

前 言

由原水利电力部组织、山西省电力工业局编写、原水利电力出版社出版的《火电生产类学徒工初级工培训教材》和《火电生产类中级工培训教材》，发行、使用已历时 10 余年。其间，《学徒工初级工》各分册分别重印 5 至 9 次，《中级工》各分册分别重印 4 至 7 次，发行量很大，深受全国电力系统广大读者的欢迎，基本上满足了电力行业火力发电工人培训、考核、提高技术水平的要求，取得了显著的社会效益。为此，这两套培训丛书在全国电力普及读物评优中，荣获了“普及电力科学技术知识特别奖”。

10 余年来，由于改革开放的不断深入发展，我国的电力工业有了很大的发展，现已普遍进入大机组、大电网、高参数、超高参数、高电压、超高电压和高度自动化的发展阶段，对电业生产人员的素质提出了更高的要求。继 1991 年 12 月原能源部颁发的《电力工人技术等级标准》之后，1995 年 9 月电力工业部、劳动部又颁发了《中华人民共和国工人技术等级标准·电力工业·火力发电部分》。因此有必要根据电力生产的新情况和电力工人技术等级标准的新要求，对上述两套培训教材进行修订并增补高级工培训教材。经山西省电力工业局和中国电力出版社通力合作，并在全国电力工人技术教育研究所的支持下，现编写、出版了这套《全国火力发电工人通用培训教材》。本套丛书的内容覆盖了火力发电 16 个专业对初、中、高级工的技术要求，每个专业分初级工、中级工、高级工三个分册出版，共计 48 个分册；每一分册中又

以各专业的不同岗位工种设“篇”，共覆盖了 40 余个工种。

在编写本套丛书的过程中，首先根据工人技术等级标准中对每一工种的定义、工作内容、技术等级、适用范围等的规定，紧扣标准提出的知识要求和技能要求，从火电生产实际需要出发拟出初步的编写提纲；经数月重点调查研究、广泛征求意见、认真修订后形成正式的编写提纲；之后，又历时半年余，始成初稿。初稿形成后，在局系统内进行了专家审稿和主编者的修改、统稿工作。因此，定稿后的火力发电工人培训教材，深信是紧扣新的工人技术等级标准的实用性教材。

火力发电工人培训教材，体现了工人技术培训的特点以及理论联系实际的原则，尽量反映了新技术、新设备、新工艺、新材料、新经验和新方法；教材以 300MW 机组及其辅机为主，兼顾 600MW 和 200MW 机组及其辅机的内容，因而有相当的先进性和普遍适用性，适应于“九五”期间主要机型的技术要求。与每一专业对应的初、中、高级工三个分册，白成一个小的系列，呈阶梯式递进，内容上互不重复。每一分册的具体内容又分为核心内容和复习题两大部分。核心内容主要讲解必备知识以及与技能要求对应的一些专业知识。复习题的形式多种多样，解答习题的目的在于巩固和深化所学知识。有些习题，如操作题、读绘图题、设计试验题等，主要用以培养和巩固必备的技能。鉴于全国电力系统各基层单位、部门培训力量和师资水平并不平衡，学员水平也参差不齐，所以有必要为每一分册编写相应的《教材使用说明和习题解答》，这将在本套丛书出版后陆续推出。

本分册是《电测仪表》中级工培训教材，全书第一、至第七章，第八章第二、三节，第九章至第十一章，十二章第

一、二、三、五节和第二十章由张同福同志编写，第八章第一节和第十四章由曹锐同志编写，第十二章第四节和第十三章由王在英同志编写，第十五、十六章由尹瑞平同志编写，第十七章至第十九章由仇沭同志编写。全书由张同福任主编，山西省太原供电公司阎刘生高级工程师担任主审。

在中电联教培部为本套培训教材组织的审定会议上，本书由武汉供电局张文莲同志审定，并被推荐为全国火力发电工人通用培训教材。

在编写这套《全国火力发电工人通用培训教材》的过程中，得到了电力工业部领导的关怀以及中电联教培部和各有关司局的关心、支持，同时也取得了全国电力系统各有关单位和人员的关注、支持和帮助，他们为本书进行了审定，提供了咨询、技术资料以及许多宝贵的建议，在此一并表示衷心的感谢。

各单位和广大读者在使用本套教材过程中，如发现有不妥之处或需修改的意见，敬请随时函告，以便再版时修改。

山西省电力工业局 中国电力出版社

1996年11月

目 录

序

前 言

第一章 电测量指示仪表概论	1
第一节 电测量指示仪表的基本结构	1
第二节 作用在测量机构可动部分的力矩	2
第三节 电测指示仪表的误差及准确度	7
第四节 指示仪表的主要技术要求	10
复习题	13
第二章 磁电系仪表	17
第一节 磁电系仪表工作原理	17
第二节 磁电系电流表与量限的扩大	19
第三节 磁电系电压表与量限的扩大	24
第四节 磁电系仪表常见故障及排除方法	30
第五节 磁电系检流计	32
复习题	41
第三章 电磁系仪表	45
第一节 电磁系仪表工作原理	45
第二节 电磁系仪表防外磁场措施	47
第三节 电磁系电流表和电压表	49
第四节 电磁系仪表的技术性能及应用	53
第五节 电磁系仪表常见故障及排除方法	54
复习题	57

第四章 电动系仪表	61
第一节 电动系仪表工作原理	61
第二节 电动系仪表的力矩曲线与刻度特性	63
第三节 电动系电流表和电压表	66
第四节 电动系功率表	71
第五节 三相无功功率的测量	82
第六节 低功率因数功率表	89
第七节 电动系仪表常见故障及排除方法	92
复习题	94
第五章 绝缘电阻表与接地电阻表	99
第一节 绝缘电阻表的结构和原理	99
第二节 绝缘电阻表的选择与使用	113
第三节 几种国产绝缘电阻表主要技术数据	117
第四节 绝缘电阻表常见故障及排除方法	120
第五节 接地电阻表	123
复习题	133
第六章 万用表与钳形表	138
第一节 万用表的结构	138
第二节 万用表表头参数的测量	140
第三节 直流电流与电压的测量	147
第四节 电阻的测量	152
第五节 交流电压与电流的测量	156
第六节 万用表失磁表头的充磁	161
第七节 万用表常见故障及处理方法	162
第八节 钳形表	166
复习题	168
第七章 静电系与热电系仪表	172

第一节	静电系仪表的结构和工作原理	172
第二节	静电系电压表	174
第三节	热电系仪表	177
复习题	.....	179
第八章	变送器式仪表	183
第一节	电量变送器	183
第二节	变送器式频率表	191
第三节	变送器式功率因数表	196
复习题	.....	201
第九章	功率因数表	204
第一节	概述	204
第二节	单相电动系功率因数表	209
第三节	1D5-cos φ 型三相功率因数表	216
复习题	.....	222
第十章	整步表	225
第一节	概述	225
第二节	1T1-S 型电磁系整步表的结构与工作原理	226
第三节	MZ10 型组合式三相整步表	234
复习题	.....	239
第十一章	直流电位差计	243
第一节	直流电位差计工作原理	243
第二节	直流电位差计的使用	245
第三节	直流电位差计主要技术参数	252
复习题	.....	256
第十二章	直流电桥	259
第一节	直流电桥的分类与技术要求	259
第二节	直流单电桥工作原理	261

第三节	直流双电桥工作原理	263
第四节	直流电桥的检定	267
第五节	常见直流电桥的型号及有关参数	276
复习题	.....	276
第十三章	直流电阻箱	282
第一节	直流电阻箱的分类与技术指标	282
第二节	直流电阻箱的整体检定	285
复习题	.....	295
第十四章	数字万用表与电子示波器	298
第一节	数字万用表	298
第二节	电子示波器	311
复习题	.....	317
第十五章	感应系电能表	320
第一节	感应系电能表的工作原理	320
第二节	三相有功电能表的特性与调整	331
第三节	电能表常见故障及检修	340
第四节	无功电能表	349
第五节	特殊用途电能表	362
复习题	.....	369
第十六章	电能表的安装和现场检定	373
第一节	电能表的选择与安装	373
第二节	电能表的现场检验与调整	378
第三节	电能计量的监督与管理	387
复习题	.....	392
第十七章	测量用电流互感器	395
第一节	电流互感器的基本结构和用途	395
第二节	电流互感器的工作原理	403

第三节	特殊结构电流互感器	415
复习题	.....	419
第十八章	测量用电压互感器	422
第一节	电压互感器的结构和用途	422
第二节	电压互感器的工作原理	429
第三节	特殊结构电压互感器	445
复习题	.....	449
第十九章	互感器的检定	452
第一节	电流、电压负载箱	452
第二节	升流器	455
第三节	互感器的检定项目	457
复习题	.....	479
第二十章	全面质量管理	482
第一节	全面质量管理的意义与基本特点	482
第二节	PDCA 循环	484
第三节	质量管理体系	486
第四节	现场质量管理	488
复习题	.....	490
参考文献	.....	492

第一章 电测量指示仪表概论

第一节 电测量指示仪表的基本结构

电测量指示仪表（以下称电测仪表）的种类很多，如磁电系、电磁系、电动系等，它们的结构虽然各有不同，但其主要作用都是将被测电量（如电流、电压、功率等）变换成仪表可动部分的偏转角或位移。为了实现这种变换，仪表的基本结构都是由两大部分组成，一部分是测量线路，另一部分是测量机构。

图 1-1 示出了电测仪表基本结构方框图。

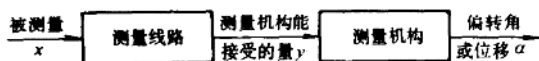


图 1-1 电测仪表基本结构方框图

一、测量线路

电测仪表的测量线路，主要是接受一定的被测量以后，将它变换成测量机构能够接受的量，去驱动仪表的可动部分使其发生偏转，这个偏转的大小是与被测量的大小成正比的。磁电系、电磁系仪表可以直接接受的被测量是电流 I ；电动系仪表可直接接受两个被测电流的乘积 $I_1 \cdot I_2$ （若为交流量，则两个电流的频率应该相同）；静电系仪表可以直接接受的被测量是电压 U 。如果被测量是频率 f 和相位角 φ 等，则必须通 R 、 L 、 C 等元件组成的电路加以转换，即变换成仪表可动部分能

够接受的被测量(电流 I , 电压 U 或是 I_1 与 I_2 的乘积等)。另外, 当被测量的电流 I 或电压 U 过大或过小时, 即不适宜直接作用到测量机构上, 还需要进行量值变换, 如采用分压、分流等措施。因此, 我们通常把这种可以将被测量变换成直接驱动仪表可动部分产生偏转的电路, 叫做测量线路。

二、测量机构

从图 1-1 可知, 被测量经过测量线路的变换后, 产生一个能被测量机构所接受的量, 从而使仪表可动部分转动产生指针的偏转或位移, 我们把这个能产生转动的部分就叫做测量机构。它是仪表的关键部分, 对于电测量指示仪表, 它是由固定部分和可动部分组成, 被测量的值, 最终都是由可动部分的偏转指示出来。

第二节 作用在测量机构可动部分的力矩

为了使仪表测量机构的可动部分产生转动, 就必须有力作用在可动部分上。下面就作用在可动部分上的几种力矩作一介绍。

一、转动力矩

经过测量线路变换后的被测量作用于测量机构后, 就会在测量机构内部产生作用力, 这个力将对测量机构的可动部分产生一个一定大小的力矩, 驱使它绕转轴转动, 带动指针发生偏转, 这个力矩称为转动力矩。

转动力矩是由电磁场能量转换为机械能量而得来的。对每一块仪表而言, 其电磁场能量的表现形式及大小都与该仪表的类型、结构及被测量的大小有关。

常用电测量指示仪表转动力矩的产生方式如下。

(1) 磁电系仪表。固定的永久磁铁的磁场与通有直流电流的可动线圈间的相互作用产生的转动力矩。

(2) 电磁系仪表。通有电流的固定线圈的磁场与铁片的相互作用（或处在磁场中的两个铁片间的相互作用）产生的转动力矩。

(3) 电动系仪表。通有电流的固定线圈的磁场与通有电流的可动线圈间的相互作用产生的转动力矩。

若用 M 代表转动力矩，则仪表测量机构可动部分上的转动力矩 M 与产生该转矩的经测量线路变换后的被测量 y （称为中间量）的关系可表示为

$$M = f(y) \quad (1-1)$$

二、反作用力矩

仪表可动部分在转动力矩的作用下，从其起始位置开始偏转，如果没有别的力矩作用，则不论被测量有多大，可动部分都会偏转到满刻度位置，直到再不能转动为止，因而无法指示出被测量的大小。为了使每个被测量只引起相应的偏转，就必须要有有一个力矩来平衡被测量所产生的转动力矩，以控制可动部分的偏转，而这个力矩的方向还必须和转动力矩的方向相反，并且还要和偏转角有关，这种力矩称为反作用力矩，用 M_a 表示。

在电测指示仪表中，产生反作用力矩的方法有以下几方面。

(1) 利用游丝的弹力。

(2) 利用张丝或悬丝的扭力。利用游丝在变形后所具有的企图恢复原状的弹力产生反作用力矩，在仪表中使用最多，被广泛应用在利用指针或光指示的仪表中。应用张丝或悬丝产生反作用力矩的仪表，因其可动部分不再有轴尖、轴承，消

除了它们之间的摩擦影响，使仪表测量机构的性能得到了很大的改善。

(3) 利用涡流的反作用力。这种方法主要用在感应系仪表中。

(4) 利用电磁力。这种方法主要用在流比计结构的仪表中，例如绝缘电阻表等。

反作用力矩的大小和偏转角 α 有关，即

$$M_a = K\alpha \quad (1-2)$$

式中 K ——反作用力矩系数。

在忽略摩擦影响的情况下，当可动部分处于某一平衡位置时，即稳定在某一偏转角时，转矩与反作用力矩相等，则

$$M = M_a \quad (1-3)$$

根据式 (1-1) ~ 式 (1-3) 可以得出

$$K_a = f(y)$$

从而得到

$$\alpha = \frac{1}{K} f(y)$$

由于反作用力矩系数 K 为常数，从而有

$$\alpha = f_1(y) \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明，可动部分的偏转角 α 的大小反映了经测量线路变换后的被测量（即中间量 y ）的大小。中间量 y 与被测量 x 之间的关系为 $y = \phi(x)$ ，所以

$$\alpha = f_1[\phi(x)] = F(x) \quad (1-5)$$

最后由式 (1-5) 可以看出，偏转角 α 是被测量 x 的函数。即每对应某一被测量，仪表就有一个相应的稳定偏转角，亦

即从偏转角 α 的大小就可读出被测量的大小。

三、摩擦力矩

当仪表的测量机构是由轴承和轴尖组成其支承结构时，由于支座中存在摩擦，使可动部分偏转时并不停在理想的平衡位置。摩擦导致产生一个与运动方向相反的力矩，称为摩擦力矩，用 M_f 表示。

摩擦力矩的作用，总是阻碍可动部分的偏转，由于它的影响，使可动部分在被测量增大时停留在比没有摩擦时较小的位置上；反之，当被测量减小时，则停留在偏转角较大的位置上。由于摩擦力矩的存在，将会给仪表带来误差。

摩擦力矩决定于轴承和轴尖的大小和材料，也决定于轴承的表面状态。摩擦力矩本质上是一个不固定的量，它决定于许多偶然因素，例如振动，并和支座内的污垢及湿度等有关。

四、阻尼力矩

从理论上讲，在电测仪表中，当作用在可动部分上的转动力矩和反作用力矩相等时，仪表指针应很快地停止在某一平衡位置，但由于仪表可动部分具有惯性，使它不能很快静止下来，而是围绕平衡位置作一系列衰减的周期性摆动，这样就造成了读数困难。为了使可动部分尽快的稳定在平衡位置上，缩短可动部分的摆动时间，就必须使仪表可动部分在运动过程中受到一个与运动方向相反的力矩作用，这种力矩通常称为阻尼力矩，用 M_d 表示。它的作用是使仪表可动部分更快地停在平衡位置上。产生阻尼力矩的装置，称为阻尼器。

测量机构的阻尼，一般有三种形式。

(1) 空气阻尼。空气阻尼器如图 1-2 所示，它是利用仪表可动部分在运动过程中带动阻尼盒 1 中的阻尼叶片 2 运动并

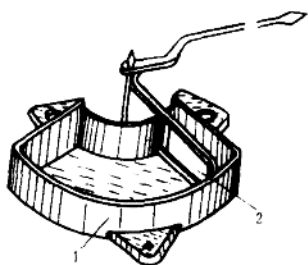


图 1-2 空气阻尼器
1—阻尼盒；2—阻尼叶片

受到空气阻力作用而产生阻尼力矩的。

(2) 磁感应阻尼。磁感应阻尼器结构如图 1-3 所示。

图 1-3 (a) 为磁电系仪表常用的阻尼方式，当可动线圈转动时带动其铝质金属框架切割永久磁铁的磁力线而产生阻尼力矩。

图 1-3 (b) 为感应系电能表常用的阻尼方式，当转轴转动时，带动转动铝盘在永久磁铁的磁场里运动，并在铝盘上感应涡流，由于涡流与磁铁的磁场相互作用，便产生了总是与转轴运动方向相反的阻尼力矩。

(3) 油阻尼。利用油对可动部分的阻力产生阻尼力矩，这种阻尼方式因结构复杂，已很少使用。

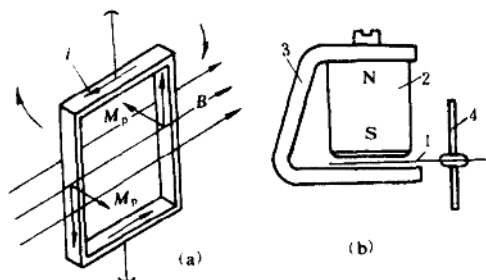


图 1-3 磁感应阻尼器

(a) 磁电系仪表常用阻尼方式；(b) 感应系仪表常用阻尼方式

1—转动铝盘；2—永久磁铁；3—导磁体；4—转轴

第三节 电测指示仪表的误差及准确度

一、电测量指示仪表的误差

电测量指示仪表的误差包括基本误差和附加误差两种。

1. 基本误差

基本误差是指仪表在规定的正常条件下进行测量时所具有的误差，它是仪表本身所固有的。这种误差是由于仪表的结构、材料及制造工艺等方面的不完善而产生的。例如支座中存在的摩擦、轴倾斜、可动部分不完全平衡、仪表刻度划分不准等，都是造成基本误差的因素。

有关仪表的正常工作条件主要有以下几方面。

(1) 周围环境温度或标度盘上注明的规定温度，例如 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 。

(2) 仪表按标度盘上所注明的工作位置安放。

(3) 仪表指针调整到零位。

(4) 除地磁外，没有外界磁场、电场的影响。

(5) 对于交流仪表而言，波形应为正弦波，频率为 50Hz 或制造厂规定值。

2. 附加误差

附加误差是仪表不在规定的正常工作条件下使用时，由于某些因素的变化使仪表产生基本误差以外的另一些误差。例如环境温度的变化、频率变化以及外部电磁场等的影响都会引起附加误差。

二、电测指示仪表准确度及其表示方法

仪表的基本误差通常用准确度等级来表示，准确度等级越高的仪表，其基本误差就越小。

用同一只仪表去测量不同大小的被测量时, 其绝对误差 Δ 变化不大, 但相对误差 Δ/A 却有很大变化, 被测量 A 越小, 相对误差就越大, 因此用相对误差概念就不能反映出仪表的准确性能。所以, 一般是引用误差来表示仪表的准确性能。

(1) 引用误差。仪表测量的绝对误差 Δ 与仪表测量上限 (即仪表的满刻度值) A_m 的百分比, 称为仪表的引用误差, 表示为

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

(2) 仪表的准确度。就是仪表的最大引用误差, 即仪表量限范围内的最大绝对误差 $\Delta_{\max}$ 与仪表测量上限 A_m 的百分比。对于常用的单向标度尺的指示仪表来说, 用 K 表示它的准确度等级, 则有

$$\pm K\% = \frac{\Delta_{\max}}{A_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

仪表的准确度等级都标注在仪表的标度盘上。目前我国生产的电流表和电压表在规定条件下使用时的基本误差不应超出表 1-1 中规定的值。

表 1-1 各级仪表的基本误差

仪表的准确度等级	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1
基本误差 (%)	± 0.05	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 1.0
仪表的准确度等级	1.5	2	2.5	3	5	
基本误差 (%)	± 1.5	± 2.0	± 2.5	± 3.0	± 5.0	

三、工程测量中准确度的评估

从式 (1-7) 不难看出, 仪表准确度等级 K 表示该仪表在

正常使用条件下所允许的最大引用误差，有时也称为仪表的极限误差，使用指示仪表直接进行测量时，仪表本身的基本误差可以根据它的准确度等级来计算，其表达式为

$$\gamma_{\max} = \pm K\%$$

式中 $\gamma_{\max}$ ——最大引用误差。

当使用指示仪表进行测量时，其测量结果可能出现的最大引用误差为

$$\gamma_{\max} = \pm K\% = \frac{\Delta_{\max}}{A_m} \times 100\%$$

由此可以得出最大绝对误差为

$$\Delta_{\max} = \pm K\% \cdot A_m \quad (1-8)$$

则最大相对误差为

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= \frac{\Delta_{\max}}{A_x} \cdot 100\% \\ &= \frac{\pm K\% \cdot A_m}{A_x} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 K ——指示仪表的准确度等级；

A_m ——所使用仪表的测量上限（即量限）；

A_x ——仪表测量时的读数。

【例 1-1】 有一只电压表， $K=0.5$ 级，测量上限为 300V，求最大绝对误差。

解：根据式 (1-8)

$$\Delta_{\max} = \pm K\% \cdot A_m = \pm 0.5\% \times 300 = \pm 1.5V$$

【例 1-2】 有一只电流表， $K=1.0$ 级，测量上限为 10A，当测量 5A 电流时，可能出现的最大相对误差是多少？

解：根据式 (1-9)，可得