

高等学校简明通用系列规划教材

ELECTRONIC
MEASUREMENT
CONCISE COURSE

电子测量技术 简明教程

主 编 张永瑞 刘联会
副主编 姜 晖 王海军 李 明



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校简明通用系列

电子测量技术简明教程

主 编	张永瑞	刘联会	
副主编	姜 晖	王海军	李 明
参 编	陈 杰	薛妮妮	朱亚利

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是参照高等院校相关专业新修订的教学计划中“电子测量”课程的教学大纲及学时要求,并考虑现代电子科技发展的趋势与潮流而编写的。本书的主要内容包括电子测量与计量的基本概念、测量误差和测量结果处理、信号发生器、电子示波器、频率和时间测量、相位差测量、电压测量、阻抗测量,重点讲述了主要物理量(电压、频率、时间、相位)的基本测量原理、测量方法及常规仪器(示波器、信号源、计数器等)的工作原理和使用方法。

本书编写思路清晰,概念和原理讲述透彻,内容深入浅出、通俗易懂,方法明了实用,必要的数学推导简明扼要,结论醒目。各章末配有小结与难度适中的习题,书末配有部分习题的参考答案。

本书可作为高等工科院校测控技术与仪器、通信工程、电子信息工程、探测制导与控制技术、智能科学与技术等专业学生的教学用书,亦可作为电类专业的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术简明教程/张永瑞,刘联会主编. —

西安:西安电子科技大学出版社,2016.4

高等学校简明通用系列规划教材

ISBN 978-7-5606-3971-0

I. ① 电… II. ① 张… ② 刘… III. ① 电子测量技术—高等学校—教材 IV. ① TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 040393 号

策划编辑 云立实

责任编辑 阎彬 张驰

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016年4月第1版 2016年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.5

字 数 316千字

印 数 1~3000册

定 价 25.00元

ISBN 978-7-5606-3971-0/TM

XDUP 426300 1-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

现代科学技术的发展使得“九天揽月,五洋捉鳖”成为现实。我国的“嫦娥三号”成功登月,“玉兔号”月球车携带着全景相机、测月雷达、红外光谱仪,肩负着科学探测使命,开展了“观天、看地、测月”的科学探测活动,获得了大量的探测数据,并发回了许多有科学研究意义的宇宙空间图像;我国自主研发的“蛟龙号”潜水器潜海深度达 7000 米,可探测海底的奥秘。再如,我国自主研发的北斗卫星导航系统(BDS)可全天候、全天时地提供高精度、高可靠的定位导航和授时服务(定位精度 10 米,测速精度 0.2 米/秒,授时精度 10 纳秒)。而这些伟大的科学工程都要用到电子检测。

电子技术在航空航天、工业、农业、交通运输、医疗、环保、国防安全等诸多领域得到了广泛应用,而电子测量又是电子技术信息检测的重要手段,也是一门发展快、应用面广、实践性强的应用学科,在当今的信息化社会中正发挥着中流砥柱的作用。

在我国实现四个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,核潜艇的潜浮操纵等都必须有快速、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、震后救生等都少不了应用电子技术进行高精度的信息检测。

为适应国民经济建设对电子测量技术人才的需求,许多高等工科大学相继开办了“测控技术与仪器”专业。即便是电类其他专业,如“通信工程”、“电子信息工程”、“探测制导与控制技术”等也纷纷开设了电子测量类的课程。特别是各院校为了培养宽口径专业的通用型人才,在 2013 年最新一轮修订的教学计划中都增开了实践性强的课程,使培养的学生毕业之后既懂理论会分析,又能动手组织、设计和操作科学实验。

为体现科技发展对学生知识结构的需要,各院校新教学计划中增开了许多新的课程,在四年学制的总框架下分配给电子测量类课程的学时数减少了,有的院校只有 45 学时左右,甚至有的院校将电子测量课缩减为 32 学时。为了满足这种新形势下的教学需求,并考虑不同层次(一本、二本、三本、高职等)的教学对象,在广泛听取多所院校教授这门课程的教师意见的基础上,我们专门编写了这本《电子测量技术简明教程》。编写本书的总体构思有以下 4 点:

(1) 考虑到我国近年来高等教育发展迅猛,招生和入学率急剧增加这种新形势下的学生基础情况,顾及高等院校的类别、学生的层次,本书在内容选材上不追求知识面的完整系统和教学上的严谨缜密,而注重以工程实用为主、够用为度。比如,对测量原理、基本概念的讲解把握由浅入深、通俗易懂的原则,重点的名词术语定义、重要问题的讨论结论以及关键的仪器使用操作步骤均用下带波纹线的黑体字做醒目显示,便于读者重点记忆掌

握；对测量方法的讲述注重归纳、比较、易操作性，尽可能做到简明实用。比如，电子示波器一章，只讲授了示波管、示波器的结构框图及性能、双踪、双线示波器的使用操作，而不讲授属高、精、尖的高速、取样、记忆、存储示波器，读者如若的确需要这方面的知识与技能，请参阅文献[16]。

(2) 考虑国内大多数院校实验仪器目前的配置情况，对实验仪器仪表只讲清其工作原理框图，而没有过多涉及单元内部具体电路；只选用常规、通用、典型型号，而没有选用高、精、新的仪器仪表做典型介绍。

(3) 重在根据测试对象选用合适的仪器仪表、采用合理的测量方法的训练，重在基本仪器仪表的操作、使用方法上的训练；对误差分析侧重物理概念解释，对必要的数学定量推导，力求简明扼要、思路清晰、结论明确醒目，便于读者掌握。

(4) 为便于教师施教和学生学习，本书在各章后配有难易度适中的习题，对题号前带“√”号的题，建议根据本校实验室仪器配置情况安排学生在实验室里完成。书末给出了部分习题的参考答案，供读者练习时参考。

各院校可根据相关专业教学计划对“电子测量”课程的具体要求及计划学时数情况，对加*号的内容进行选讲。使用本教材的参考学时数约为46学时。

本书在出版过程中，得到了西安电子科技大学机电学院测控工程与仪器系领导的关心与支持，得到了西安电子科技大学出版社云立实副编审的热情帮助与指导，参考文献中诸位作者的编写理念和思想对本书稿的编写有很多启发与帮助，在此一并向他们致以衷心的感谢！

本书由张永瑞、刘联会任主编，姜晖、王海军、李明任副主编，参加编写的还有陈杰、薛妮妮、朱亚利。

由于作者学识水平有限，加之编写时间紧迫，书中难免存在不足，敬请读者批评指正。

编 者
2015年10月

目 录

第 1 章 电子测量与计量的基本概念	1	2.3.2 随机误差的正态分布	32
1.1 电子测量的基本概念	1	2.3.3 有限次测量结果的表示	36
1.1.1 测量与电子测量	1	2.4 系统误差分析	37
1.1.2 电子测量的内容	2	2.4.1 系统误差的特性	37
1.1.3 电子测量的特点	2	2.4.2 系统误差的判断	38
1.1.4 电子测量方法的分类	4	2.4.3 消除系统误差产生的根源	39
1.1.5 电子测量方法的选择原则	6	2.4.4 减小系统误差的典型测量技术	39
1.2 电子测量仪器的功能、分类和性能指标	7	2.5 测量数据的处理	43
1.2.1 测量仪器的功能	7	2.5.1 有效数字的处理	43
1.2.2 测量仪器的分类	8	2.5.2 等精度测量结果的处理	45
1.2.3 测量仪器的主要性能指标	9	小结	47
1.3 计量的基本概念	11	习题 2	48
1.3.1 计量和计量学的研究内容	11	第 3 章 信号发生器	51
1.3.2 计量的单位制	12	3.1 信号发生器概述	51
1.3.3 计量基准	13	3.1.1 信号发生器的用途	51
1.3.4 量值的传递与跟踪、检定与比对	13	3.1.2 信号发生器的分类	51
1.3.5 计量的溯源性概念	14	3.1.3 信号发生器的基本架构	53
小结	15	3.2 低频正弦信号发生器	53
习题 1	15	3.2.1 正弦信号发生器的性能指标	53
第 2 章 测量误差和测量结果处理	17	3.2.2 低频正弦信号发生器	57
2.1 测量误差	17	3.2.3 XD-1 型低频信号发生器	59
2.1.1 测量中涉及的几个量值	17	3.3 高频信号发生器	61
2.1.2 测量误差	18	3.3.1 调谐高频信号发生器	61
2.1.3 单次、多次测量与等精度、非等精度测量	18	3.3.2 XFC-6 典型高频信号发生器	62
2.1.4 误差的表示方法	19	* 3.3.3 锁相高频信号发生器	63
2.2 测量误差的来源与分类	23	* 3.3.4 合成高频信号发生器	64
2.2.1 测量仪器的容许误差	23	3.4 扫频信号发生器	67
2.2.2 测量误差的来源	26	3.4.1 线性电路幅频特性的测量	67
2.2.3 误差的另一种分类	27	3.4.2 扫频仪的基本组成	69
2.3 随机误差分析	31	3.4.3 BT-3 典型扫频仪	71
2.3.1 测量值的数学期望和标准差	31	3.5 脉冲信号发生器	74
		3.5.1 脉冲信号	74
		3.5.2 脉冲信号发生器的分类	75
		3.5.3 脉冲信号发生器的结构	75

3.5.4	XC-14 典型脉冲信号发生器	76	5.4.2	时间间隔测量的误差分析	116
3.5.5	脉冲信号源的应用	77	5.5	典型通用电子计数器 E-312	118
小结		78	5.5.1	E-312 型电子计数式频率计的主要技术指标	118
习题 3		79	5.5.2	E-312 型电子计数式频率计的原理	118
第 4 章 电子示波器		81	5.5.3	应用 E-312 进行测量	120
4.1	示波管	81	* 5.5.4	E-312A 型通用计数器简介	122
4.1.1	电子枪	81	5.6	测量频率的其他方法	123
4.1.2	偏转系统	82	5.6.1	直读法测频	123
4.1.3	荧光屏	83	5.6.2	比较法测频	126
4.2	电子示波器的组成结构框图与性能	83	小结		132
4.2.1	电子示波器的结构框图	83	习题 5		134
4.2.2	示波器的主要技术性能	84	第 6 章 相位差测量		135
4.3	电子示波器的基本部件	86	6.1	用示波器测量相位差	135
4.3.1	垂直偏转通道(Y 通道)	86	6.1.1	直接比较法	135
4.3.2	水平偏转通道(X 通道)	89	6.1.2	椭圆法	136
4.3.3	校正器	93	6.2	相位差转换为时间间隔进行测量	138
4.4	双踪和双线示波器	94	6.2.1	模拟式直读相位计	138
4.4.1	双踪示波器	94	6.2.2	数字式相位计	139
4.4.2	双线示波器	95	6.3	相位差转换为电压进行测量	143
4.4.3	SR-8 双踪示波器	96	6.3.1	差接式相位检波电路	143
小结		99	6.3.2	平衡式相位检波电路	145
习题 4		100	小结		146
第 5 章 频率和时间测量		102	习题 6		147
5.1	时间和频率的基本概念	102	第 7 章 电压测量		148
5.1.1	时间的定义与标准	102	7.1	电压测量的特点与电压测量仪表的分类	148
5.1.2	频率的定义与标准	103	7.1.1	电压测量的特点	148
5.1.3	标准时频的传递	104	7.1.2	电压测量仪表的分类	149
5.1.4	频率测量方法概述	105	7.2	模拟式直流电压测量	150
5.2	电子计数法测量频率	106	7.2.1	动圈式电压表	150
5.2.1	电子计数法测频原理	106	7.2.2	电子电压表	153
5.2.2	电子计数器测量频率的误差分析	107	7.3	交流电压的表征和测量方法	155
5.2.3	测量频率范围的扩展	109	7.3.1	交流电压的表征	155
5.3	电子计数法测量周期	110	7.3.2	交流电压的测量方法	157
5.3.1	电子计数法测量周期的原理	110	7.4	低频交流电压测量	159
5.3.2	电子计数法测量周期的误差分析	111	7.4.1	均值电压表	159
5.3.3	中界频率	114	7.4.2	波形换算	161
5.4	电子计数法测量时间间隔	115	7.4.3	均值检波器误差	163
5.4.1	时间间隔测量原理	115			

7.4.4 有效值检波器	163	8.1 阻抗定义与 R 、 L 、 C 基本电路 元件模型	185
7.4.5 分贝值的测量	165	8.1.1 阻抗的定义及其表示方法	185
7.5 高频交流电压测量	166	8.1.2 R 、 L 、 C 基本电路元件模型	186
7.5.1 峰值检波器	167	8.2 电桥法测量阻抗	189
* 7.5.2 误差分析	169	8.2.1 电桥原理线路与平衡条件	189
7.5.3 波形换算	170	8.2.2 交流电桥的收敛性	190
7.6 脉冲电压测量	171	8.2.3 常用电桥电路	191
7.6.1 用示波器测量脉冲电压	171	8.3 谐振法测量阻抗	196
7.6.2 用脉冲电压表测量脉冲电压	172	8.3.1 谐振法测量阻抗的原理	196
7.7 电压的数字式测量	175	8.3.2 Q 表的原理	198
7.7.1 数字式电压表的特点	175	8.3.3 基本元件参数的测量	200
7.7.2 数字式电压表(DVM)的组成原理	176	小结	203
7.7.3 DVM 的技术指标	178	习题 8	204
小结	181	部分习题参考答案	206
习题 7	182	参考书目	208
* 第 8 章 阻抗测量	185		

第1章 电子测量与计量的基本概念

人们在工农业生产、运输、存储、商贸等各项活动中总是要用到测量与计量，可以说从盘古至今乃至将来都如此。但要问“测量与计量的基本概念有哪些，二者又有何区别与联系？”还真是难以说清楚。本章首先讲述电子测量的基本概念，接着重点介绍电子测量仪器的功能、分类和性能指标，章末介绍计量的基本概念及计量的溯源性概念。

1.1 电子测量的基本概念

1.1.1 测量与电子测量

测量是通过实验方法对客观事物取得定量信息(数量概念)的过程。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，并归纳、建立起各种定理和定律，而后又通过测量来验证这些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(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：科学的进步和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术并行进步、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。”

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测量的一种测量技术，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，还可通过各种传感器将非电量转换为电量，然后再对应地实施测量。电子测量方法往往更加方便、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，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、通信、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的发展增添了巨大活力。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，这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。

1.1.2 电子测量的内容

电子测量的内容主要有以下几方面:

(1) 电能量测量。电能量测量包括对各种频率、波形的电压、电流、功率等的测量。

(2) 电信号特性测量。电信号特性测量可分为时域特性测量、频域特性测量和数据域测量,本书不讨论数据域测量。电信号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、信号带宽等的测量。

(3) 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。

(4) 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更为重要,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,可以利用各种传感器将非电量(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、记录并据此对生产过程进行控制是一种典型的方法,如图 1.1.1 所示。

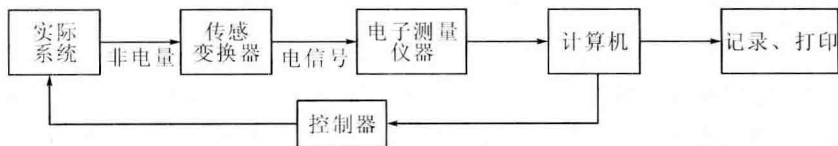


图 1.1.1 自动过程控制系统中非电量的测量

1.1.3 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,通常根据不同的工作频段采用不同的测量原理,从而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 数量级,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很高。例如中档次的国产 YM3371 型数字频率计,其测频范围为 10 Hz~1000 MHz, 国产 WC2180 型交流微伏表可以测量 $5\ \mu\text{V}\sim 300\ \text{V}$ 的交流电压,量程比为 6×10^7 。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为 $3\times 10^{-5}\sim 3\times 10^8\ \Omega$, 量程比为 10^{13} 。前面提及的较完善的电子计数式频率计其量程达 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 $10^{-13}\sim 10^{-11}$ 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^{-3} 数量级,而品质因数 Q 值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。

(4) 测量速度快。由于电子测量基于电子运动和电磁波的传播,加上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上都可以以极高的速度进行,这也是电子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。

(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、运动的或其他人们难以接近的信号进行测量成为可能。

(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学科一个活跃的分支,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。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地会产生误差,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、测量结果的可靠性或可

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。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时无处不在的寄生电容、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了困难。

1.1.4 电子测量方法的分类

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,还可能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,并进行正确、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。

1. 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”获得功率 P 。

间接测量费力、费时,常在直接测量不方便,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情况下使用。

(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的温度系数的测量。已知电阻器阻值 R_t 与温度 t 间满足关系:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1.1.1)$$

式中: R_{20} 为 $t=20^\circ\text{C}$ 时的电阻值,一般为已知量; α 、 β 分别称为电阻值随 t 变化的一次与二次温度系数; t 为环境温度。为了获得 α 、 β 值,可以在两个不同的温度 t_1 、 t_2 (t_1 、 t_2 可由温度计直接测得)下测得相应的两个电阻值 R_{t_1} 、 R_{t_2} ,代入式(1.1.1)得到联立方程:

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t_2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1.1.2)$$

求解联立方程(1.1.2), 就可以得到 α 、 β 值。如果 R_{20} 也未知, 则显然可在三个不同的温度下分别测得 R_{t_1} 、 R_{t_2} 、 R_{t_3} , 列出由三个方程构成的方程组并求解, 进而得到 R_{20} 、 α 、 β 。

2. 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。由于从仪表刻度上可以直接读取被测量, 包括大小和单位, 因此这种方法也称为直读法。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。零位式测量法又称做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做比较测量法), 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 1.1.2 所示。

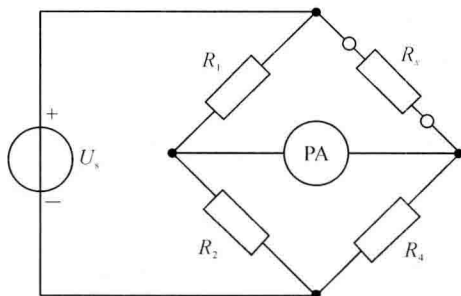


图 1.1.2 利用惠斯登电桥测量电阻示意图

当电桥平衡时, 可以得到:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 \quad (1.1.3)$$

通常是先大致调整比率 R_1/R_2 , 再调整标准电阻 R_4 , 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(1.1.3)由比率和 R_4 的值计算得到被测电阻 R_x 的值。

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, 因而这种方法的测量准确度很高, 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, 因此即便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。如图 1.1.3 所示, P 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 $x = s + \delta$ (在第 2 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)。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 1.1.4 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, 其中, U_o 为直流稳压电源的输出电压, 它随着 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); V_2 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_δ 是由 V_2 电压表测得的 U_o 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微小的起伏。

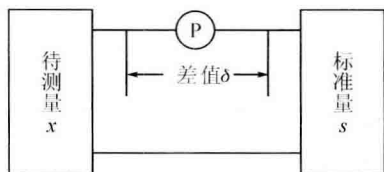


图 1.1.3 微差式测量法示意

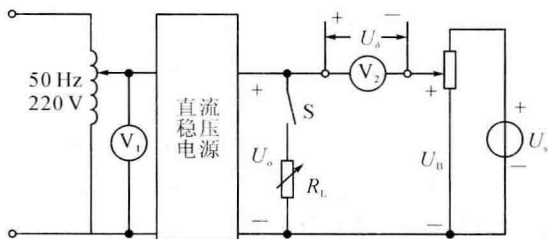


图 1.1.4 用微差法测量直流稳压电源的稳定度

3. 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。时域测量也称做瞬态测量, 主要测量被测量随时间的变化规律。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,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。随机测量又称做统计测量, 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, 在通信领域有广泛应用。

电子测量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。本书只讨论时域测量与频域测量。

1.1.5 电子测量方法的选择原则

在选择测量方法时, 要综合考虑被测量本身的特性、所要求的测量准确度、测量环境和现有测量设备等因素。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是以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为条件的。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 1.1.1】若直接用万用表“R×1”电阻挡测量晶体管发射结电阻，则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。所以，不能用此方法测量晶体管发射结电阻或二极管正向电阻。

【例 1.1.2】图 1.1.5 表示的是用电压表测量高内阻电路端电压的例子。不难看出，电压表内阻的大小将直接影响到测量结果，这种影响通常称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 表示测量用实际电压表内阻。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

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

相对误差为

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

当改用内阻 $R_V = 120\text{ k}\Omega$ 的万用表电压挡测量时，电压为

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

相对误差为

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

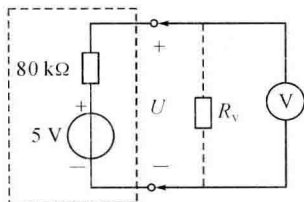


图 1.1.5 实际电压表内阻的影响

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。

1.2 电子测量仪器的功能、分类和性能指标

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。为了正确地选择测量方法、使用测量仪器和评价测量结果，本节将对电子测量仪器的主要功能、主要性能指标和分类作一概括介绍。

1.2.1 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转矩而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。

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。

1.2.2 测量仪器的分类

电子测量仪器的分类方法不一,按其功能大致可分为下面几类。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 波形测量仪器。波形测量仪器主要指通用示波器、多踪示波器、多扫描示波器等各种类型的示波器。

(5) 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。

(6) 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。

(7) 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。

(8) 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。

1.2.3 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。

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,精度不仅是评价测量仪器性能的指标,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细化表征。

(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个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 0.1 V ,即表示用它对同一个电压进行测量时,得到的各次测量值的分散程度不大于 0.1 V 。

(2) 正确度(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)对系统的影响。正确度高,则说明系统误差小,比如某电压表的正确度是 0.1 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(τ)。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,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。要获得理想的结果,应满足三个方面的条件,即性能优良的测量仪器、正确的测量方法和正确细心的测量操作。

为了加深对精密度、正确度和准确度三个概念的理解,这里以射击打靶为例加以说明。图 1.2.1 中,以靶心比作被测量真值,以靶上的弹着点表示测量结果,其中,图(a)弹着点分散而偏斜,属于既不精密,也不正确,即准确度很低;图(b)弹着点仍较分散,但总体而言大致都围绕靶心,属于正确而欠精密;图(c)弹着点密集但明显偏向一方,属于精密度高而正确度差;图(d)弹着点相互接近且都围绕靶心,属于既精密又正确,即准确度很高。

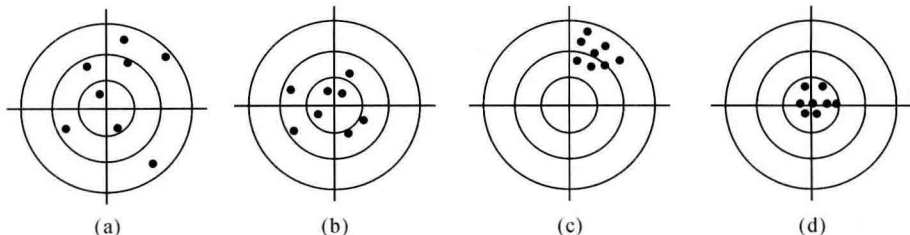


图 1.2.1 用射击打靶说明测量的精密度、正确度、准确度

2. 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