



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子信息与电气学科规划教材

电气测试技术

(第2版)

徐科军 主编 马修水 李国丽 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息与电气学科规划教材

电气测试技术

(第2版)

主 编 徐科军
副主编 马修水 李国丽
参 编 潘亚林 钱晓耀 柏逢明

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书由上篇电磁量测试技术和下篇非电量测试技术共 11 章组成。上篇介绍电磁量测试技术基本知识、直读式电测仪表、比较式电测仪表、示波器、数字化电测仪表,以及磁场和磁性材料的测量。下篇介绍非电量测试技术的基础知识、电阻式传感器原理与应用、变阻抗式传感器原理与应用、电势式传感器原理与应用、光电式传感器原理与应用,以及电气测量技术新发展。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,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. —2 版. —北京:电子工业出版社,2008.5

电子信息与电气学科规划教材

ISBN 978-7-121-06686-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 068803 号

策划编辑:凌 毅

责任编辑:凌 毅

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:北京鼎盛东极装订有限公司

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:19 字数:486 千字

印 次:2008 年 5 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:29.00 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。

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。

服务热线:(010)88258888。

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。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测试和磁参量测试。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)。非电量测量包括机械量(如位移、尺寸、力、应力、力矩、转速、加速度等)、热工量(如温度、压力、流量和物位)和成分量(如气体和液体的化学成分等)等的测试。我们用各种直读式电测仪表、比较式电测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。由于它们最终归结为电参量的测试,所以,本书取名为“电气测试技术”。

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,且仅限于电磁量测量的情况编写的,内容较为单薄。为了完整地介绍电气测试技术,也考虑到有些学校电气工程及其自动化专业将电磁量测量和非电量测量合并在一起,作为一门课来讲授的实际情况,所以,将非电量测量内容加入本书。

“电气测试技术”是电气信息类本科生的一门重要的专业课。本课程的教学目的是使学生通过本课程的学习,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、基本结构、测量电路和应用,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、工业自动化和计算机应用等方面的工作打下良好的基础。

本书由上、下两篇组成,上篇为电磁量测试技术,共分为5章。第1章绪论,介绍电磁量测试基本知识、电学量和电学基准,以及误差方面知识。第2章介绍各种直读式和比较式电测仪表的结构、工作原理及其应用,包括磁电系仪表、电磁系仪表和电动系仪表,直流电位差计、直流电桥和交流电桥的工作原理。第3章介绍几种示波器的基本结构、主要技术性能指标和应用。第4章介绍数字化电测仪表,主要包括频率、周期、相位、电压、电阻、电容、电功率的数字化测量及微机化仪表。第5章介绍磁性材料的基础知识,空间磁场、磁通的测量,以及磁性材料的测量。

下篇为非电量测试技术,共分为6章。第6章介绍非电量测试技术的基础知识,包括传感器组成和传感器的一般特性。第7章介绍电阻式传感器原理与应用,包括应变式传感器、压阻式传感器和热电阻式传感器。第8章介绍变阻抗式传感器原理与应用,包括自感式传感器、差动变压器、电涡流式传感器和电容式传感器。第9章介绍电势式传感器原理与应用,包括磁电式传感器、霍尔传感器、压电式传感器和热电偶传感器。第10章介绍光电式传感器原理与应用,包括光电效应及光电器件、光电码盘、电荷耦合器件、光纤传感器和光栅传感器。最后一章介绍电气测量技术新发展,包括误差修正技术、传感器自评估技术、多传感器数据融合及DSP技术在测量系统中的应用。

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的教材,也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

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 6.1 节和第 8 章,浙江工业大学李国丽编写第 2,3 章,安徽建筑工业学院潘亚林编写第 9 章,中国计量学院钱晓耀编写第 10 章,长春理工大学柏逢明编写第 7 章,合肥工业大学徐科军编写第 1,4,5,11 章和 6.2 节。全书由徐科军和马修水统稿。

本书在编写过程中,参阅了部分高校的教学计划和教学大纲,也参阅了许多专家的教材、著作和论文,参考了有关老师对本书第 1 版的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

本书提供配套的电子课件,可登录电子工业出版社的华信资源教育网:
www.huaxin.edu.cn 或 www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

由于作者水平有限,对于本版中存在的错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2008 年 5 月

目 录

上篇 电磁量测试技术

第 1 章 绪论	2
1.1 电磁量测量基本知识	2
1.1.1 电磁量测量方法	2
1.1.2 电磁量测量结果的表示	2
1.1.3 电磁测量的发展过程	3
1.1.4 电磁测量的发展趋势	5
1.2 电学量和电学基准	5
1.2.1 电学基准	6
1.2.2 标准电池	7
1.2.3 标准电阻	7
1.2.4 可变电阻箱	8
1.3 电磁测量仪表的误差	9
1.3.1 仪表误差的分类	9
1.3.2 误差的几种表达形式	9
1.3.3 仪表的准确度	10
习题和思考题	11
第 2 章 直读式和比较式电测仪表	12
2.1 磁电系仪表	12
2.1.1 磁电系仪表概述	12
2.1.2 磁电系电流表	15
2.1.3 磁电系电压表	17
2.1.4 磁电系欧姆表	18
2.1.5 磁电系检流计	20
2.2 电磁系仪表	23
2.2.1 电磁系仪表概述	23
2.2.2 电磁系电流表	25
2.2.3 电磁系电压表	25
2.3 电动系仪表	26
2.3.1 电动系测量机构概述	26
2.3.2 电动系电流表	27
2.3.3 电动系电压表	28
2.3.4 电动系功率表	29
2.3.5 电动系功率表的应用	30

2.4	直流电位差计	31
2.4.1	直流电位差计的补偿原理	31
2.4.2	直流电位差计的分类和主要技术指标	32
2.4.3	直流电位差计的应用	33
2.5	直流电桥	34
2.5.1	直流单比电桥	34
2.5.2	直流单比电桥的误差公式	35
2.5.3	直流双比电桥	35
2.6	交流电桥	36
2.6.1	交流电桥的工作原理	36
2.6.2	交流电桥的分类	38
2.6.3	实用交流电桥举例	39
	习题与思考题	41
第3章	电子式电测仪表	44
3.1	电子示波器原理	44
3.1.1	示波器的基本结构	44
3.1.2	示波器的主要性能指标	47
3.2	电子示波器的应用	49
3.2.1	电压的测量	49
3.2.2	时间的测量	49
3.2.3	两个同频率信号相位差的测量	50
3.2.4	频率的测量	51
3.3	取样示波器	51
3.3.1	取样原理	52
3.3.2	取样示波器的基本组成	53
3.4	数字存储示波器	54
3.4.1	数字存储示波器的基本组成	54
3.4.2	数字存储示波器的信号采集技术	55
3.4.3	数字存储示波器的波形显示技术	58
3.4.4	数字存储示波器的控制系统	59
3.4.5	数字存储示波器的主要性能指标	59
	习题与思考题	60
第4章	数字化电测仪表	62
4.1	概述	62
4.1.1	数字化测量技术的发展	62
4.1.2	数字式仪表的结构	62
4.1.3	数字式仪表的特点	63
4.1.4	数字式仪表的分类	63
4.2	频率、周期的数字化测量	64
4.2.1	电子计数器的原理	64

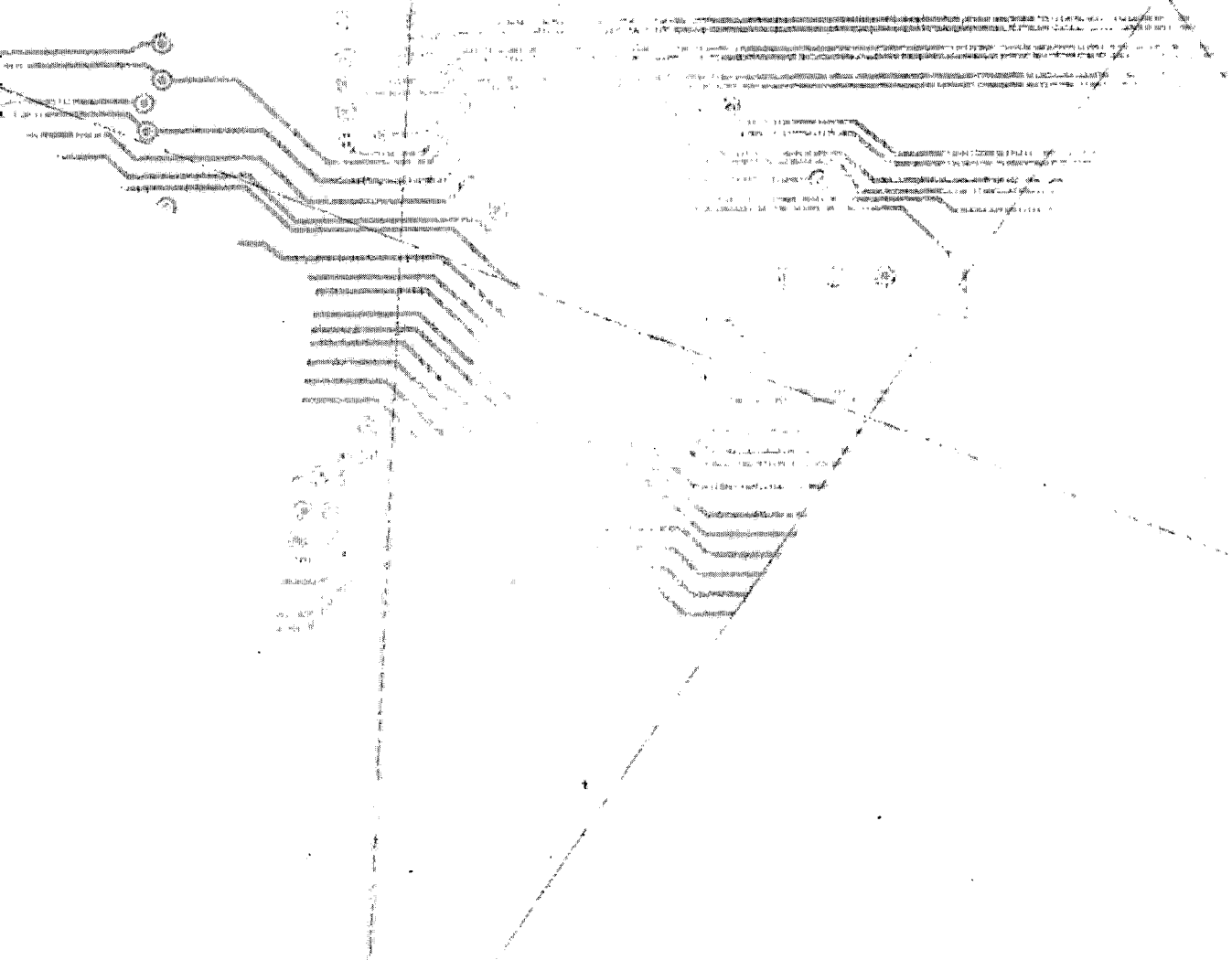
4.2.2	用电子计数器测量频率	65
4.2.3	用电子计数器测量周期	65
4.2.4	时间间隔的测量	66
4.2.5	测量频率比	67
4.2.6	电子计数器的误差	68
4.3	相位的数字化测量	69
4.3.1	相位测量原理	70
4.3.2	相位-时间式数字相位计	70
4.4	电压的数字化测量	72
4.4.1	逐位逼近比较式数字电压表	72
4.4.2	电压-时间变换型数字电压表	73
4.4.3	电压-频率型(U-F)数字电压表	77
4.5	电阻、电容的数字化测量	78
4.5.1	电阻的数字化测量	78
4.5.2	电容的数字化测量	79
4.6	电功率的数字化测量	80
4.7	微机化仪表	82
4.7.1	带微处理器的仪表	82
4.7.2	采样计算式仪表	84
4.7.3	虚拟仪器	89
	习题和思考题	93
第5章	磁性电测仪表	94
5.1	基础知识	94
5.1.1	磁性材料的静态特性	94
5.1.2	磁性材料的动态特性	96
5.1.3	磁学量的度量单位	96
5.2	空间磁场、磁通的测量	97
5.2.1	基于电磁感应原理的测量方法	97
5.2.2	用磁通门磁强计测量磁场	101
5.2.3	用霍尔效应测量磁场	102
5.2.4	用核磁共振法测量磁场	104
5.3	磁性材料的测量	104
5.3.1	软磁材料静态特性的测量	104
5.3.2	软磁材料动态特性的测量	109
5.3.3	软磁材料损耗的测量	111
	习题和思考题	112
	下篇 非电量测试技术	
第6章	非电量测试技术的基础知识	114
6.1	传感器概述	114

6.1.1	传感器的定义	114
6.1.2	传感器的组成	114
6.1.3	传感器分类	114
6.2	传感器的特性	115
6.2.1	传感器的静态特性	115
6.2.2	传感器的动态特性	118
	习题与思考题	123
第7章	电阻式传感器原理与应用	124
7.1	应变式传感器	124
7.1.1	金属电阻应变片的工作原理	124
7.1.2	电阻应变片的测量电路	132
7.1.3	电阻应变式传感器的应用	134
7.2	压阻式传感器	140
7.2.1	半导体的压阻效应	140
7.2.2	压阻式压力传感器原理和电路	141
7.2.3	压阻式传感器的应用	143
7.3	热电阻式传感器	146
7.3.1	金属热电阻	146
7.3.2	半导体热敏电阻	148
7.3.3	热电阻式传感器的应用	152
	习题与思考题	156
第8章	变阻抗式传感器原理与应用	158
8.1	自感式传感器	158
8.1.1	工作原理	158
8.1.2	变气隙式自感传感器	159
8.1.3	变面积式自感传感器	161
8.1.4	螺线管式自感传感器	161
8.1.5	自感式传感器测量电路	162
8.1.6	自感式传感器应用举例	166
8.2	差动变压器	167
8.2.1	变隙式差动变压器	167
8.2.2	螺线管式差动变压器	170
8.2.3	差动变压器应用	175
8.3	电涡流式传感器	177
8.3.1	电涡流式传感器的工作原理	177
8.3.2	高频反射式涡流传感器	180
8.3.3	低频透射式涡流传感器	182
8.3.4	电涡流式传感器的应用	183
8.4	电容式传感器	186
8.4.1	电容传感器的工作原理	186

8.4.2	电容传感器的主要性能	189
8.4.3	电容传感器的特点和设计要点	190
8.4.4	电容传感器等效电路	191
8.4.5	电容传感器测量电路	192
8.4.6	电容式传感器的应用	195
	思考题与习题	200
第9章	电势式传感器原理与应用	201
9.1	磁电式传感器	201
9.1.1	磁电式传感器的结构和原理	201
9.1.2	磁电式传感器的应用	205
9.2	霍尔传感器	206
9.2.1	霍尔传感器工作原理	206
9.2.2	霍尔元件的结构和特性	208
9.2.3	霍尔传感器的应用	210
9.3	压电式传感器	213
9.3.1	压电式传感器工作原理	213
9.3.2	压电式传感器测量电路	220
9.3.3	压电式传感器的应用	225
9.4	热电偶传感器	227
9.4.1	热电偶的测温原理	227
9.4.2	热电偶的种类和结构	230
9.4.3	热电偶的冷端温度补偿	233
9.4.4	热电偶的应用	236
	思考题与习题	237
第10章	光电式传感器原理与应用	239
10.1	光电效应及光电器件	239
10.1.1	光电管	239
10.1.2	光电倍增管	240
10.1.3	光敏电阻	241
10.1.4	光敏二极管	242
10.1.5	光敏晶体管	243
10.1.6	光电池	244
10.1.7	光电传感器的应用	246
10.2	光电码盘	248
10.2.1	工作原理	248
10.2.2	码盘和码制	249
10.2.3	旋转式光电编码器	251
10.2.4	光电码盘的应用	252
10.3	电荷耦合器件	252
10.3.1	电荷耦合器件的结构和工作原理	253

10.3.2	CCD 图像传感器	255
10.3.3	图像传感器的应用	257
10.4	光纤传感器	258
10.4.1	光导纤维的基本知识	258
10.4.2	光纤传感器结构和原理	261
10.4.3	光纤传感器的分类和特点	261
10.4.4	光纤传感器的应用	262
10.5	光栅传感器	267
10.5.1	光栅传感器的结构	268
10.5.2	莫尔条纹形成的原理	268
10.5.3	光栅的光路	269
10.5.4	光栅传感器的电路	270
10.5.5	光栅传感器应用	273
	习题与思考题	275
第 11 章	电气测量技术新发展	276
11.1	误差修正技术	276
11.1.1	系统误差的数字修正	276
11.1.2	动态误差的实时补偿	277
11.2	传感器自评估技术	279
11.2.1	问题的提出	280
11.2.2	基本定义	280
11.2.3	应用举例	280
11.3	多传感器数据融合	281
11.3.1	基本概念	281
11.3.2	融合方法	282
11.3.3	应用举例	284
11.4	DSP 技术在测量系统中的应用	286
11.4.1	DSP 的特点	286
11.4.2	DSP 的主要系列	288
11.4.3	DSP 应用举例	288
	参考文献	291

上篇 电磁量测试技术



第1章 绪 论

本章介绍电磁量测量方法、电磁量测量结果的表示、电磁量测量的发展过程和电磁量测量的发展趋势、电学量和电学基准和电磁量测量仪器的误差。

1.1 电磁量测量基本知识

1.1.1 电磁量测量方法

一般来说,对于同一个物理量,可以用各种不同的方法来进行测量。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,然后再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,一般在不能使用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 电磁量测量结果的表示

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,各导线上的电流强度为 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。这就需要有一个国际上公认的、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单位只有 4 个基本单位,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	$C=\frac{Q}{U}$	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 电磁测量的发展过程

电磁测量技术包括 3 个主要方面: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. Б. 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-沙伐-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已建立,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引入,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,随即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)智能示波器、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,不断跟踪并适应着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。

1.1.4 电磁测量的发展趋势

电磁测量仪表的发展趋势体现在以下几个方面。

① 体积小,重量轻,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。

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。

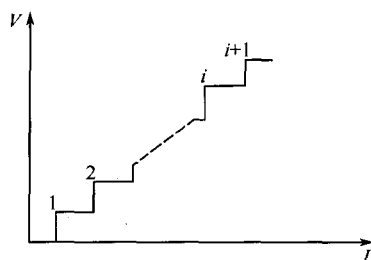
② 利用数字化技术和计算技术的成就,组成自动测试系统,快速而准确地处理复杂的测量问题。

1.2 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。

1.2.1 电学基准

人们把最精密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 1.2.1 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

$$V_n = \frac{nh}{2e}f \quad (1.2.1)$$

图 1.2.1 约瑟夫森结的伏安特性 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(1.2.1)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。

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

$$R_H(i) = \frac{U_H(i)}{I} \quad (1.2.2)$$

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

$$R(i) = \frac{R_H}{i} \quad (1.2.3)$$

式中, R_H 为冯·克里青常数。

理论上预言

$$R_H = \frac{h}{e^2} \quad (1.2.4)$$

式中, h 为普朗克常数; e 为电子电荷; R_H 为物理常数。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。