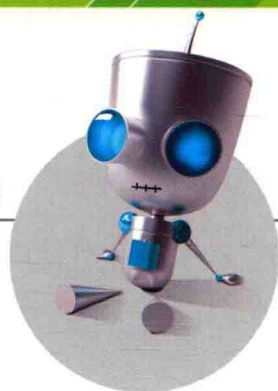
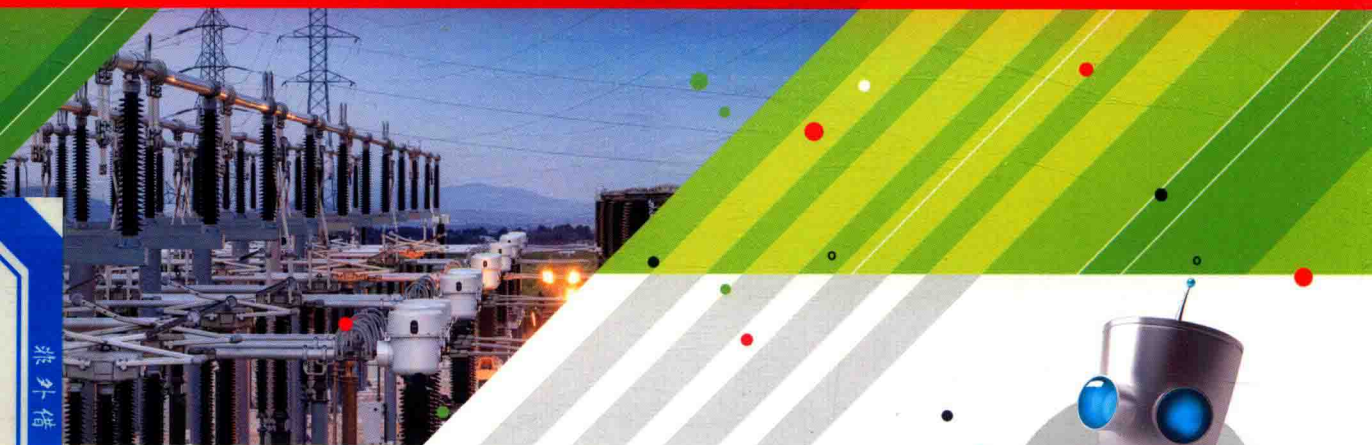




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

电气测试技术 (第4版)

◆ 徐科军 主 编
◆ 马修水 李国丽 副主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电气工程、自动化专业规划教材

电气测试技术

(第4版)

主 编 徐科军
副主编 马修水 李国丽
参 编 柏逢明 钱晓耀 夏建全

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共 9 章,主要包括测试技术基础知识、电磁量测试技术、非电量测试技术和电气测试技术新进展 4 部分内容。本书主要介绍电磁量、非电量测试技术基础以及测试误差分析,比较式电测仪表,电子式电测仪表,数字化电测仪表,磁性电测仪表,温度测量传感器,转速测量传感器,扭矩测量传感器,电气测试技术新进展。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化、测控技术与仪器等专业本科生的教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电气测试技术 / 徐科军主编. — 4 版. — 北京:电子工业出版社,2018.7

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-34503-6

I. ①电… II. ①徐… III. ①电气测量—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 129219 号

责任编辑:凌 毅

印 刷:三河市兴达印务有限公司

装 订:三河市兴达印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:14.5 字数:378 千字

版 次:2002 年 5 月第 1 版

2018 年 7 月第 4 版

印 次:2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254528,lingyi@phei.com.cn。

第4版前言

在工农业生产、商业贸易、国防建设、科学研究和日常生活中,测试技术起着非常重要的作用,其应用相当广泛。若按被测量的性质来分,有电(磁)量测量和非电(磁)量测量。电磁测量包括电参量、磁参量以及信号和电源质量的测量。其中,电参量又分为电量(如电压、电流、电功率、电能和相位等)和电路参数(如电阻、电容、电感和互感等);磁参量又分为磁量(如磁通、磁感应强度、磁场强度等)和磁路参数(如磁阻、磁性材料的磁导率等);信号和电源质量包括频率、周期和相位等。非电量测量的内容非常广泛,本书主要介绍电气工程中经常用到的温度测量、转速测量和扭矩测量。人们用各种比较式电测仪表、电子式测量仪表和数字化电测仪表完成电磁量的测试,用各种传感器完成非电量的测试。这两部分是密切相关的,因为非电量的测量是通过传感器转换成电量来进行的。可以说,电量的测量是非电量测量的基础,而非电量的测量是电量测量的拓展。由于它们最终都归结为电参量的测试,所以,本书取名为“电气测试技术”。

“电气测试技术”是电气信息类专业大学生的一门重要的专业课。本课程的教学目的和任务是使学生通过课程的学习,掌握常用电磁量的测试方法和电工仪表的工作原理,掌握常用传感器的工作原理、结构组成、测量电路和各种应用,熟悉电气测试的基本知识和数据处理方法,为学生毕业后从事电气工程、自动化和计算机应用等方面的工作打下良好的基础。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书的第1版于2002年由机械工业出版社出版,当时是针对课程学时较少的情况编写的,仅限于电磁量的测量,内容较为单薄。为了完整地介绍电气测试技术,也考虑到有些学校将电磁量测量和非电量测量合并在一起作为一门课程来讲授,所以,于2008年由电子工业出版社出版了第2版。在第2版中,加入了非电量测量的内容,形成上篇电磁量测试技术和下篇非电量测试技术。

2013年出版的第3版不再将教材明显地分为上篇和下篇,而是紧扣主题——测试技术来组织内容,将内容分为4部分:测试技术基础知识、电磁量测试技术、非电量测试技术和电气测试技术新进展。

第3版删减了一些比较陈旧的技术内容。例如,考虑到实际中直读式电测仪表很少应用,所以,删除了第2版中“直读式电测仪表”,同时增加了数字式电测仪表的内容。与此同时,增加了一些新的技术内容。例如,增加了“数字荧光示波器”和“基于数字信号处理的电测仪表”等。

第3版对非电量测试技术部分中的传感器做了较大幅度的删减和调整。按照被测量对传感器进行了分类,仅介绍几种在电气工程中常用的传感器,例如,温度测量传感器、转速测量传感器和扭矩测量传感器,突出测试技术在电气工程中应用的特点。

经过这几年的教学实践,我们对第3版内容进行了修改。本书分为9章。第1章为测试技术基础知识,介绍电磁量测试基础、非电量测试基础和测试量误差分析。第2章为比较式电测仪表,介绍直流电位差计、直流电桥和交流电桥。第3章为电子式电测仪表,介绍电子示波器原理、电子示波器应用和数字存储示波器。第4章为数字化电测仪表,介绍频率、周期的数字化测量,相位的数字化测量,电压的数字化测量,电阻、电容的数字化测量,电功率的数字化

测量以及微机化电测仪表。第5章为磁性电测仪表,介绍若干基础知识、空间磁场、磁通的测量和磁性材料的测量。第6章为温度测量传感器,介绍温标等基础知识、热电阻式传感器和热电偶传感器。第7章为转速测量传感器,介绍磁电式传感器、霍尔传感器和光电式传感器。第8章为扭矩测量传感器,介绍应变式传感器、振弦式传感器和磁电相位差式扭矩传感器。第9章为电气测试技术新进展,介绍传感器动态误差修正技术、传感器自评估技术、多传感器数据融合技术、高精度模数转换技术和DSP应用技术。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化、测控技术与仪器等专业本科生的教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

本书由徐科军担任主编,马修水和李国丽担任副主编。其中,浙江大学宁波理工学院马修水编写1.2.1节,1.2.2节,1.3节,6.1节,6.3节,8.2节,8.3节和附录;安徽大学李国丽编写第2章,第3章;长春理工大学柏逢明编写6.2节,8.1节;中国计量大学钱晓耀编写7.3节,宁波大红鹰学院夏建全编写7.1节,7.2节;合肥工业大学徐科军编写1.1节,1.2.3节,第4章,第5章和第9章。全书由徐科军和马修水统稿。

本书提供配套的电子课件,可登录华信教育资源网 www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

在本书编写的过程中,参阅了许多专家的教材、著作和论文,还得到国内外有关企业和同行的支持,在此一并表示衷心的感谢。

对于本书中存在的错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2018年6月

目 录

第 1 章 测试技术基础知识	1	3.1.1 示波器的基本结构	36
1.1 电磁量测试基础	1	3.1.2 示波器的主要性能指标	40
1.1.1 测试方法	1	3.2 电子示波器的应用	41
1.1.2 测试结果表示	2	3.2.1 电压的测量	41
1.1.3 测试发展过程和趋势	3	3.2.2 时间的测量	42
1.1.4 电学量和电学基准	5	3.2.3 两个同频率信号相位差的 测量	43
1.2 非电量测试基础	9	3.2.4 频率的测量	44
1.2.1 传感器概述	9	3.3 采样示波器	44
1.2.2 传感器分类	9	3.3.1 采样原理	45
1.2.3 传感器的特性	10	3.3.2 采样示波器的基本组成	46
1.3 测量误差分析	16	3.4 数字存储示波器	47
1.3.1 测量误差的概念和分类	16	3.4.1 数字存储示波器的 基本组成	47
1.3.2 精度	17	3.4.2 数字存储示波器的信号 采集技术	48
1.3.3 测量误差的表示方法	17	3.4.3 数字存储示波器的波形 显示技术	51
习题与思考题 1	20	3.4.4 数字存储示波器的 控制系统	52
第 2 章 比较式电测仪表	22	3.4.5 数字存储示波器的主要 性能指标	53
2.1 直流电位差计	22	3.4.6 数字荧光示波器	54
2.1.1 直流电位差计的补偿原理	22	习题与思考题 3	56
2.1.2 直流电位差计的分类和 主要技术指标	23	第 4 章 数字化电测仪表	58
2.1.3 直流电位差计的应用	24	4.1 概述	58
2.2 直流电桥	25	4.1.1 数字化测量技术的发展	58
2.2.1 直流单臂电桥	26	4.1.2 数字式仪表的结构	59
2.2.2 直流单臂电桥的误差公式	27	4.1.3 数字式仪表的特点	60
2.2.3 直流双臂电桥	27	4.1.4 数字式仪表的分类	60
2.3 交流电桥	28	4.2 频率、周期的数字化测量	61
2.3.1 交流电桥的工作原理	28	4.2.1 电子计数器的原理	61
2.3.2 交流电桥的分类	30	4.2.2 用电子计数器测量频率	61
2.3.3 实用交流电桥举例	31	4.2.3 用电子计数器测量周期	62
习题与思考题 2	34		
第 3 章 电子式电测仪表	36		
3.1 电子示波器原理	36		

4.2.4 时间间隔的测量	63	5.3.3 软磁材料损耗的测量	112
4.2.5 测量频率比	64	习题与思考题 5	114
4.2.6 电子计数器的误差	64	第 6 章 温度测量传感器	115
4.3 相位的数字化测量	66	6.1 温标	115
4.3.1 相位测量原理	66	6.1.1 温标的演变	115
4.3.2 相位-时间式数字相位计	67	6.1.2 1990 年国际温标(ITS-90) 简介	116
4.4 电压的数字化测量	68	6.1.3 温度检测的主要方法	116
4.4.1 逐位逼近比较式数字 电压表	68	6.2 热电阻式传感器	117
4.4.2 电压-时间变换型数字 电压表	69	6.2.1 金属热电阻	117
4.4.3 电压-频率型(U-F)数字 电压表	73	6.2.2 半导体热敏电阻	120
4.5 电阻、电容的数字化测量	74	6.2.3 热电阻式传感器的应用	124
4.5.1 电阻的数字化测量	74	6.3 热电偶传感器	128
4.5.2 电容的数字化测量	75	6.3.1 热电偶测温原理	128
4.6 电功率的数字化测量	76	6.3.2 热电偶基本定律	129
4.7 微机化仪表	78	6.3.3 标准化热电偶与分度表	130
4.7.1 概述	78	6.3.4 热电偶结构	132
4.7.2 带微处理器的仪表	80	6.3.5 补偿导线	133
4.7.3 基于数字信号处理的微机化 仪表	81	6.3.6 热电偶参比端(冷端)的 温度补偿	134
4.7.4 应用实例	88	习题与思考题 6	135
4.7.5 虚拟仪器	89	第 7 章 转速测量传感器	136
习题与思考题 4	93	7.1 磁电式传感器	136
第 5 章 磁性电测仪表	95	7.1.1 磁电式传感器的 结构和原理	136
5.1 基础知识	95	7.1.2 磁电式速度传感器	138
5.1.1 磁性材料的静态特性	95	7.2 霍尔传感器	140
5.1.2 磁性材料的动态特性	97	7.2.1 霍尔传感器的工作原理	140
5.1.3 磁学量的度量单位	97	7.2.2 霍尔元件的结构和特性	141
5.2 空间磁场、磁通的测量	98	7.2.3 霍尔式传感器的应用	143
5.2.1 基于电磁感应原理的测量 方法	98	7.3 光电式传感器	146
5.2.2 用磁通门磁强计测量磁场	102	7.3.1 光电效应及光电器件	147
5.2.3 用霍尔效应测量磁场	104	7.3.2 光电传感器的应用	154
5.2.4 用核磁共振法测量磁场	105	7.3.3 光电码盘	156
5.3 磁性材料的测量	105	习题与思考题 7	160
5.3.1 软磁材料静态特性的测量	105	第 8 章 扭矩测量传感器	162
5.3.2 软磁材料动态特性的测量	110	8.1 应变式扭矩传感器	162

8.1.1 金属电阻应变片的 工作原理	162	9.2.1 问题的提出	192
8.1.2 电阻应变片测量电路	170	9.2.2 基本定义	193
8.1.3 电阻应变式传感器的应用 ...	173	9.2.3 应用举例	193
8.2 振弦式扭矩传感器	178	9.3 多传感器数据融合技术	194
8.2.1 工作原理	178	9.3.1 基本概念	194
8.2.2 激振装置	180	9.3.2 融合方法	195
8.2.3 测量误差	181	9.3.3 应用举例	197
8.2.4 振弦式传感器应用	182	9.4 高精度模数转换技术	198
8.3 磁电相位差式扭矩传感器	183	9.4.1 Σ - Δ ADC 拓扑结构	198
8.3.1 测量原理	183	9.4.2 Σ - Δ ADC 工作原理	199
8.3.2 测量方式	184	9.4.3 Σ - Δ ADC 特点和应用	201
8.3.3 输出特性	185	9.5 DSP 应用技术	203
8.3.4 传感器安装	186	9.5.1 DSP 的特点	203
习题与思考题 8	186	9.5.2 DSP 的主要系列	205
第 9 章 电气测试技术新进展	188	9.5.3 DSP 应用举例	206
9.1 动态误差修正技术	188	附录 A 铂热电阻分度表	210
9.1.1 时域在线动态响应补偿	188	附录 B 铜热电阻分度表	213
9.1.2 频域离线动态误差修正	190	附录 C 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	215
9.2 传感器自评估技术	192	附录 D 镍铬-镍硅热电偶分度表	220
		参考文献	222

第 1 章 测试技术基础知识

测试技术是人类借助于专门的器件或者设备,认识物质世界,对客观事物进行定量研究的一种手段。电气测试是利用电气技术进行的测试以及对电气设备的测试,通常包括:电参数的测量,如电压、电流和电功率等;磁参数的测量,如磁感应强度、磁场强度和磁通等;电路元件参数的测量,如电阻、电容和电感等;信号和电源质量的测量,如频率、周期和相位等;电气设备中常用非电量的测量,如温度、转速和转矩等。我们把前 3 类归纳为电磁量测试,最后一类归为非电量测试。

本章介绍电磁量测试基础、非电量测试基础和测试误差分析。

1.1 电磁量测试基础

电磁量测试指的是电学量和磁学量测量。电学量包括电学量(如电压、电流、电功率、无功功率和功率因数等)和电参数(如电阻、电容、自感和互感等)。其中,电压和电流是基本量,其他一些电学量可以通过它们间接得到。磁学量包括磁通、磁感应强度、磁场强度和磁导率等。其中,磁感应强度和磁场强度为基本量。20 世纪 50 年代后出现的数字测量技术,则以时间和频率为基本量。

1.1.1 测试方法

一般来说,对于同一个物理量,可以采用各种不同的方法进行测量。根据获得测量结果的过程,可以将测量分为 3 类:直接测量、间接测量和组合测量。

直接测量是直接从实测数据中取得测量结果,实测数据可以直接由指示仪表上获得,也可以用量具直接与被测量比较而得到。例如,用电流表测量电流、用电位差计测量电压。由于被测量的数据能够直接从仪表上获得,所以称为直接测量。

间接测量是通过测量一些与被测量有函数关系的量,通过计算得到测量结果。例如,用伏安法测量电阻,就是间接测量。因为这种方法是先测出电阻两端的电压和流过电阻的电流,然后根据公式计算出电阻值。与直接测量相比,间接测量要复杂些,一般在无法进行直接测量或直接测量达不到要求的情况下,才采用间接测量。

组合测量是指在多次直接测量具有一定函数关系式的某些量的基础上,通过联立求解各函数的关系式,来确定被测量大小的方法。它比前两种测量方法复杂,通常在实验室的精密测量中采用。

根据在测量过程中所用测量器具的不同,可分为直读测量法和比较测量法。

直读测量法是利用电测指示仪表进行测量,如用电压表测量电压。这种测量的特点是计量单位的实物标准测量器并不直接参与测量过程。当然,为了保证测量仪器、仪表的准确和可靠,首先要用标准测量器对测量仪表进行校准。直读测量法所用设备简单,操作方便,所以广泛应用于电磁量的测量。

比较测量法是将被测量与标准量进行比较而得到测量结果。这种方法的特点是在测量过

程中要有量具直接参与,它是最准确的测量方法。由于此方法所需的实验条件较高,测量设备较精密,操作起来也比较复杂,所以,一般在测量准确度要求较高的场合中使用。

从上面的分类可以看到,在直接测量和间接测量中都包含着直读测量和比较测量。同时,在直读测量和比较测量中也包含着直接测量和间接测量。

1.1.2 测试结果表示

电磁量测量(以下简称电磁测量)的结果由两部分组成,即测量单位和纯数。例如,对某一电压进行测量,所得的测量结果为多少伏特。

独立定义的单位称为基本单位。例如,电磁学中安培的定义为:若处于真空中相距 1m 的两根无限长、截面小到可以忽略的平行直导线内有相等的恒定电流流过,每一导线每米长度上受力为 $2 \times 10^{-7} \text{N}$ 时,各导线上的电流为 1A。由于物理量间有各种物理关系相联系,所以,一旦几个物理量的单位确定后,其他物理量的单位就可以根据物理关系式推导出来。这些由基本单位和一定物理关系推导出来的单位称为导出单位。如物体运动的速度单位“米/秒”就是根据长度单位“米”和时间单位“秒”及物理关系“速度=距离/时间”推导出来的。基本单位和导出单位的总和称为单位制。

在测量过程中,所选单位不同,得到的结果就不同。在历史上,各国都有自己的单位制,造成了同一物理量具有多个不同单位的情况。在目前经济全球化的大环境下,单位不统一给人们的生产、生活、国际贸易和科技交流造成了极大的困难。这就需要一个国际上公认的、统一的单位制。1960 年国际计量大会上正式通过了适合于一切领域的单位制,用代号“SI”表示,见表 1.1.1。

表 1.1.1 SI 基本单位

物 理 量	单 位 名 称	单 位 符 号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
发光强度	坎德拉	cd

根据上述 7 个基本单位和两个辅助单位(弧度和球面度),通过一定的物理关系式,可以导出自然界所有物理量的单位。

电磁学中涉及的物理量的基本单位只有 4 个,即米、千克、秒和安培。通过这 4 个基本单位和电磁学定理,就可以导出所有物理量的单位。表 1.1.2 中列出了部分电磁学量的 SI 导出单位。

表 1.1.2 电磁学单位的部分 SI 导出单位

物 理 量	定义方程式	单位名称	单位代号		物 理 量	定义方程式	单位名称	单位代号	
			中文	国际				中文	国际
电量	$q=It$	库仑	库	C	电导	$g=\frac{1}{R}$	西门子	西	S
电势	$U=\frac{W}{q}$	伏特	伏	V	电场强度	$E=\frac{U}{d}$	伏特每米	伏/米	V/m
电容	$C=\frac{U}{q}$	法拉	法	F	磁通	$\Delta\Phi_m=E\cdot\Delta t$	韦伯	韦	Wb
电阻	$R=\frac{U}{I}$	欧姆	欧	Ω	磁感应强度	$B=\frac{\Phi_m}{S}$	特斯拉	特	T
电阻率	$\rho=\frac{S}{l}R$	欧姆·米	欧·米	$\Omega\cdot m$	磁场强度	$H=\frac{1}{2\pi r}$	安培每米	安/米	A/m

1.1.3 测试发展过程和趋势

电磁测量技术主要包括 3 个方面:电磁量的测量方法、电磁测量仪器的设计与制造及电磁量的量值传递。其中,以仪器仪表的发展最能体现电磁测量技术的发展。仪器仪表的发展大致分为 3 个阶段:古典式电工仪器仪表阶段、数字式仪表阶段和自动测试系统阶段。

古典式电工仪器仪表的发展是从 1743 年俄国学者 Г. В. 黎赫曼制造出第一台有刻度的验电器开始的。1836 年出现了可动线圈式检流计,1837 年出现了可动磁针式检流计,1841 年出现了电位差计原理,1843 年制成了惠斯登电桥,1861 年又制成了第一台直流电位差计,1895 年研制成功了世界上第一台感应式电度表。在这一阶段,电工学理论也得到了很大的发展,其中,库仑定律、安培定律、毕奥-沙发-拉普拉斯定律、法拉第电磁感应定律和麦克斯韦电磁场理论也都相继建立,为古典式电工仪器仪表的发展提供了理论基础。到 20 世纪 30 年代前后,古典式电工仪器仪表在理论上已经成熟,结构也已基本定型。20 世纪 40 年代以后,由于新材料的出现,使电工仪器仪表在准确度方面有所突破。例如,1936 年出现的高性能磁材料——镍铝合金,在 1960 年前后便生产出了 0.1 级的电磁系、电动系和磁电系仪表系列,直到现在,这类电磁机械仪表的准确度还保持在这一水平。

20 世纪 50 年代,数字电子技术和微型计算机技术的出现,使电磁测量仪表的发展加快,宏观上表现为模拟式仪表开始逐渐在越来越多的应用场合被数字式仪表所取代。数字电子技术应用于电磁测量,对于直流被测量,是先量化为恒定电压值,再经电压/频率变换后进行计数;而对于随时间变化的被测量,则是经过整流、滤波,转换成相应的直流量后再进行处理和显示。这一时期出现的电压、电流波形等时间间隔采样技术,揭开了数字电子技术在电磁测量领域作用日益增大的序幕。

20 世纪 70 年代以后,微电子技术和微型计算机技术发展迅猛。在它们的推动下,电气测试仪器仪表不断进步,相继诞生了智能仪器、PC 仪器、VXI 仪器、虚拟仪器及互换性虚拟仪器等微机化仪器及相应水平的自动测试系统。

大规模集成电路技术使电子计算机从庞然大物缩小到能置入传统的仪器内部,其结果使仪器具有了控制、存储、运算、逻辑判断及自动操作等智能特点,并在测量准确性、灵敏度、可靠性、自动化程度、运用能力及解决测量问题的深度和广度等方面均有明显的进步。尽管内置有微型计算机的仪器的智能水平仍较低,但人们还是称它们为智能仪器。

自从电子技术和微型计算机技术渗透到测量和仪器仪表领域,就产生了自动测试系

统——在人工最少参与的情况下能自动进行测量、数据处理并以所需要方式输出测试结果的系统。带微处理器和微型计算机的各种仪器仪表即智能仪器均具有自动测试系统的基本特征,故它们都属于自动测试系统的范畴。

智能仪器出现不久就提出了新的课题:一台智能仪器难以胜任更复杂的多任务测量需求。为了解决这一问题,总线式智能仪器与系统应运而生。人们提出了 RS-232C 和 IEEE 488 等通信接口总线,用于将多台智能仪器连在一起,以形成能完成复杂任务的自动测试系统。

但是,在复杂的 IEEE 488 总线仪器系统中,往往有多个重复的部件功能电路单元,例如,若一个 IEEE 488 仪器系统中包含逻辑分析仪、数字示波器、数字多用表、频谱分析仪等多台智能仪器及微型计算机的话,显然它们都有 CRT、键盘和存储器等部件。在这种背景下,1982 年出现了个人计算机(PC)加配板卡式的 PC 仪器与系统。

将智能仪器的测量电路制成插拔式仪器板卡,而仪器所需的键盘、CRT 和存储器等均借助 PC 的资源,就构成了 PC 仪器,又称模块式仪器。由若干块不同功能的仪器板卡插入外设机箱并与一台 PC 有机组合,便构成了 PC 仪器系统。与 IEEE 488 总线仪器系统相比,PC 仪器系统的硬件大为减少。尽管 PC 仪器系统具有体积小、重量轻、价格低和便于携带等优点,但由于各生产厂家自己定义总线,造成不同厂家的产品间缺乏兼容性,如此一来,用户在组建测试系统时难以在不同厂家产品中进行配套选择。

1987 年,第一个适用于模块化仪器标准化的接口总线标准 VXIbus 问世,1992 年又完善为 VXIbus Rev. 1. 4,简称为 VXI 总线。设计 VXI 总线,使微机化仪器系统的硬件和软件标准化,从而提高微机化仪器系统的互用性,更容易被集成和应用。

从表面上看,与智能仪器相比,PC 仪器、VXI 仪器好像只是将仪器仪表的功能电路制成板卡插入微机式的仪器,但具体到前者,微处理器或微机的作用仅限于使这一台仪器性能提高、功能增强;而后者则不然,多块仪器板卡可插入一台 PC 或一台 PC 的外设机箱,借助软件和 PC 的显示器很容易形成多种不同仪器的虚拟面板,从而组成一个单台形式的、但功能相当于多台传统仪器的微机化仪器(或称仪器系统)。这些以 PC 为核心,由测量功能软件支持,具有虚拟控制面板、必要仪器硬件和通信能力的 PC 仪器或 VXI 仪器又称为虚拟仪器。虚拟仪器一般运行于 Windows 环境下,因此可以同时启动多个应用,即利用一台 PC 可以同时组建多台虚拟仪器并实施测量。

1997 年美国国家仪器公司推出一类新产品:基于 PC 的、适用于测量仪器的开放式接口总线标准 PXI。相对于 VXI 仪器而言,PXI 仪器的主要优点是成本低,且又具有先进的数字接口与仪器接口功能,适于组成便携式测试系统。

在 VXI 仪器和虚拟仪器迅速发展的同时,智能仪器并非停滞不前。近 20 年来,智能示波器、掌上型“三合一”(示波器、信号源、万用表)智能示波表、各种钳形智能电工仪器仪表大量涌现,以其体积小、重量轻、智能化程度高、功能多、易操作、能耗低及带通信接口等特点,不断跟踪并适应广大用户的各种现场测量使用需求,仍具有广阔的发展空间和应用市场。

电磁测量仪表的发展趋势体现在以下几个方面。

① 体积小,质量轻,耗电少,电路板的元器件安装密度高,性能稳定可靠,仪器积木化、集成化和多功能化。

② 自动化程度高,如自动检测、自动调整、自动平衡、自动置零、自动读数和打印及自动校正等。

③ 向数字化、智能化发展。测量结果、预置值都可以数字显示和存储;测量数据可以用仪

器内部的计算机送到外部的计算机进行处理。通过标准接口或总线控制或调节,组成自动测试系统,提高测量准确度,扩展量程和频段范围。

电磁测量技术的发展趋势是向微观、超常态、动态方向及新的学科领域发展,主要体现在以下两个方面。

- ① 进一步利用物理学的新成就、新原理和新的测量方法,不断提高其测量的准确度。
- ② 利用数字化技术和计算技术,组成自动测试系统,快速而准确地处理复杂的测量问题。

1.1.4 电学量和电学基准

测量单位是理论定义,人们必须通过实验的方法把其复现出来并逐级传递到被测对象上去,才能实现测量。量具就是测量单位的整数倍或分数倍的复制体,是测量中用于比较的工具。根据其工作任务的不同,量具分为基准器、标准量具和工作量具。

1. 电学基准

通常把最精确地复现或保存单位的物理现象或实物称为基准。如果基准是通过物理现象建立的,称为自然基准;如果基准是建立在实物上的,称为实物基准。过去的电学基准是标准电池组复现电动势或电压的单位“伏特”,标准电阻组复现电阻的单位“欧姆”,二者是实物基准。1990年1月1日国际上正式启用电学计量新基准。约瑟夫森效应和冯·克里青效应(也称量子化霍尔效应)复现“伏特”和“欧姆”单位,实现了从实物基准向自然基准的过渡。自然基准是通过测量原子常数建立起来的,具有长期的稳定性,对计量单位的统一具有重要意义。保存基准值的实物体或装置称为“基准器”。

(1) 约瑟夫森效应

两块弱连接的超导体在微波频率的照射下,就会出现阶梯式伏安特性,如图 1.1.1 所示,这种超导体的结构称为约瑟夫森结。在第 n 个阶梯处的电压与微波频率的关系为

$$V_n = \frac{nh}{2e}f \tag{1.1.1}$$

式中, V_n 为第 n 个阶梯处的电压; n 为阶梯序数; h 为普朗克常数; e 为电子电荷; f 为微波频率。式(1.1.1)是复现和保存电压单位“伏特”的理论基础。通过精心测量微波频率,就可确定 V_n 的数值。

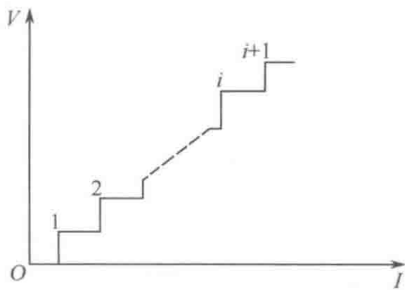


图 1.1.1 约瑟夫森结的伏安特性

(2) 冯·克里青效应(量子化霍尔效应)

量子化霍尔效应是二维电子气体的特性。对于高迁移率的半导体元件,符合一定的尺寸要求,当外加磁感应强度为 10T(特斯拉)左右,且元件被冷却到几开尔文(K)时,便可产生二维电子气。在这种情况下,二维电子气被完全量化。当通过元件的电流 I 固定时,在霍尔电

压-磁感应强度曲线上会出现磁感应强度变化而霍尔电压不变的区域,这些霍尔电压不变的区域称为霍尔平台。定义第*i*个平台的霍尔电压 $U_H(i)$ 与霍尔元件流过电流*I*的比值为第*i*个霍尔平台的霍尔电阻 $R_H(i)$,即

$$R_H(i)=\frac{U_H(i)}{I} \tag{1.1.2}$$

在电流流动方向损耗为零的极限条件下,量子化霍尔电阻与平台序数*i*的关系为

$$R(i)=\frac{R_H}{i} \tag{1.1.3}$$

式中, R_H 为冯·克里青常数。

理论上预言

$$R_H=\frac{h}{e^2} \tag{1.1.4}$$

式中,*h* 为普朗克常数;*e* 为电子电荷。一旦确定*i*,冯·克里青效应就可用于复现、保存电阻单位“欧姆”。

以上介绍了电学基准,比电学基准准确度低一些的量具是标准量具。电学中常用的标准量具是标准电池和标准电阻。

2. 标准电池

标准电池是复现电压或电动势单位“伏特”的量具。它是性能极其稳定的化学电池,电动势在 1.0186V 左右。按电解液的浓度划分为饱和式和不饱和式标准电池。在整个使用温度范围内,电解液始终处于饱和状态称为饱和式电池,而电解液始终处于不饱和状态称为不饱和式电池。如图 1.1.2 所示为饱和式标准电池的原理结构。饱和式标准电池的电动势受温度影响,其关系式为

$$E_t=E_{20}-39.9\times10^{-6}(t-20)-0.94\times10^{-6}(t-20)^2+0.009\times10^{-6}(t-20)^3 \tag{1.1.5}$$

式中, E_t 为标准电池在温度为*t* 时的电动势值; E_{20} 为标准电池在 20℃ 时的电动势值;*t* 为标准电池所处的温度值。

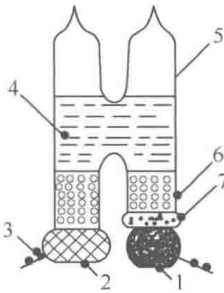


图 1.1.2 饱和式标准电池的原理结构

1—汞(+);2—镉汞合金(-);3—铂引线;4—硫酸镉饱和溶液;
5—玻璃外壳;6—硫酸镉结晶;7—硫酸亚汞

饱和式电池的优点是电动势稳定性好,缺点是内阻大和温度系数大。不饱和式标准电池的优点是内阻小和温度系数小,缺点是电动势稳定性差。

标准电池按年稳定性分为若干等级。饱和式分为 0.0002,0.0005,0.001,0.002,0.005,0.01 级;不饱和式分为 0.002,0.005,0.01 级。

标准电池在使用时应注意下列事项：

- ① 要根据标准电池的等级，在规定要求的温度下存放和使用；
- ② 标准电池不能过载，严禁用电压表或万用表去测量标准电池的电动势；
- ③ 标准电池严禁摇晃和振动，严禁倒置，经运输后要放置足够时间后再使用；
- ④ 检定证书和历年的检定数据是衡量一只标准电池好坏的依据，应注意保存。

3. 标准电阻

标准电阻是复现和保存电阻单位“欧姆”的实体。通常标准电阻是锰铜丝绕制的，如图 1.1.3 所示为其结构示意图。由于锰铜丝电阻系数高，电阻温度系数小，又采用了适当工艺处理和绕制方法，所以，其阻值稳定，结构简单，热电效应、残余电感、寄生电容小，能够准确复现欧姆量值。

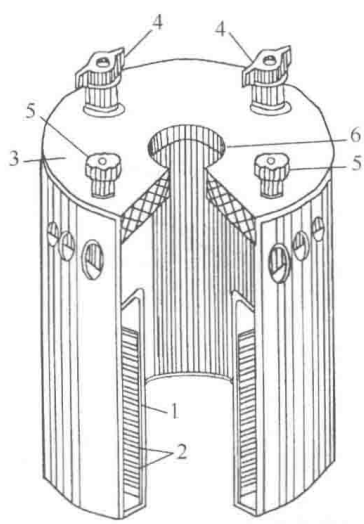


图 1.1.3 标准电阻器的结构

1—骨架；2—锰铜丝；3—绝缘盖；4—电流端钮；5—电位端钮；6—温度计插孔

阻值低于 10Ω 的电阻通常是四端钮结构，即分别有电流端钮和电位端钮，其接线如图 1.1.4 所示。阻值为

$$R = \frac{U}{I} \tag{1.1.6}$$

电阻上的电流不流过电位端钮，减小了端钮接触电阻对标准电阻阻值的影响。

当标准电阻的阻值高于 $10^6\Omega$ 时，漏电的影响相对增加。所以，高电阻标准电阻有时制成三端钮形式。其中，一个端钮是屏蔽端钮，如图 1.1.5 所示。使用时给屏蔽端一定的电位，可减小漏电的影响。

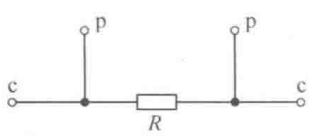


图 1.1.4 四端钮电阻

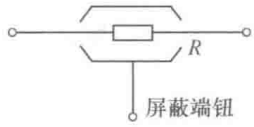


图 1.1.5 三端钮电阻

标准电阻的阻值随温度的改变而有所变化。电阻器铭牌上给出的是 $+20^\circ\text{C}$ 时电阻器电阻的名义值。电阻值与温度的关系为

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (1.1.7)$$

式中, R_t 为温度 t 时的电阻值; R_{20} 为温度在 20°C 时的电阻值; t 为温度值; α 为标准电阻的一次温度系数; β 为标准电阻的二次温度系数。

标准电阻有直流和交流两种, 分别用在直流电路和交流电路中。

4. 可变电阻箱

测量时有时需要阻值可以调节的电阻。可变电阻箱就是由若干已知数值的电阻元件按一定形式连接在一起组成的可变电阻量具。下面介绍目前应用和生产的两种主要电阻箱。

(1) 接线式电阻箱

接线式电阻箱的各已知电阻分别焊在各端钮之间, 改变接线方式就改变了电阻箱的电阻值。图 1.1.6 所示为接线式电阻箱的电路结构, 其特点是没有零电阻(电阻箱示值为零时的电阻值)和电刷的接触电阻, 示值稳定, 结构简单。但变换阻值范围太窄, 改变接线也较麻烦。

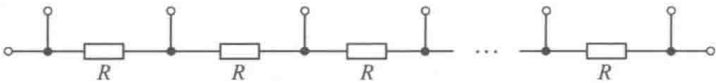


图 1.1.6 接线式电阻箱电路结构

(2) 开关式电阻箱

如图 1.1.7 所示为开关式电阻箱的电路结构示意图。这是 3 级十进制电阻箱, 转换开关的位置就可以得到需要的 3 位十进制电阻值。

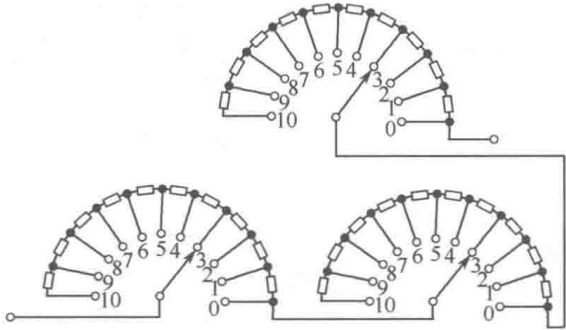


图 1.1.7 开关式电阻箱的电路结构

开关式电阻箱的优点是阻值变化范围宽, 操作方便。但是, 它的接触电阻大, 而且不稳定。当电刷均放在零位时, 由于接触电阻和导线电阻的影响使电阻箱的电阻不为零, 即开关式电阻箱存在零电阻。

电阻箱也有交流电阻箱与直流电阻箱之分, 在使用中要注意。

直流电阻箱的准确度等级分为 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 这 11 个级别。

电阻箱在额定电流或额定电压范围内的允许误差(基本误差)为

$$|\Delta| \leq (a\%R + b)\Omega \quad (1.1.8)$$

式中, Δ 为允许误差值, a 为准确度等级对应的允许偏离, R 为电阻箱的接入电阻值, b 为常数。此式中含有两个误差项: 第一项与接入电阻值有关, 主要是各电阻元件的误差; 第二项是常数, 主要是连接导线和电刷的接触电阻。

1.2 非电量测试基础

1.2.1 传感器概述

1. 传感器的定义

传感器是一种以一定精确度把被测量(主要是非电量)转换为与之有确定关系、便于应用的某种物理量(主要是电量)的测量装置。这一定义包含了以下几个方面的含义:①传感器是测量装置,能完成检测任务;②它的输入量是某一被测量,如物理量、化学量、生物量等;③它的输出是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,这种量可以是气、光、电量,但主要是电量;④输出与输入间有对应关系,且有一定的精确度。

在某些学科领域,传感器又称为敏感元件、检测器、转换器、发讯器等。这些不同提法,反映了在不同的技术领域中,只是根据器件的用途对同一类型的器件使用着不同的技术语而已,它们的内含是相同或相似的。

2. 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路 3 部分组成,组成框图如图 1.2.1 所示。

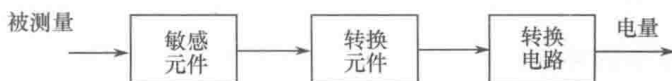


图 1.2.1 传感器组成框图

- ① 敏感元件。它是直接感受被测量,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。
- ② 转换元件。敏感元件的输出就是它的输入,它把输入转换成电路参数。
- ③ 转换电路。将上述电路参数接入转换电路,并转换成电量输出。

实际上,有些传感器很简单,有些则较为复杂,大多数是开环系统,有些是带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶传感器。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路,如压电式加速度传感器。有些传感器,转换元件不只一个,需经过若干次转换。

1.2.2 传感器分类

传感器是一门知识密集型技术,其原理各种各样,它与许多学科有关,种类繁多,分类方法也很多,目前广泛采用的分类方法有以下几种。

- ① 按照传感器的工作机理,可分为物理型、化学型、生物型等。
- ② 按照传感器的构成原理,可分为结构型和物性型两大类。

结构型传感器是利用物理学中场的定律构成的,包括力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。这类传感器的特点是传感器的性能与它的结构材料没有多大关系,如差动变压器。

物性型传感器是利用物质定律构成的,如欧姆定律等。物性型传感器的性能随材料的不同而异,如光电管、半导体传感器等。

- ③ 按传感器的能量转换情况,可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。