



高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材



电子测量技术

主编 秦云
主审 赵建



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

TM93/114

2008

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

电子测量技术

主编 秦 云

主审 赵 建

西安电子科技大学出版社

2008



本书针对电子类专业的培养目标,将电子测量技术基本原理及其应用的各项内容划分为四个部分。第一部分(1~5章)介绍了基本的电子测量技术原理,包括电子测量技术的基本概念、方法,实验数据处理和误差理论,以及电压、频率与时间的静态测量技术和基本信号发生技术。第二部分(6~8章)结合典型的测量设备介绍了电子测量技术中动态测量的三个基本内容,即时域测量、频域测量和数据域测量。第三部分(9、10章)介绍了电子测量的两种基本应用,即信号特征和电子元器件电气参数的测量。第四部分(11~13章)简要介绍了目前几种先进的电子测量设备的实现方案和电子测量的高端应用。

本书内容由浅入深,结构清晰,从总体上建立了电子测量技术的知识体系。

本书可作为高等院校电子信息、电气、自动化等专业的教学用书,也可作为从事电类专业的工程技术人员的参考书。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术/秦云主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2008.4

高等学校电子与电气工程及自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2003-9

I. 电… II. 秦… III. 电子测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 021289 号

策 划 毛红兵

责任编辑 王 瑛 毛红兵

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

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2008年4月第1版 2008年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 20.75

字 数 485千字

印 数 1~4000册

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-2003-9/TN·0413

XDUP 2295001-1

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

当今世界,电子技术被广泛应用到工业、农业、科研和人们日常生活中的各个领域。在各种电子系统的应用中,从系统本身获取外部信息、系统受到外部干扰的影响以及对外部其他设备产生影响到电子系统生产过程中的检测、质量评价等方面,电子测量都起到了关键的作用。可见,电子测量技术在当前科学技术中占据了重要的地位。随着大量高端科技的发展和运用,传统的基本电子测量技术已不能满足实际需要。电子测量不断朝着更高的精度、更快的检测速度和更高的智能水平的方向发展,由此出现了大量复杂的高端测量技术和仪器。在这种情况下,很多相关领域都对专业技术人员提出了电子测量技术方面的要求。因此,很多高等院校的电子信息、测控、检测、自动化、电气等相关专业纷纷开设了“电子测量技术”课程。为此,我们根据多年电子测量方面教学、科研工作的经验,在参考了其他同类教材的基础上,编写了本书。

本书根据电子测量技术的应用情况,将其基本原理、应用的各项内容划分为四个部分。第一部分(1~5章)介绍了基本的电子测量技术原理,包括电子测量技术的基本概念、方法,实验数据处理和误差理论以及电压、频率与时间的静态测量技术和基本信号发生技术,这一部分的基本目标是构建整个电子测量技术的基础。第二部分(6~8章)结合典型的测量设备介绍了电子测量技术中动态测量的三个基本内容,即时域测量、频域测量和数据域测量。第三部分(9、10章)介绍了电子测量的两种基本应用,即信号特征和电子元器件电气参数的测量。第四部分(11~13章)简要介绍了目前几种先进的电子测量设备的实现方案和电子测量的高端应用。全书内容由浅入深,从电子测量技术的基础入手,逐步构建整个电子测量技术的知识体系。

在编写过程中,本书将篇幅的重点放在概念的介绍和理论体系的构建上,突出技术的应用;在理论方面,避免繁琐的数学推导,重点介绍理论公式的物理含义和实际应用。

在成书过程中,编者得到了江苏大学博士生导师赵德安教授的大力支持。此外,全力教授、成立教授等在本书大纲的制定和具体内容的编写上也提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书由秦云统稿,并编写了第1、2、4、5、6、10章;孙月平编写了第3章;韩守义编写了第7~9章;高平编写了第11~13章。杨建宁副教授指导拟定了全书的大纲。

由于电子测量技术所涵盖的内容非常广泛,编者不可能对所有领域都有深入研究,因此在编写过程中难免有不当之处,敬请读者批评指正,在此深表谢意。

编 者

2008年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测量与电子测量	1
1.2 电子测量的内容与特点	2
1.2.1 电子测量的基本内容	2
1.2.2 电子测量的特点	2
1.3 电子测量的方法和仪器	3
1.3.1 电子测量的一般方法	3
1.3.2 电子测量仪器	5
1.4 电子测量的历史与发展	7
1.4.1 电子测量的发展历史	7
1.4.2 电子测量的基本发展趋势	7
1.4.3 先进的电子测量技术	8
1.5 计量	10
1.5.1 计量的定义	10
1.5.2 单位制	11
1.5.3 计量基准	11
1.5.4 量值的传递与跟踪、检定与比对	12
第 2 章 误差与测量数据处理	13
2.1 误差的基本概念	13
2.1.1 测量误差的概念	13
2.1.2 测量误差的表示	15
2.1.3 测量误差的分类	18
2.1.4 测量误差对测量结果的影响	19
2.2 随机误差	20
2.2.1 随机误差的性质和特点	20
2.2.2 随机误差处理的数学基础	21
2.2.3 数学期望和标准偏差的估算	26
2.2.4 测量结果的置信度	28
2.3 粗大误差	31
2.3.1 粗大误差的性质和特点	31
2.3.2 粗大误差的判定和处理	32
2.4 系统误差	34
2.4.1 系统误差的性质和特点	34
2.4.2 系统误差的判别	35
2.4.3 消除或减弱系统误差的典型方法	37
2.5 测量不确定度	41

2.5.1	测量不确定度的概念	41
2.5.2	测量不确定度的评定	42
2.5.3	不确定度的分配及最佳测量方案的选择	48
2.6	测量的数据处理	49
2.6.1	测量数据计算中的几个问题	49
2.6.2	动态测量数据的处理	53
第3章	电压的测量	61
3.1	概述	61
3.1.1	电压及其测量技术	61
3.1.2	对电压测量的特点、要求及主要技术指标	62
3.1.3	电压基准	62
3.2	模拟电压的基本测量方法	63
3.2.1	模拟电压的基本测量原理	63
3.2.2	检波	64
3.2.3	模拟电压的测量误差	67
3.3	数字电压测量	68
3.3.1	数字电压测量的基本原理	68
3.3.2	数字电压测量技术指标	69
3.4	模/数转换器	69
3.4.1	模/数转换器概述	69
3.4.2	比较式模/数转换器	70
3.4.3	积分式模/数转换器	73
3.4.4	$\Sigma-\Delta$ 式模/数转换器	80
3.5	数字电压测量的误差分析	83
3.5.1	误差的表示	83
3.5.2	数字电压测量过程主要的误差来源	84
3.5.3	电压测量的自动校正	86
3.6	数字电压测量中的干扰与抑制	90
3.6.1	电压测量中的干扰	90
3.6.2	串模干扰及其抑制	91
3.6.3	共模干扰及其抑制	92
第4章	频率与时间的测量	95
4.1	概述	95
4.1.1	时间、频率的基本概念	95
4.1.2	时间、频率的基准	95
4.1.3	时频测量的特点和方法	96
4.2	电子计数器测量频率	98
4.2.1	电子计数器的主要技术指标	98
4.2.2	基本原理	98
4.2.3	误差分析	99
4.2.4	多周期测量	103
4.2.5	中界频率	104
4.2.6	时间间隔的测量	105

4.3	模拟频率测量方法	106
4.3.1	电桥法	106
4.3.2	谐振法	107
4.3.3	频率—电压转换法测量频率	107
4.3.4	拍频法	108
4.3.5	差频法	109
4.4	提高电子计数器测量精度的方法	109
4.4.1	游标法	109
4.4.2	内插法	111
4.4.3	随机化平均法	112
4.5	提高频率测量上限的方法	113
4.5.1	变频法	113
4.5.2	置换法	114
4.6	相位差的测量	114
4.6.1	概述	114
4.6.2	示波器测量相位差	115
4.6.3	相位差转换为电压的测量	116
4.6.4	零示法测量相位差	120
第5章	信号发生技术	122
5.1	概述	122
5.1.1	标准信号在电子测量技术中的作用	122
5.1.2	标准信号的分类及其信号源的技术指标	122
5.2	传统信号发生技术	124
5.2.1	正弦信号源	124
5.2.2	函数信号发生器	125
5.2.3	脉冲信号源	129
5.2.4	噪声信号源	132
5.3	合成信号源	133
5.3.1	合成信号源的结构和特点	133
5.3.2	合成信号源的主要技术指标	134
5.3.3	模拟直接频率合成技术	135
5.3.4	间接频率合成技术	136
5.3.5	直接数字频率合成技术	143
5.4	任意波形发生器	150
5.4.1	任意波形发生器的工作原理	150
5.4.2	任意波形发生器的主要技术指标	152
第6章	示波器	154
6.1	概述	154
6.1.1	时域测量	154
6.1.2	示波器的发展历史与分类	154
6.1.3	示波器的主要技术指标	155
6.2	模拟示波器的原理	157
6.2.1	示波管及信号显示原理	157

6.2.2	模拟示波器的基本结构	158
6.2.3	Y通道	159
6.2.4	X通道与扫描电压发生	161
6.2.5	双踪与双时基扫描系统	166
6.2.6	示波器的带宽	169
6.3	数字存储示波器的原理	172
6.3.1	数字存储示波器的功能与特点	172
6.3.2	数字存储示波器的原理	173
6.3.3	数字存储示波器的主要技术指标	174
6.3.4	数字存储示波器的触发功能	175
6.3.5	高速信号采样与保存	177
6.3.6	波形再现	179
6.3.7	峰值检测与毛刺捕捉	181
6.4	取样技术	182
6.4.1	实时取样	183
6.4.2	等效取样	185
第7章	频谱分析仪	189
7.1	概述	189
7.1.1	频域测量	189
7.1.2	频谱分析仪的功能与发展历史	191
7.1.3	频谱分析仪的分类	191
7.2	滤波式频谱分析仪的构成和原理	192
7.2.1	滤波式频谱分析仪的基本原理	192
7.2.2	外差式频谱分析仪的频率特性	195
7.2.3	外差式频谱分析仪的幅度特性	199
7.3	计算式频谱分析仪	200
7.3.1	计算式频谱分析仪的理论基础	200
7.3.2	计算式频谱分析仪的结构	202
7.3.3	计算式频谱分析仪的误差分析	203
7.3.4	采用数字中频的外差式频谱分析仪	205
第8章	逻辑分析仪	207
8.1	概述	207
8.1.1	数据域测量	207
8.1.2	数据域测量的基本仪器	209
8.2	逻辑分析仪的构成与原理	210
8.2.1	逻辑分析仪的构成	210
8.2.2	数据检测	211
8.2.3	触发	214
8.2.4	数据的存储	216
8.2.5	逻辑定时分析仪的时间分辨率	217
8.2.6	显示	218
8.3	数字信号发生器	219
8.3.1	数字信号发生器的原理	219

8.3.2	数字信号发生器的主要技术指标	222
第9章	信号特征的测量	224
9.1	概述	224
9.2	典型信号时域特征的测量	225
9.2.1	脉冲信号的时域特征参数及其测量	225
9.2.2	调幅信号的时域特征参数及其测量	226
9.3	典型信号频域特征的测量	228
9.3.1	失真度的测量	228
9.3.2	调制度的测量	229
9.3.3	相位噪声的测量	231
第10章	电子元器件及网络电气特性的测量	236
10.1	概述	236
10.2	无源器件的阻抗测量	237
10.2.1	无源器件的阻抗概述	237
10.2.2	用电桥法测量阻抗	239
10.2.3	用谐振法测量阻抗	242
10.2.4	用矢量电压电流法测量阻抗	244
10.3	有源器件的特性测量	247
10.3.1	分立元件及其特性	247
10.3.2	集成电路及其特性	249
10.3.3	运算放大器的参数测量	252
10.4	线性系统的特性测量	257
10.4.1	线性系统的描述	257
10.4.2	线性系统的时域特性及其测量	258
10.4.3	线性系统的频域特性及其测量	260
第11章	虚拟仪器技术	265
11.1	概述	265
11.1.1	虚拟仪器	265
11.1.2	虚拟仪器的构成	266
11.2	GPIB总线简介	269
11.2.1	概述	269
11.2.2	GPIB总线系统构成	269
11.2.3	GPIB总线规范	270
11.3	VXI总线简介	273
11.3.1	概述	273
11.3.2	VME总线简介	274
11.3.3	VXI总线系统构成	274
11.3.4	VXI总线规范简介	275
11.4	PXI总线简介	277
11.4.1	概述	277
11.4.2	总线系统构成	277
11.4.3	PXI总线规范简介	278

11.5	虚拟仪器软件与 VPP 规范	279
11.5.1	概述	279
11.5.2	系统框架与仪器驱动程序	280
11.5.3	虚拟仪器软件体系结构	281
11.5.4	IVI 规范	283
11.6	LabVIEW 语言简介	284
11.6.1	概述	284
11.6.2	LabVIEW 的工作环境	285
第 12 章	嵌入式测量仪器	287
12.1	概述	287
12.1.1	嵌入式系统的概念	287
12.1.2	嵌入式系统的发展历史和趋势	287
12.1.3	嵌入式系统的组成	288
12.1.4	电子测量对嵌入式系统的要求	290
12.2	嵌入式测量仪器的硬件构成	290
12.2.1	嵌入式系统的硬件组成	290
12.2.2	嵌入式微处理器	291
12.2.3	存储器	292
12.2.4	通用设备接口和 I/O 接口	293
12.3	ARM 微处理器简介	293
12.3.1	概述	293
12.3.2	ARM 微处理器系列简介	293
12.4	嵌入式测量仪器的软件	295
12.4.1	概述	295
12.4.2	实时系统(RTOS)	296
12.4.3	嵌入式软件的体系结构	298
12.5	常用实时操作系统简介	300
12.5.1	嵌入式操作系统的概念	300
12.5.2	嵌入式操作系统的分类	301
第 13 章	电子测量技术的高端应用	303
13.1	电磁兼容性测量	303
13.1.1	电磁兼容性的概念	303
13.1.2	电磁兼容性测量的基本内容和方法	304
13.2	电子测量技术在通信系统中的应用	308
13.2.1	甚高频/超高频通信系统的测试	308
13.2.2	公众数字移动通信系统(GSM)测试	313
附录 A	正态分布在对称区间的积分表	317
附录 B	t 分布在对称区间的积分表	318
参考文献	319

第 1 章 绪 论

1.1 测量与电子测量

现代科学以及在其基础上发展出来的各类现代技术的基础是通过实验的方法取得对客观世界的定量认识，测量就是在这种实验过程中定量获取客观世界信息的基本方法。通过测量，人们对事物有了定量的认识，从而发现客观世界严谨的定量规律。因而，测量是人类认识世界、研究世界不可或缺的手段。

在现代科学发展过程中，测量扮演了至关重要的角色，同时，科学技术的发展也不断地推动了测量技术的发展。

测量是建立在实验的基础之上。从本质上说，测量包含了两个方面的含义：“测”，任何要测量的事物必须是人可感受的，至少可以转换成人可感受的事物；“量”，任何要测量的事物必须是可量化的。

测量过程的本质是用一个标准事物与被测事物进行比较，得到被测事物与标准事物的相对关系。因此，采用统一的标准研究同一类待测事物，以保证不同的测量方案及其结果在时间、地点等各种条件下所得到的结果是可比的。也就是说，测量过程必须是标准化的，在有些领域还存在着法制化的问题，即某些测量的结果将具有一定的法律效力。因此，对于测量方案的评价，也就是对其测量结果可信程度的评价同样也需要统一的标准。

电子测量技术是自 20 世纪中叶以来随着电子技术不断发展而兴起的一门技术。一般来说，电子测量分为两类：一类是比较狭义的电子测量技术，即指专门测量电压、电流、电磁场强度或各种电子材料、器件、系统的电特性等电参量；另一类则相对广义，通常将所有利用电子技术来测量压力、温度或流量等非电物理量的技术通称为电子测量技术。本书主要讨论狭义的电子测量技术。

实际上，狭义的电子测量技术是测量领域较基础的内容，对于各种非电量的测量只不过是在此基础上增加了将非电量转化为电参量的传感器而已，然后系统仍是对这些电参量进行测量。

在电子测量中使用的各种设备称为电子测量仪器，简称电子仪器。电信号以及系统电特性等电参量都是人无法直接感受的，因此需要电子仪器对被测信号进行转换，并输出一定的人可感受的信号。早期的电压、电流测量仪表就是将电压、电流转换成指针的相对转动，实验人员可以通过比对指针和仪表盘上的刻度读出被测信号的大小。新型数字式仪表则是直接利用基准参考电压与被测电压进行比较，并用数字的形式显示出比较结果。

1.2 电子测量的内容与特点

1.2.1 电子测量的基本内容

根据被测对象的性质,电子测量技术的基本内容可分为以下两个部分。

第一部分是对客观电信号所具有的各种特征的测量。例如,客观电信号所具有的各种特征参量,包括信号的各种能量参数,电压及电流的瞬时值、平均值、有效值等;电信号的波形特征,如波形参数、频率、相位、失真度、调制度等。

第二部分是测量各种材料、器件、电路系统等电特性。如无源系统的阻抗、伏安特性、 Q 值、传递系数等;有源系统的输入阻抗、输出阻抗、增益、频带宽度等。

根据被测信号的时间形态,电子测量可分为静态测量和动态测量,其中动态测量又包括时域测量、频域测量、调制域测量、数据域测量等。信号的时域测量即了解信号幅度、能量与时间的关系。例如:电压、电流的瞬时大小与时间的关系。对于系统电特性的时域测量则是要了解该电特性与时间的关系。由于绝大多数电子系统的特性并不与时间有关,因此对系统电特性的时域测量通常表现为静态的测量过程。频域测量指信号幅值/能量或系统特性参数与频率的关系。频域测量的基本内容包括研究客观电信号的能量参数按频率分布的情况,或研究电子系统对于不同频率的输入/输出信号所具有的电特性。频域测量的基本理论依据是拉普拉斯变换理论,根据该理论任何信号都可以描述为各种频率成分的合成,因此电信号的频域测量即要得到该信号所包含的各种频率成分所具有的能量、幅度、初相角等。电子系统的频域测量则是研究系统对信号各种频率成分所体现的电特性。调制域测量是研究信号频率、相位与时间的关系。例如:被调制的信号、干扰等对信号频率的影响等。数据域测量是研究数字化电信号所代表的逻辑意义随时间的变化关系。

时域测量是其他各种测量的基础。我们可以设计专门的硬件系统进行频域或其他域测量,但实际上对于中低频范围的信号首先进行时域测量,然后利用计算机软件对时域测量结果进行分析处理,间接地实现其他域的测量。

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) 测量频率范围宽,信号变化速度快。电子测量中被测信号的频率变化从直流一直可延伸至 300 GHz。当然,并不是一台仪器同时须完成如此宽带的测量。通常对于不同频段、不同信号特性的测量要求是不同的,因此测量原理、方法及仪器也是不同的。例如,频率、时间的测量中,在中低频段,常采用直接计数法,但在微波段,数字器件工作速度难以满足要求,须首先将信号频率按一定规则转变为较低的中频频率,然后对这个中频信号进行计数以间接测量微波频率。由于微波段信号的频率通常是相对稳定的,因此能保证上面测量方法的精度。随着电子技术的发展和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。

(2) 测量量程宽。测量量程指被测信号可能的最大值和最小值之差或之比。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。例如,远程雷达发出的脉冲功率可

高达 10^8 W, 而到达接收端, 天线输出的信号功率低到 10^{-14} W, 两者之比为 $1:10^{22}$ 。通常, 要满足高量程的要求就无法满足低量程的精度要求, 因此仪器通常要通过量程的变换以适应不同的需要。

(3) 测量精确度高。相对传统测量技术, 电子测量可达到的精确度要高得多。传统测量技术在没有辅助电子技术的情况下, 长度测量的最高精确度约为 10^{-8} m 量级。而电子测量中对频率和时间的测量精确度可达到 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ s 量级, 电压的测量精确度可达到 10^{-12} V 以上。这是目前人类在测量精确度方面达到的最高水平。同时, 由于在电子仪器中大量采用了微处理器、DSP(数字信号处理器)等智能化器件, 可对测量结果进行各种数据处理, 这在相当大的程度上解决了随机误差和各种系统误差对数据的影响, 减小了测量误差, 使得测量精确度进一步提高。

(4) 测量速度快。一方面, 由于电子信号的变化速度通常很快, 因此电子测量仪器必须具有足够快的测量速度, 才能捕捉被测信号的瞬时状态。另一方面, 由于采用了电子技术, 使得电子仪器的响应速度非常快。例如, 在交流电网谐波监测系统中, 要研究阶次尽可能高的谐波、谐间波, 则要求检测系统能以足够快的速度检测电网电压的瞬时值。而实际上目前电压检测可以达到每秒钟采样 10^9 次以上。

(5) 引入智能化器件和大规模集成电路等先进电子技术, 使电子测量系统具有智能化、网络化以及体积小、功耗低等很多优秀的特征。电子仪器及测量技术的发展既是其他技术发展的要求, 也是这些技术发展的保证。在工业自动化、大容量高速通信等高端领域, 信号的复杂程度变高、速度变快, 要求测量系统智能程度尽量高, 能够对信号进行复杂的处理, 以获得较深层次的信息。对各种复杂环境下的应用电子系统进行测量则对测量系统在体积、功耗、操作自动化等方面提出了更高的要求。

近几十年来, 电子技术, 尤其是微电子技术和计算机技术的迅速发展促进了电子仪器技术的飞速发展, 电子仪器与计算机技术相结合使功能单一的传统仪器变成先进的智能仪器和由计算机控制的模块式测试系统。仪器具备强大的数据处理能力, 使过去难以实现的测试项目变得可能, 也使过去难以解决的测量误差可以通过数据处理的方式解决。同时各种数据通信技术使电子测量不再是一个和几个独立仪器互不相关的工作过程。一方面, 大量仪器仪表可通过数据通信相互连接构成复杂的仪器网络。另一方面, 一个仪器内部可通过数据总线集成多个功能模块, 这样, 在各仪器之间、仪器与计算机之间能方便地用各种标准总线连接起来组成功能非常强大的自动测试系统。在计算机的控制下, 自动测试系统可自动执行测量、数据处理及记录等操作, 省却了繁琐的人工操作。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, 使电子仪器功能更强、体积更小、功耗更低, 使从前只能在实验室使用的电子仪器能够用于各种工业现场, 甚至野外场合。

1.3 电子测量的方法和仪器

1.3.1 电子测量的一般方法

前面已经提到, 测量过程的本质是用一个标准事物与被测事物进行比较。电子测量也不例外。电子测量的过程实际上就是将电信号的某种特征与一定的标准信号进行比较的过

程。对于人来说，电信号的各种特征是抽象的。人无法直接感知并量化电信号，因此电子测量必须经过一定的转化过程，以方便人们获取测量结果。

电信号的特征是非常复杂的，根据测量的手段可以将电子测量分为直接测量和间接测量两类。直接测量是指利用仪器直接对被测信号特征进行比较即得到测量结果。间接测量则是指无法对某些被测信号特征直接进行比较，需要对其他多个相关特征进行比较测量，而后进行数据计算间接获得。例如，对电压的测量可直接将被测电压与标准电压进行比较获得测量结果，而功率的测量则需要对信号的电压、电流分别进行比较测量，而后将测量结果相乘得到功率的最后结果。

电子测量的基本方法是利用标准信号与被测信号进行比较，调整标准信号，当两者相等时，读出标准信号特征的大小即为测量结果。例如，在图 1-1 所示利用电桥测量电阻的过程中， $R_2 = R_3$ 为标准电阻， R_x 为待测电阻， R_1 为可调标准电阻，桥臂间接入电流表，电路实际完成了对 R_1 、 R_x 的比较过程。调节 R_1 ，当 $R_1 = R_x$ 时，桥臂间的电流表不再有电流通过，此时 R_1 的读数即是 R_x 的读数。

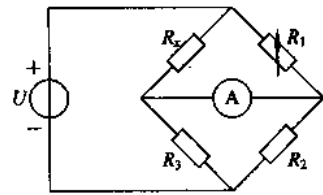


图 1-1 电桥法测量电阻原理示意图

但并非所有的电信号特征都可以直接进行比较，对于那些无法直接比较的特征就必须先转化成可以比较的某个特征。例如在数字电流表出现之前，我们利用模拟动圈式电流表检测电流，由于无法对电流直接进行比较，则将电流转化成了动圈指针的旋转，并对其旋转角度与刻度盘进行比较，读出刻度。电信号测量基本系统结构框图如图 1-2 所示。



图 1-2 电信号测量基本系统结构框图

对系统电特性的测量过程主体上还是对电信号特征的测量，差别仅仅是在测量的第一步须将被测系统电特性转化为一定的电信号特征，这个过程称为对被测系统的激励，其基本原理结构见图 1-3。根据被测系统电特性的不同，须给出不同的激励条件，例如在测量电阻阻值的系统中，可以利用恒流源作为激励，电阻上施加一定电流后在其两端产生直流电压，其后的工作即与测量电压的过程是相同的。又如，在测量电阻的寄生特性时，须在电阻上施加一定频率的交流信号作为激励，并测量电阻上的电压、电流。

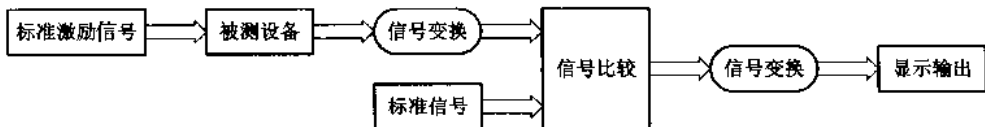


图 1-3 电子系统电特性测量基本系统结构框图

1.3.2 电子测量仪器

1. 电子测量仪器的基本功能

电子测量仪器的基本功能包括变换功能、标准信号发生功能和显示功能。

1) 变换功能

前面已经提到,电子测量实际上是对待测信号与标准信号的比较过程,为完成这样的比较,必须将待测信号变换成与标准信号可比的信号形式。例如,作为模拟式仪表最基本构成单元的动测式检流计(电流表),就是将流过线圈的电流强度转化为与之成正比的扭矩,使仪表指针偏转一定角度,这个旋转角度可以与刻度盘上的刻度进行比较,读取检测结果,这就是一种基本的变换功能。对电流以外的其他电量,则首先须将该电量转换为与之成正比的电流才能驱动检流计。

2) 标准信号发生功能

为了完成测量中的比较工作,仪表必须产生稳定的、高精度的标准信号。例如,指针式仪表必须有精确的刻度盘,而数字式电压表必须能够产生精确、稳定的基准电压供模/数转换器完成被测电压与标准电压的比较。

3) 显示功能

测量结果必须以某种方式输出给操作人员或上级系统设备。基本的输出方式即显示,如指针式仪表通过指针在仪表盘上的位置显示测量结果,数字式仪表通过数码管等直接以数字形式显示测量结果。除此之外,先进的智能化仪表还具有通过数据通信向上级设备报告检测结果,利用数据存储设备进行数据记录等数据输出功能。某些特殊的仪表则利用打印机或波形记录仪等设备输出数据。

2. 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) 精确度

精确度(简称精度)通常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,也就是仪器测量数据的误差状况。实际上,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。可见,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、最基本的指标。精度包含精密度和正确度两个方面。

(1) 精密度。精密度表明了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。它反映了仪器的测量过程对外界因素的敏感程度以及仪器本身的不稳定性。精密度高,测量结果的重复性好。

(2) 正确度。正确度表明了仪表检测结果的总趋势与客观真实数据之间的接近程度。正确度主要反映了仪器系统内部一些固有因素(如仪器中放大器的零点漂移、接触电位差等)对测量结果的影响。

2) 线性度

仪器对在不变条件下检测一个固定被测信号所得结果的可靠程度可以用精度说明,而对于整个量程中不同被测信号的检测结果来说,其精度并不是相同的,线性度则说明了这

种精度的偏差。通常仪表的检测读数 N 与输入被测信号 x 之间的关系用函数 $N = ax$ 表示, 显然, 这是 $N-x$ 平面上过原点的一条直线, 故称之为线性刻度特性。由于各类测量仪器的原理各异, 因此实际读数与输入信号之间的关系并非这样的直线, 不同的被测信号对应了不同的正确度, 即存在着非线性。

3) 稳定性

稳定性指经过长期工作后仪器检测精度等性能的变化, 它通常包含稳定度和影响量两个方面。

稳定度也称稳定误差, 是指在规定的时间内连续工作, 且外界条件不变的情况下, 仪器测量结果的变化量。造成这种变化的原因主要是仪器内部各元器件的特性、参数长期不稳定和老化等因素。稳定度通常用示值绝对变化量与时间一起表示。如某数字电压表的稳定度为 $(0.008\%U_m + 0.003\%U_x)/(8h)$, 其含义是在 8 小时内, 在外界条件维持不变的情况下测量同一电压, 电压表的示值可能发生 $0.008\%U_m + 0.003\%U_x$ 的上下波动, 其中 U_m 为该量程满度值, U_x 为示值。稳定度也可用示值的相对变化率与时间一起表示。如标准信号发生器在 220 V 电源电压和 20℃ 环境温度下, 频率稳定度小于或等于 $2 \times 10^{-4}/(10 \text{ min})$ 。

由电源电压、频率、环境温度、湿度、气压、振动等外界条件变化而造成测量结果的变化量, 称为影响量或影响误差, 一般用测量结果变化量和相应的影响量来表示。如晶体振荡器在环境温度从 10℃ 变化到 35℃ 时, 频率漂移小于或等于 $1 \times 10^{-9} \text{ Hz}$ 。

4) 输入/输出特性

测量仪器的接入会使被测系统的状态发生改变。如电压表、示波器等在测量时并联在待测电路两端, 由于测量仪表输入电阻并非无穷大, 因此它的接入改变了被测电路的阻抗状况, 使被测电压下降。为了减小仪表对待测电路的影响, 提高测量精度, 通常希望尽量提高这类测量仪表的输入电阻。电流表在测量电流时串联在被测系统中, 由于其内阻不等于零, 因此它的接入使被测电流下降, 为了提高测量精度, 则要尽量降低电流表的内阻。

对于信号源等仪器还需考虑输出阻抗, 在高频尤其是微波测量等场合, 还必须注意阻抗的匹配。

5) 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, 即其输出编码变化 1 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。

6) 动态特性

测量仪表的动态特性指仪表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。

这些指标并非对所有仪器有完全相同的意义, 有些测量仪器除了上述指标特性外, 还有其他技术要求, 这些具体问题将在后面章节中加以说明。

1.4 电子测量的历史与发展

1.4.1 电子测量的发展历史

电子测量技术是伴随着电子技术的出现、发展而同步发展的。从19世纪末期至今,电子测量技术的发展大体经历了三个阶段。在早期的电子测量过程中,对电信号进行直接比较是较困难的,因此通常须将电信号转换成机械运动,通过读取标尺刻度获得测量结果。这一阶段电子仪表的基本特征是采用模拟电子技术完成信号的处理,利用机械运动指示测量结果,因此通常称此类仪表为模拟仪表或指针式仪表。20世纪50年代开始,随着数字电子技术的不断发展,出现了以模拟/数字转换器为基础的数字式电子仪表,其基本特征是采用模/数转换器完成电信号的比较,并利用数码显示方式给出检测结果。

从20世纪70年代起,随着大规模集成电路的出现,尤其是微处理器的出现和发展,越来越多的智能化器件被应用在电子测量仪表中,这对电子测量技术的发展产生了巨大的推动作用。首先出现了大量具有较高智能水平的智能化仪表,这些仪表不仅能够对电信号进行比较并给出比较结果,还能完成大量数据的二次处理工作,大大提高了仪表的检测精度,同时使仪表具备了很多从前无法完成的测量功能。随着计算机技术和数据通信技术的发展,这些新型技术不可避免地被应用在电子测量中。数据通信使仪表不再是一个孤立的电子系统,通过一定的通信系统,仪表与仪表、仪表与计算机被连接在一起,构成了结构更复杂、功能更强大同时具备很高的自动化程度的电子测量系统。

1.4.2 电子测量的基本发展趋势

电子测量技术作为保证各种电子应用技术发展和电子产品性能、质量的基本工具,必须具有比其他电子产品更高的精度、更快的速度,因此电子测量的技术革新和发展基本代表着尖端电子技术的革新和发展。未来电子测量仪器的新概念和发展趋势主要有三个方面:首先是单机功能更加丰富,性能更加优越;其次,仪器和计算机技术的充分融合;再次,硬件和软件的充分融合。

测量仪器基本性能的发展包括更高的检测速度和更高的检测精度。更高的检测速度使仪器可以检测频率更高的信号,精确地获得信号的高频成分。另外,高检测速度使很多工业、通信现场使用的动态实时检测成为可能。更高的检测精度使电子产品的生产更加精确,对于宇航技术等精度要求非常高的领域具有很重要的价值。仪器性能参数不断发展甚至已经接近极限,如Agilent频谱分析仪本机噪声可达到 -169 dBm,网络分析仪的动态范围达 143 dB,采用Mega Zoom技术的示波器在 16 Mb深存储时实时采样率达到 4 Gsa/s;另一方面,为了适应电子技术在通信、导航等诸多方面的应用以及对电子产品要求的不断提高,电子仪器具有了更多的功能,出现了大量专门用于各种用途的专业仪器。例如,进行无线通信中手机和基站测试的RF和协议测试,既有模拟通道又有数字通道的混合信号示波器,用示波器做前端采样、逻辑分析仪做后端分析的高端测试系统等。

仪器和计算机技术的结合更加紧密,这种趋势包括了两个方面的发展:电子仪器的计算机化和计算机的电子仪器化。目前已有大量的中小型仪器开始采用嵌入式系统,这些仪