

电子信息测量 及其误差分析校正的研究

DIANZI XINXI CELIANG JIQI WUCHA FENXI JIAOZHENG DE YANJIU

曹连江 著

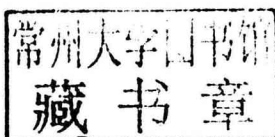


NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS
WWW.NEUP.COM

东北师范大学出版社

电子信息测量及其 误差分析校正的研究

□ 曹连江 著



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NNUP.COM

东北师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子信息测量及其误差分析校正的研究 / 曹连江著. --
长春: 东北师范大学出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5681-3768-3

I.①电… II.①曹… III.①电子信息—电子测量技术—误差
分析 IV.①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 244850 号

□ 策划编辑: 王春彦

□ 责任编辑: 卢永康

□ 封面设计: 优盛文化

□ 责任校对: 赵忠玲

□ 责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行
长春市净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码: 130117)

销售热线: 0431-84568036

传真: 0431-84568036

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbs@mail.jl.cn

河北优盛文化传播有限公司装帧排版

北京一鑫印务有限责任公司

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

幅画尺寸: 185mm×260mm 印张: 17.75 字数: 416 千

定价: 62.00 元



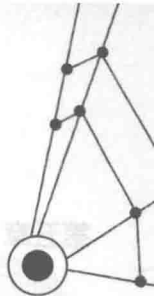
P 前言 PREFACE

在我国实现现代化与中国梦的宏伟事业中,科学技术的现代化是关键,科学实验手段的现代化是实现科学技术现代化的必要条件,而电子信息测量的方法与手段是否现代化正是科学实验手段是否现代化的重要标志。宇宙飞船、航天飞机的发射,火箭、导弹飞行轨道的控制,人造卫星姿态的调整,核潜艇的潜浮操纵,都必须有快速、精确的信息检测;现代化的大地测量、气象遥感、地震预测预报、震后救灾、医疗诊断等都少不了应用电子技术进行高精度的电子信息测量。

同时,随着高新科技的发展,电子技术在航空航天、工业农业、交通运输、国防安全等国民经济领域中得到了越来越广泛的应用。这其中电子信息测量又是电子技术信息检测的重要手段,它是一门发展快、应用面宽、实践性强的应用性学科,在当今的信息化社会中日益发挥着中流砥柱的作用。为适应国民经济建设对电子信息测量技术专业人才的需求,许多高等工业学校相继开办了“测控技术与仪器”专业,即便是电子类的其他专业,如“通信工程”“电子信息工程”“探测制导与控制技术”等专业也纷纷开设了电子信息测量类课程。而误差分析与数据处理一直是我国高校化学、分析化学、物理、材料物理、计量管理与质量管理、仪器、机械、医学检验、土木工程检测技术及机电结合类等专业的专科生、本科生和某些专业的研究生的必修课。

本书是在全面了解电子信息测量技术与误差分析校正的基础上,以系统性、科学性、实用性为特色,对电子信息测量及其误差分析校正进行分析研究。首先对电子信息测量技术的基本概念及其发展现状、发展趋势进行分析;然后对信号发生器、电子示波器等电子信息测量的关键设备以及电子信息测量的关键技术进行分析;最后对测量误差的分类、来源、分析处理方法以及校正方法进行系统的分析。本书内容全面,适用面广,希望通过对电子信息测量及其误差分析校正的研究,可以为自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器等相关专业的师生提供帮助,同时希望能够为从事传感器与检测技术相关领域应用和设计开发的研究人员、工程技术人员提供参考。

由于时间紧张,编者水平有限,本书难免存在不足之处,在本书出版之际,我们真诚地希望读者对本书提出宝贵的意见和建议。



目录 CONTENT

第一章	电子信息测量基本概念	001
第一节	测量与电子信息测量	001
第二节	电子信息测量的内容和特点	002
第三节	电子信息测量方法的分类	004
第四节	电子信息测量仪器的功能、分类和主性能指标	007
第五节	计量的基本概念	010
第二章	电子测量的发展概述	014
第一节	电子测量的发展现状	014
第二节	电子测量面临的挑战与问题	015
第三节	电子测量技术的发展趋势	018
第三章	电子信息测量的关键设备	020
第一节	信号发生器	020
第二节	电子示波器	042
第四章	电子信息测量的关键技术研究	069
第一节	频率及时间测量	069
第二节	相位差测量	095
第三节	电压测量	106
第四节	阻抗测量	142
第五节	噪声测量	159
第六节	数据域测量与测量新技术简介	171

第五章 测量误差概述 189

第一节 测量误差的基本概念及分类 / 189

第二节 测量误差的来源 / 197

第三节 测量数据的表示方法 / 198

第六章 误差的合成与测量的不确定度分析 202

第一节 测量误差的合成分析 / 202

第二节 最佳测量方案的误差分配与调整 / 205

第三节 测量不确定度分析 / 207

第七章 测量过程中随机误差的分析处理 232

第一节 数理统计概念 / 232

第二节 随机误差的参数计算 / 234

第三节 加权数据处理 / 238

第四节 测量值的基本分布 / 240

第八章 测量过程中系统误差及粗大误差的分析处理 244

第一节 系统误差概述 / 244

第二节 系统误差的发现方法 / 248

第三节 粗大误差及其离群值判断准则 / 253

第四节 测量数据处理的方法 / 256

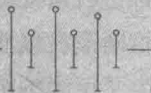
第九章 电子信息测量的误差分析校正方法 260

第一节 线性参数的最小二乘法处理 / 260

第二节 回归分析法 / 264

参考文献 275

第一章 电子信息测量基本概念



第一节 测量与电子信息测量

一、测 量

人们通过对客观事物的大量观察和测量形成定性和定量的认识，归纳总结，建立起各种定理和定律，而后又通过测量来验证这些认识、定理和定律是否符合实际情况，经过如此反复实践，逐步认识事物的客观规律，并用以解释和改造世界。因此可以说，测量是人类认识和改造世界的一种不可或缺的手段。俄国科学家门捷列夫在论述测量的意义时曾说过：“没有测量，就没有科学。”“测量是认识自然界的主要工具。”英国科学家库克也认为：“测量是技术生命的神经系统。”这些话都极为精辟地阐明了测量的重要意义。历史事实也已证明：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依赖、相互促进的。测量技术水平是一个历史时期、一个国家的科学技术水平的一面镜子。正如特爾曼教授所说：“科学和技术的发展是与测量技艺并行进步、相互匹配的。事实上，可以说，评价一个国家的科技状态，最快捷的办法就是去审视那里所进行的测量以及由测量所累积的数据是如何被利用的。”

二、电子信息测量

在对非电量进行测量时，先通过各种传感器将非电量转换为电量，然后再实现对非电量的测量。

电子信息测量方法往往更加方便、快捷、准确，有时是其他测量方法所不能替代的。因此，电子信息测量不仅用于电学各专业，也广泛用于物理学、化学、机械学、材料学、生物学、医学、航空航天等科学领域及生产、国防、交通、通信、商业贸易、生态环境保护乃至



日常生活的各个方面。

几十年来,计算机技术和微电子技术的迅猛发展,为电子信息测量和测量仪器增添了巨大活力。电子计算机,尤其是微型计算机与电子信息测量仪器相结合,构成了一代崭新的仪器和测试系统,即人们通常所说的“智能仪器”和“自动测试系统”,它们能够对若干电参数进行自动测量、自动量程选择、数据记录和处理、数据传输、误差修正、自检自校、故障诊断及在线测试等,不仅改变了若干传统测量的概念,更对整个电子技术和其他科学技术产生了巨大的推动作用。现在,电子信息测量技术(包括测量理论、测量方法、测量仪器装置等)已成为电子科学领域重要且发展迅速的分支学科。

第二节 电子信息测量的内容和特点

一、电子信息测量的内容

通常人们把电参数测量分为电磁测量和电子信息测量两类。电磁测量的内容包括交直流电量的指示测量和比较测量以及磁量的测量等。电子信息测量的内容包括对电量和非电量所进行的测量。其中,对电量的测量可细分为以下几个方面。

(一) 电能量测量

电能量测量包括对各种频率、波形下的电压、电流、功率等的测量。

(二) 电信号特性测量

电信号特性测量可分为时域、频域和数据域特性测量,具体包括对波形、频率、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数、群延迟、信号带宽以及数字信号的逻辑状态等的测量。

(三) 电路元件参数测量

电路元件参数测量包括对电阻、电感、电容、阻抗、品质因数及电子器件参数等的测量。

(四) 电子设备的性能测量

电子设备的性能测量包括对增益、衰减、灵敏度、频率特性、噪声指数等的测量。

上述各项测量内容中,尤以对频率、时间、电压、相位、阻抗等基本电参数的测量为主,因为它们往往是其他参数测量的基础。例如,放大器的增益测量实际上就是对其输入、输出端电压的测量,再相比取对数得到增益分贝数;脉冲信号波形参数的测量可归结为对电压和时间的测量;许多情况下电流测量是不方便的,常以电压测量来代替。同时,由于时间和频率测量具有其他测量所不可比拟的精确性,因此,人们越来越关注把对其他待测量的测量转换成对时间或频率的测量的方法和技术。

在科学研究和生产实践中,常常需要对许多非电量进行测量。传感技术的发展为这类测量提供了新的方法和途径。现在,可以利用各种敏感元件和传感装置将非电量(如位移、速度、温度、压力、流量、物质成分等)变换成电信号,再利用电子信息测量设备进行测量。



在一些危险的和人们无法进行直接测量的场合,这种方法几乎成为唯一的选择。在生产自动过程控制系统中,将生产过程中各有关非电量转换成电信号进行测量、分析、记录并据此对生产过程进行控制是一种典型的方法。

二、电子信息测量的特点

与其他测量方法和测量仪器相比,电子信息测量和电子信息测量仪器具有以下特点。

(一) 测量频率范围宽

电子信息测量中所遇到的测量对象,其频率覆盖范围极宽,低至 10^{-6} Hz, 高至 10^{12} Hz。当然,不能要求同一台仪器能在这样宽的频率范围内工作,通常根据不同的工作频段采用不同的测量原理,使用不同的测量仪器。例如阻抗的测量,在低频段多采用电流电压法,而在微波段则必须采用开槽测量线或反射计技术。上述两种方法无论在原理上,还是在测量设备上都大不一样。当然,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,其频率测量范围可低至 10^{-6} Hz, 高至 10^{11} Hz。

(二) 测量量程宽

量程是测量范围的上、下限值之差或上、下限值之比。电子信息测量的另一个特点是被测对象的量值大小相差悬殊。例如,地面上接收到的宇宙飞船自外太空发来的信号功率低至 10^{-14} W 数量级,而远程雷达发射的脉冲功率可高达 10^8 W, 两者之比为 $1:10^{22}$ 。一般情况下,使用同一台仪器,同一种测量方法,是难以覆盖如此宽广的量程的。如前所述,随着电子信息测量技术的不断发展,单台测量仪器的量程也可以很高。例如中档的国产 YM3371 型数字频率计,其测频范围为 $10\text{ Hz} \sim 1\,000\text{ MHz}$, 国产 WC2180 型交流微伏表可以测量 $5\text{ }\mu\text{V} \sim 300\text{ V}$ 的交流电压,量程为 $1:(6 \times 10^7)$ 。一些更为先进的仪器,其量程更宽。例如高档的数字万用表直接测量的电阻值为 $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^8\text{ }\Omega$, 量程为 $1:10^{13}$ 。前面提及的较完善的电子计数式频率计,其量程达 $1:10^{17}$ 。

(三) 测量准确度高低相差悬殊

就整个内容而言,测量结果的准确度是不一样的,有些参数的测量准确度可以很高,而有些参数的测量准确度却又相当低。例如,对频率和时间的测量准确度可以达到 $10^{-13} \sim 10^{-11}$ 的数量级,这是目前在测量准确度方面达到的最高指标,而长度测量的最高准确度为 10^{-8} 数量级。可惜除了频率和时间的测量准确度很高之外,其他参数的测量准确度相对都比较低。例如,直流电压的准确度当前可达到 10^{-6} 数量级,音频电压为 10^{-4} 数量级,射频电压仅为 10^{-1} 数量级,而品质因数和电场强度的测量准确度只有 10^{-1} 数量级。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,待测装置和测量装置之间、装置内部各元器件之间的电磁耦合、外界干扰及测量电路中的损耗等对测量结果的影响往往不能忽略却又无法精确估计。

（四）测量速度快

由于电子信息测量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，使得电子信息测量无论在测量速度还是在测量结果的处理和传输上都能以极高的速度进行，这也是电子信息测量技术广泛应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，简直是无法想象的。

（五）可以进行遥测

电子信息测量依据的是电子的运动和电磁波的传播。因此，可以将现场各待测量转换成易于传输的电信号，用有线或无线的方式传送到测试控制台（中心），从而实现遥测和遥控。这使得对那些远距离的、高速运动的或其他人们难以接近的地方的信号进行测量成为可能。

（六）易于实现测试智能化和测试自动化

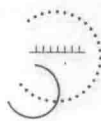
电子信息测量本身是电子学科一个活跃的分支，电子科学的每一项进步都会非常迅速地在电子信息测量领域得到体现。电子计算机尤其是功耗低、体积小、处理速度快、可靠性高的微型计算机的出现，给电子信息测量理论、技术和设备带来了新的革命。比如，微处理器出现于 1971 年，而在 1972 年就出现了使用微处理器的自动电容电桥。现在，已有大量商品化带微处理器的电子信息测量仪器面世，许多仪器还带有 GPIB 标准仪器接口，可以方便地构成功能完善的自动测试系统。毫无疑问，电子测试技术与计算机技术的紧密结合和相互促进，为测量领域带来了极为美好的前景。

（七）影响因素众多，误差处理复杂

任何测量如果不能准确地确定误差或误差范围的大小，则无法衡量测量结果的准确程度、可靠性或可信性，从而也就失去了测量的意义和价值。造成测量误差的原因是多方面的。客观上影响测量结果及测量误差的因素大体上可分为外部因素和内部因素。通常，来自测量系统的外部，能对测量结果产生影响的量称为影响量，如环境温度、湿度、电源电压、外界电磁干扰等；测量系统内部对测量结果产生影响的工作特性，称为影响特性。例如，交流电压表中检波器的检波特性会随着被测电压的频率和波形而有所改变，从而影响测量结果。前面已经提到，电子信息测量中另一个难以避免而又无法准确估算其实际影响大小的因素是：测量仪器内部各元器件之间、测量与被测量装置之间无时无刻不在的寄生电容、电感、电导等的不良影响。不难看出，电子信息测量中的影响量和影响特性众多而又复杂，其规律难以确定，这就给测量结果的误差分析和处理带来了困难。

第三节 电子信息测量方法的分类

一个物理量的测量可以通过不同的方法实现。测量方法选择得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。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量设备。有了先进精密的测量仪器设



备,并不等于就一定能获得准确的测量结果。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、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。

一、测量方法的分类

测量方法的分类形式有多种,下面为几种常见的分类方法。

(一) 按测量过程分类

1. 直接测量

直接测量是指直接从测量仪表的读数获取被测量量值的方法,比如用电压表测量晶体管的工作电压,用欧姆表测量电阻阻值,用计数式频率计测量频率等。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的辅助运算,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

间接测量是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”获得功耗 P 。

间接测量费时、费事,常在下列情况下使用: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。

3. 组合测量

当某项测量结果需用多个未知参数表达时,可通过改变测量条件进行多次测量,根据测量量与未知参数间的函数关系列出方程组并求解,进而得到未知量,这种测量方法称为组合测量。

(二) 按测量方式分类

1. 偏差式测量法

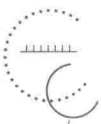
在测量过程中,用仪器仪表指针的位移(偏差),表示被测量大小的测量方法称为偏差式测量法,例如使用万用表测量电压、电流等。由于从仪表刻度上直接读取被测量,包括大小和单位,因此这种方法也叫直读法。用这种方法测量时,作为计量标准的实物并不装在仪表内直接参与测量,而是事先用标准量具对仪表读数、刻度进行校准,实际测量时根据指针偏转大小确定被测量量值。

这种方法的显著优点是简单、方便,因此在工程测量中被广泛采用。

2. 零位式测量法

零位式测量法又称作零示法或平衡式测量法。测量时将被测量与标准量相比较(因此也把这种方法称作比较测量法),用指零仪表(零示器)指示被测量与标准量相等(平衡),从而获得被测量。

这种方法的显著优点是测量准确度很高。常用在实验室作为精密测量的一种方法。但由



电子信息测量及其误差分析校正的研究

于测量过程中为了获得平衡状态,需要进行反复调节,因此即使采用一些自动平衡技术,测量速度仍然较慢,这是这种方法的一个不足之处。

3. 微差式测量法

偏差式测量法和零位式测量法相结合,构成微差式测量法。该法通过测量待测量与标准量之差(通常该差值很小)来得到待测量的值,和零位式测量法相比,该法省去了反复调节标准量大小以求平衡的步骤。因此,该法兼有偏差式测量法测量速度快和零位式测量法测量准确度高的优点。微差式测量法除在实验室中用作精密测量外,还广泛地应用在生产线上控制参数的测量上,如监测连续轧钢机生产线上的钢板厚度等。

(三) 按被测量的性质分类

如果按被测量的性质进行划分,测量还可以做如下分类。

1. 时域测量

时域测量主要测量被测量随时间的变化规律,亦称瞬态测量。典型的例子为用示波器观察脉冲信号的上升沿、下降沿、平顶降落等脉冲参数以及动态电路的暂态过程等。

2. 频域测量

频域测量主要获取待测量与频率之间的关系,又称为稳态测量。例如用频谱分析仪分析信号的频谱和测量放大器的幅频特性、相频特性等。

3. 数据域测量

数据域测量是用逻辑分析仪等设备,对数字量或电路的逻辑状态进行测量,又称逻辑域测量。数据域测量可以同时观察多条数据通道上的逻辑状态,或者显示某条数据线上的时序测量。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。随着微电子技术的发展需要,数据域测量及其测量智能化、自动化显得愈来愈重要。

4. 随机测量

随机测量又称作统计测量,主要是对各类噪声信号进行动态测量和统计分析。这是一项较新的测量技术,尤其在通信领域有重要应用。

除了上述几种常见的分类方法外,还有其他一些分类方法。比如,按照对测量精度的要求,分为精密测量和工程测量;按照测量时测量者对测量过程的干预程度,分为自动测量和非自动测量;按照被测量与测量结果获取地点的关系,分为本地(原位)测量和远地测量(遥测),接触测量和非接触测量;按照被测量的属性,分为电量测量和非电量测量等。

二、测量方法的选择原则

在选择测量方法时,要综合考虑下列主要因素: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现有测量设备等。在此基础上,选择合适的测量仪器和正确的测量方法。前面曾提到,正确、可靠的测量结果的获得,要依据测量方法和测量仪器的正确选择、正确操作和测量数据的正确处理。否则,即便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。



第四节 电子信息测量仪器的功能、分类和主性能指标

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设备,包括各类指示仪器、比较仪器、记录仪器和传感器等,利用电子技术对各种待测量进行测量。

一、测量仪器的功能

各类测量仪器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。

(一) 变换功能

对电压、电流等电学量的测量,是通过测量各种电效应来达到目的的。比如作为模拟式仪表最基本构成单元的动圈式检流计(电流表),就是将流过线圈的电流强度转化成与之成正比的转矩,使仪表指针相对于初始位置偏转一个角度,根据角度偏转大小(这可通过刻度盘上的刻度获得)得到被测电流的大小,这就是一种基本的变换功能。对非电量的测量,必须将各种非电物理量(如压力、位移、温度、湿度、亮度、颜色、特质成分等)通过各种对之敏感的敏感元件(通常称为传感器)转换成与之相关的电压、电流等,而后通过对电压、电流的测量、转换得到被测物理量的大小。随着测量技术的发展,现在往往将传感器、放大电路及其他有关部分构成独立的单元电路,将被测量转换成模拟的或数字的标准电信号,送往测量和处理装置,这样的单元电路称为变送器,它是现代测量系统中极为重要的组成部分。

(二) 传输功能

在遥测、遥控等系统中,现场测量结果经变送器处理后,需经较长距离的传输才能送到测试终端和控制台。不管采用有线的还是无线的方式,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。

(三) 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。比如,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、液晶或阴极射线管显示测量结果。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。

二、测量仪器的分类

电子信息测量仪器的分类方法不一,按其功能大致可分为下面几类。

(一) 电平测量仪器

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。

（二）电路参数测量仪器

电路参数测量仪器包括各类电桥、Q 表、RLC 测试仪、晶体管或集成电路参数测试仪、图示仪等。

（三）频率、时间、相位测量仪器

频率、时间、相位测量仪器主要包括电子计数式频率计、石英钟、数字式相位计、波长计等。

（四）波形测量仪器

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。

（五）信号分析仪器

信号分析仪器包括失真度仪、谐波分析仪、频谱分析仪等。

（六）模拟电路特性测试仪器

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。

（七）数字电路特性测试仪器

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设备。

（八）测试用信号源

测试用信号源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。由于它们的主要功能是作为测试用信号源，因此又称供给量仪器。

三、测量仪器的主要性能指标

从获得的测量结果角度评价测量仪器的性能，主要包括以下几个方面。

（一）精 度

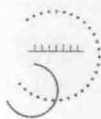
精度是指测量仪器的读数（或测量结果）与被测量真值相一致的程度。对精度目前还没有一个公认的定量的数学表达式，因此常作为笼统的概念使用，其含义是：精度高，表明误差小；精度低，表明误差大。因此，精度不仅用来评价测量仪器的性能，也是衡量结果优劣最主要、最基本的指标。精度又可用精密度、正确度和准确度三个指标加以细化表征。

1. 精密度

精密度表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大小。精密度高，意味着随机误差小，得到的测量结果发现比如某电压表的精密度为 0.1 V ，即表示用它对同一电压进行测量时，得到的各次测量值的分散程度不大于 0.1 V 。

2. 正确度

正确度表明仪表指示值与真值的接近程度。所谓真值，是指待测量在待定状态下所具有的真实值大小。正确度反映了系统误差（例如仪器中放大器的零点漂移、接触电位差等）的



影响大小。正确度高,则说明系统误差小。比如某电压表的正确度是 0.1 V ,则表明用该电压表测量电压时的指示值与真值之差不大于 0.1 V 。我国电工仪表的分级就是按正确度来确定的。

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,致使最终测量结果的可信度也高。

在具体的测量实践中,可能会有这样的情况:正确度较高而精密度较低,或者情况相反,相当精密但欠正确。当然,理想的情况是既正确,又精密,即测量结果准确度高。要获得理想的测量结果,应满足三个方面的条件。为了加深对精密度、正确度和准确度三个概念的理解,可以以射击打靶为例加以说明。

(二) 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,仪器示值变化的大小。造成这种示值变化的原因主要是仪器内部各元器件的特征、参数不稳定和老化等。稳定度可用示值绝对变化量与时间一起表示。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量称为影响误差,一般用示值偏差和引起该偏差的影响量一起表示。

(三) 输入阻抗

电压表、示波器等仪表在测量时并接于待测电路两端,如图 1-1 所示。可以看出,测量仪表的接入改变了被测电路的阻抗特性,这种现象称为负载效应。为了减小测量仪表对待测电路的影响,提高测量精度,通常对这类测量仪表的输入阻抗都有一定的要求。仪表的“输入阻抗”性能的优劣一般用输入电阻 R_i 和输入电容 C_i 标注。

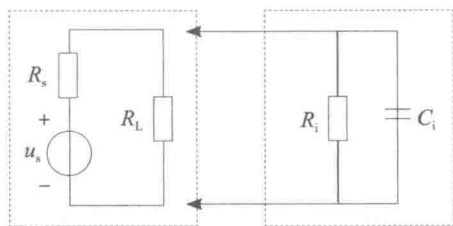


图 1-1 测量仪表的负载效应

(四) 灵敏度

灵敏度表示测量仪表对被测量变化的敏感程度,一般定义为测量仪表指示值(指针的偏转角度、数码的变化、位移的大小等)增量 Δy 与被测量增量 Δx 之比。例如,示波器在单位输入电压的作用下,示波管荧光屏偏转灵敏度,单位为 cm/V 、 cm/mV 等。对示波器而言,偏转灵敏度的倒数称为偏转因数,单位为 V/cm 、 mV/cm 或 mV/div (格)等。由于习惯用法和测量电压读数的方便,也常把偏转因数当作灵敏度。比如,SR37A 型双踪示波器的最高偏转灵敏度是 2 mV/cm ,表示输入电压变化 2 mV 时,示波器荧光屏上的光点产生 1 cm 的位移。显然,这里的偏转灵敏度实际上是偏转因数,不过,这样一般不会引起人们的误解。灵敏度的另一种表述方式称作分辨力或分辨率,在数字式仪表中经常使用。例如, SX1842 型数字电压表的分辨力为 $1\text{ }\mu\text{V}$,表示该电压表显示器上最末位跳变 1 个字时,对应的输入电压变化量为 $1\text{ }\mu\text{V}$,即这种电压表能区分出最小为 1 pV 的电压变化。可见,分辨力

的值愈小,其灵敏度愈高。由于各种干扰和人的感觉器官的分辨能力等因素的影响,不必也不应该苛求仪器有过高的灵敏度,否则将导致测量仪器成本过高以及实际测量操作困难。通常规定分辨力为允许绝对误差的 $1/3$ 。

(五) 线性度

线性度是测量仪表的输入、输出特性之一,表示仪表的输出量(示值)随输入量(被测量)变化的规律。若仪表的输出为 y ,输入为 x ,则两者关系用函数 $y=f(x)$ 表示。如果 $y=f(x)$ 为 $y-x$ 平面上过原点的直线,则称之为线性刻度特性,否则称为非线性刻度特性。由于各类测量仪器的原理各异,因此不同的测量仪器可能呈现不同的刻度特性。例如,常用万用表的电阻档具有上凸的非线性刻度特性,而数字电压表具有线性刻度特性,分别如图 1-2 所示。

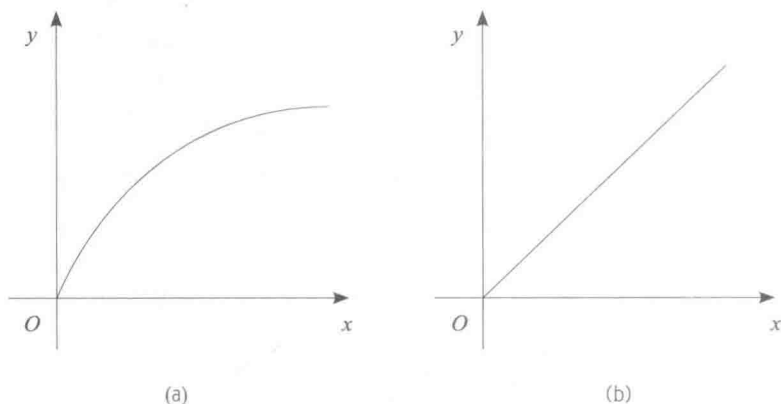


图 1-2 数字电压表的线性刻度特性

仪器的线性度可用线性误差来表示,如 SR46 双线示波器垂直系统的幅度线性误差小于等于 5%。

(六) 动态特性

测量仪表的动态特性表示仪表的输出响应随输入变化的能力。例如,示波器的垂直偏转系统,由于输入电容等因素的影响,造成了输出波形对输入信号的滞后与畸变,示波器的瞬态响应就表示了这种仪器的动态特性。

第五节 计量的基本概念

一、计 量

计量和测量是互有联系又有区别的两个概念。测量是通过实验手段对客观事物取得定量



信息的过程,也就是利用实验手段把待测量直接或间接地与另一个同类已知量进行比较,从而得到待测量值的过程。测量过程中所使用的器具和仪器就直接或间接地体现了已知量,测量结果的准确与否与所采用的测量方法、实际操作和作为比较标准的已知量的准确程度都有着密切的关系。因此,体现已知量在测量过程中作为比较标准的各类量具、仪器仪表必须定期进行检验和校准,以保证测量结果的准确性、可靠性和统一性,这个过程称为计量。计量的定义不完全统一,目前较为一致的意见是:“计量是利用技术和法制手段实现单位统一和量值准确可靠的测量。”计量可看作测量的特殊形式,在计量过程中,认为所使用的量具和仪器是标准的,用它们来校准、检定受检量具和仪器设备,以衡量和保证使用受检量具和仪器进行测量时所获得测量结果的可靠性。因此,计量又是测量的基础和依据。

计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,在工农业生产、科学技术、国防建设、国内外贸易以及人民生活等各个方面起着技术保证和技术监督作用。《中华人民共和国计量法》第一条就指出,“做好计量工作有利于生产、贸易和科学技术的发展,适应社会主义现代化建设的需要,维护国家、人民的利益”,这些都非常深刻地说明了计量工作的重要意义。

二、单位制

任何测量都要有一个统一的,体现计量单位的量作为标准,这样的量称作计量标准。计量单位是有明确定义和名称并令其数值为1的固定的量,例如长度单位1米(m),时间单位1秒(s)等。计量单位必须以严格的科学理论为依据进行定义。法定计量单位是国家以法令形式规定使用的计量单位,是统一计量单位制与单位量值的依据和基础,因而具有统一性、权威性和法制性。1984年2月27日,国务院在发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》时指出,我国的计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。我国法定计量单位以国际单位制(SI)为基础,包括11个国家选定的非国际单位制单位,如时间(分、时、天)、平面角(秒、分、度)、长度(海里)、质量(吨)和体积(升)等。

国际单位制中包括基本单位、导出单位和辅助单位。基本单位是那些可以彼此独立地加以规定的物理量单位,共7个,分别是长度单位米(m)、时间单位秒(s)、质量单位千克(kg)、电流单位安培(A)、热力学温度单位开尔文(K)、发光强度单位坎德拉(cd)和物质的量单位摩尔(mol)。由基本单位通过定义、定律及其他函数关系派生出来的单位称为导出单位。例如力的国际单位牛顿(N)的定义为“使质量为1千克的物体产生加速度为1米每2次方秒的力”,即 $N = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$;在电学量中,除电流外,其他物理量的单位都是导出单位,如频率的单位赫兹(Hz)的定义为“周期为1秒的周期现象的频率”,即 $\text{Hz} = 1 / \text{s}$;能量(功)的单位焦耳(J)的定义为“1牛顿的力使作用点在力的方向上移动1米所做的功”,即 $J = \text{N} \cdot \text{m}$;功率的单位瓦(W)的定义为“1秒内产生1焦耳能量的功率”,即 $W = J / \text{s}$;电荷量库仑(C)的定义为“1安培的电流在1秒内所传送的电荷量”,即 $C = \text{A} \cdot \text{s}$;电位电压的单位伏特(V)的定义为“在载有1安培恒定电流导线的两点间,