

电工仪表和测量

周洪涛 洪绰然

小型水电站运行工人培训教材

水利电力出版社

小型水电站运行工人培训教材

电工仪表和测量

周洪涛 洪绰然

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 7.5印张 192千字

1987年8月第一版 1987年8月北京第一次印刷

印数00001—18150册 定价1.90元

书号 15143·6414

内 容 提 要

本书是“小型水电站运行工人培训教材”的一个分册。内容包括电气测量的指示仪表和较量仪表两大部分，共十三章。第一章为电工仪表的一般知识，第二章至第九章为常用指示仪表，第十章至第十二章为常用较量仪表，考虑到数字仪表的发展，在第十三章中也作了简述。关于互感器的内容未列入本书，将在本培训教材的《水电站电气一次部分》中介绍。

本书参考学时为50学时，讲授时应尽量结合实物参观或模型演示，使学生对各类仪表、仪器的结构原理和使用方法得到直接的感性知识。

前 言

近年来,我国小水电建设发展很快。为了提高小水电站、电网运行工人的技术和管理水平,充分发挥小水电的经济效益,巩固和扩大办电成果,迫切需要加强对职工进行技术培训。为此,我们组织成都科技大学的有关同志,编写了培训讲义。经多次使用并广泛征求读者意见,现修改编写成这套“小型水电站运行工人培训教材”,供各地举办技术培训使用。全套教材共十一册:《电工数学基础》、《电工原理》、《电子技术及应用》、《电机原理和运行》、《电工仪表和测量》、《水电站电气一次部分》、《水电站电气二次部分》、《小型电力系统》、《水轮机》、《水轮机调节》、《水轮发电机组辅助设备及自动化》。本教材内容丰富,针对性较强,理论联系实际,凡小型水电站及35千伏及以下电网运行、维护、检修中应当掌握的主要知识,都作了较系统的讲述。对有关领域的新设备和新技术,也有简要的介绍。

本教材适用于培训具有初中毕业文化程度的小型水电站和电网的发、供电运行工人,也可作为具有同等文化程度的有关人员自学参考书。各地可根据实际需要,选用其中有关分册,进行培训。培训班一般以半年为一期,总教学时数控制在500学时左右。

《电工仪表和测量》一书由周洪涛同志主编,其中第一章至第六章由洪绰然同志编写,第七章至第十三章由周洪涛同志编写,蔡家鲤同志审阅,教学时数约为50学时。

由于受经验和水平的限制,书中存在的缺点和问题,恳请读者批评指正。

四川省地方电力公司

1982年12月

目 录

第一章	电工仪表的基本知识	1
1-1	电工仪表的基本结构和原理	1
1-2	电工仪表的分类、标记和型号	5
1-3	指示仪表的误差和准确度	11
1-4	指示仪表的主要技术要求	14
第二章	磁电系仪表	18
2-1	磁电系仪表的结构和工作原理	18
2-2	磁电系电流表和电压表	22
2-3	磁电系直流检流计	27
2-4	磁电系仪表的主要技术特性	30
第三章	电磁系仪表	32
3-1	电磁系仪表的结构和工作原理	32
3-2	电磁系电流表和电压表	37
3-3	电磁系仪表对外磁场的防御	39
3-4	电磁系仪表的主要技术特性	40
第四章	电动系仪表	42
4-1	电动系仪表的结构及其工作原理	42
4-2	电动系电流表和电压表	45
4-3	电动系功率表	48
4-4	低功率因数功率表简介	56
4-5	铁磁电动系仪表简介	58
4-6	三相电路中有功功率的测量方法	59
4-7	三相电路中无功功率的测量方法	64
第五章	感应系电度表	69
5-1	交流单相电度表的结构	69
5-2	交流单相电度表的工作原理	72
5-3	电度表的使用和选择	79

5-4	三相电路中有功电能的测量	83
5-5	三相电路中无功电能的测量	87
第六章	摇表、频率表和功率因数表	94
6-1	摇表的结构和工作原理	94
6-2	摇表的使用方法及注意事项	100
6-3	电动系频率表	104
6-4	铁磁电动系频率表	109
6-5	功率因数表	113
第七章	同步表	119
7-1	电磁系同步表	119
7-2	MZ-10型组合式同步指示器	133
第八章	接地电阻测量仪	137
8-1	ZC-8型接地电阻测量仪	137
8-2	MC-07型接地电阻测量仪	143
第九章	万用表	147
9-1	万用表的结构	147
9-2	万用表的直流电流档	149
9-3	万用表的直流电压档	152
9-4	万用表的交流电压档	154
9-5	万用表的电阻档	156
9-6	电平的测量	160
9-7	使用万用表时的注意事项	164
9-8	万用表的简单调试修理	167
第十章	直流电桥	173
10-1	直流单电桥	173
10-2	直流双电桥	179
10-3	单双两用電桥	183
第十一章	交流电桥	186
11-1	交流电桥的工作原理	186
11-2	交流电桥的电源	188
11-3	交流电桥的指零仪表	188
11-4	西林电桥	189

11-5	电感电桥	194
11-6	使用交流电桥的注意事项	197
11-7	万用电桥举例	197
第十二章 直流电位差计		204
12-1	直流电位差计的工作原理	204
12-2	直流电位差计的电路结构	206
12-3	直流电位差计的分类及主要技术特性	211
12-4	直流电位差计的应用	214
12-5	典型直流电位差计举例	216
第十三章 数字仪表简述		219
13-1	数字仪表的发展和现状	219
13-2	数字仪表的特点	220
13-3	数字频率表	220
13-4	数字电压表	223

电工测量仪表，至今已有二百多年的发展历史。其基本结构及制造工艺已达到较为完善的程度。它在电能的生产、传输、分配及使用的各个环节中，起到对电能的质量、负荷情况等加以监视和度量的作用，借以保证生产安全和经济运行。

电工测量仪表是指测量各种电量（如电流、电压、功率、电能等），电路中各个参数（如电阻、电感、电容）以及各种磁量（如磁感应强度等）的仪器仪表。测量的过程，就是将被测电量或磁量与测量单位的同类量进行比较的过程。

由于各种磁量可以通过基本电量进行计算而得，所以本书主要介绍测量各种电量和电路参数的仪器仪表。

第一章 电工仪表的基本知识

为了能对电工仪表有一个概括的了解，本章首先将电工仪表的基本结构和原理，分类和型号，误差和准确度以及主要技术要求进行介绍。

1-1 电工仪表的基本结构和原理

在电工测量过程中，度量器不直接参与工作就能指示出被测量数值的仪表，称为电工测量指示仪表。这种仪表的种类虽然繁多，但就它们的组成、结构、原理而言，包括以下几个基本部分：

一、指示仪表的组成

电工测量指示仪表通常由测量线路和测量机构两部分组成。其作用是将被测的电量变换成仪表活动部分指针的角位移，直接

指示出被测电量的数值。电工测量指示仪表的组成，可用图1-1的方框图表示。

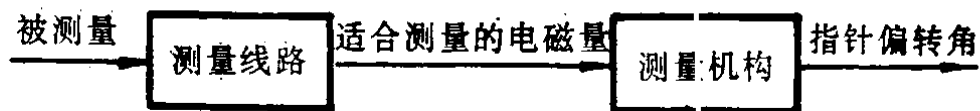


图 1-1 电工测量指示仪表的组成方框图

1. 测量线路

测量线路的作用，是将被测电量变换成适合测量机构直接测量的电磁量，且保持一定的比例关系。例如电流表的分流器、电压表的附加电阻等电路都属于测量线路。

2. 测量机构

测量机构是指示仪表的核心。它的作用是将被测电量产生的电磁力，转换为仪表指针的偏转角位移，从而指示出被测电量的数值。同一系列的仪表，采用相同的测量机构，只需用不同的测量线路，即可构成测量不同电量的仪表。

二、指示仪表测量机构的基本结构和原理

测量机构通常由固定部分和活动部分组成。固定部分包括固定线圈、磁路系统、标尺等；活动部分包括可动线圈、可动铁芯、游丝、指针等。

测量机构的基本结构有：

1. 产生转动力矩的装置

要使指示仪表的指针偏转，指示出被测量的数值，在测量机构中必须包含一个产生转动力矩的装置，这个力矩作用在仪表的活动部分上。仪表的类型不同，产生转动力矩的原理也不同。常用的电工测量指示仪表转动力矩产生的方式有：

(1) 磁电系仪表的转动力矩，由永久磁铁的磁场与通有直流电的可动线圈相互作用而产生；

(2) 电磁系仪表的转动力矩，由通电固定线圈所建立的磁场与可动铁片相互作用而产生；

(3) 电动系仪表的转动力矩, 由通电固定线圈所建立的磁场与通电可动线圈的相互作用而产生;

(4) 感应系仪表的转动力矩, 由通电固定线圈所建立的磁场与可动铝盘中所感应的涡流相互作用而产生。

转动力矩用符号 M 表示, 其大小是被测量 x 与指针偏转角位移 α 的函数, 即

$$M = F_1(x, \alpha) \quad (1-1)$$

2. 产生反作用力矩的装置

在指示仪表的测量机构中, 如果仅有转动力矩的作用, 是不能显示出被测电量的大小的。因为不管被测量的大小如何, 只要它产生的转动力矩能克服仪表轴尖与轴承的摩擦力, 仪表的活动部分 (包括指针) 就会偏转到满刻度位置, 直至不能再转动为止, 这显然不能指示出被测量的大小。

为使指示仪表能够反映被测电量的大小, 如“秤杆”需要“秤砣”平衡重物才能秤东西的道理一样, 在测量机构中还必须装设一个有反作用力矩的装置, 且反作用力矩的方向应与转动力矩的方向相反, 并与偏转角位移 α 有关。反作用力矩用符号 M_α 表示, 即

$$M_\alpha = F_2(\alpha) \quad (1-2)$$

当被测量较小时, 转动力矩也小, 转动力矩与反作用力矩平衡时, 使指针偏转一个较小的角度而平衡, 指示出被测量的数值。反之, 当被测量较大时, 转动力矩也大, 指针偏转一个较大的角度, 直至转动力矩与反作用力矩平衡时为止, 从而测出被测量的数值。总之, 当转动力矩使仪表活动部分发生偏转时, 反作用力矩也同时作用在仪表的活动部分上, 且随偏转角度的增大而增大, 当 $M = M_\alpha$ 时, 活动部分达到平衡, 指针才停止下来, 指示出被测量的数值。即仪表只要有一定的被测量, 指针就对应一定的偏转角位移。

在指示仪表中产生反作用力矩的方法通常有:

(1) 机械力。这是一种利用弹性元件变形后的弹力来产生

反作用力矩的。原理是在弹性变形的范围内，弹力与变形的大小成正比。常见的弹性元件有游丝、张丝和悬丝，它在磁电系、电磁系和电动系仪表中得到广泛的应用。这些仪表将在二、三、四章分别介绍。

(2) 电磁力。有些仪表的结构里面不设游丝和张丝，如在比率型结构的 D_3 型功率因数表、 D_3 型频率表中，可动部分装设有两个线圈，其中一个线圈用来产生转动力矩，另一个线圈则产生反作用力矩，而这些力矩都是由电磁力产生的。有关这类仪表，将在第六章中介绍。

此外，也有利用可动铝盘在磁场中运动时所感应的涡流来产生反作用力矩的，如感应系仪表，详见第五章。

3. 产生阻尼力矩的装置

上面我们介绍了转动力矩和反作用力矩在平衡位置时的关系，当转动力矩和反作用力矩相等时，仪表的指针应静止在某一平衡位置上，但由于仪表的活动部分具有一定的转动惯量，使指针不能立刻停止，而在平衡位置左右来回摆动，造成读数困难。为了尽快读数，必须设法缩短这个摆动时间，所以在仪表的结构中还装设了阻尼器。

产生阻尼力矩的装置，称为阻尼器。阻尼力矩总是与活动部分的运动方向相反，当活动部分完全稳定后，它就不存在了，所以阻尼力矩只能缩短活动部分的摆动时间，而不改变由转动力矩与反作用力矩所确定的偏转角。

指示仪表常用的阻尼力矩装置如图1-2所示。

空气型阻尼器，由阻尼箱和阻尼片组成。阻尼片固定在仪表的转轴上，这样，当活动部分偏转时，便同时带动阻尼片偏转。在偏转过程中，阻尼片因受到空气阻力的作用而产生阻尼力矩，如图1-2(a)所示。

磁感应型阻尼器，由阻尼片和永久磁铁组成。它利用活动部分的运动带动阻尼片，使之切割永久磁铁的磁力线而产生阻尼力矩，见图1-2(b)。

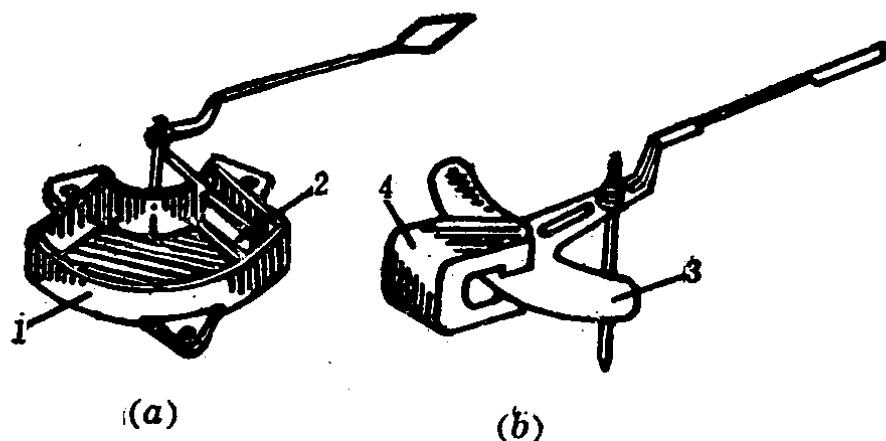


图 1-2 仪表的阻尼器
 (a)空气型阻尼器；(b)磁感应型阻尼器
 1—阻尼箱；2、3—阻尼片；4—永久磁铁

此外，有些仪表（如磁电系）不设专门的阻尼器，而是利用可动线圈的铝框作阻尼器。近年来，还有采用油阻尼的，但因结构比较复杂，大都用在张丝结构的检流计仪表中。

4. 支承装置和指示装置

仪表的支承装置一般有轴尖轴承支承方式和张丝弹片支承方式。指示装置通常有指针式和光标指示两种。

有了以上四个部分，就可以组成一个完整的电工仪表测量机构。

1-2 电工仪表的分类、标记和型号

一、指示仪表的分类

电工仪表通常包括指示仪表、较量仪表、数字仪表和巡回检测装置等。其中指示仪表具有测量迅速、直接读数、价格低廉等优点，被小型水电站广泛采用。常见的电工测量指示仪表分类方法如下：

1. 按使用方式分

按其使用方式，可分为安装式仪表和可携式仪表。

安装式仪表（简称“板式表”）固定安装在开关板或某一电

气设备的板面上。这种仪表一般准确度较低，但价格比较便宜。

可携式仪表便于携带，被实验室广泛采用。这种仪表一般准确度较高，但价格较贵。

2. 按被测电流的种类分

根据被测电流的种类，可以分为直流仪表、交流仪表、交直流两用仪表。

3. 按测量对象的种类分

根据测量对象的种类，可以分为：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）、电度表（瓦时表）。此外，还有功率因数表、频率表以及多种用途的万用表等。

4. 按仪表的工作原理分

如按仪表的工作原理分类，则可分为：磁电系、电磁系、电动系、感应系、整流系、静电系、热电系、电子系以及铁磁电动系等仪表。

5. 按仪表的准确度分

按仪表的准确度可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。此外，还可按仪表防御外磁场的能力以及使用条件等分类。

二、指示仪表的表面标记

不同种类的指示仪表具有不同的技术特性。这些技术特性，通常用不同的符号在仪表的表面标志出来。根据国家统一标准，有关标记的符号见表1-1。

表1-1中，I级防外磁场的符号，通常不标注级数，而填仪表的工作原理符号。A组仪表在表盘一般不标注符号，工作环境温度 为 $0 \sim +40^{\circ}\text{C}$ ，湿度为85%以下。B组仪表的工作环境温度为 $-20 \sim +50^{\circ}\text{C}$ ，湿度为85%以下。C组仪表的工作环境温度为 $-40 \sim +60^{\circ}\text{C}$ ，湿度为95%以下。A和B组仪表宜在室内使用，而C组仪表可在不固定地区的室内和室外使用。

三、指示仪表的型号

表 1-1

指示仪表表盘的标记符号

A.测 量 单 位 的 符 号			
名 称	符 号	名 称	符 号
千伏,	kV	兆欧	MΩ
伏特	V	千欧	kΩ
毫伏	mV	欧姆	Ω
微伏	μV	毫欧	mΩ
千安	kA	微欧	μΩ
安培	A	相位角	φ
毫安	mA	功率因数	cosφ
微安	μA	无功功率因数	sinφ
兆瓦	MW	库伦	C
千瓦	kW	毫韦伯	mWb
瓦特	W	毫韦伯/米 ²	mT
兆乏	MVar	微法	μF
千乏	kVar	皮法	PF
乏尔	Var	亨	H
兆赫	MHz	毫亨	mH
千赫	kHz	微亨	μH
赫兹	Hz	摄氏温度	°C
兆兆欧	TΩ		

B.仪表工作原理的图形符号

磁电系仪表		电磁系比率表	
磁电系比率表		电动系仪表	
电磁系仪表		电动系比率表	

续表

B. 仪表工作原理的图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号
铁磁电动系仪表		静电系仪表	
铁磁电动系比率表		整流系仪表	
感应系仪表		热电系仪表	

C. 电 流 种 类 的 符 号

直 流		直流和交流	
交 流		三相交流	

D. 准确度等级的符号

以标尺量限百分数表示准确度，例如 1.5 级	1.5	以指示值百分数表示准确度，例如 1.5 级	
以标尺长度百分数表示准确度，例如 0.5 级			

续表

E.工 作 位 置 的 符 号

名 称	符 号	名 称	符 号
垂直放置		倾斜60°放置	
水平放置			

F.绝 缘 强 度 的 符 号

不进行绝缘强度试验		绝缘强度试验电压为2kV	
-----------	---	--------------	---

G.端 钮、调 零 器 的 符 号

正 端 钮		与外壳连接的端钮	
负 端 钮		与屏蔽连接的端钮	
公共端钮		调 零 器	
接地端钮			

续表

H.按外界条件分组的符号			
名 称	符 号	名 称	符 号
I 级防外磁场（磁电系）		IV级防外磁 场 及电场	
I 级防外磁场（静电系）		A 组仪表	（不标注）
II级防外磁场及电场		B 组仪表	
III级防外磁 场 及电场		C 组仪表	

安装式和可携式指示仪表的产品型号按规定标准各有不同的编制规则。

安装式仪表的型号如图1-3所示。

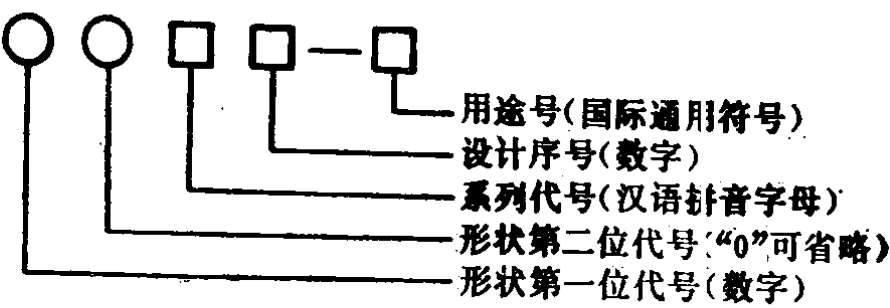


图 1-3 安装式仪表型号的编制规则

根据第一位、第二位形状代号，可从有关标准中查出仪表的形状和尺寸。系列代号表示仪表的不同系列，如磁电系用C，电磁系用T，电动系用D来表示等等。譬如，天津市电表厂生产的11C2-A型直流电流表，“11”为形状代号，‘C’表示磁电系