

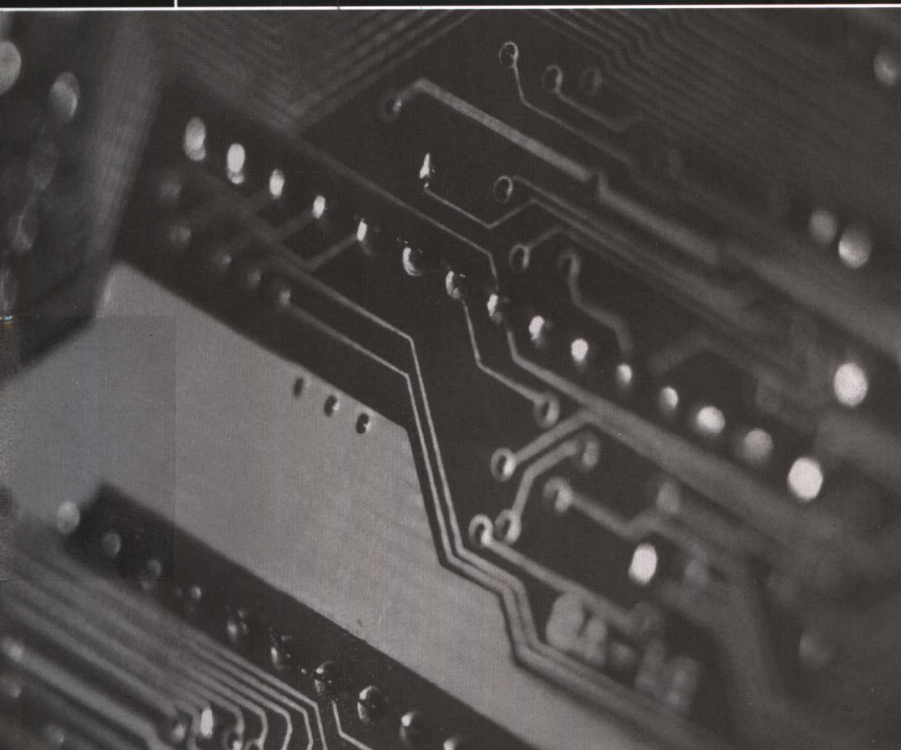
1
HZ BOOKS

21
世纪

高等院校电气信息类本科规划教材

电工实验技术

马鑫金 编著



机械工业出版社
China Machine Press

国家示范性高职院校重点建设教材

电工实验技术

王明 主编



TM-33

34

2007

21
世纪

高等院校电气信息类本科规划教材

电工实验技术

马鑫金 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书主要包括电工仪表、测量技术、电路元件、实验室设备、常用低压电器、电气控制环节、实验安全技术和电工实验、PLC 实验等内容。本书还增加了电工仪表与测量的章节；加强了电工技术中电路元件、常用低压电器、电气控制环节、实验安全技术方面的技术介绍；强化了实验实践教学内容。

本书内容丰富、注重理论与实际应用相结合。既可作为大学本科非电类专业电工技术基础课程及实践教学用书，也可作为电工仪表与测量、电气工程和控制技术等相关课程的参考教材。

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

电工实验技术/马鑫金编著. —北京:机械工业出版社, 2007.3

(21 世纪高等院校电气信息类本科规划教材)

ISBN 978-7-111-20771-9

I. 电… II. 马… III. 电工技术—实验—高等学校—教材 IV. TM-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 007983 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:秦燕梅

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2007 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·12.25 印张

定价:18.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换

本社购书热线:(010)68326294

前 言

《电工实验技术》主要是配套高校本科非电类专业“电工技术基础”或“电工学”课程的实践教学用书。

本书根据教学改革的要求，参考相关优秀实践教学教材，增添了电工仪表与测量的章节；加强了电工技术中电路元件、常用低压电器、电气控制环节、实验安全技术方面的技能介绍；强化了实验实践教学内容。

本书注重电工新技术介绍，在电工仪表方面增加了智能电工仪表的内容，在传统的电工实验之外结合低压电器、电气控制环节增加了 PLC 方面的实验。

本书中的前 8 章是电工技术实验的必备知识，在实验前可以结合电工技术基础理论进行自学，充分了解与实验有关的知识，掌握实践工具，在此基础上参加实验，才能取得事半功倍的效果。

本书在第 9、10 章中对传统的电工技术实验作了改革性尝试——对实验只提出实验要求和任务，实验线路自拟为主；在 PLC 实验中，结合实际任务，重点提出控制系统的控制要求，这就要求将“电工技术基础”课程中的电气控制与 PLC 编程控制的知识融会贯通。PLC 编程调试完成后与控制对象（低压电器、电动机等）相连并运行，这一部分内容注重了对学生实践能力的培养。

祝愿读者有所收获、有所提高！书中有疏漏之处望读者指正。

2006. 10

目 录

前言

第 1 章 指针式电工仪表	1
1.1 指针式电工仪表简述	1
1.1.1 指针式电工仪表的组成	1
1.1.2 指针式电工仪表测量机构的基本工作原理	2
1.2 指针式电工仪表的主要技术指标	5
1.2.1 准确度	5
1.2.2 灵敏度和仪表常数	5
1.2.3 功耗	6
1.3 磁电系仪表	6
1.3.1 磁电系仪表测量机构的结构及工作原理	6
1.3.2 磁电系仪表测量机构的特点	8
1.3.3 磁电系仪表测量机构的应用	9
1.4 电磁系仪表	10
1.4.1 电磁系仪表测量机构的结构及工作原理	10
1.4.2 电磁系仪表测量机构的特点	11
1.4.3 电磁系仪表	12
1.5 电动系仪表	13
1.5.1 电动系仪表测量机构的结构及工作原理	13
1.5.2 电动系仪表测量机构的特点	14
1.5.3 电动系仪表	15
1.5.4 电动系仪表使用	15
1.6 整流系仪表	17
1.6.1 整流系仪表测量机构	17
1.6.2 整流系仪表	18
1.6.3 常见指针式系列仪表技术指标比较	19
1.7 磁电系比率表	19

1.7.1 磁电系比率表测量机构和兆欧表工作原理	19
1.7.2 兆欧表的特点	21
1.7.3 兆欧表的使用	21
1.8 指针式万用表	22
1.8.1 指针式万用表的结构和工作原理	22
1.8.2 指针式万用表的特点和技术指标	25
第2章 现代电工仪表	27
2.1 电工仪表的数字化测量技术	27
2.1.1 概述	27
2.1.2 双积分式 A/D 转换器	28
2.2 数字直流电压基本表	31
2.2.1 数字直流电压基本表组成	31
2.2.2 A/D 转换电路	31
2.2.3 逻辑控制电路	32
2.2.4 显示器	32
2.3 便携式数字式万用表原理	34
2.3.1 典型数字电压基本表 7106 芯片	34
2.3.2 多量程数字式直流电压表原理	35
2.3.3 多量程数字式直流电流表原理	36
2.3.4 线性整流和数字交流量的测量原理	37
2.3.5 多量程数字式电阻测量原理	39
2.3.6 国内便携式数字万用表及测量指标	41
2.4 智能式电工仪表	42
2.4.1 智能式电工仪表概述	42
2.4.2 DMM 结构	44
2.4.3 DMM	46
2.5 数字式电工仪表中常见的测量符号	48
第3章 电工实验技术	50
3.1 仪表误差与准确度	50
3.1.1 误差的表示方式	50
3.1.2 仪表准确度	51
3.2 误差分析	52

3.2.1	测量误差的分类	52
3.2.2	直接测量中工具误差的分析	53
3.2.3	间接测量中由仪表引起的误差分析	54
3.3	减少测量误差的方法	55
3.3.1	系统误差和处理	55
3.3.2	随机误差和处理	57
3.3.3	疏失误差和处理	58
3.4	测量数据处理	58
3.4.1	测量中仪表数据的读取	58
3.4.2	有效数字的表示方法和运算	59
3.4.3	实验数据处理	61
3.5	实验设计的基本方法和故障排除	62
3.5.1	实验设计的基本方法	62
3.5.2	实验步骤与故障排除	64
3.6	实验报告的书写	66
3.6.1	实验报告书写要求	66
3.6.2	实验报告内容	67
第4章	RLC 元件	69
4.1	电阻元件	69
4.1.1	电阻的命名和分类	69
4.1.2	电阻的主要技术指标	70
4.1.3	电阻的标示法	71
4.2	电感元件	72
4.2.1	电感的主要技术指标	73
4.2.2	含铁心(或磁心)线圈的特殊问题	74
4.3	电容元件	75
4.3.1	电容命名和介质代号	76
4.3.2	电容的主要技术指标	76
4.3.3	电容的标示法	78
第5章	电工实验常用设备	80
5.1	晶体管直流稳压电源	80
5.1.1	原理综述	80

5.1.2 JWY—30C 型直流稳压电源及主要技术指标	81
5.2 函数信号发生器	82
5.2.1 原理综述	82
5.2.2 AS101E 函数信号发生器及主要技术指标	83
5.3 晶体管毫伏表	84
5.3.1 原理综述	84
5.3.2 TC2172 型晶体管毫伏表及主要技术指标	85
5.4 电子示波器	86
5.4.1 示波器的组成	86
5.4.2 6502 双踪示波器及技术指标	89
第 6 章 常用低压电器简介	92
6.1 主令电器	92
6.1.1 常用接触式主令电器	92
6.1.2 常用非接触式主令电器	93
6.2 保护电器	95
6.2.1 熔断器	96
6.2.2 低压断路器	97
6.2.3 热继电器	98
6.3 控制电器	101
6.3.1 继电器	101
6.3.2 接触器	107
6.3.3 电磁式速度继电器	110
第 7 章 继电—接触式控制电路	112
7.1 三相笼型异步电动机基本控制电路	112
7.1.1 启动、保持、停止典型电路	112
7.1.2 可逆运行控制典型电路	113
7.1.3 行程控制与顺序控制	114
7.2 三相笼型异步电动机降压启动控制电路	116
7.2.1 自耦变压器降压启动控制电路	116
7.2.2 Y— Δ 形降压启动控制电路	117
7.3 三相笼型异步电动机制动控制电路	118
7.3.1 电动机反接制动	118

7.3.2 电动机能耗制动	120
第8章 电工实验安全技术	123
8.1 用电安全简述	123
8.1.1 电对人体的伤害	123
8.1.2 实验室安全防护和安全用电	125
8.2 安全标志和绝缘防护	126
8.2.1 安全标志	126
8.2.2 电工材料与绝缘防护	128
8.3 安全防护	131
8.3.1 名词解释	131
8.3.2 三相四线制供电系统的保护接地	132
8.3.3 保护接零分析	134
8.3.4 保护接地、接零线的要求	134
8.4 漏电保护	135
8.4.1 漏电保护器	135
8.4.2 漏电保护器的技术指标	136
8.4.3 漏电保护器使用选择	137
第9章 电工技术基础实验	138
实验一 电压源、电流源特性测定及 KVL 电路分析	138
实验二 等效电源定理的运用	140
实验三 相量法测量电感元件参数及功率因数的提高	143
实验四 三相交流电路的研究	145
实验五 正弦稳态谐振电路的研究	147
实验六 一阶电路的暂态响应	149
实验七 单相变压器特性测试	152
实验八 三相笼型电动机运行及控制	155
实验九 三相电动机功率测量及能耗制动	156
实验十 行程控制和时限控制	159
第10章 PLC 编程及实验	161
实验一 基本电路的编程控制实验	161
实验二 三相异步电动机简单控制实验	163

实验三 交通信号灯控制实验	165
实验四 简单的顺序控制程序编程实验	167
实验五 PLC 编程综合应用	168
实验六 三层电梯模拟控制	170
附录 A 指针式电工仪表表盘上常用的符号及其意义	173
附录 B STEP7—Micro/MIN 32 编程软件的使用简介	175
附录 C S7—200 常用特殊存储器 SM 的信息位	185
参考文献	186

第 1 章 指针式电工仪表

1.1 指针式电工仪表简述

1.1.1 指针式电工仪表的组成

指针式电工仪表主要由测量机构和测量线路组成，配上读数装置就可以由指针的偏转指示来取得测量的量值。

1. 测量机构

指针式电工仪表的测量机构是一个接受电量后产生偏转运动的机构。它能将被测电量转换成仪表可动部分的偏转角，并在转换过程中保持接受的电量和产生的偏转角成函数关系。测量机构大都由固定部分(永磁材料或线圈)和可动部分(线圈或软磁铁片)两大部分组成，这两部分通过电磁力的相互作用来产生转动力矩带动指针偏转以指示电量，故常称这种测量机构为机电式测量机构，这类仪表也随之称为机电式电工仪表。

2. 测量线路

指针式电工仪表测量线路的作用，是将被测量 x (如电流、电压、相位、功率等)转换为测量机构可以直接接受的过渡量 y (如电流)，并保持一定的变换比例。测量线路通常由电阻、电感、电容及电子元件组成。

同一种测量机构配合不同的测量线路，可组成多种测量仪表。指针式电工仪表的测量过程如图 1-1 所示。

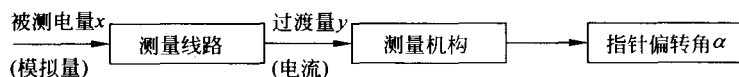


图 1-1 指针式电工仪表的测量过程

3. 读数装置

指针式电工仪表的读数装置由指示器和标尺(又称刻度盘)组成。

指示器有指针式和光标式两种。指示器的指针由铝或玻璃纤维制成,重量极轻。指针式又分为刀形和矛形。刀形指针要近观细看,多用于便携式仪表中,以利取得精确读数;矛形指针远看醒目,用于大、中型安装式仪表中,便于一定距离之外读取指示值。

光标式指示器不用指针读取指示值,它借助于一套光学系统将测量机构的偏转角聚成一个光点射到刻度盘上来读取指示值,它可以完全消除视差,但结构复杂,只在一些高灵敏度、高准确度的仪表上使用。

标尺是一块标有刻度的表盘,标尺可以是线性的(刻度均匀),也可以是非线性的(刻度不均匀)。为减小视差,0.5级以上的精密仪表通常在标尺下面安装一个反射镜(又称为镜子标尺),当看到指针和指针在镜子中的影像重合时才进行读数。

指针式电工仪表的表盘除了读数装置外,尚有一定的空间,常用来将仪表的各种技术参数以符号的形式表示在表盘的下方,以便使用者对仪表的性能有一定了解。指针式电工仪表表盘上常用的符号及其意义详见附录A。

1.1.2 指针式电工仪表测量机构的基本工作原理

指针式电工仪表的测量机构从结构特点来划分,主要由固定部分和可动部分组成,这两个部分通过电磁力的相互作用产生作用力矩(转矩),构成驱动机构,给出偏转指示。为了和这个作用力矩取得平衡,从而得到稳定偏转,在可动部分的转轴上必须装有反作用力矩装置,其产生的反作用力矩(也称为控制力矩)用于控制可动部分的偏转。反作用力矩装置一般用游丝、张丝、吊丝等组成而产生,有些特殊仪表也可以用一个通电流的线圈来产生。为了使仪表指针在测量中很快静止以便读数,还需要有阻尼装置。

可见测量机构必须包含转矩装置、反作用力矩装置和阻尼装置三部分。除此以外,在结构上测量机构还要有支架、转轴、轴承、调零器等附件。

1. 转矩装置

为了使指针式仪表可动部分的偏转角反映被测电量的大小,测量机构必须具有产生转动力矩的装置。不同类型的仪表,产生转动力矩的原理和方式也不相同。例如,磁电系仪表是利用永久磁铁与通电线圈之间的电磁力产生转矩,而电动系仪表则利用两个通电线圈之间的电磁力产生转矩。转动力矩 M 的大小与被测量 x (或过渡量 y)及偏转角 α 之间必须满足某种函数关系,即有

$$M = f(x, \alpha)$$

2. 反作用力矩装置

仪表可动部分在转矩 M 作用下, 将带动指示器偏转。但是, 如果在仪表可动部分上只有转矩而无反作用力矩作用, 则不论被测量为多大, 只要转矩 M 能克服可动部分的摩擦力矩, 都将使指示器一直偏转到尽头。所以, 没有反作用力矩的仪表只能反映被测量的有无, 而不能测量其大小。因此在可动部分的转轴上必须装设反作用力矩装置。

反作用力矩装置一般由游丝或张丝构成, 图 1-2 为用游丝产生反作用力矩的装置。当可动部分偏转时游丝被扭紧, 利用游丝的弹力(或张丝的扭力)产生反作用力矩。反作用力矩的方向总是与转矩方向相反, 而其大小在游丝的弹性变形范围内与可动部分偏转角 α 成正比。

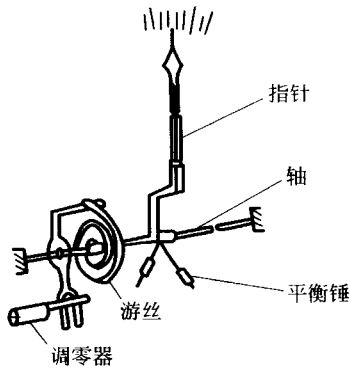


图 1-2 反作用力矩的装置

当被测量一定时, 测量机构的转动力矩 M 也是一定的, 可动部分在这个力矩的作用下开始偏转。随着偏转角 α 的增大, 反作用力矩 M_a 也不断增大, 直到反作用力矩 M_a 与转矩 M 平衡, 此时可动部分不再偏转, 而稳定在一定的偏转角 α 上。

即

$$M = M_a \quad (1-1)$$

当被测量增大时, 测量机构的转动力矩 M 也随之增大, 式(1-1)所示的力矩平衡关系被破坏, 可动部分又开始转动而使偏转角 α 继续增大, 于是反作用力矩随之增大, 直到力矩达到新的平衡状态为止。这时可动部分稳定于一个较大的偏转角, 正好与被测量增大的数值相对应。这样达到了用偏转角 α 来表示被测量的目的。

以上所述利用游丝、张丝产生的反作用力矩, 属于机械反作用力矩, 在仪表中应用较多。此外, 有的仪表也用电磁力来产生反作用力矩, 如兆欧表等。

3. 阻尼装置

用电工仪表测量时，其可动部分就要偏转。当偏转到 $M = M_0$ 的平衡位置时，由于惯性不能马上停止偏转，会在平衡位置左右来回摆动，这样要经过一段时间才能稳定在平衡位置上。为了减少可动部分摆动的时间以便尽快读数，仪表中还必须有阻尼装置，用来消耗可动部分的动能，即限制可动部分的摆动。常用的仪表阻尼装置，有空气阻尼器和磁感应阻尼器两种，结构如图 1-3 所示。

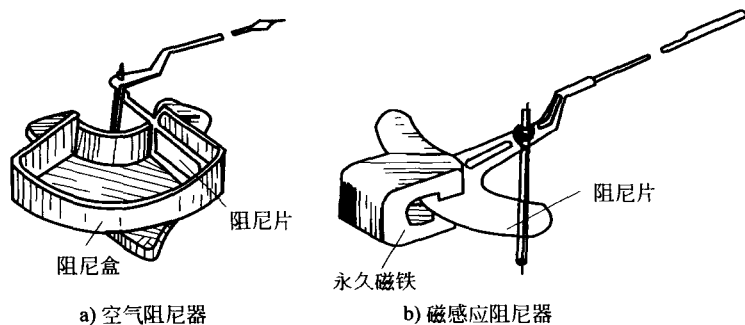


图 1-3 仪表阻尼装置

图 1-3a 中，所示的空气阻尼器有一密闭小盒，盒中的阻尼片固定在仪表转轴上。当可动部分偏转时带动阻尼片运动，由于盒中的阻尼片两侧空气压力差而形成了阻尼力矩。图 1-3b 中所示为磁感应阻尼器。当可动部分偏转时，带动阻尼金属片在永久磁铁的磁场内运动，因切割磁力线将产生涡流，其方向如图 1-4 所示。若阻尼金属片向左运动，则产生的涡流方向如图中虚线所示，永久磁铁的磁场 B 和涡流相互作用的结果，产生一个向右的阻尼力矩。

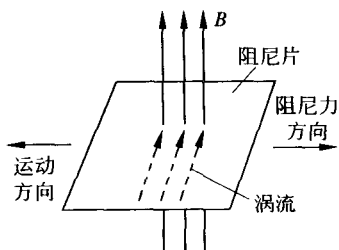


图 1-4 磁感应阻尼器原理

需要指出的是，阻尼力矩只能在可动部分运动时才产生，它仅与可动部分的运动速度有关而与偏转角无关，即可动部分的稳定偏转角只由转动力矩和反作用力矩的平衡关系所确定，而与阻尼力矩无关。

1.2 指针式电工仪表的主要技术指标

通常，指针式电工仪表的主要技术指标包括足够的准确度、适当的灵敏度、良好的标尺特性、较小的阻尼时间、较少的功率损耗、较强的过载能力；还要求频率范围宽、绝缘耐压力强及其工作环境(温度、湿度等)宽松等。

1.2.1 准确度

指针式电工仪表准确度，通常指仪表的准确度级别。它表示仪表在正确和正常使用下所具有的最大引用误差(将在第3章详细叙述)，如1.0级，2.5级等。选用仪表的准确度要与测量所要求的准确度相适应，即根据实际需要和具体条件来选用相应准确度级别的仪表，而非一味追求准确度级别越高越好。例如测量三相交流电压，由于供电部门本身提供的参量是线电压 $380\text{V} \pm 10\%$ ，故只要选用2.5~5.0级表就可以了，再选正确度高也就没有必要了，而且正确度高的仪表成本也必定会高。通常0.1级和0.2级仪表多用做标准仪表以校准其他工作仪表；0.5级、1.5级表可作为一般测量用表。

1.2.2 灵敏度和仪表常数

将指针式仪表的指针或光点偏转角的变化量与被测量的变化量之比称为仪表的灵敏度，其表达式为

$$S = d\alpha/dX \quad (1-2)$$

式中， S 为仪表灵敏度； α 为偏转角； X 为被测量。

由此可见，灵敏度取决于仪表的偏转性能，并与被测量性质有关，它是单位被测量的偏转角。灵敏度反映了仪表对被测量的反应能力，单位为：格/安或格/伏。在电工仪表中，电流灵敏度有时也用指针满偏转(满量程)电流来表示。

将灵敏度的倒数称为仪表常数，用 C 表示，即

$$C = 1/S$$

例如将 $1\mu\text{A}$ 电流通入微安表，若偏转刻度10格，则其灵敏度 S 为10格/ $1\mu\text{A}$ ，仪表常数 C 则为 $1\mu\text{A}/10$ 格。仪表的偏转角一般为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 或 $0^\circ \sim 110^\circ$ 。在有限的偏转范围内，灵敏度越高就意味着量限越小。不同类型仪表其灵敏度有时相差很大。仪表灵敏度反映了仪表所能测量的最小被测量。对于测量同一被测量(如测量电压)的不同型号仪表，其

结构不同,即使有相同的电压灵敏度也可能有不同的电流灵敏度,反之亦然。因此选用仪表时不要顾此失彼,应综合考虑,相互兼顾。

1.2.3 功耗

当指针式仪表被接入被测电路时,经测量线路和测量机构会消耗一些功率,这称为仪表功耗。功耗也是仪表的一个重要参数,它由仪表的类型和结构决定。当被测电路的功率不大时,仪表消耗的功率将会改变电路的工作状态,因而带来很大的测量误差。这种测量误差并不是由于仪表示值不准确而引起的,所以它与仪表的准确度等级无关。仪表消耗的功率对电路的影响,通常可通过仪表内阻来表示:电流表用它们的满标(量程)的电压降表示;电压表用满标的电流或每伏欧姆数表示。因此,选择仪表时其内阻也是要考虑的一个主要因素:对于电流表应有尽可能小的内阻抗,对于电压表应有尽可能大的内阻抗;而功率表应具有以上两者的有利因素才能使功耗尽可能小。

仪表功耗的考虑也要根据实际被测电路而定,有时可以不予考虑,而有时必须考虑。例如用电压表测量稳压电源电压时,无论电压表的内阻抗值为多少(或功耗多少),该电源电压不会因仪表功耗大小而有所改变;相反若被测电路本身是高阻抗的,即使电压表功耗不太大,也会导致被测电路本身的参数的变化,从而引起测量误差。

1.3 磁电系仪表

1.3.1 磁电系仪表测量机构的结构及工作原理

1. 结构

磁电系仪表测量机构由固定的磁路系统和可动部分组成,其结构如图 1-5 所示。仪表的固定部分是永久磁铁组成的磁路系统,用它来得到一个较强的磁场。在永久磁铁的两极,固定着极掌,两极掌之间是圆柱形铁心。圆柱形铁心固定在仪表的支架上,用来减小两极掌间的磁阻,并在极掌和铁心之间的空气隙中形成均匀辐射的磁场,即圆柱形铁心的表面,磁感应强度处处相等,且方向和圆柱表面垂直。圆柱形铁心与极掌间留有一定的空隙,以便可动线圈在空隙中运动。

仪表的可动部分是薄铝片做成的一个矩形框架,上面用很细的漆包线绕有多匝线圈。转轴分成前后两个半轴,每个半轴的一端固定在动圈铝框上,另一端通过轴尖支承于轴