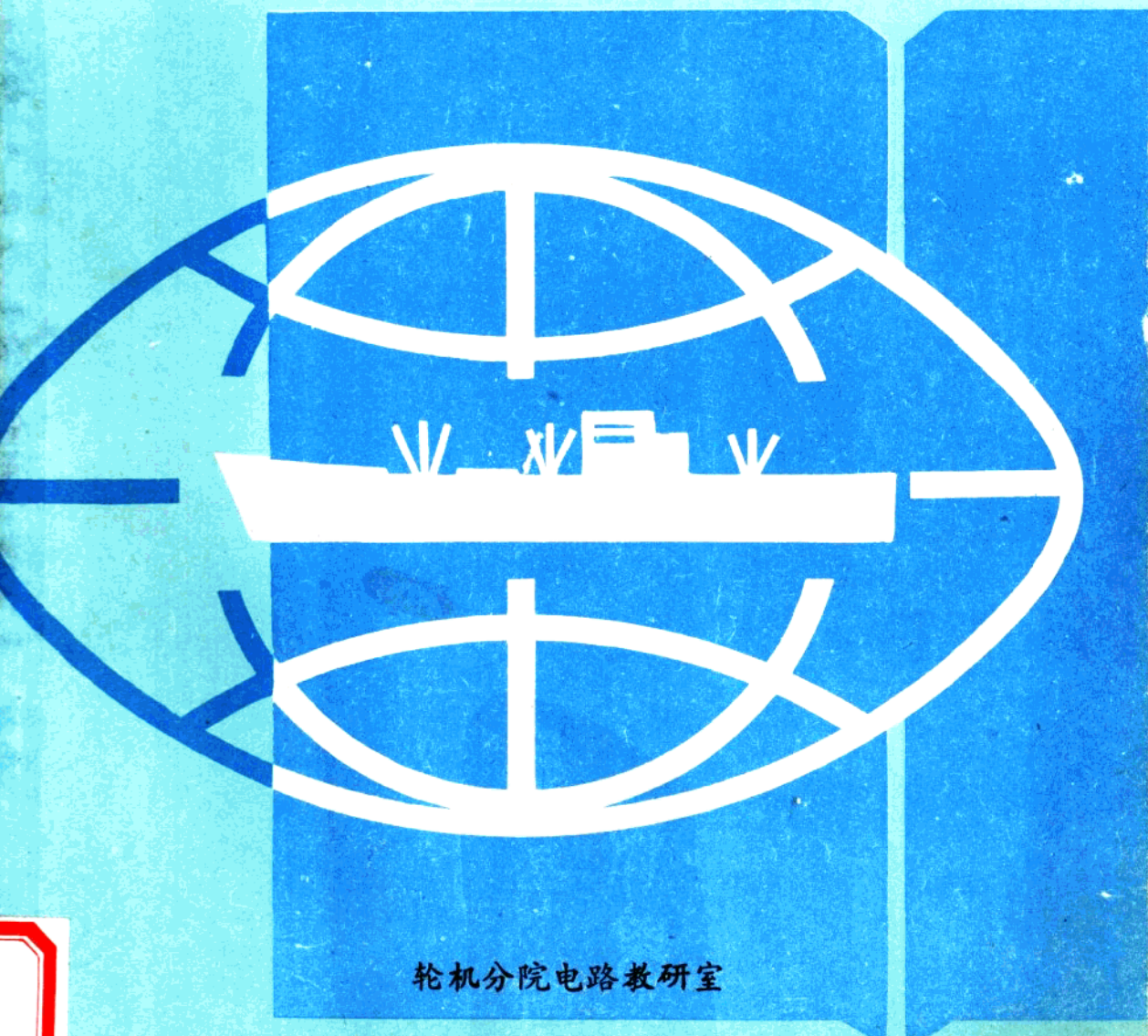


大连海运学院自编讲义

船电测量仪表

王维刚 姚淑惠 编



轮机分院电路教研室

前 言

本书为海运院校船电专业及电气自动化职业专科试用教材，也可供船舶电机员及电气工程技术人員参考。

本书介绍了磁电系、电磁系、电动系、感应系等类型仪表。着重介绍了电流表、电压表、功率表、万用表、兆欧表、相位表、电度表以及测量用互感器和交流电桥的结构，原理和使用方法。

本书是由王维刚和姚淑惠编写，薛继汉副教授详细审稿，并提出许多宝贵意见，在此谨致谢意。

由于编者水平有限，缺少经验，编写时间仓促，书中定存在错误和不妥之处，恳请读者批读指正。

1992年11月

目 录

第一章 电气测量指示仪表的一般知识	1
第一节 电气测量指示表的分类	1
第二节 电气测量指示仪表的组成及其基本原理	2
第三节 电气测量指示仪表的误差及准确度	4
第四节 电气测量指示仪表的主要技术要求	7
第五节 电气测量指示仪表的表面标记	8
第二章 磁电系仪表的结构及工作原理	12
第一节 磁电系仪表的结构及工作原理	12
第二节 磁电系电流表	15
第三节 磁电系电压表	16
第四节 磁电系仪表的技术特性	17
第三章 万用表	19
第一节 万用表的基本组成结构	19
第二节 万用表的直流电流档	21
第三节 万用表的直流电压档	25
第四节 万用表的交流电压档	27
第五节 万用表的欧姆档	32
第六节 电平测量	39
第七节 万用表的技术特性	42
第八节 万用表的正确使用	43
第九节 万用表的简单设计	44
第十节 万用表的校验与调整	47
第四章 兆欧表	53
第一节 兆欧表的结构及原理	53
第二节 兆欧表的正确使用	56
第三节 兆欧表的调整及校验方法	60
第五章 电磁系仪表	61
第一节 电磁系仪表的结构及工作原理	61
第二节 电磁系电流表和电压表	64

第三节	电磁系仪表的技术特性	65
第四节	电磁系整步表	66
第六章	电动系仪表	68
第一节	电动系仪表的结构及工作原理	68
第二节	电动系电流表及电压表	70
第三节	电动系功率表	72
第四节	三相电路的功率测量	76
第五节	电动系单相相位表	78
第六节	电动系三相相位表	81
第七节	电动系频率表	83
第七章	电度表	87
第一节	交流单相电度表的基本结构	87
第二节	单相电度表的工作原理	88
第三节	交流电能的测量 三相有功电度表	97
第四节	三相无功电能的测量 三相无功电度表	99
第五节	电度表的正确使用	103
第八章	测量用互感器	107
第一节	互感器的用途及结构	107
第二节	互感器的误差	108
第三节	电流互感器	110
第四节	电压互感器	113
第五节	钳形电流表	114
第九章	交流电桥	118
第一节	交流电桥的基本原理	118
第二节	交流指零仪和电源	120
第三节	电容电桥	121
第四节	电感电桥	123
第五节	交流电桥的正确使用	125
第十章	电气测量指示仪表的选择及测量方法	127
第一节	电气测量指示仪表的选择	127
第二节	基本电参数的测量方法	129
第十一章	数字万用表	134

附 1：机械振动式频率表 152

附 2：万用表设计任务书 153

第一章 电气测量指示仪表的一般知识

所谓测量就是使用仪器去测定并决定某一物理量或数值变化量的方法，它是人们认识物质世界和改造世界的重要手段。而电气测量则是利用电工仪器、仪表来直接测量电路中各电量（如电压、电流、功率、电阻、相位以及频率等）或经过转换间接测量多种非电量（如磁通、温度、压力等）。

由于电能已成为现代工业、现代农业和交通运输业的主要动力源，因此在电能的生产，输送，控制和应用方面，电气测量仪表获得了广泛的应用并成为其主要的测量工具之一。作为船舶电气设备管理人员掌握一些常用电气测量指示仪表的结构，原理和使用方法等方面的知识是很有必要的。

第一节 电气测量指示仪表的分类

电气测量指示仪表的种类繁多，分类方法也很多。了解电气测量指示仪表的分类，有助于认识它们所具有的特性，对我们了解电气测量指示仪表的概况也有一定的帮助，下面介绍几种常见的分类方法。

一、根据电气测量指示仪表的工作原理分类

主要有以下几种：磁电系；电磁系；感应系；整流系；静电系；热电系和电子系等。

本书主要介绍船舶电气测量中常用的前五种。

二、根据被测量的名称（单位）可分为：

电流表（安培表、毫安表、微安表）；电压表（伏特表、毫伏表）；功率表（瓦特表）；兆欧表；电度表；相位表（或功率因数表）；频率表以及多种用途的仪表，如万用表等。

三、根据使用方式可分为：

开关板式与可携式仪表

开关板式仪表（简称板式仪表），通常固定安装在开关板上或某一装置上。一般误差较大，价格较低。

可携式仪表通常做成可携型式，这种仪表一般误差较小，价格较贵。

四、根据仪表工作电流的种类可分为：

直流仪表；交流仪表；交直两用仪表。

此外，按仪表的准确度等级可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。按仪表对电磁场的防御能力可分为 I、II、III、IV 四级。按仪表的使用条件可分为 A、B、C、三组。

第二节 电气测量指示仪表的组成及工作原理

一、仪表的组成

电气测量指示仪表的主要作用是将被测电量转换成仪表的可动部分的机械偏转角度来反映被测电量的大小。为了完成这个转换过程，仪表就必须由两个基本部分组成，即测量线路和测量机构。

测量线路的作用是将被测量 x ，如电压、电流、功率等转变为测量机构可以接受的过渡量（电磁量） y 。测量线路是由电阻，电容、电感及电子元件所组成。

测量机构是将过渡量 y 转变为可动部分的机械偏转角 α 或位移，它是电气测量指示仪表的核心，是由固定可动两部分组成的。

电气测量指示仪表的组成方框图如图 1—1 所示。

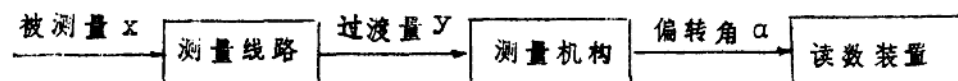


图 1—1

二、测量机构的结构及工作原理

仪表的测量机构由两部分组成，一部分是固定的，另一部分是可动的。用来指示被测量数值的指针或光点反射装置都装在可动部分上。

测量机构的作用原理包括：

1、产生转动力矩

要使仪表的指针转动，在测量机构内必须有转动力矩作用在指示仪表的可动部分上。转动力矩一般是由磁场和通有电流的线圈之间的相互作用力产生的。或由磁场将铁磁物质磁化后产生的作用力产生的。磁场的建立可以利用永久磁铁，也可以利用通有电流的线圈。

转动力矩的大小与测量的数值有关，它是被测量 x 的函数，即

$$M_{\alpha} = f(x)$$

2、产生反作用力矩

仪表可动部分在转动力矩的作用下产生偏转时，如果没有一个反作用

力矩与其平衡，则不论被测量的大小如何，可动部分都会偏转到满刻度位置，直到不能再转动时为止。这样的指示仪表只能反映出被测量的有无，而测不出被测量的大小。因此，为使仪表能指示出被测量的大小就必须在测量机构的可动部分上加入一个反作用的力矩 M_F 。这样，当转动力矩与反作用力矩相等时，可动部分就停止转动，指示出被测量的数值。

反作用力矩 M_F 除方向与转动力矩相反外，其数值的大小还是偏转角度 α 的函数即

$$M_F = F(\alpha)$$

在电气测量指示仪表中产生作用力矩的办法有：

(1) 利用机械力

产生反作用力矩的机械元件通常有：游丝、张丝或悬丝。其基本作用原理是利用它们在弹性变形后所具有的弹性恢复力作用到可动部分上产生反作用力矩，反作用力矩 M_F 的大小与偏转角度 α 成正比。

$$M_F = W \cdot \alpha$$

式中 W 是反作用力矩系数，为常数。

利用电磁力产生反作用力矩的指示仪表通常在不使用时指针停留在任意位置上。

3、产生阻尼力矩

从理论上来说，在指示仪表中，当转动力矩和反作用力矩相等时，仪表指针应静止在某一平衡位置，但由于仪表可动部分具有惯性，它不能立即就静止下来，而是围绕这个平衡位置左右摆动不已，这种情况将造成读数的困难。为了缩短这个摆动时间，必须使可动部分在运动过程中受到一个与运动方向相反的力矩的作用，这个力矩称为阻尼力矩，它仅与可动部分的运动速度有关，而与偏转角度无关。换句话说，就是阻尼力矩只在可动部分的偏转过程中起作用，不会影响稳定偏转值。它的作用是使仪表的可动部分更快静止在最后的平衡位置上，产生阻尼力矩的装置称阻尼器，电气测量指示仪表中常用的阻尼器有：

(1) 空气阻尼器

空气阻尼器是利用仪表可动部分在运动过程中带动在阻尼箱内的阻尼翼片运动时受到空气的阻力作用来产生阻尼力矩的，这种阻尼器一般多用在电磁系和电动系指示仪表中。

(2) 磁感应阻尼器

磁感应阻尼器是利用仪表可动部分在运动过程中带动金属阻尼翼片切割

永久磁铁的磁力线，在翼片中产生感应电流，再由这个感应电流与磁场的相互作用力来产生阻尼力矩。

总的来说，转动力矩和反作用力矩是仪表内部的一对主要矛盾，两者的相互作用决定了仪表的稳定偏转位置，而转动力矩又是该矛盾的主要方面。因此，正是由于产生转动力矩的方法和机构的不同，从而构成了各种不同类型的仪表，如磁电系，它磁系，电动系和感应系等。

第三节 电气测量指示仪表的误差及准确度

一、误差的定义

由于没有任何一个仪表可以做到百分之百的准确，并且在实际测量中，由于测量方法的不完善以及各种外界环境因素和人为因素的影响，都会使仪表的指示值与被测量的实际值之间存在着一定的差异，这个差异称为误差。

关于误差的定义，常见的有如下几种：

1、绝对误差

指示值 A_x 和被测量的实际值 A_0 之间的差值叫做绝对误差，以符号 Δ 表示，即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

绝对误差的单位与被测量的单位相同，在计算时可以用标准表（用来检定工作仪表的高准确度仪表）的指示值作为被测量的实际值。

在实际测量中还常用到更正值这一概念，它与绝对误差等值符号相反，以符号 C 表示，即

$$C = -\Delta = A_0 - A_x \quad (1-2)$$

在测量中引进更正值后，就可以对仪表的指示值进行校正，以消除其误差。

2、相对误差

绝对误差 Δ 与实际值 A_0 之比的百分数称为相对误差，以符号 r 表示，即

$$\begin{aligned} r &= \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \\ &= \frac{A_x - A_0}{A_0} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-3)$$

在相对误差的实际计算中，有时难于求得被测量的实际值，这时也可以

用测量结果 A_x 代替实际值 A_0 ，而近似求得：

$$r = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\%$$

3、引用误差

绝对误差 Δ 与仪表测量上限 A_n 之比的百分数称为引用误差，以符号 r_n 表示，即

$$r_n = \frac{\Delta}{A_n} \times 100\% \quad (1-4)$$

例如，用一只标准电压表检定一只 1.5 级、0~250 伏的电压表，在被检表 200 伏那一点的标准表的指示为 203 伏，则

$$\text{绝对误差} \quad \Delta = A_x - A_0 = 200 - 203 = -3 \text{ 伏}$$

$$\text{更正值} \quad C = -\Delta = 3 \text{ 伏}$$

$$\text{相对误差} \quad r = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{-3}{203} \times 100\% = -1.48\%$$

$$\text{引用误差} \quad r_n = \frac{\Delta}{A_n} \times 100\% = \frac{-3}{250} \times 100\% = -1.2\%$$

二、误差的种类

1、系统误差

在同样条件下多次测量同一量时，维持不变或按一定规律而改变的误差称为系统误差，这种误差一般分为两类：

(1) 仪器误差（基本误差），这种误差来源于仪表本身机械结构的缺点和仪表刻度的准确性。例如测量机构可动部分的支持轴承的摩擦作用就会引起不正确的结果；或是游丝，张丝等的弹力不稳定，刻度划分的不精密都会造成仪表产生偏差。这种误差是仪表本身所固有的，是无法在测量中消除的。

(2) 环境误差，这种误差来源于外界环境对仪表的影响如温度、湿度、大气压力的变化或周围电磁场的影响等。这种误差可以通过在规定的环境条件下正确使用仪表或根据环境条件对仪表读数的影响进行更正来消除。

2、人为误差

人为误差主要包括读取数值或记录数值及计算测量结果时所产生的误差。如将数值读错，读数不准确，算错数据以及仪表选择不当等。因为仪表的使用者是人，因此人为误差就不可避免，虽然人为误差不可能完全消除。但可以通过对仪表的正确使用条件的了解，适当的选用仪表，正确的读取数

来减少此项误差。

3、随机误差(偶然误差)

在相同条件下多次测量同一量时, 误差绝对值和符号均发生变化, 其时大时小, 没有一定的变化规律, 又不能事前预定的误差称为随机误差。和误差是由各种影响所造成的。例如, 电磁场的变化, 热起伏空气扰动, 地微震, 测量人员感觉器官的生理变化等一些互不相关的独立因素, 对定值的综合影响均将造成随机误差, 它是任何时刻都存在的。

随机误差服从统计规律, 对它的计算可分为:

(1)算术平均值: 对同一被测对象的多次测量结果, 设测量次数为 n 所值为 $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$, 其算术平均值为

$$A_p = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{n} \quad (1-5)$$

(2)偏差: 任一次的测量结果与所有读数的算术平均值之间的差值, 以 Δ_1 表示

$$\Delta_1 = A_1 - A_p \quad (1-6)$$

差值可正可负, 所有偏差之和为零。

(3)平均偏差值:

$$\alpha = \pm \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2| + |\Delta_3| + \dots + |\Delta_n|}{n} \quad (1-7)$$

平均偏差是表示仪表的准确度的最好方式, 仪表的准确度越高, 其平均差就越小。

(4)标准偏差(均方根偏差)

所有偏差值的平方和除以读数次数减一后再开平方, 以符号 σ 表示

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \dots + \Delta_n^2}{n-1}} \quad (1-8)$$

平均偏差值和标准偏差值是用来估计对某一被测量多次测量的精度的

三、仪表的准确度

准确度是表示待测量的实际值与指示值的接近程度。当仪表在额定条件工作时, 在它的标度尺的工作部分(指标尺度上仪表指示值误差保证在允误差以内的部分)的全部分度线上, 可能出现的最大基本误差, 以引用误差表示的百分数就称为仪表的准确度等级。对于常用的单相标度尺的指示仪表来说, 若以 K 表示它的准确度等级, 则有

$$\pm K \% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 Δ_m 是以绝对误差表示的最大基本误差； A_m 是仪表的量程，从式 (1-9) 中可以看出，仪表的准确度等级实际上就是仪表的最大引用误差。

目前我国生产的电气测量指示仪表，根据我国国家标准 GB776-76 《电测量指示仪表通用技术条件》规定，准确度分为七级，即 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 级。准确度较高的 0.1、0.2 级仪表用来进行精密测量或校正其它仪表，0.5、1.0、1.5 级仪表用作实验室测量仪表，2.5、5.0 级仪表用作工程测量仪表。

知道了仪表的准确等级之后，在实际测量中，我们就可利用准确度估计测量结果的误差。

例：用准确度为 0.5 级，量程为 5 A 的电流表，在规定条件下测量某一电流，其读数为 2.5 A，求测量结果的相对误差是多少。

解：可能出现的最大绝对误差为：

$$\begin{aligned} \Delta_m &= \pm K \% \cdot A_m = \pm 0.5\% \times 5 \\ &= \pm 0.025 \text{ A} \end{aligned}$$

故测量结果可能出现的最大相对误差为：

$$r = \frac{\Delta_m}{A} \times 100\% = \frac{\pm 0.025}{2.5} \times 100\% = \pm 1\%$$

第四节 电气测量指示仪表的主要技术要求

要保证测量结果的真实性，就必须对测量仪表提出一定的质量要求。为了衡量电气测量指示仪表的质量，我国制订了国家标准 GB776-76 《电测量指示仪表通用技术条件》，对仪表质量提出了全国的要求。对于一般电气测量指示仪表来说，主要有以下几个方面的要求：

一、有足够的准确度

仪表的基本误差与该仪表所标明的准确度等级相符，具体说来，即在仪表标度尺的工作部分的所有分度线上仪表的基本误差不应超过表 1-1 的规定。

表 1-1 各级仪表的基本误差

仪表的准确度	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 %	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

二、受外界因素影响小

当外界因素如温度、外电场和磁场等影响量的变化超过仪表规定条件时所引起的仪表的指示值的变化应当愈小愈好。

三、要有适合于被测量的灵敏度

灵敏度是指仪表的指示值（可动部分的偏转角）的变化量 $\Delta\alpha$ 与对应的被测量的变化量 Δx 之间的比值，以符号 S 表示，即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x}$$

仪表的灵敏度的高低反映出仪表能够测量的最小被测量。要求仪表具有较高的灵敏度，对于各项精密测量工作往往是非常重要的。

四、仪表本身所消耗的功率要小

在测量过程中，仪表本身必须要消耗一部分能量。当被测电功率很小时，若仪表本身消耗的功率太大，将使电路工作状态改变，因而引起误差。

五、有足够高的绝缘电阻，耐压能力和过载能力

为了保证使用上的安全，仪表应有足够高的绝缘电阻和耐压能力。仪表的绝缘电阻是指仪表及其附件中的所有线路与它的外壳之间的绝缘电阻，耐压能力就是指这一绝缘电阻所能承受的试验电压的数值。

除某些特殊型式的仪表外，其它仪表均应能承受短时间的过载，仪表过载能力的大小，均有一定的规定，一般开关板式仪表的过载能力较大，而便携式仪表则小得多，这在使用时应特别注意。

对于船舶电气测量仪表除应满足GB776-76《电测量指示仪表通用技术条件》中的规定外，还应满足国家《钢制海船建造规范》中的有关要求。

第五节 电气测量指示仪表的表面标记

每一个电气测量指示仪表的面板上都有多种符号的表面标记，它们显示了仪表的基本技术特性。只有在识别了这些标记之后，才能正确地选择和使用仪表。

现将常见的电气测量指示仪表的表面标记的符号列表介绍如下：

表 1—2 仪表种类符号

被测量	仪表名称	符 号	被测量	仪表名称	称 号
电 流	安培表	A	功 率	千瓦表	K W
电 流	毫安表	m A	功 率	瓦特表	W
电 流	微安表	μ A	相 位 差	相位表	φ
电 压	千伏表	K V	频 率	频率表	H Z
电 压	伏特表	V	功率因数	功率因数表	$\cos \varphi$
电 压	毫伏表	m V	电 阻	兆欧表	M Ω
电能量	电度表	Kwh	电 阻	欧姆表	Ω

1—3 仪表工作原理图形符号

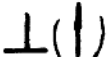
名 称	符 号	被 测 量 的 种 类	电 流 的 种 类 与 频 率
磁 电 系		电流、电压、电阻、非电量	直流
电 磁 系		电流，电压	直流及工频交流
电 动 系		电流、电压、功率、功率因数、电能量	直流与工频及较高频的交流
整 流 系		电流、电压、功率	工频及较高频的交流
感 应 系		电功率，电能量	工频交流

铁磁电 动系		电流, 电压, 功率, 功率因数, 频率	工频交流
热电系		电流	工频及高频交流

表 1—4 电流种类符号

名 称	符 号	名 称	符 号
直 流	—	交 直 流	
交 流	~	三 相 交 流	

表 1—5 其它标记符号

名 称	符 号	名 称	符 号
准确度等级如 1.5 级	1.5	仪表的绝缘受过 2 千伏的耐压实验	
仪表工作时垂直放		仪表的绝缘不进行试验	
仪表工作时水平放		B 组仪表 (工作环境 -20~50℃, 湿度 85%)	
仪表工作时与水平面倾斜一个角度 (60°)			
负端钮	—		

正端钮	+	C 组仪表 (工作环境 为 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$, 湿度 98% 以下)	
公共端钮	✕		
接地用端钮	$\perp$		
调零器		A 组仪表 (工作环境 为 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$, 湿度 85% 以下)	
II 级防外磁场			
II 级防外电场			

附:

防外磁场等级的划分标准是: 在直流仪表最不利的方向下加 400 [安匝/米] 的直流均匀外磁场。在交流仪表最不利的方向和相位下, 加上与被测量同频率的正弦交流均匀外磁场, 当仪表最大额定频率 $f \leq f_K$ 时, 为 $400f_K/f$ [安匝/米] (f_K 为仪表的外磁场极限频率通常为 1000Hz), 各级的误差不应超过表 1—6 的范围。

表 1—6

准确度等级	允许的仪表指示值改变%			
	I 级	II 级	III 级	IV 级
0.1, 0.2, 0.5	± 0.5	± 1.0		
1.0, 1.5			± 1.0	± 2.5
2.5, 5.0			± 2.5	± 5.0

第二章 磁电系仪表的结构及工作原理

磁电系仪表在电气测量指示仪表中占有极其重要的地位，应用也十分广泛。它常用来测量直流电路中的电压、电流，以及作为零值指示器（检流计）。磁电系仪表加上整流器后就变为整流系仪表，可以测量交流电路中的电压、电流等，若在磁电系仪表内附上电池，则还可以用来测量电阻值。

磁电系仪表的测量机构的特点是，由永久磁铁和通有电流的动圈之间的相互作用力推动动圈并带动其它可动部分偏转，指示被测量的大小。可动部分可以是通有电流的动圈，也可以是永久磁铁。因此，磁电系仪表又可分为动圈式和动磁式两种。由于目前生产和使用的多是动圈式的仪表，所以本章只介绍动圈式仪表的结构、原理及特性和其应用。

第一节 磁电系仪表的结构及工作原理

一、磁电系仪表的结构

磁电系仪表的测量机构如图 2—1 所示，构成仪表固定部分的是磁系统而构成仪表可动部分的是动圈，指示器（如指针或灯光反射镜）。可动部分是由轴尖、宝石或张丝支承的。

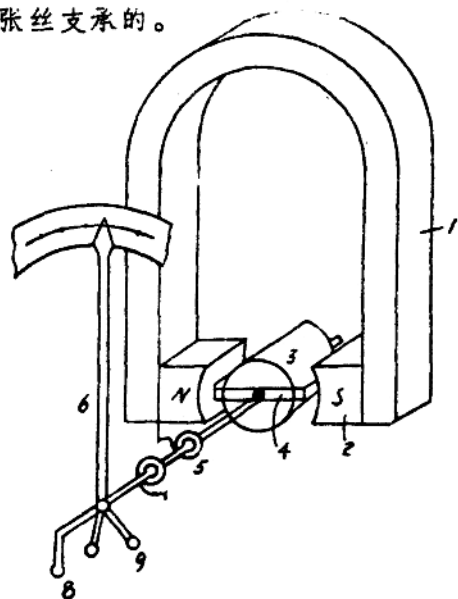


图 2—1