

电度表设计、 制造及其应用

胡文彬 方吉六 张联宗 王颂嘉 编著

33.4

机械工业出版社

电度表是计量电能的重要手段，它对节约电能关系极大。

本书对感应式电度表的原理、结构、产品设计、制造工艺、误差分析和运行检验等方面作了较全面系统地介绍，其中以产品设计和误差分析论述得较为深入，对特种电度表与电子式电度表也作了简要介绍。

本书主要读者对象为从事电度表设计、生产、使用和维修的技术人员，也可供大专院校有关专业的师生参考。

电度表设计、制造及其应用

胡文彬 方吉六 张联宗 王颂嘉 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $13 \frac{1}{2}$ ·字数 298 千字

1984 年 3 月北京第一版·1984 年 3 月北京第一次印刷

印数 00,001—13,500·定价 1.70 元

*

统一书号：15033·5384

前 言

电度表是电磁测量仪表中的一个大类。

目前，世界各国所生产的交流电度表，几乎都是采用感应式原理，这是因为感应式电度表具有性能稳定，调整简单，维修方便，成本低廉，适于大量生产等优点。电子式电度表虽已有产品问世，但由于其综合技术经济指标仍不如感应式电度表，一时还难于推广。

随着电力工业的发展，特别是最近号召要节约能源，为之服务的电度表产量也增加很快，从事电度表设计、生产、使用和维修的人员，也日益增多，《电度表设计制造及其应用》一书，就是为适应这种形势而编写的。

本书对感应式电度表的原理、结构、产品、设计，制造工艺，误差分析和运行检验等方面作了较全面的介绍，其中以产品设计和误差分析论述较深入，对于特种电度表、电子式电度表也作了简要介绍。

本书由胡文彬主编，具体分工是：胡文彬编写第一章、第二章、第三章、第四章、第六章和第八章；方吉六编写第五章；张联宗编写第七章；王颂嘉编写第九章。谭祖根、黄力元、黄寿海、钱永年、钟克强、程玉林、易铁金、周本勉、黄建玲等审阅了书稿，提出了不少宝贵意见和建议。全稿最后由王镒校订和整理。编者对此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不少缺点和错误，诚恳地希望读者批评指正。

编者

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 电能的计量与电度表	1
第二节 电度表的种类	2
第三节 电度表的结构与原理	3
第四节 电度表的主要技术经济要求	12
第二章 感应式单相电度表	13
第一节 交流电路中的功率和电能	14
第二节 磁路及其等效电路	15
第三节 带铁芯的线圈的向量图	20
第四节 感应式电度表的驱动元件	23
第五节 串联电路	31
第六节 并联电路	32
第七节 电度表的总向量图	34
第八节 驱动力矩和制动力矩	36
第九节 电度表的附加力矩	42
第十节 电度表内相角的调节方法	48
第十一节 电度表的负载曲线	52
第十二节 电度表特性随相位角 φ 的变化	59
第十三节 电度表的过负载补偿	61
第十四节 电度表的设计要求及品质系数	63
第三章 感应式三相电度表	66
第一节 三相电路的基本性质	66
第二节 感应式三相电度表的作用原理和结构	73
第三节 三相四线电度表	79

第四节	三相无功电度表	86
第五节	三相电度表中元件的合理配置及元件间的电磁干扰	101
第四章	外界因素对电度表的影响	115
第一节	电压变化的影响	115
第二节	频率变化的影响	125
第三节	温度变化的影响	135
第四节	波形变化的影响	153
第五章	感应式电度表的设计和计算	157
第一节	概述	157
第二节	测量机构元件的选择	159
第三节	磁路的复磁阻计算	160
第四节	气隙磁阻的计算	167
第五节	驱动力矩的计算	174
第六节	制动力矩的计算	184
第七节	计算举例	189
第八节	计度器的计算	240
第六章	电度表主要零部件的结构及制造工艺	244
第一节	驱动元件	244
第二节	底壳、支架和罩壳	248
第三节	线圈	254
第四节	可动部分	258
第五节	计度器	262
第六节	可动部分的轴承	268
第七节	永久磁钢	278
第八节	调整装置	282
第九节	端钮盒	292
第十节	零部件的表面处理工艺	293
第七章	感应式电度表的运行与检验	299
第一节	概论	299

VI

第二节	电度表的接线	300
第三节	调整装置的作用	305
第四节	校验方法	306
第五节	三相有功电度表的校验调整步骤	317
第六节	三相无功电度表的校验	324
第七节	电度表产生误差的原因	329
第八节	三相电度表在运行中接线错误的判断方法	331
第九节	校验电度表用的电源及仪表	335
第十节	电度表的试验	337
第八章	特种电度表	342
第一节	标准电度表	342
第二节	最高需量电度表	359
第三节	直流电度表	370
第四节	双费率电度表	379
第五节	损耗电度表	381
第九章	电子式电度表	386
第一节	概述	386
第二节	输入级	389
第三节	乘法器	392
第四节	电压-频率转换器	407
第五节	分频器	413
第六节	计数器	414
附录		417
附录一	双磁极结构的感应式仪表的驱动力矩	417
附录二	下轴承摩擦力矩的计算公式	423

第一章 绪 论

第一节 电能的计量与电度表

发电量和用电量是以电能作为衡量标准的。因此，电能的计量已涉及到工农业生产以及日常生活中的各个方面。电力工业部门要做到有计划生产，要进行经济核算，要多发电，并减少供电损耗；用电各部门要厉行节约，要尽可能降低电能的消耗。这就是说，电能的计量对上述各部门说来是必不可少的。因而计量电能的电度表的使用范围也就非常广泛。

电度表是一种专门用来测量电能的累积式仪表，它能积算出在某一段时间内电能的数值。因此在某段时间内的电能量可以用以下公式来表达：

设电路中的功率瞬时值为 p ，则

$$p = ui$$

式中 $u = U_m \sin \omega t$ ； $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$

电能 W 是在某一段时间间隔（例如 0 和 T 之间）内电功率 p 的积分，即

$$W = \int_0^T p dt$$

如果上式中电功率的单位是千瓦，时间的单位是小时，则电能的单位就是千瓦·小时，通常称为“度”，1 千瓦·小时，即 1 度电，表示符号为 “kW·h”。

电度表作为积算电能的仪表，它与功率表不同的地方是不仅能反映出功率的大小，而且还能积算出电能随时间而增

长的总和，由于电度表的这种特殊功能，决定了它具有与其它仪表不同的特殊结构。

第二节 电度表的种类

电度表的种类很多，按其结构型式、工作原理、测量对象的性质可以作不同的分类。

按照结构的不同，可分为电解式、电子式、电气机械式三大类。

电气机械式电度表，按照其工作原理又可以分为感应系、电动系和磁电系三种，它们的共同特点是有一个可以在电磁场中旋转的可动部分，指示器多数是一个机械计数器。

磁电系主要用作直流安培小时计；而电动系则主要用于测量直流电能；感应系主要用于测量交流电能。

感应系电度表的特点是结构简单、牢固，转动力矩大，工作可靠，而且价格低廉，在所有电磁测量仪表中它数量最多，使用最普遍。在后面的章节中，主要论述感应系电度表（或称感应式电度表）。

根据用途的不同，感应式电度表可分为有功电度表、无功电度表以及最大需量电度表等类型。

根据测量准确度的不同，电度表还可分为普通电度表和用于校验普通电度表的标准电度表。

根据接入不同的电路，还有单相电度表、三相三线电度表和三相四线电度表。

随着电能测量技术的不断发展，出现了很多种特殊用途的电度表，例如测量线路损耗的铜损电度表；测量各种大型用电器具铁损耗的铁损电度表；测量在一定积算周期内最大平均功率的最大需量电度表；在大型电力用户中，具有多路

馈电系统，出现了多路最大需量电度表；为便于集中检测，出现了三相有功电能、三相无功电能、最大需量综合测量装置；为了便于电力供应部门预先掌握用户用电数量和减少抄表收费的手续，出现了预付电费电度表（又称投币式电度表）；为了鼓励用户在高峰负荷时少用电和鼓励用户多在低峰负荷时用电，出现了双费率以至多费率电度表。此外，还有峰值负载电度表、脉冲电度表等等。

第三节 电度表的结构与原理

一、结构概要

感应式单相电度表的基本结构如图 1-1 所示。按各部件在电度表中所起的作用，可分为如下几个主要部分：

1. 电磁部分

电磁部分有时也称驱动部分。它由电压元件和电流元件组成，其作用是产生移进磁场，并与圆盘相互作用产生转动转矩（或称驱动力矩），使电度表的转动部分产生旋转运动。电磁部分有两个元件：

1) 电压元件：它由电压铁芯和电压线圈组成。电压铁芯用低比损耗的电工钢片叠铆而成。电压线圈用很细的导线绕制，而且匝数很多。

2) 电流元件：它由电流铁芯和电流线圈组成。电流铁芯采用含硅量高的电工钢片叠铆而成。电流线圈则用较粗的铜线绕制，其匝数的多少，视铁芯结构型式、尺寸大小以及对测量机构的不同要求而不同。

2. 转动部分

转动部分由圆盘和转轴组成。转轴上装有传递圆盘转数的蜗杆和防止圆盘潜动的防潜针（在圆盘上打防潜孔以防潜

动的电度表，则不需要防潜针)。

电压、电流工作磁通和制动磁钢的工作磁通在转动部分的圆盘中感应出涡流，从而产生驱动力矩和制动力矩。

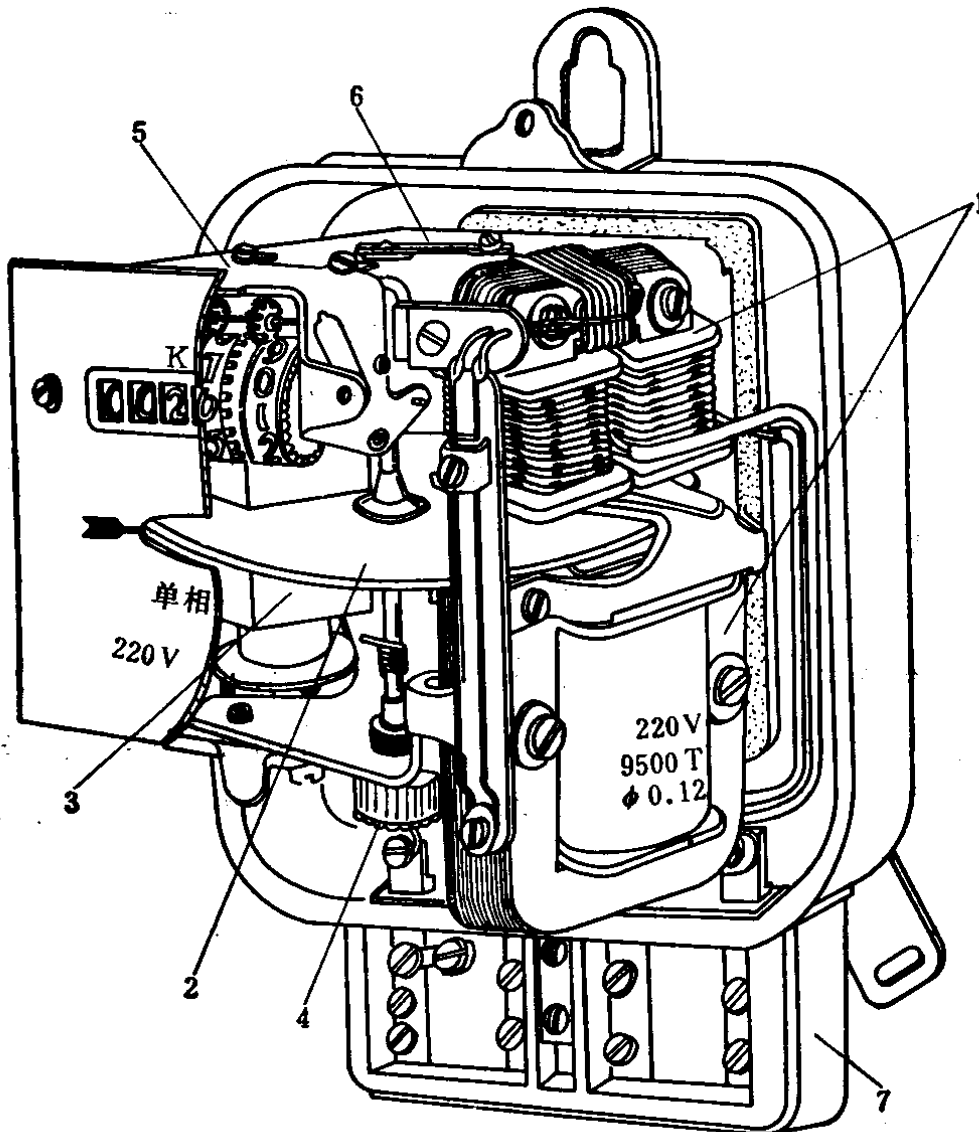


图1-1 感应式单相电度表的基本结构

1—电磁部分 2—转动部分 3—制动磁钢 4—轴承
5—计度器 6—支架 7—端钮盒

单相电度表的转动部分只有一个圆盘；三相三线电度表的转动部分有两个圆盘装于同一转轴上，但也有单圆盘的三相三线电度表；三相四线电度表的转动部分有三个圆盘，或

者两个圆盘装于同一转轴之上，也有单圆盘的。

3. 制动磁钢

制动磁钢由永久磁钢和磁轭组成，其作用是在圆盘转动时产生制动力矩，使圆盘转速均匀并使转速与负载的大小成正比。

制动磁钢上除永久磁钢和磁轭之外，还有调节装置，用以调节制动力矩的大小。

4. 轴承

轴承用以支承转动部分，分上下两个。上轴承主要是起导向作用；下轴承由于承受转动部分的重量，为了减小转动部分在转动时的摩擦力矩，对其质量要求很严格，常用的有单宝石、双宝石和磁力轴承等不同的结构。

5. 计度器

电度表的计度器，亦称积算机构，用来累计电度表圆盘的转数，即把电度表圆盘的转数变成与电能相对应的指示值，通常用机械计数器指示。

新型的电子式电度表，多数直接用数码管显示电能数。它借助于脉冲计数，而不是通过齿轮机构来计数。

6. 支架

电度表的电磁部分、制动磁钢、计度器和轴承等部件，均固定安装于支架之上。通过支架，将各部件组合成为测量机构整体。支架的质量优劣，对电度表的技术特性的稳定性起很大的作用。

7. 端钮盒

端钮盒主要用于电度表的内外接线。它由铜制端钮与绝缘盒体组成。目前大多采用活动端钮的端钮盒，以减少压制中零件损坏，并且也便于检修。

8. 外壳

外壳用于保护电度表的内部机构不受腐蚀性气体的影响，防止脏物进入表内，也可保护测量机构免受外来的机械损伤。外壳是由底壳和罩壳两部分组成。电度表的支架固定在底壳之上，罩壳上要有观察圆盘转动情况与读取计度器示数的窗口。

二、感应式电度表的作用原理

感应式电度表的结构比一般指示仪表要复杂得多，这是因为感应式电度表不但要象指示式功率表一样能反映被测功率的大小，而且还要对此功率进行积算，这在数学上叫做积分，最后计量出从一个时刻到另一个时刻的总电能。

由于感应式电度表要有这几种功能才能实现测量，所以结构比较复杂，作用原理也比指示仪表难理解。

单相有功电度表是感应式电度表中最简单的一类，也是构成所有各类感应式电度表的基础，它的原理接线如图 1-2 所示。为了简便，

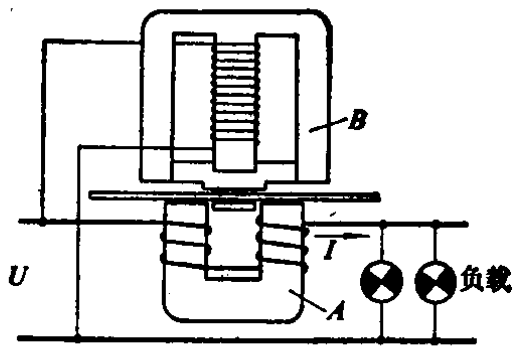


图1-2 单相有功电度表
原理接线图

图中只画出了与接线有关的部分。铁芯A的线圈称为串联线圈（或称电流线圈），串联于电路的火线端，负载电流 I 通过串联线圈。铁芯B的线圈称为并联线圈（或称电压线圈），并联于电路的两端，承受电路电压 U 。此时若负载的功率因数为 $\cos\varphi$ ，则负载消耗的功率为

$$P = UI \cos\varphi$$

首先我们分析电度表是如何反映这个功率的。



感应式单相电度表的测量机构如图 1-3 所示。加于并联线圈的电压 U 使线圈中流过电流 I_u ，产生磁通 Φ_u ，且 Φ_u 正比于 U 。同时，流过串联线圈 A_1 、 A_2 的负载电流 I 产生磁通 Φ_i ，且 Φ_i 正比于 I 。电度表内部电路和磁路的设计，保证 Φ_u 滞后电压 U 的角度为 β ，滞后 I_u 的角度为 α_u ，而 Φ_i 滞后于电流 I 的角度为 α_i 。其简要向量图示于图 1-4。为什么要把电度表内部电路和磁路设计成这样呢？目的是要使 Φ_u 滞后于 Φ_i 的角度为 $\psi = 90^\circ - \varphi$ ，或者说在负载功率因数 $\cos\varphi = 1$ 即 $\varphi = 0$ 时， $\psi = 90^\circ$ 。

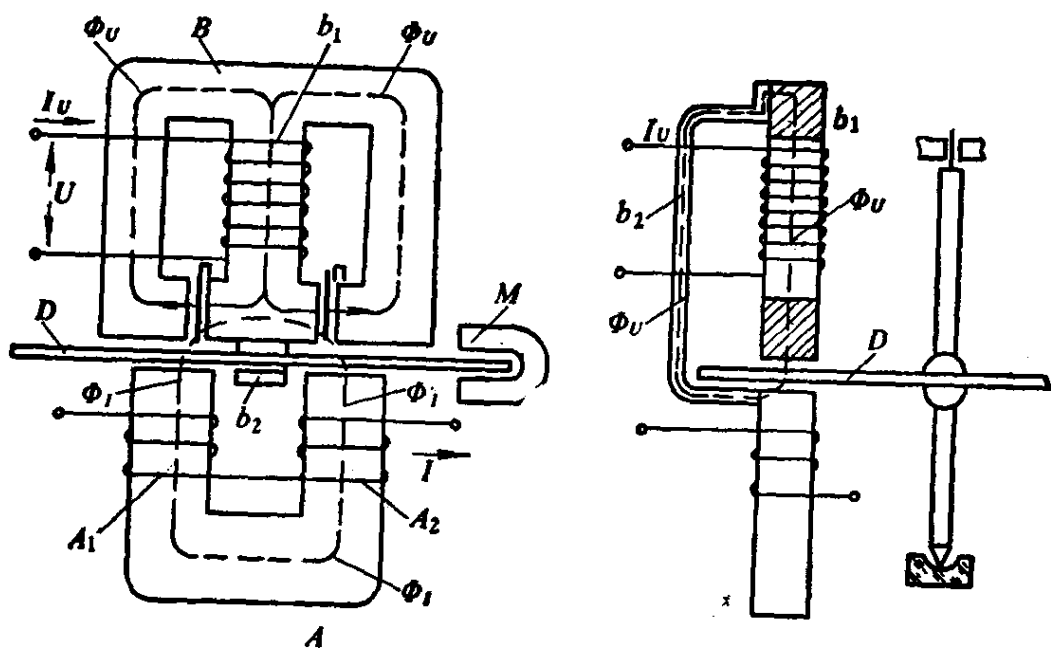


图1-3 感应式单相有功电度表测量机构

A —电流部件 B —电压部件 $A_1 A_2$ —电流线圈 b_1 —电压线圈

M —制动磁铁 D —圆盘

为了方便起见，我们分析 $\cos\varphi = 1$ 即 $\psi = 90^\circ$ 时的情况。这时，并联磁通（或称电压磁通） Φ_u 与串联磁通（或称电流磁通） Φ_i 的波形如图 1-5 所示。图中 Φ_i 和 $-\Phi_i$ 都是

串联磁通，加负号者表示以相反方向穿过圆盘的。 Φ_I 在两个磁极下两次穿过圆盘，所以有两个符号，则 Φ_I 与 $-\Phi_I$ 大小相等，方向相反。并联磁通 Φ_U ，由于回磁板 b_2 的作用，只穿过圆盘一次（参见图1-3）。因此， Φ_I 、 Φ_U 、 $-\Phi_I$ 三个随时间作正弦变化的磁通，在三个相邻的位置上穿过圆盘，即构成了三磁通测量机构。现在我们用长方块横向排列表示三个磁通穿过圆盘的位置，并以图1-5 a) 所给出的时刻 $t_1, t_2, \dots, t_7$ 为顺序，用长方块的高低来标志其磁通大小，按纵向排列，可作出如图1-5 b) 所示的图形。

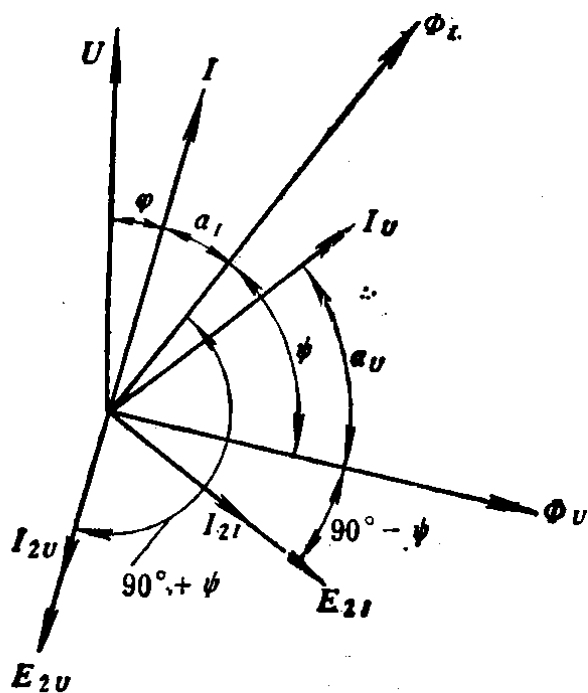


图1-4 简要向量图

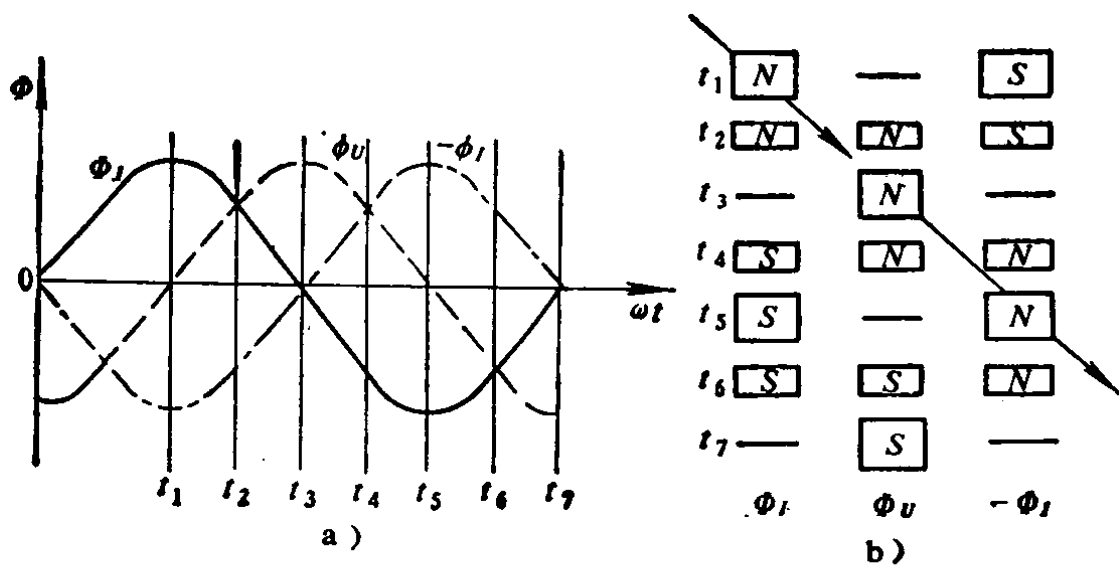


图1-5 磁通波形与移进磁场示意

a) Φ_U 、 Φ_I 波形 b) 移进磁场示意

从图上可见，同一方向穿过圆盘的最大磁通，从左向右逐渐移动，即在一个周期内，同一方向的最大磁通从左向右逐渐移过所有三个磁极，形成了最大磁通的有规则的变化。这样的磁通变化所形成的磁场，便叫作移进磁场。

移进磁场产生使圆盘向磁场移进方向运动的力，此力作用于圆盘上，形成对转轴的力矩，使圆盘沿移进磁场方向旋转。

能产生移进磁场的测量机构，不但有三磁通测量机构，还有双磁通、四磁通等多磁通测量机构。但由于三磁通测量机构既不太复杂，又有较大的驱动力矩，所以被广泛采用。

以上分析，定性地说明了电度表圆盘为什么会转动，下面我们以三磁通中的两个，如 ϕ_r 与 ϕ_u （这相当于双磁通测量机构）来说明电度表转矩与被测功率的关系。而 ϕ_u 与 $-\phi_r$ 相互作用的效果和 ϕ_r 与 ϕ_u 相互作用的效果是相等的。

由向量图可见， ϕ_r 与 ϕ_u 间的相角为 ψ ，则它们在圆盘中感应的电势 E_r 与 E_u 间的相角也是 ψ 。如果圆盘是纯阻性的，则在圆盘中流过与电势同相的感应电流 I_{2r} 与 I_{2u} ， I_{2u} 流过 ϕ_r 的极迹并与之作用将产生转矩。同理 I_{2r} 流过 ϕ_u 极迹并与之作用产生转矩。

略去下标，则瞬时转矩的通式为

$$m = C' \phi i$$

式中 C' 为比例系数，与电路、磁路和结构参数有关*； ϕ 和 i 可分别为 ϕ_r 和 I_{2u} 或 ϕ_u 和 I_{2r} 的瞬时值。

如果 ϕ 和 i 都按正弦变化，且电流滞后于磁通 γ 角，即

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad i = I_m \sin (\omega t - \gamma)$$

* 书中有好多系数，它们虽各有确定的含义，但大多数只是在公式推导中临时出现的；只有少数系数将在第五章具体计算其数值。

代入瞬时力矩通式得

$$m = C' \Phi_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \gamma)$$

由于电度表可动部分转动惯量很大，来不及追随转矩瞬时值的变化，因此它的偏转角将决定于转矩在一个交变周期内的平均值。平均值由瞬时值经积分求得，则转矩平均值的通式为

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{T} \int_0^T m dt = C' \frac{1}{T} \Phi_m I_m \int_0^T \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \gamma) dt \\ &= C'' \Phi I \cos \gamma \end{aligned}$$

现在把两组产生转矩的磁通和电流，即 Φ_I 和 I_{2v} 或 Φ_v 和 I_{2I} 代入上式，并根据向量图，以它们之间的相角代替 γ ，则可得到两个转矩

$$M_{11} = C_{11} \Phi_I I_{2v} \cos(\psi + 90^\circ)$$

$$M_{12} = C_{12} \Phi_v I_{2I} \cos(\psi - 90^\circ)$$

若按前面的分析，进一步以相应磁通 Φ_I 和 Φ_v 取代 I_{2I} 和 I_{2v} ，并把包含负载相角的公式 $\psi = 90^\circ - \varphi$ 代入上式，则得

$$M_{11} = -C'_{11} \Phi_I \Phi_v \cos \varphi$$

$$M_{12} = C'_{12} \Phi_I \Phi_v \cos \varphi$$

二力矩的方向可根据相应磁通设定的方向，按左手定则确定。按原来在绘制图 1-5 a) 时设定的方向判断，二力矩方向相反，而公式中 M_{11} 有个负号，则表明根据其相位关系，二力矩实际上沿同一方向驱动圆盘转动。

在前面，曾说明我们是以 Φ_I 和 Φ_v 为例来分析的，所得出的结论不难推广到 Φ_v 和 $-\Phi_I$ ，它们作用的结果同样也会产生两个转矩，以同样的方向驱动圆盘转动。如此，共有四个分力矩，由于方向相同，则总力矩为各分力矩之和

$$M_1 = C'_1 \Phi_I \Phi_v \cos \varphi$$

从这个公式出发, 不难利用 $\Phi_i \propto I$ 、 $\Phi_u \propto U$ 的关系得到驱动力矩和被测功率成正比的关系, 即

$$M_1 = C_1'' IU \cos \varphi = C_1'' P$$

这个公式说明, 在单相有功电度表的内部电路和磁路的设计中, 使并联磁通滞后串联磁通的相角为

$$\psi = 90^\circ - \varphi$$

时, 则驱动力矩 M_1 与被测负载功率成正比。也就是说, 电度表转矩反映了被测功率的大小。

当驱动力矩使圆盘转动后, 转速将在转矩作用下逐渐增大。而制动磁钢同时作用于圆盘, 圆盘在制动磁钢的磁隙中转动时切割磁钢磁通 Φ_M 产生的制动力矩

$$M_2 = C_M \Phi_M^2 n$$

当圆盘转速不断增大到使 $M_2 = M_1$ 时, 圆盘将保持匀速转动, 即得到

$$n = \frac{C_1''}{C_M \Phi_M^2} IU \cos \varphi = K' IU \cos \varphi = K' P$$

公式说明, 电度表圆盘转速正比于被测功率。显然, 正比于被测功率的圆盘转速与时间的乘积, 即应为此时间内的被测电能。转速与时间的乘积是圆盘转数, 也就是说, 圆盘转数就代表被测电能。当功率随时间变化时, 则由不断积算的计数机构, 完成各时间段内功率和时间乘积的叠加, 即完成对被测功率的积分作用, 得到

$$N = \int_0^T n dt = K' \int_0^T P dt$$

当功率不随时间变化时, 则从 0 到 T 时间内的转数为

$$N = nT = K' PT$$

最后由计数器记录下的转数即代表被测电路所消耗的电能,