

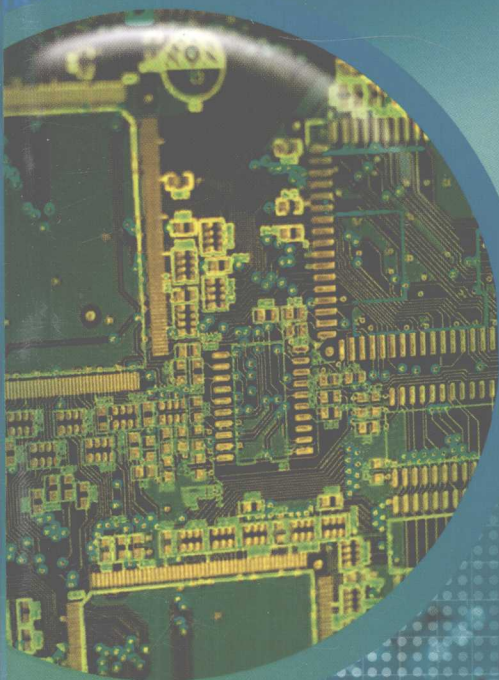


高等院校电气信息类专业系列实验教材

# 模拟电子技术

◎ 严雪萍 主编  
◎ 蒋彦

## 实验教程



化学工业出版社

高等院校电气信息类专业系列实验教材

# 模拟电子技术实验教程

严雪萍 蒋彦 主编  
成立 主审



化学工业出版社

·北京·

本书对模拟电子技术实验作了较为详细、全面的介绍。全书内容包括模拟电子技术实验的基础知识、模拟电子技术实验常用仪表的应用、常用电子元器件特性参数及其识别方法、模拟电子技术基本实验和计算机电路设计仿真技术 Multisim 10.0 及其应用。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化、自动化等相关专业本、专科学生的模拟电子技术实验教材或参考用书，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术实验教程/严雪萍, 蒋彦主编. —北京:  
化学工业出版社, 2008.6

(高等院校电气信息类专业系列实验教材)

ISBN 978-7-122-02978-2

I. 模… II. ①严…②蒋… III. 模拟电路-电子技术-  
实验-高等学校-教材 IV. TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 075979 号

责任编辑: 郝英华 郭燕春  
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 王 洋  
装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 10½ 字数 238 千字 2008 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 19.00 元

版权所有 违者必究



# 前 言

模拟电子技术是高等工科院校的重要专业基础课之一，是一门理论性和实践性都很强的课程。面对 21 世纪培养创新人才的需要，结合当前高校模拟电子技术实验教学的具体情况，应按照实验能力培养的规律，着力培养学生的独立思考和勇于创新的精神。

本书介绍了电子测量技术的基本应用知识，深入浅出地阐述了测量的误差分析和数据处理；测量的基本方法，测试原理；常用电子仪器的组成原理、使用方法；电子元器件的识别和参数测试；引入了 12 个基本实验项目，包括常用二极管、三极管的测试和单级放大电路、负反馈放大电路、运算放大电路和集成稳压电源等的交、直流信号测试内容；详细介绍了 Multisim 10.0 电路仿真软件的基础知识、基本操作并提供了具体操作实例。

本书的指导思想是培养学生掌握电子实验基本技能和基本测试技术的能力。为此，本书在编写时融合了电路分析基础、电子测量技术等相关理论知识。实验项目的选取力求做到验证性实验强调基本技能的训练，设计性实验利用计算机仿真软件及虚拟仪器等手段对电路进行仿真设计、运行和分析，帮助学生发现问题、分析问题、解决问题，使学生更好地掌握基础实验知识、基本实验技能，为独立完成综合性、设计性实验打下扎实的基础。

全书共分 5 章，第 2、5 章由蒋彦编写，严雪萍负责全书的修改和定稿，并编写第 1、3、4 章。

本书得到了全力教授、尤德同高级实验师和高平高级实验师的关心和支持，成立教授在百忙中审阅了书稿，并提出了许多中肯的修改建议，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者学术水平有限，书中难免有不妥之处，敬请批评指正。

编 者

2007 年 11 月于江苏大学

# 目 录

<b>第1章 模拟电子技术实验的基础知识</b> .....	1
1.1 模拟电子技术实验的目的和意义 .....	1
1.2 模拟电子技术基础实验的一般要求 .....	1
1.3 测量误差的基本知识及测量结果的处理 .....	2
1.4 测量的基本方法 .....	7
1.5 电子电路故障检查的一般方法 .....	19
<b>第2章 模拟电子技术实验常用仪表的应用</b> .....	23
2.1 UT803 真有效值台式数字万用表 .....	23
2.2 YB43020D 示波器 .....	30
2.3 YB-1631 型功率函数信号发生器 .....	38
2.4 QT2 型晶体管特性图示仪 .....	40
<b>第3章 常用电子元件参数特性及识别</b> .....	42
3.1 电阻器的分类与识别 .....	42
3.2 电容器的分类与识别 .....	47
3.3 电感器的分类与识别 .....	53
3.4 半导体器件的分类与识别 .....	55
3.5 集成电路的分类与识别 .....	67
<b>第4章 模拟电子技术基本实验</b> .....	70
4.1 二极管和三极管的测试 .....	70
4.2 晶体管单级放大电路 .....	72
4.3 晶体管多级放大电路 .....	77
4.4 场效应管放大电路 .....	79
* 4.5 差动放大电路 .....	83
4.6 多级放大负反馈电路和射极跟随电路 .....	87
4.7 集成运算放大器的应用 .....	91
4.8 RC 桥式正弦波振荡器 .....	94
4.9 LC 振荡电路 .....	97
* 4.10 功率放大电路 .....	100
4.11 串联型晶体管稳压电源 .....	103

4.12	集成稳压电路 .....	107
<b>第5章 Multisim 10.0 的简介与应用 .....</b>		
5.1	Multisim 10.0 及其界面 .....	112
5.2	Multisim 10.0 中的元件与操作 .....	116
5.3	虚拟仪表的使用 .....	126
5.4	Multisim 10.0 仿真实例 .....	145
5.5	模拟电路仿真实验 .....	150
<b>参考文献 .....</b>		
		161

# 第 1 章 模拟电子技术实验的基础知识

## 1.1 模拟电子技术实验的目的和意义

在电子技术飞速发展、广泛应用的今天，实验显得更加重要。在实际工作中，电子技术人员需要分析器件、电路的工作原理；验证器件、电路的功能；对电路进行调试、分析，排除电路故障；测试器件、电路的性能指标；设计、制作各种实用电路的样机。所有这些都离不开实验。此外，实验还有一个重要作用，就是培养勤奋、进取、严肃认真、理论联系实际的作风和为科学事业奋斗到底的精神。对于模拟电子技术基础这样一门具有工程特点且实践性很强的课程，加强工程人员工程训练，特别是技能的培养，对于培养工程人员的素质和能力具有十分重要的作用。

模拟电子技术实验按性质可分为验证性实验、综合性实验和设计性实验三大类。

验证性实验主要用于模拟电子技术基础学科范围内的理论知识的验证和实验技能的培养，侧重于奠定基础。这类实验除了可以巩固、加深某些重要的基础理论外，还可以帮助学习者认识现象，掌握基本实验知识、基本实验方法和基本实验技能。

综合性实验属于应用性实验，实验内容侧重于对某些理论知识的综合应用，其目的是培养综合运用所学理论的能力和解决较复杂的实际问题的能力。

设计性实验对于学习者来说既有综合性又有探索性，它主要侧重于某些理论知识的灵活运用，例如，完成特定功能电子电路的设计、安装和调试等。要求学生在教师指导下独立进行查阅资料、设计方案与组织实验等工作，并写出报告。这类实验对于提高学习者的素质和科学实验能力非常有益。

自 20 世纪 90 年代以来，电子技术的发展呈现出系统集成化、设计自动化、用户专用化和测试智能化的态势，为了培养 21 世纪和适应电子信息时代要求的电子技术人才，除了完成常规的硬件实验外，在模拟电子技术实验教学中引入电子电路计算机辅助分析与设计的内容（其中包括若干仿真实验和通过计算机来完成设计的小系统）是必须的，也是很有益的。

总之，模拟电子技术实验应当突出基本技能、设计性综合应用、创新和计算机应用能力的培养，以适应培养 21 世纪人才的要求。

## 1.2 模拟电子技术基础实验的一般要求

尽管模拟电子技术各个实验的目的和内容不同，但为了充分发挥学生的主动能动性，促使其独立思考、独立完成实验并有所创造，对模拟电子技术实验的准备阶段、进行阶段、完成阶段和实验报告分别提出下列基本要求。

### 1.2.1 实验前准备

为避免盲目性,所以参加实验者必须对实验内容进行预习,要明确实验目的要求,掌握相关电路的基本原理(设计性实验则要完成设计任务),拟出实验方法和步骤,设计实验表格,对思考题做出解答,初步估算(或分析)实验结果(包括参数和波形),最后做出预习报告。

### 1.2.2 实验操作

- ① 参加实验者要自觉遵守实验室规则。
- ② 根据实验内容合理布置实验现场。仪器设备和实验装置安放要适当。按实验方案搭接实验电路和测试电路。
- ③ 要认真记录实验条件和所得数据、波形(并进行分析判断所得数据、波形是否正确)。发生故障应独立思考,耐心排除,并记下排除故障过程和方法。
- ④ 发生事故后应立即切断电源,并报告指导教师和实验室有关人员,等候处理。做实验者的共同愿望是做好实验,保证实验质量。这里所谓做好实验,并不是要求在实验过程中不发生问题,一次成功。实验过程不顺利,不一定是坏事,通常可以通过分析故障增强独立实验能力。相反,“一帆风顺”也不一定有收获。所以,做好实验的意思是独立解决实验中所遇到的问题,把实验做成功。

### 1.2.3 实验完成

实验完成后,经实验室相关人员同意后才能拆除线路,清理现场。

### 1.2.4 实验报告

作为一个工程技术人员必须具有撰写实验报告这种技术文件的能力。

#### (1) 实验报告的内容

- ① 列出实验条件。包括何日何时与何人共同完成什么实验,当时的环境条件、使用仪器名称及编号等。
  - ② 认真整理和处理测试的数据或用坐标纸描绘的波形,并列出表格或用坐标纸画出曲线。
  - ③ 对测试结果进行理论分析,做出简明扼要结论。找出产生误差的原因,提出减少实验误差的措施。
  - ④ 记录产生故障情况,说明排除故障的过程和方法。
  - ⑤ 对本次实验的心得体会。
- (2) 实验报告要求 文理通顺,书写简洁;符号标准,图表齐全;讨论深入,结论简明。

## 1.3 测量误差的基本知识及测量结果的处理

### 1.3.1 测量误差的基本知识

- (1) 测量误差的来源 测量误差的来源主要有以下五方面。



① 仪器误差。此误差是由于仪器的电气或机械性能不完善所产生的误差，如校准误差、刻度误差等。

② 使用误差。使用误差又称操作误差，它是指在使用仪器过程中，因安装、调节、布置、使用不当引起的误差。

③ 人身误差。人身误差是由于人的感觉器官和运动器官的限制所造成的误差。

④ 影响误差。影响误差又称环境误差。它是指由于受到温度、湿度、大气压、电磁场、机械振动、声音、光照、放射性等影响所造成的附加误差。

⑤ 方法误差。方法误差又称理论误差，它是指由于使用的测量方法不完善、理论依据不严密、对某些经典测量方法作了不适当的修改所产生的，即凡是在测量结果的表达式中没有得到反映，但又影响测量结果的因素引起的误差，例如，用伏安法测电阻时，若直接以电压表示值与电流表示值之比作测量结果，而不计电表本身内阻的影响，就会引起误差；又如，测量并联谐振的谐振频率时，常用近似公式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

若考虑  $L$ 、 $C$  的实际串联损耗电阻  $r_L$ 、 $r_C$ ，实际的谐振频率应为

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{1-r_L^2(C/L)}{1-r_C^2(C/L)}}$$

则有

$$\Delta f = f'_0 - f_0$$

上述用近似公式带来的误差称为方法误差。

(2) 测量误差的分类 按误差性质和特点可分为系统误差、随机误差和疏失误差三大类。

① 系统误差。是指在相同条件（人员、仪器及环境）下重复测量同一量时，大小和符号保持不变，或按照一定的规律变化的误差。系统误差一般可通过实验或分析方法，查明其变化规律及产生原因，因此这种误差是可以预测的，也是可以减少或消除的（例如，仪器的零点没有调整好，可以采取消除措施）。

② 随机误差（偶然误差）。在相同条件下多次重复测量同一量时，误差大小正负，即大小和符号无规律变化的误差称为随机误差。随机误差不能用实验方法消除，但在多次重复测量时，其总体服从统计律，从随机误差的统计规律中可了解它的分布特性，并能对其大小及测量结果的可靠性做出估计，或通过多次重复测量，然后取其算术平均值来达到减小它的目的。

③ 疏失误差（粗差）。这是一种过失误差。这种误差是由于测量者对仪器不了解或使用粗心，导致操作不正确而引起的；测量条件的突然变化也会引起粗差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值，必须根据统计检验方法的某些准则去判断哪个测量值是坏值，然后将其去除。

(3) 测量误差表示法 常见的误差表示方法有绝对误差和相对误差。

① 绝对误差。设被测量的真值为  $A_0$ ，测量仪器的示值为  $X$ ，则绝对误差为

$$\Delta X = X - A_0$$

在某一时间及空间条件下，被测量的真值虽然是客观存在的，但一般无法测得，只能

尽量逼近,故常用高一级标准仪器测量的示值  $A$  代替真值  $A_0$ ,则

$$\Delta X = X - A$$

在测量前,测量仪器应由高一级标准仪器进行校正,校正量常用修正值  $C$  表示。对于被测量,高一级标准仪器的示值减去测量仪器的示值得到的值就是修正值。实际上,修正值就是绝对误差,只是二者符号相反,即

$$C = -\Delta X = A - X$$

利用修正值便可得被测量的真值

$$A = X + C$$

例如,用电压表测量电压时,电压表的示值为  $1.1\text{V}$ ,通过检定得出其修正值为  $-0.01\text{V}$ 。则被测电压的真值为

$$A_0 = 1.1 + (-0.01) = 1.09 (\text{V})$$

修正值给出的形式可以是曲线、公式或数表。对于自动测量仪器,修正值则预先编制成有关程序,存于仪器中,测量时对误差进行自动修正,所得结果便是真值。

② 相对误差。绝对误差值的大小往往不能确切地反映测量结果的准确程度,例如,测  $100\text{V}$  电压时,  $\Delta X_1 = +2\text{V}$ ,在测  $10\text{V}$  电压时,  $\Delta X_2 = +0.5\text{V}$ ,虽然  $\Delta X_1 > \Delta X_2$ ,可实际  $\Delta X_1$  只占被测量的  $2\%$ ,而  $\Delta X_2$  却占被测量的  $5\%$ 。显然,后者对测量结果的相对影响大。因此,工程上常采用相对误差来比较测量结果的准确程度。

相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差和引用(或满度)相对误差。

实际相对误差是用绝对误差  $\Delta X$  与被测量的实际值  $A$  的比值的百分数来表示的相对误差,记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A} \times 100\%$$

示值相对误差是用绝对误差  $\Delta X$  与仪器给出值  $X$  的百分数来表示的相对误差,即

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$$

引用(或满度)相对误差,简称满度误差。它是用绝对误差  $\Delta X$  与仪器的满刻度值  $X_m$  之比的百分数来表示的相对误差,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$$

电工仪表的准确度等级就是由  $\gamma_m$  决定的。如  $1.5$  级的电表,  $\gamma_m < 1.5\%$ 。我国电工仪表按  $\gamma_m$  值共分七级:  $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.5$  和  $5.0$ 。若某仪表的等级为  $S$ ,它的满刻度值为  $X_m$ ,则测量的绝对误差为

$$\Delta X \leq X_m S\%$$

其示值相对误差为

$$\gamma_X \leq \frac{X_m}{X} S\%$$

在上式中,总是满足  $X \leq X_m$  的,可见当仪表等级  $S$  选定后,  $X$  越接近  $X_m$  时,  $\gamma_X$  的上限值越小,测量越准确。因此,当使用这类仪表进行测量时,一般测量的值尽可能在仪表满刻度值的  $\frac{1}{2}$  以上。

例如,测量一个10V、50Hz的电压,现用1.5级表,可选用的量程有15V和150V。用150V量程时,测量产生的绝对误差为

$$\Delta X = X_m S\% = 150 \times (\pm 1.5\%) = \pm 2.25 \text{ (V)}$$

而用量程为15V时,测量产生的绝对误差为

$$\Delta X = X_m S\% = 15 \times (\pm 1.5\%) = \pm 0.225 \text{ (V)}$$

显然,用15V量程测量10V电压,绝对误差比较小。

### 1.3.2 测量结果的处理

测量结果通常用数据或曲线表示,下面分别进行讨论。

#### (1) 测量结果的数据处理

① 有效数字。由于存在误差,所以测量数据总是近似值,它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成,例如,由电流表测得电流为12.6mA,这是个近似数,12是可靠数字,而末位的6为欠准数字,即12.6为三位有效数字。

对有效数字的正确表示,应注意以下三点。

a. 有效数字是指从左边第一个非零的数字开始,直到右边最后一个数字为止的所有数字,例如,测得的频率为0.0246MHz,它是由2、4、6三个有效数字组成的频率值,而左边的两个0不是有效数字,因而它可以通过单位变换写成24.6kHz,这时有有效数字仍为3位,6是欠准数字未变。但不能将0.0246MHz写成24600Hz,因为后者的有效数字变为5位,最右边的0为欠准数字,两者意义完全不同。

b. 如已知误差,则有效数字的位数应与误差的位数相一致,例如,设仪表误差为 $\pm 0.01\text{V}$ ,测得电压为11.3735V,其结果应写作11.37V。

c. 当给出误差有单位时,测量结果的写法应与其一致。

② 数据舍入规则。为使正、负舍入误差出现的机会大致相等,现已广泛采用“小于5舍,大于5入,等于5时取偶数”的舍入规则,即

a. 若保留 $n$ 位有效数字,当第 $n+1$ 位小于第 $n$ 位的0.5个单位时,就舍去。

b. 若保留 $n$ 位有效数字,当第 $n+1$ 位大于第 $n$ 位的0.5个单位时,就在第 $n$ 位数字上加1。

c. 若保留 $n$ 位有效数字,当第 $n+1$ 位恰为第 $n$ 位的0.5个单位时,第 $n$ 位数字为偶数(0, 2, 4, 6, 8, ...)时,应舍去后面的数字(即末位不变);第 $n$ 位数字为奇数(1, 3, 5, 7, 9, ...)时,第 $n$ 位数字应加1(即将末位凑成为偶数)。这样,由于舍入概率相同,当舍入次数足够多时,舍入的误差就会抵消。同时,这种舍入规则使有效数字的尾数为偶数的机会增多,尾数为偶数能被除尽的机会比奇数多,有利于准确计算。

③ 有效数字的运算规则。当测量结果需要进行中间运算时,有效数字的取舍原则上取决于参与运算的各数中精度最差的那一项。一般应遵循以下规则。

a. 当几个近似值进行加、减运算时,在各数(采用同一计量单位)中,以小数点后位数最少的那一个数(如无小数点,则为有效位数最少者)为准,其余各数均舍入至比该数多一位,而计算结果所保留的小数点后的位数应与各数中小数点后位数最少

者相同。

b. 进行乘除运算时, 以有效数字位数最少的那一个数为准, 其余各数及积 (或商) 均舍入至比该数多一位, 而与小数点位置无关。

c. 将数平方或开方后, 结果可比原数多保留一位。

d. 用对数进行运算时,  $n$  位有效数字的数应该用  $n$  位对数表。

e. 若计算式中出现如  $e$ 、 $\pi$ 、 $\sqrt{3}$  等常数时, 可根据具体情况来决定它们应取的位数。

(2) 曲线测量结果的处理 在分析两个 (或多个) 物理量之间的关系时, 用曲线比用数字、公式表示更形象和直观。因此, 测量结果常用曲线来表示。

在实际测量过程中, 由于各种误差的影响, 测量数据将出现离散现象, 如将测量点直接连接起来, 将不是一条光滑的曲线, 而是呈波动状的折线, 如图 1-1 所示。但运用相关的误差理论, 可以把各种随机因素引起的曲线波动抹平, 使其成为一条光滑均匀的曲线, 这个过程称为曲线的修匀。

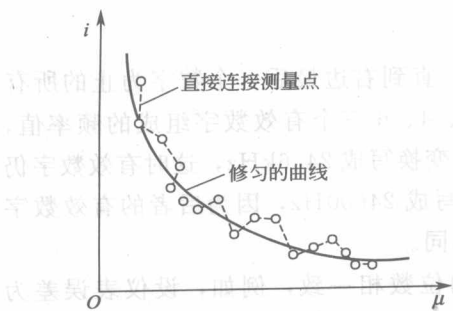


图 1-1 直接连接测量点时波动现象

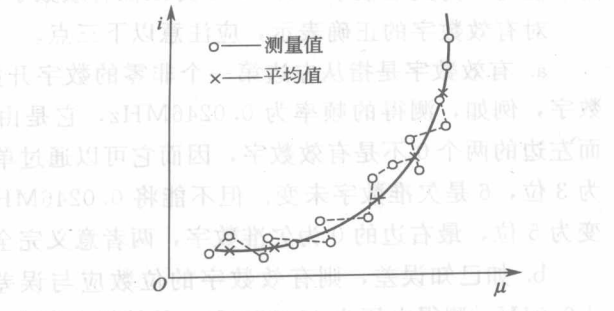


图 1-2 分组平均法修匀曲线

在要求不太高的测量中, 常采用一种简便、可行的工程方法, 即分组平均法来修匀曲线。这种方法是将各数据点分成若干组, 每组 2~4 个数据点, 然后分别估取各组的几何重心, 再将这些重心点连接起来。图 1-2 示出的就是分组平均法修匀曲线。这条曲线, 由于进行了数据平均, 在一定程度上减少了偶然误差的影响, 使之较为符合实际情况。进行测量误差分析与数据处理时应注意以下五点。

- ① 实验前应尽量做到“心中有数”, 以便及时分析测量结果的可靠性。
- ② 在时间允许时, 每个参量应该多测几次, 以便弄清实验过程中引入系统误差的因素, 尽可能提高测量的准确性。
- ③ 应注意测量仪器、元器件的误差范围对测量的影响。通常所读得的示值与测量值之间的关系为

$$\text{测量值} = \text{示值} + \text{误差}$$

因此测量前对测量仪器的误差及鉴定、校准和维护情况要了解, 在记录测量值时要注明有关误差, 以决定测量值的有效位数。

- ④ 正确估计方法误差的影响。实验中采用的理论公式常常是近似公式, 这将带来方法误差, 其次计算公式中元件参量一般都用标称值 (而不是真值), 这将带来随机的系统误差, 因此应考虑理论计算的误差范围。

⑤ 应注意剔除粗差。测量仪器没有校准、没有调零、对弱信号引线过长或没有屏蔽等都会带来测量误差,如做放大器实验时,放大器的输入信号  $U_i$  通常是由信号发生器供给的,如果把在信号发生器输出端开路时测出的信号作为放大器的输入信号  $U_i$  值,则由于信号发生器有内阻,同时放大器的输入电阻又不为  $\infty$ ,故两者连接后,信号发生器实际供给放大器的输入信号将小于上述测出的  $U_i$  值,这样在测量放大器的  $A_U$ 、 $R_i$  等动态指标时将出现误差。

## 1.4 测量的基本方法

### 1.4.1 概述

一个物理量的测量可以通过不同的方法来实现,而电子测量技术是一门发展十分迅速的学科,它涉及电量及各种非电量的测量,这里只简要介绍基本电量测量技术中的共性问题。测量方法的分类如下。

#### ① 直接测量与间接测量

a. 直接测量。顾名思义,这是一种可以直接得到被测量值的测量方法,例如,用电压表测量稳压电源工作电压等。

b. 间接测量。与直接测量不同,间接测量是利用直接测量的量与被测量之间已知的函数关系得到被测量值的测量方法,例如,测量放大器的电压放大倍数  $A_U$ ,一般是分别测量输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_i$  后,再由  $A_U = U_o / U_i$  算出  $A_U$  的值。这种方法常用于被测量不便于直接测量,或者间接测量的结果比直接测量更为准确的场合。

c. 组合测量。这是一种兼用直接测量和间接测量的方法,将被测量和另外几个量组成联立方程组,最后通过求解联立方程组来得出被测量的大小。这种方法用计算机求解比较方便。

#### ② 直读测量法与比较测量法

a. 直读测量法。是直接从仪器仪表的刻度线(或显示屏)上读出测量结果的方法,例如,用电流表测量电流就是直读法,它具有简单方便等优点。

b. 比较测量法。这是一种在测量过程中,将被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法。电桥利用标准电阻(电容、电感)对被测量进行测量就是一个典型例子。应当指出,直读法与直接测量、比较法与间接测量并不相同,二者互有交叉,例如,用电桥测电阻,是比较法,属于直接测量;用电压、电流表法测量功率,是直读法,但属于间接测量等。

③ 按被测量性质分类。虽然被测量的种类很多,但根据其特点,对它们的测量方法大致可分为以下四类。

a. 频域测量。频域测量技术又称为正弦测量技术。测量参数多表现为频域的函数,而与时间因素无关。测量时,电路处于稳定工作状态,因此又叫稳定测量。

这种测量技术用的信号是正弦信号,线性电路在正弦信号作用下,所有电压和电流量都有相同的频率,仅幅度和相位有差别。利用这个特点,可以实现各种电量的测量,如放



大器增益、相位差、输入阻抗和输出阻抗等。此外，还可以观察非线性失真。其缺点是不宜用于研究电路的瞬态特性。

b. 时域测量。时域测量技术与频域测量技术不同，它能观察电路的瞬变过程及其特性，如上升时间  $t_r$ 、平顶降落  $\delta$ 、重复周期  $T$  和脉宽  $t_P$  等。时域测量技术采用的主要仪器是脉冲信号发生器和示波器。

c. 数据域测量。这是用逻辑分析仪对数字量进行测量的方法。它具有多个输入通道，可以同时观测许多单次并行的数据，例如，在对微处理器地址线、数据线上的信号进行数据域测量时，可以显示时序波形，也可以用“1”、“0”显示其逻辑状态。

d. 噪声测量。噪声测量属于随机测量。在电子电路中，噪声与信号是相对存在的，不与信号大小相联系来讲噪声大小是无意义的。因此工程技术中，常用噪声系数  $F_N$  来表示电路噪声的大小。”

$$F_N = \frac{\text{输入信噪比}}{\text{输出信噪比}} = \frac{P_{iS}/P_{iN}}{P_{oS}/P_{oN}} = \frac{1}{A_P} \frac{P_{oN}}{P_{iN}}$$

式中， $P_{iS}$ 、 $P_{iN}$  表示电路输入端的信号功率与噪声功率； $P_{oS}$ 、 $P_{oN}$  表示电路输出端的信号功率与噪声功率； $A_P$  ( $A_P = P_{oS}/P_{iS}$ ) 表示电路对信号的功率增益。

若  $F_N = 1$ ，则说明该电路本身没有产生噪声。一般放大电路的噪声系数都大于 1。放大电路产生的噪声越小， $F_N$  就越小，放大微弱信号的能力就越强。

测量方法还可以根据测量的方式分为自动测量和非自动测量；原位测量和远距离测量等。此外，在电子测量中，还经常用到各种变换技术，例如，变频、分频、检波（如测交流电压有效值的原理就是首先利用各种检波器将交流量变成直流量，然后再测量）、斩波、A/D 变换和 D/A 变换等，有关这些方面的问题不详细讨论。

#### 1.4.2 选择测量方法的原则

在选择测量方法时，应首先研究被测量本身的特性及所需要的精确程度、环境条件及所具有的测量设备等因素，综合考虑后，再确定采用哪种测量方法和选择哪些测量设备。

使用正确的测量方法，可以得到好的结果，否则，不仅测量结果不可信，而且有可能损坏测量仪器、仪表和被测设备或元器件。下面举例加以说明。

**【例 1-1】** 用万用表的  $R \times 1$  挡测试半导体三极管的发射结电阻或用图示仪显示输入特性曲线时，由于限流电阻较小，而使基极电流过大，结果可能使三极管在测试过程中被损坏。

**【例 1-2】** 一测量电流的电路如图 1-3 所示，当未串接测量仪表时，回路的实际电流（即真值）为  $I = U/R$ ，串接测量仪表后，由于仪表内阻  $r_i$  的影响，实际的测量值为

$$I' = \frac{U}{R + r_i} = \frac{I}{1 + \frac{r_i}{R}}$$

只有当  $r_i \ll R$  时，测量值  $I'$  才近似接近真值  $I$ ，否则误差很大。

**【例 1-3】** 在实际测量中，常希望测量更精确些，就有一个最佳方案选择问题。设现有条件下，电流、电压和电阻的测量精度分别为

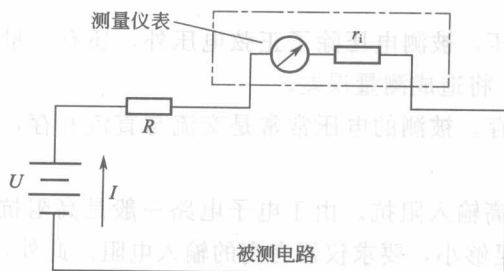


图 1-3 测量电流的电路示意图

$$\frac{\Delta I}{I} = \pm 2.5\%$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \pm 2\%$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \pm 1.0\%$$

可用下述三种方案进行功率的间接测量

$$\textcircled{1} P = IU$$

$$\textcircled{2} P = U^2/R$$

$$\textcircled{3} P = I^2 R$$

试选择一种具有测量误差最小的最佳测量方案。

解：根据现有条件，采用不同方案进行测量，其误差分别为

$$\textcircled{1} \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} = \pm 4.5\%$$

$$\textcircled{2} \frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta R}{R} = \pm 5.0\%$$

$$\textcircled{3} \frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} = \pm 6.0\%$$

可见①方案具有最小合成误差，为最佳选择方案。为了获得准确的测量结果，正确的选择测量方法、仪器设备以及拟订测试方案是十分重要的。

### 1.4.3 电压测量

在电子测量领域中，电压是基本参数之一。许多电参数，如增益、频率特性、电流、功率、调幅度等都可视为电压的派生量。各种电路工作状态，如饱和、截止等，通常都以电压的形式反映出来。不少测量仪器也都用电压来表示。因此，电压的测量是许多电参数测量的基础。电压的测量对调试电子电路来说是必不可少的。

电子电路中电压测量的特点如下。

① 频率范围宽。电子电路中电压的频率可以在直流到数百兆赫兹范围内变化，因此对于低频或高频范围的电压测量，一般万用表是不能胜任的。

② 电压范围广。电子电路中，电压范围为微伏级到千伏以上，对于不同的电压挡级，必须采用不同的电压表进行测量，例如，用数字电压表，可测出  $10^{-9}$  V 数量级的

电压。

③ 存在非正弦量电压。被测电压除了正弦电压外，还有大量的非正弦电压，如用普通仪表测量非正弦电压，将造成测量误差。

④ 交、直流电压并存。被测的电压常常是交流与直流并存，甚至还夹杂有噪声干扰等成分。

⑤ 要求测量仪器有高输入阻抗。由于电子电路一般是高阻抗电路，为了使测量仪器对被测电路的影响减至足够小，要求仪器有高的输入电阻。此外，在测量电压时，还应考虑输入电容的影响。

如果发生上述情况，而测量精度要求不高，用示波器就可以解决。如果测量精度要求较高，则要全面考虑，选择合适的测量方法，合理选择测量仪器。

(1) 直流电压的测量 对于直流电压，可以用模拟式指针万用表、数字万用表以及示波器等能够对直流信号产生响应的仪器来测量。模拟式指针万用表的直流电压挡可以直接测量直流电压，如果要求的测量准确度较高，可以使用数字万用表。测量时尽可能使万用表的电压量程与被测电压接近，以减少测量误差。用示波器的“AC”耦合方式也可以测量直流电压。将示波器耦合方式“DC-GND-AC”置于“GND”，在屏幕上选定一刻度线作为0电压线，移动时基线，使其与0电压线重合，然后将耦合方式开关至于“DC”，输入被测电压，记下时基线偏离0电压线的格数（1格为1DIV）。基线位于0电压线上方时测出的电压为正，位于下方时测出的电压为负。按下式计算直流电压值。

$$\text{直流电压值} = A \times \text{时基线偏离0电压线的格数}$$

式中， $A$  为示波器的偏转灵敏度选择开关示值。

电子电路中的直流电压一般分为两大类：一类是直流电源电压，它具有一定的直流电动势  $E$  和等效内阻  $R_0$ ，如图 1-4(a) 所示；另一类是直流电路中某元器件两端之间的电压差或各点对地的电位，如图 1-4(b) 所示，图中的  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  可以是任意元器件的直流等效电阻， $U_1$ 、 $U_2$  为元器件两端的电压。

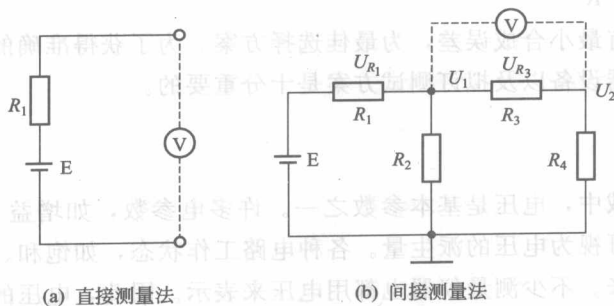


图 1-4 两种直流电压

① 直接测量法。将电压表直接并联在被测支路的两端进行测量，如图 1-4(a) 所示。如果用模拟式指针电压表测量，特别要考虑电表输入阻抗、量程和准确度等级等因素，因为电压表的内阻不可能为无穷大，所以直接测量会影响被测电路，造成测量误差。同时应尽量使被测电压的指示值在仪表满刻度量程的三分之二以上，这样可以

减少测量误差。

若用数字式电压表进行测量,由于一般数字式万用表的直流电压挡的输入阻抗都较高,可达 $10\text{M}\Omega$ 以上,可以将其视为无穷大,把它并联在被测支路两端,对被测支路的影响较小。

② 间接测量法。如图 1-4(b) 所示,若要测量 $R_3$ 两端的电压值,可以先分别测出 $R_3$ 两端对地的电位 $U_1$ 和 $U_2$ ,然后通过公式 $U_{R_3}=U_1-U_2$ 求出要测量的电压值。

(2) 交流电压的测量 放大器的输入输出信号一般都是交流信号,放大器的一些动态指标,如电压增益、输入电阻、输出电阻等也都经常用输入正弦交流信号的方法进行间接测量。因此,正弦测试方法是电子电路测量中贯穿始终的基本方法,其常用的测量方法有交流电压表法和示波器法。

① 交流电压表法。能测量交流电压信号大小的仪器统称为交流电压表。交流电压表分为模拟式和数字式两类,不论是模拟式还是数字式交流电压表,测量交流电压时,都要先将交流电压经过检波器转换成直流电压后再进行测量。

模拟式电压表的表盘刻度都是按正弦波的有效值刻度的,所以用它来测量正弦交流信号的电压时,直接从表盘刻度读出来的就是电压有效值。

② 示波器测量法。用示波器法测量交流电压比交流电压表法测量具有更明显的优点,即测量速度快、测量范围广。

a. 测量速度快。由于被测电压的波形可以立即显示在屏幕上,这样就不会出现模拟式电压表表头的惰性现象。模拟式电压表由于惰性,只能测出周期信号的有效电压值(或峰值电压),而不能反映被测信号幅度的快速变化。示波器不但能测量周期信号的峰值电压、观测信号的幅度变化情况,还能测量被测信号的瞬时电压和电压波形上任意两点间的电压差。

b. 测量范围广。电压表一般对于失真小的正弦信号能够测量;而示波器可以测量失真较大的正弦信号、判断波形的性质,还能方便地测出振荡电路、信号发生器以及其他电子设备输出的交流电压、交流信号,包括正弦波、三角波、方波、脉冲波、调制波等。模拟式电压表一般不能同时测量出被测电压的直流分量和交流分量,示波器能清楚方便地实现这样的测量。

#### 1.4.4 阻抗测量

阻抗是描述一切电路系统的传输及变化特征的重要参数。测量条件不一样,阻抗测量值也不一样。

在直流情况下 
$$R = \frac{E}{I}$$

在交流情况下 
$$Z = \frac{\dot{E}}{\dot{I}} = R + jX$$

输入电阻和输出电阻的测量,一般都采用间接测量方法,即所谓的“两次电压法”。下面简单介绍模拟线性电路在低频条件下,有源二端口网络输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ 的测量方法。