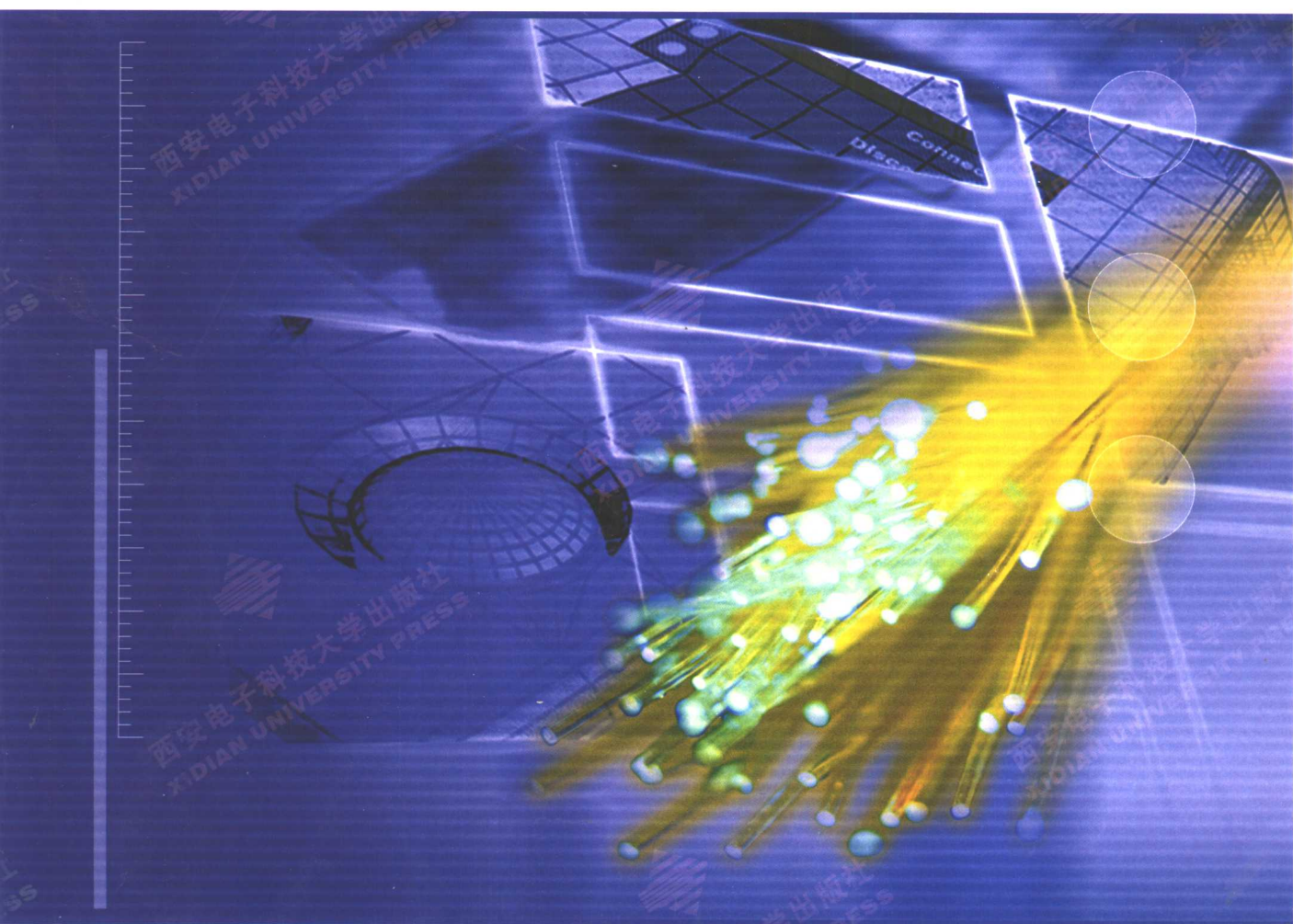


21世纪

高等学校电子信息类系列教材

电子测量技术基础

■ 张永瑞 刘振起
杨林耀 顾玉昆



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校电子类系列教材

电子测量技术基础

张永瑞 刘振起
杨林耀 顾玉昆

西安电子科技大学出版社

(陕)新登字 010 号

内 容 提 要

本书着重讲述了电子测量中的基本概念,主要物理量(电压、频率、时间、相位)、元件参数、阻抗、噪声的基本测量原理、方法以及常规仪器(示波器、信号源、计数器)的工作原理和操作使用,并对数据域测量、逻辑分析仪作了一定的介绍。本书编写思路清晰,概念原理讲述透彻,深入浅出,通俗易懂;方法明了实用;必要的数学推导简明扼要、结论明确。各章末配置有小结与深浅度适中的习题,书末有部分习题参考答案。

本书既可作为高等工业院校电子仪器与测量、检测技术与仪器仪表、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参考书。

电子测量技术基础

张永瑞 等编

责任编辑 云立实

西安电子科技大学出版社出版发行

地址:西安市太白南路2号 邮编:710071

西安兰翔印刷厂印刷

各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 19.25 字数 456 千字

1994年12月第1版 2005年6月第17次印刷 印数 101 001~109 000册

ISBN 7-5606-0345-9/TM·0010(课) 定价:17.30元

XDUP 0595021-17 本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

电子测量技术基础

前 言

随着科学技术的迅速发展，在工业、农业、交通运输、航空航天、国防建设等国民经济的诸多领域都广泛应用着电子技术，而电子测量又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、重要的应用学科，在现代科学技术中占有举足轻重的作用和地位。

在我国实现四个现代化的伟大事业中，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，而电子测量正是各个学科领域科学实验手段现代化的重要标志。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量测。

为适应国民经济建设对电子测量技术专业人才的需求，许多高等工业学校相继开办了“电子仪器及测量技术”、“检测技术与仪器仪表”专业。即便是电类的其他专业，如“通信工程”、“电子工程”、“应用电子技术”等专业也纷纷开设了电子测量的课程，培养学生具有电子测量方面的基础知识和应用能力。

为满足教学急需，我们编写了《电子测量技术基础》一书。编写中，总的构思是：对测量原理的讲解力求深入浅出、通俗易懂、便于自学，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框图，不过多涉及单元内部具体电路，突出常规、典型、操作使用；对误差分析多作定性说明，必要的数学推导简明扼要、结论醒目明确，便于读者掌握。为教和学的方便，本书各章后配有小结与习题，书末给出了部分习题参考答案。

全书共分十章，第一、二、三、七章由刘振起同志编写，第五、六章由张永瑞同志编写，第八、九章由杨林耀同志编写，第四、十章由顾玉昆同志编写。

在编写和出版本书过程中，得到了西安电子科技大学检测与仪器系领导的关心和支持，得到了责任编辑云立实同志热情的帮助，在此一并致以衷心的感谢。

由于编者学识水平有限，书中定有许多不妥之处或错误，热忱欢迎读者赐教。

编 者 1994.5

目 录

第一章	绪论	1
§ 1.1	电子测量	1
§ 1.2	电子测量的内容和特点	2
§ 1.3	电子测量的一般方法	5
§ 1.4	电子测量仪器概述	9
§ 1.5	计量的基本概念	13
小 结	.....	16
习题一	.....	17
第二章	测量误差和测量结果处理	19
§ 2.1	误差	19
§ 2.2	测量误差的来源	27
§ 2.3	误差的分类	29
§ 2.4	随机误差分析	32
§ 2.5	系统误差分析	38
§ 2.6	系统误差的合成	45
§ 2.7	测量数据的处理	51
小 结	.....	55
习题二	.....	57
第三章	信号发生器	61
§ 3.1	信号发生器概述	61
§ 3.2	正弦信号发生器的性能指标	63
§ 3.3	低频信号发生器	67
§ 3.4	射频信号发生器	80
§ 3.5	扫频信号发生器	87
§ 3.6	脉冲信号发生器	94
§ 3.7	噪声发生器	99
小 结	.....	101
习题三	.....	102
第四章	电子示波器	104
§ 4.1	概述	104
§ 4.2	示波管	105
§ 4.3	电子示波器的组成结构	107
§ 4.4	电子示波器的基本部件	111
§ 4.5	双踪和双线示波器	119
§ 4.6	高速和取样示波器	124

§ 4.7	记忆示波器与存贮示波器	128
§ 4.8	数字化波形处理系统	133
小结		134
习题四		135
第五章	频率时间测量	137
§ 5.1	概述	137
§ 5.2	电子计数法测量频率	140
§ 5.3	电子计数法测量周期	145
§ 5.4	电子计数法测量时间间隔	150
§ 5.5	典型通用电子计数器例	153
§ 5.6	其他测量频率的方法	158
小结		167
习题五		169
第六章	相位差测量	171
§ 6.1	概述	171
§ 6.2	用示波器测量相位差	171
§ 6.3	相位差转换为时间间隔进行测量	174
§ 6.4	相位差转换为电压进行测量	180
§ 6.5	零示法测量相位差	183
§ 6.6	测量范围的扩展	184
小结		186
习题六		187
第七章	电压测量	188
§ 7.1	概述	188
§ 7.2	模拟式直流电压测量	190
§ 7.3	交流电压表征和测量方法	195
§ 7.4	低频交流电压测量	201
§ 7.5	高频交流电压测量	209
§ 7.6	脉冲电压测量	213
§ 7.7	电压的数字式测量	217
小结		230
习题七		231
第八章	阻抗测量	235
§ 8.1	概述	235
§ 8.2	电桥法测量阻抗	240
§ 8.3	谐振法测量阻抗	249
§ 8.4	利用变换器测量阻抗	257
小结		260
习题八		261

第九章	噪声测量	263
§ 9.1	概述.....	263
§ 9.2	噪声的统计特性及其测量.....	263
§ 9.3	器件的噪声参数及其测量.....	268
小 结	.....	273
习题九	.....	274
第十章	数据域测量	276
§ 10.1	数据域测量的基本概念.....	276
§ 10.2	数据域测量技术.....	278
§ 10.3	逻辑分析仪.....	284
小 结	.....	296
习题十	.....	296
部分习题参考答案		298
参考书目		300

第一章 绪 论

§ 1.1 电子测量

一、测量

测量是通过实验方法对客观事物取得定量信息即数量概念的过程。人们通过对客观事物大量的观察和测量,形成定性和定量的认识,归纳、建立起各种定理和定律,而后又要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缺少和替代的手段。俄国科学家门捷列夫(Л. П. Менделеев)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(A. H. Cook)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”。正如特尔曼(F. E. Telmen)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、电子测量

电子测量是泛指以电子技术为基本手段的一种测量技术。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和参数进行测量外,还可通过各种敏感器件和传感装置对非电量进行测量,而且往往更加方便、快捷、准确,有时是用其他测量方法所不能替代的。因此,电子测量不仅用于电学各专业,也广泛用于物理学、化学、光学、机械学、材料学、生物学、医学等科学领域及生产、国防、交通、通讯、商业贸易、生态环境保护乃至日常生活的各个方面。近几十年来计算技术和微电子技术的迅猛发展,为电子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”,它们具有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功能,不仅改变了若干传统测量概念,更对整个电子技术和其他科学技术产生了巨大推动作用。现在,电子测量技术(包括测量理论、方法,测量仪器装置等)已形成电子科学领域重要而发展迅速的分支。

§ 1.2 电子测量的内容和特点

一、电子测量的内容

通常人们把电参数测量分为电磁测量和电子测量两类。电磁测量主要指交直流电量的指示测量法和比较测量法以及磁量的测量等。电子测量是指以电子技术理论为依据，以电子测量仪器和设备为手段，对电量和非电量进行的测量。其中电量测量可分为以下几个方面。

1. 电能量测量

电能量测量包括各种频率、波形下的电压、电流、功率等的测量。

2. 电信号特性测量

电信号特性测量包括波形、频率、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数及数字信号的逻辑状态等的测量。

3. 电路元件参数测量

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

4. 电子设备的性能测量

电子设备的性能测量包括增益、衰减、灵敏度、频率特性、噪声指数等的测量。

上述各项测量内容中，尤以频率、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；许多情况下电流测量是不方便的，就以电压测量来代替。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其他待测量的测量转换成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、物面高度、物质成分等变换成电信号，再利用电子测量设备进行

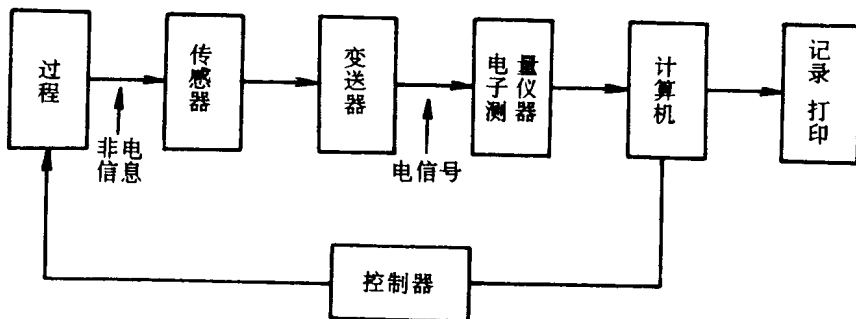


图 1.1-1 非电量测量在过程控制中的作用

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

生产的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、记录并据以对生产过程进行控制,是一种典型的方法,如图 1.1-1 所示。

二、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特点。

1. 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^{-6} Hz 以下,高至 10^{12} Hz 以上。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。例如阻抗的测量,在低频段多采用电流电压法,而在微波段则须采用开槽测量线或反射计技术。上述两者无论在原理上,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,频率测量范围可以低至 10^{-6} Hz,高至 10^{11} Hz。

2. 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空发来的信号功率,低到 10^{-11} W 数量级,而远程雷达发射的脉冲功率,可高达 10^8 W 以上,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,随着电子测量技术的不断发展,单台测量仪器的量程也可以达到很高。例如中档次的国产 YM3371 型数字频率计,测频范围为 10 Hz 到 1 000 MHz,国产 WC2180 型交流微伏表,可以测量 $5\ \mu\text{V}$ 到 300 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。例如高档次的数字万用表直接测量的电阻值,由 $3\times 10^{-5}\ \Omega$ 到 $3\times 10^8\ \Omega$,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 $1:10^{17}$ 。

3. 测量准确度高低相差悬殊

就整个电子测量所涉及的测量内容而言,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 $10^{-13}\sim 10^{-11}$ 的量级,这是目前在测量准确度方面达到的最高指标。作为比较,比如长度测量的最高准确度为 10^{-8} 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,直流电压准确度当前达到 10^{-6} 量级,音频电压为 10^{-1} 量级,射频电压仅为 10^{-3} 量级,而品质因数 Q 值和电场强度的测量准确度,只有 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,尤其在较高频率段,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。为此,对许多电子测量和测量仪器,除规定了必须满足的工作条件外,在对电子测量仪器的检定过程中,还规定了一套比工作条件更为严格的基准条件,如表 1.1-1 所示。该表摘自国家标准《电子测量仪器误差的一般规定》,它是参照国际电工委员会(IEC)第 359 号公告《电子测量设备工作性能表示》而制定的。除了须遵守这些规定外,为了尽可能减小外部环境的影响,许多测量都需要良好的电磁屏蔽和接地措施,系统内部则应尽量减小寄生电容、电感的影响,而在高频和微波测量中,阻抗匹配更是必须认真对待的问

题。此外，造成电子测量中不同参数测量准确度相差悬殊的另一个原因是，虽然前面讲到频率和时间的测量准确度可以达到很高，但遗憾的是，电子测量中大多数待测量的计量单位都是导出单位，而导出单位的准确度，不可能高于它所赖以导出的原始单位的准确度。例如功率的单位是瓦(W)，定义为1秒(s)内产生1焦耳(J)能量的功率；1焦耳定义为1牛顿(N)的力使作用点在力的方向上位移1米(m)所做的功；而1牛顿定义为使质量为1千克(kg)的物体产生加速度为1米每2次方秒的力。可见瓦(W)这个导出单位的准确度，就依赖于长度米(m)，质量千克(kg)，时间秒(s)等的准确度，除时间秒外，长度米，质量千克的计量准确度都低得多，因此功率瓦的计量准确度就自然要低。

表 1.1-1 电子测量设备的基准条件

影响量	基准数值或范围	容许公差
环境温度	20 ℃	±2 ℃
相对湿度	45%~75%	
大气压强	650~800 mm 汞柱	
交流供电电压	220 V	±2%
交流供电频率	50 Hz	±1%
交流供电波形 ^①	正弦波	$\beta=0.05$
交流供电电压的波纹 ^②	无	0.1%
外电磁场干扰	避免	
通风	良好	
阳光照射	避免直接照射	
工作位置	按制造厂家规定	

① 交流电压波形应保持在 $(1 + \beta)A\sin\omega t$ 与 $(1 - \beta)A\sin\omega t$ 所形成的包络之内。

② 波纹电压的峰至峰值不得超过额定电压的 0.1%。

4. 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，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。比如像卫星、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。

5. 可以进行遥测

如前所述，电子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地方的信号测量成为可能。

6. 易于实现测试智能化和测试自动化

电子测量本身是电子科学一个活跃的分支，电子科学的每一项进步，都非常迅速地在电子测量领域得到体现。随着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。无疑,电子测试技术与计算机技术的紧密结合与相互促进,为测量领域带来了极为美好的前景。

7. 影响因素众多,误差处理复杂

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,那就无法衡量测量结果的准确程度、测量结果的可靠性或可依赖性,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的和内部的。能对测量结果产生影响的量,称为影响量,它通常来自测量系统的外部,如环境温度、湿度、电源电压,外界电磁干扰等。测量系统内部会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,从而影响到测量结果。前面已经提到,电子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处无时不在的寄生电容、电感、电导等的不良影响。不难看出,电子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困难。

§ 1.3 电子测量的一般方法

一个物理量的测量,可以通过不同的方法实现。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。

测量方法的分类形式有多种,下面介绍几种常见的分类方法。

一、按测量手续分类

1. 直接测量

它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它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

它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。一个典型的例子是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 间满足关系

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1.3-1)$$

式中 R_{20} 为 $t=20^\circ\text{C}$ 时的电阻值，一般为已知量。 α 、 β 称为电阻的温度系数， t 为环境温度。为了获得 α 、 β 值，可以在二个不同的温度 t_1 、 t_2 下 (t_1 、 t_2 可由温度计直接测得) 测得相应的二个电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} ，代入式 (1.3-1) 得到联立方程

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1.3-2)$$

求解联立方程 (1.3-2)，就可以得到 α 、 β 值。如果 R_{20} 也未知，显然可在三个不同的温度下，分别测得 R_{t1} 、 R_{t2} 、 R_{t3} ，列出由三个方程构成的方程组并求解，进而得到 R_{20} 、 α 、 β 。

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。由于是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，在工程测量中广泛采用。

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。测量时用被测量与标准量相比较 (因此也把这种方法叫作比较测量法)，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。利用惠斯登电桥测量电阻 (或电容、电感) 是这种方法的一个典型例子，如图 1.3-1 所示。

当电桥平衡时，可以得到

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 \quad (1.3-3)$$

通常是先大致调整比率 R_1/R_2 ，再调整标准电阻 R_3 ，直至电桥平衡，充当零示器的检流计 PA 指示为零，此时即可根据式 (1.3-3) 由比率和 R_3 值得到被测电阻 R_x 值。

只要零示器的灵敏度足够高，零位式测量法的测量准确度几乎等于标准量的准确度，因而测量准确度很高，这是它的主要优点，常用在实验室，作为精密测量的一种方法。但由于测量过程中为了获得平衡状态，需要进行反复调节，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。

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。它通过测量待测量与标准量之差 (通常该差值很小) 来得到待测量量值，如图 1.3-2 所示。

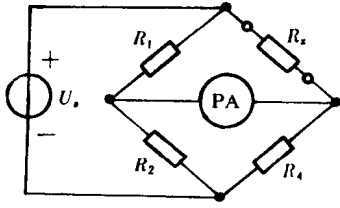


图 1.3-1 惠斯登电桥测量电阻示意图

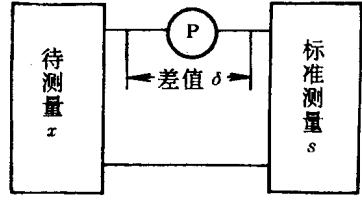


图 1.3-2 微差式测量法示意图

图中ⓐ为量程不大但灵敏度很高的偏差式仪表，它指示的是待测量 x 与标准量 s 之间的差值： $\delta = x - s$ ，即 $x = s + \delta$ 。在下一章中将证明，只要 δ 足够小，这种方法的测量准确度基本上取决于标准量的准确度。而和零位式测量法相比，它又可以省去反复调节标准量大小以求平衡的步骤。因此，它兼有偏差式测量法的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。图 1.3-3 是用微差法测量直流稳压电源输出电压稳定度的测量原理图。图中直流稳压电源的输出电压 U ，会随着 50 Hz、220 V 市电的波动和负载 R_L 的变化而有微小起伏（常用波纹系数表示起伏大小）。ⓑ为量程不大但灵敏度很高的电压表， U_B 表示由标准电源 U_s 获得的标准电压， U 为直流稳压电源的实际输出电压， U_s 是由ⓑ电压表测得的 U 与 U_B 的差值，即输出电压 U 随着市电波动和负载变化而产生的微小起伏。

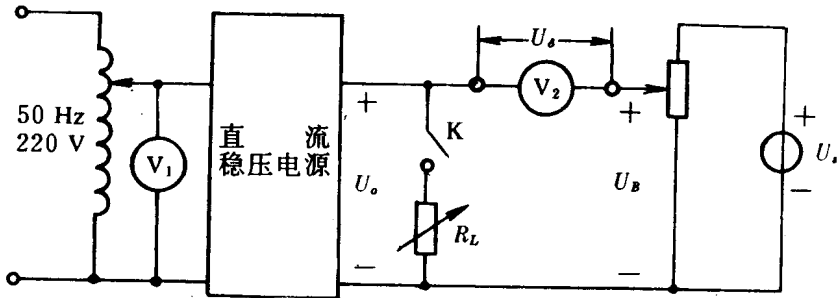


图 1.3-3 用微差法测量直流稳压电源的稳定度

三、按被测量的性质分类

如果按被测量的性质，测量还可以作如下分类。

1. 时域测量

时域测量也叫作瞬态测量，主要测量被测量随时间的变化规律。典型的例子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等。

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

数据域测量也称为逻辑量测量，主要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。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。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。这是一项较新的测量技术，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等。

四、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结果，甚至可能损坏测量仪器和被测设备。

[例 1] 直接用万用表 $R \times 1$ 电阻档测量晶体管发射结电阻，由于限流电阻过小而使基极注入电流很大，很容易将晶体管损坏。

[例 2] 图 1.3-4 表示的是用电压表测量高内阻电路端电压的例子。不难看到，电压表内阻的大小将直接影响到测量结果，这种影响通常叫做电压表的负载效应。图中虚线框内表示放大器输出端等效电路， R_v 表示测量用电压表内阻。忽略其他因素，不难算出：当用内阻 $R_v = 10 \text{ M}\Omega$ 的数字电压表测量时，电压为

$$U = 5 \times \frac{10 \times 10^3}{80 + 10 \times 10^3} = 4.96 \text{ V}$$

相对误差

$$\gamma = \frac{4.96 - 5}{5} \times 100\% = -0.8\%$$

而改用内阻 $R_v = 120 \text{ k}\Omega$ 的万用表电压档测量时，电压为

$$U = 5 \times \frac{120}{80 + 120} = 3 \text{ V}$$

相对误差

$$\gamma = \frac{3 - 5}{5} \times 100\% = -40\%$$

可见，这种情况下应选用内阻尽可能大的电压表，否则造成的仪器误差是很大的。有时测量仪表负载效应的存在，会过大地改变被测电路的工作状态，此时的测量结果将失去实际意义。

不应认为，只有使用精密的测量仪器，才能获得准确的测量结果。实际上，有时选择

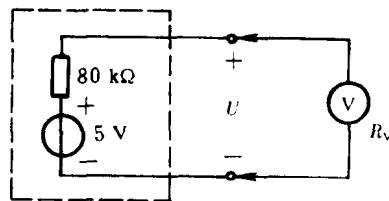


图 1.3-4 电压表内阻的影响

一种好的正确的测量方法，即便使用极为普通的设备，也同样可以得到相当令人满意的测量结果。

[例 3] 图 1.3-3 所示用微差法测量直流稳压电源稳定度例中，设 (V_2) 的量程为 1 V，准确度等级 $s=1.5$ ， $U_B=25$ V，并假设忽略标准电压 U_B 的误差，可以得到 (V_2) 电压表示值相对误差为

$$\begin{aligned} \gamma_s &= \pm s\% \times \frac{x_m}{x} \\ &= \pm 1.5\% \times \frac{1}{0.5} \\ &= \pm 3\% \end{aligned}$$

测量值相对误差为

$$\begin{aligned} \gamma_x &= \frac{\Delta U_o}{U_o} \doteq \gamma_s \times \frac{U_s}{U_B} \\ &= (\pm 3\%) \times \frac{0.5}{25} \\ &= \pm 0.06\% \end{aligned}$$

可见使用很一般的仪器 ((V_2) 电压表的准确度等级仅为 1.5 级)，却得到了很高的测量准确度。例子中的有关术语和计算公式将在后面予以介绍。如果我们用偏差式测量法，直接测量 U_o 的波动，情况将大有不同。设采用 $s=0.5$ 级、量程为 30 V 的电压表，仍设电压表示值 $U_o=25$ V，忽略其他因素，仅考虑电压表的仪器误差，可以算出，测量值相对误差为

$$\begin{aligned} \gamma_x &= \pm s\% \times \frac{x_m}{x} \\ &= \pm 0.5\% \times \frac{30}{25} \\ &= \pm 0.6\% \end{aligned}$$

可见尽管使用了准确度等级很高的仪表，由于选择的测量方法不当，得到的测量结果的准确度却远低于仅用一般仪表但方法得当所获得的测量准确度。

§ 1.4 电子测量仪器概述

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。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。为了正确地选择测量方法，使用测量仪器和估价测量结果，本节将对电子测量仪器的一般情况，包括它的主要功能、主要性能指标和分类做一些概括介绍。

一、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扭矩而使仪表指针偏转初始位置一个角度，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压力、位移、温度、湿度、亮度、颜色、物质成份等，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，而后再通过对电压、电流的测量，得到被测物理量的大小。随着测量技术的发展和需要，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，这样的单元电路常称为变送器，它是现代测量系统中极为重要的组成部分。

2. 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。

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。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。除此而外，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、测量仪表的主要性能指标

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。对精度目前还没有一个公认的定量的数学表达式，因此常作为一个笼统的概念来使用，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。比如某电压表的精密度为 0.1V ，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 0.1V 。

(2) 正确度 (ϵ)

正确度说明仪表指示值与真值的接近程度。所谓真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（例如仪器中放大器的零点漂移、接触电位差等等）的影响。正确度高则说明系统误差小，比如某电压表的正确度是 0.1V ，则表明用该电压表测量电压时的指示值与真值之差小于 0.1V 。我国电工仪表的分级，就是按正确度来