

高等学校教材

电能计量学

上海电力学院 李文娟 主编

33.4

水利电力出版社

内 容 提 要

本书为高等专科学校“用量管理与监察”专业试用教材。书中从用电管理与监察的需要出发,着重介绍电能计量装置各部分的工作原理、使用方法和分析问题的基本方法,适当介绍了电能计量专业的新技术。主要内容有:感应式电度表的结构和工作原理、误差特性及误差调整装置,电能计量方式,测量用互感器,电能计量装置的接线检查及其综合误差,感应式电度表的校验及校验装置,特种电度表,电力负荷监控装置第九章。各章后均有习题可供练习。

本书也可供有关技术人员参考。

高等学校教材

电 能 计 量 学

上海电力学院 李文娟 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 11.75印张 263千字

1989年10月第一版 1989年10月北京第一次印刷

印数 0001—2910 册

ISBN7-120-00752-1/TM·207

定价2.40元

前 言

根据全国高等学校水利电力类专业教材编审出版规划以及我院拟定“用电管理与监察”专业教材编写计划,编写了本教材。本书可作为该专业的高等专科学校试用教材。也可供有关技术人员参考。

本书从用电管理与监察的需要出发,着重介绍电能计量装置各部分的工作原理、使用方法和分析问题的基本方法,适当介绍电能计量专业的新技术。书中的例题、习题和实验可便于学生理解和运用所学的理论知识。

本课程总学时定为60学时,其中实验约占12~15学时。书中带有*号的内容不计在学时之内,可由各学校自行选取。

全书共分九章。其中第六、七、九章由徐美希编写,第三章中的无功电度表及计量方式和第五章由黄燕君编写。李文娟为全书主编,负责编写其余各章和全书的统稿定稿工作。罗廷璇副教授对本书稿进行了审阅,提出了许多宝贵的修改意见。对此,谨致以衷心的感谢。编写过程中,得到华东电管局、浙江省电力工业局及上海市电力工业局等单位的协助,在此表示深切的谢意。

由于编写水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

一九八八年六月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 感应式电度表的结构和工作原理	4
第一节 单相感应式电度表的结构	4
第二节 单相感应式电度表的工作原理	8
第三节 三相感应式电度表的结构	16
第二章 感应式电度表的误差特性及调整装置	18
第一节 电度表的附加力矩及其误差	18
第二节 电度表的负荷特性曲线	20
第三节 电度表的附加误差	23
第四节 误差调整装置	28
第三章 电能计量方式	34
第一节 单相电路有功电能的测量	34
第二节 三相电路有功电能的测量	35
第三节 无功电度表及其计量方式	41
第四节* 用对称分量法分析三相电路中无功电能的测量误差	48
第五节 高电压大电流系统的电能计量	54
第四章 测量用互感器	57
第一节 电流互感器	57
第二节 电压互感器	66
第三节* 互感器的试验	76
第五章 电能计量装置的接线检查	84
第一节 不带电检查互感器的接线	84
第二节 带电检查互感器的接线	87
第三节 带电检查电度表和互感器的联合接线	92
第四节 追退电量的计量方法	100
第六章 电能计量装置的综合误差	104
第一节 有功电能计量装置的综合误差	104
第二节 无功电能计量装置的综合误差	116
第三节 减少电能计量装置综合误差的方法	117
第七章 感应式电度表的校验及校验装置	119
第一节 感应式电度表的校验	119
第二节 电度表校验装置	124
第三节 单相电度表校验台	132

第四节* 电度表自动化校验	134
第八章 特种电度表	141
第一节 标准电度表	141
第二节 最大需量表	142
第三节 脉冲电度表	144
第四节 分时计量电度表	145
第五节* 电子电度表	153
第六节* 微处理机测量电能	165
第七节* Q_h 表	166
第九章 电力负荷监控装置	169
第一节 负荷控制方法	169
第二节 电力定量器	170
第三节* 微机型电力负荷监控仪	176
主要参考文献	181

绪 论

一、电能计量装置的一般概念

现代社会中，电力已成为国民经济和人民生活必不可少的一种能源。电力作为电力工业的一种产品来讲，它不同于其他产品的显著特点是：它的生产、输送和使用（即产、供、销）是在同一时间内完成的，三个环节互相依存、互相制约。搞好用电管理，是保证电力安全生产和向用电单位正常供电的必要条件。

1. 电能计量装置

在电力系统中，为了安全生产、保证电能质量以及做好经济核算工作，装设了各种各样的测量表计，使我们能随时检测所需要的各种参数：电压、电流、功率、频率、电能……。这些仪表中，有反映随时间变化的表计，也有记录累积值的表计。本书讲述的电度表是专门用来测量电能累积值的一种表计。

在高电压、大电流系统中，一般的测量表计是不能直接接入被测电路进行测量，需要先通过电压互感器和电流互感器，变换成低电压、小电流后再进行测量。我们把电度表与其配合使用的互感器以及电度表到互感器的二次回路连接线统称为电能计量装置。

2. 电能计量装置的作用

（1）通过电能计量装置测量发电量、厂用电量、供电量以及售电量等，为制定生产计划、供电计划，搞好经济核算合理计收电费等提供依据。

（2）工农业用电部门，通过电能计量装置来加强经营管理，考核单位产品耗电量，制定电力消耗定额，以利于开展节约用电，提高经济效益。

（3）随着人民生活的不断提高，民用电量与日俱增，电度表已逐渐成为千家万户不可缺少的电气仪表。

总而言之，电能计量管理直接关系到国家的财政收入，电业部门的最终经济效益和用户电费的合理负担。若电能计量设备不全、安装不妥、管理不善，都会影响电能的正确计量，影响电费的收入，对国家不利。

二、电度表的发展概况

19世纪中叶，工业上开始使用电能。白炽灯出现后，电能的应用面大为扩展。感应式电动机出现后，使交流电能占据了电能应用的主要地位。

1881年，爱迪生发明了最早的电能测量仪器——直流安培小时计。1885年正式试制成功第一台感应式交流电度表。由于感应式电度表具有结构简单、操作安全、价廉、耐用、又便于维修和批量生产等一系列优点，所以发展很快。从二、三十年代开始，陆续出现了各种无功电度表、脉冲电度表、分时计量电度表以及0.2级以上的标准电度表。

60年代以来，开始出现采用固体电路的电子式电度表，准确度达0.5级~0.05级。近些年来又出现了应用微处理机的电度表。

当今世界发达国家对电度表的生产和发展极为重视。为了提高电度表的质量、产量和降低制造成本，各国都在电度表的结构、使用材料及元件等方面不断地研究改进。电度表的质量是以精度、过负载能力和延长一次使用寿命等几项指标为主要标志的。目前国外感应式单相电度表精度可达1.0级，三相感应式电度表可达0.5级；单相电度表过负荷能力为400%~667%；一次使用寿命在6~7年以上，个别国家可达15~30年校验一次。

解放前，我国的电能测量仪表生产是一片空白。50年代从仿制开始，经过二十多年的努力，现在我国的电度表制造业，已具备了相当的水平和规模，不仅供给国内，还远销国外。目前我国正在研制0.1级~0.05级电子式标准电度表、多路综合需量表、分时计量电度表等特种电表。

此外，在电度表的制造中采用装配自动线，在电度表的校验中采用微机自动化校验装置，都能大大地提高劳动生产率、降低成本，这也是国外的一个发展动向。

三、电度表的分类及铭牌标志

我们知道，负荷在一段时间内所消耗的电能 $W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = P(t_2 - t_1)$ ，即电能是这段时

间内平均功率 P 与时间的乘积。这表明电能可用功率和时间的乘积来计量，这是电能测量的基本公式。目前所用的电能测量仪表都是应用这一原理实现的。如测量功率的有电动式功率表、电子乘法器以及微处理机等，相应的测量电能的方法有感应式电度表、电子电度表及微机采样电度表（暂名）等。

目前，电度表的分类按不同情况划分如下：

按照所测不同电流种类可分为：直流式和交流式；

按照不同用途可分为：单相感应式电度表、三相感应式电度表和特种电度表（包括标准电度表、最大需量表、电子电度表等）；

按照准确度等级可分为：普通电度表（3.0、2.0、1.0、0.5级）；标准电度表（0.5、0.2、0.1、0.05级）。

由于感应式电度表结构简单、工作可靠、维修方便、使用寿命长等一系列优点，至今在世界各国得到广泛的应用。我国也以感应式电度表为主要计量元件。下面介绍它的铭牌标志。

每只出厂的感应式电度表（以下均简称电度表），在表盘上都钉有一块铭牌，通常标注了名称、型号、标定电流等项标志。国产电度表铭牌上各项标志的含意分别说明如下：

（1）名称 标明该电度表按用途分类的名称，如单相电度表、三相三线有功电度表等。

（2）型号 我国对电度表型号表示方式规定如下：

类别代号	组别代号	设计序号
D—电度表	D—单相 S—三相三线	阿拉伯数字

T—三相四线

X—无功

B—标准

.....

例如: DD—单相电度表, 如DD₅、DD₂₈型。

DB—标准电度表, 如DB₁、DB₅型。

(3) 准确度等级 用置于圆圈内的数字来表示, 如圈内数字2.0表明该表准确度等级为2.0级。

(4) 电能计算单位 有功电度表为“千瓦·小时”或“kW·h”; 无功电度表为“千乏·小时”或“kvar·h”。

(5) 标定电流和额定最大电流 作为计算负载的基数电流值叫标定电流, 用 I_b 表示。能长期工作, 而且误差与温升完全满足技术条件的最大电流值叫额定最大电流, 用 I_m 表示。如DD₂₈型电度表铭牌标明“2(4)A”时, 表明标定电流 I_b 为2A, 额定最大电流 I_m 为4A。

我国原机械工业部部颁标准《交流电度表》(JB793-78)中规定:

直接接入式的单相电度表, $I_m \geq 2I_b$;

直接接入式的三相电度表, $I_m \geq 1.5I_b$;

经互感器接入式的电度表, $I_m \geq 1.2I_b$;

若铭牌上只标出标定电流 I_b 数值的电度表, $I_m \leq 1.5I_b$ 。

(6) 额定电压 三相电度表额定电压的标注有三种方法:

标注“3×380V”, 表示三相, 额定线电压为380V;

标注“3×380/220V”, 表示三相, 额定线电压为380V, 额定相电压为220V;

标注“ $3 \times \frac{6000}{100}V$ ”, 表示经电压互感器接入式的电度表, 用电压互感器的额定变比形式来标注, 电度表的额定电压为100V。

(7) 电度表常数 用A表示电度表计度器的指示数和转盘转数之间的比例数。如A=1500r/kW·h。

(8) 额定频率 “50Hz”。

第一章 感应式电度表的结构和工作原理

利用固定交流磁场与由该磁场在可动部分的导体中所感应的电流之间的作用力而工作的仪表，称为感应式仪表。常用的交流电度表就是一种感应式仪表。

电度表用来测量电源发出的能量和负荷消耗的能量，它等于

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (1-1)$$

从上式中可以看出，电度表不仅要反映出负载消耗的功率，而且要反映随着时间的推移所消耗能量积累的总和。

第一节 单相感应式电度表的结构

单相电度表的型号繁多，但其结构基本相似，由两大部分组成：

(1) 测量机构 包括驱动元件、传动元件、制动元件、轴承和计度器。

(2) 辅助部件 包括基架、底座、表盖、端钮盒和铭牌。

一、驱动元件

驱动元件包括电压电磁铁和电流电磁铁。它的作用是交变的电压和电流产生的交变磁通穿过转盘时，该磁通与其在转盘中感应的电流相互作用，产生驱动力矩，使转盘转动。

(1) 电压电磁铁（也叫并联电磁铁）电压电磁铁由电压铁芯1、电压线圈2和回磁极12组成。电压线圈并联于负载上，无论有无负荷电流，电压线圈总是消耗功率的。成年累月，其耗电量将是不可忽视的。一般其消耗功率控制在0.5~1.5W之内。电压线圈的特点是匝数多(25~50匝/V)，线径细(直径为0.08~0.16mm)。电压铁芯采用0.35~0.5mm厚的硅

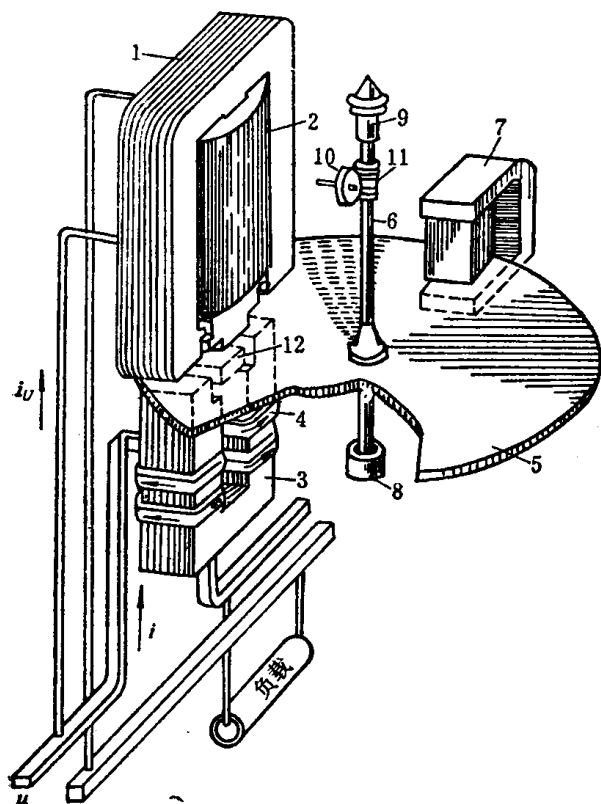


图 1-1 单相电度表的测量机构简图

1—电压铁芯；2—电压线圈；3—电流铁芯；4—电流线圈；
5—转盘；6—转轴；7—制动元件；8—下轴承；9—上轴承；
10—蜗轮；11—蜗杆；12—回磁极

钢片叠成，片间有绝缘，使电压铁芯压在不大的激磁安匝下就能得到所需的电压磁通。回磁极用1.5~2.0mm厚的钢板冲压而成，用作电压工作磁通的回路。

电压电磁铁的等值电路图和相量图如图1-2所示。电压电磁铁的阻抗较大，一般电压线圈中的电流 $\dot{I}_U$ 滞后电压 $\dot{U}$ 的相位角达到 $75^\circ \sim 80^\circ$ 。

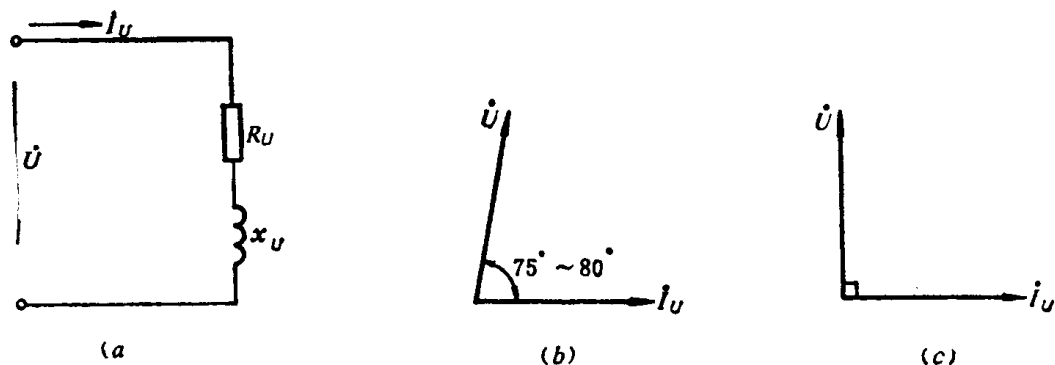


图 1-2 电压电磁铁的等值电路图和相量图
(a)等值电路图；(b)实际相量图；(c)理想相量图

(2) 电流电磁铁（也叫串联电磁铁） 电流电磁铁由电流铁芯3、电流线圈4组成。电流线圈与负荷串联，所以通过电流线圈的电流就是负荷电流。电流线圈的特点是匝数少，它的安匝数一般在60~150安匝范围内，电流密度按 $3 \sim 5 \text{ A/mm}^2$ 考虑。根据《交流电度表》(JB793-78)标准规定，电度表单个电流线圈在通入标定电流时，所消耗的视在功率不超过2.0VA。电流铁芯用0.35mm厚的“U”形高硅电工钢片叠成。

电流线圈通常分成匝数相等的两部分，分别绕在U形铁芯的两柱上，其绕制方向应使两部分线圈产生的电流磁通在铁芯内部的方向相同。

电度表的驱动元件，从其布置形式来看，有切线式和辐射式两种。切线式的电压铁芯垂直于转盘半径方向平面放置，如图1-3(a)所示；辐射式的电压铁芯平行于转盘半径方向放置，如图1-3(b)所示。切线式驱动元件比辐射式的结构简单、体积小、便于安装等，因此得到广泛采用。

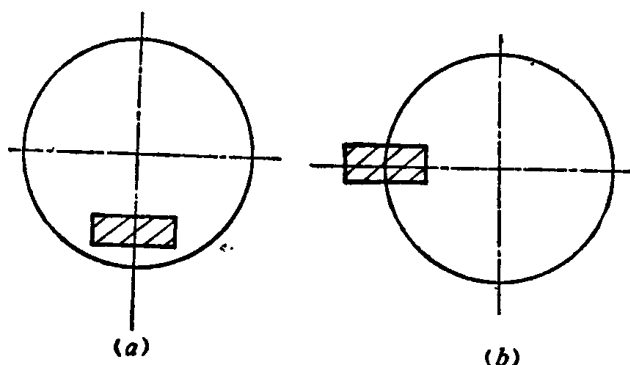


图 1-3 电度表驱动元件的布置形式
(a)切线式驱动元件；(b)辐射式驱动元件

图1-1是切线式驱动元件的分离式铁芯结构图，此外还有封闭式和组合封闭式结构。分离式结构的电压铁芯和电流铁芯是彼此分开的，用螺钉固定在基架上。此类结构耗用的

硅钢片较少，而且便于检修。大批量生产的普通电度表，多采用分离式结构的切线式驱动元件。

二、转动元件

它由转盘5和转轴6（图1-1）组成，在驱动元件于转盘上产生的驱动力矩作用下连续转动。转盘的导电率要大，重量要轻，且要保证一定的机械强度，所以转盘用纯铝板制成。转盘直径通常为80~100mm，厚度为0.8~1.2mm。

转轴用铝合金或铜合金棒材制成。转轴上端装有蜗轮传动机构（图1-1中的10、11部件），将转盘的转数传递给计度器，累计成电度数。

三、轴承

电度表的轴承是主要元件之一。上轴承9位于转轴上端，起导向作用。下轴承8位于转轴下端，支撑转动元件的全部重量。现代电度表轴承分为钢珠宝石结构和磁力结构两种：

（1）钢珠宝石轴承 钢珠由铬钢或不锈钢材料精磨而成，直径一般为0.8~1.5mm。宝石用钢玉（三氧化二铝）制成，其曲率半径为1~1.7mm。图1-4为钢珠宝石轴承的三种基本类型的示意图。图(a)为倒宝石轴承，其中宝石的凹面向下，灰尘不易落入球穴内。在宝石与钢珠的相对运动中，硬度较大的宝石为主动状态，故其磨损较正宝石轴承[图1-4(b)]为小。双宝石轴承[图1-4(c)]中的钢珠在两个宝石之间可以自由转动，因此钢珠表面受磨均匀，大大延长了轴承的使用寿命。但是制造工艺复杂，成本较高。

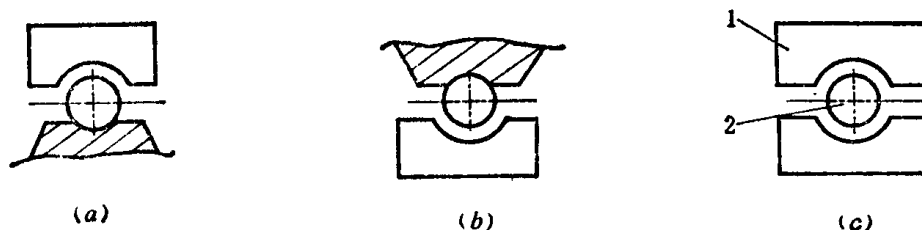


图 1-4 钢珠宝石轴承的示意图
(a)倒宝石轴承; (b)正宝石轴承; (c)双宝石轴承
1—宝石; 2—钢珠

总之，由宝石和钢珠构成的轴承，由于宝石和钢珠之间的机械磨损、润滑油老化等原因，影响了电度表一次的使用寿命。

（2）磁力轴承 这是近年逐渐发展起来的一种轴承。它的优点是利用磁力平衡转盘产生的重力，消除轴向压力。在磁力轴承中一般又可分为磁推力轴承和磁悬式轴承。

磁推力轴承如图1-5(a)所示。利用两个环形的永久磁铁的排斥力，使电度表的转动体悬空，其上下两端均用不锈钢轴销针与石墨尼龙衬套作为导向，制止它在水平方向的移动，并保证了磁场的同心度。磁悬式轴承如图1-5(b)所示，它主要依靠磁钢与导磁板（或磁钢）之间的吸力而使转动部分悬空。

磁力轴承中采用石墨塑料等自润滑材料制造的轴衬，无需润滑油便能达到润滑目的，因而可长期使用。

据报道, 国外许多新结构电度表中均已采用磁力轴承, 一次调整后的使用寿命可达到20~30年左右, 这就大大延长了电度表的检修周期, 并保证了电度表的准确计量。我国自80年代以来, 已试制出采用磁推轴承的电度表, 保证了电度表的稳定性, 延长了使用寿命, 10年内不必检修。

四、制动元件

制动元件由永久磁铁及其调整装置组成。永久磁铁采用具有较大的矫顽力和剩磁感应强度、磁性稳定、受外界磁场和温度的影响较小的合金材料, 如铝镍合金或铝镍钴合金压铸而成。

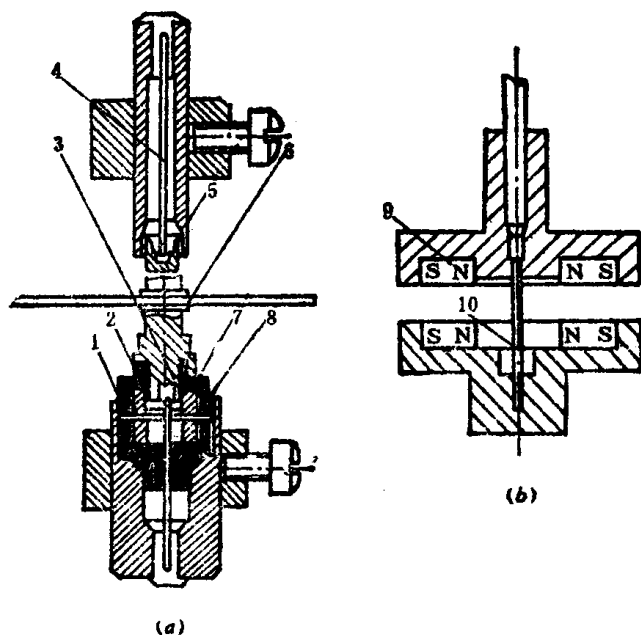


图 1-5 磁力轴承

(a)磁推力轴承; (b)磁悬式轴承

1—转轴; 2—石墨轴承; 3—环形永久磁铁; 4—安装板; 5—固定螺丝; 6—销; 7—上磁铁; 8—下磁铁; 9—磁钢; 10—轴销针

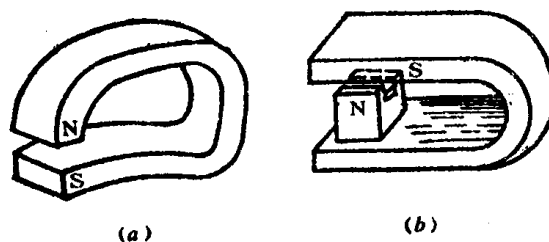


图 1-6 永久磁铁

(a)单磁通型; (b)双磁通型

永久磁铁的基本结构可分为两类: 单磁通型和双磁通型。图1-6(a)为单磁通永久磁铁, 它是由低磁能合金铸成细长的整体形状, 无磁轭, 制动磁通只穿过转盘一次构成回路。这类磁铁机械强度较高, 但引起转动元件的振动亦较大。图1-6(b)为双磁通永久磁铁, 它由高磁能的合金制成, 磁铁固定在铸钢磁轭上, 其磁通两次穿过转盘构成回路, 磁的稳定性较高。双磁通永久磁铁常固定在铝合金外套内。这类磁铁的机械强度较差, 但能增大制动力矩, 引起转动元件的振动较小, 所以得到了广泛的应用。

五、计度器

电度表是供计算电能用的, 它属于积算仪表。因为它所测量的是在某一时间段内总值不断上升的电能。因此, 为了记录被消耗的电能, 每一只感应式电度表不管形式如何, 都有一个依靠联动机构与可动部分相连的积算机构。积算机构是转数的计算器, 有三种型式: 字轮式、指针式和字盘式。在电度表中用得最普遍的是字轮式计度器, 主要由齿轮联动机件、若干个有0到9的十个数码的轮子、以及遮盖联动机件和轮子的铝板组成的。铝板上开有窗孔, 以备读取被测量。字轮式计度器的结构示于图1-7中。

电度表转盘的旋转通过齿轮系统传送到计度器。为此, 在电度表可动部分的转轴10上, 装有蜗杆11, 它与固定安装在横轴1上的蜗轮12交链。转盘的旋转运动通过蜗轮蜗杆传递

给作为计度器第一环节的横轴1和一系列齿轮13和14传送给第一个带有0~9数字的轮子。第一个轮子旋转一周，相当于随其后的轮子（从右到左）旋转十分之一周，而第三个轮子又只有第二个轮子的十分之一，依此类推。字轮式计度器通常具有五个轮子。

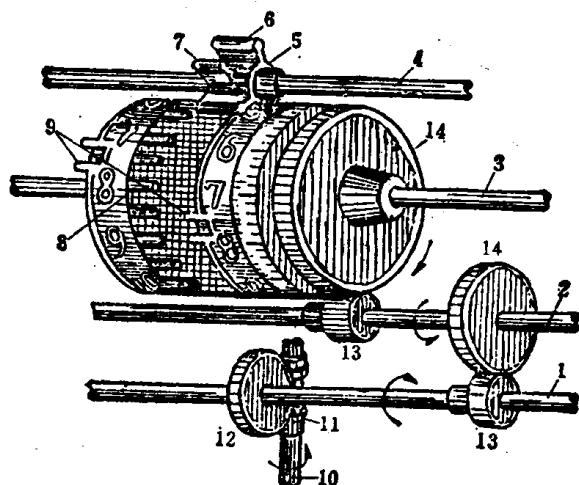


图 1-7 字轮式计度器

1~4—横轴；5—进位轮；6—长齿；7—短齿；8—稍齿；
9—槽齿；10—转轴；11—蜗杆；12—蜗轮；13—主动轮；
14—从动轮

被计度器记录下来一个单位的电能，视齿轮数目及其传递数而定，它与电度表转盘的转数相对应。

六、辅助部件

(1) 支架 用于支撑和固定测量机构，它对电度表的技术特性有一定的影响。基架应有足够的机械强度。

(2) 外壳 由底座与表盖等组合而成，用绝缘材料或金属材料制作。底座用来组装测量机构。表盖有用铝板冲压成的，也有用玻璃、胶木或塑料压制而成的。

(3) 端钮盒 用来连接电度表的电流、电压线圈和被测电路。整个端钮盒应有足够的机械强度和良好的绝缘。

(4) 铭牌 附在表盖上，或固定在计度器的框架上，它应标明制造厂、表型、额定电压、标定电流、频率、相数、准确度等级以及电度表常数A等。

第二节 单相感应式电度表的工作原理

一、转盘转动原理及驱动力矩表达式

由电工原理得知，载流导体在磁场内将受到电磁力 f 的作用。根据左手定则确定其受力方向如图1-8所示。电磁力 f 的大小可用下式表示

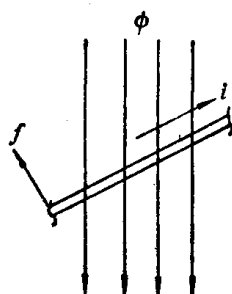


图 1-8 载流导体在磁场中的受力情况

$$f = c\phi i \quad (1-2)$$

式中 ϕ ——磁场中的磁通量；
 i ——载流导体中的电流；
 c ——比例系数。

运行中的电度表，其转盘所以能转动，就是因为受到某种电磁力形成的驱动力矩作用。即转盘是个导体，其上有电流通过，在磁场作用下受到力矩作用而转动。那么穿过转盘的磁通有哪些？转盘上的电流是如何产生的？

1. 穿过转盘的磁通

电压线圈2加上电压 u 时，线圈中有电流 i_u 通过，产生了磁通 ϕ_{xu} 。它又可以分成两

部分:

1) 磁通 ϕ_{UF} , 它通过的路径是:

中心柱→上磁轭→两边柱
↑——下磁轭——↓

还有一部分是经过空气隙而闭合的漏磁通。

2) 磁通 ϕ_U , 它通过的路径是:

中心柱→上磁轭→两边柱→回磁极
↑——气隙←转盘←气隙←↓

由磁路欧姆定律得知, 磁路中的磁通与外加磁动势 F 成正比, 与磁路中的磁阻成反比。即

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-3)$$

式中 F —— 磁动势;

R_m —— 磁阻。

气隙的磁阻大, 铁芯的磁阻小, 因此磁通 ϕ_{UF} 约大于磁通 ϕ_U 3 ~ 6 倍。

从上面磁通通过的路径分析中得到: 磁通 ϕ_U 是穿过转盘的, 称为电压工作磁通。磁通 ϕ_{UF} 不穿过转盘, 称为电压非工作磁通。

当负载电流 i 通过电流线圈4时, 产生了磁通 ϕ_{IF} 。它也可以分为两部分:

1) 磁通 ϕ_I , 它通过的路径是:

电流铁芯→气隙→转盘→气隙→电压铁芯
↑——气隙←转盘←气隙←——↓

2) 磁通 ϕ_{IF} , 它通过的路径一部分是沿电流铁芯、回磁极到电流铁芯另一边柱构成回路; 另一部分是电流线圈的漏磁通。

同理, 穿过转盘的磁通 ϕ_I 称为电流工作磁通, 而磁通 ϕ_{IF} 称为电流非工作磁通。

上述的磁通路径和分布情况见图1-9。

从图1-9看出, 电压工作磁通 ϕ_U 一次穿过转盘, 电流工作磁通从不同位置两次穿过转盘构成回路, 对转盘而言, 相当于有大小相等方向相反的两个电流工作磁通 ϕ_I 和 ϕ'_I 穿过转盘。因而构成“三磁通”型感应式电度表, 如图1-10所示的三个磁板 A_1 、 A_2 和 A_3 (按图1-9设置的正方向下确定的极性)。

交变的工作磁通 ϕ_I 、 ϕ'_I 和 ϕ_U 穿过转盘时, 各工作磁通产生相应的滞后 90° 的感应电势 e_{pI} 、 $e_{pI'}$ 和 e_{pU} 以及感应电流 i_{pI} 、 $i_{pI'}$ 和 i_{pU} 。

2. 移进磁场

假设: ①电压铁芯和电流铁芯工作在不饱和状态, 则在正弦交流电压和电流作用下, 各磁通也按正弦规律变化;

②忽略电流磁通回路中的损耗, 则电流磁通 Φ_I 与负荷电流 $\dot{I}$ 同相位;

③电压线圈的感抗很大, 电压工作磁通 Φ_U 滞后电压 $\dot{U}$ 约 90° ;

④负荷呈感性, 其功率因数角为 φ 。

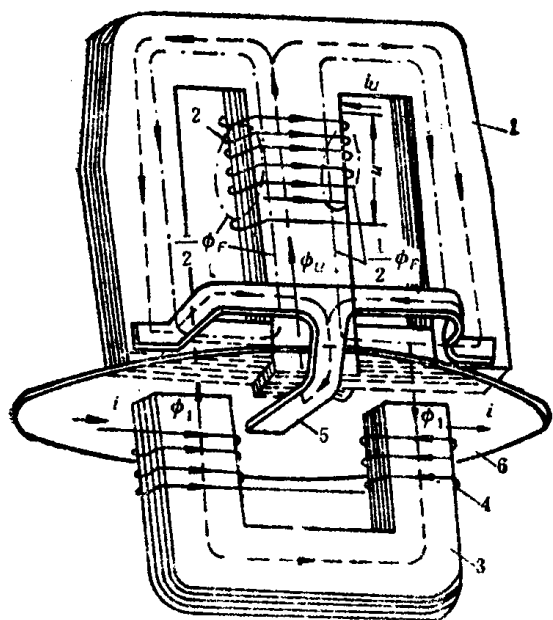


图 1-9 电度表内各磁通分布情况
1—电压铁芯；2—电压线圈；3—电流铁芯；4—电
流线圈；5—回磁极；6—转盘

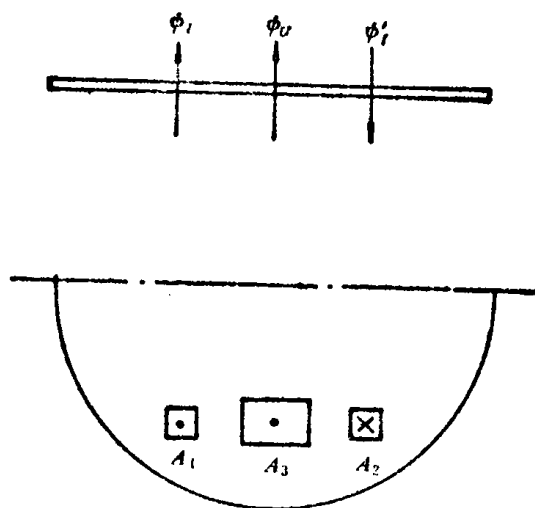


图 1-10 三磁通型电度表的磁极分布

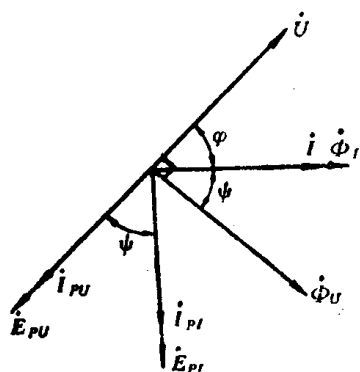


图 1-11 磁通和感应电势、感应电流相量图

以电流工作磁通 ϕ_I 为参考相量，各工作磁通及其在转盘内的感应电流间的相位关系如图1-11所示。他们的瞬时值为

$$\phi_I = \Phi_I \sin \omega t \quad (1-4)$$

$$\phi'_I = \Phi_I \sin(\omega t - 180^\circ) \quad (1-5)$$

$$\phi_U = \Phi_U \sin(\omega t - \psi) \quad (1-6)$$

$$i_{PI} = \sqrt{2} I_{PI} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-7)$$

$$i'_{PI} = \sqrt{2} I_{PI} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1-8)$$

$$i_{PU} = \sqrt{2} I_{PU} \sin(\omega t - 90^\circ - \psi) \quad (1-9)$$

式中 ϕ_I 、 ϕ'_I 和 ϕ_U ——电流和电压工作磁通的瞬时值；

Φ_I 、 Φ_U ——电流和电压工作磁通的最大值；

ψ ——电流工作磁通超前电压工作磁通的相位角；

i_{PI} 、 i'_{PI} 和 i_{PU} ——感应电流的瞬时值；

I_{PI} 、 I'_{PI} 和 I_{PU} ——感应电流的有效值。

根据式(1-4)至(1-6)可画出各工作磁通随时间变化的关系曲线，如图1-12(a)所示。

由于 ϕ_I 、 ϕ'_I ($= -\phi_I$) 和 ϕ_U 都是交变的，所以穿过转盘的各磁通大小和极性，对 t_1 至 t_2 各瞬时来说，将如图1-12(b)所示。

图上方块表示对应于各磁通在 t_1 至 t_2 各瞬时穿过转盘的分布情况，其大小表示各磁通瞬时值的大小。由此可见，穿过转盘的磁通最大值从磁极 A_1 向磁极 A_2 逐渐移进。也就是说，在一个周期内，它经过所有三个磁极的下面，这样就形成了移进磁场。移进磁场在转盘内感应出电流，并带引转盘向磁场移进方向移动，即从相位超前的磁通位置（图中 ϕ_I ）

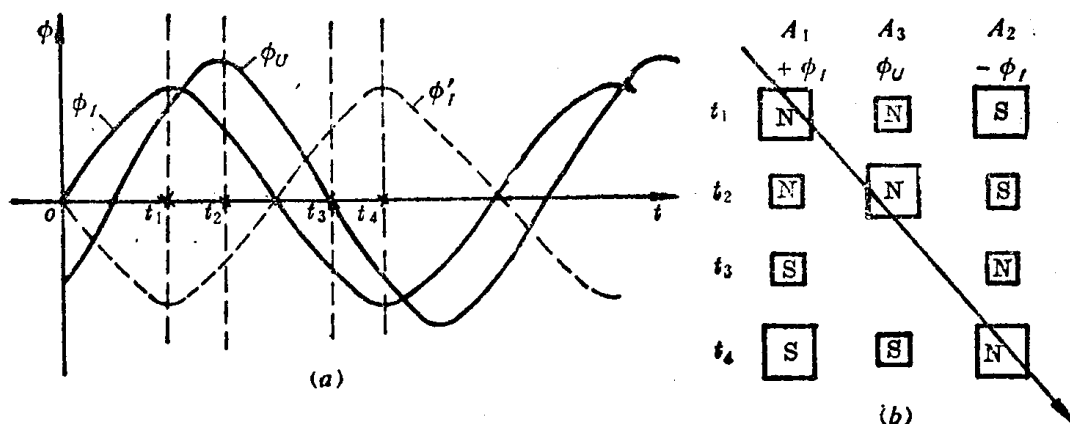


图 1-12 工作磁通波形图及移进磁场的形成
(a) 波形图; (b) 移进磁场

移向相位滞后的磁通 (图中 ϕ_U) 位置。

3. 驱动力矩 M_q

图1-13画出了在已设置的正方向情况下, 磁通 ϕ_I 、 ϕ'_I 和 ϕ_U 穿过转盘时的极性, 并在转盘产生的感应电流 i_{PI} 和 i_{PU} 。为分析方便, 规定磁通自上而下穿过转盘时为符号 “ $\times$ ”, 各感应电流方向按右手螺旋法则确定。

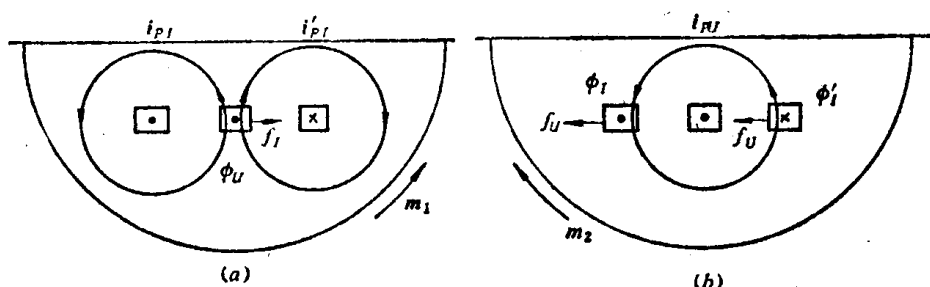


图 1-13 转盘内磁通和感应电流示意图

磁通 ϕ_I 和 ϕ'_I 在转盘内产生的感应电流 i_{PI} 和 i'_{PI} , 它与电压磁通 ϕ_U 相互交链形成向右方向的电磁力 f_I , 如图1-13(a)所示; 磁通 ϕ_U 在转盘内产生感应电流 i_{PU} , 它与电流磁通 ϕ_I 和 ϕ'_I 相互交链形成向左方向的电磁力 f_U , 如图1-13(b)所示。电磁力与其作用力臂的乘积, 就是使转盘转动的驱动力矩。

驱动力矩的瞬时值 m 的一般表达式为

$$m = c_p \phi_p i_p \quad (1-10)$$

式中 ϕ_p ——穿过转盘磁通的瞬时值;

i_p ——转盘上的感应电流瞬时值;

c_p ——比例系数。

由于转盘的转动惯量较大, 因此转盘的转动方向决定于瞬时转矩在一个周期内的平均

值。即

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt$$

若 $\phi_p = \Phi_p \sin \omega t$, $i_p = I_{pm} \sin(\omega t - \theta)$, 则

$$M = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{pm} \Phi_p \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \theta) d\omega t = K I_p \Phi_p \cos \theta \quad (1-11)$$

式中 θ —— 电流 i_p 和磁通 ϕ_p 之间的相位差。

由图1-13中可看出, 作用在转盘上的瞬时力矩有 2 个, 即

$$m_1 = c_1 i_{pI} \phi_U$$

$$m_2 = c_2 i_{pU} \phi_I$$

从相量图1-11中得到, 感应电流 i_{pI} 与电压工作磁通 ϕ_U 之间的相位差为 φ 角; 感应电流 i_{pU} 与电流工作磁通 ϕ_I 之间的相位差为 $(90^\circ + \psi)$ 角, 因此一个周期内的平均转矩值, 根据公式 (1-11) 可得到

$$M_1 = K_1 I_{pI} \Phi_U \cos \varphi = K_1 I_{pI} \Phi_U \sin \psi \quad (1-12)$$

$$M_2 = K_2 I_{pU} \Phi_I \cos(90^\circ + \psi) = -K_2 I_{pU} \Phi_I \sin \psi \quad (1-13)$$

作用在转盘上的总力矩为两力矩之差。设总力矩即驱动力矩 M_Q 使转盘沿逆时针方向旋转, 则与 M_Q 方向一致的力矩 M_1 取为正, 与 M_Q 方向相反的力矩 M_2 取为负, 得到

$$M_Q = M_1 - M_2 = K_1 I_{pI} \Phi_U \sin \psi + K_2 I_{pU} \Phi_I \sin \psi \quad (1-14)$$

因为感应电流 $I_{pI} \propto \Phi_I$, $I_{pU} \propto \Phi_U$, 所以驱动力矩

$$M_Q = K \Phi_I \Phi_U \sin \psi \quad (1-15)$$

式中 ψ —— 电流磁通 Φ_{Im} 超前电压磁通 Φ_U 的相位角;

K —— 系数, 与铁芯的尺寸、转盘的尺寸以及它们之间的相对位置等因素有关。

公式 (1-15) 是感应式电度表驱动力矩的基本公式。它表明: 电度表的驱动力矩与穿过转盘的两个磁通以及它们之间相位差的正弦的乘积成正比。

4. 驱动力矩和负载功率的关系

若忽略电压线圈中的阻抗压降, 则加在电压线圈上的电压 U 与电压线圈中的感应电势 E 相平衡, 即 $U \approx E = 4.44 \Phi_{xU} w_U f$, 因为电压工作磁通 ϕ_U 是总磁通 ϕ_{xU} 的一部分, 因此可近似地认为

$$U \approx 4.44 \Phi_U w_U f \quad (1-16)$$

式中 w_U —— 电压线圈匝数;

f —— 交流电源的频率;

Φ_U —— 电压工作磁通。

在一定的电压线圈匝数和一定的电源频率下, 电压工作磁通大致与外加电压成正比

$$\Phi_U \propto U \quad (1-17)$$

根据磁路欧姆定律, 流经电流线圈的负荷电流 I 和电流工作磁通 Φ_I 的关系为

$$\Phi_I = \frac{\sqrt{2} I w_I}{R_m}$$