

DIANZI CELIANG JISHU YU YIQI FENXI

电子测量技术与仪器分析

· 李宗宝 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

电子测量技术与仪器分析

李宗宝 著

天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

电子测量技术与仪器分析 / 李宗宝著. —天津:
天津科学技术出版社, 2016.8
ISBN 978-7-5576-1374-7

I. ①电… II. ①李… III. ①电子测量技术②电子测
量设备—仪器分析 IV. ① TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 159659 号

责任编辑: 方 艳

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社出版

出版人: 蔡 颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话 (022) 23332695 (编辑部)

网址: www.tjkjcs.com.cn

新华书店经销

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 250 000

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 35.00 元

前 言

测量技术是当今信息社会的三大支柱技术之一，是获取信息的源头技术，测量水平的高低可以反映一个国家科学技术发展的状况。近年来，科学技术的飞速发展，促进了电子测量仪器的发展，使得功能单一的传统测量仪器逐步向智能仪器和模块式自动测试系统发展，社会对电子测量人才的需求也越来越多。

“电子测量与仪器应用”是电子信息类专业人必须掌握的专业知识。电子信息类专业人才应对电子测量技术、电子测量仪器以及测试系统的专业知识具有较为全面的认识，同时对电子测量仪器和测试系统的工程应用具有较为系统的掌握，能够电子测量中的实际问题。

本人结合自己 15 年来对电子测量技术的教学经验和对电子测量仪器的使用研究撰写了《电子测量技术与仪器分析》。本书内容的系统性、实用性、先进性和新颖性，主要体现在以下几个方面。

(1) 按照电子测量不同的域进行编写，具有一定的系统性。本书根据电子测量的性质与特点，按照不同的域进行分析，使读者通过每一篇的划分，更加清楚测量技术与仪器所涉及的域；对每个域涉及的测量技术与仪器又进行了清晰的划分，具有一定的新颖性。

(2) 将技术与仪器相结合，从仪器的使用角度进行测量技术的分析，对每种测量技术和测量仪器的阐述有很强的条理性，为读者的进一步分析提供了一定的理论基础，具有一定的理论价值。

(3) 对新型、典型仪器的使用进行了介绍，由浅入深地分析了电子测量技术与仪器，并有一定的实际应用案例，具有一定的实用性。可以为学习电子测量技术与仪器的学生提供学习的参考，也为电子测量工程技术人员提供实际应用的借鉴和参考。

(4) 对现代电子测量技术进行了分析与展望，具有一定的先进性。

全书把电子测量的技术与仪器使用分为 6 篇、10 章进行分析。第 1 篇为电子测量技术与仪器概论，主要从电子测量的基本认识、电子测量仪器的基本认识、测量误差的分析、测量结果的表示及测量数据的处理 4 个方面对电子测量与仪器进行整体的概述性的分析；第 2 篇为测量信号产生技术与仪器分析，主要从通用信号发生器的构成、低频信号发生器、高频信号发生器、函数信号发生器、电视信号发生器 5 个部分对信号的产生及不同类型的信号发生器的构成及使用进行详细的分析；第 3 篇为时域测量技术与仪器分析，分为电压测量与仪器分析、频率和时间测量与仪器分析、示波器测量技术与测仪器分析、电子元器件参数测量与仪器分析 4 章内容，对每一部分涉及的测量技术与典型仪器进行分析；第 4 篇为频域测量技术与仪器分析，分为频率特性测试仪分析和频谱分析仪分析两章内容，主要从电路频率特性的测量方法、频率特性测试仪的构成及使用、频谱分析仪的类别及频谱分析仪的应用几个部分进行分析；第 5 篇为数据域测量技术与仪器分析，主要从数据域测量系统的构成及逻辑分析仪等数据域测量设备分析进行阐述；第 6 篇为自动测试技术分析，概括的阐述了自动测试技术的发展过程，主要对虚拟仪器进行了分析，并对现代电子测量仪器的发展趋势进行了阐述。

本书在撰写过程中参考了大量的资料，在此向参考作者和仪器厂家表示感谢！

由于本人学识、水平有限，因此书中难免有不当和错误之处，敬请各位读者批评指正。

著 者

目 录

第一篇 电子测量技术与仪器概论

1 电子测量与仪器概述	2
1.1 电子测量的基本认识	3
1.1.1 电子测量包含的内容	3
1.1.2 电子测量具有的特点	3
1.1.3 电子测量方法的选择	4
1.2 电子测量仪器的基本认识	6
1.2.1 电子测量仪器的选择	6
1.2.2 电子测量仪器主要技术指标的意义	7
1.2.3 电子测量仪器的使用条件	7
1.3 测量误差的分析	8
1.3.1 测量误差的表示分析	8
1.3.2 测量误差的来源分析	10
1.3.3 测量误差的类型分析	10
1.3.4 电子测量仪器的误差分析	13
1.4 测量结果的表示及测量数据的处理分析	14
1.4.1 测量结果的表示分析	14
1.4.2 测量数据的处理分析	15

第二篇 测量信号产生技术与仪器分析

2 信号发生器分析	18
2.1 通用信号发生器分析	19
2.1.1 信号发生器的基本构成分析	19
2.1.2 信号发生器的种类划分分析	19
2.1.3 信号发生器主要性能指标分析	21
2.2 低频信号发生器分析	22
2.2.1 低频信号发生器的构成分析	22
2.2.2 XD-2 型低频信号发生器分析	24
2.3 高频信号发生器分析	26
2.3.1 高频信号发生器的构成分析	26
2.3.2 高频信号发生器的种类划分分析	27
2.3.3 SG1051S 型高频信号发生器分析	28
2.4 函数信号发生器分析	31
2.4.1 函数信号发生器产生信号的方式分析	31
2.4.2 CA1641 型函数信号发生器分析	34
2.5 电视信号发生器分析	38
2.5.1 电视信号发生器的构成分析	38
2.5.2 电视信号发生器的使用分析	39

第三篇 时域测量技术与仪器分析

3	电压测量与仪器分析	44
3.1	电压测量的基本分析	45
3.1.1	交流电压的参数及表征方法	45
3.1.2	电压测量的基本要求	46
3.1.3	电压测量仪器的分类	47
3.2	模拟交流电压表分析	49
3.2.1	低频交流电压表分析	49
3.2.2	高频交流电压表分析	52
3.3	数字电压表分析	56
3.3.1	数字电压表主要技术指标分析	56
3.3.2	A-D 转换器分析	57
3.4	数字万用表分析	60
3.4.1	数字万用表的构成分析	60
3.4.2	DT9205 型数字万用表分析	62
3.4.3	数字万用表的使用分析	64
4	频率和时间测量与仪器分析	66
4.1	通用电子计数器分析	67
4.1.1	电子计数器的构成分析	67
4.1.2	电子计数器的工作过程分析	68

4.1.3	电子计数器主要技术指标分析	69
4.2	电子计数器的主要测量功能分析	70
4.2.1	频率测量分析	70
4.2.2	周期测量分析	71
4.2.3	频率比测量分析	71
4.2.4	累加计数分析	72
4.2.5	时间间隔测量分析	72
4.2.6	自校准分析	73
4.3	SG3310 型多功能计数器分析	73
4.3.1	SG3310 型多功能计数器主要性能指标分析	73
4.3.2	多功能计数器操作分析	75
5	示波器测量技术与仪器分析	77
5.1	示波器测量原理分析	78
5.1.1	示波器测试技术的认识	78
5.1.2	阴极射线示波管分析	79
5.1.3	波形显示原理分析	81
5.2	通用模拟示波器分析	85
5.2.1	模拟示波器的构成及技术指标分析	85
5.2.2	模拟示波器的垂直系统分析	87
5.2.3	模拟示波器的水平系统分析	89
5.2.4	示波器的多波形显示分析	93
5.2.5	VP-5220A-1 型双踪示波器分析	96
5.3	示波器的基本测量技术分析	100

5.3.1	示波器测量电压分析·····	100
5.3.2	示波器测量时间和频率分析·····	102
5.3.3	示波器测量相位差分析·····	104
5.3.4	示波器测量调幅系数分析·····	105
5.4	数字存储示波器分析·····	106
5.4.1	数字存储示波器的组成特点分析·····	106
5.4.2	TDS2024B 型数字存储示波器分析·····	109
6	电子元器件参数测量与仪器分析·····	119
6.1	集中参数元件的特性分析·····	120
6.1.1	电阻器的性质分析·····	120
6.1.2	电容器的性质分析·····	121
6.1.3	电感器的性质分析·····	121
6.2	低频电路元件参数测量的电桥法分析·····	122
6.2.1	电桥的类别及平衡条件分析·····	122
6.2.2	电桥法测量低频电路元件原理分析·····	123
6.2.3	QS18A 型万用电桥分析·····	125
6.3	高频电路元件参数测量的谐振法分析·····	128
6.3.1	Q 表的构成原理分析·····	128
6.3.2	谐振法测量电容分析·····	130
6.3.3	谐振法测量电感分析·····	132
6.3.4	QBG-3 型高频 Q 表分析·····	133
6.4	晶体管特性参数的测量分析·····	136
6.4.1	晶体管特性图示仪的组成分析·····	136

6.4.2 CA4810A 型晶体管特性图示仪分析.....138

6.4.3 晶体管特性测试分析.....142

第四篇 频域测量技术与仪器分析

7 频率特性测试仪分析146

7.1 电路频率特性的测量分析147

7.1.1 电路的频率特性.....147

7.1.2 电路频率特性的测量方法.....147

7.2 频率特性测试仪分析149

7.2.1 频率特性测试仪的构成分析.....149

7.2.2 频率特性测试仪的工作过程分析.....151

7.2.3 频率特性测试仪的主要技术指标分析.....152

7.2.4 BT3C-B 型频率特性测试仪分析.....153

8 频谱分析仪分析159

8.1 频谱分析的认识160

8.1.1 频谱分析的基本概念.....160

8.1.2 频谱分析仪的基本组成分析.....162

8.1.3 频谱分析仪的类别分析.....164

8.1.4 频谱分析仪的主要技术指标分析.....166

8.2 AT5010 频谱分析仪分析168

8.3 频谱分析仪的应用分析	171
----------------------	-----

第五篇 数据域测量技术与仪器分析

9 数据域测量与仪器分析	176
--------------------	-----

9.1 数据域测量概述	177
9.1.1 数据域测量的基本认识	177
9.1.2 数据域测量的方法分析	179
9.1.3 数据域测量系统的构成分析	179
9.2 数据域测量设备分析	180
9.2.1 逻辑笔分析	180
9.2.2 数字信号源分析	181
9.2.3 逻辑分析仪分析	183

第六篇 自动测试技术分析

10 自动测试技术与发展趋势	194
----------------------	-----

10.1 自动测量系统的认识	195
10.1.1 自动测量系统的基本组成	195
10.1.2 自动测量系统的发展过程	196
10.1.3 自动测量系统如何组建	197

10.2 虚拟仪器分析	198
10.2.1 虚拟仪器概述	198
10.2.2 虚拟仪器硬件分析	200
10.2.3 虚拟仪器软件分析	201
10.2.4 虚拟仪器的数据采集系统分析	206
10.3 现代电子测量仪器的发展趋势	209
参考文献.....	212

第一篇 电子测量技术与仪器概论

1 电子测量与仪器概述

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程，测量能使人们对事物有定量的概念，从而发现事物的规律性。在这种认识过程中，人们依据一定的理论，借助专门的设备，通过实验的方法求出被测量的量值或确定一些量值的依从关系。因而，测量是人们认识事物的一种手段。杰出科学家门捷列夫说过，“没有测量，就没有科学。”测量是人们认识事物不可或缺的手段，没有测量，人们就不能真正地、准确地认识世界。

电子测量广义上是指利用电子技术进行的测量。狭义的电子测量是指对电子技术中各种电参量的测量。电子测量涉及极宽频率范围内所有电量、磁量以及各种非电量的测量。目前，电子测量凭借其应用广泛而成为现代科学技术中不可缺少的手段，同时也是一门发展迅速、对现代科学技术的发展起重大推动作用的独立学科。从某种意义上说，近代科学技术的水平是由电子测量的水平来保证和体现的。电子测量的水平是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。



1.1 电子测量的基本认识

1.1.1 电子测量包含的内容

测量的目的是获得用数值和单位共同表示的被测量的结果。人们借助专门的设备,依据一定的理论,通过实验的方法将被测量与已知同类标准量进行比较而取得测量结果。测量的结果必须是带有单位的有理数,没有单位的量值是没有物理意义的。电子测量的内容主要包括如下几个方面。

(1) 电能量的测量。电能量的测量指的是对电流、电压、功率、电场强度等参量的测量。

(2) 电路元器件参数的测量。电路元器件参数的测量指的是对电阻、电容、电感、阻抗、品质因数、损耗因数、电子器件参数等参量的测量。

(3) 电信号特性的测量。电信号特性的测量指的是对频率、周期、时间、相位、调制系数、频谱、失真度、信噪比、数字信号的逻辑状态等参量的测量。

(4) 电路性能的测量。电路性能的测量指的是对放大倍数、衰减量、灵敏度、通频带、反射系数、噪声系数等参量的测量。

(5) 特性曲线的测量。特性曲线的测量指的是对幅频特性、相频特性、器件特性等特性的测量。

(6) 非电量转换成电量的测量。通过传感器将非电量变换为电量后进行的测量属于广义电子测量的内容,如温度、压力、流量、位移等非电量通过传感器转换成电信号后进行的测量。

上述各种电参量中,频率、时间、电压、相位、阻抗等是基本电参量,其他的为派生电参量,基本电参量的测量是派生电参量测量的基础。电压测量是最基本、最重要的测量内容。

1.1.2 电子测量具有的特点

电子测量与其他测量相比,主要具有以下几个突出特点。

(1) 测量频率范围宽。电子测量除了可以测量直流电量外,还可以测量交流电量,可测量的频率范围宽,低至 10^{-4}Hz , 高至 10^{12}Hz 量级。当然,同一台仪器不能在所有的频率范围内工作。在实际测量中应注意:不同的测量频段采用不同的测量原理和使用不同的测量仪器,同一种电量采用的测量方法和使用的测量仪器可以不同。

(2) 仪器的量程广。量程是仪器所能测量的各种参数的范围的上限值与下限值之差。被测量的数值大小相差较大,这就要求测量仪器具有相当宽的量程。例如,一台数字电压表可以测出从纳伏(nV)级至千伏(kV)级的电压,其量程可达9个数量级;一台较完善的数字频率计的量程可达17个数量级。

(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。长度测量的最高准确度为 10^{-8} 量级, 直流电压测量的最高准确度为 10^{-6} 量级, 而频率和时间的测量准确度可达 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 量级, 这是目前测量准确度达到的最高指标。

(4) 测量速度快。电子测量是基于电磁波的传播和电子运动进行的, 因此可以实现测量过程的高速化。测量只有具有高速度, 才能测出快速变化的物理量。测量速度快对电子测量技术广泛应用于现代科学技术的各个领域具有特别重要的意义。例如, 卫星的发射与运行、原子核的裂变过程、导弹的发射速度等的测量, 都需要采用高速度的电子测量。

(5) 易于实现遥测遥控。电子测量的一个最突出的优点是可以通过各种传感器实现遥测遥控。这使得对那些远距离的、高速运动的或环境恶劣的、人体难以接近的地方的信号测量成为可能。例如深海、地下、高温炉内、核反应堆内、人造卫星等, 可以通过传感器或电磁波、光波、辐射等方式进行测量。

(6) 易于实现测量自动化。大规模集成电路和微型计算机的应用, 使电子测量出现了崭新的局面。电子测量与计算机技术相结合, 能实现程控、自动量程转换、自动校准、自动故障诊断和自动修复, 对测量结果可以自动记录、自动进行数据运算、分析和处理, 自动显示测量结果。这类仪器有数字存储示波器、数字万用表、数字频率计、逻辑分析仪、网络分析仪及一些自动测试系统。

正是由于电子测量技术的上述优点, 所以电子测量已被广泛应用到科学技术、社会生活的各个领域。大到天文观测、航空航天, 小到物质结构、基本粒子, 无不运用电子测量技术, 这使得电子测量技术迅速发展。

1.1.3 电子测量方法的选择

一个电参量的测量可以通过不同的方法实现, 为了达到测量目的, 正确选择测量方法是极其重要的, 它直接关系到测量工作的正常进行和测量结果的有效性。

1. 按测量手段选择

按照测量手段选择, 测量方法有直接测量、间接测量、组合测量三种方法。间接测量与组合测量同属于非直接测量方法。

(1) 选择直接测量方法。直接测量是指借助测量仪器等设备对被测量直接进行测量并可以直接获得测量结果的测量方法。用电子计数器测频率, 用电压表测电压等, 都可以选择直接测量方法。

(2) 选择间接测量方法。间接测量是指对几个与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量, 然后按照函数关系, 通过公式计算、曲线或查表等求出被测量值的测量方法。对共射放大电路的集电极电流进行测量时, 可选择间接测量方法。先直接测出集电极电阻 R 的值及