



“十三五”普通高等教育本科规划教材

MONI DIANZI JISHU SHIYAN
ZHIDAOSHU

模拟电子技术实验 指导书

孙淑艳 赵东 主编
黄晓明 王赞 编写

(第二版)



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电路原理
信号与系统分析
模拟电子技术基础
数字电子技术基础

吉培荣
杜保强
李月乔
李文娜

模拟电子技术实验指导书(第二版)

数字电子技术实验指导书(第二版)

电子技术综合实验(第二版)

电子技术实验指导书(第二版)

电子技术基础实验

电工电子技术(第二版)

电工电子实训

电工测量技术(第二版)

电工测试技术

电工基本常识及技能

电工与电气技术基础实验

高级维修电工培训教程

电机学

电机学学习指导与习题解答

电机与拖动基础

电机与拖动基础学习指导

电力系统分析学习指导

电力电子技术及应用

电力工程基础

电力系统继电保护技术

电力系统继电保护学习指导

电力系统自动化

电力系统运动与调度自动化(第二版)

电力市场营销管理(第三版)

配电网规划

供用电设备

电能计量技术(第二版)

高电压技术(第三版)

发电厂电气运行技术教程

刘向军

龙世瑜

瞿晓

宋绍楼

于文波

李平

张炜

贾红芳

秦健

赵君有

赵君有

刘学军

刘学军

刘学军

张新建

李慧

韦延方

刘学军

张瑛

孟祥萍

刘秋华

朴在林

张炜

王月志

张一尘

王德江



中国电力出版社官方微信



中国电力教材服务官方微信

中国电力出版社教材中心

网 址 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

服务热线 010-63412548 63412523

ISBN 978-7-5123-9744-6



9 787512 397446 >

定价: 33.00 元



“十三五”普通高等教育本科规划教材

模拟电子技术实验指导书

(第二版)

主编 孙淑艳 赵 东
编写 黄晓明 王 赞
主审 戴振刚



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。全书共四章，包括模拟电路基础实验、模拟电路仿真实验、常用电子仪器仪表、NI Multisim 12 使用指南。其中，实验类型包括验证型、综合型和设计型实验。

本书采用实验报告原始数据便携式设计，学生完成实验可将实验原始数据、实验波形等直接填写在原始数据记录处，然后裁下贴在实验报告中，节省时间，适用性强。

本书可作为高等院校电气、电子、信息、通信、自动化、测控、计算机等专业的本、专科教材，同时也可作为参加各类电子设计竞赛学生自学的参考书，以及相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术实验指导书/孙淑艳, 赵东主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2016. 10

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 9744 - 6

I. ①模… II. ①孙… ②赵… III. ①模拟电路—电子技术—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN710—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 211017 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 11 月第一版

2016 年 10 月第二版 2016 年 10 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 393 千字

定价 33.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为贯彻科学发展观，进一步加强普通高等教育教材建设，确保高质量教材进课堂，根据高等院校的教学需要，华北电力大学电子技术课程组总结多年实践教学经验和“十二五”规划教材建设的基础上，编写了一套电子技术基础实践课程系列教材，包括《模拟电子技术实验指导书（第二版）》、《数字电子技术实验指导书（第二版）》、《电子技术基础实验指导书（第二版）》及《电子技术综合实验指导书（第二版）》。本套教材为“十三五”普通高等教育本科规划教材。本套教材充分体现工程技术教育的特点，力求达到教学与实验相结合、硬件电路与软件仿真性结合、理论与应用相统一，培养学生运用电子技术解决实际问题的工程能力和实践能力。其主要内容覆盖模拟电子技术、数字电子技术、电子电路的测试技术以及计算机辅助分析和设计方法等。

《模拟电子技术实验指导书（第二版）》是该套教材中的一部。

(1) 教材编写背景。“模拟电子技术基础”课程是电气信息类及其他相近专业的一门重要技术基础课程，具有较强的工程实践性，并渗透到各专业教学的环节中，是学生基本素质形成和发展的关键课程。“模拟电子技术基础实验”课程是针对“模拟电子技术基础”课程设置的一门独立的实践课程，目的是通过模拟电子技术实验使学生加深对所学“模拟电子技术基础”理论知识的理解，培养学生对模拟电子电路的实验研究能力，正确使用常用的电子仪器和设备，初步掌握模拟电子电路的测试技术以及计算机辅助分析和设计方法。

(2) 教材特点。在内容编排上，通过我校电子技术实验层次化教学和实验室管理模式的改革，除了选择学生必做的经典项目之外，还增加了部分综合型、设计型实验内容，实验内容与理论课程紧密相连，即可以培养学生的基本动手能力、基本分析和解决问题的能力，还为具有超前意识、科学态度严谨的大学生创造了实践环境。通过设计性实践教学训练，可激发学生参加各类电子设计竞赛，并为此选拔、培养和输送人才创造了条件。

(3) 教材内容。全书共包括四章：第一章为模拟电路基础实验，共设置了十个实验项目；第二章为模拟电路仿真实验，共设置了十个实验项目；第三章为常用电子仪器仪表；第四章介绍了NI Multisim 12使用指南。此外，附录部分介绍了电子元器件的基本知识以及在实际应用中所需的参数和功能，电子电路的故障分析与排除方法，Multisim 12中半导体器件的模型参数，以及面包板和万用板的使用方法等，供学生参阅。

(4) 课程要求。教学内容从实现方法和内容上分两个层次：

1) 基础实验的分析与设计，主要是借助模拟实验箱上的资源，使用不同的电子元器件设计、构建模拟电子电路，并使用电子仪器仪表对典型的模拟电子电路进行分析和测试。

2) 计算机辅助分析与设计，主要是借助NI Multisim 12仿真平台，使用Multisim中的各种元器件、各种分析方法和虚拟仪器仪表构建典型的模拟电子电路，并对电路进行辅助分析和设计。

本书仿真实验部分的电路图，元器件符号均采用欧洲标准（DIN），所以为便于学生理

解和使用，本书第二章和第四章涉及的电路图均按仿真软件最终显示电路绘制。

参加本书编写工作的有孙淑艳（第二章、第三章、附录 E），赵东（第一章、第四章），黄晓明（第三章、附录 A、附录 B），王赟（第四章、附录 C、附录 D）。本书由孙淑艳、赵东任主编，黄晓明、王赟参编。戴振刚老师担任本书的主审。本书的编写得到华北电力大学电气与电子工程学院电工电子中心多位教师的帮助，在此向他们表示感谢！

本书尚有待改进之处，敬请读者在使用本书时，将发现的问题及时指出，并将意见和建议及时反馈给我们，以便今后不断完善。编者邮箱为 sshy@ncepu.edu.cn。

编 者

2016 年 6 月于华北电力大学

目 录

前言	
模拟电子技术实验基本要求	1
第一章 模拟电路基础实验	3
实验一 常用电子仪器的使用	3
实验二 共射极单管放大电路	11
实验三 共集电极放大电路	19
实验四 OTL 功率放大电路	25
实验五 差动放大电路	31
实验六 负反馈放大电路	37
实验七 集成运放基本运算电路的分析与设计	43
实验八 有源滤波电路的分析	49
实验九 方波—三角波发生器的设计	57
实验十 用集成稳压器组成直流稳压电源	61
第二章 模拟电路仿真实验	69
实验一 二极管 $V-I$ 特性曲线及应用电路	69
实验二 三极管输出特性曲线的测试	81
实验三 三极管基本共射放大电路的静态分析	91
实验四 三极管基本共射放大电路的动态分析	103
实验五 场效应管共源放大电路	113
实验六 互补对称功率放大电路	121
实验七 差动放大电路	129
实验八 两级负反馈放大电路的分析	135
实验九 有源带通滤波器的设计	143
实验十 RC 桥式振荡电路的分析与设计	147
第三章 常用电子仪器仪表	153
第一节 示波器	153
第二节 信号发生器	167
第三节 数字万用表	179
第四章 NI Multisim 12 使用指南	184
第一节 NI Multisim 12 简介	184
第二节 NI Multisim 12 的基本操作界面	185
第三节 元器件库	186

第四节	仪器仪表库·····	188
第五节	基本分析方法·····	189
第六节	NI Multisim 12 的后处理器·····	199
第七节	NI Multisim 12 的基本操作·····	201
附录 A	常用电子元器件简介·····	212
附录 B	放大器干扰、噪声抑制和自激振荡的消除·····	235
附录 C	电子电路的故障分析与排除·····	238
附录 D	NI Multisim 12 中半导体器件模型参数·····	241
附录 E	面包板和万用板·····	247
参考文献	·····	251

模拟电子技术实验基本要求

模拟电子技术实验课程是与模拟电子技术基础课程配套的重要专业基础实践课程。课程的重点是通过模拟电子技术实验使学生加深对所学理论知识的理解,培养学生对模拟电子电路的实验研究能力,正确使用常用的电子仪器仪表,初步掌握模拟电子电路的测试技术。

一、实验总体目标

模拟电子技术基础课程是电子、信息、电气、计算机和控制等工科专业的重要技术基础课程,具有较强的工程实践性,并渗透于各专业教学的环节中,是学生基本专业素质形成和发展的关键课程。实验课程是培养学生动手、实践能力的必要环节。实验类型包括验证型、综合型和设计型实验。通过验证性实验,在巩固和加深本学科的基本理论的基础上,重点培养学生掌握实验工具(包括仪器、仪表和计算机辅助工具等)、电路的基本测量技术、基本实验方法,培养基本实验技能,为以后进行更复杂的实验打下基础。这类实验不再过分强调验证基础理论,而是以培养基本能力为主。同时在基础实验中,渐进安排设计型和综合型的内容,以开拓思路,提高学生电路分析和设计能力。综合型、设计型实验一般是提出实验任务与要求,给定功能和技术指标,由学生自己拟定实验实施方案,并完成实验任务,从中全面提高学生的素质和创新能力,为以后进行更复杂的实验打下基础。

二、实验总体要求

模拟电子技术实验分为实物实验和仿真实验。学生在实验前要进行预习,完成每个实验的预习要求,并写出预习报告,内容包括实验目的、预习要求、实验原理、实验电路、实验所需仪器设备、实验内容以及指导书上所要求的必要的理论计算结果,切实地掌握理论知识和实验原理,尽量做到带着问题来实验。对于设计型实验,还需要预先设计好电路,画出电路原理图和器件引脚连接图;最好能够在 Multisim 12 等仿真环境下先进行计算机仿真,然后再拟定实验方法和步骤,设计实验表格,估算实验结果,撰写预习实验报告。

(1) 实物实验两人一组进行,实验中要细心连接电路;通电前须仔细检查电路的电源电压和接地情况,检查无误后通电;出现问题时要冷静地分析、查找原因;对实验过程中出现的现象、电路调整的过程以及测量结果要认真客观地记录。

实验中不得随意交换或搬动其他实验台上的仪器、仪表和设备。实验仪器的使用必须严格按照实验指导书中说明的方法操作,如因操作不当造成仪器设备损坏,须酌情进行赔偿。

实验中必须要如实记录实验数据,积极思考,注意实验数据是否符合理论分析。实验完成后,实验结果经指导教师检查无误并签字后方可切断电源,拆除电路,整理实验台面,离开实验室。

实验结束后,撰写实验报告,分析和整理实验数据,加深对理论知识和实验原理的理解,增强利用理论知识,解决设计问题的能力。

(2) 仿真实验一人一组进行,进入实验室找到机位,启动 Multisim 仿真软件,构建实验电路原理图,采取适当的方法对实验电路进行辅助分析与设计。

三、实验报告撰写

实验报告是实验情况的总结,应根据实验目的、实验数据及在实验中观察到的现象,经过分析和整理之后得出结论及心得体会。

(1) 实物实验报告一人一份独立完成,实验报告要有理论分析、要实事求是、字迹要清楚、文理要通顺、图表要整洁、结论要明确。实物实验报告内容主要有:

- 1) 实验名称、专业班级、姓名、实验台号、实验日期、指导教师;
- 2) 列出本次实验所用电子仪器仪表的数量和型号;
- 3) 简单扼要地写出实验步骤;
- 4) 合理使用便撕式原始数据记录表;
- 5) 整理数据并绘制曲线,数据要真实,曲线要光滑,最好用坐标纸绘制;
- 6) 分析实验数据,得出合理结果,给出明确结论。

(2) 仿真实验报告是边实验边撰写,实验完成后将实验电路和实验报告打包,然后通过教学平台提交至教师机。

四、实验成绩考核

采取多段式、多方位实验考核方式。多段式考核是指总的实验考核成绩来自于整门课程进行中的各个阶段成绩;多方位考核是指每个阶段的成绩来自实验过程中的多个方面,包括:

- (1) 实验项目原理理解与电路原理图设计;
- (2) 实际电路连接是否正确;
- (3) 能否正确选择元器件;
- (4) 能否正确使用电子仪器仪表;
- (5) 实验电路调试及实验结果是否正确;
- (6) 实验数据记录与整理。

总成绩=实验考试成绩(60%) + 平时成绩 [30% (每次实验操作成绩+实验报告成绩)] + 课堂表现(10%)。总成绩分优、良、中、及格、不及格五级。实验考试为一人一组在规定的时间内完成指定的实验内容。

注:凡因病、因事及预习不合格者给予一次补做实验的机会,无故缺席者另做处理。

第一章 模拟电路基础实验

实验一 常用电子仪器的使用

一、实验目的

(1) 学习电子技术实验中常用的电子仪器仪表——数字存储示波器（以下简称示波器）、函数/任意波形发生器（以下简称信号发生器）、数字万用表等的主要技术指标、性能及正确使用方法。

(2) 熟悉模拟电子技术实验箱的结构和使用方法。

(3) 掌握几种典型信号的幅值、有效值、周期和频率等参数的测量方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

(1) 阅读第三章有关数字存储示波器、函数/任意波形发生器以及数字万用表的使用说明，了解这些仪器仪表的主要技术性能指标，熟悉各仪器仪表面板按钮的作用和使用方法。

(2) 了解实验所用仪器仪表的主要用途并回答下列问题：

1) 如何使用数字存储示波器测量交流电压信号的有效值？

2) 当数字存储示波器显示屏上的波形幅值超出显示屏时，应该调整示波器面板上的哪个旋钮？

(3) 如何用函数/任意波形发生器产生频率 $f=1\text{kHz}$ 、峰—峰值 $U_{p-p}=20\text{mV}$ 的正弦信号？

四、实验原理

在模拟电子电路实验中，经常使用的电子仪器仪表有示波器、信号发生器、直流稳压电源等，它们和数字万用表一起可以完成对模拟电子电路的静态和动态工作情况的测试。

实验中要对各种电子仪器仪表进行综合使用，可按照信号流向，以连线简洁，方便调节、观察与读数等为原则进行合理布局。各电子仪器仪表与被测实验电路之间的布局与连接如图 1-1-1 所示。接线时应注意，为防止外界干扰，各仪器仪表的公共接地端应连接在一起，称为共地。示波器、信号发生器的引线通常采用屏蔽线或专用电缆线，直流电源的引线采用普通导线，数字万用表采用专用的表笔线。

(一) DS2072A 型数字存储示波器

示波器是一种用途很广的电子测量仪器，既能直接显示电信号的波形，又能对电信号进行各种参数的测量。本实验所用示波器为 DS2072A 型数字存储示波器，具有 $0\sim 70\text{MHz}$ 的频带宽度，可同时显示两路被测信号的波形，并对被测信号的各种参数进行测量。

DS2072A 型数字存储示波器的详细介绍请参阅本教材第三章第一节，此处仅对其基本使用方法进行介绍，并以 CH1 通道为例进行说明。

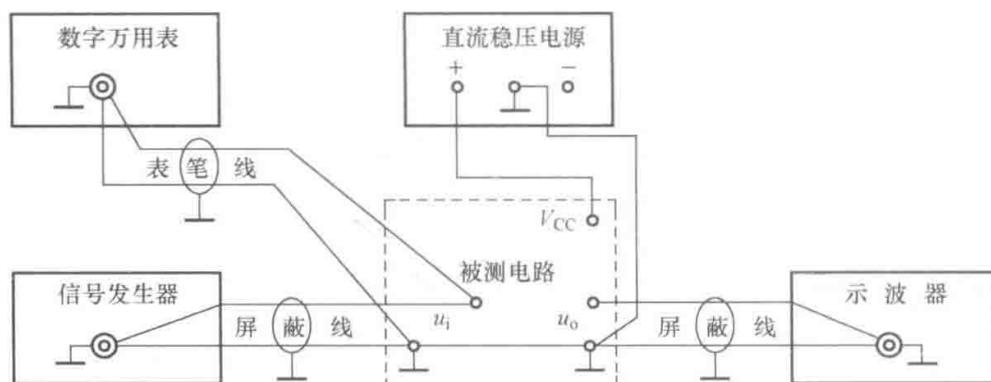


图 1-1-1 模拟电子电路中常用电子仪器仪表与被测实验电路之间的布局与连接图

1. 示波器功能检查

首先将探头衰减开关推到 1X 的位置，并与示波器正确连接，然后打开示波器电源 ，执行所有自检项目。按下  按钮将示波器恢复为默认设置，按  键设置耦合为直流，探头衰减为 1X，将探头基准导线（黑夹子）连接到示波器“探头元件”接地端，将探头端部（红夹子或钩子）连接到示波器“探头元件”补偿信号输出端上，按下  按钮，几秒内屏幕会显示频率为 1kHz、峰—峰值约为 3V 的方波，此方波为示波器的基准信号，如图 1-1-2 所示。图中，CH1 通道的显示波形颜色为黄色。使用相同方法检查其他通道。如实际显示的方波形状与图 1-1-2 不相符，请执行“探头补偿”。

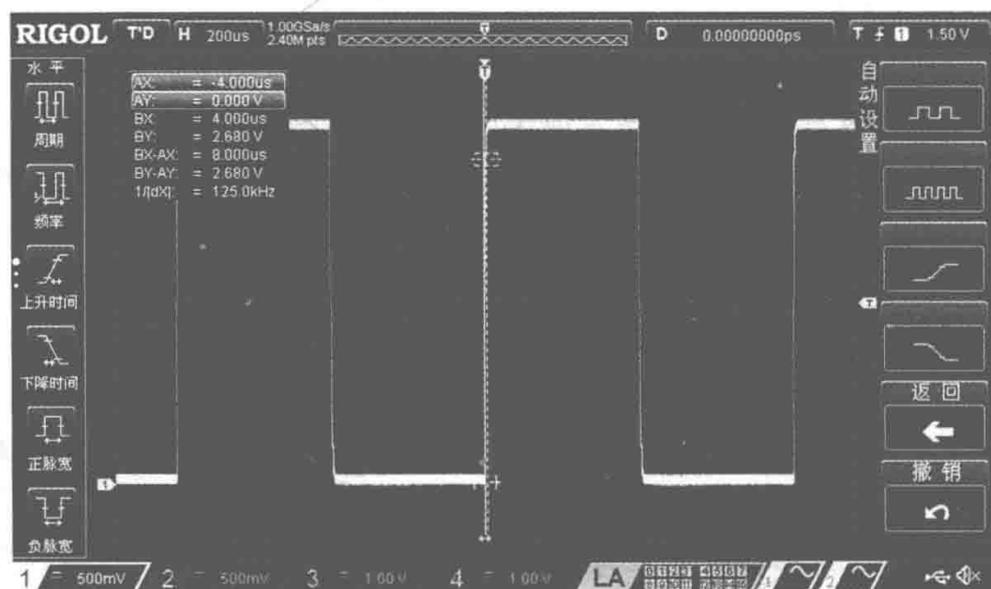


图 1-1-2 CH1 通道显示基准信号

2. 信号波形周期、频率和幅值的测量

通过示波器可以显示某一被测信号的波形，但仍需要采取一定的方法测量该信号的幅值、周期和频率等参数。常用的测量方法有刻度测量、光标手动测量和自动测量三种方法。此处仅结合示波器基准信号简单介绍光标手动测量和自动测量的方法，详细介绍参阅本教材第三章第一节。

(1) 信号波形周期、频率和幅值的光标手动测量。

1) 屏幕上显示出基准信号的波形后，按光标测量 **【CURSORS】** 按钮，在屏幕上出现两条水平的光标线（一条实线光标 A 和一条虚线光标 B）和两条垂直的光标线（一条实线光

标 A 和一条虚线光标 B)，屏幕右侧显示一系列菜单，包括【模式】【选择】【信源】【光标 A】【光标 B】和【光标 AB】六项，如图 1-1-3 所示。

2) 光标测量有关闭、手动方式、追踪方式、自动方式四种模式。按【模式】选项按钮，选择“手动”方式。

3) 按【选择】选项按钮，选择两条水平光标线或两条垂直光标线。

4) 按【信源】选项按钮，选择信源为“CH1”。

5) 选择【光标 A】，旋转万能旋钮调节光标 A 的位置。

6) 选择【光标 B】，旋转万能旋钮调节光标 B 的位置。

7) 其测量值显示在屏幕的左上角，如图 1-1-3 所示。

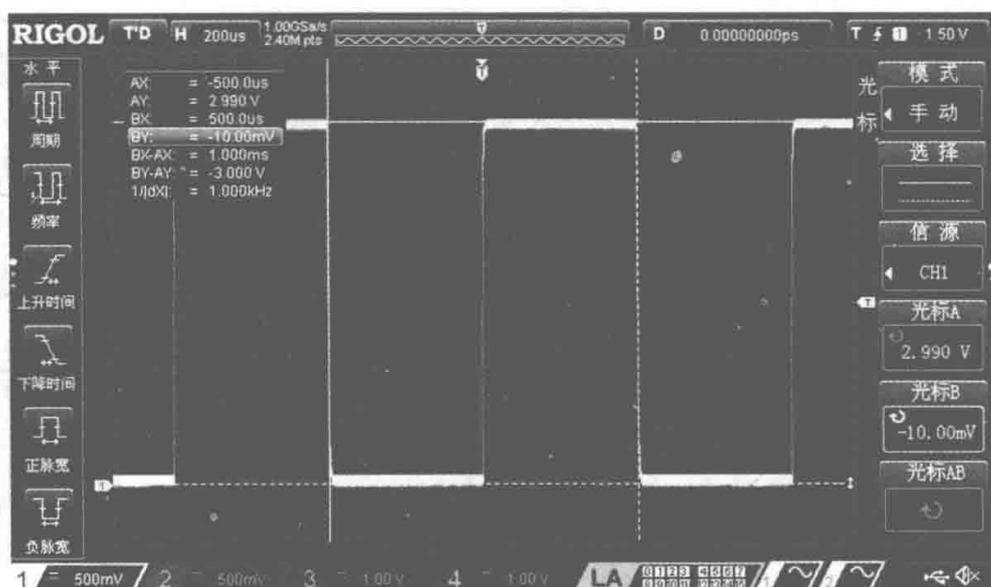


图 1-1-3 光标手动测量菜单以及测量结果

(2) 信号波形周期、频率和幅值的自动测量。

1) 按自动测量【MEASURE】按钮，此时屏幕右侧显示一系列菜单，包括【信源】【频率计】【移除测量】【全部测量】【全部测量信源】和【统计】六项，如图 1-1-4 所示。

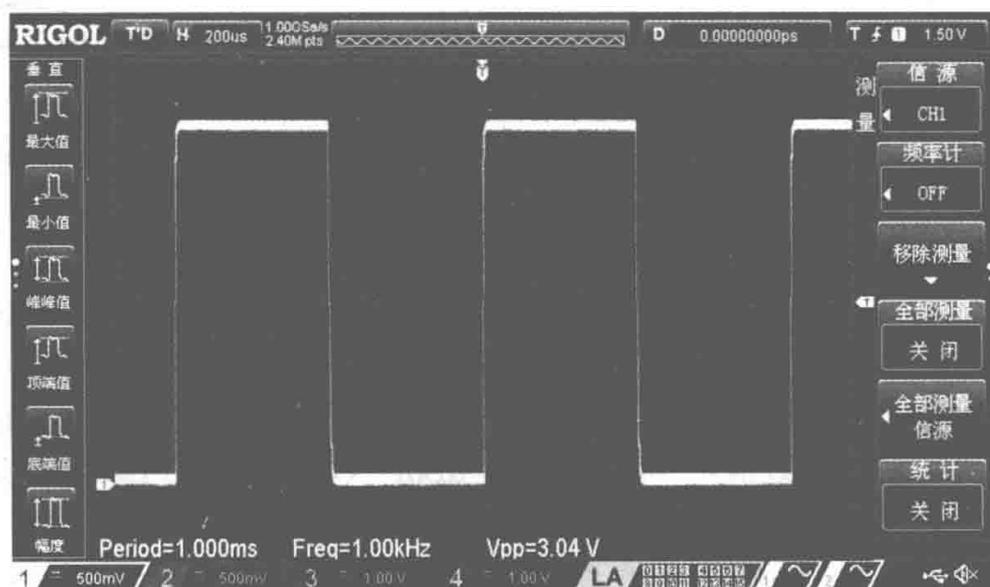


图 1-1-4 自动测量菜单以及测量结果

2) 按【信源】选项按钮, 选择输入信号的通道, 如选择 CH1 通道。

3) 按屏幕左侧  按钮设置水平测量参数或垂直测量参数, 测量结果可以以多种字号显示在屏幕底部, 如图 1-1-4 所示。

3. 停止功能

如果被测信号不能在屏幕上稳定显示, 无法进行测量时, 可按  按钮, 屏幕上便会静止地显示出当前捕捉到的波形。此时, 可旋转水平灵敏度调节旋钮  SCALE 和垂直灵敏度调节旋钮  SCALE 将波形调整到适当大小(通常情况要求显示波形的 2~3 个完整周期, 幅值占屏幕的 1/3~2/3), 再按上述的光标功能进行相应参数的测量。调整完成后, 再次按下  按钮, 退出停止模式。

(二) DG1032Z 型函数/任意波形发生器

DG1032Z 型函数/任意波形发生器可单通道或同时双通道输出五种基本波形, 包括正弦波、方波、锯齿波、脉冲和噪声。其前面板提供五个功能按钮用于选择相应的波形, 按下相应的按钮即可选中所需波形, 此时, 按钮背灯点亮, 用户界面右侧显示相应的功能名称及参数设置菜单。开机时, 该信号发生器默认设置频率为 1kHz、峰—峰值 U_{P-P} 为 5V 的正弦波。

1. 开机并选择输出通道

正确连接电源后, 按下前面板的电源按钮  , 打开信号发生器。开机过程中信号发生器执行初始化过程和自检过程, 之后屏幕进入默认界面。

该信号发生器前面板  按钮用于切换选择 CH1 或 CH2 通道。该信号发生器默认选中 CH1 通道, 用户界面中 CH1 对应的区域高亮显示, 且通道状态栏的边框显示为黄色。此时, 按下前面板  按钮可选中 CH2, 用户界面中 CH2 对应的区域高亮显示, 且通道状态栏的边框显示为蓝色。选中所需的输出通道后, 就可以配置所选通道的波形和参数。

2. 设置基本波形参数

例如, 要从 CH1 通道输出一个频率为 20kHz, 峰—峰值为 $2.5V_{P-P}$, 偏移量为 $500mV_{DC}$, 起始相位为 90° 的正弦波, 可以按以下操作实现:

(1) 按通道选择按钮  , 选中 CH1, 此时通道状态栏边框以黄色标识。

(2) 按  按钮, 选择正弦波, 背灯变亮表示功能选中, 屏幕右侧出现该功能对应的菜单, 如图 1-1-5 所示;

(3) 按  按钮, 使“频率”高亮显示, 通过数字键盘输入“20”, 在弹出的菜单中选择单位“kHz”。频率范围为 $1\mu\text{Hz}\sim 60\text{MHz}$, 可选的频率单位有“MHz”“kHz”“Hz”“mHz”“ μHz ”; 再次按下此按钮切换至周期的设置, 可选的周期单位有“sec”“msec”“ μsec ”“nsec”。

(4) 按  按钮, 使“幅值”高亮显示, 通过数字键盘输入“2.5”, 在弹出的菜单中选择单位“ V_{pp} ”(峰—峰值)。幅值范围受阻抗和频率/周期设置的限制, 可选的幅值单位有“ V_{pp} ”“ mV_{pp} ”“ V_{rms} ”(有效值)“ mV_{rms} ”和“dBm”(功率单位, 分贝毫瓦, 高阻时无效); 再次按下此按钮切换至高电平设置, 可选的高电平单位有“V”和“mV”。

(5) 按  按钮, 使“偏移”高亮显示, 通过数字键盘输入“500”, 在弹出的菜单中选择单位“ mV_{DC} ”。偏移范围受阻抗和幅值/高电平设置的限制, 可选的偏移单位有“ V_{DC} ”和“ mV_{DC} ”; 再次按下此按钮切换至低电平设置。低电平应至少比高电平小 1mV (输出阻抗为

50Ω时), 可选的低电平单位有“V”和“mV”。

(6) 按 **起始相位** 按钮, 通过数字键盘输入“90”, 在弹出的菜单中选择单位“°”。起始相位值范围为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。

(7) 按 **Output** 按钮, 背灯变亮, CH1 输出通道连接器以当前配置输出正弦波信号。

上述 (3) ~ (7) 操作也可以使用方向键和旋钮设置参数数值。使用方向键移动光标选择需要编辑的单位, 再旋转旋钮修改数值。

(8) 使用 BNC 连接线将 DG1032Z 的 CH1 输出通道与示波器相连接, 图 1-1-6 为由示波器观察到的波形。

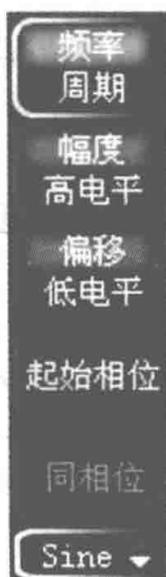


图 1-1-5 输出正弦波的菜单

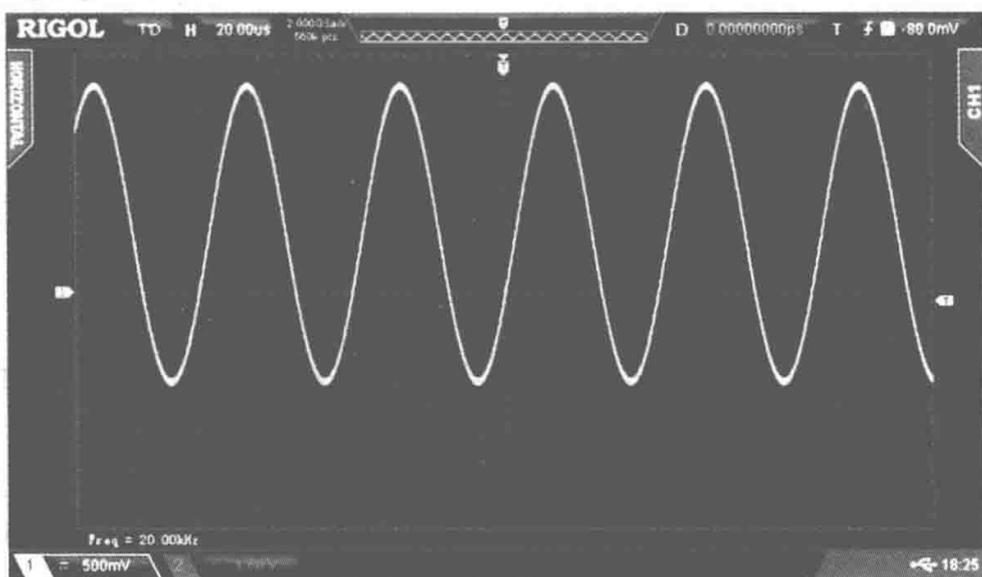


图 1-1-6 示波器显示 DG1032Z 输出的正弦波

(三) DM3058 型数字万用表

DM3058 型数字万用表是一款 $5\frac{1}{2}$ 位双显数字万用表, 是针对高准确度、多功能、自动测量的用户需求而设计的产品, 集基本测量功能、多种数学运算功能、任意传感器测量等功能于一身。

DM3058 型数字万用表拥有高清晰的 256×64 点阵单色液晶显示屏, 易于操作的键盘布局 and 清晰的按键背光和操作提示, 使其更具灵活、易用的操作特点; 支持 RS-232、USB、LAN 和 GPIB 接口。

DM3058 型数字万用表可用来测量交直流电压、电流, 以及电阻、电容、二极管、三极管、频率、电路通断, 是企业、学校及科研单位的理想工具。在使用 DM3058 型数字万用表过程中, 要根据被测信号的属性选择合适的挡位和量程; 为了防止过载而损坏, 测量前一般先把量程开关置于量程较大位置上, 然后在测量中逐挡减小量程。

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。
- (4) DM3058 型数字万用表。

六、实验内容和要求

(一) 观测数字存储示波器机内基准信号

(1) 基准信号连接。用探头连接示波器的信号输入端 CH1~CH2, 将探头端部(红夹子或钩子)和基准导线(黑夹子)连接到示波器“探头元件”连接器上, 如图 1-1-7 所示。

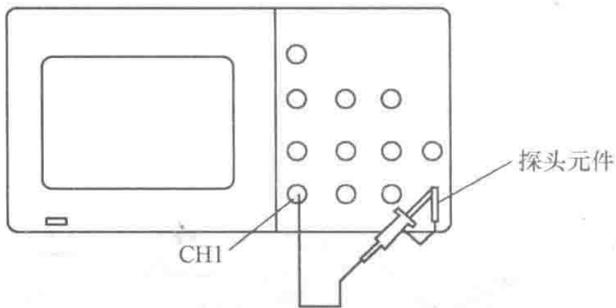


图 1-1-7 自检功能连接图

(2) 显示“基准信号”波形。打开示波器电源, 示波器执行所有自检项目, 并确认通过自检。按下  按钮将示波器恢复为默认设置。根据被测信号的参数和当前波形显示的情况, 手动调整对应通道的水平和垂直控制系统, 使得示波器在屏幕中显示合适波形(通常情况要求完整显示波形的 2~3 个周期, 幅值占屏幕的 1/3~2/3)。

(3) 信号测量。使用光标手动测量方法测量“基准信号”的频率和峰—峰值, 将测量结果记入数据表 1-1-1 中。

(二) 设置信号发生器输出正弦信号并进行观测

(1) 设置 DG1032Z 型函数/任意波形发生器, 使 CH1 通道输出频率为 1kHz、峰—峰值为 1V 的正弦波信号。

(2) 正确连接示波器与信号发生器, 调整示波器使信号波形显示合适, 使用光标手动测量方法测量该信号的周期、频率和峰—峰值, 将测量结果和有效值计算结果记入数据表 1-1-2 中。

(3) 设置 DG1032Z 型函数/任意波形发生器, 使 CH1 通道输出频率为 10kHz、峰—峰值为 50mV 的正弦波信号。按下示波器的  按钮, 等待示波器自动进行设置, 完成后显示合适波形, 然后使用自动测量功能测量该信号的周期、频率、峰—峰值和有效值, 将测量结果记入数据表 1-1-2 中。

(三) 用数字万用表测量模拟实验箱中的电源

用数字万用表测量模拟实验箱中的直流稳压电源电压值, 并将测量结果填入数据表 1-1-3 中; 再用万用表测量模拟实验箱中的直流信号源的电压值(为一个电压范围), 将测量结果填入数据表 1-1-4 中。

七、注意事项

(1) 预习报告只需写入预习实验内容, 无需抄录实验指导书中所有内容。实验过程中所有的测量数据需记录在本书中提供的便撕式原始数据记录表, 待实验完成, 经指导教师签字后撕下贴在实验报告的原始数据记录页上。

(2) 熟悉实验原理和实验内容, 从而减少实验的盲目性。

(3) 熟练各种仪器仪表的使用方法及使用范围。

八、实验报告

(1) 整理实验数据, 回答预习要求中的题目。

(2) 归纳本次实验用到的示波器、信号发生器和数字万用表的使用方法。

(3) 写出通过本次实验掌握了哪些实验方法, 实验中须注意哪些事项, 有些什么体会, 以及对实验方法的改进建议。

(4) 附上原始数据记录(实验指导书中), 并由指导教师签名。

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-1-1 对示波器机内基准信号进行观测

	标准值	实测值
频率 f (kHz)		
峰-峰值 U_{P-P} (V)		

内容 2:

数据表 1-1-2 设置信号发生器输出正弦信号并进行观测

正弦信号	示波器测量值			
	周期 (ms)	频率 (Hz)	峰-峰值 (V)	有效值 (V)
$f=1\text{kHz}$, $U_{P-P}=1\text{V}$	光标手动测量			计算值
$f=10\text{kHz}$, $U_{P-P}=50\text{mV}$	自动测量			

内容 3:

数据表 1-1-3 用数字万用表测量模拟实验箱中的直流电源电压值

直流电源的电压值 (V)	+12	-12	+5	-5
测量值 (V)				

数据表 1-1-4 用数字万用表测量模拟实验箱中的直流信号源

直流信号源 (V)	-5~+5	-5~+5
测量值 (V)		

指导教师: _____

实验日期: _____

实验二 共射极单管放大电路

一、实验目的

- (1) 掌握放大电路静态工作点的调试方法, 分析静态工作点对放大电路输出波形的影响, 观察饱和失真和截止失真现象。
- (2) 掌握放大电路电压放大倍数和最大不失真输出电压的测试方法。
- (3) 熟悉常用电子仪器及模拟电路实验设备的使用。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 阅读教材中有关分压式共射极放大电路的工作原理。
- (2) 估算实验电路的静态工作点 Q 和电压放大倍数 \dot{A}_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。假设: 三极管 VT 的 $\beta=100$, $r_{be}=1.5\text{k}\Omega$, $U_{BE}=0.7\text{V}$; 电路元件参数分别为 $R_{B1}=62\text{k}\Omega$, $R_{B2}=20\text{k}\Omega$, $R_C=2.4\text{k}\Omega$, $R_{F1}=100\Omega$, $R_E=1\text{k}\Omega$, $R_L=2.4\text{k}\Omega$ 。
- (3) 改变静态工作点对放大电路的输入电阻 R_i 是否有影响? 改变负载电阻 R_L 对输出电阻 R_o 是否有影响?

四、实验原理

图 1-2-1 为电阻分压式工作点稳定共射极单管放大电路实验电路图。其偏置电路采用 R_{B1} 和 R_{B2} 组成的分压电路, 并在发射极接有电阻 R_{F1} 和 R_E , 以稳定放大电路的静态工作点。当在放大电路输入端 B 加入输入信号 u_i 后, 在放大电路的输出端便可得到一个与 u_i 相位相反、幅值被放大的输出信号 u_o , 从而实现了电压放大。注: R_s 、 R_{B1} 的电阻值依实验所用的实际电路而定。

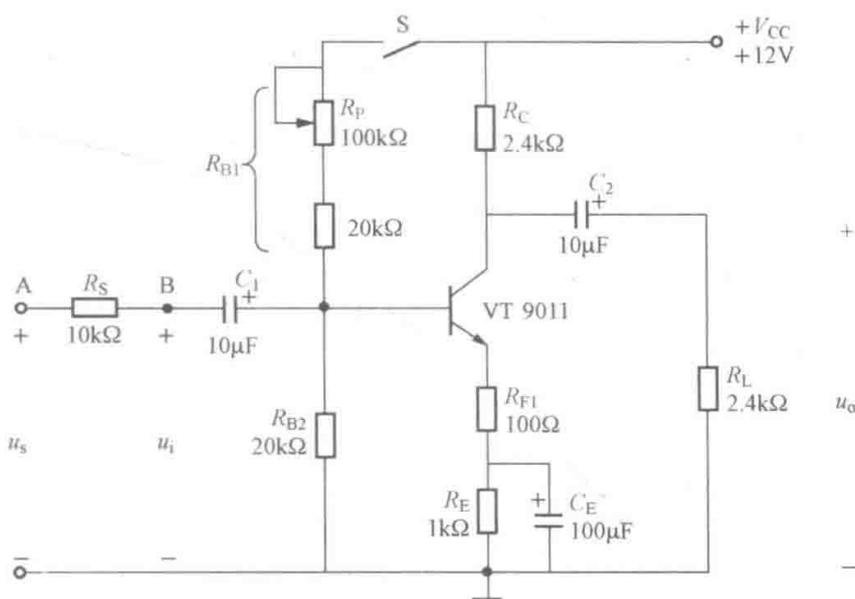


图 1-2-1 共射极单管放大电路实验电路

在图 1-2-1 电路中, 当流过偏置电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 的电流远大于三极管 VT 的基极电流 I_B 时 (一般为 5~10 倍), 则静态工作点可用下式估算:

$$U_B \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$I_E \approx \frac{U_B - U_{BE}}{R_E + R_{F1}} \approx I_C$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_{F1} + R_E)$$

电压放大倍数

$$A_u = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{F1}}$$

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_E}$$

输入电阻

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{F1}]$$

输出电阻

$$R_o \approx R_C$$

由于电子器件性能的分散性比较大, 因此在设计和制作晶体管放大电路时, 离不开测量和调试技术。所用元器件参数应根据电路性能要求而选定, 在搭建电路时元器件参数应测定。在完成设计和装配以后, 还必须测量和调试放大电路的静态工作点和各项性能指标。一个优质放大电路, 必定是理论设计与实验调整相结合的产物。因此, 除了学习放大电路的理论知识 and 设计方法外, 还必须掌握必要的测量和调试技术。

放大电路的测量和调试一般包括: ①放大电路静态工作点的测量与调试; ②消除干扰与自激振荡; ③放大电路各项动态指标的测量与调试等。

(一) 放大电路静态工作点的测量与调试

1. 静态工作点的测量

测量放大电路的静态工作点, 应在输入信号 $u_i = 0$ 的情况下进行, 即将放大电路输入端与地端短接, 然后选用量程合适的直流毫安表和直流电压表, 分别测量晶体管的集电极电流 I_C 以及各电极对地的电位 U_B 、 U_C 和 U_E 。一般实验中, 为了避免断开集电极, 常采用测量电压 U_E 或 U_C , 然后计算出 I_C 的方法。例如, 只要测出 U_E , 即可用 $I_C \approx I_E = \frac{U_E}{R_E + R_{F1}}$ 算出

I_C (也可根据 $I_C = \frac{V_{CC} - U_C}{R_C}$, 由 U_C 确定 I_C), 同时也能算出 $U_{BE} = U_B - U_E$, $U_{CE} = U_C - U_E$ 。

为了减小误差, 提高测量准确度, 应选用内阻较高的直流电压表, 一般数字万用表的输入阻抗为 $10\text{M}\Omega$ 左右。

2. 静态工作点的调试

放大电路静态工作点的调试是指对管子集电极电流 I_C (或集—射间电压 U_{CE}) 的调整与测试。静态工作点是否合适, 对放大电路的性能和输出波形都有很大影响。工作点偏高, 放大电路在加入交流信号以后易产生饱和失真, 此时 u_o 的负半周将被削底, 如图 1-2-2 (a) 所示; 工作点偏低则易产生截止失真, 即 u_o 的正半周被削顶, 如图 1-2-2 (b) 所示。这些情况都不符合不失真放大的要求, 所以在选定工作点以后还必须进行动态调试, 即在放大电路的输入端加入一定的输入电压 u_i , 检查输出电压 u_o 的大小和波形是否满足要求。如不满足, 则应调节静态工作点的位置。

改变电路参数 V_{CC} 、 R_C 、 R_B (R_{B1} 、 R_{B2}) 都会引起静态工作点的变化, 如图 1-2-3 所示。但通常多采用调节偏置电阻 R_{B1} 的方法来改变静态工作点, 如减小 R_{B1} , 则可使静态工作点抬高。

最后需要说明的是, 上面所说的工作点“偏高”或“偏低”不是绝对的, 应该是相对信号的幅度而言, 如输入信号幅度很小, 即使工作点较高或较低也不一定会出现失真。所以确切地说, 产生波形失真是信号幅度与静态工作点设置配合不当所致。如需满足较大信号幅度的要求, 静态工作点最好尽量靠近交流负载线的中点; 如输入信号较小, 可适当降低 Q 点。

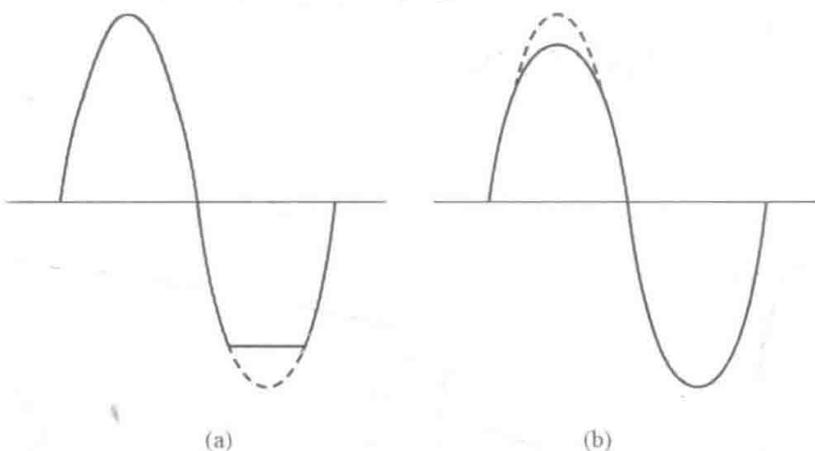


图 1-2-2 静态工作点对 u_o 波形失真的影响
(a) 饱和失真; (b) 截止失真

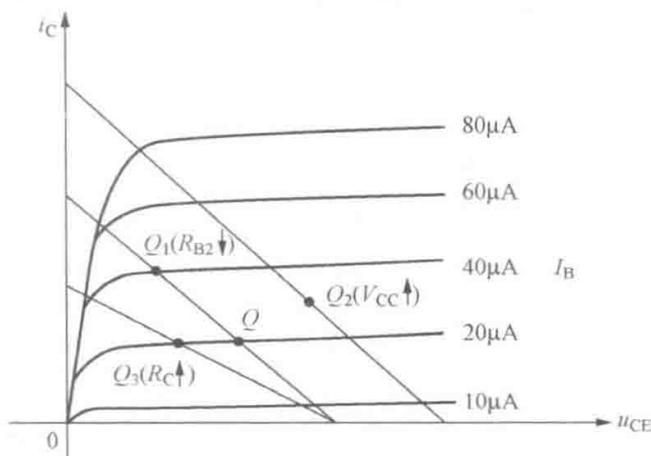


图 1-2-3 电路参数对静态工作点的影响

(二) 放大电路动态指标测试

放大电路动态指标包括电压放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 、最大不失真输出电压 U_{OP-P} (动态范围) 和通频带 f_{BW} 等。

1. 电压放大倍数 A_u 的测量

调整放大电路到合适的静态工作点, 然后加入输入电压 u_i , 在输出电压 u_o 不失真的情况下, 测出 u_i 和 u_o 的有效值 U_i 和 U_o , 则

$$A_u = \frac{U_o}{U_i}$$

2. 输入电阻 R_i 的测量

为了测量放大电路的输入电阻, 按图 1-2-4 所示电路在被测放大电路的输入端与信号源之间串入一已知电阻 R_s , 在放大器正常工作的情况下, 测出 U_s 和 U_i , 则根据输入电阻的定义可得

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_R/R_s} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s$$

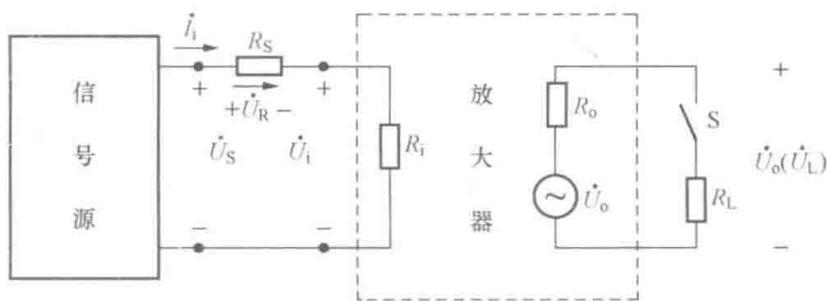


图 1-2-4 输入、输出电阻测量电路

测量时应注意下列几点:

(1) 由于电阻 R_s 两端没有电路公共接地点, 所以测量 R_s 两端电压 U_R 时必须分别测出 U_s 和 U_i , 然后按 $U_R = U_s - U_i$ 求出 U_R 值。

(2) 电阻 R_s 的值不宜取得过大或过小, 以免产生较大的测量误差, 通常取 R_s 与 R_i 为同一数量级为好, 本实验 $R_s = 10\text{k}\Omega$ 。

3. 输出电阻 R_o 的测量

按图 1-2-4 所示电路, 在放大电路正常工作条件下, 测出输出端不接负载 R_L 的输出电压 U_o 和接入负载后的输出电压 U_L , 根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$$

即可求出

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L$$

在测试中应注意, 必须保持 R_L 接入前后输入信号的大小不变。

4. 最大不失真输出电压 U_{OP-P} 的测量 (最大动态范围)

如上所述, 为了得到最大动态范围, 应将静态工作点调在交流负载线的中点。为此在放大器正常工作情况下, 逐步增大输入信号的幅度, 并同时调节 R_P (改变静态工作点), 用示波器观察 u_o , 当输出波形同时出现削底和削顶现象 (见图 1-2-5) 时, 说明静态工作点已调在交流负载线的中点。然后反复调整输入信号, 使波形输出幅度最大, 且无明显失真时测出最大不失真输出电压 U_{OP-P} 有效值 $U_{cm} = U_{OP-P} / 2\sqrt{2}$ 。

5. 放大电路幅频特性的测量

放大电路的幅频特性是指放大器的电压放大倍数 A_u 与输入信号频率 f 之间的关系曲线。单管阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 1-2-6 所示。 A_{um} 为中频电压放大倍数, 通常规定电压放大倍数随频率变化下降到中频放大倍数的 $1/\sqrt{2}$ 倍, 即 $0.707A_{um}$ 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H , 则通频带 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

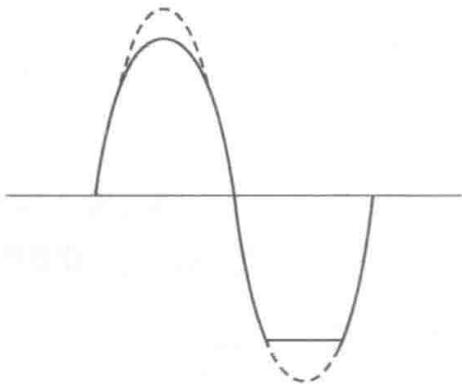


图 1-2-5 静态工作点合适, 输入信号太大引起的失真

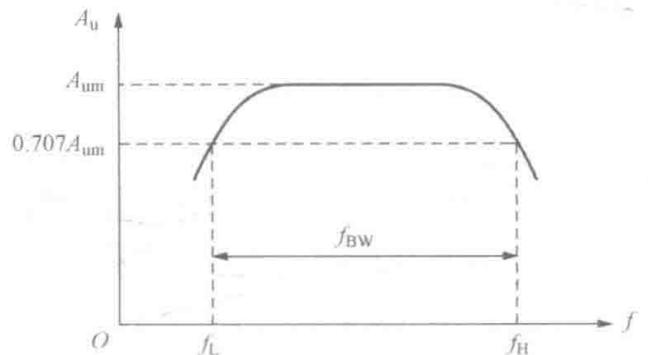


图 1-2-6 幅频特性曲线

放大电路的幅频特性就是测量不同频率信号时的电压放大倍数 A_u 。为此, 可采用前述测量 A_u 的方法, 每改变一个信号频率, 测量其相应的电压放大倍数。测量时应注意取点要恰当, 在低频段与高频段应多测几点, 在中频段可以少测几点。此外, 在改变频率时, 要保持输入信号的幅度不变 (需要随时监测、调整), 且输出波形不得失真。

6. 干扰和自激振荡的消除 (参考附录 B)

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。
- (4) DM3058 型数字万用表。
- (5) 电阻器: $2.4\text{k}\Omega \times 1$ 。

六、实验内容和要求

实验电路如图 1-2-1 所示。为防止干扰,各仪器的公共端必须连在一起,信号发生器和示波器的引线应采用专用电缆线或屏蔽线,如使用屏蔽线,则屏蔽线的黑夹子应接在公共接地端上。

(一) 调试静态工作点

将放大电路输入端 B 接地,即设置 $u_i=0$,开关 S 闭合,接通 +12V 电源,调节 R_p ,使 $U_E=2.0\text{V}$,用万用表的直流电压挡测量 U_B 、 U_E 、 U_C ;然后断开 +12V 电源或关闭电源开关,断开开关 S,用万用表的电阻挡测量 R_{B1} 值,将测量结果记入数据表 1-2-1 中,并计算静态工作点。

(二) 测量不同负载下的电压放大倍数 A_u

在放大电路输入端 B 加入正弦信号 u_i ($f=1\text{kHz}$ 、 $U_{iP-P}=30\text{mV}$),用示波器同时观察放大电路的输入电压 u_i 和输出电压 u_o 波形。在输出波形不失真的情况下测量数据表 1-2-2 中两种情况下输出电压峰—峰值 U_{oP-P} ,观察 u_o 与 u_i 的相位关系,将测量结果记入数据表 1-2-2 中,并计算两种情况下的电压放大倍数 A_u 。

(三) 测量输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

在放大电路输入端 A 加入正弦信号 u_s ($f=1\text{kHz}$ 、 $U_{sP-P}=60\text{mV}$),用示波器观察输出电压 u_o 波形。在输出波形不失真的情况下用示波器分别测出 A、B 点的电压峰—峰值 U_{sP-P} 、 U_{iP-P} ,将测量结果记入数据表 1-2-3 中,并计算输入电阻 R_i ;在输入信号不变的情况下,用示波器测量空载时的输出电压峰—峰值 U_{oP-P} ,接上负载 $R_L=2.4\text{k}\Omega$,测量带载时的输出电压峰—峰值 U_{iP-P} ,将测量结果记入数据表 1-2-3 中,并计算输出电阻 R_o 。

(四) 观察静态工作点对输出波形失真的影响

调节 R_p 到最大,适当调节信号 u_s 的幅度,用示波器观察输出波形,解释观察到的现象,绘出 u_o 的波形,并测出此时的 U_{CE} 值,将测量结果记入数据表 1-2-4 中。然后调节 R_p 到最小,重复上述调节过程,将测量结果记入数据表 1-2-4 中。

(五) 测量最大不失真输出电压 U_{oP-P} (有效值)

置 $R_L=2.4\text{k}\Omega$,同时调节输入信号 u_s 的幅度和电位器 R_p ,用示波器同时观察输入 u_i 和输出 u_o 波形,当输出波形同时出现削底和削顶失真时,说明静态工作点已调在交流负载线的中点。然后反复调整输入信号,使波形输出幅度最大,且无明显失真时,用示波器直接读出 U_{iP-P} 、 U_{oP-P} 和 U_{om} 的值,将结果记入数据表 1-2-5 中。

七、注意事项

- (1) 检测所用导线是否导通,尽量选择短导线避免干扰;接好电路检查无误再通电。
- (2) 先连接直流通路测静态工作点,接 $V_{CC}=+12\text{V}$ 和地线,并将开关置于接通的状态。

态；测量电阻 R_{B1} 的时候需要将 R_{B1} 和电路断开（即开关 S 断开）。

(3) 测量静态电压时，注意正确调整万用表挡位；实验中不直接测量电路电流值，通过测量两点电位得出电压，再通过计算得到电流。调节电位器时动作需轻柔些，静态工作点调好后，不要再动电位器，以免影响测量。

八、思考题

(1) 怎样测量 R_{B1} 阻值？当调节偏置电阻 R_{B1} 使放大电路输出波形出现饱和或截止失真时，三极管的管压降 U_{CE} 怎样变化？

(2) 在测试 A_u 、 R_i 和 R_o 时怎样选择输入信号的大小和频率？为什么信号频率一般选 1kHz，而不选 100kHz 或更高？

(3) 放大电路中哪些元件决定静态工作点的位置？

九、实验报告

(1) 整理测量结果，并把实测的静态工作点、电压放大倍数的值与理论值进行比较（取一组数据进行比较），分析产生误差原因。

(2) 总结 R_C 、 R_L 对放大电路电压放大倍数的影响。

(3) 讨论静态工作点变化对放大电路输出波形的影响。

(4) 分析讨论在调试过程中出现的问题，如何解决这些问题？

(5) 回答预习要求和思考题中的题目。

(6) 附上原始数据记录（实验指导书中），并由指导教师签名。

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-2-1 调试静态工作点 $U_E = 2.0V$

测量值				计算值		
U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	R_{B1} (k Ω)	U_{BE} (V)	U_{CE} (V)	I_C (mA)

内容 2:

数据表 1-2-2 测量不同负载下的电压放大倍数 $U_E = 2.0V$ ($U_{iP-P} = 30mV$)

R_L (k Ω)	U_{oP-P} (V)	A_u	观察记录一组 u_o 和 u_i 波形
∞			
2.4			

内容 3:

数据表 1-2-3 测量输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

测量值		计算值	测量值		计算值
U_{sP-P} (V)	U_{iP-P} (V)	R_i (k Ω)	U_{oP-P} (V)	U_{lP-P} (V)	R_o (k Ω)

内容 4:

数据表 1-2-4

观察静态工作点对输出波形失真的影响

R_P (k Ω)	U_{CE} (V) (测量后计算值)	u_o 波形	失真情况	管子工作状态
∞				
0				

内容 5:

数据表 1-2-5

测量最大不失真输出电压 U_{om}

示波器测量值		
U_{iP-P} (mV)	U_{oP-P} (V)	U_{om} (V)

指导教师: _____

实验日期: _____

实验三 共集电极放大电路

一、实验目的

- (1) 掌握射极跟随器（也称共集电极放大电路）的工作原理和特性。
- (2) 学习动态调试放大电路静态工作点的方法。
- (3) 进一步学习放大电路各项动态指标的测试方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习射极跟随器的工作原理。

(2) 设 VT 的 $\beta=100$, $r_{be}=1.5\text{k}\Omega$, $U_{BE}=0.7\text{V}$; 电路元件参数分别为 $R_B=140\text{k}\Omega$, $R_E=2.7\text{k}\Omega$, 估算静态工作点, 并画出交、直流负载线。

四、实验原理

射极跟随器实验电路如图 1-3-1 所示。这是一个电压串联负反馈放大电路, 具有输入电阻高, 输出电阻低, 电压放大倍数接近于 1, 输出电压能够在较大范围内跟随输入电压作线性变化以及输入、输出信号相位相同等特点。射极跟随器的输出取自发射极, 故又称其为射极输出器。

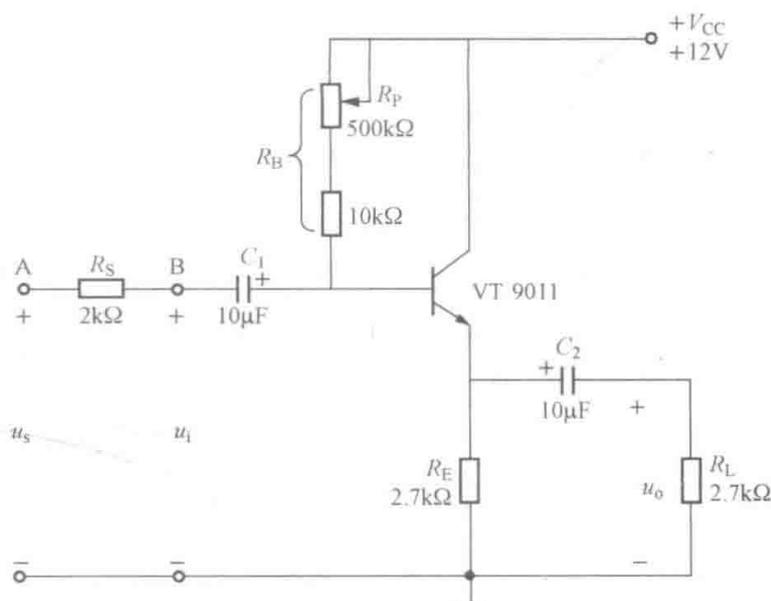


图 1-3-1 射极跟随器实验电路

1. 输入电阻 R_i

根据图 1-3-1 所示电路可知

$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$$

由上式可知射极跟随器的输入电阻 R_i 比共射极单管放大器的输入电阻 $R_i = R_B // r_{be}$ 要高得多, 但由于偏置电阻 R_B 的分流作用, 输入电阻难以进一步提高。

输入电阻的测试方法同共射极单管放大电路, 根据图 1-3-1 电路可知

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R$$

即只要测得 A、B 两点的对地电压即可计算出 R_i 。

2. 输出电阻 R_o

在图 1-3-1 电路中

$$R_o = \frac{r_{be}}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be}}{\beta}$$

如考虑信号源内阻 R_s ，则

$$R_o = \frac{r_{be} + (R_s // R_B)}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be} + (R_s // R_B)}{\beta}$$

由上式可知射极跟随器的输出电阻 R_o 比共射极单管放大器的输出电阻 $R_o \approx R_C$ 低得多。三极管的 β 越高，输出电阻越小。

输出电阻 R_o 的测试方法亦同于共射极单管放大电路，即先测出空载输出电压 U_o ，再测接入负载 R_L 后的输出电压 U_L ，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$$

即可求出 R_o 。

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L$$

3. 电压放大倍数 A_u

在图 1-3-1 电路中

$$A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \leq 1$$

上式说明射极跟随器的电压放大倍数小于接近于 1 且为正值，这是深度电压负反馈的结果。但其射极电流仍比基极电流大 $1 + \beta$ 倍，所以具有一定的电流和功率放大作用。

4. 电压跟随范围

电压跟随范围是指射极跟随器输出电压 u_o 跟随输入电压 u_i 作线性变化的区域。当 u_i 超过一定范围时， u_o 便不能跟随 u_i 作线性变化，即 u_o 波形产生了失真。为了使输出电压 u_o 正、负半周对称，并充分利用电压跟随范围，静态工作点应选在交流负载线中点。测量时可直接用示波器读取 u_o 的峰—峰值 u_{oP-P} ，即得电压跟随范围；或用晶体管毫伏表读取 u_o 的有效值 U_o ，则电压跟随范围为

$$U_{oP-P} = 2\sqrt{2}U_o$$

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。
- (4) DM3058 型数字万用表。
- (5) 电阻器：2.7k Ω × 1。

六、实验内容和要求

按图 1-3-1 所示实验电路接线。

1. 静态工作点的调整

接入负载 $R_L = 2.7\text{k}\Omega$ ，接通 +12V 直流电源，在放大电路输入端 A 加入正弦信号 u_s 。

($f=1\text{kHz}$ 、峰—峰值自定义),用示波器观察输出波形,反复调整 R_P 及信号 u_s 的幅度,使得在示波器的屏幕上得到一个最大不失真输出波形,然后置 $u_s=0$,用万用表测量三极管各电极对地电位,将测量结果记入数据表 1-3-1 中,并计算静态电流 I_E 。

2. 测量电压放大倍数 A_u 和输入电阻 R_i

保持 R_P 值不变,在放大电路输入端 A 加入正弦信号 u_s ($f=1\text{kHz}$ 、峰—峰值自定义),调节信号 u_s 的幅度,用示波器观察输出波形 u_o ,在输出最大不失真情况下,用示波器分别测 U_{SP-P} 、 U_{iP-P} 、 U_{LP-P} 值,将测量结果记入数据表 1-3-2 中,并计算电压放大倍数 A_u 和输入电阻 R_i 。

3. 测量输出电阻 R_o

保持 R_P 值不变,负载开路,在放大电路输入端 A 加入正弦信号 u_s ($f=1\text{kHz}$ 、峰—峰值自定义),用示波器观察输出波形,在输出波形不失真的情况下,用示波器测量空载时输出电压 U_{OP-P} ;接上负载 $R_L=2.7\text{k}\Omega$,测量带载时输出电压 U_{LP-P} ,将测量结果记入数据表 1-3-3 中,并计算输出电阻 R_o 。

4. 测量放大电路的频率特性

保持信号 u_s 幅度不变,改变信号 u_s 的频率,用示波器观察输出波形,测量不同频率下的输出电压 U_{LP-P} ,将测量结果记入数据表 1-3-4 中,并计算放大电路带宽 f_{BW} 。

七、注意事项

- (1) 电流值是由测量电压和电阻值计算获得,不进行电流的直接测量。
- (2) 调节电位器时动作需轻柔些,静态工作点调好后,不要再动电位器,以免影响测量。

八、思考题

- (1) 射极跟随器和共射极放大电路的区别是什么?
- (2) 为了减小电路对信号源的衰减,需要提高电路的输入电阻,在射极跟随器中应该采取何种措施提高电路的输入电阻?

九、实验报告

- (1) 整理实验数据,并画出 $U_L=f(U_i)$ 的曲线。
- (2) 分析射极跟随器的性能和特点。
- (3) 回答预习要求和思考题中的题目。
- (4) 附上原始数据记录(实验指导书中),并由指导教师签名。

十、相关知识

1. 复合管

射极跟随器的电压放大倍数小于并接近于 1 且为正值,没有电压放大作用,但它的射极电流仍比基流大 $1+\beta$ 倍,所以它具有一定的电流和功率放大作用。为了进一步提高电流放大系数,引入复合管,其由两个或两个以上的三极管组合而成,也称为达林顿管。

两个三极管组成的复合管有四种连接方法,如图 1-3-2 所示。

图 1-3-2 (a)、(b) 分别由两个相同类型的三极管组成,也称跟随型复合管;图 1-3-2 (c)、(d) 是由不同类型的三极管组成,称为互补型复合管。互补型复合管的管型取决于第一个三极管的管型。

由两个相同类型的三极管所组成的复合管,其 β 值和 r_{be} 分别为

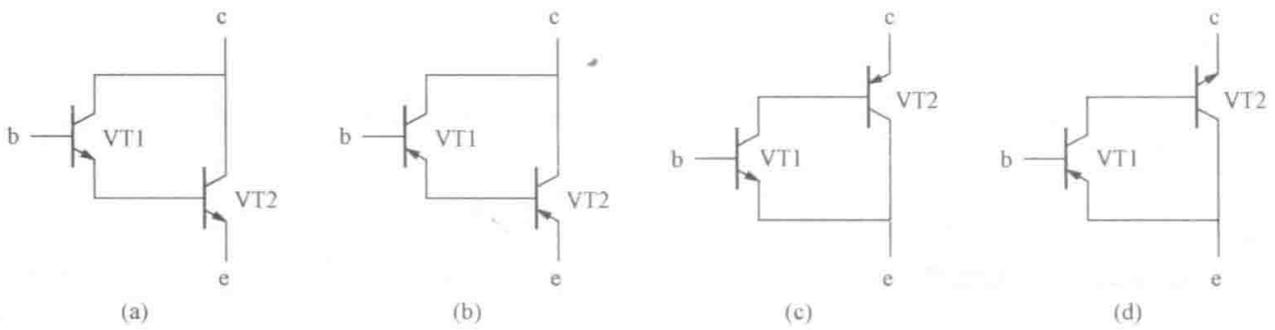


图 1-3-2 复合管的连接方法

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2, r_{be} \approx r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}$$

由两个不同类型的三极管所组成的复合管, 其 β 值和 r_{be} 分别为

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2, r_{be} \approx r_{be1}$$

2. 带自举电路的射极跟随器

在一些电子测量仪器中, 为了减轻仪器对信号源所取用的电流, 以提高测量准确度, 通常采用图 1-3-3 所示带自举电路的射极跟随器, 以提高偏置电路的等效电阻, 从而保证射极跟随器有足够高的输入电阻。

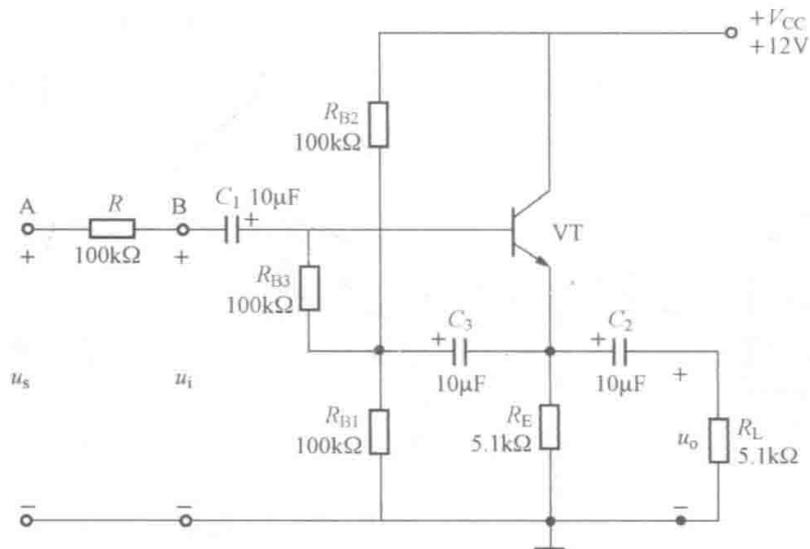


图 1-3-3 带自举电路的射极跟随器

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-3-1

静态工作点的调整

测量值			计算值
U_B (V)	U_C (V)	U_E (V)	I_E (mA)

在下面整个测试过程中应保持 R_P 值不变 (即保持静态工作点 I_E 不变)。

内容 2:

数据表 1-3-2

测量电压放大倍数 A_u 和输入电阻 R_i

测量值		计算值	测量值		计算值
U_{sP-P} (V)	U_{iP-P} (V)	R_i (k Ω)	U_{iP-P} (V)	U_{LP-P} (V)	A_u

内容 3:

数据表 1-3-3

测量输出电阻 R_o

测量值		计算值
U_{oP-P} (V)	U_{LP-P} (V)	R_o (k Ω)

内容 4:

数据表 1-3-4

测试频率特性

f (kHz)	f_L	f	f_H	f_{BW}
U_{LP-P} (V)				

指导教师: _____

实验日期: _____

实验四 OTL 功率放大电路

一、实验目的

- (1) 理解 OTL 功率放大电路的工作原理。
- (2) 学习 OTL 电路的调试及主要性能指标的测试方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习 OTL 电路的组成和工作原理。
- (2) 为什么引入自举电路能够扩大输出电压的动态范围?
- (3) 交越失真产生的原因是什么? 怎样克服交越失真?
- (4) 如电路有自激现象, 应如何消除?

四、实验原理

图 1-4-1 所示为 OTL 低频功率放大电路。图中由晶体三极管 VT1 组成推动级 (也称前置放大级), VT2、VT3 是一对参数对称的 NPN 和 PNP 型晶体三极管, 它们组成互补推挽 OTL 功放电路。由于每一个管子都接成射极输出器形式, 因此具有输出电阻低, 负载能力强等优点, 适合于做功率输出级。VT1 管工作于甲类状态, 它的集电极电流 I_{C1} 由电位器 R_{P1} 进行调节。 I_{C1} 的一部分流经电位器 R_{P2} 及二极管 VD, 给 VT2、VT3 提供偏压。调节 R_{P2} , 可以使 VT2、VT3 得到合适的静态电流而工作于甲乙类状态, 以克服交越失真。静态时要求输出端中点 A 的电位 $U_A = \frac{1}{2}V_{CC}$, 可以通过调节 R_{P1} 来实现, 又由于 R_{P1} 的一端接在 A 点, 因此在电路中引入交、直流电压并联负反馈, 一方面能够稳定放大器的静态工作点, 同时也改善了非线性失真。

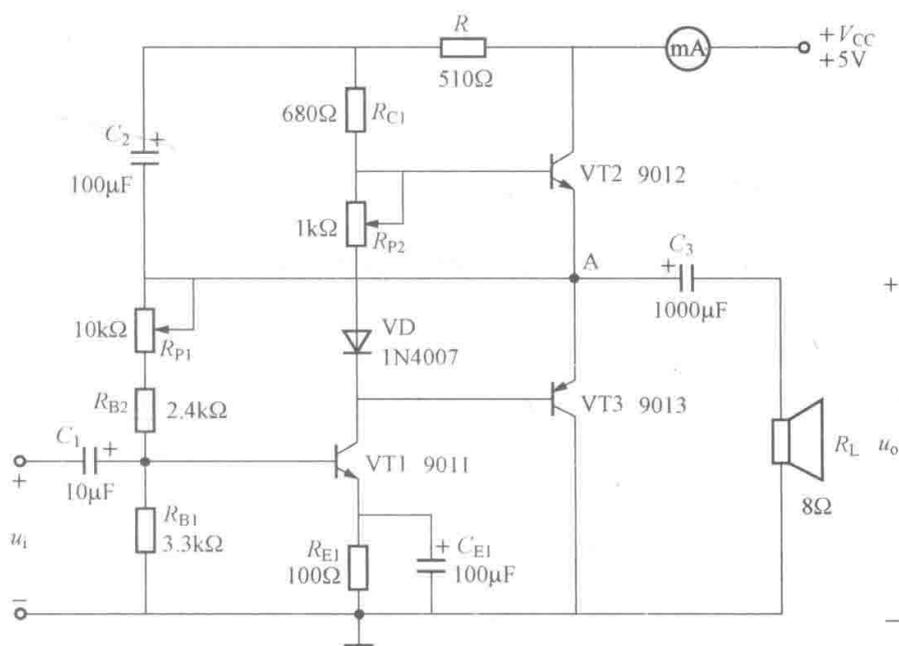


图 1-4-1 OTL 功率放大器实验电路

当输入正弦交流信号 u_i 时, 经 VT1 放大、倒相后同时作用于 VT2、VT3 的基极, u_i 的负半周使 VT3 管导通 (VT2 管截止), 有电流通过负载 R_L , 同时向电容 C_3 充电; 在 u_i 的正半周, VT2 导通 (VT3 截止), 则已充好电的电容器 C_3 起着电源的作用, 通过负载 R_L 放电, 这样在 R_L 上就得到完整的正弦波。

C_2 和 R 构成自举电路, 用于提高输出电压正半周的幅度, 以得到较大的动态范围。

OTL 电路的主要性能指标如下。

1. 最大不失真输出功率 P_{om} 。

理想情况下, $P_{om} = \frac{1}{8} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$ 。在实验中可通过测量 R_L 两端的电压有效值 U_o , 来求得实际

$$P_{om} = \frac{U_o^2}{R_L}。$$

2. 效率 η

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_{av}} \times 100\%$$

式中 P_{av} ——直流电源供给的平均功率。

理想情况下, $\eta_{max} = 78.5\%$ 。在实验中, 可测量电源供给的平均电流 $I_{C(av)}$, 从而求得

$$P_{av} = V_{CC} I_{C(av)}, \text{ 因而也就可以计算实际效率了, 即 } \eta = \frac{P_{om}}{P_{av}} \times 100\%。$$

3. 输入灵敏度

输入灵敏度是指输出最大不失真功率时, 输入信号 u_i 的大小。

4. 频率响应

详见本章实验二有关内容。

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。
- (4) DM3058 型数字万用表。
- (5) 其他元器件: 晶体三极管: 9011×1, 9012×1, 9013×1;
晶体二极管: IN4007×1;
8Ω 扬声器×1;
电阻器、电容器若干。

六、实验内容和要求

在整个测试过程中, 放大电路不应有自激现象。消除自激现象的方法参阅附录 B 的相关内容。

1. 静态工作点的测试

按图 1-4-1 连接实验电路, 将输入信号旋钮旋至“0” ($u_i = 0$), 直流电源引线中串入数字万用表 (直流电流挡), 电位器 R_{P2} 置最小值, R_{P1} 置中间位置。接通 +5V 电源, 观察万用表指示, 同时用手触摸输出级管子, 若电流过大或管子温升显著, 应立即断开电源检查原因 (如 R_{P2} 开路, 电路自激, 或输出管性能不好等); 如无异常现象, 可开始调试。

(1) 调节输出端中点电位 U_A 。调节电位器 R_{P1} , 用数字万用表 (直流电压挡) 测量 A

点电位,使 U_A 接近 $\frac{1}{2}V_{CC}$ 。

(2) 调整输出级静态电流及测试各级静态工作点。调节 R_{P2} , 使 VT2、VT3 管的 $I_{C2} = I_{C3} = 5 \sim 10\text{mA}$ 。从减小交越失真角度而言,应适当加大输出级静态电流,但该电流过大,会使效率降低,所以一般以 $5 \sim 10\text{mA}$ 为宜。由于万用表串联在电源进线中,因此测得的是整个放大电路的电流,但一般 VT1 的集电极电流 I_{C1} 较小,从而可以把测得的总电流近似当作末级的静态电流。如要准确得到末级静态电流,则可从总电流中减去 I_{C1} 之值。

调整输出级静态电流的另一方法是动态调试法。先使 $R_{P2} = 0$, 在输入端接入 $f = 1\text{kHz}$ 的正弦信号 u_i 。逐渐加大输入信号的幅值,此时输出波形应出现较严重的交越失真(注意:没有饱和和截止失真);然后缓慢增大 R_{P2} , 当交越失真刚好消失时,停止调节 R_{P2} , 恢复 $u_i = 0$, 此时万用表读数即为输出级静态电流,一般在 $5 \sim 10\text{mA}$; 如过大,则要检查电路。

输出级电流调好以后,测量各级静态工作点,将测量结果记入数据表 1-4-1 中。

2. 最大输出功率 P_{om} 和效率 η 的测试

(1) 测量 P_{om} 。输入端接 $f = 1\text{kHz}$ 的正弦信号 u_i , 用示波器观察输出电压 u_o 波形。逐渐增大 u_i , 使输出电压达到最大不失真输出,用示波器测出负载 R_L 上的输出电压峰—峰值 U_{oP-P} , 并计算出有效值 U_o , 则 $P_{om} = \frac{U_o^2}{R_L}$ 。

(2) 测量 η 。当输出电压为最大不失真输出时,读出万用表中的电流值,此电流即为直流电源供给的平均电流 $I_{C(av)}$ (有一定误差),由此可近似求得 $P_{av} = V_{CC} I_{C(av)}$, 再根据上面测得的 P_{om} , 即可求出 $\eta = \frac{P_{om}}{P_{av}} \times 100\%$ 。

3. 输入灵敏度测试

根据输入灵敏度的定义,只要测出输出功率 $P_o = P_{om}$ 时的输入电压 u_i 的有效值 U_i 即可。

4. 频率响应的测试

测试方法同本章实验三,将测量结果记入数据表 1-4-2 中。

在测试时,为保证电路的安全,应在较低电压下进行,在整个测试过程中,应保持 u_i 为恒定值,且输出波形不得失真。

5. 研究自举电路的作用

(1) 测量有自举电路且 $P_o = P_{omax}$ 时的电压增益 $A_u = \frac{U_{om}}{U_i}$ 。

(2) 将 C_2 开路, R 短路(无自举),再测量 $P_o = P_{omax}$ 时的 A_u 。

用示波器观察(1)、(2)两种情况下的输出电压波形,并将以上两项测量结果进行比较,分析研究自举电路的作用。

6. 噪声电压的测试

测量时将输入端短路 ($u_i = 0$), 观察输出噪声波形,并用示波器测量输出电压有效值,即为噪声电压 U_N 。本电路中若 $U_N < 15\text{mV}$, 即满足要求。

7. 试听

输入信号改为录音机输出,输出端接试听音箱及示波器。开机试听,并观察语言和音乐信号的输出波形。

七、注意事项

(1) 在调整 R_{P_2} 时，一是要注意旋转方向，不要调得过大，更不能开路，以免损坏输出管。

(2) 输出管静态电流调好，如无特殊情况，不得随意旋动 R_{P_2} 的位置。

八、思考题

(1) 试说明实验电路中 R 和 C_2 的作用。

(2) 电路中电位器 R_{P_2} 如果开路或短路，对电路工作有何影响？

九、实验报告

(1) 整理实验数据，并与理论值进行比较，画出频率响应曲线。

(2) 计算静态工作点、最大不失真输出功率 P_{om} 和效率 η 。

(3) 分析自举电路的作用。

(4) 回答预习要求和思考题中的题目。

(5) 附上原始数据记录（实验指导书中），并由指导教师签名。

十、相关知识

(1) 功率放大电路按输出形式分为三种：OCL（Output Capacitor Less）功率放大电路、OTL（Output Transformer Less）功率放大电路和 BTL（Balance Transformer Less）功率放大电路。目前，使用较多的是 OTL 电路。

(2) 功率放大电路是在大信号下工作，通常采用图解法进行分析。

(3) 功率放大电路是由一个 NPN 型晶体管和一个 PNP 型晶体管组成的推挽式电路，在有信号时，两个管子轮流导电，互补对方的不足，工作性能对称，所以通常称为互补对称电路。

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-4-1 静态工作点的测试 ($I_{C2} = I_{C3} =$ _____ mA, $U_A = 2.5V$)

	VT1	VT2	VT3
U_B (V)			
U_C (V)			
U_E (V)			

注意: 在下面整个测试过程中应保持 R_{P2} 值不变。

内容 2:

(1) 测量 P_{om} 。 $U_o =$ _____, 计算 $P_{om} =$ _____。(2) 测量 η 。 $I_{C(av)} =$ _____, 计算 $\eta =$ _____。

内容 3:

输入灵敏度测试: $P_o = P_{om}$ 时的输入电压值 $U_i =$ _____。

内容 4:

数据表 1-4-2 频率响应的测试 ($U_{iP-P} =$ _____ mV)

	f_L				f_0	f_H			
f (Hz)					1000				
U_{oP-P} (V)									
A_u									

内容 5:

(1) 测量有自举电路时, $U_i =$ _____, $U_{om} =$ _____。(2) 将 C_2 开路, R 短路 (无自举) 时, $U_i =$ _____, $U_{om} =$ _____。

用示波器观察 (1)、(2) 两种情况下的输出电压波形, 并将结果进行比较。

内容 6:

噪声电压 $U_N =$ _____。

指导教师: _____

实验日期: _____

实验五 差动放大电路

一、实验目的

- (1) 加深对差动放大电路性能及特点的理解。
- (2) 学习差动放大电路主要性能指标的测试方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

(1) 根据实验电路参数, 估算典型差动放大电路和具有恒流源的差动放大电路的静态工作点及差模电压放大倍数 (取 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 100$, $r_{be1} = r_{be2} = r_{be3} = 2.5\text{k}\Omega$)。

(2) 测量静态工作点时, 放大电路输入端 A、B 与地应如何连接?

(3) 怎样进行 U_o 的静态调零? 用什么仪表测量?

四、实验原理

差动放大电路是集成电路运算放大器的重要组成部分, 既能放大直流信号, 又能放大交流信号; 它对差模信号具有较强的放大作用, 对共模信号具有很强的抑制作用。由于电路输入、输出方式的不同组合, 共有四种典型电路。

图 1-5-1 为差动放大电路的基本结构, 由两个元件参数相同的基本共射放大电路组成。当开关 S 拨向①端时, 构成典型差动放大电路。调零电位器 R_P 用来调节 VT1、VT2 管的静态工作点, 使得输入信号 $u_i = 0$ 时, 双端输出电压 $u_o = 0$ 。 R_E 为两管共用的发射极电阻, 它对差模信号没有负反馈作用, 因而不影响差模电压放大倍数; 但对共模信号有较强的负反馈作用, 故可以有效地抑制零点漂移, 稳定静态工作点。

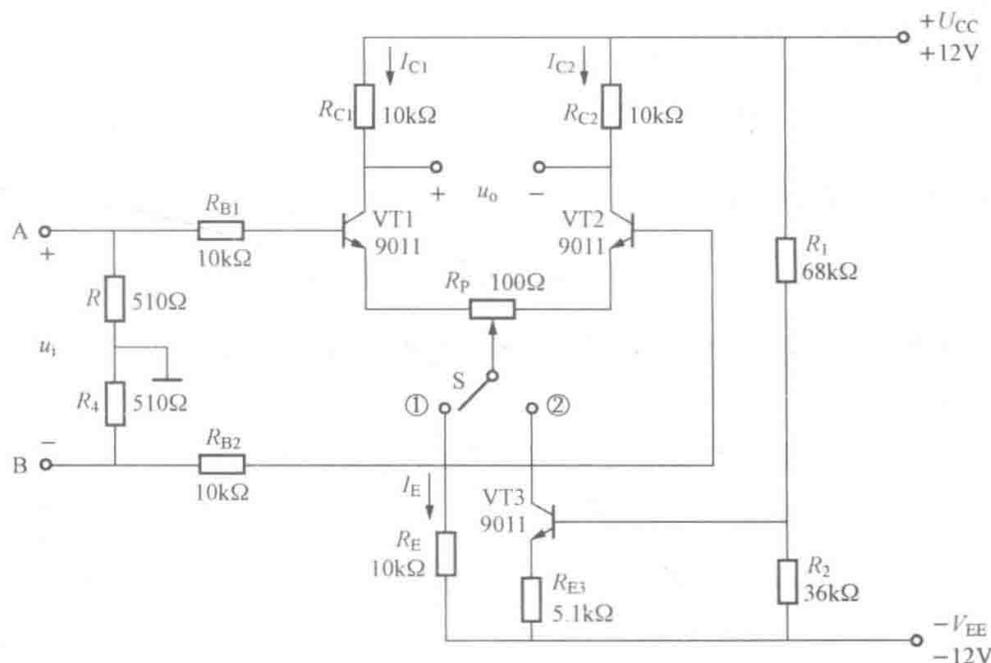


图 1-5-1 差动放大电路实验电路

当开关 S 拨向②端时, 构成具有恒流源的差动放大电路。该电路用三极管恒流源代替发射极电阻 R_E , 可以进一步提高差动放大器抑制共模信号的能力, 且不影响差模输出范围。

(一) 静态工作点的估算

典型电路:

$$I_E \approx \frac{|V_{EE}| - U_{BE}}{R_E} \quad (\text{认为 } U_{B1} = U_{B2} \approx 0)$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_E$$

恒流源电路:

$$I_{C3} \approx I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_{CC} + |V_{EE}|) - U_{BE}}{R_{E3}}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_{C3}$$

(二) 差模电压放大倍数 A_{ud} 和共模电压放大倍数 A_{uc}

当差动放大器的射极电阻 R_E 足够大或采用恒流源电路时, 差模电压放大倍数 A_{ud} 由输出端方式决定, 而与输入方式无关。

双端输出方式, $R_E = \infty$, R_P 在中心位置时, 有

$$A_{ud} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = - \frac{\beta R_C}{R_B + r_{be} + \frac{1}{2} (1 + \beta) R_P}$$

单端输出方式, 有

$$A_{ud1} = \frac{\Delta U_{c1}}{\Delta U_i} = \frac{1}{2} A_{ud}$$

$$A_{ud2} = \frac{\Delta U_{c2}}{\Delta U_i} = - \frac{1}{2} A_{ud}$$

当输入共模信号时, 若为单端输出, 则有

$$A_{uc1} = A_{uc2} = \frac{\Delta U_{c1}}{\Delta U_i} = \frac{-\beta R_C}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) \left(\frac{1}{2} R_P + 2R_E \right)} \approx - \frac{R_C}{2R_E}$$

若为双端输出, 在理想情况下有

$$A_{uc} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = 0$$

实际上由于元件不可能完全对称, 因此 A_{uc} 也不会绝对等于零。

(三) 共模抑制比 K_{CMR}

为了表征差动放大电路对差模信号的放大作用和对共模信号的抑制能力, 通常用一个综合指标来衡量, 即共模抑制比。其表达式为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ (dB)} \quad \text{或} \quad K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ (dB)}$$

差动放大电路的输入信号可采用直流信号也可采用交流信号。本实验由信号发生器提供频率 $f = 1 \text{ kHz}$ 的正弦信号作为输入信号。

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。

(3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。

(4) DM3058 型数字万用表。

六、实验内容和要求

(一) 典型差动放大电路性能测试

按图 1-5-1 连接实验电路, 开关 S 拨向①端构成典型差动放大电路。

1. 测量静态工作点

(1) 调节放大电路零点。

将输入信号 u_i 置为“0”, 即将放大电路输入端 A、B 与地短接。接通 $\pm 12\text{V}$ 直流电源, 用万用表的直流电压挡测量双端输出电压 u_o , 并调节调零电位器 R_P , 使 $u_o = 0$ 。调节时要仔细, 力求准确。

(2) 测量静态工作点。

零点调好以后, 用万用表的直流电压挡测量 VT1、VT2 管各电极电位及射极电阻 R_E 两端电压 U_{RE} , 将测量结果记入数据表 1-5-1 中, 并计算 VT1、VT2 管的静态工作点。

2. 测量差模电压放大倍数

将信号发生器 CH1 通道接放大电路输入端 A, CH2 通道接放大电路输入端 B, 构成双端输入方式。设置信号发生器使 CH1 通道输出正弦信号 u_A ($f = 1\text{kHz}$ 、 $U_{AP-P} = 50\text{mV}$ 、 $\varphi = 0^\circ$), CH2 通道输出正弦信号 u_B ($f = 1\text{kHz}$ 、 $U_{BP-P} = 50\text{mV}$ 、 $\varphi = 180^\circ$), 分别接在放大电路 A、B 两端, 构成差模输入信号 U_{id} 。

接通 $\pm 12\text{V}$ 直流电源, 用示波器观察输入、输出波形, 微调信号发生器 CH1、CH2 通道的输出幅度, 用示波器测量 $U_{iP-P} = 100\text{mV}$; 在输出波形无失真的情况下, 用示波器测量 U_{C1P-P} 、 U_{C2P-P} , 将测量结果记入数据表 1-5-2 中, 观察 u_i 、 u_{C1} 、 u_{C2} 之间的相位关系, 并记录波形。

3. 测量共模电压放大倍数

将放大电路输入端 A、B 短接, 信号发生器 CH1 通道接放大电路输入端 A 与地之间, 构成共模输入方式。设置输入信号 u_A ($f = 1\text{kHz}$ 、 $U_{iP-P} = 1\text{V}$), 并用示波器测量 $U_{iP-P} = 1\text{V}$; 在输出波形无失真的情况下, 测量 U_{C1P-P} 、 U_{C2P-P} 的值并记入数据表 1-5-2 中, 观察 u_i 、 u_{C1} 、 u_{C2} 之间的相位关系并记录波形。

(二) 具有恒流源的差动放大电路性能测试

将图 1-5-1 电路中开关 S 拨向②端, 构成具有恒流源的差动放大电路。参照典型差动放大电路性能测试的步骤对具有恒流源的差动放大电路进行测试, 将测得的静态工作点填入自行设计的表格中, 而后测量数据表 1-5-2 中右侧的相关数据。

七、注意事项

(1) 注意电路中选择开关 S 的使用。

(2) 观测差模输入信号 u_i 时, 可用示波器的“Math”功能; 信号发生器设定输出信号的值与接入放大电路的实际值之间存在偏差, 数据处理时应以 u_i 的实际测量值为准。

八、思考题

(1) 试说明实验电路中的电位器 R_P 的作用。

(2) 差动放大电路有几种接法, 各有什么特点? 并根据图 1-5-1 说明不同接法对输入电阻、输出电阻以及放大倍数的影响。

九、实验报告

- (1) 整理实验数据，列表比较实验结果和理论估算值，分析误差原因。
- (2) 计算静态工作点和差模电压放大倍数。
- (3) 回答预习要求和思考题中的题目。
- (4) 附上原始数据记录（实验指导书中），并由指导教师签名。

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-5-1

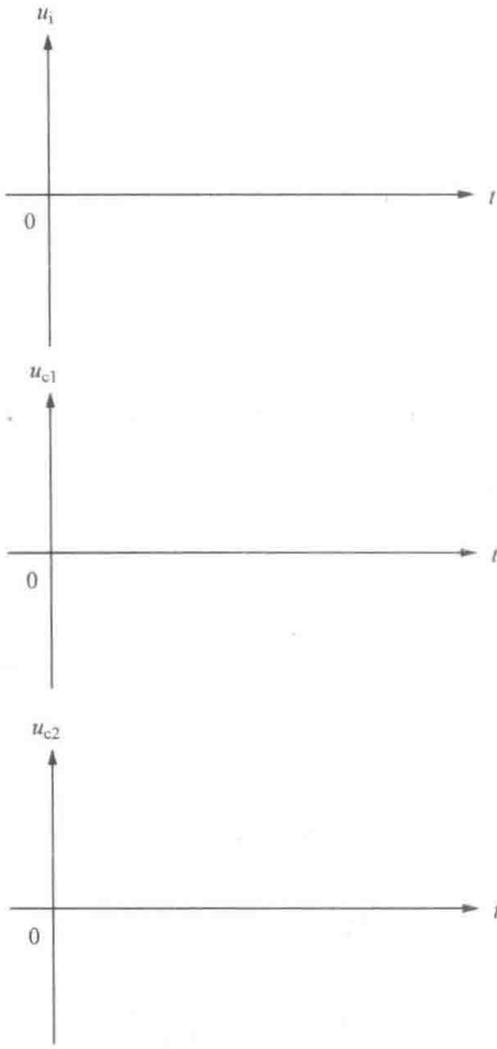
测量静态工作点

测量值	U_{C1} (V)	U_{B1} (V)	U_{E1} (V)	U_{C2} (V)	U_{B2} (V)	U_{E2} (V)	U_{RE} (V)
计算值	I_{C1} (mA)		I_{B1} (μ A)		U_{CE1} (V)		
	I_{C2} (mA)		I_{B2} (μ A)		U_{CE2} (V)		

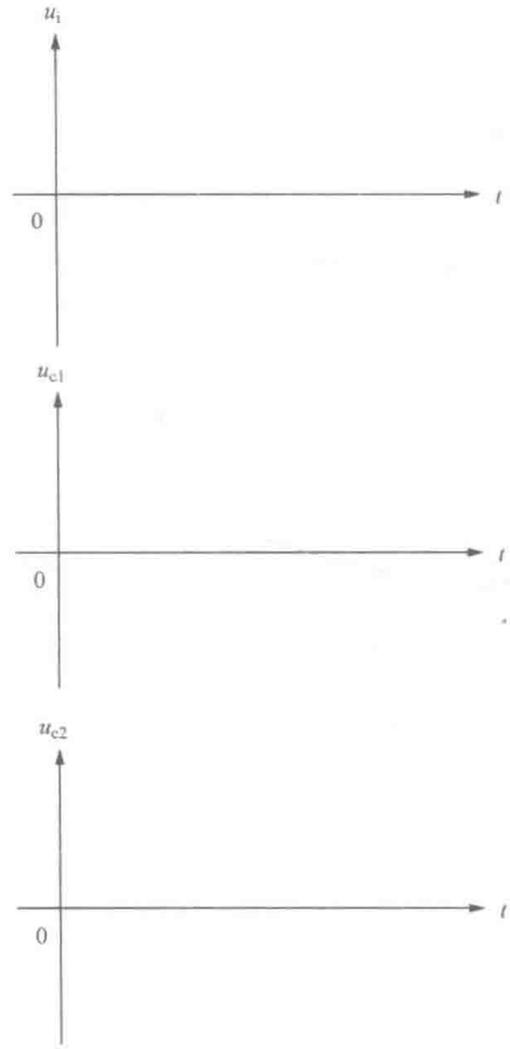
数据表 1-5-2

测量差模、共模电压放大倍数, 测量 U_{C1} 、 U_{C2} 的值

	典型差动放大电路		具有恒流源差动放大电路	
	双端输入	共模输入	双端输入	共模输入
U_i	100mV _{P-P}	1V _{P-P}	100mV _{P-P}	1V _{P-P}
U_{C1P-P} (V)				
U_{C2P-P} (V)				
$A_{ud1} = \frac{U_{C1}}{U_i}$		—		—
$A_{ud} = \frac{U_o}{U_i}$		—		—
$A_{uc1} = \frac{U_{C1}}{U_i}$	—		—	
$A_{uc} = \frac{U_o}{U_i}$	—		—	
$K_{CMR} = \left \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right $				



差模输入相位关系图



差模输入相位关系图

内容 2:

测得的静态工作点填入自行设计的表格中, 而后测量数据表 1-5-2 中右侧的相关数据。

指导教师: _____

实验日期: _____

实验六 负反馈放大电路

一、实验目的

- (1) 加深理解放大电路中引入负反馈的方法及负反馈对放大电路各项性能指标的影响。
- (2) 研究电压串联负反馈对放大电路性能的影响。
- (3) 掌握负反馈放大电路各性能指标的测试方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习负反馈放大电路的组成、工作原理以及四种组态。
- (2) 按实验电路(图 1-6-1)估算放大电路的静态工作点, 设元件参数取 $\beta_1 = 100$ 、 $\beta_2 = 50$ 、 $r_{be1} = 1.5\text{k}\Omega$ 、 $r_{be2} = 1.0\text{k}\Omega$ 、 $R_{B1} = 62\text{k}\Omega$ 、 $R_{B3} = 38\text{k}\Omega$ 。
- (3) 估算基本放大电路的 A_u 、 R_i 和 R_o ; 估算负反馈放大电路的 A_{uf} 、 R_{if} 和 R_{of} 。

四、实验原理

负反馈在电子电路中有着非常广泛的应用。虽然负反馈使放大电路的放大倍数降低, 但在多方面改善放大电路的动态指标, 如稳定放大倍数, 改变输入、输出电阻, 减小非线性失真和展宽通频带等。因此, 几乎所有的实用放大电路都带有负反馈。

负反馈放大电路有四种组态, 即电压串联、电压并联、电流串联、电流并联。本实验以电压串联负反馈为例, 分析负反馈对放大电路各项性能指标的影响。

图 1-6-1 为带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大电路。在电路中通过 R_f 把输出电压 u_o 引回到输入端, 加在晶体管 VT1 的发射极上, 在发射极电阻 R_{E1} 上形成反馈电压 u_f 。根据反馈的判断法可知, 该电路属于电压串联负反馈。

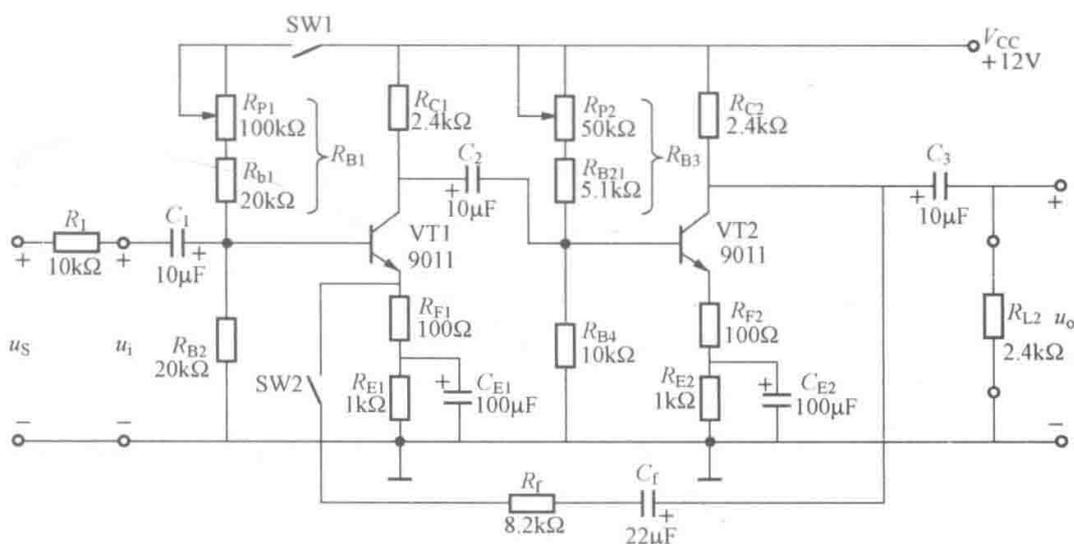


图 1-6-1 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大电路

该电路的主要性能指标如下:

- (1) 闭环电压放大倍数

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{A}_u}{1 + \dot{A}_u \dot{F}_u}$$

式中 $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ ——基本放大电路 (无反馈) 的电压放大倍数, 即开环电压放大倍数。

$1 + \dot{A}_u \dot{F}_u$ ——反馈深度, 其大小决定了负反馈对放大电路性能改善的程度。

(2) 反馈系数

$$\dot{F}_u = \frac{R_{F1}}{R_f + R_{F1}}$$

(3) 输入电阻

$$R_{if} = (1 + \dot{A}_u \dot{F}_u) R_i$$

式中 R_i ——基本放大电路的输入电阻。

(4) 输出电阻

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + \dot{A}_{uo} \dot{F}_u}$$

式中 R_o ——基本放大电路的输出电阻。

\dot{A}_{uo} ——基本放大电路空载时的电压放大倍数。

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。
- (4) DM3058 型数字万用表。
- (5) 电阻器: $2.4\text{k}\Omega \times 1$ 。

六、实验内容和要求

1. 测量静态工作点

按图 1-6-1 连接实验电路, 取 $V_{CC} = +12\text{V}$, $u_i = 0$, 开关 SW1 闭合, 开关 SW2 断开, 接入负载电阻 $R_L = 2.4\text{k}\Omega$ 。调节电位器 R_{P1} 使 $U_{E1} = 2.2\text{V}$, 调节电位器 R_{P2} 使 $U_{E2} = 1.8\text{V}$ 。用万用表的直流电压挡分别测量两个三极管的集电极电压 U_C , 并通过 U_C 和 U_E 求出 U_{CE} 和 I_C 。将各项测量结果记入数据表 1-6-1, 并计算每一级放大电路的静态工作点。

2. 测量无级间负反馈时放大电路的动态指标

(1) 开关 SW1 闭合, 开关 SW2 断开, 加入负载电阻 $R_L = 2.4\text{k}\Omega$, 在 u_s 处加入频率 $f = 1\text{kHz}$ 、峰—峰值为 $20 \sim 40\text{mV}$ 的正弦信号。用示波器 CH1 和 CH2 同时观察输入信号 u_s 和输出信号 u_o , 调节输入信号 u_s 的幅度; 在 u_o 不失真的情况下, 用示波器测量 U_{sp-p} 、 U_{ip-p} 、 U_{lp-p} , 将测量结果记入数据表 1-6-2 中。

(2) 保持 u_s 不变, 断开负载电阻 R_L , 测量空载时的输出电压 U_{op-p} , 将测量结果记入数据表 1-6-2 中, 并计算开环电压放大倍数 A_{uo} 和输出电阻 R_o 。

(3) 测量通频带。接上 R_L , 保持 (1) 步骤中的 u_s 不变, 然后增加和减小输入信号 u_s 的频率, 找出上、下限频率 f_H 和 f_L , 将测量结果记入数据表 1-6-3 中。

3. 测试负反馈放大电路的各项性能指标

将开关 SW2 闭合, 即引入负反馈。适当加大输入信号 u_s , 在输出波形不失真的条件下, 测量负反馈放大电路的闭环电压放大倍数 A_{uf} 和输出电阻 R_{of} , 将测量结果记入数据表 1-6-2 中; 测量闭环时的 f_{HF} 和 f_{LF} , 将测量结果记入数据表 1-6-3 中。

4. 观察负反馈对非线性失真的改善

(1) 实验电路改接成基本放大电路形式, 在输入端加入 $f=1\text{kHz}$ 的正弦信号 u_s , 输出端接示波器, 逐渐增大输入信号 u_s 的幅度, 使输出波形开始出现失真, 记下此时的波形和输入电压的峰—峰值 U_{i1P-P} 。

(2) 再将实验电路改接成负反馈放大电路形式, 增大输入信号幅度 u_s , 使输入电压峰—峰值达到 U_{i1P-P} , 观察输出波形是否失真。继续增大输入信号幅度 u_s , 使输出波形出现同

(1) 步骤的失真, 记下此时的波形和输入电压的峰—峰值 U_{i2P-P} 。

七、注意事项

(1) 注意电路中选择开关 SW2 的使用。

(2) 在用示波器观察最大不失真输出波形时, 若出现信号幅度不稳定、非正弦或高频自激等现象, 要加以排除后方可进行下一步实验。

八、思考题

(1) 若想获得较高输入电阻的放大电路, 应引入什么反馈类型?

(2) 已知负反馈放大电路的开环放大倍数 $A_u=10^5$, 若要求获得 100 倍的闭环放大倍数, 则其反馈系数 F_u 应取多大?

九、实验报告

(1) 整理实验数据, 列表比较实验结果和理论估算值, 分析误差原因。

(2) 根据实验结果, 总结电压串联负反馈对放大器性能的影响。

(3) 简述通过本次实验你对多级放大器和反馈放大器的理解和认识是否有所提高。

(4) 回答预习要求和思考题中的题目。

(5) 附上原始数据记录 (实验指导书中), 并由指导教师签名。

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-6-1 测量静态工作点

	测量值					计算值		
	U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	R_{B1} (k Ω)	R_{B3} (k Ω)	U_{BE} (V)	U_{CE} (V)	I_C (mA)
第一级		2.2			—			
第二级		1.8		—				

内容 2:

数据表 1-6-2 测量有无级间负反馈时放大电路的动态指标

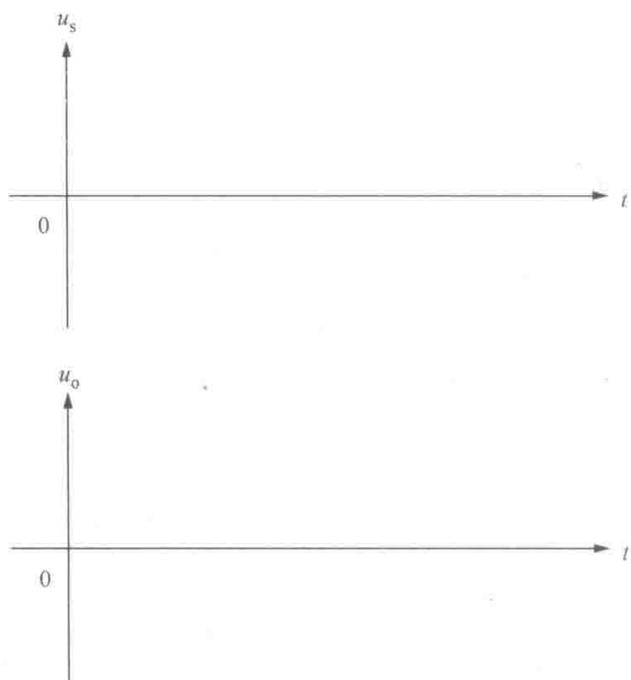
电路类型	测量值				计算值		
基本放大器	U_{sP-P} (mV)	U_{iP-P} (mV)	U_{LP-P} (V)	U_{oP-P} (V)	A_{uL}	A_{uo}	R_o (k Ω)
负反馈放大器	U_{sP-P} (mV)	U_{iP-P} (mV)	U_{LP-P} (V)	U_{oP-P} (V)	A_{uLf}	A_{uof}	R_{of} (k Ω)

内容 3:

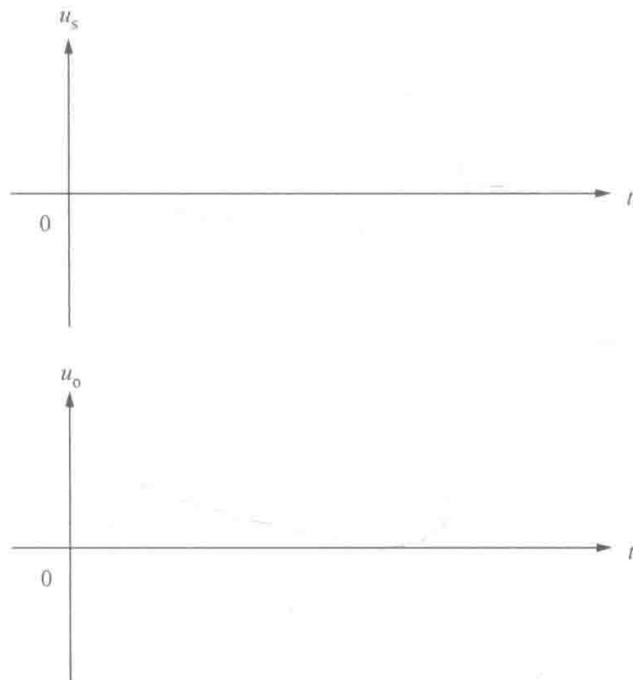
数据表 1-6-3 测量通频带

基本放大器	f_L (kHz)	f_H (MHz)	Δf (MHz)
负反馈放大器	f_{Lf} (kHz)	f_{Hf} (MHz)	Δf_f (MHz)

内容 4: 基本放大器输出波形

输入电压峰—峰值 $U_{i1P-P} =$ _____

负反馈放大器输出波形

输入电压峰—峰值 $U_{i2P-P} =$ _____

指导教师: _____

实验日期: _____

实验七 集成运放基本运算电路的分析与设计

一、实验目的

(1) 掌握使用集成运算放大器构成反相输入比例运算电路、同相输入比例运算电路、反相输入求和运算电路、减法运算电路的方法。

(2) 进一步熟悉这些基本运算电路的输出和输入之间的关系。

二、实验类型

设计型实验。

三、预习要求

(1) 复习集成运算放大器组成各种基本运算电路的知识。

(2) 仔细阅读实验指导书，掌握实验内容、方法和步骤。

(3) 用给定的元器件自行设计 $A_u=6$ 的同相比例运算电路和 $A_u=5$ 的减法运算电路，要求画出电路图，列出相应的表格，得出计算结果。

四、实验原理

(一) 集成运算放大器

集成运算放大器是一种具有高电压放大倍数的直接耦合多级放大电路。当其外部接入不同的线性或非线性元器件组成输入和负反馈电路时，可以灵活地实现各种特定的函数关系。在线性应用方面，可组成比例、加法、减法、积分、微分、对数等模拟运算电路。

在大多数情况下，将集成运算放大器视为理想运放，就是将运放的各项技术指标理想化。满足下列条件的运算放大器称为理想运放：

(1) 开环电压增益 $A_{ud}=\infty$ 。

(2) 输入阻抗 $R_i=\infty$ 。

(3) 输出阻抗 $R_o=0$ 。

(4) 带宽 $f_{bw}=\infty$ 。

(5) 失调与漂移均为零等。

理想运放在线性应用时的两个重要特性：

(1) 输出电压 U_o 与输入电压之间满足关系式

$$U_o = A_{ud}(U_P - U_N)$$

由于 $A_{ud}=\infty$ ，而 U_o 为有限值，因此 $U_P - U_N \approx 0$ ，即 $U_P \approx U_N$ ，称为“虚短”。

(2) 由于 $R_i=\infty$ ，故流进运放两个输入端的电流可视为零，即 $I_{IB}=0$ ，称为“虚断”。这说明运放对其前级吸取电流极小。

上述两个特性是分析理想运放应用电路的基本原则，可简化运放电路的计算。

(二) 基本运算电路

1. 反相比例运算电路

图 1-7-1 所示为反相比例运算电路。对于理想运放，该电路的输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i$$

为了减小输入级偏置电流引起的运算误差,在同相输入端应接入平衡电阻为

$$R_2 = R_1 // R_F$$

2. 反相加法电路

反相加法电路如图 1-7-2 所示,输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}U_{i1} + \frac{R_F}{R_2}U_{i2}\right)$$

平衡电阻为

$$R_3 = R_1 // R_2 // R_F$$

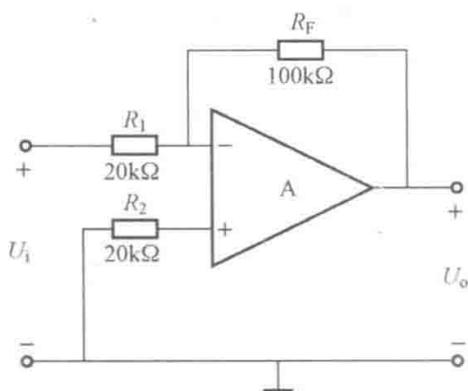


图 1-7-1 反比例运算电路

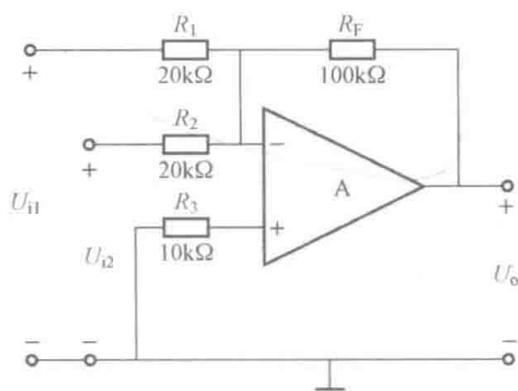


图 1-7-2 反相加法电路

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DM3058 型数字万用表。
- (3) 集成运算放大器: LM324×1。
- (4) 电阻器: 10kΩ、20kΩ、100kΩ 若干。

六、实验内容和要求

1. 反相输入比例运算

按图 1-7-1 连接实验电路。接通直流电源,按照数据表 1-7-1 中第一行数据,从实验箱的直流信号源引入输入信号 U_i ,测量对应的输出信号 U_o 的值,记入数据表 1-7-1 中;计算出各种输入信号下的 A_u ,并与理论计算值进行比较,分析误差产生的原因。

2. 同相输入比例运算

设计同相输入比例运算电路,并按所设计的电路图接线。对电路进行测量,数据填入自行设计的表格中。要求测出四组数据,将测量值与设计要求进行比较,如果误差较大,修改电路。

3. 反相输入求和运算

按图 1-7-2 接线, U_{i1} 和 U_{i2} 按数据表 1-7-2 中的要求调节,测出各种输入条件下的输出电压 U_o ,记入数据表 1-7-2 中。计算出各种输入条件下的输出电压 U_o ,也记入数据表 1-7-2 中。比较 U_o 的实验值和理论值,分析误差产生的原因。

4. 减法运算

设计减法运算电路,并按所设计的电路图接线。对电路进行测量,数据填入自行设计的表格中。要求测出四组数据,将测量值与设计要求进行比较,如果误差较大,修改电路。

七、注意事项

LM324 是双电源供电的模拟集成器件，连接电路时注意不要将电源的正负极性接反。

八、思考题

(1) 在反相求和电路中，集成运放的反相输入端是如何形成虚地的？该电路属于何种反馈类型？

(2) 在反相比值运算电路中，说明电阻 R_2 的作用，以及对这个电阻有什么要求。

九、实验报告

(1) 整理并分析实验数据，将实验结果和理论值对比，加深对基本运算电路的理解。

(2) 记录 LM324 各引脚功能，画出运算电路的实际接线图，加深对该芯片用法的理解。

(3) 回答预习要求和思考题中的题目。

(4) 附上原始数据记录（实验指导书中），并由指导教师签名。

十、相关知识

本实验使用的芯片 LM324 为四运算放大器集成电路。该芯片不需外接调零电路，也不需外接频率补偿电路，使用方便；该芯片为双列直插式 14 线封装，各引脚的功能如图 1-7-3 所示。

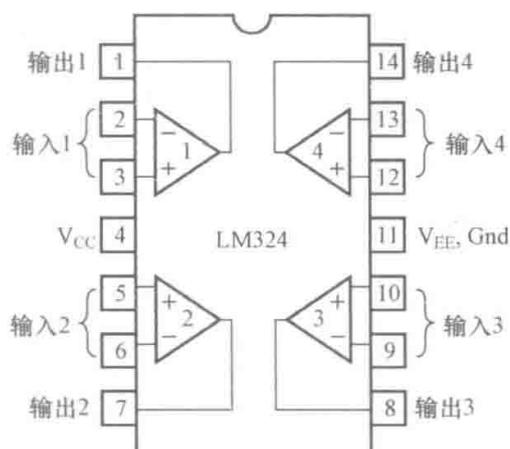


图 1-7-3 LM324 原理电路图及引脚连接图

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-7-1

反相输入比例运算

U_i (V)	0.5	1.0	-0.5	-1.0
U_o (V)				
A_u 实验计算值				
A_u 理论计算值				

内容 2: 设计同相输入比例运算电路

自行设计的电路图:

自行设计的表格:

内容 3:

数据表 1-7-2

反相输入求和运算

U_{i1} (V)	0.5	-0.5	0.5	-0.5
U_{i2} (V)	1	1	-1	-1
U_o 实验计算值 (V)				
U_o 理论计算值 (V)				

内容 4: 设计减法运算电路

自行设计的电路图:

自行设计的表格:

指导教师: _____

实验日期: _____

实验八 有源滤波电路的分析

一、实验目的

- (1) 熟悉用运放、电阻和电容组成有源低通滤波、高通滤波、带通和带阻滤波器的方法。
- (2) 学会测量有源滤波器的幅频特性。
- (3) 了解 Q 值对幅频特性的影响。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习有关滤波器的相关内容。
- (2) 分析图 1-8-2~图 1-8-5 所示电路, 写出它们的增益特性表达式。
- (3) 计算图 1-8-2、图 1-8-3 的截止频率, 计算图 1-8-4、图 1-8-5 的中心频率。
- (4) 画出四种滤波电路的幅频特性曲线。

四、实验原理

由 RC 元件与运算放大器组成的滤波器称为 RC 有源滤波器。其功能是让一定频率范围内的信号通过, 抑制或急剧衰减此频率范围以外的信号, 可应用在信息处理、数据传输、抑制干扰等方面。但因受运算放大器频带限制, 这类滤波器主要用于低频范围。根据对频率范围的选择不同, RC 有源滤波器可分为低通 (LPF)、高通 (HPF)、带通 (BPF) 与带阻 (BEF) 四种滤波器, 幅频特性分别如图 1-8-1 (a) ~ (d) 所示。

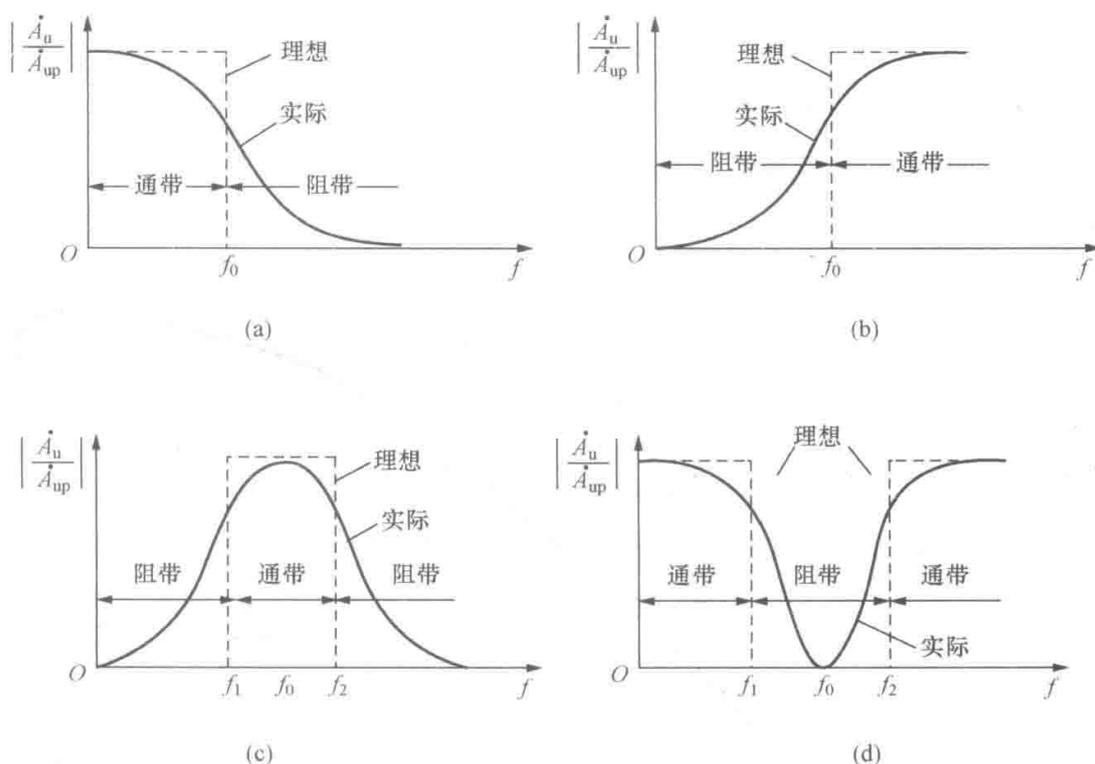


图 1-8-1 四种滤波电路的幅频特性示意图

(a) 低通; (b) 高通; (c) 带通; (d) 带阻

具有理想幅频特性的滤波器是很难实现的, 只能用实际的幅频特性去逐渐逼近理想的。

一般来说,滤波器的幅频特性越好,其相频特性越差;反之,亦然。滤波器的阶数越高,幅频特性衰减的速率越快,但 RC 网络的阶数越多,元件参数计算越繁琐,电路调试越困难。任何高阶滤波器均可以用较低的二阶 RC 有滤波器级联实现。

1. 低通滤波器 (LPF)

低通滤波器是用来通过低频信号而衰减或抑制高频信号。

图 1-8-2 (a) 所示为典型的二阶有源低通滤波器。它由两级 RC 滤波环节与同相比例运算电路组成,其中第一级电容 C 接至输出端,引入适量的正反馈,以改善幅频特性。

图 1-8-2 (b) 所示为二阶低通滤波器幅频特性。

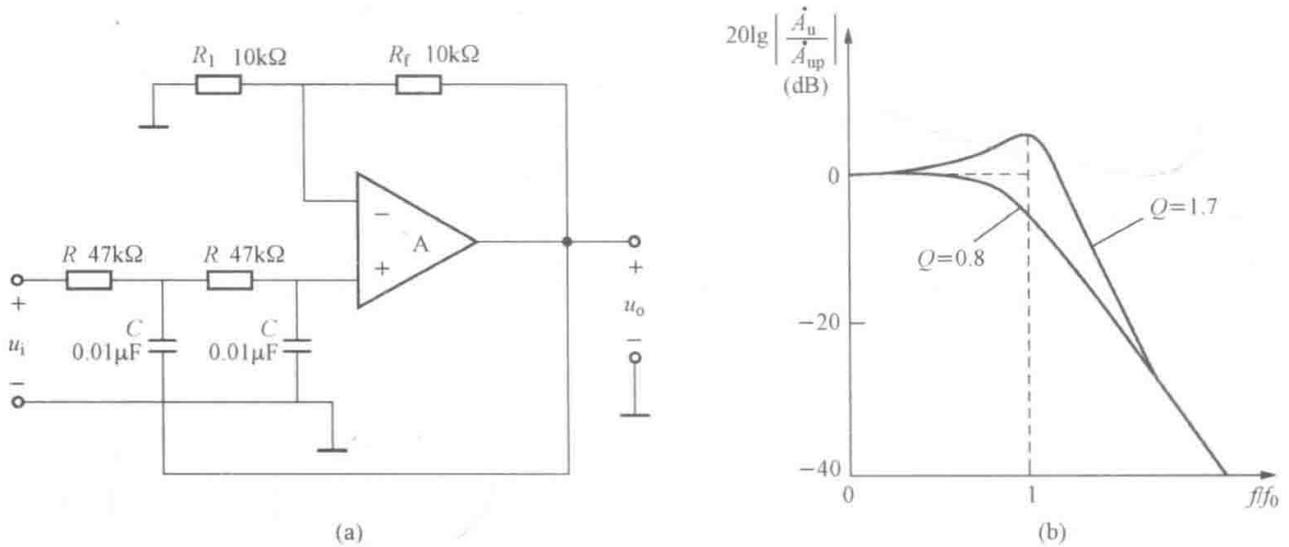


图 1-8-2 二阶低通滤波器

(a) 电路图; (b) 幅频特性

二阶低通滤波器电路性能参数如下:

(1) 二阶低通滤波器的通带放大倍数, $A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ 。

(2) 通带截止频率,指二阶低通滤波器通带与阻带的界限频率, $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

(3) 品质因数,其大小影响低通滤波器在截止频率处幅频特性的形状, $Q = \frac{1}{|3 - A_{up}|}$ 。

2. 高通滤波器 (HPF)

与低通滤波器相反,高通滤波器用来通过高频信号而衰减或抑制低频信号。

只要将图 1-8-2 (a) 所示低通滤波电路中起滤波作用的电阻、电容互换,即可变成二阶有源高通滤波器,如图 1-8-3 (a) 所示。高通滤波器性能与低通滤波器相反,其频率响应和低通滤波器是“镜像”关系,可仿照低通滤波器的分析方法求得其幅频特性。

二阶高通滤波器的电路性能参数 A_{up} 、 f_0 、 Q 的含义同二阶低通滤波器。

图 1-8-3 (b) 为二阶高通滤波器的幅频特性。可见,它与二阶低通滤波器的幅频特性有“镜像”关系。

3. 带通滤波器 (BPF)

带通滤波器的作用是只允许在某一个通频带范围内的信号通过,而比通频带下限频率低和比上限频率高的信号均加以衰减或抑制。

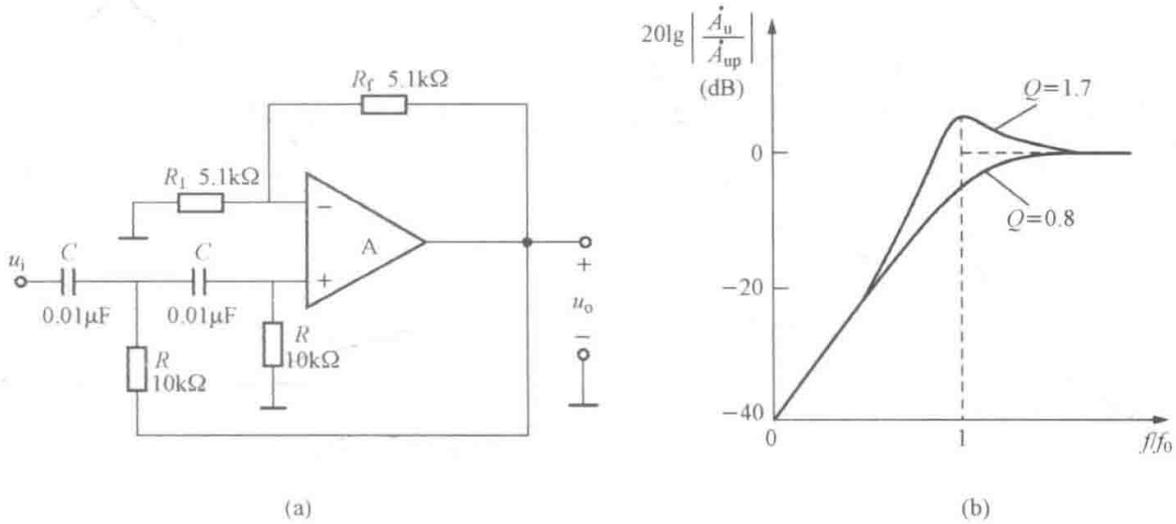


图 1-8-3 二阶高通滤波器

(a) 电路图; (b) 幅频特性

典型的二阶带通滤波器可以由二阶低通滤波器中将其中一级改成高通而成,如图 1-8-4 (a) 所示。其幅频特性如图 1-8-4 (b) 所示。

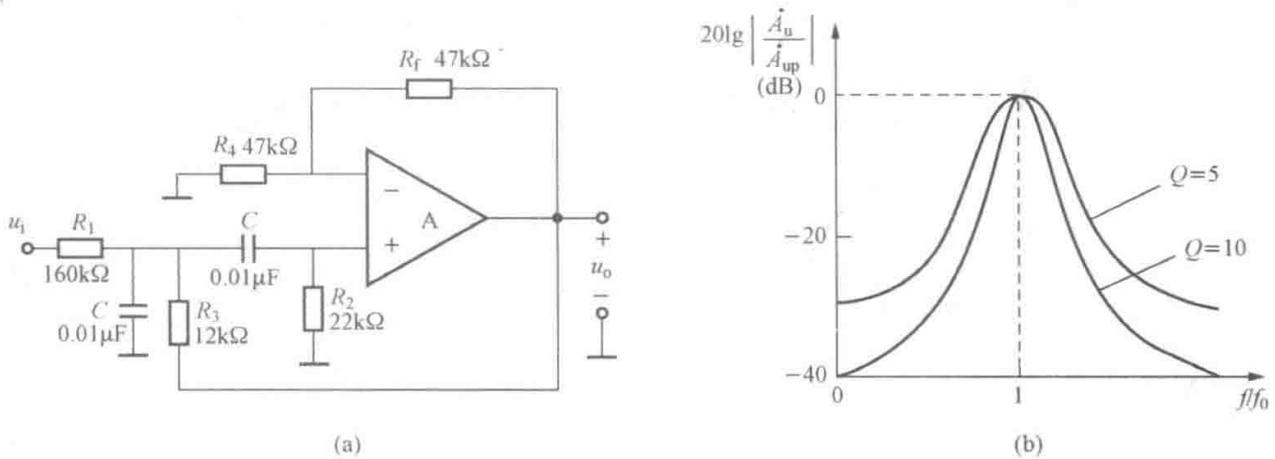


图 1-8-4 二阶带通滤波器

(a) 电路图; (b) 幅频特性

二阶带通滤波器电路性能参数如下:

(1) 同相比例运算电路的比例系数, $A_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_4}$ 。

(2) 中心频率, $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_2 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right)}$ 。

(3) 通带宽度, $f_{BW} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} - \frac{R_f}{R_3 R_4} \right)$ 。

(4) 品质因数, $Q = \frac{\omega_0}{f_{BW}}$ 。

(5) 通带放大倍数, $A_{up} = \frac{A_{uf}}{|3 - A_{uf}|} = QA_{uf}$ 。

此电路的优点是改变 R_f 和 R_4 的比例就可改变频宽而不影响中心频率。

4. 带阻滤波器 (BEF)

如图 1-8-5 (a) 所示, 带阻滤波器电路的性能和带通滤波器相反, 即在规定的频带

内, 信号不能通过 (或受到很大衰减或抑制), 而在其余频率范围, 信号则能顺利通过。图 1-8-5 (b) 为带阻滤波器幅频特性。

在双 T 网络后加一级同相比运算电路就构成了基本的二阶有源 BEF。

带阻滤波器电路性能参数如下:

(1) 通带放大倍数, $A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ 。

(2) 中心频率, $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

(3) 带阻宽度, $f_{BW} = 2 | 2 - A_{up} | f_0$ 。

(4) 品质因数, $Q = \frac{1}{2 | 2 - A_{up} |}$ 。

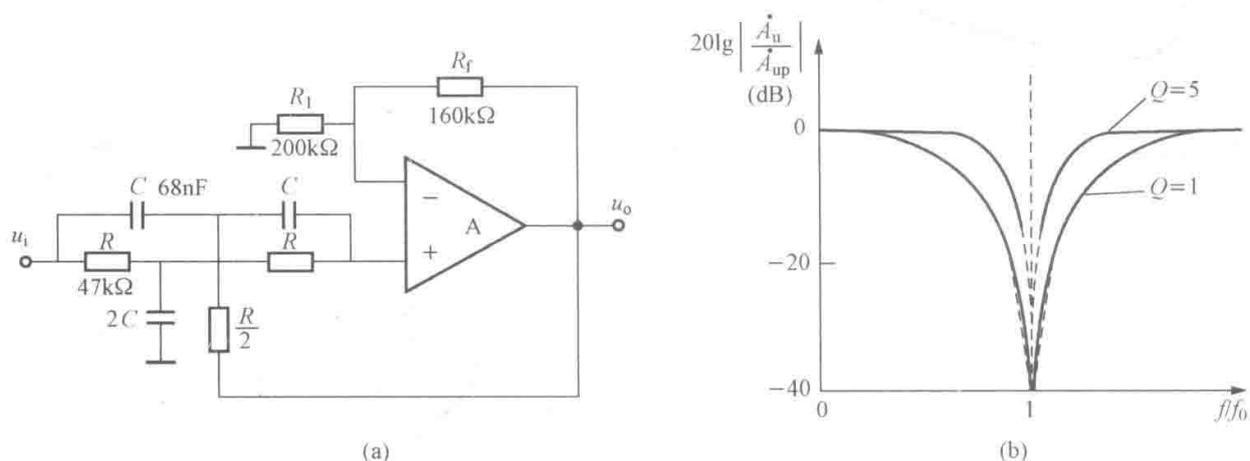


图 1-8-5 二阶带阻滤波器

(a) 电路图; (b) 幅频特性

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。
- (4) DM3058 型数字万用表。
- (5) 集成运算放大器: LM324×1。
- (6) 其他元器件: 电阻器 10kΩ、12kΩ、22kΩ、47kΩ、160kΩ、200kΩ 若干; 电容器 68nF、136nF、0.01μF 若干。

六、实验内容和要求

1. 二阶低通滤波器

实验电路如图 1-8-2 (a) 所示。

(1) 粗测。接通±12V 电源, u_i 接信号发生器, 令其输出为 $U_i = 1V$ 的正弦波信号, 在滤波器截止频率附近改变输入信号频率, 用示波器观察输出电压幅度的变化是否具备低通特性; 如不具备, 应排除电路故障。

(2) 在输出波形不失真的条件下, 选取适当幅度的正弦输入信号, 在维持输入信号幅度不变的情况下, 逐点改变输入信号频率, 测量输出电压, 记入数据表 1-8-1 中, 并描绘幅频特性曲线。

2. 二阶高通滤波器

实验电路如图 1-8-3 (a) 所示。

(1) 粗测。输入 $U_i=1V$ 正弦波信号，在滤波器截止频率附近改变输入信号频率，观察电路是否具备高通特性。

(2) 测绘高通滤波器的幅频特性，记入数据表 1-8-2 中。

3. 带通滤波器

实验电路如图 1-8-4 (a)，测量其幅频特性，记入数据表 1-8-3 中。

(1) 实测电路的中心频率 f_0 。

(2) 以实测中心频率为中心，测绘带通滤波器的幅频特性。

4. 带阻滤波器

实验电路如图 1-8-5 (a) 所示。

(1) 实测电路的中心频率 f_0 。

(2) 测绘电路的幅频特性，记入数据表 1-8-4 中。

七、注意事项

LM324 是双电源供电的模拟集成器件，注意连接电路时一定要将电源的正负极性接反。

八、思考题

(1) 如何根据幅频特性曲线得到截止频率、中心频率和带宽？

(2) 讨论运算放大器的闭环放大倍数对有源滤波器特性的影响。

九、实验报告

(1) 整理实验数据，画出各电路实测的幅频特性。

(2) 根据实验曲线，计算截止频率、中心频率、带宽及品质因数。

(3) 总结有源滤波电路的特性。

(4) 回答预习要求和思考题中的题目。

(5) 附上原始数据记录（实验指导书中），并由指导教师签名。

十、相关知识

滤波器是一种能使有用信号通过而同时抑制或大幅度衰减无用频率信号的电子装置，工程上其多用来作信号处理、数据传送和抑制干扰等。在 20 世纪 20~70 年代，滤波电路主要采用无源元件 R、L 和 C 组成，称为无源滤波器。为了提高无源滤波器的质量，要求所用的电感元件既要有一定的电感量，又具有较高的品质因数 Q_L ，这样就会增加电感元件的体积、质量和成本。随着集成运算放大器的发展，由它和 R、C 元件组成了集成有源滤波电路。由于集成运放开环电压增益和输入阻抗较高，输出阻抗较低，构成有源滤波电路后还具有一定的电压放大和缓冲作用。

但是，集成有源滤波电路也存在如下缺点：

(1) 集成运算放大器的带宽有限，所以集成有源滤波电路的工作频率难以做得很高，仅限于音频范围 ($f \leq 20kHz$) 内应用；

(2) 生产工艺和环境变化所造成的元件偏差对有源滤波电路的影响较大；

(3) 集成运放要消耗功率。

虽然集成有源滤波电路存在上述缺点，但是在声频 ($f \leq 4kHz$) 范围内与无源滤波器相比，在经济和性能上优越很多，因此在世界各国的先进通信系统中得到极其广泛的应用。

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-8-1

二阶低通滤波器

$f(\text{Hz})$	
$U_o(\text{V})$	

内容 2:

数据表 1-8-2

二阶高通滤波器

$f(\text{Hz})$	
$U_o(\text{V})$	

内容 3:

数据表 1-8-3

带通滤波器

$f(\text{Hz})$	
$U_o(\text{V})$	

内容 4:

数据表 1-8-4

带阻滤波器

$f(\text{Hz})$	
$U_o(\text{V})$	

指导教师: _____

实验日期: _____

实验九 方波—三角波发生器的设计

一、实验目的

- (1) 学习用集成运算放大器构成方波—三角波信号发生器的方法。
- (2) 掌握波形发生器的调整和主要性能指标的测试方法。

二、实验类型

设计型实验。

三、预习要求

- (1) 复习有关波形发生器的电路组成和工作原理。

- (2) 用集成运放设计一个方波—三角波发生器，方波及三角波波形如图 1-9-1 所示。要求由一个滞回比较器及一个 RC 积分电路组成，所选用的元器件依据书中给出的实验器件清单，拟定实验步骤和实验表格。

四、实验原理

由集成运算放大器构成的正弦波、方波和三角波发生器有多种形式，如 RC 桥式正弦波振荡器（文氏电桥振荡器），由迟滞比较器和 RC 积分器构成的方波发生器和三角波发生器等。

波形发生器的设计通常需要考虑两个方面：一是选择输出波形电路，二是确定该电路的振荡频率。

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DM3058 型数字万用表。
- (4) 集成运算放大器：LM324×1。
- (5) 双向稳压管：2DW7×1。
- (6) 电阻：10kΩ×1、20kΩ×1、2kΩ×1。
- (7) 电容：0.047μF×1 或 0.022μF×1。
- (8) 电位器：100kΩ×1。

六、实验内容和要求

- (1) 在模拟实验箱中根据自行设计的电路图连线电路。
- (2) 用示波器读出并标明测得的参数，包括输出波形周期 T 、频率 f 以及方波和三角波电压的幅值 u_o 和 u'_o ，并填入自行设计的数据表格中。

七、注意事项

- (1) 注意 LM324 的正极在下而负极在上，一定不要将电源的正负接反。
- (2) 注意双向稳压管的使用方法。

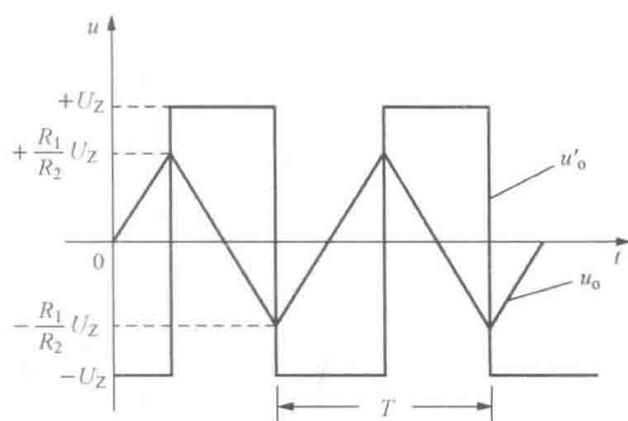


图 1-9-1 方波、三角波发生器输出波形图

八、思考题

- (1) 讨论如何实现限幅。
- (2) 如何调整波形的幅值及频率?

九、实验报告

- (1) 列表整理实验数据,在同一坐标纸上按比例画出方波和三角波的波形图(标出周期和电压幅值)。
- (2) 比较和分析实测值是否满足设计要求。
- (3) 回答预习要求和思考题中的题目。
- (4) 附上原始数据记录(实验指导书中),并由指导教师签名。

实验原始数据记录

内容 1: 自行设计的电路图

内容 2: 记录方波和三角波波形图



自行设计数据表格, 记录方波和三角波的周期 T 、频率 f 以及方波和三角波的幅值 u_0 和 u'_0 。

指导教师: _____

实验日期: _____

实验十 用集成稳压器组成直流稳压电源

一、实验目的

- (1) 研究整流滤波电路的工作原理和基本特点。
- (2) 掌握三端稳压器的使用方法和稳压电路基本指标的测试方法。
- (3) 了解集成稳压器扩展性能的方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习整流、滤波电路的组成和工作原理。
- (2) 复习三端稳压器电路的工作原理和各外接电容的作用。
- (3) 估算图 1-10-2 中 U_1 的值。
- (4) 查阅有关手册，了解三端集成稳压器参数及应用的有关知识。

四、实验原理

随着半导体工艺的发展，稳压电路也制成了集成器件。由于集成稳压器具有体积小，外接线路简单、使用方便、工作可靠和通用性强等优点，因此在各种电子设备中应用十分普遍，基本上取代了由分立元件构成的稳压电路。集成稳压器的种类很多，应根据设备对直流电源的要求来进行选择。对于大多数电子仪器、设备和电子电路来说，通常是选用串联线性集成稳压器，其中又以三端式稳压器应用最为广泛。

W7800、W7900 系列三端式集成稳压器的输出电压是固定的，在使用中不能进行调整。W7800 系列三端式稳压器输出正极性电压，一般有 5、6、9、12、15、18、24V 七挡，输出电流最大可达 1.5A（加散热片）。同类型 78M 系列稳压器的输出电流为 0.5A，78L 系列稳压器的输出电流为 0.1A。若要求负极性输出电压，则可选用 W7900 系列稳压器。

图 1-10-1 为 W7800 系列的外形和接线图。它有三个引出端：输入端（不稳定电压输入端），标以“1”；输出端（稳定电压输出端），标以“3”；公共端，标以“2”。

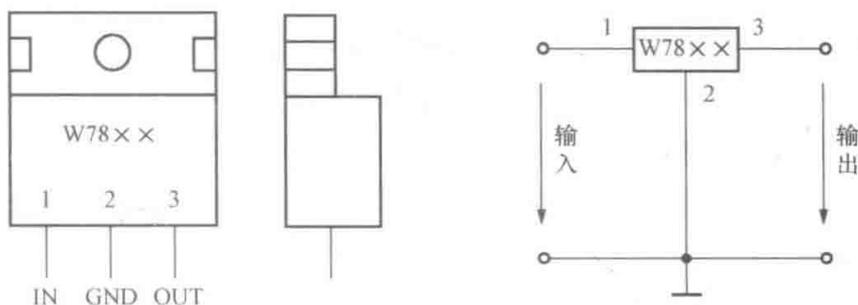


图 1-10-1 W7800 系列外形及接线图

除固定输出三端稳压器外，还有可调式三端稳压器，后者可通过外接元件对输出电压进行调整，以适应不同的需要。

本实验所用集成稳压器为三端固定正稳压器 W7812，它的主要参数有：输出直流电压

$U_O = +12\text{V}$; W78L12 输出电流为 0.1A , W78M12 为 0.5A ; 电压调整率 10mV/V ; 输出电阻 $R_o = 0.15\Omega$; 因为一般 U_1 要比 U_O 大 $3\sim 5\text{V}$, 才能保证集成稳压器工作在线性区, 所以输入电压 U_1 的范围为 $15\sim 17\text{V}$ 。

图 1-10-2 是用三端式稳压器 W7805 构成的单电源电压输出串联型稳压电源的实验电路图。其中整流部分采用了由四个二极管组成的桥式整流器成品 (又称桥堆), 型号为 2W06 或 KBP306, 其内部接线和外部引脚引线如图 1-10-3 所示。滤波电容 C_1 、 C_3 一般选取几百至几千微法。当稳压器距离整流滤波电路比较远时, 在输入端必须接入电容器 C_2 (数值为 $0.33\mu\text{F}$), 以抵消线路的电感效应, 防止产生自激振荡。输出端电容 C_4 ($0.1\mu\text{F}$) 用以滤除输出端的高频信号, 改善电路的暂态响应。

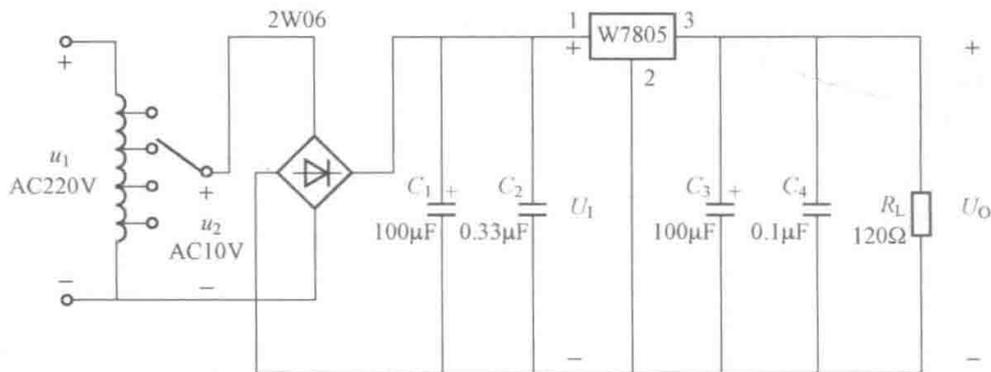


图 1-10-2 由 W7805 构成的串联型稳压电源

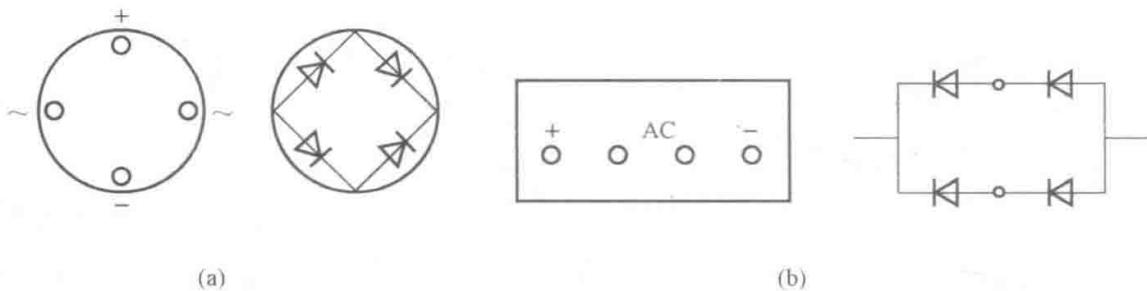


图 1-10-3 桥堆内部接线和外部引脚图

(a) 圆桥 2W06; (b) 排桥 KBP306

图 1-10-4 为正、负双电压输出电路, 如需要 $U_{O1} = +15\text{V}$, $U_{O2} = -15\text{V}$, 则可选用 W7815 和 W7915 三端稳压器, 这时的 U_1 应为单电压输出时的两倍。

当集成稳压器本身的输出电压或输出电流不能满足要求时, 可通过外接电路来进行性能扩展。图 1-10-5 是一种简单的输出电压扩展电路。如 W7812 稳压器的 3、2 端间输出电压为 12V , 因此只要适当选择 R 的值, 使稳压管 VZ 工作在稳压区, 则输出电压 $U_O = 12 + U_Z$, 可以高于稳压器本身的输出电压。

图 1-10-6 是通过外接晶体管 VT 及电阻 R_1 来进行电流扩展的电路。电阻 R_1 的阻值由外接晶体管的发射结导通电压 U_{BE} 、三端式稳压器的输入电流 I_1 (近似等于三端稳压器的输出电流 I_{O1}) 和 VT 的基极电流 I_B 来决定, 即

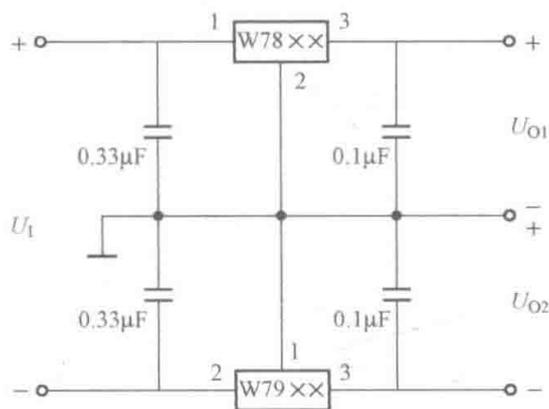


图 1-10-4 正、负双电压输出电路

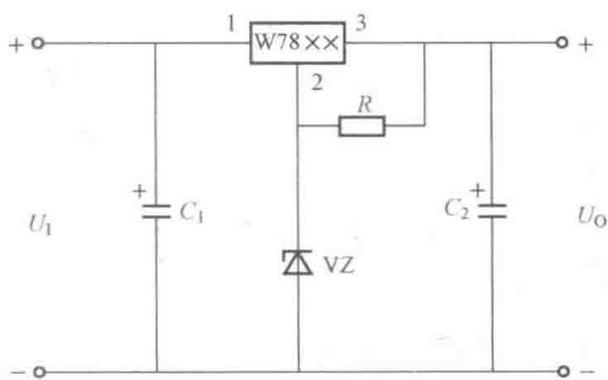


图 1-10-5 输出电压扩展电路

$$R_1 = \frac{U_{BE}}{I_R} = \frac{U_{BE}}{I_1 - I_B} = \frac{U_{BE}}{I_{O1} - \frac{I_C}{\beta}}$$

式中 I_C ——晶体管 VT 的集电极电流， $I_C = I_O - I_{O1}$ ；

β ——VT 的电流放大系数，对于锗管 $U_{BE}\beta$ 可按 0.3V 估算，对于硅管 $U_{BE}\beta$ 按 0.7V 估算。

五、实验设备与器件

- (1) 模拟电路实验箱。
- (2) DS2072A 型数字存储示波器。
- (3) DG1032Z 型函数/任意波形发生器。
- (4) DM3058 型数字万用表。
- (5) 整流桥堆：2WO6 (或 KBP306) ×1。
- (6) 三端稳压器：W7812×1、W7815×1、W7915×1。

(7) 电阻器、电容器若干。

六、实验内容和要求

(一) 整流滤波电路测试

(1) 按图 1-10-7 所示实验电路接线，取 $R_L = 240\Omega$ ，不加滤波电容，接通工频电源，用万用表直流电压挡测量输出端直流电压 U_L 及用示波器测量输出端纹波电压 \tilde{U}_L ，用示波器观察 u_2 、 u_L 的波形，将数据及波形记入数据表 1-10-1 中。

(2) 取 $R_L = 240\Omega$ ， $C = 470\mu F$ ，重复上述步骤，将数据和波形记入数据表 1-10-1 中。

(3) 取 $R_L = 120\Omega$ ， $C = 470\mu F$ ，重复上述步骤，将数据和波形记入数据表

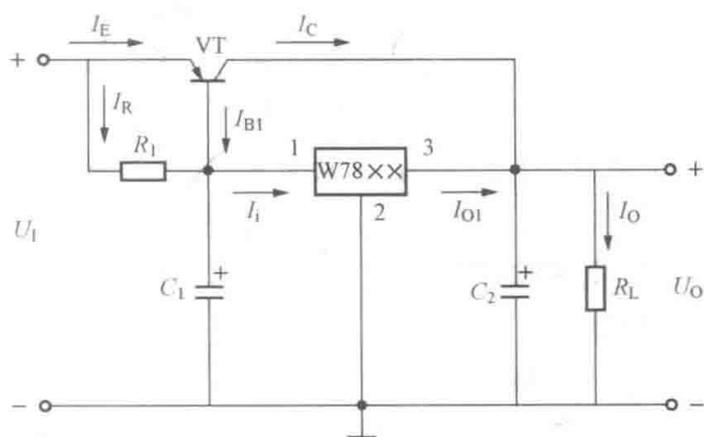


图 1-10-6 输出电流扩展电路

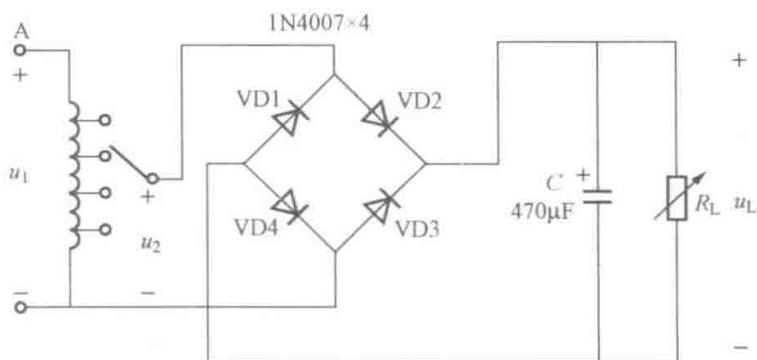


图 1-10-7 整流滤波电路

1-10-1 中。

（二）集成稳压器性能测试

断开工频电源，按图 1-10-2 连接实验电路，取负载电阻 $R_L=120\Omega$ 。

1. 初测

接通工频 14V 电源，测量 u_2 、滤波电路输出电压 U_1 （稳压器输入电压）、集成稳压器输出电压 U_0 。 U_1 和 U_0 的数值应与理论值大致符合，否则说明电路出现了故障，应设法查找故障并加以排除。

电路经初测进入正常工作状态后，才能进行各项指标的测试。

2. 各项性能指标测试

(1) 输出电压 U_0 和最大输出电流 I_{Omax} 的测量。在输出端接负载电阻 $R_L=120\Omega$ ，由于 W7812 输出电压 $U_0=12V$ ，因此流过 R_L 的电流 $I_{Omax}=\frac{12}{120}=100mA$ 。这时 U_0 应基本保持不变，若变化较大则说明集成块性能不良。

(2) 稳压系数 S 的测量。取 $I_0=100mA$ ，按数据表 1-10-2 改变整流电路输入电压 U_2 （模拟电网电压波动），分别测出相应的稳压器输入电压 U_1 及输出直流电压 U_0 ，记入数据表 1-10-2 中。

(3) 输出电阻 R_0 的测量。取 $U_2=14V$ ，改变滑线变阻器 R_L 位置，使 I_0 为空载电流、50mA 和 100mA，测量相应的 U_0 值，记入数据表 1-10-3 中。

(4) 输出纹波电压的测量。取 $U_2=14V$ ， $U_0=12V$ ， $I_0=100mA$ ，测量输出纹波电压 U_0 （通常用稳压器输出电压 u_0 交流分量的峰—峰值来代表），记录之。

*（三）集成稳压器性能扩展

根据实验器材选取图 1-10-4~图 1-10-6 中各元器件，并自拟测试方法与表格，记录实验结果。

七、注意事项

- (1) 集成稳压器的输入端和输出端不要接反，否则会损坏稳压器。
- (2) 注意集成稳压器的公共端要可靠接地，否则 $U_0=U_1$ ，致使负载元件损坏。
- (3) 在进行整流滤波电路测试时，每次改接电路都必须切断工频电源。
- (4) 在观察输出电压 u_L 波形的过程中，示波器“Y 轴灵敏度”旋钮位置调好以后，不要再变动，否则将无法比较各波形的脉动情况。

八、思考题

- (1) 在测量稳压系数 S 和内阻 R_0 时，应怎样选择测试仪表？
- (2) 分析讨论实验中发生的现象和问题。

九、实验报告

- (1) 整理实验数据，计算 S 和 R_0 ，并与手册上的典型值进行比较。
- (2) 比较单相桥式整流电路、电容滤波电路输出电压 U_1 的测量值和理论值，说明误差的原因。
- (3) 回答预习要求和思考题中的题目。
- (4) 附上原始数据记录（实验指导书中），并由指导教师签名。

十、相关知识

1. 直流稳压电源

电子设备一般都需要直流电源供电。这些直流电除了少数直接利用干电池和直流发电机外,大多数是采用把交流电(市电)转变为直流电的直流稳压电源。直流稳压电源由电源变压器、整流、滤波和稳压电路四部分组成,其原理框图如图 1-10-8 所示。电网供给的交流电压 u_1 (220V、50Hz) 经电源变压器降压后,得到符合电路需要的交流电压 u_2 ; 然后由整流电路变换成方向不变、大小随时间变化的脉动电压 u_3 ; 再经滤波器滤去其交流分量,就可得到比较平直的直流电压 u_4 ; 但这样的直流输出电压,还会随交流电网电压的波动或负载的变动而变化,在对直流供电要求较高的场合,还需要使用稳压电路,以保证输出直流电压 u_0 更加稳定。

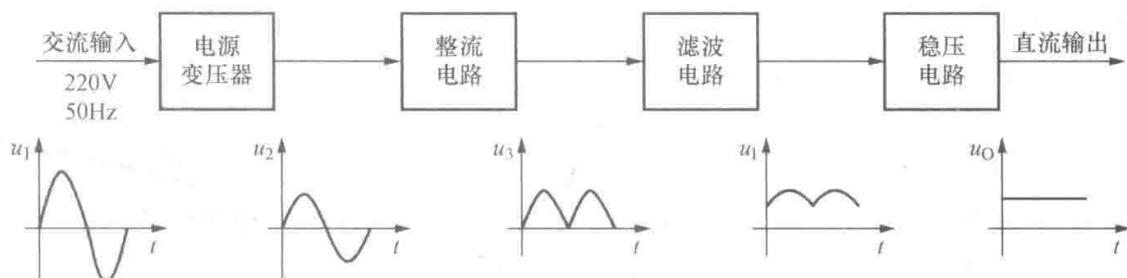


图 1-10-8 直流稳压电源原理框图

2. 稳压电源的技术指标

稳压电源的技术指标有三种:

(1) 使用指标,指从功能角度来看稳压电源的容量(输出电压和输出电流)、调节范围及效率高低等指标;

(2) 非电气指标,指外观形状、体积大小及质量等直观形象的些指标;

(3) 质量指标,用来衡量输出直流电压的稳定程度,包括稳压系数、输出电阻、温度系数及纹波电压等。

3. W7900 系列外形及接线图

图 1-10-9 为 W7900 系列(输出负电压)外形及接线图。

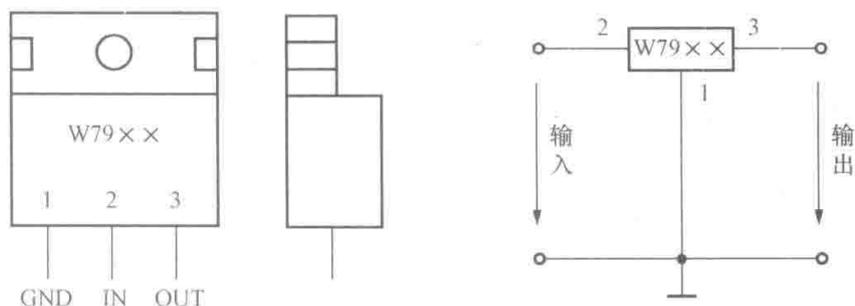


图 1-10-9 W7900 系列外形及接线图

4. W317 外形及接线图

图 1-10-10 为可调输出正三端稳压器 W317 外形及接线图。

输出电压
$$U_0 \approx 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

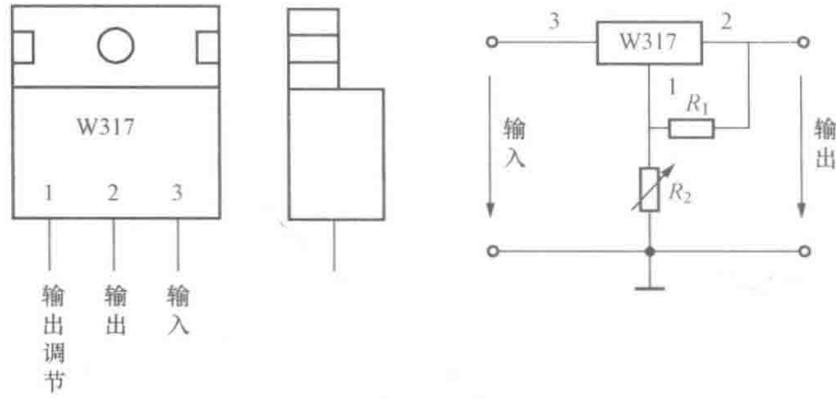


图 1-10-10 W317 外形及接线图

最大输入电压

$$U_{im} = 40V$$

输出电压范围

$$U_o = 1.2 \sim 37V$$

W7800 系列的测试方法可用数字万用表的二极管挡测试，方法如下：

- (1) 黑表笔接触地脚，红表笔分别接触输入、输出脚，都有二极管的正向导通特性。
- (2) 红表笔接触输出脚，黑表笔接触输入脚，有二极管的正向导通特性。
- (3) 红表笔、黑表笔对换再测量，有二极管的反向特性。
- (4) 通过以上测量说明 W7800 是好的。

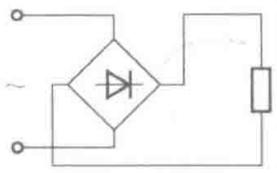
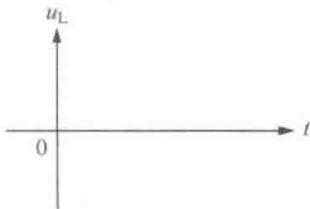
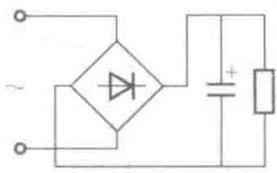
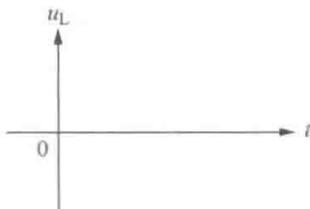
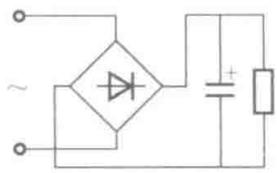
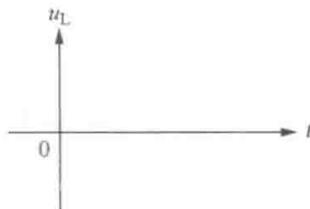
其他的三端稳压集成电路（含可调）也可以用同样的方法。注意：W7900 系列的测量表笔与 W7800 系列相反。

实验原始数据记录

内容 1:

数据表 1-10-1

 $U_2 = 14V$ 整流滤波电路测试

电路形式	U_L (V)	\tilde{U}_L (V)	u_L 波形
$R_L = 240\Omega$ 			
$R_L = 240\Omega$ $C = 470\mu F$ 			
$R_L = 120\Omega$ $C = 470\mu F$ 			

内容 2: 集成稳压器性能测试

1. 初测

 $U_2 = \underline{\hspace{2cm}}$; $U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$; $U_0 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

2. 各项性能指标测试

(1) 输出电压 U_0 和最大输出电流 I_{Omax} 的测量。 $U_0 = \underline{\hspace{2cm}}$; $I_{Omax} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2) 稳压系数 S 的测量。

数据表 1-10-2

 $(I_O = 100mA)$

测试值			计算值
U_2 (V)	U_1 (V)	U_0 (V)	S
12			$S_{12} =$ $S_{23} =$
14		12	
16			

(3) 输出电阻 R_O 的测量。

数据表 1-10-3

($U_i = 14V$)

测试值		计算值
I_O (mA)	U_O (V)	R_O (Ω)
空载		$R_{O_{12}} =$ $R_{O_{23}} =$
50	12	
100		

(4) 输出纹波电压的测量。

$U_O =$ _____。

指导教师: _____

实验日期: _____

第二章 模拟电路仿真实验

实验一 二极管 $V-I$ 特性曲线及应用电路

一、实验目的

- (1) 学习 NI Multisim 12 软件的使用方法。
- (2) 学习元器件的选取及放置、电路的连接、电路中各元器件模型参数和标号的修改方法。
- (3) 学会使用 NI Multisim 12 中直流扫描分析方法测试二极管 $V-I$ 特性曲线。
- (4) 学习 NI Multisim 12 中虚拟示波器的使用方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习二极管的相关知识，熟悉二极管的 $V-I$ 特性曲线以及二极管的门坎电压和击穿电压的定义，认真完成预习报告的相关内容。
- (2) 阅读第四章，熟悉 NI Multisim 12 的基本界面以及界面的布局。
- (3) 阅读第四章，了解 NI Multisim 12 直流扫描分析方法分析电路的一般步骤。
- (4) 阅读第四章，了解 NI Multisim 12 关于虚拟示波器使用方法的介绍。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

二极管 $V-I$ 特性曲线测试实验电路如图 2-1-1 所示。试分析：

- (1) 画出二极管 1N4148 的 $V-I$ 特性曲线。
- (2) 测量二极管 1N4148 的门坎电压和击穿电压。
- (3) 当输入电压信号 u_i 有效值为 5V，频率为 1kHz 正弦波时，观察输入、输出波形并说明电路的功能。

六、实验步骤

(一) 编辑原理图

编辑原理图包括建立电路文件、设计电路界面、设置元器件封装标准、放置元件、连接电路、编辑处理及保存文件等步骤，具体请参阅第四章第七节 - NI Multisim 12 的基本操作。

1. 建立电路文件

启动 NI Multisim 12 程序，在 NI Multisim 12 基本界面上会打开一个空白的电路文件，系统自动命名为“Design1”，显示在主窗口的标题栏。

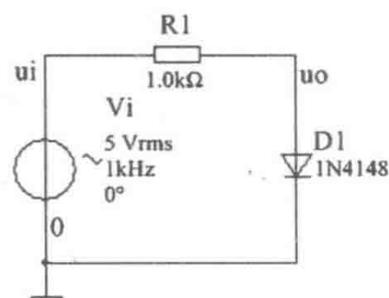
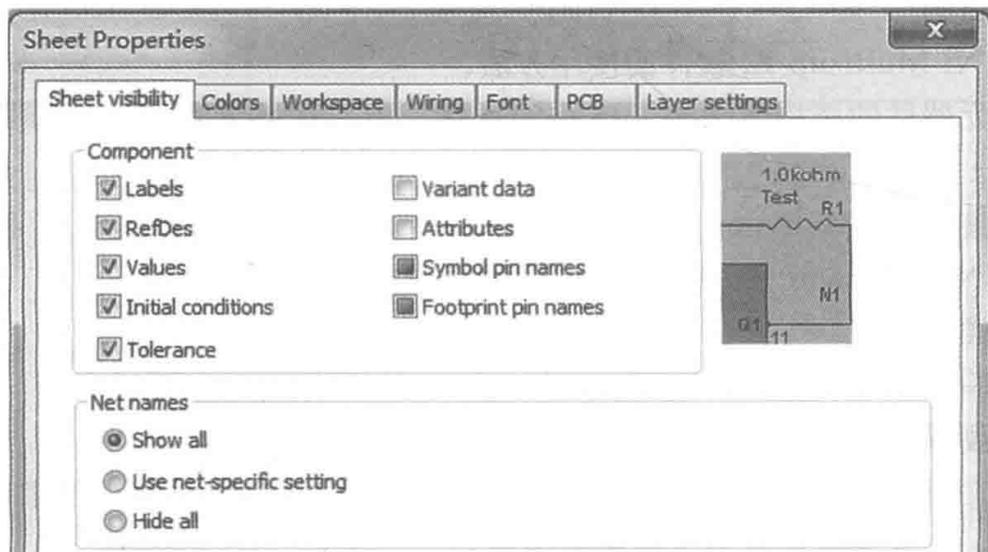


图 2-1-1 二极管 $V-I$ 特性曲线测试实验电路

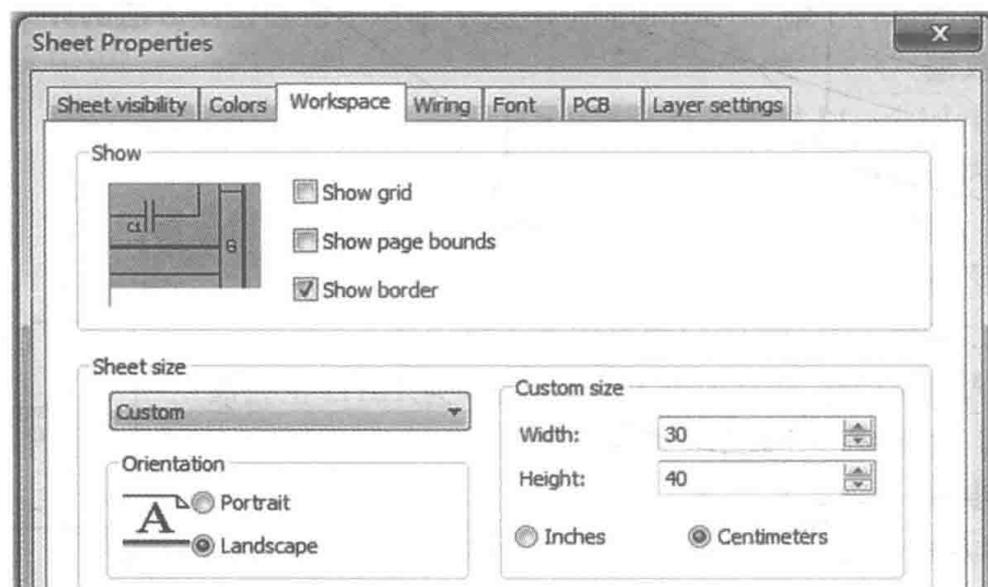
2. 设计电路界面

选取“Options\Sheet properties”，打开“Sheet Properties”对话框；或者在原理图编辑区单击鼠标右键，在弹出菜单中单击“Properties”；或者使用快捷键“Ctrl+M”，对7个选项卡中的若干功能选项进行相应设置，定义一个用户需要的原理图编辑区。

本教材中所有仿真实验的电路界面均按照图2-1-2所示进行设置，之后的实验中不再赘述。“Sheet Properties\Sheet visibility”的设置如图2-1-2(a)所示，“Sheet Properties\Workspace”的设置如图2-1-2(b)所示。其他选项默认。



(a)



(b)

图 2-1-2 “Sheet Properties” 对话框

(a) “Sheet Visibility” 的设置；(b) “Workspace” 的设置

3. 设置元器件封装标准

选取“Options\Global preferences”，打开“Global Preferences”对话框，对“components”选项卡中“Symbol standard”进行修改，选择“DIN”，如图2-1-3所示。其他选项默认。

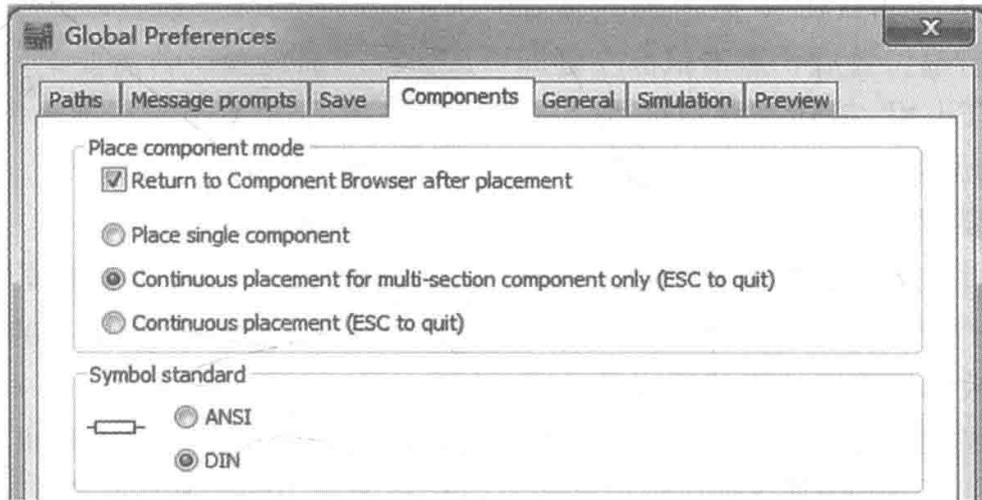


图 2-1-3 “GlobalPreferences”对话框

4. 在原理图编辑区中放置元器件

(1) 选取并放置二极管。将鼠标指向元件工具栏的二极管符号上，显示“Place Diode”，点击鼠标左键出现“Diode”对话框，如图 2-1-4 所示。

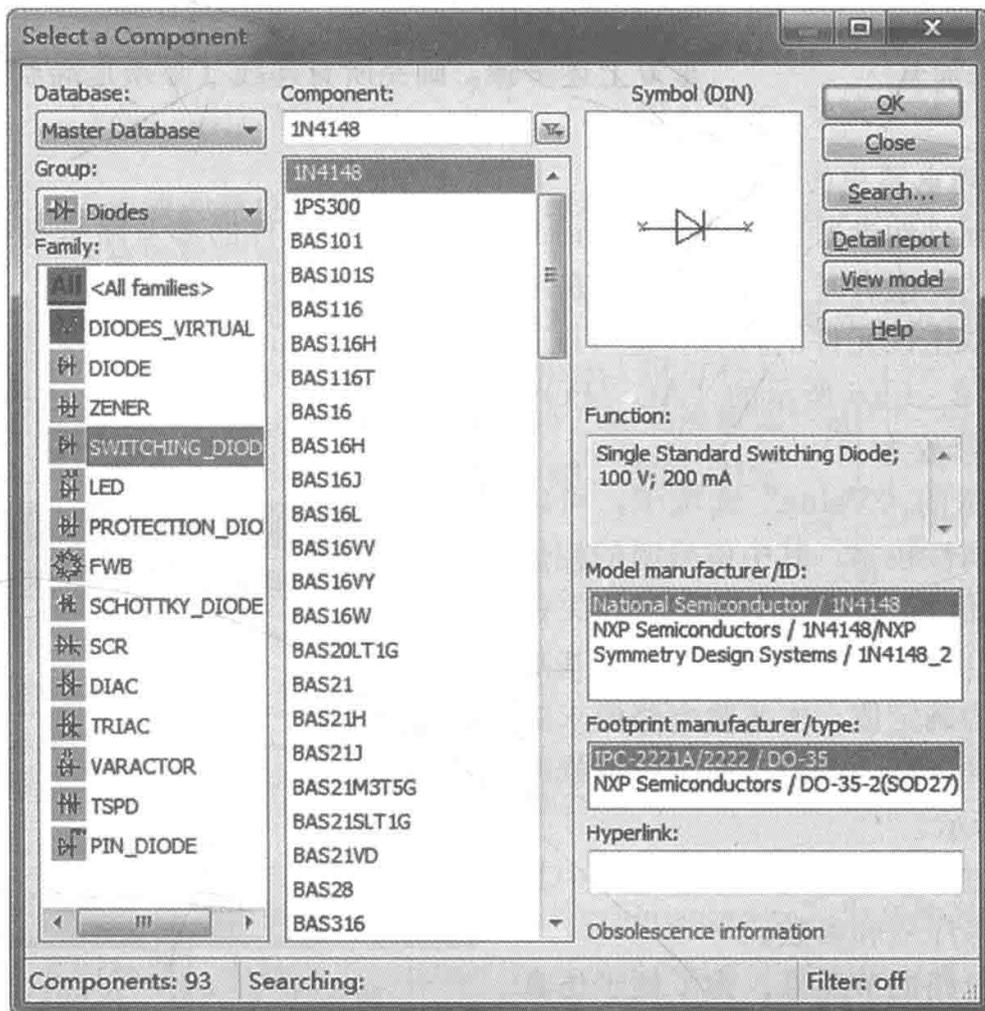
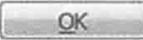


图 2-1-4 “Diode”对话框

本实验选取现实存在的型号二极管 1N4148，点击图 2-1-4 中的“SWITCHING_DIODE”，在“component”列表中显示出所有的“Switch diode”，在“Component”列表里拉

动滚动条, 找到“1N4148”, 点击  按钮, 选出的二极管紧随着鼠标在原理图编辑区内移动, 移到合适位置后, 点击鼠标左键即可放置在当前位置。若需要, 可用快捷键“Ctrl+R”或“ALT+X”旋转或翻转符号(也可用菜单项 Edit 下面的选项来完成)。如果需要放置多个同类元器件, 利用拷贝和粘贴就可以。

本实验需要用快捷键“Ctrl+R”对二极管进行旋转放置。

(2) 选取并放置电阻、交流信号源和公共端。按照上述方法, 将鼠标分别指向元件工具栏的电阻符号 、电源符号  上, 选择 1.0kΩ 电阻、120Vrms/60Hz/0° 交流信号源以及“GROUND”放到原理图编辑区适当的位置上。

全部元器件放置完, NI Multisim 12 界面上的“**In Use List**”栏内列出了电路所使用的**所有元器件**, 如图 2-1-5 所示。使用该栏可以检查所调用的元器件是否正确和完整。

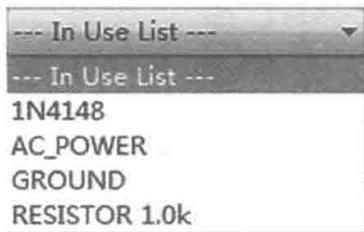


图 2-1-5 电路所使用的
所有元件列表

5. 连接线路

放置完所有元器件后需要对其进行线路连接, 将鼠标移到元件引脚处, 鼠标指针就会变成小黑点; 单击鼠标左键, 即可拉出一条虚线, 如要从某点转弯, 则先点击转弯处, 固定该点, 然后再移动鼠标, 将鼠标移到要连接的另一元件引脚处单击左键, 则完成一根连线的连接。

重复上述步骤, 画完所有连线(必须是端点连线, 不能有重合的线段)。

6. 编辑处理电路中的元器件

(1) 修改元件的参考序号(ReferenceID)和参数。元件的参考序号是在元件选取时由系统自动分配的, 但有时与人们的习惯表示不同, 如本实验中交流信号源 V1, 习惯表示为 Vi, 可以通过双击该元件的符号, 也可以选择菜单项“Edit\Properties”或快捷键“Ctrl+M”, 出现如图 2-1-6 所示的“AC_POWER”对话框, 将“Label”选项卡上“RefDes”栏内的“V1”修改为“Vi”。

单击信号源的“Value”选项卡, 可以看到信号源的属性较多, 其中信号源的幅值 Voltage (有效值), 频率 Frequency 和失调电压 Voltage Offset (即信号源的直流基准电压) 必须设为确定值。本实验电路要求的信号源是 5V/1000Hz/0Deg, 相应参数修改如图 2-1-7 所示。

重复上述过程, 可以编辑修改电路中其他元器件的参考序号和参数。

(2) 修改电路的节点号。为了便于仿真分析, 将电源和电阻 R1 的连接线上的节点号改为 ui, 将电阻 R1 与二极管的连线上的节点号改为 uo, 可将鼠标箭头对准此连线并双击左键, 弹出“Net Properties”对话框, 如图 2-1-8, 在“Net name”选项卡中“Preferred net name”栏输入 ui, 点击“OK”即可。如果没有必要, 这一步可以不做。

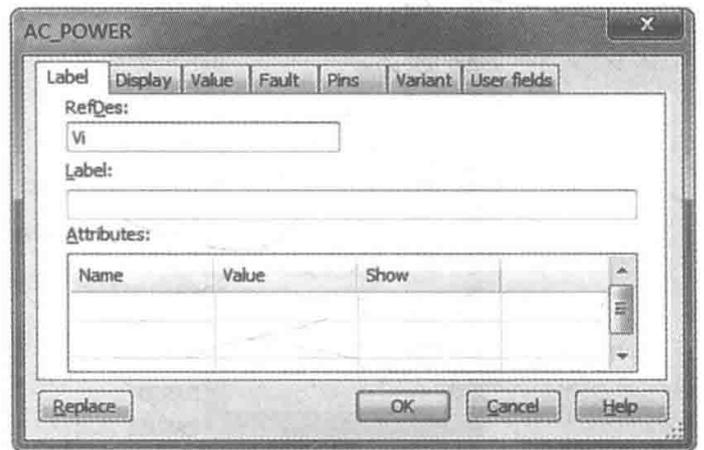


图 2-1-6 “AC_POWER”对话框

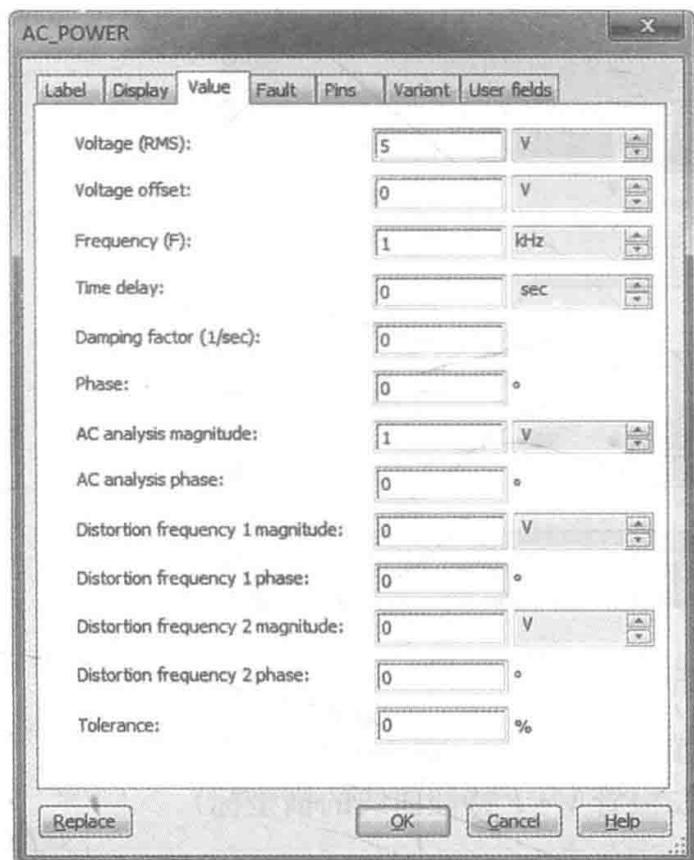


图 2-1-7 “Value” 属性对话框

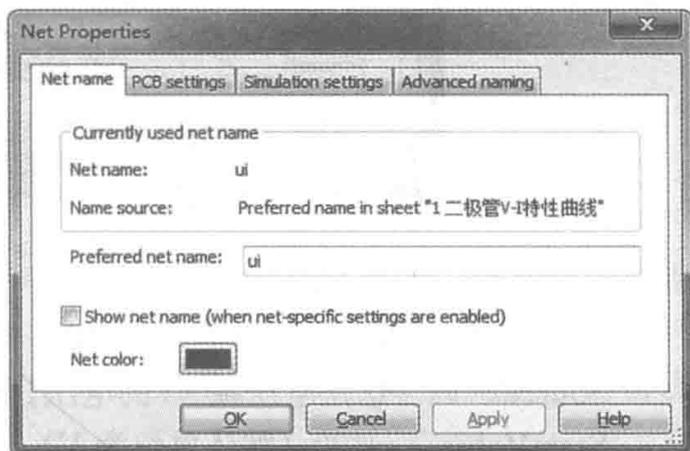


图 2-1-8 “Net Properties” 对话框

(3) 修改元件或连线的颜色。如有需要,可以根据使用者的喜好或者分析问题的方便修改电路中某些元件或连线的颜色。

(4) 删除元件或连线。如果想删除不需要的元件,可用鼠标选中该元件(元件符号周围出现一个矩形虚框),然后选择菜单项“Edit\Delete”就可将元件删除(也可用键盘上的“Delete”键直接删除)。如果想删除不需要的连线,将鼠标移动到该连线点击鼠标右键,选择“Delete”即可。

对本实验进一步编辑处理后的电路如图 2-1-9 所示。

7. 保存文件

- (1) 选择菜单项“File\Save”,弹出保存文件对话框。
- (2) 选定保存文件的路径。
- (3) 在文件名编辑框中输入文件名,如“erjiguan”。
- (4) 单击“保存”按钮。

完成上述步骤后,刚才绘制的电路图,即以“erjiguan.msm”为文件名的文件就保存在选定的路径中,此时标题栏中显示“erjiguan”。

(二) 用直流扫描分析(DC Sweep Analysis)仿真二极管的 $V-I$ 特征曲线和测试参数

1. 设置直流扫描分析(DC Sweep Analysis)

(1) 选择菜单项“Simulate\Analysis\DC Sweep...”,或者点击设计工具栏上的  按钮,选中下拉菜单中的“DCS weep...”,即弹出如图 2-1-10 所示的“DC SweepAnalysis”对话框。

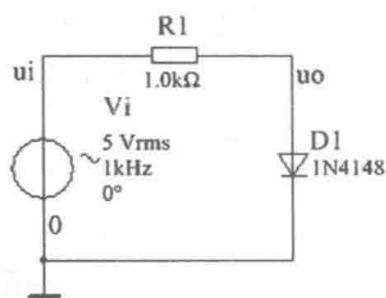


图 2-1-9 进一步编辑处理后的电路图

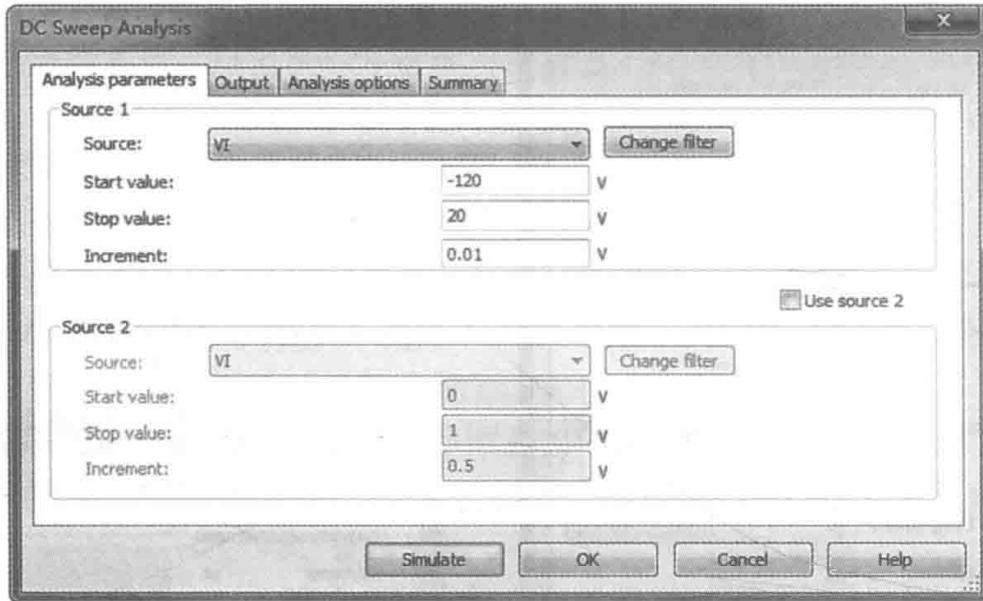


图 2-1-10 “DC Sweep Analysis” 对话框

(2) 在“Analysis Parameters”选项卡中设置“Source1”，各参数设置如下：
 Source: VI (这是电压源 V_i 的电压，作为二极管 $V-I$ 特性曲线的横坐标)。
 Start Value: -120 (默认单位为 V)。
 Stop Value: 20 (默认单位为 V)。

Increment: 0.01 (默认单位为 V，该值取得越小，显示出的曲线就越平滑，但会影响仿真速度)。

以上参数设置说明仿真程序由 -120V 扫描到 20V ，每隔 0.01V 记录一次。

(3) 在“Output”选项卡中设置 $I(D1 [ID])$ (这是流过二极管 $D1$ 的电流，作为二极管 $V-I$ 特性曲线的纵坐标) 为仿真输出变量，点击“Add”按钮添加此变量到分析变量列表，如图 2-1-11 所示。

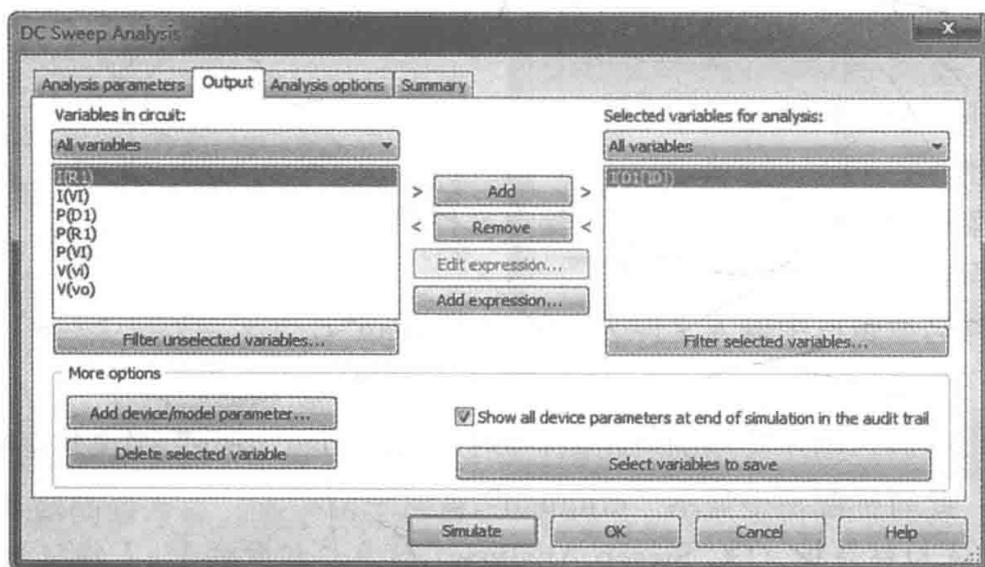


图 2-1-11 “Output” 设置对话框

2. 仿真二极管的 $V-I$ 特性曲线

(1) 单击“Simulate”进行仿真，弹出“Analysis Graphs”窗口，出现如图 2-1-12 所

示的仿真曲线图。

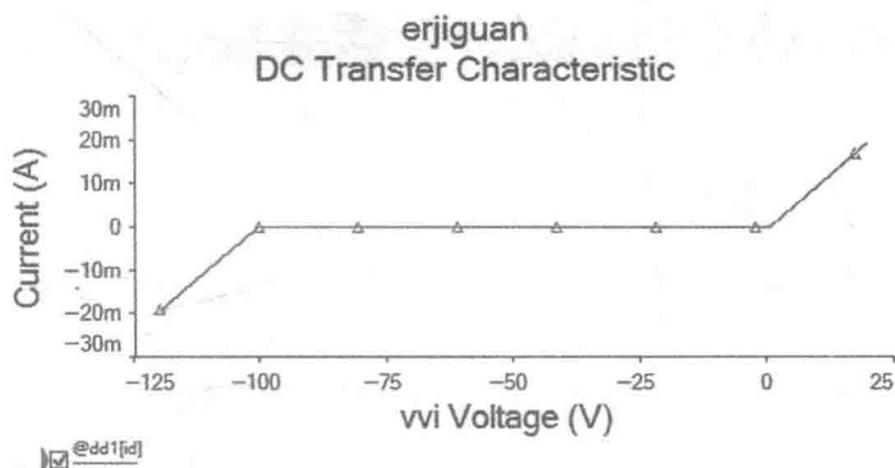


图 2-1-12 仿真二极管的 $V-I$ 特性曲线

(2) 在“Graph View”对话框中, 点击工具  保存仿真好的特性曲线。仿真曲线就保存在以“erjiguan.gra”为文件名的文件中。运行 NI Multisim 12 仿真软件, 点击“View\Grapher”, 可直接打开存有仿真结果的文件, 无需打开电路图, 就可以看到相应的仿真曲线。

3. 调整 X 轴和 Y 轴的坐标范围, 以便观察门坎电压值

在“Graph View”对话框中, 点击“Graph\Properties”; 或者点击鼠标右键选择“Properties”, 打开“Graph Properties”对话框, 对该对话框中的各选项卡进行如下的修改:

General 选项卡: Title 改为“二极管正向 $V-I$ 特性曲线”, 如图 2-1-13 所示。



图 2-1-13 “Graph Properties”对话框

Bottom axis 选项卡: 设置 X 轴范围, 在用户定义“Range”项中, 输入范围设置为 $0 \sim 2V$, 如图 2-1-14 所示。

Left axis 选项卡: 设置 Y 轴范围, 在用户定义“Range”项中, 输入范围设置为

-0.0001~0.001A, 如图 2-1-15 所示。

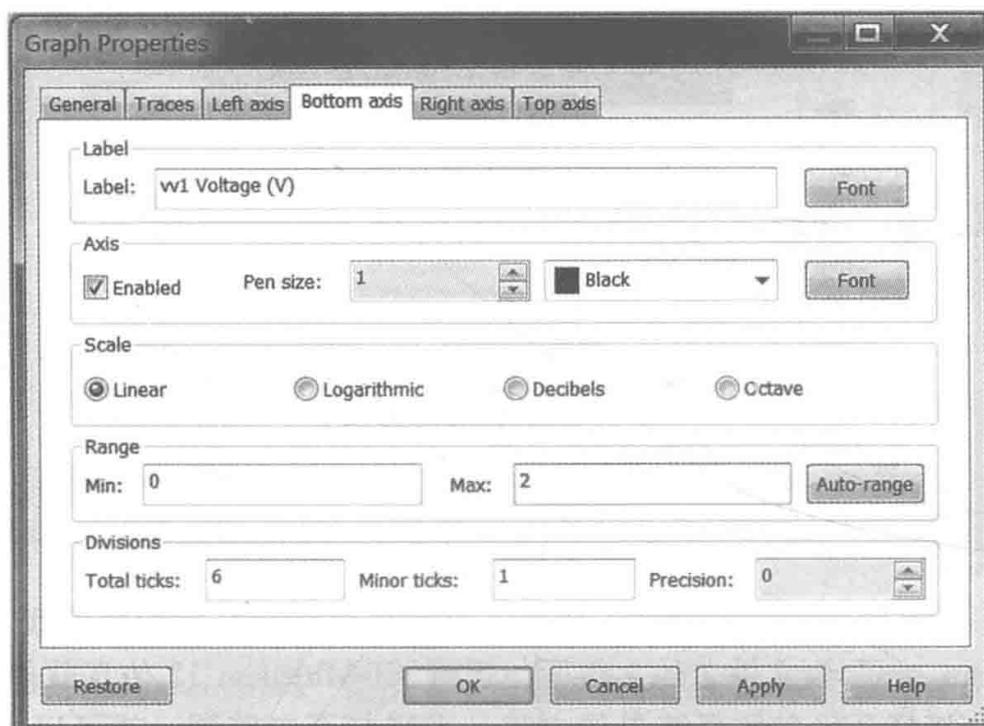


图 2-1-14 X 轴设置

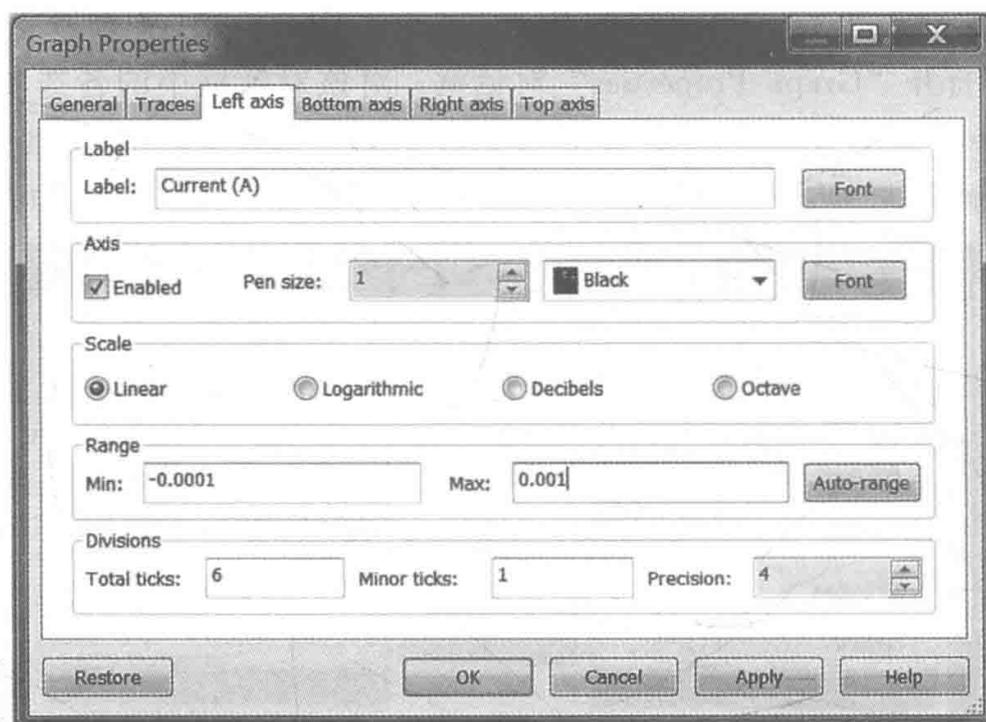
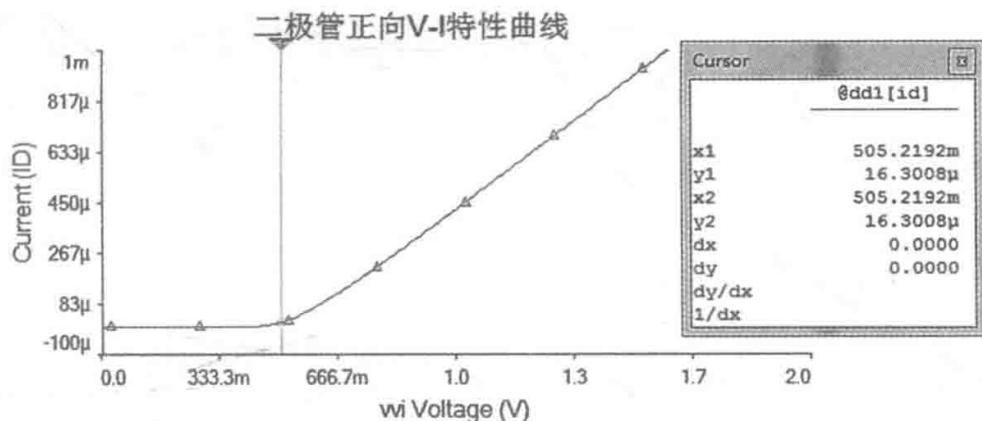


图 2-1-15 Y 轴设置

单击“OK”按钮即可得到二极管正向 $V-I$ 特性曲线, 如图 2-1-16 所示。

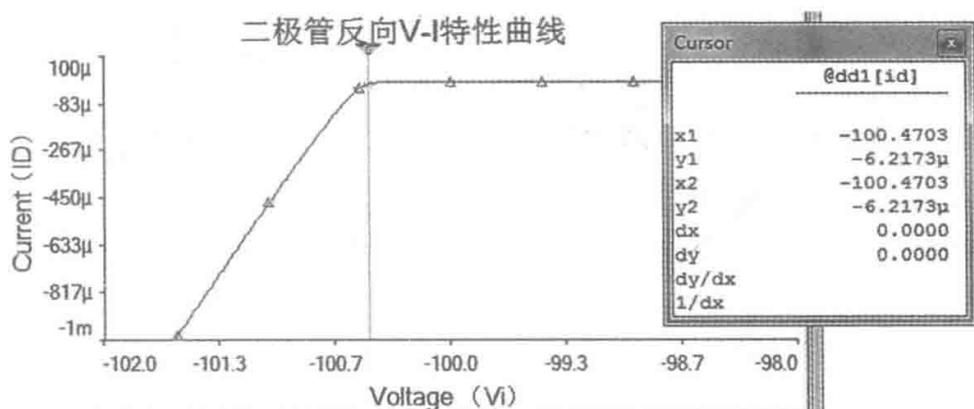
选择菜单项“View\Show\Hide Cursor”或单击工具栏上的图标, 激活游标, 在窗口右侧出现游标值显示窗, 如图 2-1-16 所示。图中, x_1 为 1 号红色游标当前横坐标值, y_1 为 1 号红色游标当前纵坐标值, x_2 为 2 号蓝色游标当前横坐标值, y_2 为 2 号蓝色游标当前纵坐标值, dx 为 x_1 与 x_2 的差值, dy 为 y_1 与 y_2 的差值。为了方便读取, 将 1 号红色、2 号蓝色游标重合即得到绿色游标。移动游标, 当 y_1 近似为 0 时, 从 x_1 显示的当前游标值可

图 2-1-16 二极管正向 $V-I$ 特性曲线

以读出门坎电压约为 0.505V 。

4. 调整 X 轴和 Y 轴的坐标范围, 以便观察雪崩电压值

重复步骤 3, 将 X 轴范围设置为 $-102 \sim -98\text{V}$, 将 Y 轴范围设置为 $-0.001 \sim 0.0001\text{A}$, 此时得到二极管反向 $V-I$ 特性曲线, 如图 2-1-17 所示。其雪崩电压约为 -100.47V 。

图 2-1-17 二极管反向 $V-I$ 特性曲线

(三) 采用虚拟示波器观察输入、输出波形

在原理图编辑区右边仪表工具栏中点击符号, 取出一台双踪模拟示波器 (虚拟示波器的使用方法与实际的双踪示波器的使用方法相同), 将电路的输入、输出端与示波器的两个通道相连。双击示波器图标, 打开示波器面板, 单击右上角仿真电源开关, 示波器即可显示波形。调整示波器 “Timebase” 和 “ChannelA” “ChannelB” 的 Scale (参见第四章第四节中示波器的使用), 在示波器屏幕上出现如图 2-1-18 所示的输入和输出两个波形 (上面的波形为输入波形, 下面的波形为输出波形)。为了区分输入和输出, 可以改变连接在示波器两个通道连线的颜色。

由示波器的显示波形可知, 该实验电路具有半波整流的功能。

七、注意事项

(1) 正确的电路连接顺序为: 电路界面设置 \rightarrow 选择并放置元件 \rightarrow 连接电路 \rightarrow 调整并修改电路 \rightarrow 放置仪器 \rightarrow 设置方法 \rightarrow 仿真 \rightarrow 记录结果。

(2) 指导学生养成正确的电路原理图连接的方法, 指出电路连接容易出错的地方 (如节点、接地、短路、断路等)。

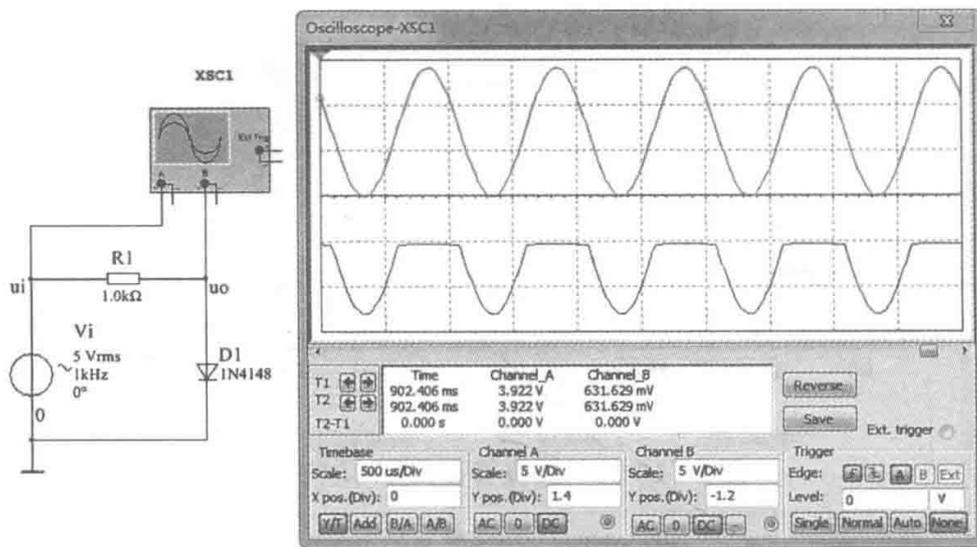


图 2-1-18 用示波器观察输入、输出波形

(3) 在设置某种分析方法时,一定要正确设置分析参数和输出变量,合理设置分析参数的扫描范围。

八、思考题

- (1) 如何改变元器件的模型参数和标号?
- (2) 如何显示电路节点,并修改电路节点?
- (3) 如何在分析方法中添加分析变量?
- (4) 如何调整“Grapher View”中曲线的 X、Y 轴数据范围,以便读取相关数据?

预 习 报 告

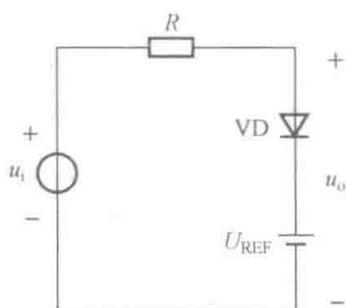
班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、二极管有什么特性？画出二极管 $V-I$ 特性曲线，标出二极管的开启电压 U_{on} （死区电压或门坎电压）和反向击穿电压 U_{BR} 的位置。

二、二极管的主要参数有_____、_____、_____、_____和_____。

三、二极管的等效模型有几种？画出二极管的理想模型、恒压降模型和折线模型。

四、如图所示电路，已知： $R=1k\Omega$ ， $U_{REF}=3V$ ，二极管的导通电压 $U_D=0.7V$ 。要求：画出在输入电压 $u_i=6\sin\omega t V$ 时，输出电压 u_o 的波形。



五、稳压二极管有什么特性？若想在电路中起到稳压作用，稳压管应如何连接？说明稳压管构成的并联型稳压电路中电阻 R 的作用，并画出稳压电路的示意图。

六、简单描述如何利用 NI Multisim 12 得到二极管的 $V-I$ 特性曲线。

实验日期：_____

实验二 三极管输出特性曲线的测试

一、实验目的

- (1) 进一步学习 NI Multisim 12 软件的使用方法。
- (2) 进一步学习元器件的选取及放置、电路的连接、电路中各元器件模型参数和标号的修改方法。
- (3) 进一步使用 NI Multisim 12 中直流扫描分析方法测试三极管的输出特性曲线。
- (4) 学会使用 NI Multisim 12 中的伏安特性测试仪。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习三极管的相关知识，熟悉三极管的输出特性曲线以及三极管的电流放大系数 β 和等效输出电阻 r_{ce} 的定义，认真完成预习报告的相关内容。
- (2) 阅读第四章 NI Multisim 12 直流扫描分析方法分析电路的一般步骤。
- (3) 阅读第四章 NI Multisim 12 关于伏安特性测试仪使用方法的介绍。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

三极管输出特性曲线测试实验电路如图 2-2-1 所示。试分析：(1) 画出三极管 2N2222 的输出特性曲线；(2) 测量三极管 2N2222 的电流放大系数 β 和等效输出电阻 r_{ce} 。

六、实验步骤

(一) 编辑原理图

1. 建立电路文件

启动 NI Multisim 12 程序，在 NI Multisim 12 基本界面上会打开一个空白的电路文件，系统自动命名为“Circuit1”。

2. 设计电路界面

选取“Options”选项中的“Sheet properties”，打开“Sheet Properties”对话框，或者在原理图编辑区点击鼠标右键，在弹出菜单中单击“Properties”；或者使用快捷键“Ctrl+M”，对 7 个选项中的若干功能选项进行相应设置，定义一个用户需要的原理图编辑区。电路界面设置同本章实验一。

3. 在原理图编辑区中放置元件

(1) 放置三极管。将鼠标指向元件工具栏的三极管符号  上，就会显示“Place Transistor”，点击鼠标左键即打开三极管库，如图 2-2-2 所示。

在 Family 系列点击 BJT - NPN  图标，弹出“Component”浏览窗口。在“Component”列表里拉动滚动条，找到“2N2222”，点击“OK”即选中。点击鼠标左键即可放置当前位置，原理图编辑区即放置了一个虚拟 NPN 型三极管 Q1。若需要，可用快捷键

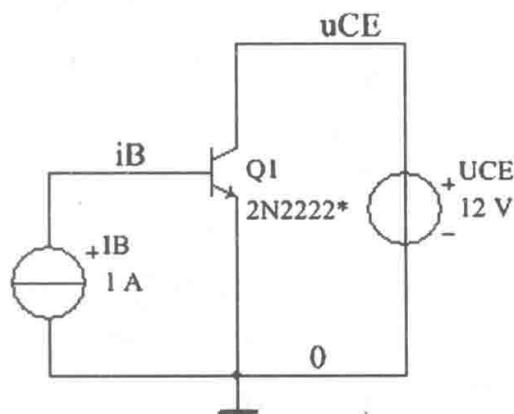


图 2-2-1 三极管输出特性曲线测试实验电路

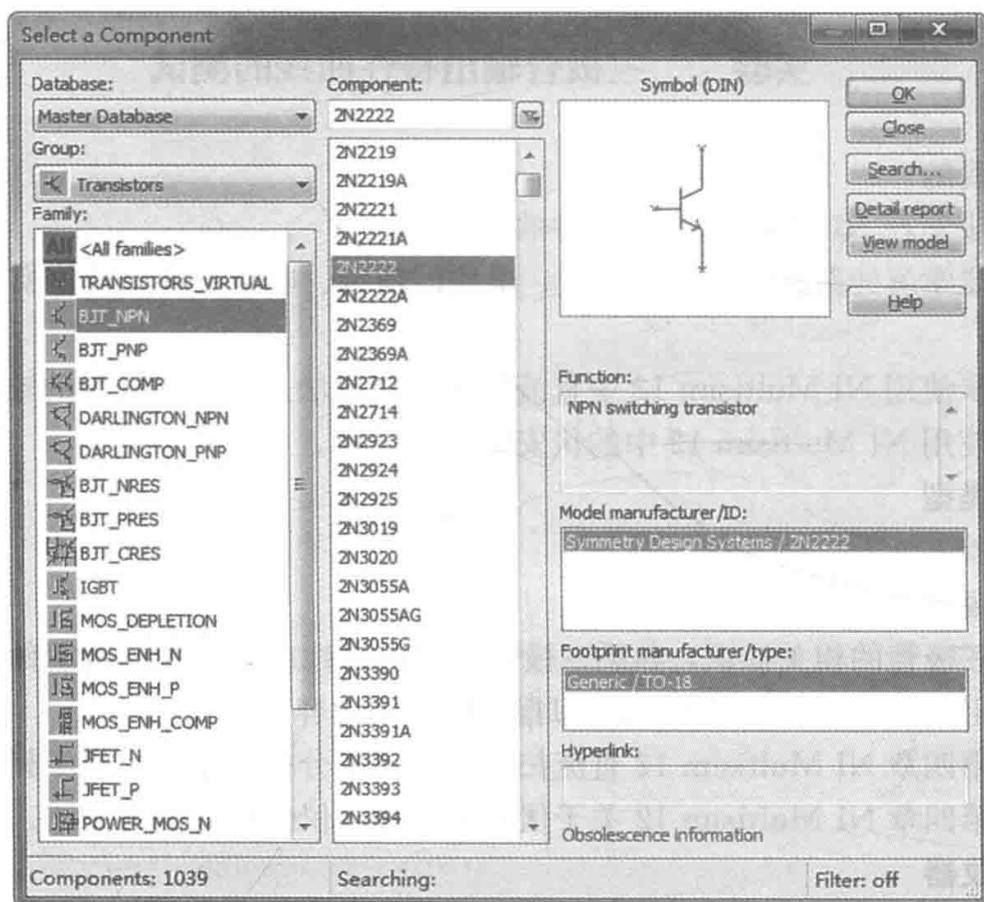


图 2-2-2 三极管选择对话框

“Ctrl+R”或“ALT+X”旋转或翻转符号(也可用菜单项“Edit”下面的选项来完成)。如果需要放置多个同类元器件,利用拷贝和粘贴就可以。

(2) 按照实验一中介绍的步骤,将直流电流源、接地端、直流电压源放置在原理图编辑区合适的位置上。

如果想删除不需要的元件,可用鼠标选中该元件(元件符号周围出现一个矩形虚框),然后选择菜单项“Edit\Delete”就可将元件删除(也可用键盘上的“Delete”键直接删除)。

4. 连接线路

将鼠标移到元件引脚端,鼠标箭头就会变成小黑点;单击鼠标左键,再将鼠标移到要连接的另一元件引脚端单击左键,则完成一根连线的连接。重复上述过程,画完所有连线(必须是端点连线,不能有重合的线段)。

5. 编辑修改电路中的元器件

(1) 修改元件的参考序号(Reference ID)。本实验中将直流电流源“ I_1 ”改为“ I_B ”,直流电压源“ V_1 ”改为“ U_{CE} ”。双击该元件的符号,出现相应的属性对话框,对“Label”选项卡上的“RefDes”进行修改即可。

(2) 修改电路的节点号。本实验中将直流电流源和三极管基极连线上的节点号改为“ i_B ”,将直流电压源和三极管集电极连线上的节点号改为“ u_{CE} ”。

(3) 修改三极管 2N2222 的模型参数。双击三极管“2N2222”符号,打开“BJ-TNPN”对话框,点击“Value”选项卡,如图 2-2-3 所示。点击“Editmodel”按钮,即出现“EditModel”对话框,如图 2-2-4 所示。该对话框包含了许多参数(三极管模型参数的含义参见附录 D),其中 BF 是三极管的电流放大系数,将其数值改为 100。点击“Change

component”按钮，回到“BJT - NPN”对话框；再点击“OK”按钮，完成对 2N2222 的 β 值的修改。此时，在 2N2222 的右上角出现一个“*”号（见图 2-2-1），表明对模型参数已进行了修改。

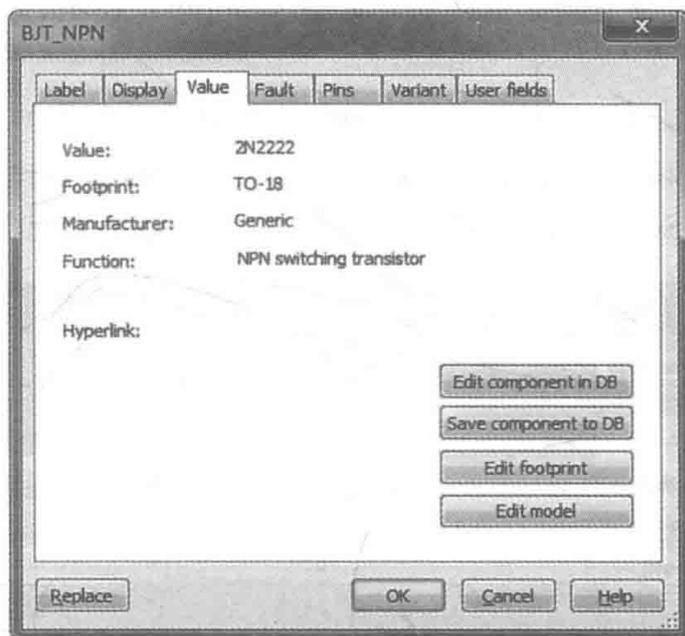


图 2-2-3 “BJT - NPN/Value”对话框

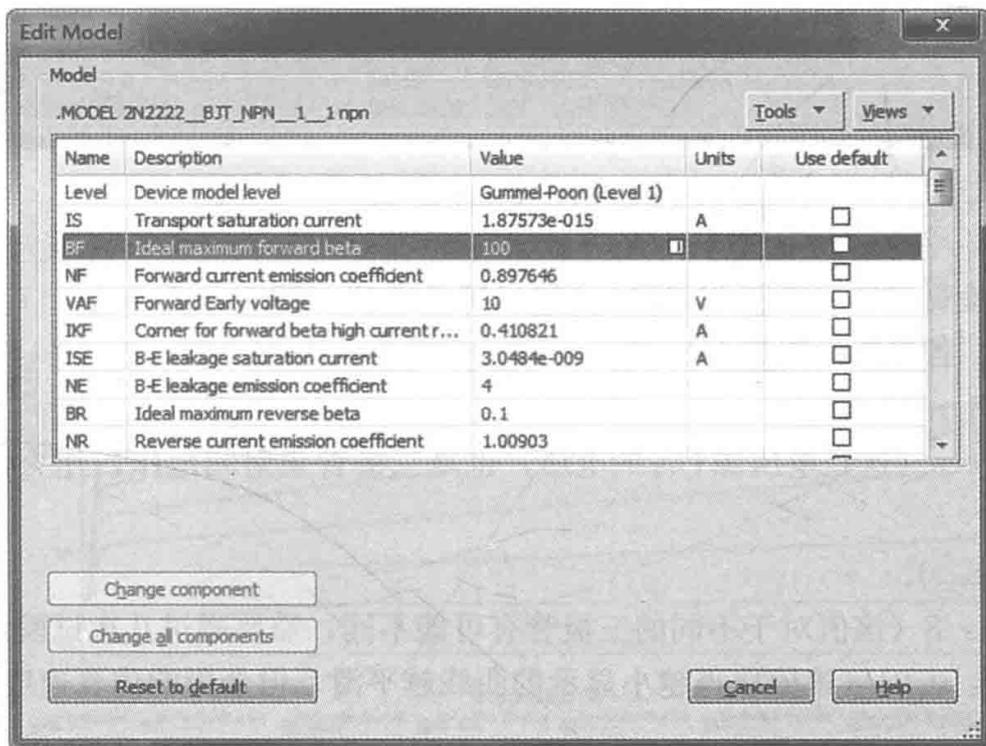


图 2-2-4 “Edit Model”对话框

如有需要，可以更改元件和连线的颜色。如想删除不需要的元件或连线，可用鼠标选中该元件或连线（元件符号或连线的 4 个角上各出现一个小黑方块），然后选择菜单项“Edit\Delete”即可。

6. 保存文件

(1) 选择菜单项“File\Save”，弹出保存文件对话框。

- (2) 选定保存文件的路径。
- (3) 在文件名编辑框中输入文件名, 如“sanjiguan”。
- (4) 单击“保存”按钮。

完成上述步骤后, 刚才绘制的电路图, 即以 sanjiguan.msm 为文件名的文件就保存在选定的路径中。

(二) 设置直流扫描分析 (DC Sweep Analysis) 仿真三极管的输出特性曲线和测试参数

(1) 选择菜单项“Simulate\Analysis\DC Sweep...”; 或者点击设计工具栏上的  按钮, 选中下拉菜单中的“DC Sweep...”, 即弹出如图 2-2-5 所示的“DC Sweep Analysis”对话框。

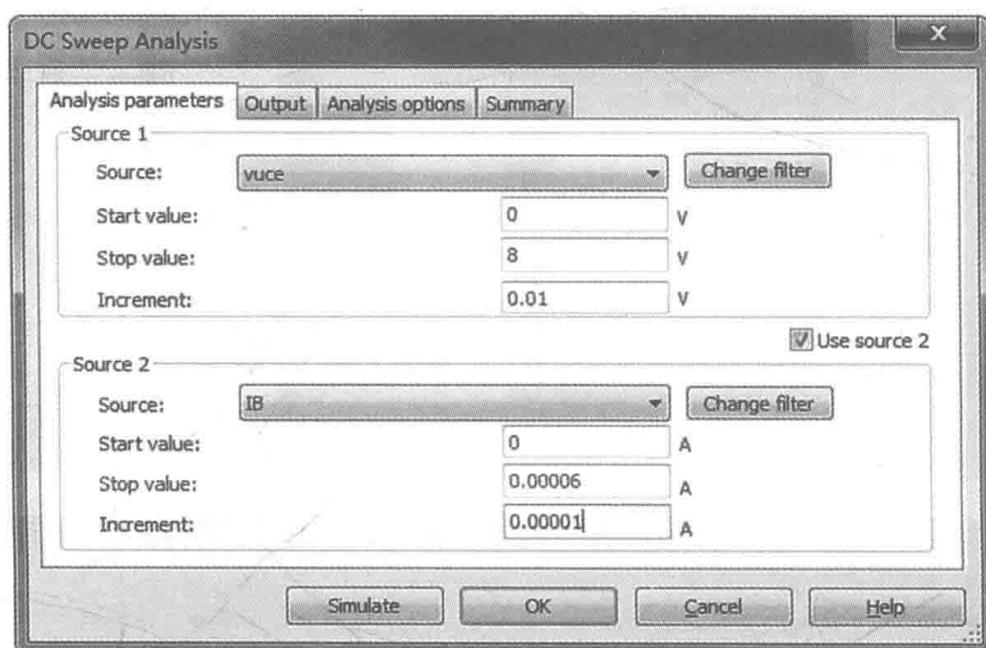


图 2-2-5 “DC Sweep Analysis”对话框

(2) 本实验要测试三极管 2N2222 的输出特性曲线, 即 $i_C = f(u_{CE}) |_{i_B=\text{常数}}$, 所以需要设置两个电源, 各参数设置如下:

1) Source1。

Source: vuce (这是电压源 U_{CE} 的电压, 也是三极管集射间电压, 作为输出特性曲线的横坐标)。

Start Value: 0。

Stop Value: 8 (该值对于不同的三极管有可能不同, 需要通过几次试验逐步调整)。

Increment: 0.01 (该值取得越小显示的曲线越平滑, 但会影响仿真速度)。

2) Source2。

Source: IB (这是电流源 IB 的电流, 也是三极管的基极电流)。

Start Value: 0

Stop Value: 0.00006 (该值对于不同的三极管也有可能不同, 也需要通过几次试验逐步调整)。

Increment: 0.00001 (该值也是取得越小显示的曲线越平滑, 但会影响仿真速度)。

(3) 点击“Output”, 出现如图 2-2-6 所示对话框。选择三极管电流“I (Q1 [IC])”作为输出变量, 点击“Add”按钮添加此变量到分析变量列表。

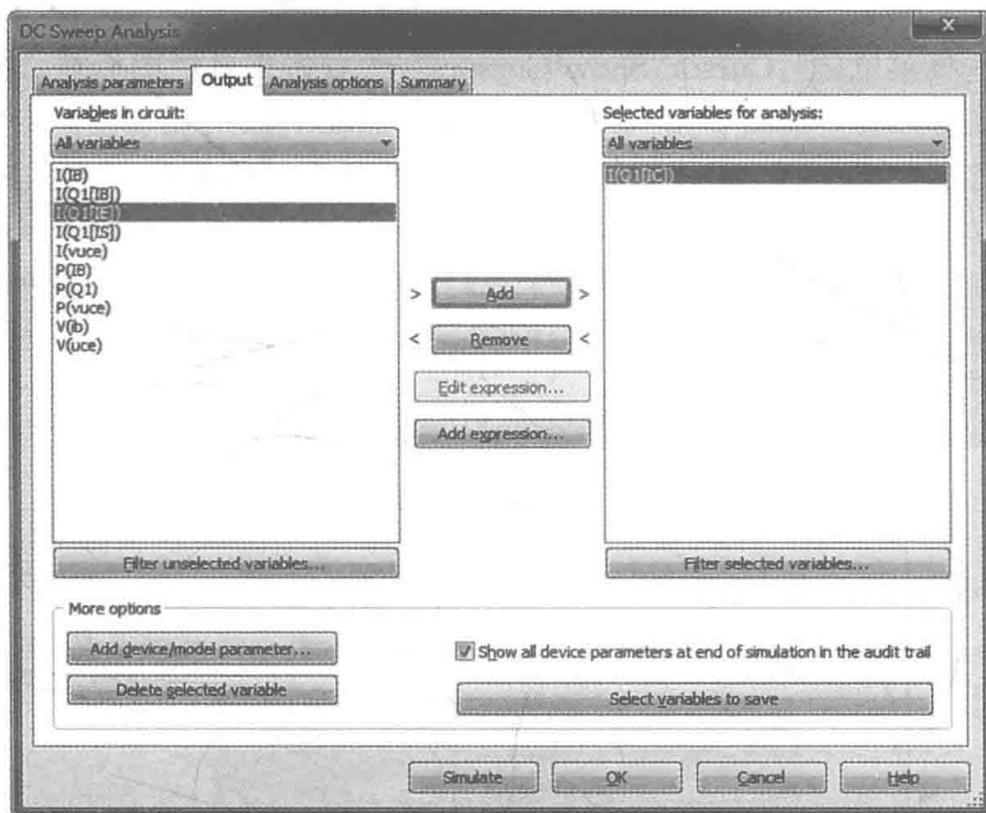


图 2-2-6 “Output” 设置对话框

(4) 仿真。

1) 单击“Simulate”进行仿真，弹出“Analysis Graphs”窗口，出现如图 2-2-7 所示的仿真曲线。

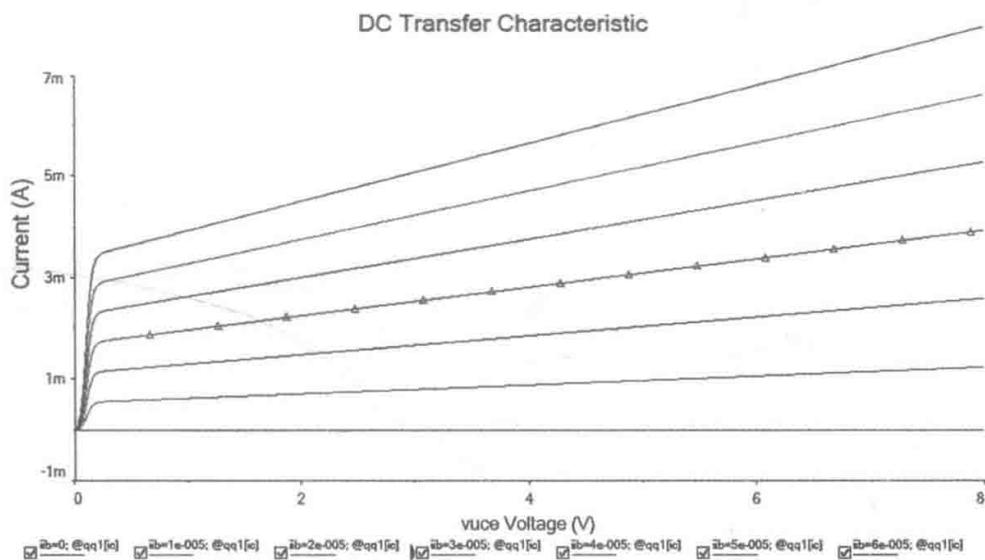
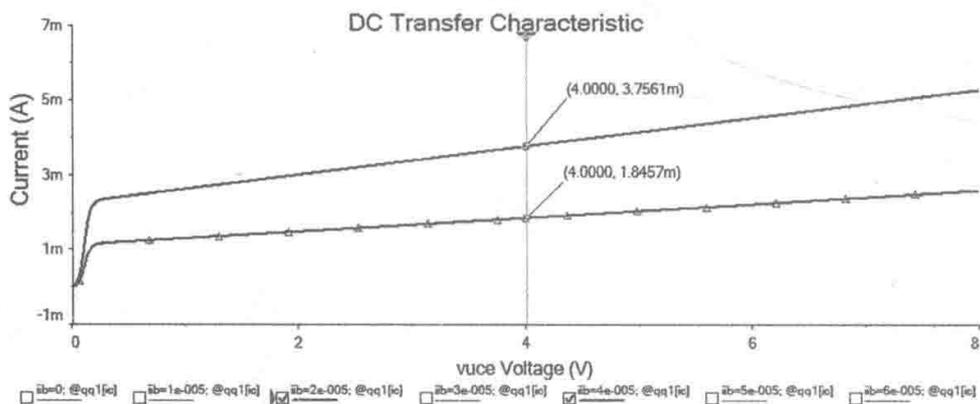


图 2-2-7 三极管的输出特性曲线

2) 在“Grapher View”窗口，保存仿真好的特性曲线。运行 Multisim 仿真软件，点击“View\Grapher”，可直接打开存有仿真结果的文件，无需打开电路图，就可以看到保存过的仿真曲线。

(5) 启用游标以便测量三极管 2N2222 的电流放大系数 β 和等效输出电阻 r_{ce} 。在“Legent”列表中选择“iib=2e-005”和“iib=4e-005”，在“Grapher View”中留下这两

条输出特性曲线。将鼠标移动到这两条曲线点击鼠标右键,选择“trace width”加粗曲线 (width=2),选择菜单项“Cursor\Show Cursors”或点击工具栏图标,激活游标,在窗口中出现游标值显示窗,如图 2-2-8 所示。将鼠标放在 1、2 号游标上点击鼠标右键,在弹出的菜单中选择“Set X value”,弹出“Set X value Crosshair _ 1 或 Set X value Crosshair _ 2”对话框,如图 2-2-9 所示,在“Value”中输入 4,点击“OK”按钮,1、2 号游标均被设置在 $u_{CE}=4V$ 的位置,点击工具栏图标,在游标与两条曲线相交的地方标记坐标值。可见,在 $i_B=20\mu A$ 时, $i_C=1.8457mA$; 在 $i_B=40\mu A$ 时, $i_C=3.7561mA$ 。由此可以计算出 $\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{3.7561 - 1.8457}{0.04 - 0.02} = 95.97$ 。



Cursor		
	$i_B=2e-005; @qq1[i_C]$	$i_B=4e-005; @qq1[i_C]$
x1	4.0000	4.0000
y1	1.8457m	3.7561m
x2	4.0000	4.0000
y2	1.8457m	3.7561m
dx	0.0000	0.0000
dy	0.0000	0.0000
dy/dx		
1/dx		

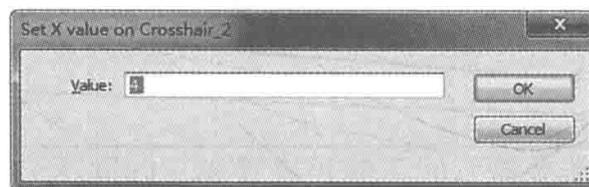
图 2-2-8 β 值的测量

图 2-2-9 “Set X value Crosshair _ 2”对话框

根据三极管等效输出电阻 r_{ce} 的定义,采取同样的办法测量并计算出三极管 2N2222 的等效输出电阻 r_{ce} 。

(三) 用伏安特性测试仪 (IV analyzer) 分析三极管的输出特性曲线和参数

在原理图编辑区界面右边仪表工具栏中点击符号,取出一台伏安特性测试仪 (IV analyzer),双击测试仪图标,打开 IV analyzer 仿真分析设置界面,即伏安特性测试仪的面板,如图 2-2-10 所示,从“Components”的选项列表中选择三极管“BJT-NPN”,关掉面板,将三极管的三个电极与伏安特性测试仪对应的接线端子相连。

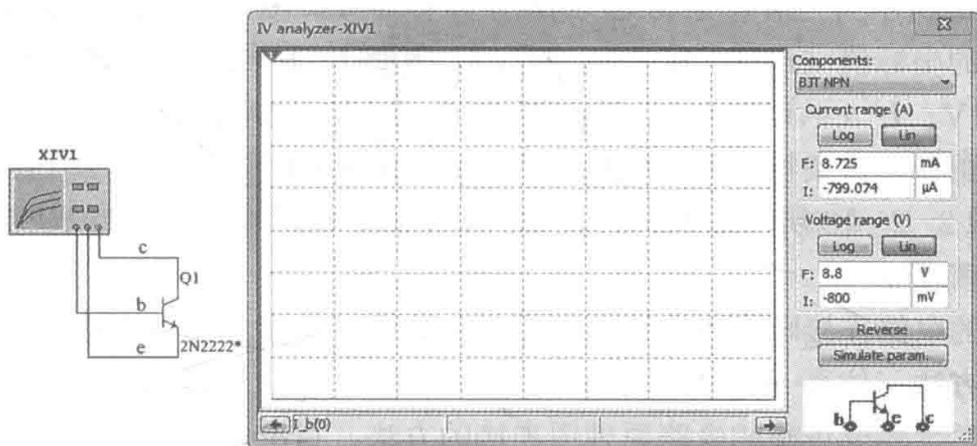


图 2-2-10 用 IV analyzer 测试三极管的输出特性曲线

再次双击 IV analyzer 图标  打开面板，单击“Simulate parameters”，进入如图 2-2-11 所示的仿真参数对话框进行设置。

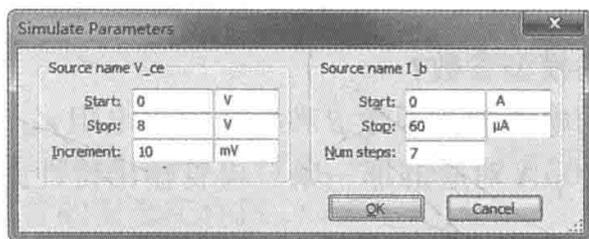


图 2-2-11 “Simulate Parameters”对话框

Source name V_{ce} 的设置：Start 起始值为 0V，Stop 终值为 8V，Increment 间隔为 10mV。

Source name I_b 的设置：Start 起始值为 0A，Stop 终值为 $60\mu\text{A}$ ，Numsteps 取值个数 7，即 $I_b = \{1, 10\mu\text{A}, 20\mu\text{A}, 30\mu\text{A}, 40\mu\text{A}, 50\mu\text{A}, 60\mu\text{A}\}$ 。

设置结束，点击“OK”按钮和运行按钮 ，仿真结果如图 2-2-12 所示。

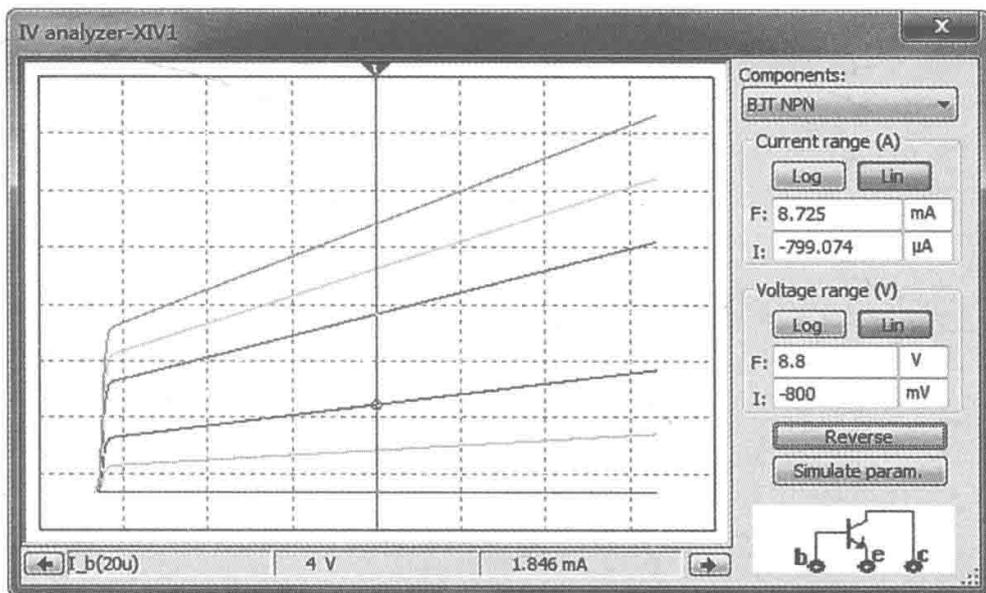


图 2-2-12 IV analyzer 仿真输出特性曲线

图 2-2-12 所示为三极管 2N2222 的输出特性曲线。图中界面的下方显示出游标与输出特性曲线交点的坐标值 (I_b , U_{ce} , I_c), 表明 $I_b=20\mu\text{A}$ 时输出特性曲线中游标位置为 $U_{ce}=4\text{V}$ 、 $I_c=1.846\mu\text{A}$ 。这与图 2-2-8 标记结果一致。用鼠标选中某一条输出特性曲线, 则游标与该条特性曲线相交, 可以显示相应的 I_b 值; 左右移动游标, 则不改变 I_b 值。图 2-2-12 所示界面的右方显示了仿真分析时电压和电流范围。

七、注意事项

(1) 正确的电路连接顺序为电路界面设置→选取并放置元件→连接电路→调整电路→放置仪器→设置方法→仿真→记录结果。

(2) 指导学生养成正确的电路原理图连接的方法, 指出电路连接容易出错的地方 (直流电压源和直流电流源的连接等)。

(3) 在设置某种分析方法时, 一定要正确设置分析参数和输出变量, 合理设置分析参数的扫描范围。

(4) 注意 VI-analyzer 分析仪的面板设置, 尤其是要注意 “Components” 选项的设置。

八、思考题

(1) 如何改变元器件的模型参数?

(2) 如何测量三极管的电流放大系数 β 和等效输出电阻 r_{ce} ?

(3) 如何仿真 $I_b=40\mu\text{A}$ 对应的那一条三极管输出特性曲线?

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

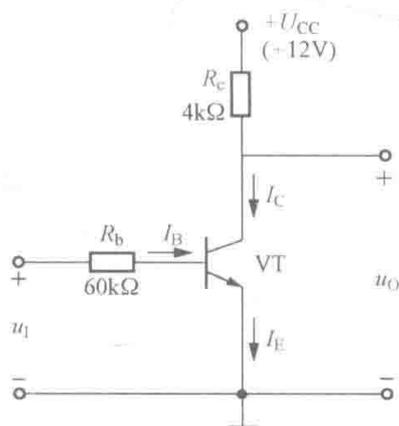
一、三极管按结构划分有几种？画出相应类型三极管的图形符号。

二、三极管有什么特性？其外部工作条件是什么？写出三极管的电流分配关系和共射极连接方式的电流控制关系表达式。

三、写出三极管输入特性和输出特性方程，画出输入特性曲线和输出特性曲线，并在输出特性曲线上定性标出三极管的安全工作区。

四、三极管的主要参数有 _____、_____、_____、_____、_____、_____、_____和_____。

五、如图所示电路，已知三极管的开启电压 $U_{BE(on)} = 0.6V$ ， $\beta = 50$ 。当输入电压 u_1 分别为 0、3、6V 时，判断三极管的工作状态，并计算输出电压 u_O 。



六、简单描述在 NI Multisim 12 中如何修改三极管的模型参数。

实验日期：_____

实验三 三极管基本共射放大电路的静态分析

一、实验目的

- (1) 进一步学习 NI Multisim 12 软件的使用方法。
- (2) 进一步学习如何改变元器件的模型参数。
- (3) 进一步学习 NI Multisim 12 中虚拟示波器的使用方法。
- (4) 学会使用 NI Multisim 12 中参数扫描分析方法和直流工作点分析方法。
- (5) 学习 NI Multisim 12 中电压表、电流表和测量探针的使用方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

- (1) 复习三极管基本共射放大电路的组成和工作原理，认真完成预习报告的相关内容。
- (2) 阅读第四章中 NI Multisim 12 参数扫描和直流工作点的分析方法分析电路的一般步骤。
- (3) 阅读第四章中 NI Multisim 12 电压表、电流表、测量探针的使用方法。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

三极管基本共射放大电路实验电路图如图 2-3-1 所示。

设三极管 2N2222 的 $\beta=100$ ，试分析：

(1) 研究可变电阻 R7 对静态工作点的影响；

(2) 分析三极管基本共射放大电路的静态工作点，研究三极管电流放大系数 β 变化对静态工作点的影响；

(3) 研究静态工作点对放大电路输出波形的影响。

六、实验步骤

1. 编辑原理图

依据图 2-3-1 利用 NI Multisim 12 画电路原理图，步骤如下：

(1) 按照本章实验一和实验二介绍的方法选择并放置三极管、电阻、电容、直流电压源、交流信号源以及接地端，按图 2-3-1 所示电路及要求修改各元器件参数。

(2) 放置电位器。在基本元件库中点击电位器箱  按钮，如图 2-3-2 所示。在“Component”列表中选择“20k”电位器，与电阻一样将其选放在原理与编辑区的适当位置。电位器 (Potentiometer) 是一个三端元件。

电位器旁标注的文字“Key=A”，表明按动键盘上的 A 键，电位器的阻值按 5% 的速度

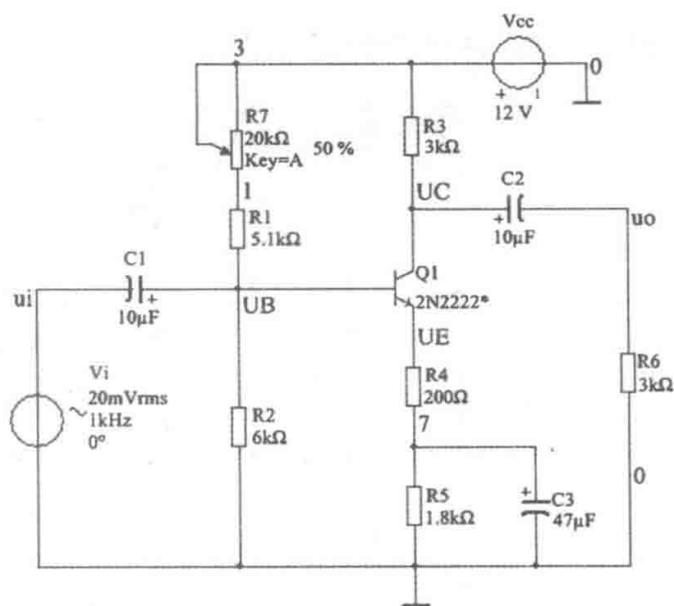


图 2-3-1 三极管基本共射放大电路

增加；若按动“shift+A”键，电位器的阻值将按5%的速度减小。电位器变动的数值大小直接以百分比的形式显示在一旁，默认值为50%。

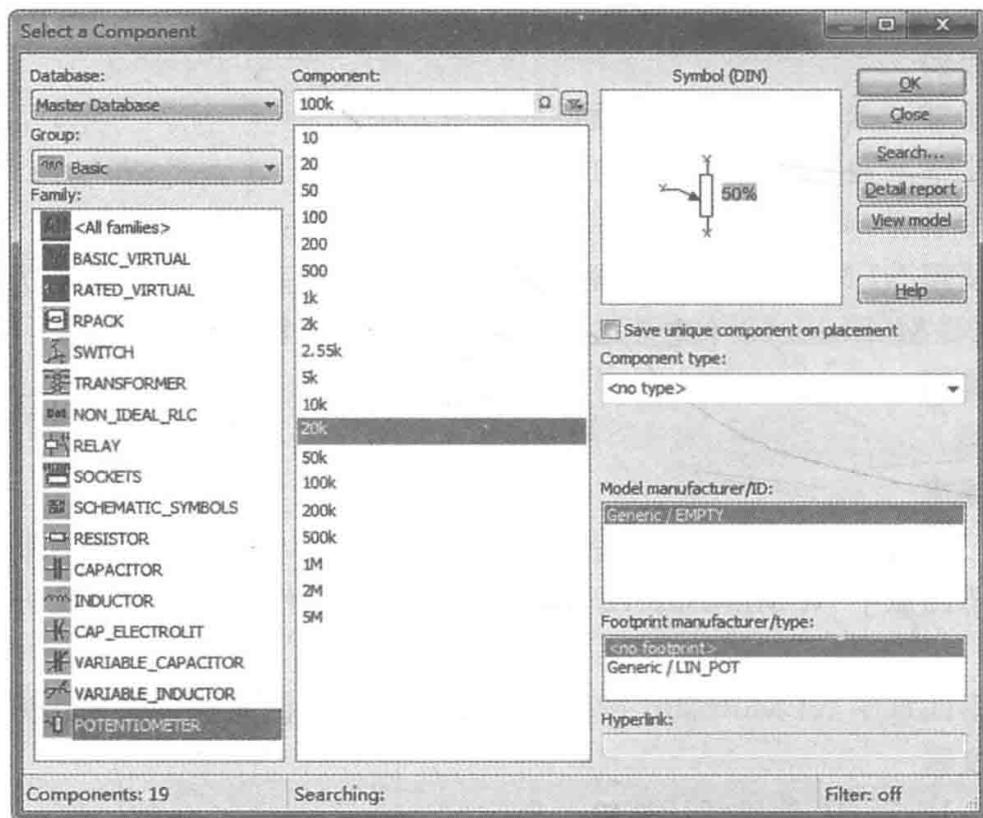


图 2-3-2 电位器选择对话框

双击电位器图标，出现如图 2-3-3 所示的“Potentiometer”对话框，将“Increment”修改为1%，即电位器变动的速度设置为1%。

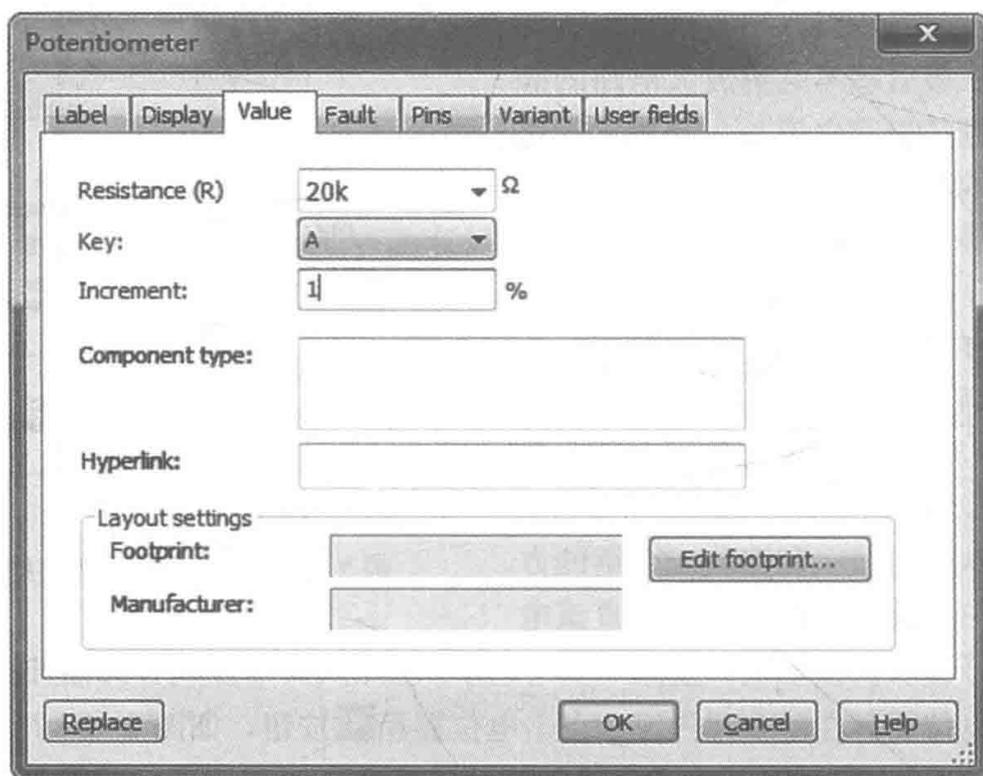


图 2-3-3 “Potentiometer”对话框

(3) 修改节点号并保存文件。

按图 2-3-1 标识的节点号进行修改, 并保存文件。

2. 参数扫描分析 (Parameter Sweep Analysis)

通过参数扫描分析研究电路参数 ($R1+R7$) 和 $R3$ 变化时对 β 的影响, 以确定最佳电路参数。

(1) 修改电路。将电路中的 $20\text{k}\Omega$ 的电位器 $R7$ 和 $5.1\text{k}\Omega$ 电阻 $R1$ 合并为一个 $25.1\text{k}\Omega$ 的电阻 $R1$ 。

(2) 选择菜单项 “Simulate\Analysis\Parameter Sweep Analysis”, 打开 “Parameter Sweep” 对话框。其中, “Analysis parameters” 页参数设置如图 2-3-4 所示。选择 $R1$ 为要扫描的器件, 开始扫描值为 $1\text{k}\Omega$, 停止扫描值为 $25.1\text{k}\Omega$, 扫描点数为 26, 可得扫描增量为 964Ω (程序按照扫描点数自动计算出来); 设置 “Sweep variation type” 选项为 “Linear”; “More Options\Analysis to sweep” 选项为 “DC Operating Point”; 其他选项如图 2-3-4 所示。

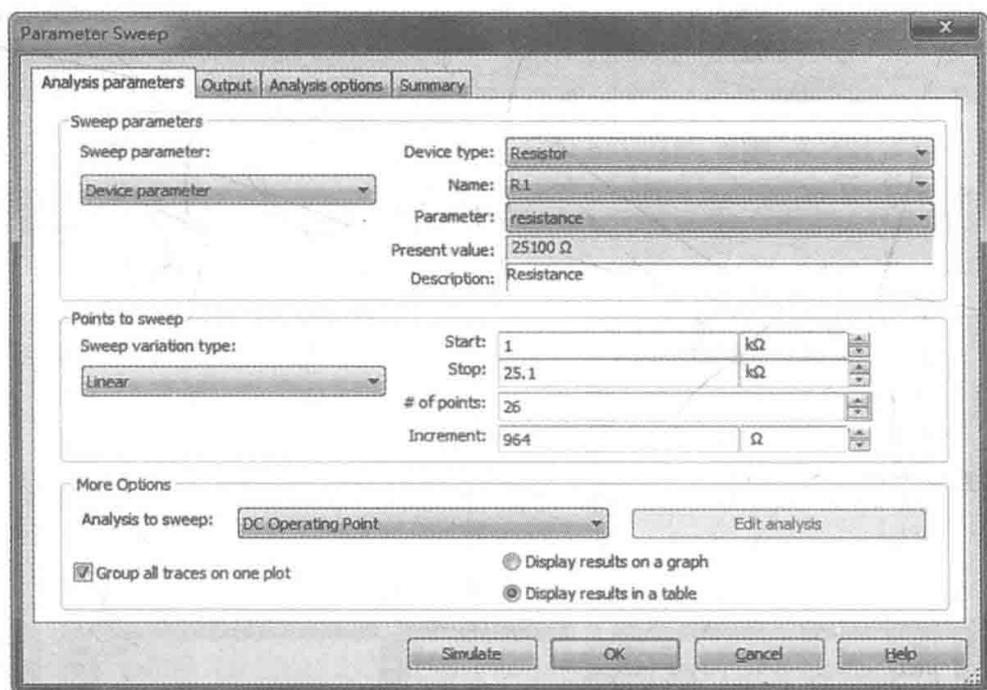


图 2-3-4 “Parameter Sweep” 对话框

(3) 点击 “Output” 选项卡, 点击 “Add expression...” 按钮, 出现 “Analysis Expression” 对话框, 在 “Expression” 中输入表达式 “@qq1 [ic] /@qq1 [ib]”, 即电流放大系数 β , 如图 2-3-5 所示。点击图 2-3-5 中 “OK” 按钮, 将 @qq1 [ic] /@qq1 [ib] 添加到分析变量列表, 如图 2-3-6 所示。单击图 2-3-6 中 “Simulate” 仿真按钮, 出现如图 2-3-7 (a) 所示的参数扫描分析结果。可见, 在其他在其他参数不变的情况下, $R1$ 增大时 β 变大, $R1$ 减小时 β 变小, 当 $R1$ 为 $15\text{k}\Omega$ 时 β 值与三极管 2N2222 的模型参数 BF 接近, 所以电位器 $R7$ 的百分数设为 49% 可以得到最合适的静态工作点。

(4) 按照同样的方法研究 $R3$ 对 β 的影响。由图 2-3-7 (b) 可知, 放大电路集电极负载电阻 $R3$ 的阻值为 $3\text{k}\Omega$ 可以得到最合适的静态工作点。

3. 进行直流工作点分析 (DC Operating Point Analysis), 测量放大电路的静态工作点

由上述分析可知, 电位器 $R7$ 的百分数设为 49% 可以得到最合适的静态工作点, 所以修改电路 $R7$ 的百分数为 49%。

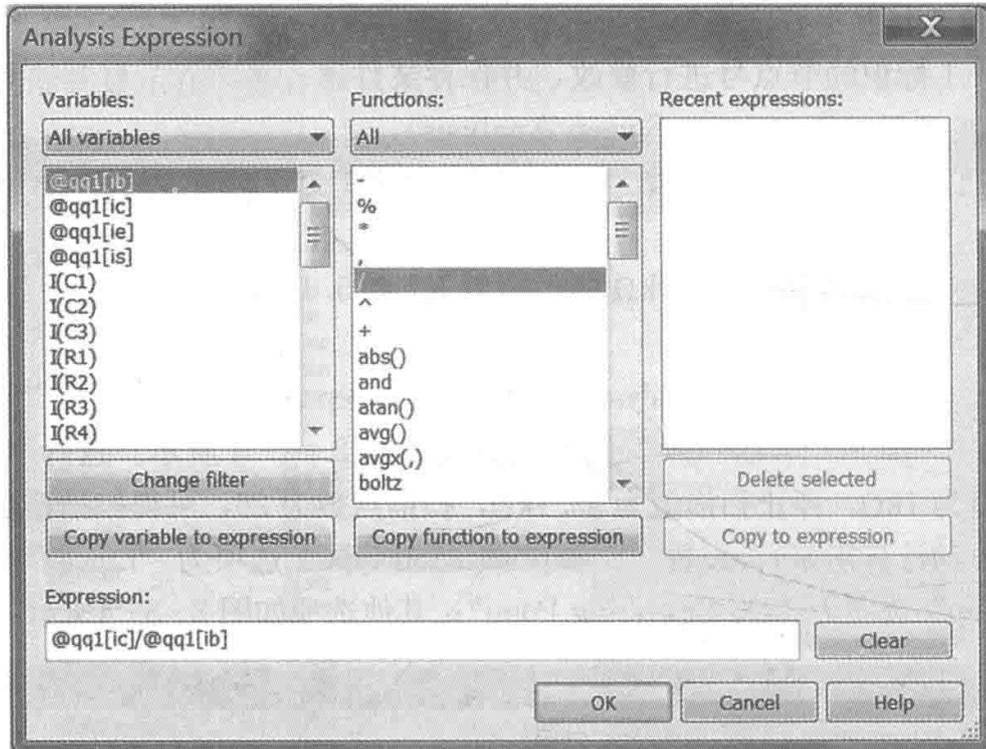


图 2-3-5 “Analysis Expression” 对话框

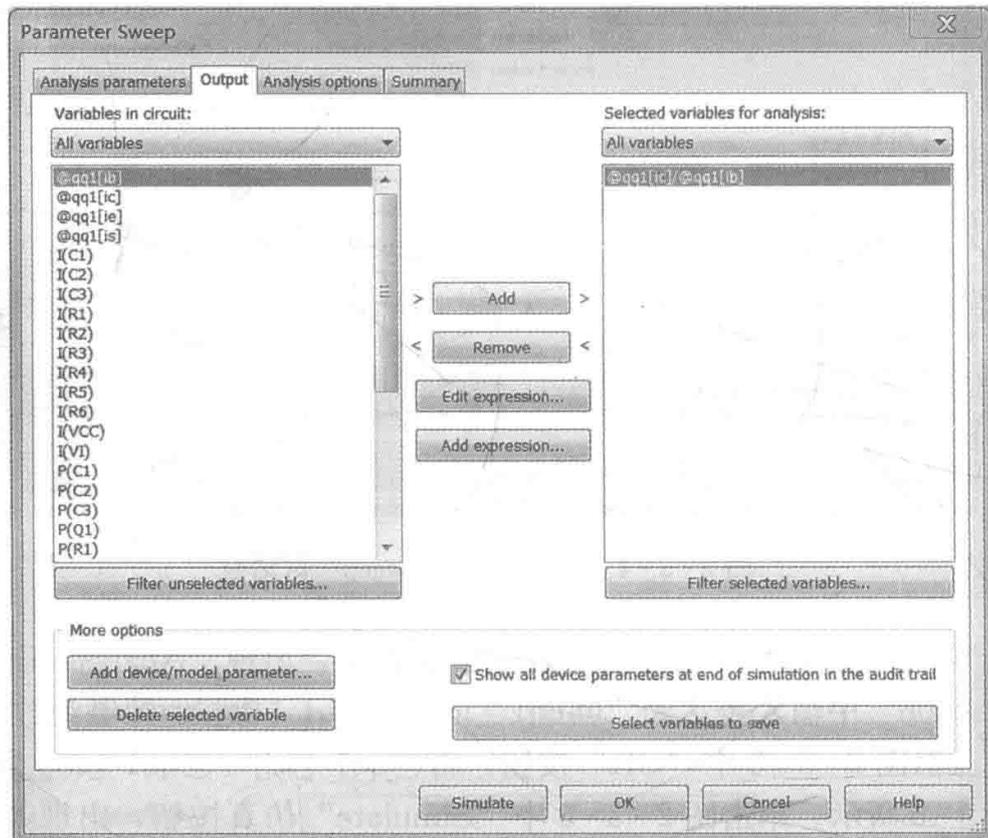


图 2-3-6 “Output” 设置对话框

(1) 选择菜单项“Simulate\Analysis\DC Operating Point Analysis”，打开“DC Operating point Analysis”对话框，选中静态工作点相关的变量“I(Q1 [IB])和I(Q1 [IC])”，点击“Add”按钮，添加到分析变量列表中；点击“Add expression...”按钮，在“Expression”中输入表达式“ $V(ub) - V(uc)$ ”，点击“OK”按钮，添加表达式“ $V(ub) - V(uc)$ ”到分析变量列表中，按照同样的办法添加表达式“ $V(ub) - V(ue)$ ”“ $V(uc) - V(ue)$ ”，如图 2-3-8 所示。

1	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=1000	644.69498 m
2	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=2000	1.58041
3	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=3000	2.58109
4	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=4000	4.48369
5	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=5000	8.11305
6	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=6000	16.91059
7	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=7000	58.13023
8	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=8000	66.79193
9	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=9000	74.04003
10	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=10000	80.26753
11	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=11000	85.64886
12	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=12000	90.32486
13	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=13000	94.38947
14	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=14000	97.94054
15	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=15000	101.05016
16	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=16000	103.77913
17	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=17000	106.17760
18	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=18000	108.22838
19	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=19000	110.06904
20	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=20000	111.68358
21	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=21000	113.09728
22	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=22000	114.33180
23	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=23000	115.40579
24	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=24000	116.33539
25	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr1 resistance=25000	117.13463

(a)

1	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr3 resistance=1000	123.13414
2	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr3 resistance=2000	111.98758
3	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr3 resistance=3000	100.75723
4	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr3 resistance=4000	89.44825
5	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr3 resistance=5000	78.20267
6	@qq1[ic]/@qq1[ib], rr3 resistance=6000	66.98300

(b)

图 2-3-7 参数扫描分析结果

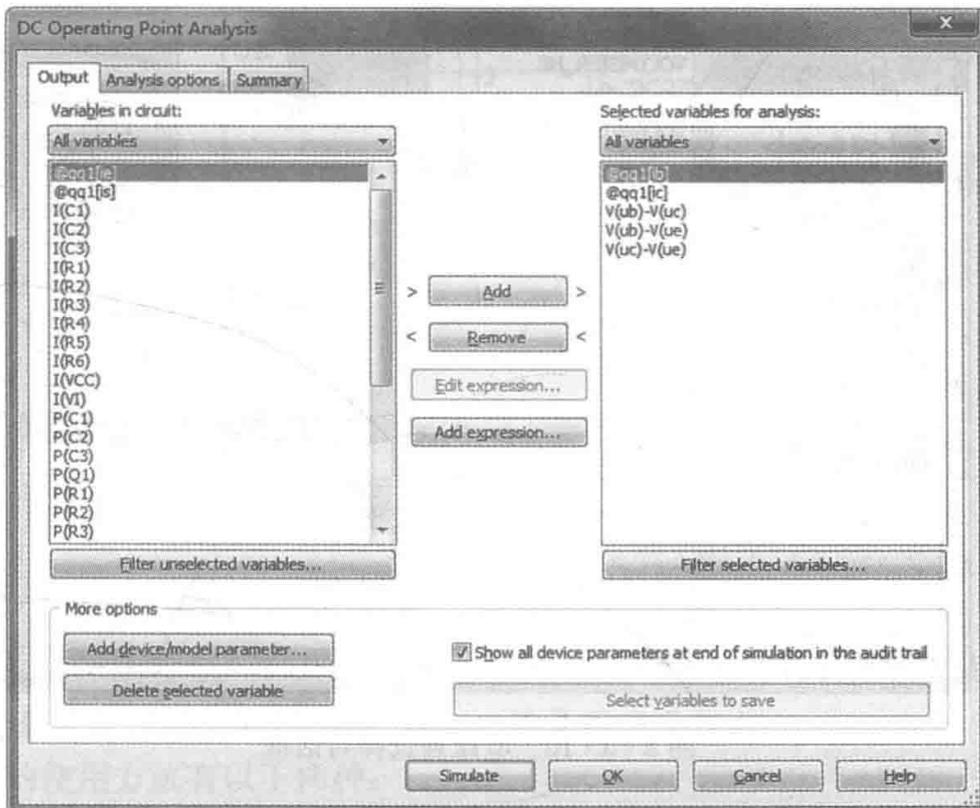
(a) R1 的变化对 β 的影响; (b) R3 的变化对 β 的影响

图 2-3-8 “DC Operating Point Analysis” 对话框

(2) 设置好输出变量后, 点击“Simulate”仿真按钮, 显示结果如图 2-3-9 所示。

DC Operating Point

DC Operating Point		
1	@qq1[ic]	1.36909 m
2	@qq1[ib]	13.58801 u
3	V(ub)-V(ue)	631.83946 m
4	V(uc)-V(ue)	5.15260
5	V(ub)-V(uc)	-4.52076

图 2-3-9 $R_7=9.8\text{k}\Omega$ 、 $\beta=100$ 时的直流工作点仿真结果

分析仿真结果为：三极管 2N2222 的发射结电压 $U_{BE}=0.63184\text{V}$ ，正向偏置；集电结电压 $U_{BC}=-4.52076\text{V}$ ，反向偏置；基极电流 $i_b=13.58801\mu\text{A}$ ，集电极电流 $i_c=1.36909\text{mA}$ 。由此可知， $\beta=100.75$ ，说明三极管处于放大状态，静态工作点合适，电路能正常工作。

(3) 设置三极管电流放大系数 $\beta=150$ ，重复上述过程，自行研究 β 值变化对静态工作点是否有影响。

4. 采用直流电压表和直流电流表测量电路的静态工作点

将鼠标指向元件工具栏的指示部件符号上，就会显示“Select a Component”对话框，在“Family”列表中点击 VOLTMETER，即在“Component”列表中显示四种电压表，如图 2-3-10 所示。

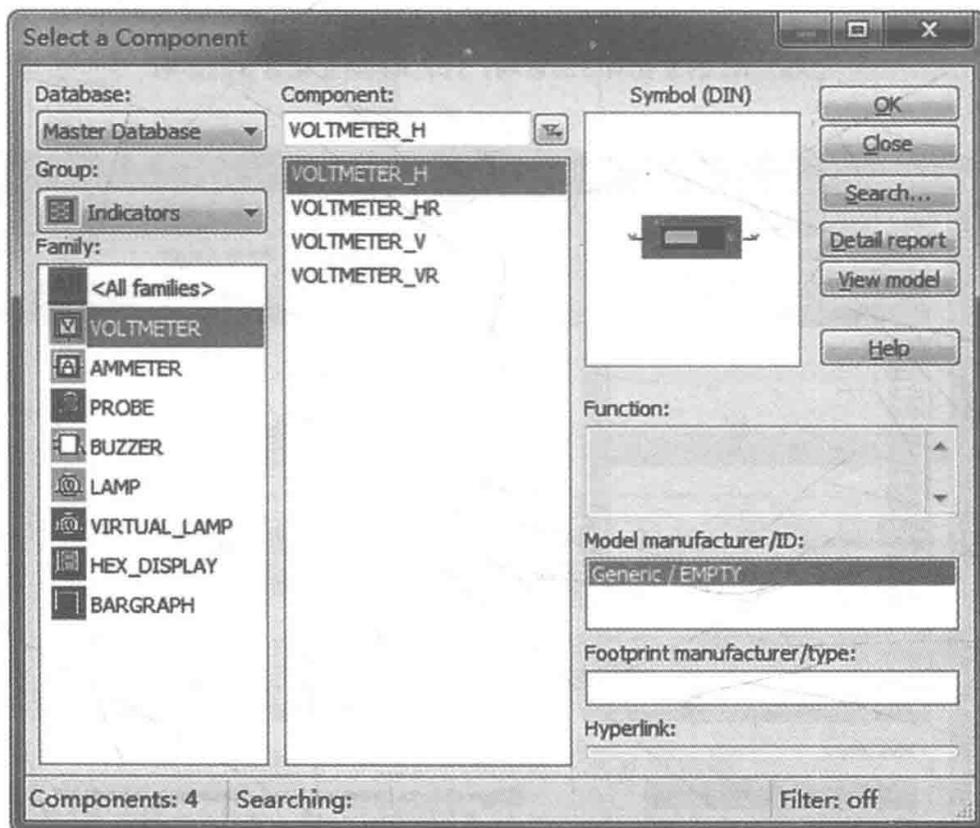


图 2-3-10 电压表选择对话框

根据电路的需要，选出三块电压表和两块电流表。双击电压表图标，得到如图 2-3-11 所示的电压表参数设置对话框，将电压表设置为 DC，然后将电压表分别并联在三极管的基极和发射极之间、基极和集电极之间以及集电极和发射极之间。采用同样方法设置电流表为

DC 方式，将电流表串联在三极管的基极和集电极电阻与三极管的集电极之间，单击电路窗口右上角的仿真开关，在各个表上就会显示出放大电路静态工作电压和静态工作电流，如图 2-3-12 所示。

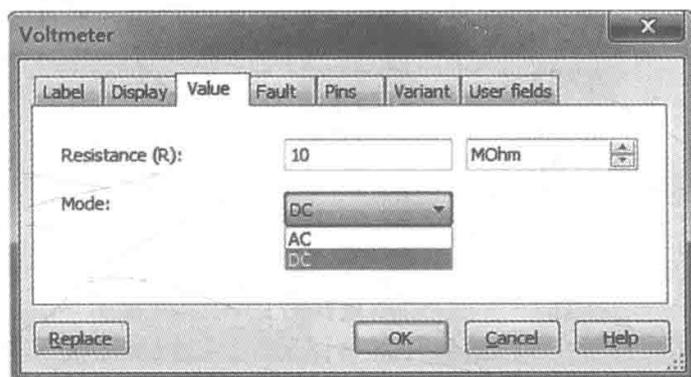


图 2-3-11 电压表参数设置对话框

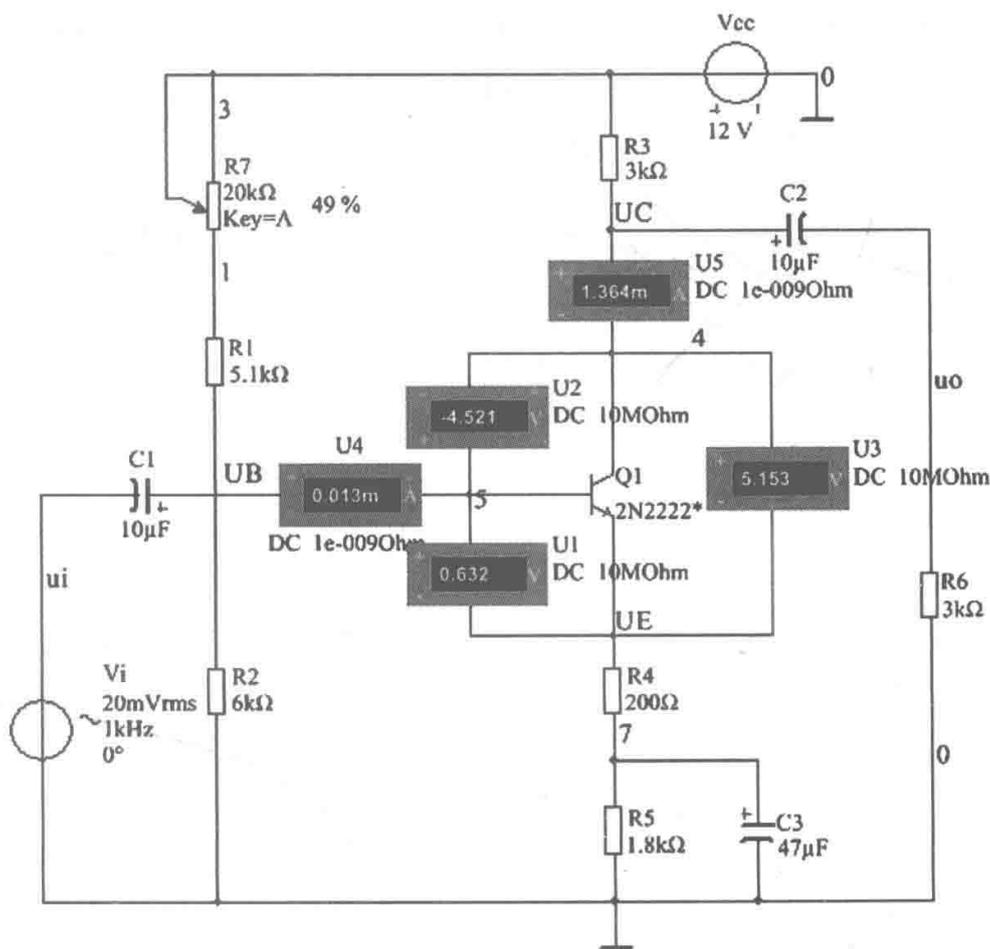


图 2-3-12 用直流电压表和直流电流表测量静态工作点

由电压表和电流表的示数可知，测量结果与直流工作点分析法的分析结果相近。

5. 采用测量探针 (Measurement Probe) 测量静态工作点

测量探针的使用方法有以下两种：

(1) 动态测试。在电路仿真过程中，将测量探针放在测试点上，会自动显示该点的电信号信息（电压和频率）。

(2) 放置测试。在电路仿真前或仿真过程中，将多个测量探针放在测试位置上，这样可

以同时显示多个节点的电信号特征 (电压、电流和频率)。

测量探针的图标、动态测试和放置测试显示如图 2-3-13 所示。

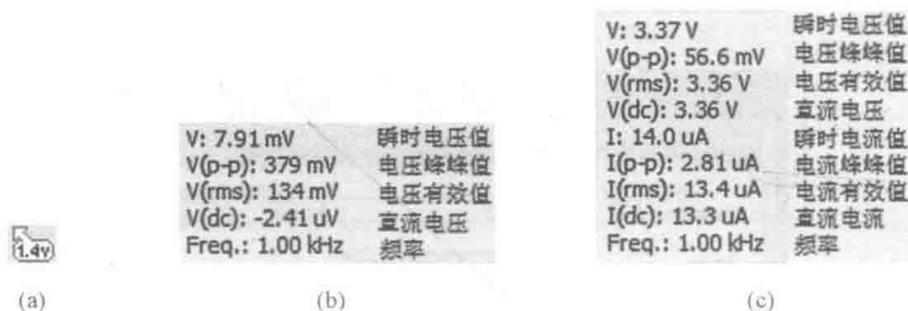


图 2-3-13 测量探针的图标及显示

(a) 图标; (b) 动态测试的显示及含义; (c) 放置测试的显示及含义

单击仿真开关 , 将仪表工具栏中的测量探针放在所要测试的节点处, 如图 2-3-14 所示, 进行电路分析。此时电路各个测试点的测量探针显示直流量的数值 (加黑框表示) 即为放大电路的静态工作点。

由图 2-3-14 可知, 三极管放大电路的静态工作点 $I_B = 13.6 \mu\text{A}$ 、 $I_C = 1.36 \text{mA}$ 、 $U_{BE} = 0.63 \text{V}$ 、 $U_{CE} = 5.15 \text{V}$, 测量结果与前两种方法测量结果一致。

6. 采用示波器观察静态工作点的变化对输出波形的影响

点击仪表工具栏中的符号 , 取出一台示波器, 将信号源和放大电路的输出分别连接在示波器的两个通道上。打开仿真开关 , 双击示波器图标 , 打开示波器面板, 调节合适的频率和幅值, 在示波器屏幕上出现如图 2-3-15 所示的输入和输出两个波形。为了区分输入和输出, 可以改变连接在示波器两个通道连线的颜色, A 通道为红色, B 通道为蓝色。

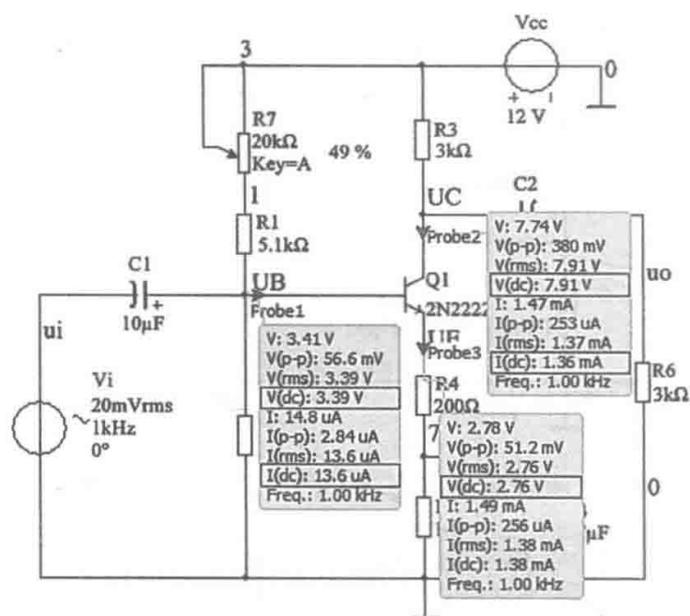


图 2-3-14 用测量探针测量静态工作点

改变电位器 R7 的百分比, 当 R7 减小到一定值时, 会出现 2-3-15 (a) 所示的饱和失真现象; 当 R7 增大到一定数值时, 会出现 2-3-15 (b) 所示的截止失真现象。由此可以说明, R7 阻值的变化会改变静态工作点的位置, 当静态工作点靠近饱和区时, 输出会出现饱和失真; 当静态工作点靠近截止区时, 输出会出现截止失真。

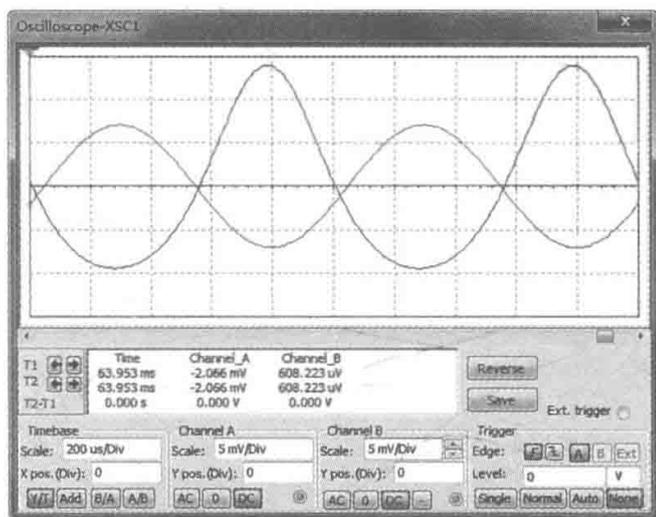
七、注意事项

(1) 本实验电路所用的元器件比较多, 要合理放置各元件, 连接电路时注意不要有遗漏。

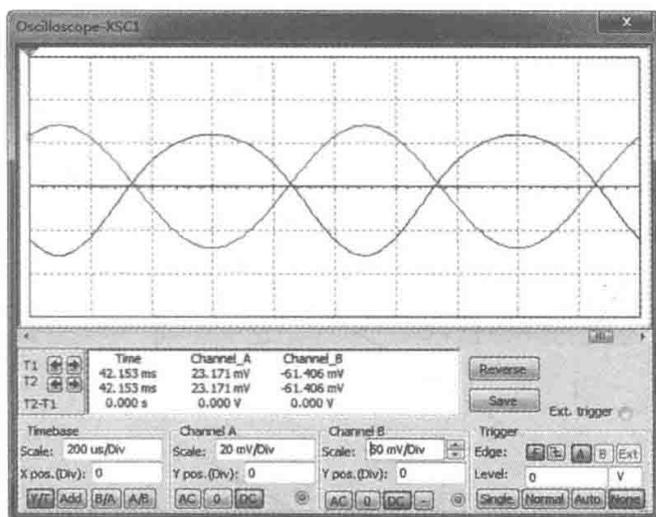
(2) 电路中使用两个电解电容, 连接时注意电容的极性。

(3) 本实验所采用的分析方法比较多, 注意每一种分析方法的设置和使用。

(4) 在使用电压表和电流表时, 要注意合理的设置直、交流属性, 并合理连接在电



(a)



(b)

图 2-3-15 用示波器观察输出波形的饱和失真和截止失真

(a) R_7 减小出现饱和失真; (b) R_7 增大出现截止失真

路中。

八、思考题

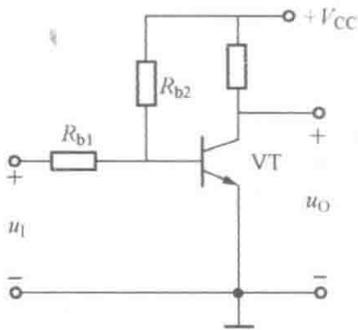
- (1) 如何从静态工作点的分析结果中判断放大电路的静态工作点是否合适?
- (2) 如果增大 R_1 的阻值, 静态工作点 Q 会有什么变化? 如果此时加入一定幅值的输入信号源 u_i , 放大电路的输出 u_o 会有什么现象?
- (3) 说明静态工作点对放大电路的影响? 哪些电路参数对静态工作点有影响?

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、什么是放大电路？放大电路的组成原则有哪些？在基本共射放大电路中，每个元器件的作用是什么？

二、放大电路为什么要设置静态工作点？写出如图所示直接耦合共射极放大电路静态工作点的表达式。



三、如图 2-3-1 所示放大电路，假设三极管的 $\beta=100$ ， $U_{BE}=0.7\text{V}$ ， $r_{bb'}=200\Omega$ 。试利用 NI Multisim 12 分析：

- (1) 画出放大电路的直流通路，估算静态工作点 Q ；
- (2) 假设电位器 R_7 的阻值增大到 $20\text{k}\Omega$ ，分析电路的输出会出现什么现象，属于哪种失真。采用作图的方式，利用输出特性曲线，定性画出此种失真波形。

实验日期：_____

实验四 三极管基本共射放大电路的动态分析

一、实验目的

(1) 学会使用 NI Multisim 12 中直流工作点分析方法、瞬态分析方法以及交流分析方法分析单级共射放大电路各项性能指标。

(2) 学习在 NI Multisim 12 中使用万用表测量单级共射放大电路各项性能指标。

(3) 通过研究放大电路的频率特性曲线，建立频率特性的概念。

(4) 学习 NI Multisim 12 中波特图仪的使用方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

(1) 复习三极管基本共射放大电路的分析方法，认真完成预习报告的相关内容。

(2) 阅读第四章中 NI Multisim 12 直流工作点的分析方法、瞬态分析方法以及交流分析方法分析电路的一般步骤。

(3) 阅读第四章中 NI Multisim 12 万用表和波特图仪的使用方法。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

三极管基本共射放大电路实验电路图如图 2-4-1 所示。

设三极管 2N2222 的 $\beta = 100$, $r_{bb'} = 200\Omega$, 试分析:

(1) 三极管基本共射放大电路的静态工作点;

(2) 当输入电压信号幅值为 20mV、频率为 1kHz 的正弦波时, 观察输入、输出波形曲线, 研究它们之间的相位关系;

(3) 求出放大电路的电压放大倍数、输入电阻及输出电阻;

(4) 仿真放大电路的频率特性曲线, 求出上、下限频率和带宽;

(5) 仿真放大电路的波特图, 求中频区电压增益。

六、实验步骤

1. 编辑原理图

依据图 2-4-1 画出实验电路图, 电路元器件参数值按照电路图进行修改。

将电路图各节点号显示出来: 单击鼠标右键, 选中菜单的最底部“Properties”选项, 选中“sheetvisibility\Net names”中的“Show all”选项。

修改节点标号: 节点号显示后, 选中节点相关的导线, 双击后修改节点名称, 请按

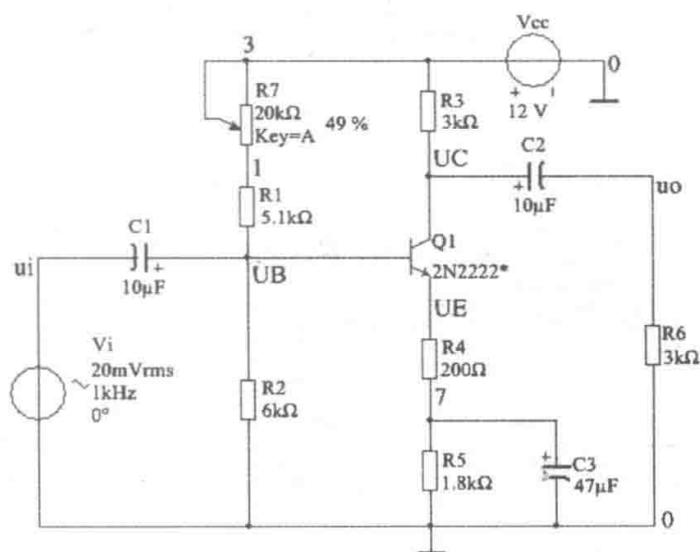


图 2-4-1 三极管基本共射放大电路

图 2-4-1 标识的节点号进行修改。

2. 进行直流工作点分析 (DC Operating Point Analysis), 测量放大电路的静态工作点

(1) 选择菜单项 “Simulate\Analysis\DC Operating Point Analysis”, 或者点击设计工具栏上的按钮 , 选中下拉菜单中的 “DC Operating Point Analysis” 选项, 打开 “DC Operating Point Analysis” 对话框, 在 “Output” 选项卡中选中静态工作点相关的变量, 点击 “Add” 按钮, 添加到分析变量列表中, 如图 2-4-2 所示。

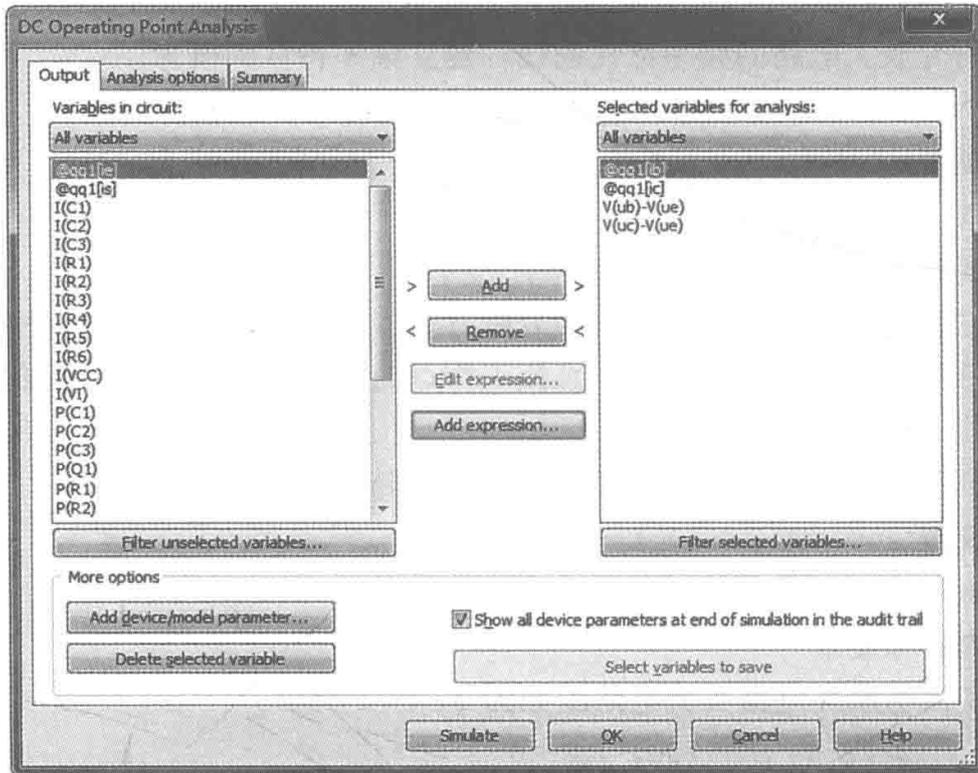


图 2-4-2 “DC Operating Point Analysis” 对话框

(2) 设置好分析变量后, 点击 “Simulate” 仿真按钮, 显示仿真结果如图 2-4-3 所示。

DC Operating Point

DC Operating Point		
1	@qq1[ib]	13.58801 u
2	@qq1[ic]	1.36909 m
3	V(ub)-V(ue)	631.83946 m
4	V(uc)-V(ue)	5.15260

图 2-4-3 直流工作点分析仿真结果

由仿真结果可知, 此放大电路的 $U_{BE} = 0.632V$, $U_{CE} = 5.153V$, $I_B = 1.3691\mu A$, $I_C = 1.3691mA$ 。由理论分析可知, 此静态工作点可以保证三极管工作在放大区, 静态工作点合适。

3. 进行瞬态分析 (Transient Analysis), 观察放大电路的输入、输出波形

(1) 选择菜单项 “Simulate\Analysis\Transient Analysis”, 或者点击设计工具栏上的  按钮, 选中下拉菜单中的 “Transient Analysis” 选项, 打开 “Analysis parameters” 对话框, 参数设置如图 2-4-4 所示。因为输入信号频率为 1kHz, 周期为 0.001s, 观察两个周期的波形, 所以将终止时间 (End Time) 设为 “0.002sec”, 该参数决定了瞬态分析的时间长度。

(2) 单击 “Output” 选项卡, 选择 “V (ui)” 作为输出变量, 点击 “Add” 按钮添加此变量到分析变量列表。单击 “Simulate” 仿真按钮, 弹出 “Grapher View” 对话框, 仿真波形如图 2-4-5 (a) 所示。再选择 “V (uo)” 作为输出变量, 单击 “Simulate” 仿真按钮, 仿真波形如图 2-4-5 (b) 所示。

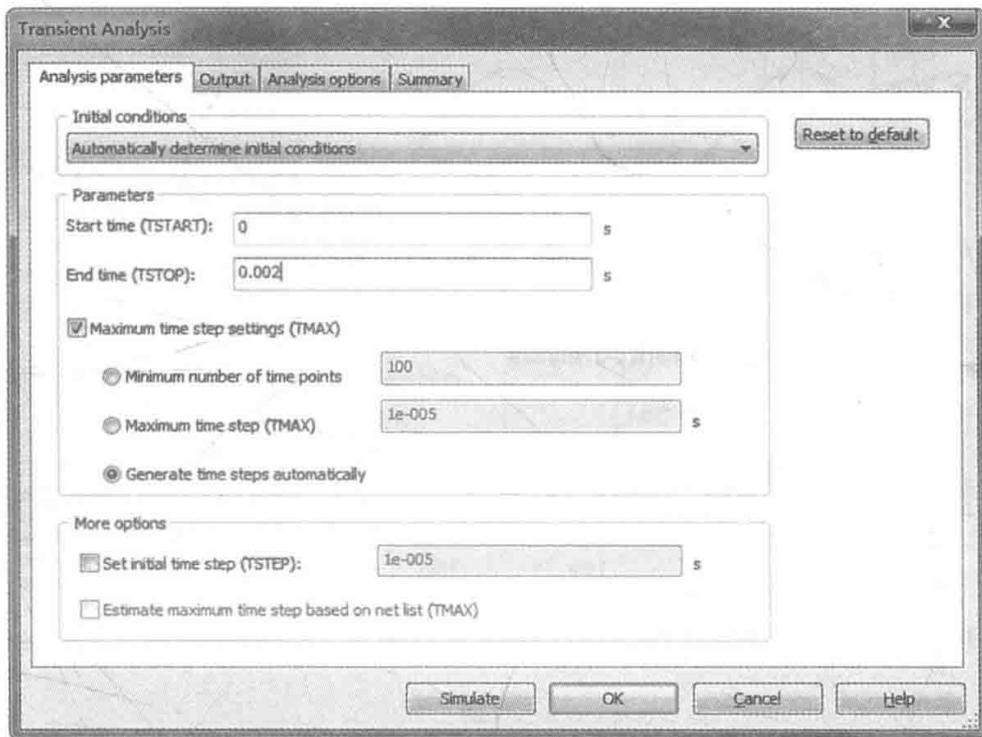


图 2-4-4 “Analysis parameters” 设置对话框

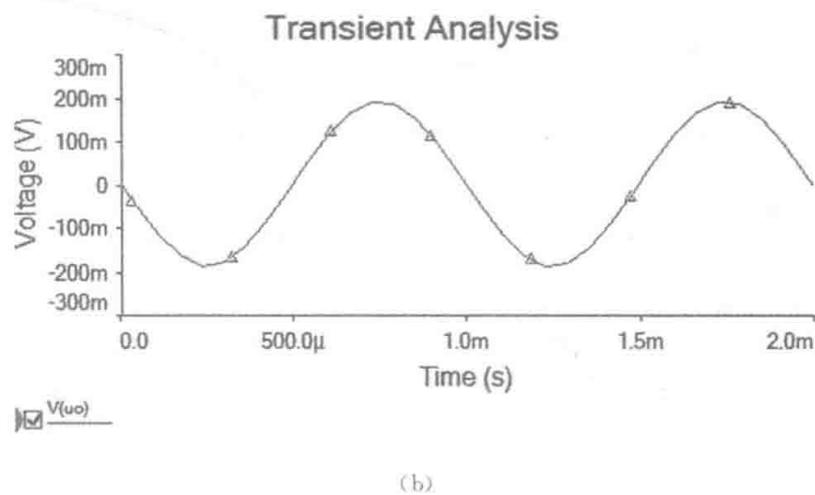
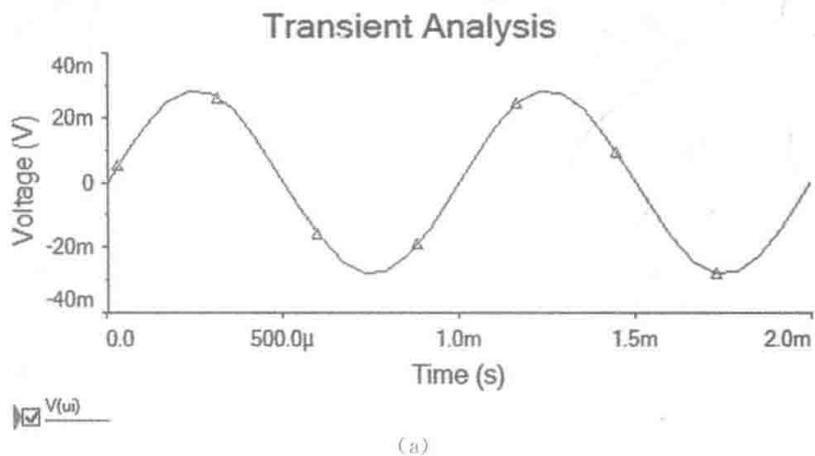


图 2-4-5 瞬态分析的仿真结果 (一)

(a) 输入波形; (b) 输出波形

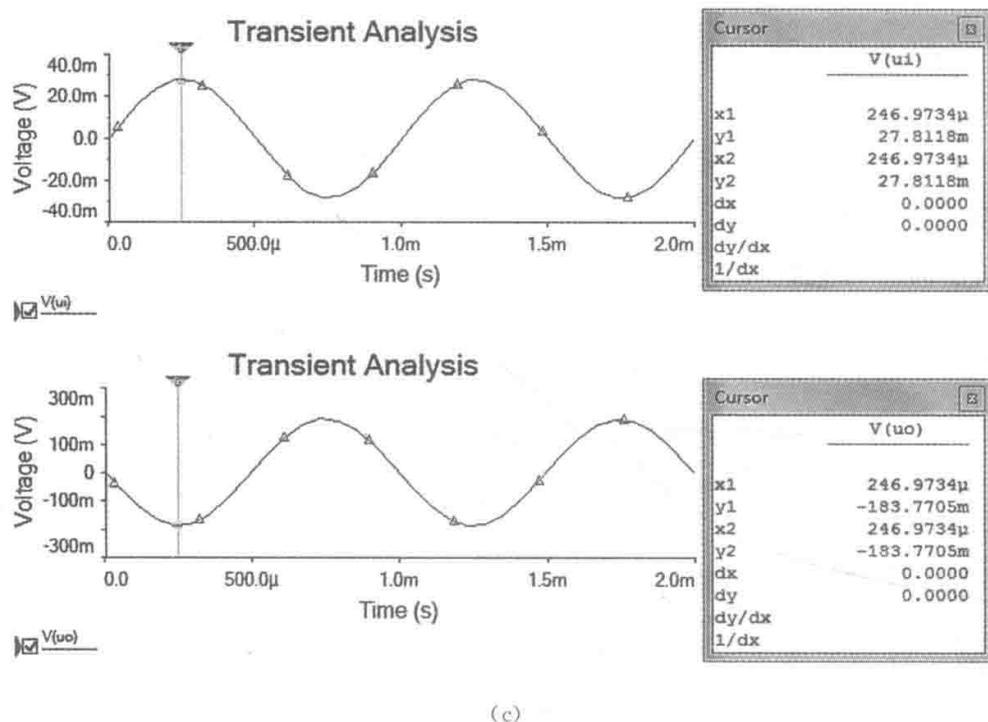


图 2-4-5 瞬态分析的仿真结果 (二)

(c) 输入输出同界面显示

可以利用“Grapher View”界面中的菜单“Graph\Addtrace(s) from latest simulation result”将“V(uo)”作为“New graph”添加到“V(ui)”的显示页上。注意：先进入V(ui)的显示页上，单击菜单中的上述选项（或者是相应的快捷按钮），在相应的界面选择“To new graph”，其中“Page name”是当前页的名称（也可以从列表中选其他页），“Graph name”是要加入的图名称，在“Graph type”中选“Analog graph”，自动将最近的仿真变量列入变量列表中，选中要选的变量（或表达式）加入到“Expressions selected”列表中，单击“Calculate”则完成两个波形的同界面显示，如图2-4-5(c)。

由图2-4-5可知，共射极放大电路输出波形与输入波形相位相差 180° ，电压放大倍数 $A_u = -183.7705/27.8118 \approx -6.61$ 。

4. 测量放大电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

(1) 测量输入电阻 R_i 。为了测量放大电路的输入电阻，按图2-4-6所示电路，在被测放大电路的输入端与信号源之间串入一已知电阻 $R_s = 1\text{k}\Omega$ ，通常取 R_s 与 R_i 为同一数量级为宜。用万用表交流挡测得 $U_s = 20\text{mV}$ 、 $U_i = 15.576\text{mV}$ 。

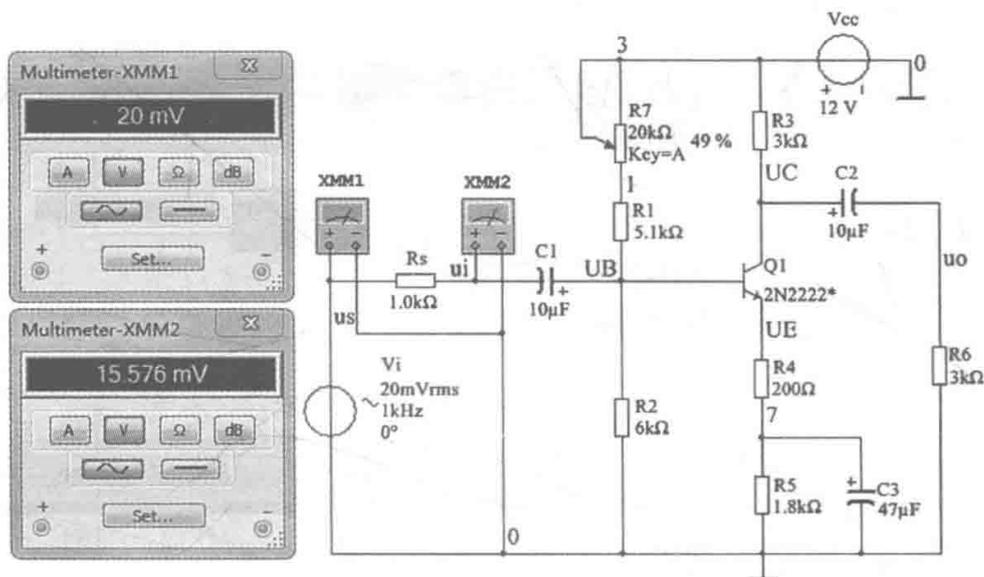
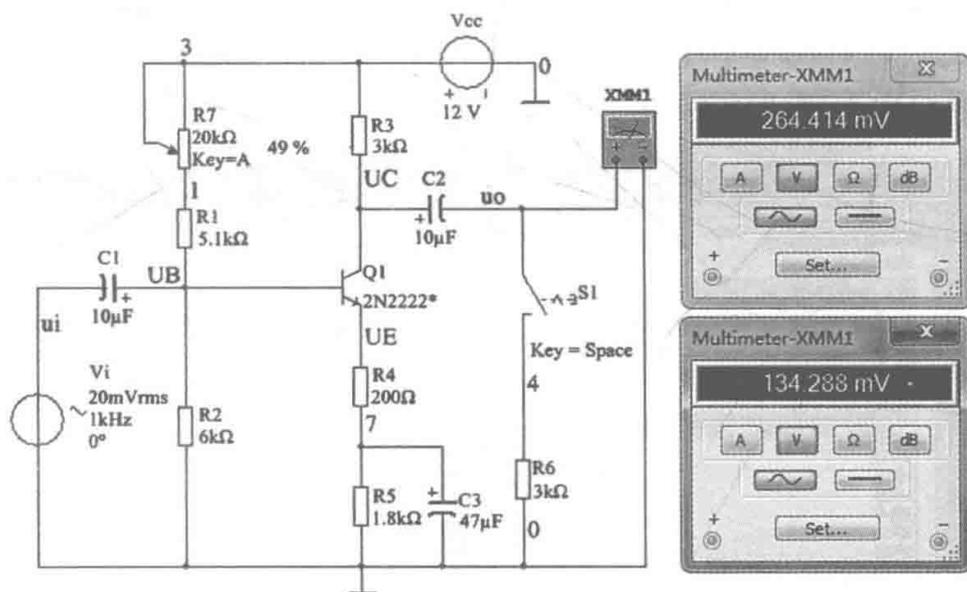
根据输入电阻的定义可得

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s = \frac{15.576}{20 - 15.576} \times 1 = 3.521(\text{k}\Omega)$$

(2) 测量输出电阻 R_o 。如图2-4-7所示，在负载支路上串联一个开关S1，通过按动“Space”键，转换开关S1的状态，用万用表交流挡分别测出输出端不接负载即空载时的输出电压 $U_o = 264.414\text{mV}$ ，以及接入负载 R_L 后的输出电压 $U_L = 134.288\text{mV}$ 。在测试中应注意，必须保持 R_L 接入前后输入信号的大小不变。

根据输出电阻的定义可得

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L = \left(\frac{264.414}{134.288} - 1 \right) \times 3 = 2.907(\text{k}\Omega)$$

图 2-4-6 输入电阻 R_i 的测量图 2-4-7 输出电阻 R_o 的测量

5. 进行交流分析 (AC Analysis), 测试放大电路的频率特性曲线

选择菜单项“Simulate\Analysis\AC Analysis”, 或者点击设计工具栏上的  按钮, 选中下拉菜单中的“AC Analysis”, 弹出如图 2-4-8 所示的“AC Analysis”对话框。

(1) “Frequency Parameters” 选项卡中各参数设置如下:

Start frequency: 1Hz。

Stop frequency: 100MHz。

Sweep Type: Decade (Linear: 线性扫描; Octave: 倍频程变化扫描; Decade: 十倍频程变化扫描), 以对数方式展现。

Number of points per decade: 10。

Vertical scale: Logarithmic (Decibel: 分贝; Octave: 八倍; Linear: 线性; Logarithmic: 对数), 纵坐标以对数刻度或分贝展现。

频率扫描范围可以根据分析结果判断是否合适, 如不合适可以重新设置。“Frequency

Parameters” 的设置结果如图 2-4-8 所示。

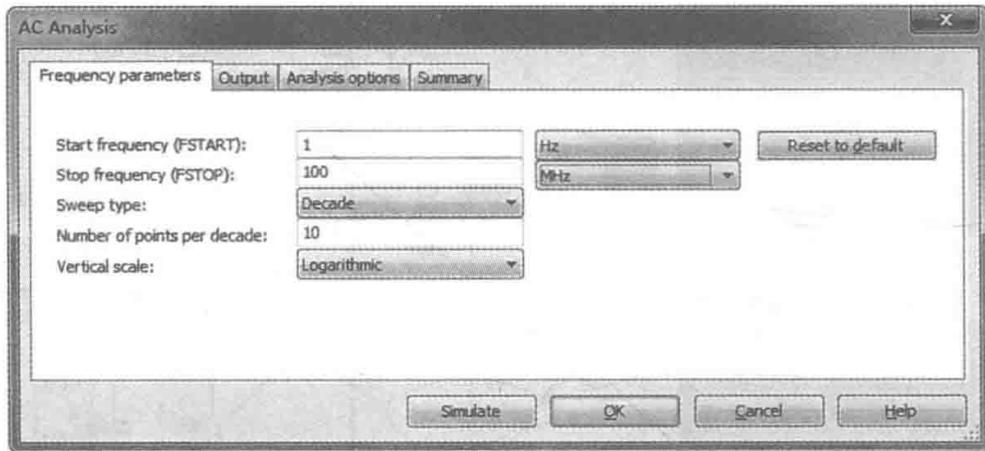


图 2-4-8 “AC Analysis” 对话框

(2) “Output” 的设置:

打开“Output”页，点击“Add expression...”按钮，进入“Add expression”对话框，添加表达式“ $V(u_o) / V(u_i)$ ”，点击“OK”按钮，回到“Output”设置对话框，在右侧选择变量窗口中出现“ $V(u_o) / V(u_i)$ ”，如图 2-4-9 所示。

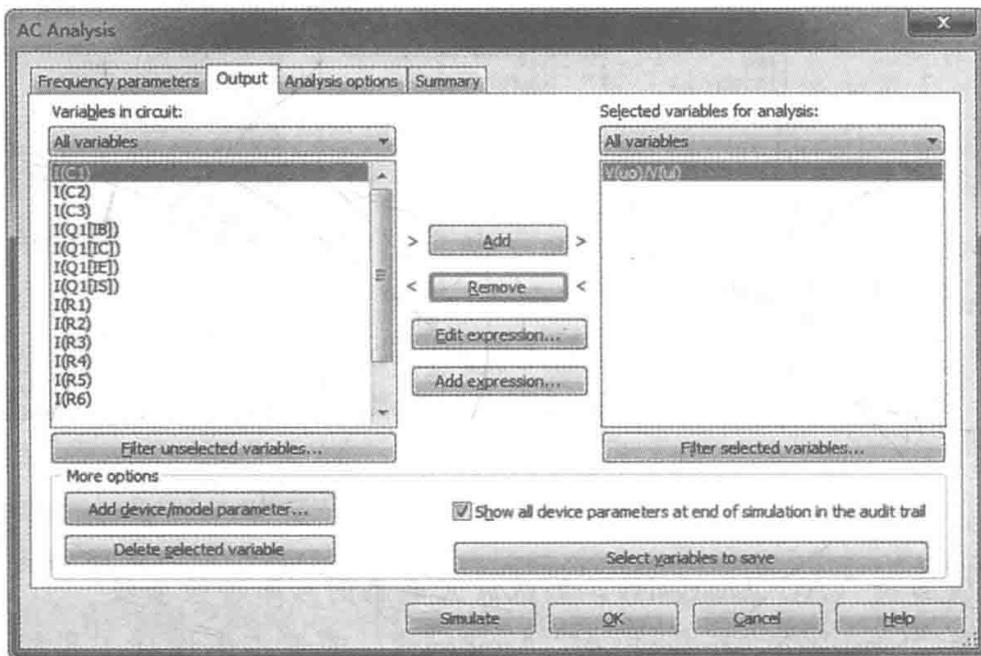


图 2-4-9 “Output” 设置对话框

(3) 单击“Simulate”按钮，出现如图 2-4-10 所示频率特性曲线。其中，上图为幅频特性曲线，下图为相频特性曲线。

启用游标可以读出： $f=1\text{kHz}$ 时，电压放大倍数 A_u 的值为 6.7173；输出与输入的相位差 φ 为 -178.7094° ，说明基本共射极放大电路是一个反相电压放大电路。

向低频区移动游标 1，观察游标 y_1 的示数，当 $y_1=0.707 \times 6.7173=4.7491$ 时，此时的 x_1 即为下限频率 $f_L=19.1354\text{Hz}$ ，如图 2-4-11 所示；向高频区移动游标 2，观察游标 y_2 的示数，当 $y_2=4.7491$ 时， x_2 为上限频率 $f_H=20.8877\text{MHz}$ ， f_{BW} 为放大电路的带宽 $f_{\text{BW}}=20.8876\text{MHz}$ 。

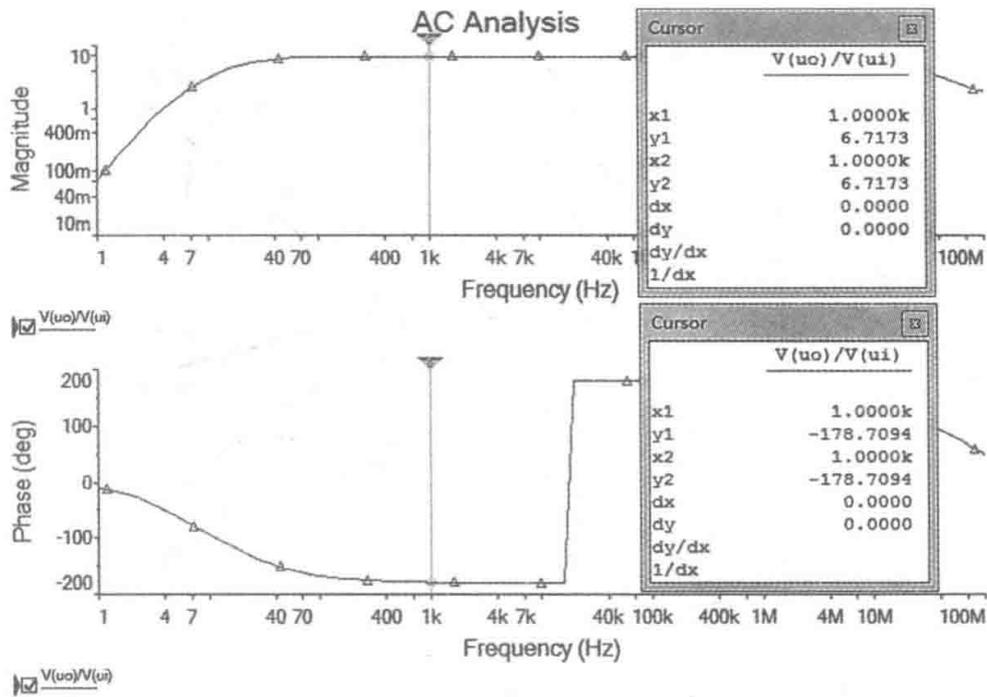


图 2-4-10 基本共射放大电路的频率特性曲线

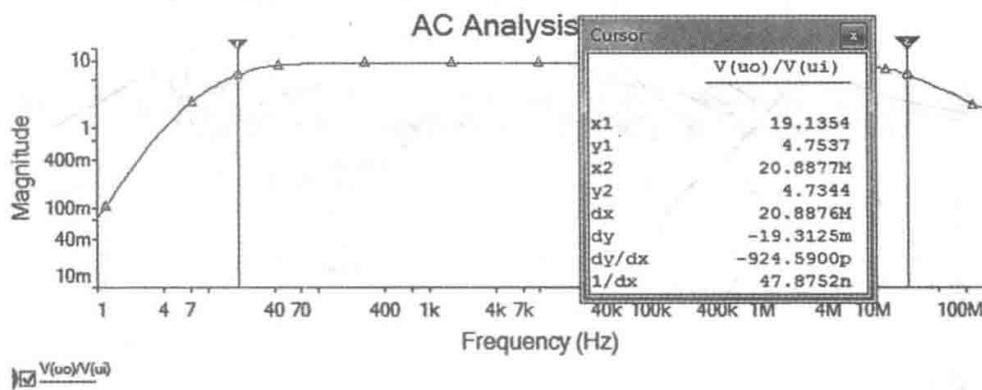


图 2-4-11 放大电路带宽的测量

6. 采用波特图仪 (Bode Plotter) 测试放大电路的波特图, 测量放大电路的电压增益

电压增益是用分贝 (dB) 为单位来表示电压放大倍数, 定义为 $20\lg|\dot{A}_u|$ (dB)。在原理图编辑界面右边仪表工具栏中点击符号 , 取出一台波特图仪 (Bode Plotter), 将电路的输入、输出端与波特图仪的 IN 和 OUT 端子相连, 如图 2-4-12 所示。

双击“Bode Plotter”图标 , 在“Mode”选项中设置幅频特性和相频特性频率扫描范围和增益范围, 按运行按钮 , 仿真结果如图 2-4-13 所示。

图 2-4-13 所示为放大电路的波特图, 界面的下方显示出游标与波特图交点的坐标值。图中游标位置 $f=1\text{kHz}$, 电压增益为 16.544dB。向低频区移动游标, 观察增益的示数, 当增益下降 3dB 为 13.544dB 时, 此时频率即为下限频率 $f_L=19.444\text{Hz}$; 向高频区移动游标, 观察增益下降 3dB 为 13.544dB 时的频率为上限频率 $f_H=20.77\text{MHz}$, f_H-f_L 即为放大电路的带宽 $f_{BW}=20.77\text{MHz}$ 。

七、注意事项

(1) 电路中使用两个电解电容, 连接时注意电容的极性。

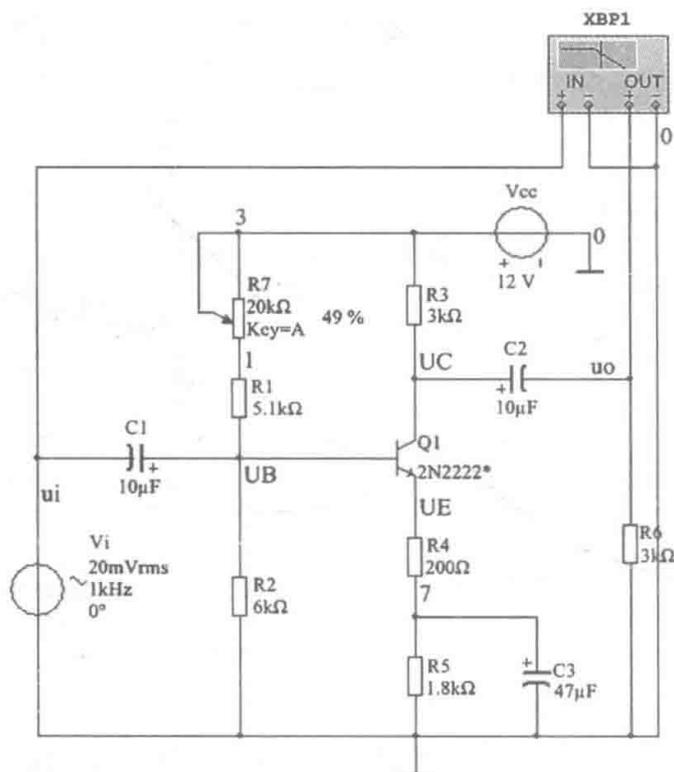


图 2-4-12 用波特图测量放大电路的频率特性

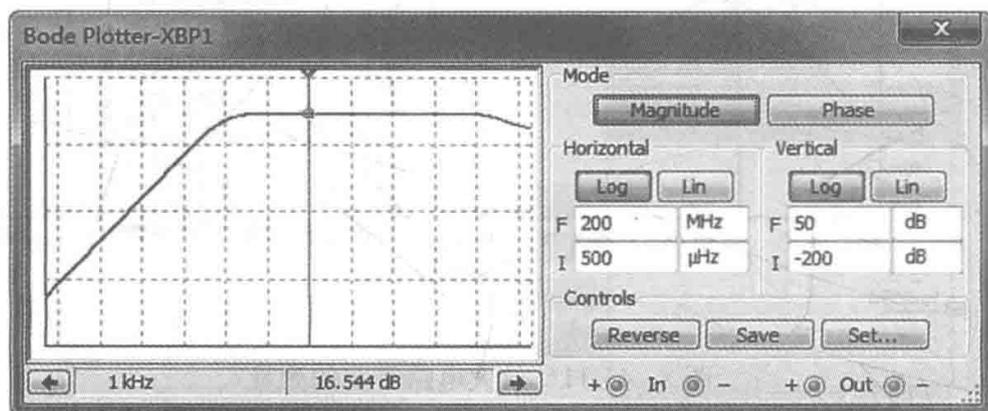


图 2-4-13 Bode Plotter 仿真结果

- (2) 本实验所采用的分析方法比较多，注意每一种分析方法的设置和使用。
- (3) 在使用电压表和电流表时，要注意合理的设置直、交流属性，并注意正确连接。

八、思考题

- (1) 如何从静态工作点的仿真分析结果中判断放大电路的静态工作点是否合适？
- (2) 使用示波器观察 u_i 和 u_o 波形，得出的图形和哪种分析方法得到的波形一致？
- (3) 如何使用交流分析方法测量放大电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o ？
- (4) 如果增大 R_b 的阻值，静态工作点 Q 会有什么变化？如果增大输入信号源 u_i 的幅值，放大电路的输出 u_o 会有什么现象？
- (5) 如何在 NI Multisim 12 软件下使用万用表测量该放大电路的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻？

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、三极管在电路中有几种连接方式？画出相应电路连接示意图，标清输入变量和输出变量。

二、如图 2-4-1 所示放大电路，假设三极管 VT 的 $\beta=100$ ， $U_{BE}=0.7V$ ， $r_{bb'}=200\Omega$ 。试利用 NI Multisim 12 软件分析：

- (1) 画出放大电路的直流通路，估算静态工作点 Q。
- (2) 画出放大电路的交流通路和交流等效电路。
- (3) 计算放大电路的电压放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。
- (4) 假设电位器 R7 短路，分析电路的输出会出现什么现象？属于哪种失真？采用作图的方式，利用输出特性曲线，定性画出此种失真。
- (5) 定性画出此放大电路的幅频频率曲线，标出上、下限频率的位置。

实验日期：_____

实验五 场效应管共源放大电路

一、实验目的

- (1) 学习使用 Multisim12 测试场效应管放大电路各项性能指标的方法。
- (2) 掌握场效应管放大电路的工作原理。
- (3) 学习使用 Multisim12 中小信号传递函数分析法分析放大电路的各项指标。
- (4) 学习使用 Multisim12 的后处理程序。

二、实验类型

设计型实验。

三、预习要求

- (1) 复习场效应管放大电路的组成和工作原理，认真完成预习报告的相关内容。
- (2) 复习实验三中介绍的直流工作点的分析方法、瞬态分析方法以及交流分析方法分析方法。
- (3) 阅读第四章中 NI Multisim 12 的小信号传递函数分析法的介绍，自行设计小信号传递函数数值分析电路。
- (4) 阅读第四章中 NI Multisim 12 后处理器的使用方法。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

场效应管共源放大电路实验电路图如图 2-5-1 所示。

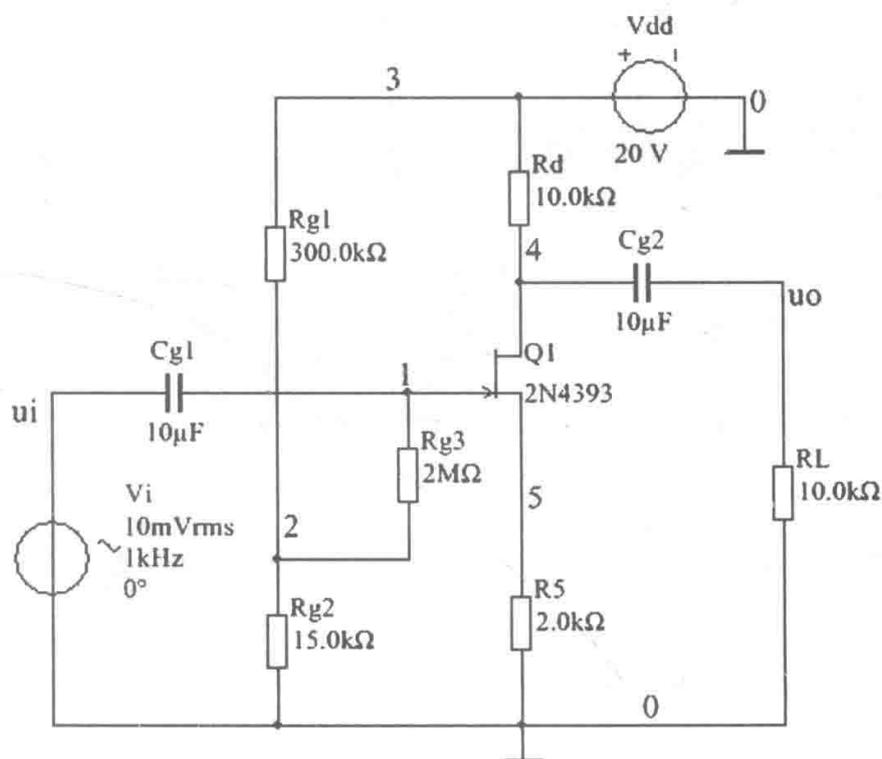


图 2-5-1 场效应管共源放大电路

设场效应管 2N4393 的低频跨导 $g_m = 9.109 \text{ms}$ ，试分析：

- (1) 采用直流工作点的分析方法测量电路的静态工作点。
- (2) 选择合适的分析方法，观察 u_i 及 u_o 的波形，并测出电压放大倍数 A_u ，说明它们之间的相位关系。
- (3) 选择合适的分析方法求出输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 。
- (4) 使用后处理器仿真放大电路的波特图，求中频区电压增益以及上、下限频率。
- (5) 根据自行设计的小信号传递函数值分析电路，同时求出中频区电压放大倍数、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

六、实验步骤

(一) 编辑原理图

建立电路文件，设计电路界面，选取并放置元器件，在原理图编辑区中搭接电路图，并按照图 2-5-1 电路所示修改各元器件参数。

(二) 仿真分析

自行设置直流工作点分析，测量放大电路的静态工作点；自行设置相应的分析方法，观察 u_i 及 u_o 的波形，并测出电压放大倍数 A_u ，说明它们之间的相位关系。

(三) 使用后处理程序 (Postprocessor)

后处理功能是在使用 multisim 对电路进行仿真分析之后，将仿真所得到的各种分析结果再作进一步处理，是专门用来对仿真结果进行进一步数学处理的工具，处理的结果仍以曲线或数据表形式显示。

1. 启动后处理程序 (Postprocessor)，测量放大电路的电压增益以及上、下限频率

在对电路进行交流分析之后，启动后处理程序，对交流分析结果进行数学处理，得到放大电路的波特图。

(1) 选择菜单项 “Simulate\Postprocessor”，或者点击快捷按钮，启动后处理程序，打开 “Postprocessor” 对话框，如图 2-5-2 所示。

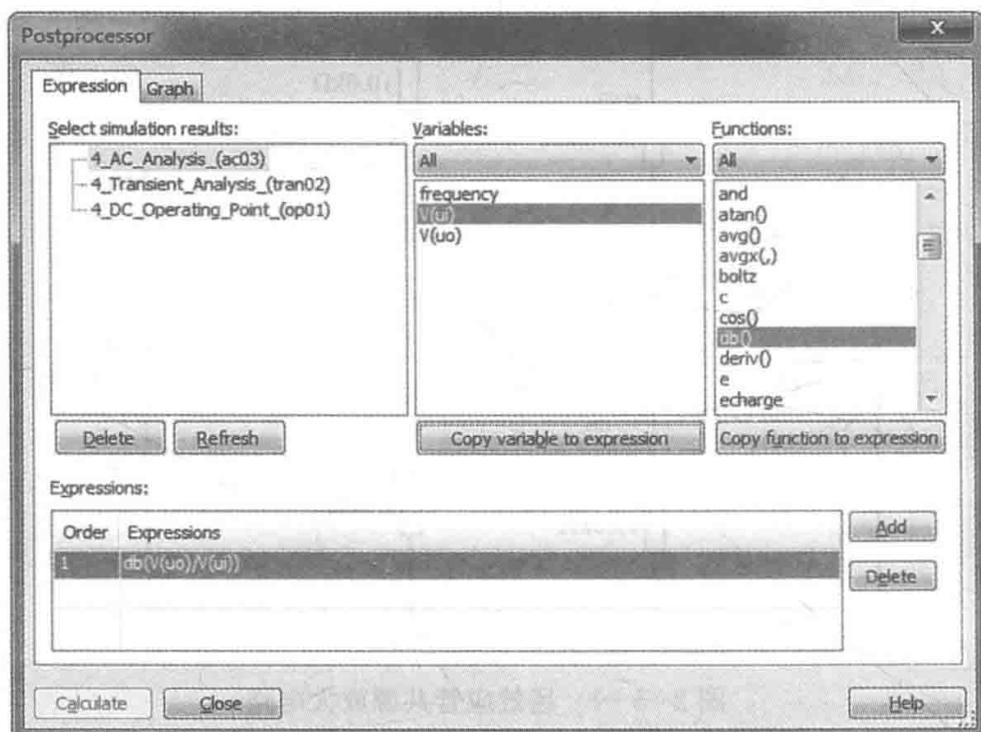


图 2-5-2 “Postprocessor” 对话框

“Postprocessor”对话框中“Expression”选项卡有四个区：

1) Select simulation results 区：用来存放对该电路所进行过的仿真分析结果。选取其中的一项分析结果，双击鼠标，则该分析结果中的所有变量将出现在其右边的“Variables”中。可以对该分析结果进行其他运算处理，这里选择 AC Analysis (ac03) 交流分析结果。

2) Variables 区：显示其左边 Select simulation results 区所选取分析项目中的所有变量；在该区中，先选中要处理的变量，再点击“Copy variable to expression”（或者双击该变量名称）按钮，把改变量放入“Expression”的函数编辑区。

3) Function 区：存放 Multisim 提供的主要数学运算函数。

4) Expression 区：函数编辑区。在这里定义函数“ $\text{db}(V(u_o)/V(u_i))$ ”为放大电路的电压增益。

(2) 单击“Graph”选项卡，如图 2-5-3 所示。在这里选择增加一个“Page”页，点击“Add”按钮，页名为“电压增益”；增加一个波形图，点击“Add”按钮，命名为“波特图”。然后点击“>”按钮把编辑的公式“ $\text{db}(V(u_o)/V(u_i))$ ”从“Expression available”区添加到“Expression selected”区；点击“Calculate”按钮，仿真出放大电路的频率特性曲线如图 2-5-4 (a) 所示。

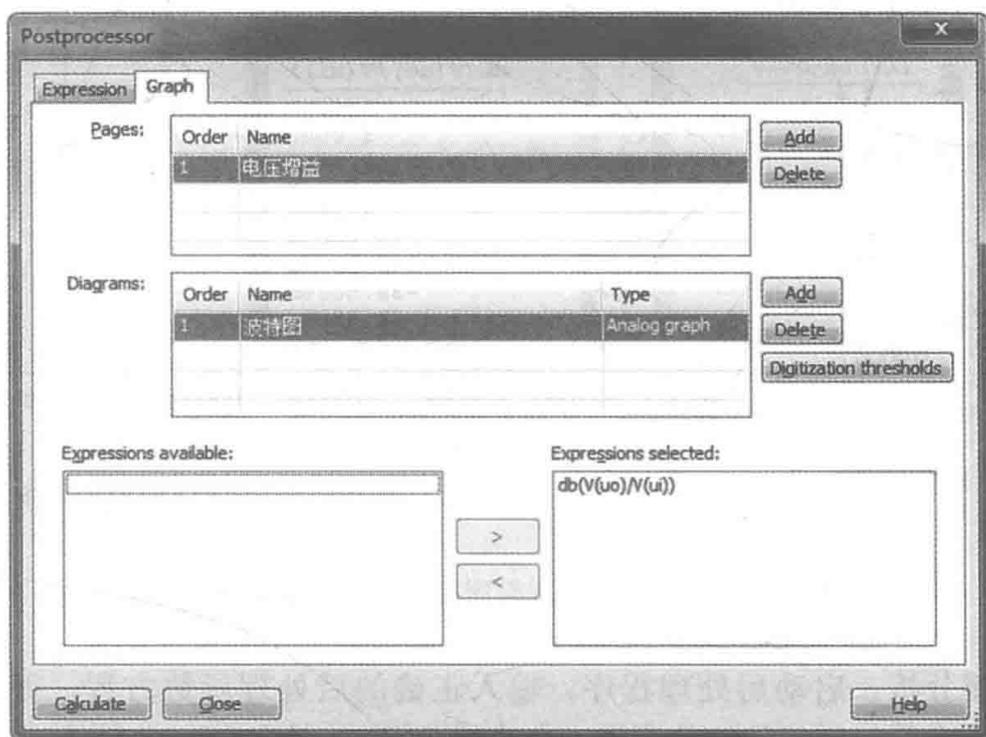


图 2-5-3 “Graph”页对话框

(3) 启用游标可知， y_1 即为放大电路的中频电压增益 7.2594dB。向高频区移动游标 2，观察游标 y_2 的示数，当 y_2 下降 3dB 为 4.2594dB 时，此时的 x_2 即为上限频率 $f_H = 23.9407\text{MHz}$ ，如图 2-5-4 (b) 所示。同理，向低频区移动游标 1， x_1 为下限频率 $f_L = 1\text{Hz}$ ， Δx 为放大电路的带宽 $f_{BW} = 23.9407\text{MHz}$ 。

2. 启动后处理程序 (Postprocessor)，测量放大电路的输入电阻和输出电阻

[提示：在交流分析之后，启动后处理程序，输入后处理函数方程“ $V(u_i)/I(VI)$ ”，得到如图 2-5-5 (a) 所示的输入电阻的幅频特性曲线。]

根据放大电路输出电阻的定义，需要将信号源短接、负载开路，然后在输出端加上一个

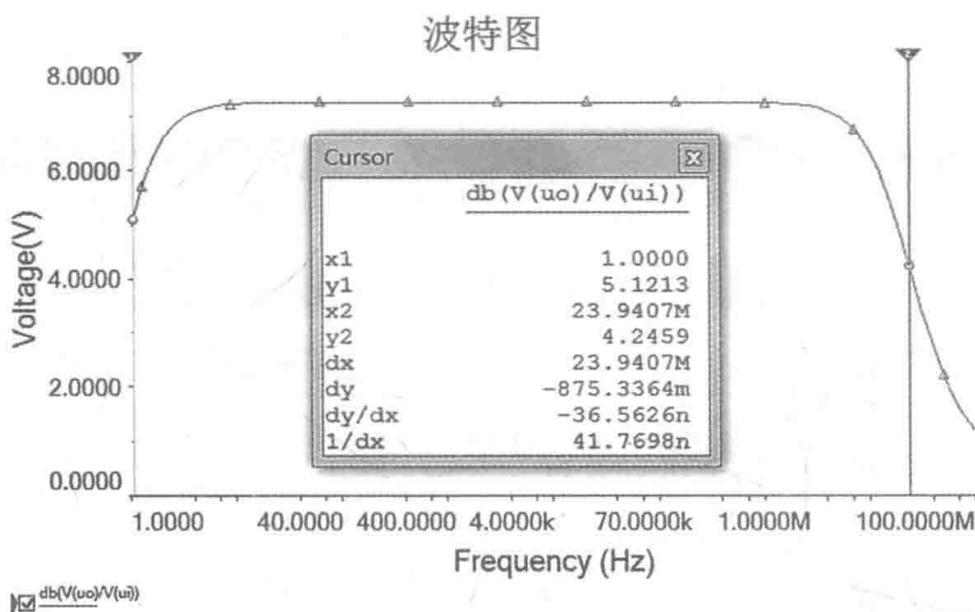
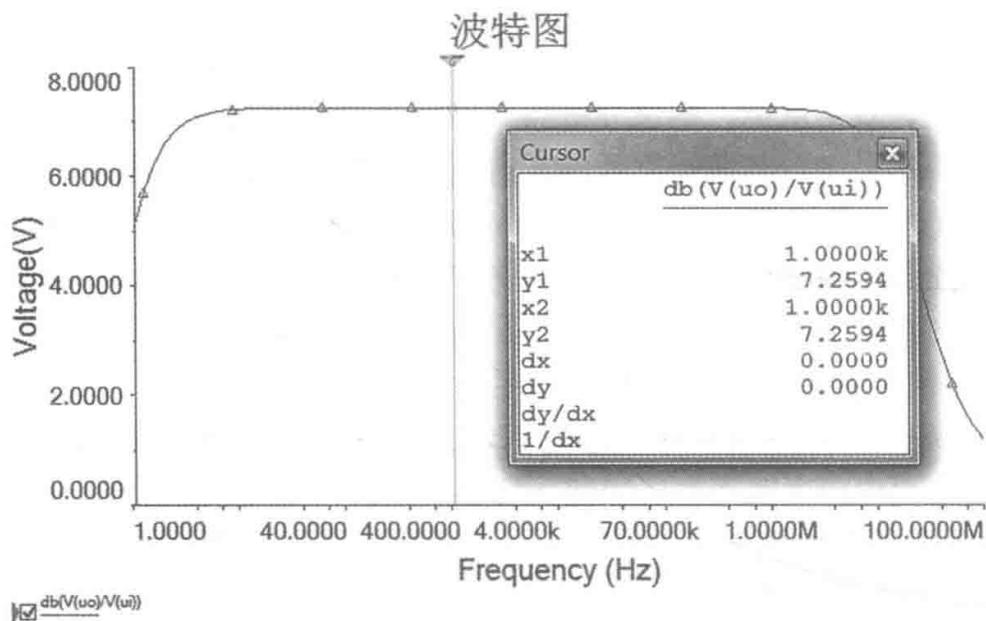


图 2-5-4 使用后处理程序得到的放大电路的波特图

(a) 放大电路电压增益的测量; (b) 放大电路上、下限频率的测量

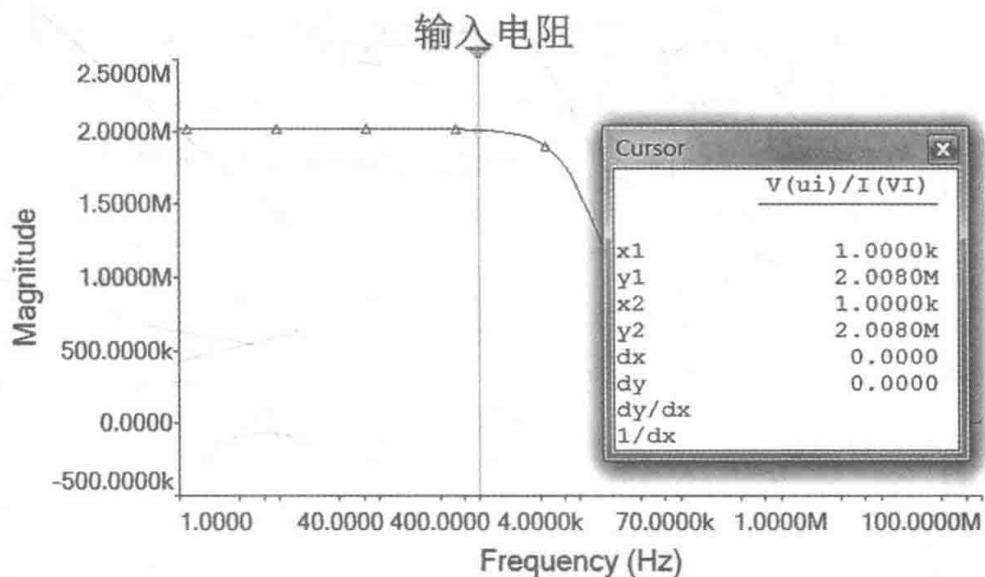
信号源进行交流分析, 启动后处理程序, 输入正确的后处理函数方程, 得到如图 2-5-5 (b) 所示的输出电阻的幅频特性曲线。

由图 2-5-5 可知, 在 $f=1\text{kHz}$ 时, 放大电路的输入电阻为 $2.0080\text{M}\Omega$, 输出电阻为 $9.9568\text{k}\Omega$ 。

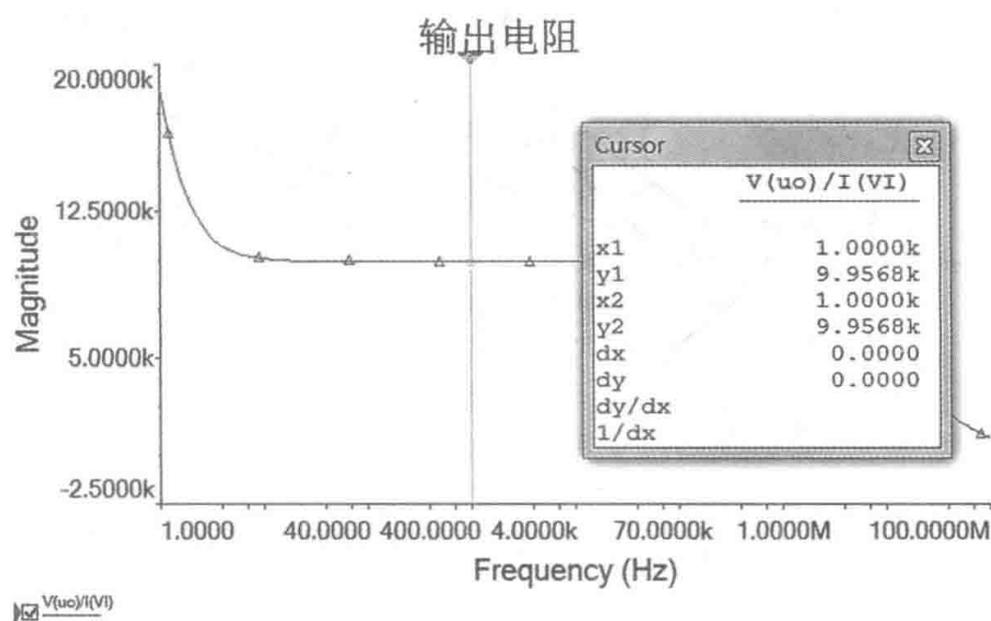
(四) 小信号传递函数分析 (Transfer Function Analysis)

小信号传递函数分析是分析计算在交流小信号条件下, 由用户指定的作为输出变量的任意两节点之间的电压或流过某一器件上的电流与作为输入变量的独立电源之间的比值, 同时也将计算出相应的输入阻抗和输出阻抗。

所谓交流小信号条件下, 就是先得到原放大电路的交流通路, 即把原放大电路中的电容短接, 负载开路, 但直流电源保留。因为本软件在仿真时程序自动把直流电源置零。所以, 进行传递函数分析之前要修改原放大电路。修改完, 在工具栏中选择 “Transfer Function



(a)



(b)

图 2-5-5 输入电阻和输出电阻的幅频特性曲线
 (a) 输入电阻的幅频特性曲线；(b) 输出电阻的幅频特性曲线

Analysis”，出现如图 2-5-6 所示的“Transfer Function Analysis”对话框，本实验中“Analysis Parameters”选项卡的设置如图 2-5-6 所示，点击“Simulate”按钮，出现如图 2-5-7 所示的仿真结果。

此结果显示的三个数据分别为：开路时的电压放大倍数 $A_u = -4.51015$ （电压增益为 13.08dB，为带载时的 2 倍），输入电阻 $R_i = 2.01408\text{M}\Omega$ 和输出电阻 $R_o = 9.96926\text{k}\Omega$ 。

七、注意事项

- (1) 连接电路原理图时要注意栅极分压电阻的连接。
- (2) 本次实验为设计型实验，实验过程中要合理选择电路分析方法。
- (3) 合理使用后处理器，输入正确的后处理函数方程。
- (4) 合理使用游标读取数据。

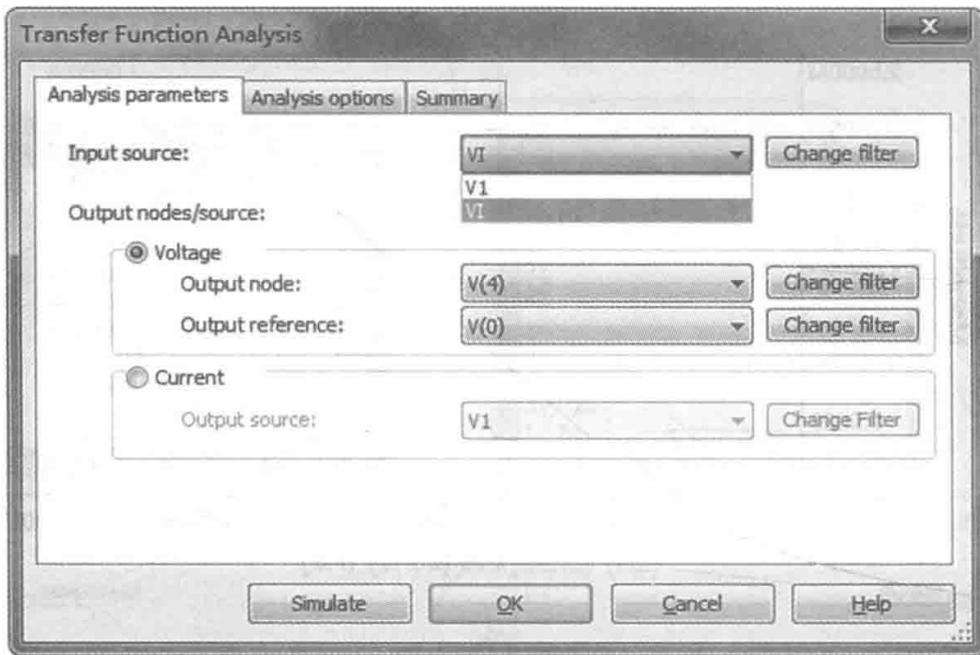


图 2-5-6 “Transfer Function Analysis” 对话框

Transfer Function		
Transfer Function Analysis		
1	Transfer function	-4.51015
2	vvi#Input impedance	2.01408 M
3	Output impedance at V(V(4),V(0))	9.96926 k

图 2-5-7 传递函数分析的仿真结果

八、思考题

- (1) 在 Multisim 中除了用瞬态分析法测出输入与输出的关系曲线, 还可以采用何种方法?
- (2) 如何在“AC Analysis”中增加需要的仿真变量?
- (3) 如何使用批处理分析法对同一个电路进行多种分析?
- (4) 在使用传递函数分析法时需要对原放大电路进行什么样的修改?
- (5) Multisim 中后处理程序的作用是什么? 如何在后处理程序中添加函数方程?

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、场效应管在电路中有几种连接方式？画出相应电路连接示意图，标清输入变量和输出变量。

二、场效应管与三极管有哪些区别？

三、如图 2-5-1 所示电路，已知电路参数及场效应管的低频跨导 $g_m = 9.109\text{mS}$ ，假设放大电路静态漏极电流为 $I_{DQ} = 1.02\text{mA}$ 。利用 NI Multisim 12 软件，回答如下问题：

- (1) 画出电路的直流通路，用估算法求出静态时的 U_{GSQ} 、 U_{DSQ} 值；
- (2) 画出电路的小信号等效电路，求出动态指标 A_u 、 R_i 及 R_o 。

实验日期：_____

实验六 互补对称功率放大电路

一、实验目的

- (1) 观察乙类互补对称功率放大电路输出波形，学习抑制交越失真的方法。
- (2) 学习互补对称功率放大电路最大输出电压范围的测试方法。
- (3) 进一步掌握用 NI Multisim 12 进行瞬态分析和直流扫描分析的方法。
- (4) 学习在 NI Multisim 12 中测试功率放大电路各项指标的方法。
- (5) 学习 NI Multisim 12 中功率表的使用方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

(1) 复习乙类互补对称功放电路的工作原理，分析其输出波形，认真完成预习报告的相关内容。

(2) 复习甲乙类互补对称功放电路工作原理及指标计算方法。

(3) 复习 NI Multisim 12 进行瞬态分析和直流扫描分析的步骤。

(4) 阅读第四章中 NI Multisim 12 功率表的使用方法。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

互补对称功率放大电路实验电路图如图 2-6-1 所示。

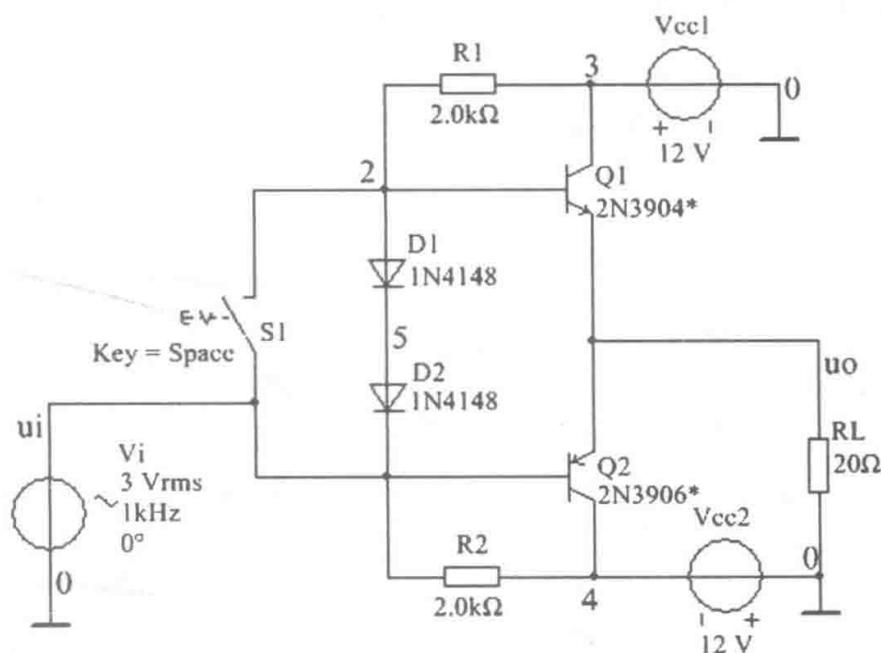


图 2-6-1 互补对称功率放大电路

设 NPN 型三极管 2N3904 和 PNP 型三极管 2N3906 的 β 均为 100:

- (1) 开关 S1 闭合，观察乙类互补对称功率放大电路的交越失真现象。
- (2) 画出乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线。

(3) 开关 S1 断开, 将输入信号接在 5 号节点, 观察甲乙类互补对称功率放大电路的输出波形, 是否消除交越失真现象。画出甲乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线。

(4) 计算甲乙类互补对称功率放大电路的功率和效率。

六、实验步骤

1. 编辑原理图

建立电路文件, 设计电路界面, 选取并放置元器件, 在原理图编辑区中搭接电路图, 并按照图 2-6-1 电路所示修改各元器件参数。

2. 乙类互补对称放大电路的仿真分析

将开关 S1 闭合, 构建乙类互补对称功率放大电路, 观察交越失真现象, 画出乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线。

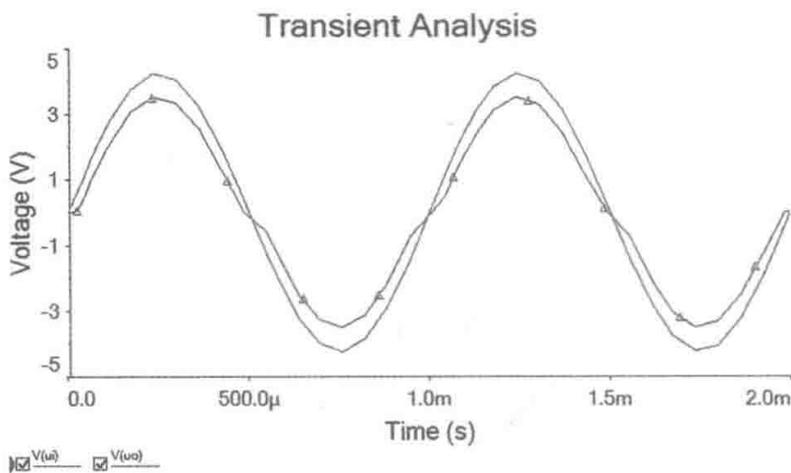


图 2-6-2 乙类互补对称功率放大电路的交越失真

进行 DC Sweep 分析, 扫描电压源设为 u_i , 扫描范围为 $-2 \sim +2V$, 扫描步长为 $0.01V$; “Output Variables” 设置为输出变量 u_o 。仿真后得到电压传输特性曲线如图 2-6-3 所示。在图上标出交越失真发生的输入电压范围。(标数据的方法参考本章实验一有关内容。)

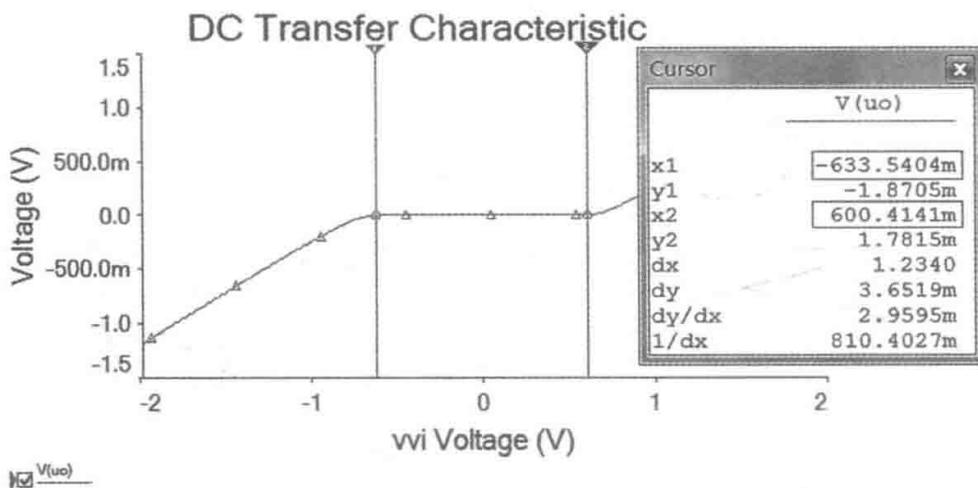


图 2-6-3 乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线

3. 甲乙类互补对称功率放大电路的仿真分析

观察甲乙类互补对称功率放大电路的输出波形, 并画出甲乙类互补对称功率放大电路的

电压传输特性曲线。

(1) 修改电路，构建甲乙类互补对称功率放大电路。将开关 S1 断开，并将信号源接至图 2-6-1 的 5 号节点，并修改节点号为 ui，如图 2-6-4 所示。

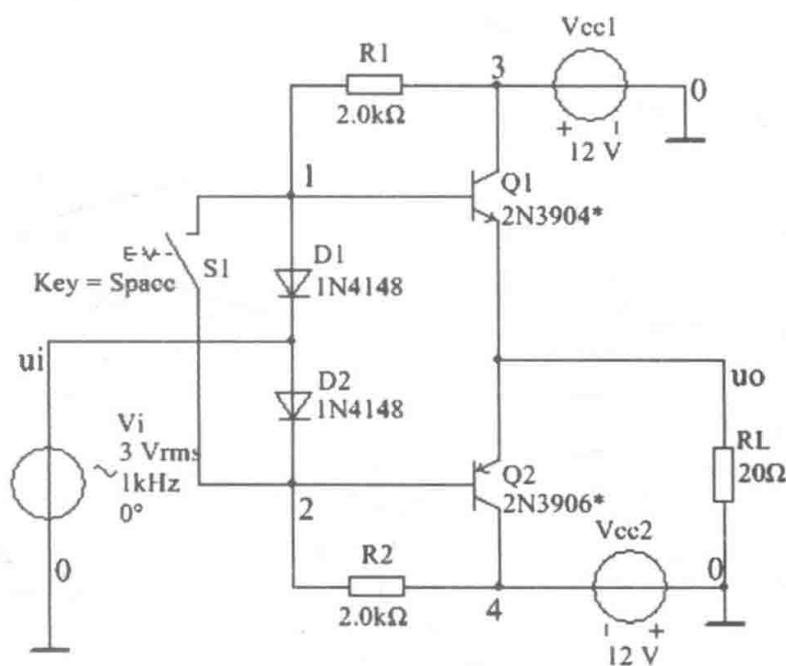


图 2-6-4 甲乙类互补对称功率放大电路

(2) 进行 Transient Analysis 分析，仿真观察输入、输出波形。将图 2-6-4 所示电路输入信号源的幅值修改为“ $2V_{rms}$ ”，启动瞬态分析，设置合适的参数和输出变量，仿真得到如图 2-6-5 所示的波形。可见，输出 u_o 已无明显交越失真。

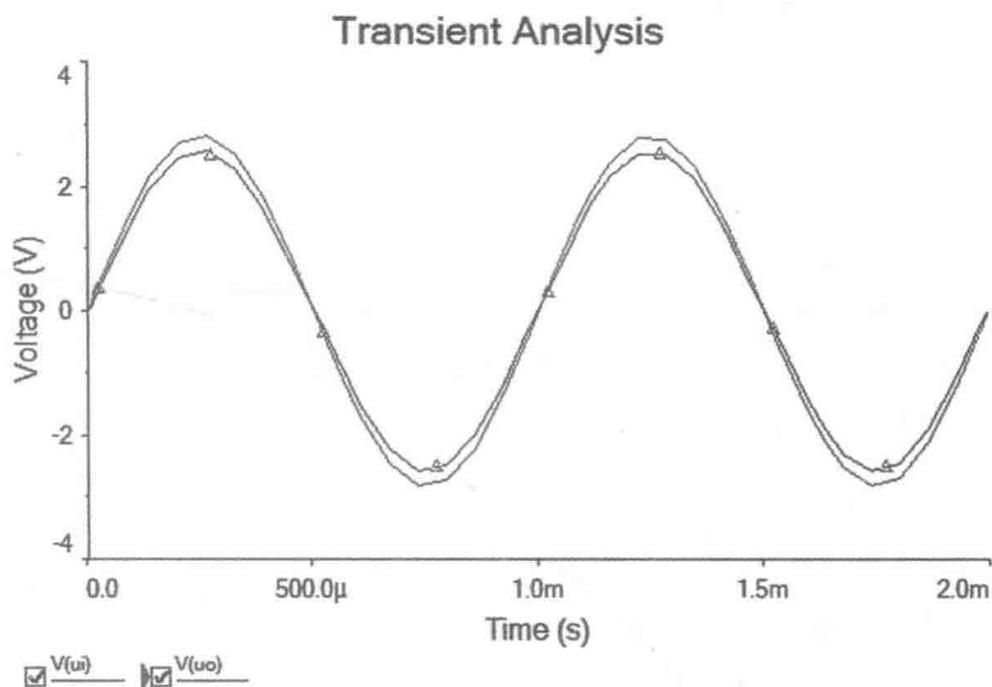


图 2-6-5 甲乙类互补对称功率放大电路输入、输出波形

(3) 进行 DC Sweep 分析，画出甲乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线。设置“DC Sweep”，参数扫描范围和输出变量的设置同乙类互补对称功率放大电路，仿真得到甲乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线，如图 2-6-6 所示。

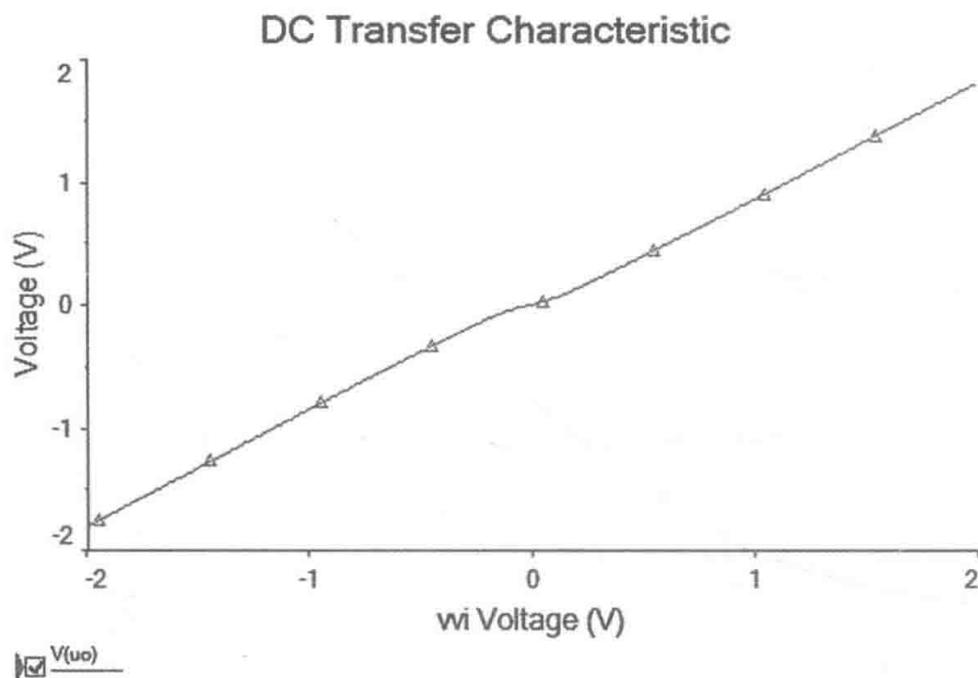


图 2-6-6 甲乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线

由图 2-6-6 可知, 发生交越失真的范围已经明显减小。

(4) 进行 DC Sweep 分析, 观察甲乙类功率放大电路最大输出电压范围。设置 DC Sweep, 扫描电压源仍设为 V_i , 扫描范围改为 $-10 \sim +10\text{V}$, 扫描步长仍为 0.01V 。仿真得到电压传输特性曲线如图 2-6-7 所示, 标出最大输出电压范围。

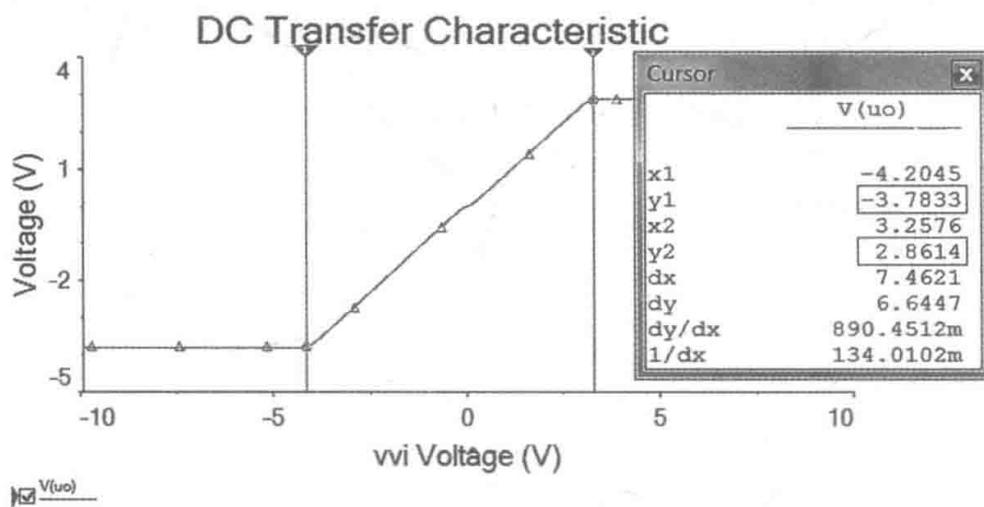


图 2-6-7 甲乙类互补对称功率放大电路的电压传输特性曲线

由图 2-6-7 可知, 功率放大电路的最大输出电压范围为 $(-3.7833 \sim 2.8614\text{V})$ 。所以, 当功率放大电路的输入信号超过这个范围, 输出波形将会出现失真。鉴于此, 该功率放大电路的输入信号的幅值不能高于 $2.86\text{V}_{\text{rms}}$ 。

4. 借助示波器计算甲乙类互补对称功率放大电路的输出功率 P_o 和效率 η

在甲乙类互补对称功率放大电路的输出端接上示波器, 打开仿真开关 , 双击示波器图标, 打开示波器面板, 观察示波器显示的输出波形, 如图 2-6-8 所示。

启动游标, 得到输出电压 $U_o = 2.57\text{V}$, 然后利用公式 $P_o = \frac{1}{2} \frac{U_o^2}{R_L}$, 计算出输出功率 $P_o =$

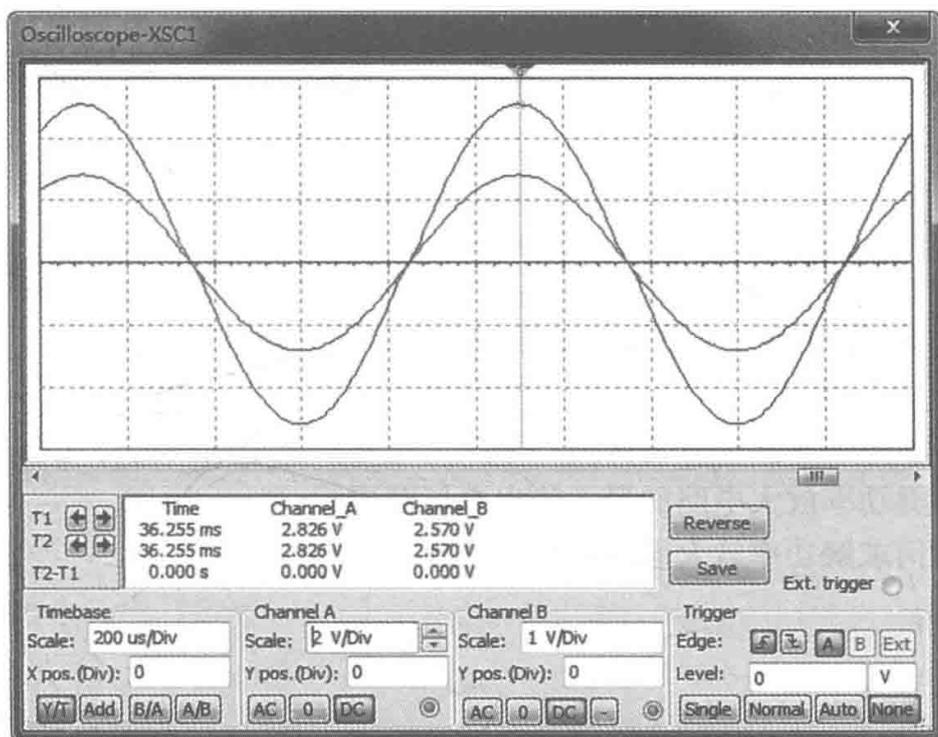


图 2-6-8 甲乙类互补对称功放电路的输入、输出波形

0.165W；利用公式 $P_V = \frac{2U_{CC}U_o}{\pi R_L}$ ，计算出直流电源提供的功率 $P_V = 0.982W$ ；利用公式 $\eta = \frac{P_o}{P_V}$ ，可知此甲乙类互补对称功率放大电路的效率为 16.8%。

5. 用功率表测量甲乙类互补对称功率放大电路的输出功率 P_o 和直流电源供给的功率 P_V 。在仿真平台上可用功率表测出输出功率 P_o 。在原理图编辑区右边仪表工具栏中点击符号 ，取出一台功率表。功率表的电压输入端与负载并联，功率表的电流输入端与负载串联，如图 2-6-9 所示的 XWM1。启动仿真按钮，双击功率表图标 ，功率表读数为 163.895mW，如图 2-6-9 所示。

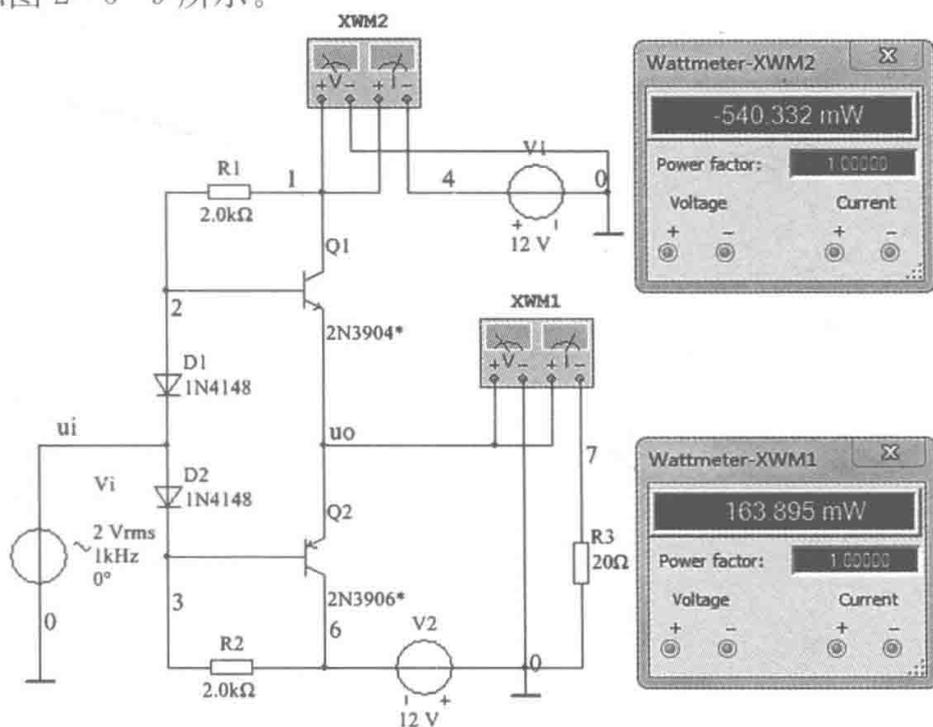


图 2-6-9 用功率表测量甲乙类互补对称功放电路的功率

同理，可用功率表（见图 2-6-9 所示的 XWM2）测出直流电源供给的功率 P_V ，功率表读数为 540.332mW，如图 2-6-9 所示。利用计算公式可知乙类互补对称功率放大电路的

效率 $\eta = \frac{P_o}{2P_V} = 15.2\%$ 。

七、注意事项

- (1) 电路中使用了两种类型的三极管，在连接电路时注意直流电源的极性。
- (2) 在开关 S1 断开后，注意要将信号源改接在两个二极管之间。

八、思考题

- (1) 整理实验数据和波形并将两类功率放大电路的波形曲线进行比较。
- (2) 比较两类功率放大电路的最大输出电压范围。
- (3) 考虑如何求解功率放大电路的最大输出功率和效率。

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、功率放大电路的作用是什么？在输入信号上，它与放大电路有什么区别？

二、功率放大电路工作在乙类状态下，由于_____原因，输出会产生_____失真，采用_____工作状态下的功率放大电路可以消除这种失真。

三、OCL互补对称电路如图 2-6-4 所示，假定三极管的饱和管压降 $|U_{CES}| = 2V$ ， $U_{CC} = 12V$ 。试分析：

- (1) 静态时三极管发射极电位 U_{EQ}
- (2) 最大不失真输出功率 P_{omax} ；
- (3) 当输入为正弦波时，若 R1 虚焊，则输出电压有什么变化？并说明原因。
- (4) 当输入为正弦波时，若 D1 开路，电路会出现什么现象？并说明原因。
- (5) 为保证电路正常工作，所选三极管的 $U_{(BR)CEO}$ 应大于多少。
- (6) 如何克服此电路存在的交越失真，并画出相应的电路图。

实验日期：_____

实验七 差动放大电路

一、实验目的

- (1) 进一步熟悉用小信号传递函数值分析方法求解放大电路的动态指标。
- (2) 学习用 DC Sweep 分析方法分析放大电路的电压传输特性。
- (3) 加深对差动放大电路性能及特点的理解。
- (4) 学会自主设计满足一定性能指标的差动放大电路。

二、实验类型

设计型实验。

三、预习要求

- (1) 复习几种常用的差动放大电路的工作原理，认真完成预习报告的相关内容。
- (2) 复习瞬态分析、直流扫描分析以及小信号传递函数值分析方法。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

实验电路如图 2-7-1 所示。图中三个三极管 2N2222 的电流放大系数 β 均取 100，其他元器件参数值依照电路图选取。

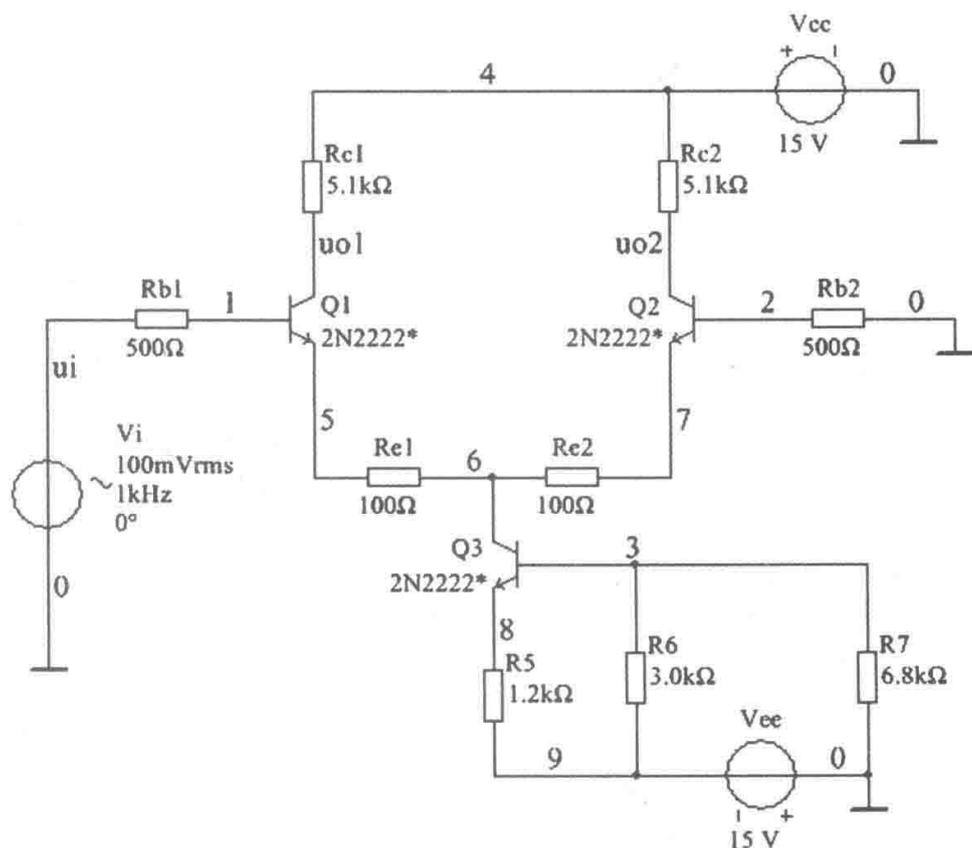


图 2-7-1 差动放大电路

通过实验试分析：

- (1) 采用适当的方法测试差动放大电路的静态工作点。
- (2) 设置单端输入方式，如图 2-7-1 所示。采取适当的分析方法，观察单端输出 u_{o1} 、

u_{o2} 的曲线以及双端输出 ($u_{o1} - u_{o2}$) 的曲线, 并求出单端输出时的差模电压放大倍数 A_{d1} 、 A_{d2} 和双端输出时的差模电压放大倍数 A_d 。

(3) 设置双端输入方式, 输入信号 $u_{id1} = -u_{id2} = 50\text{mV}$, $f = 1\text{kHz}$, 如图 2-7-2 所示。采取适当的分析方法, 观察单端输出 u_{o1} 、 u_{o2} 的曲线和双端 ($u_{o1} - u_{o2}$) 的曲线, 说明三条曲线之间的关系, 并求出单端输出时的差模电压放大倍数 A_{d1} 、 A_{d2} 和双端输出时的差模电压放大倍数 A_d 。

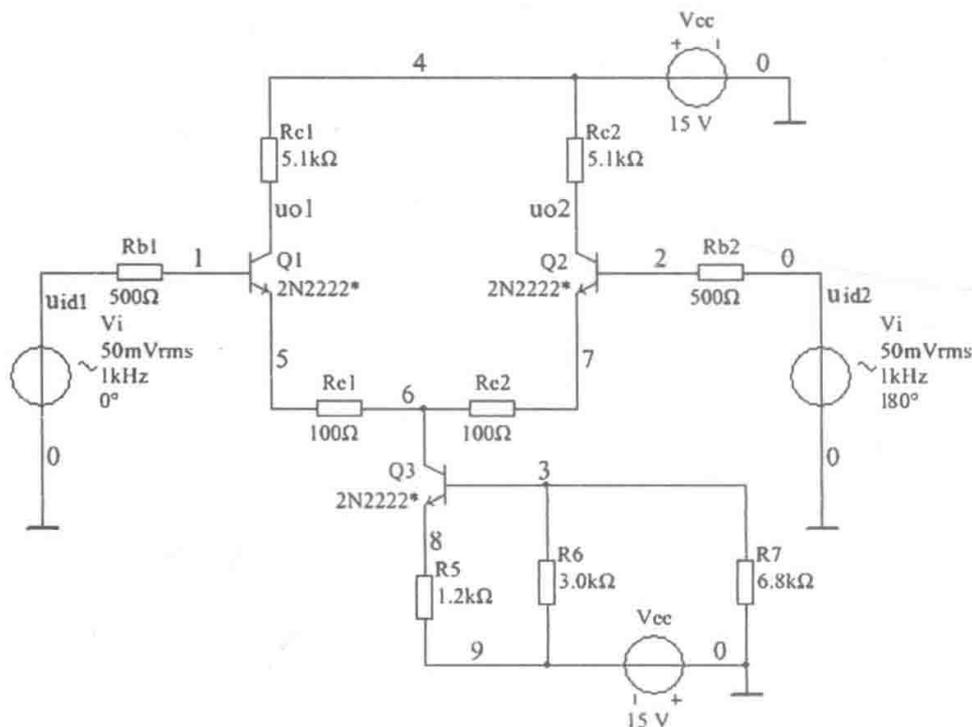


图 2-7-2 双端输入的差动放大电路

(4) 在差模信号作用下, 采取适当的分析方法, 测量单端输出 u_{o1} 、 u_{o2} 的电压传输特性曲线, 以及双端输出 ($u_{o1} - u_{o2}$) 的电压传输特性曲线, 并从结果中分析单端输出与双端输出电压放大倍数的关系。

(5) 在差模信号作用下, 采取适当的方法同时测量单端输出 u_{o1} 、 u_{o2} 以及双端输出 ($u_{o1} - u_{o2}$) 时的差模电压增益、差模输入电阻 R_{id} 和输出电阻 R_o 。

(6) 设置共模输入方式, 输入信号 $u_{ic} = 100\text{mV}$, $f = 1\text{kHz}$, 采取适当的分析方法, 分析单端输出和双端输出的共模电压放大倍数, 并求出共模抑制比。

(7) 测试自行设计的差动放大器, 如测试结果不满足设计要求, 则修改电路图, 使其满足设计要求。

六、注意事项

(1) 本实验电路结构较复杂, 使用了两个直流电源, 三个三极管和多个电阻, 在连接电路原理图时要注意直流电源的连接。

(2) 差动放大电路的输入、输出连接方式较多, 针对不同的输入方式, 信号源与电路有不同的连接形式, 要正确设置双端输入、单端输入, 正确接入差模信号以及共模信号。

(3) 合理使用后处理器得到所需要的测试结果。

七、思考题

(1) 若采用直流输入信号, 针对单端和双端输入方式, 如何接入差模信号和共模信号,

给出连接示意图，并说明理由。

(2) 在加入交流共模输入信号时，Q3 集电极对地电压和输入信号电压在数值和相位方面有何关系？为什么？

(3) 能否用示波器观察双端输出的电压波形，为什么？

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、差动放大电路如图 2-7-1 所示，设三个三极管的参数相同， $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 100$ ， $r_{bb'} = 200\Omega$ 。试计算：

- (1) Q1 和 Q2 的静态工作点；
- (2) 假设负载开路，画出差模信号作用下的交流通路，计算差模电压放大倍数 A_{ud} 、差模输入电阻 R_{id} 、差模输出电阻 R_{od} ；
- (3) 画出共模信号作用下的交流通路，计算共模放大倍数 A_{uc} ；
- (4) 简述零漂的定义，说明 Q3 的作用；
- (5) 若 $u_i = +10\text{mV}$ ，问电路的差模输入电压 u_{id} 是多少？共模输入电压 u_{ic} 是多少？

二、设计一个差动放大器,要求放大倍数 $A_d \geq 40$,双电源 $V_{CC} = 15V$, $V_{EE} = -6V$ 供电,双端输入、双端输出工作方式,负载 $R_L = 10k\Omega$,工作电流 $I_{CQ} = 0.5mA$ 。写出设计过程,画出电路图,并采用适当的方法对之进行测量。

1. 设计过程

2. 电路图

实验日期: _____

实验八 两级负反馈放大电路的分析

一、实验目的

- (1) 学习使用 Multisim 测试负反馈放大电路各性能指标的方法。
- (2) 加深理解负反馈对放大电路各项性能指标的影响。
- (3) 进一步熟悉 Multisim 中波特图仪的使用方法。

二、实验类型

验证型实验。

三、预习要求

(1) 复习教材中有关负反馈放大电路的组成和工作原理，认真完成预习报告的相关内容。

(2) 总结电压串联负反馈放大电路的特点。

(3) 阅读第四章中交流分析方法和波特图仪的使用方法。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

电压串联负反馈放大电路实验电路如图 2-8-1 所示。其中两个三极管 2N3394 的电流放大系数 β 均取 80，其他元器件参数值依照电路图选取。

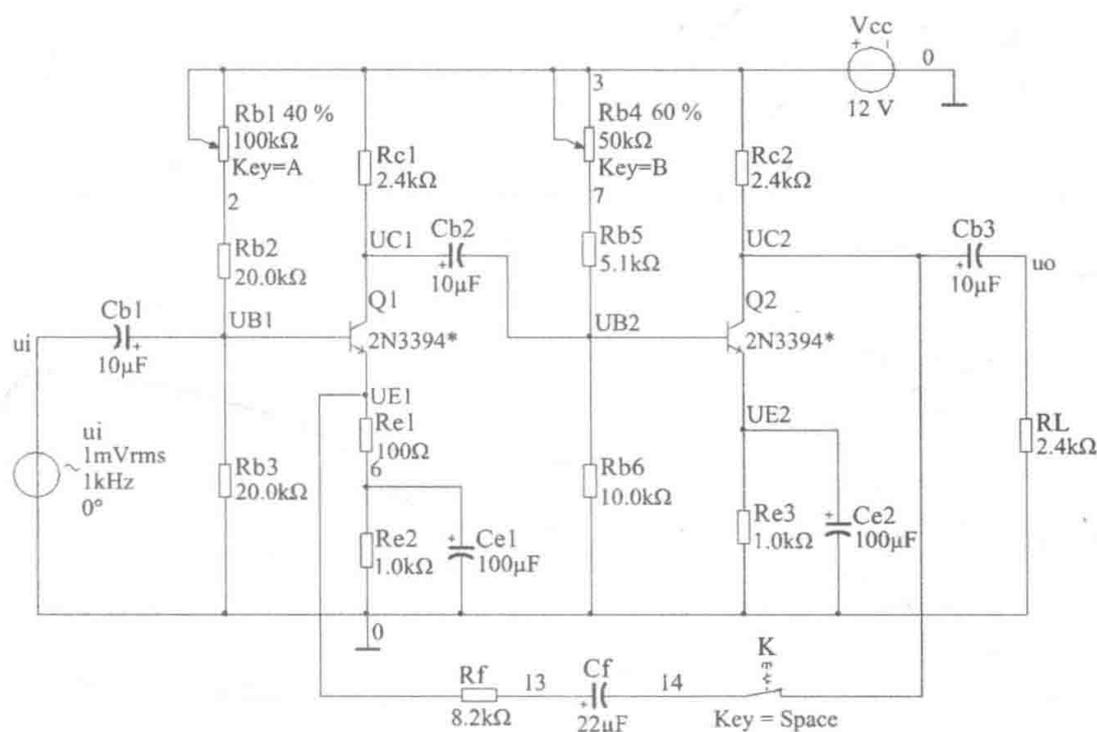


图 2-8-1 电压串联负反馈放大电路

通过实验试分析：

- (1) 无负反馈时两级放大电路的静态工作点。
- (2) 电路引入负反馈后对输出波形失真的改善。
- (3) 电路引入负反馈后对输入电阻和输出电阻的影响。

(4) 电路引入负反馈后对放大倍数和频带的影响。

六、实验步骤

(一) 编辑原理图

建立电路文件, 设计电路界面, 选取并放置元器件, 在原理图编辑区中搭接电路图, 并按照图 2-8-1 电路所示修改各元器件参数。电位器变动的速度设置为 1%。

(二) 设置电路分析并仿真

1. 静态工作点的设置与调整

双击电阻“Rf”, 在属性对话框的“Fault”选项卡中, 选中“Open”, 并勾选端点“1”, 如图 2-8-2 所示。然后单击“OK”按钮, 完成使放大电路处于无负反馈放大状态的设置。通过键盘上的 A、B 键设置电位器 R_{b1} 的百分比为 40%, 设置电位器 R_{b1} 的百分比为 60%。

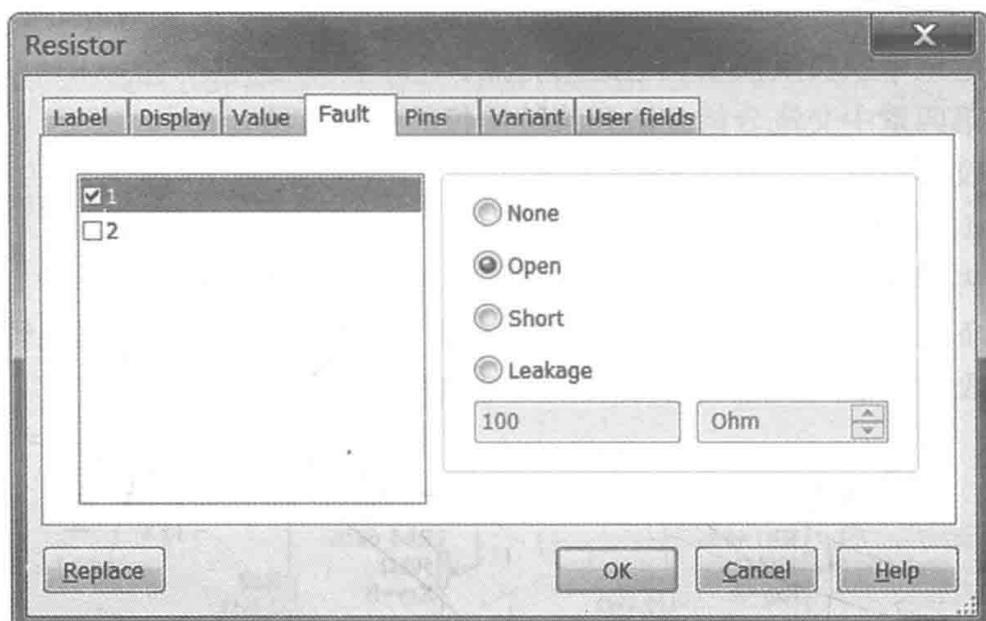


图 2-8-2 设置反馈电阻“Rf”断开

DC Operating Point

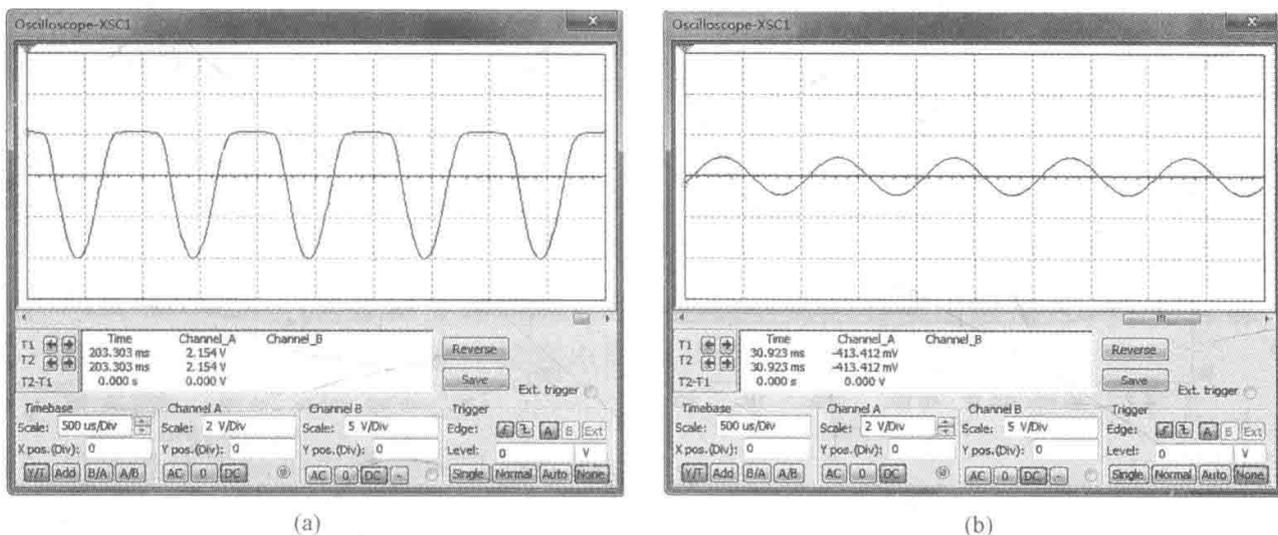
DC Operating Point		
1	@qq1[ic]	1.69889 m
2	@qq2[ic]	1.75028 m
3	V(uc1)-V(ue1)	6.01960
4	V(uc2)-V(ue2)	6.01695

图 2-8-3 无负反馈时两级放大电路的静态工作点

选择菜单项“Simulate\Analysis\DC Operating Point Analysis”, 在“Output”选项卡中选择各三极管集电极电流 I_C , 集、射间电压 U_{CE} , 点击“Add”按钮和“Add expression...”按钮添加到分析变量列表; 设置好分析参数后, 点击“Simulate”仿真按钮, 得到如图 2-8-3 所示的仿真结果。分析仿真数据可知, 两级电路的静态工作点合适, 放大电路可以正常工作。

2. 借助示波器观察负反馈对输出波形失真的改善

取出一台示波器, 连接在整个电路的输出端 u_o , 打开仿真开关 , 双击示波器图标, 打开示波器面板, 观察示波器显示的输出波形。增大输入信号 u_i 的幅值为 10mV, 使得输出波形出现明显失真, 如图 2-8-4 (a) 所示; 然后修改反馈电阻“Rf”的状态为“None”, 设置放大电路闭环工作状态, 得到如图 2-8-4 (b) 所示的输出波形。



(a) (b)

图 2-8-4 无负反馈和有负反馈时的输出波形

(a) 无负反馈时的输出波形；(b) 有负反馈时的输出波形

对比有无反馈两种情况下的输出波形可知：放大电路没有引入负反馈时，输出波形出现了明显的饱和失真；当放大电路引入负反馈后，输出波形的失真明显减小，已基本看不出失真，但输出幅值减小。

3. 进行 AC Analysis 分析，观察负反馈对输入电阻和输出电阻的影响

(1) 观察负反馈对输入电阻的影响。设置放大电路为开环状态，启动 AC Analysis，频率参数设置同本章实验四，“Output”设置为“V(ui)/I(VI)”，仿真得到开环状态时输入电阻的频率特性曲线，如图 2-8-5 (a) 所示。

设置放大电路为闭环状态，电路引入负反馈，再进行如上操作，得到如图 2-8-5 (b) 所示闭环时输入电阻的幅频特性曲线。

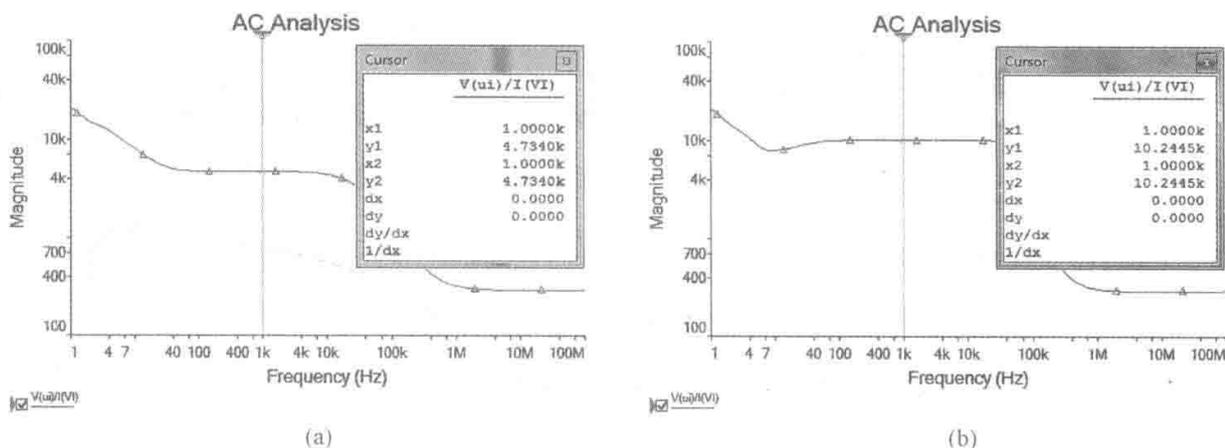


图 2-8-5 无负反馈和有反馈时输入电阻的幅频特性曲线

(a) 无负反馈时输入电阻的幅频特性曲线；(b) 有负反馈时输入电阻的幅频特性曲线

由图 2-8-5 可知，放大电路引入负反馈后输入电阻增大了。

(2) 观察负反馈对输出电阻的影响。根据放大电路输出电阻的定义，需要将信号源短接、负载开路，然后在输出端加上一个信号源，在放大电路开环和闭环两种情况下，进行同上操作，得到如图 2-8-6 所示的有无负反馈时输出电阻的幅频特性曲线。注意：为了看清楚有负反馈时输出电阻的特性，图 2-8-6 (b) 中将纵坐标放大了 10 倍（即改变纵坐标的显示范围）。

由图 2-8-6 可知，放大电路引入负反馈后输出电阻减小了。

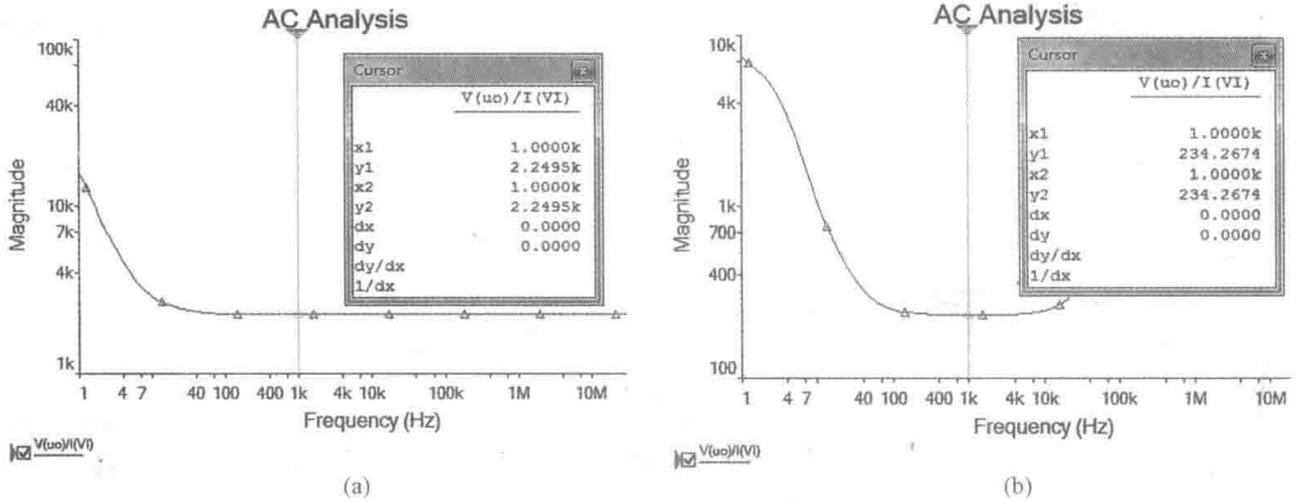


图 2-8-6 无负反馈和有反馈时输出电阻的幅频特性曲线

(a) 无负反馈时输出电阻的幅频特性曲线; (b) 有负反馈时输入电阻的幅频特性曲线

4. 采用波特图仪分析电路引入负反馈后对放大倍数和频带的影响

从仪表栏中取出一台波特图仪接在电路中, 设置放大电路为开环状态, 打开仿真开关 , 双击波特图仪图标, 打开波特图仪面板, 合理设置面板参数, 在波特图仪面板上显示的无负反馈时放大电路的幅频特性曲线如图 2-8-7 所示。

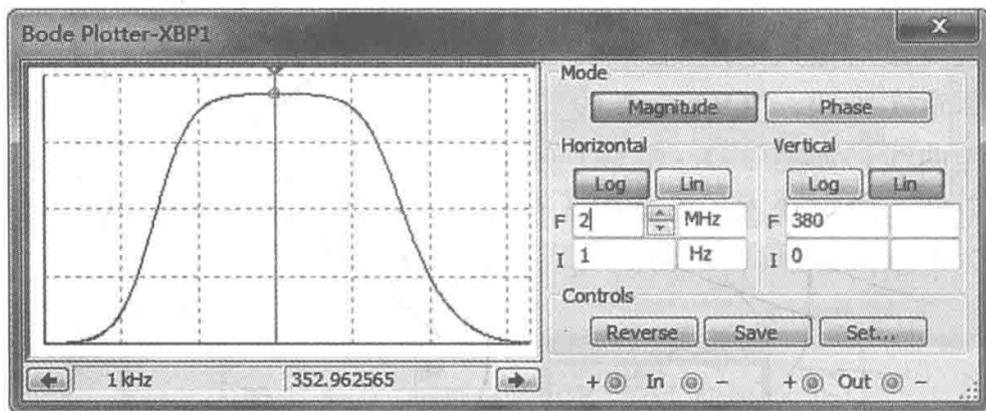


图 2-8-7 无负反馈时放大电路的幅频特性曲线

移动波特图仪的游标, 可以读出没有负反馈时的放大倍数约为 352.96, 上、下限频率分别为 28.444kHz 和 43.101Hz, 从而得到带宽约为 28.401kHz。

设置放大电路为闭环状态, 放大电路引入负反馈, 打开仿真开关 , 波特图仪显示的幅频特性曲线如图 2-8-8 所示。

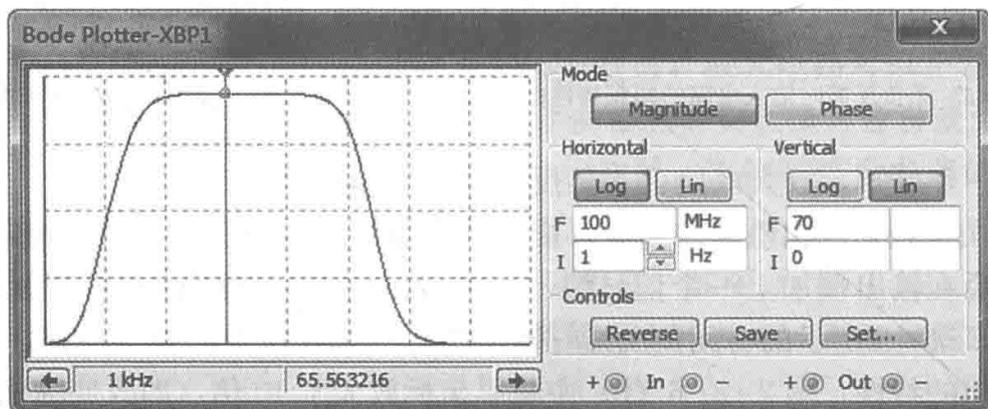


图 2-8-8 有负反馈时放大电路的幅频特性曲线

移动波特图仪的游标，可以读出没有负反馈时的放大倍数约为 65.56，上、下限频率分别为 166.488kHz 和 17.737Hz，从而得到带宽约为 166.47kHz。由此可见，引入负反馈以后，放大电路的放大倍数有所降低，但带宽变宽了。

七、注意事项

- (1) 本实验电路结构比较复杂，在连接电路原理图时要注意各元器件间的连接。
- (2) 测量输出电阻时要将信号源短路，负载开路，并且在输出端接入一个信号源。
- (3) 在使用波特图仪时要正确连接在电路中，并且合理设置面板参数。

八、思考题

- (1) 总结电压串联负反馈放大电路的特点。
- (2) 如何采用加表法测量负反馈对放大电路输出电阻的影响？
- (3) 如何采用瞬态分析测量引入负反馈前、后电路的电压放大倍数？
- (4) 试采用交流分析方法，观察引入负反馈后对带宽的影响。
- (5) 本实验电路中，当输入信号 u_i 的幅值增大时，为什么会先出现饱和失真？如果继续增大输入信号 u_i 的幅值，输出会出现什么现象？

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、什么是反馈？画出负反馈电路的组成框图。

二、简答

- (1) 负反馈放大电路的四种组态分别是什么？
- (2) 说明负反馈对放大电路的那些指标产生什么影响？
- (3) 若想电路获得较高输入电阻，应引入何种反馈组态？
- (4) 已知负反馈放大电路的开环增益 $A_u = 10^5$ ，若要求该电路的闭环增益 $A_{uf} = 100$ ，反馈系数 F 应该取多大？

三、电路如图 2-8-1 所示。假设电路中 $R_{b1} = 40\text{k}\Omega$ 、 $R_{b2} = 30\text{k}\Omega$ ，三极管的参数 $\beta_1 = \beta_2 = 80$ 、 $r_{be1} = 1.2\text{k}\Omega$ 、 $r_{be2} = 1.3\text{k}\Omega$ 。试回答：

- (1) 当开关 K 断开时，分别计算两级基本放大电路的静态工作点。
- (2) 估算两级放大电路的 A_u 、 R_i 和 R_o 。
- (3) 当开关 K 闭合时，判断电路中引入了哪种组态的反馈，并将瞬时极性和反馈信号标注在电路上。
- (4) 在深度负反馈的条件下估算负反馈放大电路的 A_{uf} 、 R_{if} 和 R_{of} 。
- (5) 说明此种反馈类型对电路输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 的影响。

实验日期：_____

实验九 有源带通滤波器的设计

一、实验目的

- (1) 熟悉用运算放大器、电阻和电容设计带通滤波器的方法，并合理选择 Multisim 分析方法对电路进行必要的分析。
- (2) 掌握使用 Multisim 测试有源滤波器幅频特性和相频特性的方法。
- (3) 掌握在 Multisim 中改变中心频率的方法。

二、实验类型

设计型实验。

三、预习要求

- (1) 复习教材中有关有源滤波器的组成和工作原理，认真完成预习报告的相关内容。
- (2) 阅读第四章内容，熟悉 Multisim 中波特图仪的使用方法。

四、实验原理

滤波器是一种能使有用频率信号通过而同时抑制无用频率信号电子装置。工程上常用来作信号处理、数据传送和抑制干扰等。滤波电路有低通滤波器 (LPF)、高通滤波器 (HPF)、带通滤波器 (BPF) 和带阻滤波器 (APF) 四种。

低通滤波器是用来通过低频信号，衰减或抑制高频信号 (具体电路参照教科书二阶有源滤波电路)。与低通滤波器相反，高通滤波器用来通过高频信号，衰减或抑制低频信号。只要将低通滤波电路中起滤波作用的电阻、电容互换，即可变成二阶有源高通滤波器。带通滤波器是只允许在某一个通频带范围内的信号通过，而比通频带下限频率低和比上限频率高的信号均加以衰减或抑制。典型的带通滤波器可以从二阶低通滤波器中将其中一级改成高通而构成。带阻滤波器的性能和带通滤波器相反，即在规定的频带内，信号不能通过 (或受到很大衰减或抑制)，而在其余频率范围，信号则能顺利通过。

五、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

六、实验内容

- (1) 在 Multisim 上搭接自行设计的有源带通滤波电路，并计算各转折点的转折频率。
- (2) 采用适当的分析方法，分析出所设计有源带通滤波器的幅频特性和相频特性。
- (3) 采用适当的方法测量带通滤波器的输入电阻。
- (4) 对设计指标进行测试，若不能达到设计要求，按指标要求修改电路并调试，直到测试结果达到设计指标的要求。

七、注意事项

- (1) 集成运算放大器是双电源供电的集成器件，连接电路时要注意正、负电源不要接反。
- (2) 在使用波特图仪时要注意正确连接在电路中。

八、思考题

- (1) 如果所设计电路的放大倍数一定，输入信号的大小是否可以任意值？

- (2) 如何设计中心频率可调的带通滤波器?
- (3) 将一个低通滤波器和一个高通滤波器进行级联, 可否构成带滤波器? 这时对低通截止频率和高通截止频率有什么要求?
- (4) 讨论运算放大器的闭环放大倍数对有源滤波器特性的影响。

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、滤波电路的功能是什么？滤波电路有几种？主要性能指标有哪些？画出理想滤波电路的幅频特性曲线。

二、如何识别集成运放所组成的电路是否为有源滤波电路？它与运算电路有什么相同之处和不同之处？

三、设计一个二阶 RC 有源带通滤波器，要求：中心频率 $f_0 = 1\text{kHz}$ ，通带增益 $A_{up} = 2$ ，品质因数 $Q = 1$ 。写出该有源带通滤波器的设计过程，画出电路图。

实验日期：_____

实验十 RC 桥式振荡电路的分析与设计

一、实验目的

- (1) 学习用集成运放构成 RC 桥式振荡电路的方法。
- (2) 学习 RC 串并联网络选频特性的测试方法。
- (3) 学习使用 Multisim 中虚拟示波器测量振荡频率的方法。
- (4) 理解稳幅环节在振荡电路中的作用。

二、实验类型

设计型实验。

三、预习要求

(1) 复习教材中有关 RC 正弦波振荡电路的电路组成和工作原理，认真完成预习报告的相关内容。

(2) 计算图 2-10-1 所示 RC 桥式振荡电路的振荡频率。

四、实验仪器

装有 NI Multisim 12 软件的计算机一台。

五、实验内容和要求

RC 桥式正弦波振荡电路实验电路如图 2-10-1 所示。

通过实验试分析：

(1) 测试 RC 串并联网络的选频特性，并测出其固有频率 f_0 。

(2) 断开开关 K，移动电位器 R4 滑动头，观察 RC 正弦波振荡电路的输出波形，测试振荡周期，并说明电位器 R4 在电路中的作用。

(3) 改变开关 K 的状态，移动电位器 R4 滑动头，观察 RC 正弦波振荡电路的输出波形，说明稳幅环节的作用。

(4) 对自行设计的正弦波振荡电路进行 Multisim 仿真和调试。

六、实验步骤

1. 借助于波特图仪，测试 RC 串并联网络的选频特性

建立电路文件，设计电路界面，选取并放置元器件，在原理图编辑区中搭接 RC 串并联网络，在输入端加交流信号源“Vi”，连接波特图仪，打开仿真开关 ，双击波特图仪图标，打开波特图仪面板，修改波特图仪相关面板参数，观察波特图仪显示的幅频特性曲线，如图 2-10-2 所示。

启动游标，测得幅频特性曲线的特征频率 $f_0 = 160.372.5\text{Hz}$ ，RC 串并联网络固有频率

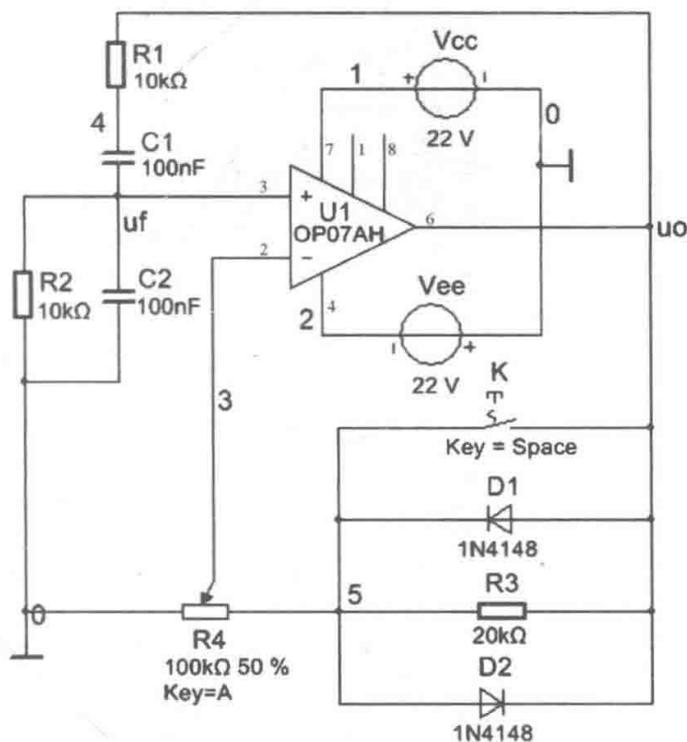


图 2-10-1 RC 桥式正弦波振荡电路

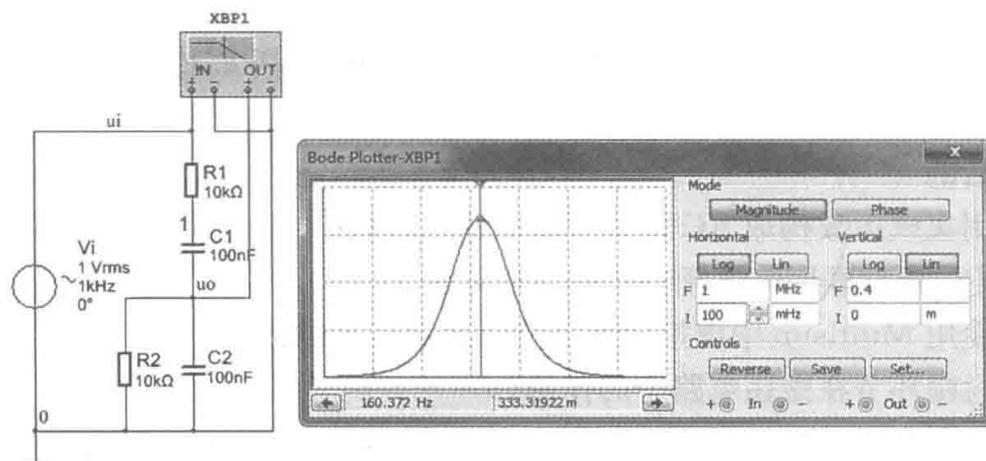


图 2-10-2 RC 串并联网络的幅频特性曲线

的理论计算值 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 159\text{Hz}$ ，两者基本相同。

2. 借助示波器，观察 R4 对振荡电路的影响，观察振荡电路的输出波形，测量振荡频率重新建立一个电路文件，在原理图编辑区中搭接图 2-10-1 所示电路，并按图修改各元器件参数。

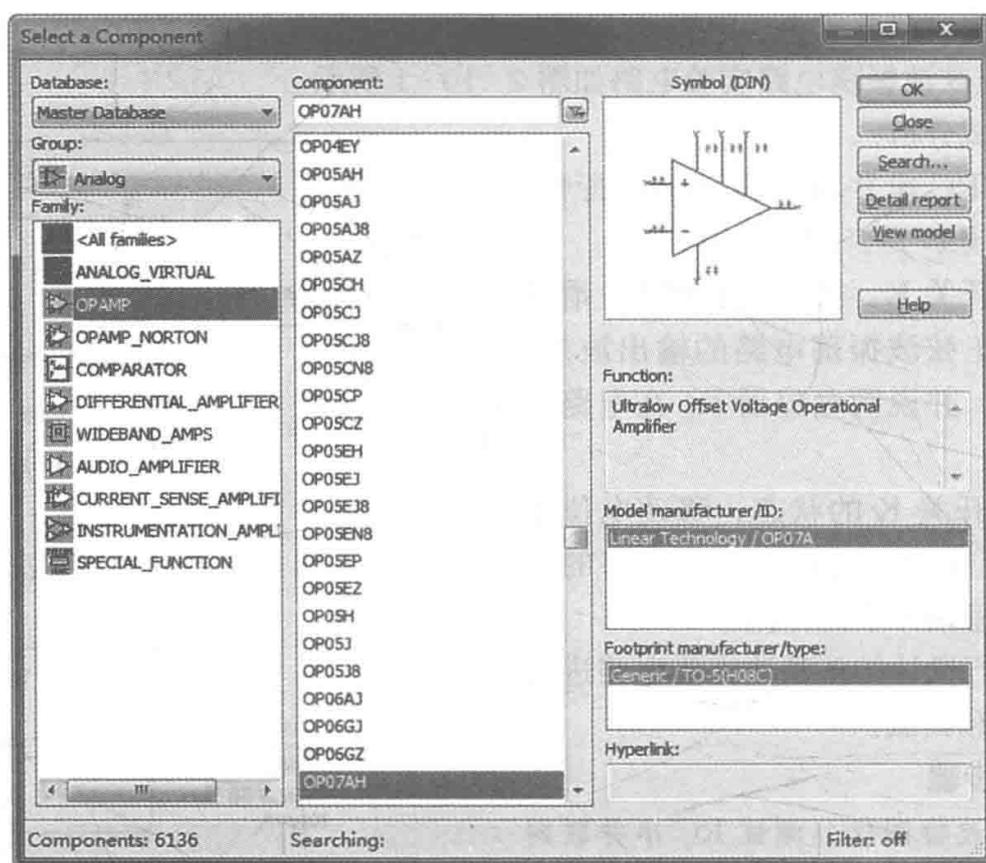


图 2-10-3 “Component Browser” 对话框

提示：集成运算放大器选用“OP07AH”，在基本元件库中点击“Place Analog”元件库按钮，如图 2-10-3 所示对话框，在“Family”列表中点击 OPAMP，在“Component”列表中选择“OP07AH”放在原理图编辑区的适当位置。

取出一台示波器，连接在如图 2-10-1 所示振荡电路的输出端“uo”。断开开关 K，打开仿真开关，双击示波器图标打开示波器面板，观察示波器显示的输出波形。改变电位

器 R4 滑动头的位置, 即按动键盘上的“a”键或“Shift+a”键, 可以观察振荡起振与稳定的过程, 如图 2-10-4 (a) 所示。当电位器 R4 设置为 38% 时, 在示波器上显示出如图 2-10-4 (b) 所示的振荡频率稳定的波形。

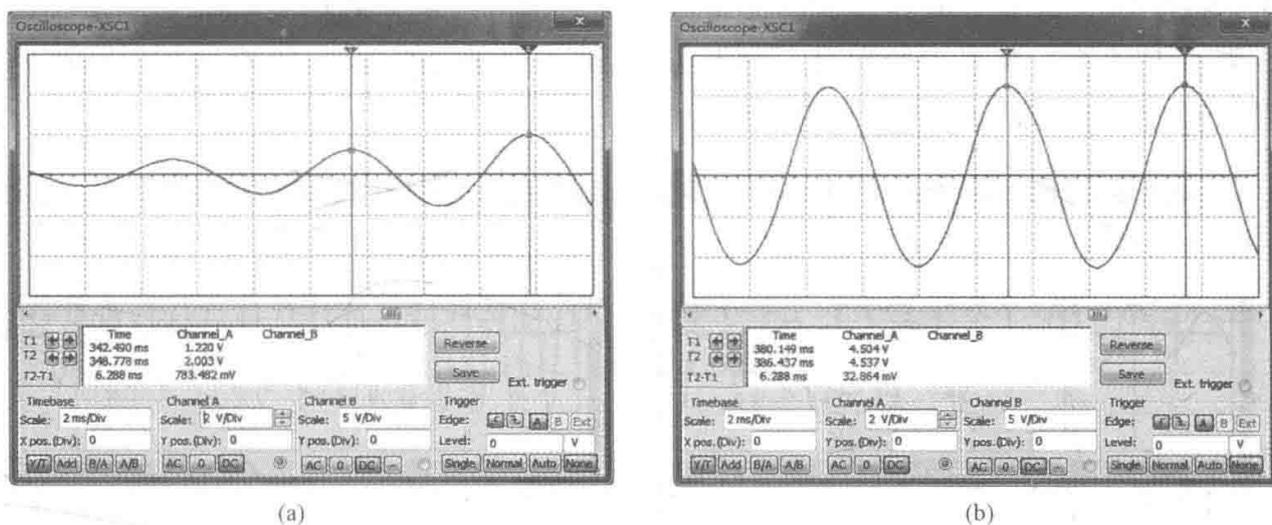


图 2-10-4 RC 振荡电路的输出波形

(a) RC 振荡电路的起过程; (b) RC 振荡电路的稳定过程

由图 2-10-4 (a) 可知, 改变电阻器 R4 的滑动头, 可以使得振荡电路满足起振条件 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$, 开始振荡。当 R4 的滑动头处于 38% 位置时, 电路满足相位平衡条件 $\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi$, 输出频率稳定的波形; 继续减小 R4 的百分数到 35% 时, 电路满足幅值平衡条件 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$, 输出最大幅值稳定的波形; 再减小, 输出失真, 如图 2-10-5 所示。

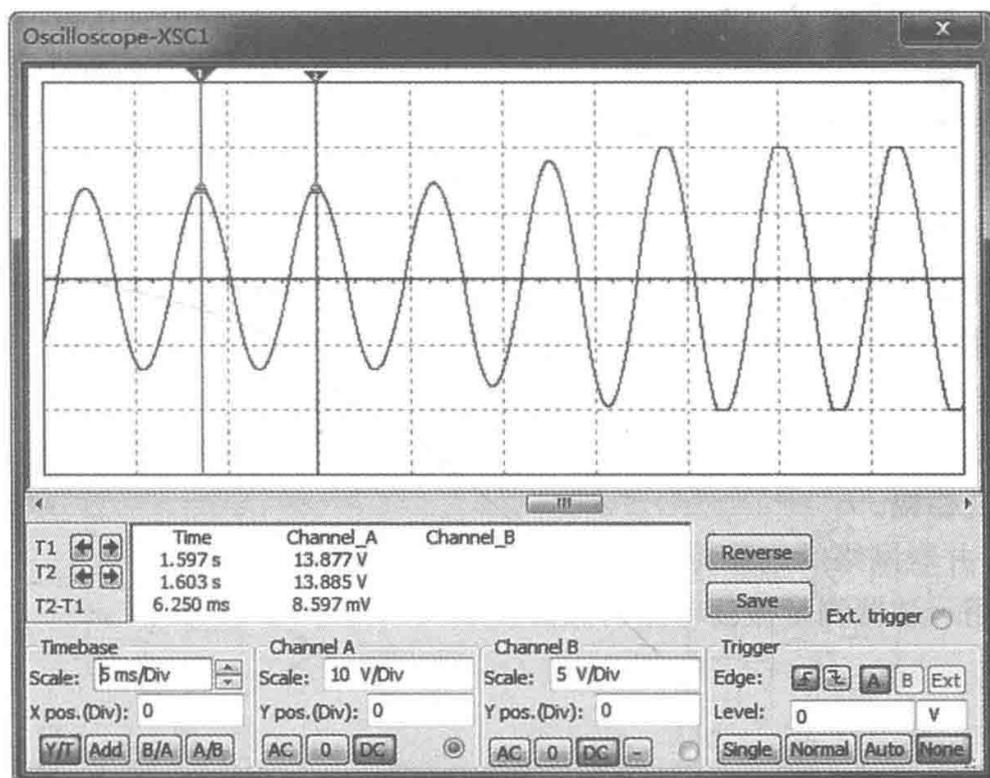


图 2-10-5 RC 振荡电路输出的稳定波形和失真波形

在图 2-10-5 中启动游标, 可以读出振荡波形的振荡周期 $T=6.25\text{ms}$, 可知振荡频率

$f=160\text{Hz}$, 与 RC 串并联网络的固有频率基本相同。

3. 借助示波器, 观察稳幅环节对振荡电路的影响

在振荡电路有最大稳定输出波形时, 闭合开关 K, 可以观察到振荡波形慢慢消失, 此时减小 R_4 的百分数到 32% 时在示波器又可以看到振荡的过程, 输出失真, 如图 2-10-6 (a) 所示。断开开关 K, 失真仍然存在, 增大 R_4 的百分数到 35% 时, 输出失真逐渐消失, 直至输出最大稳定的波形, 如图 2-10-6 (b) 所示。

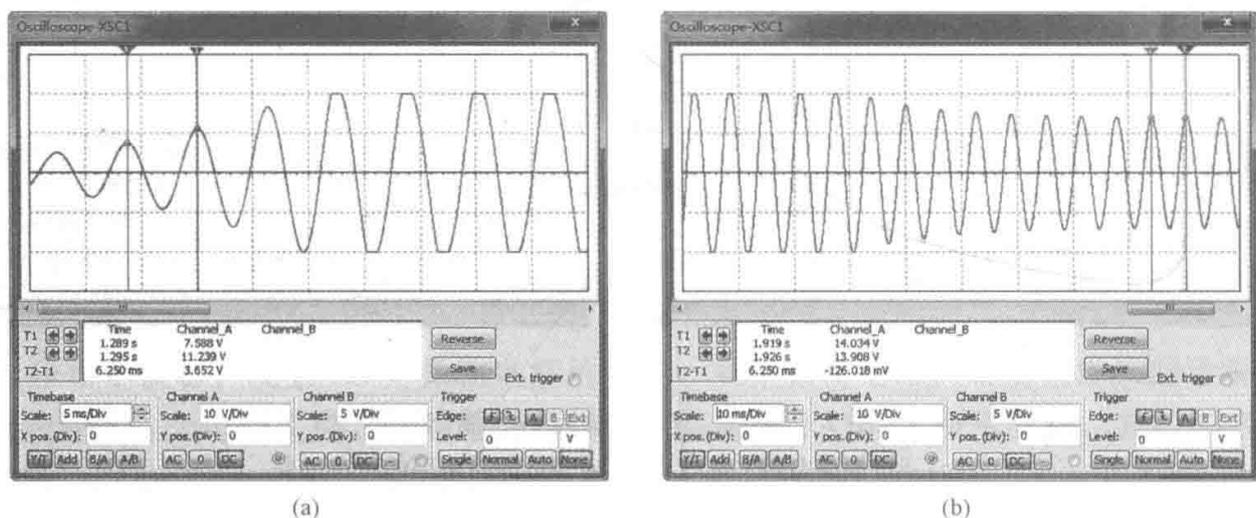


图 2-10-6 稳幅环节对振荡电路输出波形的影响

(a) K 闭合减小 R_4 百分数对输出波形的影响; (b) K 断开增大 R_4 百分数对输出波形的影响

4. 自行设计电路并调试

在 Multisim 中搭建自行设计的电路, 并采用适当的方法对设计指标进行测试, 若不能达到设计要求, 按指标要求修改电路并调试, 直到测试结果达到设计指标的要求。

七、注意事项

- (1) 连接电路原理图时集成运算放大器的正、负电源不要接反。
- (2) 连接电路原理图时二极管的阳极、阴极不要接反。
- (3) 在测试 RC 串并联网络的选频特性时要注意外接一个信号源。
- (4) 在使用波特图仪时要正确连接在电路中, 并且合理设置面板参数。

八、思考题

- (1) 如果电路没有起振, 应该改变哪些元器件的参数?
- (2) 说明稳幅环节在振荡电路中的作用。简述除了采用二极管实现稳幅之外, 还可以采用哪些措施实现稳幅。
- (3) RC 串并联网络的选频特性可以采用什么方法分析?
- (4) 如何用示波器测量振荡电路的振荡频率?

预 习 报 告

班级：_____ 姓名：_____ 学号：_____ 机位：_____ 成绩：_____

一、正弦波振荡电路的振荡条件是什么？

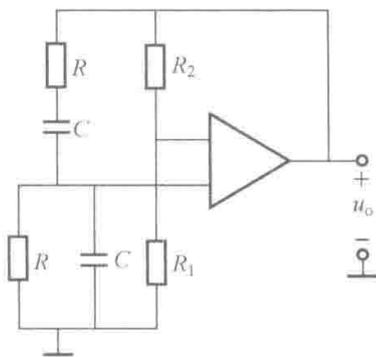
二、正弦波信号发生电路一般由几个部分组成？各部分的作用是什么？

三、典型 RC 串并联正弦波振荡电路产生的频率范围为_____，振荡频率的计算公式为_____；LC 正弦波振荡电路产生的频率范围为_____，振荡频率的计算公式为_____，常用的 LC 正弦波振荡电路有_____、_____和_____。

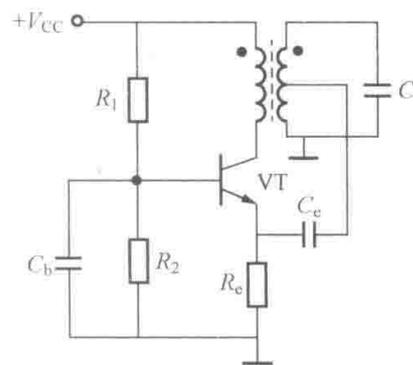
四、已知图示正弦波振荡电路，试回答：

1. 若图 (a) 所示电路能起振，请标出运放的同相端和反相端，并说明 R_2 和 R_1 需要满足什么关系；

2. 判断图 (b) 所示电路是否满足相位平衡条件。



(a)



(b)

五、设计一个振荡频率在 $500\text{Hz}\sim 1\text{kHz}$ 范围内可调的正弦波振荡电路，要求输出波形的振幅稳定、波形对称、无明显线性失真，并写出设计过程，画出电路图。

实验日期：_____

第三章 常用电子仪器仪表

第一节 示波器

示波器是一种电子图示测量仪器, 它可以将电压的变化作为一个时间函数描绘出来。可以说, 示波器是电压表的一种特殊形式, 而且它比一般电压表可提供更多的信息。

示波器可以用来显示被观测信号电压的波形, 还可对信号做时间和幅度方面的定量测试, 以及测量波形间相位, 是电子电路调试和电子设备检测中非常重要且有效的工具。

现代示波器分模拟示波器和数字示波器两类, 模拟示波器的使用可以参阅相关资料, 在此对 DS2000A 系列数字存储示波器的特点、面板、用户界面、功能和使用方法作简要说明。

一、数字存储示波器的特点

DS2000A 系列数字存储示波器是一款基于 Ultra Vision 技术的高性能、低带宽数字示波器, 具有极高的存储深度、超宽的动态范围、优异的波形捕获率和全面的触发功能, 同时兼具硬件波形录制功能和良好的显示效果。它是一种在通信、航天、国防、嵌入式系统、计算机、研究和教育等领域被广泛应用的调试仪器, 是 200MHz 带宽以内数字示波器中功能最齐全、指标最为优秀的代表。

DS2000A 系列数字存储示波器具有如下优点: 体积小巧、操作灵活、功耗较低, 有两个模拟通道, 而且模拟通道波形亮度可调, 带宽为 70MHz; 有独创 Ultra Vision 技术; 实时采样率最高达 2GSa/s、存储深度最高达 14Mpts, 波形捕获率达每秒 50000 个波形; 硬件实时的波形录制、回放、常开、分析功能, 最多可录制 65000 帧; 256 级灰度显示; 采用 8" 超宽屏彩色 TFT-LCD, 色彩逼真, 功耗低, 寿命长; 波形显示可以自动设置; 高达 16 种触发功能, 包含多种协议触; 标配并行解码, 提供多种串行解码选件; 自动测量 24 种波形参数, 带统计的测量功能; 精细的延迟扫描功能; 内嵌 FFT 功能; 通过/失败检测功能; 多重波形数学运算功能; 配有 USBDevice、USBHost、LAN 等接口, 支持远程命令控制; 符合 LXI-C 类仪器标准, 能够快速、经济、高效地创建和重新配置测试系统; 支持 U 盘存储和 PictBrige 打印机; 支持多国语言, 中英文输入; 嵌入式在线帮助系统, 方便信息获取、用户操作和使用。

二、DS2000A 系列示波器面板和用户界面简介

在使用 DS2000A 系列数字存储示波器以前, 先要了解示波器的操作面板, 以下内容对 DS2000A 系列的前面板、用户界面和仪器背部的操作及功能作简单的介绍和描述。

1. 前面板

DS2000A 系列示波器面板上包括旋钮和功能按键。显示屏左侧按键为测量菜单操作键, 右侧按键为功能菜单操作键, 通过这些按键用户可以设置当前菜单的不同选项。其他按键为功能键, 通过这些按键用户可以进入不同的功能菜单或直接获得特定的功能应用。

DS2000A 系列数字存储示波器前面板如图 3-1-1 所示。图中编号功能说明如下:

①测量菜单软键;

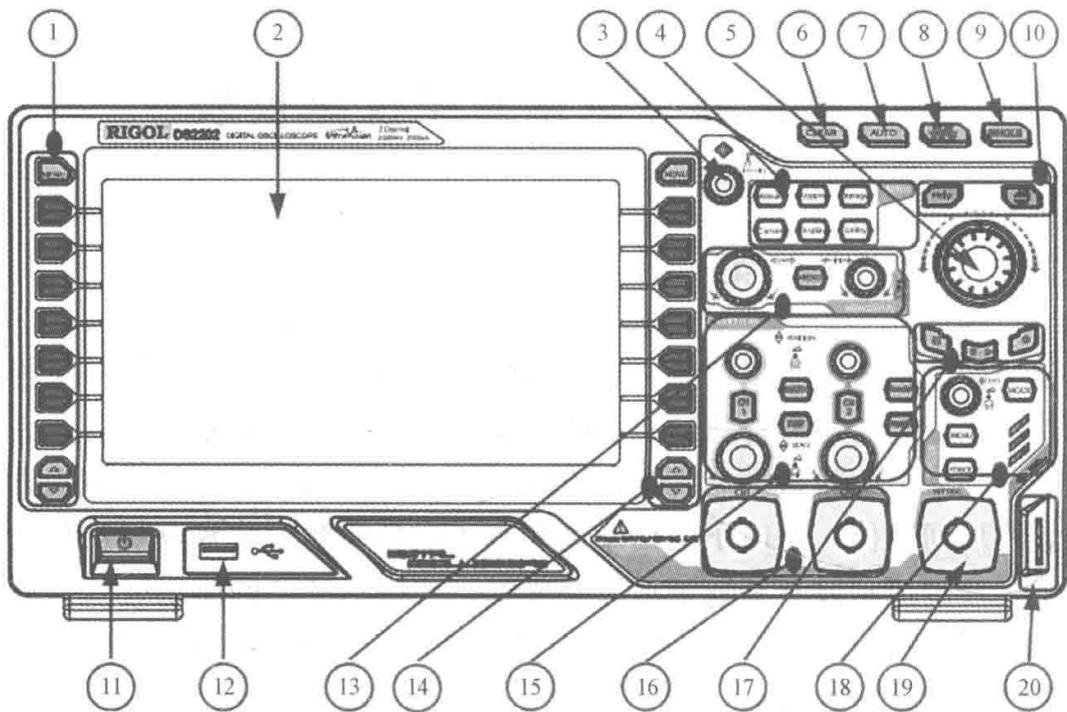


图 3-1-1 DS2000A 系列数字存储示波器前面板

- ②LCD;
- ③万能旋钮;
- ④功能菜单键;
- ⑤导航旋钮;
- ⑥全部清除键;
- ⑦波形自动显示;
- ⑧运行/停止控制键;
- ⑨单次触发控制键;
- ⑩内置帮助/打印键;
- ⑪电源键;
- ⑫USB Host 接口;
- ⑬水平控制区;
- ⑭功能菜单设置软键;
- ⑮垂直控制区;
- ⑯模拟通道输入区;
- ⑰垂直控制系统;
- ⑱触发控制区;
- ⑲外触发输入端;
- ⑳探头元件。

2. 后面板

DS2000A 系列数字存储示波器后面板如图 3-1-2 所示。DS2000A 系列编号功能说明如下:

- ①手柄: 垂直拉起该手柄, 可方便提携示波器; 不需要时, 向下轻按手柄即可。
- ②LAN: 通过该接口将示波器连接到网络中, 对其进行远程控制。本示波器符合 LX I

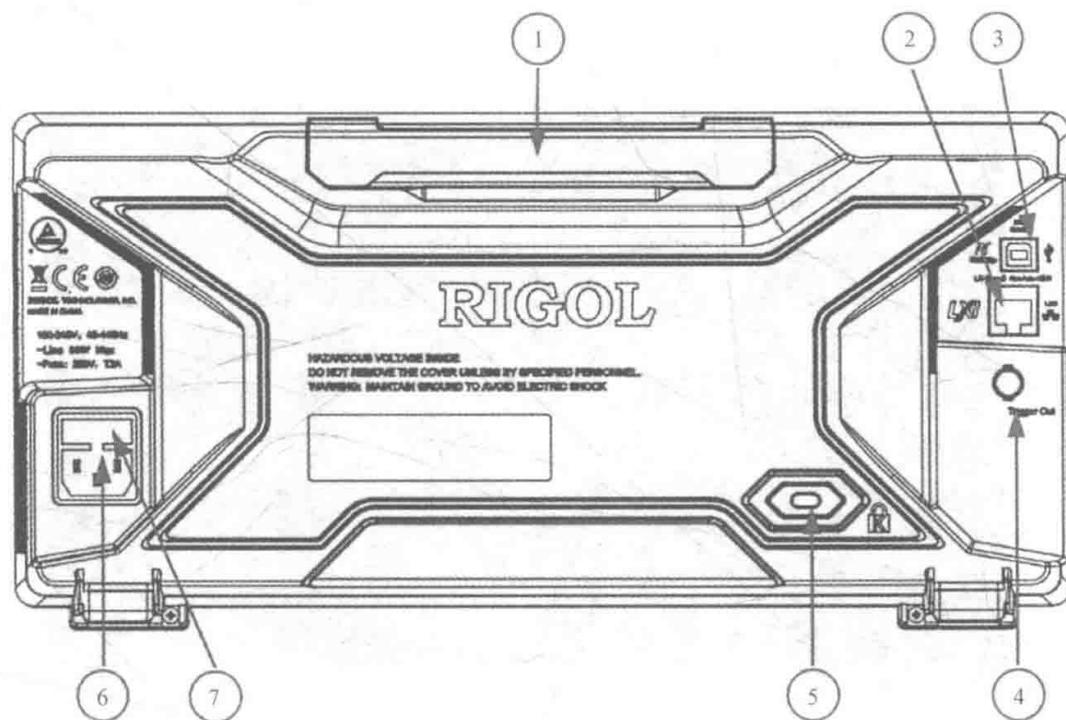


图 3-1-2 DS2000A 系列数字存储示波器后面板

CORE 类仪器标准，可快速搭建测试系统。

③USB Device：通过该接口可将示波器连接至 PictBridge 打印机以打印波形数据，或连接 PC 机，通过上位机软件对示波器进行控制。

④触发输出：示波器产生一次触发时，可通过该接口输出一个反映示波器当前捕获率的信号。

⑤锁孔：可以使用安全锁，通过该锁孔将示波器锁定在固定位置。

⑥AC 电源插孔：AC 电源输入端。该示波器的供电要求为 100~240V，45~440Hz。请使用附件提供的电源线将示波器连接到 AC 电源中，按下前面板电源键即可开机。

⑦熔丝：如需更换熔丝，请使用符合规格的熔丝。本示波器的熔丝规格为 250V、T2A。更换熔丝的操作方法如下：关闭仪器，断开电源，拔出电源线；使用小一字螺丝刀插入电源插口处的凹槽，轻轻撬出熔丝座；取出熔丝，更换指定规格的熔丝，然后将熔丝座安装回原处。

3. 用户界面

DS2000A 系列数字存储示波器界面显示区如图 3-1-3 所示。DS2000A 系列编号功能说明如下：

①自动测量选项：提供 12 种水平（HORIZONTAL）测量参数和 12 种垂直（VERTICAL）测量参数。按下屏幕左侧的软键即可打开相应的测量项。连续按下【MENU】软键，可切换水平和垂直测量参数。

②通道标记/波形：不同通道用不同的颜色标识，通道标记和波形的颜色一致。

③运行状态：可能的状态包括：RUN（运行）、STOP（停止）、T'D（已触发）、WAIT（等待）和 AUTO（自动）。

④水平时基：表示屏幕水平轴上每格所代表的时间长度；使用水平  SCALE 可以修改该参数，可设置范围为 2ns~1ks。

⑤采样率/存储深度：显示当前示波器使用的采样率以及存储深度；使用水平

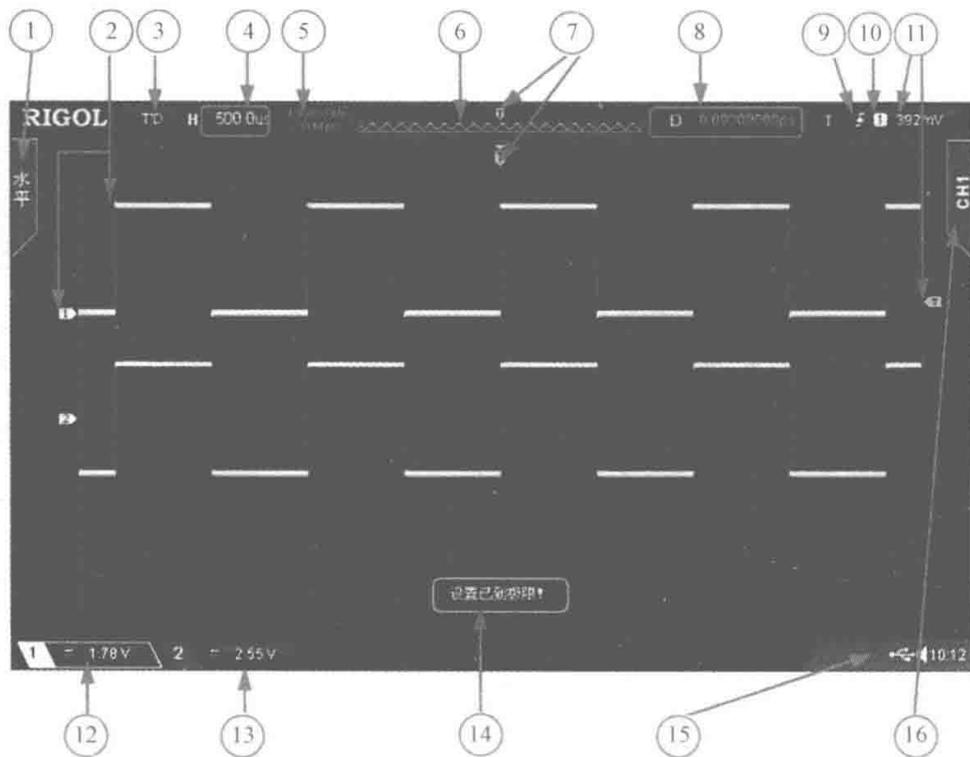


图 3-1-3 DS2000A 系列数字存储示波器界面显示区

⑥ SCALE 可以修改该参数。

⑥ 波形存储器：提供当前屏幕中的波形在存储器中的位置，示意图如图 3-1-4 所示。

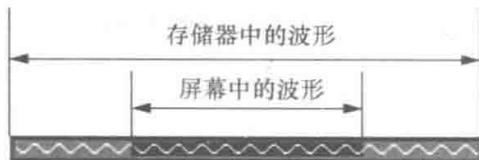


图 3-1-4 波形在存储器中的位置示意图

⑦ 触发位置：显示波形存储器和屏幕中波形的触发位置。

⑧ 触发位移：使用水平 POSITION 可以调节该参数。按下旋钮时参数自动设置为“0”。

⑨ 触发类型：显示当前选择的触发类型及触发条件设置。选择不同触发类型时显示不同的标识。例如，表示在“边沿触发”的上升沿处触发。

⑩ 触发源：显示当前选择的触发源（CH1 - CH2、EXT 或市电）。选择不同触发源时，显示不同的标识，并改变触发参数区的颜色。例如，表示选择 CH1 作为触发源。

⑪ 触发电平：触发信源选择模拟通道时，需要设置合适的触发电平。屏幕右侧的为触发电平标记，右上角为触发电平值；使用触发 LEVEL 修改触发电平时，触发电平值会随的上下移动而改变。

注意：斜率触发、欠幅脉冲触发和超幅触发时，有两个触发电平标记（和）。

⑫ CH1 垂直挡位：显示屏幕垂直方向 CH1 每格波形所代表的电压；使用垂直 SCALE 可以修改该参数；会根据当前的通道设置给出如下标记：通道耦合（如）、带宽限制（如）。

⑬ CH2 垂直挡位：显示屏幕垂直方向 CH2 每格波形所代表的电压；使用垂直 SCALE 可以修改该参数；会根据当前的通道设置给出如下标记：通道耦合（如）、带宽限制（如）。

⑭ 消息框：显示提示消息。

⑮通知区域：显示系统时间、声音图标和 U 盘图标。

系统时间：以“hh:mm (时:分)”的格式显示。在打印或存储波形时，输出文件将包含该时间信息。按“【Utility】→系统→系统时间”，通过格式“yyyy-mm-dd hh-mm-ss (年-月-日 时-分-秒)”设置。

声音图标：声音打开时，该区域显示；按【Utility】→声音，可以打开或关闭声音。

U 盘图标：当示波器检测到 U 盘时，该区域显示.

⑯操作菜单：按下任一软键可激活相应的菜单。下面的符号可能显示在菜单中：

：表示可以旋转多功能旋钮修改参数值。多功能旋钮的背光灯在参数选择有效时变亮。

：表示可以用修改参数值。的背灯在参数输入有效时变亮。

：表示可以用导航旋钮快速调节/定位参数。

：表示使用调节参数，然后按下选中参数。

：表示当前菜单有若干选项。

：表示当前菜单有下一层菜单。

：按下该键可以返回上一级菜单。

注意：操作菜单左下角的网格中也可能出现方向键（表示可以打开下一页菜单）和（表示可以打开上一页菜单）。

三、探头

DS2000A 系列数字存储示波器的探头如图 3-1-5 所示。

进行任何测量前，将探头连接到示波器并将接地端接地。在使用探头时避免触电，应使手指保持在探头主体上防护装置的后面，在探头连接到电压电源时不可接触探头顶部的金属部分。示波器测量的信号是对“地”的参考电压，接地端请正确接地、不可造成短路。

图 3-1-5 所示的探头衰减开关控制探头有不同的衰减系数，它影响信号的垂直刻度。“探头检查”功能验证探头衰减选项是否与探头的衰减匹配，可按下垂直菜单按钮（如【CH1】按钮），选择与探头衰减系数匹配的探头选项。示波器探头选项默认的设置为×10，确保探头上的“衰减”开关与示波器中的“探头”选项匹配，例如，当“衰减”开关设置为×1 时，探头将示波器的带宽限制到 10MHz（各探头规格不一）。要使用示波器的全带宽，确保将开关设定到×10。

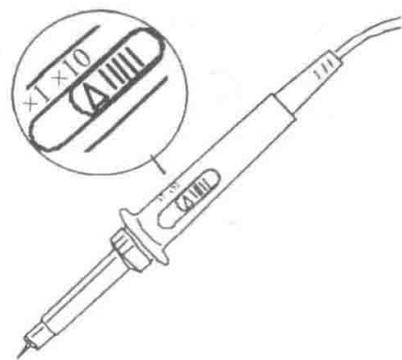


图 3-1-5 示波器探头

四、DS2000A 系列示波器的功能检查

为了验证示波器是否正常工作，执行一次快速功能检查。DS2000A 系列数字存储示波器提供了频率为 1kHz，峰—峰值约为 3V 的方波信号作为自检信号，可以通过 CH1~CH2 通道显示该自检信号，操作步骤进行如下：

(1) 打开示波器电源，示波器执行所有自检项目，并确认通过自检；按下按钮。探头选项默认的衰减设置为×10。

(2) 将示波器探头上的开关设定到×1，并将探头与示波器的通道 1 (CH1) 连接。将

探头连接器上的插槽对准 CH1 同轴电缆插接件 (BNC) 上的凸键, 按下去即可连接, 然后向右旋转以拧紧探头。将探头基准导线 (黑夹子) 连接到“探头元件”接地端, 将探头端部 (红夹子或钩子) 连接到“探头元件”补偿信号输出端上, 如图 3-1-6 所示。

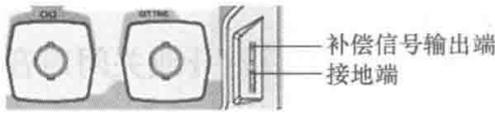


图 3-1-6 功能检测连接示意图

(4) 用同样方法检查其他通道。如实际显示的方波形状与上图不相符, 请执行“探头补偿”。

五、探头补偿

首次使用探头时, 应进行探头补偿调节, 使探头与示波器输入通道匹配。未经补偿或补偿偏差的探头会导致测量偏差或错误。探头补偿步骤如下:

(1) 执行上述“功能检查”中的步骤 (1) ~ (3)。

(2) 检查所显示的波形形状并与图 3-1-8 所示波形进行对比。

(3) 用非金属质地的改锥调整探头上的低频补偿调节孔, 直到显示的波形如上图“补偿正确”。

六、DS2000A 系列示波器的功能简介

DS2000A 系列数字存储示波器整个操作区分为垂直控制系统、水平控制系统、触发控制系统、运行控制、单次触发控制、波形自动设置、万能旋钮、功能菜单、清除按钮、默认设置、帮助信息以及打印等多个部分。为了使读者更加快速的熟悉和使用 DS2000A 数字存储示波器, 下面将分区介绍每一按钮的功能。

1. 垂直控制系统

垂直控制系统如图 3-1-9 所示, 各按钮的功能介绍如下。

、: 模拟输入通道。2 个通道标签用不同颜色标识, 且屏幕中波形颜色和输入通道连接器的颜色相对应。按下通道按键可打开相应通道及其菜单, 连续按下两次可关闭该通道。

: 按下该键打开数学运算菜单, 可进行加、减、乘、除、FFT、逻辑、高级运算。

: 按下该键打开参考波形功能。可将实测波形和参考波形比较, 以判断电路故障。

垂直  POSITION: 修改当前通道波形的垂直位移。顺时针转动增大位移, 逆时针转动减小位移。修改过程中波形会上下移动, 同时屏幕左下角弹出的位移信息 (如 ) 实时变化。按下该旋钮可快速将垂直偏移归零。

垂直  SCALE: 修改当前通道的垂直挡位。顺时针转动减小挡位, 逆时针转动增大挡位。修改过程中波形显示幅度会增大或减小, 同时屏幕下方的挡位信息 (如 )

(3) 按下  按钮。几秒钟内, 屏幕会显示频率为 1kHz、峰—峰值约为 3V 的方波, 如图 3-1-7 所示。图中, CH1 通道的显示波形颜色为黄色。

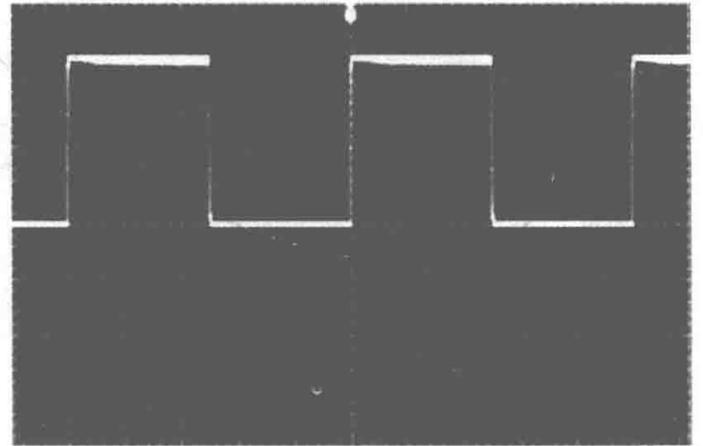


图 3-1-7 功能检查方波输出显示

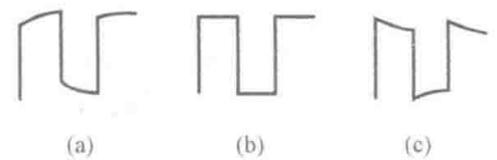


图 3-1-8 探头补偿对比波形
(a) 欠补偿; (b) 补偿适当; (c) 过补偿

实时变化。按下该旋钮可快速切换垂直挡位调节方式为“粗调”或“微调”。

、：解码功能按键。按下相应的按键打开解码功能菜单。DS2000A 系列支持并行解码和协议解码。

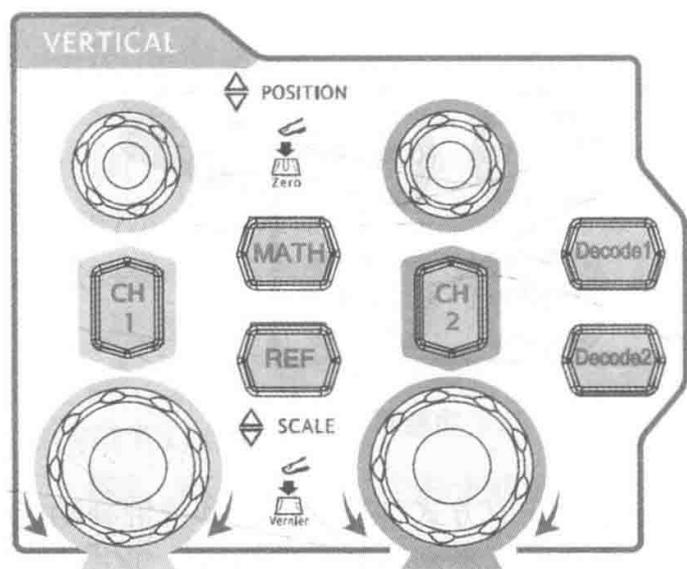


图 3-1-9 垂直控制系统

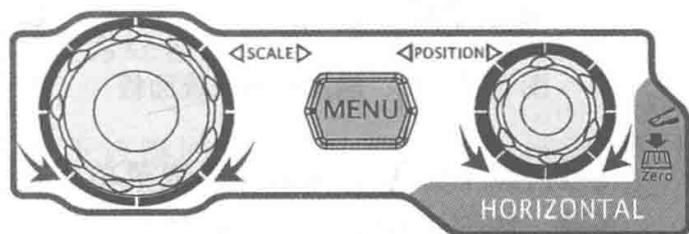


图 3-1-10 水平控制系统

2. 水平控制系统

水平控制系统如图 3-1-10 所示，各按钮的功能介绍如下。

：按下该键打开水平控制菜单。可开关延迟扫描功能，切换不同的时基模式和挡位的“微调”或“粗调”，以及修改水平参考设置。

水平  POSITION：修改触发位移。转动旋钮时触发点相对屏幕中心左右移动。修改过程中，所有通道的波形左右移动，同时屏幕右上角的触发位移信息（如 ）实时变化。按下该旋钮可快速复位触发位移（或延迟扫描位移）。

水平  SCALE：修改水平时基。顺时针转动减小时基，逆时针转动增大时基。修改过程中，所有通道的波形被扩展或压缩显示，同时屏幕上方的时基信息（如 ）实时变化。按下该旋钮可快速切换至延迟扫描状态。

3. 触发控制系统

触发控制系统面板如图 3-1-11 所示，各按钮的功能介绍如下。

：按下该键切换触发方式为 Auto、Normal 或 Single，当前触发方式对应的状态背光灯会变亮。

触发  LEVEL：修改触发电平。顺时针转动增大电平，逆时针转动减小电平。修改过程中，触发电平线上下移动，同时屏幕左下角的触发电平消息框（如 ）中的值实时变化。按下该旋钮可快速将触发电平恢复至零点。

：按下该键打开触发操作菜单。本示波器提供丰富的触发类型。

：在 Normal 和 Single 触发方式下，按下该键将强制产生一个触发信号。

4. 功能菜单

功能菜单面板如图 3-1-12 所示，各按钮的功能介绍如下。

：按下该键进入测量设置菜单，可设置测量设置、全部测量、统计功能等。按下屏

幕左侧的“MENU”软键，可打开 24 种波形参数测量菜单，然后按下相应的菜单软键快速实现“一键”测量，测量结果将显示在屏幕底部。

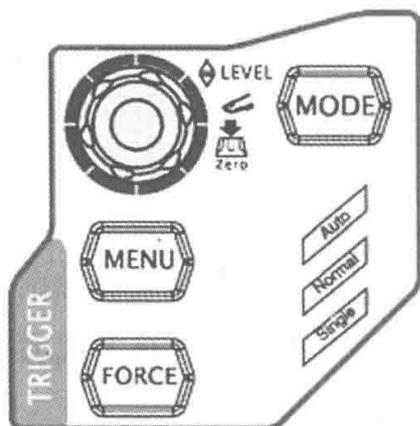


图 3-1-11 触发控制系统面板

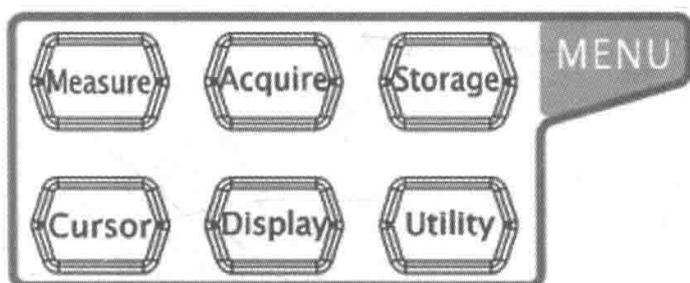


图 3-1-12 功能菜单面板

Acquire: 按下该键进入采样设置菜单。可设置示波器的获取方式、存储深度和抗混叠功能。

Storage: 按下该键进入文件存储和调用界面。可存储的文件类型包括轨迹存储、波形存储、设置存储、图像存储和 CSV 存储。支持内、外部存储和磁盘管理。

Cursor: 按下该键进入光标测量菜单。示波器提供手动测量、追踪测量和自动测量三种光标模式。

Display: 按下该键进入显示设置菜单。设置波形显示类型、余辉时间、波形亮度、屏幕网格、网格亮度和菜单保持时间。

Utility: 按下该键进入系统功能设置菜单。设置系统相关功能或参数，如接口、扬声器、语言等。此外，还支持一些高级功能，如通过/失败测试、波形录制和打印设置等。

5. 全部清除

CLEAR: 按下该键清除屏幕上所有的波形。如果示波器处于“RUN”状态，则继续显示新波形。

6. 波形自动显示

AUTO: 按下该键启用波形自动设置功能。示波器将根据输入信号自动调整垂直挡位、水平时基以及触发方式，使波形显示达到最佳状态。

注意：应用自动设置要求被测信号的频率不小于 50Hz，占空比大于 1%，且幅度至少为 20mVpp。如果超出此参数范围，按下该键后会弹出“Auto 失败！”消息框，而且菜单可能不显示快速参数测量功能。

7. 运行控制

RUN/STOP: 按下该键运行或停止波形采样。运行（RUN）状态下，该键黄色背光灯点亮；停止（STOP）状态下，该键红色背光灯点亮。

8. 单次触发控制

SINGLE: 按下该键将示波器的触发方式设置为“Single”。单次触发方式下，按**FORCE**键立即产生一个触发信号。

9. 万能旋钮

调节波形亮度：非菜单操作时（菜单隐藏），转动该旋钮可调整波形显示的亮度。亮度

可调范围为 0%~100%。顺时针转动增大波形亮度，逆时针转动减小波形亮度。按下旋钮将波形亮度恢复至 50%。也可按  → 波形亮度，使用该旋钮调节波形亮度多功能旋钮：菜单操作时，该旋钮背光灯变亮，按下某个菜单软键后，转动该旋钮可选择该菜单下的子菜单，然后按下旋钮可选中当前选择的子菜单。该旋钮还可以用于修改参数、输入文件名等。

10. 导航旋钮

对于某些可设置范围较大的数值参数，该旋钮提供了快速调节/定位的功能。顺时针（逆时针）旋转增大（减小）数值；内层旋钮可微调，外层旋钮可粗调。

例如，在回放波形时，使用该旋钮可以快速定位需要回放的波形帧（“当前帧”菜单）。类似的菜单还有触发释抑、脉宽设置、斜率时间等。

11. 波形录制、回放/暂停和停止

：录制。按下该键开始波形录制，按键背灯为红色。此外，打开录制常开模式时，该按键背灯点亮。

：回放/暂停。在停止或暂停的状态下，按下该键回放波形，再次按下该键暂停回放，按键背灯为黄色。

：停止。按下该键停止正在录制或回放的波形，按键背灯为橙色。

12. 打印

：按下该键打印屏幕或将屏幕保存到 U 盘中。若当前已连接 PictBridge 打印机，并且打印机处于闲置状态，按下该键将执行打印功能；若当前未连接打印机，但连接 U 盘，按下该键则将屏幕图形以指定格式保存到 U 盘中；同时连接打印机和 U 盘时，打印机优先级较高。

注意：DS1000Z 仅支持 FAT32 格式的 Flash 型 U 盘。

13. 帮助信息

：按下该按键开启帮助信息功能。在此基础上依次按下各功能菜单键即可显示相应菜单的帮助信息。若要显示各功能菜单下子菜单的帮助信息，则需先打开当前菜单界面；然后按下“HELP”键，选中相应的子菜单键；再次按下该按键可关闭帮助信息功能。

七、信号的测量

示波器将显示电压相对于时间的图形，并帮助用户测量显示波形。测量方法有刻度测量、光标测量和自动测量三种。

1. 刻度测量

使用刻度测量方法能快速、直观地对被测波形做出估计。可以观察被测波形的幅度和周期，通过计算相关的横、纵刻度分度并乘以垂直挡位或水平时基挡位来进行简单的测量。例如，如果计算出波形的峰—峰之间有五个纵垂直刻度分度，并且已知垂直挡位为 100mV/分度，则可按照下列方法来计算峰—峰值电压：

$$5 \text{ 分度} \times 100\text{mV/分度} = 500\text{mV}$$

如果计算出波形两个前沿或两个后沿之间有四个横水平刻度分度，并且水平时基挡位为 250us/分度，则可按照下列方法来计算信号周期：

$$4 \text{ 分度} \times 250\mu\text{s/分度} = 1000\mu\text{s} = 1\text{ms}$$

2. 自动测量

DS2000A 系列数字存储示波器提供 24 种波形参数的自动测量，以及对测量结果的统计

和分析功能。此外,还可以用频率计实现更精确的频率测量。

(1) AUTO 后的快速测量。正确连接示波器后,输入有效信号,按下  键自动设置波形并打开如图 3-1-13 所示的功能菜单。功能菜单显示的各波形的含义如下:

 单周期:对当前信源进行单周期的“周期”和“频率”测量,并在屏幕下方显示测量结果。

 多周期:对当前信源进行多周期的“周期”和“频率”测量,并在屏幕下方显示测量结果。

 上升沿:对当前信源的“上升时间”进行测量,并在屏幕下方显示测量结果。

 下降沿:对当前信源的“下降时间”进行测量,并在屏幕下方显示测量结果。

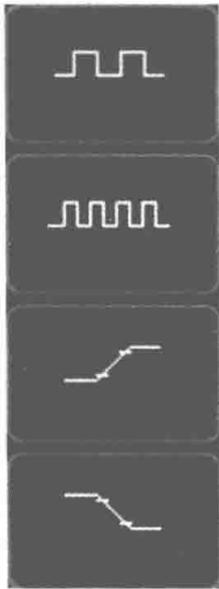


图 3-1-13 AUTO 后的功能菜单

注意: AUTO 功能要求被测信号的频率不小于 50Hz, 占空比大于 1%, 且幅度至少为 20mVpp。若被测信号参数超出此限定范围,按下该键后,弹出菜单可能不显示快速参数测量选项。

(2) 一键测量 24 种参数。按屏幕左侧的  软键下面对应的软键,可快速测量 24 种波形参数,实现“一键”测量,测量结果将显示在屏幕底部。

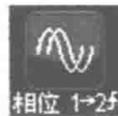
测量项中的时间和电压参数图标,以及屏幕中的测量结果,总是使用与当前测量通道 (“Measure” 键 → “信源选择”) 一致的颜色标记,而延迟和相位测量项总是用绿色标记,如图 3-1-14 所示。

注意:若测量显示为 “* * * * *”,表明当前测量源没有信号输入,或测量结果不在有效范围内(过大或过小)。

(3) 清除测量。如果当前已经打开 24 种测量参数中的任一项或多项,那么可以单独“删除”或“还原”前面 5 项参数,也可以“删除”或“还原”所有已打开的测量项。

注意:前 5 项参数是根据打开测量项的顺序决定的,不会因为删除了一个或多个测量项而改变。

参数图标:



测量结果:

Freq = 1.000kHz Max = 1.61 V Dly1→2f = 32.00ns Phase1→2f = 11.52 °

图 3-1-14 参数图标、测量结果与当前测量通道颜色一致

按 “Measure” 键 → “清除测量” → “测量项 n”,可以“删除”或“还原”指定的测量项。删除或还原一个测量项时,屏幕底部的测量结果会左移或右移一项显示。

按 “Measure” 键 → “清除测量” → “所有测量项”,可以“删除”或“还原”所有已打开的测量项。

注意:长按 “Measure” 键也可以快速清除或还原所有已打开的测量项。

3. 光标测量

光标是水平和垂直的标记。使用光标可以测量所选波形的 X 轴值（如时间）和 Y 轴值（如电压）。使用光标测量前，请将信号连接至示波器并获得稳定的显示。所有“自动测量”参数都可以通过光标测量实现。

按前面板的功能菜单“Cursor”→“光标模式”，使用万能旋钮选择所需的光标模式（默认为“关闭”），然后按下旋钮选中该模式。可选的模式包括手动、追踪和自动测量。

（1）光标手动测量方式。该模式下，将出现一对光标，可以手动调节光标测量指定源（CH1、CH2 或 MATH）波形中的一对 X（或 Y）值，光标间的 X 增量（或 Y 增量），以及 X 增量的倒数。

1) 按“Cursor”键→“模式”→“手动”，打开手动光标测量功能，测量结果将以如图 3-1-15 所示的形式显示在屏幕左上角。

2) 光标手动测量参数的步骤：

a. 选择光标类型

按“光标类型”软键，选择“X”或“Y”。X 型光标为一对垂直虚线，通常用于测量时间参数，而 Y 型光标为一对水平虚线，通常用于测量电压参数。

b. 选择测量源

按“信源”软键，选择模拟通道（CH1 或 CH2）、数学运算结果（MATH）中的波形进行测量。选择“无光标”则不显示光标。

c. 选择 X（Y）轴单位

当光标类型为 X 时，按“水平单位”键可以选择“s”、“Hz”、“°”或“%”。

“s”：选择该单位后，测量结果中的 CurA、CurB 和 ΔX 以“s”为单位， $1/\Delta X$ 以“Hz”为单位。

“Hz”：选择该单位后，测量结果中的 CurA、CurB 和 ΔX 以“Hz”为单位， $1/\Delta X$ 以“s”为单位。

“°”：选择该单位后，测量结果中的 CurA、CurB 和 ΔX 以“°”为单位。此时，按下“设置光标”软键，无论当前光标 A 和 B 处于什么位置，测量结果中 CurA 的值立即变为“0°”，CurB 和 ΔX 的值立即变为“360°”，同时屏幕上出现两条不可移动的光标线作为参考位置。

“%”：选择该单位后，测量结果中的 CurA、CurB 和 ΔX 以“%”为单位。此时，按下“设置光标”软键，无论当前光标 A 和 B 处于什么位置，测量结果中 CurA 的值立即变为“0%”，CurB 和 ΔX 的值立即变为“100%”，同时屏幕上出现两条不可移动的光标线作为参考位置。

当光标类型为 Y 型时，按“垂直单位”可以选择“信源单位”或“%”。

“信源单位”：选择该单位后，测量结果中的 CurA、CurB 和 ΔY 的单位自动设置为当前信源的单位。

“百分比”：选择该单位后，测量结果中的 CurA、CurB 和 ΔY 以“百分号”为单位。此时，按下“设置光标”软键，无论当前光标 A 和 B 处于什么位置，测量结果中 CurA 的值立即变为“0%”，CurB 和 ΔY 的值立即变为“100%”，同时屏幕上出现两条不可移动的光

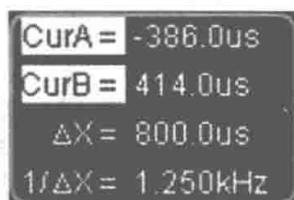


图 3-1-15 光标手动测量的结果

标线作为参考位置。

d. 调节光标位置（注意：在同一菜单页，您也可以连续按下 \curvearrowright 旋钮切换当前光标）

调节光标 A：按“Cursor A”软键，使用 \curvearrowright 调节光标 A 的位置，调节过程中测量结果将实时变化，可调节范围限制在屏幕范围内。

调节光标 B：按“Cursor B”软键，使用 \curvearrowright 调节光标 B 的位置，调节过程中测量结果将实时变化，可调节范围限制在屏幕范围内。

同时调节光标 A 和 B：按“Cursor AB”软键，使用 \curvearrowright 可同时调节光标 A 和 B 的位置，调节过程中测量结果将实时变化，可调节范围限制在屏幕范围内。（注意：您也可以连续按下 \curvearrowright 旋钮切换当前光标。）

3) 光标手动测量的实例

用手动光标测量一个方波的周期（ ΔX ）为 1ms，与自动测量周期相等，如图 3-1-16 所示。

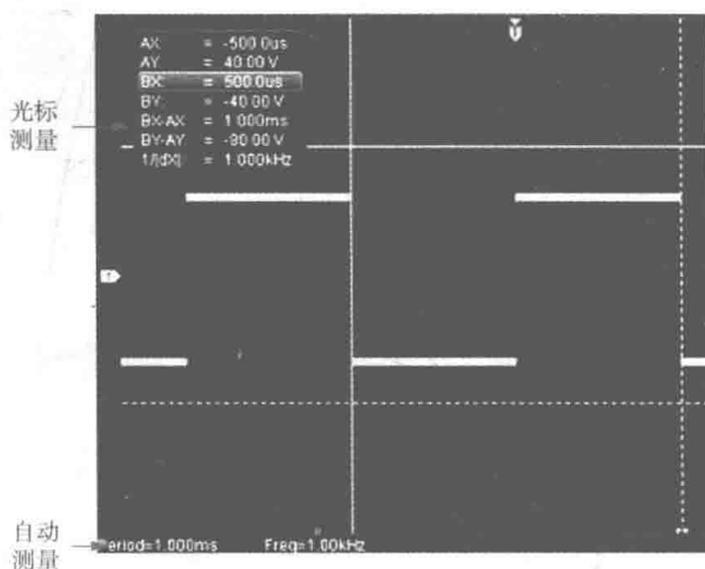


图 3-1-16 光标手动测量实例

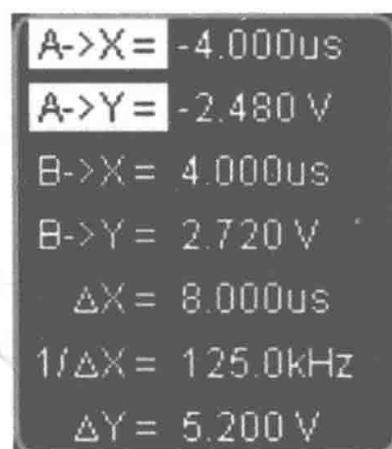


图 3-1-17 光标跟踪测量的结果

(2) 光标追踪测量。该模式下，将出现一对或两对光标。您可以调节两个光标（光标 A 和光标 B）分别测量两个不同信号的 X 值和 Y 值。光标 A 和光标 B 上测量的点分别用一个橙色的矩形和菱形标记。水平移动光标时，该标记会自动在波形上定位，水平扩展或压缩波形时，该标记会跟踪最后一次调节光标时所标记的点。

1) 按“Cursor”键 → “模式” → “追踪”，打开光标追踪功能，测量结果将以如图 3-1-17 所示的形式显示在屏幕左上角。

A->X：光标 A 处的 X 值，以触发位置为基准，以“s”或“Hz”（测量 FFT 波形时）为单位。

A->Y：光标 A 处的 Y 值，以通道接地点为基准，使用与当前信号源单位一样的单位。

B->X：光标 B 处的 X 值，以触发位置为基准，以“s”或“Hz”（测量 FFT 波形时）为单位。

B->Y：光标 B 处的 Y 值，以通道接地点为基准，使用与当前信号源单位一样的单位。

ΔX ：光标 A 和 B 的水平间距。

$1/\Delta X$: 光标 A 和 B 的水平间距的倒数。

ΔY : 光标 A 和 B 的垂直间距。

2) 光标手动测量参数的步骤

a. 选择测量源

按“光标 A”软键，选择模拟通道 (CH1 或 CH2) 或数学运算结果 (MATH) 中的波形为光标 A 的测量源 (只有已打开的通道才可选)。也可以选择“无”，即不使用光标 A。

按“光标 B”软键，选择模拟通道 (CH1 或 CH2) 或数学运算结果 (MATH) 中的波形为光标 B 的测量源 (只有已打开的通道才可选)。也可以选择“无”，即不使用光标 B。

b. 调节光标位置 (注意: 在同一菜单页, 您也可以连续按下 \curvearrowright 旋钮切换当前光标)

调节光标 A: 按“光标 A”软键, 使用 \curvearrowright 调节光标 A 的位置, 调节过程中测量结果将实时变化, 可调节范围限制在屏幕范围内。

调节光标 B: 按“光标 B”软键, 使用 \curvearrowright 调节光标 B 的位置, 调节过程中测量结果将实时变化, 可调节范围限制在屏幕范围内。

同时调节光标 A 和 B: 按“光标 AB”软键, 使用 \curvearrowright 可同时调节光标 A 和 B 的位置, 调节过程中测量结果将实时变化, 可调节范围限制在屏幕范围内。

注意: 垂直光标会实时追踪标记的点 (即随着波形的瞬时变化而上下跳动), 因此即使没有调节光标 Y 值也可能会变化。

3) 测量实例。用光标 A 和光标 B 分别测量 CH1 和 CH2 中的波形, 然后水平扩展或压缩波形, 可以发现光标会跟踪所标记的点, 如图 3-1-18 所示。

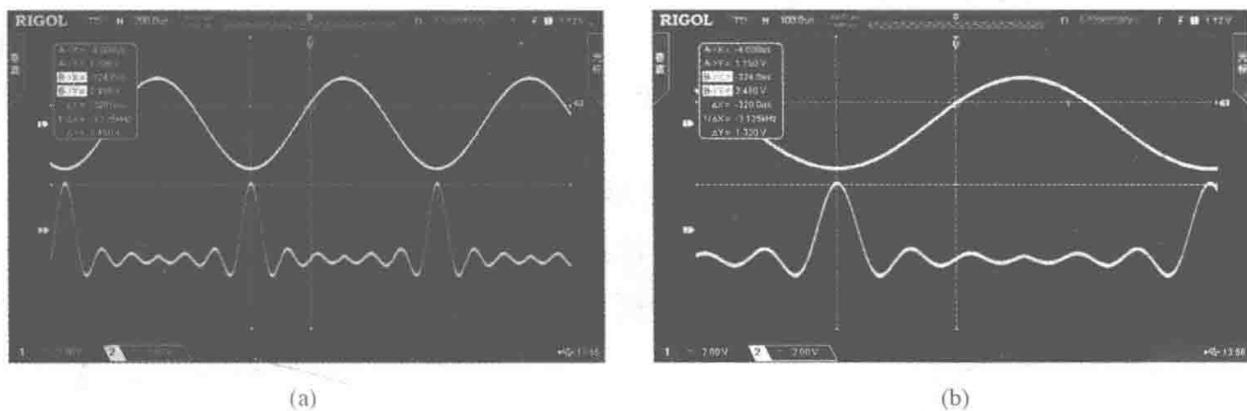


图 3-1-18 光标追踪测量水平扩展前后的显示结果

(a) 光标追踪测量水平扩展前; (b) 光标追踪测量水平扩展后

(3) 光标自动测量。该模式下, 将出现一个或多个光标。可以使用自动光标测量 24 种波形参数中的任一种。使用该模式前, 需要打开至少一种自动测量参数, 光标数量会随测量参数变化。

1) 按“Cursor”键→“模式”→“自动”, 屏幕显示的光标个数由当前打开的测量参数决定 (不同测量项所需光标数目不同)。

注意: 未选定自动测量参数或者测量源没有输入时均没有光标显示。水平扩展或压缩波形时, 光标也会相应变化。

如果后续又打开多个测量参数, 可通过“测量参数”软键切换最后打开的最多 5 项测量所需的参数, 当前选中的测量参数会突出显示在屏幕底部。

2) 光标自动测量实例。图 3-1-19 所示为光标自动测量 CH2 正弦信号频率的实例。

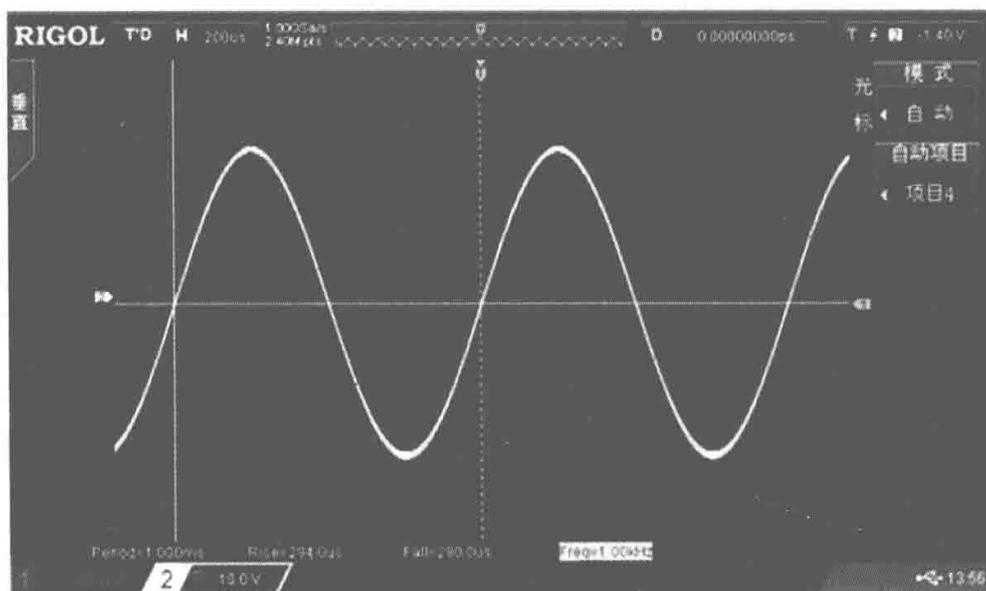


图 3-1-19 光标自动测量实例

八、异常排除

示波器在使用过程中可能出现的故障及排查方法。当遇到这些故障时，请按照相应的步骤进行处理，如无法处理，与 RIGOL 厂商联系。

1. 按下电源键后示波器仍然黑屏，没有任何显示

- (1) 检查电源开关是否打开。
- (2) 检查电源接头是否接好。
- (3) 检查熔丝是否熔断。如需更换熔丝，请使用符合本产品规格的熔丝。
- (4) 做完上述检查后，重新启动仪器。

2. 采集信号后画面中并未出现信号的波形

- (1) 检查探头是否与示波器和待测物正常连接。
- (2) 检查待测物是否有信号产生（可将探头补偿输出信号连接到有问题的通道，以确定是通道还是待测物的问题）。
- (3) 重新采集信号一次。

3. 测量的电压幅度值比实际值大或者小（一般在使用探头时才会出现）
检查通道的探头比设置是否与实际使用的探头衰减比例相符。

4. 有波形显示，但不能稳定下来

- (1) 检查触发信源：按前面板触发控制区（TRIGGER）的“MENU”→“信源”，确认所选的触发信源是否与实际使用的信号通道相符。
- (2) 检查触发类型：一般的信号应使用“边沿触发”方式，视频信号应使用“视频触发”方式。只有应用适合的触发方式，波形才能稳定显示。
- (3) 检查触发电平：将触发电平调整至信号的中间位置。
- (4) 改变触发释抑设置。

5. 按下 RUN/STOP 键无任何显示

检查前面板触发控制区（TRIGGER），确认触发方式是否为“普通”或“单次”挡，

且触发电平是否超出波形范围。如果是，将触发电平居中或者按“MODE”将触发方式设置为“自动”挡。

注：使用自动设置 AUTO 按钮可自动完成以上设置。

6. 波形显示呈阶梯状

(1) 水平时基挡位可能过低，增大水平时基以提高水平分辨率，可以改善显示。

(2) 若显示类型为“矢量”，采样点间的连线，可能造成波形阶梯状显示。按“Display”→“显示类型”，设置为“点”显示方式，即可解决。

7. 通过 USB 连接 PC 或 PictBridge 打印机失败

(1) 按“Utility”→“接口设置”→“USB”设备，检查当前设置是否与当前连接的设备匹配。

(2) 检查 USB 数据线是否与示波器和 PC 连接正常。

(3) 检查 USB 数据线是否完好，必要时重启示波器。

8. U 盘设备不能被识别

(1) 检查 U 盘是否可以正常工作。

(2) 确认使用的为 Flash 型 U 盘，本仪器不支持硬盘型 U 盘。

(3) 确认使用的 U 盘容量是否过大，本示波器推荐使用不超过 8GBytes 的 U 盘。

(4) 重新启动仪器后，再插入 U 盘设备进行检查。

第二节 信号发生器

信号发生器是为了模拟实际情况而设计的一种仪器，可以产生各种形状信号，如正弦信号、三角波信号、方波信号、TTL 和 CMOS 电平逻辑信号等。

一、信号发生器的原理

信号发生器的原理结构如图 3-2-1 所示。

由图 3-2-1 可知，信号发生器由信号产生电路、整形放大电路、输出衰减电路、驱动保护电路和电源电路五个部分组成。

1. 信号产生电路

信号产生电路是信号发生器的核心部

分。对于不同的信号发生器，其工作原理不尽相同。一般来讲，通用的信号发生器的信号产生电路的工作原理主要三种。

(1) 直接应用 RC（或 LC）形成。例如 XD2 系列信号发生器采用由 RC 组成的文氏电桥振荡器。

(2) 采用频率合成法实现，包括直接合成法和间接合成法。

直接合成法是利用一个（或几个）基准频率，通过一系列倍频器、分频器以及混频器来完成基本代数运算，以合成所需频率。

间接合成法是利用锁相技术将振荡器的输出频率与基准频率保持严格的有理数关系，被合成的输出频率最后取自受控的振荡器，而不是把基准频率进行直接代数运算。间接合成法又称锁相合成法，锁相环电路是实现间接合成法的基本电路。

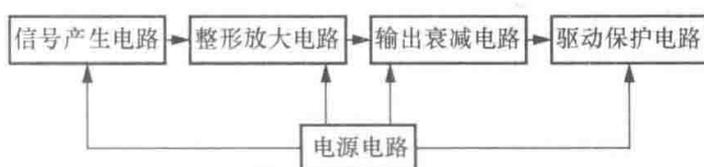


图 3-2-1 信号发生器原理结构

(3) DDS 数字合成方式。此种方式没有采用振荡元件, 是用数字合成方法产生一连串数据流, 再经过数模转换产生预先设定的模拟信号, 即利用程序软件产生所需信号。

例如, 要产生一个正弦波, 先将函数 $y = \sin x$ 进行数字量化, 再以 x 为地址、 y 为量化数据, 依次存入波形存储器。

这种方式可以产生连续或不连续、周期或非周期的任意信号, 具有很高的应用价值, 已广泛应用于通用信号发生器。

2. 整形放大电路

任何一个信号产生电路产生的波形, 都存在着信号幅度小、波形有失真等缺点, 需要进行再处理才能满足用户的要求。因此, 根据不同信号产生电路的要求, 有不同的整形放大电路。

对于直接应用 RC (或 LC) 形成的振荡电路而言, 由于振荡器输出信号幅度小, 波形失真小, 因此整形放大电路主要的工作是放大信号。频率合成法和 DDS 数字合成法实现的振荡器, 其输出信号谐波分量较多, 所以整形放大电路的工作除了放大信号外, 还必须对信号进行滤波处理。

3. 输出衰减、驱动保护及电源电路

输出衰减电路是由一系列电阻阻值按比例串联分压产生的。为了提高信号发生器的带载能力, 减小输出阻抗, 降低负载对信号发生器的影响, 部分信号发生器增加了电流放大驱动电路。电源电路是给整个信号发生器电路提供工作电源。

二、DG1000Z 系列任意波信号发生器面板功能简介

DG1000Z 系列任意波信号发生器是一种多功能、宽频带、采用 DDS 数字合成方式产生相应信号的信号发生器, 它可以产生最大频率可达 30MHz 的正弦信号、 $1\mu\text{Hz} \sim 25\text{MHz}$ 的方波信号、 $1\mu\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 的锯齿波信号、 $1\mu\text{Hz} \sim 25\text{MHz}$ 的脉冲波信号、30MHz 的高斯噪声信号以及 $1\mu\text{Hz} \sim 10\text{MHz}$ 的任意波信号; 可输出多种调制方式的波形; 可用于设置辅助功能参数和系统参数; 可存储或调用仪器状态或者用户编辑的任意波数据; 设有帮助同时有两种语言界面显示以及嵌入式在线帮助系统, 方便用户操作和使用; 设有 3.5 英寸彩色液晶显示屏, 可以显示当前功能的菜单和参数设置、系统状态以及提示消息等内容。

1. 前面板介绍

DG1000Z 系列任意波信号发生器的前面板如图 3-2-2 所示。

图 3-2-3 中, 信号发生器前面板上各功能按钮的介绍如下:

①电源键: 用于开启或关闭信号发生器。

②USBHost: 可插入 U 盘, 读取 U 盘中的波形文件或状态文件, 或将当前的仪器状态或编辑的波形数据存储到 U 盘中, 也可以将当前屏幕显示的内容以图片格式 (*.Bmp) 保存到 U 盘。

③菜单翻页键: 打开当前菜单的下一页。

④返回上一级菜单: 退出当前菜单, 并返回上一级菜单。

⑤CH1 输出连接器: BNC 连接器, 标称输出阻抗为 50Ω 。当  打开时 (背灯变亮), 该连接器以 CH1 当前配置输出波形。

⑥CH2 输出连接器: BNC 连接器, 标称输出阻抗为 50Ω 。当  打开时 (背灯变亮), 该连接器以 CH2 当前配置输出波形。

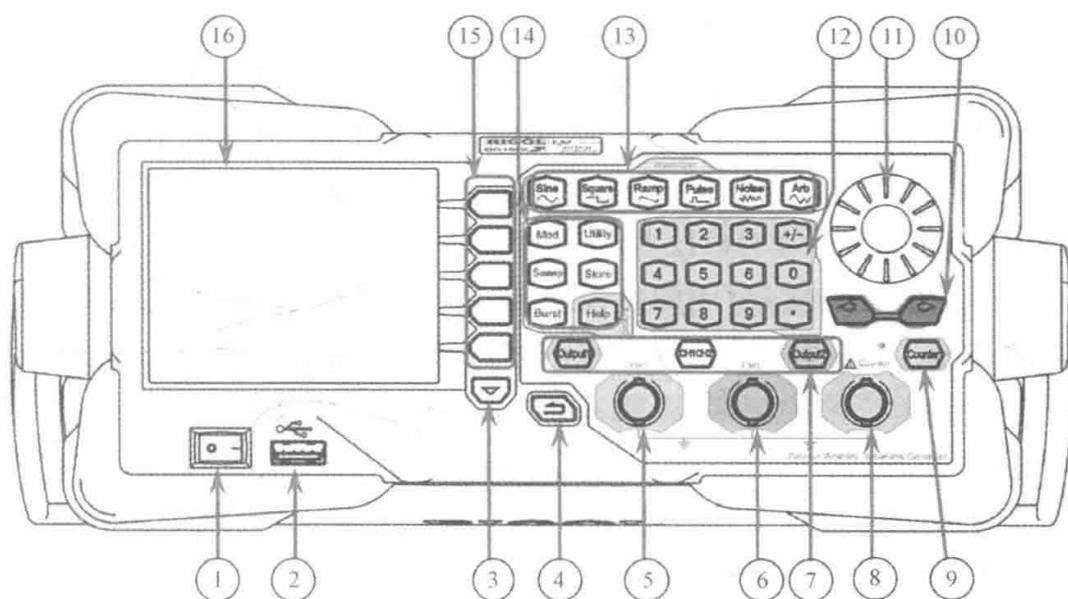


图 3-2-2 DG1000Z 系列任意波信号发生器的前面板图

⑦通道控制区：

：用于控制 CH1 的输出。按下该按键，背灯变亮，打开 CH1 输出。此时，[CH1] 连接器以当前配置输出信号；再次按下该键，背灯熄灭，此时，关闭 CH1 输出。

：用于控制 CH2 的输出。

按下该按键，背灯变亮，打开 CH2 输出。此时，[CH2] 连接器以当前配置输出信号；再次按下该键，背灯熄灭，此时，关闭 CH2 输出。

：用于切换 CH1 或 CH2 为当前选中通道。

注意：CH1 和 CH2 通道输出端设有过压保护功能，满足下列条件之一则产生过电压保护：仪器幅值设置大于 $2V_{pp}$ 或输出偏移大于 $|2VDC|$ ，输入电压大于 $\pm 11.5V \pm 0.1V$ ；仪器幅值设置小于等于 $2V_{pp}$ 或输出偏移小于等于 $|2VDC|$ ，输入电压大于 $\pm 3.5V \pm 0.1V$ 。产生过压保护时，屏幕弹出提示消息，输出关闭。

⑧ Counter：测量信号输入连接器，输入阻抗为 $1M\Omega$ 。用于接收频率计测量的被测信号。

注意：为了避免损坏仪器，输入信号的电压范围不得超过 $\pm 7V_{ac} + dc$ 。

⑨ ：用于开启或关闭频率计功能。按下该按键，背灯变亮，左侧指示灯闪烁，频率计功能开启；再次按下该键，背灯熄灭，此时，关闭频率计功能。

⑩ 方向键：使用旋钮设置参数时，用于移动光标以选择需要编辑的位；使用键盘输入参数时，用于删除光标左边的数字；存储或读取文件时，用于展开或收起当前选中目录；文件名编辑时，用于移动光标选择文件名输入区中指定的字符。

⑪ 旋钮：使用旋钮设置参数时，用于增大（顺时针）或减小（逆时针）当前光标处的数值；存储或读取文件时，用于选择文件保存的位置或用于选择需要读取的文件；文件名编辑时，用于选择虚拟键盘中的字符；在  → 选择波形 → 内建波形中，用于选择所需的内建任意波。

⑫ 数字键盘：包括数字键（0 至 9）、小数点（.）和符号键（+/-），用于设置参数。

注意：编辑文件名时，符号键用于切换大小写；连续按两次小数点可将用户界面以“*.Bmp”格式快速保存至 U 盘。

⑬波形键：

：提供频率从 $1\mu\text{Hz}$ ~ 60MHz 的正弦波输出。选中该功能时，按键背灯变亮。可以设置正弦波的频率/周期、幅值/高电平、偏移/低电平和起始相位。

：提供频率从 $1\mu\text{Hz}$ ~ 25MHz 并具有可变占空比的方波输出。选中该功能时，按键背灯变亮。可以设置方波的频率/周期、幅值/高电平、偏移/低电平、占空比和起始相位。

：提供频率从 $1\mu\text{Hz}$ ~ 1MHz 并具有可变对称性的锯齿波输出。选中该功能时，按键背灯变亮。可以设置锯齿波的频率/周期、幅值/高电平、偏移/低电平、对称性和起始相位。

：提供频率从 $1\mu\text{Hz}$ ~ 25MHz 并具有可变脉冲宽度和边沿时间的脉冲波输出。选中该功能时，按键背灯变亮。可以设置脉冲波的频率/周期、幅值/高电平、偏移/低电平、脉宽/占空比、上升沿、下降沿和起始相位。

：提供带宽为 60MHz 的高斯噪声输出。选中该功能时，按键背灯变亮。可以设置噪声的幅值/高电平和偏移/低电平。

：提供频率从 $1\mu\text{Hz}$ ~ 10MHz 的任意波输出。支持采样率和频率两种输出模式。多达 160 种内建波形。选中该功能时，按键背灯变亮。可设置任意波的频率/周期、幅值/高电平、偏移/低电平和起始相位。

⑭功能键：

：可输出多种已调制的波形。提供多种调制方式：AM（幅度调制）、FM（频率调制）、PM（相位调制）、ASK（幅移键控）、FSK（频移键控）、PSK（相移键控）和 PWM（脉宽调制）。支持内部和外部调制源。选中该功能时，按键背灯变亮。

：可产生正弦波、方波、锯齿波和任意波（DC 除外）的 Sweep 波形。支持线性、对数和步进 3 种 Sweep 方式。支持内部、外部和手动 3 种触发源。提供频率标记功能，用于控制同步信号的状态。选中该功能时，按键背灯变亮。

：可产生正弦波、方波、锯齿波、脉冲波和任意波（DC 除外）的 Burst 波形。支持 N 循环、无限和门控 3 种 Burst 模式，默认类型为 N 循环。噪声也可用于产生门控 Burst。支持内部、外部和手动 3 种触发源。脉冲串类型、触发源和波形的关系见表 3-2-1。选中该功能时，按键背灯变亮。

表 3-2-1

脉冲串类型、触发源和波形的关系

类型	触发源	载波波形
N 循环	内部/外部/手动	正弦、方波、锯齿波、脉冲、任意波（直流除外）
无限	外部/手动	正弦、方波、锯齿波、脉冲、任意波（直流除外）
门控	外部	正弦、方波、锯齿波、脉冲、噪声、任意波（直流除外）

：用于设置辅助功能参数和系统参数。选中该功能时，按键背灯变亮。

：可存储或调用仪器状态或者用户编辑的任意波数据。内置一个非易失性存储器（C 盘），并可外接一个 U 盘（D 盘）。选中该功能时，按键背灯变亮。

：要获得任何前面板按键或菜单软键的帮助信息，按下该键后，再按下你所需要获

得帮助的按键。

注意：当仪器工作在远程模式时，该键用于返回本地模式。

⑮菜单软键：与其左侧显示的菜单一一对应，按下该软键激活相应的菜单。

⑯LCD显示屏：3.5英寸TFT（320×240）彩色液晶显示屏，显示当前功能的菜单和参数设置、系统状态以及提示消息等内容，详细信息请参考“用户界面”一节。

2. 后面板介绍

DG1000Z系列任意波信号发生器的后面板如图3-2-3所示。

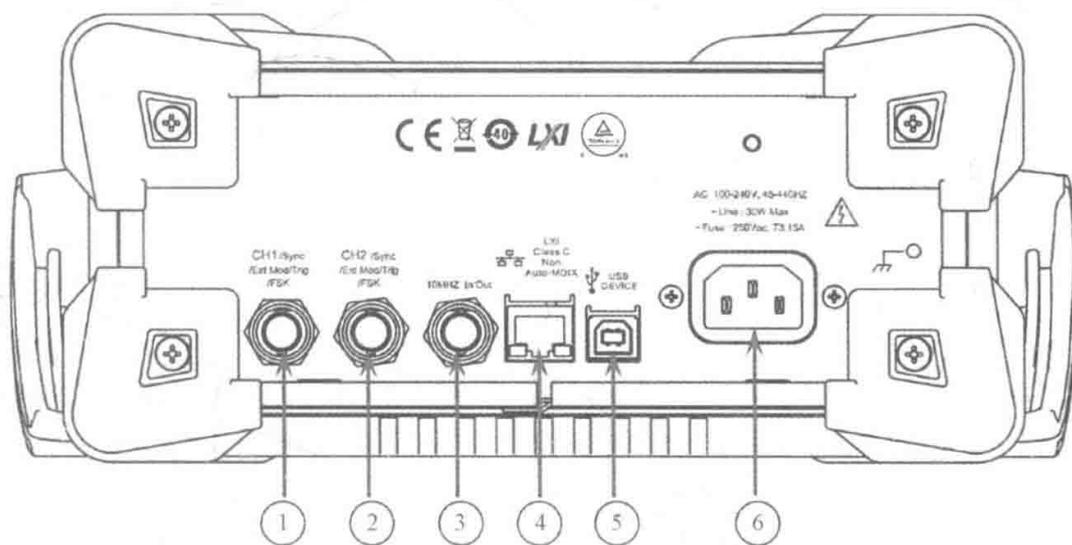


图 3-2-3 DG1000Z 系列任意波信号发生器的后面板图

图 3-2-3 中，信号发生器后面板上各功能按钮的介绍如下：

①CH1 同步/外调制/触发连接器：[CH1/Sync/Ext Mod/Trig/FSK]

BNC 母头连接器，标称阻抗为 50Ω ，其功能由 CH1 当前的工作模式决定。

Sync：打开 CH1 输出时，该连接器输出与 CH1 当前配置相匹配的同步信号。

Ext Mod：若 CH1 开启 AM、FM、PM 或 PWM 并且使用外部调制源，该连接器接收一个来自外部的调制信号。

FSK：若 CH1 开启 ASK、FSK 或 PSK 并且使用外部调制源，该连接器接收一个来自外部的调制信号（可设置该信号的极性）。

Trig In：若 CH1 开启 Sweep 或 Burst 功能并且使用外部触发源，该连接器接收一个来自外部的触发信号（可设置该信号的极性）。

Trig Out：若 CH1 开启 Sweep 或 Burst 功能并且使用内部或手动触发源，该连接器输出具有指定边沿的触发信号。

②CH2 同步/外调制/触发连接器：[CH2/Sync/Ext Mod/Trig/FSK]

BNC 母头连接器，标称阻抗为 50Ω ，其功能由 CH2 当前的工作模式决定。

Sync：打开 CH2 输出时，该连接器输出与 CH2 当前配置相匹配的同步信号。

Ext Mod：若 CH2 开启 AM、FM、PM 或 PWM 且使用外部调制源，该连接器接收一个来自外部的调制信号。

FSK：若 CH2 开启 ASK、FSK 或 PSK 且使用外部调制源，该连接器接收一个来自外部的调制信号（可设置该信号的极性）。

Trig In: 若 CH2 开启 Sweep 或 Burst 功能且使用外部触发源, 该连接器接收一个来自外部的触发信号 (可设置该信号的极性)。

Trig Out: 若 CH2 开启 Sweep 或 Burst 功能且使用内部或手动触发源, 该连接器输出具有指定边沿的触发信号。

③10MHz 输入/输出连接器: [10MHz In/Out]

BNC 母头连接器, 标称阻抗为 50Ω , 其功能由仪器使用的时钟类型决定。

若仪器使用内部时钟源, 该连接器 (用作 10MHz Out) 可输出由仪器内部晶振产生的 10MHz 时钟信号。

若仪器使用外部时钟源, 该连接器 (用作 10MHz In) 接收一个来自外部的 10MHz 时钟信号。

该连接器通常用于在多台仪器之间建立同步。

④LAN 接口: 用于将信号发生器连接至计算机或计算机所在的网络, 进行远程控制。

该信号发生器符合 LXI-C 类仪器标准, 可与其他标准设备快速搭建测试系统, 轻松实现系统集成。

⑤USB Device 接口: 用于与计算机连接, 通过上位机软件或用户自定义编程对信号发生器进行控制; 还可与 PictBridge 打印机连接, 打印屏幕显示的内容。

⑥AC 电源插口: 该信号发生器支持的交流电源规格为 $100\sim 240\text{V}$, $45\sim 440\text{Hz}$, 最大输入功率不可超过 30W , 电源熔丝规格为 250V 、 $\text{T}3.15\text{A}$ 。

三、用户界面

DG1000Z 系列任意波信号发生器的用户界面包括三种显示模式: 双通道参数 (默认)、双通道图形和单通道显示。在此着重以双通道参数模式为例介绍仪器的用户界面, 如图 3-2-4 所示。

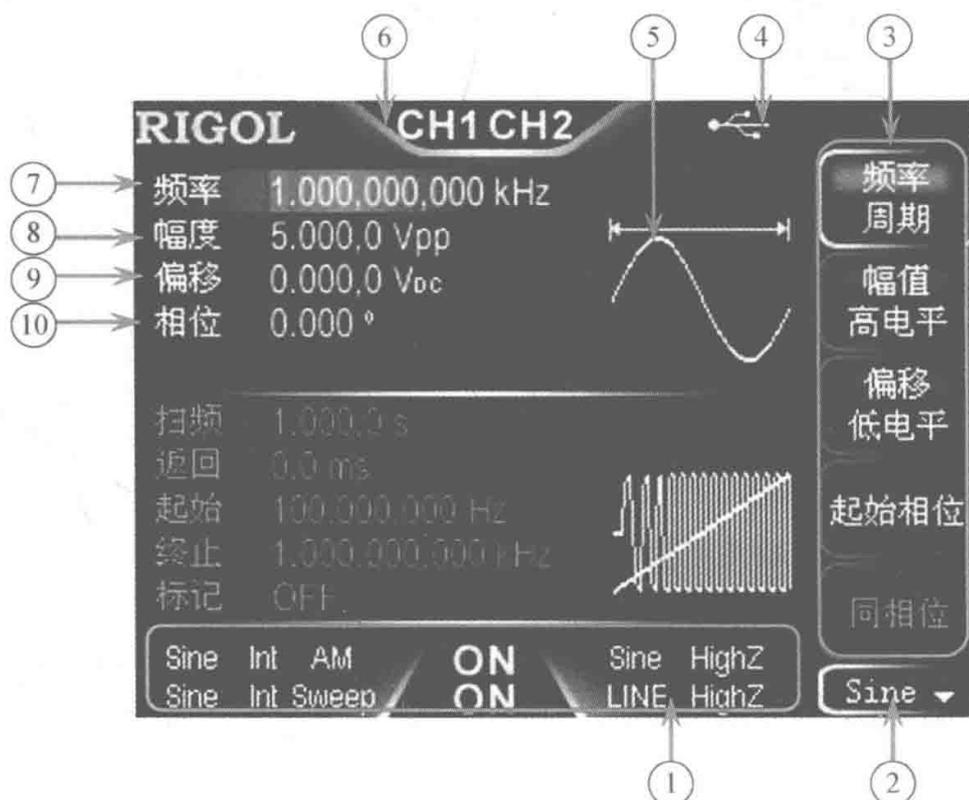


图 3-2-4 双通道参数显示模式的用户界面

图 3-2-4 中各标号的功能说明如下：

①通道输出配置状态栏：显示各通道当前的输出配置，如图 3-2-5 所示。

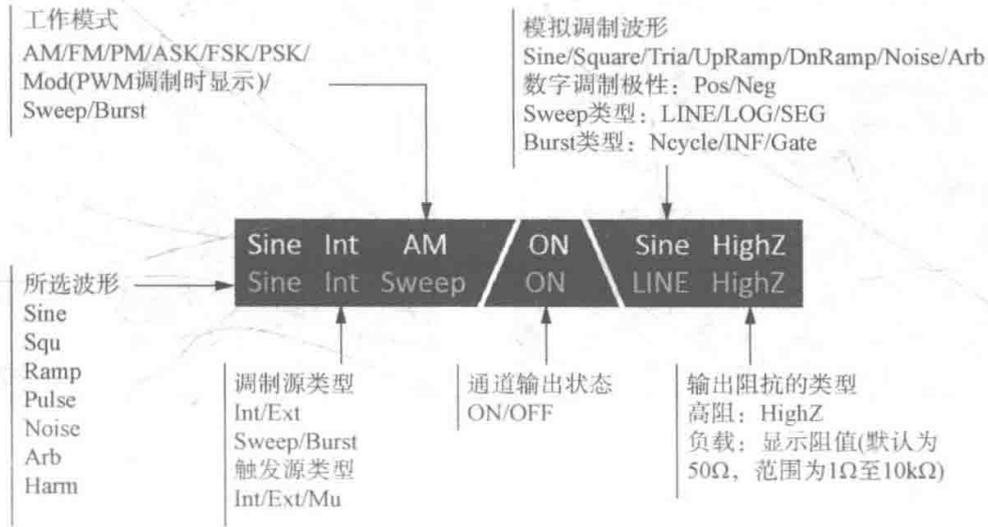


图 3-2-5 通道输出配置

②当前功能：显示当前已选中功能的名称。例如，“Sine”表示当前选中正弦波功能，“Edit”表示当前选中任意波编辑功能。

③菜单：显示当前已选中功能对应的操作菜单。

④状态栏：

：仪器正确连接至局域网时显示。

：仪器工作于远程模式时显示。

：仪器检测到 U 盘时显示。

⑤波形：显示各通道当前选择的波形。

⑥通道状态栏：指示当前通道的选中状态和开关状态。选中 CH1 时，状态栏边框显示黄色；选中 CH2 时，状态栏边框显示蓝色；打开 CH1 时，状态栏中“CH1”以黄色高亮显示；打开 CH2 时，状态栏中“CH2”以蓝色高亮显示。

注意：可以同时打开两个通道，但不可同时选中两个通道。

⑦频率：显示各通道当前波形的频率。按相应的 使“频率”突出显示，通过数字键盘或旋钮改变该参数。

⑧幅值：显示各通道当前波形的幅值。按相应的 使“幅值”突出显示，通过数字键盘或旋钮改变该参数。

⑨偏移：显示各通道当前波形的直流偏移。按相应的 使“偏移”突出显示，通过数字键盘或旋钮改变该参数。

⑩相位：显示各通道当前波形的相位。按相应的 菜单后，通过数字键盘或旋钮改变该参数。

按 键 → “系统设置” → “显示设置” → “显示模式”，选择“双通道图形”即可切换为双通道图形显示模式，如图 3-2-6 所示。

按 键 → “系统设置” → “显示设置” → “显示模式”，选择“单通道显示”即可切换为单通道显示模式，如图 3-2-7 所示。

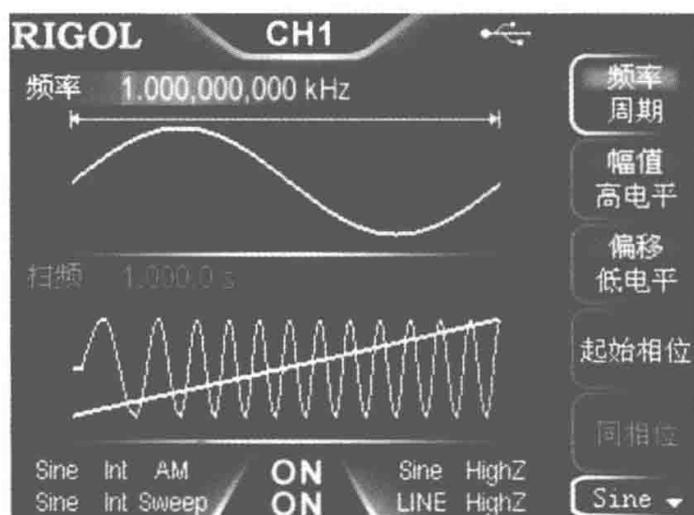


图 3-2-6 双通道图形显示模式的用户界面

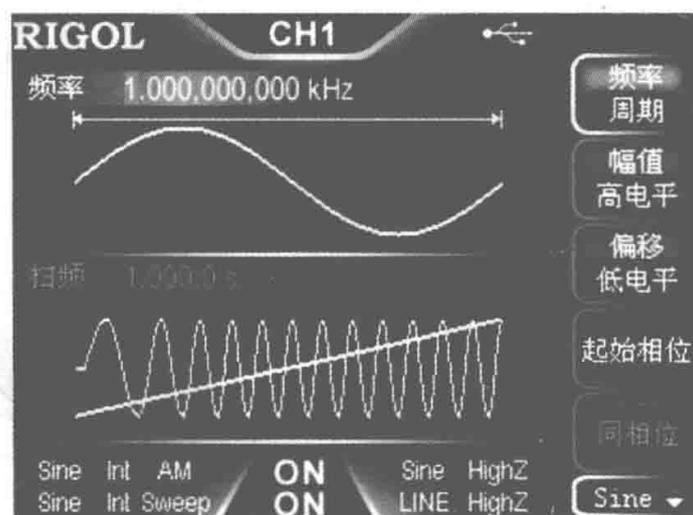


图 3-2-7 单通道显示模式的用户界面

四、DG1000Z 系列任意波信号发生器的基本操作

1. 开机

正确连接电源后，按下前面板的电源键，打开信号发生器。开机过程中仪器执行初始化过程和自检过程，结束后屏幕进入默认界面。如无法正常开机，需要检查后再处理。

2. 设置系统语言

DG1000Z 系列任意波信号发生器支持中文和英文两种系统语言，可以按→Language，选择所需的语言类型。

3. 输出基本波形

DG1000Z 系列任意波信号发生器可从单通道或同时从双通道输出 5 种基本波形，包括正弦波、方波、锯齿波、脉冲和噪声。前面板提供 5 个功能按键用于选择相应的波形。按下相应的按键即可选中所需波形，此时，按键背灯点亮，用户界面右侧显示相应的功能名称及参数设置菜单（见表 3-2-2）。开机时，仪器默认选中正弦波。

此处主要介绍如何从 [CH1] 连接器输出一个正弦波（频率为 20kHz，幅值为 2.5V_{pp}，偏移量为 500mV_{DC}，起始相位为 90°）。

(1) 选择输出通道。按通道选择键选中 CH1，此时通道状态栏边框以黄色标识。

表 3-2-2 基本波形

基本波形		正弦波	方波	锯齿波	脉冲	噪声
功能按键						
功能名称		Sine	Squ	Ramp	Pulse	Noise
参数	频率/周期	√	√	√	√	
	幅度/高电平	√	√	√	√	√
	偏移/低电平	√	√	√	√	√
	起始相位	√	√	√	√	

续表

基本波形		正弦波	方波	锯齿波	脉冲	噪声
参数	同相位	√	√	√	√	
	占空比		√			
	对称性			√		
	脉宽/占空比				√	
	上升沿				√	
	下降沿				√	

(2) 选择正弦波。按  键选择正弦波，背灯变亮表示功能选中，屏幕右方出现该功能对应的菜单。

(3) 设置频率/周期。按  键使“频率”突出显示，通过数字键盘输入 20，在弹出的菜单中选择单位 kHz。频率范围为 $1\mu\text{Hz}\sim 60\text{MHz}$ ，可选的频率单位有 MHz、kHz、Hz 和 mHz、 μHz ；再次按下此软键切换至周期的设置，可选的周期单位有 sec、msec、 μsec 和 nsec。

(4) 设置幅值。按  键使“幅值”突出显示，通过数字键盘输入 2.5，在弹出的菜单中选择单位 V_{pp} 。幅值范围受阻抗和频率/周期设置的限制。可选的幅值单位有 V_{pp} 、mV $_{pp}$ 、 V_{rms} 、mV $_{rms}$ 和 dBm（仅当  → “通道设置” → “输出设置” → “阻抗为非高阻”时，dBm 有效）；再次按下此软键切换至高电平设置，可选的高电平单位有 V 和 mV。

说明：

1) V_{pp} 是表示信号峰—峰值的单位， V_{rms} 是表示信号有效值的单位。仪器默认使用 V_{pp} 。按数字键盘中的  键可快速切换当前幅度的单位。二者之间的关系为 $V_{pp} = 2\sqrt{2}V_{rms}$ 。

2) dBm 是表示信号功率绝对值的单位，dBm 与 V_{rms} 之间满足如下关系式：

$$\text{dBm} = 10\lg\left(\frac{V_{rms}}{R} \times \frac{1}{0.001\text{W}}\right)$$

其中， R 表示通道的输出阻抗值，必须为确定的数值，因此，输出阻抗为高阻时，不可使用单位 dBm。按数字键盘中的  键选择 dBm 可将幅度 V_{rms} 转换为以 dBm 为单位对应的值。

(5) 设置偏移电压。按  键使“偏移”突出显示，通过数字键盘输入 500，在弹出的菜单中选择单位 mVDC。偏移范围受阻抗和幅值/高电平设置的限制，可选的偏移单位有 VDC 和 mVDC；再次按下此软键切换至低电平设置。低电平应至少比高电平小 1mV（输出阻抗为 50Ω 时），可选的低电平单位有 V 和 mV。

(6) 设置起始相位。按  键，通过数字键盘输入 90，在弹出的菜单中选择单位 $^{\circ}$ 。起始相位值范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 。

(7) 启用输出。按  键，背灯变亮，[CH1] 连接器以当前配置输出正弦波信号。

(8) 观察输出波形。使用 BNC 连接线将 DG1032Z 的 [CH1] 与示波器相连接, 图 3-2-8 为示波器观察到的 DG1000Z 输出的正弦波。

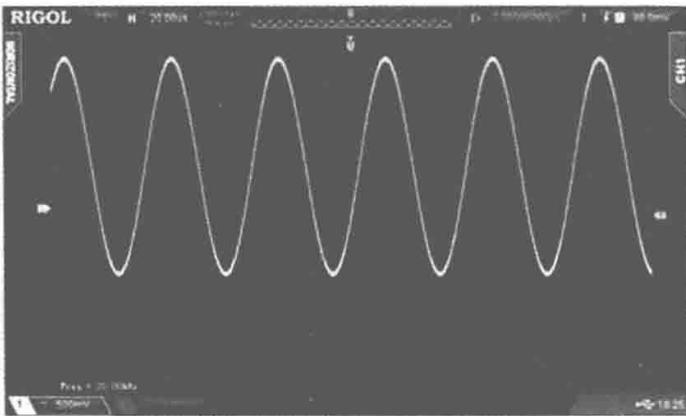


图 3-2-8 示波器显示 DG1000Z 输出的正弦波

4. 输出任意波

DG1000Z 系列任意波信号发生器可从单通道或同时从双通道输出仪器内建波形或用户自定义的任意波形。内建任意波形多达 160 种, 存储在仪器内部非易失性存储区。此外, DG1000Z 允许用户编辑任意波形, 波形点数可为 8~16384 (16k) 个, 即 8~16kpts。已编辑的波形可以存储在仪器内部或外部存储器中 (* .RAF 格式)。

DG1000Z 系列任意波信号发生器的标配存储深度为 8M (8Mpts) 个数据点, 并提供 16Mpts 深存储选件。用户可以通过上位机软件编辑任意波, 通过远程接口下载至仪器或通过 U 盘读取后输出。

此处主要介绍如何从 [CH1] 连接器输出一个用户自定义的任意波 (采样点编辑模式, 循环周期: 1s, 高电平: 4V, 低电平: -2V, 初始化点数: 8, 点 1 至点 4 的电压: 4V, 点 5 至点 8 的电压: -2V)。

(1) 选择输出通道。按通道选择键  选中 CH1。此时通道状态栏边框以黄色标识。

(2) 启用任意波功能。按  键进入任意波设置界面。按照“输出基本波形”的介绍, 设置任意波的频率、幅值、偏移和相位等参数。

(3) 编辑任意波。按  键 → “编辑波形”, 打开任意波编辑菜单:

1) 按“模式”选择“采样点”。

2) 按“循环周期”, 使用数字键盘输入 1, 并在弹出的菜单中选择单位 sec。

3) 按“高电平”, 使用数字键盘输入 4, 并在弹出的菜单中选择单位 V。

4) 按“低电平”, 使用数字键盘输入 -2, 并在弹出的菜单中选择单位 V。

5) 按“点数”, 使用数字键盘输入 8 后按确认。此时, 出现一条 -2V 的电平线。

6) 按“点编辑”, 进入点编辑界面。

按采样点, 开始定义第一个点。直接按电压键, 使用数字键盘输入 4, 并在弹出的菜单中选择单位 V。再次按采样点, 使用数字键盘或旋钮选择点 2, 然后按电压, 输入 4V。使用上述方法输入点 3 至点 8 的电压值。

(4) 选择波形。按  键 → “选择波形” → “易失波形”, 选择已编辑的波形。

(5) 启用输出。按  键, 背灯变亮, [CH1] 连接器以当前配置输出已编辑的任意波。

(6) 观察输出波形。使用 BNC 连接线将 DG1000Z 的 CH1 与示波器相连接, 此时, 可通过示波器观察任意波的波形。

五、频率计的使用

DG1000Z 系列任意波信号发生器提供频率计功能, 可以测量外部输入信号的频率、周期、占空比、正脉宽及负脉宽等参数, 并支持对测量结果的统计。统计功能开启时, 仪器自动计算测量值的最大值、最小值、平均值和标准差, 并且可以以“数字”和“动态曲线”两种形式显示测量值的变化趋势。双通道输出可与频率计测量同时工作。

1. 启用频率计

按前面板的 **Counter** 键，背灯变亮，左侧指示灯闪烁，打开频率计功能，同时进入频率计设置界面，如图 3-2-9 所示。

若当前频率计已打开，且屏幕处于频率计界面，再次按下 **Counter** 键则关闭频率计功能；若当前频率计已打开，且屏幕处于非频率计界面，再次按下 **Counter** 键则跳转到频率计显示界面。

注意：频率计功能打开时，CH2 的同步输出将会关闭。



图 3-2-9 频率计设置界面

2. 设置频率计

(1) 闸门时间。按 **闸门时间** 键，选择测量系统的闸门时间，默认为“1.310ms”，见表 3-2-3。

表 3-2-3 测量系统的闸门时间

标准时间	测量系统的闸门时间
1 毫秒	1.310ms
10 毫秒	10.48ms
100 毫秒	166.7ms
1 秒	1.342s
10 秒	10.73s
>10 秒	>10s

(2) 选择被测参数。按 **测量参数** 键，选择频率计测量的参数类型。频率计可以测量如下参数：频率、周期、占空比、正脉宽和负脉宽，默认参数类型为“频率”。

(3) 统计功能。按 **统计关闭** 键开启或关闭频率计的统计功能。统计功能开启时，仪器自动计算测量值的最大值、最小值、平均值和标准差，并且可以以“数字”和“动态曲线”两种形式显示测量值的变化趋势。

1) 选择显示形式。统计功能开启后，按 **显示形式** 键可选择统计结果的显示形式为“数字”或“动态曲线”，如图 3-2-10 和图 3-2-11 所示。

注意：统计功能关闭时，**显示形式** 菜单置灰禁用。

2) 清除统计结果。按 **数据清除** 键，信号源清除当前的统计结果。

注意：统计功能关闭时，**数据清除** 菜单置灰禁用。

(4) 灵敏度。设置测量系统的触发灵敏度，默认为 25%，可设置范围为 0%~100%。按“灵敏度”软键，使用数字键盘输入所需的数值，在弹出的单位菜单中选择“%”。

(5) 触发电平。设置测量系统的触发电平。当输入信号达到指定的触发电平时，系统触



图 3-2-10 统计结果数字显示界面



图 3-2-11 统计结果动态曲线显示界面

发并获取测量读数。默认值为 0V，可设置范围为 $-2.5\sim 2.5\text{V}$ 。按“触发电平”软键，使用数字键盘输入所需的数值，在弹出的单位菜单中选择所需的单位（V 或 mV）。

(6) 耦合。设置输入信号的耦合方式为“AC”或“DC”，默认为“AC”。

(7) 高频抑制。在测量低频信号时，高频抑制可用于滤除高频成分，提高测量精确度。按“高频抑制”软键开启或关闭高频抑制功能。

注意：在测量频率小于 250kHz 的低频信号时，打开高频抑制，以滤除高频噪声干扰；在测量频率大于 250kHz 的高频信号时，关闭高频抑制，此时，最大输入频率可为 200MHz。

(8) 自动。按下该菜单软键，仪器根据被测信号的特征自动选择合适的闸门时间。频率计界面闸门时间区域显示“AUTO”。

(9) 运行状态。按下该菜单软键可控制频率计的运行状态。当按下前面板  键时，频率计自动进入“运行”状态，以当前的配置连续对输入信号进行测量。按“运行状态”菜单软键，频率计首先进入“单次”状态，完成正在进行的测量后进入“停止”状态。当频率计进入“停止”状态后，每按一次“单次”键，频率计执行一次测量。

六、DG1000Z 系列任意波信号发生器的帮助系统

DG1000Z 系列任意波信号发生器内置帮助系统对于前面板上的每个功能按键和菜单软键都提供了帮助信息。用户可在操作仪器的过程中随时查看任意键的帮助信息。

1. 获取内置帮助的方法

按下  键，背灯点亮，然后再按下所需要获得帮助的功能按键或菜单软键，仪器界面显示该键的帮助信息。

2. 帮助的翻页操作

当帮助信息为多页显示时，通过菜单软键 （上一行）/（下一行）/（上一页）/（下一页）或旋钮可滚动帮助信息页面。

3. 关闭当前的帮助信息

当仪器界面显示帮助信息时，用户按下前面板上的任意功能按键（除  和  键外），将关闭当前显示的帮助信息并跳转到相应的功能界面。

4. 常用帮助主题

连续按两次  键打开常用帮助主题列表。此时，可通过按  /  /  /  菜单软键或旋转旋钮滚动列表，然后按“选择”选中相应的帮助信息进行查看。

第三节 数字万用表

万用表是一种多用途的测量仪表，可以测量电阻、直流电压、交流电压、直流电流、电感、电容、晶体管电流放大系数等多种参数。

万用表的种类繁多，根据测量原理及测量结果显示方式的不同，可分为模拟指针式万用表和数字万用表。由于数字式万用表的使用灵活，操作简单，读数可靠，携带方便等特点，成为各类实验室必备的测量仪表。



图 3-3-1 数字式万用表的测量过程

(A/D 转换器) 将被测模拟量转换为数字量，然后通过电子计算器的计算，最后把测量结果直接显示在数字显示器上。

一、数字式万用表的工作原理

数字式万用表的测量过程如

图 3-3-1 所示。先由模数转换器

二、DM3058/DM3058E 型数字万用表及面板功能简介

1. DM3058/DM3058E 的基本功能

DM3058/DM3058E 是一款 $5\frac{1}{2}$ 位双显数字万用表，它是针对高准确度、多功能、自动测量的用户需求而设计的产品，集基本测量功能、多种数学运算功能、任意传感器测量等功能于一身。

DM3058/DM3058E 拥有高清晰的 256×64 点阵单色液晶显示屏，易于操作的键盘布局和清晰的按键背光和操作提示，使其更具灵活、易用的操作特点；支持 RS-232、USB、LAN（仅 DM3058）和 GPIB（仅 DM3058）接口。

2. DM3058/DM3058E 的前面板布局

DM3058/DM3058E 型数字万用表的前面板图如图 3-3-2 所示。

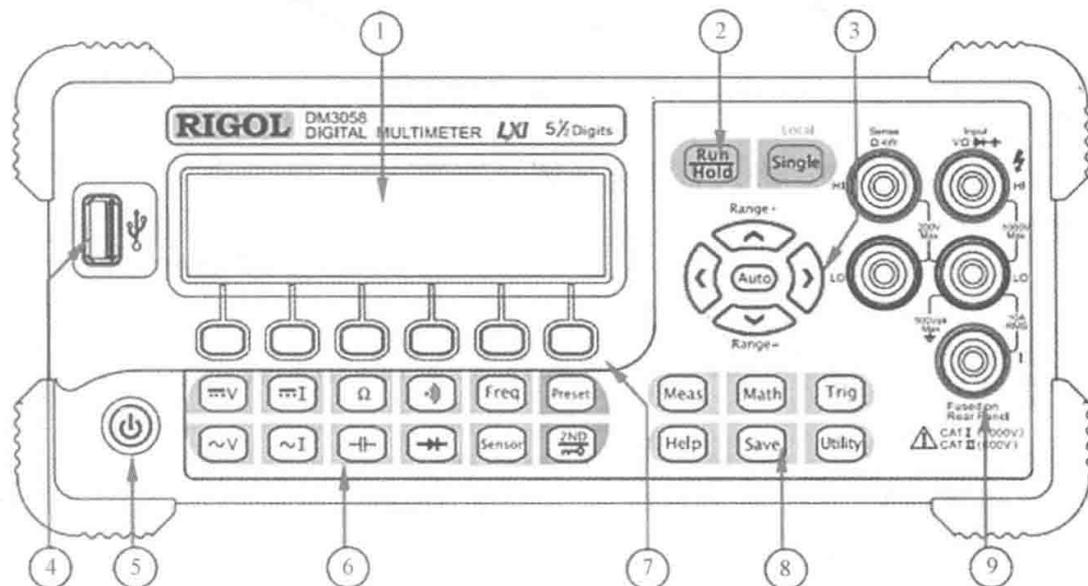


图 3-3-2 DM3058/DM3058E 型数字万用表的前面板图

图 3-3-2 中, 前面板编号功能说明如下: ①LCD 显示屏; ②黄色按键区 (使能触发键盘); ③方向键; ④USB Host; ⑤电源键; ⑥灰色按键区 (基本测量功能键); ⑦菜单操作键; ⑧蓝色按键区 (辅助测量功能键); ⑨信号输入键。

3. DM3058/DM3058E 的后面板布局

DM3058/DM3058E 型数字万用表的前面板图如图 3-3-3 所示。

图 3-3-3 编号功能说明如下: ①电流输入熔丝; ②10/100Ethernet; ③GPIB (IEEE-488); ④电源插口; ⑤USB Device; ⑥RS 232; ⑦电力熔丝; ⑧交流电压选择器; ⑨电源开关。

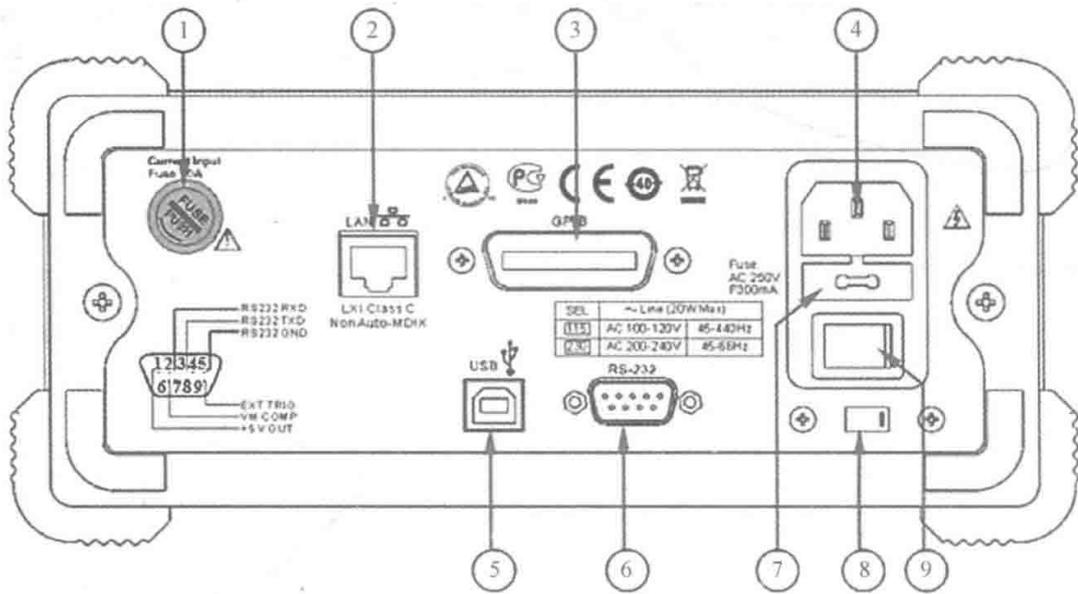


图 3-3-3 DM3058/DM3058E 型数字万用表的后面板图

4. DM3058/DM3058E 的用户界面

打开 DM3058/DM3058E 后面板的电源开关, 按下前面板的电源键, 等待数秒后仪器显示画面。DM3058/DM3058E 用户界面有双显和单显两种, 如图 3-3-4 所示。

三、DM3058/DM3058E 基本测量功能

DM3058/DM3058E 的基本测量功能包括: 测量直流电压, 测量交流电压, 测量直流电流, 测量交流电流, 测量电阻, 测量电容, 测试连通性, 检查二极管, 测量频率或周期等。

1. 测量直流电压

该万用表可测量最大 1000V 的直流电压。

(1) 按下前面板的 DCV 键, 进入直流电压测量界面。

(2) 连接测试引线和被测电路, 红色测试引线接 Input - HI 端, 黑色测试引线接 Input - LO 端。

(3) 根据测量电路的电压范围, 选择合适的电压量程。

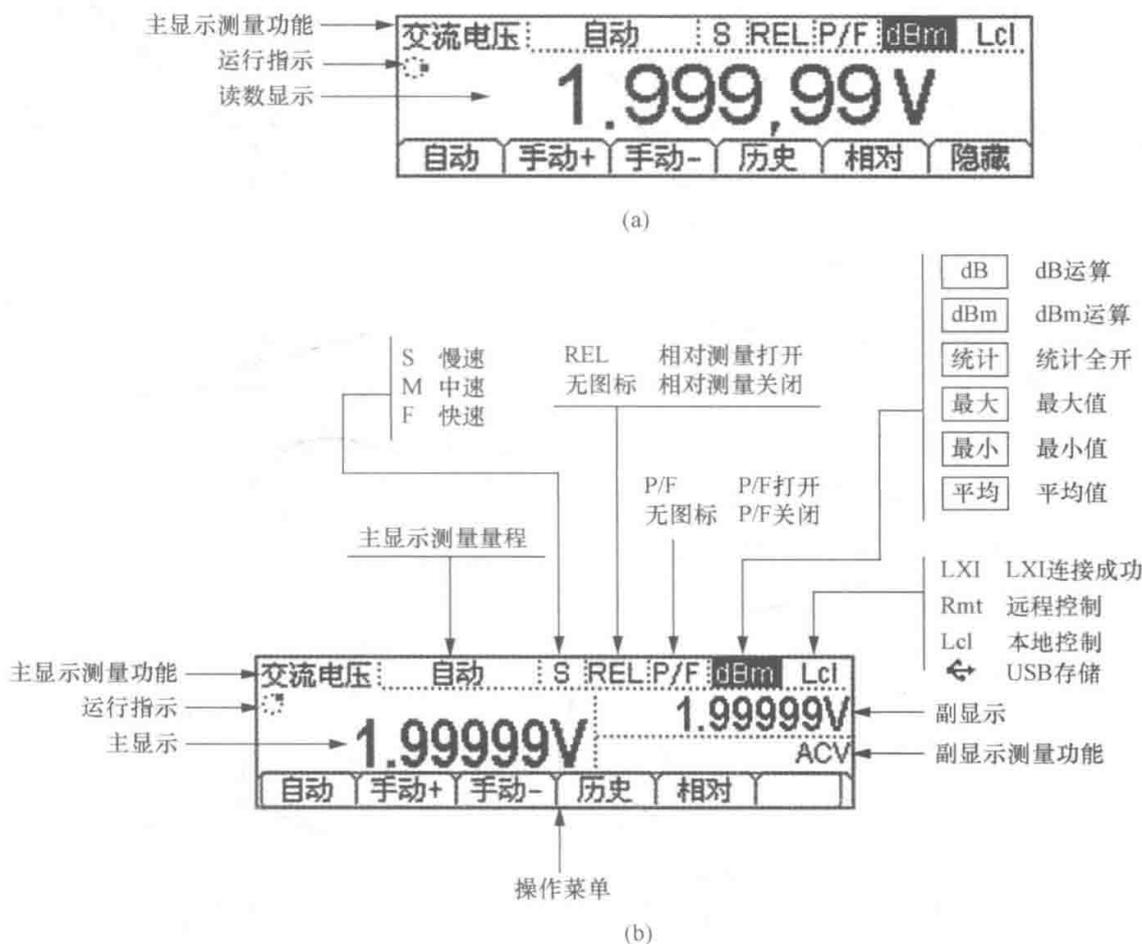
(4) 读取测量值。

2. 测量交流电压

该万用表可测量最大 750V 的交流电压。

(1) 按下前面板的 ACV 键, 进入交流电压测量界面。

(2) 连接测试引线和被测电路, 红色测试引线接 Input - HI 端, 黑色测试引线接



Input - LO端。

(3) 根据测量电路的电压范围，选择合适的电压量程。

(4) 读取测量值。

3. 测量直流电流

该万用表可测量最大 10A 的直流电流。

(1) 按下前面板的键, 进入直流电流测量界面。

(2) 连接测试引线和被测电路，红色测试引线接 Input - I 端，黑色测试引线

Input - LO端。

(3) 根据测量电路的电流范围，选择合适的电流量程。

(4) 读取测量值。

4. 测量交流电流

该万用表可测量的最大 10A 的交流电流。

(1) 选中前面板的键，进入交流电流测量界面。

(2) 连接测试引线和被测电路，红色测试引线接 Input - I 端，黑色测试引线 Input -

LO端。

(3) 根据测量电路的电流范围，选择合适的电流量程。

(4) 读取测量值。

5. 测量电阻

该万用表提供二线、四线两种电阻测量模式。

(1) 二线电阻测量模式。

- 1) 按下前面板的 \ominus 键，选择二线电阻测量模式，进入二线电阻测量界面。
- 2) 连接测试引线和被测电阻，红色测试引线接 Input - HI 端，黑色测试引线接 Input - LO 端。
- 3) 根据测量电阻的阻值范围，选择合适的电阻量程。
- 4) 读取测量值。

操作提示：当测量较小阻值电阻时，建议使用相对值运算，可以消除测试导线阻抗误差。

(2) 四线电阻测量模式。当被测电阻阻值小于 $100\text{k}\Omega$ ，测试引线的电阻和探针与测试点的接触电阻与被测电阻相比已不能忽略不计时，若仍采用二线电阻测量模式必将导致测量误差增大，此时可以使用四线电阻测量模式。

- 1) 连续按 \ominus 键切换到四线电阻测量模式，进入四线电阻测量界面。
- 2) 连接测试引线，红色测试引线接 Input - HI 和 HI Sense 端，黑色测试引线接 Input - LO 和 LO Sense 端。
- 3) 根据被测电阻的阻值范围，选择合适的电阻量程，读取测量值。

注意事项：测量电阻时，电阻两端不能放置在导电桌面或用手拿着进行测量，这样会导致测量结果不准确，而且电阻越大，影响越大。

6. 测量电容

DM3058/DM3058E 万用表可测量最大 $10000\mu\text{F}$ 的电容。

- (1) 按下前面板的 \oplus 键，进入电容测量界面。
- (2) 将测试引线接于被测电容两端，红色测试引线接 Input - HI 端和电容的正极，黑色测试引线接 Input - LO 端和电容的负极。
- (3) 根据被测电容的容值范围，选择合适的电容量程，然后读取测量结果。

操作提示：用万用表测量电解电容前，每次都要用测试引线将电解电容的两个脚短接一下进行放电，然后才可以测量。

7. 测试连通性

当短路测试电路中测量的电阻值低于设定的短路电阻时，仪器判断电路是连通的，发出蜂鸣提示音（声音已打开）。

- (1) 按下前面板的 Ⓢ 键，进入下图所示界面，测量电路的连通性。
- (2) 连接测试引线和被测电路，红色测试引线接 Input - HI 端，黑色测试引线接 Input - LO 端。
- (3) 设置短路电阻值。短路电阻值的默认值为 10Ω 。

8. 检查二极管

- (1) 按下前面板的 Ⓢ 键，进入二极管检测界面。
- (2) 连接测试引线和被测二极管，红色测试引线接 Input - HI 端和二极管正极，黑色测试引线接 Input - LO 端和二极管负极。
- (3) 检查二极管通断情况。二极管导通时，仪器发出一次蜂鸣（声音已打开）。

9. 测量频率或周期

被测信号的频率或周期可以在测量该信号的电压或电流时，通过打开第二功能测量得

到,也可以直接使用频率或周期测量功能键进行测量。下面介绍如何直接使用功能键进行测量。

(1) 测量频率。

1) 按下前面板的键,进入频率测量界面。

2) 连接测试引线,红色测试引线接 Input - HI 端,黑色测试引线接 Input - LO 端,读取测量值。

(2) 测量周期。

1) 连续按键进入周期测量界面。

2) 连接测试引线,红色测试引线接高电压 HI 端,黑色测试引线接低电压 LO 端读取测量值。

第四章 NI Multisim 12 使用指南

第一节 NI Multisim 12 简介

电子设计自动化 (Electronic Design Automation, EDA), 是现代电子工程领域的一门新技术, 它提供了基于计算机和信息技术的电路系统设计方法。

传统的电子电路与系统设计方法, 周期长、耗材多、效率低, 难以满足电子技术飞速发展的要求。从 20 世纪 80 年代开始, 随着计算机技术的飞速发展, 电子电路的分析与设计方法发生了重大变革, Pspice、EWB 等一大批各具特色的优秀电子设计自动化 (EDA) 软件的出现, 改变了以定量估算和电路实验为基础的电路设计方法, 极大地提高了电子电路与系统的设计质量和效率。熟练掌握和运用 EDA 技术是电类专业学生的基本要求, 也是当今电子电路分析与设计人员必须具备的基本技能之一。

EDA 技术和设计手段, 是指使用硬件描述语言表达设计意图, 以大规模集成器件做硬件载体, 以计算机、大规模可编程逻辑器件的开发软件及实验开发系统为设计工具, 自动完成用软件方式设计的电子系统, 是一种电子元件产品和系统设计的综合技术。

随着 EDA 技术的发展, 其涉及的内容也日趋庞大, 不仅涉及用计算机技术的某几种软、硬件开发系统的方法来完成硬件设计和实现, 而且还与现代自动化设计中行为与结构综合的概念、自顶向下的设计理念等内容相结合。

NI Multisim 12 是美国国家仪器有限公司推出的 NI Circuit Design Suit 12 中的一个重要组成部分, 其前身为 EWB (Electronics Work - bench)。NI Multisim 是一种交互式电路模拟软件, 是一种 EDA 工具, 它为用户提供了丰富的元件库和功能齐全的各类虚拟仪器, 主要用于对各种电路进行全面的仿真分析和设计。NI Multisim 提供了集成化的设计环节, 能完成原理图的设计输入、电路仿真分析、电路功能测试等工作; 当需要改变电路参数和电路结构仿真时, 可以清楚地观察到各种变化电路对性能的影响; 用户还可以自己添加新元件, 操作简单, 分析和仿真功能十分强大。用 NI Multisim 进行电路的仿真, 实验成本低、速度快、效率高。熟练使用该软件可以大大缩短产品研发的时间。

针对不同的用户需要, NI Multisim 12 发行了多个版本, 分为增强专业版 (Power Professional)、专业版 (Professional)、个人版 (Personal)、教育版 (Education)、学生版 (Student) 和演示版 (Demo) 等, 这里仅对 Multisim 12 教育版进行介绍。

NI Multisim 12 有直观的图形界面、丰富的元器件库、丰富的测试仪器仪表、完备的分析手段、强大的仿真能力、完美的兼容能力、丰富的在线帮助、高效的电路设计等特点。

NI Multisim 12 易学易用, 便于电子信息、通信工程、自动化、电气控制类专业学生自学, 便于开展综合性的设计和实验, 有利于培养学生综合分析能力、开发和创新能力。

第二节 NI Multisim 12 的基本操作界面

一、主窗口

单击“开始\程序\National Instruments\Circuit Design Suite 12.0\Multisim 12.0”，启动 NI Multisim 12，弹出如图 4-2-1 所示的界面，即 NI Multisim 12 的基本操作界面。该界面主要由标题栏、菜单栏、工具栏、仿真开关、元器件栏、设计管理窗口、电路工作区、仪器仪表栏、电子表格查看窗口等组成。这个界面相当于一个虚拟的电子实验平台。



图 4-2-1 NI Multisim 12 的基本操作界面

二、菜单栏

NI Multisim 12 的菜单栏有 12 个菜单项，如图 4-2-2 所示。菜单栏中提供了软件所有的功能命令。



图 4-2-2 NI Multisim 12 菜单栏

(1) File (文件菜单): 提供了 17 个文件操作命令，如打开、保存、打印等，主要用于管理所创建的电路文件。

(2) Edit (编辑菜单): 提供对电路和元件进行剪切、粘贴、旋转等 23 个操作命令，主要用于在电路绘制过程中对电路和元器件进行各种技术性处理。

(3) View (视图菜单): 提供了 21 个用于控制仿真界面上显示的内容、缩放电路原理图和查找元件等操作命令。

(4) Place (放置菜单): 提供了在电路工作窗口内放置元件、节点、导线、各种连线接

口及文本等命令。

(5) MCU (微控制器菜单): 提供了带有微控制器的嵌入式电路仿真功能。所支持的微控制器芯片类型有 80C51 和 PIC 两类。

(6) Simulate (仿真菜单): 提供了常用的仿真设置与操作命令。

(7) Transfer (文件输出菜单): 提供仿真电路的各种数据与 Ultiboard12 数据相互传送的功能。

(8) Tools (工具菜单): 提供了常用电路创建向导和电路管理命令, 主要用于编辑和管理元器件和元件库。

(9) Report (报告菜单): 用于产生指定元件存储在数据库中的所有信息和当前电路窗口中所有元件的详细参数报告。

(10) Options (选项菜单): 提供了用户需要设置电路功能、存储模式及工作界面功能。

(11) Window (窗口菜单): 提供了对一个电路的各个多页子电路以及不同的各个仿真电路同时浏览的功能。

(12) Help (帮助菜单): 为用户提供在线技术帮助和使用指导, 包含帮助主页目录、帮助主题索引及版本说明等选项。

三、工具栏

Multisim 12 的工具栏主要包括 Standard Toolbar (标准工具栏)、Main Toolbar (系统工具栏)、View Toolbar (视图工具栏)、Component Toolbar (元件库)、Virtual Toolbar (虚拟元件库)、Graphic Annotation Toolbar (图形注释工具栏)、Status Toolbar (状态栏) 和 Instrument Toolbar (虚拟仪器工具栏) 等, 如图 4-2-1 所示。

(1) Standard Toolbar。该工具栏包含了常见的文件操作和编辑操作。

(2) Main Toolbar。该工具栏是 Multisim 的核心工具栏, 通过该工作栏按钮的操作可以完成对电路从设计到分析的全部工作, 其中的按钮可以直接开关下层的工具栏 (Component 中的 Multisim Master 工具栏, Instrument 工具栏)。

(3) View Toolbar。用户可以通过 Zoom 工具栏方便地调整所编辑电路的视图大小。

(4) Component Toolbar。该工具栏有 14 个按钮, 每一个按钮都对应一类元器件, 其分类方式和 Multisim 元器件数据库中的分类相对应, 通过按钮上图标就可大致清楚该类元器件的类型。具体的内容可以从 Multisim 的在线文档中获取。

(5) VirtualToolbar。该工具栏有 7 个按钮, 提供 7 类虚拟元器件。

(6) Graphic Annotation Toolbar。该工具栏主要是绘制电路原理图中一些不具有电气意义的图形 (包括画直线、折线、矩形、椭圆、弧线、多边形和粘贴图片等) 及输入文字。

(7) Instruments Toolbar。该工具栏集中了 Multisim 为用户提供的所有虚拟仪器仪表, 用户可以通过按钮选择自己需要的仪器对电路进行观测。

(8) Simulation。该工具栏可以控制电路仿真的开始、结束和暂停。

第三节 元 器 件 库

Multisim 12 将所有的元器件模型分门别类的放到 18 个分类库中, 每个元器件库放置同一种类型的元器件。有些元器件库中的元器件分为虚拟元器件和非虚拟元器件。虚拟元器件

的参数可以任意设置；非虚拟元件的参数是固定的，但可以根据需要选择，其中绿色衬底的元件代表虚拟元件。元件库如图 4-3-1 所示。



图 4-3-1 元件库

一、电源/信号源库

电源/信号源库共有 6 个系列，包含功率源、信号电压源、信号电流源、控制电压源、控制电流源和控制函数等。

二、基本元件库

基本元件库共有 16 个元件系列，包含通用虚拟器件、定值虚拟器件、排阻、开关、变压器、非线性变压器、继电器、插座、常用绘图器件、电阻、电容、电感、电解电容、可调电容、可调电感以及电位器等基本元件。

三、二极管库

二极管库共有 14 个元件系列，包含虚拟二极管、二极管、稳压管、开关二极管、发光二极管、保护二极管、二极管整流桥、晶闸管整流桥、单向晶闸管、双向二极管、双向晶闸管、变容二极管、晶闸管以及 PIN 二极管等器件。

四、晶体管库

晶体管库中共有 21 个元件系列，包含虚拟晶体管、NPN 型晶体管、PNP 型晶体管、互补晶体管、NPN 型复合管、PNP 型复合管、带阻 NPN 型晶体管、带阻 PNP 型晶体管、带阻互补型晶体管、绝缘栅双极型晶体管、耗尽型 MOS 场效应管、增强型 N 沟道 MOS 场效应管、增强型 P 沟道 MOS 场效应管、互补增强型 MOS 场效应管、N 沟道结型场效应管、P 沟道结型场效应管、N 沟道功率场效应晶体管、P 沟道功率场效应晶体管、互补型功率场效应晶体管、单结晶体管及热分析模型等多种器件。

五、模拟集成电路库

模拟集成电路库共有 10 个元件系列，包含模拟虚拟器件、运算放大器、诺顿运算放大器、比较器、微分放大器、宽带运放、音频放大器、电流检测放大器、仪表放大器以及特殊功能放大器。

六、TTL 数字集成电路库

TTL 数字集成电路库共有 9 个元件系列，包含 74 系列、74 系列 IC 结构、74S 系列、74S 系列 IC 结构、74LS 系列、74LS 系列 IC 结构、74F 系列、74ALS 系列及 74AS 系列等 74 系列数字集成电路。

七、CMOS 数字集成电路库

CMOS 数字集成电路库共有 14 个系列，包含有 4000 系列（5V 和 5VIC 结构、10V 和 10VIC 结构、15V）、74HC 系列（2V、4V 和 4VIC 结构、6V）及 TINY 系列（2~6V）等

多种 CMOS 数字集成电路。

八、数字元器件库

数字元器件库共有 11 个系列, 包含数字逻辑元件、DSP 芯片、FPGA 在线可编程逻辑器件、PLD 可编程逻辑器件、CPLD 复杂可编程逻辑器件、微控制器、微处理器、存储器、线性驱动器、线性接收器及线性发送器。

九、混合集成电路库

混合集成电路库共有 6 个元器件系列, 包含混合虚拟元件、模拟开关、模拟开关 IC 结构、555 定时器、模数—数模转换器及多谐振荡器等多种数模混合集成电路。

十、指示器件库

指示部件库共有 8 种可用来显示电路仿真结果的显示器件, 包含电压表、电流表、发光探针、蜂鸣器、灯泡、虚拟灯泡、十六进制数码管及条形光柱。

十一、功率电源库

功率电源库共有 12 个系列, 包括功率控制器、开关、开关控制器、开关电源控制器、开关电源辅助设备、标准稳压器、稳压调节器件、压敏器件、LED 驱动器、微电器驱动器、熔丝以及混合电源等多种功率电源。

十二、其他器件库

其他器件库共有 14 个系列, 包含虚拟多功能器件、光电耦合器、晶振、真空电子管、开关电源降压转换器、开关电源升压转换器、开关电源升降压转换器、有损耗传输线、无损耗传输线 1 型、无损耗传输线 2 型、滤波器、场效应管驱动器、杂项元件及网络。

十三、外围设备库

外围设备库共有 4 个系列, 包含键盘组件、LCD 显示屏、液晶屏及其他外围设备。

十四、射频元器件库

射频元器件库共有 8 个系列, 包含射频电容器、射频电感器、射频 NPN 晶体管、射频 PNP 晶体管、射频 MOSFET、隧道二极管、传输线及铁氧体磁珠。

十五、机电类器件库

射频元器件库共有 8 个系列, 包含设备、运动控制器、传感器、机械载荷、同步触点、线圈继电器、辅助开关及保护装置。

十六、NI 元器件库

NI 元器件库共有 9 个系列, 包含 5 种数据采集卡、2 个可配置嵌入式系统及信号调理模块等。

十七、连接器

连接器共有 12 个系列, 包含不同厂家的常用接插件。

十八、微控制器

控制器件库共有 4 个系列, 包含 805X 系列单片机、PIC 系列芯片、读/写存储器及制度存储器等。

第四节 仪器仪表库

Multisim 中的仪器仪表是一种具有虚拟面板的计算机仪器, 主要由计算机和控制软件

组成。操作人员通过图形用户界面用鼠标或键盘来控制仪器运行，以完成对电路的电压、电流、电阻及波形等物理量的测量。虚拟仪器与实际的仪器仪表的操作非常相似，这使仿真实验的操作更加直观、方便。

NI Multisim 12 的仪器仪表库存放有 20 多种虚拟仪器，包括数字万用表、函数信号发生器、示波器（模拟示波器和数字示波器）、波特图仪、字信号发生器、逻辑分析仪、功率表、失真度分析仪、频谱分析仪、网络分析仪、测量探针、Lab View 仪器以及电流探针等，如图 4-4-1 所示。

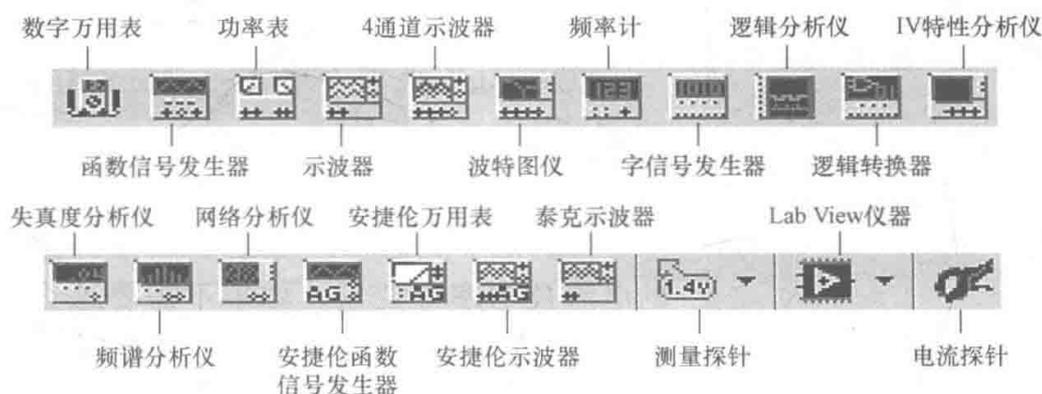


图 4-4-1 仪器仪表库

虚拟仪器仪表的基本操作方法是：

- (1) 仪器选用：从仪器仪表库中将所用的仪器图标用鼠标拖放到电路图工作区即可。
- (2) 仪器连接：将仪器图标上的接线端与相应电路的连接点连接。
- (3) 仪器参数设置：双击仪器图标打开仪器面板，用鼠标点击仪器面板上相应的按钮、旋钮和参数设置对话框完成仪器仪表的参数设置。
- (4) 仿真运行：打开软件的仿真开关后，可观测数据或观察波形。

在同一电路中可以使用一种多台或多种多台虚拟仪器仪表，而且在仿真过程中，可以根据实际需要实时修改仪器的参数，以满足实验要求。

第五节 基本分析方法

NI Multisim 12 教育版中提供了 19 种分析方法，包括直流分析、交流分析、时域分析和频域分析等。启动 Multisim 12 菜单中的“Analyses”命令，弹出图 4-5-1 所示的“Analysis”菜单。点击设计工具栏中的  按钮，同样可以得到图 4-5-1 所示的菜单。

下面对本节中常用的分析方法加以介绍。

一、直流工作点分析 (DC Operating Point Analysis)

直流工作点分析是在电路电感短路、电容开路的情况下，计算电路的静态工作点。在对电路进行直流工作点分析时，电路中的交流电压源视为短路，交流电流源视为开路，电容视为开路，电感视为短路，数字器件视为高阻接地。直流分析的结果通常用于电路的进一步分析，如在交流小信号分析之前，先进行直流工作点分析，以确定交流小信号情况下的非线性器件的工作状态。

启动“Simulate”菜单中“Analyses”命令下的“DC Operating Point Analysis”，或者

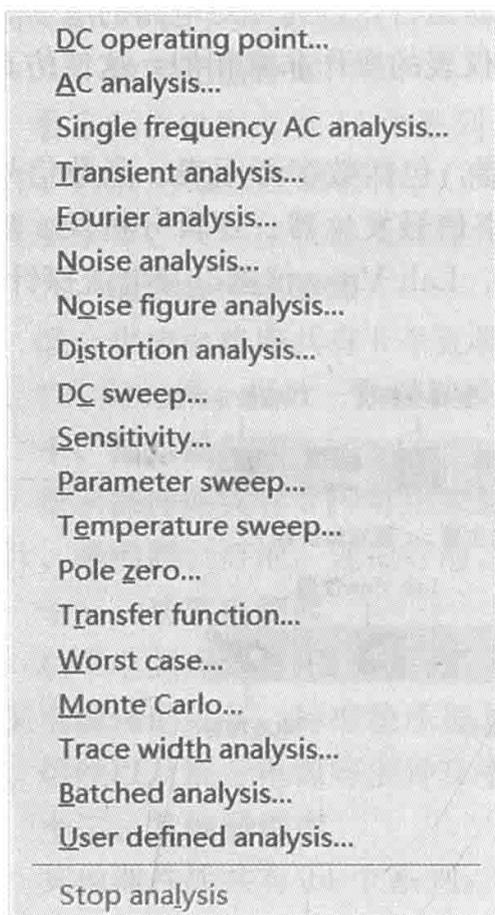


图 4-5-1 Analysis 菜单

点击▼按钮，选择“DC Operating Point Analysis”，会出现图 4-5-2 所示的“DC Operating Point Analysis”对话框。

该对话框包括“Output”、“Analysis Options”和“Summary”3个选项卡和 **Simulate**、**OK**、**Cancel** 和 **Help** 4个按钮。这3个选项卡也会出现在其他分析方法的对话框中，在此给出详细介绍。

1. “Output”选项卡

“Output”选项卡用于选定所要分析的节点和相关属性，共有3个设置区。

(1) “Variables in circuit”区内列出的是电路中可用于分析的节点电压、流过元器件的电流、元器件/模型的电流及功率等变量。如果不需要这么多的变量显示，可点击“Variable in circuit”下拉列表的下箭头按钮，出现图 4-5-3 所示的变量类型选择表，从中选取所需要的变量类型。

图中“Circuit Voltage and current”是显示电压和电流变量，“Circuit Voltage”仅显示电压变量，Circuit Current 仅显示电流变量，“Device/Model Parameters”

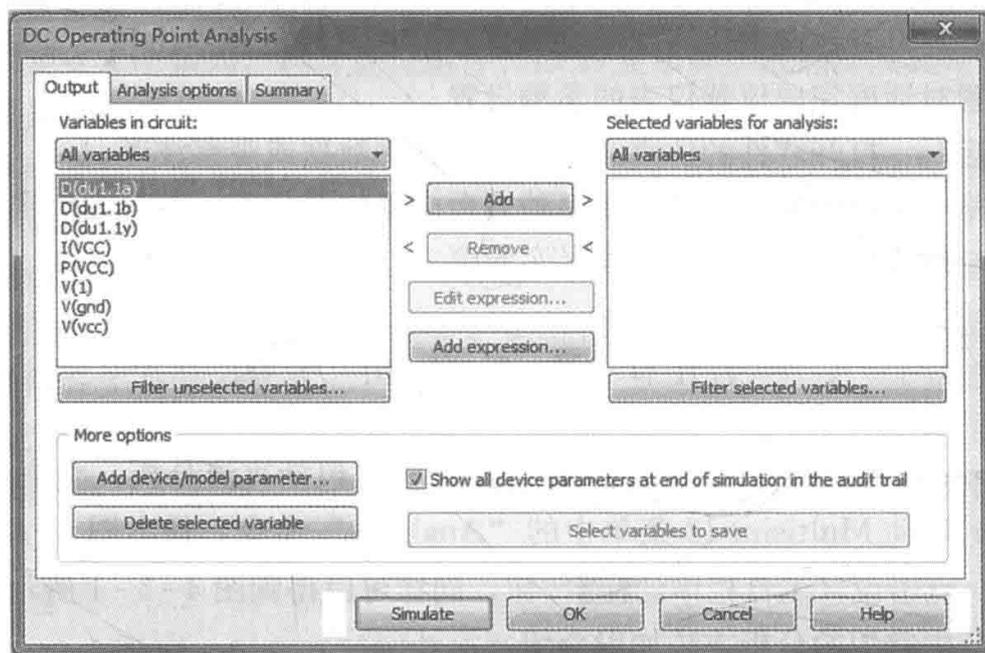


图 4-5-2 “DC Operating Point Analysis”对话框

显示的是元件/模型参数变量（如果有的话），“All variable”显示程序自动给出的全部变量。

如果还需要显示其他参数变量，可点击该栏下的“Filter Unselected Variable”按钮，可对程序没有自动选中的某些变量进行筛选。对话框如图 4-5-4 所示。

该对话框中有3个选项：“Display internal nodes”，显示内部节点；“Display submodules”，显示子模型的节点；“Display open pins”，把连接开路的引脚（即没被用到的引脚）

也显示出来。选中者将与节点等变量同时出现在“Variable in circuit”栏内。

(2) “Selected variable for analysis”区用来确定需要分析的节点。默认状态为空，需要用户从“Variables in circuit”中选取，然后点击“Plot during simulation”按钮即可将选中的变量移入“Selected variable for analysis”栏中。如果不想分析已选中的某一个变量，可以选中该变量，点击“Remove”按钮将其移回“Variables in circuit”栏中。

“Filter selected variables”与“Filter Unselected variables”类似，不同之处在于前者只能筛选由后者已经选中且放在“Selected variables for analysis”栏的变量。

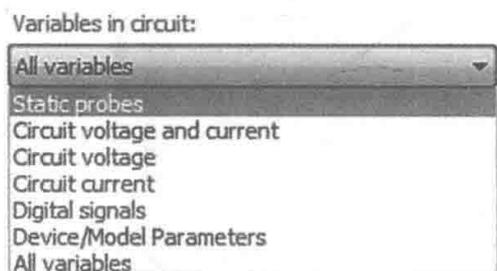


图 4-5-3 变量类型选择列表

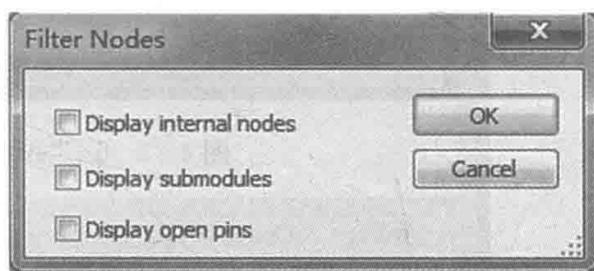


图 4-5-4 “Filter Nodes”对话框

(3) “More Option”区中按钮的作用分别为：

“Add device/model parameter”是在“Variable in Circuit”区内增加某个元器件/模型的参数。点击该按钮，出现图 4-5-5 所示的对话框。

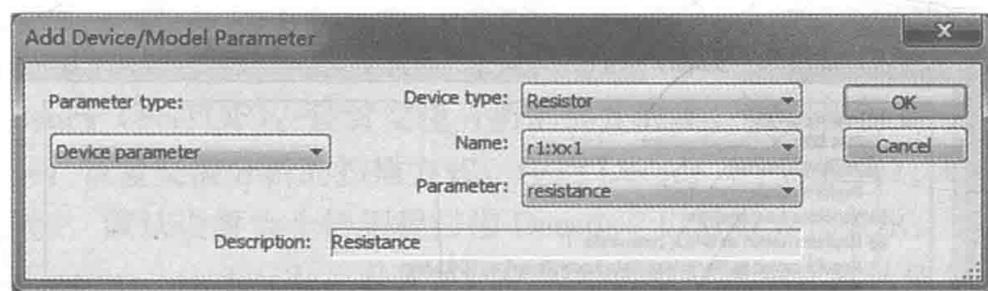


图 4-5-5 “Add Device/Model Parameter”对话框

可以在“Parameter Type”栏内指定所要增加参数的类型；然后分别在“Device Type”栏内选定元件模块的种类，在“Name”栏中选定元件名称（序号），在“Parameter”栏中选定所要使用的参数。

“Delete selected variables”是删除通过“Add device/model parameter”已选择但不再需要的变量。首先选中变量，然后点击该按钮即可删除。

2. “Analysis Options”选项卡

该选项卡用来设置与仿真分析有关的分析选项，建议使用默认值，如图 4-5-6 所示。

“Analysis Options”选项卡中有两个选项区。“SPICE options”是用来对非线性电路的 SPICE 模型进行设置。其中“Use Multisim defaults”是使用软件默认选项；“Use custom settings”用来选择程序是否采用用户设定的分析选项，可在“Customize”中进行选取设定，单击“Customize”按钮，出现“Customize Analysis Options”对话框，该对话框中给出了“Global”、“DC”、“Transient”、“Device”和“Advanced”5个选项卡，用户可以对某个仿真电路分析进行自定义设置，点击对话框左下角的 **Restore to recommended settings** 按钮，即可恢复

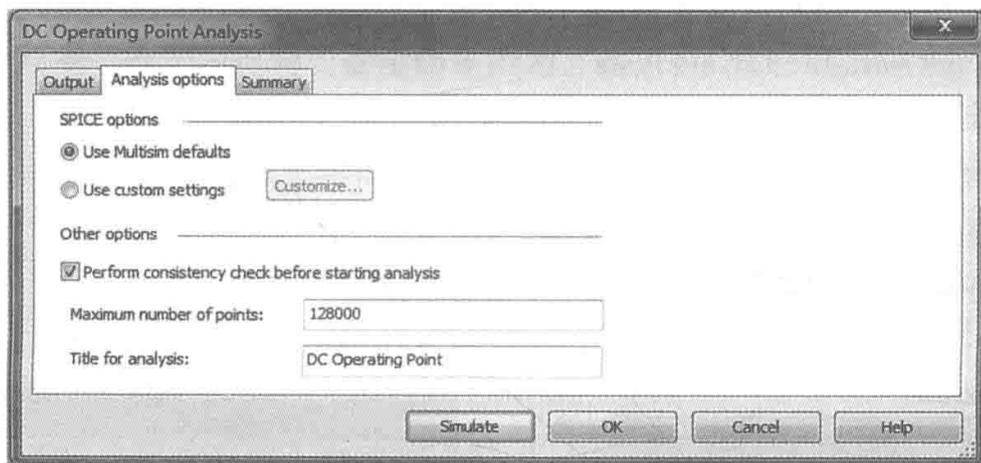


图 4-5-6 “Analysis Options” 对话框

默认值。

“Other options” 是用于设置与仿真相关的其他属性。其中，“Perform Consistency check before starting analysis” 表示在分析之前先进行一致性检查；“Maximum number of” 栏用来定义每个点的最大值；“Title for analysis” 用来设置分析结果显示的标题。

3. Summary 选项卡

选项卡对分析设置进行汇总确认，如图 4-5-7 所示。

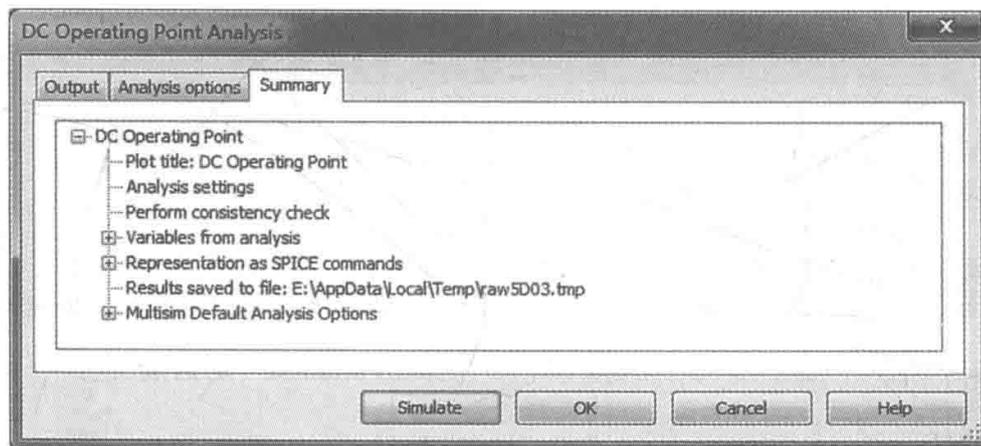


图 4-5-7 “Summary” 选项卡

在该选项卡中，程序给出了所设定的参数和选项，用户可确认检查所要进行的分析设置是否正确。

4. 保存设置

经过前两个选项卡的设置，如果在“Summary”页内确认正确，可以点击 **OK** 按钮保存设置。

5. 放弃设置

点击 **Cancel** 按钮，可以放弃设置。

6. 仿真分析

点击 **Simulate** 按钮可进行仿真分析，得到直流工作点仿真分析结果。

二、交流分析 (AC Analysis)

交流分析是分析电路的小信号频率响应。在进行交流分析时程序自动先对电路进行直流

工作点分析，以便建立电路中非线性元件的交流小信号模型，并把直流电源置零，交流信号源、电容及电感等采用其交流模型，如果电路中含有数字元件，将视为一个接地的大电阻。交流分析是以正弦波作为输入信号，即不管在电路的输入端输入何种信号，进行交流分析时都将自动以设定频率范围内的正弦波替换。交流分析的结果是幅频特性和相频特性两个图形。交流分析对话框如图 4-5-8 所示。

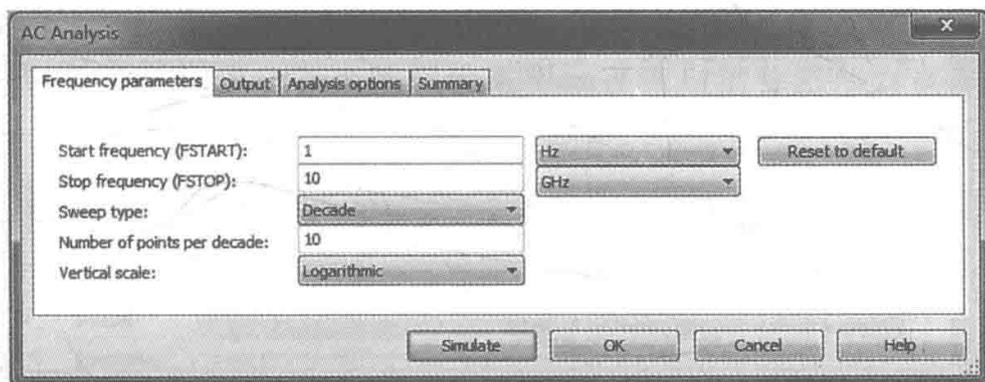


图 4-5-8 “AC Analysis”对话框

该对话框包含“Frequency Parameters”、“Output”、“Analysis Options”和“Summary”4个选项卡，除了“Frequency Parameters”选项卡外，其余选项卡与直流工作点分析的设置一样。“Frequency Parameters”选项卡包含下列选项：

1. 参数设置

Start frequency (FSTART): 设置交流分析的起始频率，默认值为 1Hz。

Stop frequency (FSTOP): 设置交流分析的终止频率，默认值为 10GHz。

Sweep type: 设置交流分析的扫描方式，包括 Decade (十倍频程)、Octave (八倍频程) 和 Linear (线性)。默认设置为十倍频程扫描 Decade，以对数方式显示。

Number of points per decade: 设置每十倍频程的取样数量，默认值为 10。

Vertical scale: 用以选择输出波形纵坐标刻度形式，包括 Decibel (分贝)、Octave (八倍)、Linear (线性) 和 Logarithmic (对数)。默认设置为 Logarithmic (对数) 或 Decibel (分贝)。

2. 默认值恢复

点击 **Reset to default** 按钮，将所有设置恢复为程序默认值。

3. 仿真分析

点击 **Simulate** 按钮，即可在显示图上获得被分析节点的频率特性曲线。交流分析的结果，可以显示幅频特性和相频特性两个图。如果用波特图仪对电路进行测试，会得到同样的交流频率特性。

在对模拟小信号电路进行交流分析时，数字器件将被视为高阻接地。

三、瞬态分析 (Transient Analysis)

瞬态分析是一种非线性时域 (TimeDomain) 分析，在有无激励信号的情况下计算电路的时域响应。分析时，电路的初始状态可由用户定义，也可由程序自动进行直流分析，用直流解作为电路的初始状态。当瞬态分析的对象是节点的电压波形时，结果与用示波器观察到的结果相同。瞬态分析的对话框如图 4-5-9 所示。

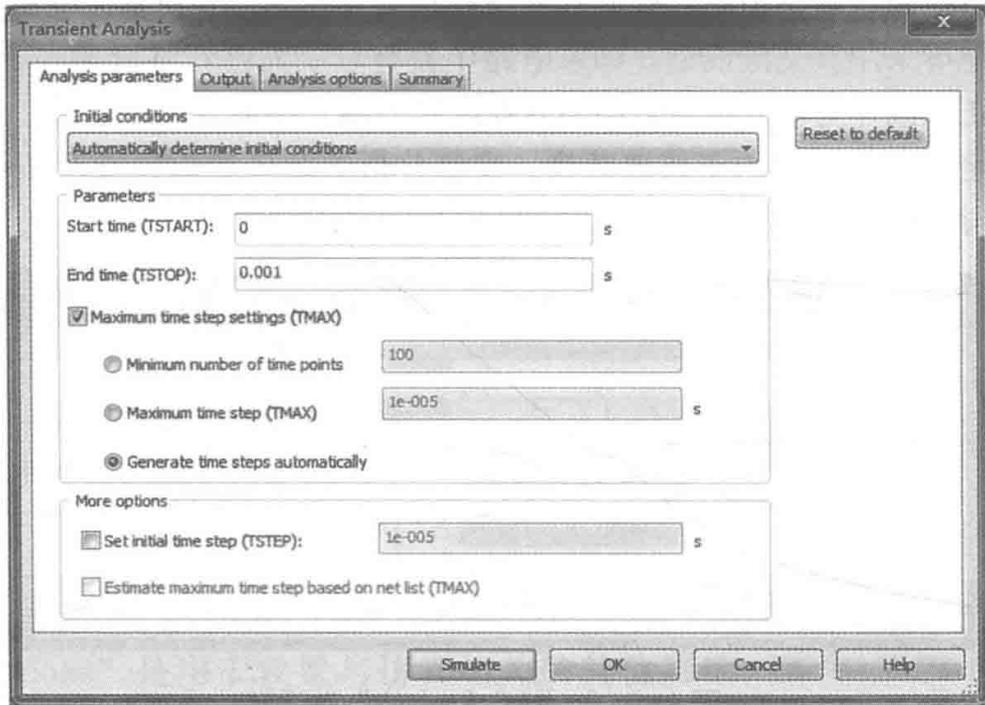


图 4-5-9 “Transient Analysis” 对话框

该对话框包含 4 个选项卡，除了“Analysis Parameters”选项卡外，其余选项卡与直流工作点分析的设置一样。下面介绍“Analysis Parameters”选项卡包含的项目。

1. “Initial conditions” 区

设置初始条件，包括：

Automatically determine initial conditions：由程序自动设置初始值。

Set to zero：将初始值设为 0。

User defined：由用户定义初始值。

Calculate DC operating point：通过直流工作点得到初始值。

2. “Parameter” 区

对时间间隔和步长等参数进行设置，包括：

Start time：设置开始分析的时间。

End time：设置结束分析的时间。

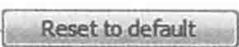
Maximum time step settings：设置分析的最大时间步长。其中，“Minimum number of time point”，可以设置单位时间内的取样点数，数值越大在一定时间内分析的点数越多，分析需要的时间越长；“Maximum time step (TMAX)”，可以设置最大的取样时间间距，数值越大相应的步长所对应的时间越长；“Generate time steps automatically”，由程序自动决定分析的时间步长。

3. More options 区

“Set initial time step (TSTEP)”选项由用户决定是否自行确定起始时间步长，在其右边栏内输入步长大小；如不选择，则由程序自动约定。

“Estimate maximum time step based on net list”选项用来决定是否根据网表来估算最大时间步长。

4. 恢复默认值

单击  按钮，把所有设置恢复为程序默认值。

5. 仿真分析

点击 **Simulate** 按钮，即可在显示图上获得被分析节点的瞬态特性曲线。

四、直流扫描分析 (DC Sweep Analysis)

直流扫描分析是用于计算电路中某一节点的直流工作点随电路中一个或两个直流电源的数值变化的情况。利用直流扫描分析，可以快速的根据直流电源的变动范围确定电路的直流工作点。作用相当于每变动一次直流电源的数值，则对电路做一次不同的仿真。如果电路中有数字器件，分析时将其视为一个大的接地电阻。直流扫描分析的对话框如图 4-5-10 所示。

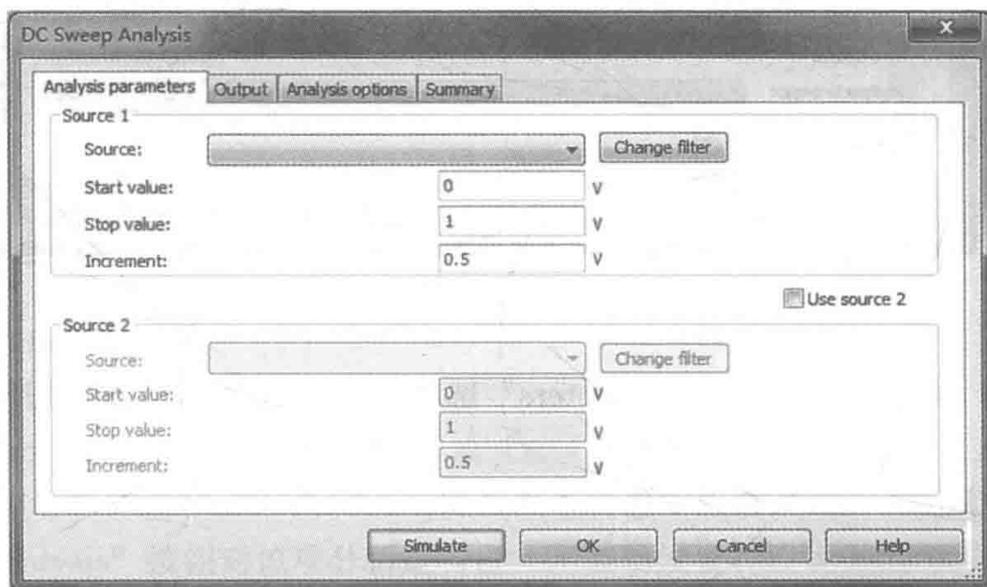


图 4-5-10 “DC Sweep Analysis” 对话框

该对话框包含“Analysis Parameters”、“Output”、“AnalysisOptions”和“Summary”4个选项卡，除了“Analysis Parameters”选项卡外，其余选项卡与直流工作点分析的设置一样。“Analysis Parameters”选项卡包括“Source 1”与“Source 2”两个区，两个区中的各选项相同。每个区各有下列选项：

Source: 选择所要扫描的直流电源。

Start value: 设置开始扫描的数值。

Stop value: 设置结束扫描的数值。

Increment: 设置扫描步长。该值取得越小，其显示出的曲线越平滑，但仿真速度会变慢。

Change filter: 其功能与“Output”对话框中的“Filter Unselected Variables”相同，选择 Source 表中过滤的内容。

如果需要指定第 2 个电源，则需要选择“Use source 2”选项。

五、参数扫描分析 (Parameter Sweep Analysis)

参数扫描分析是通过改变电路中某些元件的参数，在一定取值范围内变化时对电路直流工作点、瞬态特性及交流频率特性等的影响进行分析，以便对电路的某些性能指标进行优化。参数扫描分析的对话框如图 4-5-11 所示。

该对话框包含“Analysis Parameters”、“Output”、“Analysis Options”和“Summary”

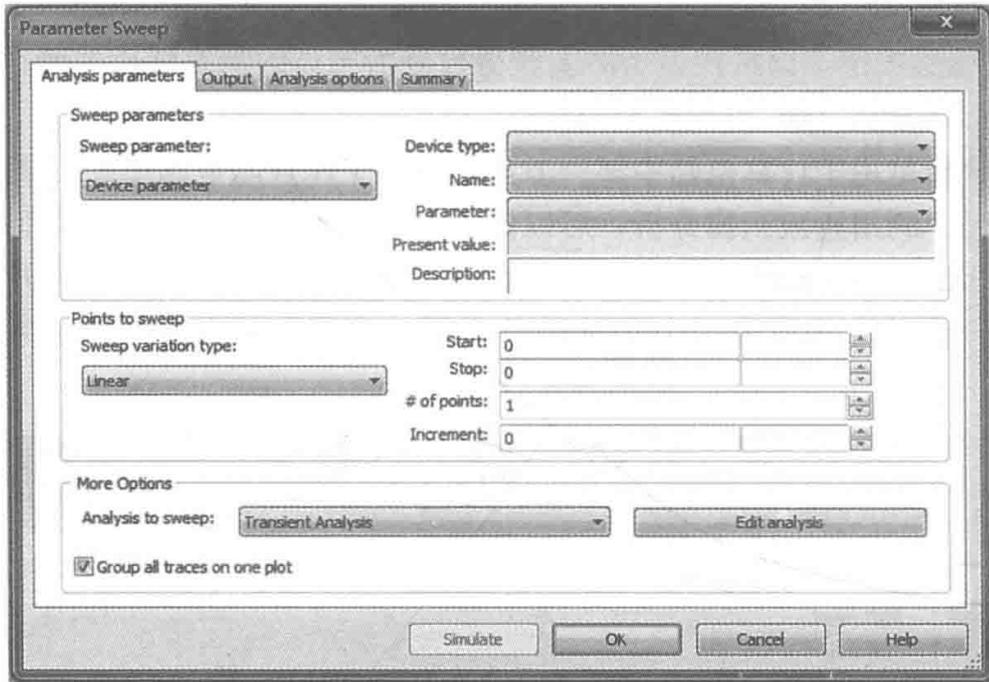


图 4-5-11 “Parameter Sweep Analysis” 对话框

共 4 个选项卡，除了“Analysis Parameters”选项卡外，其余页与直流工作点分析的设置一样。

“Analysis Parameters”选项卡包含下列选项：

1. “Sweep Parameter” 区

该区用于选择扫描的元件及参数。扫描参数类型有元件参数（Device Parameter）或模型参数（Model Parameter）。选择不同的扫描参数类型后，将有不同的项目供进一步选择。

（1）选择元件参数类型。

Device Parameter：选择元件参数类型，该区的右边有 5 个栏用以说明与该器件参数有关的信息，根据需要作进一步选择。

Device Type：选择所要扫描元件的种类，这里包括电路图中所有用到的元件种类，有 Capacitor（电容器类）、Diode（二极管类）、Resistor（电阻类）、Vsource：（电压源类）等。

Name：选择要扫描的元器件序号，如“Device Type”栏内选择“Resistor”，则此处可选择电阻。

Parameter：选择要扫描元件的参数，不同元件有不同的参数，其含义在“Description”栏内说明。

Present Value：为目前 Parameter 参数的设置值。

Description：用以描述目前所选中的是元件参数类型，不可更改。

（2）选择元件模型参数类型。

Model Parameter：选择元件模型参数类型，该区右边同样会出现用以说明与该器件参数有关的信息。这 5 个栏中提供的选项，不仅与电路有关，而且与选择 Device Parameter 对应的选项有关，需要注意区别。

2. “Points to sweep” 区

该区用于选择扫描方式。

Sweep Variation Type：选择扫描变量类型，提供四种变量类型，分别为 Linear（线性

刻度扫描)、Octave (八倍刻度扫描)、Decade (十倍刻度扫描)、List (取列表值)。

如果选择“Linear”、“Octave”或“Decade”选项,该区右边会出现4个栏,如图4-5-11所示。在“Start”中输入开始扫描值,在“Stop”中输入停止扫描值,在“# of points”中输入扫描的点数,在“Increment”中输入扫描增量。在这4个数值之间有: $(\text{Increment}) = [(\text{Stop}) - (\text{Start})] / [(\text{\# of points}) - 1]$,故“# of points”与“Increment”只需指定其中之一,另一个由程序自动设定。

如果选择“List”选项,该区右边出现“Value list”栏,如图4-5-12所示,输入所取的值。如要输入多个不同的值,在数字之间以空格、逗点或分号隔开。



图 4-5-12 “list”选项的“Value list”栏

3. “More Options” 区

该区用于选择分析类型。

Analysis to sweep: 扫描分析类型,有 DC Operating Point (直流工作点分析)、AC Analysis (交流分析) 及 Transient Analysis (瞬态分析) 三种类型。在选定分析类型后,可点击“Edit Analysis”按钮对该项分析进行进一步编辑设置,设定方法与瞬态分析同。

Group all traces on oneplot: 选择此项将所有分析的曲线放置在一个分析图中显示。

六、传递函数分析 (Transfer Function Analysis)

传递函数分析是分析计算在交流小信号条件下,由用户指定的作为输出变量的任意两节点之间的电压或流过某一器件上的电流与作为输入变量的独立电源之间的比值,同时也将计算出相应的输入阻抗和输出阻抗。在进行传递函数分析时,首先计算电路的直流工作点,进而确定非线性元件在交流小信号条件下的线性化模型,最后求出电路传递函数等参数。分析中要求输入源必须是独立源。传递函数分析的对话框如图4-5-13所示。

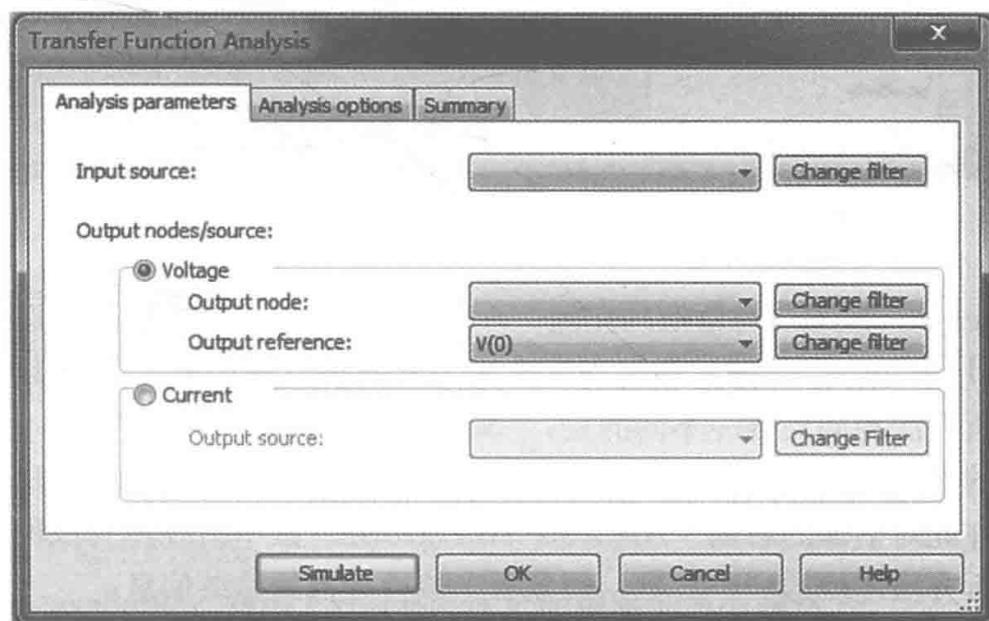


图 4-5-13 “Transfer Function Analysis”对话框

该对话框包含“Analysis Parameters”、“Analysis Options”和“Summary”共3个选项卡，除了“Analysis Parameters”选项卡外，其余选项卡与直流工作点分析的设置一样。“Analysis Parameters”选项卡中有下列选项：

(1) Input source: 选择所要分析的输入电源（电压源或电流源）。

(2) Output node/source: 选择所要分析的输出变量。

1) Voltage: 选择作为输出电压的变量，默认设置为选用。在“Output node”栏中指定将作为输出电压变量的节点号，默认设置为1；在“Output reference”栏中指定输出电压变量的参考节点号，默认设置为0（接地端）。

2) Current: 选择作为输出电流的变量。若选中，在“Output source”栏中指定所要输出的电流。

在 Analysis Parameters 对话框的右边有3个“Change Filter”按钮，分别对应左边的3个栏，其功能与“Output”对话框中的“Filter Unselected Variables”按钮相同，详见直流工作点分析中的“Output”对话框。

七、批处理分析 (Batched Analysis)

在实际电路分析中，通常需要对同一个电路进行多种分析，批处理分析可以将不同的分析功能放在一起依序执行。批处理分析的对话框如图4-5-14所示。

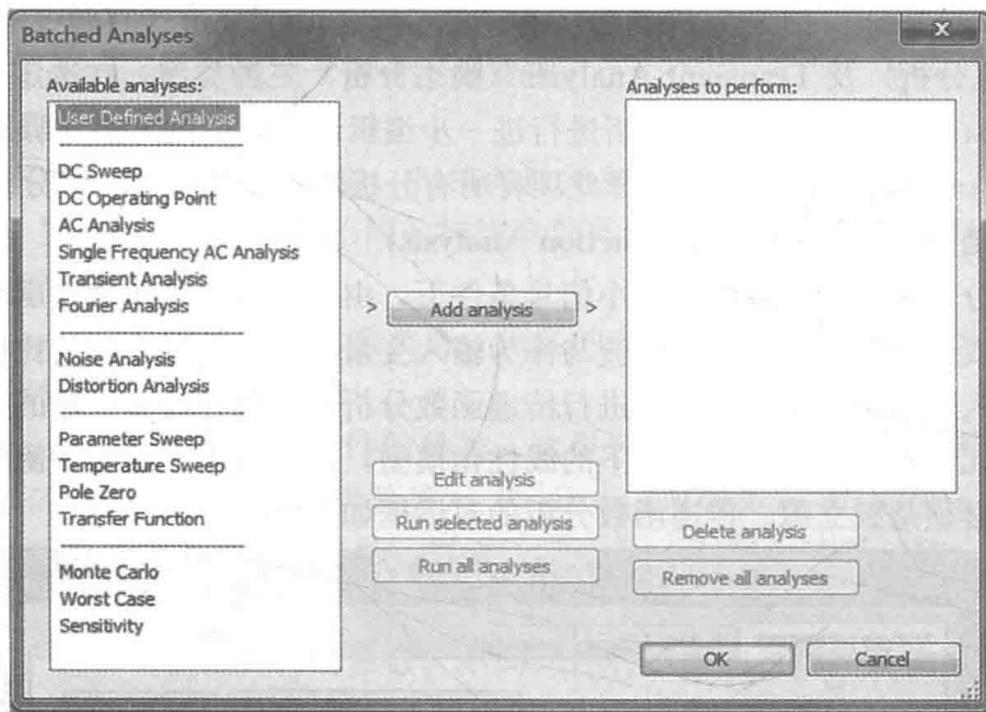


图4-5-14 “Batched Analysis”对话框

在“Batched Analysis”对话框的左侧“Available analysis”区中可以选择所要执行的分析，单击“Add analysis”按钮，则出现所选择分析的参数对话框。所弹出的对话框和之前介绍的各种分析方法相同，唯一不同的是，“Simulate”按钮变成了“Add to list”按钮。在所选分析方法的参数设置完毕之后，单击“Add to list”按钮，即回到“Batched Analysis”对话框，这时在此对话框的右侧“Analysis To Perform”区中出现将要该种分析的选项，然后单击该种分析方法左侧的“+”号，则显示出该种分析的总结信息。

如果需要继续添加所希望的分析，可以按照上述方法进行，全部选择完毕后，在

“Batched Analysis”对话框的“Analysis To Perform”区中将出现全部选择分析项，单击“RunAll Analysis”按钮，即执行所选定在“Analysis To Perform”区中的全部分析仿真。仿真结果将依次出现在“Analysis Graphs”中。

此外，“Batched Analyses”对话框中还包括如下选项：

Edit analysis: 对分析种类的参数进行编辑处理。

Delete analysis: 删除要执行的分析种类。

Run Selected analysis: 对选中的一个分析种类进行仿真分析。

Remove all analysis: 将已经选择的分析种类全部删除。

第六节 NI Multisim 12 的后处理器

后处理功能是在使用 NI Multisim 12 对电路进行仿真分析完成之后，将仿真所得到的各种分析结果再作进一步处理，共有三种情况。一种是仍在 NI Multisim 12 环境下对分析结果进行数学运算处理，如将电压乘以电流可以得到功率，将输出曲线除以输入曲线可以得到电压增益曲线等。第二种是将仿真分析所得到的资料（如原理图、曲线和数据等）提供给其他软件，作为下一部设计处理之用，如将得到的图表资料输出到 Excel 作进一步分析，或将电路图资料输出到 Ultiboard，以便制作印制电路板等。第三种是对电路原理图上的元器件和仪表的型号及数量进行统计，以便实际应用时选购这些器件。

NI Multisim 12 提供的后处理器（Postprocessor）是专门用来对仿真结果进行进一步数学处理的工具，它不仅能对仿真所得的曲线和数据进行单个化处理（如取绝对值、开方等），还可以对多个曲线或数据彼此之间进行运算处理（如将电压波形曲线与电流波形曲线相乘）。处理的结果仍以曲线或数据表形式显示。

仿真分析后，启动菜单栏上的“Simulate”菜单中“Postprocessor”命令，或者点击工具栏后处理器快捷图标进入后处理器对话框如图 4-6-1 所示，共有两个选项卡，即“Expression”和“Graph”。

在“Expression”选项卡中：

Select simulation results: 选择从哪一个仿真分析结果中取数据。

Variables: 选中的仿真分析结果中所有的变量。

Functions: NI Multisim 12 软件提供的数学运算函数。

Expressions: 从“Variables”列表中取变量，选择“Functions”列表中的函数，编辑要处理的表达式。表达式只能针对一个仿真分析结果，不同表达式可取自不同的仿真分析结果，该列表可以编辑多个表达式。

“Graph”选项卡界面如图 4-6-2 所示。

Pages: 单击“Add”，增加一图形页面，其名称可编辑；单击“Delete”，删除图形页面。

Diagrams: 单击“Add”，在图形页面上增加一曲线，其名称可编辑；单击“Delete”，删除该图形页面中选中的曲线。

Expressions available: 列出 Expressions 页面编辑的所有表达式。

Expressions available: 从 Expressions available 中选出要绘制处理的表达式。

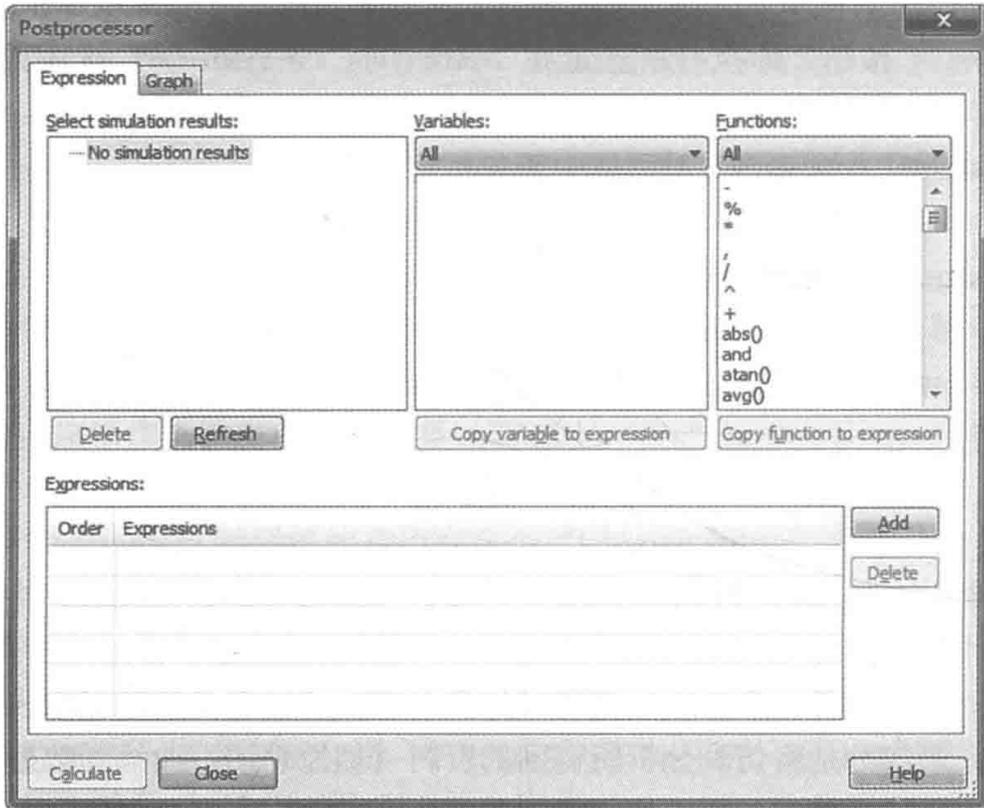


图 4-6-1 “Postprocessor” 对话框

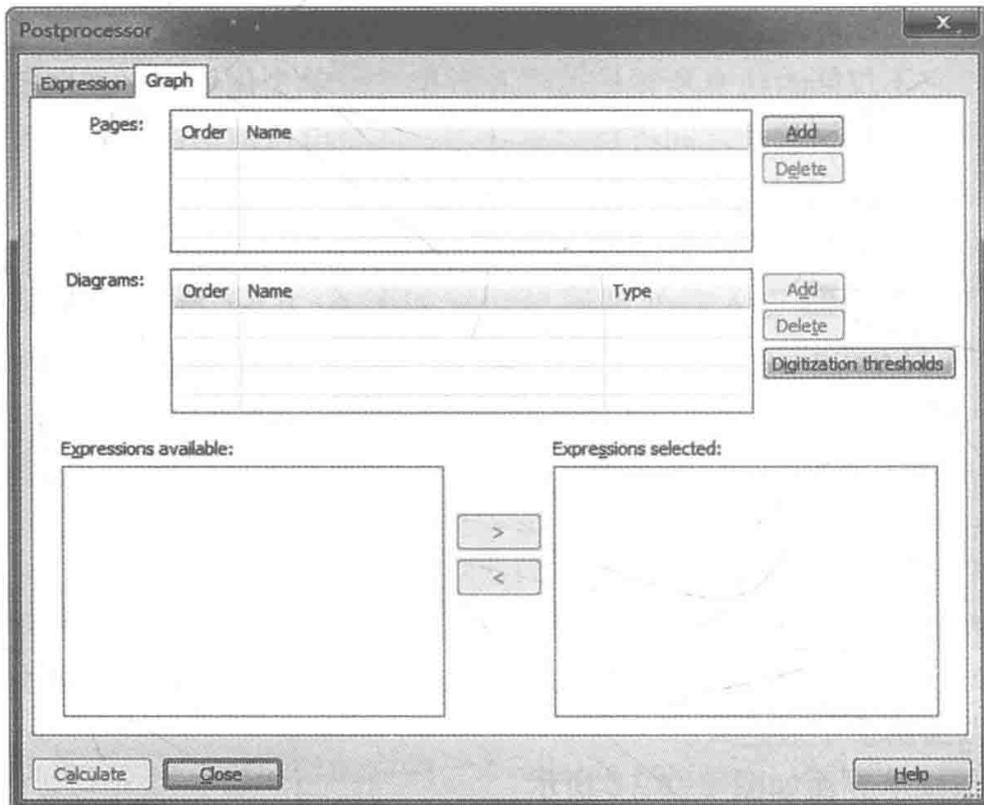


图 4-6-2 “Graph” 选项卡界面

Calculate: 单击该按钮, 将选中的表达式后处理的结果在 Grapher 中显示出来。

第七节 NI Multisim 12 的基本操作

利用 NI Multisim 12 软件创建一个电路原理图包括建立电路文件、设置电路界面、选取并放置元器件、连接线路、编辑处理及保存文件等步骤。

一、建立电路文件

启动 NI Multisim 12 程序,则在 NI Multisim 12 基本界面上会自动打开一个空白的电路文件。在 NI Multisim 12 程序正常运行时,只需点击系统工具栏中“New”按钮,同样会出现一个空白的电路文件,系统自动命名为“Design 1”,可以在保存此电路文件时重新命名。

二、设置电路界面

NI Multisim 12 的基本界面好比一张制图纸,所以 NI Multisim 12 又形象地把基本界面上的原理图编辑区称为 Workspace。在进行某个实际电路实验之前,通常要定义一下制图纸张的大小、边界、电路的名称、电路的实验者及实验时间、电路中元器件的符号标准、连线的粗细、编辑区的背景及电路元件的颜色等。在 NI Multisim 12 中,可以通过“Options”菜单中的“Sheet Properties”(工作界面设置)对话框中的若干个选项来实现。具体操作如下:

(1) 选取“Options”中的“Sheet Properties”,打开“Sheet Properties”对话框,如图 4-7-1 所示。

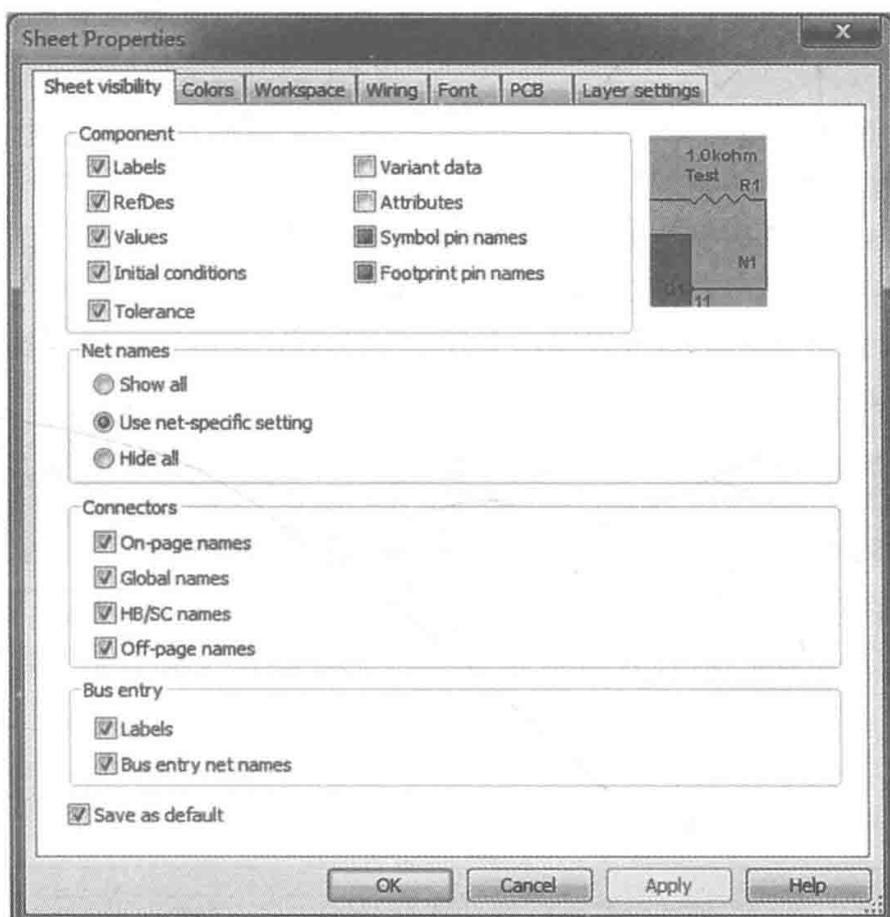


图 4-7-1 “Sheet Properties”对话框

“Sheet Properties”对话框中共有 7 个选项卡,每个选项卡为单独的一个页面,包含若

干个功能选项。用户通过对这 7 个选项卡的不同功能项的设置就可以定义一个电路界面。

(2) 选择“Workspace”选项卡，完成对电路图纸进行设置，如图 4-7-2 所示。

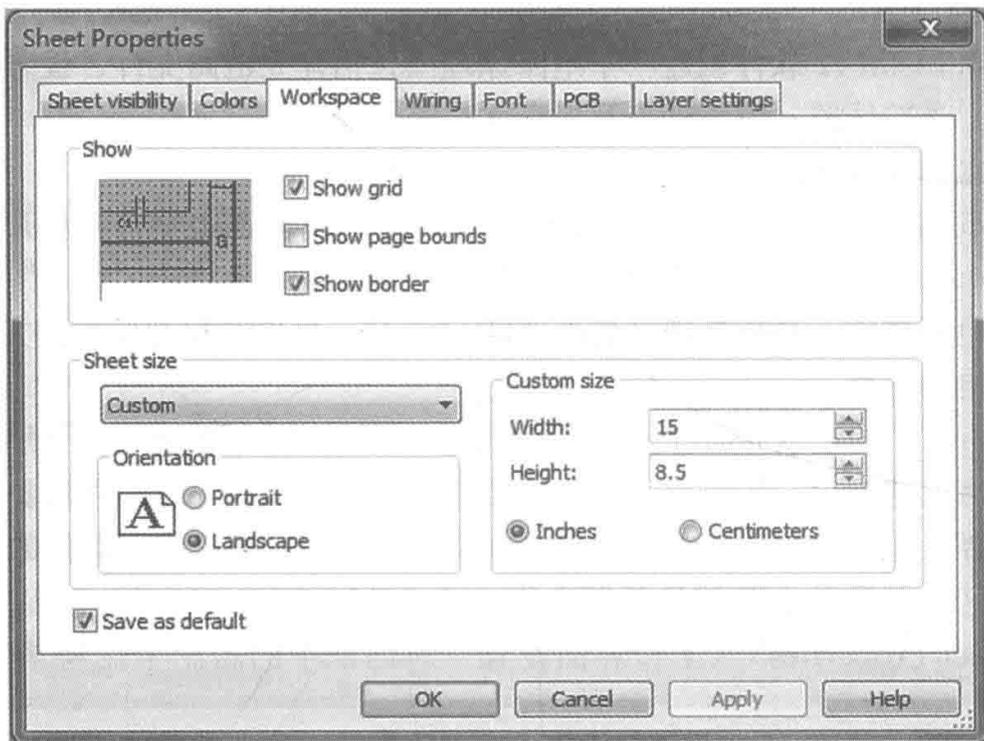


图 4-7-2 “Workspace”选项卡

此选项卡上有两个功能区，分别是“Show”和“Sheet size”。其中，“show”区的各选项的功能如下：

Show Grid: 选择电路工作区中是否显示网格，使用网格可方便电路元器件之间的连接，使创建出的电路图整齐美观。

Show page bounds: 选择电路工作区是否页面分隔线。

Show border: 选择电路工作区是否显示显示边界。

“Sheet Size”区域的功能是设置图纸大小，与 Word 中的页面设置类似。

(3) 选择“Wiring”选项卡，完成导线和总线宽度进行设置，如图 4-7-3 所示。

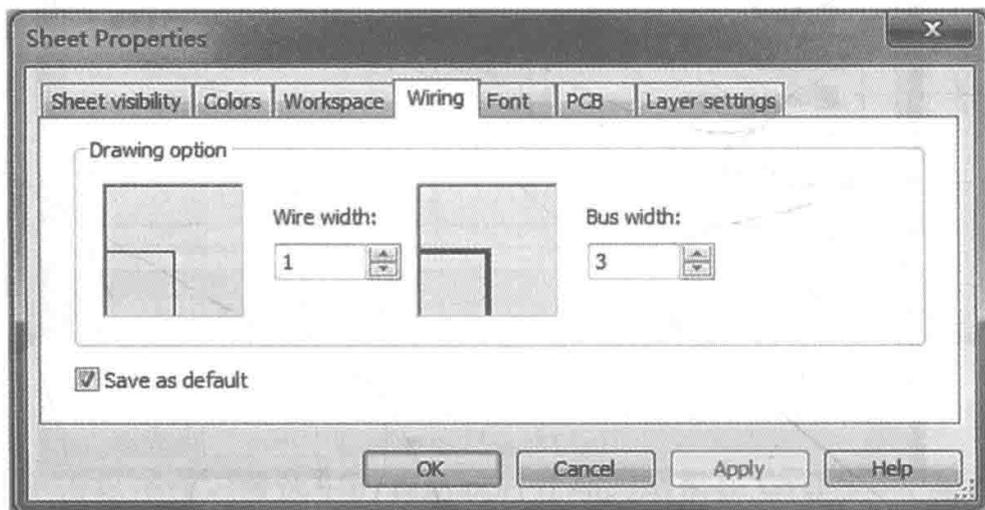


图 4-7-3 “Wiring”选项卡

(4) “Sheet visibility” 选项卡，完成对电路各种参数的设置，如图 4-7-4 所示。

此选项卡上有四个功能区，分别是 Component、Net names、Connectors 和 Bus entry。各功能区主要选项的功能如下：

Labels: 用来显示元器件的标识。

RefDes: 用来显示元器件的编号。

Values: 用来显示元器件的数值。

Initial conditions: 用来显示元器件的初始化条件。

Symbol pin names: 用来显示元器件符合管脚名称。

Footprint pin names: 用来显示元器件封装管脚名称。

Show all: 电路中的节点全部显示。

Hide all: 电路中的节点全部隐藏。



图 4-7-4 “Sheet visibility” 选项

(5) 选取 “Options” 中的 “Global Preferences”，打开 “Global Preferences” 对话框，然后点击 “Components”，打开 “Components” 选项卡，如图 4-7-5 所示。

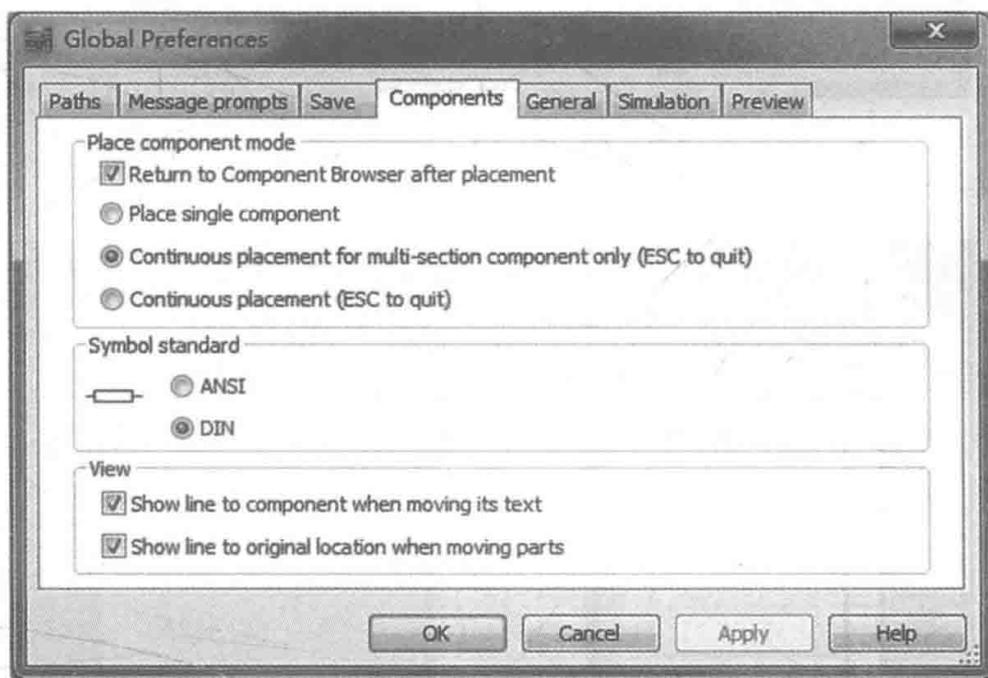


图 4-7-5 “Components” 选项卡

“Components” 选项卡是对界面上元件箱出现的形式、元件箱内元件的符号标准及从元件箱中选用元件的方式的设置，此页面有三个功能区，分别为 “Place Component mode”、“Symbol standard” 和 “View”。

选中 “Symbol standard” 区中的 “DIN” 项。NI Multisim 12 中提供了两套电气元器件符号标准，ANSI 是美国标准，DIN 是欧洲标准。DIN 与我国现行的标准相似，所以选择 DIN。

在设计过程中，为了更好地按所需风格来进行有关设计，需要调整一下相关窗口结构和背景设计，可利用 “Sheet Properties” 菜单中的 “Colors” 选项进行相关设置，如图 4-7-6 所示，具体调试请参照对话框中的英文说明。

经过以上简单的设置后，原理图编辑区如图 4-7-7 所示。

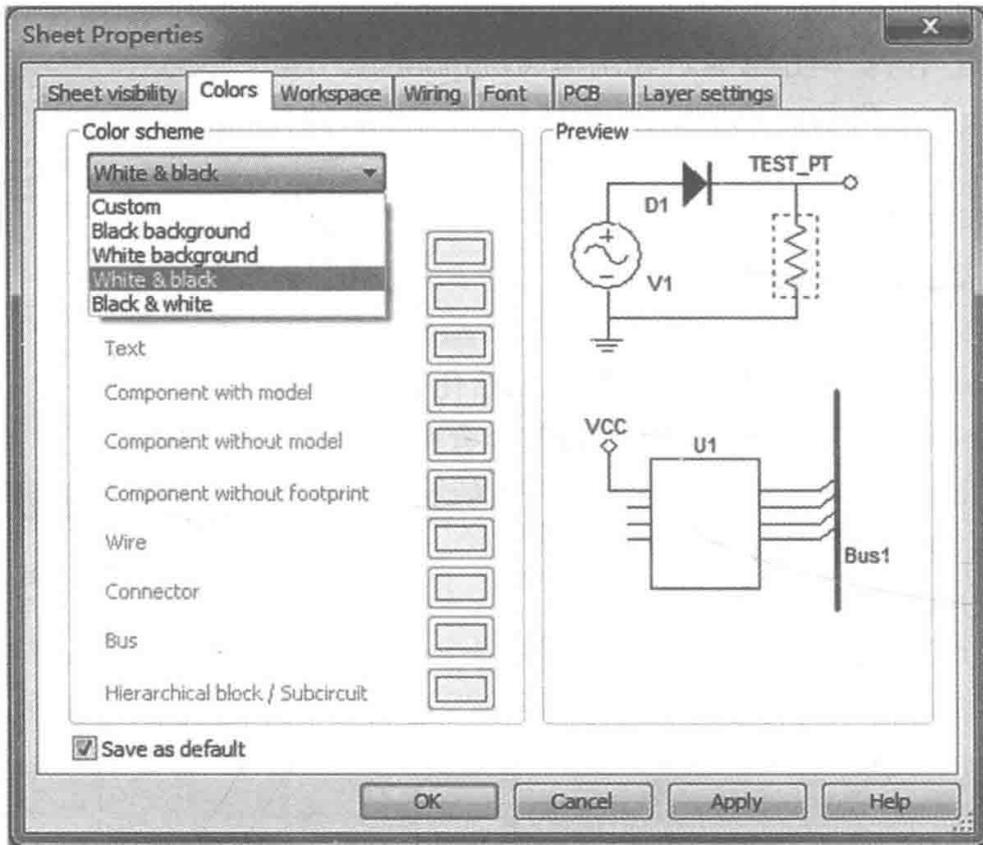


图 4-7-6 “Colors” 选项卡

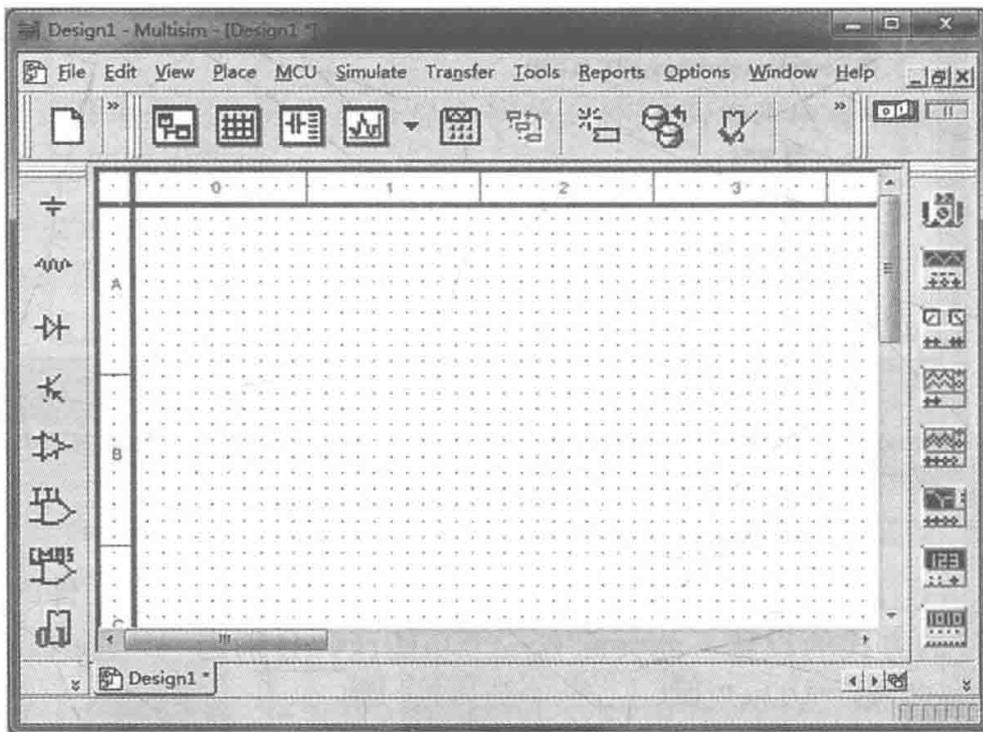


图 4-7-7 用户设置的界面

三、选取与放置元器件

1. 元器件的选取

选用元器件时，首先在元器件库中单击包含该元器件的图标，打开该元器件库；然后从选中的元器件窗口中，单击该元器件，单击“OK”按钮，用鼠标将该元器件放置在电路工

尽管该电源仍连接在电路中,但实际上隐含了开路的故障,这可为电路的故障分析提供方便。

放置完电路中的所有元器件后,就会在 NI Multisim 12 界面上的“*In Use List*”栏内列出电路所使用的所有元器件,可用来检查所调用的元器件是否正确。

四、线路连接及编辑处理电路中的元器件

1. 线路连接

放置完所有元器件,并对元器件标签、编号、数值、模型参数等进行设置后,需要对其进行线路连接。NI Multisim 12 的线路连接非常简单,将鼠标移到元件引脚处,鼠标指针就会变成小黑点,单击鼠标左键,即可拉出一条虚线;如要从某点转弯,则先点击转弯处,固定该点,然后再移动鼠标,将鼠标移到要连接的另一元件引脚处单击左键,则完成一根连线的连接。重复以上过程,画完所有连线(必须是端点连线,不能有重合的线段)。

2. 显示并修改电路的节点号

电路元件连接后,系统会自动分配给各个节点一个序号。通常这些节点序号并不出现在



图 4-7-10 “Net names”选项

电路上,可启动“Options”菜单中的“Sheet Properties”对话框,然后选中“Net names”中的“Show all”,如图 4-7-10 所示;或者在原理图编辑区的空白处点击鼠标右键,出现一个下拉菜单,点击“Properties”,

也会弹出“Sheet Properties”对话框,然后进行如上的操作,点击“OK”,电路的各个节点上就会显示出系统自动分配的节点号。

出现在电路各节点的序号不一定是人们习惯的表示,为了便于仿真分析,可以对节点号进行修改。可将鼠标箭头对准准备修改编号的连线并双击左键,弹出“Net Properties”对话框(见图 4-7-11),在“Preferred net name”中输入“vo”,点击“OK”,即可将电路中的 1 号节点改为“vo”。如果没有必要,这一步可以不做。

3. 改变元件和连线的颜色

在复杂的电路中,为了方便电路的连接和测试,可以将连线设置为不同颜色。具体方法是:将鼠标指向此元件或连线,点击右键则出现图 4-7-12 所示的下拉菜单,选定“Segment color”项,弹出图 4-7-13 所示的“Colors”对话框,选取所需要的颜色,点击确定即可。

4. 调整元件和文字标注的位置

如对某些元件放置的位置不满意,可以调整其位置。具体方法是:将鼠标指向这些元件,点击鼠标,这些元件的 4 个角上将各出现一个小黑方块,按住鼠标拖动到所要放置的位置松开鼠标即可;若要同时选中多个元件时,可按住鼠标左键,拖出一个虚线框框住所要移动的元件,松开左键即可。要大幅度移动元件的位置可以直接拖动;小幅度的位置调整,最

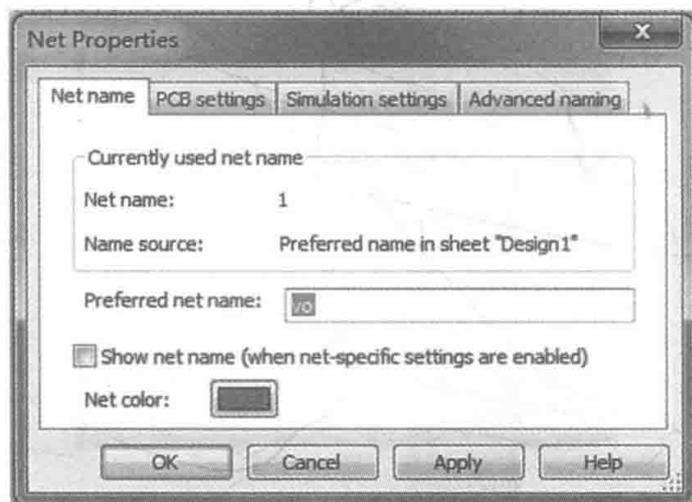


图 4-7-11 节点标号对话框

好利用键盘上的的方向键。



图 4-7-12 对元器件进行相关操作的菜单

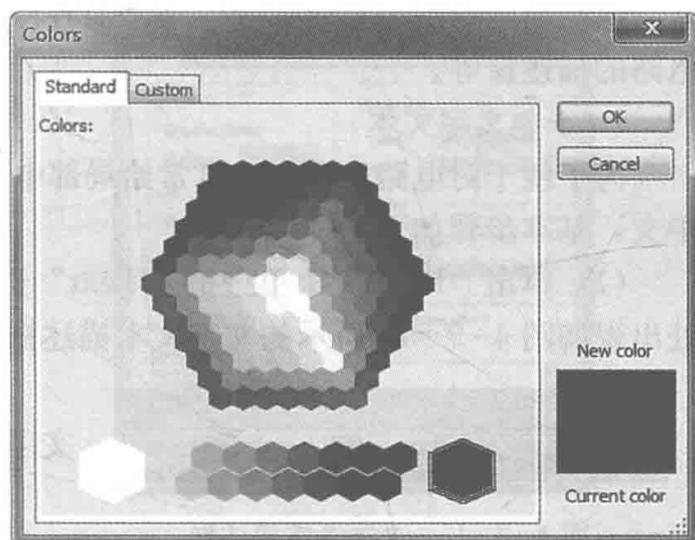


图 4-7-13 “Colors” 对话框

当对电路上的元件进行连线、移动、翻转或旋转时，元件的序号或数值等文字标注可能会出现在不恰当的位置上。其调整方法是：鼠标指向所要调整位置的元件序号或元件值上，点击则对应文字的 4 个角上格出现一个小黑方块表示选中，按住鼠标左键直接拖动或利用键盘上的方向键移动即可。

5. 删除元件或连线

如果想删除不需要的元件或连线，可用鼠标选中该元件或连线（元件符号或连线的 4 个角上各出现一个小黑方块），然后选择菜单项“Edit\Delete”就可将元件或连线删除（也可用键盘上的“Delete”键直接删除）。万一错删，可启动“Edit”菜单中的“Undo”命令，或者点击快捷按钮进行恢复。另外，当删除一个元件时，与该元件连接的连线也将一并消失，但删除连线不会影响到元件。

6. “连接点”的使用

“连接点”是一个小圆点，单击“Place Junction”可以放置“连接点”。一个“连接点”最多可以连接来自 4 个方向的导线。可以直接将“连接点”插入连线中。

五、输入/输出端

单击“Place”菜单中的“Connectors”选项，即可取出所需要的一个输入/输出端，如图 4-7-14 所示。

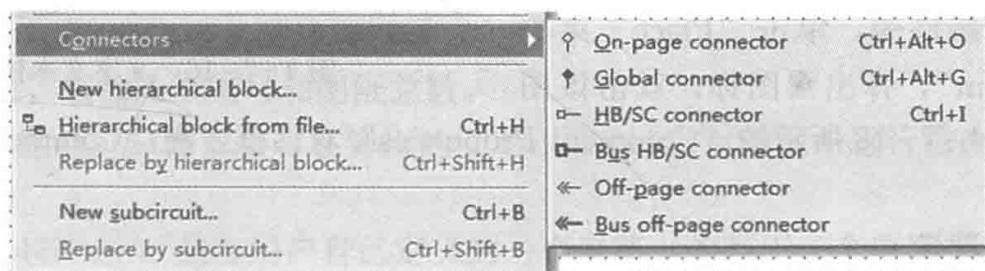


图 4-7-14 输入/输出端菜单

在电路控制区中，输入/输出端可以看作只有一个引脚的元器件，所有操作方法与元器件相同。不同的是输入/输出端只有一个连接点。

六、添加文本

电路图建立后,有时要为电路添加各种文本,比如放置文字、防止电路图的标题栏以及电路的描述窗等。

1. 添加文字文本

为了便于对电路的理解,常常给局部电路添加适当的注释,允许在电路图中放置英文或中文,基本步骤如下:

(1) 单击“Place”菜单中的“Text”选项,然后单击所要放置文字文本的位置,在该处出现如图4-7-15所示的文字文本描述框。

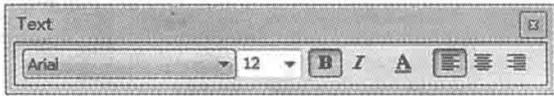


图4-7-15 文字文本描述框

(2) 在文字文本描述框中输入要放置的文字,文字文本描述框会随着文字的多少进行缩放。

(3) 输入完毕后,单击文字文本描述框以外的界面,文字文本描述框也相应消失,输入文本描述框中的文字就显示在电路图中。

(4) 如要对文字文文本进行修改,将鼠标移向该文字文本描述框,单击鼠标右键弹出图4-7-16所示的快捷菜单,可以对文字文本进行颜色、字体、大小、移动、删除等操作。

2. 添加电路描述窗

利用电路描述框对电路的功能和使用说明进行详细的描述,在需要查看时打开可以打开,否则关闭,不会占用电路窗口有限的空间。

单击“Tool”菜单中的“Description Box Editor”选项,弹出图4-7-17所示的电路描述框窗,可输入说明文字(中、英文均可),还可以插入声音、图片和视频。执行“View”菜单中的“Description Box”命令,可查看电路描述窗的内容,但不可修改。

3. 添加注释

利用注释描述框输入文本可以对电路的功能、使用进行简要说明。具体方法是:在需要注释的元器件旁,单击“Place”菜单中的“Comment”,弹出图标,双击该图标,弹出如图4-7-18所示的“Comment Properties”对话框,在“Comment text”区中输入文本。

4. 添加标题栏

在原理图编辑区的右下角通常放置一个标题栏,对电路的创建日期、创建人、校对人、审核人、图纸编号等信息进行说明。具体方法是:单击“Place”菜单中的“Title Block”,弹出一个将文件路径添加为NI Multisim 12安装路径下的Titleblocks子目录,在该文件夹中存放了NI Multisim 12为用户设计的10个标题栏文件。假设选中NI Multisim 12默认标

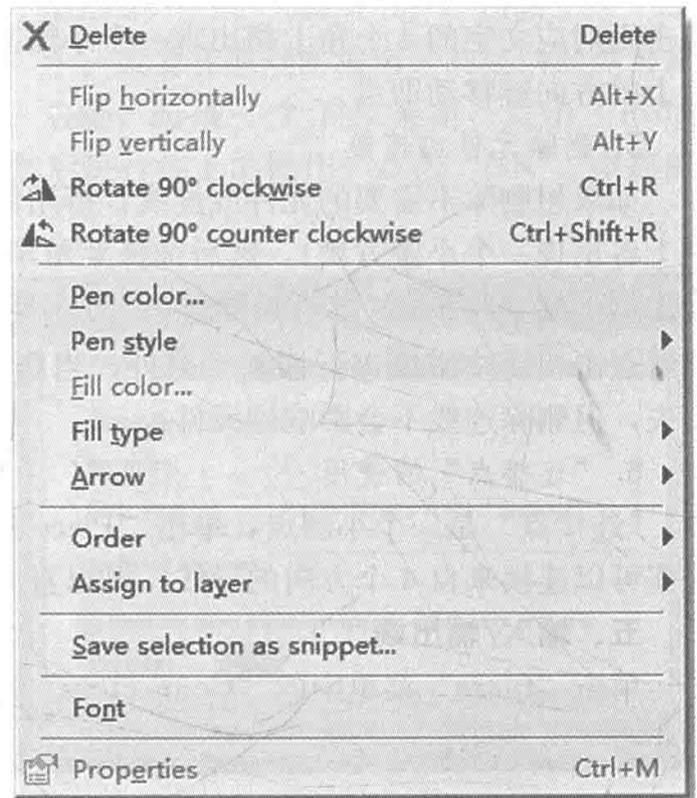


图4-7-16 文字文本描述框

题文件“default.tb7”，单击“打开”按钮，弹出如图 4-7-19 所示的标题栏。

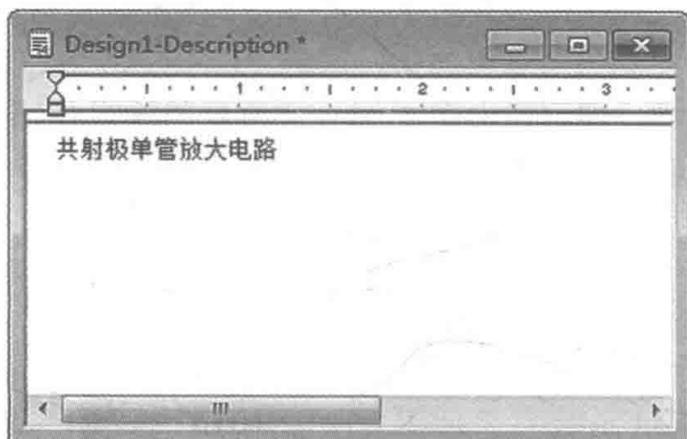


图 4-7-17 电路描述框



图 4-7-18 “Comment Properties”对话框

National Instruments 801-111 Peter Street Toronto, ON M5V 2H1 (416) 977-5550		 NATIONAL INSTRUMENTS ELECTRONICS WORKBENCH GROUP	
Title: Design1	Desc.: Design1		
Designed by:	Document No: 0001	Revision: 1.0	
Checked by:	Date: 2015-04-14	Size: Custom	
Approved by:	Sheet 1 of 1		

图 4-7-19 “default.tb7”标题栏

“default.tb7”标题栏主要包含以下信息：

Title：电路图的标题。默认为电路的文件名。

Desc：对工程的简要描述。

Designed by：设计者的姓名。

Document No：文档编号。默认为 0001。

Revision：电路的修订次数。

Checked by：校对人的姓名。

Date：默认为电路的创建日期。

Size：图纸的尺寸。

Approved by：电路审批人的姓名。

Sheet 1 of 1：当前图纸编号和图纸总数。

如要修改标题栏，只需双击，在弹出的“Title Block”对话框中进行修改即可。

七、子电路

子电路（Subcircuit）是由用户自己定义的一个电路（相当于一个电路模块），可存放在自定义元器件库供电路设计时反复调用。利用子电路可使大型的、复杂电路的设计模块化、层次化，从而提高设计效率与设计文档的简洁性、可读性，实现设计的重用，缩短产品的开发周期。

为了使用子电路，先要创建一个子电路，下面以共射极单管放大电路为例详细介绍子电

路的创建过程。

1. 创建子电路的电路图

按照前述的方法选取元器件、放置元器件、连线等步骤构建图 4-7-20 所示的共射极单管放大电路原理图。

单击“Place”菜单中的“Connectors”选项,即可弹出图 4-5-12 所示的输入/输出节点的菜单。对于本例,需要分别给输入端点、输出端点和两个公共端点添加输入/输出节点,添加节点后的电路如图 4-7-21 所示。

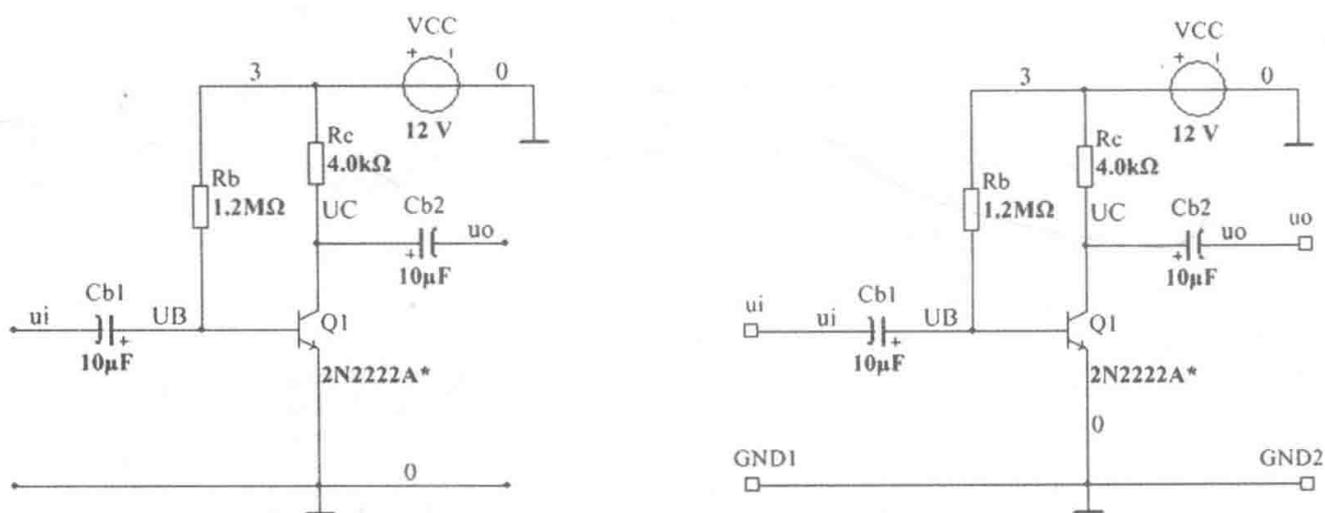


图 4-7-20 共射极单管放大电路原理图 图 4-7-21 添加输入/输出节点的共射极单管放大电路

2. 添加子电路

建立子电路的内部电路后,下一步就是将此电路转化成—个子电路并把它放置在原理图编辑区中,具体操作如下:

(1) 按住鼠标左键拖出一个方框,将图 4-7-21 所示的电路图全部圈入方框内。

(2) 单击“Place”菜单中“Replace by Subcircuit”选项或单击鼠标右键,在弹出的下拉菜单中单击“Replace by Subcircuit”选项,弹出“Subcircuit Name”对话框,如图 4-7-22 所示。

(3) 在“Subcircuit Name”对话框中输入创建的子电路名称,比如“CEC”。

(4) 命名之后,单击“OK”按钮,在原理图编辑区中的鼠标箭头处出现一个尾随的虚框,表明子电路已做好放置的准备。

(5) 移动鼠标到合适的位置单击鼠标左键,即可完成—个子电路的放置。放置的共射极单管放大电路子电路如图 4-7-23 所示。

在含有子电路的原理图编辑区中,子电路可作为一个元件使用。



图 4-7-22 “Subcircuit Name”对话框

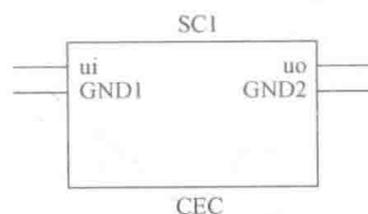


图 4-7-23 共射极单管放大电路子电路

3. 子电路的编辑

在原理图编辑区中双击子电路，弹出“Hierarchical Block/Subcircuit”对话框，如图 4-7-24 所示。通过此对话框可以修改子电路的参考序列号（Reference ID），单击“Open subcircuit”按钮，可以查看和修改子电路的电路图。

在原理图编辑区中对元件的操作都适合于子电路。如添加子电路后，子电路的名称就会出现在元件列表中，如图 4-7-25 所示；选中子电路后，单击鼠标右键执行相应的菜单命令，可以对子电路进行剪切、复制、水平翻转、垂直翻转、顺时针 90° 旋转、逆时针 90° 旋转、设置颜色、字体、符号等操作。

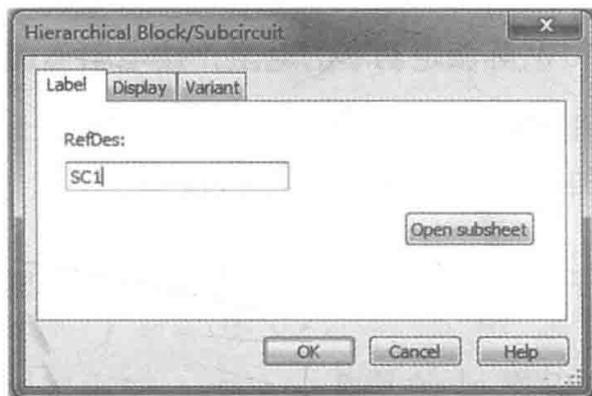


图 4-7-24 “Hierarchical Block/Subcircuit”对话框

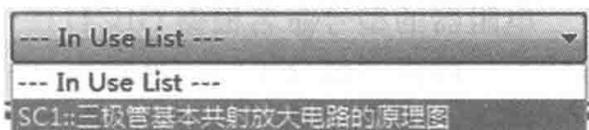


图 4-7-25 元件列表中子电路

除此之外，子电路的创建也可以采用先创建子电路符号再编辑具体电路的方法实现。单击“Place”菜单中“New Subcircuit”选项或单击鼠标右键，在“Place on Schematic”弹出的下拉菜单中点击“New Subcircuit”选项，弹出“Subcircuit Name”对话框，如图 4-7-26 所示。输入子电路的名称，单击“OK”按钮，出现如图 4-7-27 所示的子电路符号。



图 4-7-26 “Subcircuit Name”对话框

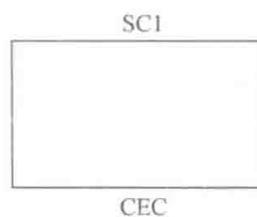


图 4-7-27 子电路符号

双击子电路符号，弹出如图 4-7-24 所示的“Hierarchical Block/Subcircuit”对话框，单击“Open subcircuit”按钮，弹出子电路编辑窗口，创建子电路的电路图即选取电路元器件、连线并添加输入/输出节点，返回主电路窗口时主电路窗口会显示带 I/O 引脚的子电路模块。

八、保存文件

- (1) 选择菜单项“File\Save”或点击工具栏中的存储快捷键，弹出保存文件对话框。
- (2) 选定保存文件的路径。
- (3) 在文件名编辑框中输入文件名，如“erjiguan”。
- (4) 单击“保存”按钮。

通过上述步骤，绘制的电路图就以“erjiguan.ms 12”为文件名的文件形式，保存在选定的路径中。

附录 A 常用电子元器件简介

一、电阻器

电阻器是电气、电子设备中用得最多的元件之一,是一种两端电子元件,当电流流过时,其两端的电压与电流成正比。电阻器主要用于控制和调节电路中的电流和电压,或用作消耗电能的负载。

电阻器有固定电阻器和可变电阻器之分,可变电阻器常称为电位器。

电阻器有不同的分类方法:按材料分,有线绕电阻、非绕线电阻和敏感电阻等不同类型;按功率分,有 $\frac{1}{16}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、1、2、5、10W等额定功率的电阻;按电阻值的准确度分,有准确度为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 等的普通电阻,还有准确度为 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1\%$ 和 $\pm 2\%$ 等的精密电阻。电阻器的类别可以通过外观的标记识别。

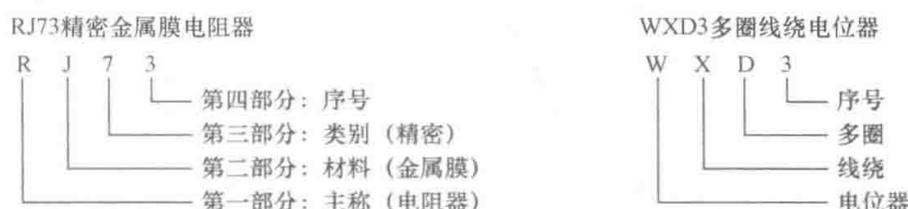
1. 电阻器型号命名方法

电阻器的型号命名根据 GB2471—1995《电子设备用固定电阻器、固定电容器型号命名方法》一般由四部分组成,见附表 A-1。

附表 A-1 电阻器的型号命名方法

第一部分:主称		第二部分:材料		第三部分:特征			第四部分:序号
符号	意义	符号	意义	符号	电阻器	电位器	
R	电阻器	T	碳膜	1	普通	普通	对主称、材料相同,仅性能指标、尺寸大小有区别,但基本不影响互换使用的产品,给同一序号;若性能指标、尺寸大小明显影响互换时,则在序号后面用大写字母作为区别代号
RP	电位器	H	合成膜	2	普通	普通	
		S	有机实芯	3	超高频	—	
		N	无机实芯	4	高阻	—	
		J	金属膜	5	高温	—	
		Y	氧化膜	6	—	—	
		C	沉积膜	7	精密	精密	
		I	玻璃釉膜	8	高压	特殊函数	
		P	硼酸膜	9	特殊	特殊	
		U	硅酸膜	G	高功率	—	
		X	线绕	T	可调	—	
		M	压敏	W	—	微调	
		G	光敏	D	—	多圈	
		R	热敏	B	温度补偿用	—	
				C	温度测量用	—	
				P	旁热式	—	
				W	稳压式	—	
				Z	正温度系数	—	

举例如下：



2. 固定电阻器

(1) 固定电阻器的电路符号。常用的固定电阻器有碳膜、金属膜、线绕等类型，电阻器的电路图形符号和外观如附图 A-1 所示。



附图 A-1 固定电阻器的电路符号和外观

(a) 电路图形符号；(b) 碳膜电阻；(c) 金属膜电阻；(d) 线绕电阻

(2) 固定电阻值的标识。按部颁标准规定，固定电阻器的标称值应为附表 A-2 所列数字的 10^n 倍，其中 n 为正整数、负整数或零。

附表 A-2 固定电阻器（电位器、电容器）的允许误差和标称值

系列	允许误差	标称值
E24	I 级 ($\pm 5\%$)	1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.7 3.0
		3.3 3.6 3.9 4.3 4.7 5.1 5.6 6.2 6.8 7.5 8.2 9.1
E12	II 级 ($\pm 10\%$)	1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2
E6	III 级 ($\pm 20\%$)	1.0 1.5 2.2 3.3 4.7 6.8

固定电阻器的阻值和允许误差的标注方法有直标法、色标法和文字符号法。

1) 直标法。将电阻的阻值和误差直接用数字和字母印在电阻上（无误差标示为允许误差 $\pm 20\%$ ）。也有厂家采用习惯标记法，如：

3 Ω 3 I 表示电阻值为 3.3Ω 、允许误差为 $\pm 5\%$ ；

1 k8 表示电阻值为 $1.8k\Omega$ 、允许误差为 $\pm 20\%$ ；

5 M1 II 表示电阻值为 $5.1M\Omega$ 、允许误差为 $\pm 10\%$ 。



附图 A-2 固定电阻器的直标法

固定电阻器直标法如附图 A-2 所示。

2) 色标法。将不同颜色的色环涂在固定电阻器上来表示电阻的标称值及允许误差，常见的多为 5 色环电阻。各种颜色所对应的数值见附表 A-3。固定电阻器色环标值读数识别规则如附图 A-3 所示。对于金色环和银色环，在四色环电阻中，第四

道色环是金色表示电阻误差为 $\pm 5\%$ ，银色表示误差为 $\pm 10\%$ ；在五色环电阻中，金色表示 10^{-1} ，银色表示 10^{-2} 。

附表 A-3

固定电阻器色标符号意义

颜色	有效数字第一位	有效数字第二位	倍乘数	允许误差 (%)	颜色	有效数字第一位	有效数字第二位	倍乘数	允许误差 (%)
棕	1	1	10^1	± 1	灰	8	8	10^8	—
红	2	2	10^2	± 2	白	9	9	10^9	—
橙	3	3	10^3	—	黑	0	0	10^0	—
黄	4	4	10^4	—	金	—	—	10^{-1}	± 5
绿	5	5	10^5	± 0.5	银	—	—	10^{-2}	± 10
蓝	6	6	10^6	± 0.2	无色	—	—	—	± 20
紫	7	7	10^7	± 0.1					



附图 A-3 固定电阻器色环标志读数识别规则

(a) 一般电阻；(b) 精密电阻

例如：红 红 棕 金 表示为 $22 \times 10^1 = 220\Omega$ ，误差范围在 $\pm 5\%$
 黄 紫 橙 银 表示 $47 \times 10^3 = 47000\Omega = 47\text{k}\Omega$ ，误差范围在 $\pm 10\%$
 棕 紫 绿 棕 金 表示 $175 \times 10^{-1} = 17.5\Omega$ ，误差范围在 $\pm 1\%$

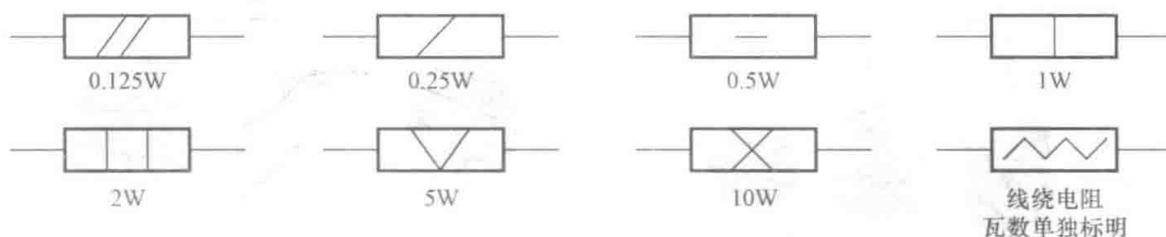
3) 文字符号法。例如，3M2K 3M3 表示 $3.3\text{M}\Omega$ ，K 表示允许误差为 $\pm 10\%$ 。允许误差与字母的对应关系见附表 A-4。

附表 A-4

固定电阻 (电容) 器允许误差标志符号表

允许误差	标识符号	允许误差	标识符号	允许误差	标识符号
± 0.001	E	± 0.05	W	± 2	G
± 0.002	Z	± 0.1	B	± 5	J
± 0.005	Y	± 0.2	C	± 10	K
± 0.01	H	± 0.5	D	± 20	M
± 0.02	U	± 1	F	± 30	N

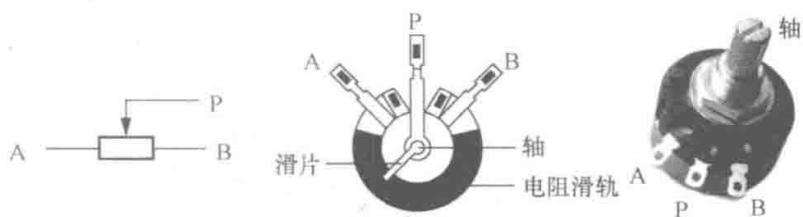
(3) 固定电阻器额定功率的识别。固定电阻器的额定功率指固定电阻器在直流或交流电路中，长期连续工作所允许消耗的最大功率。固定电阻器额定功率共分 19 个等级，其中常用的有 1/16、1/8、1/4、1/2、1、2、5W 等。选用电阻时要按实际耗散功率的 2 倍左右来确定额定功率。薄膜电阻的额定功率一般在 2W 以下，大于 2W 的电阻多为绕线电阻，额定功率较大的电阻体积也较大。固定电阻器额定功率有两种标志方法：2W 以上的电阻，直接用数字印在电阻体上；2W 以下的电阻，以自身体积大小来表示功率。在电路图上表示电阻功率时，采用附图 A-4 所示的符号。



附图 A-4 固定电阻器额定功率电路符号

3. 可变电阻器

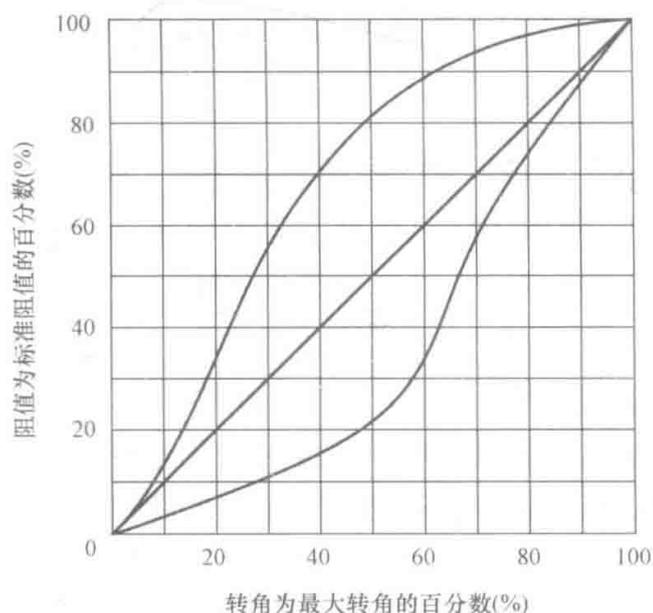
可变电阻器一般称为电位器，其从形状上分有圆柱形、长方体形等多种形状；从结构上分有直滑式、旋转式、带开关式、带紧锁装置式、多连式、多圈式、微调式和无接触式等多种形状；从材料上分有碳膜、合成膜、有机导电体、金属玻璃釉和合金电阻丝等多种电阻体材料。碳膜电位器是较常用的一种。



附图 A-5 电位器的电路图形符号、结构和外观

电位器的电路图形符号、结构和外观如附图 A-5 所示。图中，A、B 脚是一个电阻的两端，P 脚连接一个能在电阻滑轨上接触行走的滑片。

电位器在旋转时，其相应的阻值依旋转角度而变化。其变化规律有三种不同形式：直线型（X 型）、指数型（Z 型）、对数型（D 型），如附图 A-6 所示。



附图 A-6 电位器旋转角与实际阻值变化关系

直线型：其阻值按角度均匀变化，适用于作分压、调节电流等用。如在电视机中作场频调整。

指数型：其阻值按旋转角度依指数关系变化（即阻值变化开始缓慢，以后变快），普遍使用在音量调节电路中。

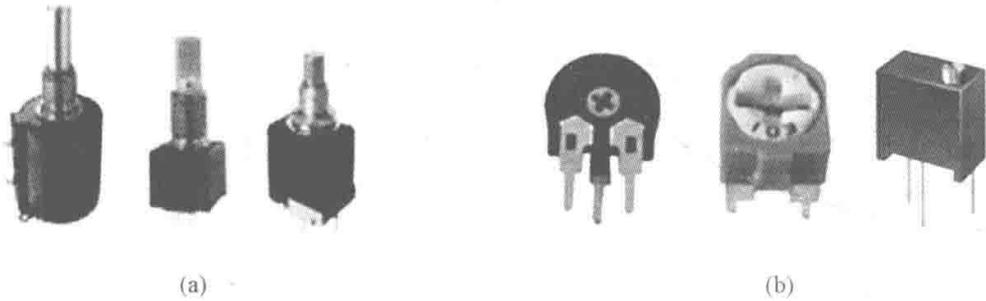
对数型：其阻值按旋转角度依对数关系变化（即阻值变化开始快，以后缓慢），一般用于仪器设备的特殊调节，如在电视机中调节黑白对比度。

常用的电位器有转轴式和微调两种，其中各自又有一些不同类型的电位器，如附图 A-7 所示。

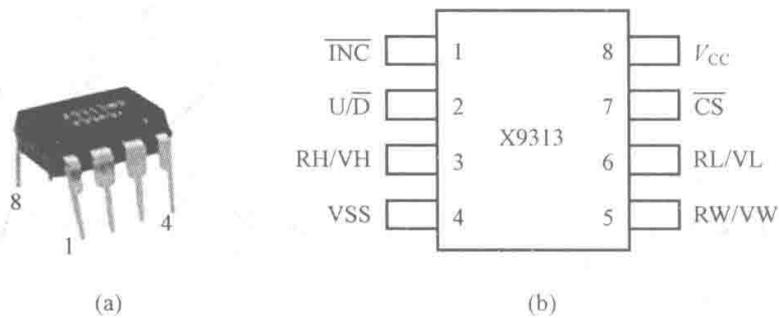
在电路设计中，如果电位器需要用户在使用

用中参与调整的,如收音机中的音量调节,则可用转轴式,并把这些电位器设计在面板上,便于随时调节;如果只是在电路调试时对某些参数调整时使用,则可选择微调电位器,这些电位器大都直接焊接在电路板上,使用小号的一字或十字螺丝刀进行调节,电路调试完毕后一般不用再去动它。

传统电位器的内部结构采用的是机械结构,限制了它的使用寿命,近年来出现了一种用电子控制来实现阻值变化的电位器,称为数字电位器。X9313 型数字电位器的外观和引脚分布如附图 A-8 所示。



附图 A-7 常用电位器外观
(a) 转轴式电位器; (b) 微调电位器



附图 A-8 X9313 型数字电位器的外观和引脚分布
(a) 外观; (b) 引脚分布

4. 电阻器的单位

电阻器的常用单位有 Ω (欧姆)、 $\text{k}\Omega$ (千欧) 和 $\text{M}\Omega$ (兆欧), 它们之间的换算关系为 $1\text{M}\Omega=10^3\text{k}\Omega$, $1\text{k}\Omega=10^3\Omega$ 。

二、电容器

电容器也是组成电子电路的基本元件, 在电路中应用广泛。利用电容器充、放电和隔直通交的特性, 在电路中用于隔断直流、耦合交流、旁路交流、滤波、定时和组成振荡电路等。电容器的文字符号用 C 表示。

1. 电容器的命名方法

电容器的命名参见 GB2471—1995, 基本内容见附表 A-5。

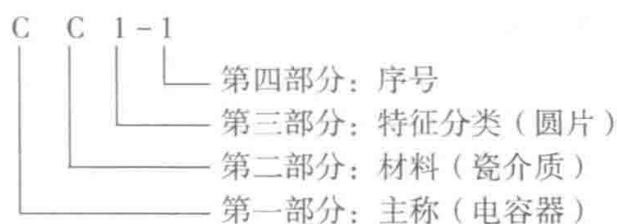
附表 A-5 中的规定对可变电容器和真空电容器不适用, 对微调电容器仅适用于瓷介微调电容器。在某些电容器的型号中还用 X 表示小型, 用 M 表示密封, 也有的用序号来区分电容器的形式、结构、外形尺寸等。

例如, CC1-1 型圆片形瓷介微调电容器的型号含义如下:

附表 A-5

电容器型号命名方法

第一部分：主称		第二部分：材料		第三部分：特征、分类						第四部分：序号
符号	意义	符号	意义	符号	意义					
					瓷介	云母	玻璃	电解	其他	
C	电容器	C	瓷介	1	圆片	非密封	—	箔式	—	对主称、材料相同，仅性能指标、尺寸大小有区别，但基本不影响互换使用的产品，给同一序号；若性能指标、大小尺寸明显影响互换时，则在序号后面用大写字母作为区别代号
		Y	云母	2	管形	非密封	—	箔式		
		I	玻璃釉	3	叠片	密封	—	烧结粉固体		
		O	玻璃膜	4	独石	密封	—	烧结粉固体		
		Z	纸介	5	穿心	—	—	—		
		J	金属化纸	6	支柱	—	—	—		
		B	聚苯乙烯	7	—	—	—	无极性		
		L	涤纶	8	高压	高压	—	—		
		Q	漆膜	9	—	—	—	特殊		
		S	聚碳酸酯							
		H	符合介质							
		D	铝							
		A	钽							
		N	铌							
G	合金									
T	钛									
E	其他									



2. 电容器的单位

电容器的常用单位有 F（法拉）、mF（毫法）、 μF （微法）、nF（纳法）和 pF（皮法），它们之间的关系如下：

mF（毫法或简称为 m）= 10^{-3}F

μF （微法或简称为 μ ）= 10^{-6}F

nF（纳法或简称为 n）= 10^{-9}F

pF（皮法或简称为 p）= 10^{-12}F

3. 电容器的表示方法

国际电工委员会推荐的标示方法为 p、n、 μ 、m 表示法，具体如下：

(1) 用 2~4 位数字表示电容量有效数字，再用字母表示数值的量级。例如：

1p2 表示：1.2pF； 2 μ 2 表示：2.2 μF

4m7 表示：4.7mF=4700 μF ； 103n 表示：0.103 μF

(2) 用数码表示。数码一般为三位，前两位为电容量的有效数字，第三位是倍乘数，但

第三位被乘数是 9 时, 表示 $\times 10^{-1}$, 如:

103 表示: $10 \times 10^3 = 10000 \text{pF} = 0.01 \mu\text{F}$

224 表示: $22 \times 10^4 = 0.22 \mu\text{F}$

159 表示: $15 \times 10^{-1} = 1.5 \text{pF}$

(3) 色标法。电容器色标法与电阻器色标法相同, 标志的颜色符号与电阻器采用的相同, 可参见附表 A-3, 单位为 pF。电解电容器的工作电压有时也采用颜色标志: 6.3V 用棕色, 10V 用红色, 16V 用灰色。色点应标在正极。

4. 电容器的主要参数

(1) 电容器的标称容量和偏差。固定电容器的容量标称值和偏差如附表 A-6 所示。

附表 A-6 固定电容器的容量标称值和偏差

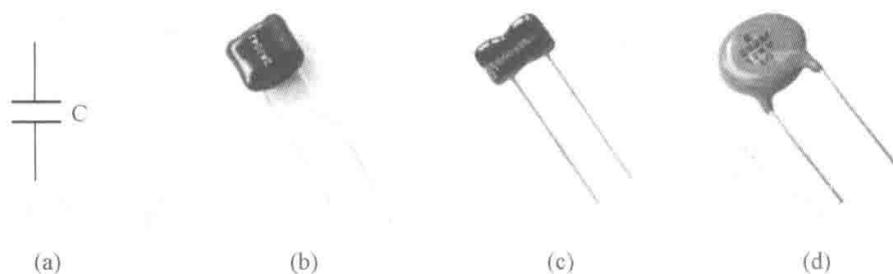
类 型	允许误差 (%)	容量标称值																							
纸介、金属化纸介、低频无极性有机介质电容器	± 5	100pF~1 μ F					1.0	1.5	2.2	2.3	4.7	6.3													
	± 10	1 μ F~100 μ F					1	2	4	6	8	10	15	20											
	± 20	只取表中值					30	50	60	80	100														
无极性高频有机薄膜介质、瓷介、云母等无机介质电容器	± 5	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
	± 10	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2												
	± 20	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8																		
铝、钽电解电容	$\pm 10 \sim \pm 20$																								
	$-20 \sim +50$	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8																		
	$-10 \sim +100$																								

(2) 额定直流工作电压。额定直流工作电压指在线路上能够长期可靠地工作而不被击穿时所能承受的最大直流电压(也称耐压)。额定直流工作电压的大小与介质的种类和厚度有关。

钽、铌、钛、固体铝电解电容器的直流工作电压, 系指 $+85^\circ\text{C}$ 条件下能长期正常工作的电压。如果电容器用在交流电路里, 则应该注意所加的交流电压的最大值(峰值)不能超过额定直流工作电压。

5. 电容器的主要种类和特点

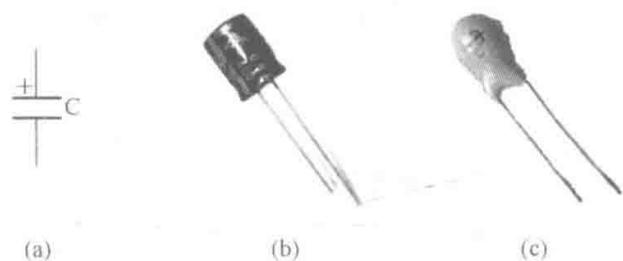
电容器有固定电容器和可调电容器之分。根据电容中电介质的不同, 电容有涤纶电容、云母电容、瓷介电容、电解电容、可变电容等多种, 其中涤纶、云母和瓷介电容为无极性电容。附图 A-9 所示为无极性电容的电路符号和外形图。



附图 A-9 无极性电容的电路符号和外形图

(a) 电路符号; (b) 涤纶电容; (c) 云母电容; (d) 瓷介电容

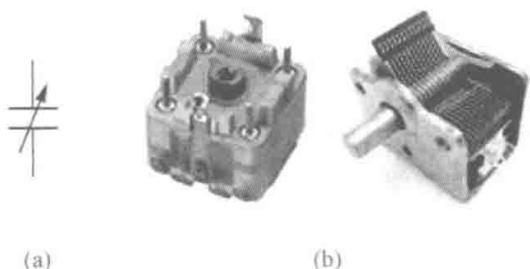
电解电容是一种极性电容，附图 A-10 所示为电解电容的电路符号和外形图，它在无极性电容电路符号的基础上多了一个“+”号。标有“+”号的一端为正极。电解电容有两种：一种为铝电解电容，如附图 A-9 (b) 所示，它是一个圆柱形的器件，在外壳上印有容量和耐压值等信息，还有一个非常明显的银色或灰色条，指明与之同侧的引脚为电容的负极；另一种电解电容为钽电解电容，如附图 A-9 (c) 所示，在低电压电路中可以与铝电解电容直接换用，它比铝电解电容有更小的漏电流和较小的误差，但是钽电解电容的容量一般都不会超过 $470\mu\text{F}$ ，钽电解电容外壳上有一侧标有“+”，指明同侧引脚为正极。



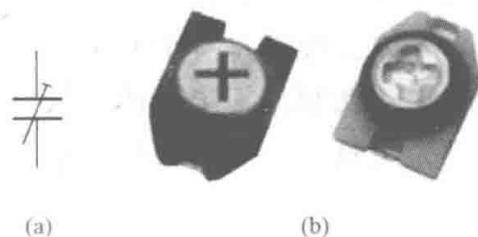
附图 A-10 电解电容的电路符号和外形图
(a) 电路符号；(b) 铝电解电容；(c) 钽电解电容

电解电容是有极性的电容，在使用时千万不能接反，否则会烧毁元件。此外，电解电容在选用时还需要注意其额定电压。

可变电容的容量是可以调节的，附图 A-11 所示为可变电容的电路符号和外形图。可变电容常用于无线电接收机的调谐电路，在器件内部有一个固定的金属板，可通过旋转轴控制另一平行的金属板与固定金属板重叠面积，从而改变容量，可变电容的介质一般为空气。此外，还有一种用于预先设置电路工作点的电容是微调电容，附图 A-12 所示为微调电容的电路符号和外形图，这种电容一般在电路调试时调好，之后不用再调整。



附图 A-11 可变电容的电路符号和外形图
(a) 电路符号；(b) 可变电容



附图 A-12 微调电容的电路符号和外形图
(a) 电路符号；(b) 微调电容

6. 电容器的检测

测量电容器的电容量用电容表，带有电容挡的万用表也可以。通常情况下，电容用于滤波或隔直，电路中对电容量的准确度要求不高，故无须测量实际电容量。但在使用中掌握电容的一般检测方法是必要的。

电解电容器的正、负极性不允许接错，当极性接反时，可能因电解液的反向极化，引起电解电容器的爆裂。当极性标记无法辨认时，可根据正向连接时漏电电阻大、反向连接时漏电电阻相对小的特点判断极性。交换表笔前后两次测量漏电电阻，阻值大的一次，黑表笔接触的是正极，因为黑表笔与万用表内电池的正极相接（采用数字万用表时，红表笔接电池正极）。但用此种方法有时并不能明显地区分正、反向电阻，所以使用电解电容时，要注意保护极性标记。

7. 电容器的选取

电容器有无极性电容和极性电容之分，下面介绍在电路设计中的选取方面。

先根据电路图中电路符号确定是无极性电容还是极性电容。如果需要一个无极性电

容,在一般用途的电路中,选择涤纶和瓷介电容都可以。瓷介电容比较便宜,电路对电容误差要求不高时可以选用。云母电容的容量一般比较小,一般在电路信号频率比较高时选用。如果需要极性电容,一般选用铝电解电容,但电路对漏电流要求比较高时可以考虑选用钽电解电容。附表 A-7 给出了不同种类电容的容量范围等参数,供选用时参考。

附表 A-7 不同种类电容的容量范围

种类	无极性电容			极性电容	
	涤纶电容	云母电容	瓷介电容	铝电解电容	钽电解电容
容量范围	100pF~22 μ F	1pF~47nF	0.1pF~10 μ F	0.1 μ F~4F	0.47~470 μ F
误差	$\pm 20\%$	$\pm 1\%$	-25%~+50%	-10%~+50%	$\pm 20\%$
漏电流	小	小	小	大	小
应用	一般用途	高频	退耦	低频	低压

三、半导体二极管

半导体二极管是一个有两个引脚的半导体器件。它是在 PN 结的外面接上引线,用管壳封装起来,就制作了半导体二极管,简称二极管。由 P 区引出的电极为阳极,由 N 区引出的电极为阴极。二极管根据用途和特点的不同有二十几种,常见二极管的外形图和电路符号如附图 A-13 所示。



附图 A-13 二极管的外形图和电路符号

1. 半导体分立器件型号命名方法

半导体分立器件型号命名方法见附表 A-8。

附表 A-8

半导体分立器件型号命名方法

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分	第五部分
用数字表示器件的电极数目		用字母表示器件的材料和极性		用字母表示器件的类型		用数字表示器件序号	用字母表示规格号
符号	意义	符号	意义	符号	意义		
2	二极管	A	N型, 锗材料	P	普通管		
3	三极管	B	P型, 锗材料	V	微波管		
		C	N型, 硅材料	W	稳压管		
		D	P型, 硅材料	C	参量管		
		A	PNP型, 锗材料	Z	整流管		
		B	NPN型, 锗材料	L	整流堆		
		C	PNP型, 硅材料	S	隧道管		
		D	NPN型, 硅材料	N	阻尼管		
		E	化合物材料	U	光电器件		
				K	开关管		
				X	低频小功率管 ($f_a < 3\text{MHz}$, $P_a < 1\text{W}$)		
				G	高频小功率管 ($f_a \geq 3\text{MHz}$, $P_a < 1\text{W}$)		
				D	低频大功率管 ($f_a < 3\text{MHz}$, $P_a \geq 1\text{W}$)		
				A	高频大功率管 ($f_a \geq 3\text{MHz}$, $P_a \geq 1\text{W}$)		
				T	可控整流器		

2. 几种半导体二极管的主要参数

附表 A-9~附表 A-11 给出了几种半导体二极管的主要参数。

附表 A-9

2AP 型检波二极管

型号	参数	最大整流电流 $I_F(\text{mA})$	正向压降 ($I_F = I_{FM}$) $U_F(\text{V})$		最高反向工作电压 $U_{RM}(\text{V})$	反向击穿电压 $U_{BR}(\text{V})$	截止频率 $f(\text{MHz})$
	2AP1	16	≤ 1.2		20	40	150
	2AP2	16			30	45	150
	2AP3	25			30	45	150
	2AP4	16			50	75	150
	2AP5	16			75	110	150
	2AP6	12			100	150	150
	2AP7	12			100	150	150

续表

参 数	最大整流电流 $I_F(\text{mA})$	正向压降 ($I_F=I_{FM}$) $U_F(\text{V})$	最高反向工作电压 $U_{RM}(\text{V})$	反向击穿电压 $U_{BR}(\text{V})$	截止频率 $f(\text{MHz})$
2AP11	25	≤ 1	10	10	40
2AP12	40		10	10	40
2AP13	20		30	30	40
2AP14	30		30	30	40
2AP15	30		30	30	40
2AP16	20		50	50	40
2AP17	15		100	100	40
2AP9	8		10	65	100

注 2AP 型检波二极管的结电容 $C_f \leq 1\text{pF}$ 。

附表 A - 10

国内外常用硅整流二极管

参 数	额定正向 整流电流 $I_F(\text{A})$	正向不重复 峰值电流 $I_{FSM}(\text{A})$	正向压降 $U_F(\text{V})$	反向电流 $I_R(\mu\text{A})$	反向工作 峰值电压 $U_{RWM}(\text{V})$
1N4001	1	30	≤ 1	< 5	50
1N4002					100
1N4003					200
1N4004					400
1N4005					600
1N4006					800
1N4007					1000
1N5400	3	150	≤ 0.8	< 10	50
1N5401					100
1N5402					200
1N5403					400
1N5404					600
1N5405					800
1N5406					1000
1N5407					100

附表 A - 11

国内外常用硅整流二极管

参 数	额定正向 整流电流 $I_F(\text{mA})$	反向电流 $I_R(\text{nA})$	正向压降 $U_F(\text{V})$	反向击穿电压 $U_{RWM}(\text{V})$	结电容 $C_T(\text{pF})$	开关时间 $t_{rr}(\text{ns})$
1S1555	—	500	1.4	35	1.3	—
1N4148	200	≤ 25	≤ 1	75	4	4

3. 半导体二极管的极性判别及选用

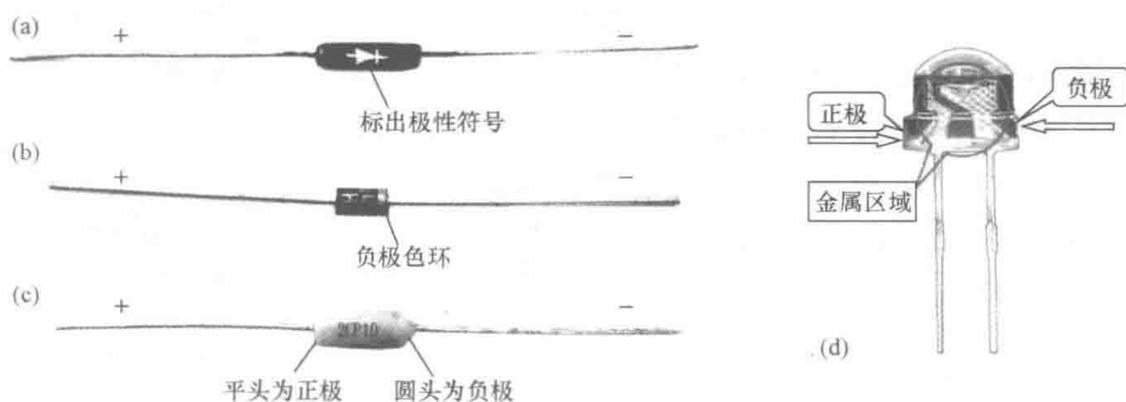
(1) 半导体二极管的极性判别。一般情况下，二极管的外壳上标有二极管的符号，可以通过外壳上的标记判断正极、负极。方法如下：

1) 看外壳上的符号标记：标有三角形箭头的一端为正极，另一端为负极，如附图 A-14 (a) 所示。

2) 看外壳上标记的色点：在点接触二极管的外壳上，通常标有色点（白色或红色），除少数二极管（如 2AP9、2AP10 等）外，一般标记色点的这端为正极，如附图 A-14 (b) 所示。

3) 塑封二极管有圆环标志的是负极，如 1N4000 系列，如附图 A-14 (c) 所示。

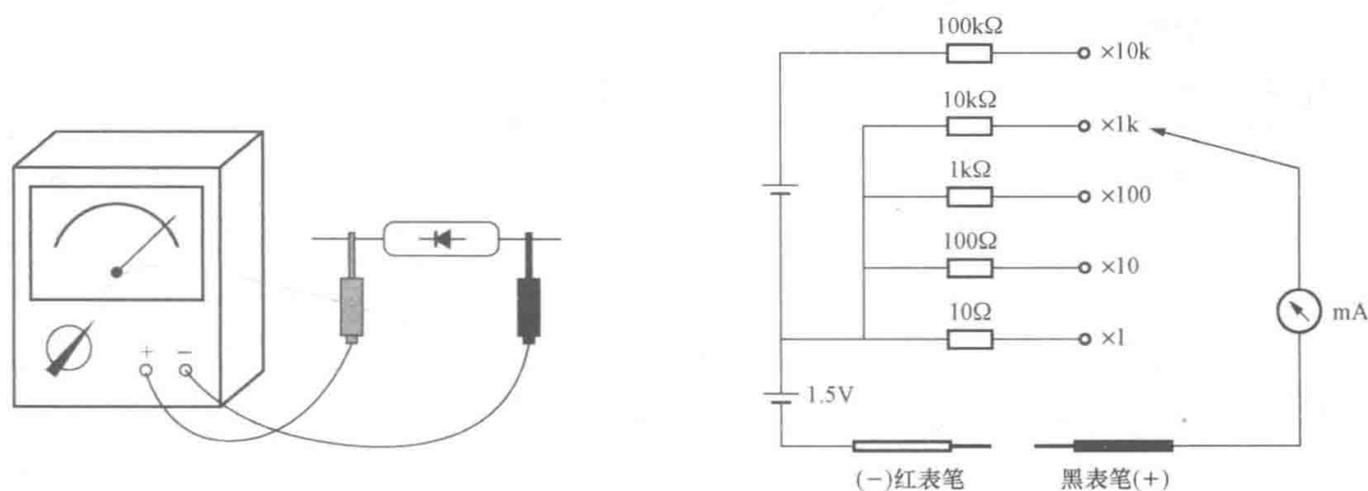
4) 透过玻璃看触针：对于点接触型玻璃外壳二极管，如果标记已磨掉，则可将外壳上的漆层（黑色或白色）轻轻刮掉一点，透过玻璃可以看到金属触针的是 N 型锗片；有金属触针的那头就是正极，如附图 A-14 (d) 所示。



附图 A-14 有标记二极管极性的判别

对于没有标记的二极管或者标记模糊不清的二极管，可以采用下述两种方法区别：

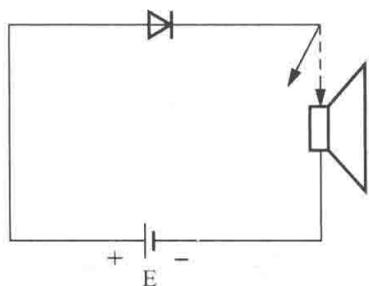
1) 可用万用表电阻挡来判别正负极，如附图 A-15 所示。



附图 A-15 万用表欧姆挡示意图

根据二极管正向电阻小，反向电阻大的特点，将万用表拨到电阻挡（一般用 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡。不要使用 $R \times 1$ 或 $R \times 10k$ 挡，因为 $R \times 1$ 挡使用的电流太大，容易烧坏管子，而 $R \times 10k$ 挡使用的电压太高，可能击穿管子。）用表笔分别与二极管的两极相接，测出两个电阻值。在所测得阻值较小的一次，与黑表笔相接的一端为二极管的正极。同理，在所测得阻值较大的一次，与黑表笔相接的一端为二极管的负极。如果测得的正、反向电阻值均很小，说明管子内部短路；若正、反向电阻值均较大，则说明管子内部开路。在这两种情况下，管子就不能使用了。

2) 用电池和喇叭也可以判别二极管的正、负极, 如附图 A-16 所示。



附图 A-16 用电池和喇叭判别二极管的正、负极

将一节电池和一个喇叭(或耳机)与被测二极管构成串联电路, 然后将二极管的一端引线断续触碰喇叭, 再把二极管翻转过来再测一次。以听到“咯、咯”声较大的一次为准, 与电池正极相接的引线为正极, 另一根为负极。

(2) 半导体二极管的选用。通常小功率锗二极管的正向电阻值为 $300\sim 500\Omega$, 硅管为 $1k\Omega$ 或者更大些。锗管反向电阻为几十千欧, 硅管反向电阻在 $500k\Omega$ 以上(大功率二极管的数值要大得多)。正反向电阻差值越大越好。

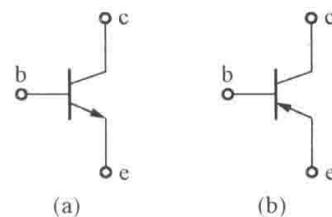
点接触二极管的工作频率高, 不能承受较高的电压和通过较大的电流, 多用于检波、小电流整流或高频开关电路。面接触二极管的工作电流和能承受的功率都较大, 但使用的频率较低, 多用于整流、稳压、低频开关电路等方面。

选用整流二极管时, 既要考虑正向电压, 也要考虑反向饱和电流和最大反向电压。选用检波二极管时, 要求工作频率高, 正向电阻小, 以保证较高的工作频率, 特性曲线要好, 避免引起过大的失真。

四、半导体三极管

半导体三极管是一种用于放大或开关电信号的半导体器件, 它有三个管脚, 分别为基极 b (base)、集电极 c (collector) 和发射极 e (emitter)。三极管根据内部结构的不同分为 NPN 型和 PNP 型两大类, 三极管的电路符号如附图 A-17 所示。

1. 常用小功率三极管的主要参数 (见附表 A-12)



附图 A-17 三极管的电路符号

(a) NPN 型; (b) PNP 型

附表 A-12

常用小功率三极管的主要参数

参数 型号	$P_{CM}(mW)$	$f_T(MHz)$	$I_{CM}(mA)$	$U_{CEO}(V)$	$I_{CBO}(\mu A)$	$h_{FE}(min)$	极性
3DG4A	300	200	30	15	0.1	20	NPN
3DG4B	300	200	30	15	0.1	20	NPN
3DG4C	300	200	30	30	0.1	20	NPN
3DG4D	300	300	30	15	0.1	30	NPN
3DG4E	300	300	30	30	0.1	20	NPN
3DG4F	300	250	30	20	0.1	30	NPN
3DG6	100	250	20	20	0.01	25	NPN
3DG6B	300	200	30	20	0.01	25	NPN
3DG6C	100	250	20	20	0.01	20	NPN
3DG6D	100	300	20	20	0.01	25	NPN

续表

参数 型号	$P_{CM}(mW)$	$f_T(MHz)$	$I_{CM}(mA)$	$U_{CEO}(V)$	$I_{CBO}(\mu A)$	$h_{FE}(min)$	极性
3DG6E	100	250	300	40	0.01	60	NPN
3DG12B	700	200	300	45	1	20	NPN
3DG12C	700	200	300	30	1	30	NPN
3DG12D	700	300	300	30	1	30	NPN
3DG12E	700	300	300	60	1	40	NPN
2SC1815	400	80	150	50	0.1	20~700	NPN
JE9011	400	150	30	30	0.1	28~198	NPN
JE9013	500		625	20	0.1	64~202	NPN
JE9014	450	150	100	45	0.05	60~1000	NPN
8050	800		800	25	0.1	55	NPN
3CG14	100	200	15	35	0.1	40	PNP
3CG14B	100	200	20	15	0.1	30	PNP
3CG14C	100	200	15	25	0.1	25	PNP
3CG14D	100	200	15	25	0.1	30	PNP
3CG14E	100	200	20	25	0.1	30	PNP
3CG14F	100	200	20	40	0.1	30	PNP
2SA1015	400	80	150	50	0.1	70~400	PNP
JE9012	600		500	50	0.1	60	PNP
JE9015	450	100	450	45	0.05	60~600	PNP
3AX31A	100	0.5	100	12	12	40	PNP
3AX31B	100	0.5	100	12	12	40	PNP
3AX31C	100	0.5	100	18	12	40	PNP
3AX31D	100		100	12	12	25	PNP
3AX31E	100	0.015	100	24	12	25	PNP

2. 三极管电极和管型的判别

(1) 目测法。

1) 管型的判别。一般管型是 NPN 还是 PNP 应从管壳上标注的型号来判别。依照部颁标准，三极管型号的第二位（字母），A、C 表示 PNP 管，B、D 表示 NPN 管，例如：

3AX 为 PNP 型低频小功率管；

3BX 为 NPN 型低频小功率管；

3CG 为 PNP 型高频小功率管；

3DG 为 NPN 型高频小功率管；

3AD 为 PNP 型低频大功率管；

3BD 为 NPN 型低频大功率管；
 3CA 为 PNP 型高频大功率管；
 3DA 为 NPN 型高频大功率管。

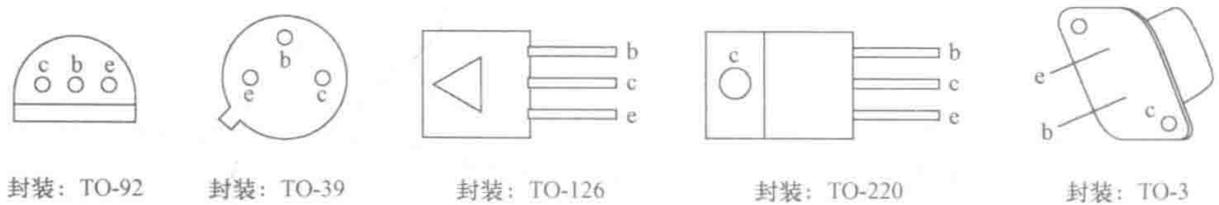
此外，国际上广泛采用的 9011~9018 系列高频小功率管中，除 9012 为 PNP 管外，其余均为 NPN 型管。

2) 电极的判别。常用的中、小功率三极管有金属圆壳和塑料封装 (半柱型) 等外型。附图 A-18 给出三极管典型的外形和封装。

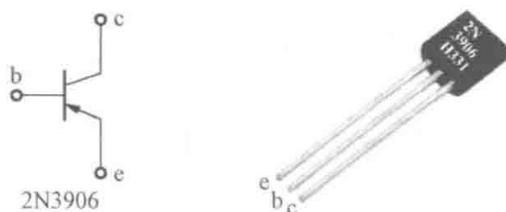


附图 A-18 三极管典型外形和封装

为了便于三极管管脚的辨别，附图 A-19 中给出典型封装三极管的底视图。以封装为 TO-92 的小功率 PNP 型三极管 2N3906 为例，正对器件的型号从左到右管脚依次为 e 极、b 极和 c 极，如附图 A-20 所示。



附图 A-19 典型封装三极管的底视图



附图 A-20 TO-92 封装三极管的管脚判别

(2) 用万用表电阻挡判别。三极管内部有两个 PN 结，可用万用表电阻挡分辨 e、b、c 三个电极。在型号标注模糊的情况下，也可用此法判别管型。

1) 基极的判别。判别管型时应首先确认基极。对于 NPN 管，用黑表笔接假定的基极，用红表笔分别接触另外两个极，若测得电阻都小 (几百欧至几千欧)，则将黑、红表笔对调，测得电阻均较大，在几百千欧以上，则黑表笔接的就是基极。PNP 管情况正好相反，测量时两个 PN 结都正偏的情况下，红表笔接基极。

实际上，小功率管的基极一般排列在三个管脚的中间，可用上述方法，分别将黑、红表笔接基极，既可测定三极管的两个 PN 结是否完好 (与二极管 PN 结的测量方法一样)，又可确认管型。

2) 集电极和发射极的判别。确定基极后，假设余下管脚之一为集电极 c，另一为发射极 e，用手指分别捏住 c 极与 b 极 (即用手指代替基极电阻 R_b)。同时，将万用表量表笔分别与 c、e 接触，若被测管为 NPN，则用黑表笔接触 c 极、用红表笔接触 e 极 (PNP 管相反)，观察指针偏转角度；然后再设另一管脚为 c 极，重复以上过程，比较两次测量指针的

偏转角度，大的一次表明 I_c 大，管子处于放大状态，相反假设的 c、e 极正确。

(3) 通过互联网查找。信息时代网络比较发达，直接把三极管的型号输到网络搜索引擎中，就可以得到一些提供技术文档的网站链接，其中有可以免费浏览或下载器件的技术文档。在三极管技术文档的第 1 页一般都会有管脚排列示意图，如附图 A-21 所示的三极管 BC546 技术文档中就有关于封装、管脚判别的描述：BC546 是一个 NPN 型的通用三极管，用于一般放大和开关，有 TO-92、SOT54 和 SC-43A 三种封装。如果面对着器件，则其管脚从左到右依次为 c 极、b 极、e 极（如图中粗体标注）。

General description

NPN general-purpose transistors in Surface Mounted Device (SMD) plastic packages.

Table 1. Product overview

Type number ^[1]	Package			PNP complement
	NXP	JEITA	JEDEC	
BC546A ^[2]	SOT54	SC-43A	TO-92	BC556A
BC546B ^[2]	SOT54	SC-43A	TO-92	BC556B

Features

- General-purpose transistors
- SMD plastic packages
- Two different gain selections

Applications

- General-purpose switching and amplification

Pinning information

Pin	Description	Simplified outline	Symbol
SOT54			
1	emitter		
2	base		
3	collector		

管脚判别：1-e极 2-b极 3-c极

附图 A-21 三极管 BC546 的技术文档

三极管的管型及管脚的判别是电子技术初学者的一项基本功，为了帮助读者迅速掌握判别方法，此处总结出四句口诀：“三颠倒，找基极；PN 结，定管型；顺箭头，偏转大；测不准，动嘴巴。”

(1) 三颠倒，找基极。大家知道，三极管是含有两个 PN 结的半导体器件。根据两个 PN 结连接方式不同，可以分为 NPN 型和 PNP 型两种不同导电类型的三极管。

测试三极管要使用万用电表的欧姆挡，并选择 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡位。红表笔所连接的是表内电池的负极，黑表笔则连接着表内电池的正极。

假定并不知道被测三极管是 NPN 型还是 PNP 型，也分不清各管脚是什么电极。测试的第一步是判断哪个管脚是基极。这时，任取两个电极（如这两个电极为 1、2），用万用电表两支表笔颠倒测量它的正、反向电阻，观察表针的偏转角度；然后，再取 1、3 两个电极和 2、3 两个电极，分别颠倒测量它们的正、反向电阻，观察表针的偏转角度。在这三次颠倒测量中，必然有两次测量结果相近：即颠倒测量中表针一次偏转大，一次偏转小；剩下一次必然是颠倒测量前后指针偏转角度都很小，这一次未测的那只管脚就是要寻找的基极。

(2) PN 结，定管型。找出三极管的基极后，就可以根据基极与另外两个电极之间 PN

结的方向来确定管子的导电类型。将万用表的黑表笔接触基极,红表笔接触另外两个电极中的任一电极,若表头指针偏转角度很大,则说明被测三极管为 NPN 型管;若表头指针偏转角度很小,则被测管即为 PNP 型。

(3) 顺箭头,偏转大。找出了基极 b,另外两个电极哪个是集电极 c,哪个是发射极 e 呢?这时可以用测穿透电流 I_{CEO} 的方法确定集电极 c 和发射极 e。

1) 对于 NPN 型三极管,由 NPN 型三极管穿透电流的流向原理,用万用电表的黑、红表笔颠倒测量两极间的正、反向电阻 R_{ce} 和 R_{ec} ,虽然两次测量中万用表指针偏转角度都很小,但仔细观察,总会有一次偏转角度稍大,此时电流的流向一定是:黑表笔→c 极→b 极→e 极→红表笔,电流流向正好与三极管符号中的箭头方向一致顺箭头,所以此时黑表笔所接的一定是集电极 c,红表笔所接的一定是发射极 e。

2) 对于 PNP 型的三极管,道理也类似于 NPN 型,其电流流向一定是:黑表笔→e 极→b 极→c 极→红表笔,其电流流向也与三极管符号中的箭头方向一致,所以此时黑表笔所接的一定是发射极 e,红表笔所接的一定是集电极 c。

(4) 测不出,动嘴巴。若在“顺箭头,偏转大”的测量过程中,若由于颠倒前后的两次测量指针偏转均太小难以区分时,就要“动嘴巴”了。其具体方法是:在“顺箭头,偏转大”的两次测量中,用两只手分别捏住两表笔与管脚的结合部,用嘴巴含住(或用舌头抵住)基电极 b,仍用“顺箭头,偏转大”的判别方法即可区分集电极 c 与发射极 e。其中人体起到直流偏置电阻的作用,目的是使效果更加明显。

3. 三极管性能的简易测量

(1) 用万用表电阻挡测量 I_{CEO} 和 β 。基极开路,万用表黑表笔接 NPN 管的集电极 c、红表笔接发射极 e (PNP 管相反),此时 c、e 间电阻值大则表明 I_{CEO} 值小,电阻值小则表明 I_{CEO} 值大。

用手指代替基极电阻 R_b ,用上述方法测量 c、e 间电阻,若阻值比基极开路时小得多则表明 β 值大。

(2) 用万用表 h_{FE} 挡测 β 。有的万用表有 h_{FE} 挡,按表上规定的极型插入三极管即可测得电流放大系数 β ,若 β 很小或为零,表明三极管已坏,可用电阻挡分别测量两个 PN 结,确认是否有击穿或断路。

4. 半导体三极管的选用

选用晶体管一要符合设备及电路的要求,且要符合节约的原则。根据用途的不同,一般应考虑以下几个因素:工作频率、集电极电流、耗散功率、电流放大系数、反向击穿电压、稳定性及饱和压降等。这些因素又具有相互制约的关系,在选用管子时应抓住主要因素,兼顾次要因素。

低频管的特征频率 f_T 一般在 2.5MHz 一下,而高频管的 f_T 都从几十兆和到几百兆赫甚至更高。选管时应使 f_T 为工作频率的 3~10 倍。原则上讲,高频管可以代换低频管,但是高频管的功率一般都较小,动态范围窄,在代换时应注意功率条件。

一般希望 β 选大一些,但也不是越大越好。 β 太高了容易引起自激振荡,何况一般 β 高的管子工作多不稳定,受温度影响大。通常 β 多选 40~100,但低噪声高 β 值的管子(如 1815、9011~9015 等), β 值达数百时温度稳定性仍较好。另外,对整个电路来说还应该从各级的配合来选择 β 。例如,前级用 β 高的,后级就可以用 β 较低的管子;反之,前级用 β 较低的,后级就可以用 β 较高的管子。

集电极—发射极反向击穿电压 $U_{(BR)CE0}$ 应选的大于电源电压。穿透电流越小,对温度的稳定性越好。普通硅管的稳定性比锗管好得多,但普通硅管的饱和压降较锗管大,在某些电路中会影响电路的性能,应根据电路的具体情况选用。选用晶体管的耗散功率时应根据不同电路的要求留有一定的余量。

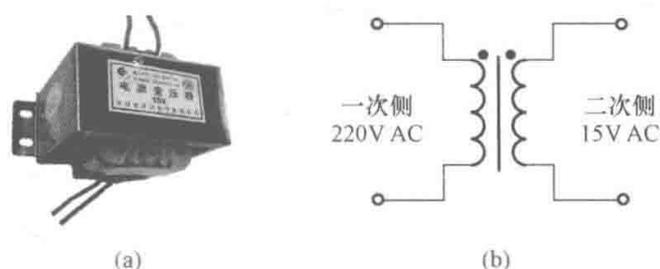
对高频放大、中频放大、振荡器等电路的晶体管,应选用特征频率 f_T 高、极间电容较小的晶体管,以保证在高频情况下仍有较高的功率增益和稳定性。

五、电源变压器

电子电路都要靠电源供电,电池作为最常见的电源使用在手机、MP3 播放器等便携设备中。此外,另一类电源是把 220V AC (市电) 经过处理后输出低压直流电压给电路供电,如手机充电器、计算机等。把 220V AC 转换为低压直流电压的第一步是降压,常使用的元器件是电源变压器,它专门用于变换交流信号的电压。

1. 电源变压器的外形和电路符号

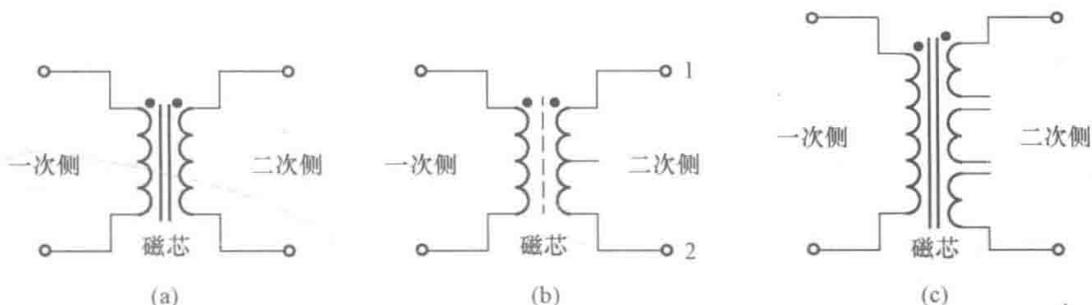
附图 A-22 所示为电源变压器的外形和电路符号。变压器外壳上贴一个标牌,上面标明该变压器的输入电压(一次侧)、输出电压(二次侧)、额定功率、工作频率等参数。附图 A-22 (a) 所示的变压器是一个将 220V AC 变压为 15V AC 的电源变压器。如果把一次侧管脚接到 220V AC 中,可从二次侧管脚得到 15V AC 的电压。



附图 A-22 电源变压器(单绕组)
(a) 外形; (b) 电路符号

2. 电源变压器的种类

电源变压器的种类繁多,按照次级绕组数量可分为单绕组、双绕组和多绕组变压器,如附图 A-23 所示。



附图 A-23 单绕组、双绕组、多绕组电源变压器
(a) 单绕组; (b) 双绕组; (c) 多绕组

单绕组变压器有一个一次绕组、一个二次绕组,二次侧有两个管脚。

双绕组变压器的一次绕组有两个,且首尾相连成一个公共端,二次侧有 3 个管脚。一般来说,公共端到二次绕组 1 或 2 另一端的电压是相等的,只是信号的相位相反,所以如果测量二次侧绕组 1、2 最外两端电压应该为双绕组变压器额定输出电压的两倍。

多绕组变压器有一个一次绕组和多个独立的二次绕组。二次绕组有多种匝数,可以形成多种输出电压。这种变压器常用在一个电子系统需要不同电源电压的场合,多绕组变压器一般需要定制。

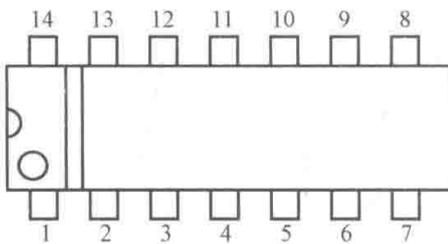
不论是单绕组或多绕组变压器,在使用前一定要注意区分二次绕组的管脚,一旦反接,

轻则烧断电源熔断器，重则会使变压器绕组烧毁而彻底损坏。一般电源变压器在一次绕组上都会标注“220V”的字样，如果没有标注可以按照下面的方法进行分辨。用万用表电感器测量挡，分别测量变压器的一、二次绕组，电感大的为一次，电感小的为二次。另外，一般变压器的一次侧管脚的导线颜色为红色且较粗，二次侧为蓝色、黄色等且较细。总之，对一、二次侧管脚没有十分的把握时，不应该将其接入电路。

六、集成电路介绍

集成电路（integrated）也常被称为芯片（chip），简称 IC，它是封在单个封装件中的一组互连电路。装在陶瓷衬底上的分立元件或电路有时还和单个集成电路连在一起，成为混合集成电路。把全部元件和电路做在单片晶体硅材料上称为单片集成电路。单片集成电路成为最普及的集成电路形式，可以封装成各种类型的固态器件，也可以封装成特殊的集成电路。

通用集成电路分为模拟（线性）电路和数字电路两大类。模拟电路根据输入的各种电平，在输出端产生各种相应的电平；数字电路是开关器件，以规定的电平导通和截止。有时集成电路标有 LM（线性类型）或 DM（数字类型）。集成电路都有两或三个电源接线端，用 V_{CC} 、 V_{DD} 、 V_{SS} 、 $+V$ 、 $-V$ 或 GND 来表示。



附图 A-24 双列直插式集成电路的管脚排列

在电子电路设计中，常用的模拟集成电路主要有集成运放、集成功放、集成整流桥堆和集成三端稳压器等。

1. 双列直插式集成电路的封装

集成电路有多种封装形式，双列直插式集成电路是最通用的封装形式，管脚之间间隔为 2.54mm，并分布在两侧。集成电路一般有 8、14、16、20、24、40 脚等形式。民用集成电路是塑料封装，军用集成电路是耐高温陶瓷封装。集成电路管脚标记有半圆形豁口、标志线、标志圆点等，一般由半圆形豁口来确定管脚的位置。双列直插式的管脚排列如附图 A-24 所示。

2. 集成电路的命名方法（见附表 A-13）

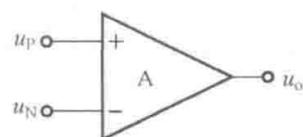
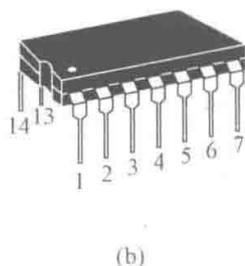
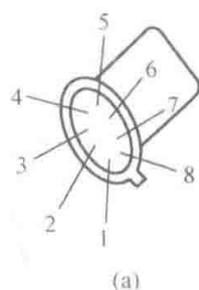
附表 A-13 国产半导体集成电路型号命名法

第零部分		第一部分		第二部分	第三部分		第四部分		
表示器件符合国家标准		表示器件的类型		表示器件的系列和品种代号	表示器件的工作温度范围		表示器件的封装形式		
符号	意义	符号	意义		符号	意义	符号	意义	
C	中国制造	T	TTL		C	0~70℃	W	陶瓷封装	
		H	HTL		E	-48~75℃	B	塑料扁平	
		E	ECL		R	-55~85℃	F	全密封扁平	
		C	CMOS		M	-55~125℃	D	陶瓷直插	
		F	线性放大器		C	0~70℃	P	塑料直插	
		D	音响、电视		E	-48~75℃	J	黑陶瓷扁平	
		W	电路稳压器		R	-55~85℃	K	金属菱形	
		J	接口电路		M	-55~125℃	T	金属圆形	
		B	非线性电路						
		M	存储器						
		μ	微型电路						

3. 集成运算放大器

(1) 运算放大器的电路符号和外形。运算放大器 (Operational Amplifier, 或 op-amp), 简称运放, 主要用于加法、减法、积分、微分等数学运算。其外形如附图 A-25 (a)、(b) 所示。金属壳封装有 8、10、12 管脚等种类, 双列直插式有 8、10、12、14、16 管脚等种类。

集成运放的电路图形符号如附图 A-26 所示。从外部看, 可以认为集成运算放大器是一个双端输入、单端输出, 具有高差模电压放大倍数、高输入电阻、低输出电阻、能较好抑制温漂的差分放大电路。集成运放有两个输入端: 一个是同相输入端, 在三角符号的内部标有符号“+”, 表示输出端的电位 u_o 与同相输入端的电位 u_P 极性相同; 另一个为反相输入端, 在三角符号的内部标有符号“-”, 表示输出端的电位 u_o 与反相输入端的电位 u_N 极性相反。



附图 A-25 集成运放的两种封装

附图 A-26 集成运放的电路图形符号

(a) 金属壳封装; (b) 双列直插式塑料封装

(2) 几种运算放大器的参数 (附表 A-14)。

附表 A-14

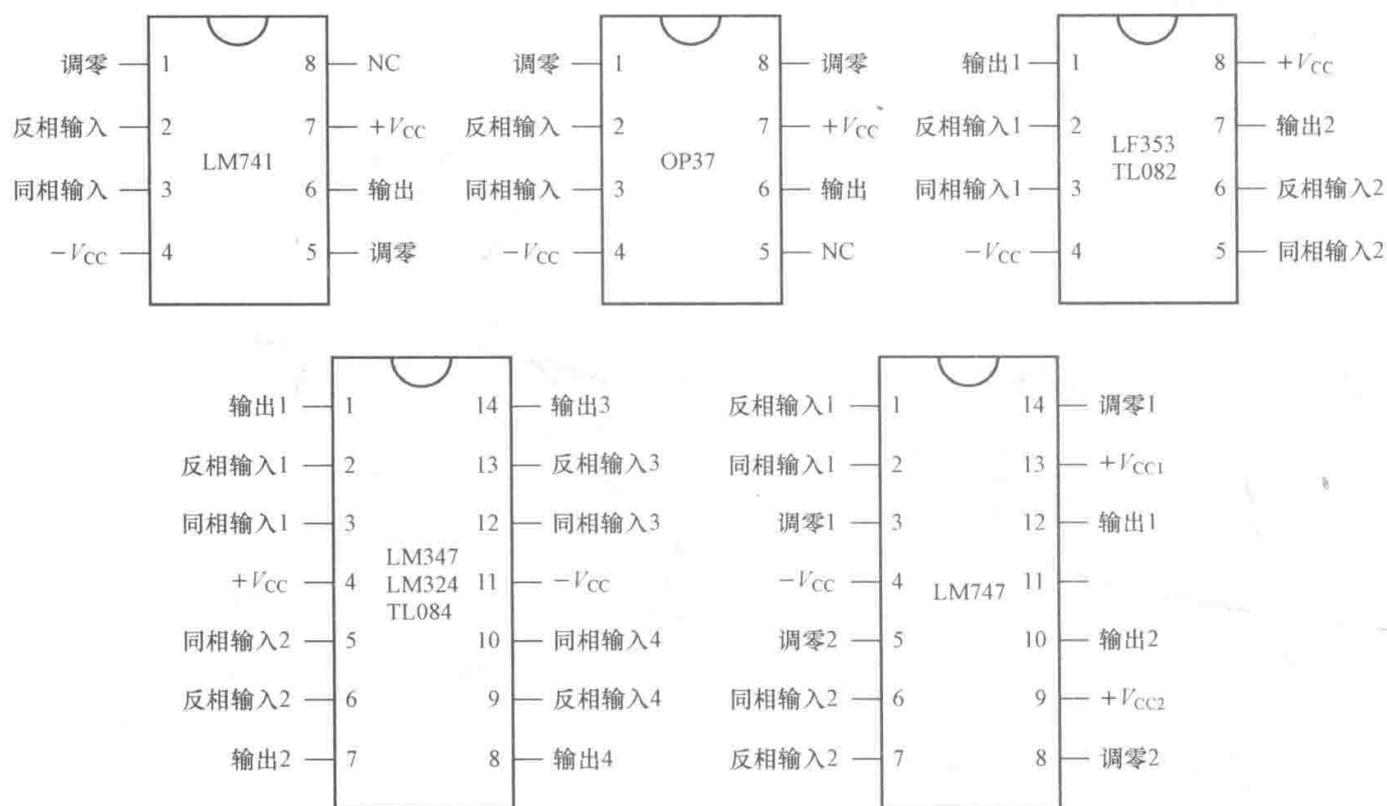
几种集成运算放大器参数表

参 数			型 号							
符号	名称	单位	LM741	LM747	LM324	LF353	LF347	TL082	TL084	OP37
V_{CC}	电源电压	V	$\pm 5 \sim \pm 18$	$\pm 22_{\max}$	± 16	± 18	± 18	± 18	± 18	± 22
U_{omax}	最大输出电压幅度	V					± 13.5	± 13.5	± 13.5	± 13.8
U_{idmax}	最大差模输入电压	V	± 30	± 30	32	± 30	± 30	± 30	± 30	± 0.7
U_{icmax}	最大共模输入电压	V	± 12		$V_{CC} - 1.5$	± 12	± 15	± 11	± 11	
A_{uo}	开环差模电压增益	dB	86~106	106	100	106	100	106	106	120
R_{id}	开环差模输入电阻	$k\Omega$	1000	2000		10°	10°	10°	10°	6000
R_o	开环输出电阻	Ω	200							70
K_{CMR}	共模抑制比	dB	70~90	90	85	86	100	86	86	126
K_{SVR}	电源抑制比	dB	76~90	96	100	86	100	86	86	120
U_{io}	输入失调电压	mV	2~6	1	2	10	5	3	3	0.03

续表

参 数			型 号							
符号	名称	单位	LM741	LM747	LM324	LF353	LF347	TL082	TL084	OP37
dV_{I0}	输入失调电压温漂	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	15	15	7	10	10	10	10	0.2
I_{I0}	输入失调电压	nA	20	20	5	0.2	0.025	0.005	0.005	10
I_{IB}	输入偏置电流	nA	80		45		0.05	0.02	0.02	20
SR	输出电压摆动速率	$\text{V}/\mu\text{s}$	0.5	0.5		16	13	16	16	17
GBP	增益带宽乘积	MHz	1.2	1.5	1	4	4	4	4	63
描述			通用 双极型	通用 双极型	通用 双极型	JFET 输入	JFET 输入	JFET 输入	JFET 输入	精密 高速

(3) 部分运算放大器的管脚分布 (见附图 A-27)。



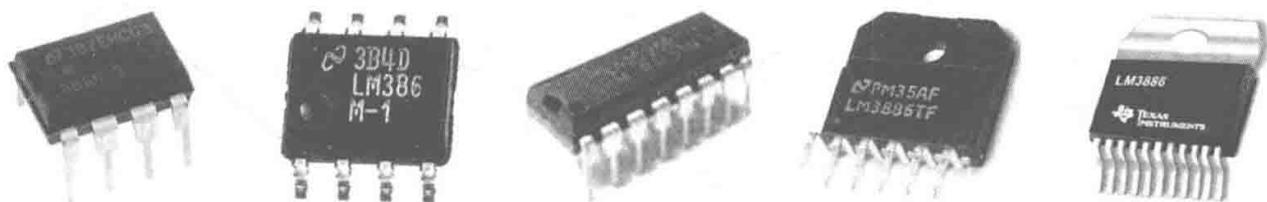
附图 A-27 部分运算放大器管脚分布图

4. 集成功率放大器

功率放大器在电路中主要用于需要放大功率的场合,通常在电子系统中作为最后一级电路用于驱动大功率负载,如发射天线、扬声器等进行输出驱动。

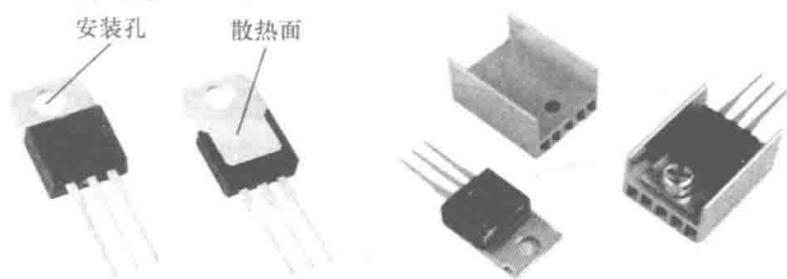
集成功率放大器的种类很多,有通用型和专用型两大类。前者可应用于多种场合,后者只能应用于某些特殊场合(如收音机和电视机中)。按照功率来划分,集成功率放大器有小功率、中功率和大功率放大器之分。附图 A-28 所示为常用功率放大器的外形图。

功率放大器在使用过程中,由于发热较大,需要安装合适尺寸的散热器。一般情况下,大功率三极管的背面都有一个用于与散热器连接的散热面,如附图 A-29 所示。利用三极管



附图 A-28 常用集成功率放大器的外形图

上的安装孔，可以把合适的散热器与三极管散热面装配到一起。在安装时，需要在三极管与散热器之间涂上导热膏以提高热传导。



附图 A-29 功率三极管与散热器的外形图

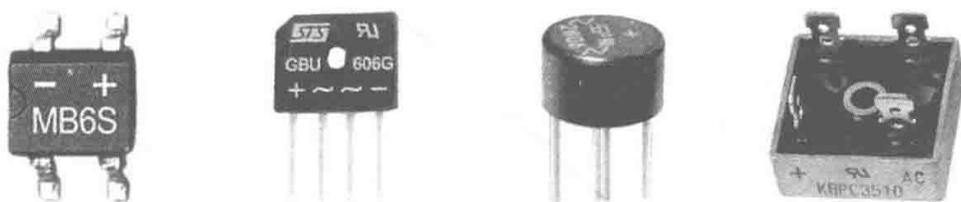
在一些功率非常大的系统中，经常要使用体积庞大的散热器，将多个功率管同时进行装配，如附图 A-30 所示。



附图 A-30 几种体积庞大的散热器的外形图

5. 整流桥堆

整流桥堆是将四个同一型号的二极管集成在一起构成的全波整流电路，在直流电源的设计中应用广泛。附图 A-31 所示是一些常见的整流桥堆的外形，每种型号的整流桥堆都有最大反向电压 U_{RRM} 和平均正向电流 $I_{F(AV)}$ 等参数。在选用时，要保证整流桥堆的 U_{RRM} 大于电路的额定电压、平均正向电流 $I_{F(AV)}$ 大于电路的最大持续工作电流。

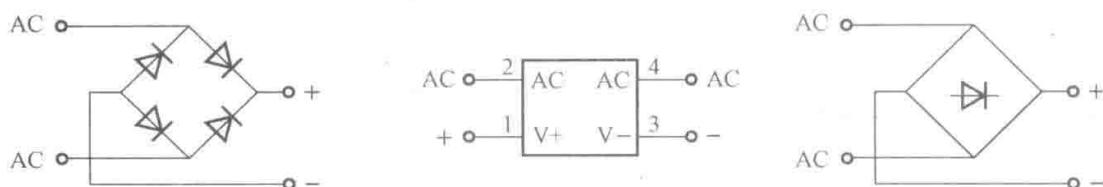


附图 A-31 常见的整流桥堆外形

整流桥堆所能承受的电流越大，其体积也就越大。 $I_{F(AV)} \geq 3A$ 的整流桥堆还有与散热器连接的结构。若整流桥堆持续工作在大电流的条件下，应当为其安装散热器。

整流桥堆有三种电路符号，如附图 A-32 所示，每种电路符号的 4 个管脚分别为：两个 AC 管脚接交流输入信号（电源变压器的输出），由于交流信号没有正负之分，所以这两个

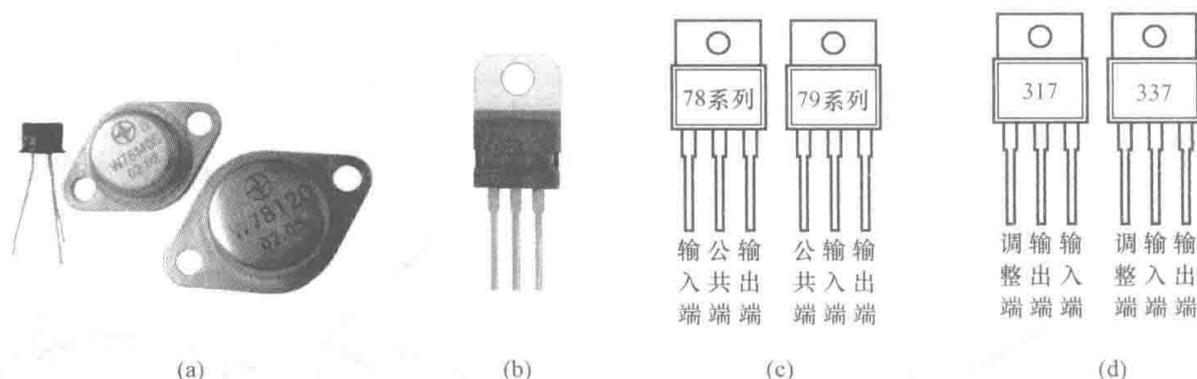
AC 管脚可以混用；“+”管脚为整流桥堆的输出正极，“-”管脚为整流桥堆的输出负极，这两个是整流桥堆的输出，由于信号经过整流已经具有极性之分，所以正、负极不能混用，否则将会烧毁负载。



附图 A-32 整流桥堆的三种电路符号

6. 集成稳压器

集成稳压器是在直流电源的设计中经常用到的模拟集成器件，按照管脚的多少分为三端固定式、三端可调式、多端可调式等，其中三端式稳压器最为常见。附图 A-33 所示为三端稳压器的外观及管脚排列。



附图 A-33 三端集成稳压器外观及三种器件的管脚排列

(a) 金属封装；(b) 塑料封装；(c) 三端固定式稳压器；(d) 三端可调式稳压器

三端稳压器的通用产品有 78 系列（输出固定正电压）、79 系列（输出固定负电压）、17 系列（输出可调正电压）和 37 系列（输出可调负电压）。78 系列和 79 系列三端集成稳压器是较常用的三端固定式集成稳压器，三个管脚分别为输入端、输出端、公共端，如附图 A-33 (c) 所示。78 系列三端集成稳压器为正电压型，79 系列三端集成稳压器为负电压型。每个系列都有 10 个输出电压等级，分别为 5、6、8、9、12、15、18、20V 和 24V。具体型号中的后两位数字代表输出电压值，如 W7805 表示输出电压为 +5V，而 W7912 表示输出电压为 -12V。17 系列和 37 系列三端集成稳压器是较常用的三端可调式集成稳压器，三个管脚分别称为输入端、输出端和调整端，如附图 A-33 (d) 所示。17 系列三端集成稳压器为正电压型，37 系列三端集成稳压器为负电压型。

附录 B 放大器干扰、噪声抑制和自激振荡的消除

放大器的调试一般包括调整和测量静态工作点和性能指标。放大器的性能指标包括放大倍数、输入电阻、输出电阻和通频带等。由于放大电路是一种弱电系统，具有很高的灵敏度，因此很容易接受外界和内部一些无规则信号的影响。也就是在放大器的输入端短路时，输出端仍有杂乱无规则的电压输出，这就是放大器的噪声和干扰电压。另外，由于安装、布线不合理，负反馈太深以及各级放大器共用一个直流电源造成级间耦合等，也能使放大器在没有输入信号时，有一定幅度和频率的电压输出。例如，收音机的尖叫声或“突突……”的汽船声，这就是放大器发生了自激振荡。噪声、干扰和自激振荡的存在都妨碍了对有用信号的观察和测量，严重时放大器将不能正常工作。所以必须抑制干扰、噪声和消除自激振荡，才能进行正常的调试和测量。

一、干扰和噪声的抑制

将放大器输入端短路，在放大器输出端仍可测量到一定的噪声和干扰电压。其频率如果是 50Hz (或 100Hz)，一般称为 50Hz 交流声；有时是非周期性的，没有一定规律，可以用示波器观察到如附图 B-1 所示波形。50Hz 交流声大都来自电源变压器或交流电源线，100Hz 交流声往往是由整流滤波不良造成的。另外，由电路周围的电磁波干扰信号引起的干扰电压也是常见的。由于放大器的放大倍数很高（特别是多级放大器），只要在它的前级引进一点微弱的干扰，经过几级放大，在输出端就可以产生一个很大的干扰电压。此外，电路中的地线接得不合理，也会引起干扰。

抑制干扰和噪声的措施一般有以下几种。

1. 选用低噪声的元器件

选用噪声小的集成运放和金属膜电阻等。另外，可加低噪声的前置差动放大电路。由于集成运放内部电路复杂，因此它的噪声较大。即使是“极低噪声”的集成运放，也不如某些噪声小的场效应对管，或双极型超 β 对管的噪声小。所以在要求噪声系数极低的场合，以挑选噪声小对管组成前置差动放大电路为宜；也可加有源滤波器。

2. 合理布线

放大器输入回路的导线和输出回路、交流电源的导线要分开，不要平行铺设或捆扎在一起，以免相互感应；用于实验中的连接线应越短越好。

3. 屏蔽

小信号的输入线可以采用具有金属丝外套的屏蔽线，外套接地。整个输入级用单独金属盒罩起来，外罩接地。电源变压器的一、二次侧之间加屏蔽层。电源变压器要远离放大器前级，必要时可以把变压器也用金属盒罩起来，以利隔离。

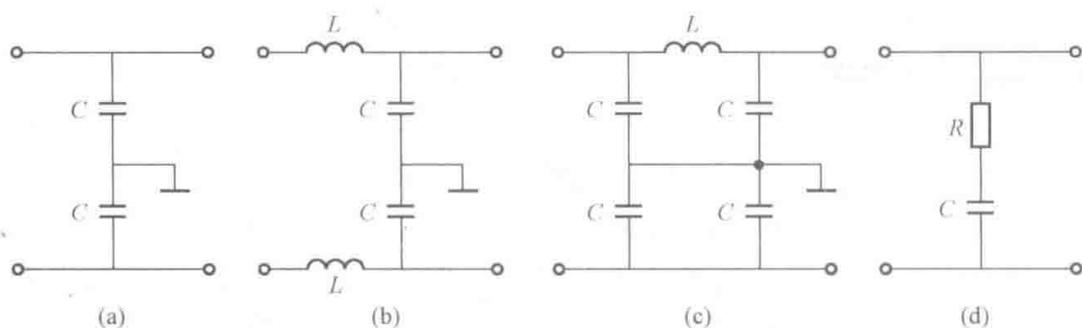
4. 滤波

为防止电源串入干扰信号，可在交（直）流电源线的进线处加滤波电路。附图 B-2



附图 B-1 信号中的干扰和噪声

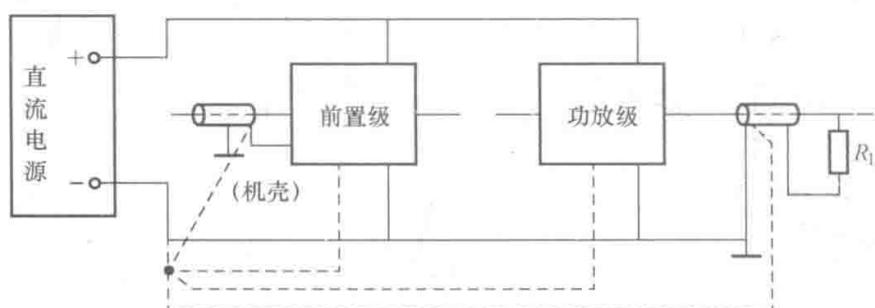
(a) ~ (c) 所示的无源滤波器可以滤除天电干扰（雷电等引起）和工业干扰（电机、电磁铁等设备起、制动时引起）等干扰信号，而不影响 50Hz 电源的引入。图中电感元件一般为几至几十毫亨，电容元件为几千微微法。附图 B-2 (d) 中阻容串联电路对电源电压的突变有吸收作用，以免其进入放大器。附图 B-2 中， R 和 C 的数值可选 100Ω 和 $2\mu\text{F}$ 左右。



附图 B-2 抑制干扰和噪声的措施

5. 选择合理的接地点

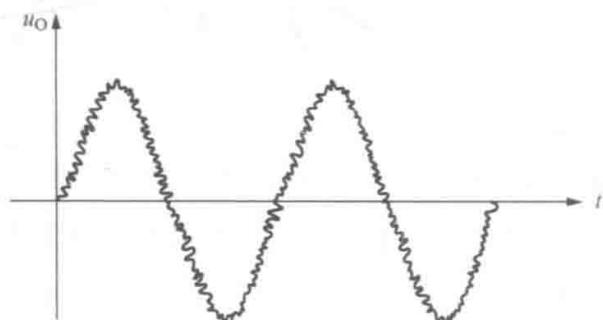
在各级放大电路中，如果接地点安排不当，也会造成严重的干扰。例如，在附图 B-3 中，同一台电子设备的放大器，由前置放大级和功率放大级组成。当接地点如图中实线所示时，功率级的输出电流是比较大的，此电流通过导线产生的压降，与电源电压一起，作用于前置级，引起扰动，甚至产生振荡。此外，因负载电流流回电源时，造成机壳（地）与电源负端之间电压波动，而前置放大级的输入端接到这个不稳定的“地”上，会引起更为严重的干扰。如将接地点改成图中虚线所示，则可克服上述弊端。



附图 B-3 选择合理的接地点抑制噪声

二、自激振荡的消除

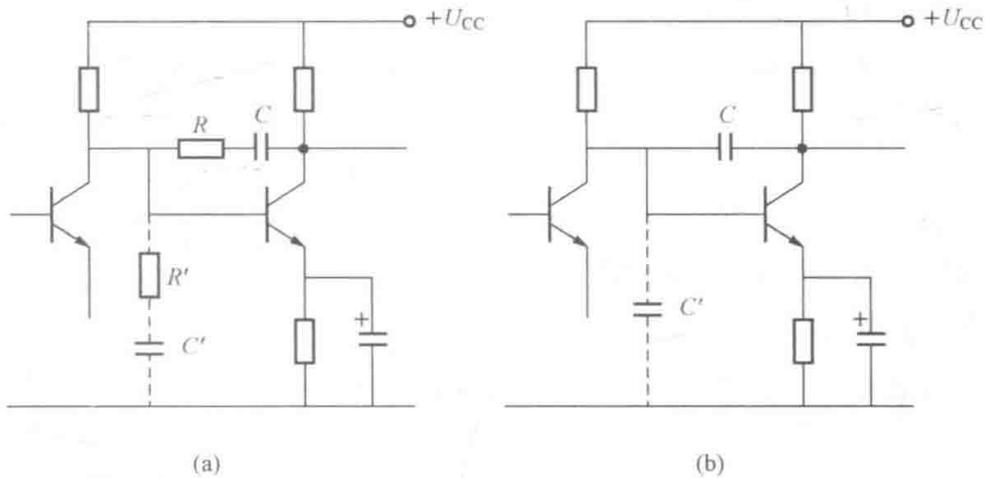
检查放大器是否发生自激振荡，可以把输入端短路，用示波器（或毫伏表）接在放大器的输出端进行观察，如附图 B-4 所示波形。自激振荡和噪声的区别是，自激振荡的频率一般为比较高的或极低的数值，而且频率随着放大器元件参数不同而改变（甚至拨动一下放大器内部导线的位置，频率也会改变），振荡波形一般是比较规则的，幅度也较大，往往使三极管处于饱和和截止状态。



附图 B-4 自激振荡波形

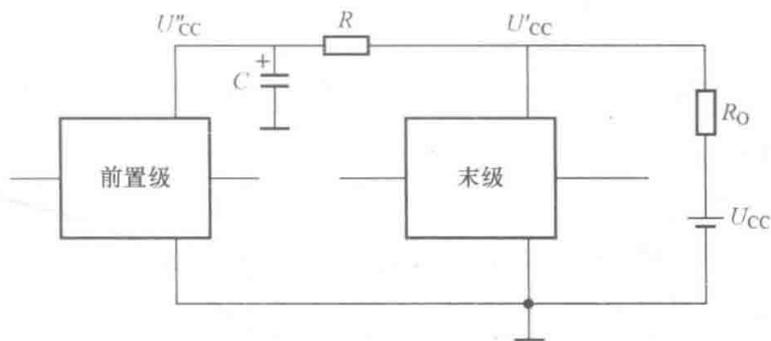
高频振荡主要是由于安装、布线不合理引起的。例如，输入和输出线靠得太近，产生正反馈作用。对此应从安装工艺方面解决，如元件布置

紧凑，接线要短等。也可以用一个小电容（如 1000pF 左右）一端接地，另一端逐级接触管子的输入端，或电路中合适部位，找到抑制振荡的最灵敏的一点（即电容接此点时，自激振荡消失），在此处外接一个合适的电阻电容或单一电容（一般为 $100\text{pF}\sim 0.1\mu\text{F}$ ，由实验决定），进行高频滤波或负反馈，以压低放大电路对高频信号的放大倍数或移动高频电压的相位，从而抑制高频振荡（见附图 B-5）。



附图 B-5 抑制高频振荡的方法

低频振荡是由于各级放大电路共用一个直流电源所引起。如附图 B-6 所示，因为电源总有一定的内阻 R_0 ，特别是电池用得时间过长或稳压电源质量不高，使得内阻 R_0 比较大时，则会引起 U'_{CC} 处电位的波动， U'_{CC} 的波动作用到前级，使前级输出电压 U''_{CC} 相应变化，经放大后，使波动更严重，如此循环，就会造成振荡现象。最常用的消除办法是在放大电路各级之间加上“去耦电路”，如附图 B-6 中的 R 和 C ，从电源方面使前后级减小相互影响。去耦电路 R 的值一般为几百欧，电容 C 选几十微法或更大一些。



附图 B-6 抑制低频振荡的方法

附录 C 电子电路的故障分析与排除

在电子技术实践中经常会出现故障,通过查找和排除故障,对全面提高电子技术实践能力十分有益。但对于初学者来说,遇到故障后会束手无策,因此,了解和掌握查找和排除故障的基本方法是十分必要的。

一、常用检查方法

1. 直观检查法

通过视觉、听觉、嗅觉、触觉来查找故障部位,这是一种简便有效的方法。

(1) 检查接线,在面包板上插接电路,接错线引起的故障比率比较高,有时还会损坏器件。如发现电路有故障时,应对照安装接线图检查电路的接线有无漏线、断线和错线,特别要注意检查电源线和地线的接线是否正确。为了避免和减少接线错误,应在课前画出正确的安装接线图。

(2) 听通电后是否有打火等异响;闻是否有烧焦等异味;轻触电路中各种元器件是否温度过高。如果听、闻、摸到异常时应立即断电。

电解电容器极性接反时可能会造成爆炸,漏电大时,介质损耗将增大,也会使温度上升,甚至使电容器胀裂。因此,通电前要认真细致的检查电解电容器的极性。

2. 电阻法

用万用表测量电路电阻和元件电阻来发现和寻找故障部位及元件,注意应在断电条件下进行。

(1) 通断法。用于检查电路中连线是否断路,元器件引脚是否虚连。要注意检查是否有不允许悬空的输入端未接入电路,尤其是 CMOS 电路的任何输入端不能悬空。一般采用万用表电阻挡 $R \times 1$ 或 $R \times 10$ 挡进行测量。

(2) 测电阻值法。用于检查电路中电阻元件的阻值是否正确;检查电容器是否断线、击穿和漏电;检查半导体器件是否击穿、开断及各 PN 结的正反向电阻是否正常等。检查二极管和三极管时,一般用万用表的 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡进行测量。在检查大容量电容器(如电解电容器)时,应先用导线将电解电容的两端短路,泄放掉电容器中的存储电荷后,再检查电容有没有被击穿或漏电是否严重;否则,可能会损坏万用表。

在测量电阻值时,如果是在线测试,还应考虑到被测元器件与电路中其他元器件的等效并联关系;需要准确测量时,元器件的一端必须与电路断开。

3. 电压法

用电压表直流挡检查电路各静态工作点电压、集成电路引脚的对地电位是否正确。也可用交流电压挡检查有关交流电压值。测量电压时,应当注意电压表内阻及频率响应对被测电路的影响。

例如,在 TTL 门电路中, TTL 电路的输入和输出电压的正常范围为:

引出端所处状态	电压范围
输出高电平	$>2.7V$
输出低电平	$<0.4V$

所有与输入端悬空	1.0~1.4V
有一个与输入端接低电平	$0.3V < 0.4V$
有一个与输入端接地	0.1V
两个输出端状态不同时发生短路	0.6~2.0V

4. 示波法

这是一种动态测试法，通常是在电路接入输入信号的前提下进行检查。用示波器观察电路有关各点的信号波形，以及信号各级的耦合、传输是否正常来判断故障所在部位，是在电路静态工作点处于正常的条件下进行的检查。

5. 电流法

用万用表测量晶体管 and 集成电路的工作电流、各部分电路的分支电流以及电路的总负载电流，以判断电路及元件是否正常工作。

6. 元器件替代法

对怀疑有故障的元器件，可用一个完好的元器件替代，替换后若电路工作正常，则说明原有元器件存在故障，可作进一步检查测定之。但对于连接线层次较多、功率大的元器件及成本较高的部件不宜采用此方法。

对于集成电路，可用同一芯片上的相同电路来替代怀疑有故障的电路。有多个与输入端的集成器件，如在实际使用中有多余输入端时，则可换用其余输入端进行试验，以判断原输入端是否有问题。

7. 分隔法

为了准确地找出故障发生的部位，还可通过拔去某些部分的插件和切断部分电路之间的联系来缩小故障范围，分隔出故障部分。如发现电源负载短路可分区切断负载，检查出短路的负载部分；或通过关键点的测试，将故障范围分为两个部分或多个部分，通过检测排除或缩小可能的故障范围，找出故障点。采用这种方法时，应保证拔去或断开部分电路不至于造成关联部分的工作异常及损坏。

二、逐步逼近法

在不能直接迅速地判断故障时，可采用逐级检查的方法逐步逼近故障。逐步逼近法分析与排除故障的步骤如下：

1. 判断故障级

在判断故障级时，可采用两种方式：

(1) 由前向后逐级推进，寻找故障点。从第一级输入信号，用示波器或电压表逐级测试其后各级输出端信号，如发现某一级的输出波形不正确或没有输出时，则故障就发生在该级或下级电路，这时可将级间连接或耦合电路断开，进行单独测试，即可判断故障级。模拟电路一般加正弦信号，数字电路可根据功能的不同输入方波、单脉冲或高、低电平。

(2) 由后向前逐级推进寻找故障级。可在某级输入端加信号，测试其后各级输出端信号是否正常，无故障则往前级推进；若某级输出信号不正常，处理方法与(1)相同。

2. 寻找故障的具体部位或元器件

故障级确定后，寻找故障具体部位可按以下几步进行：

(1) 检查静态工作点。可按电路原理图所给定静态工作点进行对照测试，也可根据电路元件参数值进行估算后测试。以晶体管为例，对线性放大电路，则可根据如下计算式估算和

判断电路工作状态是否正常:

$$U_C = (1/2 \sim 1/3)U_{CC}, U_E = (1/6 \sim 1/4)U_{CC}$$

$$U_{BE}(\text{硅管}) = (0.5 \sim 0.7)V, U_{BE}(\text{锗管}) = (0.2 \sim 0.3)V$$

对于开关电路, 如果三极管应处于截止状态, 则根据 U_{BE} 电压加以判断, 它应略微处于正偏或处于反偏; 如果三极管应处于饱和状态, 则 U_{CE} 小于 U_{BE} 。若工作点值不正常, 可检查该级电路的接线点以及电阻、三极管是否完好, 查出故障所在点。若仍不能找出故障, 应作动态检查。

对于数字电路, 如果无论输入信号如何变化, 输出一直保持高电平不变时, 这可能是被测集成电路的地线接触不良或未接地线。

如输出信号的变化规律和输入的相同, 则可能是集成电路未加上电源电压或电源线接触不良所致。

(2) 动态的检查。要求输入端加检查信号, 用示波器 (或电子电压表) 观察测试各级各点波形, 并与正常波形对照, 根据电路工作原理判断故障点所在。

3. 更换元器件

元器件拆下后, 应先测试其损坏程度, 并分析故障原因, 同时检查相邻的元器件是否也有故障。在确认无其他故障后, 再动手更换元器件。更换元器件应注意以下事项:

(1) 更换电阻应采用同类型、同规格 (同阻值和同功率级) 的电阻, 一般不可用大功率等级代用, 以免电路失去保护功能。

(2) 对于一般退耦、滤波电容器, 可用同容量、同耐压或高容量、高耐压电容器代用。

对于高中频回路电容器, 一定要用同型号瓷介电容器或高频介质损耗以及分布电感相近的其他电容器代换。

(3) 集成电路应采用同型号、同规格的芯片替换。对于型号相同但前缀或后缀字母、数字不同的集成电路, 应查找有关资料, 清楚其意义方可使用。

(4) 晶体管的代换, 尽量采用同型号, 参数相近的代用。当使用不同型号的晶体管代用时, 应使其主要参数满足电路要求, 并适当调整电路相应元件的参数, 使电路恢复正常工作状态。

附录 D NI Multisim 12 中半导体器件模型参数

半导体器件包括二极管、双极型晶体管、结型场效应管、MOS 场效应管和砷化镓场效应管。这些半导体器件的特性方程通常都是非线性的，故也称为非线性有源器件。用 EDA 工具进行电路仿真时，需要用等效的数学模型来描述这些器件。数学模型的正确性、准确度及效率直接影响整个电路分析的精确性和速度。在 EDA 工具中，不同的分析功能所采用的半导体器件模型是不同的。一般有直流模型、交流小信号模型、瞬态模型、噪声模型、温度模型等，模型参数也较多，如双极型晶体管、MOS 场效应管的模型参数都在 40 个以上。下面附表 D-1~附表 D-4 中列出了几种半导体器件模型参数、参数意义及隐含值。

附表 D-1 二极管模型参数

序号	符号	Multisim 关键字	名称	隐含值	单位	举例
1	I_S	IS	饱和电流	10^{-14}	A	2×10^{-15} A
2	R_S	RS	寄生电阻	0	Ω	10 Ω
3	n	N	发射系数	1		1.2
4	τ_D	TT	渡越时间	0	s	1ns
5	C_{J0}	CJO	零偏置结电容	0	F	2pF
6	ϕ_D	VJ	结电压	1	V	0.6V
7	m	M	电容梯度因子	0.5		0.33
8	E_g	EG	禁带宽度	1.11	eV	1.11eV (硅管)
9	p_i	XTI	饱和电流温度系数	3.0		0.69eV (锗管)
10	K_f	KF	闪烁噪声系数	0		
11	α_f	AF	闪烁噪声指数	1		3.0
12	FC	FC	正偏耗尽电容公式系数	0.5		0
13	BV	BV	反向击穿电压	∞		1
14	I_{BV}	IBV	反向击穿电流	10^{-3}		0.5
15	I_{BVL}	IBVL	低电平反向击穿电流	1		40V
16	I_{KF}	IKF	大注入的“膝点电流”	∞	A	10^{-3} A
17	n_{BV}	NBV	反向击穿理想系数	1		1A
18	n_{BVL}	NBVL	低电平反向击穿理想系数	1		50mA
19	n_R	NR	ISR 的发射系数	2		1
20	T_{BV1}	TBV1	线性温度系数	0	1/ $^{\circ}$ C	1
21	T_{BV2}	TBV2	二次温度系数	0	1/ $^{\circ}$ C	2
22	T_{IKF}	TIKF	IKF 线性温度系数	0	1/ $^{\circ}$ C	
23	T_{RS1}	TRS1	寄生电阻线性温度系数	0	1/ $^{\circ}$ C	
24	T_{RS2}	TRS2	寄生电阻二次温度系数	0	1/ $^{\circ}$ C ²	
25	T	T_MEASURED	参数测量温度	27	$^{\circ}$ C	
26	T_{ABS}	T_ABS	模型运行温度	27	$^{\circ}$ C	
27	T_{REL}	T_REL_GLOBAL	相对温差	0	$^{\circ}$ C	

附表 D-2

双极型晶体管模型参数

序号	符号	Multisim 关键字	名称	隐含值	单位	举例
1	I_S	IS	饱和电流	10^{-16}	A	10^{-15} A
2	β_F	BF	正向电流增益	100		80
3	β_R	BR	反向电流增益	1		1.5
4	n_F	NF	正向电流发射系数	1		1
5	n_R	NR	反向电流发射系数	1		
6	c_2	ISE	B-E 结泄漏饱和电流	0	A	
7	c_4	ISC	B-C 结泄漏饱和电流	0	A	
8	I_{KF}	IKF	正向 β 大电流下降点	∞	A	0.01A
9	I_{KR}	IKR	反向 β 大电流下降点	∞	A	10^{-13} A
10	n_{EL}	NE	B-E 结泄漏发射系数	1.5		2
11	n_{CL}	NC	B-C 结泄漏发射系数	2		2
12	U_A	VAF	正向欧拉电压	∞	V	200V
13	U_B	VAR	反向欧拉电压	∞	V	200V
14	$R_{CC'}$	RC	集电极体电阻	0	Ω	10 Ω
15	$R_{EE'}$	RE	发射极体电阻	0	Ω	1 Ω
16	$R_{BB'}$	RB	基极体电阻	0	Ω	10 Ω
17	R_{BM}	RBM	大电流时最小基极欧姆电阻	RB	Ω	10 Ω
18	I_{RB}	IRB	基极电阻下降到最小值 1/2 时的电流	∞	A	0.1A
19	τ_F	TF	理想正向渡越时间	0	s	1ns
20	τ_R	TR	理想反向渡越时间	0	s	10ns
21	X_{TF}	XTF	TF 随偏置变化系数	0		
22	u_{TF}	VTF	描述 TF 随 VBC 变化的电压	∞		
23	I_{TF}	ITF	TF 的大电流参数	0	A	
24	P_{TF}	PTF	$f = \frac{1}{2\pi\tau_F}$ 时超前相位	0		
25	C_{JED}	CJE	B-E 结零偏置耗尽电容	0	F	
26	ϕ_E	VJE	B-E 结内建电势	0.75	V	2pF
27	m_E	MJE	B-E 结梯度因子	0.33		0.70V
28	C_{JC0}	CJC	B-C 结零偏置耗尽电容	0	F	0.35

续表

序号	符号	Multisim 关键字	名称	隐含值	单位	举例
29	ϕ_C	VJC	B-C 结内建电动势	0.75	V	2pF
30	m_C	MJC	B-C 结梯度因子	0.33		0.70V
31	C_{SUB}	CJS	C-衬底结零偏置电容	0	F	0.35
32	ϕ_S	VJS	衬底结内建电动势	0.75	V	5pF
33	m_S	MJS	衬底结梯度因子	0.33		0.70V
34	FC	FC	正偏压耗尽电容公式中的系数	0.5		0.35
35	X_{CJC}	XCJC	B-C 结耗尽电容连到基极内节点的百分数	1		
36	X_{TB}	XTB	β 的温度系数	0		
37	X_{TI}	XTI	饱和电流温度指数	3		
38	E_g	EG	IS 温度效应中的禁带宽度	1.11	(硅管) eV	
39	K_f	KF	闪烁噪声系数	0		
40	A_f	AF	闪烁噪声指数	127	$^{\circ}\text{C}$	
41	T	TNOM	参数测量温度	0.5	$^{\circ}\text{C}$	1A
42	n_K	NK	大电流源滚降系数	0		1
43	I_{SS}	ISS	衬底饱和电流	1	A	1
44	n_S	NS	衬底发射系数	1		
45	X_{CJC2}	XCJC2	B-C 结零偏置耗尽电容连到基极体电阻内的百分数	1		1
46	X_{CJS}	XCJS	C-衬底结零偏置电容连到集电极体电阻内的百分数	1		1
47	$T_{1RBB'}$	TRB1	基极体电阻线性温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}$	
48	$T_{2RBB'}$	TRB2	基极体电阻二次温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}^2$	
49	$T_{1RCC'}$	TRC1	集电极体电阻线性温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}$	
50	$T_{2RCC'}$	TRC2	集电极体电阻二次温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}^2$	
51	$T_{1REE'}$	TRE1	发射极体电阻线性温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}$	
52	$T_{2REE'}$	TRE2	发射极体电阻二次温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}^2$	
53	T_{1RBM}	TRM1	电阻 RBM 线性温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}$	10
54	T_{2RBM}	TRM2	电阻 RBM 二次温度系数	0	$1/^{\circ}\text{C}^2$	
55	U_{CMO}	VO	载流子迁移拐点电压	1	V	

附表 D-3

结型场效应管模型参数

序号	符号	Multisim 关键字	名称	隐含值	单位	举例
1	U_{TO}	VTO	阈值电压	-2	V	
2	β	BETA	跨导参数	10^{-4}	A/V ²	
3	Λ	LAMBDA	沟道长度调制系数	0	V ⁻¹	
4	R_D	RD	漏极欧姆电阻	0	Ω	10 Ω
5	R_S	RS	源极欧姆电阻	0	Ω	10 Ω
6	C_{GS0}	CGS	零偏 G-S 结电容	0	F	
7	C_{GD0}	CGD	零偏 G-D 结电容	0	F	
8	ϕ_0	PB	栅结内建电动势	1	V	
9	m	M	电容梯度因子	0.33		0.35
10	I_S	IS	栅 PN 结饱和电流	10^{-14}	A	
11	FC	FC	正偏耗尽电容系数	0.5		
12	k_f	KF	闪烁噪声系数	0		
13	a_f	AF	闪烁噪声指数	0		
14	T	TNOM	参数测量温度	27	°C	27
15	A	ALPHA	电离系数	10^{-6}	V ⁻¹	506.8×10^{-6}
16	T_β	BETATCE	跨导参数指数温度系数	0	%/°C	-0.5
17	I_{SR}	ISR	栅结复合电流	10^{-12}	A	1.091×10^{-12}
18	n_S	N	栅结发射系数	0		1
19	n_{SR}	NR	栅结复合电流发射系数	0		2
20	U_{IK}	VK	电离拐点电压	0	V	251.7
21	T_{VTO}	VTOTC	阈值电压温度系数	0	V/°C	-2.5×10^{-3}
22	T_{IS}	XTI	栅 PN 结饱和电流温度系数	0		3

附表 D-4

MOS 管主要模型参数

序号	符号	Multisim 关键字	名称	隐含值	单位	举例
1	U_{TO}	VTO	零偏阈值电压	1	V	1.0V
2	K_p	KP	跨导参数	2×10^{-5}	A/V ²	3×10^{-5} A/V ²
3	γ	GAMMA	体材料阈值参数	0	V ^{1/2}	$0.35V^{1/2}$
4	$2\phi_p$	PHI	表面电动势	0.6	V	0.65V
5	λ	LAMBDA	沟道长度调制系数	0	V ⁻¹	$0.02V^{-1}$
6	t_{OX}	TOX	氧化层厚度	1×10^{-7}	m	1×10^{-7} m
7	N_b	NSUB	衬底掺杂浓度	0	cm ⁻³	1×10^{15} cm ⁻³
8	N_{SS}	NSS	表面态密度	0	cm ⁻²	1×10^{10} cm ⁻²
9	N_{FS}	NFS	快表面态密度	0	cm ⁻²	1×10^{10} cm ⁻²
10	N_{eff}	NEFF	总沟道电荷系数	1		5
11	X_J	XJ	结深	0	m	1×10^{-6} m
12	L_d	LD	横向扩散长度	0	m	0.8×10^{-6} m
13	T_{PG}	TPG	硅材料类型	1 (硅栅)		0 (铝栅)
14	μ_0	UO	载流子表面迁移率	600	cm ² / (V·s)	$700\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$
15	U_c	UCRIT	迁移率下降时临界电场	1×10^4	V/cm	1×10^4 V/cm
16	U_e	UEXP	迁移率下降时临界电场指数	0		0.1
17	U_t	UTRA	迁移率下降时横向电场系数	0		0.5
18	v_{max}	VMAX	载流子最大漂移速度	0	m/s	5×10^4 m/s
19	δ	DELET	阈值电压的沟道宽度效应系数	0.1		1.0
20	X_{QC}	XQC	漏端沟道电荷分配系数	0		0.4
21	η	ETA	静态反馈系数	0		1.0
22	θ	THETA	迁移率调制系数	0	V ⁻¹	$0.05V^{-1}$
23	A_F	AF	闪烁噪声指数	1		1.2
24	K_F	KF	闪烁噪声系数	0		1×10^{-26}
25	I_S	IS	衬底结饱和电流	1×10^{-14}	A	1×10^{-15} A
26	J_S	JS	I_S /平方米	0	A/m ²	1×10^{-8} A/m ²
27	ϕ_J	PB	衬底结电动势	0.8	V	0.75V
28	C_J	CJ	零偏衬底电容/平方米	0	F/m ²	2×10^{-4} F/m ²

续表

序号	符号	Multisim 关键字	名称	隐含值	单位	举例
29	m_j	MJ	衬底结电容梯度因子	0.5		0.5
30	C_{JSW}	CJSW	零偏衬底电容/单位周边长度	0	F/m	1×10^{-9} F/m
31	M_{JSW}	MJSW	衬底周边电容梯度因子	0.33		0.33
32	F_c	FC	正偏耗尽电容系数	0.5		0.5
33	C_{GBO}	CGBO	G-B间覆盖电容/单位沟道宽度	0	F/m	2×10^{-10} F/m
34	C_{GDO}	CGDO	G-D间覆盖电容/单位沟道宽度	0	F/m	2×10^{-11} F/m
35	C_{GSO}	CGSO	G-S间覆盖电容/单位沟道宽度	0	F/m	2×10^{-11} F/m
36	R_D	RD	漏极欧姆电阻	0	Ω	10.0 Ω
37	R_S	RS	源极欧姆电阻	0	Ω	10.0 Ω
38	R_{sh}	RSH	漏源扩散区薄层电阻	0	Ω	30.0 Ω
39	C_{BD}	CBD	零偏 B-D 结电容			
40	C_{BS}	CBS	零偏 B-S 结电容			

附录 E 面包板和万用板

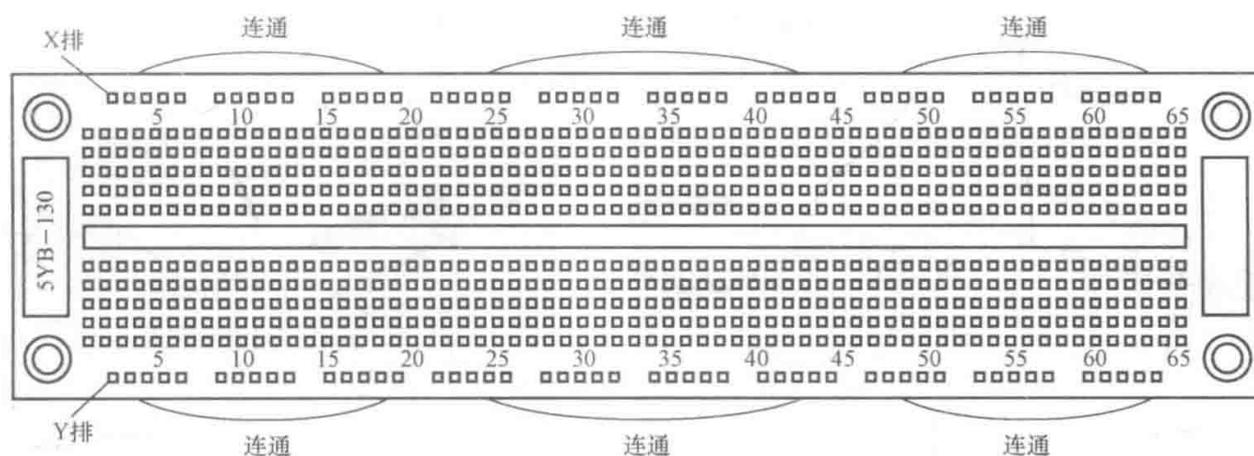
面包板和万用板是电子电路制作中必不可少的实验工具。

一、面包板

面包板是专为电子电路的无焊接实验设计制造的实验工具。由于使用面包板，各种电子元件可根据需要随意插入或拔出，免去了焊接，节省了电路的组装时间，而且元件可以重复使用，所以面包板非常适合电子电路的组装、调试和训练。

1. 常用面包板的结构

SYB-130 型面包板结构如附图 E-1 所示。面包板中央有一凹槽，凹槽两边各由 65 列小孔，每一列的 5 个小孔在电气上相互连通，任意两列间的小孔在电气上是绝缘的。集成电路的管脚就分别插在凹槽两边的小孔上。面包板上、下边各有一排（即 X 和 Y 排）在电气上是分段相连的 50 个小孔，分别作为电源与地线插孔用。对于 SYB-130 型面包板，X 和 Y 排的 1-15、16-35、36-50 孔在电气上是连通的（其他型号的面包板使用时应参看使用说明）。



附图 E-1 SYB-130 型面包板结构

面包板上的插孔可以夹住元器件的金属管脚，插孔所在的行列分别以数码和文字标注，以便查对。

2. 面包板的导线

面包板的导线可以使用附图 E-2 (a) 所示的面包板专用线。专用线有不同长度和不同颜色，线的两头是类似元器件管脚的金属针，具有一定的硬度，可以很容易地插到面包板的插孔中。如果没有这种专用线，也可以使用一定粗细的单股硬芯导线，如附图 E-2 (b) 所示，但需要用剥线钳去掉导线的绝缘皮，再将露出的导线芯插到插孔中。

3. 面包板的种类

面包板有大、中、小之分，如附图 E-3 所示，构建电路时要根据电子电路的复杂程度选用不同大小的面包板。

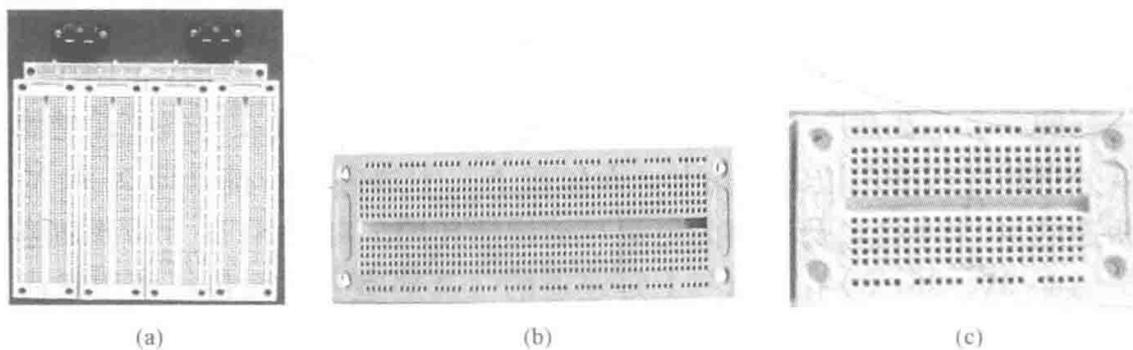
4. 布线工具

布线工具主要有剥线钳、偏口钳、扁嘴钳和镊子，如附图 E-4 所示。



附图 E-2 面包板专用线和单股硬芯导线

(a) 面包板专用线；(b) 单股硬芯导线



附图 E-3 面包板

(a) 大号；(b) 中号；(c) 小号



附图 E-4 布线用工具

(a) 剥线钳；(b) 偏口钳；(c) 扁嘴钳；(d) 镊子

剥线钳用来剥离导线绝缘皮。

偏口钳与扁嘴钳配合用来剪断导线和元器件的多余引脚。钳子刃面要锋利，将钳口合上，对着光检查时应合缝不漏光。扁嘴钳还用来弯直和理直导线，钳口要略带弧形，以免在勾绕时划伤导线。

镊子是用来夹住导线或元器件的引脚送入面包板指定位置的。

5. 面包板的使用方法及注意事项

(1) 安装分立元件时，应便于看到其极性和标志，将元件引脚理直后，在需要的地方折弯。为了防止裸露的引线短路，必须使用带套管的导线，一般不剪断元件引脚，以便重复使用。一般不要插入引脚直径大于 0.8mm 的元器件，以免破坏面包板插孔内部接触片的弹性。

(2) 对多次使用过的集成电路的引脚，必须修理整齐，引脚不能弯曲，所有的引脚应稍向外偏，这样能使引脚与插孔可靠接触。要根据电路图确定元器件在面包板上的排列方式，目的是走线方便。为了能够正确布线并便于查线，所有集成电路的插入方向要保持一致，不

能为了临时走线方便或缩短导线长度而把集成电路倒插。

(3) 根据信号流程的顺序,采用边安装边调试的方法。元器件安装之后,先连接电源线和地线。为了查线方便,连线尽量采用不同颜色。例如,正电源一般采用红色绝缘皮导线,负电源用蓝色,地线用黑线,信号线用黄色,也可根据条件选用其他颜色。

(4) 面包板宜使用直径为 0.6mm 左右的单股导线,如附图 E-2 所示。根据导线的距离以及插孔的长度剪断导线,要求线头剪成 45°斜口,线头剥离长度为 6mm 左右,要求全部插入底板以保证接触良好。裸线不宜露在外面,防止与其他导线短路。

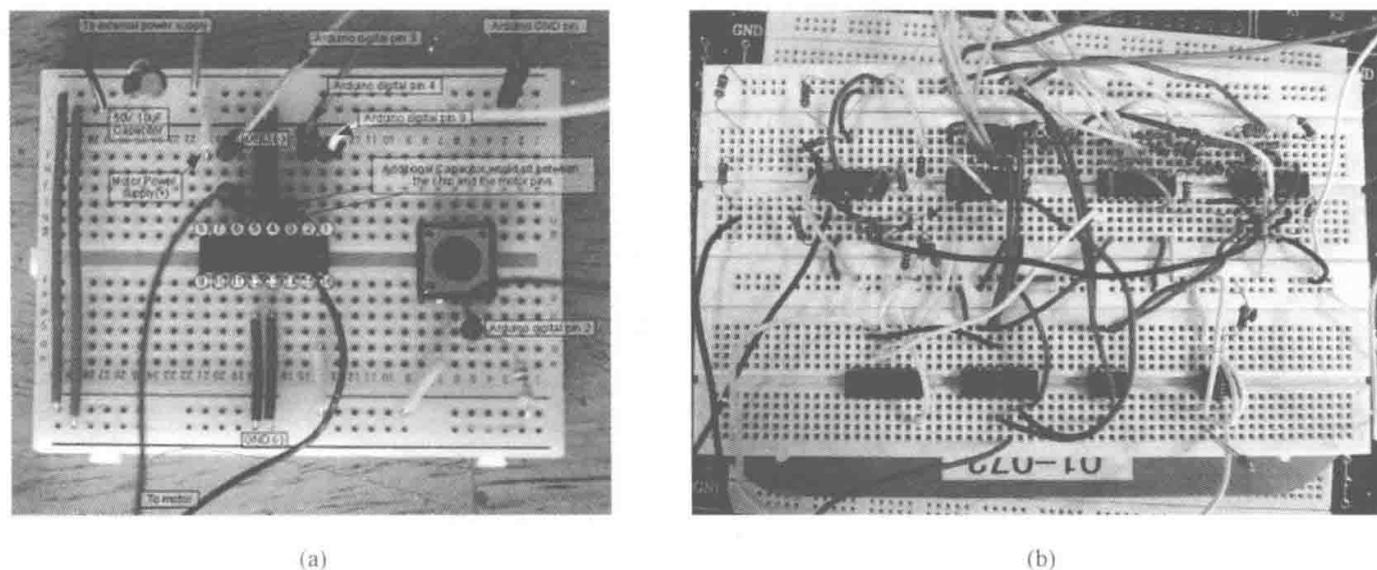
(5) 连线要求紧贴在面包板上,以免碰撞弹出面包板,造成接触不良。必须使连线在集成电路周围通过,不允许跨接在集成电路上,也不得使导线互相重叠在一起,尽量做到横平竖直,这样有利于查线,更换元器件及连线。

(6) 最好在各电源的输入端和地之间并联一个容量为几十微法的电容,这样可以减少瞬变过程中电流的影响。为了更好地抑制电源中的高频分量,应该在该电容两端再并联一个高频去耦电容,一般取 0.01~0.047 μ F 的独石电容。

(7) 在布线过程中,要求把各元器件在面包板上的相应位置以及所用的管脚号标在电路图上,以保证调试和查找故障的顺利进行。

(8) 所有的地线必须连接在一起,形成一个公共参考点。

附图 E-5 (a)、(b) 所示分别为采用面包板正确的接线方式和错误的接线方式。



附图 E-5 面包板搭接的电路

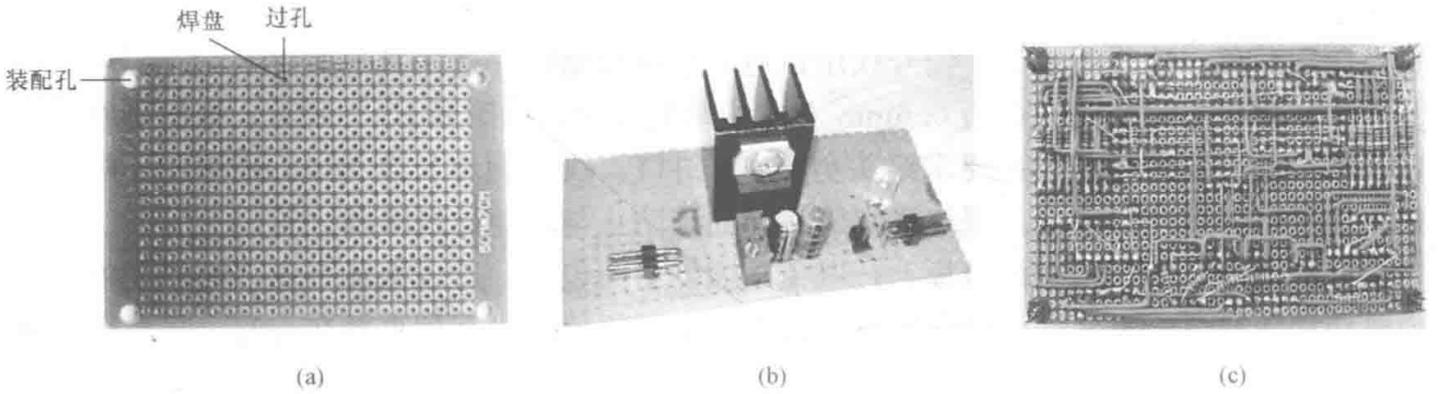
(a) 正确接法; (b) 错误接法

二、万用板

万用板也是一种接插元器件的实验工具,如附图 E-6 (a) 所示。它与面包板完全不同,使用时元器件插在万用板的一面,管脚穿过万用板的过孔,如附图 E-6 (b) 所示,在万用板的另一面用电烙铁将管脚焊接在万用板的焊盘上,然后焊接导线并通过导线实现元器件之间的电气连接。元器件一般都安装在万用板的同一面,导线可以焊接在万用板的任意一面,如附图 E-6 (c) 所示。

万用板上的元器件与导线都是通过焊接固定的,比面包板牢固;但是如果需要更换元器件或修改导线就不如面包板那样方便。所以应视电路的制作需要选择使用万用板还是面包板。

一般来说, 如果只是暂时连接电路验证设计的正确性或对电路参数进行调试, 使用面包板方便一些; 如果电路没什么缺陷, 就可以使用万用板焊接电路以便在样机中使用。



附图 E-6 万用板

(a) 万用板; (b) 万用板和元器件; (c) 导线连接器件

参 考 文 献

- [1] 王久和. 电工电子实验教程. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [2] 刘向军, 文亚凤, 孙淑艳. 电子技术实验指导书. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 康华光. 电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [4] 朱力恒. 电子技术仿真实验教程. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [5] 高文焕, 汪蕙. 模拟电路的计算机分析与设计——PSPICE 程序应用. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [6] 周常森. 电子电路计算机仿真技术. 山东: 山东科学技术出版社, 2001.
- [7] 廖先芸, 郝军. 电子技术实践与训练. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [8] 郑步生, 吴渭. Multisim 2001 电路设计及仿真入门与应用. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [9] 黄智伟. 基于 Multisim 2001 的电子电路计算机仿真设计与分析. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [10] 孙淑艳, 张青. 电子技术实践教学指导书. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [11] 臧春华. 电子线路设计与应用. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [12] 王鲁杨. 电子技术实验指导书. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [13] 鲍绍宣, 谭骏云, 王少杰. 线形分析电子学. 湖北: 华中理工大学出版社, 1993.
- [14] 孙淑艳. 电子线路解析分析方法的研究. 华北电力大学, 2006: 14, 16-19, 24-26.
- [15] 高歌. 电子技术 EDA 仿真设计. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [16] 华成英, 童诗白. 模拟电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] 华成英. 模拟电子技术基础教程. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [18] 孙淑艳. 模拟电子技术实验指导书. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [19] 梁青, 侯传教, 熊伟, 等. Multisim 11 电路仿真与实践. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [20] 孙淑艳. 模拟电子技术实验指导书. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [21] 张瑞华. 电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [22] 刘向军. 电子技术实验指导书. 北京: 高等教育出版社, 2015.

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "MTQxMzgyNDYuemlw",
  "filename_decoded": "14138246.zip",
  "filesize": 28159121,
  "md5": "c327a3101710e47fa26e505654579a98",
  "header_md5": "4ec11c8652cbc31fab784ab57b31acdf",
  "sha1": "e5b78964ec77460d81221a97df2183a07de4d357",
  "sha256": "ec2b96bac11cee4055b472bb0110bd3f163ee37ebad244979575498eb28d89ad",
  "crc32": 2306810709,
  "zip_password": "28zrs",
  "uncompressed_size": 37998204,
  "pdg_dir_name": "\u6a21\u62df\u7535\u5b50\u6280\u672f\u5b9e\u9a8c\u6307\u5bfc\u4e66 \u7b2c2\u7248_14138246",
  "pdg_main_pages_found": 251,
  "pdg_main_pages_max": 251,
  "total_pages": 259,
  "total_pixels": 1512232832,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```