



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

普通高等教育“十二五”规划教材

电子电气基础课程规划教材

电工电子实验教程

(第3版)

■ 王久和 李春云 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

普通高等教育“十二五”规划教材·电子电气基础课程规划教材

电工电子实验教程

(第3版)

王久和 李春云 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为“北京高等教育精品教材”。全书系统地阐述了电工电子测量误差理论、测量仪器仪表及测试技术和电工电子实验技术。

本书分为两篇:电工电子测量技术和电工电子实验技术,共7章。第1章介绍了测量误差的表示方法及分类,误差估计及消除方法,测量数据处理。第2章介绍了各类仪器仪表的原理、性能及使用方法。第3章介绍了元器件参数、电量的测试方法。第4章介绍了电工的实验设计及实验方法。第5章介绍了模拟电子技术的实验设计及实验方法。第6章介绍了数字电子技术的实验设计及实验方法。第7章介绍了电子设计自动化的实验设计及实验方法。

本书可作为高等院校本科电气信息类专业教材,也可作为高职高专相关专业教材,也可供从事电气信息类实验工作的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子实验教程/王久和,李春云主编. —3版. —北京:电子工业出版社,2013.8

普通高等教育“十二五”规划教材·电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-20702-0

I. ①电… II. ①王… ②李… III. ①电工试验—高等学校—教材②电子技术—实验—高等学校—教材 IV. ①TM—33②TN—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 130794 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:600 千字

印 次:2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第3版前言

自第1版出版后受到广大读者的欢迎,并被评为“北京高等教育精品教材”。本书是按照电气信息类专业培养具有一定创新能力应用型人才的目标和要求,在前两版的基础上修订而成的。并依据教学改革及课程内容的调整,根据人才培养目标的要求,结合前两版教材几年的教学实践,进行了增减处理,使其有利于高素质应用型人才的培养。

为实现电气信息类专业电工电子实验教学,本书采用理论与实验相结合的形式进行编写,教材贯穿培养学生仪器的使用能力、电工电子电路的测试能力、测试数据的处理能力、实验设计及实验方法的培养。使用该教材进行教学可独立于理论教学,也可与理论教学并行。

本书分为两篇:电工电子测量技术和电工电子实验技术。电工电子测量技术包括测量误差理论、仪器仪表的原理(以框图形式介绍)和使用、元器件和电路测试方法。电工电子实验技术覆盖电路分析、模拟电子技术、数字电子技术及电子设计自动化实验技术;每个知识内容为一章,每章首节主要讲述:相应理论课概要、实验设计方法、实验方法(仿真、实验)及标准实验范例,其他各节是以知识归类形式设置的,含每一类知识要点、实验设计及实验方法、实验范例,学生从实验题目(不同于范例和实验范例)中选题并进行实验。为便于学生掌握实验教学内容,在第1篇第1~3章后设有思考题与习题,在第2篇第4~7章内设有思考题。

第3版修订的内容:

第2章增加了DS1000系列数字示波器和DG1000系列信号发生器性能的介绍及使用。

第3章增加了功率测量、时间测量、集成电路的识别与检测等内容。

第4章增加了RLC元件阻抗特性的测定。

第5章增加了综合设计型实验可控增益放大器的设计内容。

第6章增加了采用R-2R梯形电阻网络实现8位D/A转换电路的实验内容。

第7章增加了多位二进制码转换为BCD码、BCD码转换为二进制码实验范例及状态机应用的实验范例。

第3~6章节部分内容重新进行了编排。

本教程可用于随课实验、独立设立实验课程等形式的实验教学。

本书由王久和李春云主编。其中,第1章由王久和编写,第2、5章由陈福彬编写,第3、4章由付晓辉编写,第6、7章及附录由李春云编写,全书由王久和统稿,高晶敏教授审阅。本书的编写得到了北京信息科技大学教务处、北京市电工电子示范实验教学中心有关领导和老师的大力支持,同时也得到了兄弟院校老师的支持。在此一并表示衷心感谢。

由于作者编写水平有限,编写时间比较仓促,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2013年7月

前 言

本书是按照电气信息类专业实践教学体系改革与实践的教学要求而编写的教材。主要培养学生的电工电子电路测量能力、科学实验能力,同时加深对理论教学内容的理解。

培养学生的电工电子电路的测试能力和科学实验能力,是提高学生的工程实践能力和科研开发能力的基础;为此,将电子测量技术、各类电工电子实验融为一体,使测试技术和实验技术紧密结合起来,设置了“电工电子实验技术”一门课程。

为实现“电工电子实验技术”课程的教学,本书采用理论与实验相结合的形式进行编写,教材贯穿培养学生仪器使用能力、电工电子电路的测试能力、测试数据的处理能力、实验设计及实验方法的培养。使用该教材进行教学可独立于理论教学,也可与理论教学并行。

本书分为两篇:电工电子测量技术,电工电子实验技术。电工电子测量技术包括测量误差理论、仪器仪表的原理(以框图形式介绍)和使用、元器件和电路测试方法。电工电子实验技术覆盖电路分析、模拟电子技术、数字电子技术及电子设计自动化实验技术;每部分为一章,每章第一节包括:相应理论课概要、实验设计方法、实验方法(仿真、实验)及标准实验范例,其他各节是以知识归类形式设置的,含每一类知识要点、实验设计及实验方法、实验范例,学生从实验题目(不同于范例和实验例)中选题并进行实验。

本书第1章由王久和编写,第2章由苏进编写,第3章由任小军编写,第4章由付军荣编写,第5章由王学金编写,第6章、第7章及附录由李春云编写,全书由王久和组织编写并统稿。本书由王久和任主编;李春云、苏进任副主编;全书由朱茂镒、李邓化研究员审阅。本书的编写工作得到了北京信息工程学院教学改革基金的支持,同时也得到了北京信息工程学院教务处领导及兄弟院校老师的支持,在此一并表示衷心地感谢。

由于作者编写水平有限,编写时间比较仓促,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者
2004年7月

目 录

第 1 篇 电工电子测量技术

第 1 章 测量误差理论	1
1.1 测量误差的表示方法及分类	1
1.1.1 一些基本概念	1
1.1.2 测量误差的表示法和分类	2
1.2 误差的估计及消除方法	6
1.2.1 随机误差的估计消除方法	6
1.2.2 系统误差的估计及消除方法	9
1.2.3 疏忽误差的估计及消除方法	12
1.3 测量数据的处理	13
1.3.1 有效数字及其运算	13
1.3.2 有效数字的舍入原则	15
1.3.3 等精度测量数据的处理	15
1.4 测量方案设计	17
1.4.1 设计测量方案的几点考虑	17
1.4.2 测量过程	18
思考题与习题	19
第 2 章 常用仪器仪表的原理与使用	20
2.1 示波器	20
2.1.1 示波器原理	20
2.1.2 TDS2012 系列数字示波器	26
2.1.3 DS1000 系列数字示波器	33
2.2 信号发生器	38
2.2.1 信号发生器的原理	38
2.2.2 TFG2000 系列 DDS 函数发生器	40
2.2.3 DG1000 系列信号发生器	44
2.3 直流稳压电源	48
2.3.1 稳压电源的原理	48
2.3.2 典型稳压电源性能及使用	48
2.4 测试仪表	52
2.4.1 万用表的原理及使用	52
2.4.2 功率表的原理及使用	55
2.5 频率特性测试仪	58
2.5.1 频率特性测试仪基本原理	58
2.5.2 SA1030 数字频率特性测试仪的性能及使用	59
2.5.3 SA1030 数字频率特性测试仪面板和功能菜单简介	59
2.6 仪器仪表的使用实验	63
2.6.1 电工仪器仪表的使用	63

2.6.2 电子仪器仪表的使用	66
思考题与习题	67
第3章 实验测量技术	69
3.1 常用电量的测量	69
3.1.1 电压的测量	69
3.1.2 电流的测量	69
3.1.3 功率的测量	69
3.1.4 时间的测量	70
3.1.5 频率的测量	71
3.1.6 相位差的测量	71
3.2 常用元器件的识别与检测	72
3.2.1 电阻的识别与检测	72
3.2.2 电容的识别与检测	75
3.2.3 电感的识别与检测	79
3.2.4 半导体器件的识别与检测	81
思考题与习题	85

第2篇 电工电子实验技术

第4章 电路电工实验	86
4.1 概述	86
4.1.1 电路知识概要	86
4.1.2 电路实验设计方法	86
4.1.3 电路实验方法简介	87
4.2 电路定理	89
4.2.1 基尔霍夫定律的验证	89
4.2.2 叠加定理的验证	91
4.2.3 戴维南定理和诺顿定理	93
4.2.4 互易定理	96
4.3 动态电路分析	99
4.3.1 一阶电路的研究	99
4.3.2 二阶电路的研究	102
4.4 交流电路分析	105
4.4.1 RLC 元件伏安特性的相量形式	105
4.4.2 RLC 元件阻抗特性的测定	107
4.4.3 RLC 串联谐振电路	109
4.4.4 正弦稳态电路的功率及交流参数的测定	112
4.4.5 交流电路的互感	114
4.4.6 三相交流电路的研究及电路功率的测量	117
4.4.7 非正弦周期性电路	121
4.5 受控源的应用	125
4.6 电气控制电路分析	127
4.6.1 常用低压电器的认识及电动机的启停控制	127
4.6.2 电动机的继电器接触正/反转控制	129

4.6.3	三相电机 Y- Δ 降压延时启动控制	130
4.7	设计型与综合型实验	132
4.7.1	万用表交流电压挡设计与实验	132
4.7.2	功率因数的提高与无功功率补偿的研究	134
第5章	模拟电子技术实验	137
5.1	概述	137
5.1.1	模拟电子技术实验目的和特点	137
5.1.2	模拟电路基本量和电路参数的测量方法	137
5.1.3	实验电路的设计方法	139
5.1.4	设计(预习)报告和实验报告要求	142
5.2	Multisim 10 电路仿真软件的使用	142
5.2.1	Multisim 10 仿真软件简介与使用	142
5.2.2	Multisim 电路仿真应用实验	151
5.3	分立元件电路	154
5.3.1	单管交流放大电路	154
5.3.2	差动放大电路	157
5.3.3	负反馈在放大电路中的应用	160
5.3.4	功率放大电路	163
5.3.5	分立元件电路设计性实验	166
5.4	集成运放的线性应用	168
5.4.1	基本运算放大电路	169
5.4.2	积分微分电路	171
5.4.3	有源滤波电路	174
5.4.4	运放线性应用电路设计性实验	176
5.5	集成运放的非线性应用	177
5.5.1	脉冲调宽电路	177
5.5.2	RC 桥式振荡器	179
5.5.3	三角波—方波产生电路	182
5.5.4	运放非线性应用电路设计性实验	184
5.6	稳压电源	185
5.6.1	串联型分立元件稳压电路	187
5.6.2	三端集成稳压器电路	189
5.6.3	稳压电源设计性实验	191
5.7	综合型实验	192
5.7.1	阶梯型恒流电流源的设计与实验	192
5.7.2	可控增益放大器的设计	196
第6章	数字电子技术实验	199
6.1	概述	199
6.1.1	数字电路知识概要	199
6.1.2	实验设计方法	199
6.1.3	实验方法及范例	200
6.2	门电路	204
6.2.1	集成逻辑门电路的参数描述及测试	204

6.2.2	集电极开路门和三态门的应用	206
6.2.3	集成逻辑电路的连接和驱动	208
6.2.4	门电路实验	209
6.3	组合逻辑电路	214
6.3.1	组合逻辑电路的设计	214
6.3.2	组合逻辑电路中的竞争冒险现象	216
6.3.3	编码器、译码器及数码显示电路	218
6.3.4	组合逻辑电路实验	220
6.4	触发器及时序逻辑电路	223
6.4.1	触发器电路设计应用	223
6.4.2	计数器的应用	223
6.4.3	脉冲分配器的设计	224
6.4.4	集成时序脉冲分配器	225
6.4.5	触发器及时序逻辑电路实验	226
6.5	555 集成定时器应用	233
6.5.1	555 电路工作原理	233
6.5.2	555 定时器的典型应用	233
6.5.3	555 定时器实验	236
6.6	可编程逻辑器件的应用	237
6.6.1	FPGA 的应用	237
6.6.2	Quartus II 仿真软件简介与使用	238
6.6.3	应用 Quartus II 开发工具设计 FPGA	248
6.6.4	可编程逻辑器件实验	256
第 7 章	电子设计自动化基础实验	260
7.1	概述	260
7.1.1	VHDL 语言知识概要	260
7.1.2	实验设计方法	264
7.1.3	实验方法及范例	270
7.2	基本逻辑电路设计	279
7.2.1	分频器电路的设计	279
7.2.2	译码器的设计	280
7.2.3	8 位二进制带符号数的加减电路设计	282
7.2.4	二进制码、BCD 码转换电路设计	285
7.2.5	键盘接口电路的设计	288
7.2.6	基本逻辑电路设计实验	292
7.3	数字电路系统的设计实例——出租车计价器电路设计	296
7.3.1	题目要求及任务	296
7.3.2	总体方案设计	297
7.3.3	各模块电路设计	298
7.3.4	数字电路系统设计实验	314
附录 A	DE2 开发平台	318
附录 B	常用集成电路的引脚图及逻辑关系	325
参考文献		332

第 1 篇 电工电子测量技术

第 1 章 测量误差理论

1.1 测量误差的表示方法及分类

1.1.1 一些基本概念

1. 量值

量值为数值与计量单位的乘积表示量的大小,如 6mV,8A 等。

2. 被测量

被测量为被测量的量,它可以是待测量的量,也可以是已测量的量。

3. 干扰量

干扰量不是被测量,却是影响被测量的量值或计量器具示值的量,如环境温度、被测信号的频率、电磁干扰等。

4. 量的真值

量的真值可理解为没有误差的量值,它是一个理想的情况,实际上是不可确切可知的,只能随着科学技术的发展和测量水平的提高,使其测量值逼近真值。在国家(国际)保存的基准,按定义规定,在特定条件下的值可视为真值。

鉴于量的真值是一个理想的概念,已不再使用它,而用“量的值”或“被测量的值”。

5. 约定真值

约定真值为约定目的而取的可以代替真值的量值。一般来说,约定真值与真值的差值可以忽略不计,故在实际测量中,约定真值可以代替真值。

6. 准值

准值为一个明确规定的值,以它为基准定义准值误差。例如,该值可以是被测值、测量范围上限、仪器刻度盘范围、某一预调值及其他明确规定的值。

7. 示值

对于测量仪器,示值为指示值或记录值;对于标准器具是标称值或名义值;对于供给量仪器是设置值或标称值。

8. 额定值

额定值由制造者为设备或仪器在规定工作条件下指定的量值。

9. 读数

读数为在仪器刻度盘或显示器上直接读到的数字。例如,以 100 分度表示 50mA 的电流表,当指针指在 25 处时,读数是 25,而示值为 12.5mA。有时为了避免差错和便于查对,在记录测量的示值时应同时记下读数。

10. 实际值

实际值是为满足规定精度的用来代替真值的量值。实际值可以理解为由实验获得的在某种程度上接近真值的量值。在计量检定中,通常将上一级计量标准所复现的量值称为下级计量器具的实际值。

另外,还有测量值,测量值为测量得出的量值。它可能是从计量器具直接得出的量值,也可以通过必要的换算(如系数换算、借助于相应的图表或曲线等)所得出的量值。

1.1.2 测量误差的表示法和分类

1. 误差表示法

(1) 绝对误差

绝对误差是测量值(示值)与被测量真值之间的差值。用 A_0 表示真值, x 表示测量值(示值),则绝对误差 Δx 可表示为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1.1)$$

当 $x > A_0$ 时, Δx 是正值;当 $x < A_0$ 时, Δx 是负值。所以 Δx 是具有大小、正负和单位的数值,它的大小和符号分别表示测量值偏离真值的程度和方向。

由于真值 A_0 一般是未知的,所以在实际测量中,常用被测量的实际值 A 来代替真值 A_0 。被测量的实际值通常使用上一级或数级的标准仪器、或计量器具所测得的数值代替真值。必须说明, A 不等于 A_0 , 一般来说, A 总比 x 更接近于 A_0 。则常用的绝对误差表达式为

$$\Delta x = x - A \quad (1.1.2)$$

【例 1.1.1】 一个被测电流,其真值 I_0 为 50A,用一块电流表进行测量,其测量值 I 为 50.5A,则绝对误差为

$$\Delta I = I - I_0 = 50.5 - 50 = +0.5(\text{A})$$

若用上一级标准仪器测得的值为 50.05A,则绝对误差为

$$\Delta I = 50.5 - 50.05 = +0.45(\text{A})$$

修正值是指绝对值与 Δx 相等、符号相反的值,常用 C 表示,即

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1.1.3)$$

通过检定,由上一级标准(或基准)以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。利用修正值可求出被测量的实际值,即

$$A = x + C \quad (1.1.4)$$

在某些自动测试系统中,为了提高测量精度,减少测量误差,通常将修正值预先编制成有关程序存入仪器中,根据测量结果,自动对误差进行修正。

一般规定,绝对误差和修正值的单位必须与测量值一致。

绝对误差虽然可以说明测量值偏离实际值的程度,但不能说明测量的准确程度,应引用相对误差。

【例 1.1.2】 测量两个电流,其实际值为 $I_1 = 50\text{A}$, $I_2 = 10\text{A}$;而测量值分别为 50.5A 和 10.5A。则绝对误差为

$$\Delta I_1 = 50.5 - 50 = 0.5(\text{A})$$

$$\Delta I_2 = 10.5 - 10 = 0.5(\text{A})$$

二者的绝对误差相同,但其影响是不同的,前者比后者测量得准确。

(2) 相对误差

如上所述,绝对误差的表示方法不能反映测量结果的准确程度,应采用相对误差。相对误差为

绝对误差与被测量真值的比值,通常用百分数表示,用 γ_0 表示相对误差,则有

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1.1.5)$$

在一般情况下,真值是得不到的,可用绝对误差与实际值之比表示相对误差,也称为实际相对误差,用 γ_A 表示为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{x-A}{A} \times 100\% \quad (1.1.6)$$

对于例 1.1.2 题, $\gamma_{A1} = \frac{\Delta I_1}{I_1} \times 100\% = \frac{0.5}{50} \times 100\% = 1\%$, $\gamma_{A2} = \frac{\Delta I_2}{I_2} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\%$ 。

由此可见,相对误差可以表征测量的准确度。相对误差只有大小和符号,而无单位。

在误差较小或要求不太严格的情况下,也可用仪器的测量值代替实际值。这时的相对误差称为示值相对误差,用 γ_x 表示:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.1.7)$$

式中, Δx 是由所用仪器的准确度等级确定的。

由于 x 中含有误差,所以 γ_x 值适用于近似测量。对于一般的工程测量,用 γ_x 来表示测量的准确度比较方便。

(3) 引用误差

引用误差也称为满度相对误差。引用误差是为了评价测量仪表准确度等级而引入的,因为绝对误差和相对误差均不能客观、正确地反映测量仪器仪表准确度的高低。引用误差定义为绝对误差预测量仪表的量程 x_m 值之比,用 γ_n 表示为

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.1.8)$$

测量仪器的各指示(刻度)值的绝对误差有正、有负,有大、有小。所以,测量仪器的准确度等级应用最大引用误差,即绝对误差的最大绝对值 $|\Delta x|_m$ 与量程之比,用 γ_{nm} 表示最大引用误差,则有

$$\gamma_{nm} = \frac{|\Delta x|_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.1.9)$$

国家标准 GB776—1976《测量指示仪表通用技术条件》规定,电测仪表的准确度等级指数 α 分为:0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5,5.0 等 7 个等级。它们的基本误差(最大引用误差)不能超过仪表准确度等级指数 α 的百分数,即

$$\gamma_{nm} \leq \alpha\% \quad (1.1.10)$$

例如,0.5 级的仪表,就表明其 $\gamma_{nm} \leq 0.5\%$,其面板上标以 0.5 的符号。

【例 1.1.3】 检定一台量程为 100V、1.0 级电压表,在电压为 40V 处,其绝对误差 0.9V,问该电压表是否合格?

解: 根据题意 $U_m = 100\text{V}$, $\alpha = 1.0$, $U = 40\text{V}$, $\Delta U = 0.9\text{V}$

$$\gamma_n = \frac{\Delta U}{U} \times 100\% = 0.9\% < 1.0\%$$

即 $\gamma_n < \alpha\%$,说明该电压表合格。

为提高测量精度,在选择仪表时,应尽量使被测量 x 靠近满度值 x_m ,至少 $x \approx \frac{2}{3} x_m$ 。

(4) 容许误差

容许误差为测量仪器在使用条件下可能产生的最大误差范围,它是衡量仪器的重要指标,测量仪器的准确度、稳定度等指标都可用容许误差来表征。

容许误差通常用绝对误差表示,有如下 3 种表示形式:

$$\Delta x = \pm (a\% \cdot x + b\% \cdot x_m) \quad (1.1.11)$$

$$\Delta x = \pm (a\% \cdot x + n) \quad (1.1.12)$$

$$\Delta x = \pm (a\% \cdot x + b\% \cdot x_m + n) \quad (1.1.13)$$

式中: Δx 为容许误差; a 为误差相对项系数; x 为被测量的指示值; b 为误差固定项系数; x_m 为测量仪表的满度值; $a\% \cdot x$ 为读数误差, 与读数成正比; $b\% \cdot x_m$ 为满度误差, 不随读数变化, 在 x_m 一定时, 它是一个固定值; n 为数字测量仪器显示的最后一位。

【例 1.1.4】 用一台 4 位的数字电压表的 5V 量程分别测量 5V 和 0.1V 电压, 已知该仪表的基本误差为 $\pm 0.01\% U_x \pm 1$ 个字, 求由于该仪表的基本误差引起的测量误差。

解: 4 位数字 5V ± 1 个字相当于 $\pm 0.001V$ 。

(1) 测量 5V 电压时,

绝对误差为 $\Delta U_1 = \pm 0.01\% \times 5 \pm 0.001 = \pm 0.0015(V)$

相对误差为 $\gamma_1 = \frac{\Delta U_1}{U_1} = \frac{\pm 0.0015}{5} \times 100\% = \pm 0.03\%$

(2) 测量 0.1V 电压时,

绝对误差为 $\Delta U_2 = \pm 0.01\% \times 0.1 \pm 0.001 = \pm 0.001(V)$

相对误差为 $\gamma_1 = \frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{\pm 0.001}{0.1} \times 100\% = \pm 1\%$

由此可知, 当测量小电压时, 应选择较小量程的仪表, 以提高测量精度。

2. 误差的分类

(1) 按误差来源分类

① 仪器误差: 仪器误差为仪器本身及其附件的电气、机械等特性不理想造成的误差。例如, 电桥中的标准电阻、天平的砝码、示波器的探极线等都含有误差。仪器、仪表的零位偏移, 刻度不准确, 以及非线性等引起的误差均属此类。

② 环境误差: 环境误差为各种环境因素与要求的条件不一致所造成的误差, 也称影响误差。如测量时, 由于温度、湿度、电源电压、电磁场、大气压强、振动、重力加速度等影响因素所引起的误差。

③ 理论误差与方法误差: 理论误差为由于测量时所依据的理论不严密或使用了不适当的简化, 用近似公式或近似值计算测量结果所引起的误差。例如, 用普通万用表测量高内阻回路的电压, 由于万用表内阻引起的误差。方法误差为由于测量方法不合理所造成的误差。

④ 人为误差: 人为误差为由于测量者的分辨能力、视觉疲劳、反应速度等生理因素的影响, 以及固有和精神上的因素而产生的一时疏忽等心理因素的影响而引起的误差。例如, 读错刻度、读错数据、使用或操作不当所造成的误差。

(2) 按误差的性质分类

① 系统误差: 系统误差为在相同的条件下, 多次测量同一个量值时, 误差的绝对值和符号保持不变或在条件改变时, 按一定规律变化的误差。产生这种误差的原因有:

- 测量仪器设计原理及制作上的缺陷。例如, 刻度的偏差, 刻度盘或指针安装偏心, 使用时零点偏移, 安放位置不当等。
- 测量时的实际温度、湿度及电源电压等环境条件与仪器要求的条件不一致等。
- 采用近似的测量方法或近似的计算公式等。
- 测量人员估计读数时, 习惯偏于某一方向或滞后倾向等原因所引起的误差。

系统误差的特点是测量条件一经确定, 误差就为一确定的数值。用多次测量取平均值的方法, 并不能改变误差的大小。系统误差的产生原因是多方面的, 但总是有规律的。因此, 应掌握其规律

性,采用一定的技术措施(如引入修正值法)以减少它的影响。

② 随机误差:随机误差为在相同的条件下,多次测量同一个测量值时,误差的绝对值和符号均已不可预定的方式变化的误差,也称偶然误差。产生这种误差的原因有:

- 测量仪器中零部件配合的不稳定或有摩擦,以其内部器件产生噪声等。
- 温度及电源电压的频繁波动,电磁场干扰,地基振动等。
- 测量人员感觉器官的无规则变化,读数不稳定等原因所引起的误差均可造成随机误差,使测量值产生上下起伏的变化。

随机误差的特点是在多次测量中,误差的绝对值的波动有一定的界限,即具有有界性;正负误差出现的机会相同,即具有对称性。随机误差的特点如图 1.1.1 所示,图中 A_0 为假设无系统误差时的实际值,当测量次数足够多时,随机误差的算术平均值趋于近零,即具有抵偿性。

根据随机误差的特点,可以通过对多次测量的值取算术平均值的方法来降低随机误差对测量结果的影响。因此,对于随机误差可以用数理统计的方法来处理。

③ 疏忽误差:疏忽误差为在一定的测量条件下,测量值明显地偏离实际值所形成的误差,也称粗大误差。产生这种误差的原因有:

- 一般情况下,它不是仪器本身固有的,主要是测量过程中由于疏忽而造成的。例如,测量者身体过于疲劳,缺乏经验,操作不当或工作责任心不强等原因造成读错刻度、记错读数或计算错误。这是产生疏忽误差的主观原因。
- 由于测量条件的突然变化,如电源电压、机械冲击等引起仪器示值的改变。这是产生疏忽误差的客观原因。

在测量及数据处理过程中,当发现某次测量结果所对应的误差特别大时,应认真判断该误差是否属于疏忽误差,如属于疏忽误差,该测量结果(常称为坏值)应舍去不用。

上述 3 种误差同时存在的情况下,可用图 1.1.2 表示。图中 A_0 表示真值,小黑点表示各次测量值 x_i , E_x 表示 x_i 的平均值, δ_i 表示随机误差, ϵ 表示系统误差, x_k 表示坏值,它远离真值 A_0 。

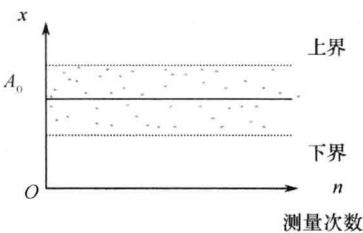


图 1.1.1 随机误差的有界性和对称性

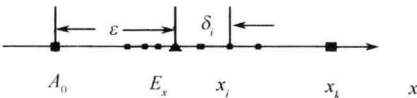


图 1.1.2 三种误差同时存在的情况

由图可知:

① 由于 x_k 的存在,将严重影响平均值 E_x ,使其失去意义。因此,在整理测量数据时,必须首先将其舍去。

② 随机误差 $\delta_i = x_i - E_x$,当舍去 x_k 以后,可以采取对多次测量数据取算术平均值的方法,以消除随机误差 δ_i 的影响。

③ 在 δ_i 消除后,系统误差 $\epsilon = E_x - A_0$ 越小,表示测量越准确。当 $\epsilon = 0$ 时,平均值就可等于真值 A_0 。

上述的划分方法只是相对的,并可以相互转化。较大的系统误差或随机误差,也可以视为疏忽误差。系统误差与随机误差之间也不存在严格的界限。例如,当电磁干扰所引起的测量误差比较小时,可以用类似随机误差取平均值的方法来处理;如果其影响有利于掌握规律时,可以按系统误差引入修正值的方法来处理。这样,掌握了误差转化的特点,就可以用数据处理的方法,减少误差的影

响,这对于测量技术是很有意义的。

(3) 按被测量随时间变化分类

① 静态误差:静态误差为在测量过程中,被测量随时间变化缓慢或基本不变时的测量误差。

② 动态误差:动态误差为被测量随时间变化很快的过程中测量所产生的附加误差。动态误差是由于测量系统(或仪表)的各种惯性对输入信号变化响应的滞后,或者输入信号中的不同频率分量通过测量系统时,受到不同程度的衰减或延时所造成的误差。

(4) 按使用条件分类

① 基本误差:基本误差为测量系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓的标准条件一般指测量系统在实验室(或制造厂、计量部门)标定刻度时所保持的工作条件,如电源电压 $220\text{V} \pm 5\%$, 温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 湿度小于 80% , 电源频率 50Hz 等。测量系统的精确度就是由基本误差决定的。

② 附加误差:当使用条件偏离规定的标准条件时,除基本误差外还会产生附加误差,例如由于温度超过标准温度引起的温度附加误差,电源波动引起的电源附加误差以及频率变化引起的频率附加误差等。这些附加误差在使用时应叠加到基本误差上。

(5) 按误差与被测量的关系分类

① 定值误差:定值误差为不随被测量变化的误差。这类误差可以是系统误差,例如直流测量回路中存在热电动势等;也可以是随机误差,如检测系统中执行电机的启动引起的电压误差等。

② 累积误差:累积误差为在整个检测系统量程内误差值 Δx 与被测量 x 成比例地变化,即

$$\Delta x = \gamma_s x \quad (1.1.14)$$

式中, γ_s 为比例系数。

1.2 误差的估计及消除方法

以上介绍了误差的表示方法和分类,下面按误差性质分类来阐述误差的估计及消除方法。

1.2.1 随机误差的估计消除方法

对于单次测量随机误差是没有规律的,需进行多次测量,用统计学方法研究其规律和处理测量数据,以减少其对测量结果的影响,并估计出其最终残留影响的大小。对随机误差的估计是在无系统误差的假设条件进行的。

1. 算术平均值原理

设对某一被测量 x 进行测量次数为 n 的等精密度测量,得到的测量值 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为随机变量。其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.1)$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,算术平均值的极限称为测量值的数学期望,也称总体平均值,用 E_x 表示,即

$$E_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (1.2.2)$$

由于随机误差 $\delta_i = x_i - E_x$,若一组测量数据中不含有系统误差和疏忽误差,则有

$$\Delta x_i = \delta_i = x_i - E_x \quad (1.2.3)$$

由随机误差的抵偿性可知,当测量次数为无穷多时, $E_x = A_0$, 则有

$$\delta_i = x_i - A_0 \quad (1.2.4)$$

随机误差的算术平均值将趋于 0,即

$$\bar{\delta} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \right) = 0 \quad (1.2.5)$$

这说明随机误差的数学期望等于 0。

对于有限次测量,当测量次数足够多时,可近似地认为

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \approx 0 \quad (1.2.6)$$

也有

$$E_x \approx A_0 \quad (1.2.7)$$

由上分析可知,当无系统误差($\epsilon = 0$)和无疏忽误差($x_k = 0$)时,测量值的数学期望可视为被测量的相对真值。即在仅有随机误差的情况下,当测量次数足够多时,测量值的平均值接近于真值。因此,通常把这时经多次等精密度测量的算术平均值称为真值的最佳估计值,即

$$\hat{A}_0 = \bar{x} = E_x \quad (1.2.8)$$

2. 残差、方差和标准差

(1) 残差

残差为各次测量值与其算术平均值之差,也称剩余误差,用 v_i 表示,即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.2.9)$$

对于残差求和

$$\sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n x_i - n\bar{x}$$

因为

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

所以

$$\sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n x_i - n\bar{x} = 0$$

这说明当 n 足够大时,残差的代数和为 0。利用这个性质可以检验所计算的算术平均值是否正确。

(2) 方差和标准差

为反映测量数据的离散程度,引入了方差。方差为当 $n \rightarrow \infty$ 时测量值与期望值之差的平方的统计平均值,用 σ^2 表示,即

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2 \quad (1.2.10)$$

因 $\delta_i = x_i - E_x$,则有

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (1.2.11)$$

对于式(1.2.11)开平方,取正平方根,得

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1.2.12)$$

式中: σ 称为测量值数列的标准差或样本标准差,简称标准差。 σ 是随机变量的一个重要统计量,也可用残差来确定,即由贝塞尔公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1.2.13)$$

δ_i 取平方的目的是不论 δ_i 是正还是负,其平方总是正值,相加的和不会等于 0,从而可以来描述随机误差的分散程度;这样在计算过程中就不必考虑 δ_i 的符号,从而带来方便。求和再平均后,使个别较大的误差在式中占的比例也较大,即标准差对较大的误差反应灵敏,所以它是表征精密度的参数。 σ 小表示测量值集中, σ 大则分散。

3. 随机误差正态分布

在大多数情况下,随机误差符合正态分布,其分布密度为

$$\varphi(x_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1.2.14)$$

$\varphi(x_i)$ 与 x_i 的函数曲线如图 1.2.1 所示。由图可见,测量值对称地分布在数学期望的两侧。

利用式(1.2.8)、式(1.2.9),由式(1.2.14)可得 v_i 的分布密度 $\varphi(v_i)$ 为

$$\varphi(v_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{v_i^2}{2\sigma^2} \right) \quad (1.2.15)$$

$\varphi(v_i)$ 与 v_i 的函数曲线如图 1.2.2 所示,由图可见, σ 越小,曲线形状越陡,随机误差的分布越集中,表明测量精度越高;反之, σ 越大,曲线形状越平坦,随机误差分布越分散,测量精度越低。

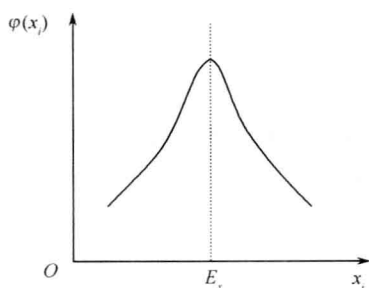


图 1.2.1 x_i 的正态分布

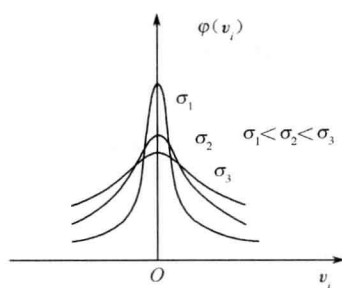


图 1.2.2 v_i 的正态分布

4. 算术平均值的标准差

在有限次等精度测量中,以算术平均值作为测量结果。如果在相同条件下对同一量值做 m 组划分,每组重复 n 次测量,每一组数据列都有一个平均值。由于随机误差的存在,这些算术平均值并不相同,围绕真值具有一定的分散性,这说明算术平均值还存在误差。对此,在要求精密度更高时,可用算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 来评价。

由概率统计学可知

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma^2 \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) = \frac{1}{n} \sigma^2 \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)$$

因为是等精密度测量,有 $\sigma_1 = \sigma_2 = \cdots = \sigma_n$, 于是

$$\sigma^2 \left[\sum_{i=1}^n x_i \right] = n \cdot \sigma^2$$

$$\text{则} \quad \sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n^2} \cdot n \cdot \sigma^2 \quad (1.2.16)$$

由式(1.2.16)可得 $\sigma_{\bar{x}}$ 的计算式为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.2.17)$$

当 n 为有限次测量时,用估算值 $\hat{\sigma}$ 代替 σ , 则

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1.2.18)$$

由式(1.2.17)、式(1.2.18)可知,算术平均值的标准差是任意一组测量样本标准差的 $1/\sqrt{n}$ 。以上结论是在每组测量数据的标准差 σ 都相等的前提得出的,它表明每组测量次数相同,做两组测量与做更多组测量的 $\sigma_{\bar{x}}$ 值相同,则可将多组测量等效为一组来计算 $\sigma_{\bar{x}}$ 。但实际测量中,各组的 $\bar{x}$ 值并不