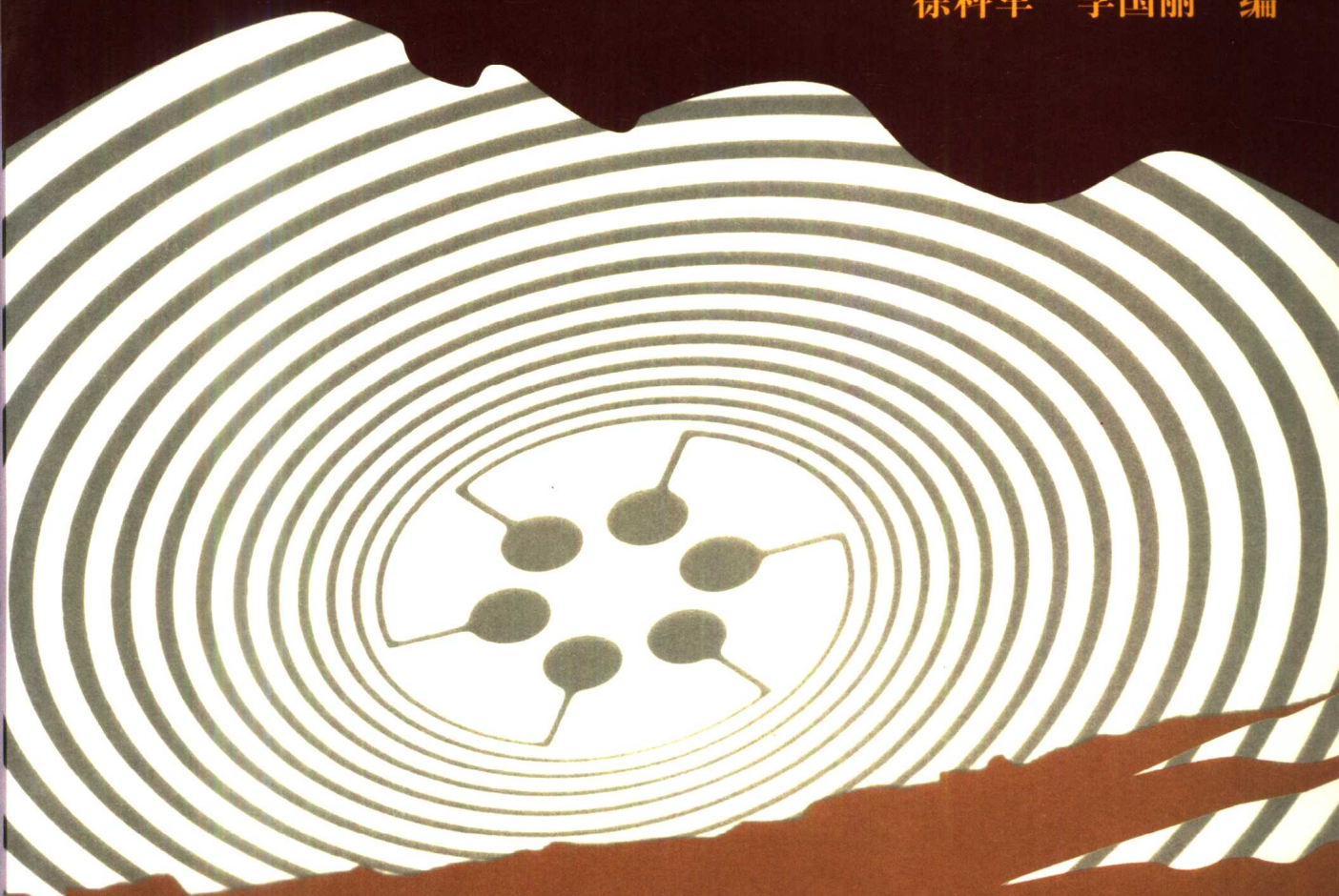


● 普通高等教育机电类规划教材

电气测试基础

徐科军 李国丽 编



93
04



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育机电类规划教材

电气测试基础

徐科军 李国丽 编



机械工业出版社

本教材是根据教育部大学本科专业引导性目录, 针对目前专业结构调整, 宽口径培养人才, 课程学时数减少的情况, 为电气工程与自动化专业(即原来的工业自动化专业、电机、电器及控制专业和电力系统及自动化专业)的电气测试基础课程而编写的。

本书介绍电气测试的基本概念和知识, 直读式电测仪表, 比较式电测仪表, 电子式电测仪表, 数字化电测仪表和磁性电测仪表。全书共六章, 每章后附有习题和参考题。

本书可作为工科电类专业的本科生以及电大学生的教材和教学参考书, 也可供有关教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气测试基础/徐科军, 李国丽编. —北京: 机械工业出版社, 2003. 4
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-11389-6

I. 电... II. ①徐...②李... 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(2003)第005239号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑: 王小东 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张 媛
封面设计: 陈 沛 责任印制: 路 琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002年12月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·7.75印张·186千字
0 001—4 000册
定价: 12.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

在工农业生产、商业贸易、国防建设、科学研究和正常生活中，测试技术起着非常重要的作用，其应用相当广泛。随着科学技术和生产发展的需要，测试技术已发展成为较为完整的技术学科。若按被测量来分，有电（磁）量测量和非电（磁）量测量。由于电和磁自身的特点和它们之间的关系，电气测试（又称电磁测量）具有较高的准确度和灵敏度，其电磁信号便于处理和传输，能够实现快速测量、连续测量、记录和进行数据处理，所以电气测试在测试技术中占有举足轻重的地位。由于电磁量与其他物理量和化学量等之间有着广泛的联系，所以几乎所有非电量都可以转换成电磁量来进行测量。所以，电气测试技术是整个测试技术的重要基础。

电气测试包括电参量测试和磁参量测试两大部分。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）。

电气测试基础一直是电类大学生的一门重要的技术基础课。本教材是根据教育部大学本科专业引导性目录，针对目前专业结构调整，宽口径培养人才，课程学时数减少的情况，为电气工程与自动化专业（即原来的工业自动化专业、电机、电器及控制专业和电力系统及自动化专业）的电气测试基础课程而编写的。目前，除了广泛使用的传统的测量方法和仪表外，数字化测量技术和仪表的应用已相当普及，以微处理器为处理核心的现代仪器系统已显示出强大的功能和很好的发展前景。所以，本教材采用传统测量仪器与先进测量仪器并重的方法加以介绍。考虑到总学时数减少的情况，对原有电磁测量的内容进行了精简和压缩。拟在 30 学时左右讲授完这门课程，使学生通过本课程的学习，掌握电磁测量的各种基本方法、电磁测量仪器仪表的工作原理和使用。

全书共分为六章。

绪论介绍电气测试的方法、电气测试结果的表示、电学量和电学基准、电气测试仪器的误差、电气测试的发展过程和电气测试的发展趋势。

第 1 章介绍各种直读式电测仪表的结构、工作原理及其应用，包括磁电系电流表、电压表、欧姆表及万用表；磁电系检流计的结构特点和运动特性；冲击检流计的工作特点和动态特性；电磁系测量机构的转矩公式及特点；电磁系电流表和电压表；电动系仪表的结构和转矩公式；电动系电流表、电压表和功率表。

第 2 章介绍几种比较式电测仪表：直流电位差计的补偿原理、实例、误差公式和应用；直流电桥的工作原理、误差公式和实例；交流电桥的工作原理和分类。

第 3 章介绍电子示波器的基本原理、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 章介绍磁性材料的若干基础知识，空间磁场、磁通的测量，以及磁性材料的测量。

本教材的绪论、第 4 章和第 5 章由合肥工业大学电气与自动化工程学院徐科军编写，第

14034/14

1 章、第 2 章和第 3 章由李国丽编写。宗仁鹤教授和黄福林副教授审阅了书稿，并提出宝贵意见。在编写过程中，参考和引用了有关专家的教材和论文，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中可能存在不妥之处，欢迎读者批评指正。

编者

2002 年 8 月于合肥工业大学

目 录

前言

绪论 1

0.1 电气测试的方法 1

0.2 电气测试结果的表示 1

0.3 电学量和电学基准 3

0.4 电气测试仪表的误差 6

0.5 电气测试的发展过程 8

0.6 电气测试的发展趋势 10

习题与思考题 10

第 1 章 直读式电测仪表 11

1.1 磁电系仪表 11

1.2 磁电系电流表、电压表、欧姆表 14

1.3 万用表 19

1.4 磁电系检流计 25

1.5 冲击检流计 29

1.6 电磁系仪表 31

1.7 电动系仪表 34

习题与思考题 39

第 2 章 比较式电测仪表 41

2.1 直流电位差计 41

2.2 直流电桥 45

2.3 交流电桥 49

习题与思考题 54

第 3 章 电子式电测仪表 56

3.1 电子示波器原理 56

3.2 电子示波器的使用 60

习题与思考题 64

第 4 章 数字化电测仪表 66

4.1 概述 66

4.2 频率、周期的数字化测量 67

4.3 相位的数字化测量 71

4.4 电压的数字化测量 73

4.5 电阻、电容的数字化测量 78

4.6 电功率的数字化测量 80

4.7 微机化仪表 81

习题与思考题 95

第 5 章 磁性电测仪表 96

5.1 概述 96

5.2 基础知识 96

5.3 空间磁场、磁通的测量 99

5.4 磁性材料的测量 106

习题与思考题 113

附录 测量仪表标度盘部分符号及其
含义 115

参考文献 116

绪 论

0.1 电气测试的方法

同样的一个物理量，可以用各种不同的方法进行测量。在一定条件下，我们要根据被测量的性质、特点以及对准确度的要求等因素来选择测量方法。根据获得测量结果的过程可以将测量分为三类：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，人们把这种测量称为间接测量。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电阻中的电流，然后再根据公式计算出电阻值。间接测量比起直接测量要复杂些，一般在不能使用直接测量或直接测量达不到要求时，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。它比前两种更为复杂，通常在实验室的精密测量中采用。

根据在测量过程中所用的测量器具不同，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。例如，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，故广泛应用于电磁测量中。

比较测量法是将被测量与标准量进行比较而取得结果。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，操作起来比较复杂，一般在测量准确度较高的场合中使用。

按照上面的分类，我们可以看到，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。

0.2 电气测试结果的表示

电气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规定为：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”。例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”和物理关系“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。

- 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有四个基本单位，即：米、千克、秒和安培。通过这四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 0-1 中列出了部分电磁学量的 SI 导出单位。

表 0-1 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	Ω
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	$\Delta\Phi_m=E\Delta t$	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

0.3 电学量和电学基准

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。

0.3.1 电学基准

我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0-3-1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有如下关系:

$$V_n = \frac{nh}{2e}f \quad (0-3-1)$$

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。

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10T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

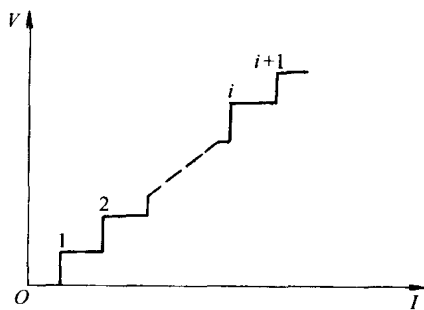


图 0-3-1 约瑟夫森结的伏安特性

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

$$R_H(i) = \frac{U_H(i)}{I} \quad (0-3-2)$$

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:

$$R(i) = \frac{R_H}{i} \quad (0-3-3)$$

式中, R_H 为冯·克里青常数。

理论上预言

$$R_H = \frac{h}{e^2} \quad (0-3-4)$$

式中, h 为普朗克常数; e 为电子电荷。 R_H 是物理常数。一旦确定 i , 冯·克里青效应就可用于复现和保存电阻单位“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。

0.3.2 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电池。图 0-3-2 所示是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

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

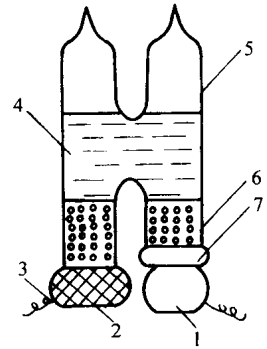


图 0-3-2 饱和式标准电池的原理结构

(0-3-5) 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

式中, E_t 为标准电池在 t 温度下的电动势值, E_{20} 为标准电池在 20°C 时的电动势值, t 为标准电池所处的温度值。

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。

0.3.3 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。图 0-3-3 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, 所以标准电阻的阻值稳定, 结构简单, 热电效应、残余电感、

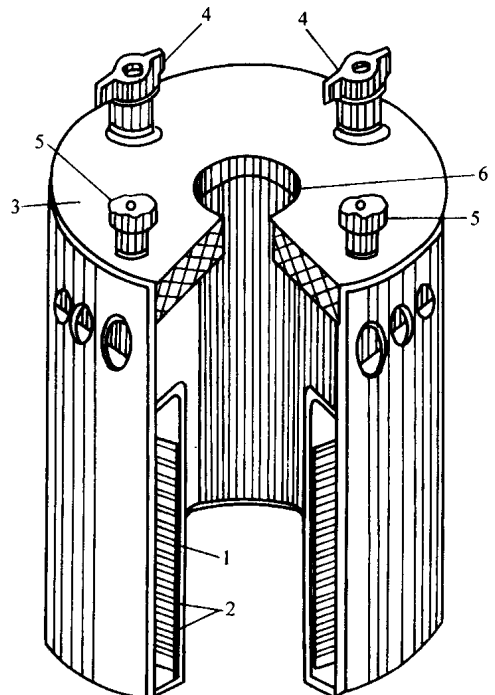


图 0-3-3 标准电阻器的结构

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

寄生电容小，能够准确复现欧姆量值。

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 0-3-4 所示。阻值为

$$R = \frac{U}{I} \quad (0-3-6)$$

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得影响。

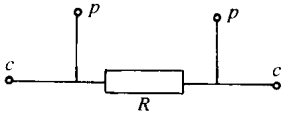


图 0-3-4 四端钮电阻器

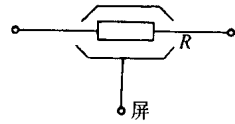


图 0-3-5 三端钮电阻器

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 0-3-5 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

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (0-3-7)$$

式中， R_t 为温度在 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。

标准电阻器有直流和交流两种，分别用在直流电路和交流电路中。

0.3.4 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 0-3-6 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，以及结构简单。但是，变换阻值范围太窄，改变接线也较麻烦。

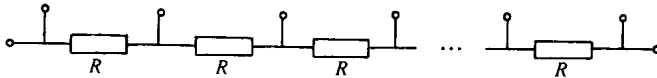


图 0-3-6 接线式电阻箱电路结构

(2) 开关式电阻箱 图 0-3-7 为开关式电阻箱的结构示意图。这是三位十进位电阻箱，转换开关的位置就可以得到需要得三位十进位电阻值。

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 这十一个级别。

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

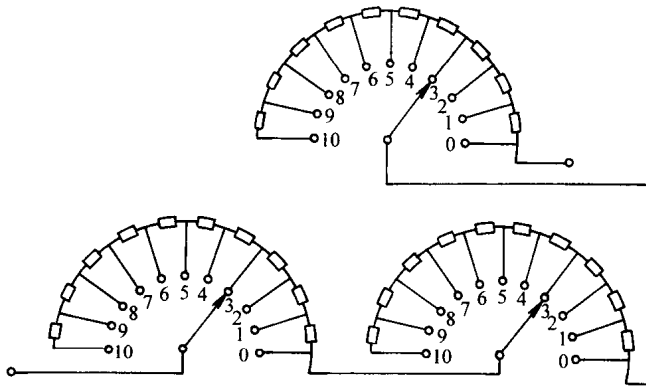


图 0-3-7 开关式电阻箱电路结构

$$|\Delta| \leq (a\%R + b)\Omega \quad (0-3-8)$$

式中， Δ 为允许误差值； a 为准确度等级对于的允许偏离； 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。

0.4 电气测试仪表的误差

用仪器仪表对某一被测量进行有限次测量都不能求得测量的真值，仪器仪表的读数和真值之间总存在着一定的差值，这个差值就是误差。仪器仪表的准确度说明仪器仪表的读数与被测量的真值相符合的程度，误差越小，准确度越高。

0.4.1 仪表误差的分类

根据引起误差的原因，可以将误差分为基本误差和附加误差两种：

(1) 基本误差 仪表在正常工作条件下进行测量时，由于内部结构和制作不完善所具有的误差。例如，活动部分的转轴和轴承存在着摩擦力矩，这一力矩的方向和活动部分的运动方向相反，大小也不恒定，它将影响活动部分的平衡位置，从而产生基本误差。又如，刻度划分不精密，指针受温度影响或其他原因产生变形，内部磁场的改变等均能产生基本误差。

仪表正常工作条件是指：

- 1) 仪表指针调整到进行零位。
- 2) 仪表按规定的工作位置安放。
- 3) 除地磁外，没有外来电磁场。
- 4) 周围温度是 20°C 或为仪表所标的温度。
- 5) 交流仪表的使用频率符合仪表的规定，所测量的波形为正弦。

(2) 附加误差 仪表偏离其正常工作条件而产生的除上述基本误差外的误差称为附加误差。如温度、外磁场、频率等不符合仪表正常工作条件时都会引起附加误差。

0.4.2 误差的几种表达形式

(1) 绝对误差 测量值与被测量的真值之间的差值称为绝对误差，如果用 A_x 表示测量结果， A_0 表示被测量的真值，则绝对误差 Δ 可表示为

$$\Delta = A_r - A_0 \quad (0-4-1)$$

注意，在很多情况下，被测量的真值是无法得到的，人们只能在一定准确度下获得一个与真值近似的可使用的值，称为约定真值。此值与真值之差可以忽略。在不引起误解时，也可将术语“真值”理解为“约定真值”。

(2) 相对误差 绝对误差 Δ 与被测量的真值 A_0 的比值称为相对误差，通常以百分数 γ 来表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (0-4-2)$$

因为 A_0 难以测得，有时用 A_r 代替 A_0 ，则

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_r} \times 100\% \quad (0-4-3)$$

例如，用两个伏特表测量两个电压，一个电压的测量值为 150V，绝对误差为 1.5V；另一个的测量值为 10V，绝对误差为 0.5V。从绝对误差角度来看，前者比后者大，但从相对误差来看，前者为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_r} \times 100\% = \frac{1.5}{150} \times 100\% = 1\% \quad (0-4-4)$$

后者为

$$\gamma = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\% \quad (0-4-5)$$

由此可见，前者的相对误差小些，测量的准确度要高些。相对误差便于对不同的测量结果的测量误差进行比较，所以一般都用它来表示误差。

(3) 引用误差 虽然相对误差可以用来表示某测量结果的准确度，但是，若用来表示指示仪表的准确度则不太合适，因为指示仪表是用来测量某一规定范围（通常称为量程）内的被测量的。当用仪表来测量不同大小的被测量时，由于式 (0-4-2) 中的分母不同，相对误差便随着改变。所以，用相对误差来衡量仪表的性能是不方便的。

例如，一个测量范围为 0~250V 的电压表，在刻度 200V 处基本误差为 2V，其相对误差为 1%；而在刻度 100V 处基本误差也是 2V，这时相对误差则变为 2% 了。为了方便起见，通常用引用误差来衡量仪表的准确度。引用误差用仪表的基本误差与其量程之比的百分数表示，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (0-4-6)$$

式中， γ_n 为仪表的引用误差； Δ 为仪表的基本误差； A_m 为仪表的量限。

0.4.3 仪表的准确度

由于仪表在不同的刻度上基本误差不完全相等，其值有大有小，其符号有正有负，为了保险起见，用最大引用误差来衡量仪表的准确度更为合适。最大引用误差的定义为

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (0-4-7)$$

式中， γ_{nm} 为仪表的最大引用误差； Δ_m 为仪表在不同刻度上的最大基本误差。

根据我国国家标准 GB 776—1965《电气测量指示仪表通用技术条例》的规定，目前我国生产的电气测量指示仪表，按最大引用误差的不同，其准确度 a 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、

2.5、5等七个等级。由于仪表工业的发展，又出现了准确度为0.05级的仪表。0.2级仪表的最大引用误差在0.1%~0.2%之间；0.1级仪表的最大引用误差在0.05%~0.1%之间等。

注意，仪表的准确度等级是用来衡量仪表性能的指标，在使用仪表进行测量时它所产生的测量误差可能会超出仪表的准确度等级。这可用下面的例子来说明。

例 0-4-1 用量限为10A，准确度为0.5级的电流表去测量10A和5A的电流，求测量的相对误差。

解 测量10A电流时所产生的最大基本误差：

$$\Delta_m = \pm \alpha \% A_m = \pm 0.5 \% \times 10A = \pm 0.05A$$

因而测量10A电流时所产生的最大相对误差：

$$\gamma = \pm \frac{0.05}{10} = \pm 0.5 \%$$

测量5A时

$$\Delta_m = \pm 0.5 \% \times 10A = \pm 0.05A$$

$$\gamma = \pm \frac{0.05}{5} = \pm 1 \%$$

由此可见，当仪表的准确度等级给定后，则所选仪表的量限越接近被测量的值，测量误差就越小。

0.5 电气测试的发展过程

电气测试技术包括三个主要方面：电磁量的测量方法，电磁测量仪表、仪表的设计与制造，以及电磁量的量值传递。其中以仪器仪表的发展最能体现电气测试技术的发展。仪器仪表的发展可以大致分为三个阶段，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。

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。1936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年设计研制成功了世界上第一台感应式电度表。在这一阶段，电工学的理论也得到了很大的发展，其中的库仑定律、安培定律、毕奥—沙伐—拉普拉斯定律、法拉弟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年出现的高性能的磁材料—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停留在这一水平。

20世纪50年代，数字电子技术和微计算机技术的引入，使电气测试仪器仪表的发展加快，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。数字电子技术应用用于电气测试，对被测直流对象，是先量化为恒定电压值，再经电压/频率变换后进行计数；而随时间变化的量，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。1974年出现的电压、电流波形等时间间隔采样技术，揭开了数字电子技术在电气测试技

术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以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、运用能力以及解决测量问题的深度和广度等方面均有明显的进步。尽管内置有微机的仪器的智能水平仍较低,但是人们还是称它们为智能仪器。

自从电子技术和微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。为解决这样的问题,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以及微计算机的话,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。

改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机的资源,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机有机组合,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,因此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总线是为了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。

近两年,VXI总线仪器又出现了模块中再分模块的构建方案,即在一个原有模块插槽上,现在可以安装上若干块小型化模块。这一进步,不仅可提高VXI仪器模块的安装密度、更有效地利用VXI仪器机箱空间、节约对多槽机箱的投资,更重要的是进一步提高了仪器组建的灵活性,且使VXI仪器更小型化成为可能,更适于移动式应用。

从表面上看,与智能仪器相比,PC仪器、VXI仪器好像只是对换了一下,是将仪表的功能电路制成板卡插入微机式的仪器,但是,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。虚拟仪器一般运行在于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。近一、二十年，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、能耗低以及带通讯接口等特点，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。

0.6 电气测试的发展趋势

电磁测量仪表的发展趋势：

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、自动读数和打印以及自动校正等。

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。

电气测试技术的发展趋势是向微观、超常态、动态方向以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。

习题与思考题

0-1 电学新基准复现电动势单位“伏特”和电阻单位“欧姆”的两种物理现象是什么？

0-2 为什么引入引用误差的概念？

0-3 指示仪表和标准量具的准确度级别是如何确定的？

0-4 为测量稍低于 100V 的电压，现实验室中的有 0.5 级的 0~300V 和 1.0 级 0~100V 两只电压表，为使测量准确些，你打算选用哪一种？

0-5 重复多次相同的测量有什么意义？

0-6 用量限为 0~100mA、准确度为 0.5 级的电流表，分别去测量 100mA 和 50mA 的电流，求测量结果的最大相对误差各为多少？

0-7 检定 1 只 1.0 级电流表，其量限为 0~250mA，检定时发现在 200mA 处误差最大，为 -3mA。问此量限是否合格？

0-8 试写出电容单位法拉与电阻单位欧姆的关系。

第 1 章 直读式电测仪表

直读式电测仪表可以进行电压、电流、电阻和功率的测量。按其内部结构，直读式电测仪表分为磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表几大类。

1.1 磁电系仪表

利用可动线圈中的电流与固定的永久磁铁产生的磁场相互作用而工作的测量仪表称“磁电系仪表”。

1.1.1 磁电系仪表的结构

磁电系仪表的内部结构主要有外磁式和内磁式两种。

1. 外磁式磁电系仪表的结构

磁电系仪表的测量机构一般含有固定和活动两个部分，外磁式磁电系仪表的结构如图 1-1-1 所示。固定部分有永久磁铁 1、极掌 2 及固定在支架上的圆柱形铁心 5 组成；活动部分包括绕在铝框架上的可动线圈 4、线圈两端的两个半轴 3、与转轴相连的指针 8、平衡锤 6、以及游丝 7。由于永久磁铁放在可动线圈的外面，所以称外磁式。

可动线圈通电后，线圈中的电流和空气隙中的磁场相互作用而使线圈受力，力的方向由左手定则确定，可动线圈两侧受到的电磁力大小相等，方向相反，形成转动力矩，使可动线圈产生偏转。反作用力矩由游丝产生，游丝一般有两个，并且盘绕方向相反，每个游丝的一端被固定在支架上，另一端被固定在转轴上，当仪表的活动部分受到转动力矩的作用转动时，游丝随转轴被扭转变形，因而产生反作用力矩。游丝的作用除产生反作用力矩外，还可作为将电流引进可动线圈的引线。通过可动线圈的电流越大，仪表指针偏转的角度就越大，游丝的反作用力矩也就越大。

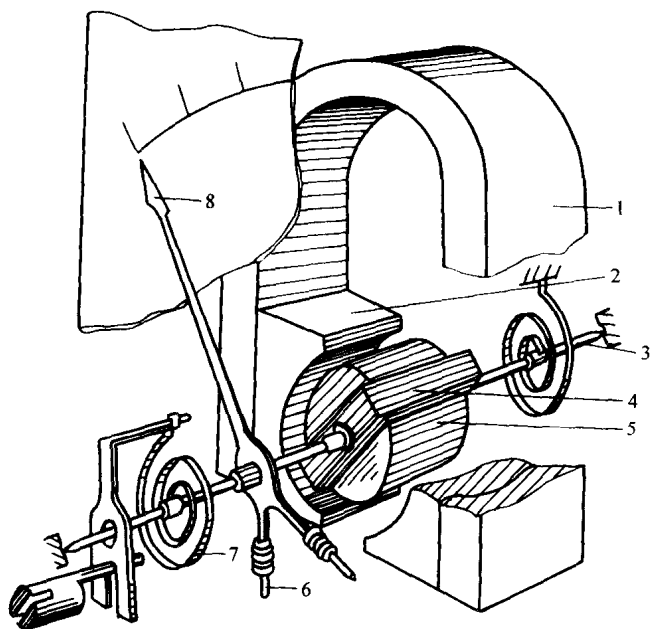


图 1-1-1 外磁式磁电系测量机构示意图

1—永久磁铁 2—极掌 3—半轴 4—可动线圈
5—圆柱形铁心 6—平衡锤 7—游丝 8—指针

2. 内磁式磁电系仪表的结构

内磁式磁电系仪表的结构如图 1-1-2 所示，它与外磁式的区别在于把永久磁铁 4 做成圆柱形，并放在可动线圈之内。它是一块磁铁，又是线圈的铁心，为了使磁路能通过导磁材料