



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

电能计量 (第二版)

祝小红 周 敏 主编



配套课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

电能计量 (第二版)

主编 祝小红 周 敏
编写 徐文靖 郑 雪
主审 刘建华



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材,是根据职业教育培养创新型、技能型人才的要求编写的。

本书以电能计量装置为线索,介绍了常用电能计量装置的原理、结构与功能,在此基础上重点说明了电能计量装置的接线、配置及检定方法,还对客户用电信息采集系统以及窃电的检查及处理方法进行了介绍。主要内容包括电子式电能表的原理与结构,电子式电能表的接线和功能,测量用互感器,电能计量装置的接线及配置,客户用电信息采集系统,窃电的检查及处理,电子式电能表的检定,测量用互感器的检定,综合误差及实验部分。本书注重新器件、新技术的应用,并全面贯彻最新国家及行业标准,同时在书中配有丰富的图、表,可读性强,有助于读者理解。每章章末配有习题,便于读者学习效果检验。为了方便教学,本书配有免费电子课件,凡是选本书作为教材的单位,均可登录“教材服务网”(jc.cepp.sgcc.com.cn)注册、下载。

本书可作为高职高专院校电力技术类、电气工程类专业的教材,也可作为培训教材及从事电能计量、用电检查和用电营业工作的电气工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电能计量/祝小红,周敏主编.—2版.—北京:中国电力出版社,2014.8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-6132-4

I. ①电… II. ①祝… ②周… III. ①电能计量—高等职业教育—教材 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 144726 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 11 月第一版

2014 年 8 月第二版 2014 年 8 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 269 千字

定价 25.00 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

随着我国坚强智能电网的全国推广,针对坚强智能电网的电能计量方式和计量手段都发生了较大变化。智能电能表与电子互感器作为智能电网的计量装置,已经逐渐代替了传统电网中应用的感应式电能表和电磁式互感器。与此同时,计量装置通信功能的实现,为建设交互性的客户用电信息采集系统提供了可能。而高等职业院校作为行业技能人才的培养单位,肩负着培养创新型、技能型行业人才的重要责任,对应的教材也应该体现新技术、新器件的推广应用,基于以上行业和教育背景,特编写了此书。

本书以电能计量装置为线索,介绍了常用电能计量装置的原理、结构与功能,在此基础上重点说明了电能计量装置的接线、配置及检定方法,还对客户用电信息采集系统以及窃电的检查及处理方法进行了介绍。主要内容包括电子式电能表的原理与结构,电子式电能表的符号与功能,测量用互感器,电能计量装置的接线及配置,客户用电信息采集系统,窃电的检查及处理,电子式电能表的检定,测量用互感器的检定,综合误差及实验部分。本书主要特点如下。

(1) 紧密结合职业教育改革成果,充分调研电能计量方向毕业生的就业岗位要求,确定了本书的主要编写内容。目前,我国的智能电网建设处于初级阶段,电能计量方式及装置还在逐渐地更新换代,新型计量装置与传统计量装置并存的情况在近时期广泛存在,因此,在介绍新型计量装置的同时,也注意新型计量装置与传统计量装置在原理、应用上的不同对照。

(2) 严格贯彻最新国家和行业标准,执行国家电能计量管理规程。随着智能电网的发展规划,国家和电力行业出台了一系列标准,在本书编写过程中,严格贯彻执行,保证本书内容的先进性。

(3) 密切联系实际,深入浅出,通俗易懂。本书编者有多年的“电能计量”课程教学经验,深刻了解高等职业院校学生的认知规律和特点,力求在编写过程中充分考虑读者群的特点,让他们感到学有所用,能够学以致用。

全书共分十章,其中绪论和第一、四、六章由祝小红编写,第二章由郑雪编写,第五、第七~九章由周敏编写,第三章由周敏和徐文靖编写,第十章由祝小红、周敏、郑雪和徐文靖共同编写,祝小红负责全书的统稿和定稿工作。

在本书编写过程中,得到了武汉电力职业技术学院、四川电力职业技术学院、武汉电力公司有关同仁的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

编写时间所限,书中不妥和疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2014年1月

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书即为该系列规划教材中的一本。

本书从高职高专教育的特点出发,严格执行国家电能计量管理规程,具有理论联系实际,深入浅出,通俗易懂的特点。全书以电能计量装置为线索,介绍了各部分的构成及工作原理,阐述了电能表、互感器的校验方法,重点介绍了常见计量装置的外部接线及反窃电检查手段;此外,以电子式电能表为核心,介绍了大量的新技术、新设备。书中配有丰富的图、表,有助于读者理解内容。每章均配有习题,最后第十一章是实验内容,便于读者巩固和运用理论知识。

全书共分十一章。其中绪论、第二、四、五、六章由祝小红同志编写,第一、七、八、十章由周敏同志编写,第三章由徐耘英同志编写,第九章由徐文靖、徐耘英同志编写,四位同志共同编写的实验内容构成了第十一章。全书由祝小红主编,并负责全书的统稿和定稿工作;由湖北省电力试验研究院刘建华主审。在本书的编写过程中,曾得到武汉电力职业技术学院、四川电力职业技术学院和武汉电力公司有关同志的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免有疏漏及不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2006年9月

目 录

前言	
第一版前言	
绪论	1
第一章 电子式电能表的原理与结构	4
第一节 电子式电能表的基本知识	4
第二节 电子式电能表的原理和结构	5
习题	17
第二章 电子式电能表的接线和功能	18
第一节 电子式电能表的接线	18
第二节 单相电子式电能表的功能	22
第三节 三相电子式电能表的功能	26
习题	33
第三章 测量用互感器	34
第一节 电磁式电压互感器	35
第二节 电容式电压互感器	43
第三节 电磁式电流互感器	45
第四节 电子式互感器	51
习题	57
第四章 电能计量装置的接线及配置	59
第一节 电能计量装置的正确接线	59
第二节 电能计量装置的错误接线	70
第三节 电能计量装置的配置	72
习题	74
第五章 客户用电信息采集系统	75
第一节 客户用电信息采集系统的构成	75
第二节 客户用电信息采集系统的功能	83
习题	88
第六章 窃电的检查及处理	89
第一节 寻找窃电嫌疑	89
第二节 判断窃电行为	94
第三节 确定窃电方式	99
第四节 处理窃电案件	112
习题	117

第七章 电子式电能表的检定	118
第一节 电子式电能表检定装置	118
第二节 电子式电能表的检定	125
第三节 电子式电能表的现场检验	134
习题	138
第八章 测量用互感器的检定	139
第一节 互感器检定条件与设备	139
第二节 电流互感器的检定	142
第三节 电压互感器的检定	146
习题	149
第九章 综合误差	151
第一节 误差理论	151
第二节 电能计量装置的综合误差	153
第三节 校验装置的综合误差	159
第四节 减小综合误差的方法	160
习题	161
第十章 实验部分	163
实验一 电能表的结构认识	163
实验二 单相电能表的接线及检查	164
实验三 电子式电能表的检定	165
实验四 电能表实负荷检验	166
实验五 互感器极性测试	170
参考文献	171

绪 论

一、电能计量装置概念

电能是一种特殊的商品,其产、供、用几乎在同一时刻完成。为了贸易结算,电能从发电厂到客户间的升压、输送、降压、使用等过程均有电能计量装置,用来计量发电量、厂用电量、供电量和销售电量等,如图 0-1 所示。例如,计量居民用电量的单相电能表就是一种最简单的电能计量装置,它计量的用电量是居民缴纳电费的依据。居民的单相电能表一般都是直接接入电路,但是在高电压、大电流系统中,实际电压和电流超过了电能表的量程,电能表就必须先通过互感器将高电压、大电流变换成低电压、小电流,才能接入电能表进行测量。

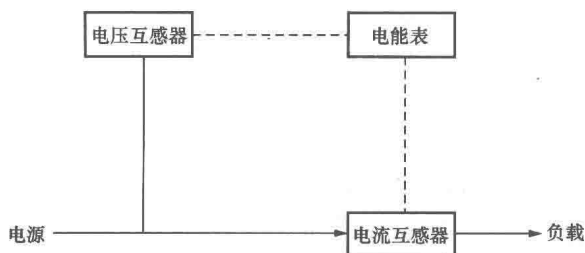


图 0-1 电能计量装置

一般把电能表、测量用互感器、电能表到互感器的二次回路(图 0-1 虚线所示部分)以及计量柜(箱)统称为电能计量装置。

二、电能计量装置各部分作用

1. 电能表的作用

电能表俗称电度表,是电能计量装置的核心部分,其作用是计量负载消耗的或电源发出的电能。由于电能等于功率乘以时间,因此,电能表测量的是功率的累积值。如,某居民客户安装了一块单相电能表,某日上午 7:00—12:00 期间用电负荷情况如下:

7:00—8:00	$P_1=1000\text{W}$
8:00—10:00	$P_2=600\text{W}$
10:00—11:00	$P_3=1500\text{W}$
11:00—12:00	$P_4=2000\text{W}$

则单相电能表计量的电能为

$$\begin{aligned} W_P &= P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 t_4 \\ &= 1\text{kW} \times 1\text{h} + 0.6\text{kW} \times 2\text{h} + 1.5\text{kW} \times 1\text{h} + 2\text{kW} \times 1\text{h} = 5.7\text{kWh} \end{aligned}$$

即该客户此日上午的用电量是 5.7kWh。

2. 互感器的作用

互感器就是小容量的变压器,它在电能计量装置中的作用有以下三个方面:

(1) 扩大电能表的量程。电压互感器把高电压变换成低电压、电流互感器将大电流变换成小电流,再接入电能表,使得电能表完成了超过其量程的电能测量任务,因此测量范围扩大了。

(2) 减少仪表的生产规格。电能表的量程由电压和电流两个参数决定。实际供电线路的电压等级并不多,而实际电流的等级却很多。但是电压互感器二次额定电压一般为 100V,

电流互感器二次额定电流为 5A, 因此, 如果电能表带互感器, 则计量高电压、大电流客户的电能表量程只需制造为 100V、5A 一种规格即可。所以互感器的使用减少了仪表的生产规格。

(3) 隔离高电压、大电流。抄表及计量装置维护人员经常接近电能表, 带互感器后, 正常情况下的二次电压、电流都很小, 并且都有一段保安接地, 安全系数大大提高。

带互感器的计量装置其电量抄读比较特殊。在图 0-1 中, 电压互感器的额定变比 $K_U = \frac{10\text{kV}}{100\text{V}}$, 电流互感器的额定变比 $K_I = \frac{50\text{A}}{5\text{A}}$, 电能表计度器的变化数字为 $(W_2 - W_1)$, 则此套计量装置计得的有功电能是

$$\begin{aligned} W_P &= (W_2 - W_1) K_U K_I \\ &= (W_2 - W_1) \times \frac{10000}{100} \times \frac{50}{5} = (W_2 - W_1) \times 1000 (\text{kWh}) \end{aligned}$$

也就是说该客户电能表计度器每 1kWh 代表 1000kWh 电量。

3. 二次回路的作用

二次回路是连接电能表和互感器的电路。电能计量装置的二次回路包含电压二次回路和电流二次回路, 它们对于计量装置的准确度有影响。

电压二次回路是指由电压互感器的二次绕组、电能表的电压回路以及连接二者的导线所构成的回路。连接导线阻抗的存在, 导致二次导线上有部分电压降落, 称为电压互感器的二次压降。这样, 电能表上实际获得的电压值小于额定值 (100V)。因此, 电能表因欠电压会少计电能。

电流二次回路是指电流互感器二次绕组、电能表的电流线圈及连接二者的导线所构成的回路。电流互感器的二次负载会影响电流互感器的准确度。二次负载包括电能表电流线圈的阻抗、二次连接导线阻抗、连接端钮间的接触电阻等。电流互感器二次负载增加也会使二次电流减小, 从而使得电能表因欠电流而少计电能。

互感器二次压降和二次负载对计量装置准确度的具体影响参见第三章。

4. 计量箱 (柜)

计量箱 (柜) 内可安装电能表、互感器、二次回路、终端设备、负荷控制开关、接线盒等设备, 外加封和锁。其作用是封闭、保护、隔离计量装置中的电能表、互感器、二次回路以及裸露在外的变压器低压桩头, 使客户不易窃电。计量箱 (柜) 应符合 GB/T 16934—1997《电能计量柜》、GB/T 7267—2003《电力系统二次回路控制、保护屏及柜基本尺寸系列》技术规范。计量箱 (柜) 按照其材质分为塑料箱 (柜)、金属箱 (柜); 按照用途分为单相计量箱 (柜)、三相计量箱 (柜)、互感器低压桩头罩等。

三、电能计量装置的分类

根据 DL/T 448—2000《电能计量装置技术管理规程》规定, 运行中的电能计量装置按其计电能的数量和计量对象的重要程度分为五类 (I、II、III、IV、V), 见表 0-1。

四、电能计量方式

供电线路分为单相、三相四线、三相三线电路, 那么, 与之对应的电能表也有单相电能表、三相四线电能表和三相三线电能表。所谓计量方式并非按电能表分类, 而是按电能计量装置相对供电变压器的位置不同来区分。

表 0-1 电能计量装置的分类

类 别	使用范围
I	月平均电量 500 万 kWh 及以上或变压器容量为 10000kVA 及以上的高压计费客户，200 万 MW 及以上发电机，发电企业上网电量，电网经营企业之间的电量交换点，省级电网经营企业与其供电企业的关口计量点的电能计量装置
II	月平均用电量 100 万 kWh 及以上或变压器容量为 2000kVA 及以上的高压计费客户，100 万 MW 及以上发电机，供电企业之间的电量交换点的电能计量装置
III	月平均电量 10 万 kWh 以上或变压器容量为 315kVA 及以上的计费客户，100 万 MW 以下发电机，发电企业厂（站）用电量、供电企业内部用于承包考核的计量点、考核有功电量平衡的 110kV 及以上的送电线路电能计量装置
IV	容量在 315kVA 以下的计费客户，发供电企业内部经济技术指标分析、考核用的电能计量装置
V	单相供电的电力客户计费用电能计量装置

假设图 0-2 中 A、B、C 分别是计量装置的安装点，则 A 点表示计量装置安装在变压器的高压侧，其计量方式称为高供高计，具有专用变压器的客户一般采用这种计量方式；而 B 点表示电能计量装置安装在变压器的低压侧出口处，这种计量方式称为高供低计；C 点表示电能计量装置安装在低压供电线路客户的产权分界处，其计量方式称为低供低计，如居民客户安装的单相电能表等。

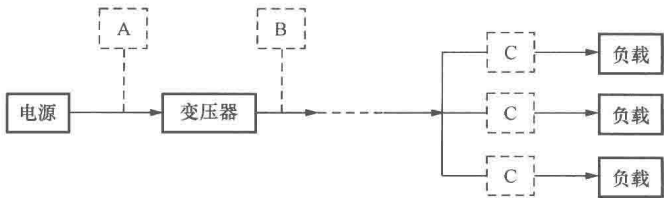


图 0-2 电能计量方式示意图

五、电能表的分类

电能表的品种、规格繁多，其类别划分一般有以下几种：

- (1) 按电源分，有直流电能表和交流电能表。
- (2) 按用途分，有单相电能表、三相电能表、特种用途电能表（如标准电能表、最大需量表、脉冲电能表、预付费电能表、多费率电能表等）、多功能电能表、智能电能表等。
- (3) 按原理分，有感应式、机电式和电子式电能表。
- (4) 按准确度等级分，有 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2S、0.5S、1、2、3 级电能表。其中，0.01~0.1 级为标准电能表，0.2S~3 级为安装式电能表。

第一章 电子式电能表的原理与结构



教学要求

了解电子式电能表的相关基础知识;知晓电子式电能表的工作原理,特别是取样电路的分立元件特点;了解载波、GPRS等通信模块的插件电路及其后期维护方法;掌握各类电子式电能表的结构,特别是电子式电能表铭牌中,型号字母及规格含义。

第一节 电子式电能表的基本知识

随着信息技术的发展与成熟,电力营销方式逐步从“大营销”转变为“大营销、智能营销”。智能营销的基础平台是客户用电信息采集系统,它完成“全覆盖、全采集、全费控”目标,这就要求电能表不仅具有电能计量功能,还必须具备存储、通信、费控,甚至网关等功能。在电子式电能表产生初期,各生产厂家根据实际需求,设计了多种规格的电子式电能表,由于当时无统一的设计、制造规范,造成了电能表的外形尺寸、功能、规格、通信规约等要素参差不齐,给使用者带来了很大的麻烦。

为此,国家针对单、三相智能电能表(统称电子式电能表)的设计、制造、采购、验收及功能,进行了规范和统一,先后制定、出台了下述规范性文件:

GB/Z 21192—2007 《电能表外形和安装尺寸》

GB/T 17215.211—2006 《交流电测量设备 通用要求 试验和试验条件 第11部分:测量设备》

GB/T 1804—2000 《一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差》

Q/GDW 205—2008 《电能计量器具条码》

Q/GDW 354—2009 《智能电能表功能规范》

一、电能表的发展概况

1890年,第一块依据交流电磁感应原理制成的感应式电能表诞生。至今,电能表的发展大致经历了以下4个阶段:

(1) 感应式机械电能表。感应式机械电能表由于具有制造简单、可靠性高、价格便宜等优点,使用了近百年,至今,许多国家仍然在广泛使用。

(2) 机电式电能表。机电式电能表也叫脉冲式电能表,产生于20世纪70年代初。它以感应式电能表的电磁感应系统为工作元件,在旋转铝盘的圆周上均匀打孔、铣槽或印记黑色分度线,用穿透式或反射式光电头发射光束,通过采集铝盘旋转的标记数目,由光电传感器完成电能——脉冲的转换,实现电能测量。

(3) 电子式电能表。电子式电能表也叫静止式电能表,研制于1976年。它是利用微电子技术、信号处理技术及通信技术制造的交流电能表。所谓“静止”,是指该类电能表没有转动元件,因此,运行时安静无声。随着集成电路和制造业的发展,初期的电子式电能表可

靠性低、抗干扰能力差等问题得到了解决,使其广泛使用成为可能。目前,我国已能自行设计、制造各种规格的电子式电能表,而且,正朝着多功能、智能化方向发展。

(4) 智能电能表。智能电能表由测量单元、数据处理单元、通信单元等组成,具有电能量计量、数据处理、实时监测、自动控制、信息交互等功能,是实现客户与电力企业之间“信息化、自动化、互动化”、构建智能电网的必要条件。

二、电子式电能表相关概念

(1) 模拟量。模拟量是指连续变化的电量,如按正弦规律变化的电压、电流、功率等。

(2) 数字量。数字量是指可用二进制数码(0和1)表示的量。由于其数值只有0和1两种状态,因此,在控制系统中用其描述开关的开断和关合。其信号特点是具有离散性。

(3) 模数转换。模数转换是将模拟量转换成数字量,简称A/D转换。

(4) 数模转换。数模转换是将数字量转换成模拟量,简称D/A转换。

(5) 测量单元。测量单元是电能表中产生与被计量的电能量成比例功率输出的部件。

(6) 数据处理单元。数据处理单元是对输入信息进行数据处理的电能表部件。

(7) 多功能电能表。多功能电能表由测量单元和数据处理单元等组成,除计量有功(无功)电能量外,还具有分时、需量测量等两种以上功能,并能显示、存储和输出数据。

(8) 计度器。计度器一般为机电或电子装置,由存储器和显示器组成,用以储存和显示信息。

(9) 需量周期。需量周期是指测量平均功率连续相等的时间间隔。

(10) 最大需量。最大需量是在指定的时间区间(如一个月)内,需量周期中测得的平均功率最大值。

(11) 滑差(窗)时间。滑差(窗)时间是依次递推来测量最大需量的小于需量周期的时间间隔。

(12) 尖、峰、谷、平时段。电力系统日负荷曲线中最突出的时段称尖时段,高峰负荷对应的时段称为峰时段,低谷负荷对应的时段称为谷时段,尖、峰、谷时段外对应的时段称为平时段。

(13) 电能表常数。它是表示多功能电能表计量到的电能量与其相应的输出值之间关系的数,如输出值是脉冲数,则常数以imp/kWh(imp/kvarh)或Wh/imp(varh/imp)作单位。如有功电能表常数为1800imp/kWh,无功电能表常数为1200imp/kvarh等。

第二节 电子式电能表的原理和结构

电能表要完成电能计量任务至少要具备两项功能:一是将电压、电流信号相乘,产生实际功率信号;二是将该功率信号进行累加,获得电能数值。

一、电子式电能表的测量原理

我们知道,电能的计算公式为

$$W_P = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt$$

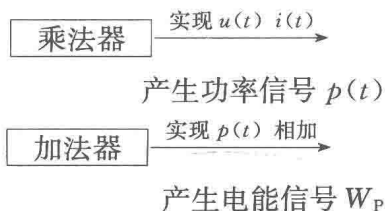
式中 W_P ——有功电能;

$p(t)$ ——瞬时功率;

$u(t)$ —— 瞬时电压;

$i(t)$ —— 瞬时电流。

由于积分实质是求和, 可见, 电能是功率对时间的累积值。也就是说, 不管什么类型的电能表, 完成电能计量的核心部分是乘法器和加法器。它们的功能如下:



电子式电能表 (微型计算机) 采用模拟乘法器 (运算放大器电路) 或数字乘法器 (A/D 转换后数字电路) 实现乘法功能, 并通过计算机内的存储器累加信号实现加法功能。因此, 电子式电能表是应用模/数转换技术, 计量电能并直接以数字显示的仪表。

实际中乘法器分为模拟乘法器和数字乘法器两种。电子式电能表的电能计量单元如图 1-1 所示。其中图 1-1 (a) 所示是运用模拟乘法器的电能计量单元; 图 1-1 (b) 所示是运用数字乘法器的电能计量单元。

从图 1-1 的最底层开始, 逐级往上分析, 首先是模拟信号电压、电流输入, 经过取样电路 (图中的 TV、TA)、A/D 转换器、乘法器、分频器、计度器 (显示器) 等环节, 最后完成计量等多种功能。

1. 取样电路

取样电路的作用, 一方面是将被测信号按一定的比例转换成低电压、小电流输入到乘法器中; 另一方面是使乘法器和电网隔离, 减小干扰。

(1) 电流取样电路。直接接入的电子式电能表一般采用锰铜电阻取样, 工作原理如图 1-2 (a) 所

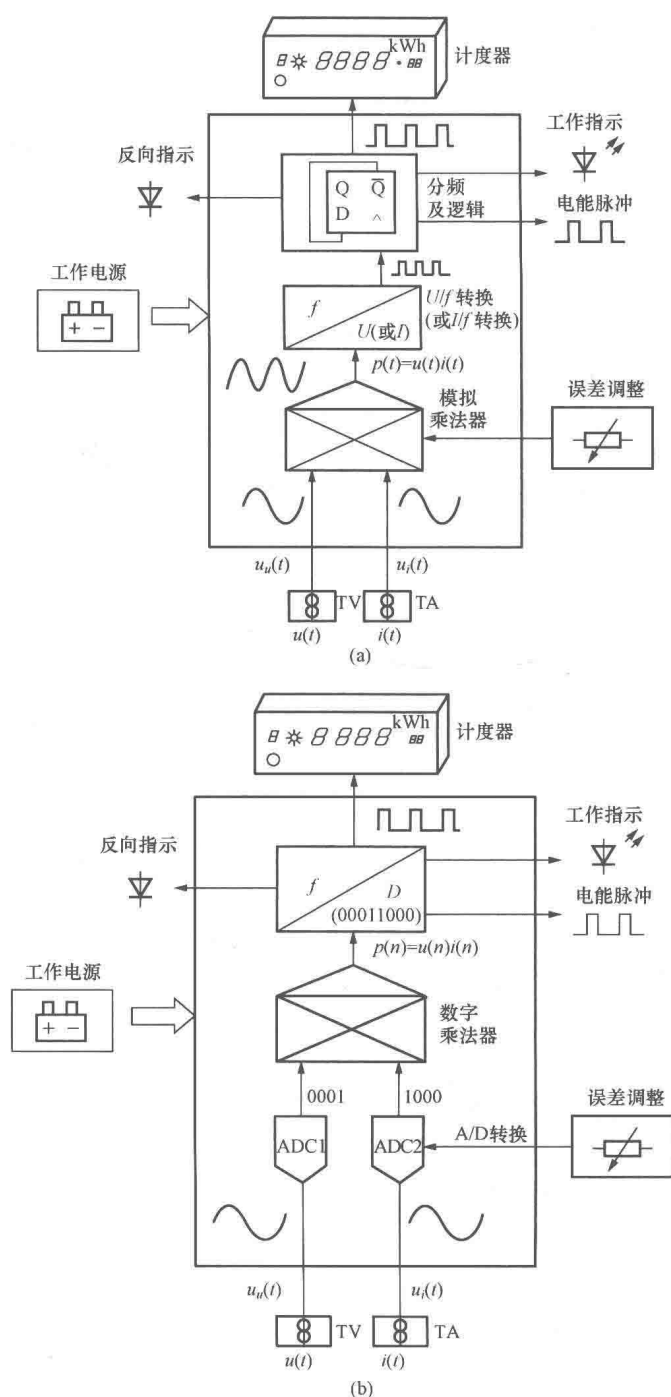


图 1-1 电子式电能表的电能计量单元

(a) 用模拟乘法器实现; (b) 用数字乘法器实现

示。经互感器接入的电子式电能表内部一般采用二次侧互感器级联，以达到前级互感器二次侧不带强电的要求，工作原理如图 1-2 (b) 所示。

1) 锰铜电阻取样。以锰铜片作为分流电阻 R_S ，当大电流 $i(t)$ 流过时，产生的微弱电压 $u_i(t) = i(t)R_S$ 。该小信号 $u_i(t)$ 送入乘法器，作为流过电能表的电流 $i(t)$ 。一般取样电阻 R_S 选 $175\mu\Omega$ ，则当基本电流为 5A 时，1、2 之间的取样信号 $u_i = 0.875\text{mV}$ 。

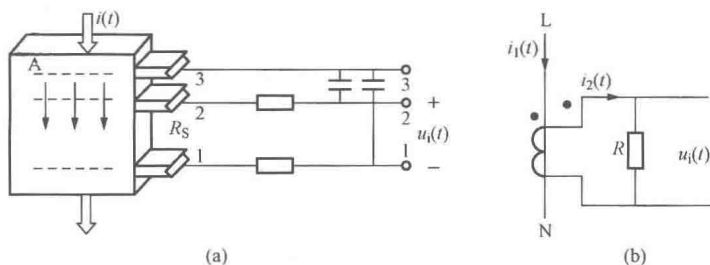


图 1-2 电流取样原理图

(a) 锰铜电阻取样工作原理；(b) 电流互感器取样工作原理

2) 电流互感器取样。采用电流互感器取样的优点是可使电能表内主回路与二次回路、电压回路与电流回路隔离分开，实现供电主回路电流互感器二次侧不带强电，并可提高电子式电能表的抗干扰能力。因 $i_2(t) = K_I i_1(t)$ ，则取样微弱电压结果为

$$u_I(t) = i_2(t)R = \frac{i_1(t)}{K_I}R \quad (1-1)$$

式中 $i_1(t)$ ——流过电能表主回路的电流，A；

$i_2(t)$ ——流过电流互感器二次侧的电流，A；

K_I ——电流互感器的变比；

R ——负载电阻， Ω ；

$u_I(t)$ ——输送给乘法器的等效电压，V。

(2) 电压取样电路。100V 或 220V 的被测电压必须经分压器或电压互感器取样后，转变为小电压信号，方可送入乘法器。直接接入式电能表一般采用电阻串联分压取样，工作原理如图 1-3 (a) 所示；经互感器接入式电能表，工作原理如图 1-3 (b) 所示。

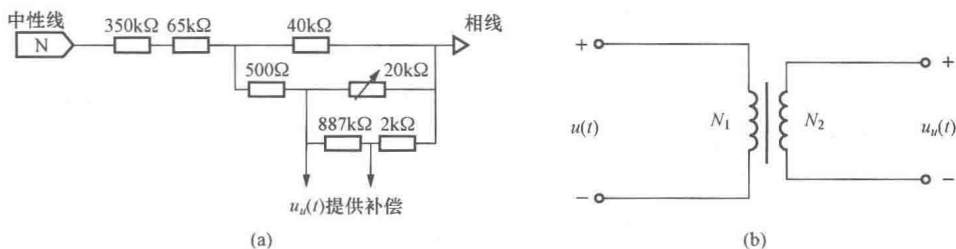


图 1-3 电压取样原理图

(a) 电阻取样电路工作原理；(b) 电压互感器取样电路工作原理

1) 电阻取样。电阻取样电路的优点是线性好、成本低，缺点是不能实现电气隔离。它一般采用多级分压，以便提高耐压和方便补偿与调试。

2) 电压互感器取样。电压互感器取样电路的优点是可实现一次侧和二次侧的电气隔离，

提高电能表的抗干扰能力, 缺点是成本高。电压取样结果为

$$u_u(t) = \frac{u(t)}{K_U} \quad (1-2)$$

式中 $u(t)$ ——被测电压, V;

K_U ——电压互感器的变比;

$u_u(t)$ ——输送给乘法器的等效电压, V。

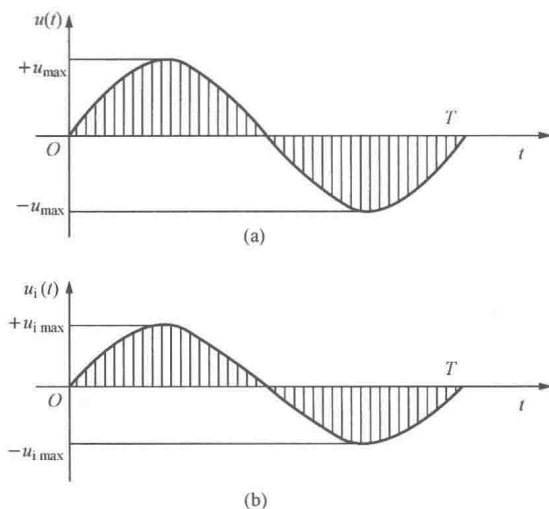


图 1-4 电压、电流信号采样原理

(a) 电压采样; (b) 电流采样

2. 采样电路

对于采用数字乘法器的电能表, 必须有 A/D 转换电路, 即采样电路。它在每一个模拟量周期 T 内, 等间隔地记录信号数据。我国生产的电子式电能表一个周期内采样的数据个数 $N \geq 64$ 。一个周期内采样个数越多, A/D 转换结果越准确。采样可以将连续变化的模拟信号转换成离散的数字信号。采样原理如图 1-4 所示。

例如, 正弦电压经过取样电路后最大值为 5V, 为了叙述方便, 以一个周期内采样 5 个数据为例, 则电压信号变成了一组数据 $D_u = (0, +5, 0, -5, 0)$ 。同理, 假设电流最大值为 1A, 则一个模拟信号周期内电流信号变成了一组数据 $D_i = (0, +1, 0,$

$-1, 0)$ 。

3. 乘法器电路

由图 1-1 可知, 乘法器有模拟乘法器和数字乘法器两种。

(1) 模拟乘法器。模拟乘法器是一种将两个模拟信号, 如输入电能表内连续变化的电压和电流, 进行相乘的电子电路, 通常具有两个输入端和一个输出端, 是一个三端网络。模拟乘法器的符号如图 1-5 所示。

理想乘法器的输出电压可表示为

$$u_o(t) = K u_x(t) u_y(t) \quad (1-3)$$

式中 K ——乘法器的增益。

如果, 使 $u_x(t) = u_i(t)$, $u_y(t) = u_u(t)$, 则乘法器输出为

$$u_o(t) = K u_x(t) u_y(t) = K u_i(t) u_u(t) = K u_p(t) \quad (1-4)$$

式中 $u_i(t)$ ——电流取样结果;

$u_u(t)$ ——电压取样结果;

$u_p(t)$ ——乘法器计算结果, 正比于功率的电压。

由于电压、电流是交变量, 可正可负, 因此, 从乘法器计算的代数结果看, 乘法器具有四个工作区域, 用图 1-6 中的四个象限来具体说明。设电流取样输入电压 $u_i(t)$ 为 x 方向参数, 电压取样输入电压 $u_u(t)$ 为 y 方向参数。两个电压的正负极性不同, 导致两个电压相

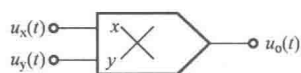


图 1-5 模拟乘法器的符号

乘出现了四种组合方式,如图 1-6 所示。实际中,把能反映两个输入电压极性四种组合的乘法器,称为四象限乘法器;若一个输入端能够反映正、负两极性电压,而另一个输入端只能反映单一极性电压的乘法器,则称为二象限乘法器;若乘法器在两个输入端分别限定为只有某一种极性的电压才能正常工作,它就是单象限乘法器。

常见模拟乘法器有时分割乘法器、霍尔乘法器等。

(2) 数字乘法器。数字乘法器是由计算机软件来完成乘法运算的。它可以在功率因数为 0~1 的全范围内,保证电能表的测量准确度,这是许多模拟乘法器都难以胜任的。采用数字乘法器的全电子式电能表基本结构框图如图 1-7 所示。

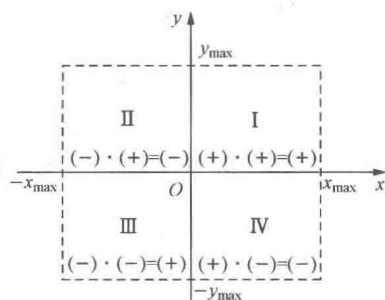


图 1-6 象限乘法器原理图

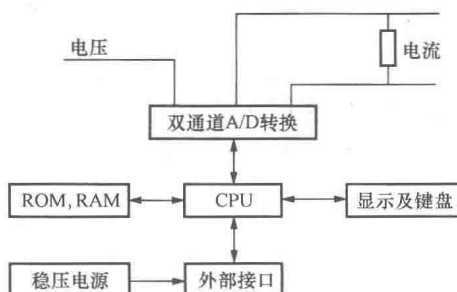


图 1-7 全电子式电能表的基本结构框图

微处理器 CPU 控制双通道 A/D 转换,同时对电压、电流进行采样,再由 CPU 实现相乘的功能并累计电能。采样原理如图 1-4 所示。当交流电压、电流的周期为 T 时,数字乘法器计算的平均功率 P 表示为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (1-5)$$

以 Δt 为时间间隔,将式 (1-5) 中的积分做离散化处理,即对电压、电流同时进行采样,则利用计算机软件来计算负载有功功率的数学模型为

$$P = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^N u(k) i(k)$$

$$T = N \Delta t$$

由此可见,平均功率的计算和功率求解过程与功率因数无关,因此,可以得出采用数字乘法器全电子式电能表的电能测量与功率因数无关的结论。这是这类电能表的一个重要特点。

A/D 转换器的准确度一般较高,其转换误差可以忽略。通过软件来完成采样及乘法计算时,准确度与 Δt 有关。 Δt 越小,准确度越高,但计算量将增加,且实时性变差。由采样理论可知,要想使连续信号离散后得到的时间序列不丢失原信号的信息,不仅采样频率要满足奈奎斯特定律,而且必须等分连续的信号周期,否则会产生误差。为此,采用软件锁相技术,可将采样频率自动地锁定在输入信号频率的 N 倍,在输入频率发生变化时,运算软件可以自动调整采样间隔,这样时钟的漂移变化也不会给测量带来误差。

4. 电压/频率转换电路

电能计量单元都有将功率信号 [用电压信号 $u_P(t)$ 或 D_P 表示] 转换成频率信号的电压/频率转换电路 (俗称压/频转换器),即图 1-1 (a) 中的 U/f 和图 1-1 (b) 中的 D/f 。

电压/频率转换电路是一种输出信号的频率与输入信号的电压成正比的电子电路。因为电能计量单元产生的测量数据处理是靠单片机完成的,而单片机只认数字“1”和“0”,因此,必须将功率信号变换成如图 1-8 所示的“1”和“0”形式方波信号,并用方波的频率 f 反映功率 P 的大小。

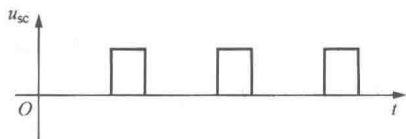


图 1-8 电压频率转换后的波形示意图

例如,输入信号 $U_H=100\text{V}$, $I_N=5\text{A}$, 设计 $f_H=1\text{Hz}$, 则被测功率 P_x 可表示为

$$P_x = \frac{U_H I_N}{f_H} f_x$$

若测得 $f_x=0.2\text{Hz}$, 则被测功率 $P_x = \frac{100\text{V} \times 5\text{A}}{1\text{Hz}} \times 0.2\text{Hz} = 100\text{W}$ 。由此可知,对于电子式电能表来说,测功率就是测频率,而测频率就是对单位时间内的脉冲进行计数。

若测电能,可根据电子式电能表的基本原理,先求出每个标准脉冲所代表的电能值 D_w

$$D_w = \frac{U_H I_N}{f_H}$$

本例中 $D_w = \frac{U_H I_N}{f_H} = \frac{100\text{V} \times 5\text{A}}{1\text{Hz}} = 500\text{Ws/imp}$ 。设在一定时间内计数值为 $m=2000\text{imp}$, 则电能为

$$W_P = D_w m = 500\text{Ws/imp} \times 2000\text{imp} = 10^6\text{Ws}$$

换算成 kWh 为

$$W_P = 10^6\text{Ws} \times \frac{1\text{kW}}{1000\text{W}} \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 0.28\text{kWh}$$

可见,电子式电能表的另一个特点是同一块电能表既可以测功率,又可以测电能,并且都是通过对标准脉冲进行计数测量,只是一个是在单位时间内计数,一个是在一段时间(10s、1天、1年)内计数。而且,电子式电能表的电能计量频率有标准高频脉冲 f_H 和标准低频脉冲 f_L 两种,它们的关系是 $f_L = \frac{f_H}{n}$, 这里 n 取整数。 f_L 相当于 f_H 在 n 内取平均值。所以, f_L 代表平均功率,常用作显示计量脉冲的频率,例如送给显示器或字轮计度器的脉冲频率;而 f_H 则代表瞬时功率,常用作校验脉冲的频率。

5. 分频计数器

经电压/频率转换电路,电能信号已经转化成了相应的脉冲信号。在送入计数器计数之前,该脉冲信号需要先送入分频器进行分频,以降低脉冲频率。这样做,一方面是为了便于取出电能计量单位的位数(如 1% kWh 位);另一方面保证计数结果不超过计数器的计数容量。

在电子式电能表中,分频器和计数器一般采用 CMOS 集成电路器件。图 1-9 为分频计数器原理框图和脉冲波形。

图 1-9 (a) 中,电压/频率转换器送来的脉冲信号 f_x 经整形电路整形后,可输出一系列规则的矩形波,并输入到控制门。控制门输入端 A 点的波形如图 1-9 (b) 所示。石英晶体振荡器产生的标准时钟脉冲信号经分频后作为时间基准,如图 1-9 (b) B 点的波形所示,也送至控制门。于是控制门打开,输出计数脉冲,得到图 1-9 (b) 所示 C 点的波形。计数