

TM93
4024

高 等 学 校 教 材

===== 专 科 适 用 =====

电 工 试 验 基 础

太原电力高等专科学校 李崇贺 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书主要介绍电工仪表、仪器的结构、基本原理和使用方法,测量技术和数据处理,电量、电路参数等物理量的测试方法以及安全用电知识。在内容选择上,紧密联系生产实际,引入计算机应用内容,采用最新国家标准。

全书共八章,每章附有习题及颇具特色的实验项目,体系新颖、内容简明,着重于能力培养。

本书系高等学校电力类专业专科教材,也可作为职工大学、函授大学有关专业的教材,还可供中等专业学校师生及有关工程技术人员参考。

高等学校教材

(专科适用)

电 工 试 验 基 础

太原电力高等专科学校 李崇贺 主编

*

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

*

787×1092毫米 16开本 12.75印张 286千字

1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数0001—2900册

ISBN 7-120-01755-1/TM·465

定价3.35元

前 言

本书是根据1990~1992年高等学校电力类教材编审出版计划及能源部高等专科电力工程类专业教学组审定的《电工试验基础教学大纲》编写的。

为了适应科学技术发展以及现场技术工作的需要,专科教育要加强实践性环节的教学,要求学生掌握电工试验的有关基本理论、基本操作技能,培养学生具有较强的进行试验以及分析和解决实际问题的能力,使学生在参加工作后,能缩短再学习的时间,尽快独立工作,以满足四化建设的需要,故决定在专科电力类专业新增设《电工试验基础》课程。

本课程是一门实践性很强的技术基础课,大纲规定其实验时间多于课堂讲授时间,因而本课程的教学不能沿袭传统的以讲授为主的教学方法。建议在组织教学时,针对教材中不同的内容及学生的具体情况,采用讲授、自学、电化教学等综合方法进行。即对理论性较强的或学生自学有困难的内容采用课堂讲授;对诸如仪表结构、人工呼吸等内容则宜采用录相片进行教学;对叙述性或学生有一定基础的内容,可采用在教师指导下自学的方式。这样就能在较短的时间内学完本课程理论教学部分的内容,效果也会好得多。此外,对本课程的实验部分,必须严格要求,学生应认真、独立地完成,为了更好地培养学生独立工作能力及实际操作技能,实验项目分为二类:一类是给定指导书,学生认真地按指导书的要求去做实验,就能达到预期效果;另一类是给出任务书,要求学生按任务书提出的任务,自行设计并组织实验。

本书第一章至第五章由李崇贺编写,第六章至第八章由丁小兰编写。实验指导书(任务书)采用由李彩峰编写的太原电力高等专科学校《电工试验基础实验指导书》。全书由李崇贺任主编。本书承上海电力学院王嘉文同志仔细审阅并提出宝贵意见,在本书编写过程中还得到张炜等许多同志的帮助,谨此一并表示衷心感谢。

本书除可供专科电力类专业作教材使用外,还可供其它各类学校有关专业学生以及现场工程技术人员使用。

由于编者水平有限,难免有不妥或错误之处,恳切希望读者,特别是使用本书的教师和同学们予以批评指正。

李崇贺

1992年7月

目 录

前 言

第一章 电工仪表的基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 常用电工仪表的工作原理	4
第三节 测量电路及仪表	12
第四节 电工仪表的分类及标记	25
第五节 电工仪表的主要技术要求	27
习题	30
第二章 测量技术及数据处理	32
第一节 测量及测量设备	32
第二节 仪表的误差和准确度	33
第三节 测量误差及消除方法	38
第四节 试验数据的处理	43
第五节 试验曲线的绘制	47
习题	59
第三章 电工试验基础知识	60
第一节 试验的意义及过程	60
第二节 仪表仪器的选择	62
第三节 安全用电知识	63
习题	66
第四章 电量的测量	67
第一节 电流和电压的测量	67
第二节 功率的测量	74
第三节 电能的测量	83
第四节 功率因数的测量	89
第五节 频率的测量	95
习题与实验	100
第五章 电源的测试	103
第一节 直流电源的测试	103
第二节 有源单口网络的测试	106
第三节 稳压电源的测试	107
习题与实验	109
第六章 电路参数的测量	111
第一节 电阻的测量	111
第二节 电感的测量	124

第三节 电容的测量	132
习题与实验	135
第七章 动态过程的测试	137
第一节 动态过程的分类及一般测试法	137
第二节 记录仪表法	138
第三节 光线示波器法	141
第四节 电子射线示波器法	142
习题与实验	144
第八章 综合试验	145
第一节 试验项目的设计	145
第二节 焊接技术	146
第三节 故障检修	148
习题与实验	152
实验指导书(任务书)	153
实验一 电工仪表测量误差的处理方法及电压表、电流表的检定(指导书)	153
实验二 仪表内阻对测量的影响(指导书)	156
实验三 分压器的原理(指导书)	158
实验四 日光灯的安装及功率因数的提高(指导书)	160
实验五 示波器测量电压、电流、频率(指导书)	161
实验六 串联谐振电路的测试(任务书)	163
实验七 三相电路中电压、电流及功率的测量(任务书)	164
实验八 三相无功功率的测量(任务书)	166
实验九 线性有源单口网络的测量(任务书)	167
实验十 受控源的测试(指导书)	168
实验十一 大、中、小电阻的测量(任务书)	171
实验十二 线圈参数——电阻、电感及互感的测量(任务书)	172
实验十三 电容的测量(任务书)	174
实验十四 一阶电路的响应(任务书)	174
实验十五 二阶电路的响应(指导书)	176
实验十六 电阻电路的焊接及故障检修(任务书)	178
实验十七 双口网络的设计、制作及参数的测定(任务书)	179
实验十八 方波发生器的制作(任务书)	180
实验十九 欧姆表的设计、安装及调试(任务书)	181
附录	183
附录一 电子示波器	183
一、SB—10型普通示波器(183) 二、SBE—20型二踪示波器(185) 三、SR—071A型二踪示波器(188)	
附录二 XD—1型低频信号发生器	191
附录三 DA—16型晶体管毫伏表和GB—9B型电子管毫伏表	194
附录四 直流稳压电源	196
附录五 单相调压器	197

第一章 电工仪表的基本知识

第一节 概 述

测量电压、电流、功率、频率、相位、电阻等电气参数的仪表称电工仪表。其中在实际工作中最常用的是直接作用模拟指示电测量仪表，习惯简称为电测量指示仪表，只要不引起混淆，也常简称为电工仪表。这类仪表的特点是直接将被测量转换为仪表的偏转角位移，并通过指示器在仪表标度尺上指示出被测量的数值，从而可直接读取测量结果。指示器大多采用指针指示读数，也有采用光标指示读数的。

一、电测量指示仪表的组成和基本原理

电测量指示仪表通常由以下两部分组成：

（一）测量电路

由一些电阻、电容、电感等元件组合成的电路，其作用是将被测量变换成测量机构能直接测量的电量。

（二）测量机构

测量机构是仪表的主要工作部件，由固定部分及活动部分组成，其作用是将接收到的电量变换为活动部分的位移。通常，机电式仪表测量机构的活动部分是完成角位移，称为偏转，根据偏转的大小可确定被测量的数值。

为使测量机构的活动部分，按接收到的被测量大小，偏转到某一相应稳定位置，电测量指示仪表测量机构工作时都具有转动力矩、反作用力矩和阻尼力矩。

1. 转动力矩 在被测量的作用下，使活动部分产生角位移的力矩称转动力矩，用 T 表示。该力矩可以由电磁力、电动力、电场力或其它力产生，产生转动力矩的方式或原理不同，就构成不同系列的电测量指示仪表。例如：

磁电系仪表：利用可动线圈内电流与固定的永久磁铁磁场之间相互作用的电磁力产生转动力矩。

电磁系仪表：利用动铁芯与载流的固定线圈之间，或动铁芯与被此载流线圈磁化的静铁芯之间的电磁力产生转动力矩。

电动系仪表：利用载流的动圈与载流的固定线圈之间的电动力产生转动力矩。

静电系仪表：利用可动电极与固定电极之间的静电场作用力产生转动力矩。

感应系仪表：由通有交流电流的固定线圈产生的交流磁场与由该磁场在可动铝盘中所感应的涡流之间的作用力产生转动力矩。

不论哪种系列的仪表，其转动力矩 T 的大小都与被测量成一定比例关系。

2. 反作用力矩 在转动力矩的作用下，仪表活动部分发生偏转，如果没有反作用力矩与之平衡，则不论被测量多大，都要偏转到极限位置，这样一来，只能反映出有无被测量，

而不能测出被测量的数值。为了使仪表能测量出被测量的数值，活动部分偏转角的大小应与被测量大小有确定的关系。为此，需要一个方向总是和转动力矩相反、大小随活动部分的偏转角大小变化的力矩，这个力矩称反作用力矩，用 T_a 表示。

反作用力矩通常由游丝（即螺旋弹簧）的弹力产生；测量微小电量的仪表，因转动力矩很小，为使单位被测量所引起的偏转角度大，其反作用力矩用吊丝或张丝的扭力产生。此时，反作用力矩 T_a 与仪表活动部分的偏转角成正比，即

$$T_a = D\alpha \quad (1-1)$$

式中 α —— 偏转角；

D —— 常数，取决于游丝、吊丝或张丝的物理性质。

在转动力矩作用下，活动部分开始偏转，使游丝扭紧，随之反作用力矩增加，当转动力矩和反作用力矩相等时，活动部分将处于力矩平衡状态，偏转角可达一稳定数值。这时

$$T = T_a$$

则

$$\alpha = \frac{T}{D} \quad (1-2)$$

可见，由于转动力矩 T 与被测量成一定的比例关系，偏转角 α 就与被测量成一定的比例，所以偏转角的大小可表示被测量的大小。

3. 阻尼力矩 仪表通电后，活动部分就要偏转，由于惯性的作用，偏转到平衡位置不会马上停下来，而是在其最终平衡位置左右来回作减幅摆动，经过较长的时间才稳定在平衡位置上，因此不能尽快地读数。为了缩短摆动时间，通常都装有产生阻尼力矩的装置，用以吸收摆动能量，使活动部分能迅速在平衡位置稳定下来。

阻尼力矩只在活动部分运动时才产生，其方向总是和活动部分的运动方向相反，大小与活动部分的运动速度成正比，当活动部分静止时，阻尼力矩为零，因而阻尼装置的存在对仪表的指示值没有任何影响。

仪表活动部分的运动特性与阻尼力矩有关，当阻尼力矩很小时，活动部分要摆动很长时间才能停在平衡位置，这种情况称欠阻尼状态；当阻尼力矩很大时，活动部分虽不再摆动，但将缓慢地达动平衡位置，这称过阻尼状态。随阻尼力矩由小变大，将由欠阻尼状态过渡到过阻尼状态，两种运动状态的交界点称临界阻尼状态。从理论上说，活动部分从开始运动到停在平衡位置所需时间最短的是临界阻尼，但由于临界阻尼的运动状态也是不经摆动、平稳地到达平衡位置，与过阻尼相似，只是时间短而已，这样在实际调整阻尼装置时，难以判别。因此通常采用稍欠阻尼状态，既易判明是否达到平衡位置又能较快地停在平衡位置上，使仪表处于最佳阻尼状态。我国规定一般仪表的阻尼时间不应超过4s。

除以上三种力矩外，用轴承支持活动部分的仪表，不可避免地会存在因摩擦而产生的摩擦力矩，它在不同程度上阻碍活动部分的运动，使活动部分停在偏离真实平衡位置的地方，致使仪表指示产生误差。

二、电测量指示仪表的一般机构

电测量指示仪表，种类很多，结构各不相同，除测量机构外大多数都有下面一些主要部件。

(一) 外壳

由铁、木、塑料等材料制成，用来保护仪表内部的机构。

(二) 指示装置

如图1-1所示，由以下零件组成：

1. 标度尺 表盘上一系列数字和分度线的总称，通常准确度较高（1.0级及以上）的仪表，采用镜子标尺，即在标度尺下有一条弧形镜面，读数时应使指针与镜面反映出的指针像重合，以保证读数的准确。

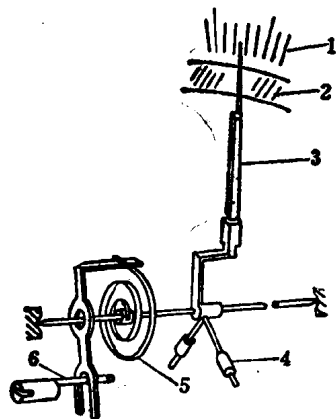


图 1-1 仪表指示装置

1—分度；2—镜面；3—指针；4—平衡锤；
5—游丝；6—机械零位调节装置

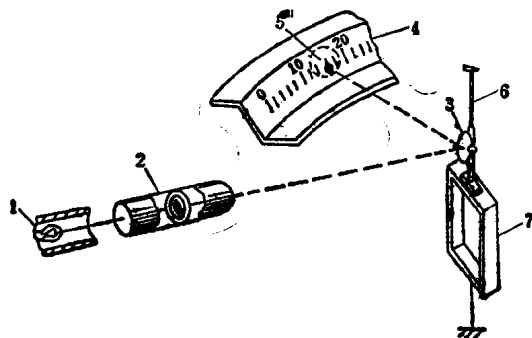


图 1-2 光标指示装置

1—灯；2—光学系统；3—小镜；4—半透明标度尺；
5—光标影像指针；6—张丝；7—线圈

2. 指针 有刀形、矛形等指针。灵敏度高的仪表（单位被测量所引起的偏转角度大），有的采用光标影像指针，如图1-2所示。

3. 限动器 限制指针的最大活动范围。

4. 平衡锤 防止在指针偏转时，由于重心不正而带来误差。

(三) 产生反作用力矩的装置

一般仪表由游丝产生反作用力矩，如图1-1所示；灵敏度很高的仪表采用吊丝或张丝（如图1-2所示）；也有的由电磁力产生。

(四) 轴和轴承

用来支持活动部分转动。为减小摩擦，轴尖用钢制成。轴承材料有多种，如青铜、玻璃、蓝宝石等。有的电度表为了减少磨损，采用磁推轴承，它是利用两块圆柱形磁钢同极性相斥的原理，把两块磁钢装在下轴套内，利用排斥力支撑电度表转动部分的重要，使之悬浮起来。

(五) 调零装置

微调游丝或张丝的固定端，改变初始力矩，从而可使仪表的机械零位与适当的分度线（零位）相重合，如图1-1所示。

(六) 阻尼装置

常用的阻尼器有空气式和电磁感应式两种，如图1-3所示。空气阻尼器是利用一个与转轴相连的薄片在封闭的扇形阻尼盒内运动，薄片受到空气的阻力而产生阻尼力矩；电磁

感应阻尼器是利用一个与转轴相连的铝片在永久磁铁气隙内运动，铝片中产生涡流，涡流与磁场作用而产生阻尼力矩。

磁电系仪表采用电磁感应式阻尼器，而且大都是把活动线圈绕在铝质框架上，利用铝框在强磁场中运动产生阻尼力矩，如图1-3(c)所示。如果活动线圈无铝框，可在活动线圈上绕几匝短路线圈作为阻尼器。

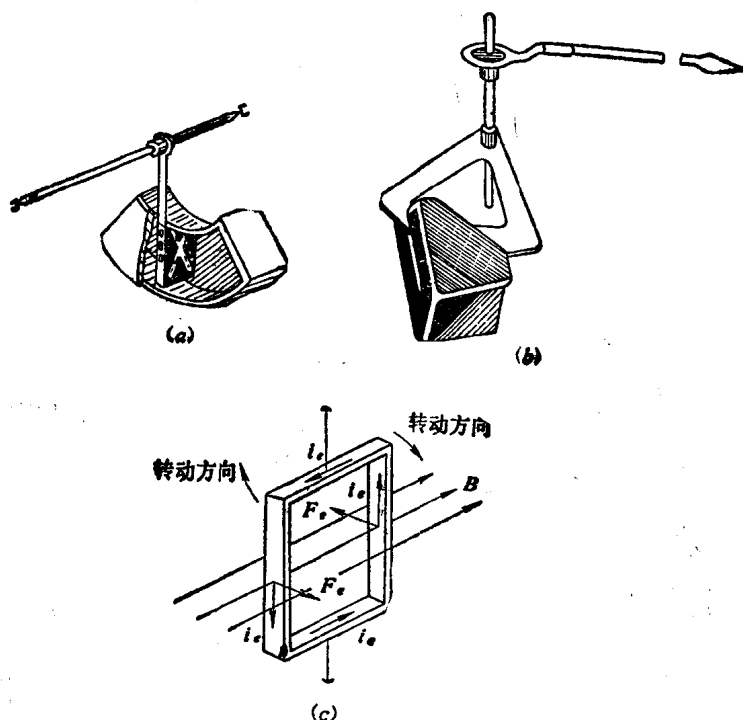


图 1-3 阻尼器
(a)空气式；(b)、(c)电磁感应式

第二节 常用电工仪表的工作原理

电工仪表种类很多，下面介绍常用的几种系列仪表的工作原理和使用特性。

一、磁电系测量机构

(一) 结构

磁电系测量机构由固定的永久磁铁和活动线圈组成，故也称动圈式仪表，如图1-4所示。绕在铝框上的活动线圈，放置在由软铁做成的极靴与圆形铁芯之间的均匀磁场里。线圈两端各连接一盘游丝，一盘在顶部、一盘在底部，游丝的自由端被接至仪表的两个接线柱，游丝除产生反作用力矩外，还作为导流片将被测电流从一盘游丝进入线圈，再从另一盘游丝出来。指针附属于线圈系统与它一起转动。

磁电系测量机构的磁路有多种结构形式，采用上述结构形式的称外磁式；还有将永久磁铁放在线圈内的内磁式，如图1-5所示；以及内外磁式。内磁式的主要优点是：磁屏蔽良好，漏磁小，气隙中磁场强，可减小仪表尺寸。

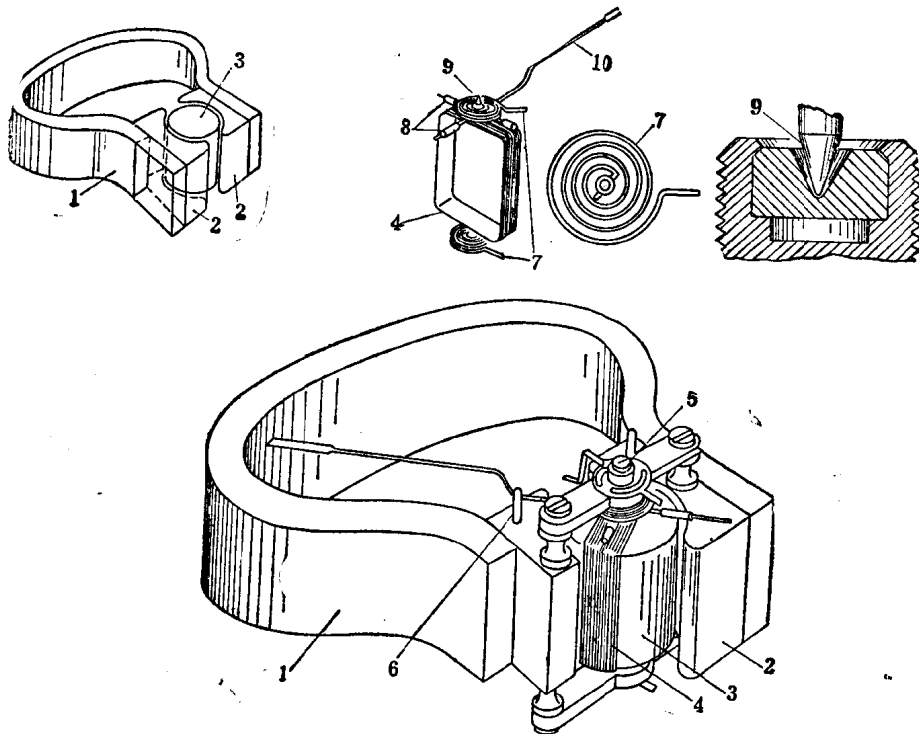


图 1-4 磁电系测量机核

1—永久磁铁；2—极靴；3—圆形铁芯；4—活动线圈；5—零位调节螺丝；6—左限动销；
7—游丝；8—平衡锤；9—轴尖；10—指针

国产仪表型号编制方法规定用C表示磁电式仪表，如C30—A型电流表。

(二) 工作原理

极靴与圆形铁芯的结构，使气隙中磁场呈均匀辐射状，如图1-6所示。

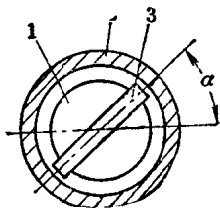


图 1-5 磁电系内磁式测量机构

1—永久磁铁；2—圆柱形铁壳；3—动圈

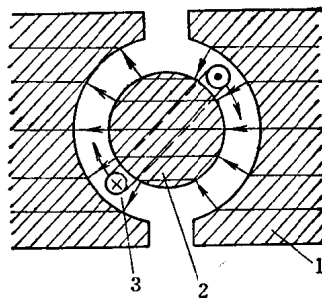


图 1-6 磁电系测量机构的原理性结构

1—极靴；2—铁芯；3—动圈

设气隙的磁感应强度为 B ，线圈垂直边长为 l 、宽度为 b 、有效面积为 A ，线圈匝数为 N ，通过线圈的电流为 i 。因一根载流导体在磁场中受到的电磁力为 $f' = Bli$ ，故作用在 N 匝线圈上的电磁力 $f = NBli$ 。

活动线圈通入电流之后产生的瞬时转动力矩为

$$t_M = 2f \times \frac{b}{2} = NBli = NBAi$$

若 i 为周期电流, 则在一个周期内的平均转动力矩

$$T = \frac{1}{T} \int_0^T t_m dt = NBA I_1 \quad (1-3)$$

式中 $I_1 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt$ ——动圈电流一周期内的平均值, 即周期电流的直流分量。

游丝产生的反作用力矩 $T_\alpha = D\alpha$, 当 T 与 T_α 相等时, 指针的偏转角为

$$\alpha = \frac{NBA}{D} \cdot I_1 = SI_1 \quad (1-4)$$

式中 $S = \frac{\alpha}{I_1} = \frac{NBA}{D}$ ——仪表的电流灵敏度, 对于确定的仪表, S 为常数。

此外, 还有动圈由两个交叉线圈组成的交叉动圈式测量机构, 如图1-7所示。

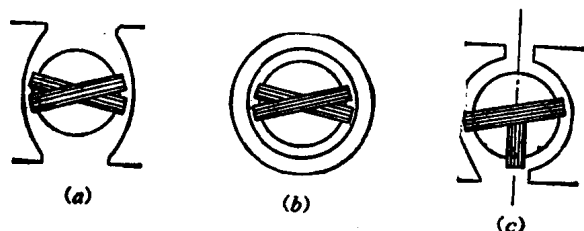


图 1-7 交叉动圈式测量机构
(a)外磁式; (b)内磁式; (c)桥型动圈式

这类磁电式测量机构的特点是: 由于磁路不对称, 使空气隙中的磁场不均匀, 动圈由两个交叉线圈组成, 且用没有反作用力的电流引线带代替游丝, 在无电流时, 指针随机停留在任意位置。通入电流后, 由于电流导入线圈的方向不同, 故两个线圈产生方向相反的两个转动力矩 T_1 、 T_2 , 由于磁场不均匀, 所以转动力矩与偏转角 α 有关, 即转动力矩为 α 的函数

$$T_1 = K_1 I_1 f_1(\alpha)$$

$$T_2 = K_2 I_2 f_2(\alpha)$$

平衡时

$$T_1 = T_2$$

所以

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (1-5)$$

可见, 偏转角 α 是两线圈中电流比率的函数, 故这类仪表称磁电式比率表, 也称磁电式流比计或偶衡表。图1-7(a)、(b)所示结构适用于小比率系数 (0.8~1.2); 图1-7(c)所示结构用于测量电流比值变化大的情况。比率表可用来测量两个电气量的比率 (商), 如两个电流的比率、两个电压的比率或电压与电流的比率。常用于电阻测量或非电量的测量。

(三) 主要特性

(1) 磁电系仪表反映被测量一周期内的平均值 (直流分量), 因此若通入的是对横轴不对称的非正弦周期电流, 则偏转角 α 反映的是非正弦周期电流的直流分量; 若通入的

是正弦交流, 其一周期内平均值为零, 不偏转; 若通入的是恒定电流, 则 α 与恒定电流成正比。从结构来看, 因为磁场的极性是恒定的, 则指针的偏转方向取决于通入线圈电流的方向, 方向与规定的相反, 指针反向偏转, 脱离标度尺, 所以磁电系仪表只能用于测量直流电量, 且使用时必须注意极性, 使电流从仪表“+”端通入。若动圈通以正弦交流电, 因电流方向不断变化, 其平均转动力矩为零, 指针不偏转, 故不能直接测量正弦交流电量, 如果要用于测量交流电量(有效值), 须配上整流器, 这就构成整流系仪表。磁电系仪表还可用于测量非正弦电量的直流分量。

(2) 由式(1-4)可知, 因为 S 是常数, 偏转角 α 与通入线圈的电流 I 呈线性关系, 所以分度线分度均匀, 便于使用。

(3) 因为动圈处于强磁场中, 可减小温度、外磁场等的影响, 所以准确度高。

(4) 由于磁场很强, 只需很小的电流就可使仪表获得足够的转动力矩, 所以磁电系仪表是机电式仪表中最灵敏的一种, 其量程上限可达几微安级, 如 C41 μ A/3 型微安表, 全偏转电流为 9.7 μ A。采用张丝及光标指示结构时, 可制成检流计, 能检测 10^{-8} V 的小电势和 10^{-10} A 的微小电流。

(5) 灵敏度高的仪表, 消耗的功率必然少, 常用的磁电系电流表功耗约为 0.2~0.4 W; 电压表约为 0.1~1.0 W。

(6) 由于通过游丝导流、动圈导线很细, 所以过载能力差。

二、电磁系测量机构

(一) 结构

电磁系测量机构由一个或几个固定的线圈和活动的软磁性铁片组成, 故也称动铁式仪表。在结构上主要分为吸引式和排斥式两种。

图1-8所示为吸引式, 其基本结构是在扁平线圈前面安放一个偏心的可动铁片, α 为偏转角, 当线圈通入电流后产生磁场, 铁片磁化后被吸入线圈夹缝, 驱动指针偏转。

图1-9所示为排斥式, 其基本结构是在圆形线圈内安放两片彼此靠近的软铁片, 其中

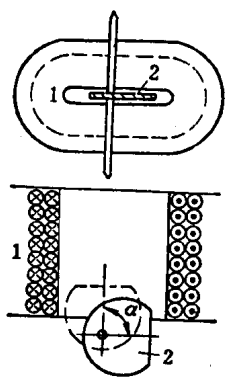


图 1-8 吸引式电磁系测量机构

1—扁平线圈; 2—可动铁片

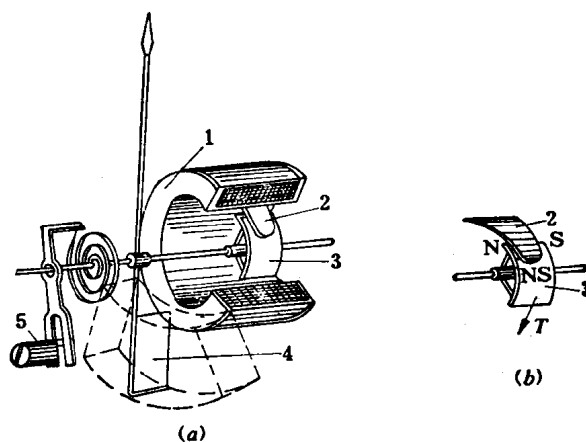


图 1-9 排斥式电磁系测量机构

(a) 结构; (b) 磁化情况

1—圆形线圈; 2—固定铁片; 3—可动铁片; 4—空气阻尼器;
5—调零螺丝

一片固定在线圈内壁，另一片装在转轴上，当线圈接通电流，两片铁片同时被磁化，产生排斥力，驱动指针偏转。

电磁系测量机构，由于被测电流不需导入活动部分，因而结构简单，价格低廉，可直接测安培级的电流。因其磁场不强，电磁阻尼不能满足要求，一般都采用空气阻尼器。

国产仪表型号中用T表示电磁系，如T₁₁-A型电流表。

不论吸引式还是排斥式，动铁片偏转方向与线圈中电流的方向无关，因为电流改变方向时，线圈磁场与铁片磁化的极性同时改变，作用力方向不变，所以电磁式仪表可测量直流电流和电压，也可测量交流电流和电压。

(二) 工作原理

电磁系测量机构的转动力矩取决于线圈对铁片的吸引力或两磁化铁片间的排斥力。

当线圈通入直流电流 I 时，线圈磁场的强弱与磁势 NI 成正比（ N 为线圈匝数）；铁片磁化后磁性的强弱也与线圈的 NI 成正比。因而不论吸引式或排斥式，转动力矩都与线圈的 $(NI)^2$ 成正比。此外，因为线圈中的磁场是不均匀的，而且动铁片偏转时将改变磁场的分布情况，所以转动力矩是偏转角 α 的函数。故电磁系测量机构的转动力矩可表达为

$$T = K(NI)^2 f(\alpha)$$

当固定线圈通入交流 i 时，瞬时转动力矩为

$$t_M = K(Ni)^2 f(\alpha)$$

活动部分，由于惯性来不及随瞬时转动力矩而变，其偏转位置决定于平均值。平均转动力矩为

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{T} \int_0^T t_M dt = KN^2 f(\alpha) \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \\ &= KN^2 I^2 f(\alpha) \end{aligned} \quad (1-6)$$

可见，测量交流电量时电磁系机构的转动力矩与通入线圈电流的有效值平方成比例。

反作用力矩通常是由游丝产生，则平衡时偏转角

$$\alpha = \frac{K}{D}(NI)^2 f(\alpha) \quad (1-7)$$

所以，电磁系仪表的偏转角，测直流量时决定于电流值的平方；测交流量时决定于电流有效值的平方。

(三) 主要特性

(1) 电磁系仪表反映被测量的有效值，因分度线表示被测量的有效值，而偏转角 α 与电流 I 的平方成比例，所以分度线的分度不均匀，前密后稀。

(2) 由于被测电流是通过固定线圈，故线圈可采用粗导线，容许较大的被测电流通过，如几百 A。仪表过载能力强，功耗较大。

(3) 因为仪表内部磁场较弱，灵敏度较低，易受外界磁场影响，须加磁屏蔽或采用不受均匀外界磁场影响的无定向结构。无定向结构是由两套完全相同的线圈和铁片构成，两个动铁片位置相差 180° ，对称地装在同一转轴两侧，两个线圈反向串联，当被测电流通过

时,产生的转动力矩方向相同,若有均匀外界磁场作用,不论外磁场的方向如何,内外磁场叠加结果总是使一个线圈磁场增强;另一个削弱,从而外磁场不会对转动力矩产生影响。

(4) 电磁系仪表可交直流两用,而实际一般只用于测量交流。因为测量直流时,铁片磁化产生的磁滞误差可能较大且不稳定,如当被测量增减或通过仪表电流方向不同时误差都不相同,所以电磁系测量机构更适用于测量交流,只有采用优质导磁材料(如坡莫合金)构成的交直流两用电磁系仪表,才用于恒定直流测量。

(5) 由于频率变化,电磁系仪表有测量误差。当频率增高时,对于电流表主要因铁片等金属部件中感应产生的涡流会对磁场有去磁作用,使转动力矩减小;对于电压表主要因线圈的感抗变化,使在一定电压下通过线圈的电流变小而产生误差。一般说,电磁系仪表只适用于工频电路,否则需采取频率补偿装置。

电磁系仪表由于结构简单、价廉,在工业上被广泛采用。

三、电动系测量机构

(一) 结构

电动系测量机构由两组线圈组成,建立磁场的固定线圈及在该磁场中偏转的活动线圈,电流是通过游丝引入动圈的。电动系测量机构有两种结构:

1. 无铁芯的电动系测量机构 通常简称为电动系机构,如图1-10所示,其固定线圈由两个组成,彼此距离不大,以获得比较均匀的磁场,并使动圈的转轴便于通过。由于线圈建立的磁场很弱,只能采用空气阻尼器;而且为避免外界磁场对测量机构的影响,须加屏蔽。然而因为其磁感应强度与通过固定线圈的电流成正比关系,准确度高。

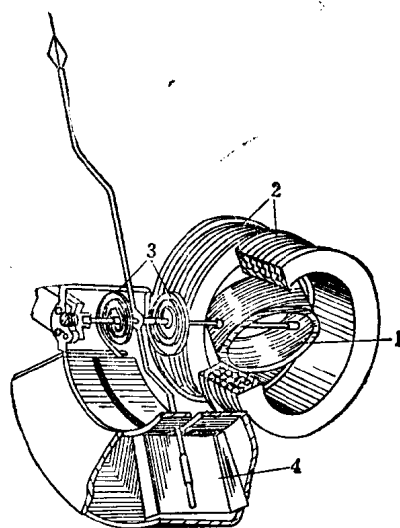


图 1-10 电动系测量机构

1—动圈; 2—定圈; 3—游丝; 4—阻尼器

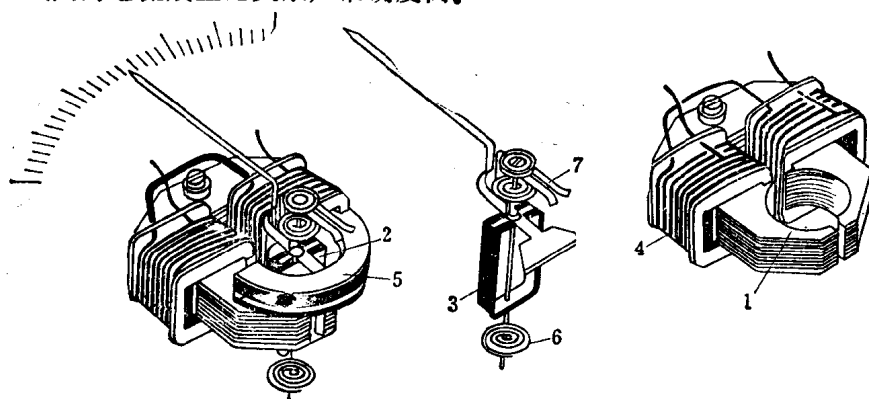


图 1-11 铁磁电动系测量机构

1—铁轭; 2—圆形铁芯; 3—动圈; 4—定圈; 5—阻抗器; 6—游丝; 7—零位调节器

2. 铁磁电动系测量机构 该机构如图1-11所示, 为了产生较强的磁场, 增大转动力矩, 将定圈绕在相互绝缘的硅钢片叠成的铁芯上, 动圈内装有圆形铁芯, 使气隙的磁通呈均匀辐射状。阻尼采用电磁感应式或空气式阻尼器。可见, 如果把磁电系机构的永久磁铁换成电磁铁就构成铁磁电动系测量机构。由于磁场较强, 故灵敏度高, 而因有铁磁物质, 产生铁芯损失, 准确度比无铁芯式的低得多。

国产仪表型号中用D表示电动系, 如D₂₈型电压表。

(二) 工作原理

设电动系测量机构(无铁芯)的动圈匝数为 N_1 , 有效面积为 A , 通过线圈的电流为 i_1 。动圈在定圈所产生的均匀磁场中, 且动圈面与磁场有一夹角 β , 如图1-12所示。

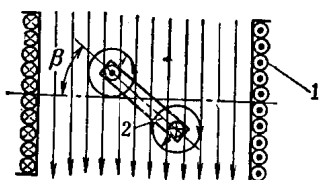


图 1-12 电动系测量机构工作原理图

1—定圈; 2—动圈

根据载流导体在磁场中受电磁力作用, 可知动圈的瞬时转动力矩为

$$t_M = N_1 B A i_1 \sin \beta$$

式中 B ——定圈的磁感应强度, 由于无铁磁物质, B 与定圈中的电流 i_2 成正比。即

$$B = K_1 i_2$$

$$\text{则} \quad t_M = K_1 N_1 A i_1 i_2 \sin \beta = K_2 i_1 i_2 \sin \beta \quad (1-8)$$

可见, 电动系机构的转动力矩不仅与通过动圈和定圈的电流成比例, 而且与两组线圈间相互位置有关。当 i_1 和 i_2 方向同时改变时, 转动力矩方向不改变, 因此电动系仪表可交直流两用。

测量恒定直流时, $i_1 = I_1$, $i_2 = I_2$ 为定值。转动力矩

$$T = K_2 I_1 I_2 \sin \beta$$

游丝产生反作用力矩, 平衡时偏转角

$$\alpha = \frac{K_2}{D} I_1 I_2 \sin \beta = K I_1 I_2 \sin \beta \quad (1-9)$$

测量交流时, 由于活动部分的惯性, 偏转角决定于平均转动力矩。设 i_1 、 i_2 频率相同, 且

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t, \quad i_2 = \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t - \psi)$$

式中 I_1 、 I_2 ——为有效值;

ψ ——是动圈电流与定圈电流之间的相位差。

平均转动力矩

$$\begin{aligned} T &= K_2 (\sin \beta) \times \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt \\ &= K_2 I_1 I_2 \cos \psi \sin \beta \end{aligned} \quad (1-10)$$

游丝产生反作用力矩, 平衡时偏转角为

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{K_2}{D} I_1 I_2 \cos\psi \sin\beta \\ &= K I_1 I_2 \cos\psi \sin\beta\end{aligned}\quad (1-11)$$

由此可见, 电动系测量机构的偏转角不仅取决于两电流有效值的乘积, 还与两电流之间的相位差有关, 因此可能出现正偏、反偏或不偏转三种情况, 如当 $\psi = \pm 90^\circ$ 时, 不发生偏转。

铁磁电动系测量机构, 由于气隙的磁通呈辐射方向, 动圈的有效边始终是垂直切割磁力线, 则在上述转动力矩公式中 $\sin\beta = 1$; 此外, 磁感应强度 $B = K_1 i_2$ 与铁芯有关。因此铁磁电动系测量机构的偏转角为

$$\alpha = K I_1 I_2 \cos\psi \quad (1-12)$$

该式没考虑 i_2 与 B 之间的相位差, 但实际上此相位差仅 $2^\circ \sim 3^\circ$, 故可以略去。

(三) 主要特性

(1) 电动系仪表反映被测量的有效值和同频率响应特性, 即通入动圈、定圈电流, 只有同频率的谐波才产生转动力矩。因此, 电动系仪表可交直流两用, 且可测量非正弦电量。仪表标度尺反映被测量的有效值, 测量正弦交流或非正弦交流时, 读数为有效值; 测量恒定直流时, 由于直流的量值就是其有效值, 故从标度尺可直接读出被测恒定直流的数值。

铁磁电动式仪表一般不用于直流测量, 因此时铁芯有残磁, 误差增大。

(2) 电动系仪表, 因无铁磁物质, 准确度高, 但由于是在弱磁场中工作, 外界磁场影响大, 需采用磁屏蔽。

铁磁电动系仪表, 因有铁磁物质, 误差较大。然而因转动力矩大, 能耐机械震动, 且受外界磁场影响小。所以主要作为配电盘式的功率表、功率因数表、频率表等, 仅在特殊情况下才用于测量电压、电流。

(3) 当用作电流表或电压表时, 因偏转角 α 与两个线圈的电流乘积成比例, 故分度不均匀。而作功率表时, 可得到近似线性的分度。

(4) 因用游丝引导电流, 故过载能力差。

四、数字式仪表

连续变化的量如电流、电压、温度等称为模拟量。上述机电式仪表是用指针偏转指示的分度来反映测量结果, 其偏转随被测量而连续变化, 即指针指示的分度是连续地反映被测物理量的变化, 这类仪表属于模拟式仪表, 故称为直接作用模拟指示电测量仪表。

近20多年来, 由于电子技术的高速发展, 特别是大规模集成电路的发展和应用, 使得数字式仪表的使用日益广泛。数字量是指以某种单位的整倍数来表示的不连续量, 例如时间是一种连续变化的物理量, 即是模拟量, 如果用数字式钟表来计时, 则是以 s (秒) 或以 min (分) 等单位步进计时, 也就是以每 $1s$ 断续的时刻来表示时间, 那么时间的描述就变成数字量了。数字式仪表就是将连续的模拟量变换为断续的数字量, 把输入量的大小用数字显示出来的仪表。可见, 数字式仪表的核心器件是 A/D (模/数) 变换器, 它是把

模拟量(A)变换成数字量(D)的电路。变换比较方便的物理量是直流电压和脉冲频率,对应的主要数字仪表为数字电压表和数字频率表,其它物理量可以通过传感器变成直流电压或频率量,然后再进行数字化测量。

图1-13为直流数字电压表的原理框图。输入的模拟量是直流电压,A/D变换器将输入直流电压变换成相应的脉冲数输出,例如输入电压为100mV,输出100个脉冲;输入为50mV,输出为50个脉冲。脉冲送入计数器,然后通过显示器以数字形式显示出输入直流电压的量值。

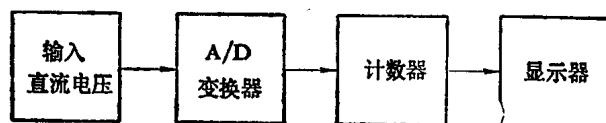


图 1-13 直流数字电压表原理框图

图1-14为数字频率表的原理框图。其工作原理是:被测频率经放大、整形后变成序列窄脉冲送至主门;门控电路产生一个固定宽度(持续时间)的门控信号,当门控信号到达主门时,主门开放,让窄脉冲通过进入计数器,门控信号结束,主门关闭,停止计数。计数器计出通过的窄脉冲数,由显示器以数字形式显示出来。

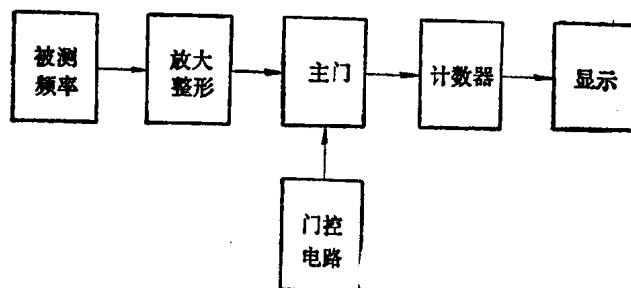


图 1-14 数字频率表原理框图

数字式仪表的主要特点是测量精度高,读数方便准确,测量响应时间短,便于利用计算机进行处理,容易实现自动测量。

第三节 测量电路及仪表

测量电路是将被测量X变换为另一电气量Y,以便测量机构或仪表能直接进行测量的电路。根据测试的需求,测量电路可由电源、放大器、变换器以及R、L、C等不同的元器件组合而成。

测量电路可以与测量机构(简称表头)组合成电测量指示仪表,如电压表、电流表、功率表等,它在测量时不需要加辅助设备,具有使用方便、读数直观的优点。测量电路也可以单独构成测量辅助装置,与仪表配合进行电量或非电量的测量。

一、电流表、电压表的构成及量程扩大

由磁电系、电磁系、电动系测量机构的工作原理可知,其偏转角与通入机构的电流成