



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电能计量技术

杜蒙祥 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电能计量技术

主 编	杜蒙祥		
编 写	李小华	杨通达	陈德英
	张铁忠	毛 莹	
主 审	张翠琴		



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

本书采用项目导向式和任务驱动式编写方式,根据电能计量现场工作过程选择典型的工作任务为编写内容,在编写中根据典型的工作任务设计学习情境。本书共设计了八个学习情境,每一个学习情境都包括相关理论知识、学习情境的实训、学习情境的练习题,实现了学习情境过程的理论与实践一体化。

本书可作为高职高专院校供用电技术专业及其他相关专业教材,也可作为相关工程技术人员的培训教材和参考书。

91831

图书在版编目(CIP)数据

电能计量技术/杜蒙祥主编. —北京:中国电力出版社,2012.7

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5123-3285-0

I. ①电… II. ①杜… III. ①电能计量—职业教育—教材

IV. ①TM933.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第156433号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012年7月第一版 2012年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17印张 416千字

定价 31.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

为了贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要》关于高等职业技术教育要求的精神,培养和造就一大批服务于社会经济发展、服务于电力行业发展的高技能人才,以适应我国电力工业及其国家电网企业科技化、信息化、智能化快速发展的迫切需要,电力高等职业技术教育的教学改革及其示范创建要围绕实施这一目标而进行。

电力高职教材开发、建设是教学改革与示范创建、培养电力高技能人才工程的一个重要组成部分。本书以《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》为指导,主要采用项目导向式和任务驱动式编写方式,根据电能计量现场工作过程选择典型的工作任务为编写内容,在编写中根据典型的工作任务设计学习情境。本书共设计了八个学习情境,每一个学习情境都编有相关理论知识、学习情境的实训、学习情境的练习题,每个学习情境过程实行了理论与实践的一体化。

本书学习情境一、二、三、五由江西电力职业技术学院杜蒙祥教授编写;学习情境四由江西电力职业技术学院李小华副教授编写;学习情境六由江西电力职业技术学院陈德英老师编写;学习情境七由江西电力职业技术学院杨通达老师编写;学习情境八由江西电力职业技术学院杜蒙祥教授和江西南昌供电公司张铁忠高级工程师共同编写;江西九江供电公司毛莹参与了本书部分内容的编写。本书由江西电力职业技术学院杜蒙祥教授担任主编并统稿,由江西电力科学院张翠琴高级工程师审稿。

本书在编写过程中参阅了部分教材和文献,先后得到了江西电力科学院靳邵平高级工程师、江西九江供电公司毛莹、江西电力职业技术学院陈斌副教授和戴勇副教授的大力支持,在此对本书审稿人和参考文献的作者以及给予大力支持的同志一并致以衷心的感谢。

由于本书编者学识水平与实践经验有限,书中难免会出现疏漏和不足之处,恳请使用本书的广大师生和读者批评指正。

编者
2012年6月

目 录

前言

学习情境一 机电式电能表的检定	1
模块一 机电式电能表基本知识	1
模块二 机电式电能表检定	15
模块三 机电式电能表检定实训	20
习题	23
学习情境二 电子式电能表的检定	25
模块一 电子式电能表基本知识	25
模块二 普通电子式电能表检定	37
模块三 多功能电子式电能表检定	41
模块四 电子式电能表检定实训	43
习题	46
学习情境三 智能电能表的检定	48
模块一 智能电能表基本知识	48
模块二 智能电能表检定	66
模块三 智能电能表检定实训	78
习题	83
学习情境四 测量用互感器检定	85
模块一 测量用互感器基本知识	85
模块二 互感器检定	94
模块三 互感器室内检定实训	97
习题	107
学习情境五 电能计量装置现场校验	111
模块一 电能表的现场校验	111
模块二 电能表现场校验实训任务	115
模块三 电流互感器现场校验	118
模块四 电流互感器现场校验实训	121
模块五 电磁式电压互感器现场校验	124
模块六 电磁式电压互感器现场校验实训	129
模块七 电压互感器二次回路压降测试	132
模块八 电压互感器二次回路压降测试实训	134
模块九 电能计量装置二次回路阻抗与导纳测试	137
习题	142

学习情境六	电能计量装置接线检查	145
模块一	电能计量装置接线	145
模块二	电能计量装置典型错误接线类型	160
模块三	电能计量装置错误接线检查	167
模块四	电能计量装置带电接线检查实训	181
习题		192
学习情境七	电能计量装置配置与安装	195
模块一	电能计量装置配置的基本知识	195
模块二	电能计量装置的配置实训	208
模块三	电能计量装置的安装	212
模块四	电能计量装置的安装实训	216
模块五	电能计量装置带电换装实训	235
习题		243
学习情境八	抄表技术与用电信息采集	245
模块一	本地抄表技术	245
模块二	远程自动化抄表系统	248
模块三	用电信息采集系统	254
模块四	抄表技术与用电信息采集实训	261
习题		263
参考文献		266

机电式电能表的检定

 学习目标

1. 知识目标

- (1) 了解机电式电能表的发展概况。
- (2) 掌握机电式电能表的分类。
- (3) 掌握机电式电能表的结构,了解机电式电能表的工作原理。
- (4) 掌握机电式电能表的各种计量功能。

2. 能力目标

- (1) 能够正确使用电能计量检定装置和校表软件并进行各种操作。
- (2) 按检定规程要求完成下列检定项目:工频耐压试验,直观检查和通电检查,启动、潜动试验、校核计度器示数,确定电能测量基本误差。
- (3) 按规程规定要求处理原始记录和出具检定证书或检定结果通知书。
- (4) 养成安全工作和防护事故的习惯。

模块一 机电式电能表基本知识

模块描述

本模块主要介绍机电式电能表的结构、工作原理、分类、基本参数和计量功能等内容。通过学习使学生了解机电式电能表的工作原理,掌握机电式电能表的结构、参数、类型和计量功能。



一、机电式电能表的结构

电能表的类别较多,从工作原理来分类大概分为机电式电能表、电子式电能表、智能式电能表等。机电式电能表由于结构差异的不同又可分为感应式(电磁式)电能表和机电电能表。但由于机电电能表与感应式电能表的工作原理是相同的,所以通常将感应式电能表和机电电能表统称为机电式(感应系列)电能表。在介绍机电式电能表的工作原理时一般以感应式电能表为例来介绍。感应式电能表的种类、型号很多,但它们的基本结构都是相似的,都是由测量机构(驱动元件、转动元件、制动元件、轴承、计度器)、误差补偿调整装置和辅助部件(外壳、基架、端钮盒、铭牌)所组成。

测量机构是电能表实现电能测量的核心部分。图 1-1 所示为感应式单相电能表测量机构简图。

(一) 驱动元件(电磁元件)

驱动元件又分为电压元件与电流元件。它的作用是将交变的电压和电流转变为穿过转盘

的交变磁通，与在转盘内产生的感应电流相互作用，进而产生驱动力矩，使转盘转动。

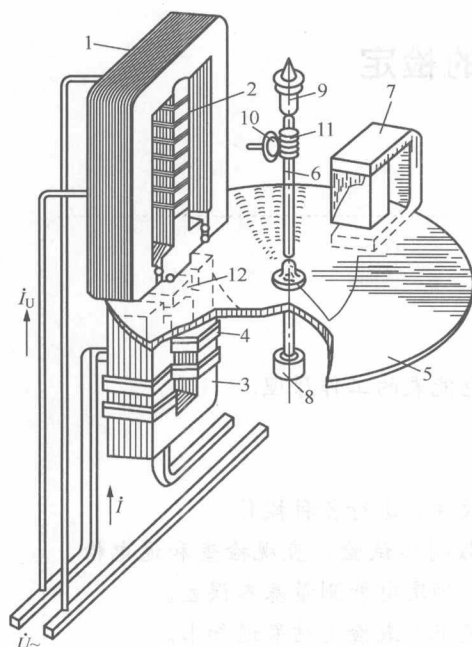


图 1-1 感应式单相电能表测量机构简图

- 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—永久磁铁；8—下轴承；9—上轴承；10—蜗轮；11—蜗杆；12—回磁极

1. 电压元件

电压元件由电压铁芯 1、电压线圈 2 和回磁极 12 组成。绕在电压铁芯上的电压线圈接在被测电压所接入的线路上且与负载并联，所以称为并联电路或电压线路。不管有无负载电流，电压线圈总是带电的，要消耗功率。为了使其消耗的功率不超过一定的限度（一般不应超过 $0.5 \sim 1.5\text{W}$ ），绕制电压线圈时，在保证所需安匝数（一般在 $100 \sim 200$ 安匝）的条件下，应选取较多的匝数（ $25 \sim 50$ 匝/V），并采用线径较细的漆包线（直径为 $0.08 \sim 0.16\text{mm}$ ）绕制，能形成较大的阻抗，限制了并联回路中的电流和功率消耗，并能使电压线圈中的电流滞后电压的相位角几乎达到 90° 。回磁极由 1.50mm 厚的铁板冲压而成，构成电压工作磁通的回路，并在上面装设了补偿力矩调整装置。

2. 电流元件

电流元件是指用粗的绝缘铜线绕成匝数不多的电流线圈 4，套在 U 形的电流铁芯 3 上。电流线圈是串接在电源与负载之间，故又叫串联线圈。电流线圈绕制的方向必须按图 1-2 所示那样，使左柱的磁通由下柱往上时，右柱的磁通由上往下。也就是两柱上线圈绕制的方向相反，这样两柱上所产生的磁通才能叠加起来；否则两磁通会互相相减，不能产生转动力矩。同时因负载电流是流过电流线圈的，所以要求电流线圈的阻抗小，即匝数少而且绕制导线要粗。

相对于转盘的位置驱动元件又可分为正切式及辐射式两种。正切式是指电压元件平面在转盘上的投影线与转盘半径方向相垂直，辐射式是指电压元件平面在转盘上的投影线与转盘半径方向一致。在我国多采用正切式电磁元件。正切式电磁元件可分为封闭式铁芯、半封闭式铁芯、分离式铁芯三种。

（二）转动元件

转动元件由压铸在一起的铝质转盘和转轴用合金组成。转盘材料要求导电性能良好、质量轻、耐腐蚀，铝最符合要求。制作转盘材料的铝的纯度为 99% 左右。转盘直径一般为 $80 \sim 100\text{mm}$ ，厚度为 $0.5 \sim 1.2\text{mm}$ ，质量约为 20g 。转盘作用是在驱动元件建立的交变磁通下，转盘上产生感应电流，进而产生驱动力矩使转盘转动，并把转动的圈数通过蜗轮与蜗杆的啮合传递给计度器。转盘固定在转轴上，边缘涂有计读转数的有色标记，有的在背面喷有校正平衡的重质涂料，转轴上部套有蜗杆以便和计度器的齿轮啮合。

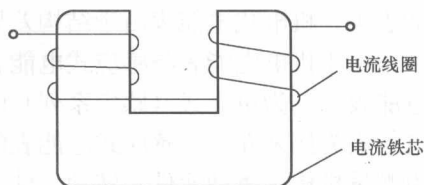


图 1-2 电流线圈的绕制方向示意图

(三) 制动元件（永久磁铁）

制动元件由永久磁铁及其调整元件组成。其作用是产生与驱动力矩相反的制动力矩，以便使转盘的转动速度与被测电路的功率成正比。制动元件的永久磁铁由具有较高矫顽力和剩磁感应强度的材料制成，如由铝合金和铝镍钴合金等压铸而成。

(四) 轴承

轴承是电能表的一个重要部件，它由上、下轴承组成。上轴承位于转轴上端，只起定位和导向作用；下轴承位于转轴下端，用以支撑转动元件的全部重量。下轴承的质量好坏对电能表的准确度和使用寿命有很大影响。现代电能表的轴承分为钢珠宝石结构和磁力结构两种。钢珠宝石轴承又分为单宝石轴承和双宝石轴承，其中双宝石轴承的摩擦力较小，耐用性好，寿命也长。磁力轴承主要有磁推轴承和磁悬轴承两种，由于磁力轴承减少了机械摩擦力，所以目前机电式电能表较多为磁力轴承。

(五) 计度器（积算机构）

计度器的作用是累计电能表转盘的转数，并通过齿轮比换算成电能单位的指示值。目前，计度器主要有两种，即指针式和字轮式，它们的面板如图 1-3 所示。指针式计度器摩擦力均匀、结构简单，在精密电能表中较多采用；但示数抄读困难，容易发生错误，普通电能表中很少使用。实际中较常见的是字轮式计度器，其结构如图 1-4 所示。字轮式计度器直接按普通数字排列方式表示其读数，抄读比较便利，外观漂亮；但摩擦力不均匀，尤其是几个字轮同时翻转（进位）时，摩擦力较大，影响表速，产生负误差。

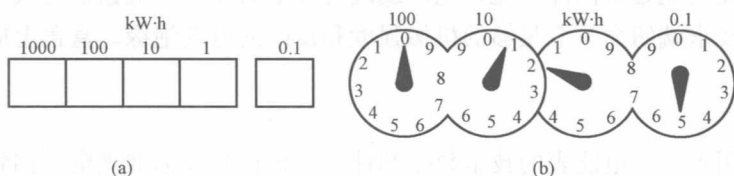


图 1-3 计度器板面图

(a) 字轮式；(b) 指针式

计度器是电能表积算转盘转数的机构。转盘转动圈数的多少，可以反映出负载所消耗电能的多少，计度器是以 kW·h（千瓦时）为单位的。一般计度器的字轮的位数是 5 位。

字轮式计度器有一个重要额定参数，即传动比 k 。传动比用公式可表示为

$$k = \frac{\text{从动轮齿数之积}}{\text{主动轮齿数之积}}$$

计度器的传动比一般用于核实、校对电能表铭牌常数的准确性。

(六) 辅助部件

1. 外壳

外壳由底座和表盖组合而成。底座的作用是固定电能表基架、端钮盒及表盖，并供电能表安装固定使用。它一般用金属材料制作，也可用塑料绝缘材料制作。表盖起封闭和保护作用，通过表盖透明部分可以看到转盘转动和计度器的示数。它一般由铝板拉伸而制成，也有塑料和玻璃制的表盖。

2. 基架

基架用来支撑和固定测量机构。由于要求元件和元件之间的相对位置必须精确、牢固，

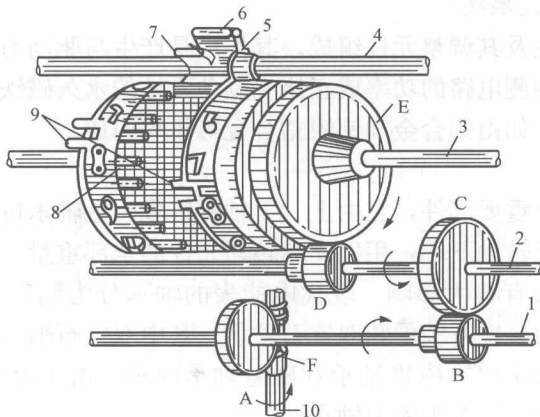


图 1-4 字轮式计度器结构

A—蜗轮；B、D—主动轮；C、E—从动轮；F—蜗杆

1~4—横轴；5—进位轮；6—长齿；7—短齿；8—梢齿；9—槽齿；10—转轴

因此，要求基架具有足够的机械强度和精密的加工工艺。基架一般是由钢板冲压或用铝合金压铸而成。

3. 端钮盒及盒盖

端钮盒的主要功能是将内部电流、电压线圈与外电路相接。端钮盒与底座的连接应有良好的密封性，并要求端钮盒具有足够的机械强度和良好的电气绝缘。盒盖上应标有电能表内部接线图。

4. 铭牌

为了便于使用者了解电能表的技术数据和性能，根据有关标准规定，铭牌上必须标注以下内容。

(1) 准确度等级。将准确度等级的数字置于一个圆圈内，如图 1-5 中表示该电能表的准确度等级为 2.0 级。

(2) 计量单位的名称或符号，有功电能表用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，无功电能表用 $\text{kvar} \cdot \text{h}$ 。

(3) 电能表规格。

1) 参比电压。对于单相电能表以电压线路接线端上的电压表示，如 220V；对于三相四线电能表则以相数乘以相电压/线电压表示，如 $3 \times 220/380\text{V}$ ；对于三相三线电能表则以相数乘以线电压表示，如 $3 \times 380\text{V}$ 。如果电能表通过测量用互感器接入，且在电能表常数中已考虑互感器变比时，应标明互感器变比，如 $3 \times 6000/100\text{V}$ 。

2) 基本电流及额定最大电流。例如 10 (40) A，其中 10A 是基本电流，是确定电能表有关特性的电流值，以 I_b 表示；40A 是额定最大电流，即指电能表长期正常工作而误差和温升又能满足准确度要求的最大电流，以 $I_{\max}$ 表示。如果额定最大电流小于基本电流的 150% 时，则只标明基本电流。对于三相电能表还应在前面乘以相数，如 $3 \times 5 (20) \text{A}$ ；对于经电流互感器接入式电能表则标明互感器二次电流，以 5A 表示，电能表的基本电流和额定最大电流可以包括在型式符号中，如 FL246-1.5 (6)，若电能表常数中已考虑互感器变比时，应标明互感器变比，如 $3 \times 1000/5\text{A}$ 。

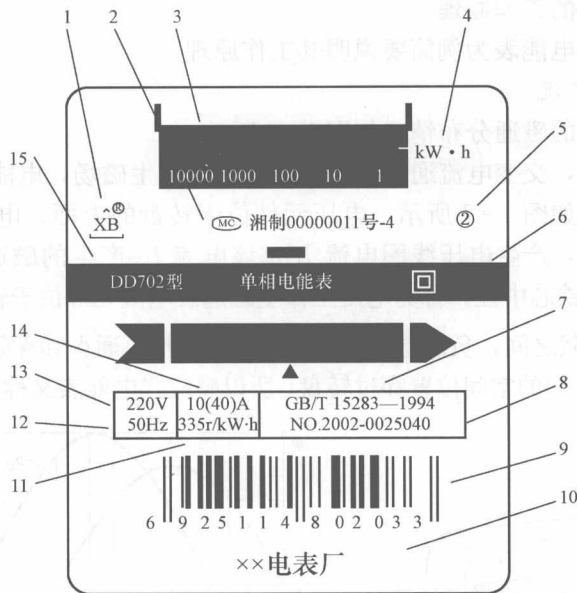


图 1-5 单相电能表的铭牌标志

- 1—商标；2—计量许可证标志；3—字轮式计度器窗口；4—计量单位名称或符号；
5—准确度等级；6—单相两线有功电能表；7—制造标准；8—出厂编号；9—条形码；
10—生产厂家；11—电能表常数；12—频率；13—参比电压；14—基本电流和
额定最大电流；15—电能表的名称及型式

3) 电能表常数。例如 $1800\text{r}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，是指电能表指示 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电量时转盘转过的圈数为 1800r。

4) 电能表的型号。例如 DD862 型，其中：

a. 类别代号：D—电能表。

b. 组别代号：D—单相；S—三相三线有功；T—三相四线有功；A—安培小时计；B—标准；D—多功能；H—总耗；J—直流；M—脉冲；S—全电子式；X—无功；Z—最大需量；Y—预付费；F—复费率。

c. 设计序号：用阿拉伯数字表示，如 201、202、862 等。

d. 派生号：T—湿热、干燥两用；TH—湿热带；TA—干热带用；G—高原用；H—船用；F—化工防腐用。

举例如下：

DD 表示单相电能表，如 DD702 型、DD862 型；

DDY 表示单相预付费电能表，如 DDY59 型；

DBT 表示三相四线有功标准电能表，如 DBT25 型；

DSSD 表示三相三线全电子式多功能电能表，如 DSSD-331 型。

5) 制造厂的厂名、制造年份和该厂的本身编号。

6) 铭牌中间窗口及箭头表示转动方向。计度器带小数点前面的窗口为整数位，后面的窗口为小数位。

二、机电式电能表的工作原理

下面以单相感应式电能表为例简要说明其工作原理。

(一) 磁通的分布情况

单相感应式电能表的磁通分布情况如图 1-6 所示。

根据右手螺旋定则, 交变电流通过导线或线圈时会产生磁场, 电能表内工作磁通和感应电流随时间变化的曲线如图 1-7 所示。电压元件位于转盘的上面, 电压线圈是并联在电源两端, 其两端电压为 U , 产生电压线圈电流 I_U , 该电流 I_U 产生的磁通 ϕ_U 从电压铁芯中柱经回磁极穿过转盘回到铁芯中柱, 称为电压工作主磁通。电流元件位于转盘下面, 电流线圈串联在交流电路电源和负载之间, 负载电流 i 产生的电流工作磁通 ϕ_i 和 ϕ'_i 穿过转盘。由此可知, 有三束磁通 ϕ_U 、 ϕ_i 、 ϕ'_i 从不同的空间位置穿过转盘, 所以感应式电能表又称为三磁通型电能表。

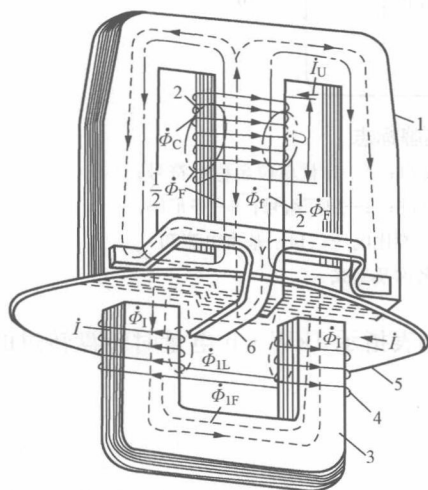


图 1-6 电能表内磁通的分布情况
1—电压铁芯; 2—电压线圈; 3—电流铁芯;
4—电流线圈; 5—转盘; 6—回磁极

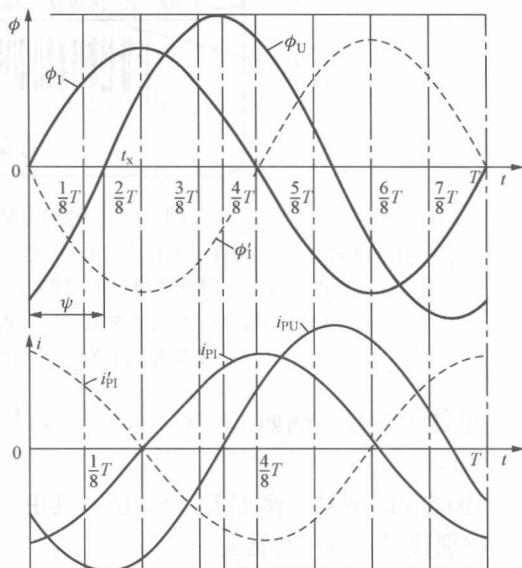


图 1-7 工作磁通和感应电流随时间变化的曲线

(二) 驱动力的产生过程

为了说明驱动力矩的产生过程, 画出工作磁通及感应电流随时间变化的关系曲线, 如图 1-7 所示。为了分析方便, 忽略电磁元件中的铁芯损耗和漏磁通, 假定磁通 ϕ 和感应电流 I 均为正弦波, 且 $\dot{\phi}_U$ 滞后 $\dot{\phi}_i$ 的相位差为 ψ 。磁通 $\dot{\phi}_U$ 、 $\dot{\phi}_i$ 和感应电动势、感应电流间的相位关系, 如图 1-8 所示。图中, 假定 $\dot{\phi}_i$ 与负载电流 i 同相位, $\dot{\phi}_U$ 滞后外加电压 U 90° 。首先, 分析对应图 1-7 上 $0 \sim 1/8T$ 时间内产生电磁力的情况, 如图 1-9 (a) 所示。图中“ $\times$ ”表示磁通自上而下穿过转盘, “ $\cdot$ ”表示磁通自下而上穿过转盘。由于在 $0 \sim 1/8T$ 时间内 ϕ_i 是在正半周趋于增加, ϕ'_i 是在负半周趋于增加,

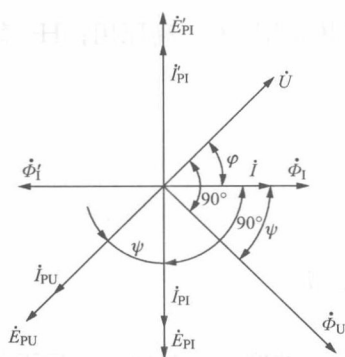


图 1-8 磁通 $\dot{\phi}_U$ 、 $\dot{\phi}_i$ 和感应电动势、感应电流的相位关系

$\dot{\Phi}_U$ 是在负半周趋于减小, 根据楞次定律和右手定则可以判断感应电流 i_{PU} 和 i_{PI} 的方向为逆时针, i'_{PI} 的方向为顺时针。感应电流 i_{PI} 与磁通 Φ_U 相互作用产生电磁力 F_1 , i'_{PI} 与 Φ_U 相互作用产生电磁力 F_2 , i_{PU} 与 Φ_1 相互作用产生电磁力 F_3 , i_{PU} 与 Φ'_1 相互作用产生电磁力 F_4 。根据左手定则可以判定这些电磁力形成的总电磁力 F 的方向, 如图 1-9 (a) 所示。

按上述同样方法可以判定 $t=2/8T \sim 3/8T$ 、 $t=4/8T \sim 7/8T$ 、 $t=6/8T \sim 7/8T$ 等几个时刻产生的总电磁力的方向, 如图 1-9 (b)、(c)、(d) 所示。

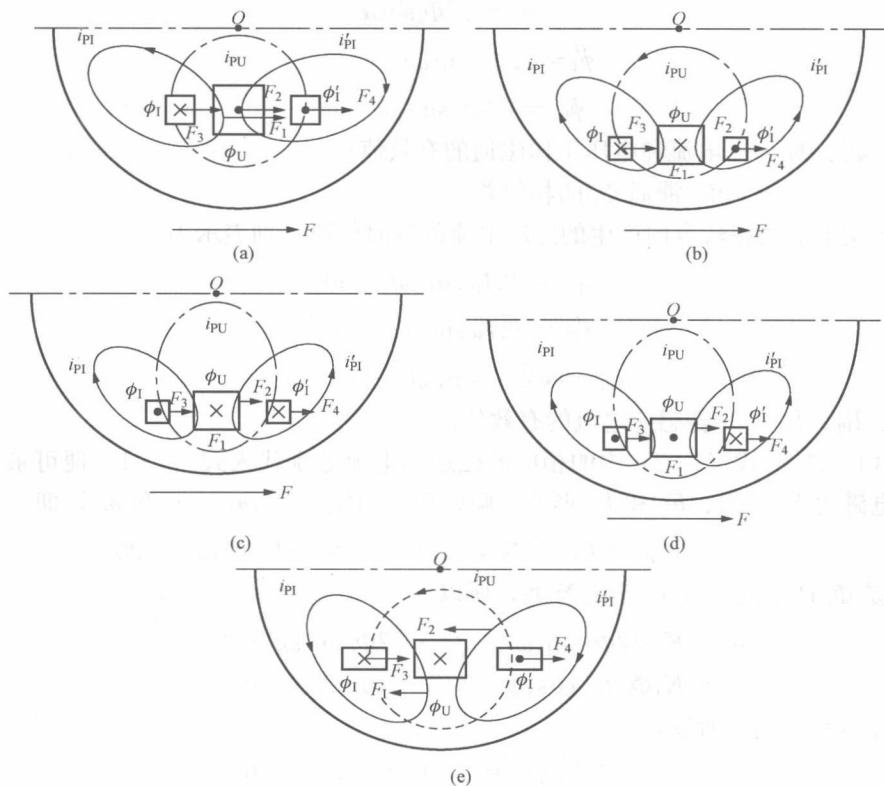


图 1-9 电磁力产生分析图

- (a) $t=0 \sim \frac{1}{8}T$ 时的情况; (b) $t=\frac{2}{8}T \sim \frac{3}{8}T$ 时的情况;
 (c) $t=\frac{4}{8}T \sim \frac{5}{8}T$ 时的情况; (d) $t=\frac{6}{8}T \sim \frac{7}{8}T$ 时的情况;
 (e) $t=t_x$ 时的情况

(三) 驱动力的方向

由图 1-9 (a) ~ (d) 中, 利用左手定则可判断出转盘在一个周期内驱动力的方向: $\dot{\Phi}_1$ 在时间上超前 $\dot{\Phi}_U$ 一个 ψ 角时, 平均电磁力的方向是由 $\dot{\Phi}_1$ 在转盘上的磁通印迹指向 $\dot{\Phi}_U$ 在转盘上的磁通印迹。当电压或电流线圈任一进出端改变时, 改变了 $\dot{\Phi}_U$ 、 $\dot{\Phi}_1$ 相位关系, 超前相变为滞后相, 相应的转盘转向将与上述情况相反。总之, 驱动力矩的方向总是由相位越前的磁通所在的空间位置指向相位滞后的磁通所在空间位置。改变磁通 $\dot{\Phi}_U$ 与 $\dot{\Phi}_1$ 之间的相位关系, 便可改变驱动力矩的方向。

(四) 驱动力矩的大小

由电工原理知, 磁场中的电磁力正比于磁通量 ϕ 和电流 i 的乘积, 而驱动力矩又正比于电磁力, 所以瞬时驱动力矩可表示为

$$m = C_m \phi i \quad (1-1)$$

式中 C_m ——比例系数。

若设各工作磁通的瞬时值分别为

$$\phi_1 = \sqrt{2} \Phi_1 \sin \omega t \quad (1-2)$$

$$\phi'_1 = \sqrt{2} \Phi'_1 \sin(\omega t - 180^\circ) \quad (1-3)$$

$$\phi_U = \sqrt{2} \Phi_U \sin(\omega t - \psi) \quad (1-4)$$

式中 Φ_1 、 Φ'_1 、 Φ_U ——电流和电压工作磁通的有效值;

ψ —— Φ_U 滞后 Φ_1 的相位差。

以上各交变磁通在转盘内产生的感应电流的瞬时值可分别表示为

$$i_{PI} = \sqrt{2} I_{PI} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-5)$$

$$i'_{PI} = \sqrt{2} I'_{PI} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1-6)$$

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

式中 I_{PI} 、 I'_{PI} 、 I_{PU} ——各感应电流的有效值。

将式 (1-2) ~ 式 (1-7) 中的相应的磁通和电流分别代入式 (1-1) 便可求出图 1-9 中的四个电磁力 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 形成的瞬时驱动力矩 m_1 、 m_2 、 m_3 和 m_4 , 即

$$m_1 = C_m \phi_U i_{PI} = C_m \sqrt{2} \Phi_U \sin(\omega t - \psi) \times \sqrt{2} I_{PI} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

而 I_{PI} 是 Φ_1 产生的, 且 I_{PI} 正比于 Φ_1 , 所以

$$\begin{aligned} m_1 &= K_1 \sqrt{2} \Phi_U \sin(\omega t - \psi) \times \sqrt{2} \Phi_1 \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= K_1 \Phi_U \Phi_1 [\cos(\psi - 90^\circ) - \cos(2\omega t - \psi - 90^\circ)] \end{aligned}$$

又因为 $i'_{PI} = -i_{PI}$, 所以,

$$m_2 = C_m \phi_U i'_{PI} = -C_m \phi_U i_{PI} = -m_1$$

同样

$$m_3 = C_m \phi_1 i_{PU} = C_m \sqrt{2} \Phi_U \sin \omega t \times \sqrt{2} I_{PU} \sin(\omega t - 90^\circ - \psi)$$

而 I_{PU} 是 Φ_U 产生的, 且 I_{PU} 正比于 Φ_U , 所以

$$\begin{aligned} m_3 &= K_3 \sqrt{2} \Phi_1 \sin \omega t \times \sqrt{2} \Phi_U \sin(\omega t - 90^\circ - \psi) \\ &= K_3 \Phi_U \Phi_1 [\cos(90^\circ + \psi) - \cos(2\omega t - \psi - 90^\circ)] \end{aligned}$$

又因为 $\phi'_1 = -\phi_1$, 所以

$$m_4 = C_m \phi'_1 i_{PU} = -C_m \phi_1 i_{PU} = -m_3$$

为了分析计算的方便, 规定磁通的正方向为自下而上穿过转盘; 涡流的正方向与磁通正方向符合右手螺旋定则的关系, 并规定逆时针方向的驱动力矩为正, 顺时针方向为负。按上述正方向的规定, 则各正方向磁通和涡流所决定的瞬时力矩中, m_1 、 m_4 为正, m_2 、 m_3 为负。于是合成瞬时驱动力矩为

$$m = m_1 - m_2 - m_3 + m_4$$

而使转盘转动的驱动力矩, 取决于合成瞬时驱动力矩在一个周期内的平均值, 可表示为

$$M_Q = \frac{1}{T} \int_0^T (m_1 - m_2 - m_3 + m_4) dt = M_1 - M_2 - M_3 + M_4$$

其中 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 分别为各个瞬时力矩 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 的平均值,且有

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T m_1 dt = \frac{1}{T} \int_0^T K_1 \Phi_U \Phi_I [\cos(\psi - 90^\circ) - \cos(2\omega t - \psi - 90^\circ)] dt$$

$$= K_1 \Phi_U \Phi_I \sin\psi$$

$$M_3 = \frac{1}{T} \int_0^T m_3 dt = \frac{1}{T} \int_0^T K_3 \Phi_U \Phi_I [\cos(90^\circ + \psi) - \cos(2\omega t - \psi - 90^\circ)] dt$$

$$= -K_3 \Phi_U \Phi_I \sin\psi$$

由于 $m_2 = -m_1$, $m_4 = -m_3$, 故其平均值也应差一负号, 即

$$M_2 = -K_2 \Phi_U \Phi_I \sin\psi$$

$$M_4 = -(-K_4 \Phi_U \Phi_I \sin\psi) = K_4 \Phi_U \Phi_I \sin\psi$$

所以, 使转盘转动的驱动力矩为

$$M_Q = K_1 \Phi_U \Phi_I \sin\psi - (-K_2 \Phi_U \Phi_I \sin\psi) - (-K_3 \Phi_U \Phi_I \sin\psi) + K_4 \Phi_U \Phi_I \sin\psi$$

$$= (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) \Phi_U \Phi_I \sin\psi$$

$$= K \Phi_U \Phi_I \sin\psi$$

(1-8)

式中 K ——驱动力矩常数, 取决于电能表的结构。

从对驱动力矩的产生过程、驱动力矩的大小及方向的分析中可得出以下结论:

(1) 存在两个以上相位不同 ($\psi \neq 0$)、空间位置又不重合的交变磁通, 是产生驱动力的必要条件;

(2) 驱动力矩的方向总是由相位超前的磁通所在的空间位置, 指向相位滞后的磁通所在的空间位置;

(3) 驱动力矩的大小正比于两个磁通 (Φ_U 、 Φ_I) 与两个磁通相位差的正弦之积。

(五) 驱动力矩与负载功率的关系

根据式 (1-8) 可知, 电能表产生的平均转矩 $M_P = K \Phi_U \Phi_I \sin\psi$ 。当电能表接入被测电路后, 若电流、电压铁芯不饱和, 便可认为磁通 Φ_U 正比于外加电压 U , 磁通 Φ_I 正比于负载电流 I , 可分别表示为 $\Phi_U \propto K_U U$, 由于 $I_U = \frac{U}{|Z_U|}$, 则 $\Phi_U = K'_U \frac{U}{|Z_U|} \propto K_U U$ 。

假设电能表所接负载为感性, 则阻抗角 $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, 不计铁芯损耗, 电压线圈为纯电感元件, 则外加电压 $\dot{U}$ 、电压线圈中的电流 $\dot{I}_U$ 、负载电流 $\dot{I}$ 及 $\dot{\Phi}_U$ 、 $\dot{\Phi}_I$ 的相位关系如图 1-10 所示。图中 $\psi = 90^\circ - \varphi$ 。

当满足以上条件时, 电能表驱动力矩为

$$\begin{aligned} M_P &= K \Phi_U \Phi_I \sin\psi = K (K_U U) (K_I I) \sin(90^\circ - \varphi) \\ &= (K K_I K_U) UI \cos\varphi = K_P P \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 K_P ——驱动力矩常数, 由电能表结构决定。

式 (1-9) 说明驱动方程与负载功率 P 成正比, 那么对时间的累积 $\int_0^T K_P P dt$ 即为有功电能。可见单相有功电能表正确计量的条件应满足:

(1) 磁通 Φ_U 正比于外加电压 U ;

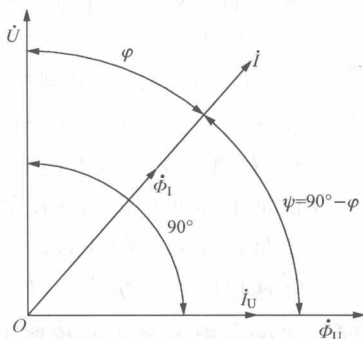


图 1-10 单相电能表条件相量图

(2) 磁通 Φ_T 正比于负载电流 I ;

(3) 内相角 $\varphi=90^\circ\pm\varphi$, 这一条件又称为正交条件, 它是靠合理的结构设计和安装相位角调整装置来实现的。

由以上的分析可知, 感应式电能表测量机构的驱动力矩与被测电路中负载功率成正比, 而电量等于功率对时间的积分。

电能表怎样才能把电量累计起来, 并实现正确计量呢? 下面来说明这个问题。

(六) 电能测量原理

为了说明测量电量的原理, 需要从永久磁铁的作用说起。当负载功率不变时, 由 $M_P = K_P P$ 得知, 转盘的转矩是一定的, 在这个转矩的作用下, 转盘开始转动, 但是若只有这个转矩的作用, 转盘必将作匀加速转动, 越转越快, 不能正确计量。若加一反作用力矩, 当转矩和反力矩相等时, 转盘即以均匀速度 n 旋转, 此时转盘的转速就可以按比例地反映负载消耗的电量。电能表的反力矩 (即制动力矩) 是由永久磁铁的磁通 Φ_T 和转盘在永久磁铁的磁场内旋转时感应的涡流 i_T 相互作用而产生的。

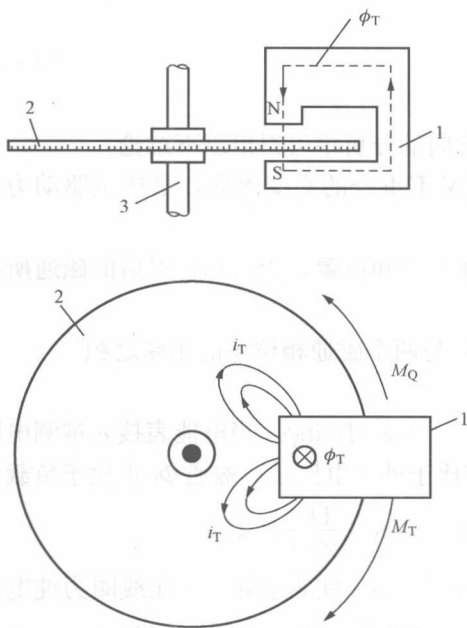


图 1-11 永久磁钢制动力矩图解

1—永久磁钢; 2—转盘; 3—转轴

如图 1-11 所示, 当转盘在驱动力矩的作用下旋转时, 切割永久磁铁的磁通 ϕ_T , 根据右手定则可知在转盘上产生如图 1-11 所示方向的感应电流 i_T , i_T 与 ϕ_T 相互作用产生的电磁力 F_T 的方向应用左手定则可以得出, 由 F_T 产生的力矩 M_T 的方向和驱动力矩 M_P 的方向正好相反, 具有制动作用, 故称制动力矩。

由于制动力矩是 M_T 与磁通 ϕ_T 相互作用产生的, 所以 $M_T \propto \phi_T i_T$; 又因 i_T 是转盘旋转切割 ϕ_T 而产生的, 故有 $i_T \propto \phi_T n$, n 为转盘转速。于是可得

$$M_T = K_T \phi_T^2 n \quad (1-10)$$

式中 K_T ——制动力矩常数, 由永久磁铁极面几何形状和磁极中心对转盘中心的相对位置决定;

ϕ_T ——穿过转盘的制动磁通;

n ——转盘转速。

由于 ϕ_T 的大小是不变的, 故式 (1-10) 又可表示为 $M_T = K'_T n$, 可见制动力矩与转盘转速成正比, 所以可阻止转盘作加速运动。这是保证电能表正确计量的第四个重要条件。

(七) 转盘转数与测电能的关系

在保证上述四个正确计量的条件下, 当负载功率 P 不变时, 驱动力矩与制动力矩保持平衡, 于是转盘便做匀速转动。当负载功率增加或减少时, 驱动力矩便随之增加或减少, 于是转盘转速也随之变快或变慢, 所以, 制动力矩 M_T 也要增加或减少, 直到负载功率不再改变时, 驱动力矩又在新的转速下做匀速运动。总之, 制动力矩总是能够与驱动力矩保持平衡。所以, 当转盘做匀速转动时必有: $M_P = M_T$, 亦即 $K_P P = K'_T n$, 则

$$n = \frac{K_p}{K_T} P = CP \quad (1-11)$$

假定某一段时间内负载功率保持不变,并设时间 T 内转盘转过 Nr ,则 $N=nT$,于是将式(1-11)等号两边同时乘以 T ,则有

$$N = CPT = CW \quad (1-12)$$

式中 W ——时间 T 内通过电能表的电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$;

C ——电能表的常数, $\text{r}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

式(1-12)说明,电能表在一定的功率下运行,经过时间 T ,转盘转过的转数是与这段时间内通过电能表的电量成正比的。所以可以用转盘转数 N 代表电量的多少。应当指出,它对变化的负载也是适用的。

电能表常数 C 的单位有时也取 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{r}$ 、 $\text{W} \cdot \text{h}/\text{r}$ 等。不同方式表示的电能表常数之间,可根据定义换算。例如:某电能表铭牌上标注的常数 $1\text{r}=0.4\text{W} \cdot \text{h}$,换算为 $\text{r}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 表示的常数则为

$$C = \frac{1\text{r}}{0.4\text{W} \cdot \text{h}} = \frac{1\text{r} \times 1000}{0.4\text{kW} \cdot \text{h}} = 2500\text{r}/(\text{kW} \cdot \text{h})$$

(八) 单相感应式电能表的相量图

电能表的相量图,实际上是电磁驱动元件的相量图。电能表的相量图给出了电能表内部各电磁量间的相位关系。掌握各电磁量间的相位关系,对于说明如何实现电能表的相位条件以及分析运行中的电能表的工作特性是十分必要的。这里以 $\dot{I}_U$ 为参考相量,作出分析电能表的工作状态和运行特性所需的简化相量图(假定负载为感性),如图1-12所示。

由于磁通 Φ_1 的路径上存在损耗,所以, $\dot{\Phi}_1$ 与 $\dot{I}$ 并不同相,而是滞后 $\dot{I}$ 一个角度 α_1 ,一般 $\alpha_1 = 5^\circ \sim 15^\circ$ 。由于电压线圈不是纯电感元件,所以 $\dot{I}_U$ 滞后 $\dot{U}$ 的角度不是 90° 而是 φ_U ,一般 $\varphi_U = 75^\circ \sim 80^\circ$ 。这是因为电压线圈的感抗虽大,匝数又多,但还是有电阻的存在,所以并不能看成纯电感。电流 $\dot{I}_U$ 在电压铁芯中产生的总磁通中的工作磁通 $\dot{\Phi}_U$ 也不与 $\dot{I}_U$ 同相,而是滞后 $\dot{I}_U$ 一个角度 α_U ,一般 $\alpha_U = 20^\circ \sim 25^\circ$ 。 $\dot{\Phi}_U$ 滞后外加电压 $\dot{U}$ 的角度为 β ,称为内相角, β 角应大于 90° 。由图1-12所示简化相量图可知,电能表实际的内相角关系为

$$\varphi + \alpha_1 + \psi = \beta$$

则

$$\psi = \beta - \alpha_1 - \varphi$$

由此可知,为了满足正交条件 $\varphi + \psi = 90^\circ$,必有 $\beta - \alpha_1 = 90^\circ$ 。可见,只有 β 大于 90° 且 α_1 、 α_U 等有合适的角度才能满足正交条件。为此,必须合理地选择电压线圈的参数和电压、电流铁芯的磁路(如,有意增加电压铁芯的漏磁通通路)。此外,还应装设相位角调整装置

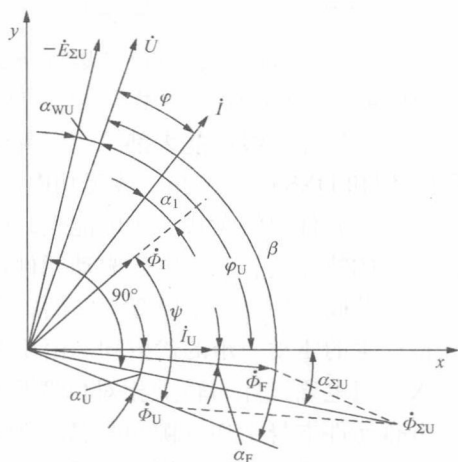


图1-12 单相感应式电能表简化相量图