

● 褚大华 编著

电子式电能表



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电子式电能表

● 褚大华 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书针对当前我国大量涌现的电子式（即静止式）电能表进行了全面讲解。

书中介绍各种类型的电子式电能表、远程自动抄表系统、电子式电能表的性能测试方法、抗电磁干扰设计要领和试验方法以及常见故障的检修方法等。全书共分十二章，第一章介绍电能表的发明和我国电能表制造业的发展过程，第二～五章由浅入深地叙述各种安装式电子式电能表，从单相到三相、有功到无功、脉冲输出到带串口的计量芯片，以及其构成的电能表电路的结构分析，第六～八章讲解多费率（分时记度）电能表、多功能（包括电能质量监测）电能表、预付费电能表功能的要求、电路、芯片、器件等，介绍产品的具体功能和整机电路图，对无功电能表构成的电路工作原理特性和芯片的优缺点进行分析，讲解谐波的形成和谐波电能计量原理。第九章对各种型式的抄表系统进行了分析，如何提高抄表成功率的方法和措施。第十、十一章讲解在电子式电能表的性能检测中容易混淆出错的问题，提高电磁兼容性能的方法，及故障表诊断和检修方法。第十二章写标准电能表设计的新技术及其使用技巧和注意事项。

本书可作为电能计量岗位职工的培训教材，也可作为电子式电能表设计和制造人员提高技能的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子式电能表/褚大华编著. —北京：中国电力出版社，2009

ISBN 978-7-5083-6802-3

I. 电… II. 褚… III. 电子式电能表 IV. TM933.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 025239 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 4 月第一版 2009 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 40 印张 912 千字 7 插页

印数 0001—3000 册 定价 90.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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



电子式电能表亦称静止式电能表,是由电流和电压作用于固体(电子)器件而产生与电能成比例输出量的一类仪表,它没有机械感应式电能表的转盘,电子式电能表英文为 static electricity energy meter,电子式交流有功电能表为 Alternating current static watt-hour meter。

电能计量装置是电力系统生产、传输、营销过程中的重要衡器,关系到电力企业运行的安全、技术水平、管理水平和发 展。电能计量装置也是经济社会中公平、公正结算电能贸易的计量器具,它的准确性直接关系到工农业、商业、学校及机关和人民生活等用户的利益。

我国电力工业随着社会的进步、工农业发展和人民生活不断提高,用户数和用电量的快速增加,尤其是城乡电网改造和实行居民用电“一户一表”制,电能表的数量猛增,需要大量准确、质量可靠的电能表,逐步淘汰 DD28 等机械感应式电能表。错峰填谷为了转移高峰用电减轻电网压力,安装分时电能表实行低谷优惠电价的政策。企业和居民可以减少电费开支,因此安装电子式电能表的积极性很高,加快了电能表的发展。我国的单、三相全电子式多费率分时记度、多功能、预付费电能表层出不穷。为了提高工作效率和减轻劳动强度,加上对电能质量的实时检测和负荷管理的需要,集中抄表系统相继推出,有线、无线远程抄表系统已经在全国逐步推广应用。

为了提高电能计量人员的技术管理水平、业务素质和工作技能,应该大力开展电能计量人员岗位培训。而传统的电能计量教材还停留在机械感应式电能表上,它的内容已远远落后于实际工作的需求。而本书完全以电子式电能表的原理结构为内容,全面讲解目前的各种类型电子式电能表的关键技术,力求由浅入深、通俗易懂、便于自学。本书突出以职业技能培训为重点,系统地介绍电子式电能表整机电路工作原理、对技术性能的要求、制造中技术质量问题、具体使用技巧和检修技术等内容。作者在电力系统从事电能计量工作三十余年,根据工作中所积累的经验和对部分科研成果的总结,并参考国内外计量芯片与厂家提供的最新资料,撰成此书,定名为《电子式电能表》。作者曾在宁波三星公司以本书作为职工培训教材,使设计和制造人员更了解电力系统对电能表技术性能的需求及如何提高产品质量。它也是电子式电能表设计人员提高专业水平的参考书。

本书在撰写过程中得到了宁波三星科技公司领导和技术人员的大力支持和帮助,中国电工仪器仪表行业专家的关心和支持,本书中标准电能表内容由郭永坤同志参编,在此一并致谢。

因电子式电能表的发展迅速并限于经验和水平,书中的缺点和不妥之处在所难免,恳请读者不吝指正。

诸大华

2008 年 1 月



目 录



前言

第一章 电能计量器具——电能表	1
第一节 电能计量装置的重要性	1
第二节 电能表的发明和发展过程	1
第三节 我国电能表制造业的发展过程	3
第二章 电子式电能表的结构与工作原理	9
第一节 电子式电能表的分类	9
第二节 输入变换电路	10
第三节 模拟乘法器电路	12
第四节 $V/f(I/f)$ 转换电路	19
第五节 A/D 转换器	22
第六节 显示器件及其驱动电路	33
第三章 安装式电子电能表	41
第一节 安装式电子电能表的测量原理	41
第二节 脉冲输出单相电子式电能表及其专用集成电路	42
第三节 单相防窃电电子式电能表及其专用集成电路	83
第四节 软件调表的带简单串口脉冲输出单相电能表	102
第四章 安装式三相电子电能表	135
第一节 用多个脉冲输出单相电能计量 IC(7755) 组成的三相电子电能表	135
第二节 脉冲输出三相电子式电能表及其专用集成电路	139
第五章 带串行接口输出可编程的单、三相电能表	165
第一节 ADE7756 带串行接口可编程的单相有功电能表	165
第二节 ADE7759 带 di/dt 积分器、串行接口可编程的单相有功电能表	198
第三节 ADE7753 带 di/dt 积分器、串行接口可编程的单相有功、 无功和视在电能表	205
第四节 ADE7763 带串口和 di/dt 传感器接口的单相有功功率和 视在功率电能计量 IC	225

第五节	ADE7754 带串行接口可编程处理器的三相有功电能表	225
第六节	ADE7758 带 di/dt 积分器、串口、可编程的三相有功、 无功电能表	227
第六章	多费率(分时记度)电子式电能表	297
第一节	多费率分时电能表的用途及种类	297
第二节	居民单相分时电能表	305
第三节	分时记度电能表的常用部件	325
第四节	单、三相多费率(分时记度)电子电能表	381
第七章	多功能电子式电能表	421
第一节	多功能电能表的功能种类	421
第二节	多功能电能表功能的实现	446
第八章	预付费电子式电能表	463
第一节	磁卡式预付费电能表的缺点	464
第二节	IC 卡预付费电能表的结构和应用	465
第三节	预付费电能表特殊功能故障	482
第四节	分时计费预付费电能表	485
第五节	单、三相 IC 卡预付费电能表	489
第九章	电子式电能表远程抄表系统	497
第一节	有线抄表系统	500
第二节	无线抄表系统	514
第三节	常用远程集中抄表系统通信方式对比	519
第十章	抗电磁干扰及电子式电能表 PCB 板设计要领	522
第一节	电磁兼容理论基本术语	522
第二节	电子式电能表的电磁兼容(EMC)试验	523
第三节	电子式电能表的抗电磁干扰设计	553
第四节	电子式电能表印刷电路(PCB)板设计要领	563
第十一章	电子式电能表的测试方法与常见故障的检修	569
第一节	电子式电能表性能要求	569
第二节	电子式电能表的检修	584
第三节	电子式电能表故障自动诊断技术	592
第十二章	电子式标准功率电能表	594

第一节	从 PS—4、PE3 到 CB3 型国产电子式标准功率电能表的发展	595
第二节	采用电流作用原理的 CB3 电子式标准电能表	597
第三节	用电压互感器和更集成化的三相和多功能标准电能表	602
第四节	0.01 级~0.02 级更精密的电子式标准功率电能表	606
第五节	标准电能表使用技巧和注意事项	621
附录	电子式电能表及相关技术国内标准目录	627
参考文献		631



电能计量器具——电能表

第一节 电能计量装置的重要性

电能已成为现代人类社会生活中必不可少的主要能源，它随着国民经济发展，工业、农业、商业及居民生活用电的日益增长，促使电力工业生产不断增加发电、供电量来满足发展的需求。电能是一种商品，尤其是从计划经济进入商品经济社会以后，人们清楚地认识到电能是一种重要的商品。电能如何公平的买卖，电能表是商品交易中重要的计量器具，这一切都得依靠电能表及其计量装置来准确计量，一定要以正确的数据来结算。

电能计量装置是商品交易中的一种特殊的计量器具，就如同日常生活中的秤、尺等量具一样，但是电能计量器具要比秤、尺复杂得多，技术性强，要求更高。因为电能计量装置常常是考核一个企业经济盈亏的重要依据，一个工业企业往往在 1h 内生产所消耗的电量高达数万元之多，并且无法复验。如果对以前用秤和尺计量的结果有怀疑时，可以反复多次计量进行复核；而电能计量则不然，它是在用户用电的同时进行计量的，错过了用电瞬间就不可能补计先前的用电量，所以做好电能计量工作显得格外重要。国家对电能计量执行强制检定，加强监督管理，必须定期检验，不断改进和更新计量装置，提高计量准确度，执法检查杜绝偷、漏、错电量。电力生产应该怎样来经营管理，用电能表计量发电量、供电量及实际用电量，按数据来分析电力生产才能合理经营和科学管理。电力公司为了做到经济运行，必须加强节能措施科学的运行管理，减少发供用电过程中的能耗，来达到预期的节能降排经济指标，创造更高的经济效益。故电能计量工作是发展国民经济必不可少的一项重要工作。

第二节 电能表的发明和发展过程

在 19 世纪西方资本主义工业化革命快速发展过程中，随着电力工业的出现，人们在解决电力经营和生产管理上的需求，必须解决电能计量问题。

1880 年爱迪生用电解原理制成直流电能表即安时计，自 1888 年交流电的发现和应用对电能表的发展提出了新的要求，交流电能表应运而生，意大利科学院的物理学家弗拉里提出用旋转磁场的原理测量电能，即在一个可转动的导体上作用两个同频率，但空间和相位不同的交变磁场，导体就能旋转。所以交流感应式电能表又称作弗拉里表。同时，美国电工技术学校有位教师也利用同一原理制造感应式电能表，这些都是电能表雏形。到 1889 年匈牙利岗兹公司一位德国人布勒泰做成总重量为 36.5kg 的世界上第一块感应式电能表(见图 1-1)，它的电压铁芯重 6kg，它是没有单独的电流铁芯的，因而，电压铁芯总

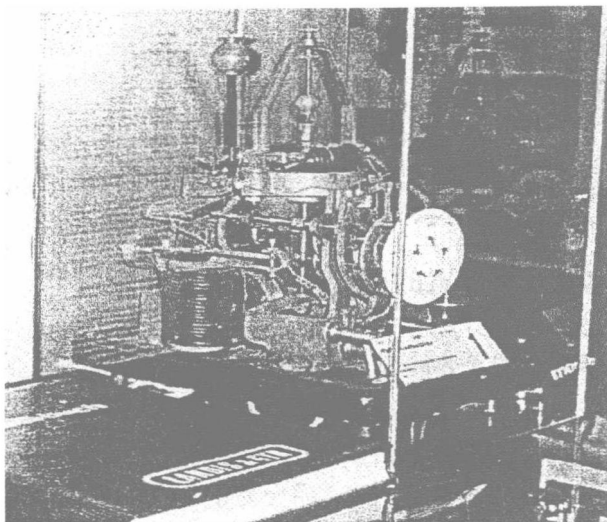


图 1-1 一百多年前的感应式电能表

的电抗必须大，体积也就大了。为了减少尺寸和重量，人们开始研究把电压与电流磁路分开，采用了独立电流铁芯，体积大为缩小。在解决内相角的问题上，也使用过人工线路和合成磁场的方法，到 1890 年以后出现了带电铁芯的电能表，然而转动元件是一铜杯，靠交流电磁铁产生反作用转矩，一直到 19 世纪末期才逐步开始采用直流磁铁，降低了旋转速度，增加了转矩，采用浇铸零件，改进了计数机构，同时采用了一个圆盘代替了原来一个盘一个杯的转动元件，用铝

盘代替了铜盘。

到 20 世纪初 1905 年时出现了增加非工作磁路改进 90° 的方法，参数也有很大提高，性能较好的导磁材料的出现，更减轻了重量，并降低了功率消耗。为了改善轻负荷特性，又出现了封闭式铁芯，但串联与并联电路参数如何合理选择，仍然是个题难。因此，辐射式的铁芯与切线式的铁芯都得到普遍应用，到 20 世纪 20 年代时，铁芯的总重量已经降低到只有 $1.5 \sim 2\text{kg}$ ，从那时起生产规模也已达年产量 10 万台。电能表开始普遍运用，扩大负载范围也成了研究的中心，到 30 年代后，出现了铬钢、铝镍合金磁铁，用它们来代替钨铜又进一步缩小了电能表的体积，磁钢的加强使转速降低，改善了过载特性，在这个基础上出现了磁分路来补偿过载特性的方法，虽然磁钢的加强使转速降低，提高了过载特性的水平，但还停留在 $150\% \sim 200\% I_b$ 。从 20 世纪 40 年代开始电能表的研究发展方向转向外界影响，如温度影响、电压影响、频率影响等，50 年代到 60 年代还在研究调整机构的合理化，抗雷击性能等等，最近二十几年已经解决了长寿命和高负载能力的电能表生产技术。双宝石轴承，磁推轴承的使用，使电能表的寿命达到 $15 \sim 30$ 年，而过载能力已达到 $667\% I_b$ ，如美国、加拿大生产的 I-50、I-70 型电能表的免检修使用寿命为 30 年以上，表的过负载能力为 $I_{\max} = 667\% I_b$ 。

国外感应式电能表机械先进的加工技术，发达的冶金技术和优质金属材料，所以感应式电能表都较为准确，且使用寿命长。因此，在相当长的历史阶段，感应式电能表在电能计量应用中占据了极其重要地位，随着微电子高新技术和电子工业的高速发展，对电能计量精度提出了新的要求，电子式电能表就越来越显示出其优越性。由于机械感应式电能表的驱动线圈的低频窄带电磁特性，对于基波外的各次谐波功率信号难以转换成等比例的驱动转矩，因而造成感应式电能表对非线性负荷、冲击负荷的计量误差较大。感应式机械电能表的精度低、非线性负荷计量误差大和难以实现各种功能的诸多缺点，使感应式电能表发展停滞不前，为了实现电能表功能上扩展的需求也必须采用电子电路来实现。且电子式



电能表还有着诸多的优点，如容易实现多功能、达到高精度、便于自动抄表、具有先进的通信功能，于是各种新型的电子电能表层出不穷，促进了电子式电能表的迅速发展。即使一些机电一体式的特种电能表，例如：分时多费率(TOU)电能表、有脉冲输出的电能表、多路最大需量表、预付费电卡电能表和电力定量器，它们虽然采用感应式电能表作基表，但是仍要用电子电路来实现功能。这就促使人们考虑去应用电子电路来实现电能计量，同时促成各种新型电子式电能表的迅速推广应用。

日本的衫山桌在 19 世纪 60 年代末发明了时分割乘法器的功率测量原理，在这个原理的基础上我国研制出单相和三相电子式数字功率电能标准表，这种电子式电能表都是时分割乘法器原理的电路。随着电子技术的进一步发展，模拟—数字转换技术和大规模集成电路的逐步完善，大量的各种性能优异的 A/D 转换 IC 和单片的、三相电能计量芯片的出现，促使各种性能和各种功能的电子式电能表逐步成为电能计量的主力军。尤其是多功能电能表的智能化功能更是尽善尽美，并且发达国家 20 世纪末就已经将电能表和微机继电保护合为一体，通过 RTU 进行遥测、遥信、遥控，全面实现电力系统自动化。

国外近年电子电能表发展非常快，芬兰、瑞典、挪威等北欧各国以及法国、英国、德国、西班牙、比利时和意大利等西欧许多国家，工商用户计费电能表目前已实现 100% 电子化。居民用户的计费电能表也正在逐步电子化过程中，如法国 2001 年起已停止购买和安装感应式电能表；意大利计划在 2005 年将全部感应式电能表更新为自动抄表的电子式电能表；英国目前已有 80% 居民计费用表为电子式电能表。

第三节 我国电能表制造业的发展过程

解放以前我国还没有电能表制造厂，只是在大城市有个别具备修理进口电能表的小型作坊，为了电力生产和供电所售电需要在电灯公司内部对计费用的电能表进行修理。于 1909 年开始由清政府在上海建立第一家电能表维修和校验场所，1929 年美商上海电力公司命名为“电能表及校电处”(Meter & Testing Department)，1949 年解放后上海电力公司更名为“校电处”，1951 年实行军事管制，1954 年上海电业管理局成立称为“表计科”，1958 年改名“表计工场”直属上海供电局。直至 1987 年上海市电力工业局的“上海电力表计(工)厂”，发展为今天的“上海市电力公司电力表计量测管理所”。迄今已有九十多年历史的“量管所”，是上海市质量技术监督局依法授权的“上海市电能表强制检定站”，目前承担全上海市 700 多万用户用于贸易结算的电能计量装置的检定、校验和技术管理工作，同时负责对各种电测仪表及继电器进行维修、校验、检定的量测管理。

解放后在上海首先创建成立我国第一家电能表制造厂。1952 年上海和成电器厂(即上海电度表厂)开业，以王颂嘉先生和(江南厂)厉德华先生为代表的技术骨干，最先生产出 2.0 级、1.0 级和其他精度等级的安装式单、三相电能表，1963 年开始制造 0.5 级感应式标准电能表，1972 年由上海电能表厂设计科陆闻众同志设计，完全具有自主知识产权的自行生产的 DB2 型感应式标准电能表(常称为标准回转表)，继而又生产 DB3 型三相三线 and DB4 型三相四线标准电能表。50 年代哈尔滨电表厂、上海(红旗)第五电表厂等在全国

先后成立，国产电能表全面进入电力工业生产第一线。在计划经济的国民经济时代里，由机械工业部哈尔滨电工仪表研究所提出的关于电能表标准体系表，由上海电能表厂为主设计的全国统一设计了 DD—28、DD—86 型单相电能表和 DS—86、DT—86 型等三相电能表，被全国大部分电能表制造厂接受，制造系列电能表生产一直到今天。

我国的电子式电能表制造是从电子式标准数字电能表起步的，与感应式电能表先有安装式表正好相反。江西省电力试验研究所从 1971~1973 年开始率先研制成功了 PS—4 型单相电子式标准数字功率电能表，郭永坤同志研制出我国的第一台分立元件的电子式数字功率电能表样机，引起我国电力系统同行的重视。由电力部西安热工研究所组织，有江西省电力试验研究所和湖北省电力试验研究所参加，组成专门在上海第二电表厂成立产品试制组，技术转让作进一步改进和完善，并在上海第二电表厂成产品生产，开始了替代感应式单相标准回转电能表。1976 年在南宁市召开了 PS—4 型 0.1 级单相数字功率电能表全国产品鉴定会，PS—4 的生产填补了我国生产电子式标准电能表的空白。自此开始采用电子式电能表作为标准，开创了采用比较法校验感应式 0.5 级标准电能表的新时代，该项成果获得 1978 年全国科学大会奖。研制组又在江西电子仪器厂共同研制的 PE3—1 型 0.1 级三相电子式数字功率标准电能表，到 1980 年研制成功在杭州通过鉴定，在江西大学电子仪器厂生产的标准电能表逐步替代三相标准回转表，与三相校验台配套应用光电头自动校表，使我国电子式标准电能表提高到一个新水平。

1983 年江西省电力试验研究所在全国首先研制出 0.5 级三相二元件安装式电子式电能表，外形同二元件感应式电能表一致，电路用时分割乘法器和低频压频变换，再采用自行设计的 24 脉冲/转的微型同步电机驱动机械计度器，在南昌无线电六厂投产成为我国最早的安装式电子电能表。其特点是精度高、频带宽，有脉冲输出，由于当时电子元器件价格贵产品生产成本高，因此主要用于感应式电能表的谐波影响试验、电能量脉冲信号的传送和管理。

随着电子技术的进步，集成电路的不断提高和优化，受到德国西门子 0.05 级三相电能变换器的启示，由当时的华中电力工业管理局下达研究课题，江西电力试验研究所开始研究电流平衡型时分割乘法器式的 0.05 级电子式三相功率电能表，即 CB3 型电子式标准电能表，“CB”表示电流平衡的意思，“3”就是三个元件的三相电能表。目标是国产化的电能表赶超西门子 M06019 型的进口表。根据以往成功的经验，首次采用电流型时分割乘法器原理，采用电流工作以后，使运放失调、开关导通电阻和漏电流等影响相对减小，能使过去所存在零漂、温漂大，电流线性范围窄的问题得到解决。CB3 表的研制中独特地解决了有放大器补偿的电流自平衡互感器，增加了电压和电流的量程，采用国外进口的线性和数字集成电路设计，并且是首先采用微机芯片和开发了汇编程序软件，新型智能化使 CB3 具有自动校验和计算误差的功能。

九江仪表厂主动要求技术转让，自 1984 年 9 月起双方合作，用了一年多时间生产出第一批表。经用户试用，辽宁省计量所和中国电力科学院测试，1986 年 10 月受国家水电部生产司委托由华中电管局主持召开成果和产品鉴定会。鉴定会上受到与会领导和代表一致好评，认为 CB—3 在技术上有较大创新，原理先进达到了准确度高、性能好的要求，

基本误差小于万分之五，量程和功能比同类进口表更多，能测量功率和电能，填补了国内空白，达到国际先进水平，可取代同类进口表。CB3 广泛地在全国各地电力部门中试所、供电局、供电所和计量部门计量所作为电能计量标准，并在全中国各电能表制造厂作为生产电能表的标准表，在很长一段时期内成为我国生产电能表必不可少的检定标准，为我国电能表的生产制造和发展做出了重要贡献。

1984 年与九江仪表厂合作生产 CB3 标准电能表的初期，当时估计 0.05 级标准电能表在全国只会有 30~40 台的需求量，每一个省只可能装备 1~2 台，作为全省的电能标准。结果出现了始料不及的情况，配备量逐年增加，总计数量超过五千多台，而且全国一致认为该表达到了准确度高、性能好的要求，基本误差小于万分之五，量程和功能比同类进口表更多，达到同期的国外先进水平，取代进口同类标准电能表，并且国产标准表的售后服务很好，国内维修方便又及时。CB3 的成功和在全国的推广应用，已经几乎不再进口同类国外标准电能表。由于发表了 CB3 电路的详细资料，及深入分析和介绍了工作原理，因此，其仅仅是微处理器电路不同而已的同类标准电能表产品大量出现，充满了全国市场，它所发挥的作用更是无法统计。尽管我国的测量仪器仪表由于技术和工艺上的落后，受到发达国家产品的严重冲击，但电子式电能表及其配套的校表电源和校验台，由于全国同行们的共同努力而得到蓬勃发展，始终走在行业的前头。

随着电力生产的不断发展以及从计划经济向市场经济的过渡，对提高电能计量精度也提出新的要求，有的电力公司甚至于要求用 0.02 级的三相电能表到现场校验，因此我国也需要继续研制准确等级更高的电能表，1989 年开发了 PS—43 型标准三相数字功率电能表，在 CB3 型的基础上作了进一步改进。并且技术上进一步的提高又生产出了 0.02 级、0.01 级的电子式标准电能表，被广泛地应用在电能计量单位作为最高标准。到 1994 年又研制现场做三相试验的多用表，生产出全集成化的 GX—3 三相功率电能表和 GXM—305 多功能电能表，使标准电能表产品更加完美，1997 年完成鉴定，能满足多方面测试和计量的要求。

国产的 GX101 型 0.01 级标准功率电能表 1996 年 8 月通过中国计量科学院的测试，同年 11 月鉴定会通过，在 1998 年获得国家电力工业部科学技术进步二等奖、1999 年获国家科学技术进步三等奖，在国外这种电能表也只有发达国家个别电能表生产名牌厂家才能制造生产，我国电能表生产从 21 世纪开始推出 0.01 级单、三相标准功率电能表，充分表现了我国在电能表制造上全面走上一个新台阶，为我国电能表制造能力和电能计量标准的建立做出了卓越的贡献。

1994 年根据现场做各种三相试验的要求研制多用校验仪，1997 年完成鉴定，具有能测量电压、电流的真有效值，能对四象限测量规律、真无功和有功、无功电能，能测量频率、直流电压、电流，并计算出功率因数和误差，可同时测两个量，有 12 种以上的组合。准确等级为 0.05 级，无功 0.1 级，该仪器属于国际上首创，在技术上有多项创新，是按照自主创新的 -90° 移相原理来实现的，满足各种多方面测试和计量的要求，用于变送器校验时不再需要另接直流电压、电流表。

在时分割乘法器式电能表的发展中，华中电力试验研究院裴学元同志研制出工频基波

电能表,中国计量科学院张佑峰同志做的精密宽频带功率、电流、电压表的实验研究中,都取得了重要成果。中国计量科学院陆祖良等同志所建立的国家最高电能标准,在参与国际比对中偏差仅在 20ppm 以内,为研究开发新产品中提供精确的标准数据。

为了配合全国开展电能计量工作和电能表生产的需要,1982 年江西省电力试验研究所电测室彭兆铭、卢运培等带领一批技术人员研制成功了全国第一个单相电能表校表源,解决了电网经常频率偏低不能校验电能表的问题,又首创采用了环形电阻网络的 360° 相位调节,实现了三相三调(电压和电流的幅值调节、频率调节、相位调节的模拟式)工频校表电源。(见“电测与仪表”1984 年第 10 期),受到 1980 年第 4 期 IEEE 论文“用数字双正弦波振荡器来比较导纳”内容的启发,开始了新的研究,在 1987 年 5 月电源组研制出电能表数字程控校表电源,初次在电力部组织的“全国电能表检验装置展评会”上向同行们展示,1994 年改进成 0.01 级的超高稳单、三相工频校表源。1987 年 5 月国内首创的 JDM 型智能化全自动电能表校验装置等成果也通过鉴定。曾经在 1984 年 3 月试制了模拟 2~25 次谐波的“工频电网畸变波形的可控失真波信号源”(见“电测与仪表”1984 年第 12 期),为我国第一条海底电缆直流输电工程开展谐波对仪表影响的试验。由此江西电力试验研究所的一系列科研成果转入仪器仪表电子行业,全面地带动了我国的电能计量工作和电能表制造行业的大踏步前进和发展。

随着集成电路的日益发展和新器件开发成功,安装式电子电能表逐步进入电力系统生产和销售管理部门的电能计量、计费第一线,安装式电子电能表进入千家万户。1995 年上海贝岭微电子制造有限公司最早推出 BL0931 单片单相电能计量芯片,及改进型 BL0932 都是采用时分分割型模拟乘法器,珠海恒通首先批量生产直接驱动步进计数器显示的单相电子电能表,20 世纪 90 年代我国安装式电子电能表基本上都是由这种芯片构成的。由于这种电能计量芯片的校准是采用激光调阻仪调节厚膜分压网络电阻的阻值速度慢,很不方便,并且存在着不能构成三相电能表的缺陷,限制了它的发展和应用。

从 1993 年湖南威胜仪表厂最早和国内其他一些电能表制造厂开始用 A/D 转换试制数字乘法器原理电能表,直到 1999 年美国 ADI 公司推出 AD7755 单片单相电子式电能表计量芯片,大大简化了电能表电路,只用少量的外围元器件和能直接驱动步进马达或机电式脉冲计数器,由此构成的电能表在恶劣的环境条件下仍能保持极高的准确度和长期稳定性,因此很快就替代了其他各种计量芯片的电能表。尤其是智能化芯片的应用,分时记度、预付费、多功能单、三相全电子电能表层出不穷,普遍地被应用到各行各业的电能计量装置中,作为现代国民经济中主要的清洁能源——电能的首要计量器具。

2003 年我国已有 600 多家电能表生产企业,其中 80%集中在浙江、江苏、广东,年生产能力达 1.6 亿台,2003 年电能表总产量为 9136 万台,总产值 906 281.56 万元,比 2002 年同期减少 6.87%。三星、华立、正泰、德力西、天正、林洋、长沙威胜、河南思达、哈表等 15 家电能表重点企业的产量和市场占有率列居全国前列,三星、华立、正泰、德力西、河南思达、哈表六家企业电能表被评上“中国名牌产品”。他们抓住电子式电能表

发展机遇,不断地开拓创新,调整产品结构。国家电力公司实行“一户一表”政策和城乡电网改造后,2003 年国家发改委《关于运用价格杠杆调节电力供求促进合理用电有关问题的通知》出台,为复费率电能表带来广阔的市场空间。从 2002 年复费率电能表产量从 239.46 万台增加到 389.32 万台增长 62.58%。国内随着电力部门对用电政策的调整,国家逐步推行分时电价政策,传统的机械感应式电能表已不能满足需要,电子式电能表替代机械表为大势所趋,民用电能表市场需求开始悄悄地从机械表为主体向以电子表为主导转变,全电子、复费率、预付费、多功能电能表获得很大的发展空间。根据电工仪器仪表市场预计 2004 年安装式电能表的需求量:500 万台复费率电能表、150 万台预付费电能表、2200 万台全电子单相电能表、300 万台全电子三相电能表、200 万台多功能电能表和 300 万台载波电能表。

解放前我国是电能表输入国,进口的电能表大部分是英美国家的产品,解放后我国不但自给自足,因为有价格优势还出口。新世纪开始不久,综观全球电能表市场,正可谓风起云涌,机械表正在逐渐退出使用,电子式电能表正逐步成为市场主流产品,尤其通信技术和数字信息技术的快速发展,更为电子式电能表的发展起到推波助澜的作用。我国得益于国家电力公司的远见卓识,我国电子式电能表起步和发展较早,并且这几年来在两网改造中得以日益提高和完善,中国的电子式电能表技术在世界具有领先地位,是目前全球最大的电能表生产国。中国生产企业数量之多,超过国外全球的总和,一批世界级大厂在中国产生。出口量已占世界电能表贸易量的 20%~25%,就是说国际市场上每 4 台电能表中就有一台中国制造。2005 年我国电能表出口 1400 万台,同比增加 60%,金额约为 2 亿美元,比上年增加 90%,出口中尤其是技术含量较高的电子式电能表,随着电子元器件价格不断下降,电子表的成本克服了价格优势和多种功能的实现,一场行业内的竞争将使强者恒强的趋势得到凸显。中国将从现有的全球第一大电能表生产国走向全球第一大电能表出口国。

我国进入 WTO 世贸组织后,电能表产品在国际市场上露出锋芒,出口到印度、土耳其、越南、孟加拉和东南亚市场,表现非常活跃,但是一些企业因相互压价,价格太低损害了厂家的利益,结果得势不得分,做单但不赚钱。尤其印度 2000~2002 年曾经有几百万台定单,但是到 2003 年以 10 万台定单的低价格只买 1 千台的做法,降低了商人的忠诚度,而且还要承担资金压力和收款风险。一旦他们掌握了电能表制造技术,就不再进口。简单的单、三相电能表印度大部分厂家都具备生产,有很强的技术能力,逐步开发生产各种功能电能表,技术上已经没有差距。我国的单相电能计量芯片 2000~2004 年出口印度超过 500 万片,出口土耳其、东欧和独联体的总数在 200 万片。我们曾经对国产芯片与进口的同类芯片进行全面的比较试验,结论为国内外生产的芯片在性能上完全一致,而国产芯片价格上比进口芯片有着很大优势。并且,我国自主知识产权的电能计量芯片已经显现巨大的潜力,例如:2005 年评为“中国第一大 IC 设计企业”的珠海炬力公司开发的 ATT7022B 三相基波谐波电能计量芯片和 ATT7023 单相多费率多功能电能表高集成的单芯片;上海复旦的 FM2307 支持停电显示的低功耗和配套的非接触卡芯片等等,这些本书将选择有

代表性的内容予以阐述。但由于篇幅所限，不能逐一录入，考虑国产芯片的资料可从多种渠道收集，因此希望读者自行收集，并编译成外文在国际上广为宣传。

总之，尽管我国的电工仪器仪表的某些高端产品由于技术上和工艺上的落后，受到发达国家进口产品的严重冲击，但是我国电子式电能表及其配套的校表电源和校验装置的研究、开发和生产，由于同行们的共同努力，电能表产业始终得到蓬勃发展，处于领先地位。



电子式电能表的结构与工作原理

第一节 电子式电能表的分类

电能测量技术是测量某一段时间内发送或消耗电能的总量,也就是将某一段时间内的电能量累计起来。常用的交流电能表不论机械式还是电子式按接线方式都可以分为直接连接式和经(电压、电流)互感器接通的两大类。电压模拟量输入直接接通 220V/380V 电压的电能表称为低压电能表;而经过电压互感器接通的电能表则称为高压电能表。高压电能表的输入电压为 100V。

电子式静止电能表与机械式感应电能表一样,都是用来测量单相或三相电路的电能,因此可以分为单相电能表和三相三线、三相四线电能表;按照被测量则分为有功电能表和无功电能表。机械式电能表往往一个电能表只能测一种电能量,而电子式电能表可以在同一个机构内实现同时测量有功、无功和视在电能的功能,我们则称为组合电能表。而且,机械式电能表难以实现的特殊用途功能表,如最大需量电能表、多费率分时电能表、预付费电能表、(铜损、铁损)损耗电能表等功能,采用电子式电能表实现就变得非常容易。电力系统因此常常采用多功能电能表来对大型用户、中型用户的各种电能进行计量和实现多种功能,并且还可以通过有线、无线等种种通信方式来实现遥测、遥信、遥控等功能。

电子式电能表就其用途和使用场合来说,可分为安装式电能表和标准式电能表两大类。在前面已经讲过我国的电子式电能表制造是从电子式标准数字电能表起步的,因为标准电能表用于量值传递和检验,精度等级比较高,原来的机械式标准回转电能表难以提高的精度,现在采用电子式电能表就能够达到很高的精度。安装式电能表用于工农业和民用电能的计量,需要常年连续不断地工作,是一种最常用的电能计量工具,从经济实用上考虑其准确等级要比标准式电能表稍低。我们将在第三章、第八章讲述单、三相安装式电子电能表,第九章讲述安装式电子电能表实现远程抄表的内容。按电子式电能表的电路结构,又可以分为模拟乘法器式和 A/D 转换数字乘法器式两大类,早期采用的是模拟乘法器的单相安装式电子电能表,再由简单的数字乘法器外置晶振和内置振荡器单相表到防窃电单相表;安装式三相表先是采用由两片或三片单相电能计量 IC 构成的三相电子式电能表到采用单片三相电能计量 IC 的三相电子式电能表;先是脉冲输出用电磁步进电机的机械计度器来显示电能数的表,到采用发光数码管或液晶显示器显示数字的安装式电子电能表;电子式电能表先是采用电阻分压器跳线方法的硬件调表结构电路,后有带串行接口的、可编程的和软件调表的电子式电能表等各种种类的安装式电子电能表。

组成电子式电能表的结构虽然各不相同,但总是含有模拟输入电路、转(变)换器、乘法器、输出驱动及显示器等几个基本部件。为了便于大家学习,在第二章里先对组成电子

式电能表的基本结构电路及各部件的工作原理进行介绍和分析。在后面的各章里再分别对实现各种功能的元器件和电路进行分类和对其工作原理作详细介绍。

近年来,进入我国电力系统的电子式电能表逐年增多,广泛地应用在电能计量和计费工作中。从事电能计量及管理工作的专业人员需要尽快掌握这方面的知识和技术。

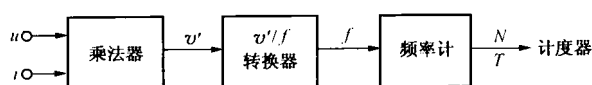


图 2-1 模拟乘法器的功率电能表方框图

电子式电能表是怎样计量电能的呢? 电路中的瞬时功率 $p=ui$ 。如果将 u 和 i 输入到乘法器中相乘,就可得一个与输入量的平均功率 P 成

正比的平均电压。再将此电压经 $v-f$ 转换器转换成为频率 f , 由频率计计数, 如图2-1所示, 即 $ui \rightarrow \infty P \rightarrow f \rightarrow N/T$, 所以, $P=k \frac{N}{T}$, 则在 T 段时间内的电能为:

$$W = PT = k \frac{N}{T} T = kN$$

公式 $W=kN$ 表示对某一段时间电能的测量, 变为对这一段时间内转换的电脉冲数(kN), 然后由数码管或计度器直接显示电能(W)的 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

电子式电能表有较好的线性度和稳定性, 功耗小, 电压和频率的响应速度好、测量精度高等诸多优点。

第二节 输入变换电路

电子式电能计量仪表中必定有电压和电流输入电路, 而电子器件大都是非线性的, 在大信号下工作时, 虽由于器件的截止和饱和, 信号将被限幅, 但工作点限于线性区内的小信号的话, 则可以作为线性工作的, 因此电子式电能表首先要将高电压和大电流转换成弱电小信号来进行测量。输入电路的作用是一方面将被测信号按一定的比例转换成低电压、小电流输到乘法器中, 另一方面使乘法器和电网隔离, 减小干扰。

输入电流 i 经输入电路变换成 V_X 弱电信号, 输入电压 u 经输入电路变换成 V_Y 弱电信号。然后将 V_X 和 V_Y 送到模拟乘法器进行运算, 因此输入变换电路的变换精度直接影响到电能计量的准确性。

$$i \rightarrow V_X \quad u \rightarrow V_Y$$

电压输入电路常见的精密电阻分压输入方式的使用概率多于电压互感器输入方式; 而电流输入电路有精密电阻分流器和电流互感器输入方式, 也有电压输入电路采用取样电阻和电流互感器串联; 电流输入电路采用取样电阻和电压互感器并联的输入变换方式。

近年出现的全自动量程的输入方式也被应用于智能式电子标准电能表中。这类电能表在测量刚开始时, 输入电路总是位于电压高的和电流大的量程上限挡, 通过对电压、电流测量的数据进行计算, CPU 根据计算机软件计算的结果, 发出电压输入变换或电流输入变换或电流输入变换的程控码, 切换到合适的输入量程挡上。如同人工改换接线端或切换开关改变测量挡一样, 使其置于合适的测量量程挡上。