

173230

TM93  
1763

# 电 气 测 量

主编 陶时澍

哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了测量方法、测量误差的基本概念,电磁机械式仪表的工作原理、数字化测量技术,传感器及非电量的电测量方法和基本的磁测量技术。全书分为六章,每章后面附有习题及部分答案。

本书可作为工科电类测量专业大专班、电类非测量专业本科生及电大学生的教材和教学参考书,也可以供从事计量、测量工作的有关技术人员参考。

## 电 气 测 量

Dianqi Celiang

主编 陶时澍

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行  
肇东粮食印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13.625 字数 317 千字

1997年8月第1版 1997年8月第1次印刷

印数 1—4 000

ISBN 7-5603-1248-9/TN·41 定价 16.00 元

# 前 言

本书是为大学电类测量专业大专班、电类、非测量专业本科生及电大学生编写的教材。

电磁测量一直是电类大学生的一门重要的技术基础课。目前,在生产实践中除了传统的测量方法和仪表继续存在外,数字化测量技术,非电量电测量技术和微型计算机已被广泛地采用。但是,现在已有的适合于大专班选用的教材在内容上多以古典的电磁机械式仪表为主,对测量方法和测量误差的概念介绍的比较简单,特别是数字化测量技术、非电量的电测量技术,和单片机、微型机在测量技术中的应用等内容基本上没有涉及。针对这一现实,本教材在选材上力图解决这一问题,并用国际标准、国家标准统一全书的名词、术语、定义和单位。在教材的写法上是在讲清基本概念的基础上尽量用相应的国产仪器、仪表为实例,介绍正确选择和应用仪器仪表的方法及注意事项。每章后面编入部分习题及答案。

学习本课程要求学生有数学、电路、模拟电子电路、数字电路和计算机等方面的知识。

通过本课程的学习,使学生掌握基本测量方法,一般仪器、仪表的工作原理及使用方法,了解测量误差的一般概念。

全书计划学时为 50~60,可根据具体情况和教学对象而适当调整。

全书共分六章,第一、二章由李慧英同志编写,第四章由王祁同志编写,第五章由孙金玮同志编写,第三章和第六章由陶时澍同志编写,由陶时澍负责主编。

由于作者的知识所限,本书在内容方面一定存在一些疏漏之处,欢迎读者批评、指正。

编 者

1997.5 于哈尔滨工业大学

# 目 录

绪论	1
第一章 测量的基本知识	4
1-1 测量与测量单位的概念	4
1-2 电学基准和电学量具	5
一、电学基准	5
二、标准电池	6
三、标准电阻	7
四、可变电阻箱	8
思考题	9
附录 1	9
第二章 测量的误差	12
2-1 误差的概念	12
一、绝对误差	12
二、相对误差	12
三、基准误差(引用误差)	12
2-2 测量误差的分类	13
一、系统误差	13
二、随机误差	14
三、粗差	16
四、相关的测量术语	16
2-3 函数误差的基本问题和基本关系	16
2-4 误差的综合与分配	17
一、随机误差的综合	17
二、系统误差的综合	18
三、误差的分配	20
2-5 有效数字及数据舍入规则	22
一、有效数字	22
二、数据舍入规则	23
三、有效数字的运算规则	23
2-6 被测信号与测量仪器之间相互影响的问题	23
思考题、习题及答案	24
附录 2	25
第三章 直接作用模拟指示电测量仪表及比较式仪表	26
3-1 直接作用模拟指示仪表的工作原理	26

一、结构方框图	26
二、转动力矩	26
三、反作用力矩	27
四、阻尼力矩	27
五、准确度等级	27
六、表征仪表指标及性能的符号	28
3-2 磁电系仪表的工作原理	28
一、固定部分	28
二、可动部分	30
三、转矩公式、灵敏度、仪表常数	30
四、磁电系测量机构的特点	32
五、磁电系仪表的阻尼方式	32
3-3 磁电系电流表、电压表、欧姆表及兆欧表	33
一、磁电系电流表	33
二、分流器的四端钮结构	35
三、磁电系电压表	35
四、磁电系欧姆表	37
五、磁电系兆欧表	38
3-4 万用电表	41
一、直流电流测量电路	42
二、直流电压测量电路	42
三、交流电流测量电路	43
四、交流电压测量电路	45
五、电阻测量电路	45
六、测量晶体管放大倍数、电路通、断检查及其它功能	46
3-5 磁电系检流计	47
一、提高检流计灵敏度的结构措施	47
二、磁电系检流计的动特性	49
三、磁电系检流计的结构参数和运行参数	50
3-6 冲击检流计	52
一、冲击检流计的工作特点	52
二、冲击检流计的动特性	53
3-7 电磁系测量机构及电磁系电流、电压表	55
一、电磁系测量机构的结构	55
二、电磁系测量机构的转矩公式及特点	56
三、电磁系电流表	56
四、电磁系电压表	57
3-8 电动系测量机构及电动系电流表、电压表和功率表	57
一、电动系测量机构的结构	57
二、电动系测量机构的转矩公式及特点	58

三、电动系电流表	58
四、电动系电压表	59
五、电动系功率表	59
3-9 直流电位差计	61
一、补偿原理及电位差计	61
二、定流变阻式电位差计	61
三、标准电池的温度补偿	62
四、电位差计的工作特点及误差公式	62
五、电位差计的应用	63
六、国产电位差计举例	63
3-10 直流电桥	64
一、直流单电桥的工作原理	65
二、单电桥的误差公式	65
三、国产单电桥举例	66
四、直流双电桥的工作原理	66
五、双电桥举例	68
3-11 交流电桥	68
一、交流电路参数	68
二、交流电桥工作原理	71
三、交流电桥举例	72
四、感应分压器及变压器电桥	73
习题及答案	74
第四章 数字化测量技术	80
4-1 概述	80
一、数字化测量技术的发展概况	80
二、数字仪表的特点	80
三、连续量的不连续表示方法	81
4-2 数-模转换器	82
一、模拟量和数字量之间的转换	82
二、D/A 转换器的结构框图	82
三、技术特性	83
四、权电阻型 D/A 转换器	83
五、T 型电阻网络 D/A 转换器	84
六、集成 D/A 转换器	85
4-3 模-数转换器	86
一、A/D 转换器的分类	86
二、A/D 转换器的主要技术特性	87
三、逐次逼近式 A/D 转换器	87
四、V-F 型 A/D 转换器	91
五、双积分 V-T 型 A/D 转换器	92

4-4	频率、周期的数字化测量	96
	一、电子计数器的原理	96
	二、用电子计数器测量频率	96
	三、用电子计数器测量周期	97
	四、时间间隔的测量	98
	五、测量频率比	98
	六、电子计数器的误差	98
4-5	相位的数字化测量	100
	一、相位测量的基本原理	100
	二、相位-时间式数字相位计	101
4-6	电压的数字化测量	102
	一、直流电压的数字化测量	102
	二、交流电压的数字化测量	104
	三、峰值电压的数字化测量	107
4-7	电阻、电容的数字化测量	107
	一、电阻的数字化测量	107
	二、电容的数字化测量	109
4-8	电功率的数字化测量	110
	一、脉冲调宽式乘法器	110
	二、采样测量法	111
4-9	数字电压表的误差及抗干扰措施	112
	一、关于数字电压表的误差	112
	二、数字仪表中的抗干扰措施	113
4-10	微机化仪器	115
	一、微机化仪器的特点	115
	二、微机化仪器的基本结构	116
	三、微机化仪器的硬件系统	116
	四、微机化仪器的软件系统	117
4-11	数据采集系统	119
	一、多路开关	120
	二、采样/保持器	121
	三、仪用放大器	121
	四、A/D 转换器	122
	五、单片数据采集系统	122
	六、数据采集系统的结构	122
	思考题、习题及答案	125
第五章	非电量电测技术	126
5-1	引言	126
5-2	传感器的一般特性及其部分基础效应介绍	127
	一、传感器的分类	127

二、传感器的静态特性与动态特性 .....	128
三、传感器与基础效应 .....	133
5-3 传感器信号调理技术 .....	137
一、传感器常用接口电路 .....	137
二、传感器信号放大电路 .....	140
三、测量系统噪声及抑制 .....	143
四、传感器非线性补偿电路 .....	146
* 五、调频式无线电遥测 .....	149
5-4 温度检测 .....	150
一、热电阻温度计 .....	150
二、热敏电阻 .....	152
三、热电偶 .....	154
四、AD590 集成温度传感器 .....	157
5-5 运动量的测量 .....	159
一、移动相对位移和转动相对位移的测量方法 .....	159
二、移动相对速度和转动相对速度的测量方法 .....	163
三、相对加速度的测量 .....	165
5-6 力与转矩的测量 .....	167
一、应变片 .....	167
二、振弦式力传感器 .....	170
三、转轴转矩的测量 .....	171
四、皮带称的测量原理 .....	172
五、力平衡式压力传感器 .....	173
5-7 流量的测量 .....	174
一、涡轮式流量计 .....	174
二、电磁式流量计 .....	176
三、涡街式流量计 .....	177
5-8 其它量值的测量 .....	178
一、湿度传感器 .....	178
二、化学成分的分析 .....	179
5-9 非电量测量系统举例 .....	180
一、智能涡街式流量计 .....	181
二、原油含水量的测量 .....	182
5-10 小结 .....	184
思考题、习题 .....	185
第六章 磁性测量 .....	189
6-1 空间磁场、磁通的测量 .....	189
一、基于电磁感应原理的测量方法 .....	189
二、用磁通门磁强计测量磁场 .....	193
三、用霍尔效应测量磁场 .....	194



四、用核磁共振测量磁场 .....	196
6-2 磁性材料直流磁特性的测量方法 .....	196
一、磁性材料样品 .....	196
二、用冲击法测量环状样品的磁特性 .....	197
6-3 磁性材料交流磁特性的测量方法 .....	200
一、用示波器测量交流磁滞回线 .....	201
二、动态磁化曲线的测量方法 .....	202
三、用瓦特表法测量铁损 .....	203
思考题 .....	206
参考文献 .....	207

# 绪 论

目前,我国正在进行大规模的“四化”建设。四个现代化的关键是科学技术现代化,没有现代化的科学技术,就不可能有现代的工业、农业和国防。

科学技术发展中的重要问题之一是科学实验。不论是基础科学的研究还是应用科学的研究都要进行大量的实验。在实验研究中,测量是基本的、大量的工作之一。对事物的认识靠比较,没有比较就没有鉴别;比较是以“量”的概念作基础的。获得量的概念靠测量。获得量的概念往往是科学实验的主要目的之一。可见,测量在科学实验中占有多么重要的位置。

在工农业生产中,为保证产品质量和人身、设备的安全,需要大量的仪器、仪表用来对生产过程实行在线、实时或定期的检测和监督,以保证生产安全、可靠的进行。生产过程机械化和自动化程度越高,对测量的准确度、测量速度及仪器、仪表的可靠性要求也越高。

可靠、准确的测量手段和统一的单位也是国际贸易和国际科学技术交流的共同语言。

可以说,测量已经在国民经济的各个部门和日常生活中占有重要地位。世界上每个科学技术和工业生产高度发达的国家都在测量技术的研究,仪器、仪表的制造,保证计量单位的统一和可靠等方面做了大量工作,并且以法律的形式给予必要的保证。

在测量技术中,电磁测量技术近年来有了很快的发展。电磁测量技术的特点是:准确度高,目前电磁测量的误差可以小到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ ;测量速度快,很容易达到 $10^2 \sim 10^3$ 次/秒;范围广,不但所有的电量、磁量和电路、磁路参数能用电磁测量技术测量,而且很多非电量,例如湿度、压力、振动、速度、位移、水位、人的血压、物体的长度、重量、地震波、飞行高度、潜水深度等等,也都可以先变成与其成函数关系的电磁量或电路参数后,再用电磁测量的方法测量;测量数值的覆盖面宽,例如,电阻的数值从 $10^{-7}\Omega$ 一直到 $10^{10}\Omega$ ,甚致更广的范围均可用电磁测量的方法进行测量;电磁测量的灵敏度高,例如,数值小到 $10^{-15}\text{A}$ 的电流也可以用电磁测量的方法检测;最后一个特点是能比较方便地实现自动测量、自动控制和自动处理实验数据,能够给出数码,易于与计算机配合。在当今的世界中,从人们的日常生活开始,不管是天空、地面、海洋还是进入人体内的细胞,到处都有用电磁测量技术解决测量问题的例子。可见,电磁测量技术已经深深地扎根到国民经济和科学技术的各个领域,而且各种不同的测量实践又迅速地推动电磁测量技术不断发展。

电磁测量技术包括三个主要方面:电磁量的测量方法,电磁测量仪器、仪表的设计与制造和电磁量的量值传递。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、仪表的发展可以分成三个主要阶段,它们是古典电工仪器仪表发展阶段,数字式仪表发展阶段和自动测试系统发展阶段。

人们最早对电的认识是从定性开始的。由于对电现象研究的需要,人们开始了对测量仪表的研究。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。到1895年设计制造成功了世界上第一台感应式电度表。在这一阶段电工学的理论也得到了很大的发展,其中的库伦定律、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年出现了高性能的磁性材料——铝镍合金,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,这类电磁机械式仪表的准确度还停留在这一水平。我国自1956年建成哈尔滨电表仪器厂以后才开始有了大型、先进的仪表工业。到了1970年以后,国产的电磁机械式仪表的准确度也达到了0.1级,在品种上已经满足了国内绝大部分的需要,并有部分出口。

第二次世界大战以后,由于电子技术和计算技术的发展,为仪器、仪表工业的发展提供了新的理论和条件。1952年,美国制造出了世界上第一台比较式数字电压表,为仪器、仪表工业的发展开辟了一条新路。在随后的十几年中,世界各国争相研究和生产数字式仪表,使电工仪器、仪表的发展进入了新的阶段。早期的数字式仪表采用斜波式模—数转换器(亦称A/D转换器);把被测的模拟量转化为数字量,不久就被抗干扰能力强的积分式A/D转换器所代替;到1968年又出现了脉冲调宽式A/D转换器,使数字式仪表不但能准确地测量电压、电流和电阻,还能准确地测量功率和电能。这样,数字式仪表在原理和结构方面都达到了较完善的程度。近年来,由于大规模、超大规模集成电路的发展和余数再循环式A/D转换器的出现,以及微型计算机和单片计算机的广泛应用,已经制造出分辨率为 $100 \sim 0.01\mu\text{V}$ 、读数达 $7\frac{1}{2}$ 位和 $8\frac{1}{2}$ 位的数字万用表,准确度可达 $10^{-6}$ ,并有求算术平均值、方差、标准差、自校准和数据存储等功能。我国的数字式仪表的研制是从1957年开始的,目前,虽已初具规模并形成了一定的生产能力,但是,在质量和性能方面还需进一步提高。

从20世纪70年代开始,由于微处理器、微型计算机、电子技术和信息处理技术综合应用的结果,使电磁测量技术向自动化、智能化、系统化方向发展,它的主要标志在下面四个方面。

#### 1. 微机置入传统仪器——智能仪器

智能仪器的最大特点是仪器中采用了单片计算机,使测量和数据处理过程改由软件控制,使仪器具有自动校准、自动校零、非线性校正、温度补偿、自动测量、自动调节,并有计算、控制、数据处理和存储等功能,也可按予定的程序要求完成其它任务。使仪器具有结构简单,可靠性高,自动化程度高等特点。

#### 2. 采用标准接口组成自动测试系统

在1972年美国的HP公司首先推出了GPIB接口,该接口是为智能仪器、微机及其它仪器、装置相互联接而提供的一种公用接口总线。1975年被电气与电子工程师协会(IEEE)承认为国际上通用的外部接口总线,又称为IEEE—488接口总线。目前,国际上生产的智能仪器绝大部分带有GPIB接口。一个GPIB接口可以连接15台仪器,组成一个测试系统。该系统在微机的控制下,通过总线的连接和协调,由系统内的仪器完成不同的功能。例如,该系统可能连有逻辑分析仪、示波器、智能仪器、数字电压表、频谱分析仪和网络分析仪等。

IEEE—488 仪器系统可以由不同厂家生产的独立仪器连接而成。每台仪器均有独立的电源、机箱、显示器、键盘和存储器等部分,在组成统一的测试系统时势必造成资源的消费,成本过高,体积庞大。在 1982 年又研制开发出了个人微机(PC 机)加配模块卡式的 PC 仪器系统。PC 仪器系统是把带有测量电路和接口的插件板(仪器卡)插入 PC 的总线,利用 PC 机的机箱(或外部机箱)、键盘、屏幕显示器(CRT)和存储器,配以适当的软件,组成不同的仪器,完成不同的测量任务。显然,它的结构大为简化,成本降低,每一插件板都独立完成一定的功能。PC 仪器又称模块化仪器。

### 3. VXI 总线系统——虚拟仪器系统

与 IEEE—488 系统相比,模块式的 PC 仪器系统因由各生产厂家自行定义总线而无统一的标准,使其兼容性大大降低,用户难以选择不同厂家的模块组成测试系统。

VXI 总线是面向模块式结构的仪器总线,1987 年问世,经修改、完善后于 1992 年 4 月形成标准。该总线结构对所有仪器生产厂家是公开的,允许用户把按该标准生产的仪器模块用于同一仪器系统的同一机箱内,从而使仪器系统硬件的组成更为灵活。

VXI 总线组成的仪器系统是微机、软件技术和测量电路组成的模块三者的有机组合,其中高性能的微机处在核心地位,传统仪器的某些硬件被软件代替,例如,利用软件在 CRT 上生成仪器的软面板,利用鼠标在软件支持下进行测量操作,以完成仪器的控制,数据采集,数据分析、数据管理、处理及存储等功能,形成所谓“虚拟仪器”,完成测试任务。

### 4. 研制和生产了大量的传感器

为了满足国民经济各个部门提出的测试任务,研制和生产了大量的传感器。例如,在物理、化学、医学、冶金、机械、石油化工、海洋、航空航天等领域中的大量非电量,都是用传感器变成电量后用电磁测量技术完成测量。

显然,仪器与计算机技术的深层次结合将产生全新的仪器结构概念,在 VXI 总线仪器和虚拟仪器等模块式仪器的基础上,将出现集成仪器的概念<sup>[37]</sup>。集成仪器将基于“信息的数据采集(A/D 转换)——信息的分析与处理(DSP)——输出及显示(D/A 转换)”的结构模式。利用这种集成仪器的通用硬件平台调用不同的测试软件,就可以构成不同功能的仪器。在这样的仪器中,改用软件就可以形成新的仪器,故称这些软件就是仪器决不是夸张。

组成统一的测试系统对生产过程进行实时监控,这在大中型厂、矿企业中已是势在必行,高质量的智能仪器、PC 仪器和虚拟仪器已有了广泛的市场。但是,必须指出,简单、可靠和价格便宜的电磁机械式仪表无论在国内还是在国外仍然广泛使用而没有完全被淘汰。因此,本书作为教材,并考虑到读者的对象,在内容安排上注意到这一现实,内容做到合理的取舍。

# 第一章 测量的基本知识

## 1-1 测量与测量单位的概念

在工农业生产、商业贸易、日常生活中都需要测量。而科学技术的发展更是与测量的发展分不开的。通过测量可以定量地认识客观事物,从而达到认识客观事物的本质和揭示自然规律的目的。

测量实际是用实验的方法把被测量与标准量进行比较以确定被测量大小的过程。要想确定被测量的大小,必须有一个参考量,即标准量。我们把这个参考量定义为单位。也就是说:单位是一个选定的参考量。一旦确定,所有同类物理量都可以用它来表示。

测量结果由两部分组成,即测量单位和纯数。一般表示成

$$X = A_x \cdot X_0$$

式中  $X$ ——表示被测量;

$A_x$ ——表示测量所得的数字值,即单位的倍数;

$X_0$ ——表示测量单位。

例如对某一电压进行测量,所得测量结果表示为

$$V_x = 5.0V$$

式中  $V_x$ ——被测电压;

$V$ ——电压单位“伏特”;

5.0——测得的数字值,表示被测量是单位值的5.0倍。

独立定义的单位称基本单位。例如电磁学中安培的定义为:若处于真空中相距1米的两根无限长、截面小到可忽略的平行直导线内有1安培的恒定电流流过;则导线间每米长度所受的力为 $2 \times 10^{-7}$ 牛顿。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,其它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“导出单位”。例如物体运动速度单位“米/秒”就是根据长度单位“米”和时间单位“秒”和物理关系“速度 = 距离/时间”推导出来的。基本单位与导出单位的总和称为单位制。

在测量过程中,所选单位不同,得到的测量结果就不同。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。在目前国际经济高度发展的大环境中,单位不统一给我们的生产、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,称为国际单位制,用代号“SI”表示。

国际单位制中有七个基本单位,即

(1)长度单位:米(m);

(2)质量单位:千克(kg);

- (3)时间单位:秒(s);
- (4)电流单位:安培(A);
- (5)热力学温度单位:开尔文(K);
- (6)物质的量的单位:摩尔(mol);
- (7)光学强度单位:坎德拉(cd)。

根据上述七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。

在电磁学中涉及的物理量的单位只和四个基本单位有关,即:米、千克、秒、安培。通过这四个基本单位和电磁学定律,就可导出电磁学中所有物理量的单位。

表 1-1 中列出了部分电磁学量的 SI 导出单位。

表 1-1 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	
			中 文	国 际
电 量	$q = It$	库仑	库	C
电 势	$U = \frac{W}{q}$	伏特	伏	V
电 容	$C = \frac{Q}{U}$	法拉	法	F
电 阻	$R = \frac{U}{I}$	欧姆	欧	$\Omega$
电 阻 率	$\rho = \frac{S}{l}R$	欧姆·米	欧·米	$\Omega \cdot m$
电 导	$g = \frac{1}{R}$	西门子	西	S
电 场 强 度	$E = \frac{U}{d}$	伏特每米	伏/米	V/m
磁 通	$\Delta\Phi_m = E \cdot \Delta t$	韦伯	韦	Wb
磁 感 应 强 度	$B = \frac{\Phi_m}{s}$	特斯拉	特	T
磁 场 强 度	$H = \frac{1}{2\pi r}$	安培每米	安/米	A/m

## 1-2 电学基准和电学量具

测量单位是理论定义。我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实体。是测量中用于比较的工具。根据其工作任务的不同分为基准器、标准量具和工作量具。

### 一、电学基准

我们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。保存基准值的实物或装置称:“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的伏安特性,见图1-1。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有如下关系

$$V_n = \frac{nh}{2e} \cdot f \quad (1-1)$$

式中  $V_n$ ——第  $n$  个阶梯处的电压;  
 $n$ ——阶梯序数;  
 $h$ ——普朗克常数;  
 $e$ ——电子电荷;  
 $f$ ——微波频率。

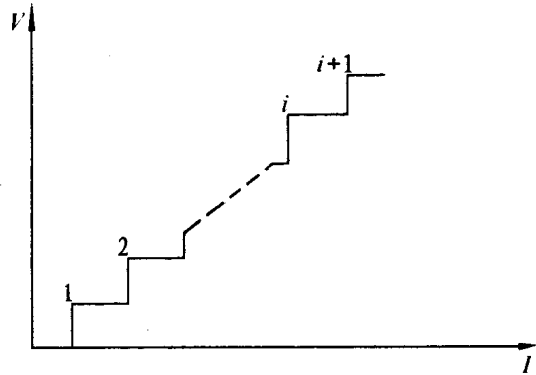


图1-1 约瑟夫森结的伏安特性

这个公式是复现和保存国家电压单位“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 10 特斯拉左右,且元件被冷却到几开尔文时,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。我们定义第  $i$  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

$$R_H(i) = \frac{U_H(i)}{I} \quad (1-2)$$

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  $i$  的关系如下

$$R(i) = \frac{R_H}{i} \quad (1-3)$$

式中  $R_H$ ——冯·克里青常数。  
 理论上预言

$$R_H = \frac{h}{e^2} \quad (1-4)$$

式中  $h$ ——普朗克常数;  
 $e$ ——电子电荷。

$R_H$  是物理常数。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。

## 二、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 1.0186 V 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饱和式标准电池,而电解液始终处于不饱和状态称不饱和标准电池。图 1-2 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,其关系式如下

式中  $t$ ——标准电池所处温度值;

$$E_t = E_{20} - 39.9 \times 10^{-6}(t - 20) - 0.94 \times 10^{-6}(t - 20)^2 + 0.009 \times 10^{-6}(t - 20)^3$$

$E_{20}$ ——标准电池在 20℃ 时的电动势值;

$E_t$ ——标准电池在  $t$  温度下的电动势值。

下面是两种形式标准电池的性能比较。

饱和式	{	优点:电动势稳定性好。
		缺点:内阻大、温度系数大。
不饱和式	{	优点:内阻小、温度系数小。
		缺点:电动势稳定性差。

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

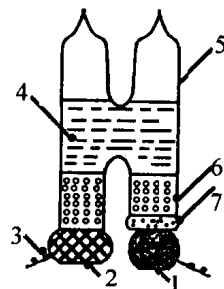


图 1-2 饱和标准电池的原理性结构

- 1—汞(+)
- 2—镉汞齐(-)
- 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

标准电池在使用时应注意下列事项。

1. 要根据标准电池的级别,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. 标准电池禁止摇晃和振动,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。

### 三、标准电阻

标准电阻是复现和保存电阻单位“欧姆”的实体。通常标准电阻是由锰铜丝绕制的。图 1-3 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。所示标准电阻阻值稳定、结构简单、热电效应、残余电感、寄生电容小。能够准确地复现欧姆量值。

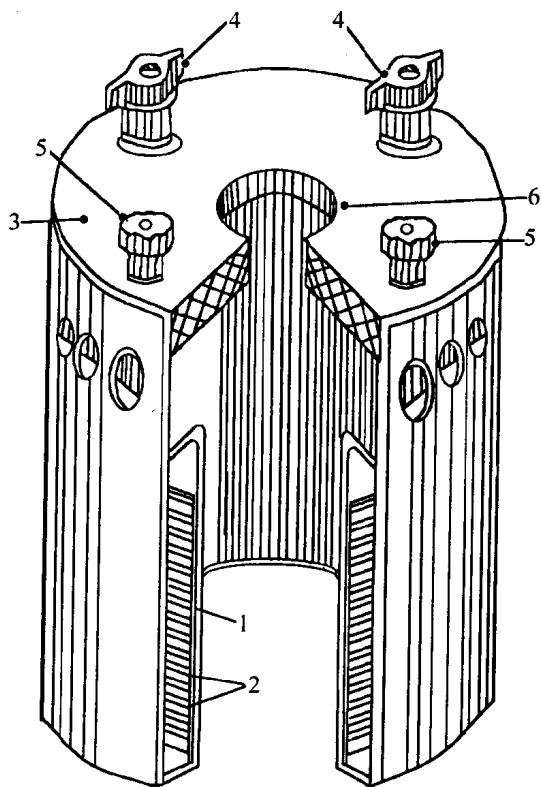


图 1-3 标准电阻器的结构

- 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

姆量值。

阻值低于 10 Ω 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



图如图 1-4 所示。阻值为

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-5)$$

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 1-5 所示。在使用时给屏蔽端一定的电位,可减小漏电的影响。

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  $+20^\circ\text{C}$  时电阻器的电阻名义值。电阻值与温度的关系为

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (1-6)$$

式中  $t$ ——温度值;

$R_{20}$ ——温度为  $20^\circ\text{C}$  的电阻值;

$R_t$ ——温度为  $t^\circ\text{C}$  的电阻值;

$\alpha$ ——标准电阻的一次温度系数;

$\beta$ ——标准电阻的二次温度系数。

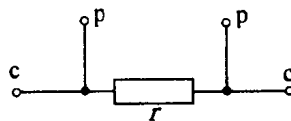


图1-4 四端钮电阻器

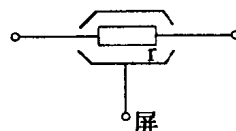


图1-5 三端钮电阻器

标准电阻器有直流、交流两种,分别用在直流电路和交流电路中。

#### 四、可变电阻箱

测量实践中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联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主要两种电阻箱。

##### 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 1-6 是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。

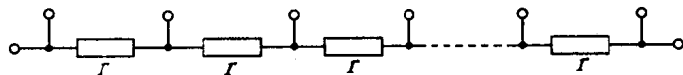


图1-6 接线式电阻箱电路结构

##### 2. 开关式电阻箱

图 1-7 为开关式电阻箱的结构示意图。这是三级十进制电阻箱。转换开关的位置就可以得到需要的三位十进电阻值。

开关式电阻箱的优点是阻值变化范围宽,且操作方便。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

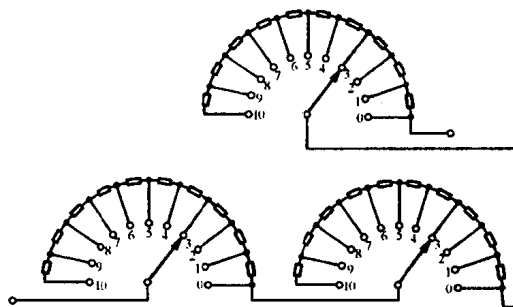


图1-7 开关式电阻箱电路结构