



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

电子测量技术

夏哲雷 主 编
许 华 副主编

免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

电子测量技术

夏哲雷 主 编
许 华 副主编

机械工业出版社

本书系统地阐述了电子测量技术的原理与方法。内容包括：测量误差与测量不确定度、电压测量、时间频率测量和调制域分析、信号发生器、时域测量、频域测量、数据域测量及现代电子测量技术，共9章。每章均配有思考题与习题。

本书内容丰富、深入浅出、重点突出和适用面广，可作为高等院校电子信息、电气工程、自动化等专业的教学用书，可作为从事电类专业的工程技术人员、仪器检测人员和科研人员的参考书，亦可作为电子测量技术培训教材，适宜读者自学。

图书在版编目（CIP）数据

电子测量技术/夏哲雷主编. —北京：机械工业出版社，
2011.8

普通高等教育“十二五”电子信息类规则教材
ISBN 978-7-111-35407-9

I. ①电… II. ①夏… III. ①电子测量技术-高等学校
-教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 144797 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：吉 玲 责任编辑：吉 玲 王寅生 谷玉春 刘丽敏

版式设计：张世琴 责任校对：胡艳萍

封面设计：张 静 责任印制：杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 9 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm · 13.75 印张 · 340 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-35407-9

定价：28.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据电子信息类专业的教学要求编写的,目的是使读者掌握电子测量技术的基本原理和方法,熟悉新型电子测量仪器的基本应用技术,具备在科学实验中能制订较先进的电子测量方案,通过选用电子测量仪器,组成合理的测量系统,正确处理测量数据,以获得最佳测试结果,从而提高分析和解决电子测量应用问题的能力。

本书主要阐述电子测量技术的基本原理与方法,共分9章。第1、2章介绍了测量、计量、电子测量和电子测量仪器的基本概念及发展,以及测量误差的基本概念和测量不确定度的概念及评定和测量数据的处理方法。第3~5章介绍了电压的模拟测量和数字测量方法,电压测量中的模-数转换,数字多用表及电压测量的误差分析;时间频率测量的概念和方法,电子计数器的基本原理和误差分析以及调制域分析的基本原理;信号发生器的分类和主要技术指标,重点介绍了合成信号发生器和任意波形发生器。第6~8章介绍了示波器的基本组成和工作原理,重点介绍了数字示波器的工作原理;信号的频谱分析及线性系统频率特性的测量;数字信号发生器和逻辑分析仪的工作原理。第9章介绍了自动测试系统、虚拟仪器、接口总线的基本原理与网络化仪器基本组成系统。每章均配有小结与习题。

本书是作者在多年教学实践的基础上编写而成的。在编写过程中,广泛参阅了有关书籍。该书内容丰富,叙述上注重启发读者的思维;对测量原理讲解深入浅出,突出基本概念;对测量误差分析在保证科学性的前提下,避免烦琐的数学推导,把重点放在对常用公式的物理解释和具体应用上;对电子测量技术重点讲清工作原理、组成结构、技术特性及典型应用;在内容处理上,既确保了传统的基本知识,又尽量反映了当代测量技术的新成就,明确了随着电子技术及计算机技术的飞速发展,电子测量领域正从传统的电子测量仪器向自动测试系统、虚拟仪器、网络化仪器方向发展。因此,本书可作为工科院校电类和工程类专业学生的教材,也可作为具有一定电子技术基础的工程技术人员参考书。

本书由中国计量学院夏哲雷教授担任主编,许华副教授担任副主编,参加编写还有浙江大学陈敏、杭州电子科技大学吕伟锋、浙江科技学院丰明坤教师。全书由夏哲雷负责统稿。本书的编写工作还得到中国计量学院信息工程学院王秀敏教授的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作 者
于中国计量学院

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 测量与计量	1
1.1.1 测量	1
1.1.2 计量	1
1.2 电子测量的内容与特点	3
1.2.1 电子测量的基本内容	4
1.2.2 电子测量的特点	4
1.3 电子测量的方法	5
1.3.1 按测量方式分类	5
1.3.2 按测量性质分类	6
1.4 电子测量仪器	7
1.4.1 电子测量仪器的主要性能指标	7
1.4.2 电子测量仪器的分类	8
1.5 电子测量技术与仪器发展	9
本章小结	10
思考题与习题	11
第2章 测量误差与测量不确定度	12
2.1 测量误差的基本概念	12
2.1.1 测量误差的定义	12
2.1.2 测量误差的分类	13
2.2 测量不确定度	18
2.2.1 测量不确定度的概念	18
2.2.2 标准不确定度的评定	20
2.2.3 测量不确定度的合成	22
2.2.4 测量不确定度评定举例	24
2.3 测量数据处理	26
2.3.1 有效数字的处理	26
2.3.2 测量数据的处理	27
本章小结	29
思考题与习题	31
第3章 电压测量	33
3.1 概述	33
3.1.1 电压测量的特点	33
3.1.2 电压测量的方法和分类	34

3.1.3 电压标准	34
3.2 电压的模拟测量	35
3.2.1 交流电压的表征	35
3.2.2 交流-直流转换器	36
3.2.3 交流电压表的刻度特性	40
3.2.4 模拟式交流电压表	42
3.3 电压的数字化测量	46
3.3.1 数字电压表的组成	46
3.3.2 数字电压表的主要性能指标	47
3.4 电压测量中的模-数转换器	48
3.4.1 积分式 ADC	48
3.4.2 比较式 ADC	54
3.5 数字多用表	57
3.5.1 AC-DC 转换原理	57
3.5.2 电流-电压转换原理	58
3.5.3 电阻-电压转换原理	59
3.6 数字电压测量的误差分析	60
3.6.1 误差的表示	60
3.6.2 数字电压测量的干扰及抑制	61
3.6.3 电压测量的自动校正	65
本章小结	66
思考题与习题	68
第4章 时间频率测量与调制域分析	70
4.1 时间频率测量	70
4.1.1 时间和频率的基本概念	70
4.1.2 时间频率基准	70
4.1.3 时间频率测量的特点和方法	71
4.2 电子计数器	72
4.2.1 电子计数器的功能与组成	72
4.2.2 电子计数器测量频率和周期	73
4.2.3 电子计数器的其他功能	75
4.3 电子计数器测量误差分析	78
4.3.1 电子计数器测频误差	78
4.3.2 电子计数器测周误差	80
4.3.3 中界频率	82

4.4 电子计数器性能的改进	83	6.2.6 通用示波器的多波形显示	130
4.4.1 多周期同步测频法	83	6.3 数字示波器	133
4.4.2 提高测试分辨率	85	6.3.1 数字示波器的功能与特点	133
4.4.3 计数器测频范围的扩展	86	6.3.2 数字示波器的组成	134
4.5 调制域测量	88	6.3.3 采样和存储	136
4.5.1 调制域的基本概念	88	6.3.4 时基与触发系统	140
4.5.2 调制域分析仪的组成和工作 原理	88	6.3.5 数据处理及显示	141
4.5.3 调制域分析仪的应用	89	6.3.6 数字示波器的主要技术指标	142
本章小结	92	6.4 示波器的应用	145
思考题与习题	92	6.4.1 示波器的基本应用	145
第5章 信号发生器	94	6.4.2 示波器应用实例	147
5.1 信号发生器概述	94	本章小结	150
5.1.1 信号发生器的功用	94	思考题与习题	151
5.1.2 信号发生器的分类	95	第7章 频域测量	154
5.1.3 信号发生器的主要技术指标	97	7.1 信号的频谱分析	154
5.2 正弦、脉冲及函数信号发 生器	99	7.1.1 时域和频域测量	154
5.2.1 正弦信号发生器	99	7.1.2 频谱分析仪的工作原理	156
5.2.2 脉冲信号发生器	100	7.1.3 频谱分析仪的结构	159
5.2.3 函数信号发生器	101	7.1.4 实时频谱分析仪	162
5.3 合成信号发生器	103	7.1.5 频谱分析仪的主要技术指标	163
5.3.1 频率合成器	103	7.1.6 频谱分析仪的应用	166
5.3.2 锁相环频率合成器	104	7.2 线性系统频率特性的测量	169
5.3.3 直接数字频率合成	110	7.2.1 频率特性测量方法	169
5.4 任意波形发生器	113	7.2.2 扫频信号发生器	170
5.4.1 对任意波形发生器的需求	113	7.2.3 扫频仪	172
5.4.2 任意波形发生器的工作原理	113	本章小结	174
5.4.3 任意波形发生器的常用技术 指标	115	思考题与习题	175
5.4.4 任意波形发生器的典型应用	116	第8章 数据域测量	177
本章小结	117	8.1 概述	177
思考题与习题	118	8.1.1 数据域测量基础	177
第6章 时域测量	120	8.1.2 数据域测量的基本仪器	179
6.1 概述	120	8.2 数字信号发生器	179
6.2 模拟示波器的基本原理	120	8.2.1 数字信号发生器的原理	179
6.2.1 示波管	120	8.2.2 数字信号发生器的主要技术 指标	182
6.2.2 波形显示原理	122	8.3 逻辑分析仪的构成与原理	183
6.2.3 通用示波器的基本组成	124	8.3.1 逻辑分析仪的构成	183
6.2.4 通用示波器的垂直通道	124	8.3.2 数据捕获	184
6.2.5 通用示波器的水平通道	125	8.3.3 触发	184
		8.3.4 实时采集存储器	185
		8.3.5 分析和显示	186

8.3.6 逻辑分析仪的性能	187	9.2.3 虚拟仪器软件结构	196
8.3.7 逻辑分析仪测量实例	188	9.2.4 虚拟仪器编程环境	197
本章小结	190	9.3 接口总线	199
思考题与习题	191	9.3.1 GPIB 接口总线	199
第9章 现代电子测量技术	192	9.3.2 VXI 接口总线	203
9.1 自动测试系统	192	9.3.3 PXI 接口总线	205
9.1.1 自动测试系统的基本组成	192	9.3.4 LXI 总线网络化仪器	207
9.1.2 自动测试系统的发展	193	本章小结	209
9.2 虚拟仪器	194	思考题与习题	210
9.2.1 虚拟仪器的基本概念和特点	194	附录	211
9.2.2 虚拟仪器的组成及关键技术	195	参考文献	213

第1章 绪 论

1.1 测量与计量

1.1.1 测量

测量是指通过实验的方法对所研究的客观事物取得定量数据的过程，该过程往往需采用专门仪器或设备，将被测对象与已知同类单位进行直接或间接比较，以取得相关数值和对应单位共同表示的客观结果。或者说，测量是用量值来描述和揭示客观世界的重要手段，所谓量值是指由一个数乘以测量单位所表示的约定量的大小。

人们经过观察对客观事物进行定性分析，利用测量对客观事物进行定量分析，逐步认识客观事物并揭示其规律，从而建立各种方法与理论。通过用科学实验验证理论的方式，使得科学理论又将产生巨大的社会效益。历史事实证明科学的进步和生产的发展，与测量理论、技术的发展和进步是互相促进的。著名科学家门捷列夫曾说过：“没有测量，就没有科学”。正是由于测量奠定了科学发展的基础，因此科学技术的不断发展将有力地促进人类社会的前进。

1.1.2 计量

对于在不同的地方用不同的手段测量同一量时，使所得结果一致，则要求使用统一的单位、基准、标准和测量器具。计量是为了保证量值的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。

1. 计量的定义

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。计量是一种特殊形式的测量，它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《检定证书》，以保证单位的统一和量值的准确可靠。

计量主要有三个特征，即统一性、准确性和法制性。其中统一性是指在世界范围内统一单位，便于国际交往、沟通和比对；准确性是指所获得的量值可以溯源到基准；法制性是指可用立法和行政手段来保障各计量内容的实现。

在计量的过程中，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仪器进行测量时所获得测量结果的可靠性。

计量按其内容可分为科学计量、法制计量和工程计量三类。科学计量的任务是研制和建立计量基准装置，保证量值传递的溯源，为法制计量和工程计量提供必要保障。法制计量的任务是由政府计量行政主管部门，对关系国计民生的重要计量器具和商品计量行为依法进行监管，以确保相关量值准确。工程计量的任务是社会的其他测量活动进行量值溯源，提供计量校准、检测服务。

计量学是研究测量、保证测量统一和准确的科学，它研究的主要内容包括：计量和测量的方法、技术、量具及仪器设备等一般理论；计量单位的定义和转换；量值的传递和保证量值统一所必须采取的措施、规程和法制等。

2. 计量单位

计量单位是计量学的基础内容。计量单位是有明确的定义和名称并赋予其数值为 1 的一个固定量，是用以量度同类量大小的标准量。

国际单位制是 1960 年第 11 届国际计量大会（CGPM）通过的，并经 1971 年第 14 届 CGPM 修订，其国际代号为 SI。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。国际单位制由基本单位、导出单位和辅助单位构成一个完整体系。基本单位是那些独立加以定义的物理量单位，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，以电学量为例，除电流外，其他物理量的单位都是导出单位，如频率的单位为赫兹（Hz）等。国际上把既可作为基本单位又可作为导出单位的单独列为一类，叫做辅助单位，如平面角的单位弧度（rad）和立体角的单位球面度（sr）。

1983 年，第 17 届国际计量大会通过了新的米的定义，根据这个定义，米与约定的光速值及秒定义有关。从原则上说，长度单位已成为时间（频率）的一个导出单位，长度基准装置这一概念也不复存在。因此可以说，新米的定义的实现是计量学单位制发展史上的一个里程碑。用基本物理常数导出单位的量纲，将不同物理量的测量转化为频率测量，是 21 世纪国际单位制的发展趋势。

3. 计量基准

能够复现、保存和传递量值，并经国家法定，作为统一全国量值最高依据的计量器具，称为计量基准器，简称计量基准。基准用当代最先进的科学技术和工艺水平，以最高的准确度和稳定性建立起来，专门用以规定、保持和复现物理量计量单位。在实际工作中，基准代表法定计量单位，直接涉及各种测量过程的精确程度，因此具有权威性和法制性。根据基准的地位、性质和用途，基准通常又分为国家基准、副基准和工作基准。

（1）国家基准

国家基准是指在特定计量领域内用来复现和保存计量单位，并具有最高计量学特性，经国家鉴定并批准，作为统一全国计量单位量值最高依据的计量器具，也称为主基准。

（2）副基准

副基准是指通过与国家基准比对或校准来确定其量值，并经国家鉴定批准的计量器具。副基准在全国用作复现计量单位，在国家计量检定系统中的地位仅次于国家基准，平时用来代替国家基准使用或验证国家基准的变化。

（3）工作基准

工作基准是指经与主基准或副基准比对或校准，并经国家鉴定批准，用以检定下属计量标准的计量器具。工作基准用作复现计量单位，在国家计量检定系统中的地位仅在国家基准和副基准之下。设置工作基准的目的是不使国家基准和副基准因频繁使用而丧失原有的准确度。

4. 量值传递、检定和校准

量值传递就是通过对计量器具的检定和校准,将国家基准所复现的计量单位量值通过各等级计量标准传递到工作计量器具,以确保量值的准确和一致。

检定是指用高一等级准确度的计量器具对低一等级的计量器具进行比较,以全面评定被检计量器具的计量性能是否合格的全部工作,一般要求计量标准的准确度为被检者的 $1/10 \sim 1/3$ 。

校准是指被校的计量器具与较高等级的计量标准相比较,以确定被校计量器具的示值误差(有时也包括确定被校器具的其他计量性能)的全部工作。

5. 测量与计量的关系

测量是指通过实验获取客观事物定量信息的过程。它是把待测未知量与同类已知的标准单位量进行比较,以获得待测量的量值,认为被测量的真实数值是客观存在的,而测量误差取决于测量仪器和测量方法。计量是用法定标准的已知量与同类的受检仪器(未知量)进行比较,这时的标准量和体现标准量的计量器具是准确的、法定的,而测量误差被认为是由受检仪器引起的,计量是为检定仪器进行的一种测量。因此,测量与计量都是比较过程,只是比较对象、误差源不同。为了保证测量结果的准确性,必须定期对在测量中使用的仪器进行检定和校准,即计量。因此,计量是测量的基础和依据。可以说没有测量,就没有计量;没有计量,测量将失去意义。

1.2 电子测量的内容与特点

电子测量是指利用电子技术进行的测量,主要测量以电参量形式所表示的各种被测对象。电子测量除了可以具体运用电子技术的原理、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,还可以通过各种传感装置对非电量进行测量。电子测量涉及宽频率范围内的所有电量、磁量以及各种非电量的测量。在科学技术高度发展的今天,电子测量的应用涉及所有的技术领域。

在电子测量中使用的仪器称为电子测量仪器,电子测量仪器是电子测量的直接实现设备。现代电子测量仪器融合了微电子技术、计算机技术、通信技术、网络技术、新元器件新材料技术、现代测试技术、现代设计制造技术和现代工艺技术等,是现代工业产品中新技术应用最多、最迅速的产品门类。

近年来,随着计算机技术和微电子技术的不断提高,极大地推进了电子测量和测量仪器的发展。计算机与电子测量的结合,构成了智能仪器和自动测试系统,可以对电参量进行自动测量、自动量程选择、自动记录数据、自动数据传输、自动完成数据的分析与处理、自动进行故障的诊断与误差修正。这种崭新的电子测量系统的出现对整个电子技术领域产生了巨大的影响。

电子信息技术包括信息的获取、信息的传输和信息的处理三个重要部分,其中测量技术已成为信息技术的源头和关键技术。如果没有对原始数据准确、可靠的测量,则对任何信息的转换、处理和传输都将失去实际意义,因此电子测量技术及电子测量仪器是电子信息产业中的基础。

1.2.1 电子测量的基本内容

对现代科学技术和现代化生产中所要求的精密和准确测量内容，通常都是运用了电子测量的方法来实现的，电子测量的范围十分宽广。对电子学中电的量值的测量是最基本、最直接的电子测量，其内容主要有以下几个方面：

- 1) 电能量的测量。包括各种频率和波形的电流、电压、电功率和电场强度等的测量。
- 2) 电信号的特性及所受干扰的测量。例如信号的失真度、时间频率、相位、脉冲参数、调制度、信号频谱和信噪比等的测量。
- 3) 电路元器件参数的测量。例如电阻、电感、电容、电子器件（晶体管、场效应晶体管等）的测量以及集成电路的测量。
- 4) 电子设备的性能测量。包括增益、衰减、灵敏度、延时、频率特性和噪声指数等的测量。
- 5) 信息的测量。如软件协议测量、硬件故障振荡等的测量。

上述各种待测参数中，频率、电压、时间、阻抗等是基本电参数，对它们的测量是其他许多派生参数测量的基础。

另外，通过传感器，可将很多非电量如温度、压力、流量、位移等转换成电信号后进行测量。

1.2.2 电子测量的特点

与其他测量技术相比，电子测量具有下列主要特点。

(1) 频率范围宽

电子测量中所涉及的测量对象，其频率覆盖范围很宽，被测信号的频率范围除测量直流外，测量交流信号的频率范围低至 10^{-6} Hz 以下，高至太赫兹 ($1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$) 以上。在不同频段，许多电量的测量原理、方法及仪器是不同的。例如，测量频率、时间的频率计数器，在较低频段，常采用直接计数法，但在微波频段，由于受电子元器件工作速度的限制，必须把微波信号频率变成较低的中频频率后再进行计数，因而微波频率计数器与通用计数器的工作原理是有差别的。随着电子技术的发展，电子元器件性能的提高，电子仪器的工作频率范围也在不断提高，目前正在向更宽频段乃至全频段方向发展。如果利用各种传感器，则几乎可以测量全部电磁频谱的物理量，如声、光、热、力、速度、质量、几何量等。

(2) 量程范围广

量程是指测量范围的最大值和最小值之差。电子信号的幅度变化范围很大，因而仪器必须具有宽广的量程。对一台电子测量仪器，往往要求最高量程与最低量程要相差几个甚至十几个数量级。例如，数字电压表，可以测量 $1\text{nV} \sim 1\text{kV}$ 的电压，量程达 12 个数量级；用于测量频率的电子计数器，其高低量程相差近 17 个数量级。量程范围广是电子测量的突出优点。

(3) 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量方法高得多。例如，用电子测量方法对频率和时间进行的测量，由于采用原子频标和原子秒作为基准，可以使测量准确度达到 10^{-15} 的量级，这是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。相比之下，力学测量的准确度最高只达 10^{-9} 的

量级。由于目前频率测量的准确度最高，所以人们往往尽可能地把其他参数转换成频率信号再进行测量。电子测量的准确度高，正是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因之一。

(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进行的，因而测量速度极快。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，这也是电子测量在现代科学技术领域内得到广泛应用的一个重要原因。例如，在通信网中很多通信设备系统中信息传输速率不断提高，设备中广泛使用均衡、补偿等电路，所以通信测量要能实现快速、自动的在线测量。

(5) 可实现遥测和测量过程的自动化

当将各待测量转换成易于传输的电信号后，通过有线或无线的方式传送到测试控制台，可实现遥测和遥控。这样，利用电子测量方式，能对远距离、高速运动的，或者人类难以接近的地方的信号进行测量。

电子测量同电子计算机相结合，使测量仪器智能化，并在自动化系统中占据重要的地位。尤其是大规模集成电路和微处理器的应用，开创了测量过程的自动化新局面。例如，电子测量系统中往往具有自动转换量程，自动校准，自动存储，自动数据处理等功能。

(6) 易于实现仪器小型化

随着微电子器件集成度的不断提高和可编程器件和微处理器及 ASIC 电路的采用，电子测量仪器正在向着小型化、数字化、宽带化、智能化、综合化和网络化的方向发展。特别是随着模块式仪器系统的采用，把多个仪器模块连同计算机装入一个机箱内组成自动测试系统，使之更为紧凑、小型化。目前，出现了智能仪器、模块仪器、卡式仪器等多种虚拟电子测量仪器。

1.3 电子测量的方法

要测量一个电信号参量，可以通过不同的方法来实现。测量方法选择的正确与否，直接关系到测量结果的可信度，也直接关系到测量工作的可行性。电子测量按不同的标准分类的方法很多，下面主要介绍几种常用的分类方法。

1.3.1 按测量方式分类

(1) 直接测量

利用测量器具对某一未知量直接进行测量，直接获取被测量量值的测量方法称为直接测量。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等过程。例如用电压表测量电压，用电子计数器测量频率等。直接测量过程简单迅速，是工程测量中广泛应用的测量方法。

(2) 间接测量

当被测量由于某种原因不能直接测量时，可利用直接测量的量与被测量之间的函数关系，通过计算求出被测量量值的方法称为间接测量。例如，要测量已知电阻 R 中流过的电流，可以通过直接测量电阻 R 两端的电压 U ，然后再根据公式 $I = U/R$ 求出被测量电流 I 的

值。间接测量方式广泛应用于科研和实验室中。

(3) 组合测量

当被测量与几个未知量有关、测量一次无法得出最后结果时,则可通过改变测量条件进行多次测量,根据被测量与未知量的函数关系列方程组求解,从而得到有关未知量。这种方法称为组合测量。它是一种兼用直接测量与间接测量的测量方法。这种测量方式比较复杂,测量时间长,但精度较高,一般适用于科学实验。

上面介绍的三种测量方式中,直接测量的特点是过程简单快捷,在工程技术中使用得比较多。间接测量多用于科学实验,在生产及工程技术中使用较少,只有当被测量不便于直接测量时才使用。组合测量是一种特殊的精密测量方法,适用于科学实验及某些特殊的场合。

1.3.2 按测量性质分类

被测对象种类繁多,性质千差万别,为方便起见,可根据被测量的性质将测量大致分为时域测量、频域测量、调制域测量、数据域测量和随机测量等多种类型。

(1) 时域测量

时域测量是指对以时间为自变量的电信号的测量。它采用测量被测对象的幅度——时间特性的方法,以得到信号波形和系统的瞬态响应(阶跃响应或冲激响应)。在时域测量中,信号波形的采集和分析、系统瞬态特性的测量和分析是最根本的任务,常用的测量信号和待测信号是脉冲、方波或阶跃信号。时域测量技术是研究信号随时间变化和分析一个系统的瞬态过程的重要手段。

(2) 频域测量

频域测量是指对以频率为自变量的电信号的测量。频域测量的主要内容包括两个方面:一是对信号进行频谱分析,二是研究电子系统对不同频率的激励所产生的响应。频域测量的主要对象是频谱和网络的测量。用于测量信号电平、频率和频率响应、谐波失真、互调失真、频率稳定度、频谱纯度、调制指数和衰减量等。可以测量一个系统的灵敏度、增益、衰减、阻抗、无失真输出功率、谐波分析、延迟失真、噪声系数、幅频特性和相频特性等多种参数。

(3) 调制域测量

调制域测量是测量输入信号随时间而变化的频率值,是测量信号的频率值与时间的关系;这种方法非常适合测量定时信号、相位编码信号或频率编码信号,是目前唯一能直接对通信传输中随时间而变化的晃动进行精确测量的技术,尤其是在军事电子测试领域更有其重要的意义。

(4) 数据域测量

数据域测量是测试数字量或电路的逻辑状态随时间变化而变化的特性,其测量目的—是确定系统中是否存在故障,称为合格/失效测试,或称故障检测;二是确定故障的位置,称为故障定位。对数字系统进行测量的基本方法是在输入端加激励信号,观察由此产生的输出响应,并与预期的正确结果进行比较,一致则表示系统正常,不一致则表示系统有故障。

(5) 随机测量

随机测量主要是指对各类随机的噪声信号、干扰信号的测量。

在电子测量中,利用噪声作为随机信号源进行测量和检测埋藏在背景噪声中的微弱被测

信号等测量技术,已发展成为一大类测量方法。由于噪声是一种与时间因素有关的随机变量,对噪声的研究使用概率统计方法,故又把这类测量称为统计测量技术。

按被测量在测量过程中的状态,可分为静态测量与动态测量。在测量过程中,被测量不随时间而变化,称为静态测量;若被测量随时间而具有明显的变化,则称为动态测量。

实际上,绝对不随时间而变化的量是不存在的。通常将变化速度相对于测量速度十分缓慢的量的测量,按静态测量来处理。相对于静态测量,动态测量更为困难。这不仅在于参数本身的变化可能是很复杂的,而且测量系统的动态特性对测量的影响也是很复杂的。因而,动态测量数据的处理有着与静态测量不同的原理与方法。

1.4 电子测量仪器

电子测量仪器是指利用电子技术实现测量的仪表设备。本节简述电子测量仪器的主要性能指标和分类。

1.4.1 电子测量仪器的主要性能指标

电子测量仪器的主要性能指标包括以下几个方面。

(1) 准确度

准确度(简称精度)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,反映了仪器测量数据的误差状况。对于仪器来说,其精度是指该仪器在测量过程中可能引入的误差有多大,精度高则表明其可能引入的误差小。因此,精度不仅用来评价测量结果,也是评定测量仪器性能最主要和最基本的指标。

(2) 稳定性

稳定性是指在规定的时间内,其他外界条件恒定不变的情况下,仪器示值变化的大小,稳定度也称稳定误差,可用示值绝对变化量与时间一起表示,并通常用稳定度和影响量两个参数来表征。对于仪器的稳定性,导致仪器示值变化的原因主要是仪器内部各元器件的特性不同,参数不稳定和老化等因素。稳定度由于电源电压、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,称为影响量或影响误差,一般用示值偏差和引起该偏差的影响量一起表示。

(3) 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与被测量增量之比。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即为它的偏转灵敏度,单位为 cm/V 。灵敏度的另一种表述方式是分辨力或称分辨率,定义为测量仪表所能分辨的被测量的最小变化量与对应量程之比。典型的分辨率是数字电压表的模-数转换器分辨率,即其输出数码变化1个字所对应的输入电压变化量与总量程之比。分辨率的值越小,其灵敏度越高。

(4) 线性度

线性度表示仪器的输出量(示值)随输入量(被测量)变化的规律,设仪器的输出为 y ,输入为 x ,两者关系用函数 $y=f(x)$ 表示。若 $y=f(x)$ 为 $x-y$ 平面上过原点的直线,则称为线性刻度特性,否则称为非线性刻度特性。仪器的线性度可用线性误差表示。根据各类仪

器组成原理不同,将导致仪器不同的刻度特性。如模拟三用表的电阻挡具有非线性刻度特性;而数字电压表具有线性刻度特性。

(5) 动态特性

电子测量仪器的动态特性表示仪器的输出响应随输入变化的能力。例如,由于检测电路带宽、扫描速度、示波管响应速度等因素的限制,示波器无法测量、显示频率很高的信号波形。

应当指出,上述各性能指标是就一般情况而论的,并非所有仪器都要用上述特性来考核,不同的测量仪器对应不同的技术指标要求。

1.4.2 电子测量仪器的分类

电子测量仪器是指利用电子技术实现测量的仪表设备,按照不同的测量特点有不同的分类方法。电子测量仪器从功能上划分有激励和测量两类;按测量领域可分为时域(如示波器)、频域(如频谱分析仪)、调制域(如调制域分析仪)、数据域(如数字逻辑分析仪)及阻抗域(如网络分析仪)等。这样,在实际应用中根据电子测量仪器的组成及应用特点可形成通用电子测量仪器。

通用电子测量仪器是以基本量(或基本参数)测量为主要特征的电子测量仪器。最常用的基础测量仪器主要有信号发生器、数字电压表(多用表)、数字(或模拟)示波器、电子计数器、元器件测量仪等。

(1) 信号发生器

在进行各种电子测量时,经常需要使用各种信号发生器作为测试激励信号源。信号发生器种类很多,常按照工作频段、用途、输出波形种类和调制类型来进行分类。例如,按工作频段可分为:低频信号发生器、射频信号发生器、微波信号发生器和毫米波信号发生器等;按输出信号波形种类可分为:正弦信号发生器、函数和任意波形信号发生器、脉冲信号发生器以及随机信号发生器等;按调制类型可分成:调幅信号发生器、调频信号发生器、调相信号发生器和脉冲调制信号发生器等。

(2) 电压测量仪器

电压是电子学中的基本测量参量,即便是对于非电量参数的测量,通常也是经过传感器变换后,以电压的形式进行测量的。因此电压测量是电子测量技术中最基本、也是最重要的测量,其应用十分广泛。电压测量仪器种类、型号繁多,按频率范围分有直流电压测量仪器和交流电压测量仪器;按测量技术分有模拟式电压表和数字式电压表;按被测信号的特点分有矢量电压表、脉冲电压表等。数字电压表/数字多用表是把连续的被测模拟电压参量变成离散的、用十进制数字显示测量结果的一种测量仪表。

(3) 时间/频率测量仪器

时间/频率测量的测量精度是所有物理量中最高的。频率测试仪器的测频范围为 $50\text{Hz} \sim 170\text{GHz}$,甚至更高;测试仪器的时间间隔测量范围为 $1\text{ns} \sim 10^7\text{s}$,测试准确度可达到 1ns 。时间/频率测量的主要仪器是电子计数器,一般包括频率计数器、时间(间隔)计数器、通用计数器、微波频率计数器和特种计数器。

(4) 示波器

示波器广泛用于电量和非电量的捕获、测试、分析和监视,示波器可直观表示二维、三

维及多维变量之间的瞬态或稳态函数关系、逻辑关系以及实现对某些物理量的变换与存储,是一种应用范围最广、渗透领域最多的电子测量仪器。示波器种类繁多,目前根据示波器发展的现状,可分为模拟示波器、数字存储示波器(DSO)、数字荧光示波器(DPO)、混合信号示波器(MSO)、数字采样示波器等。

(5) 频谱分析仪

信号的频谱是指组成信号的全部频率分量的总集,频谱测量就是在频域内测量信号的各种频率分量,以获得信号的多种参数。在频谱测量中,通常将随频率变化的幅度谱称为频谱。任意一个时域信号都可以被分解为一系列不同频率、不同相位和不同幅度的正弦波的组合。因此,在已知信号幅度谱的条件下,可以通过计算获得频域内的其他参量。所以,对信号进行频域分析就是通过对频谱的分析来研究信号本身的特性;这在系统分析中占有相当重要的位置。

信号的频谱分析包括对信号本身的频率特性分析,如对幅度谱、相位谱、能量谱、功率谱等进行测量,从而获得信号在不同频率上的幅度、相位、功率等信息;还包括对线性系统非线性失真的测量,如测量噪声、失真度、调制度等。频谱分析仪是一种多用途的频域测量仪器,它在频域测量中的地位可以与时域测量中的示波器相比拟。

(6) 逻辑分析仪

在数字系统,特别是在数字计算机系统的研制、调试和故障诊断过程中,由模拟系统的时域和频域分析发展起来的传统的测试方法与测试仪器往往难以奏效。这是因为数字系统的数据传输是按空间分布多码位的方式进行的,这些码位组成一定格式的数据,传输的数据流是以离散时间为自变量的波形。

逻辑分析仪是一种主要应用于数据域测量的通用电子测量仪器,是调试和开发数字系统的有力工具,它的基本功能是采集、存储并以多种方式显示数字系统中的数据流状态。

近年来,大部分测量仪器使用直观显示方式,非时域仪器变得更像时域仪器那样利用大型屏幕显示测量结果。时域仪器在不同应用领域测量仪器的互通扩展中占有重要位置,例如数字示波器兼有频谱分析功能,调制域仪器可由时域和频域仪器综合而成。

1.5 电子测量技术与仪器发展

电子测量技术与仪器的发展,结合自动测试核心技术,大体经历了四个阶段:模拟式仪器、数字化仪器、智能仪器和虚拟仪器,目前正向网络化仪器趋势发展。

(1) 模拟式仪器

模拟式仪器的基本结构是电磁机械式的,利用电磁技术将被测电磁量转换为指针的偏转角,再通过角位移在标尺位置上来显示测量结果,如指针式万用表和晶体管电压表等。

(2) 数字化仪器

数字化仪器将模拟信号的测量转化为数字信号的测量,并以数字方式输出测量结果,具有快速响应和较高准确度的测量特性。通过采用数字技术、锁相技术、频率合成技术和取样技术等,将不断提高数字化测量仪器性能。这类仪器目前应用广泛,如数字电压表和数字频率计等。

(3) 智能仪器

这类仪器内置微处理器，既能进行自动测试又具有一定的数据处理能力，可以取代部分脑力劳动。它的功能块以硬件或固化软件的形式存在，在开发和应用上缺乏灵活性。

自动测试系统的出现是电子测量技术、自动控制及计算机技术密切结合的成果，是电子测量仪器数字化与数字信息系统相结合的产物，它真正实现了高速度、高精度、多参数和多功能测试。

(4) 虚拟仪器

虚拟仪器是检测技术、计算机技术和通信技术有机结合的产物。虚拟仪器是指在通用计算机上设置软件和相应的硬件模块，使用户操作这台通用计算机就像操作一台真实的仪器一样。虚拟仪器技术强调软件的作用，提出了“软件就是仪器”的概念。在虚拟仪器的软件体系结构中，软件模块具有通用性，所编写的用户应用程序都是可以移植的。自虚拟仪器概念提出之后，以软件代替硬件、以图形代替代码、以组态代替编程、以虚拟代替真实组建自动测试系统的技术得到了迅速发展。虚拟仪器以其特有的优势显示了强大的生命力。

随着网络技术迅猛地发展，不断地推动着社会朝网络化方向发展。网络可用来传递实时测控信息，实现异地监测与控制，组建一个庞大的远程自动测控系统，产生网络化仪器。通过局域网或互联网来控制和使用电子仪器，可以使工程技术人员远在千里之外仍能遥控仪器和获取结果。

由于现代信息科学领域中的微电子技术、计算机技术、信号处理技术的高速发展，加速了电子测量技术与仪器的变革。新的测量方法和理论、新的测量仪器和结构及新的测试领域正在不断出现，冲击着电子测量技术和仪器的传统观念，以虚拟仪器和智能（程控）仪器为核心的自动测试技术各个领域得到了广泛的应用，促使现代电子测量技术向着数字化、自动化、智能化、网络化和标准化方向发展。

本章小结

1. 测量是用量值来描述和揭示客观世界的重要手段，所谓量值是指由一个数乘以测量单位所表示的约定量的大小。

2. 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。

计量主要有三个特征：统一性、准确性和法制性。

3. 计量基准有三类：国家基准、副基准、工作基准。

量值传递就是通过对计量器具的检定和校准，将国家基准所复现的计量单位量值通过各等级计量标准传递到工作计量器具，以确保量值的准确和一致。

没有测量，就没有计量；没有计量，测量将失去意义。

4. 电子测量的内容包括电能量测量、电信号特性测量、电路元器件参数测量、电子设备性能的测量和信息的测量。

5. 电子测量的特点：测量频率范围宽、测量量程广、测量准确度高、测量速度快、可实现遥测和测量过程的自动化、易于实现仪器小型化。

6. 测量方法分类如下：

按测量方式分类分为直接测量、间接测量和组合测量。

按被测量的特性分类分为时域测量、频域测量、调制域测量、数据域测试和随机域测