

★ 服务热线: 400-615-1233
★ 配套精品教学资料包
★ www.huatengedu.com.cn

电子测量与仪器应用(第2版)



策划编辑: 刘子嘉
责任编辑: 高宇
封面设计: 刘文东



定价: 54.00元

高等职业教育机电系列精品教材

电子测量与仪器应用(第2版)

主编 李艳 薛珑

北京邮电大学出版社

高等职业教育机电系列精品教材

电子测量 与仪器应用 (第2版)

DIANZI CELIANG YU YIQI YINGYONG

主 编 李 艳 薛 珑
主 审 贾海瀛



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



高等职业教育机电系列精品教材

电子测量 与仪器应用

(第2版)

DIANZI CELIANG YU YIQI YINGYONG

主 编 李 艳 薛 珑
副主编 魏一凡
主 审 贾海瀛



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书以培养技术应用型人才为目标,注重提升学生分析问题、解决问题的能力。全书共包括九个任务,分别为电子测量的基本知识、电压测量、频率和时间测量、测试信号源、示波测试、电子元器件测量、虚拟仪器与 LabVIEW 程序设计、Multisim 电路仿真测量以及拓展实训。

本书既可作为高等职业院校电子信息类、自动化类专业的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量与仪器应用 / 李艳, 薛珑主编. -- 2 版.
北京: 北京邮电大学出版社, 2025. -- ISBN 978-7-5635-7679-1

I. TM93

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025CK9511 号

策划编辑: 刘子嘉 责任编辑: 高 宇 封面设计: 刘文东

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

邮政编码: 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: 三河市骏杰印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 16.25

字 数: 336 千字

版 次: 2014 年 1 月第 1 版 2025 年 10 月第 2 版

印 次: 2025 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-7679-1

定 价: 54.00 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 •

服务电话: 400-615-1233

第2版 前言

本书主要介绍电子测量的基础知识及常用电子测量仪器的基本组成、工作原理和操作技巧等。学生通过学习可以提高使用仪器完成测量任务的能力,为今后走向工作岗位打下良好的基础。

本书第1版为国家示范性高等职业院校建设成果精品教材,为适应高等职业教育教学改革的要求和体现电子测量技术的发展,编者对其进行了修订。

本书第2版在结构上调整为任务式体系。为了使學生能更好地理解现代电子测量与应用技术,增加了 Multisim 电路仿真测量的内容,更新了任务中相对陈旧的内容。

本书围绕培养学生的职业技能这条主线来设计结构、内容和形式,以必需、够用为度,强调对学生创新精神和实践能力的培养,力求体现先进性、实用性。编者特别注重立体化教材建设,将主教材与电子教案、电子课件(PPT)、实训指导和习题及解答等教学资源有机结合,旨在帮助教师提高教学水平,为培养高素质技能型人才创造良好的条件。

在教学中教师可以根据学校的实际情况适度把握理论教学的深度,注意加强实践环节,探索以学生为中心的教学方法,以提高学生的职业能力和创新能力。

本书按64学时编写,各部分的学时安排见下表。

任务名称	具体内容	学时安排
电子测量的基本知识	电子测量的内容和特点	1
	测量方法及测量仪器的分类	1
	测量误差及误差数据处理	2



续表

任务名称	具体内容	学时安排
电压测量	磁电系仪表概述	2
	磁电系电流表、电压表、欧姆表	2
	模拟式电压表	2
	数字式电压表	2
	万用表	1
频率和时间测量	频率和时间测量的基本方法	1
	电子计数器的测量原理	2
	电子计数器的测量误差	2
	通用电子计数器实例	1
测试信号源	信号发生器概述	1
	通用信号发生器	2
	函数信号发生器	2
	脉冲信号发生器	1
示波测试	通用示波器	2
	示波测试技术的应用	2
	双踪示波器	2
	取样示波器和数字存储示波器	2
电子元件测量	常用电子元件	1
	电桥法测量	4
	谐振法测量	4
	晶体管特性图示仪	2
虚拟仪器与 LabVIEW 程序设计	虚拟仪器与 LabVIEW 开发入门	1
	LabVIEW 编程技术	2
	数据对象类型与操作	2
	数组与簇	2
	结构控制	1
Multisim 电路仿真测量	Multisim 概述	1
	Multisim 的工作界面	1
	Multisim 的常用仪器仪表及测量	2
拓展实训	磁电系电流表、电压表的制作	4
	函数信号发生器的制作	4
总计		64



本书由天津中德应用技术大学李艳和薛珑担任主编,李艳编写了任务一、任务二、任务六和任务七、任务九的部分内容,薛珑编写了任务四、任务五、任务八;天津中德应用技术大学魏一凡担任副主编并编写了任务三及每个任务的“任务导读”部分的内容;天津大学侯春羽参与编写了任务七、任务九的部分内容并提供了部分实操案例。本书由天津职业大学贾海瀛教授主审。

在编写过程中,编者参阅和引用了许多同类教材的相关资料,在此向其作者表示衷心的感谢,同时向对本书出版提供帮助的所有人员深表谢意。

限于编者水平,书中难免存在不当之处,敬请广大读者提出宝贵的意见和建议。

编 者

第1版 前言

“电子测量与仪器应用”是高等职业院校电子类相关专业的重要课程之一。学生通过本课程的学习可以全面系统地了解电子测量的基本测量方法、专业知识,熟练掌握常用电子测量仪器的基本组成、工作原理和操作技能,具备正确使用仪器完成所需测量任务的能力,为今后的学习和工作打下良好的基础。

本书围绕培养学生的职业技能这条主线来设计结构、内容和形式。结构建设注重立体化;内容力求体现先进性、实用性;基础知识以必需、够用为度;以应用为目的,结合实际,强化训练,强调对学生创新精神和实践能力的培养。编者将教材与电子课件(PPT)、习题及解答等教学资源有机结合,旨在提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

本书可作为电子信息、电气自动化专业的教材,教学中可以根据学校的实际情况对仪器的选型进行适当取舍或增补,适度掌握理论教学的深度,注意加强实践环节,探索以学生为中心的教学方法,以提高学生的职业能力和创新能力。

本书采用了模块引入的形式,按60教学学时编写,各部分的学时安排如下表,实验实训可结合课程教学安排。授课时也可根据教学计划和培养目标做适当调整。

模 块	任 务	学 时
电子测量的 基本知识	电子测量的内容和特点	1
	测量方法及测量仪器的分类	1
	测量误差及误差数据处理	2
电压测量	磁电系仪表概述	2
	磁电系电流表、电压表、欧姆表	2
	模拟式电压表	2
	数字电压表	2
	万用表	1



续表

模 块	任 务	学 时
频率和 时间测量	频率和时间测量的基本方法	1
	电子计数器	2
	电子计数器的测量误差	2
	通用电子计数器实例	2
测试 信号源	信号发生器概述	1
	通用信号发生器	2
	函数信号发生器	2
	脉冲信号发生器	2
示波测试	通用示波器	2
	示波测试技术的应用	2
	双踪示波器	2
	取样示波器和数字存储示波器	2
电子元件 测量	常用电子元件	1
	电桥法测量	4
	谐振法测量	4
	晶体管特性图示仪	2
虚拟仪器与 LabVIEW 程序设计	虚拟仪器与 LabVIEW 开发入门	1
	LabVIEW 编程技术	1
	数据对象类型与操作	1
	数组与簇	2
	结构控制	1
拓展实训 项目	磁电系电流表、电压表的制作	4
	基于 LabVIEW 的函数发生器的制作	4
总 计		60

本书由天津中德职业技术学院李艳副教授任主编并编写第一、二、六、七模块,天津中德职业技术学院王敏任副主编并编写第三、四、五模块,天津芯慧鸿业科技发展有限公司宋立军工程师任副主编并编写第八模块。全书由李艳统稿和定稿,由天津中德职业技术学院孙利华副教授主审。

在编写本书的过程中,参阅和使用了一部分兄弟院校的教材,选用了同类教材的部分例题、习题,在此向这些资料的作者表示衷心感谢。

限于编者水平,本书难免有不妥与疏漏之处,敬请广大读者提出宝贵的意见和建议。

编 者

目 录

任务一 电子测量的基本知识..... 1

- 学习单元一 电子测量的内容和特点 2
- 学习单元二 测量方法及测量仪器的分类 4
- 学习单元三 测量误差及误差数据处理 7

任务二 电压测量 18

- 学习单元一 磁电系仪表概述 19
- 学习单元二 磁电系电流表、电压表、欧姆表 24
- 学习单元三 模拟式电压表 30
- 学习单元四 数字式电压表 35
- 学习单元五 万用表 44

任务三 频率和时间测量 52

- 学习单元一 频率和时间测量的基本方法 53
- 学习单元二 电子计数器的测量原理 57
- 学习单元三 电子计数器的测量误差 63
- 学习单元四 通用电子计数器实例 67

任务四 测试信号源 76

- 学习单元一 信号发生器概述 77
- 学习单元二 通用信号发生器 80
- 学习单元三 函数信号发生器 89



学习单元四	脉冲信号发生器	96
-------	---------------	----

任务五 示波测试..... 102

学习单元一	通用示波器	103
学习单元二	示波测试技术的应用	119
学习单元三	双踪示波器	124
学习单元四	取样示波器和数字存储示波器	134

任务六 电子元器件测量..... 146

学习单元一	常用电子元器件	147
学习单元二	电桥法测量	149
学习单元三	谐振法测量	157
学习单元四	晶体管特性图示仪	166

任务七 虚拟仪器与 LabVIEW 程序设计..... 177

学习单元一	虚拟仪器与 LabVIEW 开发入门	178
学习单元二	LabVIEW 编程技术	183
学习单元三	数据对象类型与操作	188
学习单元四	数组与簇	192
学习单元五	结构控制	198

任务八 Multisim 电路仿真测量..... 210

学习单元一	Multisim 概述	211
学习单元二	Multisim 的工作界面	212
学习单元三	Multisim 的常用仪器仪表及测量	219

任务九 拓展实训..... 230

拓展实训一	磁电系电流表、电压表的制作	231
拓展实训二	函数信号发生器的制作	241

参考文献..... 250

任务一

电子测量的基本知识



任务导读

从古代到现代,我国测量技术经历了漫长的发展历程。圭表测日影定节气、地动仪测地震方位等,展现了古人的智慧,在当时为农业生产和社会发展提供了一定的帮助。中华人民共和国成立以后,我国测量学也取得了长足发展。在“两弹一星”等重要工程中,测量学发挥了关键作用。从导弹的发射轨道测量到卫星的运行轨迹确定,精准的测量技术为其提供了坚实保障。科研人员凭借顽强的毅力和勇于创新的精神不断提升测量精度和技术水平。

随着我国工业领域不断向高端化、智能化迈进,对测量精度和技术水平的要求也越来越高。精密测量技术如同工业发展的基石,为我国工业转型升级提供了有力支撑。测量学贯穿于工业生产、智能制造的各个环节,从产品的设计研发到制造加工,再到质量检测,都离不开精准的测量。如果没有精密测量技术的发展,我国在新时代工业中将会面临被“卡脖子”的困境。在工业产品从低附加值的“以量取胜”向高附加值的“以质取胜”转变过程中,测量技术的发展是关键所在,精准的测量能够确保产品的高质量。通过对生产过程中的各种参数进行精确测量,可以及时发现并纠正偏差,从而提高产品的一致性和可靠性。在质量控制环节,可以应用测量学对产品的尺寸、性能等进行严格检测,确保只有符合高标准的产品才能进入市场。

同时,测量学有助于推动技术创新。对先进材料、工艺等的测量和分析,可以为研发提供准确的数据支持,促进产品向高端化、智能化发展。只有依靠先进的测量技术,才能实现工业的转型升级,从单纯追求数量转变为注重质量和附加值,提升我国工业在全球产业链中的地位,实现可持续发展。

本任务主要介绍电子测量的基本概念、内容和特点,电子测量的方法和仪器分类,以及测量结果的表示方法和误差数据处理。

让我们一同开启学习电子测量基础知识的旅程,深入了解测量技术,为我们在工业发展等领域的探索打下坚实的基础。



学习单元一

电子测量的内容和特点

引言

测量是把被测量与标准量通过一定的测量方法进行比较,以获得被测量值的过程。在科学技术发展过程中,测量结果不仅用于验证理论,而且是发现新问题、提出新理论的依据。计算机技术和微电子技术的快速发展为电子测量和测量仪器增添了巨大的活力。

凡是利用电子技术进行的测量都属于电子测量。目前,电子测量已经成为现代科学技术发展的必要手段,这是因为电子测量涉及极宽频率范围内所有电量、磁量以及各种非电量的测量。科学的进步、生产的发展与测量理论技术手段的发展和进步是相互促进的。测量手段的现代化,已被公认为现代技术和生产现代化的重要条件及明显标志。

一、电子测量的内容

(1) 电能量的测量。如电流、电压、功率、电场强度、电磁干扰及噪声等的测量。

(2) 电路、元器件参数的测量。如电阻、电感、电容、阻抗的品质因数、介质损耗、介电常数及磁导率等的测量。

(3) 电信号特性的测量。如频率、周期、时间、相位、波形参数、脉冲参数、调制参数、频谱、谐波失真度、调幅度、信噪比及数字信号的逻辑状态等的测量。

(4) 电路性能的测量。如增益或衰减、频率特性、灵敏度、分辨力、噪声系数、反射系数、晶体管的 β 值等的测量。

以上各种待测参数中,电压、阻抗、频率、时间等是基本的电参数,对它们进行测量是其他许多派生参数测量的基础。

二、电子测量的特点

同其他测量相比,电子测量具有以下几个突出特点。

1. 测量频率范围宽

电子测量除可以测量直流电量外,还可以测量交流电量,测量频率范围为 $10^{-6} \sim 10^{12}$ Hz,有的甚至已进入可见光范围,而且还在向更高频段发展。但应注意,在不同的频率范围内,即使测量同一种电量,所需要采用的测量方法和使用的测量仪器也往往不同。例如,信号发生器就分为超低频信号发生器、低频信号发生器、高频信号发生器等。随着科学技术的发展,能在相当宽的频率范围内正常工作的仪器不断被研制出来。



2. 测量量程宽

量程是指仪器所能测量各种参数的范围,即测量范围上限值与下限值之差。由于被测量的数值大小相差很大,所以要求电子测量仪器必须具有相当大范围的量程。例如,普通欧姆表可测量几欧至几十兆欧的电阻,其测量范围达到 8 个数量级;一台数字式电压表可以测出 $10\text{ nV} \sim 1\text{ kV}$ 的电压,其测量范围达到 12 个数量级;而一台用于测量频率的电子计数器,其测量范围可达 17 个数量级。

3. 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量方法高得多,特别是对频率和时间的测量,由于其测量是以原子频标和原子秒为基础的,所以误差可减小到 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ 量级,是目前人类在测量准确度方面所能达到的最高指标。而其他测量的准确度则相对较低,如长度测量的最高准确度为 10^{-8} 量级,直流电压测量的最高准确度为 10^{-6} 量级,音频电压测量的最高准确度为 10^{-4} 量级,品质因数 Q 值和电场强度的测量准确度则仅有 10^{-1} 量级。测量准确度不高的主要原因在于电磁现象本身的性质,使得测量结果容易受到外部环境的影响,其中高频段影响更为严重。

4. 测量速度快

电子测量是通过电磁波的传播和电子运动来进行的,加上现代测试系统中高速电子计算机的应用,所以可以实现测量过程的高速度,并且在测量结果的处理和传输方面都可以以极高的速度进行,这是其他测量所不能比拟的。只有高速度才能测出快速变化的物理量,这对于现代科学技术的发展具有特别重要的意义。例如,原子核的裂变过程、导弹的发射速度、人造卫星的运行参数等的测量,都需要高速度的电子测量。电子测量的速度快是它在现代高科技领域得到广泛应用的重要原因之一。

5. 可以实现遥测

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器来实现遥测。例如,对于距离遥远或环境恶劣的、人体难以接触或无法达到的区域(如深海、地下、高温炉、核反应堆内、人造卫星等),可通过传感器或电磁波、光、辐射等方式进行测量。

6. 可以实现测量自动化和测量仪器微机化

由于大规模集成电路和微型计算机的应用,测量仪器实现了自动化、智能化。例如,在测量中能实现自动量程转换、自动校准、自动诊断故障和自动修复,可以自动记录,自动完成数据的计算、分析和处理的测量仪器,如带微处理器的自动化示波器、数字频率计、数字式电压表以及受计算机控制的自动化集成电路测试仪、自动网络分析仪和其他自动测试系统。

电子测量的一系列优点使它获得极其广泛的应用。大到天文观测、宇宙航天,小到物质结构、基本粒子,从复杂的生命、遗传问题到日常的工农业生产、商业部门,都越来越多地采用电子测量技术与设备。



学习单元二

测量方法及测量仪器的分类

引言

一个电参量的测量可以通过不同的方法来实现。测量方法的选择直接关系到测量结果的可信度,也关系到测量工作的经济性和可行性。

一、测量方法

1. 测量方法的分类

1) 按测量方式分类

(1)直接测量法。不需要进行辅助计算即能直接得到被测量值的测量方法称为直接测量。测量结果直接由测量仪表获得。例如,用通用电子计数器测频率,用电压表测量电路中的电压,都属于直接测量。

(2)间接测量法。先对几个与被测量有确定函数关系的电参量进行测量,再将测量结果代入表示该函数关系的公式、曲线和表格,最后求出被测量的方法称为间接测量。例如,先直接测量电阻两端的电压及其通过的电流,再根据公式 $R = \frac{U}{I}$ 可求出该电阻 R 的值;欲测量导线的电阻系数 ρ ,而没有测量 ρ 的仪表,只能先通过确定其长度 l 、直径 d 和电阻 R ,然后按公式 $\rho = \frac{\pi d^2 R}{4l}$ 进行计算得到 ρ 。

学生

直接测量法比较方便,那么是不是直接测量法就是测量首选呢?

老师

一般情况下是这样的。但是在测量精度要求很高的场合,为了提高测量准确度,就有可能选择采用间接测量法。例如,直流电路中的功率可用功率表直接测得,但功率表的准确度较低,而采用准确度高的电流表与电压表测得电流和电压值后计算得出功率,就能提高准确度。

直接测量法的优点是测量过程简单迅速,在工程技术中采用比较广泛。间接测量法多用于科学实验,在生产及工程技术中应用较少,只有当被测量不便于直接测量时才采用。



2) 按被测信号的性质分类

(1) 时域测量法。时域测量法也称为瞬态测量法,测量被测对象随时间变化的规律,这时把被测信号看成时间的函数。例如,使用示波器显示被测信号的瞬时波形,假如是正弦交流电压,它的瞬时值会随时间变化;观测脉冲信号的上升沿和下降沿等动态参数;观测动态电路(如 RC 电路)的暂态过程等。

(2) 频域测量法。频域测量法又称稳态测量法,测量的是被测对象与频率之间的关系,这时把被测对象看成频率的函数。信号通过非线性电路会产生新的频率分量,能用频谱分析仪进行分析。放大器的幅频特性可用频率特性图示仪予以显示。放大器对不同频率的信号会产生不同的相移,可使用相位计测量放大器的相频特性。

(3) 数据域测量法。数据域测量法也称为逻辑量测量法,是对数字系统逻辑特性进行的测量。利用逻辑分析仪能够分析离散信号组成的数据流,可以观察多个输入通道的并行数据,也可以观察一个通道的串行数据。

(4) 随机测量法。随机测量法又称为统计测量法,主要对各类噪声、干扰信号等进行动态测量和统计分析。

电子测量技术还有许多分类方法,如动态与静态测量技术、模拟和数字测量技术、实时与非实时测量技术、有源与无源测量技术等。

2. 选择测量方法的原则

在选择测量方法时,应考虑以下几个因素。

- (1) 被测量本身的特性。
- (2) 所需要的精确程度。
- (3) 环境条件。
- (4) 所具有的测量设备。

在此基础上综合考虑,选择合适的测量方法。只有选择正确的测量方法,才能得到精确的测量结果;否则可能出现以下问题。

- (1) 得出错误的测量数据,测量结果不能信赖。
- (2) 损坏测量仪器、仪表或被测设备、元器件。

可以通过下例来说明。

例 1-1 差分放大器电路图如图 1-1(a)所示,现要求测量 V_1 集电极电位。其等效电路如图 1-1(b)所示,等效电阻 R_0 为 $50\text{ k}\Omega$ 。若采用高输入电阻(内阻 $10\text{ M}\Omega$)数字式电压表测量,测量结果为 5 V 。请问,如果使用普通的模拟式电压表(电压表的灵敏度为 $20\text{ k}\Omega/\text{V}$)测量,测量结果又为多少呢?

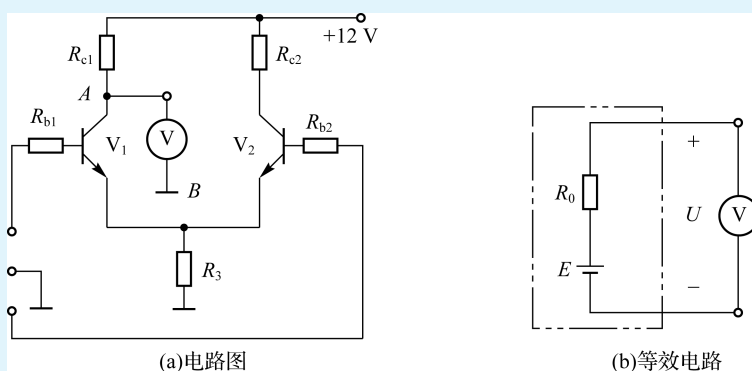


图 1-1 差分放大器电路及其等效电路

解 $E=5\text{ V}$, 为高内阻回路的电压值(数字式电压表的测量值)。

模拟式电压表的内阻为

$$R=20\text{ k}\Omega/\text{V}\times 5\text{ V}=100\text{ k}\Omega$$

模拟式电压表测量的结果为

$$U=\frac{R}{R+R_0}E\approx 3.3\text{ V}$$

可见, 实际为 5 V 的电压, 如果用低内阻的模拟式电压表来测量, 测量值仅为 3.3 V , 误差很大。所以, 在测量高内阻回路的电压时, 应采用具有高内阻的测量仪表。

由此可看出, 选择正确的测量方法、仪器设备是十分重要的。

二、测量仪器的分类

测量仪器是将被测量转换成可供直接观察的指示值或者等效信息的器具, 包括各种指示仪器、比较仪器、记录仪器、传感器和变送器等。电气电子测量仪器一般分为专用仪器 and 通用仪器两大类, 本书主要讨论后者。通用仪器是为了测量某一个或某一些基本电参量而设计的, 它能用于对各种电气电子的测量。通用仪器按照功能, 可做如下分类。

1. 电平测量仪器

电平测量仪器主要用于测量电信号的电压、电流和电平, 如电流表、电压表 and 电平表等。

2. 电路参数测量仪器

电路参数测量仪器包括晶体管测试仪、RLC 测试仪、各类电桥、Q 表、集成电路测试仪等。



拓展

电子测量仪器的种类



3. 频率、时间和相位测量仪器

频率、时间和相位测量仪器主要用来测量电信号的频率、时间间隔和相位差。这类仪器有各种频率计、相位计、波长表以及各种时间、频率标准等。

4. 波形测量仪器

波形测量仪器主要包括各类示波器,如通用示波器、双踪示波器、取样示波器以及数字存储示波器等。

5. 测试用信号源

测试用信号源包括各类低频或者高频信号发生器、调频调幅信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器、函数信号发生器等。

6. 信号分析仪器

信号分析仪器主要用来观测、分析和记录各种电量的变化,如波形分析仪和频谱分析仪等。

7. 逻辑分析仪

逻辑分析仪是专门用于分析数字系统的数据域的测量仪器。利用它对数字逻辑电路和系统在实时运行过程中的数据流或事件进行记录和显示,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。面向微处理器的逻辑分析仪则用于对微处理器及微型计算机的调试和维护。

学习单元三

测量误差及误差数据处理

引言

测量的目的就是获取被测量的数值,但是无论利用何种量具或仪器,采用何种测量方法,测量结果的数值都必然带有误差。如果测量误差过大,可能会使测量结果变得毫无意义。了解误差产生的原因和规律,合理选用测量仪器和测量方法,正确处理数据,才能使测量结果更为精确可靠。

一、有关值的概念

测量的结果是一个数值,即一个“值”。它包括测量单位和纯粹的数值。有关几个“值”的概念分述如下。

1. 真值、相对真值和实际值

一个物理量是客观存在的,其数值大小也是客观存在的。测量的目的就是希望获得被测量的实际大小,即真值。所谓真值,就是在一定的时间和环境条件下,被测量所呈现的客



观大小或真实数值。真值是利用理想的量具或测量仪器进行无误差测量得到的。但是,即使采用精度最高的测量器具,并且没有人为错误,要测得真值也是不可能的。只能说随着测量准确度的提高,测量结果的数值会不断接近真值。

既然无论怎样精密测量,也不可能得到被测量的真值,那么只能在一定准确度下测定一个量的相对真值。相对真值的定义:在研究的领域内,用标准设备对被测量所测得的量值。在每一级误差测量与比较中,都以上一级标准所体现的值当成准确无误的值,所以在实际测量中,常用高一级标准仪器的示值代替真值,也称为实际值。

2. 标称值和示值

标称值是指测量器具上标定的数值,如标准电阻标出的 $1\ \Omega$ 。由于制造、测量精度及环境因素的影响,标称值并不一定等于真值或实际值。因此,在标出标称值时,通常还要标出它的误差范围或准确度等级,例如,某电阻标称值为 $1\ \text{k}\Omega$,误差率为 $\pm 1\%$,即该电阻的实际值为 $990\sim 1\ 010\ \Omega$ 。

示值是指测量仪器仪表的指示值,它包括数值和单位。一般情况下,示值和仪器的读数有区别。读数是指从仪器刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字,示值是该读数表示的被测量的量值,常常需要加以换算。例如,100 分度表示 $50\ \text{V}$ 的电压表,当指针指在刻度盘上的 50 处时,读数是 50,而示值是 $25\ \text{V}$ 。但是对于数字显示仪表,其示值和读数是统一的。

二、测量误差的表示方法

测量是从量的方面认识客观事物,认识的有限性表现为误差。具体地说,使用测量仪器、仪表,通过一定的测量方法、在一定条件下对某被测量进行测量,由于测量设备、测量方法、测量环境和测量人员的素质等因素的限制,其结果与真值之间总是存在一定的偏差,这个偏差就是误差。

测量误差有两种表示方法:绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

1) 绝对误差的定义

由测量所得到的被测量的示值 x 与其真值 A_0 之差,称为绝对误差,用 Δx 表示,即

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

由于示值 x 总含有误差,所以 x 可能比 A_0 大,亦可能比 A_0 小,故 Δx 既有大小,又有正负。

由于真值是一个理想的概念,一般来说,是无法精确得到的。因此,实际应用中通常用实际值 A 来代替真值 A_0 。这时绝对误差可按下式计算:

$$\Delta x = x - A \quad (1-2)$$

2) 修正值

与绝对误差的绝对值大小相等,但符号相反的量值称为修正值,用 C 表示。

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1-3)$$



对测量仪器进行定期检查时,用标准仪器与受检仪器相对比,以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。在日常测量中,使用该受检仪器测量所得到的结果应加上修正值,以求得被测量的实际值,即

$$A=x+C \quad (1-4)$$

例 1-2 用一个修正值为 -0.2 mA 的电流表去测量电流,示值为 10 mA ,实际电流是多少?

解 $A=x+C=10 \text{ mA}+(-0.2) \text{ mA}=9.8 \text{ mA}$

学 生

为了测量结果的准确性,必须选择绝对误差小的仪器吗?

老 师

不一定。绝对误差虽然可以说明测量结果偏离实际值的情况,但不能确切反映测量的准确程度。例如,分别对 1 kHz 和 100 kHz 的两个频率进行测量,绝对误差分别为 $+1 \text{ Hz}$ 和 $+10 \text{ Hz}$,不能说对 1 kHz 这个频率的测量比较准确。很明显, $\frac{+1}{1\,000} \times 100\% = +0.1\%$,而 $\frac{+10}{100 \times 10^3} \times 100\% = +0.01\%$ 。因此,除绝对误差外,还应该考虑相对误差。

2. 相对误差

绝对误差与被测量的真值之比,称为相对误差,用 γ 表示。

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

相对误差有大小及符号。

1) 实际相对误差

由于真值是难以确切得到的,通常用实际值 A 代替真值 A_0 来表示相对误差,实际相对误差用 γ_A 来表示。

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

2) 示值相对误差

在误差较小、要求不严格的场合,也可用测量值 x 代替实际值 A ,由此得出示值相对误差,用 γ_x 来表示。

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

式中, Δx 由所用仪器的准确度等级定出。由于 x 中含有误差,所以 γ_x 只适用于近似测量。



例 1-3 两个电流的实际值分别为 $I_{1A}=100\text{ mA}$, $I_{2A}=10\text{ mA}$ 。测量值分别为 $I_{1x}=98\text{ mA}$, $I_{2x}=11\text{ mA}$ 。求这两次测量的绝对误差和相对误差,并比较两次测量的准确度。

解 (1)绝对误差。

$$\Delta I_1 = I_{1x} - I_{1A} = (98 - 100)\text{ mA} = -2\text{ mA}$$

$$\Delta I_2 = I_{2x} - I_{2A} = (11 - 10)\text{ mA} = 1\text{ mA}$$

可见, $|\Delta I_1| > |\Delta I_2|$ 。

(2)相对误差。

$$\gamma_{A1} = \frac{\Delta I_1}{I_{1A}} \times 100\% = \frac{-2}{100} \times 100\% = -2\%$$

$$\gamma_{A2} = \frac{\Delta I_2}{I_{2A}} \times 100\% = \frac{1}{10} \times 100\% = 10\%$$

可见, $|\gamma_{A1}| < |\gamma_{A2}|$ 。

这说明 I_1 的测量准确度高于 I_2 。

3) 满度相对误差

满度相对误差为以仪器量程内最大绝对误差 Δx_m 与测量仪器满度值(量程上限值) x_m 之比来表示的相对误差,用 γ_m 来表示。

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-8)$$

我国电工测量仪表准确度等级 S 就是按满度相对误差 γ_m 分级的,指针式仪表的准确度等级与满度相对误差之间的关系如表 1-1 所示。满度相对误差 $\leq 1.0\%$ 的仪表即为 1.0 级表,其面板上标以 1.0 的符号,表示其满度相对误差不会超过 $\pm 1.0\%$,但只要超过 $\pm 0.5\%$,也称准确度等级为 1.0 级。在七个准确度等级中,0.1 级或 0.2 级仪表可作为副标准器,精密测量需要 0.5 级仪表,一般测量使用 1.0 级或者 1.5 级仪表即可,而工业测量多数使用 2.5 级或以上的仪表。

注意:此准确度等级只针对模拟表(也称指针表),并不适用于数字显示仪表。

表 1-1 指针式仪表的准确度等级与满度相对误差的对应关系

准确度等级 S	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
满度相对误差 $\gamma_m/\%$	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

从使用仪表的角度出发,只有当仪表的示值恰好为仪表上限时,测量结果的准确度才等于该仪表准确度等级的百分数。在其他示值时,测量结果的准确度均低于仪表准确度等级的百分数。

变化式(1-8)可得



$$\Delta x_m = \pm S\% x_m$$

当示值为 x 时,可能产生的最大相对误差为

$$\gamma_{mx} = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% \leq \pm S\% \frac{x_m}{x} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明,用仪表测量示值为 x 的被测量时,最大相对误差等于 $\pm S\% \frac{x_m}{x}$;比值 $\frac{x_m}{x}$ 越大,测量结果的相对误差越大。由此可见,选用仪表时要考虑被测量的大小,越接近仪表上限越好。为了充分利用仪表的准确度,被测量的值应大于其测量上限的 $2/3$,这时结果的最大相对误差为 $\pm(1 \sim 1.5)S\%$ 。因此,选用仪表前要对被测量有所了解,如数值大小、测量要求等。

注意:这个结论只适用于正向线性刻度的电压表、电流表等类型的仪表。而对于反向刻度的仪表即随着被测量数值增大而指针偏转角度变小的仪表,如万用表的欧姆挡,由于在设计或检定仪表时均以中值电阻为基准,故在使用这类仪表进行测量时应尽可能使表针指在中心位置附近区域,因为此时测量准确度最高。

例 1-4 若测量 10 V 电压,现有量程和准确度等级分别为 150 V、0.5 级和 15 V、2.5 级两只电压表,选用哪只电压表测量比较合适? 说明原因。

解 (1)用 150 V、0.5 级电压表测量。

最大绝对误差为

$$\Delta x_{m1} = \pm S_1\% x_{m1} = \pm 0.5\% \times 150 \text{ V} = \pm 0.75 \text{ V}$$

测量的相对误差为

$$\gamma_{mx1} \leq \pm S_1\% \frac{x_{m1}}{x} = \pm 0.5\% \times \frac{150}{10} = \pm 7.5\%$$

(2)用 15 V、2.5 级电压表测量。

最大绝对误差为

$$\Delta x_{m2} = \pm S_2\% x_{m2} = \pm 2.5\% \times 15 \text{ V} = \pm 0.375 \text{ V}$$

测量的相对误差为

$$\gamma_{mx2} \leq \pm S_2\% \frac{x_{m2}}{x} = \pm 2.5\% \times \frac{15}{10} = \pm 3.75\%$$

显然,应选用 15 V、2.5 级电压表测量。

由此例可见,测量中应根据被测量的大小,合理选择仪表量程并兼顾准确度等级,而不能片面追求准确度级别高的仪表。

4) 分贝误差

相对误差也可以用对数的形式进行表达。以分贝来度量误差大小的表达方式称为分贝误差。

对于电流、电压等参量,把它表示为分贝的形式,则为

$$\gamma_{dB} = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \text{ dB} \quad (1-10)$$



对于功率类的电参量,则为

$$\gamma_{dB} = 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \text{ dB} \quad (1-11)$$

三、测量误差的来源

一切实际测量中都存在一定的误差。为了减小测量误差,提高测量结果的准确度,必须明确测量误差的来源,以便估算测量误差并采取相应的措施减小测量误差。

1. 测量仪器误差

由于仪器本身的设计方法及其附件的电气和机械性能不完善而引入的误差称为仪器误差。仪器仪表的零点漂移、元器件老化、刻度不准确和非线性等引起的误差以及数字式仪表的量化误差都属于此类。减小仪器误差的主要途径是根据测量任务正确地选择测量方法和使用测量仪器。

测量仪器误差包括以下几类。

1) 固有误差

固有误差指在基准工作条件下测量仪器的误差。基准工作条件是指一组有公差的基准值[如环境温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$]或有基准范围的影响量(如温度、湿度、气压、电源等环境条件)。

2) 工作误差

工作误差是在额定工作条件下任一值上测得的某一性能特性的误差。在影响量的工作范围内,各影响量最不利的组合点上产生工作误差的最大值。

3) 稳定误差

由于测量仪器稳定性不好引起性能特性的变化而产生的误差称为稳定误差。例如,由于元器件老化使仪器性能对供电电源或环境条件敏感,造成零点漂移或读数变化等现象。

4) 变动量

变动量是反映影响量所引起的误差。当同一个影响量相继取两个不同值时,对于被测量的同一数值,测量仪器给出的示值之差称为电子测量仪器的变动量。

2. 理论误差和方法误差

(1)由于测量所依据的理论不够严密或用近似公式、近似值计算测量结果所引起的误差称为理论误差。

(2)由于测量方法不适宜而造成的误差称为方法误差。例如,用普通的模拟式万用表测量高内阻电源两端的电压,由于模拟式万用表电压挡内阻不高而形成分压作用引起的误差就属于方法误差。

3. 影响误差

测量过程中由于受到温度、湿度、机械振动、电源电压、电磁场、声音和光照等环境因素影响,与仪器、仪表要求的条件不一致而引起的误差称为影响误差。当环境条件符合要求时,影响误差可以不予考虑。



4. 使用误差(操作误差)

由于对测量仪器使用不当引起的误差称为使用误差。如将应水平放置的仪表垂直放置、应该预热的仪表直接通电使用等都会产生使用误差。这就要求操作者严格按照仪器使用说明书规定的方法进行操作。

5. 人为误差

由于测量人员的分辨力、视觉疲劳、不良习惯或缺乏责任心等因素引起的误差称为人为误差,如读错数字、操作不当等。减小人为误差的主要途径:提高操作者的操作技能和责任心,采用更合适的测量方法和数字显示的测量仪表等。

四、测量误差的分类



根据误差的性质和特点,可将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号保持恒定或在条件变化时按照一定规律变化的误差称为系统误差。例如,仪表刻度的偏差,使用时的零点不准,温度、湿度、电源电压等变化造成的误差属于系统误差。系统误差的特点是测量条件一经确定,误差即为一确定数值。用多次测量求平均值的方法并不能改变误差的大小。

系统误差决定了测量的准确度。系统误差越小,测量结果越准确。为消除或减小系统误差的影响,在测量前应认真做好准备工作,查明所有可能产生系统误差的原因并设法消除;或者在测量中采用适当的方法引入修正值加以抵消或削弱误差。例如,为了消除或削弱固定的系统误差,可采用零示法、替代法、补偿法、交换法等测量方法。

2. 随机误差

随机误差又称偶然误差,是指在相同条件下,多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号均以不可预定的方式变化的误差。例如,温度、湿度及电源电压频繁波动,电磁干扰和测量者感觉器官无规律的微小变化等引起的误差都属于随机误差。

一次测量出来的随机误差没有规律,无法预料,不可控制,但是在足够多次的测量中,随机误差服从一定的统计规律,具有单峰性、有界性、对称性、相消性等特点。因此可以通过对多次测量值取算术平均值的方法来削弱随机误差对测量结果的影响。

随机误差反映了测量结果的精密度。随机误差越小,测量精密度越高。随机误差和系统误差共同决定测量结果的精确度,要使测量的精确度高,两者的值都要求很小。

3. 粗大误差

粗大误差是指在一定条件下,测量值明显偏离实际值时所形成的误差。粗大误差又称为疏失误差,简称粗差。粗大误差是由于读数错误、记录错误、操作不正确、测量中的失误及存在不允许的干扰等原因造成的误差。

粗大误差明显地歪曲了测量结果,就其数值而言,它远远大于系统误差和随机误差。对于含有粗大误差的测量值,一经确认,应首先予以剔除。

对于上述三类误差,应采取适当措施进行防范和处理,减小以至消除它们对测量结果的影响。为了更直观地说明上述三种误差的性质,常引用打靶的例子。图 1-2 所示为打靶时



可能出现的几种情况。图 1-2(a)的弹着点多数靠近靶心,但并未集中于一点,说明有随机误差存在;远离中心的一个弹着点说明粗大误差的存在。图 1-2(b)的弹着点不集中于一点,说明也有随机误差;但所有点都偏于一角,说明有一个恒定的系统误差在起作用。

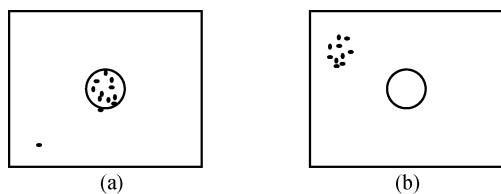


图 1-2 打靶时可能出现的情况

五、误差数据的处理

1. 测量结果的表示

测量结果通常用数字和图形两种形式表示,这里只讨论测量结果的数字式表示,它包括一定的数值(绝对值及符号)和相应的计量单位。例如,5.10 mA、220 V 等。有时为了说明测量结果的可信度,在表示测量结果时,还要同时注明其测量误差值或范围。例如,(7.36±0.01) V 等。

1) 有效数字的概念

测量结果通常表示为一定的数值,但测量过程总存在误差,即便多次测量的平均值也存在误差。需要用近似数据恰当地表示测量结果,这就涉及有效数字的问题。

组成数据的每个必要数字称为有效数字,即从最左边第一位非零数字开始,到右边最后一个数字为止的所有数字。最左边的“0”不是有效数字。例如,某电流值 0.020 10 A 中共出现了 4 个“0”,其中前面两个“0”不是有效数字,但是中间及末尾的两个“0”都是有效数字。这是因为前面的两个“0”仅与选取的测量单位有关,而与测量的准确度没有关系,如以 mA 为单位,可写为 20.10 mA,这样前面的两个“0”就不见了;末尾的“0”很重要,20.10 表示精确到百分位,而 20.1 表示精确到十分位。

注意:有效数字不能因选用的单位变化而改变。如测量结果为 1.0 V,它的有效数字为两位。如改用 mV 作单位,将 1.0 V 改写成 1 000 mV,则有效数字变成 4 位,是错误的,应改写成 1.0×10^3 mV,此时它的有效数字仍为两位。

2) 准确数字和欠准数字

对测量值 123 V 来说,尽管“1、2、3”都是有效数字,但是只有最左面的两个有效数字“1、2”可以称为准确数字,而最后面的“3”由于是估测的,所以称为欠准数字或不可靠数字。

图 1-3 所示为使用电压表和电流表测量电阻的电路,采用间接测量方法(伏安法)来求取电阻值。仪表测量结果为 $U=6.2$ V, $I=0.85$ A(仪表的有效数字为 2 位),其电阻值为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6.2 \text{ V}}{0.85 \text{ A}} \approx 7.294 \text{ } \Omega \approx 7.3 \text{ } \Omega$$

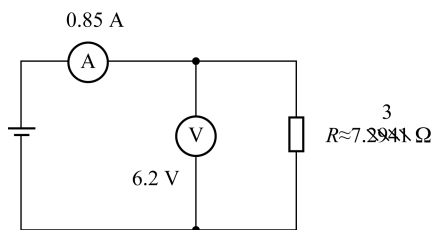


图 1-3 使用电压表和电流表测量电阻

因为仪表的第二位为欠准数字,即含有误差,所以应将结果中的第三位进行四舍五入,正确的电阻值应为 $R \approx 7.3 \Omega$ 。

2. 有效数字的舍入原则

我们在处理数据时都会遇到近似数的计算问题,由于每个数据位数不等,所以需进行舍入处理,然后进行运算。进行数据处理时,所用的舍入原则是“四舍五入”,即大于 5 的数向前入 1,小于 5 的数舍去,而等于 5 的数则应采用偶数法原则。

(1) 5 后面有数字,舍 5 入 1。

(2) 5 后面没有数字或是 0,当 5 之前是奇数舍 5 入 1,是偶数则舍去 5。

例 1-5 将下列数据保留小数点后一位有效数字。

22.74	22.76	22.753
22.75	22.85	22.750

解

22.74 → 22.7	舍去 4
22.76 → 22.8	舍 6 入 1
22.753 → 22.8	5 后面有数字,舍 5 入 1
22.75 → 22.8	5 后面没有数字,5 前面的 7 是奇数,舍 5 入 1
22.85 → 22.8	5 后面没有数字,5 前面的 8 是偶数,舍 5
22.750 → 22.8	5 后面为 0,5 前面的 7 是奇数,舍 5 入 1

经过数字舍入后,末位是欠准数字,末位以前的数字为准确数字。决定有效数字位数的标准是误差范围,并不是位数写得越多越好,写多了会夸大测量的准确度。

3. 数字近似运算法则

在数据处理过程中,常常要对几个乃至几组数据进行加、减、乘、除等近似运算。运算时要遵循以下规则。

(1) 在加减法运算中,准确度最差的项就是小数点后有效数字位数最少的那一项,有效数字的取舍以该项为准。

(2) 在乘除法运算中,所得结果的有效数字位数取决于有效数字位数最少的那一项,而



与小数点无关。

例 1-6 做下列数字运算。

$$(1) 6.356 + 1.23 + 0.2345$$

$$(2) 0.25 \times 13.36 \div 4.19$$

解 $(1) 6.356 + 1.23 + 0.2345 \approx 6.36 + 1.23 + 0.23 = 7.82$

$(2) 0.25 \times 13.36 \div 4.19 \approx 0.25 \times 13 \div 4.2 \approx 0.77$



任务小结

本任务首先介绍了电子测量的意义、内容、特点以及测量方法和测量仪器的分类。

测量结果总含有误差,测量误差的表示方法有绝对误差和相对误差。绝对误差表明测量结果偏离实际值的情况,它有大小和符号。相对误差能确切反映测量的准确程度,也有大小及符号。可以用满度相对误差确定测量仪表的准确度等级。

根据误差的性质和特点,可将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。系统误差在一定的条件下,其数值(大小及符号)保持恒定或按照一定的规律变化,它决定了测量的准确度。随机误差指在相同条件下进行多次测量时,每次测量结果出现无规律的随机变化的误差,它反映了测量结果的精确度。粗大误差指在一定条件下,测量值明显偏离实际值时所对应的误差,它歪曲了测量结果,应设法予以剔除。为了提高测量结果的可依赖程度,应针对各种误差的来源和特点,采取适当的措施进行防范,并对测量结果进行必要的处理,尽可能减小误差对测量结果的影响。

用数字方式表示测量结果时,要根据要求确定有效数字。不可随意更改测量结果的有效数字位。在对多余数字位进行删略时,必须遵循数字的舍入原则——“四舍五入”;对数据进行近似运算时也要遵循一定的法则。



任务检测

1. 什么是电子测量? 简述电子测量的意义。
2. 电子测量的主要内容有哪些? 电子测量有什么特点?
3. 电子测量的方法有哪些?
4. 测量电压、电流等参数时,仪表的指针应指在什么位置? 测量电阻时,仪表的指针应指在什么位置?
5. 说明系统误差、随机误差和粗大误差的主要特征。
6. 用一个修正值为 -0.2 mA 的电流表去测量电流,其示值为 6.7 mA 。请问实际电流为多少?
7. 在测量电压时,若测量值为 50 V ,实际值为 48.8 V ,则绝对误差和修正值各为



多少?

8. 检定一只 1.0 级的电流表,其量程为 $0\sim 250\text{ mA}$,检定时发现在 200 mA 处误差最大,为 3 mA 。请问此电流表是否合格?为什么?

9. 若测量 150 mA 的电流,有两只电流表,其中一只的量程和准确度等级为 1 A 、1.0 级;另一只为 250 mA 、2.5 级。请问选用哪一只电流表测量比较合适?为什么?

10. 根据误差的性质和特点,误差可分为哪几类?各有何特点?分别可以采取什么措施减小这些误差对测量结果的影响?

11. 按照舍入原则,将下列数据进行舍入处理,要求保留 3 位有效数字。

- | | | |
|-------------|----------------|---------------|
| (1) 6.748; | (2) 0.000 62; | (3) 1.274 51; |
| (4) 12.150; | (5) 7.685; | (6) 2.165 3; |
| (7) 85 360; | (8) 3 100 000。 | |

12. 按照数据近似运算法则计算。

- | | | |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| (1) $2.632+10.82$; | (2) $8.24-0.132\ 6$; | (3) 40.784×3.92 ; |
| (4) $1.010\div 2.5$; | (5) $27.957\times 3.34\div 7.89$ 。 | |