

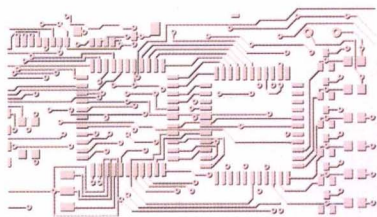


普通高等教育“十二五”规划教材

电子测量基础

DIANZI CELIANG JICHU

主编 胡 玫 王永喜
主审 马宏锋



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

普通高等教育“十二五”规划教材

电子测量基础

主 编 胡 玫 王永喜
主 审 马宏锋



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书以测量对象为中心,介绍各种测量仪器的工作原理和使用方法。内容包括电子测量的基本概念,测量误差分析与处理,主要物理量(电压、频率、时间、相位)、元件参数、阻抗的基本测量原理、方法以及常规仪器(示波器、信号发生器、电子计数器)的工作原理和操作方法,并对电路的频率特性、数据域测量和虚拟仪器测试技术做了介绍。本书还选择了5个实验,使用电子测量仪器对各种被测对象进行测量。

本书可作为电子信息工程、应用电子技术、通信工程、检测技术、测控技术与仪器等专业的教材,也可作为从事电类专业的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量基础 / 胡玫,王永喜主编. —北京:北京邮电大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5635-4424-0

I. ①电… II. ①胡…②王… III. ①电子测量—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 169112 号

书 名: 电子测量基础

著作责任者: 胡 玫 王永喜 主编

责任编辑: 刘 颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京睿和名扬印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 13

字 数: 335 千字

版 次: 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4424-0

定 价: 28.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

高校的电类专业基本上都开设了电子测量类的课程。该课程是电类专业的专业基础课程,通常建立在“电路分析基础”“信号与系统”“模拟与数字电路”等基础课程内容之上,它把电子、计算机、通信与控制等电子信息专业的知识综合应用在测量科学技术之中,形成了一个独具特色的学科。由于该课程综合性强、实践性突出,并且涉及现代常用仪器的典型测量技术,因此通过本课程的学习,不仅使学生获得电子测量技术及仪器方面的基础知识,掌握一门通用技术,而且培养了学生的综合应用能力与实践能力。

本书对测量原理的讲解力求深入浅出、通俗易懂,突出基本概念;对测量方法侧重归纳比较,突出简明实用;对测量仪器仪表讲清工作原理,不过多地涉及内部具体的单元电路,突出常规、典型。

为了满足新形势下的教学需求,参照各院校相关专业“电子测量”课程的教学大纲及学时要求,组织编写了《电子测量基础》这本书。本书共 10 章,内容包括电子测量的基本概念,测量误差分析与处理,主要物理量(电压、频率、时间、相位)、元件参数、阻抗的基本测量原理和方法以及常规仪器(示波器、信号发生器、电子计数器)的工作原理和操作方法,并对电路的频率特性、数据域测量和虚拟仪器测试技术做了介绍。本书还选择了 5 个实验,使用电子测量仪器对各种被测对象进行测量训练。

本书第 1~4,6 章由胡玫编写,第 5,7~9 章由王永喜编写,第 10 章及各章习题由祁鸿芳编写。全书由胡玫负责统稿、定稿。马宏锋教授审阅了全稿,提出了许多宝贵的意见,谨致以衷心的感谢!

由于编者学识水平有限,书中定会有许多不足或错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电子测量基础	1
1.1 电子测量的内容和方法	1
1.2 电子测量仪器概述	4
1.3 测量误差分析	7
1.4 测量结果处理方法	13
习题 1	15
第 2 章 信号发生器	16
2.1 概述	16
2.2 低频信号发生器	19
2.3 高频信号发生器	23
2.4 函数信号发生器	28
2.5 频率合成信号发生器	31
2.6 脉冲信号发生器	36
习题 2	38
第 3 章 电子示波器	39
3.1 概述	39
3.2 示波管	40
3.3 通用示波器	44
3.4 双踪示波器和双线示波器	51
3.5 高速和取样示波器	57
3.6 数字存储示波器	59
习题 3	63
第 4 章 电压测量	64
4.1 概述	64
4.2 模拟式电压表	68
4.3 数字式电压表	75

4.4 数字多用表	79
习题 4	86
第 5 章 时间频率测量	87
5.1 概述	87
5.2 电子计数器	90
习题 5	99
第 6 章 电子元件参数测量	100
6.1 概述	100
6.2 电桥法测阻抗	102
6.3 谐振法测阻抗	107
6.4 阻抗的数字化测量	113
6.5 二极管和三极管的测量	115
6.6 晶体管特性图示仪	117
习题 6	121
第 7 章 电路频率特性的测量	123
7.1 概述	123
7.2 频率特性测试仪	124
7.3 频谱分析仪	133
习题 7	138
第 8 章 数据域测量	139
8.1 概述	139
8.2 数据域测量技术及仪器	143
8.3 逻辑分析仪	148
习题 8	158
第 9 章 虚拟仪器测试技术	159
9.1 Multisim 10 软件介绍	159
9.2 Multisim 10 基本操作	166
9.3 Multisim 10 虚拟仪器仪表的使用	170
9.4 Multisim 10 仿真分析方法	177
9.5 Multisim 10 仿真实例	183
习题 9	188
第 10 章 电子测量实验	189
实验一 低频信号发生器的使用	189

实验二 数字万用表的使用·····	191
实验三 双踪示波器的使用·····	193
实验四 计算机仿真电路的测量 I ·····	194
实验五 计算机仿真电路的测量 II ·····	196
参考文献·····	198

第 1 章

电子测量基础

测量是人类认识、改造世界的重要手段。人类对于天体的认识、时间的计量、新元素的发现、山川的丈量等都需要进行各种各样的测量。19 世纪末 20 世纪初无线电电子学的诞生和发展,为经典的测量学提供了崭新的手段,并出现了电子测量这一重要分支。本章主要介绍电子测量的意义、内容、方法、测量误差的表示和误差的处理方法。

知识要点:

- ◇ 理解电子测量的意义、内容、方法;
- ◇ 了解电子测量仪器的功能、主要技术指标;
- ◇ 掌握测量误差的表示、处理方法和测量结果的处理方法。

1.1 电子测量的内容和方法

1.1.1 电子测量的意义

测量是人类对自然界的客观事物取得数值的一种认识过程。在这一过程中,人们借助专门设备,通过实验方法,获得以所采用的测量单位表示的被测量的数值。

认识一个新事物往往从“比较”开始,测量过程亦是如此。例如,用体温计测量人体正常体温,测量结果是 37.0°C ,那么测量的过程就是将人体体温(被测量)与体温计(标准量)进行比较。所以测量被定义为:将被测量与同类标准量进行比较,并确定它们之间数值关系的过程。被测量的量值包括数值(大小及符号)和用于比较的标准量的单位名称,如一个电阻的阻值为 $100\ \Omega$,一段电路的电压为 $8\ \text{V}$ 等。

电子测量是测量学的一个重要分支,是测量技术中最先进的技术之一。从广义上讲,以电子技术为手段进行的测量都称为电子测量;从狭义上讲,电子测量是指对各种电参量和电性能的测量,即本课程研究的范畴。本课程中电子测量包含的主要内容如下:

(1) 电能量的测量

包括各种电压、电流、电功率的测量。

(2) 电信号特征的测量

包括频率、时间、周期、相位差、失真度等参数的测量。

(3) 电子元件参数的测量

包括电阻、电感、电容、阻抗、品质因数、晶体管等参数的测量。

(4) 电子设备的性能测量

包括增益、衰减、灵敏度、频率特性、噪声指数等参数的测量。

以上各种待测电参数中,电压、频率、时间、相位、阻抗的测量具有重要意义,是其他参数测量的基础。例如,晶体管构成的放大电路的放大倍数的测量实际上是其输入、输出电压的测量;脉冲信号波形参数的测量归结为电压和时间的测量;许多情况下电流测量是不方便的,就以电压测量代替。由于时间和频率测量具有其他参数测量所不可比拟的精确性,因此将其他参数的测量转换为时间或频率的测量方法越来越受到关注。

科学研究和生产实践中,常常需要采用电子设备对各种非电量进行测量。利用传感器将非电量变换成电信号,然后再用电子设备进行测量。这种方法方便、快捷、准确,是其他测量方法所不能替代的。随着科学技术的快速发展,电子测量技术被广泛应用于农业、工业、医疗、天文、地质、军事等领域,如核反应堆内的温度测量、电子血压计、心电图机、飞船发射过程中的运行参数测量、精确制导导弹等。电子测量技术的不断发展,不仅标志着测量技术的进步,而且对整个科学技术的发展和人类社会的进步有积极的推动作用。因此从一定意义上说,电子测量的水平是衡量一个国家科技水平的重要标志之一。

1.1.2 电子测量的特点

与其他测量方法和测量仪器相比,电子测量和电子测量仪器具有以下的特点。

(1) 频率范围宽

电子测量中的待测参数,其频率覆盖范围极宽,低至 10^{-5} Hz以下,高至 10^{12} Hz以上。当被测对象的工作频率范围很宽时,早期的电子测量往往要用几种工作在不同频段的仪器进行衔接。近年来,由于采用一些新技术、新的宽频段元器件、新电路以及新工艺等,电子测量技术正朝着宽频段以至全频段方向发展。

(2) 量程宽

量程是测量范围的上限值与下限值之差。由于被测量的数值相差很大,因而电子测量仪器应有足够宽的量程。例如,一款中档次的国产数字频率计,测频范围为10 Hz~1 000 MHz,量程达8个数量级,而用于测量频率的电子计数器的量程可以达到17个数量级。

(3) 准确度高

电子测量仪器的准确度高。以时间测量为例,由于采用原子频标和原子秒作为基准,测量精度高达 10^{-14} ~ 10^{-13} 数量级。

(4) 测量速度快

电子测量是通过电磁波的传播和电子的运动来工作的,加之现代测试系统中高速计算机的应用,使得电子测量在测量速度、结果的传输和处理方面,都以极高的速度进行,这也是电子测量技术广泛应用于现代科技各个领域的重要原因。

(5) 易于实现遥测

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器实现遥测、遥控。对于远距离或人体难以接近的地方的信号测量,具有特殊的意义。这也是电子测量在各门学科得到广泛应用的又一重要原因。

(6) 易于实现测量过程的自动化和测量仪器的智能化

由于大规模集成电路和微型计算机的应用,使电子测量出现了崭新的局面。例如,测量过程中能够实现程控、遥控、自动转换量程、自动调节、自动校准、自诊断故障和自恢复,对于测量的结果进行自动记录,自动进行数据运算、分析和处理。

1.1.3 电子测量的方法

为了获得测量结果,采用的各种手段和方式称为测量方法。测量方法的选择正确与否,直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量工作的经济性和可行性。根据测量中采用的测量方法的不同,电子测量有不同的分类方法,下面介绍常见的几种分类方法。

1. 按测量手段分类

(1) 直接测量

用预先按已知标准定度好的测量仪器对某一未知量直接进行测量,从而得出未知量的数值,这类测量称为直接测量。例如,用电子电压表测量某放大器输出交流电压为 1.2 V,用电式电流表测得某晶体管集电极电流为 2.1 mA,等等。但直接测量并不意味着就是用直读仪表进行测量。许多比较式仪器(如电桥、电位差计及外差式频率计等)虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量值,但因参与测量的对象就是被测量本身,故仍属直接测量。

直接测量的优点是过程简单迅速,是工程技术中广泛采用的测量方法。

(2) 间接测量

利用直接测量的量与被测量之间的函数关系(可以是公式、曲线或表格等),间接得到被测量值的测量方法。例如,需要测量电阻 R 上消耗的直流功率 P ,可以通过直接测量电压 U 、电流 I ,而后根据函数关系 $P=UI$,经过计算,“间接”获得功率 P 。

间接测量费时费事,常用在直接测量不方便,或间接测量的结果较直接测量更为准确,或缺少直接测量仪器等场合。

(3) 组合测量

在某些测量中,被测量与几个未知量有关,如测量一次无法得出完整的结果,则可以通过改变测量条件测量多次,然后根据被测量与未知量之间的函数关系列出一组方程,通过解这组方程求出各未知量,称为组合测量,如电阻器电阻温度系数的测量。已知电阻器阻值 R_t 与温度 t 之间满足关系:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-1)$$

式中, R_{20} 是 20℃ 时的电阻值,一般为已知量。 α 和 β 为电阻的温度系数, t 为环境温度。为了获得 α 、 β 值,可以在两个不同的温度 t_1 、 t_2 下(可由温度计直接测得)测得相应的电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} ,代入式(1-1)得到方程组

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1-2)$$

求解方程组(1-2),就可以得到 α 、 β 值。

2. 按被测量的性质分类

按照被测量的性质,测量可以作如下分类。

(1) 时域测量

时域测量是指以时间为函数的量(如随时间变化的电压、电流)的测量。典型的例子有用示波器观察脉冲信号的上升沿、下降沿等脉冲参数以及动态电路的暂态过程等。

(2) 频域测量

频域测量是指以频率为函数的量(如电路的增益、相位等)的测量。这些测量可通过频率特性和频谱特性等方法进行测量。

(3) 数据域测量

数据域测量是对数字量的测量。数据域测量可以同时观察多条数据通道上的逻辑状态或显示某条数据线上的时序波形,也可以用计算机分析大规模集成电路芯片的逻辑功能,如用逻辑分析仪分析微处理器的地址线 and 数据线上的信号。

(4) 随机域测量

随机域测量是指对随机信号的测量,如噪声、干扰信号的测量。这是目前较新的测量技术。

1.2 电子测量仪器概述

利用电子技术测量各种电量或非电量的测量仪器称为电子测量仪器。电子测量仪器种类繁多。根据测量精度的要求不同,有高精度、普通和简易三种;按显示方式不同,有模拟式和数字式两大类;根据用途分类,有专业用仪器和通用仪器。专业用仪器是指各专业中测量特殊参量的仪器,如机械行业用的超声波探伤、医疗行业用的心电图仪等;通用示波器则用于测量电路和电子元件及电路调试和维修。本书主要介绍用于电子和通信类的通用仪器。

1.2.1 电子测量仪器的功能

各类测量仪表一般具有物理量的变换、信号的传输和测量结果的显示三种最基本的功能。

1. 变换功能

各种被测物理量中很大一部分是非电量,如热工参数中的温度、压力、流量;机械参数中的转速、力、尺寸等。对这些非电量的测量,在工程中通过传感器转换为相关的电压、电流等的电量,然后再通过对电量的测量,得到被测物理量。

2. 传输功能

在遥测遥控系统中,现场测量结果经变送器处理后,需经过较长距离的传输才能送到测试终端和控制台。不管采用有线还是无线方式,传输过程中造成的信号失真和外界干扰等问题都会存在。因此,现代测量技术和测量仪器都必须认真对待测量信息的传输问题。

3. 显示功能

测量结果必须以某种方式显示出来才有意义。因此,任何测量仪器都必须具备显示功能。例如,模拟式仪表通过指针在仪表度盘上的位置显示测量结果,数字式仪表通过数码管、液晶或阴极射线显示测量结果。除此以外,一些先进的仪器如智能仪器等还具有数据记录、处理及自检、自校、报警提示等功能。

1.2.2 电子测量仪器的分类

电子测量仪器的分类方法有很多种,现介绍按其功能的分类。

1. 电平测量仪器

包括各种模拟式电压表、毫伏表、数字式电压表等。

2. 电子元件参数测量仪

这类仪器有Q表、万能电桥、RLC测量仪、晶体管特性图示仪、模拟或数字集成电路测试仪等,用于测量电子元件(如电阻、电容、电感和晶体管等)的电参数、显示特性曲线等。

3. 信号发生器

信号发生器作为测试用信号源,能根据需要提供各种频率、各种功率和各种波形的信号。

4. 信号分析仪

这类仪器主要用来观测、分析和记录各种电量的变化,能完成包含时域、频域和数据域的分析,如各种示波器、波形分析仪、频谱分析仪和逻辑分析仪。

5. 时间、频率和相位测量仪器

这类仪器用于测量周期性信号的频率、周期和相位,有各种频率计、相位计及各种时间、频率标准等。

6. 网络参数测量仪器

这类仪器有频率特性测试仪(扫频仪)、阻抗测量仪及网络分析仪,主要用于测量电气网络的频率特性、阻抗特性和噪声特性等。

7. 数据域测试仪器

数据域测试仪器用于分析数字系统中以离散时间或事件为自变量的数据流的仪器。它能完成对数字逻辑电路和系统中的实时数据流或事件的显示,并通过各种控制功能实现对数字系统的软、硬件故障分析和诊断,如逻辑分析仪。

8. 电波特性测试仪

这类仪器有测试接收机、场强计、干扰测试仪等,用于测量电波传播、电场强度、干扰强度等。

9. 虚拟仪器

通过应用程序将通用计算机和必要的数据采集硬件结合起来,在计算机平台上创建的一台仪器。用户可自行定义其功能、操作面板,实现数据的采集、分析存储和显示,如虚拟示波器,在计算机显示器上定义一台时钟等。

1.2.3 电子测量仪器的主要技术指标

从获得的测量结果角度评价测量仪表的性能,主要包括以下几个方面。

1. 精度

精度是指测量仪器的读数或测量结果与被测量真值相一致的程度。精度高表明误差小;

精度低表明误差大。因此,精度不仅用来评价测量仪器的性能,也是评定测量结果最主要最基本的指标。精度又可用精密度、正确度和准确度三个指标加以表征。

(1) 精密度

精密度说明仪表指示值的分散性,表示在同一测量条件下对同一被测量进行多次测量时,得到的测量结果的分散程度。它反映了随机误差的影响。精密度越高,意味着随机误差越小,测量结果的重复性好。

(2) 正确度

正确度说明仪表指示值与真值的接近程度,反映了系统误差的影响。

(3) 准确度

准确度是精密度和正确度的综合反映。准确度高说明精密度和正确度都高,也就意味着系统误差和随机误差都小,因而最终测量结果的可信赖度也高。

2. 稳定性

稳定性通常用稳定度和影响量两个参数来表征。

稳定度也称为稳定误差,是指在规定的区间,其他外界条件恒定不变的情况下,仪表示值变化的大小。造成这种示值变化的原因主要是仪器内部各元器件的特性、参数不稳定和老化等因素。

由于电源电压、频率、环境温度、湿度、气压、振动等外界条件变化而造成仪表示值的变化,称为影响量或影响误差,一般用示值偏差和引起该偏差的影响量一起表示。

3. 分辨力

分辨力是指测量仪器能检测出的被测参量最小变化的能力。一般说来,数字式仪器的分辨力是读数装置最后一位的一个数字,模拟式仪器的分辨力是读数装置的最小刻度的一半。显然,仪器的绝对误差不可能小于仪器的分辨力。

4. 有效范围和动态范围

测量的有效范围是指仪器在满足误差要求的情况下,所能测量的最大值与最小值之差,习惯上称为仪器的量程。量程的大小是仪器通用性的重要标志。为了覆盖足够宽的量程,通用仪器常需分挡,一般按1-2-5,1-3-10进位的序列划分挡级。仪器量程的下限不可能小于它的分辨力;同时,仪器的分辨力可能随量程的换挡而变化。

动态范围是仪器在不调整量程挡级(包括细调)和满足误差要求的情况下,容许被测物理量的最大相对变化范围。

5. 测试速率

测试速率是指单位时间内仪器读取被测量数值的次数。直读式仪器的测试速率高于非直读式仪器,数字式仪器的测试速率远远高于指针式仪器。

6. 可靠性

可靠性指仪器在规定时间内和规定条件下,满足其技术条件、规定性能的能力。可靠性是反映产品是否耐用的一项综合性质量指标。

1.3 测量误差分析

1.3.1 误差

1. 真值 A_0

一个物理量在一定条件下所呈现的客观大小或真实数值称为真值。要得到真值,必须利用理想的量具或测量仪器进行无误差的测量。因此物理量的真值实际上是无法测得的。“理想”量具或测量仪器即测量过程的参考比较标准只是一个纯物理值。尽管随着科技水平的提高,可供实际使用的测量参考标准可以越来越逼近理想的理论定义值,但是在测量过程中由于各种主观、客观因素的影响,做到无误差的测量是不可能的。

2. 约定真值 A

由于真值是无法测得的,因此通常只能由更高一级的标准仪表所测得的值作为“真值”,故将这个值叫作约定真值。

3. 标称值

测量器具上标出来的数值为标称值。例如,某电阻标出值为 $1\ \Omega$,标准信号发生器度盘上标出的输出正弦波频率 $100\ \text{Hz}$ 等。由于制造和测量精度不够以及环境等因素的影响,标称值并不一定等于它的真值或实际值。为此,在标出测量器具的标称值时,通常还要标出它的误差范围或准确度等级。

4. 示值 x

由测量器具指示的被测量量值称为测量器具的示值。

5. 测量误差

测量过程中测量仪器仪表的测量值与真值之间的差异,称为测量误差。实际测量中,由于测量器具不准确,测量手段不完善,环境影响,测量操作不熟练及工作疏忽等因素,都会产生误差。误差的存在具有必然性和普遍性,人们只能根据需求和可能,将其限制在一定范围内而不能完全加以消除。

1.3.2 误差的表示方法

误差有多种表示方法,最基本的误差表示方法有绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

被测量值(仪器的示值 x)与其真值 A_0 之差,称为绝对误差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-3)$$

绝对误差 Δx 有大小、量纲和正负。其大小和正负分别表示测量值偏离真值的程度和方向。

由于真值 A_0 一般无法求得,故式(1-3)只有理论上的意义。因此实际应用中用约定真值

A 来代替真值 A_0 , 则有

$$\Delta x = x - A \quad (1-4)$$

绝对值与 Δx 相等, 但符号相反的值, 称为修正值, 用 C 表示, 即

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1-5)$$

测量仪器在使用前都要由上一级标准给出受检仪器的修正值, 通常以表格、曲线或公式的形式给出。由修正值可以求出实际值, 即

$$A = C + x \quad (1-6)$$

例 1-1 某电流表测的电流示值是 0.83 mA, 查得该电流表在 0.8 mA 及其附近的修正值都是 -0.02 mA, 那么被测的电流的实际值是多少?

$$A = C + x = 0.81 \text{ mA}$$

由此可见, 利用修正值可以减小误差的影响, 使测量值更接近真值。在实际应用中, 应定期将仪器仪表送计量部门鉴定, 以便得到正确的修正值。

2. 相对误差

绝对误差虽能表示测量值偏离真值的程度和方向, 但不能确切反映其准确程度, 故一般采用相对误差。相对误差的形式很多, 常用的有下列几种。

(1) 实际相对误差

绝对误差 Δx 与被测量的真值 A_0 比值的百分数, 称为相对误差, 用 γ_0 表示, 即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

因为真值无法求得, 常用约定真值 A 代替 A_0 , 此时的误差称为实际相对误差, 用 γ_A 表示, 即

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-8)$$

例 1-2 用两只电压表测量两个大小不同的电压, 测量值分别为 $U_{1x} = 101 \text{ V}$, $U_{2x} = 7.5 \text{ V}$, 绝对误差分别为 1 V 和 -0.5 V, 求两次测量的相对误差。

$$\text{解: } \gamma_{A1} = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{\Delta x}{x - \Delta x} \times 100\% = \frac{1}{101 - 1} \times 100\% = 1\%$$

$$\gamma_{A2} = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{\Delta x}{x - \Delta x} \times 100\% = \frac{-0.5}{7.5 - (-0.5)} \times 100\% = -6.25\%$$

可见前者的绝对误差绝对值大于后者, 但误差对测量结果的影响, 后者却大于前者, 因而用相对误差衡量误差对测量结果的影响, 比绝对误差更加确切。

(2) 示值相对误差

在误差较小、要求不太严格的场合, 常采用示值 x 代替 A , 此时的误差称为示值相对误差, 用 γ_x 表示, 即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-9)$$

由于示值 x 可直接通过测量仪表的读数获得, 所以这是在近似测量和工程测量中使用较多的一种表示方法。如果测量误差不大, 可用示值相对误差 γ_x 代替实际误差, 但若 γ_x 和 γ_A 相差较大, 两者应加以区别。

(3) 满度相对误差

仪器量程内最大绝对误差 Δx_m 与仪器的满度值 x_m (量程上限值) 的比值, 称为满度相对误差。

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \tag{1-10}$$

满度相对误差也称作满度误差或引用误差。由式(1-10)可以看出, 通过满度误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值

$$\Delta x_m = \gamma_m \cdot x_m \tag{1-11}$$

我国电工仪表的准确度等级 S 就是按满度误差 γ_m 分级的, 按 γ_m 大小依次划分成 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级。比如某电压表 $S=0.5$, 即说明其准确度等级为 0.5 级, 满度误差不超过 0.5% 即 $|\gamma_m| \leq 0.5\%$ 。

例 1-3 某待测电流约为 100 mA, 现有 0.5 级量程为 0~400 mA 和 1.5 级量程为 0~100 mA 的两个电流表, 问用哪一个电流表测量较好?

解: 用 0.5 级量程为 0~400 mA 电流表测 100 mA 时, 最大相对误差为

$$\gamma_{x_1} = \frac{x_m}{x} S\% = \frac{400}{100} \times \pm 0.5\% = \pm 2\%$$

用 1.5 级量程为 0~100 mA 电流表测量 100 mA 时, 最大相对误差为

$$\gamma_{x_2} = \frac{x_m}{x} S\% = \frac{100}{100} \times \pm 1.5\% = \pm 1.5\%$$

由此可知, 当仪表的准确度确定后, 示值越接近满刻度, 示值相对误差越小。所以, 在选用仪表时, 应当根据测量值的大小来选择仪表的量程, 尽量使测量的示值在仪表量程的 2/3 以上区域。

1.3.3 误差的来源与分类

1. 误差的来源

所有的测量结果都有误差, 为了减小测量误差, 提高测量结果的准确度, 需要明确测量误差的主要来源, 以便估计测量误差和进行相应的处理。造成误差的原因是多方面的, 其来源如表 1-1 所示。

表 1-1 误差的主要来源

误差名称	来源说明	实例
仪器误差	仪器本身及其附件设计、制造和装配等的不完善以及使用过程中元件的老化、机械磨损等引起的测量误差	零点偏移、刻度不准确、仪器内标准量性能不稳
影响误差	测量过程中环境因素与仪表所要求的使用条件不一致所造成的误差	温度、湿度、电源电压、电磁干扰等
方法误差	测量方法不完善、理论不严密、用了近似公式或近似值造成的误差	普通万用表电压挡测高内阻回路的电压, 用均值表测量非正弦电压
人身误差	测量者的分辨能力、固有习惯、视觉疲劳等因素引起的误差	读错刻度、计算错误等
使用误差	在仪器使用的过程中出现的误差	安装、调节和使用不当

2. 误差分类

虽然误差的来源很多,但根据测量误差的性质,测量可分为三大类:系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差

系统误差也称为确定性误差,指在确定的测试条件下,多次测量同一个物理量时,测量误差的数值大小和符号保持恒定,或在测量条件改变时,测量误差按一定规律变化的误差。系统误差总是由固定不变的或按确定规律变化的因素造成的。这些因素主要有:测量仪器本身结构和制造上的不完善而存在的误差,未能满足仪器规定的使用条件而存在的误差,测量方法不完善、电子元件性能不稳定造成的误差,如零点偏移、刻度不准、转动部分摩擦、忽略电流表的内阻,认为电压表的内阻无穷大等。

(2) 随机误差

随机误差又称为偶然误差,是由于偶然因素引起的一种大小和方向都不确定的误差。例如,噪声干扰、空气扰动、电磁场微变、大地微震等引起的误差。由于它的存在,即使在同一条件下多次重复测量同一量,所测的结果也不相同。一般来说,这种误差比较小,在工程测量中可以忽略。

(3) 粗大误差

粗大误差又称为疏忽误差,是由于测量人员在测量过程中,操作、读数、记录、计算的错误等引起的误差,如读数错误、记录错误等。粗大误差严重歪曲了测量结果,含有这种误差的实验数据不可靠,应当剔除。

1.3.4 误差的估计与处理

1. 随机误差、系统误差、粗大误差的估计和处理

测量中误差的存在是不可避免的,不同的误差应该采用不同的处理方法。

(1) 随机误差的估计和处理

随机误差没有确定的规律,但当测量次数足够多时,从统计的观点看,其测量的数据及其随机误差大多呈正态分布。因此采用数理统计的方法来分析随机误差,用有限次测量来估计整体的特征。

① 有限次测量随机误差的估计。设进行 n 次测量得到的测量值分别为: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-12)$$

式中, $\bar{x}$ 是数学期望无偏估计值,常用作被测量真值 A_0 。

任意一次测量值与 $\bar{x}$ 之差称为残差,即 $v_i = x_i - \bar{x}$ 。在实际测量中常用残差代替绝对误差,由统计规律知,残差的代数和为零。

由贝塞尔公式

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1-13)$$

可得有限次测量的标准差估计值 $\hat{s}$,通常也称为实验偏差。其值越小,表明测量值越集中,测