

高等学校电子信息类专业
“十三五”规划教材

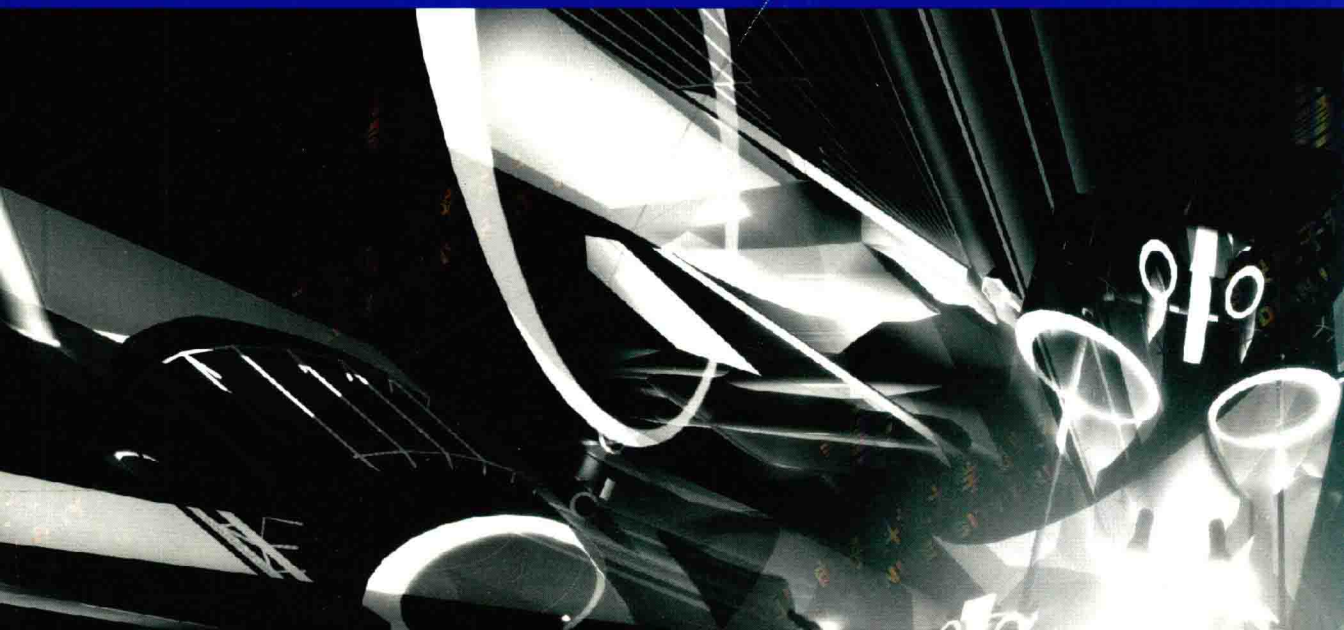
ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

电子测量技术 及应用

李希文 李智奇 主编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

电子测量技术及应用

李希文 李智奇 主编



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍电子测量技术的基本概念、基本原理、基本方法及实际应用,并对与电子测量技术相关的常规仪器,如示波器、信号源、电压表、计数器等的工作原理进行了比较系统的介绍。全书共分7章:第1章绪论;第2章测量误差理论与数据处理;第3章频率、时间测量技术;第4章电压测量技术;第5章示波测量技术;第6章测量用信号源;第7章电子测量技术应用。

本书的特色包括:概念清晰、结构合理、深入浅出、关系明确、通俗易懂;注意各章节之间、电子测量技术课程和相关课程之间知识体系的衔接和联系;注意培养学生分析问题、解决问题的能力;充分反映现代电子测量理论和最新技术潮流;强调电子测量的实用性、应用性,突出理论知识和实际应用的相互联系。

本书既可作为高等院校理工科本科、专科的测控技术与仪器、应用电子技术、自动化、通信工程、电子工程等专业的电子测量课程教学用书,也可作为电类专业广大科研工作者和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术及应用/李希文,李智奇主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-5606-5023-4

I. ① 电… II. ① 李… ② 李… III. ① 电子测量技术 IV. ① TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 191450 号

策划编辑 云立实

责任编辑 阎 彬

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 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 17.5

字 数 414千字

印 数 1~3000册

定 价 40.00元

ISBN 978-7-5606-5023-4/TM

XDUP 5325001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

电子测量是获取信息的重要手段,与各个学科、各个行业有着十分密切的联系,在现代工农业生产、科学技术研究、国防现代化建设等各个技术领域都留有电子测量技术的“烙印”。例如,现代高科技中的火箭、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。电子测量技术发展快、应用面宽,在现代科学技术中发挥着举足轻重的作用且占有重要的地位。

“电子测量技术”是建立在“电路分析基础”、“信号与系统”、“模拟与数字电路”、“计算机原理与应用”等基础课程内容之上的专业基础课程,它把电子、计算机、通信与控制等电子信息知识综合应用在测量科学技术之中。国内高校的许多理工科专业,尤其是电子信息类专业都相继把“电子测量技术”作为一门重要的技术基础性课程。由于该课程知识的综合性强,实践性、应用性特点突出,涉及了现代常用仪器的典型测量技术,因此通过对本课程的学习,学生不仅能获得电子测量技术及仪器方面的基础知识,掌握一门通用技术,而且能够提高分析问题、解决问题的能力以及综合运用知识的能力。

为了满足测控技术与仪器专业新的教学大纲需要,适应“厚基础、宽口径、通工程”的办学培养目标,我们编写了本书。本书从电子测量原理、测量误差分析及电子测量技术的应用这三个方面来阐述,三者之间的关系是,以测量原理为基础,通过测量误差的分析来提升,以实际应用为归宿。与一般电子测量技术教材不同的是,本书体现了以下三个方面的特征:

第一,紧扣电子测量技术的时频测量技术和电压测量技术这两个核心主题。时频测量技术和电压测量技术在当今电子测量的精度及信号处理方面的优势,使得它们在电子测量技术中起着测量的“引擎”和“领头羊”的作用,也是测量其它对象的技术“平台”,因此,时频测量技术和电压测量技术为本书重点介绍的内容。

第二,紧扣电子测量技术应用性强的特点,加大了电子测量技术在应用方面的内容介绍。在各章节的基本内容之后,皆有应用性内容举例。比如在第3章频率、时间测量技术和第4章电压测量技术的内容后面皆增加了相应技术的“应用系统模型组建”内容,这样就可以使学生认识到时频测量技术和电压测量技术在测量其它量值时的价值与作用。特别在第7章,介绍了电子测量知识在实际测量中的典型应用。

第三,紧扣电子测量技术知识综合性强的特点,加强各章节之间、电子测量技术课程内容和相关课程知识之间的衔接和联系。在介绍基本电子测量原理的基础上,加强了测量关系、典型测量电路的分析,提升了相关课程知识在电子测量技术课程的应用,扩大了学生的知识面,也有利于学生对相关课程知识的进一步巩固和掌握。

编者从事电子测量技术教学与研究多年,本书即是编者多年的教学体会和知识积累。在编写的过程中,编者认真学习和参考了国内外同行专家学者的有关教材、专著和论

文,充分吸取了他们的学术知识和经验,并引用、充实于本书之中。

本书不仅适合作为测控专业学生入门的专业基础课教材,而且也适用于广大非测控专业的学生,即把本书作为了解电子测量技术,增强测试能力、技术应用能力的基础课程教材。本书的教学参考时数为48~64学时,各专业可根据实际情况对具体的讲授内容加以取舍。学生在学习过程中,应加强基本概念的理解、认知,加强理论知识和实际应用的联系,即应用所学的电子测量基本原理和方法,解决实际中的测量问题,切忌死记硬背。电子测量技术课程具有很强的实践性、应用性,教学过程中应开设一定的实验内容,以达到理论联系实际、综合运用知识的效果。本书中各章节的应用举例和第7章中电子测量技术应用的内容皆可作为实验内容的参考。每章后面附有思考与练习题,在学习过程中,学生应完成一定量的习题,训练运用所学知识来解决问题的能力。

本书由李希文、李智奇主编,参加编写的还有冯晓明、白小平、康乐、张延等。在编写过程中,得到了西安电子科技大学测控工程与仪器系有关学者的关心与支持,还得到了出版社策划编辑云立实同志热情的帮助,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,殷切希望读者批评指正!

编者

2018年3月

目 录

第1章 绪论	1	2.3.2 系统误差的判断与消除方法	45
1.1 测量	1	2.3.3 粗大误差的分析与处理	49
1.1.1 测量的定义	1	2.4 测量误差的合成与分配	52
1.1.2 测量的意义	2	2.4.1 测量误差的合成	52
1.1.3 测量技术	3	2.4.2 测量不确定度及合成	56
1.1.4 与测量有关的术语	3	2.4.3 误差分配及最佳测量方案	61
1.2 计量	5	2.5 测量数据处理	63
1.2.1 计量的概念	5	2.5.1 有效数字的处理	63
1.2.2 单位和单位制	5	2.5.2 测量结果的处理	65
1.2.3 计量标准	6	2.5.3 最小二乘法与回归分析	69
1.2.4 计量标准的传递	7	思考与练习题	75
1.3 电子测量	8	第3章 频率、时间测量技术	80
1.3.1 电子测量的意义	8	3.1 概述	80
1.3.2 电子测量的内容	9	3.1.1 频率、时间测量的特点	80
1.3.3 电子测量的特点	10	3.1.2 频率、时间测量的意义	80
1.3.4 电子测量的一般方法	12	3.1.3 时间、频率的基本概念	81
1.4 电子测量的基本技术	14	3.1.4 频率测量方法概述	83
1.4.1 变换技术	14	3.2 电子计数法测量频率	84
1.4.2 放大技术	17	3.2.1 电子计数法测频原理	84
1.4.3 处理技术	17	3.2.2 计数器测频方案设计举例	86
1.4.4 比较技术	18	3.2.3 误差分析	88
1.4.5 显示技术	18	3.2.4 频率测量技术应用	90
1.5 本课程的任务及要求	22	3.3 电子计数法测量周期	90
思考与练习题	23	3.3.1 电子计数法测量周期的原理	91
第2章 测量误差理论与数据处理	25	3.3.2 误差分析	92
2.1 测量误差的基本概念	25	3.3.3 中界频率	95
2.1.1 有关误差的术语	25	3.3.4 周期测量技术应用	96
2.1.2 测量误差的表示	26	3.4 电子计数法测量时间间隔及应用	97
2.2 测量误差的来源与分类	31	3.4.1 时间间隔测量原理	97
2.2.1 测量误差的来源	31	3.4.2 时间间隔测量技术应用	98
2.2.2 测量误差的分类	32	3.5 减小计数器±1误差的方法	101
2.2.3 测量误差对测量结果的影响	35	3.5.1 平均法	101
2.3 测量误差的分析与处理	36	3.5.2 多周期同步法	102
2.3.1 随机误差的分析与处理	36	3.5.3 相检测频技术	103

3.5.4 模拟内插法	105	5.3.1 示波器的正确使用	178
3.6 模拟法测量频率	107	5.3.2 用示波器测量电压	179
3.6.1 电桥法测频	107	5.3.3 周期和时间测量	181
3.6.2 谐振法测频	108	5.3.4 信号相位差测量	183
3.6.3 频率/电压转换法	109	5.4 数字存储示波器	184
3.6.4 示波法测频	110	思考与练习题	186
思考与练习题	112	第6章 测量用信号源	190
第4章 电压测量技术	114	6.1 信号源概述	190
4.1 概述	114	6.1.1 信号源的作用	190
4.1.1 电压测量的意义	114	6.1.2 信号源的分类	190
4.1.2 电压测量的特点	114	6.1.3 信号发生器的基本组成	191
4.1.3 电压测量的方法分类	115	6.1.4 正弦信号发生器的性能指标	191
4.2 直流电压的测量	116	6.1.5 信号发生器的发展趋势	194
4.2.1 普通直流电压表	116	6.2 常见信号的产生方法	194
4.2.2 直流电子电压表	118	6.2.1 正弦信号发生器	194
4.2.3 直流数字电压表	119	6.2.2 函数信号发生器	200
4.3 交流电压的测量	119	6.2.3 数字逻辑振荡信号发生器	205
4.3.1 表征交流电压的基本参量	119	6.2.4 合成信号发生器	208
4.3.2 交流电压的测量方法	123	6.3 锁相频率合成技术	210
4.4 分贝测量	130	6.3.1 锁相频率合成原理	210
4.4.1 分贝的定义	130	6.3.2 应用举例	214
4.4.2 分贝的测量方法	132	6.4 直接数字频率合成技术	219
4.5 电压的数字化测量	134	6.4.1 直接数字频率合成原理	219
4.5.1 数字电压表的组成与分类	134	6.4.2 DDS 频率合成信号源	221
4.5.2 非积分式 DVM	135	6.4.3 几种频率合成技术的比较	222
4.5.3 积分式 DVM	140	思考与练习题	223
4.5.4 DVM 主要工作特性	145	第7章 电子测量技术应用	225
4.5.5 电压数字化测量应用系统组建 ——数字多用表技术	149	7.1 静态数字频率计设计	225
思考与练习题	153	7.1.1 结构框图及波形关系	225
第5章 示波测量技术	156	7.1.2 各部分功能及实现方法	226
5.1 概述	156	7.1.3 数字频率计系统结构及电路组成	231
5.1.1 示波器分类	157	7.1.4 各部分工作原理及系统工作过程	233
5.1.2 示波器的主要技术指标	158	7.2 三位半数字电压表设计	234
5.2 通用示波器	160	7.2.1 系统结构设计	234
5.2.1 阴极射线示波管(CRT)	160	7.2.2 各部分功能及实现方法	234
5.2.2 波形显示的基本原理	163	7.2.3 三位半数字电压表系统结构及电路组成	240
5.2.3 通用示波器的组成	169	7.3 电流测量	242
5.2.4 通用示波器的垂直通道	169	7.3.1 电流-电压转换法	242
5.2.5 通用示波器的水平通道	171		
5.3 示波器的基本测量技术	177		

7.3.2 电流-频率转换法	243	7.5.2 集成 $U-F$ 转换应用电路	251
7.3.3 电流-磁场转换法测量电流—— 霍尔式电流表	244	7.6 非电量测量技术及应用	252
7.4 电感 L 及电容 C 的测量	245	7.6.1 高精度温度测量系统设计	252
7.4.1 电感 L 的测量	245	7.6.2 重量测量系统设计	262
7.4.2 电容 C 的测量	246	思考与练习题	270
7.5 电压-频率转换	249	附录 正态分布在对称区间的积分表	271
7.5.1 集成 $U-F$ 转换原理	249	参考文献	272



第1章 绪论

1.1 测量

1.1.1 测量的定义

测量和我们每个人的生活都有着密切的联系,人们或多或少对它有一定的了解,但对于“什么是测量”,并非每一个人能给出一个科学的定义,也并非每一个人能懂得它的真正含义。关于测量的科学定义,可以从狭义和广义两个方面进行阐述。

1. 狭义的测量的定义

测量是为了确定被测量的量值而进行的实验过程。在此过程中,人们借助专门的设备,把被测量直接或间接地与同类已知单位标准量进行比较,取得用数值和单位共同表示的测量结果。

上面关于测量的定义采用了传统的、经典的表述方法,较全面地阐明了测量的内涵。它表明:① 测量是通过实验过程去认识对象的,说明了测量的实践性;② 测量是通过比较来确定被测量数值的,测量的过程就是比较的过程,比较可采用直接或间接的方法进行,比较通常需要用专门的设备(测量仪器)才能实现;③ 测量需要有同类型已知单位标准量,即被测量必须有明确的定义,且其量值的标准已建立,在此前提下测量才可能实施;④ 测量的目的是对被测对象有一个定量的认识,测量的结果包括数值和单位。

直接比较测量和间接比较测量的狭义测量原理,可以用天平称重和弹簧秤称重的典型例子来说明。天平称重是将被测物体的质量与同类已知标准(即砝码)的质量,通过天平直接比较完成,测量结果是从所加砝码值获得的;弹簧秤称重是将被测重物与标准砝码的质量,通过弹簧装置间接比较完成,测量结果是从指针在刻度盘上对应的刻度数值获得的。弹簧秤在出厂前已经用标准砝码进行了标定和校准,弹簧秤度盘上的刻度是事先与标准量进行比较的结果。

2. 广义的测量的定义

测量是为了获取被测对象的信息而进行的实践过程。在这个过程中,人们借助专门的设备去感知和识别有关的信息,取得关于被测对象的属性和量值的信息,并以便于人们利用的形式表示出来。

所谓某事物的信息,即该事物(系统)的运动状态及其变化方式。世间万事万物,无不在运动。事物运动的状态也总会随着时间和空间的推移依照某种方式发生变化,这就是说,世界随时随地产生着巨量的信息。人们要认识世界,首先必须获取事物的信息。

广义的测量原理可以通过信息获取过程来说明,即通过信息的感知和识别两个环节来



说明。信息获取的首要环节是信息的感知。信息感知的原理是通过感知系统与产生信息的源事物之间的相互作用,把源事物信息转化为某种物理量形式表现的信号。所以,感知的实质是信息载体的转换,这是获取信息的必要前提。但是,仅仅感知出信息还不够,还必须有能力识别所感受到的信息是有用的还是无用的(甚至是有害的)。如果是有用信息,还要用有效的方法把这种有用信息同其他(无用或有害)的信息分离开来,再判明它属于哪一类信息;如果是有害信息,则找到有效的方法对它进行抑制或消除。有用信息识别的基本原理是与标准样本进行比较,判断出信息的属性和数量。为了对感知的信息进行定性区分和定量确定,需要建立信息类别相似性的表示和信息量值的度量,这是信息识别的主要任务。

广义地讲,测量不仅对被测的物理量进行定量的测量,而且还包括对更广泛的被测对象进行定性、定级的测量,例如故障诊断、无损探伤、遥感遥测、矿藏勘探、地震源测定、卫星定位等。而测量结果也不仅仅是由量值和单位来表征的一维信息,还可以用二维或多维的图形、图像来显示被测对象的属性特征、空间分布、拓扑结构等。

1.1.2 测量的意义

测量技术在国民生活、工业、农业、航空航天、生物医学及科学研究等各个领域都有着广泛的应用。

在人们的日常生活中,买东西要称重量,做衣服要量尺寸,安排工作需计时间,生病了要测体温;在家庭中常用的水表、电表、气表、空调机、洗衣机、电冰箱、电饭锅等,需要测量电压、电流、电能、温度、湿度、流量、水位等物理量。可见,人们随时随地都离不开测量。

现代化的工业生产,处处离不开测量。现代制造业建立在标准化与互换性的基础上,互换性的先决条件是零部件必须具有一定的精度,而精度取决于制造水平,并由测量水平来把握。测量是精细加工和生产过程自动化的基础,没有测量也就没有现代化的制造业。在产品设计和生产过程中,为了检查、监督、控制生产过程和产品质量,必须对生产过程中的各道工序和产品的各种参数进行测量,以便进行在线实时监控。生产水平越是高度发达,测量的规模就越大,需要的测量技术与测量仪器也就越先进。

在航空航天领域,作为现代科学技术尖端之一的火箭发动机,从开始设计到样机试飞,中间要进行成百上千次试验。火箭发动机的地面试车台就是一套完整的综合测量系统,为了研究发动机的强度,需要有数百个应变片和测振传感器;为了研究燃料工作的情况,需要测量发动机工作时有关部位的压力、流量、温度及转速等。新型火箭的设计,需要测试火箭高速飞行时在气流冲击作用下的性能,通过风洞试验测定箭身、箭翼的受力和振动分布情况,以验证和改进设计方案,仅此一项就要用到上千块应变片和相应的测量电路及仪器。而航天飞行中需要监测的参数有飞行参数、导航参数、运载火箭及发动机参数、座舱环境参数、航天员生理参数、飞行器结构参数等六大类五千多个参数。

在生物医学领域,通过对人体基因的测定和人体血液的定量分析,可以判断出病变的根源;对蛋白质的反应测量,可以了解胚胎生长情况;对细胞结构的测量,可以判断肌体是否发生病变。随着心电图机、CT多层螺旋扫描仪、核磁共振成像设备、动态心电图血压测试系统、多普勒脑血管测量仪、超声诊断设备等现代医用诊断治疗仪的出现,人们可以快速、准确地测量出人体各部位的生理状态、温度分布等信息,使人类诊断疾病的效率、准

确性和可靠性大大提高,增强了人类战胜疾病的能力。

测量科学先驱凯尔文说:“测量是知识的起点,也是你进入科学殿堂的开端。”物理学、化学、生物学、医学等皆是建立在实验之上的科学。俄国著名科学家门捷列夫说:“没有测量,就没有科学。”一方面,测量推动了科学的进步和发展,离开测量就不会有真正的科学,比如说“没有望远镜就没有天文学,没有显微镜就没有细胞学,没有指南针就没有航海事业”,新的先进的测量手段,提高了人们对客观事物的认知,催生了新的科学理论,测量水平越高,提供的信息就会越丰富、越准确,科学技术取得的突破性就越大;另一方面,新的科学理论又不断催生出新的测量方法和手段,推进测量技术的发展并诞生新型的测量仪器,例如光电效应的发现促进了遥测、遥感技术的发展,压电效应的发现为一些非电参量的测量提供了新的途径。所以说,科学的进步同测量技术的发展两者密切相关,相互促进、相辅相成。

测量是人们认识事物、认识世界的钥匙。凯尔文说:“一个事物,如果你能够测量它,并且能用数字来表达它,你对它就有了深刻的了解;如果你不知道怎样测量它,且不能用数字表达它,那么你对它的知识可能就是贫瘠的,是不令人满意的。”为了揭示世界的奥秘,人们用实验的方法去认识客观世界,用测量的手段获取实验数据,再对测量数据进行归纳、演绎,从而得出科学的理论,使感性认识上升到理论阶段。科学家为了解释一个现象或验证一个理论,往往要经过大量的实验和精确的测量,例如对宇宙微弱辐射信号的测量可以发现新的天体,对能量转移的测量可以发现新的基本粒子等。

1.1.3 测量技术

测量中所采用的原理、方法和技术措施,总称为测量技术。测量对象不同,所采用的技术措施不同。如被测量中有电量和非电量的区别,电量中又有幅值大小、频率范围、有源和无源、模拟与数字等不同,这些差别在测量中需要采用不同的技术措施。即使同一测量对象,一般也有多种测量技术可供选择,不同的测量技术,其测量效果是不同的。

1.1.4 与测量有关的术语

在了解测量的基本含义之后,下面就现实中常用的与测量同义的有关派生术语进行说明。

1. 定量、定性和定级的测量

前面指出,狭义的测量是量值的测量,它按一定准确度的要求确定被测量的实际值。它是一种定量的测量,追求的是精确,通常要对测量结果进行误差分析,并给出不确定度的数值。

广义的测量除量值测量外,还应包括属性的测量,即对被测对象属性的判断,如测量数字电路某点逻辑电平的高与低、故障的有与无、功能的正常与否。这类测量对量值的准确度要求不高,是一种粗略的测量,一般不要求进行误差分析,即不要求给出误差的数值。所以这类测量是一种定性测量。

此外,在实际中还有大量的等级测量,它是以技术标准、规范或检定规程为依据,分辨出被测量的量值所归属的某一范围带,以此来判别被测量是否合格(符合某种级别)的一



种定级的测量。例如批量生产中对电阻器、电容器数值精度等级的测量，环境保护中对空气、水质等的质量等级测量等。

2. 测试

测试是测量和试验的总称，它包含了测量和试验的全部内容，既包括定量的测量，也包括定性的试验。

试验是为了察看某事的结果或某物的性能而从事的某种实践活动，它着眼于定性测量。例如，对于数字电路系统，测量某点是处于高电平状态还是低电平状态，只要它的电平在 $0\sim 0.8\text{ V}$ 之间，就认为是处于低电平，而不必关心它的具体数值，这样的过程，虽属于电压测量，但又和一般以定量为目的的电压测量不同。在现实中，某些被测对象只能作定性区别而无法作精确的定量确定。例如人的综合素质评定，其测评过程只能是带有一定模糊度的定性区别而不是带有精确度指标的定量确定。

现代测试技术是传统的测量技术与微处理技术相结合的产物。微处理器的引入，大大提高了被测量的范围、种类及精度。自动测试技术就是现代测量技术的反映。对于一些大型电子系统，不仅需要对大量被测量进行测量，而且需要依据它们各自的大小及相互关系对系统的性能情况做出判断，这在自动故障诊断、自动修复技术方面具有重要意义。

包含定量测量和定性试验的“测试”一词带有广义测量的含义，一般来说，“测试”和“测量”可以看作同义词，不必严格区别。

3. 检测

检测包括检验和测量两方面的含义。

检验属于分级测量，即检查被测参量的量值是否处在某一范围带内，以此来判断被测参量是否合格或者现象是否存在。例如，机械加工中检验某零部件参数大小是否在公差带之内，并不要求准确知道其参数的具体数值。检验也含有定性检查的含义，例如检验电路板上元器件有无虚焊和漏焊，只要求发现有无虚焊和漏焊点的存在等。

在自动化生产领域，不仅要对产品性能进行检验和测量，还要对某个生产过程或运动对象的情况进行检查、监测和控制，这就需要时刻对各种参量的大小和变化情况进行有效的检测，并将其控制在最佳工作状态，所以说检测是控制的基础，控制又离不开检测。例如工业生产中温度、压力、流量、物位等的检测与控制，以及航空、航天等应用领域中各种技术参数的检测与控制，在这些领域，测量和控制是密不可分的，通常检测的对象是以各种各样的非电量为主，对这些对象进行检测时，往往要用传感器，所以检测常与使用传感器的非电量测量、自动控制等技术联系在一起。由此可见，检测是含有检查、检验、监督等比较广泛意义上的电量与非电量的测量。

此外，根据测量目的、对象、方法、手段、过程及效用等的不同，还出现了其它各种派生术语，例如感测(传感与测量，常用于非电量检测)、电测(电量的测量)、监测(监督与测量的总称，如环境监测)、观测(观察和预测，如天文、气象的观测)、探测(探索和测量，如太空、宇宙探测)、勘测(勘查和测量，如地形、地质勘测)、遥测(远距离的测量，如卫星、火箭遥测、遥控)、预测(预报与测量，如气候、地震、水情的预测)，此外还有测控(测量与控制)、测绘(测量与绘图)、测验(测量与验证)、测定(测量与认定)等术语。在关于测量的各种术语中，测试和检测是与测量的广义含义相类同的、使用最广泛的两个术语。

1.2 计 量

1.2.1 计量的概念

随着生产的发展以及商品的交换和国际、国内交往的日益频繁,客观上要求对同一量在不同的地方、用不同的测量手段测量时,所得的结果是一致的。为了保证这种一致性,在不同的地方、不同仪器所用的单位已知量必须严格一致,这就需要有统一的单位以及体现这些单位的基准、标准和用这些基准和标准校准的测量器具,并以法律形式固定下来,从而形成了与测量有联系而又有区别的新概念——计量。

计量是利用技术和法制手段实施的一种特殊形式的测量,即把被测量与国家计量部门作为基准或标准的同类单位量进行比较,以确定合格与否,并给出具有法律效力的《鉴定证书》。可以说计量是为了保证量值统一和准确一致的一种测量。它的三个主要特征是统一性、准确性和法制性。计量包含了为达到量值统一和准确所进行的一切活动,如单位的统一、基准和标准的建立、量值的传递、计量监督管理、测量方法及其手段的研究等,因此,也可以说计量是研究测量、实现单位统一和量值准确可靠的科学。计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,它在工农业生产、科学技术、国防建设以及人民生活等各个方面起着技术保障和技术监督的作用。

测量是通过测量仪器,采用一定的测量方法将被测未知量和同类已知的标准单位量进行比较的过程,这时认为被测量的真实数值是存在的,测量误差是由测量仪器和测量方法等引起的。计量是通过计量器具用法定标准的已知量与同类的未知量(如受检仪器)进行比较的过程,这时认为标准量和体现标准量的计量器具是准确的、法定的,而测量误差是由受检仪器引起的。在测量过程中,已知量是通过所使用的测量仪器直接或间接地表现出来的,为了保证测量结果的准确性,必须定期对测量仪器进行检定和校准,这个过程就是计量。计量是保证量值统一和准确可靠的一种特殊形式的测量,所以,计量和测量是既有密切联系又有一定区别的两个概念。

计量是测量发展的客观需要,是测量数据准确可靠的保证。计量也是测量的基础和依据,没有计量,也谈不上测量。测量又是计量通向实际应用的重要途径,可以说没有测量,计量也将失去意义。计量和测量相互配合,才能在国民经济中发挥重要作用。

1.2.2 单位和单位制

任何测量都要有一个统一体现计量单位的量作为标准,这样的量称作计量标准。计量单位具有明确的定义和名称,根据定义,系数为1的量称为单位。例如长度单位1米(m),时间单位1秒(s)等。单位是表征测量结果的重要组成部分,又是对两个同类量值进行比较的基础。

计量单位是依据严格的科学理论进行定义的,并且具有统一性、权威性和法制性。在1948年第9届国际计量大会上通过一项决议,建议国际上采用一种以实用单位为基础的统一单位制。1960年第11届国际计量大会上正式通过了这种单位制,命名为国际单位制,



并规定以 SI 作为国际单位制的简称。我国确立了以国际单位制为基础的法定计量单位，国家以法律形式强制使用。1984 年 2 月国务院颁布了《中华人民共和国法定计量单位》，决定我国法定计量单位以国际单位制为基础，并包括 11 个我国选定的非国际单位制单位，即时间(分、时、天)、平面角(秒、分、度)、长度(海里)、质量(吨、原子质量单位)、体积(升)、面积(公顷)、转速(转每分)、速度(节)、能(电子伏)、级差(分贝)和线密度(特克斯)。

在国际单位制中，单位包括了基本单位、导出单位和辅助单位三类。基本单位是那些可以彼此独立地加以规定的物理量单位，共有 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)和物质质量单位摩尔(mol)。由基本单位按定义、定律或一定的函数关系推导出来的单位称为导出单位，如力的单位牛顿(N)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，其它物理量的单位都是导出单位，如：频率的单位为赫兹(Hz)，定义为“周期为 1 秒的周期现象的频率”，即 $\text{Hz} = 1/\text{s}$ ；电压的单位伏特(V)，定义为“在载有 1 安培恒定电流导线的两点间消耗 1 瓦的功率”，即 $V = W/A$ 等。国际上把既可以作为基本单位又可作为导出单位的单位叫做辅助单位，国际单位制中包括两个辅助单位，分别是平面角的单位弧度(rad)和立体角的单位球面角(sr)。

由基本单位、导出单位和辅助单位构成的完整体系，称为单位制。单位制随基本单位的选择不同而不同，例如：若确定厘米、克、秒为基本单位，则速度的单位厘米每秒(cm/s)，密度的单位克每立方厘米(g/cm^3)等构成一个体系，称为厘米克秒制。国际单位制就是由 7 个基本单位、2 个辅助单位及 19 个具有专门名称的导出单位构成的一种单位制。

1.2.3 计量标准

计量标准也称作计量基准，它是在严格的科学理论定义的基础上建立的。计量标准(基准)是指用当代最先进的科学技术、最高的加工工艺水平，并以最高的准确度和稳定性建立起来的专门用以规定、保持和复现物理量计量单位的特殊量具或仪器装置等，它是用作参考的实物量具、测量仪器、参考物质或测量系统。根据标准的地位、性质和用途，标准通常分为主标准、副标准和工作标准，也分别称作一级、二级和三级标准。

(1) 主标准(一级标准)：用来复现和保存计量单位，具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具，经国家鉴定批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据。因此，主标准也叫国家标准。在确立一个国家计量标准时，必须经过严格的法定手续，所以它具有最高的计量权威性，其量值的确定不必参照相同量的其它标准，是被指定的或普遍承认的标准。一个国家，体现某一测量单位量值的国家标准只有一个，因此，主标准也称作原始标准。

(2) 副标准(二级标准)：通过与相同量的主标准比对，确定其量值并经国家批准的计量器具或标准，其地位仅次于国家标准。副标准的量值准确度由主标准确定，平时用以代替主标准向下(如省一级计量部门)传递基本测量单位的量值标准，或代替主标准参加国际比对，以确定各国主标准的准确度，这样可保证主标准不致因经常使用和搬动而降低其准确度。

(3) 工作标准(三级标准): 通过与主标准或副标准比对或校准来确定其量值并经国家鉴定批准用以检定下属计量标准的计量器具或标准。它在全国作为复现计量单位的地位仅在主标准和副标准之下, 用于日常校准(检定)或核查实物量具、测量仪器或标准物质。工作标准用来直接向下属标准量具进行量值传递, 用以检定下属计量标准量具的准确度。设立工作标准的目的是为了不使主标准和副标准由于频繁使用而丧失其准确度, 因为主、副标准器具的工艺、结构一般都十分精细, 价格昂贵, 操作复杂, 对环境条件及其稳定性也有严格要求, 不宜经常使用或搬动。在实际测量中, 根据工作标准还复现出各种不同等级的便于经常使用的工作计量器具或仪器, 通过这些工作计量器具经常性地对日常工作仪器进行检定、标定。

需要说明的是: 首先, 标准(基准)本身并不一定刚好等于一个计量单位, 例如铯原子频率标准所复现的时间值不是 1s 而是 $(919261770)^{-1}\text{s}$, 氮长度基准复现的长度单位不是 1m , 而是 $(1\ 650\ 763.73)^{-1}\text{m}$, 标准电池复现的电压值不是 1V , 而是 1.0186V 等。另外, 一个时期的测量标准只能反映当时的人类认识水平和科学水平, 随着时代的前进、科学的进步、人们认识的深入、测量水平的提高, 各种测量标准会不断变化、不断向前发展。例如, 长度标准由原器标准发展到原子标准, 长度测量精确度有了长足的进步。用米尺测量长度只能精确到毫米, 即 1mm 是最小的长度单位。用游标卡尺测量长度时, 精确度可提高到 0.1mm 。在游标卡尺上配上光栅, 用记录光脉冲数的办法可精确到 0.01mm 。如果用精密光学仪器测量长度, 其精确度可达到埃(\AA , $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$)。用纳米激光尺测量长度, 精确度可达到纳米(10^{-9}m)。又如, 在时间的测量上, 从早期人们把地球自身的旋转周期作为计时标准; 使时间测量的精确度可达到 1s , 到 20 世纪 90 年代, 科学界做出了铯原子钟, 使得推算的计时精确度在三百万年内也不超过 1s 。这些例子说明任何测量标准都是相对的, 只能反映当时的科学技术水平, 永远也不会有绝对的测量标准存在。如何根据一个时期的科学技术水平去定义和确立测量标准, 是计量科学的研究课题。

1.2.4 计量标准的传递

首先介绍有关标准传递的几个基本概念。

标准器具: 能够复现量值或将被测量转换成可直接观测的指示值或等效信息的仪器、量具、装置等。

工作器具: 在工作岗位上使用的, 直接用来测量被测对象量值的, 而不是用于进行量值传递的仪器、用具或装置等。

检定: 使用高一等级准确度的计量器具对低一等级的计量器具或工作器具进行比较, 以达到全面评定被检器具性能是否合格的测量过程。一般要求计量标准的误差为被检者的 $1/3$ 到 $1/10$ 。

比对: 在规定条件下, 对相同准确度等级的同类标准或工作器具之间的量值进行比较, 其目的是考核量值的一致性。

校准: 被校器具与高一等级的计量标准相比较, 以确定被校器具的示值误差或其它性能指标, 供测量时参考。一般来说, 检定要比校准包括更广泛的内容。

测量标准的传递由国家主标准、副标准逐级向下传递, 一直传递到日常工作的各种量具和仪器。测量标准传递的准则是: 高一级测量标准检定低一级测量标准的精确度; 同级



测量标准的精确度只能通过比对来鉴别。量值传递过程是：各地区或各部门所使用的计量标准器具和上级标准相比较，若比较结果的误差在允许的范围内，这些标准器具就可作为地区或部门的计量器具的标准，再下一级的标准量具就以这些标准量具为标准进行比较，若比较结果的误差在允许范围内，就可作为更下一级的标准器具，这样逐级比较，逐级传递，直至工作量具。这样一级一级地对测量标准进行传递，就可以将测量标准统一在国家标准的监理之下。

检定是测量标准传递的具体形式，各级计量局、计量检定所(或站)按照法定的程序(包括检定方法、所用设备、操作步骤等)，定期对各级各类测量标准进行检定，行使国家对测量标准的行政管理权，对达到检定标准者发给合格证书，持有合格证书的测量标准才具有法律效力。新生产的测量器具在制造完毕后，必须按照规定等级的标准(工作标准)进行校准和标定，再由有关计量部门进行检定，对达到检定标准者发给合格证书；各种类别等级的标准以及各种工作测量仪器在使用一段时间后，由于元器件、部件的老化或性能的不稳定等都将引起准确度的下降，也必须定期地进行检定和校准，发给新的检定合格证书，合格证书的有效期已超过者，所标定的准确度是不可信的。检定和校准是各级计量部门的重要业务活动，正是通过这些业务活动和国家的有关法令、法规的执行，才能将全国各地区、各部门、各行业、各单位都纳入法律规定的完整计量体系之中，从而保证现代社会的生产、科研、贸易、日常生活等各个环节的工作顺利进行。

我国已建立起了一套完整的计量体系，国家计量科学研究基地用于研究和保存的国家计量标准就有 10 大类 147 项，拥有 800 多种一级标准物质库，它们与国际上保持一致，是国内量值溯源的基础。各级政府也基本上建立了可溯源至国际标准的各个等级的社会公用计量标准，各行各业也都有自己的计量器具和量值传递系统，形成了以地区覆盖为主的多层次计量标准网和计量检定网，构成了一个基本上可满足社会和国民经济需求的较完整的溯源体系。

1.3 电子测量

电子测量是泛指以电子技术为核心手段的一种测量技术，它是利用电子技术获得测量对象量值的实践过程。

电子测量中运用了电子科学的原理、方法和设备，除了对各种电信号、电路元器件及电子系统等特性和参数进行测量外，更重要的意义是可通过各种传感器件和装置对非电量进行测量。在此过程中，通过传感器等转换手段，将测量对象量值转换为对应的电参量大小(如直流电压量值，交流电压的幅值、频率、相位， R 、 L 、 C 等电参数值)。在电子技术领域，对相应的电信号进行处理、比较及标定，从而获得测量对象量值(信息)，这种测量更加方便、快捷、准确，有时是其它测量方法所不能替代的。

1.3.1 电子测量的意义

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、通信、商业贸易、生态环境保护乃至人们日常



生活的各个方面。

如果说天文学、力学、光学是古典科学的代表,那么电子信息科学则是现代科学技术的象征。目前,世界上正进行一场以电子信息技术为基础的新技术革命,它给人类社会和国民经济带来了巨大的、广泛的、深刻的影响。现代信息科学技术的三大支柱是:信息获取技术(测试技术)、信息的传输技术(通信技术)、信息的处理技术(计算机技术)。在这三大技术中,信息获取(测试)是首要的,是信息的源头。没有信息,传输就是无源之水,处理更是无本之木。传感器技术、电子测量技术是获取信息的重要途径和保证。例如,在现代化的生产工厂内或一个现代化的产品中,都配备了大量的测试点。据统计,一辆汽车内配备的监测点有50~100个,一架飞机内约有3000个,一台大型发电机组约有4000个,一个大型石油化工厂约有6000个,一个大型钢铁厂约有2万个,这些监测点皆需要通过各种传感器来完成信息的获取。电子测量技术也是自动化技术的基础和保证,在石油、化工、电力等自动化生产中,常常需要对生产过程中的温度、压力、流量、物位等参数进行测量,将测量数据处理后,进行相应的控制,以保证产品质量和生产过程的平稳进行。在此过程中,电子测量的技术和成本直接关系到自动化系统的技术水平和成本。

近几十年来,电子技术,特别是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,使功能单一的传统仪器变成了技术先进的、功能更加丰富的一代崭新的智能仪器和由计算机控制的模块式自动测试系统。微电子技术及相关技术的发展,不断为电子仪器提供各种新型器件,如ASIC(专用集成电路)、信号处理器芯片、新型显示器件及新型传感器等,不仅使电子仪器变得“灵巧”——功能强、体积小、功耗低,而且使过去难以测试的参数变得容易测试。利用智能仪器或自动测试系统可以实现对若干电参数的自动测量以及自动量程选择、数据记录、数据处理、数据传输、误差修正、自检自校、故障诊断、在线测试等功能,不仅改变了若干传统测量观念,更对整个电子技术和其它科学技术产生了巨大的推动作用。

在现代,电子测量技术(包括测量理论、方法,测量仪器装置等)已形成了电子科学领域重要且发展迅速的分支,广泛应用于人类活动的各个领域、各领域的各种工作系统及各系统的各种工作环节之中,促进了科学技术的进步和人们生活水平的提高。

工程上的一切工作系统或装置(包括电子工作系统或装置)都是在自觉不自觉地进行着测量关系的转换和大小关系的比较,这样就可以把与电子技术相关的具体活动看作是具体的电子测量活动,因此可以说大家所学习的与电子技术有关的一切课程都是电子测量知识体系中的一部分,从事的与电子技术有关的工作都是在默默地进行着电子测量的具体工作,或者说是电子测量技术工作的分工、拓宽或延伸,即有电子技术应用的地方就有电子测量技术的烙印。

1.3.2 电子测量的内容

从广义上说,电子测量是指以电子技术理论为依据,以电子测量仪器或装置为手段,对电量和非电量进行的测量。其中电量测量内容包括以下几个方面:

(1) 电信号能量参数测量。电信号能量参数测量包括各种波形电信号的电压、电流、功率等的测量。

(2) 电信号特性参数测量。电信号特性参数测量包括各种交变信号的幅度、频率、周