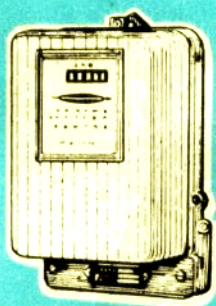


华东电网供用电培训教材

电度计量学讲义

上海供电局表计工场编



华东电业管理局供用电处

前 言

《电度计量学》讲义一书，系我场在 1977 年为从事电度计量职工专业培训而编写的。本书着重介绍了上海的计量情况和一些点滴经验。1983 年重新作了补充修改。由于近几年有关计量规程不断修订和提高，这次我们虽作了相应修正，但还有不够完善之处，再加上编写人员的水平有限，缺点和错误在所难免，望读者批评指正。

上海供电局表计工场

目 录

引 言

第一章 感应系电度表的结构和基本工作原理·····	1
第一节 电度表的种类·····	1
第二节 电度表的一般结构·····	2
第三节 电度表转动原理·····	12
第四节 转动力矩与制动力矩·····	18
第五节 电度表矢量图·····	21
第六节 相角补偿·····	22
第七节 摩擦力补偿·····	24
第八节 潜动的制止·····	26
第九节 负荷特性·····	27
第十节 灵敏度·····	31
第二章 外界因素对电度表的影响·····	33
第一节 温度影响·····	33
第二节 频率影响·····	37
第三节 电压影响·····	37
第四节 倾斜影响·····	39
第五节 自热影响·····	40
第六节 波形影响·····	41
第三章 三相电度表的特性·····	44
第一节 三相电度表的结构和特性·····	44
第二节 不平衡负荷影响·····	47
第三节 相序影响·····	48

第四章 无功电度表的结构	50
第一节 单相无功电度表	50
第二节 三相四线无功电度表	54
第三节 三相三线无功电度表	57
第四节 相序对无功电度表转动方向的影响	62
第五节 用对称分量法分析三相电路中无功电量的 测量误差	64
第五章 特种电度表概述	98
第一节 最高需量电度表	98
第二节 标准电度表	102
第三节 直流电度表	107
第四节 损耗电度表	110
第六章 电度计量方式	116
第一节 有功电度计量方式	116
第二节 无功电度计量方式	124
第三节 高供低量变压器损耗的计量	130
第四节 损耗电度表的计量	134
第七章 电度表试验设备	137
第一节 校验台主要部件	137
第二节 校验台用仪器仪表	151
第三节 单相校验台	153
第四节 三相校验台	158
第五节 标准电度表校验装置	163
第六节 长走试验台	165
第七节 耐压试验器	166
第八节 校验设备的验收试验	167
第八章 电度表的调整、校验、维修及型式试验	192

第一节	电度表的调整与校验	192
第二节	电度表的维修	207
第三节	电度表的型式试验	213
第九章	仪用互感器	238
第一节	仪用互感器的结构与工作原理	238
第二节	仪用互感器的误差与准确等级	244
第三节	仪用互感器的正确使用	249
第四节	仪用互感器有关试验项目	250
第十章	电度表及互感器的按装	
	要求与错接线检查	257
第一节	电度表及互感器的按装要求	257
第二节	现场校表	260
第三节	电度表的接线检查	263
第四节	追补电费的计算方法	272
第十一章	电度计量中仪用互感器的	
	综合误差计算方法	281
第一节	仪用互感器的综合误差计算	281
第二节	用计算尺改制计算互感器综合误差	310
第三节	用CASIO“fx-2700P”计算器计算 互感器综合误差	314
第四节	用TEXAS“TI-59”型可编程序计算器 计算互感器综合误差	317
第五节	电压互感器相电压比角差换算成 线电压比角差	330
附件: 水利电力部《电能计量装置管理规程》(试行)		
华东电业管理局《关于整顿计费电度计量装置管理工作的 若干意见》		

引 言

发电场所生产的交流电能，经输配电设备送达用户处。发电场所发出的电能(发电量)、为了生产这些电能，电厂本身也要消耗一部分电能(厂用电)、在输变电过程中，在线路与升降压变压器中将损失一部分电能(线损)、以及由用户所耗用的电能(售电量)，这许多电量都依靠按装电度表来计量。所以电度表的应用是极为广泛的，是电工测量仪表中为数最多的电表之一。因此，电度表已成为在工农业生产和日常生活中所不可缺少的组成部份，是国民经济中准确完成各项经济指标如发电量，厂用电率，线损率，售电量，产品单耗等的主要依据；是加强企业管理，实行经济核算必不可少的计量手段。研究电度表的性能，正确使用和维护，准确计量并不断改进，是电度计量工作者应尽的职责。

第一章 感应系电度表的结构 和基本工作原理

第一节 电度表的种类

交流感应系电度表按用途的不同，可以分为有功电度表、无功电度表和特种电度表三大类。有功电度表计量电能的有功部

份即视在功率的有功分量和时间的乘积。无功电度表则计量视在功率的无功分量和时间的乘积。这二类电度表又分为单相的和三相的二种。特种电度表如带有最高需量指示器，用来计量用户一个月內最大平均(15 分钟內)负荷的最高需量电度表。准确级特别高(0.5 级)，计数机构能返零的，用来作校验一般电度表标准的标准电度表，以及根据电度表原理，制成专门计量某种电量的表计，如计量线路损耗的线损表，计量变压器损耗的铜损表、铁损表等。

电度表不同于其他电气仪表之处是专门用于测量电能，属于累积式仪表，其测量结果是在某一段时间內，电路里所通过的电能的总和，可以用下面公式来表示：

$$P = \xi \cdot W \cdot T$$

式中：P 为电能，单位千瓦一小时，俗称“度”；

W 为功率，单位是千瓦；

T 为时间，单位是小时。

例如某台发电机的负荷为 125,000 千瓦，如果负荷是恒定的则一小时所发的电度为：125,000 × 1 = 125,000 千瓦一小时，可以用瓦特表和时钟的指示，及它们的乘积来计算电能。但是，在极大多数情况下，负荷不可能恒定不变，用计算的方法计量电能显然不切合实际，而且瓦特表和时钟的示数又不能保存下来，积算式电度表的设计和使用为电能的计量创造了良好的条件。

第二节 电度表的一般结构

单相有功电度表是感应系三磁通型的积算式电工测量仪表，它是由电磁元件、永久磁钢、转动机构及上下轴承、记度器、

支架、底座、表盖、端钮盒，出线罩等部件组成。现分述如下：

1. 电磁元件 包括电压元件和电流元件两部分，它们是产生电度表转动力矩的部件，因此又称驱动元件。电磁元件由磁导体即铁芯和线圈组成。对于铁芯材料，要求有高的导磁率，剩余磁感应小，由于铁芯要通过交变磁通，所以又要求涡流损失小。因此铁芯通常由薄的硅钢片叠制而成。常用的硅钢片含硅4%，厚度0.35~0.5毫米。

电压元件是用细的绝缘铜线绕成匝数极多的电压线圈，套于具有极小气隙的铁芯上而成，如图1—1(a)所示。电压线圈并接于线路全电压下，所以又称并联线圈。它具有很大的感抗，以致由它所产生的电压磁通几乎滞后于所加的电压 90° ，如图1—1(b)向量图所示。

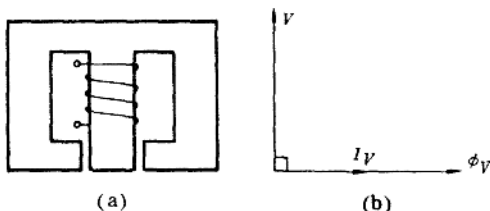
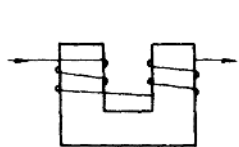
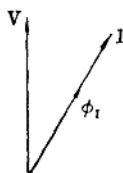


图 1—1

一般2.0级额定电压为220V的单相电度表，电压线圈的匝数通常为6500~12000匝，线径为0.1~0.15毫米，功率损耗0.5~1.2瓦。电压元件的功率损耗应力求减小，因为它常年并接于线路，成年累月地消耗着电能，以每具电度表电压元件功率损耗为1瓦计算，上海地区供电系统装有电度表50万具，消耗功率达500瓩，每小时耗电500度，一年耗电量可达 $500 \times 24 \times 360 = 4320,000$ 度。如果加上工业企业所装技术计量用电度表，以及居民用户为分担电费而装的分表，则耗电量就极为可观



a 图 1—2



b

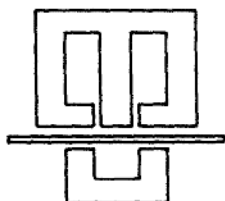


图 1—3

的了。

电流元件是在电流铁芯上用粗的绝缘铜线绕成匝数不多的电流线圈而成，如图 1—2(a)所示。线圈串连接于线路上，故又称串联线圈。由于线圈匝数不多，铁芯又不闭合，因此电感量很小，所产生的电流磁通基本上与流经线圈的电流同相，如图 1—2(b)向量图所示。电流线圈绕制的方向，必须如图 1—2 所示那样，使左柱的磁通如由下往上时，则右柱的磁通方向必须由上往下，也即两柱上线圈绕制的方向相反。这样两柱上所产生的磁通是同方向叠加的，否则两磁通异方向相减，不能产生转动力矩。

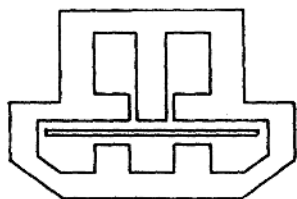


图 1—4

电流线圈的安匝数，一般取 60~150 安匝，即标定电流为 5 A 的电度表，其电流线圈的匝数为 12—30 匝。

现代电度表电磁元件铁芯形状大致可以分成三种，一种是电压铁芯与电流铁芯各自分开的，称做分离式铁芯，如图 1—3 所示。一种是电压铁芯与电流铁芯组装在一起，或者由整块硅钢片冲成为图 1—4 所示，称作封闭式铁芯。另一种则是电

压铁芯与电流铁芯合在一起,但需另设回磁铁板构成磁间隙,使铝转盘在其中运动,如图1—5所示。这三种铁芯各有其优缺点:分离铁芯材料消耗量较少,制造工艺较简单,但电气特性重合性较差。封闭式铁芯有较好的负荷特性曲线,重合性好,轻负载特性较好,但材料消耗量较大,线圈绕制与装配较困难。第三种铁芯线圈的装配也较困难,但材料消耗量则较省,多现之于老式电度表,现代电度表很少采用。

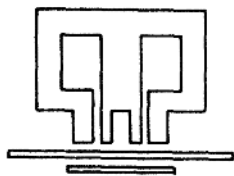


图 1—5

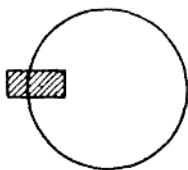


图 1—6(a)

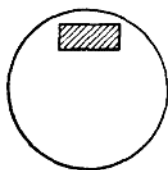


图 1—6(b)

从铁芯装置的位置言,有辐射式和正切式两种,辐射式是电磁元件顺圆盘的半径方向放置,如图1—6(a)某些老式进口表如 AEG 制 J 型表属于这一类。正切式是电磁元件垂直于圆盘半径方向平面放置,如图1—6(b)极大多数表如上海五表厂 DD17 型表等属于这一类。

2. 转动机构及上下轴承,转动机构由铝质转盘及其竖轴组成,转盘材料要求导电性能良好,重量轻,耐腐蚀,铝最为符合要求。作为转盘材料的铝的纯度为 99.3%,加工时注意表面须平整,不可有铁粉杂质混入,热处理时应掌握温度,使转盘有适当硬度,过高的热处理温度能使转盘变软,稍一碰击,即变形不平。转盘直径通常为 80~100 毫米,厚度为 0.5~1.2 毫米,重量 20 克上下,转盘上印有计算转盘转数的标记,有些电度表的转盘上打有对称的二个小孔,位置在电磁铁之下,直径约 1 毫米左右,用

来防止电度表无负载时的潜动现象。有些转盘在电磁铁位置的内侧打有3—4个大孔,主要用来减轻转盘的重量。有些转盘的边缘印有100分格,便于作同步校验估算误差之用。有些转盘的边缘印有100以至400多等分格,或铣成等分缺槽,以使用频闪法来校验电度表。有些转盘的下面涂有重质涂料,用来纠正转盘机械不平衡。热带、湿热带、使用的电度表,转盘往往氧化处理,以增强抗腐蚀性能,有些转盘由数片薄铝片叠粘而成,每片刻有径向缺槽数条,叠粘时缺槽上下交叉,这种转盘主要用于单转盘三相电度表,以减小电源相序的影响。

竖轴用合金铝,铜质或钢质棒材制成。转轴上部由针形上轴承支持,下部由镶有滚珠轴承转动于人造宝石的轴座上,其下有缓冲弹簧。在转轴中部套有蜗杆,以便与记度器的齿轮衔接,使转盘转过的转数,积算于记度器上,经齿轮比的配合,显示所测量的电能量于字盘上。有些电度表的转轴上附有小铁片或钢丝针,使与电压铁芯上伸出的磁化舌片相互作用,起防止电度表潜动的作用。

电度表的转动机构及上、下轴承如图1—7所示。电度表的轴承分为上、下两部分,上轴承主要起导向作用,下轴承主要起支持转动部分重量作用。下轴承的型式有针形轴针转动于宝石上如图1—7(a),有滚珠轴承转动于宝石上的(单宝石型)如图1—7(b),或是宝石转动于滚珠上的如图1—7(c),或是滚珠位于上下宝石之间的(双宝石型)如图1—7(d)。除严寒地区外,一般上下轴承都注有润滑油。

虽然铝转盘的重量轻,由于下轴承接触面很小,相对来讲,压力是很大的,因此钢珠与宝石易于磨损影响电度表的性能和使用寿命,近年来逐渐发展磁推轴承如图1—7(e)所示,使转盘浮悬于下轴承上,以降低压力,延长轴承使用寿命,

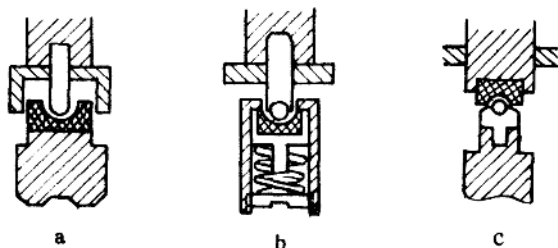


图 1—7

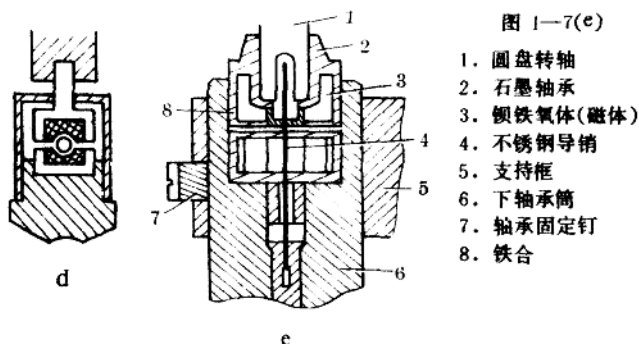


图 1—7(e)

1. 圆盘转轴
2. 石墨轴承
3. 钕铁氧体(磁体)
4. 不锈钢导销
5. 支持框
6. 下轴承筒
7. 轴承固定钉
8. 铁合

3. 永久磁钢：永久磁钢是用硬磁材料制成，作用于运动着的铝转盘，使之产生制动力矩，所以又称制动元件。制动现象可以从下述例子来观察：无原动力的重垂摆加力一次可以在空气中往复摆动很长时间，如果使它摆于一个恒定的磁场中，则很快便会停下来。这是因为运动着的摆切割磁通，在摆中产生了涡流，涡流与磁场起作用，产生与运动方向相反的反作用力矩所致。

永久磁钢品质的好坏，可以从剩磁感应和矫顽磁力两个特

性来衡量。磁钢是用硬磁材料经人工充磁而成。它有较宽大的磁滞曲线，如图 1—8 所示，图中 OABC 为磁化曲线当磁感应到

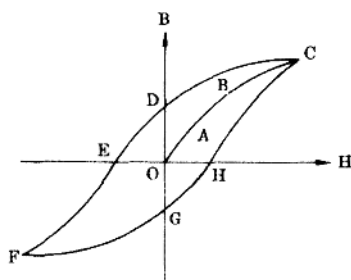


图 1—8

达 C 点后，磁场强度 H 减低时，磁感应不依原来曲线 OC 而以曲线 CD 降低，当磁场强度降低到零时，硬磁性材料尚有剩余磁感应 OD，我们要求这个数值有足够大的量。假使要去除这个磁感应，必须加以相反方向的

磁场，其强度达到 OE 时，磁感应才为零。DE 称为去磁曲线，OE 则称为矫顽磁力。我们要求这个数值也有相当大的量。

电度表早期使用的磁钢是含钨 6% 的碳素钢，矫顽磁力为 70 奥斯特，剩余磁感应为 10300 高斯。后来使用含铬 3.5% 的碳素钢，矫顽磁力与钨钢差不多，但价格较廉。之后曾制造含钴 36% 的永久磁钢，矫顽磁力可增大 2 倍达 210 奥斯特，惜乎钴为稀有金属，代价昂贵。近年来制造铝镍钴磁钢，性能大有提高，已被普遍采用。表 1—1 示数种硬磁材料的主要性能：

表 1—1

材 料	成 分	矫顽磁力	剩 磁
钨 钢	W 6% C 1% Fe 93%	70 奥斯特	10300 高斯
铬 钢	Cr 3.5 C 1 Fe 95.5	65	9000
钴 钢	Co 36 W 3 C 1 Cr 3.5 Fe 56.5	210	9000
铝镍钴 II	Co 12.5 Al 10 Ni 17 Cu 6 Fe 54.5	540	7200
铝镍钴 V	Co 24 Al 8 Ni 14 Cu 3 Fe 51	575	12000

永久磁钢的型式分单磁通的和双磁通的二种。单磁通型磁钢的形状多为C形，磁极间间隙很小，磁通一次穿过铝转盘，这种磁钢为50年代前所生产的电度表所采用。双磁通型磁钢形状为U形，磁极间距离较大，磁间隙另用回磁铁板形成，所以磁通二次穿过铝转盘，二次所产生的涡流是相加的，因此制动力矩大为增加，且便于装磁分路，近年来所生产的电度表大都采用双磁通型磁钢。磁钢与铁器碰击要发生衰退，工作中应避免撞击，清除磁间隙中铁屑杂物，要用非磁性工具，如鸭毛，纸片等。

4. 记度器 记度器是用来积算电能的，它的第一个齿轮与转盘竖轴上的蜗杆啮合，转盘每转过一转，齿轮便转过一牙，记度器便累记了一段时间内转盘所转过的全部转数，显示单位是千瓦时，记度器有三种型式，第一种是滚轮式，如图1—9所示，第二种是指针式，如图1—10所示，第三种是字盘式，其结构大

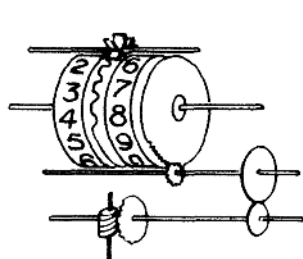


图 1—9

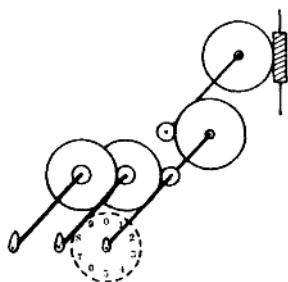


图 1—10

体与指针式相似，不过用字盘代替指针显示于小窗口。滚轮式记度器抄读非常便利，外观漂亮，缺点是摩擦力不均匀，尤其是数个滚轮同时翻字时摩擦力较大，影响表速误差，制造不良的产品容易轧煞，造成电度表停转。指针式记度器摩擦力均匀，结构

简单，很少卡字现象，但抄读不易，为其主要缺点。字盘式记度器无特殊优点，除见之于很老式的电度表外，现时都不采用。

记度器的摩擦力主要产生于齿轮与齿轮间的搭牙处，齿轮轴与夹板支持处，和第1只齿轮与蜗杆连接处，后者的摩擦力占全部摩擦力的比例最大。图1—11示滚轮式记度器各部分摩擦力分布情况。

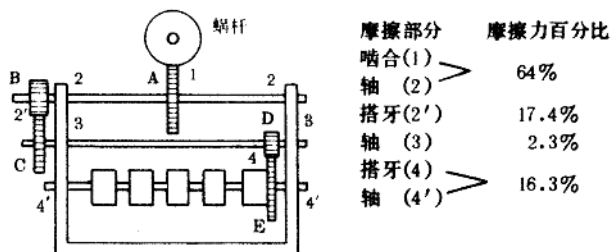


图 1—11

为了降低蜗杆与记度器啮合处的摩擦力，现时制造的蜗杆长度尽量缩短，仅存一二牙，以减少接触面积。

记度器读数的乘率，一般不标的为乘1，小容量电度表大都带有小数指针或窗口，大容量电度表或与仪用互感器联用的电度表，记度器字面上常有×10，×100等乘率，检修时不可除去。

记度器的齿轮比必须与电度表的常数或每千瓦时的盘转数相配合，例如图1—11第1字轮为小数，齿轮A为60牙，B为10牙，C为100牙，D为15牙，E为60牙，当第1字轮转一整圈，即第2字轮显示1千瓦时时，齿轮A对蜗杆讲来转过的齿为：

$$\frac{E}{D} \times \frac{C}{B} \times A = \frac{60}{15} \times \frac{100}{10} \times 60 = 2400$$

即记度器每千瓦时为 2400 转, 必须把它装于每千瓦时为 2400 转的电度表上, 否则要造成计量错误。

5. 支架 支架用于组装电磁元件, 转动部件及上下轴承, 永久磁钢与记度器等部件之用。常用的有两种类型, 一种是与底座可分离的如 LG-CGI, 和成 S-1 型等; 另一种是利用底座本身作为支架之用, 如 GE I-16, FC, 型等, 但另加底盖。从维护的角度来看, 要求各部件安装后, 易于检查部件位置是否恰当, 间隙是否平整, 表内是否藏有铁屑杂物, 并易于清除之。从特性稳定性来看, 要求支架有足够强度, 不因盖表壳旋动螺丝而使支架有变形之虞。

6. 表盖与底座 可以用绝缘材料或金属材料制成, 要求密封严密, 防止灰尘与潮气侵入, 具有能观察表盘转动, 和抄读记度器读数的窗口, 表盖螺丝应能加铅封。

7. 端钮盒与出线罩 端钮盒用于表内外导线的连接, 接线方式一进一出和二进二出两种, 前者每二孔等电位, 从绝缘角度来讲, 较易制造, 端钮盒的外部有出线罩, 以便于电度表安装后盖住有电部分及安装螺丝, 并加封印, 防止用户擅自开启影响计量, 危及安全。

8. 铭牌 电度表的铭牌钉于表盖上, 或者附属于记度器字面上。它应载明制造厂名, 表型, 标定电流、额定电压、额定频率、相数线别、准确等级, 以及每千瓦时的盘转数。根据铭牌的数据, 才可以进行准确校验与安装使用。电度表转数的表示法, 一般有三种: 第 1 种即标明每千瓦时等于多少盘转数; 第 2 种标明表盘每转一转等于多少瓦时, 称为电度表常数; 第 3 种用每分钟多少转等于多少瓦来表示。这三种表示法实质上是一样的, 可以彼此间相互换算, 例如:

(1) 已知每千瓦时 $R=2500$ 转, 那末每转的瓦时数为:

$$\frac{1000}{2500}=0.4 \text{ 瓦时} \quad \text{公式} \quad \text{常数} K = \frac{1000}{\text{每千瓦时转数}} = \frac{1000}{R}$$

1000 瓦每分钟转的转数为:

$$\frac{2500}{60}=41.66 \text{ 转} \quad \text{公式} \quad \text{转数} = \frac{R}{60} = \frac{R \times \text{瓦}}{1000 \times 60}$$

(2) 已知常数 $K=0.4$ 瓦时, 那末每千瓦时的转数为:

$$\frac{1000}{0.4}=2500 \text{ 转} \quad \text{公式} \quad R = \frac{1000}{K}$$

1000 瓦每分钟转的转数为:

$$\frac{1000}{60 \times 0.4}=41.66 \text{ 转} \quad \text{公式: 转数} = \frac{1000}{60 \times K} = \frac{\text{瓦}}{60K}$$

(3) 已知 1000 瓦每分钟 $=41.66$ 转, 则每千瓦时的转数为:

$$41.66 \times 60 = 2500 \text{ 转} \quad \text{公式: } R = \frac{1000 \times 60 \times \text{转数}}{1000}$$

每转常数为:

$$\frac{1000}{60 \times 41.66}=0.4 \quad \text{公式} \quad K = \frac{\text{瓦}}{60 \times \text{转数}}$$

第三节 电度表转动原理

感应式电度表的转动力矩是由电磁元件所产生。设线路电压为 V , 电压线圈内的电流为 I_v , 它滞后于 V 90° , I_v 所产生的磁通 ϕ_v 与 I_v 同相。磁通 ϕ_v 穿过铝转盘在其内感应一电势 e_v , 滞后于 ϕ_v 90° 。由电势 e_v 产生涡流 i_v , 与 e_v 同相, 如图 1-12 (a) 所示。又电流线圈内的负荷电流为 I , I 产生磁通 ϕ_i , 在负荷力率为 1.0 时, 电流及由它所产生的磁通 ϕ_i 与电压 V 同相,