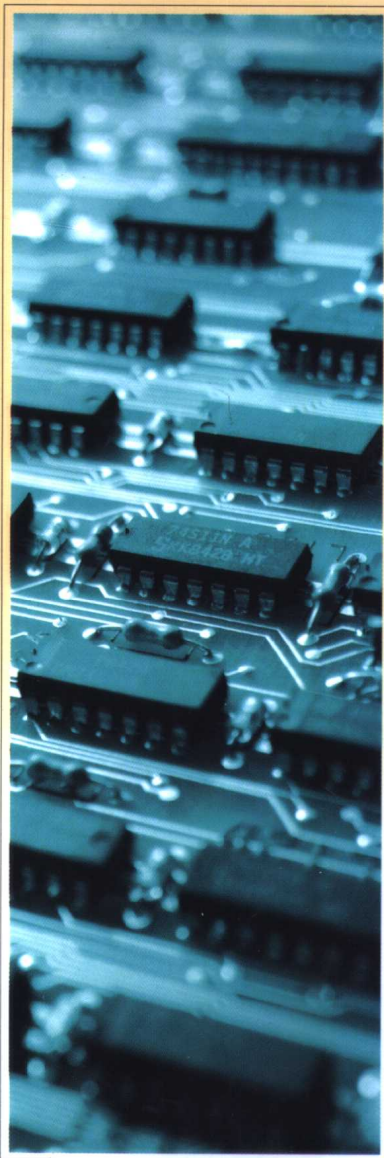


电子技术实验系列

电子技术实验基础

陈先荣 主编



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

电子技术实验系列

电子技术实验基础

陈先荣 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书为《电子技术实验系列》课程教材之一,系统介绍了电子技术实验基础知识和基本电子测量技术。全书共分三篇,分别为基础篇、基本实验及应用篇和计算机仿真篇。内容包括电子测量的基本理论和实验方法、电子元器件及常用电子测量仪器的原理使用、基本电子技术实验项目及课程设计型实验的基础知识、电路的计算机仿真及应用等。该书内容丰富、资料翔实、新颖实用,可以满足不同专业、不同学时教学的需要。

本书可作为高等院校电子类各专业的实验教材,也可供高等院校其他专业师生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术实验基础 / 陈先荣主编. —北京:国防工业出版社, 2004. 7

(电子技术实验系列)

ISBN 7-118-03517-3

I. 电... II. 陈... III. 电子技术—实验—高等学校—教材 IV. TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 053635 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 414 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

面对 21 世纪人才培养的需求,根据电子类学科发展的规律,我们对电子技术实验课程进行了系统改革。结合当前高校电子技术实验教学的具体情况,将原隶属于各门技术基础课程的电子技术实验独立设课,把电子技术实验课程按照实验能力培养的基本规律和学科发展的需要分成三段进行,实行三级考核,即第一级《电子技术实验基础》;第二级《集成电路应用实验》;第三级《现代电子技术综合实验及测试技术》。

《电子技术实验基础》为本系列教材的第一册,适用于电子类各专业教学,其指导思想是培养学生掌握基本的电子测试技术和实验技能。在电子技术飞速发展、广泛应用的今天,实验显得尤其重要。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等,所有这些都离不开实验。同时,通过实验还能培养学生勤奋、进取、孜孜追求的精神和严肃认真、严谨科学的工作作风。

全书分为三篇,共有三个板块的内容,系统介绍了电子电路测量的基本原理、实验方法;交、直流测试技术及典型放大电路的测试;电路课程设计型实验基本技术;现代电子电路虚拟实验技术等。

第一板块为第一篇“基础篇”,包括四个方面的内容。这个板块注重学生对电子电路的最基本应用知识的培养和训练,循序渐进、深入浅出地阐述测量的误差分析、数据处理;基本测量原理、实验测试技术;电路元器件的分类识别、参数测试;常用电子仪器的组成原理、使用方法,使学生从基本概念入手,为电子技术实验做好基础知识的铺垫。

第二板块为第二篇“基本实验及应用”,这部分推出了基本实验项目 11 个,内容如下。

电子技术实验基础部分:常用电子测量仪器的原理组成和基本使用,面板旋钮的功能及操作;三相交流供电系统的认识和实验室用电及配电的基本知识。

示波器测量技术:通用示波器的主要组成框图、基本原理,垂直通道及输入电路(探头)的功能及应用,水平扫描发生器环及触发电路,以及示波器的电压测量、时间测量及相位的测量。

电子元器件参量测试:半导体特性测试仪的原理和正确使用,半导体二极管正、反向特性参数的测试;晶体三极管输入特性及输出特性的测试。

交、直流信号测试技术:基本放大电路、负反馈放大电路静态工作电压的测试;应用正弦测试方法对放大器增益、输入阻抗、输出阻抗及频率响应指标的测试;集成运算放大器的基本运算关系及应用电路,集成功率放大器特性参数的测试。

这一板块还系统介绍了课程设计型实验的设计要求、设计思想和设计方法,使学生在获得基础知识学习和基本技能培养的同时,能够有更多的发挥空间。这里列出了 7 个设计课题和相关参考电路,每个功能电路中都详细介绍了电路原理、设计步骤及调试过程。

学生可根据自身具体情况,理解参考电路,运用所学知识,在老师的指导下自行确定课题,设计符合相关指标要求的电路。这是提高学生实验技能、培养实际动手能力和创新能力非常重要的环节。

第三板块为第三篇“计算机仿真”,主要介绍适合于教学,并兼有计算机辅助分析与设计功能的 Electronic Workbench 5.0 软件的使用方法和 10 个仿真实验内容。计算机的辅助分析和电路实验的仿真在现代电子实验中广泛应用,特别对于电子技术实验基础,学生在进行电路的设计、安装之前,运用虚拟技术对所选电路进行计算机仿真运行和分析,有利于帮助学生分析问题、发现问题、解决问题。使学生将现代教学手段运用到实际实验当中,对掌握电子技术实验基础的内容,为下一级《集成电路应用实验》及《现代电子技术综合实验及测试技术》课程的学习打下坚实的基础。

由于实验内容的模块化,有利于内容的不断更新,也使本课程从讲授到学习更具有系统性和更强的实践性。

电子技术基础是一门具有工程特点和实践性很强的课程,加强工程训练,特别是技能的培养,对于提高工程人员的素质和能力具有十分重要的作用。电子技术实验基础课程的建立,改变了过去附属于理论课程的旧的实验模式,融合了电路分析基础、模拟电子电路、电子测量技术等相关课程的理论,实验项目引入内容先进、综合性强、实验性突出的主动型教学模式,具有系统性、独立性、实用性,为电子技术本门学科范围由理论论证和实际技能的培养奠定基础,使学生更好地掌握基本实验知识、基本实验方法和基本实验技能。

全书由陈先荣担任主编,参加电子技术基础实验内容编写和项目设计的有郭迅、何利、张晓霞、陈骏莲、付炜、李朝海、杨德俊、崔红玲等老师,毛瑞明老师对实验装置的设计和研制做了大量的工作,朱红副教授对该书提出了许多建设性意见,在此谨向他们和其他关心、帮助本书编写工作的同志们表示衷心感谢。本书的编写除了几年来摸索的教学经验,还借鉴和参阅了大量的参考资料,在此一并向这些作者表示诚挚的谢意。

本书承电子科技大学张玉兴、胡翔骏两位教授和钟洪声副教授主审,提出了许多宝贵意见和修改建议,对此表示由衷的感谢。

由于时间仓促,且编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳切希望广大读者给予批评指正。

编 者

2004 年 5 月于成都

目 录

第一篇 基础篇

第一章 电子技术实验基本知识	1
第一节 电子技术实验基础课程要求.....	1
第二节 测量误差的基本知识.....	2
第三节 测量数据的处理.....	6
第四节 电子技术实验系统的基本组成及仪器	10
第五节 实验室安全用电知识	11
第二章 基本测量技术及实验方法	16
第一节 电子测量的基本要求	16
第二节 电子测量的分类	17
第三节 电压测量	18
第四节 阻抗测量	20
第五节 增益及幅频特性测量	22
第六节 相频特性的测量	23
第七节 频率、时间和相位的测量.....	23
第八节 正弦测试技术及放大电路的调测	28
第三章 基本测量仪器及应用	34
第一节 电子示波器	34
第二节 毫伏表的原理与使用	52
第三节 万用表	56
第四节 信号发生器	65
第五节 直流稳压电源	76
第六节 半导体管特性图示仪	79
第七节 功率表	89
第八节 电子测量仪器的正确选择与使用	92
第四章 电路元器件参数特性及识别	94
第一节 电阻器的分类与识别	94
第二节 电容器的分类与识别.....	100
第三节 电感器的分类与识别.....	105
第四节 半导体器件的分类与识别.....	108

第五节 集成电路的分类与识别	119
----------------------	-----

第二篇 基本实验及应用

第五章 电子电路课程设计基础	122
第一节 电子电路的设计方法	122
第二节 总体方案的选择	123
第三节 单元电路的设计	123
第四节 总体电路的绘制	124
第五节 元器件的选择	125
第六节 电路的安装	126
第七节 电路的调试	127
第八节 课程设计总结报告	131
第六章 电路的故障诊断及抗干扰技术	132
第一节 电路故障诊断与处理	132
第二节 噪声产生的原因	134
第三节 电路的抗干扰技术	136
第四节 噪声与接地	140
第五节 放大电路的故障检查与排除	144
第七章 基本电子技术实验	148
实验一 常用电子测量仪器的使用	148
实验二 半导体器件特性的图测方法	152
实验三 直流电压、电流及正弦交流信号的测试	156
实验四 结型场效应管放大器	160
实验五 差动放大器的研究	163
实验六 功率放大器参数测试与设计	168
实验七 负反馈放大器的研究	171
实验八 示波器测量技术	175
实验九 集成运算放大器的放大特性	178
实验十 集成运算放大器的运算应用研究	183
实验十一 集成运放构成波形产生电路的研究	187
第八章 课程设计型实验	195
实验一 交流信号多级放大电路的设计	195
实验二 测量放大器的设计	199
实验三 用集成运放设计万用表	202
实验四 语音放大电路的设计	207
实验五 直流稳压电源的设计	216
实验六 多功能信号发生器的设计	221

实验七 音响放大器的设计	226
--------------------	-----

第三篇 计算机仿真

第九章 电子电路的实验仿真	239
第一节 EWB 简介	239
第二节 EWB 的主要组成	240
第三节 EWB 的基本界面	241
第四节 EWB5.0 的基本操作	243
第五节 二阶电路动态过程仿真实验举例	250
第十章 虚拟电子实验	254
实验一 基尔霍夫电压定律和电流定律	254
实验二 RLC 串联谐振电路的研究	256
实验三 无源滤波器的研究	258
实验四 三相交流电路的测试	260
实验五 晶体管共集电极放大器的研究	263
实验六 电压比较器的研究	265
实验七 有源低通滤波电路的研究	267
实验八 整流电路的研究	270
实验九 集成稳压电源的设计与仿真	273
实验十 简易恒温控制器的设计与仿真	274

第一篇 基础篇

第一章 电子技术实验基本知识

第一节 电子技术实验基础课程要求

为培养良好的学风,充分发挥学生的主观能动作用,促使其独立思考、独立完成课堂内容并有所创造,应该使学生在实验前、实验中和实验后,按照课程的基本要求,根据教师的课堂指导完成相关内容。

一、实验前的准备

电子技术基础的各个实验的目的和内容是不同的,学生在每次实验课前必须进行预习。要明确实验的目的和要求,掌握有关电路的基本原理;拟订实验方案和步骤,弄清相关操作过程及记录参数,准备好实验表格;了解实验设备及所用仪器的技术性能,初步估算、分析实验结果,写出预习报告。

二、实验中的要求

- (1) 认真听课,注意指导教师的讲解及提出的应注意的问题。自觉遵守实验室规则。
- (2) 实验开始前应检查所用仪器设备是否齐全和完好,确定好实验电路所需电源的性质、极性、大小及测试仪表的量程等。
- (3) 根据实验内容合理布置实验现场,按实验方案连接实验电路和测试电路。
- (4) 实验中坚持严肃认真的科学态度,切实按照拟订的步骤进行,认真记录所得数据和相关波形。
- (5) 实验过程中出现故障应该独立思考、分析排除,不能解决时请指导教师指导,并应记下故障现象和排除故障的过程、方法。
- (6) 如果实验中出现事故,应立即切断电源并报告指导教师,等待处理。
- (7) 实验结束时,数据和结果要送交指导教师审阅签字,确认正确无误后方可拆除线路,清理现场,整理好实验台。

三、实验后的作业

实验课后,每个学生必须按要求独立、认真编写实验报告。要求书写清楚、文字简

洁,符号标准、图表工整,讨论深入、结论简明。报告应附原始记录,按时交指导教师审阅。

(1) 实验报告应列出实验名称、目的、原理与方案,合作完成实验人及实验时间,使用仪器的名称和型号。

(2) 根据实验记录整理成数据表格,用坐标纸绘制曲线和波形。

(3) 对测试结果进行理论分析,作出简明扼要结论;计算误差并找出产生误差原因,提出减少实验误差的措施。

(4) 记录产生故障的情况,说明排除故障的过程和方法,总结实验收获。

(5) 完成相关思考题,写出实验的心得体会,以及实验的改进及建议。

第二节 测量误差的基本知识

测量误差是指用测量仪器进行测量时,所得到的指示值与被测量的真值(一般用理论值作为约定真值,简称真值)之间的差异程度。测量误差是测量仪器本身的误差以及辅助设备、测量方法、外界环境、操作技术等误差因素共同作用的结果。

一、系统误差

系统误差是由于仪器本身电气或机械性能的不完善,使用不当或测量方法采用了近似公式以及外界因素(如温度、电场、磁场)等原因而产生的,它主要包括以下两种误差。

1. 基本误差

基本误差是指根据技术条件要求,规定某一类仪器误差不应超过的最大范围。通常技术说明书所指的误差都是基本误差,并不是指一部确定仪器的实际误差。例如,有几台合格的示波器,技术条件规定,扫描范围: $(0.2\mu\text{s} \sim 0.5\text{s})/\text{div}$,按 1,2,5 顺序共分 21 个挡级,当校准后,各挡级误差均 $\leq \pm 5\%$ 。我们只能说这几台示波器的扫描速度的误差不超过 $\pm 5\%$,至于每一台的误差为多少,一般并不知道。

基本误差的表示形式,既可以是绝对误差形式,也可以是各种相对误差形式,或者是两者结合起来表示。例如用 WQ-5 万用电桥测量 $1\text{H} \sim 122.1\text{H}$ 电感量时,其精度为 $\pm 2\%$ (相对误差表示),而测量 $1\mu\text{H} \sim 1000\mu\text{H}$ 电感时,其精度为 $\pm (2\% + 1\mu\text{H})$,是用相对误差与绝对误差结合表示的。

测量值 A_x 和被测量的实际值 A_0 之间的差值叫做绝对误差,用 Δ 表示,即

$$\Delta = A_x - A_0$$

相对误差就是绝对误差与被测量的真值之比,通常用百分数来表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\%$$

在计算时,可用标准表的指示值作为被测量的真值。

电测量指示仪表的准确度(基本误差),按国家标准规定有 7 个等级,如表 1-2-1 所列。各级仪表在规定工作条件下,其基本误差在标度尺工作部分的所有分度线上,不应超过表中规定之值。现举例说明仪表误差等级与测试结果的关系。

表 1-2-1

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差/%	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

例 用 0.5 级、10V 量程的电压表和 0.2 级、100V 量程的电压表测量 8V 电压,问哪一块表测量的准确度高?

解:用 0.5 级、10V 电压表测量,可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K \cdot A_m = \pm 0.5\% \times 10 = \pm 0.05(\text{V})$$

可能出现的最大相对误差

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.05}{8} \times 100\% = \pm 0.625\%$$

用 0.2 级、100V 电压表测量,可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K \cdot A_m = \pm 0.2\% \times 100 = \pm 0.2(\text{V})$$

可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.2}{8} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

从计算结果可以看出,用 0.5 级、10V 量程的电压表测量的准确度高。

由此看出,测量的准确度既取决于仪表的准确度,又取决于仪表的量程。被测量的值越接近满量程,测量准确度就越高。因而在测量时,除正确选择仪表的准确度等级外,还应正确选择仪表的量程。通常被测量值为满量程的 $\frac{2}{3}$ 以上较为合适。

2. 附加误差

附加误差由以下几种原因产生。

(1) 校准误差。通常指仪器出厂时或在使用过程中,用标准仪器对其指定的某些点校准时所产生的误差,它包括了标准仪器的误差和校准点的校准误差。

(2) 刻度误差。为了适应仪器批量生产的特点,一般电子测量仪器都采用统一的刻度盘,由于每一台仪器的特性不完全相同,故在非校准点,就可能引起不同程度的误差。例如校准某台仪器的频率度盘,在一个量程上有两个校准点 α_1 和 α_2 ,其对应的频率分别为 f_1 及 f_2 ,如图 1-2-1 所示。在非校准点 α ,可以根据理论分析或抽测某台仪器而确定相应函数关系(如直线①,于是得其频率为 f_0 。但对另外两台仪器,可能函数关系分别为曲线②及③,即对应的频率分别为 f'_0 及 f''_0 ,于是产生了刻度误差,最常见的是刻度的非线性所致的误差,为了减小此项误差,可给出每台仪器的校准曲线,或必要时对每台仪器分别进行刻度。

(3) 读数分辨力不高所致的误差。仪器的读数分辨力是指仪器能读出被测量的最小变化量,分辨力的高低应与仪器的容许误差相适应。如果仪器读数机构的分辨力不高,则将带来误差。例如一只 0.5 级 10mA 的电流表,其刻度如图 1-2-2(a)所示。

可能读出电表的示值约为 9.47mA, 其中小数点后第二位“7”是估计出来的, 如果把刻度改为图 1-2-2(b) 所示, 则只能读出 9.3mA, 其中小数点后面第一位“3”是靠估计的。显然图 1-2-2(b) 将因读数分辨率太低而使测量误差增大。但是, 不适当地提高仪器读数机构的分辨率也是毫无意义的。因为这时仪器本身的不稳定性将使读数不可信赖。

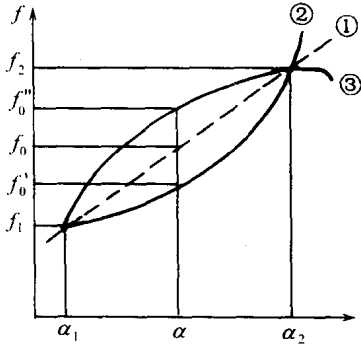


图 1-2-1 刻度误差

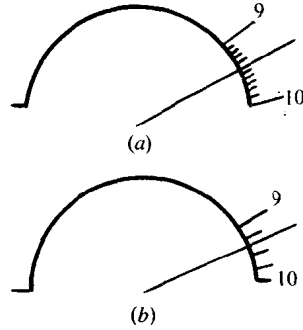


图 1-2-2 读数分辨率引起的误差

(4) 读数调节机构不完善所致的误差。对某些齿轮转动的调节装置, 这项装置特别明显。由于调节机构的不完善, 在顺时针转动和逆时针转动时, 齿轮的齿合不在同一位置, 即所谓回差, 引起误差。

(5) 量化误差。又称 ± 1 误差, 这是数字式仪表的固有误差。用电子计数器计数频率, 实质上是一个量化过程, 量化的最小单位就是数码的一个字。无论是电子计数器进行怎样的测量, 计数脉冲都是通过闸门再进入计数器的。计数的多少除了和被测频率以及闸门启闭的时间有关外, 还和闸门时间的起点和第一个计数脉冲的起点有关, 即和两者的时间关系有关, 如图 1-2-3 所示。在某个门控时间 T 内, 设被测信号有 7.4 个脉冲。但是测量结果的表达是量化的, 其值是用整数计算的。而像 0.4 这样的尾数, 要么被抹去, 要么为整数 1 被计入测量之中, 因此, 同一个被测量, 有两个不同的结果, 它取决于门控信号和第一个计数脉冲起点的随机关系。对于图 1-2-3(a) 的情况, 读数为 8, 它相当于真值 7.4 有 +0.6 个量化单位的误差, 即读数大了 0.6 个量化单位; 对于图 1-2-3(b) 的情况, 读数为 7, 它相当于真值 7.4 有 -0.4 个量化单位的误差, 这种情况不仅可以发生在 7.5 个脉冲的时候, 也可能发生在 7.1, 7.2, 7.3, 7.01, ... 等个脉冲的时候。

一般情况下, 如果门控时间 T 恰好等于 N 个被测信号的周期 NT_x , 那么, 由于量化结果, 应该有 N 个读数。这相当于图 1-2-4(a) 的情况, 这时 $0 < \Delta t < T_x$; 对于图 1-2-4(b), 若 $\Delta t \rightarrow 0$, 那么可以有两种情况, 即极端情况下, 第一个脉冲和第末个脉冲都可能进入计数器, 这时读数为 $(N+1)$ 个; 也可能第一个脉冲和第末个脉冲都同时进不了计数器, 读数就是 $(N-1)$ 。

因此研究量化而引起的读数误差时, 有理由认为 $\Delta N \leq \pm 1$ 。

当计数过程的这个时间关系在每次计数时都相同, 如自校时的情形, ± 1 的误差基本不会发生。而在一般情况下, 计数过程的这个时间关系不确定, 所以产生 ± 1 的误差就是不可克服的固有误差, 称为量化误差。量化误差的特点是: 不管 N 是多少, 它的最大误差

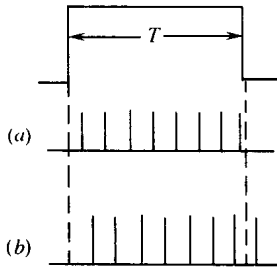


图 1-2-3 量化误差说明之一

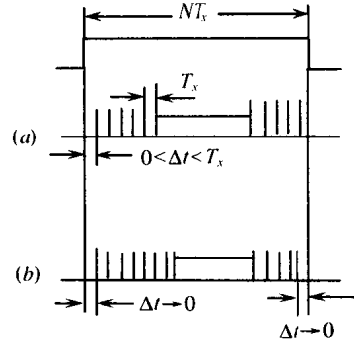


图 1-2-4 量化误差说明之二

都是 ± 1 个量化单位,为了减少量化误差对测量精度的影响,通常是减小量化单位以及增加计数时间。

二、影响误差

影响误差或称环境误差是指由于仪器受到外界温度、湿度、气压、电磁场、机械震动、声音、光照、放射性等的影响所产生的误差。

根据《电子测量仪器环境要求及其试验方法》的规定,所有电子仪器按环境条件分为三组,每组规定有相应的“额定使用范围”。电子测量仪器必须在规定的额定使用范围内工作,才能保证各项技术指标的正确。例如,就温度的使用范围而言,第 I、II、III 组仪器分别规定为 $+10^{\circ}\text{C} \sim +35^{\circ}\text{C}$, $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$, $-40^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 。

三、方法误差

方法误差是由于测量时使用的方法不完善,所依据的理论不严密,对某些理论并未掌握清楚,以及对被测量定义不明确所产生的误差。例如用电流表、电压表测量电阻可采用图 1-2-5(a)或(b)两种测量电路。根据 $R = U/I$ 求得被测电阻值。由于测量结果忽略

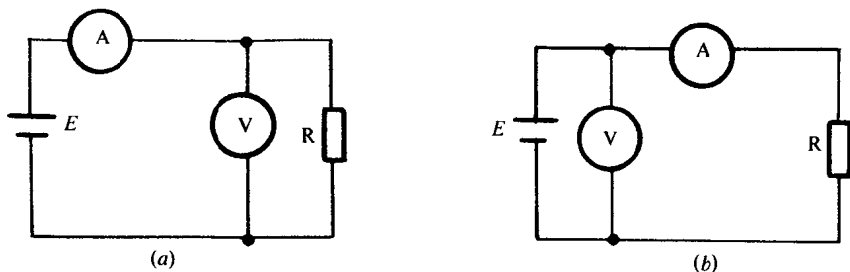


图 1-2-5 电压表、电流表内阻引起误差

了电压表和电流表内阻的分流和分压作用的影响,因而产生了方法误差。又如,利用并联谐振现象测量频率时,常用公式为

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

实际上,如考虑回路中电感 L 及电容 C 之损耗 γ_L 及 γ_C 时,谐振频率应为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{1 - \frac{\gamma_L^{2C}}{L}}{1 - \frac{\gamma_C^{2C}}{C}}}$$

这便产生了方法误差。这种误差也称理论误差。

四、允许误差

在设计无线电电子设备时,需要各种数值的元件,生产厂家不可能精确地满足这种需要。而元件数值又允许存在一定的误差。故为使生产不出废品,以产品在一定误差范围内的规格最少而规定的系列值叫标称值。

如要生产 1kΩ 电阻,制成后的电阻不可能全部都是 1kΩ,而是以 1kΩ 为中心的正态分布曲线,如图 1-2-6 所示。在正常情况下生产的 R、L、C 元件都符合这样的分布。为了便于大量生产,同时也让使用者在一定的允许误差范围内选用这些元件,我们总希望在使用者的允许误差范围内,将阻容元件的规格数减小到最少。利用几何级数可以达到上述要求。几何级数的通项公式为

$$a_n = 10^{\frac{n}{K}} \qquad (1-2-1)$$

式中 K——由误差等级决定的系数;
n——表示项数。

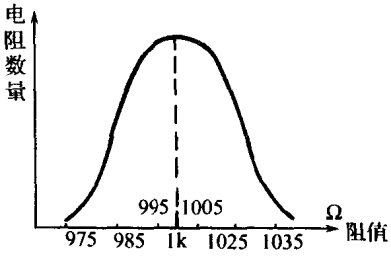


图 1-2-6 正态分布曲线

阻容元件的标称值是将 K 分别选为 6,12,24,48,96,192。按公式(1-2-11)算得值化整后构成的。即 E₆ 系列,E₁₂ 系列,E₂₄ 系列,E₄₈ 系列,E₉₆ 系列,E₁₉₂ 系列。它们分别适用于允许误差为 ±20%, ±10%, ±5%, ±2%, ±1.0%, ±0.5% 的阻容元件。现将常用的 E₆,E₁₂,E₂₄ 的各系列值列于表 1-2-2 中,由表可算出相邻标称值之间的误差极限是衔接或叠接的,即做到生产无废品。

表 1-2-2

十进标称值系列	误 差	标 称 值
E ₂₄	±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
E ₁₂	±10%	1.0,1.2,1.5,1.8,2.2,2.7,3.3,3.9 4.7,6.8,8.2
E ₆	±20%	1.0,1.5,2.2,3.3,4.7,6.8

第三节 测量数据的处理

一、测量结果的记录和运算

任何测量总存在误差。所以一个完整的测量结果记录应包括测量数据和误差两部分,这样才能从测量结果的记录中得知数据的可靠性。

1. 测量数据的记录

测量数据的记录方法应是:所记录的数据中,除末位数位是估计数字外,其他各位数字都应是确定的数。这样一个数既反映了被测量的大小,又与测量误差出现的位数一致。所以作为一个测量数据。即使“零”出现在末尾也不能不写。如 3.70 为三位有效字的测量数据,末位的零写上,意味着这个零是估计数字,而其前面的 7 是确定无疑的数字,若将“零”舍去不写,则该数变为 3.7,意味着这个数中的数字“7”是估计数。

2. 测量数据的运算

根据上述道理,对几个数据进行运算时,运算结果只能保留参加运算的所有测试数据中小数点后面位数最少的一位。例如:

$$3.1 \times 5.72 \times 0.384 = 6.809$$

运算结果应记为 6.8。它与参加运算的 3.1 在小数点后面的位数一样多。

3. 测量结果的图解分析

所谓图解分析,就是研究如何根据实验结果作出一条尽可能反映真实情况的曲线(包括直线),并对该曲线进行定量分析。一个测量结果,除了用数的大小表示外,还经常用各种曲线来表示。如频率变化时,放大器输出电压随频率变化而变化的情况,可用频率特性曲线表示。图解分析两个(或几个)物理量之间的关系时,比用数字、公式表示更形象,更直观。

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,即将测量点直接连接起来不是一条光滑的曲线,而是表现出波动或折线状,如图 1-3-1 所示。这时将所有测量点直接相连是欠妥的。图解分析的重要内容就是对一组离散的测量数据,运用有关的误差理论来求得一条最佳曲线,这个过程就是把各种随机因素引起的曲线波动性抹平,并修整为一条光滑均匀的曲线,故称为曲线的修匀。由于直线可视为曲线的特殊情况,所以曲线的修匀包括一般曲线和直线两种情况。

在精密测量等要求较高的场合,利用最小二乘法原理修匀曲线,计算工作十分繁重。

在要求不太高的测量工作中,采用一种简便、可行的工程方法——分组平均法来修匀曲线或直线。

这种方法是把横坐标分成若干组,例如 m 组。每组包括 2 个~4 个数据点。然后分别求出各组数据点几何重心的坐标 $(\bar{x}_1, \bar{y}_1), (\bar{x}_2, \bar{y}_2), \dots, (\bar{x}_m, \bar{y}_m)$ 。由于进行了数据平均,故在一定程度上削平了测量过程中随机误差的影响,各几何质心点的离散性显著减小,从而使作图较为方便和准确。图 1-3-2 就是每组取 2 个~4 个数据点进行平均的修匀曲线。

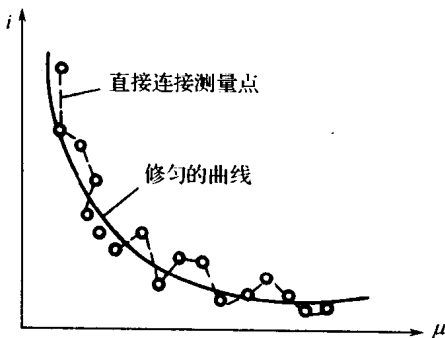


图 1-3-1 直接连接测量点时波动现象

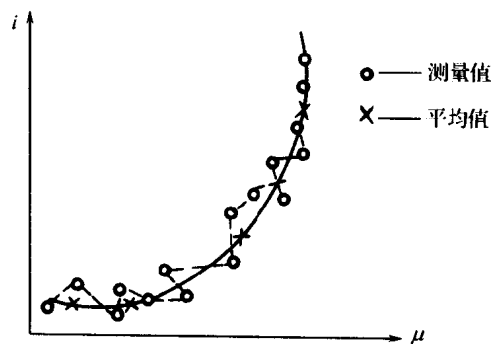


图 1-3-2 分组平均法修匀曲线

与测量数据点一样,在曲线斜率变化比较大和变化规律重要的地方测量数据点适当选密些,分组数目也要细些。

二、测量结果误差的估计

测量结果误差估计根据要求不同,有两种情况:一是在工程测量中的误差估计,二是在理论分析时须进行精密测量中的误差估计。在进行理论分析而进行的精密测量中,为了保证有较高的准确度,常需进行多次重复的测量,再求其算术平均值,并设法消除可能消除的误差,或对读数进行必要的修正。在工程测量中一般对精度要求不高,因此不需要确定误差的实际值,只要知道误差在什么范围内就可以了。工程测量中往往只对被测量进行一次测量。下面介绍工程测量中如何估计测量误差。

在实际工程测量中,根据仪表对被测量的测量方法可分为直接测量和间接测量两种。所谓直接测量,是用仪表直接显示测量结果的测量方法,例如用电压表测量电压,用欧姆表测量电阻。所谓间接测量,是指要获得一个测量结果需要分别测出几个其他量,然后再通过一定公式计算得出被测量的测量方法。例如要测量某元件的电阻,可用电压表测出其端电压,用电流表测出通过的电流,然后用欧姆定律公式: $R = \frac{U}{I}$ 算出其阻值。

1. 直接测量时的最大误差

正常情况下进行直接测量时,测量的最大误差可从仪表精确度 K 计算得出。

仪表精确度 K 定义为

$$\pm K = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\%$$

式中, Δ_m 为仪表可能出现的最大绝对误差; A_m 为仪表量程。可见仪表测量的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm \frac{K \cdot A_m}{100\%} = \pm K \cdot A_m$$

若用相对误差表示,相对误差定义为:绝对误差 Δ_m 与被测量真实数值 A_o 的比值,其符号为 γ ,即:

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A_o} \times 100\%$$

最大相对误差为

$$\gamma_m = \pm \frac{K \cdot A_m}{A_o \pm \Delta_m} \times 100\%$$

一般情况下 $A_o \gg \Delta_m$, 故

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_o} \times 100\%$$

式中, K 为仪表精确度; A_m 为测量仪表的量程; A_o 为被测量真值。

由上式可见,当仪表精确度给定后,被测量 x 相对于量程值越小,测量结果的相对误差越大; A_o 越接近仪表量程 A_m , 则测量误差就越接近仪表精度的百分数。

2. 间接测量时的最大误差

采用间接测量时,其最大误差可由直接测量的误差得到,若 y 为被测量。 A_1 和 A_2 为直接测量所获得的读数值,则间接测量的最大误差可分为下述几种情况。

第一种情况:被测量等于两测量数据 A_1 与 A_2 的和,即

$$y = A_1 + A_2 + \cdots \quad (1-3-1)$$

如果各种量前冠以 Δ 表示该量的绝对误差,则

$$y + \Delta y = (A_1 + \Delta A_1) + (A_2 + \Delta A_2) + \cdots \quad (1-3-2)$$

将式(1-3-2)减去式(1-3-1),有

$$\Delta y = \Delta A_1 + \Delta A_2$$

被测量的最大相对误差出现在各量相对误差为同一符号时,即

$$\gamma_m = \left| \frac{\Delta y}{y} \right| = \left| \frac{\Delta A_1}{y} \right| + \left| \frac{\Delta A_2}{y} \right|$$

因此 A_1 和 A_2 的相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta A_1}{A_1}, \quad \gamma_2 = \frac{\Delta A_2}{A_2}$$

所以被测量的最大误差又可写为

$$\gamma_m = \left| \frac{A_1}{y} \gamma_1 \right| + \left| \frac{A_2}{y} \gamma_2 \right| = \left| \frac{A_1}{A_1 + A_2} \gamma_1 \right| + \left| \frac{A_2}{A_1 + A_2} \gamma_2 \right|$$

第二种情况:被测量等于两测量数据 A_1 和 A_2 的差,即

$$y = A_1 - A_2$$

$$y + \Delta y = (A_1 + \Delta A_1) - (A_2 + \Delta A_2)$$

误差的最大情况发生在 ΔA_1 和 ΔA_2 绝对值相加的情况,即

$$\gamma_m = \left| \frac{\Delta y}{y} \right| = \left| \frac{\Delta A_1}{y} \right| + \left| \frac{\Delta A_2}{y} \right| = \left| \frac{A_1}{y} \gamma_1 \right| + \left| \frac{A_2}{y} \gamma_2 \right|$$

可见, A_1 和 A_2 之差值越小,所引起的被测量误差就越大。

第三种情况:被测量 y 等于两测量数据 A_1 及 A_2 的积或商,即

$$y = A_1^m \cdot A_2^n$$

式中 m 及 n 可能为正负整数或分数。将上式取自然对数

$$\ln y = m \ln A_1 + n \ln A_2$$

$$\frac{dy}{y} = m \frac{dA_1}{A_1} + n \frac{dA_2}{A_2}$$

即

$$\frac{\Delta y}{y} = m \frac{\Delta A_1}{A_1} + n \frac{\Delta A_2}{A_2}$$