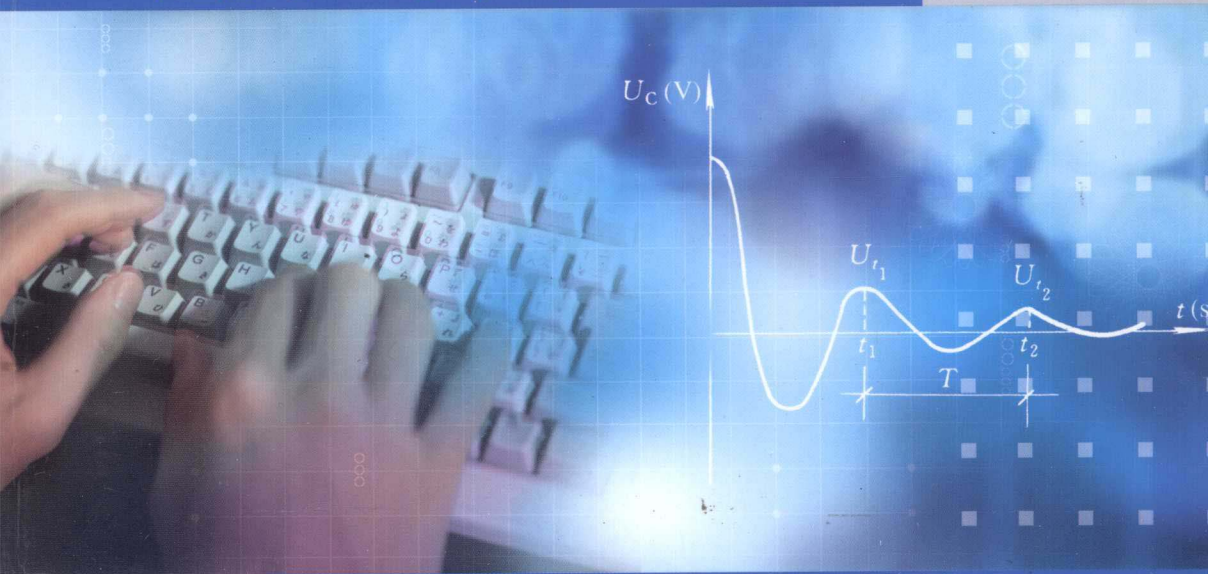


总主编 秦杏荣 张保华

21 世纪电工电子实验系列教材



(第2版)

D I A N L U S H I Y A N J I C H U

电路实验基础

主 编 秦杏荣 副主编 王 霞 杨尔滨



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

21 世纪电工电子实验系列教材

总主编 秦杏荣 张保华

电路实验基础

(第 2 版)

主 编 秦杏荣

副主编 王 霞 杨尔滨



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书为同济大学、安徽大学等十余所高等院校共同编著的电工电子实验系列教材之一。全书共分3章,第1章介绍了电路实验中所用到的测量仪表的基本知识;第2章介绍了常用电工测量仪表、仪器的基本原理和使用方法;第3章详细介绍了电路原理的实验方法,并增加了设计性、研究性内容和计算机仿真要求,实验项目内容详细完整。在附录中介绍了常用电路元件和计算机电路仿真软件的基本应用。

本书可作为高等院校工科电工、通信、自动化、电气类各专业的电路实验课程教材,也可供从事电路设计的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验基础/秦杏荣主编. —2版. —上海:同济大学出版社,2011.2
ISBN 978-7-5608-4500-5

I. ①电… II. ①秦… III. ①电路—实验—高等学校—教材 IV. ①TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 011199 号

21 世纪电工电子实验系列教材

电路实验基础(第2版)

主 编 秦杏荣 副主编 王 霞 杨尔滨
责任编辑 姚铭焰 责任校对 徐春莲 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 同济大学印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 13
印 数 1—3100
字 数 260 000
版 次 2011 年 2 月第 2 版 2011 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-4500-5

定 价 22.00 元

序

高等学校是培养社会主义建设人才的主渠道.尤其在科学技术高速发展的今天,如何培养学生的实践能力、创业能力、创新能力和国际竞争能力是我们每个教育工作者都必须认真思考的主题.传统意义上的实验教学模式显然已经不能为飞速发展的时代所接受.为此,全面推行教学改革,实施新的教学方案,编撰新的实验教材已成为我们每个致力于实验教学的教师的新课题.

本系列教材是在各参编学校多年来实验教学研究、改革和实践的基础上,吸取各兄弟院校近年来实验改革的经验编撰而成的.它是集体的智慧,更是众人的成果.

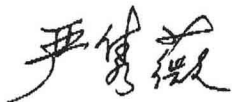
与以往形式单一、内容陈旧的实验教材不同,本系列教材中除保留了部分传统的验证性实验外,增加了设计性、研究性的实验内容和计算机仿真内容.考虑到在实施本系列教材时的学生还处在低年级阶段,其所学和掌握的理论和实践知识的局限性,新编实验教材在其内容和形式上都按照循序渐进的要求进行.本系列实验教材既考虑到与理论课教材的衔接、呼应和配套,又不失实验教材的自身独立体系.在编写实验项目时已经顾及所用实验仪器、设备和实验器材的通用性及实验装置的开放性.

实验计划时数可参照2004年修定的“高等学校电工电子课程教学基本要求”适当放宽,以便于教师实施本教材时根据实际情况酌情选用.

参加本系列实验教材编纂的学校有同济大学、华东师范大学、华东理工大学、东华大学、上海海事大学、上海大学、上海电力学院、上海工程技术大学、上海应用技术学院、上海第二工业大学和安徽大学、中国人民解放军电子工程学院、中国人民解放军炮兵学院、淮南师范学院等.

本实验系列教材从筹划到出版,自始至终得到了同济大学出版社和各参编学校领导的鼎力相助和大力支持,在此我们谨以编委会的名义向他们致以崇高的敬意和衷心的感谢.

限于作者的业务水平和各校初次合作,书中难免存在一些不妥之处,敬请各使用者批评斧正.



2005年9月21日

前 言

教材是教学改革的载体. 编撰具有时代特色的电工电子实验系列教材, 培养学生的实践能力、创业能力和创新能力, 以适应高等学校实验教学的改革和教学实践的需要, 是我们从事电工电子实验教师的重要职责.

本教材基于教育部高等学校电子信息科学与工程类基础教育指导分委会 2004 年修订的“高等学校电工电子课程教学基本要求”, 是在吸取了各参编院校近年来实验教学改革经验的基础上编撰而成的.

本教材的特色之一是, 每个实验内容都按从易到难、由浅入深、循序渐进的原则编写, 既保留了传统的验证性内容, 又增加了设计、研究性要求. 实验指导老师可根据学生的实际情况, 对实验内容有所取舍.

本教材的特色之二是, 在实验预习习题中增设了电路计算机仿真的内容. 学生在进行实验前通过计算机仿真, 对实验状况即可有大概的了解, 便于学生在实验中对测量仪表的量限的正确选用、对测量点的合理选取和对设计性要求都可事先在计算机上仿真实现.

成功的实验是基于准确的测量和正确的使用实验仪器, 考虑到目前学生的实际情况, 本教材在第 1、第 2 章中简要地介绍了电路实验中所用到的仪器仪表的基本知识和常用的电工测量仪表、仪器的基本原理和使用方法, 学生在进入实验室进行电路实验前, 就可以通过自学了解上述内容.

为了进一步提高电路实验教学的教学质量, 本教材在“实习预习要求”中增设了与实验内容有关的实验预习习题. 实验指导老师则可据此来检查学生的实习预习情况. 为了培养学生独立思考和分析问题的能力, 本教材在每个实验结束之前都附有一定量的与该实验内容有关的“实验思考题”.

本教材为同济大学“十五”规划教材, 并得到同济大学教材、学术著作出版基金委员会的资助.

在本教材的编写过程中, 得到了同济大学出版社和各参编学校的大力支持和帮助. 上海交通大学朱承高教授严格而又仔细地审阅了本教材的原稿, 并提出了许多宝贵的修改意见, 在此一并表示谢意.

本教材由秦杏荣任主编, 王霞、杨尔滨任副主编. 参加本教材编写的还有李子、孙学平、陆炜江和周蕾等.

在本教材的初版中, 存在一些疏漏和不妥之处, 本次修订中, 除调整了部分实验内容外, 对原书中的疏漏尽可能加以更正弥补, 但由于编者的水平有限, 一定还会存在某些不足之处, 殷切希望得到读者的批评指正.

编 者

2011 年元月于同济

目 录

序

前言

第 1 章 电气测量的基本知识	(1)
1.1 电气测量基本概念	(1)
1.2 电气测量仪表的基本知识	(2)
1.3 测量误差的表示法和分类及误差估计	(5)
1.4 实验方案设计与实践	(11)
第 2 章 常用电气测量仪器仪表的原理与使用	(12)
2.1 磁电系仪表	(12)
2.2 电磁系仪表	(16)
2.3 电动系仪表	(19)
2.4 万用电表	(23)
2.5 交流毫伏表	(27)
2.6 比较式测量仪器	(28)
2.7 电子射线示波器	(32)
2.8 函数信号发生器	(37)
2.9 直流稳压电源	(41)
第 3 章 电路实验	(44)
3.1 电阻元件伏安特性的测量	(44)
3.2 基尔霍夫定律的验证	(49)
3.3 直流电阻的测量实验	(53)
3.4 电源的等效变换及理想电源外特性研究实验	(57)
3.5 含有受控源的直流电路研究实验	(61)
3.6 负阻抗变换器及应用实验	(67)
3.7 叠加定理的验证实验	(78)
3.8 戴维南定理和诺顿定理的验证	(81)
3.9 特勒根定理与互易定理的研究实验	(85)
3.10 直流电位差计的使用和分压器的实验研究	(88)
3.11 电路过渡过程的观察和研究实验	(92)
3.12 交流电路阻抗参数的测量实验	(97)

3.13	功率因数的提高实验·····	(101)
3.14	串联谐振电路的研究实验·····	(104)
3.15	交流电路中的互感实验·····	(109)
3.16	一端口 LC 网络的频率特性实验·····	(113)
3.17	三相电路的电压与电流实验·····	(116)
3.18	三相电路的功率测量实验·····	(121)
3.19	非正弦周期电流电路的研究实验·····	(126)
3.20	无源双口网络传输参数的测定实验·····	(130)
3.21	网络频率特性测量与研究实验·····	(134)
3.22	回转器的研究实验·····	(139)
3.23	无源和有源滤波器实验·····	(144)
3.24	非线性电路的研究实验·····	(150)
3.25	无损耗均匀传输线研究实验·····	(153)
3.26	交流磁路性能测试实验·····	(158)
附录 1	常用电子元件介绍·····	(163)
附录 2	电路仿真软件的基本应用介绍·····	(173)
参考文献	·····	(196)

第 1 章 电气测量的基本知识

1.1 电气测量基本概念

实验是将事物置于特定、可控的条件下加以观测,是对事物发展规律进行科学认识的必要环节,是科学理论的源泉、自然科学的根本,也是工程技术的基础.任何科学技术的发展都离不开实验.

测量是人们借助于专门设备,通过实验方法对客观事物取得数量观念的认识,也是探求、收集和整理表征事物性质及其相互关系的各种资料与数据的过程,只有大量积累这些资料和数据,并进行实事求是的分析,才有可能发现事物的发展规律.因此,测量是人类认识世界的手段.

电路理论及实验课程是一门实践性很强的学科,它的任务是使学生获得电气方面的基础理论、基础知识和基本技能.加强实验训练特别是技能的训练,对学生分析问题和解决问题的能力,特别是毕业后的实际工作能力,具有十分重要的意义.

1.1.1 电气测量的方法

在电路实验中采用的测量方法一般分为直接测量法和间接测量法.直接测量法在测量过程中可以从测试仪器中直接读出被测物理量的数值大小或波形曲线形状.间接测量法是先对各间接参量进行直接测量,并将测量得到的数据代入计算公式,通过计算得到待测参量.

电气测量的结果,可能表现为一定的数字或一条曲线,或某种图形,但不论是哪种形式,测量的结果总包含一定的数值(大小和符号)以及相应的单位.也就是说,测量结果是有名数,例如,1.05V,20W,5 Ω 等.没有注明单位的测量结果是毫无价值的.

电气测量获得的数据,因测量仪器、测量方法、测量环境和人为因数等的影响,测量结果会出现偏离真实数值的情况,产生测量误差.

1.1.2 电气测量的分类与应用

电路实验,就其内容可由验证性内容、训练性内容、综合性内容和设计性内容四部分组成.

验证性内容和训练性内容是针对于电路基础理论而设置的.通过实验获得感性认识,以验证和巩固重要的基础理论,同时使学生掌握测量仪器的工作原理和规范使用,熟悉常用元器件的性能,掌握其参数的测量方法和使用方法,掌握基本实验知识、基本实验方法和基本实验技能.同时,培养学生一定的接线、测试、分析和故障查找等

技能。

综合性实验侧重于对一些理论知识的综合应用和实验的综合分析,其目的是培养学生综合应用理论知识能力和解决较复杂的实际问题的能力,包括实验理论的系统性、实验方案的完整性、可行性、元器件及测量仪器的综合应用等。

设计性实验对学生来说,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应用,要求学生在教师的指导下独立查阅资料、设计方案与组合实验等工作,并写出试验报告。借助于计算机仿真实验,可以使实验方案更趋合理、完善,这类实验对提高学生的科学实验能力等方面非常有益。

1.2 电气测量仪表的基本知识

1.2.1 基本测量知识

电路实验中涉及到的物理量主要有:电压、电流、功率、频率、阻抗(包括电阻、电感和电容等)及频谱等,所用到的物理量单位是指根据定义而令系数为1的量。例如,米是长度单位;伏特是电压单位等。单位是表征测量结果的重要组成部分,是物理量进行比较的基础。

在物理量单位中,米、千克、秒等是可以任意地、彼此无关的加以规定,所以被称为基本单位。由各种基本单位通过定义、定律及其他函数关系派生出来的单位称为导出单位。例如,由长度和时间可以导出速度单位($\text{米} \cdot \text{秒}^{-1}$)。为了使用方便,有些导出单位以某位著名的学者名字命名,如电流单位是安培,力的单位是牛顿,频率的单位是赫兹等。

以一些基本单位为基础,通过各种物理量之间的联系便可组成单位制。例如,绝对单位制、电磁单位制等。采用不同的单位制,对科学技术的发展带来种种不便,在1960年第11届国际计量大会上,正式规定了一个以实用单位制为基础的统一单位制,命名为国际单位制,用符号SI表示。

国际单位制的基本单位共有7个,即长度单位[米(m)]、质量单位[千克(kg)]、时间单位[秒(s)]、电流单位[安培(A)]、热力学温度单位[开尔文(K)]、光强度单位[坎德拉(cd)]、物质的量单位[摩尔(mol)]。此外还有两个辅助单位,即平面角单位[弧度(rad)]、立体角单位[球面度(sr)]。

我国和世界上许多国家及国际组织都已采用国际单位制。

1.2.2 测量数据的有效数字

测量得到的结果一般都是近似值。如用电流表测量电流时,如果指针所指的位置如图1-1所示,此时电流读数为27.5 A。这时明显看出2和7两个数字是准确的,称为准确数字;而末位的数字5则是根据指针在标尺的最小分格中的位置估计出的结

果,是不准确的数字,称为欠准数字.准确数字和欠准数字在测量结果中都是不可缺少的,它们统称为有效数字,即从左边第一个非零的数字到右边最后一个非零的数字为止所包含的数字.有效数字不仅包含了被测参量的大小,也确定了测量的精度.在测试中,记录数据时只能保留一位欠准数字,超过一位欠准数字是无意义的.例如,图 1-1 的电流读数为 27.51A,

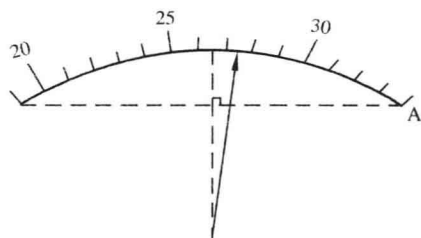


图 1-1

则末位的 1 无意义.保留有效数字位数的多少与小数点无关,如 27.5 和 275 都是 3 位有效数字.0 在非零数字间或数字末尾仍算作有效数字,但在数字之前不算有效数字,如 5.50 和 5.5 表示同一数值,但前者是 3 位有效数字,后者只有 2 位有效数字,它们反映了不同的测量精度.另外大数值和小数值最好用幂的乘积形式表示,如 360 000A 应记为: 3.6×10^5 A.在表示误差时,一般只取 1 位有效数字,最多取 2 位有效数字.

对于测量读数,在规定的精度范围以外的那些数字,一般应按照“四舍五入”的规则进行取舍,此时对于 5 的处理,当被舍去的数字等于 5,而 5 之后有数字时,则舍 5 进 1;若 5 后面无数字或 0 时,这时只有在 5 之前为奇数时,才能舍 5 进 1,否则舍 5 不进为 1.

1.2.3 常用电气测量仪表的使用

在电路实验中,测量各种电气参数并进行分析时,较常用的仪器仪表有直流稳压电源、信号发生器、示波器、交流毫伏表、直流和交流电压表及电流表、万用表、频率计及频谱分析仪等,如图 1-2 所示.

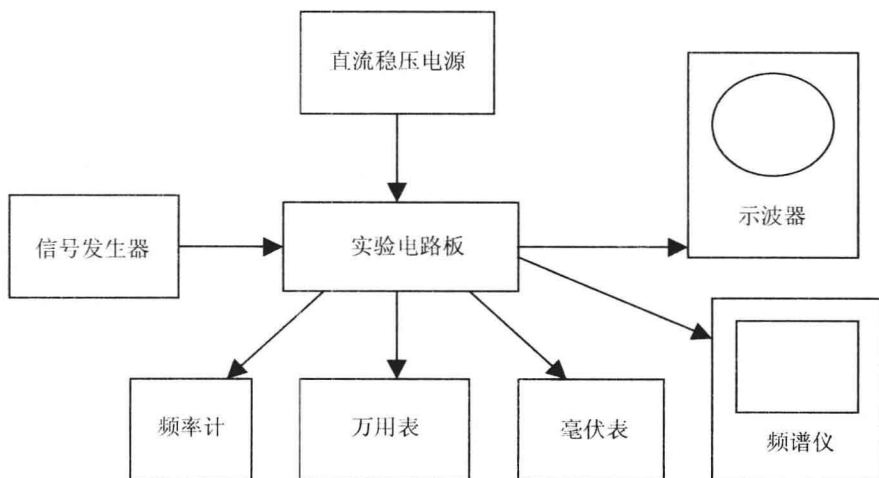


图 1-2

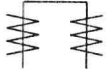
各个仪器仪表的主要功能如下：

- 1) 直流稳压电源：为实验电路提供直流工作电源。
- 2) 示波器：用于观察实验电路中各测试点的电压、电流波形，也可以用于测量信号的周期、幅值、相位以及观察电路的动态特性曲线等。
- 3) 信号发生器：为实验电路提供各种频率、相位和幅值的输入信号。
- 4) 电压、电流表：用于测量电路中各支路电流及元件端电压。
- 5) 万用表：一般用于测量电阻值和电路测试点上的直流信号。
- 6) 交流毫伏表：用于测量电路中交流输入、输出信号的有效值。
- 7) 频率计：一般用于测量电路中交流信号的频率、周期。
- 8) 频谱仪：用于测量信号的幅频特性。

1.2.4 电测仪表的表面标记

熟悉电测仪表的表面标记是正确选用仪表的依据。表 1-1 列示的是常用的各种指针式电测仪表的表面标记符号。

表 1-1 常用指针式电测仪表的表面标记

名 称	符 号	名 称	符 号
磁电系仪表		以指示值的百分数表示的准确度等级； 例如，1.5 级	
磁电系比率表		标度尺位置为垂直的	
电磁系仪表		标度尺位置为水平的	
电磁系比率表		I 级防外磁场； 例如，磁电系	
电动系仪表		I 级防外磁场； 例如，静电系	
电动系比率表		II 级防外磁场及电场	
整流系仪表		III 级防外磁场及电场	
热电系仪表		直 流	
绝缘强度实验电压 例如，2kV		交流(单相)	

续表

名 称	符 号	名 称	符 号
以标度尺量限百分数 表示的准确度等级 例如, 1.5 级	1.5	直流和交流	
以标度尺长度百分数 表示的准确度等级 例如, 1.5 级		具有单元件的三相 平衡负载交流	

1.3 测量误差的表示法和分类及误差估计

在科学实验与生产实践的过程中,为了获取表征被研究对象的特征的定量信息,必须准确地进行测量.在测量过程中,由于各种原因,测量结果与待测量的客观真值之间总存在一定差别,即测量误差.因此,分析误差产生的原因,如何采取措施减小误差,使测量结果更加准确,对实验人员及科技工作者来说是必须了解和掌握的.

下面着重从理论分析和实践过程中认识误差的来源和性质,从根本上找到减小或消除误差的有效措施和途径.

1.3.1 误差分类与测量结果的处理和误差的消除

1) 误差的来源与分类

(1) 测量误差的来源

测量误差的来源主要有以下几个方面:

① 仪器误差

仪器误差是指由测量仪器本身的电气或机械等性能不完善所造成的误差.显然,消除仪器误差的方法是配备性能优良的仪器并定时对测量仪器进行校准.

② 使用误差(操作误差)

这是测量过程中因操作不当而引起的误差.减小使用误差的办法是测量前详细阅读仪器的使用说明书,严格遵守操作规程,提高实验技巧和对各种仪器的操作能力.例如,万用表表盘上的符号:⊥, □, ∠60°分别表示万用表垂直位置使用,水平位置使用,与水平面倾斜成 60°使用.使用时应按规定放置万用表,否则会带来误差,至于用欧姆档测电阻前不调零所带来的误差,更是显而易见的.

③ 方法误差(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、简化所产生的,即凡是在测量结果的表达式中没有得到反映的因素,而实际上这些因素在测量过程中又起到一定的作用所引起的误差.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,而不计及电表本身内阻的影响,就会引起误差。

(2) 测量误差的分类

测量误差按其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

它是指在相同条件下重复测量同一量时,误差的大小和符号保持不变,或按照一定的规律变化的误差。系统误差一般通过实验或分析方法,查明其变化规律及产生原因后,可以减少或消除。电路实验中的系统误差常来源于对测量仪器的调整不当和使用方法不当所致。

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,误差大小和符号无规律的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作出估计,或通过多次重复测量,然后取其中算术平均值来达到目的。

③ 疏失误差

这是一种由于测量者对仪器不了解、粗心,导致读数不正确而引起的误差,测量条件的突然变化也会引起疏失误差。含有疏失误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,然后剔除。

2) 误差的表示方法

误差可以用绝对误差和相对误差来表示。

(1) 绝对误差

设被测量的真值为 A_0 , 测量仪器的示值为 X , 则绝对值为

$$\Delta X = X - A_0.$$

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,只能尽量逼近它。故常用高一级标准测量仪器的测量值 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所得的差值,就是修正值。实际上,修正值就是绝对误差,只是符号相反,则

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

利用修正值便可得该仪器所测量的实际值

$$A = X + C.$$

例如,用电压表测量电压时,电压表的示值为 1.1V , 通过鉴定得出其修正值为 -0.01V , 则被测电压的真值为

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

修正值给出的方式可以是曲线、公式或数表。对于自动测试仪器,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,所得结果便是实际值。

(2) 相对误差

绝对误差值的大小往往不能确切地反映出被测量的准确程度。例如,测 100V 电压时, $\Delta X_1 = +2\text{V}$, 在测 10V 电压时, $\Delta X_2 = 0.5\text{V}$, 虽然 $\Delta X_1 > \Delta X_2$, 可实际 ΔX_1 只占被测量的 2%, 而 ΔX_2 却占被测量的 5%。显然, 后者的误差对测量结果的影响相对较大。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。

① 实际相对误差: 它是用绝对误差 ΔX 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

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

② 示值相对误差: 它是用绝对误差 ΔX 与仪器给出值 X 的比值的百分数来表示的相对误差, 即

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%.$$

③ 引用(或满度)相对误差: 它是用绝对误差 ΔX 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 γ_m 确定的, 如 1.5 级的电表, 表明 $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$ 。我国电工仪表按值共分七级: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。若某仪表的等级是 S 级, 它的满刻度值为 X_m , 则测量的绝对误差为

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

其示值相对误差为

$$\gamma_x \leq \frac{X_m}{X} \times S\%.$$

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 愈接近 X_m 时, γ_x 的上限值愈小, 测量愈准确。因此, 当我们使用这类仪表进行测量时, 一般应使被测量的值尽可能在仪表满刻度值的 $\frac{1}{2}$ 以上。

1.3.2 测量结果的处理

测量结果通常用数字或图形表示, 下面分别进行讨论。

1) 测量结果的数据处理

(1) 有效数字

前面我们已经给出有效数字的定义,它是由可靠数字和欠准数字两部分组成.有效数字对测量结果的科学表述极为重要.

对有效数字的正确表示,应注意以下几点:

① 与计量单位有关的“0”不是有效数字,例如,0.054A 与 54mA 这两种写法均为 2 位有效数字.

② 小数点后面的“0”不能随意省略,例如,18mA 与 18.00mA 是有区别的,前者为 2 位有效数字,后者则是 4 位有效数字.

③ 对后面带“0”的大数目数字,不同写法其有效数字位数是不同的,例如,3000 如写成 30×10^2 ,则成为 2 位有效数字;若写成 3×10^3 ,则成为一位有效数字;如写成 3000 ± 1 ,就是 4 位有效数字.

④ 如已知误差,则有效数字的位数应与误差所在位相一致,即有效数字的最后一位数应与误差所在位对齐.如仪表误差为 $\pm 0.02\text{V}$,测得数为 3.2832V,其结果应写作 3.28V.因为小数点后面第二位“8”所在位已经产生了误差,所以从小数点后面第三位开始后面的“32”已经没有意义了,写结果时应舍去.

⑤ 当给出的误差有单位时,则测量资料的写法应与其一致.如频率计的测量误差为 $\pm$ 数 kHz,其测得某信号的频率为 7100kHz,可写成 7.100MHz 和 7100×10^3 Hz,若写成 7100000Hz 或 7.1MHz 是不行的.因为后者的有效数字与仪器的测量误差不一致.

(2) 数据舍入规则

为了使正、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:

① 若保留 n 位有效数字,当后面的数值小于第 n 位的 0.5 单位就舍去;

② 若保留 n 位有效数字,当后面的数值大于第 n 位的 0.5 单位就在第 n 位数字上加 1;

③ 若保留 n 位有效数字,当后面的数值恰为第 n 位的 0.5 单位,则当第 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),当第 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,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:

① 当几个近似值进行加、减运算时,在各数中(采用同一计量单位),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后再进行加减运算,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的位数相同.

② 进行乘除运算时,在各数中,以有效数字位数最少的那一个数为准,其余各数均舍入至比该数多一位后进行运算,而与小数点位置无关.运算结果的有效数字的位数应取舍成与运算前有效数字位数最少的相同.

③ 将数平方或开方后,结果可比原数多保留一位.

④ 用对数进行运算时, n 位有效数字的数应该用 n 位对数表.

⑤ 若计算式中出现如 e 、 π 等常数时,可根据具体情况来决定它们应取的位数.

2) 测量结果的曲线处理

在分析两个(或多个)物理量之间的关系时,用曲线比用数字、公式表示常常更形象和直观,因此测量结果常要用曲线来表示.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,而是呈折线状.如图 1-3 所示,但我们应用有关误差理论,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.

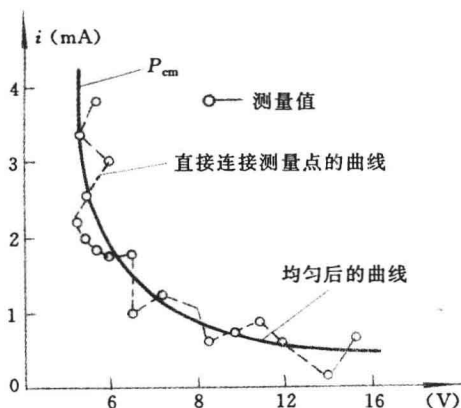


图 1-3 直线连接测量点时曲线的波动情况

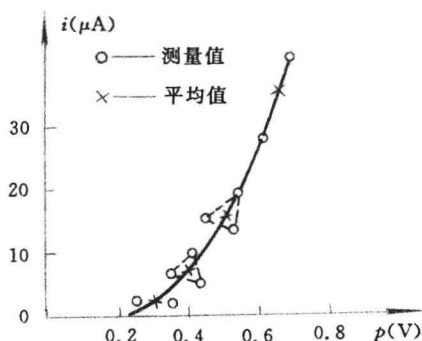


图 1-4 分组平均法修匀曲线

在要求不太高的测量中,常采用一种简便、可行的工程方法——分组平均法来修匀曲线.这种方法是将各测量点分成若干组,每组含 2~4 个数据点,然后分别估取各组的几何重心,再将这些重心连接起来.图 1-4 就是每组取 2~4 个数据点进行平均后的修匀曲线.这条曲线由于进行了测量点的平均,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.

1.3.3 误差估计

1) 单次测量的误差估计

由于有些物理量的测量精度要求不高,或者这一物理量的误差对整体影响较小,因而只测量一次即可满足测量要求,此时测量误差的估计分两种情况:

(1) 在给定仪器误差情况下,单次测量的误差取仪器误差;

(2) 在没有给出仪器误差的情况下,对连续读数的仪器,取测量仪器最小分度值

的一半作为单次测量的误差;对非连续读数的仪器,取测量仪器的最小分度值作为单次测量的误差。

对于其余一些特殊情况,单次测量的仪器误差视具体情况而定。例如,秒表和天平。

2) 多次测量的误差估计

(1) 算术平均值 $\bar{x}$

在相同测量条件下,对同一物理量独立测量 n 次的测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

(2) 残差 Δx_i

测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差称为残差。即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

(3) 标准偏差 δ_x

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

需要注意的是:测量值的标准偏差并不表示测量值的误差的实际大小,因为测量值的偶然误差是随机的,所以测量值的标准偏差只表示任一测量值的误差落在区域 $(+\delta_x, -\delta_x)$ 内的概率为 68.3%,这就是标准偏差的统计意义。

(4) 多次测量的误差 Δx

在充分考虑多次测量的标准偏差 δ_x 和仪器误差 $\Delta_{\text{仪器}}$ 的情况下,多次测量的误差为

$$\Delta x = \sqrt{\delta_x^2 + \Delta_{\text{仪器}}^2}.$$

(5) 算术平均值的标准偏差 s

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

3) 可疑数字的剔除

一般测量的误差出现在 $\pm \delta_x$ 内的概率为 68.3%,误差出现在 $\pm 2\delta_x$ 内的概率为 95.5%,而出现在 $\pm 3\delta_x$ 区间内的概率为 99.7%,而一般我们的测量次数又不是很多,故测量值误差超出 $\pm 3\delta_x$ 区间的可能性极小,对误差超出 $\pm 3\delta_x$ 的数据可以剔除,但要在原始数据记录表格中保留,并用红色笔做删除标记。

4) 测量次数的确定

在基础实验中,一般测量次数为 4~10 次。

5) 重复测量所得测量值相等时误差估计