

21世纪电气信息类教材

电子技术实验

主 编 冼月萍
副主编 陈斌 宋春宁
主 审 郑 江

华南理工大学出版社

21 世纪电气信息类教材

电子技术实验

主 编 冼月萍
副主编 陈 斌 宋春宁
主 审 郑 江

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书是作者根据多年的实验课教学经验,结合电子技术日新月异的发展及教学改革的实践编写的。本书以培养电气信息类专业人才对电子技术实验课的教学体系、教学内容、教学方法和手段的改革所提出的目标和要求为宗旨,优化、整合实验内容,充分体现实验课程独立设课的教学体系,注重培养学生的创新意识和实践动手能力。

全书共分五部分,内容包括电子技术实验基础知识(基本测量技术、电子技术实验中基本参数的测量、测量结果的处理和误差分析、电路的调试及故障检查、常用电子电路元件、器件的识别);Electronics Workbench 基本操作方法;模拟电子技术基础实验;数字电子技术基础实验;课程设计等。

本书可作为高等院校电气信息类专业本、专科教材,亦可供从事电子技术工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术实验/冼月萍主编. —广州:华南理工大学出版社,2005.9
(21 世纪电气信息类教材)

ISBN 7-5623-2262-7

I. 电… II. 冼… 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(2005)第 086418 号

总 发 行: 华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail:scut202@scut.edu.cn http://www.scutpress.com.cn

责任编辑:欧建岸

印 刷 者: 湛江日报社印刷厂

开 本: 787×960 1/16 印张:9.25 字数:186 千

版 次: 2005 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—5 000 册

定 价: 14.50 元

版权所有 盗版必究

前 言

电子技术实验是电气信息类学生的专业基础实验课,是一门实践性很强的课程。实验教学是一个十分重要的教学环节。编写本书的目的在于将电子技术教学内容与实验有机地结合起来,培养和提高学生的设计创新意识与实践动手能力。

本实验教材贯彻了既要重视基本技能、基本测试方法的训练,又要适应电子技术发展的需要的宗旨,将验证性、综合性、创新性实验融为一体,不断更新实验内容和方法。全书分为五部分:

第一部分为电子技术实验基础知识。主要介绍基本测量方法及原则;电子技术实验中基本参数的测量;测量结果的处理和误差分析;电路的调试及故障检查;常用电子电路元件、器件的识别,以便学生对器件有感性认识,掌握一定的检测器件性能的能力。

第二部分介绍 Electronics Workbench 基本操作方法。随着电子技术的飞速发展,EDA(电子设计自动化)技术在电子技术课程中的应用越来越广泛,利用 EDA 工具设计与测试电路可以提高工作效率。

第三部分为模拟电子技术实验。共有 7 个基础实验。

第四部分为数字电子技术实验。共有 10 个基础实验。

第五部分为设计性实验,也是综合性实验,通过实验进一步提高学生综合运用所学理论知识能力和实践动手能力。

为适应电子技术课程独立设课和不独立设课的不同要求,本教材每个实验都附有实验原理、参考电路,多数学生通过自学即可自行完成实验。

广西大学电气工程学院郑江、陈可中教授审阅了本书,并提出了许多宝贵意见,谨在此表示衷心的感谢。

由于编者的能力和水平有限,书中不妥和错漏之处在所难免,恳请有关专家以及广大读者给我们提出宝贵意见,以便进一步修订完善,更加符合教学要求。

编 者

2005 年 4 月

实验要求

在实验前应写出实验预习报告,实验完后要写出实验报告。报告书写要清楚,字迹要工整,电路中所画的元器件符号要符合国家标准,元件参数应符合系列化标准值,所有曲线必须画在坐标纸上。

1. 对实验预习报告的要求

(1) 验证性实验

①首先弄清实验目的,熟悉所用仪器设备,根据模拟电子技术课程和数字电子技术课程所学的理论知识,弄清电路的工作原理及各元器件的作用。根据器件手册查出所用器件的外部引脚排列、主要参数、逻辑功能等。

②认真预习实验内容、实验步骤和测试方法,设计实验数据记录表格等。

③回答有关的思考题。

(2) 综合性实验

①在弄清实验目的、实验内容及要求的基础上,列出本次实验所需仪器、仪表等设备。

②拟定详细的实验步骤,包括调试步骤和测试步骤,设计好实验数据记录表格。

(3) 设计性实验

①根据教师对本次实验提出的要求,结合自己学习的实际情况,认真选择实验题目。

②根据题目要求,设计或选用实验电路和测试电路。设计电路时,计算要正确,步骤要清楚,画出的电路要整洁,元器件符号要标准化,参数要符合系列化标准值。

③列出本次实验所用元器件、仪器、仪表和器材的详细清单,在实验前一天交实验室。

④拟定详细的实验步骤,包括实验电路的调试步骤和测试步骤。设

计好实验数据记录表格。

2. 对实验报告的要求

①认真整理和处理实验数据,并列出表格或画出曲线。

②对实验结果进行理论分析,找出产生误差的原因,提出减少实验误差的措施。

③详细记录组装、调试和测试过程中出现的故障和问题,进行故障分析和说明故障排除的过程及方法。

④认真写出对本次实验的体会和意见,以及改进实验的建议。

目 录

第一部分 电子技术实验基础知识	1
第一章 基本测量技术	1
第二章 电子技术实验中基本参数的测量	2
第三章 误差分析与测量结果的处理	7
第四章 电路的调试及故障检查	12
第一节 电路的调试	12
第二节 检查与排除电路故障的一般方法	15
第五章 常用电子电路元件的识别	16
第一节 电阻器、电容器的简单识别	16
第二节 半导体器件的简单识别	19
第二部分 Electronics Workbench 基本操作方法	23
第一节 EWB 的主窗口	23
第二节 EWB 的基本操作方法	24
第三节 仿真实例	33
第四节 Electronics Workbench 仿真实验题目	39
第三部分 模拟电子技术实验	40
实验一 常用电子仪器的使用	40
实验二 晶体管共射极单管放大器	50
实验三 负反馈放大器	56
实验四 模拟运算电路	60
实验五 RC 正弦波振荡器	64
实验六 直流稳压电源	66
实验七 晶闸管可控整流电路	70
第四部分 数字电子技术实验	73
实验一 认识常用实验设备和集成门电路	73
实验二 组合逻辑电路实验分析	79
实验三 组合逻辑电路的设计与测试	81
实验四 译码器及其应用	84
实验五 数据选择器及其应用	88
实验六 触发器的功能测试	92

实验七 计数器及其应用	97
实验八 555 集成定时器及其应用	102
实验九 智力竞赛抢答器的原理及调试方法	106
实验十 数控步进电机	108
实验十一 计数和定值控制电路	112
第五部分 设计性实验	117
实验一 晶体管共射极单管放大器的设计	117
实验二 负反馈放大器的设计	118
实验三 模拟集成运算放大器的设计	119
实验四 RC 正弦波振荡器的设计	120
实验五 组合逻辑电路的设计	121
实验六 用中规模组合逻辑器件设计组合逻辑电路	122
实验七 设计一个异步四位二进制可逆计数器	123
实验八 设计任意进制计数器	124
实验九 设计一个串行累加器	124
实验十 拔河游戏机的设计	126
实验十一 运用虚拟电子实验平台进行设计	127
附录 部分集成电路管脚图	136
参考文献	138

第一部分 电子技术实验基础知识

第一章 基本测量技术

一、测量方法的分类

①直接测量。这是一种可以直接得到被测量值的测量方法。例如用万用表测量稳压电源的工作电压。

②间接测量。是利用直接测量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 ,一般通过分别测量输出电压 U_o 与输入电压 U_i 然后再计算出来: $A_v = U_o/U_i$ 。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的结果更准确的场合。

③组合测量。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,再求解联立方程得出被测量的大小。

④直读测量法。是直接从仪器仪表的刻度线(或显示)上读取测量结果的方法。如用电流表测量电流就是直读法。

⑤比较测量法。是将被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法。

二、选择测量方法的原则

在选择测量方法时,应首先研究被测量对象的性质及需要的测量精确程度、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、被测设备和元器件。下面举例说明。

例 1 在图 1-1 中,用示波器或数字电压表测量电路的内部电压,设被测电路的输出阻抗为 $Z_s = 200\text{k}\Omega$,内部电压为 $\hat{V} = 10\text{V}$ 。用输入阻抗为 $Z_m = 10\text{M}\Omega$ 的示波器或者数字电压表测量时,测量点 A、B 间的电压 $U = 10\text{V}$;而用 $20\text{k}\Omega/\text{V}$ 的万用表直流电压 10V 挡测量时,其值为 $U = 5\text{V}$ 。两者为何相差这么大?

分析如下:

由于万用表的内阻

$$R_v = 20\text{k}\Omega/\text{V} \times 10\text{V} = 200\text{k}\Omega$$

显然, R_v 与 Z_s 对 $\dot{V}$ 的分压就是电压表的示值 U_v 。因此有

$$U_v = \dot{V} R_v / (R_v + Z_s) = 200 \times 10 / (200 + 200) = 5(\text{V})$$

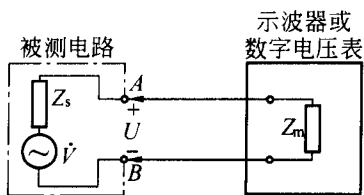


图 1-1 用高输入阻抗仪器测量电压

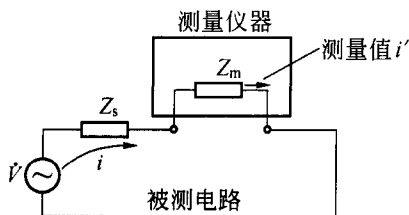


图 1-2 用低输入阻抗仪器测量电流

当 $Z_m \gg Z_s$ 时, $U = \dot{V}$, 此时误差非常小。如果 $Z_m = Z_s$, $U = \dot{V}/2$, 指示值为实际电压的 $1/2$ 。因此, 在这种情况下, 必须使测量仪器的输入阻抗比被测电路的输出阻抗大很多。另外, 一般 Z_m 和 Z_s 是频率的函数(通常是频率越高, 阻抗越低), 在高频测量时必须注意这一点。

例 2 测量仪器和被测电路串联测量电流时, 一测量电流电路如图 1-2 所示。若未接 Z_m 前的真值电流为 i , 串接 Z_m 后电流为 i' , 则

$$i' = \frac{i}{1 + \frac{Z_m}{Z_s}} \quad i = \frac{\dot{V}}{Z_s}$$

若 $Z_m \ll Z_s$, 则 $i' \approx i$, 测量值近于真值。如果 $Z_m = Z_s$, 则 $i' = i/2$, 测量指示值为真值的 $1/2$ 。因此, 在这种情况下, 测量仪器的输入阻抗应远小于被测电路的输出阻抗。

由此可见, 测量仪器的阻抗会对测量结果产生较大的影响, 在实验中应给予足够的重视。

第二章 电子技术实验中基本参数的测量

电子技术实验离不开对某些电量的测量。测量是为了确定被测量对象的量值而进行的实验过程。在这个过程中, 人们借助于专门的设备, 把被测量对象直接或间接地与同类已知单位进行比较, 取得用数值和单位共同表示的测量值。由于受篇幅所限, 本章仅介绍几个基本参数的测量, 其他有关电参量的测量, 请参阅有关资料。

一、电压的测量

在电子领域中,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,各种电路的工作状态如饱和、截止等,通常以电压的形式反映出来,不少测量仪器也都用电压来表示被测电参数。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可以说是必不可少的。

电压的测量方法主要有电压表测量法和示波器测量法两种。

用电压表测量法进行测量时,首先有一个电压表的选择问题。选择电压表时,通常要根据被测电压的特点(如频率的高低、幅度的大小等)和被测电路的状态(如内阻的数值等)来考虑,一般以电压表的使用频率范围、测量电压范围和输入阻抗的高低作为选择电压表的依据。对电压表的基本要求是:

①输入阻抗要高。

②测量交流电压时,要有一定的使用频率范围。一般交流电表,如万用表的交流挡只适宜于测几十赫到几千赫的交流电压,而毫伏表能测 1Hz 到 2MHz 的交流电压。

③要有较高的精度。

1. 直流电压的测量

电子电路中的直流电压一般分为两大类,一类为直流电源电压,它具有一定的直流电动势 E 和等效内阻 R_0 ,如图 1-3a 所示。另一类是直流电路中某元器件两端的电压差或各点对地的电位,如图 1-3b 所示。图 1-3b 中 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_3 为元器件两端电压, U_2 、 U_4 既是对地电位又是元器件两端电压。

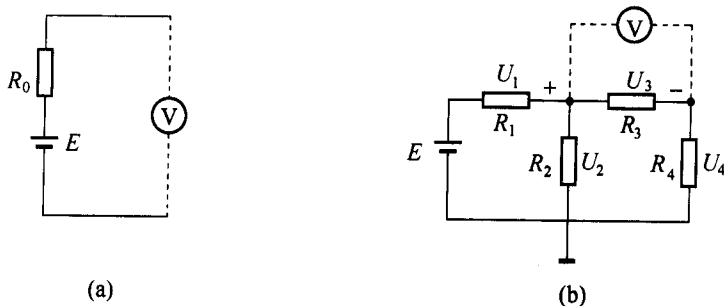


图 1-3 两种直流电压

直流电压的测量方法大体上有直接测量法和间接测量法两种。

(1) 直接测量法

将电压表直接并联在被测支路的两端,如图 1-3b 所示,如果电压表的内阻无穷大,则电压表的示数就是被测两点间的电压值。实际电压表的内阻不可能无穷大,因此直接测量法必定会影响被测电路,造成测量误差。测量时还应注意电压表的极性,它影响到测量值与参考极性之间的关系,也影响模拟式电压表指针的偏转方向。

(2)间接测量法

如图 1-3b 所示,若要测量 R_3 两端的电压,可以分别测出 R_3 对地的电位 U_2 和 U_4 ,然后利用公式 $U_3 = U_2 - U_4$ 求出要测量的电压值。

2. 交流电压的测量

在电子技术实验中,交流电压大致可分为正弦和非正弦交流电压两类。一个交流电压的大小可用峰值(或峰峰值)、平均值、有效值来表征。一般用毫伏表测量正弦波电压,非正弦波电压的测量只能借助于示波器了。

(1)峰值 U_p

峰值是交变电压在所观察的时间或一个周期内所达到的最大值,记为 U_p ,如图 1-4 所示。峰值是从参考零电平开始计算的,有正峰值 U_{p+} 和负峰值 U_{p-} 之分。正峰值与负峰值一起包括时称为峰峰值 U_{pp} 。常用的还有振幅 U_m ,它是以直流电压为参考电平计算的。因此,当电压中包含直流成分时, U_p 与 U_m 是不相等的,只有纯交流电压时才有 $U_p = U_m$ 。

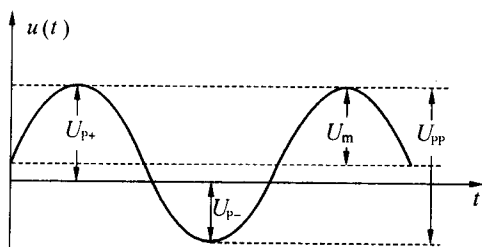


图 1-4 交流电压的峰值与幅度

(2)平均值

平均值在数学上定义为

$$\overline{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

原则上,求平均值的时间为任意时间。对周期信号而言, T 为信号周期。

根据以上的定义,若包含直流成分 U_- ,则 $\overline{U} = U_-$;若仅含有交流成分, $\overline{U} = 0$ 。这样对纯粹的交流电压来说,由于 $\overline{U} = 0$,将无法用平均值来表征它的大小。由于在实际测量中,总是将交流电压通过检波器变换成直流电压后再进行测量的,因此平均值通常是指检波后的平均值。根据检波器的不同又可分为全波平均值和半波平均值。一般如不加特别说明,平均值就是指全波平均值,即

$$\overline{U} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

(3)有效值 U

一个交流电压和一个直流电压分别加在同一电阻上,若在相同时间内它们产生的热量相等,则交流电压的有效值 U 等于该直流电压值,即

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

作为交流电压的一个参数,有效值比峰值、平均值用得更为普遍。当未特别指明时,交流电压的量值均指有效值。各类交流电压表的示值,除特殊情况外,都是按正弦波的有效值来刻度的。

测交流电压首先遇到的是如何选择电压表的问题。测直流或者低电压时,只需考虑使电压表的输入电阻足够大;测高频电压时除要求电压表有足够大的输入电阻外,还要求其输入电容足够小。

测量交流电压始终要注意仪器共地。这里所说的“地”是指仪器或线路的公共端。当两个或多个电子仪器通过交流电源供电时,就需要将这些仪器各自的公共端接在一起,以使干扰最小。因此,在测量交流电压时为了保持“共地”原则,总是测量电位而不是直接测量两点的电压。例如,对于图 1-5 所示的电路,应该分别测量 V_s 和 V_i ,然后通过计算 $V_s - V_i$ 得到 V_{R_p} 。

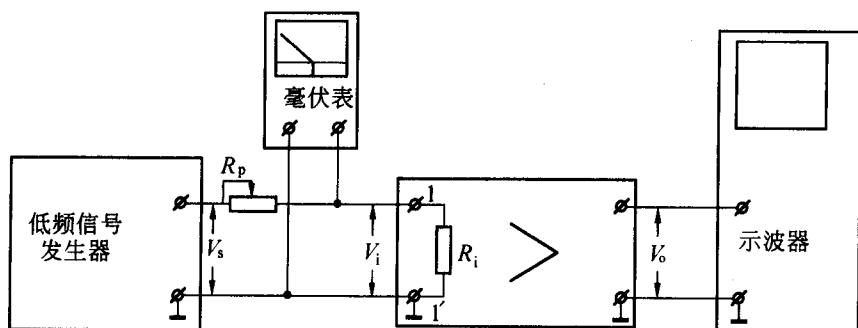


图 1-5 输入电阻测量

被测信号必须处在电压表可以使用的频率范围内和可以测量的电压范围内。另外,电压表接入被测电路之后,必定影响被测电路的工作状态,为了把这种影响限制在允许的范围内,应对电压表的输入阻抗提出一定的要求。

二、阻抗的测量

1. 输入电阻的测量

测量输入电阻既可采用后面将要讲到的实验二的方法也可采用半电压测量法。所谓放大器的输入电阻,是指从放大器输入端 1、1' 向右看进去的等效电阻。

测量时也可在信号源与放大器之间串入一个可变电阻 R_p , 如图 1-5 所示。当 R_p 为零时, 测出输出电压 V_o 。然后增大 R_p 使 V_o' 为 $\frac{V_o}{2}$ 时, 则 $R_i = R_p$ 。

2. 输出电阻的测量

测量输出电阻既可采用实验二的方法也可采用半电压测量法, 如图 1-6 所示。所谓放大器的输出电阻, 是指从放大器输出端 2、2' 向左看进去的等效电阻。测量时, 可以把放大器输出端等效成一个理想电压源与输出电阻 R_o 串联。

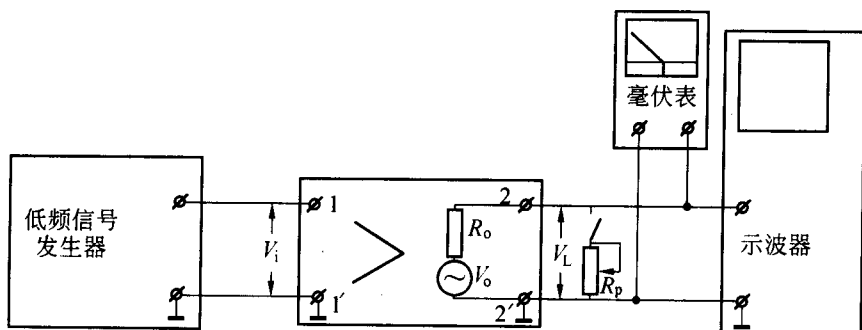


图 1-6 输出电阻测量

①使负载开路, 即拆去图 1-6 中的 R_p , 由低频信号发生器输出一个适当电压的中频信号作为放大器的输入信号, 用毫伏表测量这时放大器的输出电压 V_o (开路电压)。

②在 2、2' 之间并上可变电阻器 R_p 作为负载, 调节 R_p 使放大器的输出电压下降 $V_o/2$ 即 $V_o' = V_o/2$ 时, 根据全电路欧姆定律可知, 此时的可变电阻阻值就与放大器的输出电阻 R_o 相等。

三、增益及幅频特性测量

增益是网络传输的重要参数。一个有源二端网络的电流、电压、功率增益 (或放大倍数) 可用下式表示:

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \quad A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad A_p = \frac{P_o}{P_i}$$

二端网络的幅频特性, 是一个与频率有关的量, 表征网络输出电压与输入电压的比值随频率变化的特性。下面简单介绍测量幅频特性的方法。

测量电路如图 1-7 所示, 通常用毫伏表或示波器监视, 由低频信号发生器输出一个电压幅度适当的中频信号作为放大器的输入信号 V_i , 保持输入信号 V_i 为常数, 改变输入信号频率, 测出相应的不失真 (用示波器观察) 的输出电压 V_o 的

值,计算电压增益 $A_u = V_o/V_i$,即可得到被测网络的幅频特性。

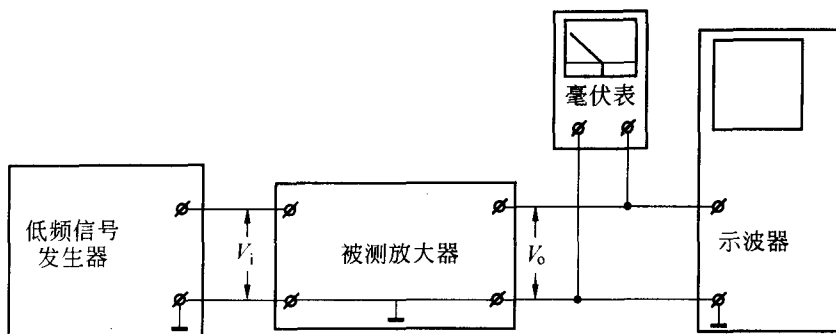


图 1-7 幅频特性测量

第三章 误差分析与测量结果的处理

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,测量结果和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,研究如何采取措施减少误差,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。

一、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

使用误差也称操作误差,指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“ $\perp$ ”、“ $\square$ ”、“ $\angle 60^\circ$ ”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° 角使用。使用时应按规定放置万用表,否则会带来误差。至于用欧姆挡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

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,而不计电表本身内阻的影响,就会产生误差。减小误差的方法是采用合理的测量线路及理论。

2. 测量误差的分类

测量误差按性质和特点可分为系统误差、随机误差和粗差三大类。

(1)系统误差

在规定的测量条件下,对同一量进行多次测量时,如果误差值保持恒定或按某种确定规律变化,则称这种误差为系统误差。例如,电表零点不准,温度、湿度、电源电压等变化造成的误差便属于系统误差。

系统误差产生的原因有:

①工具误差:测量时所用的装置或仪器仪表本身的缺点引起的误差。

②外界因素影响误差:由于没按照技术要求使用测量工具,或由于周围环境不合乎要求而引起的误差。

③方法误差或理论误差:由于测量方法不完善或测量所用理论根据不充分引起的误差。

④人员误差:由于测量人员的感官、技术水平、习惯等个人因素不同引起的误差。

(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,大小和符号无规律地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,然后取其算术平均值以达到减小误差的目的。

(3)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、粗心,导致读数不正确引起的。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,然后去除。

二、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。高一级标准仪器的示值减去测量仪器的示值所得的差值,就是被测量量的修正值。实际上,修正值就是绝对误差,只是符号相反。

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

利用修正值便可得被测量的实际值:

$$A = X + C$$

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

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

给出修正值的方式可以是曲线、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,测量时测量仪器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量的准确程度。例如,测 100V 电压时, $\Delta X_1 = +2\text{V}$,测 10V 电压时, $\Delta X_2 = 0.5\text{V}$,虽然 $\Delta X_1 > \Delta X_2$,但是实际 ΔX_1 只占被测量量的 2% ,而 ΔX_2 却占被测量量的 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实际相对误差是用绝对误差 ΔX 与被测量量的实际值 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示值相对误差是用绝对误差 ΔX 与仪器给出值 X 之比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

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