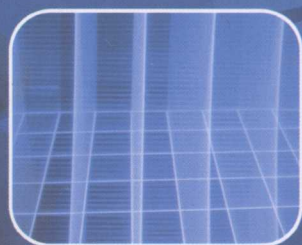
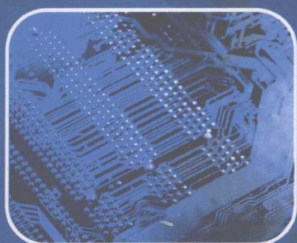




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪高职高专电子信息类规划教材

电子测量与仪器

第2版



赠电子课件

徐洁◎主编



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪高职高专电子信息类规划教材

电子测量与仪器

第 2 版

主编 徐 洁
参编 韩敬东 宋悦孝
主审 姜 邈

图 1-1-1 (P) 图 1-1-1

电子测量与仪器(第2版) 姜邈主编 机械工业出版社

2007.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 姜邈主编

机械工业出版社

ISBN 978-7-111-11061-3

1. 电子测量与仪器 姜邈主编 机械工业出版社

2. 电子测量与仪器 姜邈主编 机械工业出版社

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第199287号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王宁 责任印制:王宁 责任校对:王宁

封面设计:李 娟 印刷:李 娟

唐山丰润市丰润印刷厂印刷

2008年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·1/32开·300千字

0.001~1.000册

标准书号: ISBN 978-7-111-11061-3

定价:19.80元

凡购本书,即赠赠书,赠书地址: (010) 88379228

赠书地址: (010) 88379228

赠书地址: (010) 88379228

赠书地址: (010) 88379228



机械工业出版社

本书面向电子测量仪器及其应用,较为全面地介绍了电子测量技术的基本知识、电子测量仪器及测试系统的工作原理以及它们在工程实际中的具体应用。

全书共分八章。第一章电子测量与仪器的基本知识,介绍电子测量的内容与特点、测量仪器分类、测量误差及数据处理等;第二章电压测量与电压表,介绍电压测量方法与要求、各种电压表及其应用等;第三章波形测试与仪器,介绍示波测试原理、示波器工作原理及其应用等;第四章频率和时间测量及仪器,介绍通用电子计数器及其应用、电子计数器的测量误差等;第五章信号发生器,介绍通用信号发生器、函数信号发生器以及专用信号发生器等;第六章集中参数元件的测量,介绍电桥法测量、谐振法测量及数字化测量方法等;第七章智能仪器,介绍数字存储示波器、数字电压表、智能型信号源等;第八章自动测量技术,介绍 GPIB 总线系统、VXI 总线系统、现场总线系统以及虚拟仪器等;附录实验。

本书是教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材,可供高等职业教育电子类专业使用,也可用作电子测量与仪器的培训教材或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/徐洁主编. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2007.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 .21 世纪高职高专电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-11061-3

I. 电… II. 徐… III. ①电子测量-高等学校:技术学校-教材
②电子测量设备-高等学校:技术学校-教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 199787 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于宁 责任编辑:于宁 责任校对:王欣

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2008年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·12.5 印张·300千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-11061-3

定价:19.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379758

封面无防伪标均为盗版

前言

PREFACE

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

“电子测量与仪器”是高等职业教育电子技术类专业的重要课程。本教材第一版自2003年出版以来,得到众多学校与老师的首肯和使用,同时提出了许多宝贵意见。在广泛听取一线教师的意见和建议的基础上,编者对教材进行了修订,同时对原书存在的错误和纰漏进行了更正和修改。

本教材的参考学时数为60学时。其主要内容包括电子测量技术的基本知识和电子测量仪器及系统的工作原理与应用。全书共分八章,第一章电子测量与仪器的基本知识,介绍电子测量的内容与特点、电子测量仪器分类、测量误差及数据处理等;第二章电压测量与电压表,介绍电压测量方法与要求、模拟电压表、数字电压表、万用表等;第三章波形测试与仪器,介绍波形测试基本原理、通用示波器工作原理及其应用、取样示波器、晶体管特性图示仪等;第四章频率和时间测量及仪器,介绍通用电子计数器及其应用、电子计数器的测量误差、数字相位计等;第五章信号发生器,介绍通用信号发生器、函数信号发生器以及专用信号发生器等;第六章集中参数元件的测量,介绍电桥法测量、谐振法测量及数字化测量方法等;第七章智能仪器,介绍数字存储示波器、数字电压表、智能型信号源等;第八章自动测量技术,介绍 GPIB 总线系统、VXI 总线系统、现场总线系统以及虚拟仪器等;教材的最后为附录,给出了一系列实验,可供本教材的使用者在教学中采用或参考。此外,为方便教学,本书备有免费电子教案,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电索取,咨询电话:010-88379375。

根据高职课程教学的特点,在教学目标上应突出应用性与实践性,建议在教学过程中探索以学生为中心的教学方法,加强学生的能力培养。

本教材由北京信息职业技术学院徐洁担任主编并编写第一、七、八章和附录,山东信息职业技术学院韩敬东编写第三、五章,山东信息职业技术学院宋悦孝编写第二、四、六章。在教材的编写过程中,得到学校领导和老师们的大力支持,在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

目 录

CONTENTS

前言	1
第一章 电子测量与仪器的基 本知识	1
第一节 电子测量的内容与特点	1
第二节 电子测量的方法及仪器的分类	3
第三节 测量误差及处理	5
本章小结	10
习题一	10
第二章 电压测量与电压表	12
第一节 概述	12
第二节 电流、电压测量基本方法	17
第三节 模拟电压表	18
第四节 数字电压表	25
第五节 万用表	35
本章小结	37
习题二	38
第三章 波形测试与仪器	39
第一节 概述	39
第二节 波形测试的基本原理	39
第三节 通用示波器的组成及技术指标	43
第四节 示波器的应用	54
第五节 取样示波器	62
第六节 晶体管特性图示仪	65
第七节 频率特性测试仪	67
本章小结	70
习题三	70
第四章 频率和时间测量及仪器	73
第一节 概述	73
第二节 电子计数器概述	74
第三节 通用电子计数器	76
第四节 电子计数器的测量误差	80
第五节 通用计数器实例	84
第六节 数字相位计	86
本章小结	89
习题四	89
第五章 信号发生器	91
第一节 概述	91
第二节 通用信号发生器	93
第三节 函数信号发生器	99
第四节 专用信号发生器	102
本章小结	109
习题五	109
第六章 集中参数元件的测量	111
第一节 概述	111
第二节 电桥法测量	112
第三节 谐振法测量电容、电感 和 Q 值	116
第四节 LCR 的数字化测量方法	122
本章小结	123
习题六	123
第七章 智能仪器	125
第一节 概述	125
第二节 智能型数字存储示波器	127
第三节 智能型数字电压表	135
第四节 智能型信号源	139
本章小结	148
习题七	148
第八章 自动测量技术	150
第一节 概述	150
第二节 GPIB 标准接口总线系统	152
第三节 VXI 总线系统	155

第四节 现场总线系统	163	实验四 图示仪测量	181
第五节 虚拟仪器	165	实验五 频率测量	183
本章小结	171	实验六 信号发生器的使用	185
习题八	172	实验七 阻抗测量	187
附录 实验	173	实验八 便携式直流平衡电桥的使用	190
实验一 电压测量	173	实验九 综合实验（放大电路动态指标的测量）	191
实验二 波形测量 1	175	参考文献	194
实验三 波形测量 2	178		

第一章 电子测量与仪器的基本知识

测量是人类对客观世界获取定量信息的过程。人们通过对客观事物大量观察和测量,形成定性和定量的认识,归纳并建立起各种定理和定律。测量是用数字语言描述周围世界、揭示客观世界规律、进而改造世界的重要手段。我们可以用著名科学家门捷列夫的一句话来概括测量的重要性:“没有测量,就没有科学。”

从广义上说,电子测量的概念泛指利用电子技术进行的测量,它是测量学和电子学相互结合的产物。电子测量除具体运用电子科学的原理、方法和设备对各种电量、电信号及电路元器件的特性参数进行测量外,还可通过各种敏感器件和传感装置对非电量进行测量,而且往往更快捷、更准确。在科学技术高度发展的今天,电子测量的应用可以说遍及所有的技术领域。近30年来,随着计算机技术和微电子技术的迅猛发展,为电子测量和仪器增添了巨大的活力。计算机与电子测量的结合,构成了智能仪器和自动测试系统,可以对电参量进行自动测量、自动量程选择、自动记录数据、自动数据传输、自动完成数据的分析与处理、自动进行故障的诊断与误差修正。这种新型的电子测量系统的出现对整个电子及其他技术领域均产生了巨大的影响。

第一节 电子测量的内容与特点

一、电子测量的内容

从广义讲,凡是利用电子技术进行的测量都可以说是电子测量;从狭义上讲,电子测量是指在电子学中测量有关电的量值。由此可见,电子测量的内容是相当广泛的,主要包括以下内容:

1. 能量的测量 包括电流、电压、功率、电场强度、电磁干扰及噪声等。
2. 元件和电路参数的测量 包括电阻、电容、电感、阻抗、品质因数、介质损耗、介电常数及磁导率等。
3. 电信号特性的测量 包括频率、周期、时间、相位、波形参数、脉冲参数、调制参数、频谱、失真度、信噪比、数字信号的逻辑状态等。
4. 电子电路性能的测量 包括增益或衰减、频率特性、灵敏度、分辨力、噪声系数、反射系数、电压驻波比、晶体管的 β 值等。

上述各种电参数中,频率、时间、电压、相位、阻抗是基本的电参量,对它们所进行的测量也是其他许多派生参数测量的基础。

二、电子测量的特点

电子测量具有以下主要特点:

(一) 测量频率范围宽

电子测量中所遇到的测量对象,其频率覆盖范围极宽,低至 10^{-4} Hz以下,高至10GHz以上,甚至有的已进入可见光范围。目前还在向更宽频段乃至全频段方向发展。当然,不能要求同一台仪器能在这样宽的频率范围内工作,通常是根据不同的工作频段,采用不同的测量原理和使用不同的测量仪器。例如超低频信号发生器、音频信号发生器、高频信号发生器等。随着技术的发展,能在相当宽的频率范围内正常工作的仪器不断地被研制出来,例如,现在一台较为先进的频率计,频率的测量范围可以低至 10^{-6} Hz,高至 10^{11} Hz。

(二) 测量量程宽

量程是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悬殊,因而要求测量仪器具有足够大的量程。普通欧姆表,可测量几欧至几十兆欧的电阻。量程达8个数量级;数字电压表可测量10nV~1kV的电压,量程可达12个数量级;高档次的数字万用表直接测量的电阻值量程可达13个数量级;而较完善的数字式频率计,其量程可达17个数量级。

(三) 测量准确度相差大

测量准确度是决定测量技术水平和测量结果可信性的关键。在电子测量中,由于频率的测量是以原子频标和原子秒为基础的,故对频率和时间测量的准确度可达 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 量级,这是目前在测量准确度方面达到的最高指标。而其他参数测量的准确度则比较低,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,音频电压为 10^{-4} 量级,射频电压为 10^{-3} 量级。品质因数 Q 值和电场强度的测量准确度仅为 10^{-1} 量级,造成这种现象的主要原因在于电磁现象本身的性质,使得测量结果极易受到外部环境的影响,尤其在较高频段更为严重。

(四) 测量速度快

由于电子测量是基于电子运动和电磁波的传播,加之现代测试系统中高速电子计算机的应用,使得电子测量无论在测量速度,还是在测量结果的处理和传输方面,都可以以极高的速度进行,这也是电子测量技术广泛用于现代科技各个领域的重要原因。比如卫星、飞船等各种航天器的发射与运行,没有快速、自动的测量与控制,工作是无法进行的。

(五) 实现遥测及测试过程的自动化

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和遥控。这使得对那些远距离的、高速运动的或其他人体难以接近的地方(如深海、地下、高温炉等)的信号测量成为可能。电子测量同计算机相结合,使测量仪器自动化、智能化。可以进行自动测量、自动记录、自动完成数据的计算、分析和处理,便于组成自动测试系统。

(六) 测量误差较难处理

任何测量都不可避免会有误差,如果不能准确地确定误差或误差范围的大小,就无法衡量测量结果的准确度及可靠性,从而也就失去了测量的意义和价值。电子测量仪器及被测对象所包含的各种元器件往往较多,因此容易受各种外界因素(环境温度、湿度、电源电压、外界电磁干扰等)的影响,而且测量仪器内部各元器件之间、测量仪器与被测电路之间均存在着寄生电容、电感、电导等的不良影响。同时,实际测量时又难以获得大量的采样值,也就难以了解误差的概率分布规律,使得误差处理复杂化,难以控制、分析和处理各

种测量误差。

第二节 电子测量的方法及仪器的分类

一、电子测量的方法

一个电参量的测量,可以通过不同的方法来实现。测量方法的选择正确与否,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。不当或错误的测量方法,除了得不到正确的测量结果外,甚至会损坏测量仪器和被测设备。必须根据不同的测量对象、测量要求和测量条件,选择正确的测量方法和合适的测量仪器,构成实际测量系统,进行正确细心的操作,才能得到理想的测量结果。测量方法的分类形式有多种,下面介绍几种常见的分类方式及测量方法。

(一) 按测量方法分类

1. 直接测量 指直接从电子仪器或仪表上读出测量结果。例如用万用表电阻档测电阻、计数器测频率、电桥测电容、电压表测电压等。直接测量的特点是不需要对被测量与其他实测的量进行函数关系运算,因此测量过程简单迅速,是工程测量中广泛应用的测量方法。

2. 间接测量 指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、曲线或表格,最后求出被测量。例如,直接测出电阻 R 的阻值及其两端的电压 U ,由公式 $I = U/R$ 可求出被测电流 I 的值。当被测量不便于直接测量,或间接测量结果比直接测量更为准确时,可采用间接测量方法。例如通过测量集电极电阻上的电压,再经计算得到晶体管集电极电流,比断开电路串入电流表的方法更为简便易行。

(二) 按测量的性质分类

1. 时域测量 时域测量也叫做瞬态测量,主要测量被测量随时间变化的规律。如电流、电压等电参量的瞬时值常用示波器来显示;又如用示波器观测脉冲信号的上升沿、下降沿、平顶跌落等脉冲参数以及动态电路的暂态过程等。

2. 频域测量 频域测量又称稳态测量,主要测量被测量与频率之间的关系。如放大器的增益、相移等,常通过对电路的频率特性或频谱特性的分析来测量。

3. 数据域测量 数据域测量也称为逻辑量测量,主要是用逻辑分析仪等设备对数字量和电路的逻辑状态进行分析。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,还可以借助计算机分析大规模集成电路芯片的逻辑功能等。

4. 随机测量 随机测量又称统计测量,主要是对各类噪声信号、干扰信号进行动态测量和统计分析,这是一项较新的测量技术,尤其在通信领域有着广泛的应用。

(三) 测量方法的选择

在选择测量方法时,主要考虑以下几个因素:①被测量本身的特性;②所要求的测量准确度;③测量环境;④现有测量设备。在此基础上,选择合适的测量仪器和正确的测量方法。否则,即使使用价值昂贵的精密仪器设备,也不一定能够得到准确的测量结果,甚至可能损坏测量仪器和被测设备。

例 1-1 如图 1-1 所示, 测量差分放大器电路中 V_1 的集电极电位时, 若采用数字电压表(内阻 $10\text{M}\Omega$)来进行测量, 测量值为 5V 。问: 若用模拟万用表的电压档(电压灵敏度为 $20\text{k}\Omega/\text{V}$)来测量, 测量值又为多少?

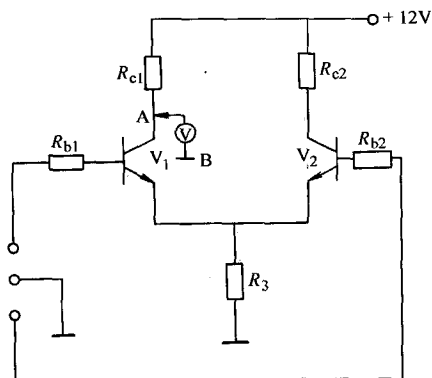


图 1-1 用电压表测高内阻回路电压的示意图

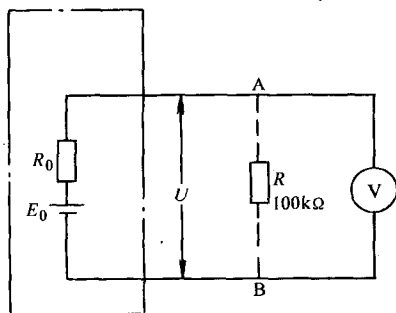


图 1-2 用万用表测高内阻的等效图

解 将测量电路用等效电路来表示, 如图 1-2 所示。其中 E_0 是高内阻回路的电压值(数字电压表的测量值), 万用表的内阻 $R = 20\text{k}\Omega/\text{V} \times 5\text{V} = 100\text{k}\Omega$ 。万用表实际测量的是 A、B 两点的电压值, 即 R 、 R_0 的分压值。因此, 万用表的测量值为:

$$U = RE_0 / (R + R_0) = 100\text{k}\Omega \times 5\text{V} / (100 + 50)\text{k}\Omega = 3.3\text{V}$$

从上述测量值可知, 实际为 5V 的电压, 用低内阻的万用表来测量, 测量值仅为 3.3V , 可见误差之大。因此, 在测量高内阻回路的电压时, 要采用具有高内阻的测量仪表。

二、电子测量仪器的分类

测量仪器是将被测量转换成可供直接观察的指示值或等效信息的器具, 包括各类指示仪器、比较仪器、记录仪器、传感器和变送器等。利用电子技术对各种被测量进行测量的设备, 统称为电子测量仪器。电子测量仪器的分类方法很多, 按其功能, 大致可分为以下几类:

1. **电平测量仪器** 包括各种模拟电压表、毫伏表、数字电压表等。
2. **电路参数测量仪器** 包括各类电桥、Q 表、R 及 L 测试仪、晶体管或集成电路测试仪、图示仪等。
3. **频率、时间、相位测量仪器** 包括电子计数式频率计、石英钟、数字式相位计、波长计等。
4. **波形测量仪器** 主要指各类示波器。如通用示波器、多踪示波器、多扫描示波器、取样示波器以及记忆和数字存储示波器等。
5. **信号分析仪器** 包括失真度分析仪、谐波分析仪、频谱分析仪等。
6. **模拟电路特性测试仪器** 包括扫频仪、噪声系数测试仪、网络特性分析仪等。
7. **数字电路特性测试仪器** 主要指逻辑分析仪。这类仪器内部多带有微处理器或通过

接口总线与外部计算机相连,是数据域测量中不可缺少的部分。

8. 测试用信号源 它包括各类低频和高频信号发生器、脉冲信号发生器、函数发生器、扫频和噪声信号发生器等。由于它的主要功能是作为测试用信号源,因此也叫供给量仪器。

第三节 测量误差及处理

在日常生活或生产实践中,人们常会接触到各种量,而且要对它们进行测量、比较、计算,并研究量与量之间的关系。测量的目的就是获得被测量的真值。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的测量得到的。实际上,真值只是一个理想的概念,实际中无法得到。因为,无论利用何种量具或仪器,采用何种测量方法,误差总是不可避免的。

关于误差,还需要介绍几个基本概念,即实际值、标称值和示值。实际值的意义是在每一级误差测量和比较中,都以上一级标准所体现的值当作准确无误的值。所以在实际测量中,常用高一级标准仪器的示值来代替真值,通常称为实际值,也叫做相对真值。

标称值的意义是测量器具上标定的数值。如标准电阻标出的 1Ω , 信号发生器度盘上标出的输出正弦波的频率 100kHz 等。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。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,例如某电阻标称值为 $1\text{k}\Omega$, 误差 $\pm 1\%$, 即该电阻的实际值在 $990 \sim 1010\Omega$ 之间。

示值的意义是由测量器具指示的被测量的量值,也称测量器具的测量值,它包括数值和单位。一般地说,示值与测量仪表的读数有区别,读数是仪器刻度盘上直接读到的数字。例如以 100 分度表示 50mA 的电流表,当指针指在刻度盘上的 50 处时,读数是 50 ,而值是 25mA 。对于数字式显示仪表,通常示值和读数是统一的。

测量就是一个比较过程,即把一个被测量与一个充当测量单位的已知量进行比较,所以测量结果包括数字和计量单位两部分。测量误差就是测量值与真值之间存在的差异,误差伴随于测量过程的始终。人们只能根据需要和可能,将其限制在一定范围内而不可能完全消除。在实际测量中,应分析误差产生的原因,合理选用仪器和测量方法,正确处理数据,使测量结果尽可能逼近真值。

一、电子测量误差的表示方法及计算

使用任何量具或仪器进行测量时,总存在着误差。因此,测量结果不可能准确地等于被测量的真值,而只是近似值。

(一) 绝对误差

若被测量的真值为 A_0 , 测量仪器的示值为 x , 则得到绝对误差 Δx 为:

$$\Delta x = x - A_0$$

由于真值 A_0 一般无法求得,故常用高一级标准仪器的示值 A 代替真值, x 与 A 之差称为仪器的示值误差,记为:

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

由于式(1-1)以代数差的形式给出了误差绝对值的大小及符号,故通常称为绝对误差。它是有大小和单位的量。

绝对值与 Δx 相等但符号刚好相反的值,称为修正值,一般用 C 表示:

$$C = -\Delta x = A - x$$

受检仪器的修正值一般是通过检定(校准)由上一级标准(或基准)以表格、曲线或公式的形式给出的。

在测量时,利用示值与已知的修正值相加,即可计算出被测量的实际值:

$$A = x + C$$

例 1-2 某电流表测得的电流示值为 0.83mA ,查该电流表检定证书,得知该电流表在 0.8mA 及其附近的修正值都为 -0.02mA ,那么被测电流的实际值为:

$$A = [0.83 + (-0.02)]\text{mA} = 0.81\text{mA}$$

(二) 相对误差

为了说明测量的准确度,经常采用相对误差的形式,可分为:

1. 实际相对误差 因为一般情况下得不到真值,所以用绝对误差与实际值之比来表示相对误差,称为实际相对误差,用 γ_A 表示:

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

如前例,已知 $\Delta x = -C = 0.02\text{mA}$, $A = 0.81\text{mA}$,故:

$$\gamma_A = \frac{0.02}{0.81} \times 100\% = 2.47\%$$

2. 示值相对误差 在误差较小、要求不太严格的场合,也可以用仪器测得值代替实际值,这时的相对误差称为示值相对误差,用 γ_x 表示:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-2)$$

同前例,已知 $\Delta x = 0.02\text{mA}$, $x = 0.83\text{mA}$,故:

$$\gamma_x = \frac{0.02}{0.83} \times 100\% = 2.41\%$$

3. 满度相对误差 满度相对误差为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 表示:

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-3)$$

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 的大小依次划分成 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 及 5.0 七级。例如 2.5 级的电表,就表示其满度相对误差 γ_m 范围为 $\pm 2.5\%$,并在面板上标以 2.5 的符号。

比较式(1-3)和式(1-2)可以看出:为了减少测量中的示值误差,在选择量程时应使指针尽可能接近于满度值。一般指针最好指在不小于满度值 $2/3$ 的区域。

4. 用分贝表示的相对误差 用分贝表示的相对误差在电子测量仪器中应用十分广泛。

对于电流、电压等参量,有:

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

对于功率类电参量,有:

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

当误差较小时,它与其他相对误差有以下关系:

对电流、电压类参量: $\gamma_{dB} \approx 8.69 \gamma_x \text{dB}$, $\gamma_x \approx 0.115 \gamma_{dB}$

对功率类参量: $\gamma_{dB} \approx 4.3 \gamma_x \text{dB}$, $\gamma_x \approx 0.23 \gamma_{dB}$

(三) 容许误差

测量仪器的误差是产生测量误差的主要因素。为了保证测量结果准确可靠,必须对测量仪器本身的误差有一定要求。容许误差是指测量仪器在规定的使用条件下可能产生的最大误差范围。容许误差有时也称作仪器误差,它是衡量电子测量仪器质量的最重要的指标。容许误差的表示方法既可以用绝对误差形式,也可以用相对误差形式,或者将两者结合起来表示。在指针式仪表中,容许误差就是满度相对误差 γ_m 。

容许误差是指某一类仪器不应超出的误差最大范围,并不是指某一台确定仪器的实际误差。假如有几台合格的毫伏表,技术说明书给出的容许误差是 $\pm 2\%$,则只能说明这几台毫伏表的容许误差范围为 $\pm 2\%$,并不能由此判断其中每一台的误差。

一般电子测量仪器的容许误差有4种:工作误差、固有误差、影响误差及稳定误差。

1. 工作误差 工作误差是在额定工作条件下仪器误差的极限值,即来自仪器外部的各种影响量和仪器内部的影响特性为任意可能的组合时,仪器误差的最大极限值。这种表示方法的优点是使用非常方便,使用者可以利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围。缺点是工作误差是在最不利的组合条件下给出的,而实际使用中构成最不利组合的可能性很小。因此,用仪器的工作误差来估计测量结果的误差,前者会偏大。

2. 固有误差 固有误差是当仪器的各种影响量和影响特性处于基准条件时,仪器所具有的误差。这些基准条件是比较严格的,所以这种误差能够更准确地反映仪器所固有的性能,便于在相同条件下,对同类仪器进行比较和校准。

3. 影响误差 影响误差是当一个影响量在其额定使用范围内(或一个影响特性在其有效范围内)取任意值,而其他影响量和影响特性均处于基准条件时所测得的误差。例如温度误差、频率误差等。只有当某一影响量在工作误差中起重要作用时才给出影响误差,它是一种误差的极限。

4. 稳定误差 稳定误差是仪器的标称值在其他影响量和影响特性保持恒定的情况下,于规定时间内产生的误差极限。习惯上以相对误差形式给出稳定误差或者注明最长连续工作时间。

使用者可能还会遇到其他的电子仪器的误差表示方法,如基本误差和附加误差。基本误差就是固有误差,只是基准条件宽一些。附加误差类似于影响误差,但又不完全相同。它是指规定工作条件中的一项或几项发生变化时,仪器产生的附加误差。所谓规定工作条件的变化,可以是使用条件发生变化,也可以是被测对象参数发生变化。

二、误差来源分析及分类

(一) 误差来源分析

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主要来源,以便估

算测量误差并采取相应措施减小测量误差。测量误差是指测量仪器进行测量时,所得到的指示值与被测量的实际值之差。它是多种误差因素共同作用的结果。

1. 仪器误差 仪器误差是由于仪器、仪表本身及其附件设计、制造、装配、检定等的不完善以及仪器使用过程中元器件老化、机械部件磨损、疲劳等因素而使测量仪器设备带有的误差。如电桥中的标准电阻、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仪器误差。减小仪器误差的主要途径是根据具体测量任务,正确地选择测量方法和使用测量仪器。

2. 使用误差 使用误差又称操作误差,是由于对测量设备操作使用不当而造成的误差。例如将按规定应垂直安放的仪表水平放置,由于仪表接地不良,测试引线太长而造成损耗或未考虑阻抗匹配,未按操作规程进行预热、调节、校准后再测量等,都会产生使用误差。减小使用误差的最有效途径是提高测量操作技能,严格按照仪器使用说明书规定的方法步骤进行操作。

3. 人为误差 人为误差是由于测量者的分辨能力、视觉疲劳、固有习惯或缺乏责任心等因素引起的误差。例如读错刻度、念错读数。对于某些需借助人眼、人耳来判断结果的测量以及需要进行人工调节的测量工作,均会引入人为误差。减小人为误差的主要途径有: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式显示的测量仪表等。

4. 影响误差 由于各种环境因素与要求条件不一致而造成的误差称为影响误差。对电子测量来说,最主要的影响因素是环境温度、电源电压和电磁干扰。当环境条件符合要求时,影响误差通常可以不予考虑。

5. 方法误差和理论误差 由于测量方法不合理所造成的误差称为方法误差。例如用普通万用表测量电路中高阻值电阻两端的电压,由于万用表电压档内阻不高而形成分流作用引起的误差即为方法误差。用近似公式或近似值计算测量结果所引起的误差称为理论误差。

(二) 误差的分类

虽然产生误差的原因多种多样,但按误差的基本性质和特点,误差可分为三种,即系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差 在相同条件下,多次测量同一量时,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,误差即为一确切数值。用多次测量取平均值的方法,并不能改变误差的大小。系统误差产生的原因是多方面的,但总是有规律的。针对其产生的根源采取一定的技术措施,可减小它的影响。例如,对零点不准的仪器重新调零,即可减小系统误差。

2. 随机误差 随机误差又称偶然误差,它是指在相同条件下,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就属于随机误差。随机误差在多次测量时,其总体服从统计规律,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。

3. 粗大误差 在一定的测量条件下,测得值明显地偏离实际值所形成的误差称为粗大

误差,也称为疏失误差,简称粗差。确认含有粗差的测得值称为坏值,应当剔除不用,因为坏值不能反映被测量的真实数值。产生粗差的主要原因包括:

(1) 测量方法不当或错误 例如用普通万用表电压档直接测量高内阻电源的开路电压,用普通万用表交流电压档测量高频交流信号的幅值等。

(2) 测量操作疏忽和失误 例如未按规程操作,读错读数或单位,记录及计算错误等。

(3) 测量条件的突然变化 例如电源电压突然增高或降低、雷电干扰、机械冲击等引起测量仪器示值的剧烈变化等。这类变化虽然也带有随机性,但由于它造成的示值明显偏离实际值,因此将其列入粗差范围。

三、误差数据的处理方法

测量数据的处理,就是从测量中得到的原始数据中求出被测量的最佳估计值,并计算其精确程度。测量结果通常用数字和图形两种形式表示。用数字方式表示的测量结果,可以是一个数据,也可以是一组数据;用图形方式表示的测量结果,可以是将测量数据处理后绘制的图形,也可以是显示在屏幕上的图形,具有形象、直观的特点。如放大器的幅频特性曲线等。

以数字方式表示的测量结果——数据,包括数值和计量单位两部分。例如 3.27V、98A 等。测量结果一定要注明单位,否则就毫无意义。有时为了表明测量结果的可信度,还要注明误差范围,如 $3.27V \pm 0.01V$ 等。

(一) 有效数字的概念

组成数据的每个必要数字,称为有效数字,即从左边第一个非零数字开始,直至右边最后一个数字为止的所有数字。例如某电流值 0.0321mA,其中“3、2、1”三个数字就是有效数字,而左边两个“0”是非有效数字;由于最后一位有效数字“1”是估测的,所以称为欠准数字或不可靠数字,而“1”左边的“2、3”两个有效数字均为准确数字。“0”在一个数中,可能是有效数字,也可能不是有效数字。例如 0.02030MHz,“2”前面的两个“0”不是有效数字,中间及末尾的“0”都是有效数字。因为前面的“0”与测量准确度无关,当转换成另一个单位时,它可能就不存在了,将上例变换成 20.30kHz 后,前面的“0”即没有了。数字尾部的“0”很重要。20.30 表示测量结果精确到百分位。而 20.3 则表示精确到十分位。有效数字不能因选用的单位发生变化而改变。例如测量结果为 2.0V,它的有效数字为两位,如果改用 mV 为单位,应该为 2000mV 如果认为有效数字变为四位,这显然是错误的,应改写为 $2.0 \times 10^3 \text{mV}$,此时它的有效数字仍是两位。

有效数字的位数不仅表明了被测量的大小,同时还表明了测量的精度。决定有效数字位数的是误差。并非写出的位数越多越好,多写位数,就夸大了测量准确度;少记位数将带来附加误差。对测量结果有效数字的处理原则是:根据测量的准确度来确定有效数字的位数(允许保留一位欠准数字),再根据舍入规则将有效位以后的数字作舍入处理。

(二) 有效数字的处理

在实际测量中,经常要对测量结果的几个数据的有效数据进行必要的处理,然后进行运算。保留的有效数字位数过多过少,都会影响最后的结果。保留位数的总原则是:运算过程中的有效数字的位数应按准确度最差的数据的有效数字进行取舍。

删略多余的有效数字应按“四舍五入”的原则进行。即大于5的数，向前入1；小于5的数，舍去；而等于5的数，有两种情况：

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

例1-3 以下数字均保留小数点后一位有效数字：

- 16.34→16.3 (舍去4)
 16.36→16.4 (舍6入1)
 16.35→16.4 (5后面无数字,5前面3为奇数,舍5入1)
 16.45→16.4 (5后面无数字,5前面4为偶数,舍5)
 11.150→11.2 (5后面为0,前面是奇数,舍5入1)
 10.253→10.3 (5后面有数字,舍5入1)

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、除等运算。加、减运算中，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。乘、除运算中，有效数字的取舍决定于有效数字最少的一项数据，而与小数点无关。

例1-4 运算下列数据：

1) $5.432 + 3.02 + 1.1234 \approx 5.43 + 3.02 + 1.12 = 9.57$

由于3.02精确度最差，故小数点后保留两位。

2) $43.12 \times 0.32 \div 6.09 \approx 43 \times 0.32 \div 6.1 = 2.3$

由于0.32精确度最差，故取两位有效数字。

本章小结

电子测量技术是现代科技、生产和社会活动的一项支撑性技术，其应用范围几乎遍及所有领域。本章作为绪论，介绍了电子测量技术的基本概念、主要内容、基本特点、主要方法、电子测量仪器的主要类型及应用场合等。

本章还介绍了测量误差和数据处理的基本知识；电子测量误差的表示方法，如绝对误差、相对误差和容许误差；测量误差的来源以及分析，如系统误差、随机误差、粗大误差等；数据的处理方法，如有效数字的概念及其处理方法等。

通过本章的学习，使学生建立起电子测量技术的基本概念，了解电子测量技术的基本知识，为下面内容的学习奠定基础。

习 题 一

1. 简述电子测量的意义和主要特点。
2. 简述测量误差的分类。
3. 说明系统误差、随机误差和粗大误差的主要特征。
4. 用一个修正值为-0.3V的电压表去测量电压，示值为7.5V，问实际电压为多少？
5. 若测量10V电压，现有两只直流电压表，一只量程为150V、0.5级；另一只量程为15V、2.5级。问选用哪一只电压表测量更合适，为什么？
6. 采用一只量程为5V、 $\gamma_m = 1.5\%$ 的电压表去测量两处电压，测量值分别为4.26V及4.19V，问两处

电压的绝对误差和相对误差各为多少？

7. 现校准一个量程为 100mV、表盘为 100 等分刻度的毫伏表，测得数据如下：

仪表刻度值/mV	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
校准表示值/mV	0.0	9.9	21	29	39.8	50.2	60.4	70.3	80.0	89.7	100.0
绝对误差 Δx /mV											
修正值 C /mV											

求：1) 将各校准点的绝对误差和修正值填在表格中。

2) 10mV 刻度上的示值相对误差 γ_x 和实际相对误差 γ_A 为多少？

3) 确定仪表的准确度等级。

8. 按照舍入法则，对下列数据进行处理，使其保留三位有效数字：

86.372, 8.9145, 3.1750, 0.03215, 59.450, 0.00071, 10.4650, 24.4550, 12.126, 21000, 0.000321。

9. 按照有效数字的运算法则，计算下列各结果：

1) 1.0713×3.2 2) 1.0713×3.20 3) 40.313×4.52

4) 0.514×3.7 5) $56.09 + 4.6532$ 6) $70.4 - 0.453$

10. 指出下列数据中的有效数字、准确数字和欠准数字：

10009, 0.00071, 0.549000, 0.000088

5189, 0.900004, 0.066, 7.500