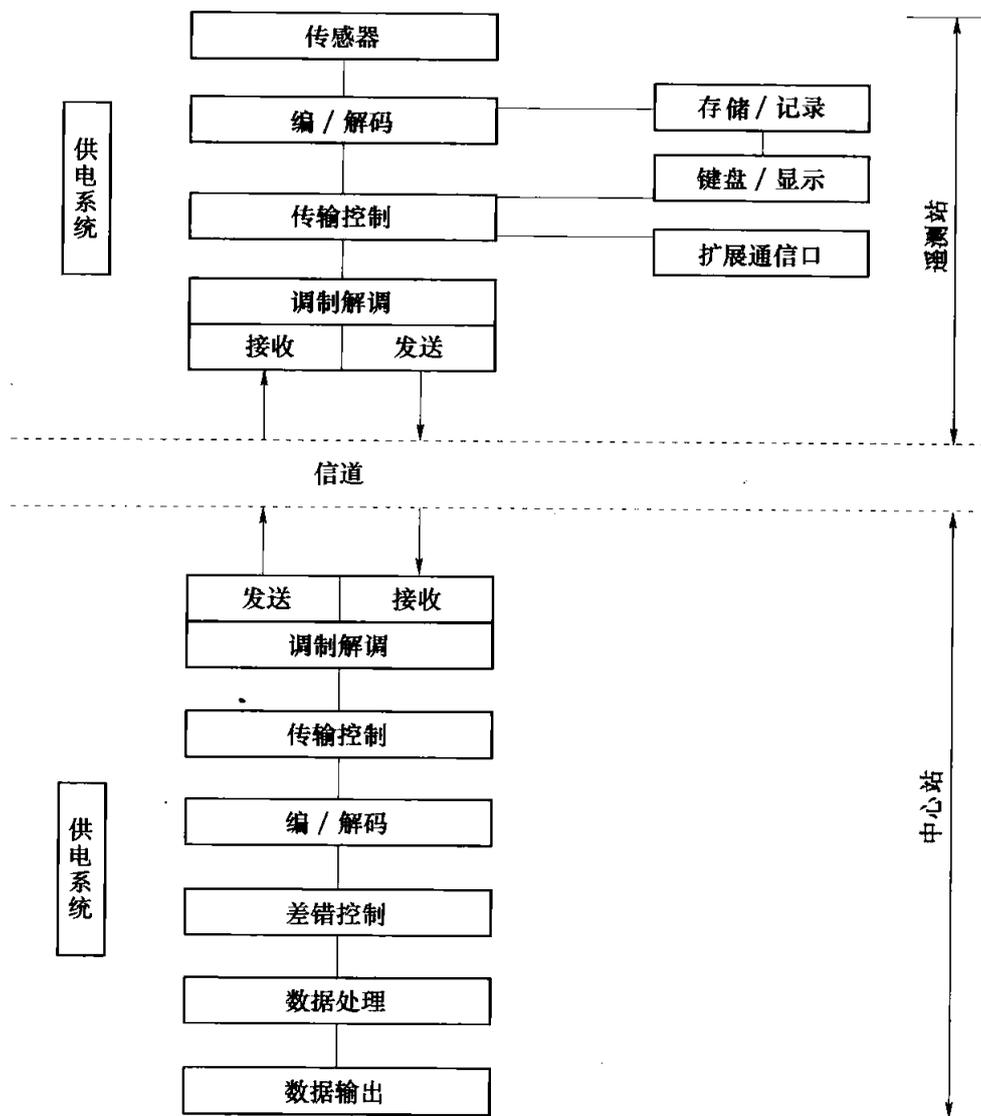


图 13-15 水文自动测报系统的基本功能框架

水文自动测报系统应能通过中心站与水文信息网相连，在网络支持下，实现信息共享。

13.5.2 系统设计任务和工作内容

水文自动测报系统的设计任务应按照项目建议书或可行性研究报告的要求，选择系统工作制式和通信组网方案；分配系统各组成部分的技术指标；确定各类接口的技术标准；规定数据流程，完成数据采集、传输和处理各部分的设计；进行主要设备选型；设计软件功能，制定配套部件的研制计划；编制投资预算等。

基本系统设计的工作内容通常应包括以下几个。

- (1) 进行现场查勘和收集数据。
- (2) 选择系统工作体制和数据通信方式。
- (3) 选择实现系统功能要求的技术措施。
- (4) 进行数据通信网的设计。
- (5) 论证和选择传输控制方式，制定数据传输规程。
- (6) 进行数据接收、处理、检索软件的设计。如有需要还应进行预报和调度作业的软件设计。
- (7) 规定各组成部分间的接口标准与数据编码格式。
- (8) 主要设备选型和制定新设备研制计划。
- (9) 提出土建工程、供电系统的建设标准，如有必要可进行专项设计。
- (10) 编制经费预算。
- (11) 拟定建设进度计划与人员培训计划。

水文自动测报网的设计，应在联网的各基本系统设计基础上进行，主要是选择网络结构，设计数据传输网，设计与选定通信线路，规定信息流向和制定数据传输规程。还应研究利用该地区现有通信线路的可能性，比较各种通信方式（如有线、超短波、微波、短波、卫星通信等）的优缺点，选定网内每一条线路的通信方式。

13.5.3 基本系统设计

1. 工作体制

应根据功能要求和管理维护力量，电源、交通、信道质量等条件，按照经济合理、便于维护的要求，选用自报式或查询一应答式与混合式工作体制。这三种体制的特点有以下几个。

(1) 自报式。在遥感站设备控制下每当（或在规定的时间内）被测的水文参数发生一个规定的增减量变化时（如水位涨落 1cm），即自动向中心站发送一次数据，中心站的数据接收设备始终处于值守状态。

(2) 查询一应答式。由中心站自动定时或随时呼叫遥测站，遥测站响应中心站的查询，实时采集水文数据并发送给中心站。定时自动巡测的时间间隔，可根据数据处理和预报作业的需要，在 15min 和 0.5h、1h、3h、6h、12h 等档次中选择。

(3) 混合式。由自报式和查询一应答式两种遥测方式的遥测站组成的系统，称为混合式系统。

进行系统设计，应首先根据可行性研究报告规定的遥测站网布设方案和数据流

向,通过分析选择通信方式和中继站位置,拟定数据传输网的组网方案。在基本系统中,超短波通信是数据传输的主要方式,但应充分利用已有通信线路(如邮电通信网、已设报讯电台)。整个系统可以用单一通信方式组网,也可以用几种通信方式混合组网。

2. 系统规模和主要技术指标

基本系统所包含的遥测站数一般不宜超过50个。如系统规模过大,可增设分中心或数据收集站,进行分级管理。

(1) 数据传输信道误码率。根据所选通信方式规定数据传输信道误码率 P_e 。主要通信方式的数据传输信道误码率可按表13-3确定。所选通信方式所允许的误码率最大值不能满足设计要求时,应重选通信方式,调整组网方案。

表 13-3 主要通信方式的数据传输信道误码率

信道	超短波	短波	微波、卫星	PSTN	GSM	DDN、ADSL、FR
P_e	$\leq 1 \times 10^{-4}$	$\leq 1 \times 10^{-3}$	$\leq 1 \times 10^{-6}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-6}$

注 PSTN信道的误码率要求和数据传输速率有关。

数据传输速率应依据通信方式在下列范围内选择。所选通信方式的允许最高数据传输速率不能满足系统数据传输时间要求的,应重选通信方式,调整组网方案。

1) 超短波信道的数据传输速率可根据系统要求的响应时间在300bps、600bps、1200bps、2400bps、4800bps、9600bps等档次中选择。

2) 短波信道的数据传输速率可在75bps、110bps、300bps、600bps、1200bps、2400bps等档次中选择。

3) 微波信道的数据传输速率可在1.2kbps、2.4kbps、4.8kbps、9.6kbps、32kbps、64kbps等档次中选择。

4) 采用邮电公用通信信道的数据传输速率应根据系统使用要求选定。

5) 不同卫星通信终端设备的数据传输速率有较大差异,可根据使用要求进行选择。

6) 采用数字移动通信信道(GSM、GPRS等)的数据传输速率可选用9600bps。所采用的信道和信道带宽要满足下列要求。

1) 超短波信道应优先选用国家无线电管理部门分配给水文遥测系统建设的专用频率。

2) 利用公用信道或其他信道时,应根据数据传输要求和信道特点确定传输速率和所需带宽。

3) 在确定使用通信方式及其所需带宽时,应尽量提高通信资源的利用率,不宜过多采取专线专用方式。

(2) 系统采集参数的精度。系统采集参数的精度,取决于传感器的分辨力和测量准确度,由数据传输、处理带来的误差应不影响数据精度。

1) 雨量计。应选择分辨力为0.1mm、0.2mm、0.5mm或1.0mm的雨量计。较大降雨量时的误差应用自身实测降雨量与排水量相比较的相对误差检测;较小降雨量

时用绝对误差检测。不同分辨力的雨量计测量精度应符合表 13-4 的规定, 并达到三级精度要求。

表 13-4

雨量传感器的允许误差

单位: mm

分辨力	自身排水量					
	≤10	>10	≤12.5	>12.5	≤25	>25
0.1, 0.2	±0.4	±4%	—	—	—	—
0.5	—	—	±0.5	±4%	—	—
1.0	—	—	—	—	±1.0	±4%

2) 水位计。应选择分辨力为 0.1cm 或 1.0cm 的水位计。在水位变幅不大于 10m 的情况下: 当分辨力为 0.1cm 时, 室内测试的最大允许误差应为 ±0.3cm; 当分辨力为 1.0cm 时, 95% 测点的允许误差不应超过 ±2cm, 99% 测点的允许误差不应超过 ±3cm。

3) 闸位计。分辨力为 1.0cm 时, 其测量准确度和分辨力与分辨力为 1.0cm 的水位计相同。

(3) 水文自动测报系统的可靠性。包含系统可靠性和设备可靠性两个指标。指标的确定应符合下列要求。

1) 系统可靠性用系统在规定条件下和规定的时间内, 数据收集的月平均畅通率和数据处理作业的完成率来衡量。系统数据收集的月平均畅通率应达到平均有 95% 以上的遥测站 (重要控制站必须包括在内) 能把数据准确送到中心站。数据处理作业的完成率 P 应大于 95%。

$$P = \frac{m}{N} \times 100\%$$

式中: N 为按照设计要求完成的数据处理作业的次数; m 为在 N 次数据处理作业中, 系统能按时按要求完成的作业次数。

2) 系统通过网络向上传输数据的畅通率宜达到 99% 以上。遥测站、中继站和中心站设备的 MTBF 应不小于 6300h。

系统的工作环境、电源、防雷接地的设计应符合下列要求。

1) 系统的设备应能在下列温度和湿度条件下正常运行: 中心站, 温度 5~40℃, 相对湿度小于 90% (40℃); 遥测站、中继站, 温度 -10~45℃, 相对湿度小于 95% (40℃)。

2) 系统的电源设计应按下列要求进行。

a. 中心站交流电源。单相 220V 或三相 380V 允许变幅为 ±10%, (50±1) Hz; 中心站交流电源必须采取稳压、滤波等措施, 保证电源电压值符合设备要求并抑制经交流电源引入的干扰, 也可以配备不间断电源等, 提高供电系统的可靠性。

b. 中心站、中继站、遥测站直流电源。电压的要求为 12V 或 24V, 允许变幅为 -10%~+20%, 推荐使用 12V; 电流的要求为电池提供电流的能力应根据遥测站所配设备的工作电流要求确定。对于使用收发信机的站点, 发射功率大于 5W 时, 电池

提供瞬时电流的能力应不小于2A, 发射功率达到25W等级时, 电池提供瞬时电流的能力应不小于10A; 容量的要求为全靠电池供电, 应能保证设备连续工作30d, 用太阳能电池浮充供电, 应保证设备能长期可靠工作。

3) 应保证系统可靠运行, 防止从天馈线、电源线、遥测设备与传感器间的信号线引入雷电损坏设备。在系统设计中应采取下列避雷措施: 安装避雷针, 避雷针的接地电阻应小于 10Ω ; 天线系统应根据具体情况安装合适的避雷装置; 交流电源输入端可增加浪涌吸收器、隔离变压器或其他防雷装置。对于遥测站、中继站和中心站的通信控制机, 应尽可能采用太阳能电池浮充供电, 避免交流电源引雷。在雷电多发地区, 交流电源输入端应采用可靠的电源避雷措施; 室外电缆应采取良好的防雷措施, 防止信号线引雷; 交流电源接地、防雷接地和设备接地应各自单独引线接入地网; 应用PSTN信道时, 必须加装电话线避雷器。

13.5.4 系统联网

水文自动测报系统联网设计应根据网络规模、信息流程、信息量、节点间信息交换的频度和节点的地理位置等要求, 选择联网信道和数据传输规程, 实现与水文信息网的互联。联网设计应符合下列要求。

网络结构选择。各水文自动测报系统中心站与水文信息网连接的网络通常为星形结构。联网通信设计可按以下要求进行。

(1) 应优选已建的专用通信网和公用通信网等现有信道组网。新建联网信道, 应在满足数据传输速率和可靠性的前提下, 按所选网络结构选择通信方式, 进行信道设计。

(2) 联网信道应根据信息量的大小和速率要求选择带宽, 并配置备用信道。

(3) 联网信道的通信可以选择一种方式, 也可以采用多种方式混合组网。

13.5.5 数据处理系统设计

数据处理系统应包括用来完成数据处理任务的应用软件和支持它运行的软硬件、网络环境。

水文自动测报系统的数据处理应包括以下内容: ①对本系统遥测数据和其他水文信息的接收; ②对实时信息进行处理和数据入库; ③建立相应的数据库系统, 管理实时数据和支持系统运行的有关数据; ④实时信息的转发; ⑤根据系统的应用需求完成信息查询、数据的统计分析等。

数据处理系统设计, 根据系统的功能要求, 进行应用软件功能模块的划分, 完成逻辑结构和数据流程设计; 根据系统的规模选择适用的数据库管理系统并完成数据库系统的设计; 根据遥测系统接收、发送数据和通信方式的要求, 选择通信规程和接口标准, 完成数据接收软件的设计; 根据系统需要处理的信息种类, 完成信息处理和入库软件的设计; 根据有关标准和通信协议, 完成信息交换软件的设计; 完成信息查询和分析软件的设计; 确定计算机系统的性能要求, 拟定中心站计算机设备选型和外围设备的配置方案; 系统安全设计。

数据处理系统应具有: 数据接收、数据处理、信息查询、数据转发、数据管理等功能。

在数据处理系统中还可以设置下列扩展功能：①建立和管理历史水文数据、基本数据库等；②进行水文预报作业以及防洪、供水、发电等水利调度方案的计算和优选；③通过接入 INTERNET/INTRANET 等方式，提供信息服务。

应依据系统规模和功能要求，以安全、可靠地实现各项功能为目标配置数据处理系统的硬件和网络设备。无论系统规模大小，都应有实现遥测数据接收、处理、入库，水情信息交换，信息查询和统计计算，以及硬拷贝输出等功能要求的相应设备。仅承担数据接收和转发任务的系统中心站，可不建局域网。

计算机操作系统和应用软件开发工具的选择，应符合下列要求。

(1) 服务器的操作系统应选择稳定可靠、多用户、多任务的操作系统，提高系统的可靠性和可维护性。用于开发运行信息接收、处理、转发和查询等应用软件的操作系统，应选用性能优良可靠、被广为采用的操作系统。

(2) 应用软件的开发可以根据需要，选择适宜的程序开发工具，提高系统的开放性、可靠性和可维护性。

(3) 计算机局域网可以采用以太网、快速以太网、高速以太网协议和 TCP/IP 协议。

13.5.6 目前系统建设存在的问题

发展水文自动测报系统是今后水文测报的方向，这是无可非议的，但是也要看到其中的问题。

众所周知，水文自动测报系统建设费用（成本）是很大的。根据水利部水文局在 1999 年出版的《全国水文自动测报系统建设评价》一书中的数据：从 1979 年至 1999 年 4 月，全国已建和在建的水文自动测报系统达 482 处，由 843 个中心站（含分中心站）、1460 个水文站（含雨量及水位等参数）、1197 个水位站和 4612 个雨量站组成，总投资达 6.18 亿元；其中属水利管理系统的有 394 处，占 81.8%；属水文系统的有 50 处，占 10.4%；属电力系统的有 86 处，占 17.8%；从 2000 年开始，由国家防汛指挥系统工程项目办安排建设的 20 个示范区，中央和地方总投资为 7465 万元（其中中央投资 4384 万元，地方配套 3081 万元，平均一个系统 370 多万元）。同期国家防办又在全国进行 100 座水库自动化建设，项目中包括相当一部分的水文自动测报系统建设，总投资也是几千万元。从 2000 年开始，国家防汛指挥系统工程项目办又要在近 3 年时间内、在全国范围内完成覆盖 11 个省的水文自动测报系统，中央和地方总投资为 3 亿~4 亿元。这里大家要注意一个事实，从 1997 年 4 月至 2000 年底期间全国范围内所进行的水文自动测报系统建设经费还没有参加上述的统计。

如此巨大的投资，没有相当的经济实力是难以办到的。这对一些经济发达地区可能问题不大，但对一些经济欠发达地区就很困难了。

另外系统建成以后，其运行费用也是很大的，据测算，一个系统的年运行费要占到建设费用的 3%~5%，系统建设期间是中央、地方共同投资，当系统建成以后，系统运行费用是由地方承担的，特别是在一些经济欠发达的省份，系统运行费在哪里？这是目前存在的并为许多人不愿意谈到的一个问题。

13.6 水质自动监测系统

13.6.1 系统概述

水质自动监测系统是一套以在线自动分析仪器为核心,运用现代传感技术、自动测量技术、自动控制技术、计算机应用技术以及相关的专用分析软件和通信网络组成的一个综合性的在线自动监测体系。可尽早发现水质的异常变化,为防止下游水质污染迅速做出预警预报,及时追踪污染源,从而为管理决策服务。

水质自动监测在国外起步较早,我国在水质自动监测、移动快速分析等预警预报体系建设方面处在探索阶段。1998年以来,我国已先后在七大水系的10个的重点流域建成了42个地表水水质自动监测系统,黑龙江、广东、江苏和山东等省也相继建成了10个地表水水质自动监测系统。2005年,全国计划在主要流域的重点断面水质自动监测站达到100个,实现水质自动监测周报。目前所用的自动化监测系统多为国外进口设备,国内在水质自动化监测装置制造上跟不上快速发展的水质监测的需要,由此可见,国产化自动监测仪有广阔的开发前景和潜在的销售市场。

13.6.2 系统功能

1. 实现监测自动化

水质自动监测仪具有最佳现场使用效果,可以对水质进行自动、连续监测,数据远程自动传输,随时查询所设站点的水质数据。其先进性体现在实验室(中央控制室)里可以实时显示现场数据,仪器发生故障时,报警功能可提醒用户并告知故障原因。

2. 实现水污染的预警预报

水质自动监测一改过去总在事后才能向有关部门提供水质信息的被动局面,实现了水质发生恶化时仪器自动报警或响应,对流域下游发出水质污染的预警预报,防患未然,充分体现了水利部门水量水质综合管理的优越性。例如,2001年夏季在淮河泄污监测中,淮南石头埠断面的电导率上升趋势极为明显,成功地预测了污水团对下游的影响;2003年1月底至4月初,长江最大支流——汉江接连三次发生水华污染事件,武汉宗关水质自动监测站通过pH值和溶解氧的异常变化,多次率先监测到水华的产生,并连续进行了跟踪、监测,掌握了污染事件的发生、发展、结束过程,对于防止污染事件的进一步发展起到至关重要的作用。

3. 实现水质信息在线查询和共享

水质自动监测系统促进水利部门水环境监测系统计算机联网,改革环境质量和污染源报告的编报,加速全国水环境监测技术向统一化、标准化发展,实现水质信息的在线查询、分析、计算、图表显示、打印等,随时实现各单位之间水质信息的互访共享,实现全流域水环境综合评价,可迅速为领导决策提供科学依据。

13.6.3 系统组成及质量控制

水质污染自动监测系统是在一个水系或一个地区设置若干个有连续自动监测仪器

的监测站，由一个中心站控制若干个固定监测子站，随时对区域的水质污染状况进行连续自动监测，形成一个连续自动监测系统。

子站内装有传感器，用于测定各种污染物的单项指标、综合指标以及气象参数的分析仪器，数据采集通信控制器及通信设备。各子站的工作是长年连续运行的。中心站是各子站的网络指挥中心，又是信息数据中心，它配有功能齐全、储存容量大的计算机系统，由通信联络设备及数据显示、分析、传输和接收的管理软件构成。中心站的主要功能：数据通信、实时数据库、报警、安全管理、数据打印。中心站的工作一般是间歇式的。

自动监测系统在正常运行时一般不需要人的参与，而是在电脑的自动控制下进行工作。其工作系统由信息采集系统、信息传输系统、信息管理系统和信息服务系统四部分组成。

信息采集系统完成自动监测系统的信息采集、整理，并通过通信系统和计算机网络把各类信息传送给水质监测中心站，使决策部门及时了解水质状况，发布水质公报，为控制水质和治理水环境提供科学依据。信息采集系统的建设主要包括自动采样器、自动分析仪和多参数水质监测仪、水量测定装置的配备、设计和安装，以及采样场所的建设工程。

信息传输系统充分利用流域现有的通信网和计算机网络，建立覆盖流域水资源监测实验室的计算机网络系统，实现水资源信息的网上传输和资料共享，以达到快速、准确地传递水质信息的目的，为充分利用水资源提供服务。

1. 水样采集

采样方法分为瞬时采样、周期采样和连续采样3种。采样设备为潜水泵。潜水泵通常安装在采样位置一定深度的水面下，经输水管道将水样输送到子站监测室内的配水槽中。

由于河流、湖泊等天然水中携带有泥沙等细小颗粒物，初滤后的水样经过配水槽，泥沙沉积在槽底，澄清水则以溢流方式分配到各检测仪器的检测池中，多余的水经排水管道排放出去。

潜水泵的安装方式大体可分为两种：①固定式；②浮动式。固定式安装方便，但是采水深度会随水位的涨落而改变，因此在水位变化大的水域中使用，不能保持恒定的采水深度。浮动式是将水泵安装在浮舟上，因浮舟始终漂浮在水面上，无论水位如何变化，采水深度始终保持不变。

从水泵到监测室的输水管道越短越好，以免水质特别是测定溶解氧的水质在输送过程中发生变化。输水管道的长度一般为5~25m。管道要避光安装，以防藻类的生长和聚集。管道还应保温，防止冬天冻冰，堵塞输水管路。

2. 监测指标选择

监测指标的选择一方面要能满足SL 219-98《水环境监测规范》的要求，使其所选择的监测指标尽可能反映比较多的水质特征；另一方面要根据国内外市场上是否有可靠的产品而定，保证监测指标测定结果的可靠性。

由表13-5可见，我国的水质污染监测项目还很有限，特别是重金属和有机污染物的自动化检测仪器更缺。这使得自动监测指标选择受到一定的限制。

表 13-5 水质自动监测系统的监测项目和自动检测方法

监 测 项 目		自 动 检 测 方 法
综合 指标	水温	热敏电阻或铂电阻法
	浑浊度	表面光散射法或分光光度法
	pH 值	玻璃电极法
	电导率	铂电极法
	溶解氧	隔膜电极法
	氧化还原电位	复合电极
	化学需氧量	$K_2Cr_2O_7$ 或 $KMnO_4$ 湿化学法、流动池紫外线吸收光度法或 $KMnO_4$ 反滴定法
	总有机碳	非色散红外线吸收法或紫外催化氧化法
单项 污染 物指 标	氟离子	氟离子电极法
	氯离子	氯离子电极法
	氰离子	氰离子电极法
	氨氮	氨离子电极法
	铬	湿化学自动比色法
	酚	湿化学自动比色法或紫外线吸收光度法
	磷酸盐	钼锑抗分光光度法
	总磷	钼酸铵分光光度法
	总氮	紫外分光光度法
硝酸盐	离子选择电极	

3. 信息传输方式

充分利用各站现有的水情通信条件, 对比选择合适的通信方式, 重点站点可选用一种以上的通信方式, 确保数据的可靠传输。

4. 质量保证与质量控制

水质自动监测系统具有连续运转的特点, 其采水和配水管路的清洗程度、仪器运行状况、试剂与标准溶液的稳定性及分析仪器的基线漂移等都是影响数据质量的重要因素, 为了保证测量精度, 仪器必须带自动清洗、自动校正以及相应的程序控制装置。日常采取的质量控制措施包括定期校准、质控样检查、比对实验验证、试剂有效性检查及数据审核等方法, 应严格按照 HJ/T 96-104-2003《水质自动分析仪技术要求》进行校对试验, 保证数据的有效性。

复 习 题

- 13-1 水文数据自动化系统的含义是什么?
- 13-2 我国计算机处理中对于“定线”是如何处理的?
- 13-3 在曲线与数字的转换上, 我国采用了哪些公式, 它们各自的思路如何?
- 13-4 浮动多项式配方程模型的思路如何? 做法怎样? 为什么要进行所配方程

的合理性检查?

13-5 对于复杂的水位流量关系,用计算机处理的途径怎样?

13-6 用程序判别日分界有什么好处?怎样判别?

13-7 目前计算机处理中,洪水水文要素摘录的思路如何?

参 考 文 献

- [1] 严义顺. 水文测验学. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [2] 李世镇, 林传真. 水文测验学. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [3] 张留柱, 赵志贡等. 水文测验学. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [4] 林传真, 周忠远. 水文测验与查勘. 南京: 河海大学出版社, 1988.
- [5] 周忠远, 舒大兴. 水文信息采集与处理. 南京: 河海大学出版社, 2005.
- [6] 水利部水文司. ISO 标准手册 16—明渠水流测量. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [7] 水利部水文司. SL 219—98 水环境监测规范. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [8] 水利部水文局. 国标水文测验名词与术语. 北京: 中国计划出版社, 1987.
- [9] 水利部水文局. 水文站网规划译文集. 北京: 中国计划出版社, 1986.
- [10] 胡凤彬. 水文站网规划. 南京: 河海大学出版社, 1993.
- [11] 流量测验译文集. 林传真, 舒大兴编译. 北京: 科学技术出版社, 1992.
- [12] 水利部水文司. 水文测验规范. 南京: 河海大学出版社, 1994.
- [13] WMO. Guide to Hydrological Practices, Vol. 1, Data Acquisition and Processing. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [14] WMO. Guide to Hydrological Practices, Vol. 1, Analysis, Forecasting, and other Applications. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [15] 长委水文局. 水文测验学术讨论会论文选集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1983.
- [16] 长委水文局. 水文测验误差研究文集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1984.
- [17] 长委水文局. 水文测验误差研究文集(二). 北京: 学术期刊出版社, 1987.
- [18] 詹道江, 谢悦波. 古洪水研究及应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [19] 水利部水文司. SL 34—92 水文站网规划技术导则. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [20] 水利部水文司. SL 21—90 降雨量观测规范. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [21] 中华人民共和国水利电力部. SD 265—88 水面蒸发观测规范. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [22] 中华人民共和国水利部. GBJ 138—90 水位观测标准. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [23] 水利部水文司. SL 59—93 河流冰情观测规范. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [24] 中华人民共和国水利部. GB 50179—93 河流流量测验规范. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [25] 水利部水文司. SL 59—93 河流冰情观测规范. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [26] 水利部水文司. SL 20—92 水工建筑物测流规范. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [27] 水利部水文司. SL 24—91 堰槽测流规范. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [28] 水利电力部水文局. SD 121—84 水文缆道测验规范. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [29] 水利电力部水文局. SD 185—86 动船法测流规范. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [30] 中华人民共和国水利电力部. SD 174—85 比降——面积法测流规范. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [31] 水利部长江水利委员会水文局. SL 195—97 水文巡测规范. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [32] 中华人民共和国水利部. GB 5019—92 河流悬移质泥沙测验规范. 北京: 水利电力出版

- 社, 1992.
- [33] 水利部长江水利委员会水文局. SL 43—92 河流推移质泥沙及床沙测验规范. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [34] 水利部黄河水利委员会水文局. SL 42—92 河流泥沙颗粒分析规程. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [35] 水利部水文司. SL 58—93 水文普通测量规范. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [36] 水利部长江水利委员会水文局. SL 257—2000 水道观测规范. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [37] 水利部水文司. SL/T 183—96 地下水监测规范. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [38] 建设部综合勘察研究设计院. CJJ/T 76—98 城市地下水动态观测规程. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [39] DZ/T 0133—94 地下水动态观测规程. 中华人民共和国地质矿产行业标准, 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [40] 南京水文水资源研究所. SL 196—97 水文调查规范. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [41] 水利部长江水利委员会水文局. SL 247—1999 水文资料整编规范. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [42] 中华人民共和国水利部. GB/T 50095—98 水文基本术语和符号标准. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [43] 水利部水文局. ISO/TC 113 水文测验国际标准译文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [44] 林祚顶. 对我国地下水监测工作的分析. 地下水, 2003, 25 (4).
- [45] 戴长雷, 迟宝明. 地下水监测研究进展. 水土保持研究, 2005, 12 (2).
- [46] 英爱文. 地下水监测与评价. 水文, 2006, 26 (3).
- [47] 钱正英, 张光斗, 等. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [48] S. E. Rantz and Others. Measurement and Computation of Streamflow. Geological Survey Water—Supply Paper 2175, Washington: United States Government Printing Office, 1982.
- [49] R. G. Kazmann. Modern Hydrology. New York: Harper and Rowpublishers, 1965.
- [50] R. K. Linsley and Others. Hydrology for Engineering. McGraw—Hill, 1982.
- [51] E. M. Wilson. Engineering Hydrology (Fourth Edition). Macmillan Education LTD, 1990.
- [52] W. Boiten. Hydrometry. A. A. Balkema Publishers, 2000.

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "5rC05L+h5oGv5oqA5pyvXzEyMTgyNzc2LnppcA==",
  "filename_decoded": "\u6c34\u4fe1\u606f\u6280\u672f_12182776.zip",
  "filesize": 40850225,
  "md5": "6aab36523e2433bc02ff15c47997edb0",
  "header_md5": "513ffa9c2fa4324ef41735f7f22592a7",
  "sha1": "2a0190ad2deacc0ef81b68998bcb3b103621530",
  "sha256": "0937b98bf0e49d000039dcd44d37d85363c86b6b7eb409aa72c31fc7240653cb",
  "crc32": 1634651836,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 43762907,
  "pdg_dir_name": "\u2566\u00ab\u2568\u253c\u2567\u00f3\u255d\u255d\u2569\u2321_12182776",
  "pdg_main_pages_found": 283,
  "pdg_main_pages_max": 283,
  "total_pages": 298,
  "total_pixels": 1699219248,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```