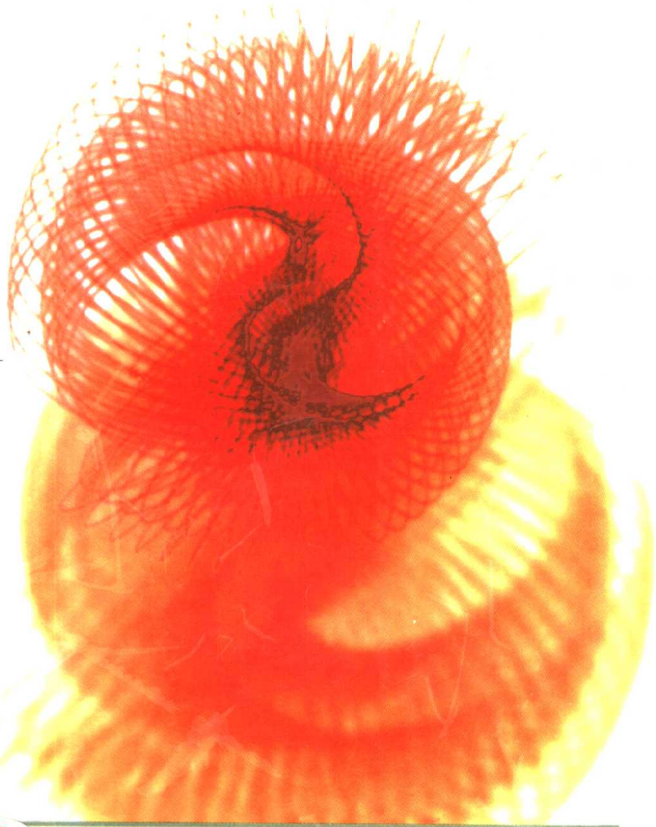




电子式电能表及其在 现代用电管理中的应用

赵伟 吕鸿莉 郭蕴蛟 编著

中国电力出版社

M933.4

4425

183380

电子式电能表及其在 现代用电管理中的应用

赵 伟 吕鸿莉 郭蕴蛟 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是有关各种电子式电能表及其在现代用电管理系统中应用的专业技术著作。

全书共分七章,依次论述了电子式电能表的产生与发展过程、工作原理、主要功能与分类、校验技术和标准、性能测试与常见故障维修、自动抄表技术和在现代用电管理系统中的应用、国内外主要品牌以及国内的研制开发生产概况。

本书可供从事各种电子式电能表研制开发或组织生产的工程技术人员阅读,也可供电力系统及工矿企业从事电气测量、试验、运行及维修工作的技术人员和工人阅读;另外,还可做高等工程大专院校相关专业的正式教材或辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

电子式电能表及其在现代用电管理中的应用/赵伟等编著. -北京:中国电力出版社,1999
ISBN 7-80125-982-3

I. 电… II. 赵… III. ①电子式电能表②电子式电能表应用-用电管理 IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 04117 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>)

水电印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 5 月第一版 1999 年 5 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 32 开本 8.75 印张 193 千字
印数 0001—3800 册 定价 12.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

随着我国社会主义市场经济和电力工业的发展，供用电管理制度的改革不断深化。为满足全面推行峰谷分时电价和居民用电管理一户一表的需要，近年来，在引进吸收国外先进技术的基础上，国内开发和生产出了多种新型电子式电能计量仪器仪表；在电子式电能表新原理、新技术方面开展的研究，取得了不少可喜成果；为提高供用电管理水平，也积极探索利用各种自动抄表、集中抄表、微机化手段等新技术。

为使我国电子式电能表的设计制造、系统集成、质量检测、使用运行和开发生产从整体上尽快赶超世界先进水平，很有必要出版一本原理论述正确、所介绍技术手段实用性强、学术和技术用语规范统一、数据信息资料属实且提供有国内外先进经验与最新成果的普及性专业技术参考书籍。本书即是为此目的并为满足社会的需求而编写的。

三位编著者对电子式电能表产生与发展的历史、各种表计的工作原理、功能与分类、性能测试与校验技术、质量评价标准、在现代供用电管理系统中的应用以及预期的发展等，都进行过深入的研究和探讨；花费大量时间遴选、整理文献资料，对书的构架和具体章节内容的取舍，进行过多次改写甚至重写。他们中的两位从事电磁测量技术及仪器领域的教学与科研工作，不仅基础理论知识扎实，而且孜孜以求，积极吸取新知识，钻研新课题；另一作者亲身参加电子式电能表的研制、开发并组织生产多年，积累有丰富的实践经验。这

些都为本书的成功编写奠定了良好的基础。

本书取材符合工程实际需求，编排合理，注重基本概念，讲述深入浅出，文笔流畅，用语规范。作为第一部全面论述电子式电能表及其应用的专业技术书籍，相信它在受到读者欢迎的同时，也将在规范电子式电能表技术术语和形成相应理论的体系方面发挥积极的作用。

唐统一

1998年6月

前言

在现代化社会中，电能已经成为了最重要的能源。作为国民经济支柱产业的电力工业的发展，需要电能测量仪器仪表技术的进步与之相适应；发电、输电、配电和用电均需要对电能进行准确测量；而且在世界性能源匮乏和环境污染日益严重的今天，电能的节约与更高效利用，对人类的发展都具有十分重要的意义。正因为此，对电能的准确测量越来越受到人们的普遍关注。

测量电能用的专用仪表电能表自诞生至今已有 100 多年。最早出现且至今仍在我国和许多国家普遍采用的感应系电能表，虽结构简单、可靠性好且价格便宜，但其功能单一、测量准确度受工作原理局限不可能提高等，不适应工业现代化和供用电管理现代化飞速发展的需求，于是，电子式电能表应运而生。近一二十年来，微电子技术、计算机技术和通信技术的高速发展，有力地推动了电子式电能表技术的迅速更新与进步。高准确度、高可靠性的元器件以及大规模电路集成技术和电路制造的表面贴装技术等应用于电子式电能表的开发与生产，使电子式电能表寿命提高、功能多种多样且仍在不断扩展，并逐步使供用电管理的智能化和微机化成为现实。

电子式电能表最早诞生于工业发达国家。70 年代初，瑞士就研制出了电子式标准电能表；70 年代末，计费用电子式电能表在日本已有商品化产品；80 年代，电能表电子化的浪潮席卷欧美。我国研制开发电子式电能表虽较晚，但在引进

与借鉴的基础上进步十分迅速。尤其是进入 90 年代以来,随着制作工艺水平的不断提高和采用各种新材料、新器件,短短几年,我国研制、开发、生产各种电子式电能表和电能计量微机化、智能化管理系统的企业和科研院所已发展到上百家,一些单位的产品已形成规模,并不断有改进型、新型表计和管理系统通过鉴定投入运行。

伴随着电子式电能表技术不断提高发展的进程,该领域的科技工作者和工程技术人员撰写了大量论文。这些文章散见于国外、国内的许多刊物和文献资料中,但至今尚未见到全面论述电子式电能表发展历程、工作原理、功能与分类、性能测试技术与校验、性能评价标准以及在现代供用电管理系统中应用的专业书籍。作者从事电磁测量技术及仪器研究、电子式电能表研制开发并组织生产多年,出于为尽快使我国电子式电能表研制、开发、生产从整体上赶上或接进世界先进水平的意愿,认为,在我国很有必要尽早编写出一部有关全面介绍电子式电能表及其应用的普及性专业技术参考书。基于上述初衷和设想,作者们编写了此书。

本书在选材上突出一般性和实用性,不过深涉及电子式电能表及相关设备的电路原理的分析或数学证明,但为进一步研究这类问题,提供了一些参考文献;对一些较特殊的相关内容,如电焊机用电子电能表、测量微波电能用电子式电能表等,考虑到它们更专且面较窄的特点,本书未作介绍。本书第一章回顾电子式电能表的发展历程之后,对各种电子式电能表的定义进行了归纳讨论,介绍了工业用电子式电能表功能选择的综合考虑和对采用预付费电能表与自动抄表的不同看法。第二、第三两章较全面而系统地讲述了各种电子式电能表的工作原理和其分时计量、最大需量计量、电能测量

遥控、预付费等主要功能及其实现。第四章和第五章介绍电子式电能表的校验技术、用于电能表校验的电子式标准电能表、电子式电能表国家标准和部颁标准、电子式电能表性能测试技术以及常见故障的维修。第六章讲述自动抄表技术、卡式预付费电能表、适于测量含谐波电能的电子式电能表以及多用户组合式电子电能表在现代供用电管理系统中的应用。第七章作为全书的最后一章，介绍国家对电能表生产和使用的管理，以及国内外电子式电能表主要产品，并提供有国内研制、开发、生产电子式电能表和微机化电能计量管理系统的单位名称。

本书由清华大学电机工程与应用电子技术系赵伟、吕鸿莉和北京富根智能电表有限公司郭蕴蛟编写。赵伟编写了前言、第一章、第四章至第六章；吕鸿莉编写了第二章和第三章；郭蕴蛟编写了第七章；全书由赵伟统稿。限于作者水平及缺乏经验，书中难免有不足之处甚至错误，敬请读者批评指正。

本书编写过程中得到了清华大学电机系唐统一教授、钱家骊教授、王赞基教授和《电测与仪表》杂志刘家新主编的支持和鼓励；哈尔滨电工仪表研究所顾新民高级工程师（教授级）、清华大学电机系罗承沐教授和杨学昌教授提供了宝贵的文献资料；清华大学电机系95届本科毕业生张召辉、96届本科毕业生李冀，也在本书编写的初期协助作者做过一些基础性工作；中国计量科学研究院陆祖良研究员审阅全书并提出了许多宝贵意见。在此一并致谢。

编者著

1998年5月

— 目 录 —

序

前言

第一章	绪论	1
第二章	电子式电能表的工作原理	25
第一节	概述	25
第二节	机电脉冲式电子电能表的结构与工作原理	31
第三节	全电子式电能表的结构与工作原理	40
第四节	电子式电能表中的分频与计数技术 ^[94]	80
第三章	电子式电能表的功能与分类	91
第一节	分时计量功能	91
第二节	最大需量计量功能	109
第三节	电能测量遥控功能	117
第四节	预付费功能及其实施手段	122
第五节	电能表专用集成电路	132
第四章	电子式电能表的校验技术	140
第一节	概述	140
第二节	电子式标准电能表	142
第三节	电子式电能表的校验技术	144
第四节	电子式电能表校验装置	157
第五节	各种电子式电能表的标准	164
第五章	电子式电能表的性能测试与 常见故障维修	175
第一节	概述	175
第二节	电子式电能表的性能测试	176

第三节	电子式电能表常见故障维修	184
第六章	电子式电能表在现代用电管	
	理系统中的应用	190
第一节	概述	190
第二节	自动抄表技术及其在现代用电管理系统 中的应用	191
第三节	卡式预付费电子电能表及其在现代用电 管理系统中的应用	212
第四节	适用于测量含谐波电能的电子式电能表 及其应用	218
第五节	多用户组合式电子电能表及其应用	229
第七章	电子式电能表主要产品及国	
	内研制开发生产概况	236
第一节	国家对电能表生产和使用的管理	236
第二节	富根智能电能表-集中抄表系统	237
第三节	WSD 系列全电子式预付费多功能交流 电能表	244
第四节	INDIGO PXA 电子式电能表	247
第五节	ZMB210T 系列 1.0 级三相多功能电子 式电能表	251
第六节	Alpha 系列电子式电能表	254
第七节	电子式电能表国内研制开发生产单位 统计	258
参考文献		262

第一章 绪 论

在现代化社会中，电能已经成为最重要的能源。

近十几年来，我国国民经济增长很快，其中电力行业作为重中之重有了长足的发展。最近几年，我国每年新增发电装机容量达 1500~1800 万 kW；不仅年发电量已超过日本，而且总装机容量也已超过日本，仅次于美国居世界第二位。按照“九五”规划，到 2000 年，我国的发电装机总容量将达 3 亿 kW。电力工业的发展需要电能计量仪表制造业的进步与之相适应，发电、输电、配电与用电均需要准确地计量电能。在世界性能源匮乏的今天，电能的节约与有效利用均具有十分重要的意义。为此，对电能的精确测量也越来越受到电能供需双方及其他有关方面的高度重视。

一、电能表的历史发展过程^[1~9]

作为测量电能的专用仪表电能表，自诞生至今已有 100 多年的历史。因为 1kWh 的电能量被定义为一度电，所以按计量单位，电能表又俗称电度表或千瓦时表。电能表在电能管理用仪器仪表中占有很大比例，其性能直接影响着电能管理的效率和科学化水平。100 多年来，随着电力系统、所有以电能为动力的产业的发展以及电能管理系统的不断完善，电能表的结构和性能也经历了不断更新、优化的发展过程。

世界上最早的电能表是一个叫爱迪生的德国人于 1880 年利用电解原理制成的直流电能表。交流电的出现和被利用，对电能计量仪表的功能提出了新的要求。1888 年，意大利物

理学教授费拉里斯 (Ferraris) 首先想到用旋转磁场理论服务于交流电能的测量。与费拉里斯几乎同时, 美国某电工技术学校的一物理教师也根据旋转磁场的原理试制出了感应系电能表雏形。1889 年, 德国人布勒泰制作出了无单独电流铁心的 (即感应电流由交变磁场本身产生的被称为单磁通式的) 感应系电能表。1890 年, 带电流铁心的 (即感应电流由另一交变磁场产生的被称作多磁通式的) 感应系电能表出现了, 不过其转动元件是一个铜环, 反作用力矩靠交流电磁铁产生。直到 19 世纪末, 电能表才逐步改由永久磁铁产生反作用 (制动) 力矩, 以降低转动元件旋转速度 (转速) 并增加转矩; 表的计数机构也几经改进, 铜制的圆转盘由铝圆盘所取代。至此, 感应系电能表的制造理论基本形成。

测量直流电能的电能表多采用电动系测量机构, 而用于测量交流电能的电能表则采用感应系测量机构。

在电力系统发展的早期, 感应系电能表被广泛用于工频 (50Hz 或 60Hz) 电能的测量。感应系电能表是利用处在交变磁场的金属圆盘中的感应电流与有关磁场形成力的原理制成的, 具有制造简便、可靠性好、价格便宜等特点。经过近 100 年的不断改进与完善, 感应系电能表的制作技术已经成熟。通过双重绝缘、加强绝缘和采用高质量双宝石轴承甚至磁悬浮 (推) 轴承等技术手段, 其结构和磁路的稳定性得以提高, 电磁振动被削弱, 使用寿命大大延长, 且过载能力明显增强。因此, 至今在包括我国在内的许多发展中国家甚至是一些发达国家里, 感应系电能表仍作为主要的电能计量仪表被广泛使用。

电能开发及利用的加快, 对电能管理和电能表性能提出了更高的要求。电力系统的不断扩大以及对电能合理利用的

探索，使感应系电能表暴露出不少甚至是致命（先天）的缺（弱）点。一般感应系电能表的准确度为 2.0 级和 1.0 级，其所能达到的最高准确度受制造和机理所限只能达到 0.5 级，但对大用户和大电网的电能管理，要求电能计量仪器仪表应具有更高的准确度。瑞士斯波尔特公司的统计数字表明：36000 块 2.0 级电能表用于小用电户电能测量的总的误差只有 $\pm 0.054\%$ ；而用电大户安装一块 0.2 级电能表的综合测量误差已达 $\pm 0.07\%$ 。可见，高准确度对电能计量管理十分必要。感应系电能表的发展受到其原理和结构等因素的制约，难以满足现代电能管理的要求。此外，感应系电能表是针对很低且十分狭窄的频率范围的正弦电压和正弦电流而设计的，但现代电力系统中采用硅整流与换流技术，这些非线性负荷产生大量高次谐波并引起不平衡，致使电网电压波形产生畸变、波动及三相不平衡，对感应系电能表产生不利影响，使其指示不正确，由此可能造成操作、管理人员做出错误的分析判断。

随着用电量的急剧增长以及由此引发的能源供需矛盾的加剧，许多工业大国日益重视电能管理，都在通过技术改造等各种手段加强对电力负荷的监控，以实现计划用电与合理配电，从而提高电网负荷率。现代电能管理强调自动化、智能化，要求以高新技术手段确保经济杠杆调配电能的使用，以求更高的供用电效率。这便对电能计量仪器仪表提出了多功能化的要求，希望它不仅计量电能，而且也能应用于管理。因此功能单一的感应系电能表及其相关机械装置（如与工业用表计相配合使用的时间开关和记录器等），已不适应现代电能管理的要求。

为使电能计量仪器仪表适应工业现代化和电能管理现代

化飞速发展的需求，电子式电能表应运而生。

早期的电子式电能表并没有完全摆脱感应系电能表，它采用精密感应系电能表的测量机构(简称感应系测量机构)作为工作元件，由光传感器完成电能-脉冲转换，然后经电子电路对脉冲进行适当处理，从而实现对电能的测量。由于此种表的显著特点是感应系测量机构配以脉冲发生装置，因此被称为感应系脉冲电能表，也称为机电式电能表，或简称脉冲式电能表。脉冲式电能表在国外早已有成熟产品，并自 70 年代初起开始在一些工业化国家被大面积采用。这种表和机械耦合式多费率电能表是感应系电能表向全电子式电能表发展过程中过渡的电能计量表种，它们对分时电价、需量电价制度的实施起了积极的推动作用。尽管直到 90 年代还有人不断地改进脉冲式电能表的某些技术性能，但以感应系测量机构作为其测量主回路的原理性缺陷，决定了其测量准确度级别只可能与感应系电能表一样，一般为 1.0 和 2.0 级，而不可能再高。

为了替代由感应系测量机构测量交变电能，人们研究并试验了许多不同的测量方式方法与实现方案。70 年代就出现了三种比较典型的采用全电子电路的测量方案，且每一种都被证明有自己的优势或特殊的用途。

1974 年，Turgel 展示了通过等时间间隔采样电压、电流波形并将其数字化，然后将它们进行相乘运算得到平均功率的技术方案。他利用当时技术水平的装置展示出，通过对每一个电压、电流信号的周波采样 512 点，并在 40kHz 采样速率下以 15bit 的准确度将其转换成数字形式，可做到工作频率从直流到 5kHz 均能与传统的测量仪器取得良好的一致性。次年，Dix 提出另一种采样方式，并且证明了如果 n 正好

等于被采样信号 m 个周期内的总采样间隔数，那么，只要 $2m/n$ 不是整数，积分被代之以数字量的求和就不会引起误差。再则，通过适当选择 m 和 n ，信号中的基波和各次高次谐波分量就可分别得到相应的处理。按照这种方式进行采样，模/数转换器的频率限制就有可能被突破。

Stoction 提出了一种与 U-T 双斜积分数字电压表有关的将采样与模拟乘法器相结合的新的实现功率、电能测量的技术方案。这个方案是建立在模拟乘法器基础上的电能测量实验装置。这种装置的性能很大程度上取决于所用的具有平方特性的器件。当时，一种性能稳定且可提供线性化优于士百万分之 500 (或写成 500ppm) 的四象限模拟乘法器已问世。其原理是基于晶体管基极-发射极间电压与集电极电流之间具有良好的对数关系。两个四象限乘法器与加法、减法功能电路单元和输入传感器一起便构成了一个便携的有效频率范围为 30Hz~10kHz 的电子式电能测量装置。

上述三种技术方案的准确度均达到了 $\pm 0.01\%$ ，且被证明在不同的领域有其特殊用途。尽管如此，在当时 (70 年代) 试制出的电子式电能表的体积仍比较庞大且价格昂贵。再则，基于双斜积分电路形成的电能测量装置尽管比较简单，但也仍具有只能在较理想的正弦波形等条件下使用的局限性。基于模拟乘法器形成的电能测量装置比较小巧且适于测量多样的波形，但为使其各种输出性能稳定需要进行反复的初始调整。70 年代的这些探索性试验揭示了后来的电子式电能测量仪器仪表的进一步发展，并且已经能让人相信，把不同的新技术合理地应用于电能的测量的可行性，使建立以这些仪器为基础的电能测量手段成为可能。

由于电能是电功率对时间的积分，所以，任何全电子式

电能计量方案的第一步都是确定电功率。因而，使用乘法器是实现测量功率和电能的全电子式测量方案的共同特点。

近 20 年来，大量新型电子元器件的相继出现，为全电子式电能表的更新换代奠定了坚实的基础。模拟乘法器已发展成晶体管阵列平方乘法器、热偶乘法器、可变跨导型乘法器、双斜积分乘法器、霍尔效应乘法器、时分割乘法器等几种类型且多个品种系列；数字乘法器也有若干种类。

电子式电能表的一种分类方法是，按所依托的乘法器是模拟的还是数字的分为模拟乘法器型电子式电能表和数字乘法器型电子式电能表。

目前，国内外生产使用的模拟乘法器型电子式电能表中采用的模拟乘法器（电路），主要有时分割乘法器、可变跨导型乘法器和霍尔效应乘法器。时分割模拟乘法器分为电压输入型与电流平衡型两种。前者的特点是输入阻抗高，一般在 $10\text{k}\Omega/\text{V}$ 以上；输入信号电流小，一般约为 $20\sim 100\mu\text{A}$ 之间。其优点是以电压来整定，例如在直流条件下做成 $1\text{V}\times 1\text{V}=1\text{V}^2$ 的输入输出关系，便于实施直观地模拟相乘。这种乘法器的缺点是存在开关场效应管尖峰效应、导通电阻不可忽略及较多运放漂移等，其满度和零点的稳定性问题也不易解决。因而，在使用基于这种乘法器形成的电子式功率表或电能表时，改换不同量程（限）需要重新调零，且它们的零漂明显。后一种时分割乘法器也称传号-空号乘法器（Mark-spacemultiplier），它依据电流平衡原理等形成的特性，克服了前者存在的尖峰效应及由于使用较多运算放大器所引起的零漂等缺点，并且电路简单、准确度高、性能稳定；但不足之处是利用变压器、互感器做输入隔离使工作频率范围变得较窄，一般仅用于工频信号的测量。可变跨导型乘法器较易由单片集

成电路实现,准确度一般为 $\pm 0.5\%$,工作频率范围可达数兆赫兹。霍尔效应乘法器的特点是电流、电压回路彼此独立互不影响,电路简单,便于检测与校准。较早期的霍尔元件受所用材料的制约灵敏度较低,致使当时的采用霍尔效应乘法器电路制成的电子式电能表的准确度不可能很高。近年来,用新材料制成的霍尔元件性能有了明显改善,它带动了利用霍尔效应乘法器的电子式电能表在准确度等性能指标方面有较大的提高。

目前,全电子式电能表多采用模拟或数字乘法器作为核心器件。高准确度全电子式电能表多采用时分割模拟乘法器。

由于利用乘法器实现电能测量方案的第一步是完成电压、电流相乘即可先获得功率,故实际中人们根据需要还专门制造有既可测量功率又能测量电能的电子式仪器仪表电子式功率-电能表。有些类型的电子式电能表虽不称为功率-电能表,但具有测量功率的功能。

数字乘法器型电子式电能表则是以微处理器为核心,采用 A/D 转换对经 TV、TA 变换的被测电压和电流进行数字化处理,并进行各种判断处理和运算,从而实现多种功能。这种类型的电能表利用位数较多的 A/D 转换电路或自动量程转换电路,原理上可达到很高的测量准确度,且它的独特性在于在一定周期内对电压、电流信号进行采样处理的方法保证了测量准确度不受高次谐波的影响。考虑到电能管理现代化的必然发展方向,需要访问多种信息并要求决策与电价器具之间的双向通信,而数字乘法器型电子式电能表功能的扩展十分方便,十分容易与配电自动化系统集成,故有专家预计,数字乘法器型电子式电能表将成为今后电子式电能表的主要发展方向。