

新世纪
高等职业教育规划教材

电子测量技术

徐佩安 主 编
谢展鹏 郭慧泉 副主编

93-43

机械工业出版社
China Machine Press



新世纪高等职业教育规划教材

电子测量技术

主 编	徐佩安	
副主编	谢展鹏	郭慧泉
参 编	王效华	刘婷婷
主 审	蔡昌荣	



机械工业出版社

本书着重讲述电子测量中的基本概念,以电子测量仪器为主线介绍仪器的工作原理、使用方法和测量技能。主要内容有:电子测量基本知识;万用电表;直流稳压电源;毫伏表;信号发生器;示波器;数字频率计;扫频仪、频谱分析仪及失真度测量仪;逻辑分析仪;计算机仿真测量和智能化测量技术。

本书既可作为高等职业学院应用电子技术、通信工程、电子工程等专业学生的教学用书,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

电子测量技术/徐佩安主编. —北京:机械工业出版社, 2002.7
新世纪高等职业教育规划教材
ISBN 7-111-10411-0

I. 电... I. 徐... III. 电子测量—高等学校:技术学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第039211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:王保家 版式设计:张世琴 责任校对:张媛
封面设计:姚毅 责任印制:路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002年7月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·10.75印张·261千字
0 001—4 000册
定价:15.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

新世纪高等职业教育规划教材编审委员会

主任委员	李维东	广东白云职业技术学院	常务副院长
副主任委员	陈周钦	广东交通职业技术学院	院长
	石令明	广西柳州职业技术学院	院长
	蔡昌荣	广州民航职业技术学院	副院长
	覃洪斌	广西职业技术学院	副院长
	姚和芳	湖南铁道职业技术学院	副院长
	韩雪清	机械工业出版社教材编辑室	副主任
委 员	郑伟光	广东机电职业技术学院	院长
	张尔利	广西交通职业技术学院	院长
	谈向群	无锡职业技术学院	副院长
	刘国生	番禺职业技术学院	副院长
	陈大路	温州职业技术学院理工学区	主任
	邹 宁	广西机电职业技术学院	副院长
	修德明	济源职业技术学院	副院长
	管 平	浙江机电职业技术学院	副院长
	韦荣敏	广西柳州市交通学校	校长
	田玉柯	遵义航天工业学校	校长
	黄秀猛	厦门市工业学校	校长
	张毓琴	白云职业技术学院	兼委员会秘书

前 言

电子测量技术是电子技术中进行信息检测的重要手段，它是一门发展快、应用面宽、实践性强的应用学科，在现代科学技术中占有举足轻重的地位。现代高科技中，火箭、导弹飞行轨道的控制，人造卫星飞行姿态的调整，必须有快速、精密的信息检测；现代化的大地测量、气象遥感、地质勘探等也都少不了应用电子技术手段进行测量。

为适应国民经济建设对电子测量技术专业人才的需求，许多高职高专学院的“电子仪器及测量技术”、“检测技术与仪器仪表”、“通信工程”、“电子工程”、“应用电子技术”等专业纷纷开设了电子测量课程，培养学生具有电子测量方面的基础知识和应用能力。

本课程是一门实践性很强的课程，在理论教学的同时，就尽可能与电子测量技能与训练的实践同步进行，以达到理论联系实际，学以致用为目的。教学内容应根据专业不同而各有侧重。

根据教育部对高职高专教材的要求，新世纪高等职业教育规划教材编委会组织二十多家高职高专院校编写新世纪高等职业教育规划教材，本书为其中一本。本书在编写过程中力求适应高等职业院校注重应用能力培养的特点，突出实际应用。在问题的阐述上，避免过深过难的理论推导，力求简明扼要，通俗易懂。对测量仪器仪表讲清工作原理框图，重点介绍电物理量的测量技能。为了教与学的方便，本书各章后配有小结和习题。

本教材的教学参考学时数为54学时，其中第一章2学时，第二章6学时，第三章2学时，第四章4学时，第五章6学时，第六章10学时，第七章2学时，第八章8学时，第九章4学时，第十章8学时，第十一章2学时。

全书共十一章，第一、二、五章由徐佩安编写，第三、四、十章由郭慧泉编写，第六章由谢展鹏编写，第八章由刘婷婷编写，第七、九、十一章由王效华编写，本书由广州民航职业技术学院蔡昌荣副教授担任主审。

全书在编写中参考了一些电子测量方面的教材和科技书，在此，编者向给予支持和帮助的同志致以感谢。由于编者水平有限，书中存在的错误和不妥之处敬请读者批评指正。

序

90年代以来,我国高职高专教育为社会主义现代化建设事业培养了大批急需的各类专门人才,提高了劳动者的素质,对于建设社会主义的精神文明,促进社会进步和经济发展起到了重要作用。中共中央、国务院《关于深化教育改革,全面推进素质教育的决定》指出:“要大力发展高等职业教育”,教育部在《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》中明确指出:“高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,培养拥护党的基本路线,适应生产、建设、服务第一线需要的,德、智、体、美等方面全面发展的高等技术应用性专门人才;学生应在具有必备的基础理论知识和专门知识的基础上,重点掌握从事本专业领域实际工作的基本能力和基本技能。”加入WTO以后,我国将面临人才资源的全球竞争,其中包括研究开发型人才的竞争,也包括专业技能型优秀人才的竞争。高等职业教育要适应我国现代化建设的需要,适应世界市场和国际竞争的需要,培养大批符合市场需求的、有熟练技能的高等技术应用性人才。

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要环节,在贯彻国家教育教改精神、保证人才质量方面起着重要作用。改革开放以来,各地已出版了一批高职高专教材,但从整体上看,具有高职高专教育特点的教材极其匮乏,教材建设仍滞后于高职高专教育的发展需要。为此,根据目前高等职业教育发展的要求,机械工业出版社组织全国多所在高等职业教育办学有特色、在社会上影响较大的高职院校成立了“新世纪高等职业教育规划教材编审委员会”,选择教学经验丰富、实践能力强的骨干教师,组织、规划、编写了这套“新世纪高等职业教育规划教材”,教材首批三个系列21本(书目附后)。它凝聚着全体编审人员、编委会委员的大量心血,同时得到了各委员院校的大力支持,在此表示衷心感谢。

本套教材的作者队伍是经编审委员会严格遴选确定的,他们来自高等职业教育的第一线,教学经验丰富、业务上乘、文笔过硬,大多是各校学科和专业的带头人。他们对本专业的课程设置、教学大纲、教学教改都有深刻的认识和独到的见解,对高职教育的特色把握能力强,有较高的编写水平。这些都为编写出具有创新性、适用性强的高职教材打下了良好基础。

本套教材的编写以保证基础、加强应用、体现先进、突出以能力为本位的职教特色为指导思想,在内容上遵循“宽、新、浅、用”的原则。所谓“宽”,即知识面宽,适用面广;所谓“新”,就是要体现新知识、新技术、新工艺、新方法;所谓“浅”,是指够用为度、通俗易懂;所谓“用”,就是要注重应用、面向实践。

本套教材的出版,促进了高等职业教育的教材建设,将对我国高等职业教育的发展产生积极的影响。同时,我们也希望在今后的使用中不断改进、完善此套教材,更好地为高等职业教育服务,为经济建设服务。

新世纪高等职业教育规划教材编审委员会

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 电子测量基本知识	1
第二节 测量误差	4
第三节 电子测量仪器概述	7
第四节 测量数据的处理	9
本章小结	11
习题	11
第二章 万用电表	13
第一节 模拟式万用表	13
第二节 模拟式万用表的测量技能和训练	18
第三节 数字式万用表	22
第四节 数字式万用表的测量技能和训练	29
本章小结	32
习题	32
第三章 直流稳压电源	33
第一节 概述	33
第二节 直流稳压电源应用技能	36
第三节 直流稳压电源应用实例	37
本章小结	38
习题	38
第四章 毫伏表	39
第一节 概述	39
第二节 DA—16 晶体管毫伏表	40
第三节 晶体管毫伏表应用实例	43
本章小结	43
习题	44
第五章 信号发生器	45
第一节 概述	45
第二节 低频信号发生器	46
第三节 高频信号发生器	50
第四节 其他信号发生器	57

本章小结	62
习题	62
第六章 示波器	63
第一节 通用示波器	63
第二节 通用示波器测量技能和训练	71
第三节 其他示波器	80
本章小结	89
习题	89
第七章 数字频率计	91
第一节 概述	91
第二节 频率计的原理和使用方法	92
本章小结	100
习题	100
第八章 扫频仪、频谱分析仪及失真度测量仪	101
第一节 扫频仪	101
第二节 频谱分析仪	112
第三节 失真度测量仪	115
本章小结	120
习题	120
第九章 逻辑分析仪	121
第一节 概述	121
第二节 逻辑分析仪原理和使用方法	122
本章小结	129
习题	130
第十章 计算机仿真测量	131
第一节 软件介绍	131
第二节 仪器使用	136
第三节 电路仿真测试举例	147
本章小结	155
第十一章 智能化测量技术	156
本章小结	162
习题	162
参考文献	163

第一章 概 述

第一节 电子测量基本知识

一、电子测量的意义

电子测量就是以电子技术理论为依据，借助于电子测量设备，把未知的电量或非电量与作为测量单位的标准电量进行比较，从而确定这个未知电量或非电量（包括数值和单位）的过程。电子测量内容通常包含以下几个方面：

- (1) 能量的测量，如电流 (I)、电压 (U)、电功率 (P)、电能 (W) 等。
- (2) 电路特征的测量，如电阻 (R)、电容 (C)、电感 (L) 等。
- (3) 电信号特性的测量，如频率 (f)、相位 (φ)、功率因数 ($\cos\varphi$)、失真度 (k) 等。
- (4) 电子电路性能的测量，如放大倍数 (A)、通频带 (BW)、灵敏度 (S) 等。
- (5) 非电量的测量，如压力 (p)、温度 (T)、速度 (v) 等。

上述各项测量内容中，尤其是频率、时间、电压、相位、阻抗等基本电参数的测量更为重要，它们往往是其他参数测量的基础。如放大器的增益测量实际上就是其输入、输出端电压的测量；脉冲信号波形参数的测量可归结为电压和时间的测量；许多情况下电流的测量不方便，就以电压的测量来代替。同时，由于时间和频率的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其他待测量转化成时间或频率的测量的方法和技术。

二、电子测量的方法

1. 按测量手段分类

(1) 直接测量：在测量过程中，能够直接将被测量与同类标准量进行比较，或能够直接用事先刻度好的测量仪器对被测量进行测量，直接获得数值的测量称为直接测量。例如，用电压表测量电压、用直流电桥测量电阻等都是直接测量。直接测量方式广泛应用于工程测量中。

(2) 间接测量：当被测量由于某种原因不能直接测量时，可以通过直接测量与被测量有一定函数关系的物理量，然后按函数关系计算出被测量的数值，这种间接获得测量结果的方式称为间接测量。例如，用伏安法测量电阻，是利用电压表和电流表分别测量出电阻两端的电压和通过该电阻的电流，然后根据欧姆定律计算出被测电阻的大小。间接测量方式广泛应用于科研、实验室及工程测量中。

(3) 组合测量：当某项测量结果需要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，根据函数关系列出方程组求解，从而得到未知量的测量，称为组合测量。这种测量方法比较复杂，费时间，但精度较高，一般适用于科学实验。

2. 按测量方式分类

(1) 直读法：用直接指示被测量大小的指示仪表进行测量，能够直接从仪表刻度盘上或从显示器上读取被测量数值的测量方法，称为直读法。例如，用欧姆表测量电阻时，从指示的数值可以直接读出被测电阻的数值。这一读数被认为是可信的，因为欧姆表的数值事先用标准电阻进行了校验，标准电阻已将它的量值和单位传递给欧姆表，间接地参与了测量。直读

法测量的过程简单，操作容易，读数迅速，但其测量的准确度不高。

(2) 比较法：将被测量与标准量在比较仪器中直接比较，从而获得被测量数值的方法，称为比较法。例如，用电桥测量电阻时，标准电阻直接参与了测量过程。在电子测量中，比较法具有很高的测量准确度，可以达到 $\pm 0.001\%$ ，但测量时操作比较麻烦，相应的测量设备也比较昂贵。

比较法又分为零值法、较差法和替代法三种。

1) 零值法又称平衡法，它是利用被测量和标准量对仪器的作用相互抵消，由指零仪表作出判断的方法，即当指零仪表指示为零时，表示两者的作用相等，仪器达到平衡状态。此时按一定的关系可计算出被测量的数值。

2) 较差法是通过测量被测量与标准量的差值，或正比于该差值的量，根据标准量来确定被测量数值的方法。

3) 替代法是分别把被测量和标准量接入同一测量系统，在标准量替代被测量时，调节标准量，使系统的工作状态在替代前后保持一致，然后根据标准量来确定被测量的数值。用替代法测量时，由于替代前后测量系统的工作状态是一样的，因此仪器本身性能和外界因素对替代前后的影响几乎是相同的，有效地克服了所有外界因素对测量结果的影响。

3. 按测量性质分类

(1) 时域测量：时域测量也叫作瞬时测量，主要是测量被测量随时间的变化规律。如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。

(2) 频域测量：频域测量也称为稳态测量，主要目的是获取待测量与频率之间的关系。如用频谱分析仪分析信号的频谱，测量放大器的幅频特性、相频特性等。

(3) 数据域测量：数据域测量也称逻辑量测量，主要是对数字信号或电路的逻辑状态进行测量，如用逻辑分析仪等设备测量计数器的状态。随着微电子技术的发展需要，数据域测量及测量智能化、自动化显得越来越重要。

(4) 随机测量：随机测量又叫作统计测量，主要是对各类噪声信号进行动态测量和统计分析。这是一项新的测量技术，尤其在通信领域有着广泛应用。

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，可以分为精密测量和工程测量；按照测量时测量者对测量过程干预程度分为自动测量和人工测量；按照被测量与测量结果获取地点的关系分为本地测量和遥控测量或分为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等。

三、电子测量的特点

1. 测量频率范围极宽

测量频率低频除测直流外可低至 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{Hz}$ ，高频可至 10^{12}Hz 。在不同的频率范围内，电子测量所依据的原理、使用的测量仪器、采用的测量方法也各不相同。例如，信号源就分为低频、音频、高频、超高频等多种信号发生器。

2. 测量仪器的量程很广

量程是仪器所能测量各种参数的最大范围。由于被测对象的大小相差极大，因而要求测量仪器的量程也极宽。例如，一台高灵敏度的新型数字电压表可以测出 10nV 级至 1kV 极的电压，量程达11个数量级。

3. 测量准确度高

电子仪器的准确度比其他测量仪器高很多，特别是对频率和时间的测量。由于采用原子频标和原子秒作为基准，使时间的测量误差减小到 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 量级，这是目前人类在测量准确度方面达到的最高标准。

4. 测量速度快

电子测量由于是通过电子运动和电磁波的传播来进行工作的，因此它具有其他测量方法通常无法比拟的高速度。例如，火箭发射过程需要快速测出其运动参数，以便下达控制信号，使它达到预期的目标。

5. 实现遥测和长期不断的测量

通过各种类型的传感器，可以实现对人体不便于接触或无法到达的区域进行遥测，而且也可以在被测对象正常工作的情况下进行不间断的测量。例如对卫星、导弹、人体内部、敌人火力可达的前沿阵地等的测量。

6. 测量过程的自动化和测量仪器的微机化

由于电子测量的测量结果和它所需要的控制信号都是电信号，非常有利于直接测量或通过 A/D 变换与计算机相连接，实现自动记录、数据运算、分析处理和程序控制，做成各种自动化仪器或自动测试系统。

电子测量所具有的一系列特点，使它被广泛地运用到各个领域，大到天文观测、航空航天，小到物质结构、基本粒子，几乎没有不应用电子测量技术的领域。

四、测量单位制

测量单位是确定一个被测量的标准，因此测量单位的确定和统一是非常重要的。

1. 国际单位制 (SI) 的组成

国际单位制是由国际单位制单位、国际单位制词头和国际单位制的十进倍数单位三部分组成。

(1) 国际单位制单位包括了基本单位、导出单位和辅助单位三类。基本单位共有七个，其名称及符号列于表 1-1 中。导出单位是由基本单位按定义、定律或一定的关系式推导出来的单位。辅助单位有两个，即平面角的单位弧度 (rad) 和立体角的单位球面度 (sr)，它们在实际应用过程中可以任意作为基本单位或导出单位。

表 1-1 国际单位制基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克 (公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安 [培]	A
热力学温度	开 [尔文]	K
物质的量	摩 [尔]	mol
发光强度	坎 [德拉]	cd

(2) 国际单位制词头采用的是十进制词头，它是用来表示使单位增大或缩小的十进倍数。

词头是这些倍数单位名称的一部分，它们代表的倍数从 $10^{-18} \sim 10^{18}$ ，共有 16 个，见表 1-2。

表 1-2 国际单位制词头

因数	词头名称		符号	因数	词头名称		符号
	原文 (法)	中文			原文 (法)	中文	
10^{18}	exa	艾	E	10^{-1}	deci	分	d
10^{15}	peta	拍	P	10^{-2}	centi	厘	c
10^{12}	tera	太	T	10^{-3}	milli	毫	m
10^9	giga	吉	G	10^{-6}	micro	微	μ
10^6	mega	兆	M	10^{-9}	nano	纳	n
10^3	kilo	千	k	10^{-12}	pico	皮	p
10^2	hecto	百	h	10^{-15}	femto	飞	f
10^1	deca	十	da	10^{-18}	atto	阿	a

2. 使用国际单位制的注意事项

在使用国际单位制时，必须遵循规定的使用方法。这里简要介绍国际单位制的使用方法和需要注意的事项。

(1) 词头代号与单位代号之间不留间隔。例如，km (千米)。

(2) 如果词头代号上有指数，则表明倍数单位按指数相乘。例如， $1\text{cm}^3 = 10^{-6}\text{m}^3$ ， $1\text{cm}^{-1} = 100\text{m}^{-1}$ 。

(3) 两个以上单位的乘积最好用圆点作为乘号，只有当不致与其他代号混淆时，圆点可以省略，但次序不能变动。例如，k · m 或 km，但不允许写成 mk。

(4) 不允许用两个以上国际单位制词头并列构成组词头。例如，1pF (皮法)，而不允许用 1mnF (毫纳法)。

(5) 当导出单位由一个单位被另一个单位除而构成时，可以用斜线、水平线或者负幂数表示。例如，m/s、 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(6) 除了加括弧外，一个组合单位在同一行内只能用一条斜线，在复杂情况下应该用负幂数或括弧。例如， m/s^2 或 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，但不应写为 m/s/s。

(7) 选用国际单位制单位的倍数单位时，应使数值处于 0.1~1000 之间。例如， $3.4 \times 10^4\text{N}$ 可以写成 34kN；0.00687m 可以写成 6.87mm； $5.4 \times 10^{-9}\text{s}$ 可以写成 5.4ns。但在同一个量的数值表中，或同一篇文章中讨论这些数值时，即使有些数值不在 0.1~1000 的范围以内，也要求使用一致的倍数单位或分数单位。

第二节 测量误差

在测量过程中，由于受到测量方法、测量设备、测量条件及观测经验等多方面因素的影响，测量结果不可能是被测量的真实数值，而只是它的近似值，即任何测量的结果与被测量的真实值之间总是存在着差别，这种差别称为测量误差。

一、测量误差的分类

根据测量误差的性质和特点，可以将其分为系统误差、偶然误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一量时，其大小和符号保持恒定，或在条件改变时按某种确定规律而变化的误差称为系统误差。系统误差主要是由于测量设备的不完善、测量方法的不严格和测量条件的不稳定而引起的。由于系统误差表示了测量的结果偏离其真实值的程度，即反映了测量结果的准确度，所以在误差理论中，经常用准确度来表示系统误差的大小。

系统误差的消除方法：对测量仪器仪表进行校正，在准确度要求较高的测量结果中，引入校正值进行修正；消除产生误差的根源，即正确选择测量方法和仪器，尽量使测量仪表在规定的使用条件下工作，消除各种外界因素造成的影响；采用特殊的测量方法，如正负误差补偿法、替代法等。

2. 偶然误差

在实际相同条件下多次测量同一量时，其大小和符号以不可预定的方式变化着的误差称为偶然误差，又称随机误差，很多测量结果的随机误差的分布形式接近于正态分布，也有部分测量结果的随机误差属于均匀分布或其他分布。产生偶然误差的原因很多，如温度、磁场、电源频率、感官分辨本领等的偶然变化都可能引起这种误差。由于偶然误差表示了测量的结果偏离其真实值的分散情况，因此偶然误差经常用来表示测量的精密度。

消除偶然误差可采用在同一条件下，对被测量进行足够多次的重复测量，取其平均值作为测量结果的方法。

系统误差和偶然误差是两类性质完全不同的误差。系统误差反映在一定条件下误差出现的必然性；而偶然误差则反映在一定条件下误差出现的可能性。

3. 粗大误差

超出了规定条件下预期的误差叫粗大误差。也就是说一定的测量条件下，测量结果明显地偏离了真值。粗大误差亦称为寄生误差，它主要是由于读数错误，测量方法错误、测量仪器有缺陷等原因造成的。显然，凡是含有粗大误差的测量结果是应该摒弃不用的。

二、测量误差的来源

1. 仪表误差

由于测量仪器本身及附件的电器和机械性能不完善而引起的误差。如仪器零件位置安装不正确，刻度不够均匀，元器件老化等，这是仪器固有的误差。

2. 使用误差

由于仪器的安装、布置、调节和校正不当等所造成的误差。如把要求水平放置的仪器垂直放置、接线太长、未装阻抗匹配连接线、接地不当等都会产生使用误差。减小这种误差的方法就是严格按照技术规程操作，提高实验技巧和对各种现象的分析能力。

3. 影响误差

由于受外界温度、湿度、电磁场、机械振动、光照、放射性等影响而造成的误差。

4. 人体误差

由于测量者的分辨能力、工作习惯和身体素质等原因引起的误差。对于某些借助人耳、人眼来判断结果的测量以及需要进行人工调整等的测量工作，均会产生人体误差。

5. 方法和理论误差

由于测量方法或者仪器仪表选择不当所造成的误差称为方法误差；测量时，依据的理论

不严格或者应用近似公式、近似值计算等造成的误差称为理论误差。

三、测量误差的表示方法

测量误差通常用绝对误差和相对误差来表示。

1. 绝对误差

测量结果的数值 X 与被测量的真实值 X_0 的差值称为绝对误差，用 ΔX 表示

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-1)$$

由于被测量的真实值 X_0 往往是很难确定的，所以在实际测量中，通常用标准表的指示值或多次测量的平均值作为被测量的真实值。对同一被测量而言，测量的绝对误差越小，测量就越准确；对不同被测量，测量的绝对误差不能反映测量的准确程度。

2. 相对误差

相对误差的大小，既可以用来反映同一被测量又可以反映不同被测量的测量准确程度，相对误差根据不同的表示形式，可分为实际相对误差、示值相对误差、分贝误差和满度相对误差。

(1) 实际相对误差：测量的绝对误差与被测量真实值之比，称为实际相对误差，用符号 γ_0 表示

$$\gamma_0 = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

(2) 示值相对误差：测量的绝对误差与仪表指示值之比，称为示值相对误差，用符号 γ_x 来表示

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

(3) 分贝误差：用分贝 (dB) 表示的相对误差，其在电子学和声学中常用来表示相对误差。

$$\text{对于电流、电压等电参量：} \gamma \text{ (dB)} = 20 \lg (1 + \gamma) \quad (1-4)$$

$$\text{对于功率类等电参量：} \gamma \text{ (dB)} = 10 \lg (1 + \gamma) \quad (1-5)$$

(4) 满度相对误差：测量仪器量程内最大绝对误差与测量仪器满度值(量程上限值)之比，称为满度相对误差，用符号 γ_m 表示

$$\gamma_m = \frac{\Delta X_m}{X_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

满度相对误差也叫作满度误差或者最大引用误差。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。如某电压表为 0.1 级，即表明它的准确度等级为 0.1 级，它的满度误差不超过 0.1%，即 $|\gamma_m| \leq 0.1\%$ (习惯上也写成 $\gamma_m = \pm 0.1\%$)。

利用绝对误差和相对误差的概念，可以把一个测量结果完整地表示为

$$\text{测量结果} = X + \Delta X \quad \text{或} \quad \text{测量结果} = X(1 + \gamma_x) \quad (1-7)$$

也就是说，测量不仅要确定被测量的大小，还必须确定测量结果误差的大小，即确定测量结果的可靠程度。

例 1 若要测一个 10V 左右的电压，手头有两块电压表，其中一块量程为 50V、1.5 级，另一块量程为 15V、2.5 级，问选用哪一块表合适？

解 若使用量程为 50V、1.5 级电压表，测量产生的最大相对误差

$$|\Delta U| \leq 50 \times 1.5\% = 0.75\text{V}$$

$$\gamma_x = \frac{|\Delta U|}{10\text{V}} \times 100\% = 7.5\%$$

被测电压的最大相对误差为 7.5%。

若使用量程为 15V、2.5 级电压表，用同样方法可以求得测量产生的最大相对误差

$$|\Delta U| \leq 15 \times 2.5\% = 0.375\text{V}$$

$$\gamma_x = \frac{|\Delta U|}{10\text{V}} \times 100\% = 3.75\%$$

被测电压的最大相对误差为 3.75%。因此应选用 15V、2.5 级电压表。

第三节 电子测量仪器概述

测量仪器是将被测量转化成可直接获得数值或者信息的器具，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待测量进行测量的设备，统称为电子测量仪器。

一、测量仪器的功能

各类测量仪器一般都具有物理量的变换、信号的传输和测量结果的显示等三种最基本的功能。

1. 变换功能

对于电压、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。比如作为模拟测试仪表，就是将流过线圈的电流，转变为转动力矩，并带动与线圈相连的指针转动，使仪表指针偏转初始位置的一个角度，根据偏转角度大小得到被测电流的大小，这就是一种很基本的变换功能。对非电量测量，更须将各种非电物理量如温度、亮度、颜色、压力、物质成分等，通过各种传感器，转换成为与之相关的电压、电流等，然后再通过对电压、电流的测量，得到被测物理量的大小。

2. 传输功能

在遥测系统中，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。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。

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，任何测量工具都必须具备显示功能。比如模拟式仪表通过指针在仪表刻度盘上的位置显示测量结果，数字式仪表通过数码管、液晶显示器或阴极射线管显示测量结果。另外，一些先进的仪器如智能化仪器等还具有数据记录、数据存储、数据处理及自检、自校、报警提示等功能。

二、测量仪表的主要性能指标

1. 精度

精度是指测量仪器的读数或测量结果与被测量真实值相一致的程度。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 (δ): 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。精密度高, 意味着随机误差小、测量结果的重复性好。比如某电流表的精密度为 0.05mA , 即表示用它对同一电流进行测量时, 得到的各次测量值的分散程度不大于 0.05mA 。

(2) 正确度 (ϵ): 正确度说明仪表指示值偏离真实值的程度。所谓真实值是指待测量在特定状态下所具有的真实值的大小。正确度反映了系统误差的影响。正确度高则说明系统误差小, 比如某电流表的正确度是 0.05mA , 则表明用该电流表时的指示值与真实值之差不大于 0.05mA 。

(3) 准确度 (τ): 准确度是精密度和正确度的综合反映。准确度高, 说明精确度和正确度都高, 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度也高。在具体的测量实践中, 可能会出现这样的情况: 正确度较高而精密度较低, 或者情况相反, 有相当精确但欠正确。当然理想的情况是既正确又精密, 即测量结果准确度高。要获得理想的结果, 应满足三个方面的条件: 性能优良的测量仪器、正确的测量方法和细心的测量操作。准确度、精密度和正确度的关系可用图 1-1 表示。

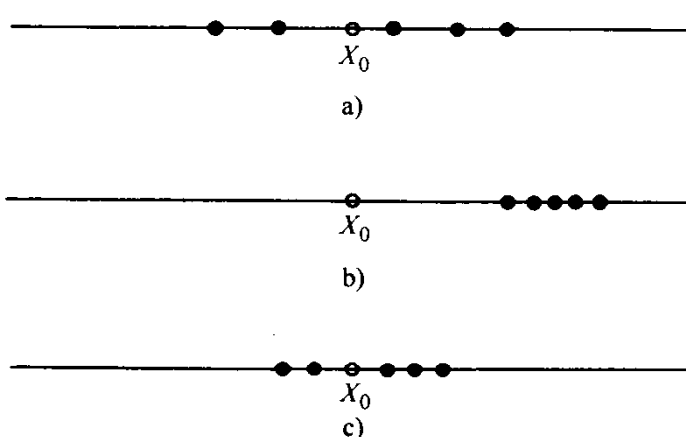


图 1-1 测量结果的正确度、精密度和准确度

a) 正确度高而精密度低 b) 精密度高而正确度低

c) 准确度高——正确度、精密度均高

2. 稳定性

稳定性经常用稳定度和影响量两个参数来表征。稳定度 (稳定误差), 是指在规定的区间, 其他外界条件恒定不变的条件下, 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性, 参数不稳定和老化等因素。稳定度可用示值绝对变化量和时间一起表示。

由于电源电压、频率、环境温度、湿度、气压、震动等外界条件变化而造成仪表表示值的变化量, 称为影响量 (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. 输入阻抗

测量时由于仪器接入待测电路, 将改变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要求。仪表的输入阻抗一般用输入电阻和输入电抗表示。对信号源等供给仪器, 还要考虑输出阻抗, 在高频以上频率测量等场合, 还必须注意阻抗的匹配。

4. 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, 示波管荧光屏上光点偏移的距离就定义为它的偏转灵敏度, 单位为 cm/V , cm/mV 等。灵敏度的另一种表示方式叫作分辨力, 定义为测量仪表所能区分的被测量的最小变化量, 在数字式仪表中经常使用。

5. 线性度

线性度表示测量仪表输入输出特性，表示仪表的输出量随输入量变化的规律。若仪表的输出为 Y ，输入为 X ，两者关系用 $Y = f(X)$ 表示。如果 $Y = f(X)$ 为 XY 平面上过原点的直线，则称之为线性刻度特性，否则称之为非线性刻度特性。由于各类测量仪器的原理各异，不同的测量仪器可能呈现不同的刻度特性。仪器的线性度可用线性误差来表示。

6. 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，模拟测试仪表由于动圈式表头指针惯性、轴承摩擦、空气阻尼等因素的作用，使得仪表的指针不能瞬间稳定在固定值上。又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。

并非所有仪器都用上述特性加以考核。有些测量仪器除了上述指标特性外，还有如功耗、读数装置、工作频率等其他技术要求。

三、电子测量仪器的分类

电子测量仪器的分类方法按不同的要求分类不同，如果按其功能，大致可分为下面几类。

(1) 电平测量仪器：各种模拟式电压表，毫伏表，数字式电压表，电流表，功率计，电能表等。

(2) 电路参数测量仪器：各类电桥， Q 表， R 、 L 、 C 测试仪，晶体管或集成电路参数测试仪，图示仪等。

(3) 频率、时间、相位测量仪器：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：各类示波器，如通用示波器、多踪示波器、取样示波器、记忆和数字存储示波器等。

(5) 信号分析仪器：失真度测量仪，谐波分析仪，频谱分析仪等。

(6) 模拟电路特性测试仪器：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：它主要指逻辑分析仪。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。

(8) 测试用信号源：各类低频和高频信号发生器，脉冲信号发生器，函数发生器，扫描和噪声信号发生器等。

第四节 测量数据的处理

测量数据的处理，就是从测量所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。必要时还要把测量数据绘制成曲线或归纳成经验公式，以便得出正确结论。

一、有效数字

由于含有误差，所以测量数据和由测量数据计算出来的算术平均值等都是近似值。通常就从误差的观点来定义近似值的有效数字。若末尾数字是个位，则包含的绝对误差值不大于 0.5，若末尾是十位，则包含的绝对误差值不大于 5，对于其绝对误差不大于末尾数字一半的

数，从它左边第一个不为零的数字起，到右边最后一个数字（包括零）止，都叫做有效数字。

例如	51416	五位有效数字	4.162	四位有效数字
	6500	四位有效数字	67×10^2	二位有效数字
	0.058	二位有效数字	0.906	三位有效数字

由上述几个数字可以看出，位于数字中间和末尾的零都是有效数字，而位于第一个非零数字前面的“0”，都不是有效数字。

数字末尾的“0”很重要，如写成 10.60 表示测量结果准确到百分位，最大绝对误差不大于 0.005，而若写成 10.6，则表示测量结果准确到十分位，最大绝对误差不大于 0.05，可见末一位是欠准确的估计值，称为欠准数字。决定有效数字位数的标准是误差，多了则夸大了测量准确度，少了则带来了附加误差。

二、多余数字的修约规则

对测量结果中的多余有效数字，应按下面的修约规则进行：以保留数字的末尾为单位，它后面的数字若大于 0.5 个单位，末尾进 1；小于 0.5 个单位，末尾不变；恰为 0.5 个单位，则末尾为奇数时加 1，末尾为偶数时不变，即末尾取偶数。简单概括为“小于 5 舍，大于 5 入，等于 5 时取偶数法则”。

例 2 将下列数字保留到小数点后一位：22.34，12.56，15.35，32.45。

解 22.34→22.3 12.56→12.6 15.35→15.4 32.45→32.4

之所以采用这样的舍入法则，是出于减小计算误差的考虑。每个数字经舍入后，末尾是欠准数字，末位之前是准确数字，最大舍入误差是末位的一半。因此当测量结果未注明误差时，就认为最末一位数字有“0.5”误差，称此为“0.5 误差法则”。

三、有效数字的运算规则

当需要对几个测量数据进行运算时，要考虑有效数字保留多少位的问题，以便不使运算过于麻烦而又能正确的反映测量的精确度。保留的位数原则上取决于各数中精确度最差的那一项。

1. 加法运算

以小数点后最少的为准（各项无小数点则以有效位数最少者为准），其余各数可多取一位。结果以小数点后最少的为准（无小数点则以有效位数最少者为准）。

例如： $13.3729 + 16.04 \rightarrow 13.373 + 16.04 = 29.413 \rightarrow 29.41$

2. 减法运算

当相减两数相差甚远时，原则同加法运算，当两数很接近时，有可能造成很大的相对误差，因此第一要尽量避免导致相近两数相减的测量方法，第二在运算中多取一些有效数字。

3. 乘除法运算

以有效数字最少的数为准，其余参与运算的数字可多取一位，结果中的有效数字位数与最少的数相等。

例如： $1.05782 \times 14.21 \times 4.52 \rightarrow 1.058 \times 14.21 \times 4.52 = 67.9544936 \rightarrow 68.0$

4. 乘方、开方运算

运算结果比原数多保留一位有效数字。