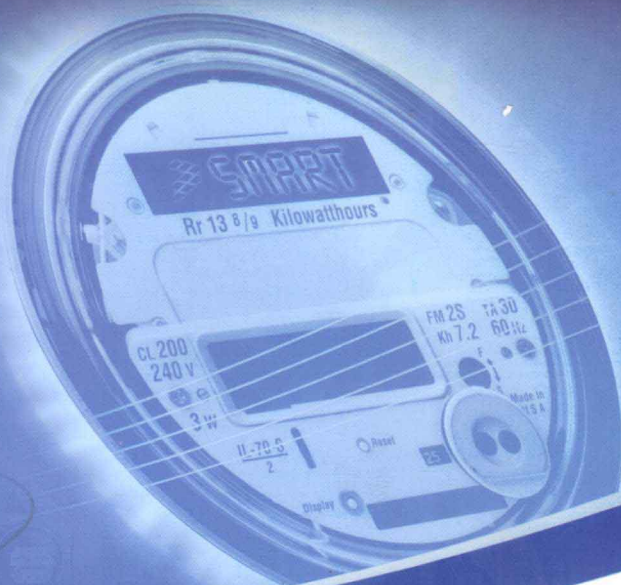


电能计量 自动化技术

肖勇 周尚礼 张新建 化振谦 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电能计量自动化是智能用电领域最核心、最关键的技术，是建设智能电网的着力点和落脚点。而电能计量自动化系统建设又是一项系统工程，点多面广，业务复杂。本书是广东电网公司电力科学研究院在总结相关工程经验基础上，依据最新国家、行业规程规范编写而成的，它是一本系统阐述智能电网电能计量自动化技术的专著。

本书共分 8 章，主要包括综述、电能计量自动化主站系统、计量自动化终端与主站的远程通信、计量自动化终端与电能表的通信、计量自动化终端、计量自动化终端智能仿真检测平台、计量自动化终端智能测试系统和计量自动化终端故障远程智能诊断平台。

本书可供从事智能配电、智能用电领域的设计、建设、咨询、运行、检修等管理人员和技术人员使用。

图书在版编目（CIP）数据

电能计量自动化技术 / 肖勇等编著. —北京：中国电力出版社，2011.10

ISBN 978-7-5123-2016-1

I. ①电… II. ①肖… III. ①电能—电量测量 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 206582 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

*

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月北京第一次印刷

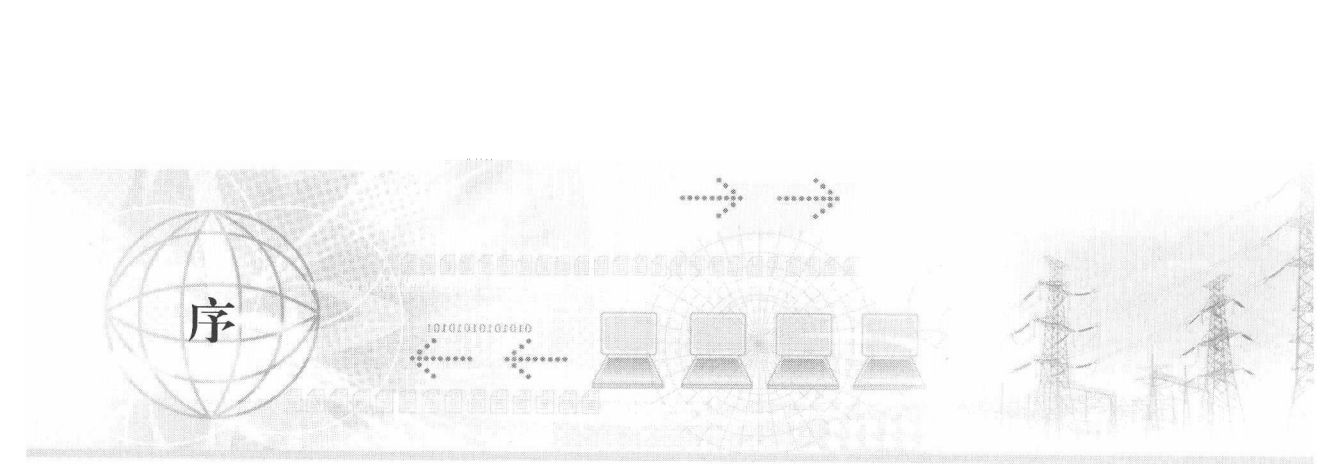
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 415 千字

印数 0001—3000 册 定价 42.00 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



序

构建稳定、经济、清洁、安全的现代能源供应体系，智能电网是满足其未来发展的战略性选择。基于信息化技术提高电网运行质量和经营管控水平，智能电网可以大大提升电网公司驾驭复杂大电网的能力。其中，电能计量自动化是智能用电领域最核心、最关键的技术，是建设智能电网的着力点和落脚点。

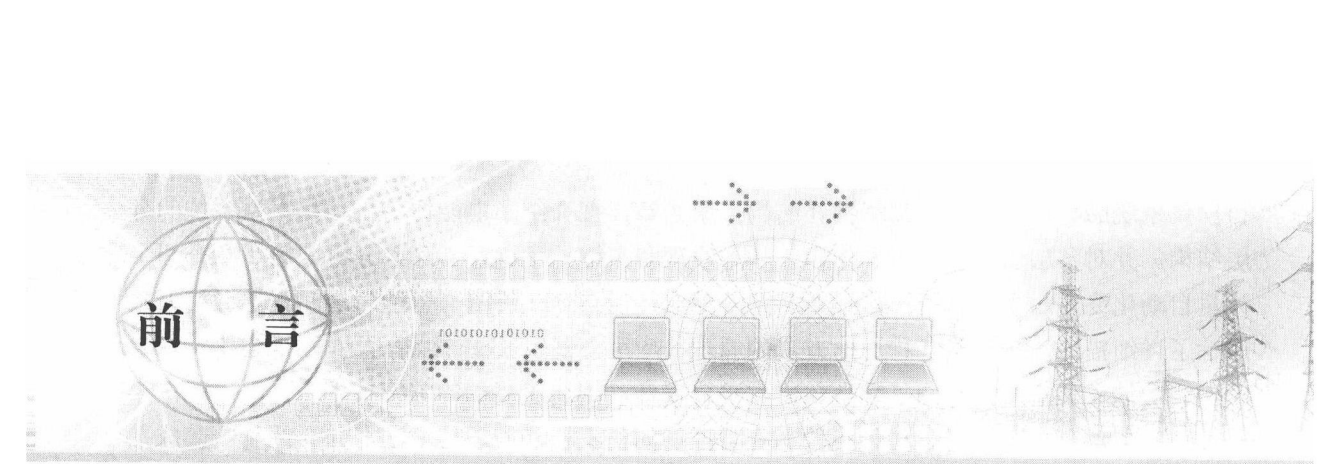
适应这一发展趋势，广东电网公司首次提出了“电能计量自动化系统”概念，并建立了完善的一体化智能计量自动化系统。早在 2005 年，广东电网公司就在国内率先大规模推进大客户负荷管理系统建设。2006 年，扩充了 IEC 102 标准，在全省全面推进地区电网计量遥测系统建设，并在大客户负荷管理主站系统基础上，全面整合厂站电能量计量遥测系统，接入配电变压器监测计量系统和低压用户集中抄表系统。2008 年，在此基础上启动了一体化计量自动化主站系统建设，集成实现了远程自动化实时抄表、用电信息异常报警、电压与电能质量监测、线损分析、预付费管理、用电检查、负荷管理与控制、停电统计等功能，为需求侧管理、线损“四分”管理等提供了强大的技术支撑。目前，计量自动化系统建设已经取得了可喜的成就，赢得了国内外同行及相关专家认可，在电能智能高级量测架构（AMI）技术领域处于领先地位。

计量自动化系统建设是一项系统工程，点多面广，业务复杂。广东电网公司电力科学研究院在总结多年工作经验的基础上，编写了这本《电能计量自动化技术》。该书详细介绍了计量自动化系统的建设原则与系统构架，以及主站系统、通信网络和智能终端等方面的关键技术，在总结相关工程经验基础上形成了较为系统的理论体系，是一部系统阐述智能电网电能计量自动化系统技术的专著。

本书作者在智能配用电领域从事的开拓性工作，推动了电能计量自动化系统技术发展；本书的出版，可为相关专业的读者提供参考，在科学研究及人才培养方面发挥积极作用，推动电能计量管理工作自动化、智能化水平提高，促进智能电网技术发展。



2011 年 11 月



前言

近年来,世界经济迅猛发展,能源短缺问题日益突出,电网供电负荷缺口大,电力用户提出了多样化的需求,电网公司面临着巨大的经营压力。在此前提下,全世界都非常关注智能电网的研究与建设,我国也提出建设绿色电网、智能电网的宏伟设想。智能用电是智能电网主要组成部分,是电网公司与电力用户直接密切联系的环节。其中,高级量测架构(AMI)是智能用电建设的核心环节,是电网公司实时、准确掌握用电负荷、电力供应等情况的基础,实现用户互动的技术保障,也是电力市场营销领域技术发展的主要方向之一。

电能计量是高级量测架构的主要部分,是电网企业经营和市场营销的基础。电能计量技术至今已经经历过一百多年历史发展,电能计量的准确性和精确度方面已有较大提升。但现阶段人工抄表还是电能计量数据的主要来源,电费的结算及时性不好,抄表结算成本较高;工业用户用电负荷不能实时监测,无法对用电负荷进行准确预测和合理调度;偷漏电现象依然严重,缺乏先进的技术进行防窃电;不能及时发现现场用电计量设备及回路故障,造成电能大量损失,电网企业市场营销中面临着诸多问题。现有电能计量与用电监测方式已不能满足智能电网和智能用电发展与建设的需要,与现代社会信息化高度发达现状已不匹配,电子通信技术、计算机应用技术、网络技术等在此领域的应用急需加强,电能计量自动化与电力营销信息化水平亟待提高。

编者自20世纪末开始电能计量适应新形势发展的新型管理模式和用电监测新技术的研究,着重分析远程监测终端技术、最优化通信技术以及应用主站平台技术等。经过十几年的研究,硕果累累,在2005年首次提出了“电能计量自动化”的理念,形成了一体化电能计量自动化技术体系。至2010年,广东电网公司建设国内规模最大、功能最强、覆盖面最广的覆盖厂站、专用变压器、公用变压器和居民用户的一体化电能计量自动化系统,为高级量测体系(AMI)建设打下了坚实基础,在智能用电网建设方面走在了国内外的前列,受到了国内外专家的高度评价。本书中大量技术成果在广东电网一体化电能计量自动化系统建设中得到了大量应用和实践验证,并在提升广东电网公司营销计量管理信息化、精细化水平发挥了重要作用。

本书从实用的角度,提出了电能计量自动化体系架构,详细介绍了电能计量自动化主站系统设计、通信技术以及终端设计实现、仿真检测和故障诊断技术。全书分为8章:第1章介绍了智能电网、高级计量架构和电能计量自动化的概念及相互关系,并阐述了电能计量

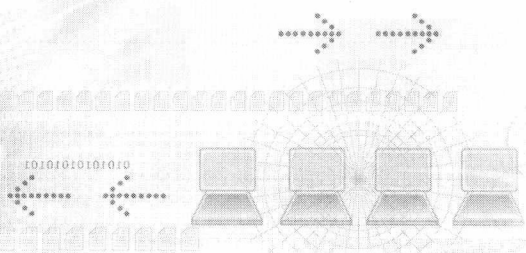
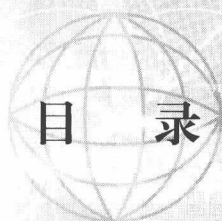
自动化系统的物理、逻辑和网络拓扑结构；第2章详细介绍了电能计量自动化主站系统的分层结构，并对各层子系统的主要作用、基本原理和关键技术进行了深入分析；第3章介绍了计量自动化终端与主站远程通信技术；第4章对计量自动化终端与电能表之间本地通信方式进行了详细描述，分析了各种通信方式的原理、应用方式及其优缺点；第5章描述了计量自动化终端的发展趋势，介绍了终端软硬件平台设计，阐述了终端的关键技术与实现方法；第6章和第7章分析了计量自动化终端功能与性能的仿真检测原理与方法，并介绍了一套成熟的检测平台与系统；第8章从运行维护的角度介绍了计量自动化终端故障远程智能诊断分析的原理与平台实现。

在本书编撰过程中，肖勇负责编写第5章至第8章和第1章部分内容，并负责全书统稿工作；周尚礼负责编写第3章和第4章；张新建、化振谦负责编写第2章，以及第1章部分内容。广东电网公司电力科学研究院党三磊工程师、伍少成博士对第7章和第8章部分内容进行校核，杨劲锋工程师对第2章和第3章部分内容进行校核。陈锐民高级工程师对本书的内容提出了宝贵的意见，并在统稿过程中给予大力支持和直接帮助，在此表示特别感谢。另外，广东电网公司电力科学研究院钟清、何宏明、孙卫明、危阜胜、李佳、阙华坤、李健、刘健，以及广东电网公司市场营销部陈蔚文、张亚东等同志在本书的编写过程中也给予大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，兼作者水平有限，书中难免存有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2011年10月

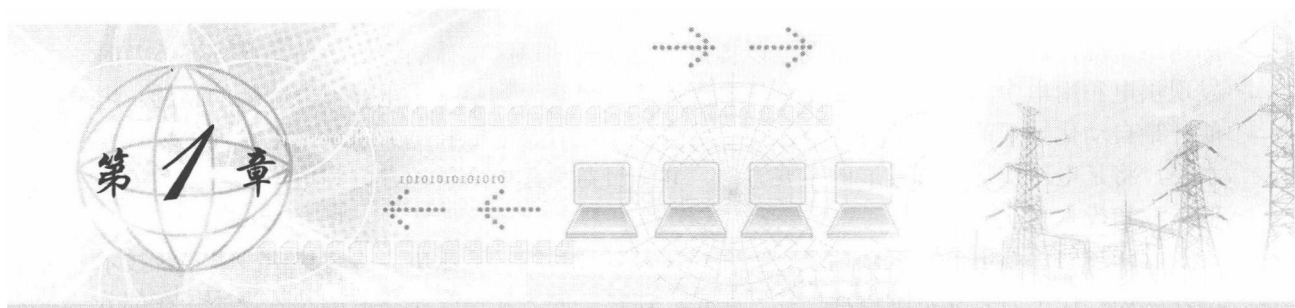


序

前言

第 1 章 综述	1
1.1 概述	1
1.2 智能电网	3
1.3 高级计量架构	8
1.4 电能计量自动化系统	14
第 2 章 电能计量自动化主站系统	20
2.1 电能计量自动化主站系统概述	20
2.2 电能计量自动化主站系统结构	21
2.3 电能计量自动化主站数据采集处理子系统	24
2.4 电能计量自动化主站应用子系统	32
2.5 高级综合应用系统	50
2.6 电能计量自动化系统接口	65
第 3 章 计量自动化终端与主站的远程通信	69
3.1 通信的定义	69
3.2 通信网络协议	76
3.3 远程通信原理	83
3.4 远程通信技术	89
第 4 章 计量自动化终端与电能表的通信	99
4.1 RS-485	99
4.2 低压电力线载波	107
4.3 微功率无线组网	133
4.4 通信方式选择	136
第 5 章 计量自动化终端	140
5.1 计量自动化终端发展趋势	140
5.2 计量自动化终端体系结构	141

5.3	计量自动化终端关键技术	151
第 6 章	计量自动化终端智能仿真检测平台	176
6.1	计量自动化终端通信仿真平台	177
6.2	计量自动化终端功能仿真检测平台	178
6.3	计量自动化终端环境试验与可靠性评估仿真	193
第 7 章	计量自动化终端智能测试系统	203
7.1	厂站电能量终端智能测试系统	203
7.2	负荷管理与配电变压器监测计量自动化终端一体化自动测试系统	208
7.3	低压集中抄表设备智能测试系统	229
7.4	计量自动化终端环境试验与可靠性测试平台	243
第 8 章	计量自动化终端故障远程智能诊断平台	249
8.1	平台总体架构	249
8.2	地市局诊断系统设计	251
8.3	省主控诊断系统设计	258
	参考文献	262



综 述

本章将从当前社会经济发展形势入手，分析了电力行业发展面临的问题，简要介绍了智能电网的发展历程和展望，高级计量架构（Advanced Metering Infrastructure, AMI）的概念、发展历程及其与智能电网的关系，进而引出智能电网下的电能计量自动化系统，介绍了该系统的构成、功能等基本情况。

1.1 概 述

随着社会经济的发展，能源短缺问题日益严峻、结构性矛盾日益突出，供电可靠性要求不断提高，用户需求更加多样，电网运营面临着巨大挑战。为了应对这些挑战，不同国家结合各自的实际情况积极开展智能电网研究和实践工作，以灵活应对大规模清洁、可再生能源接入电网而对电网带来的影响，保证电网清洁、高效运行。另外，随着社会发展和人民生活水平的提高，特别是我国电力系统两网改造工作的逐步推行，“一户一表，管电到户”政策的贯彻，用电网络规模剧增，使得供电企业对用电网络的管理任务日益繁重，传统电能计量方式已很难满足社会发展的要求。

电力生产的特点是发电厂发电、供电部门供电、用户用电这三个环节连成一个系统，不间断地同时完成。发、供、用电三方如何销售与购买电能、如何进行经济计算，涉及许多技术、经济问题。电能测量技术与仪表在我国经济建设中起着重要作用，其公平、公正、准确、可靠性直接关系到发电、供电与用电三方的经济利益，具有广泛的社会性。随着我国电力系统的改革，对电能计量工作提出了更高的要求。而电能计量设备又包括电压互感器、电流互感器、计量二次回路、电能表计等诸多设备单元，每个单元的误差及信号衰减都会影响计量精度，特别是在市场经济条件下，降低电能计量综合误差，提高其准确性显得尤为重要。

在计量设备的支持下，如何将各终端设备的数据进行汇总分析是摆在电力部门面前的一个难题。电能计量自动化技术是新兴的、先进的计量技术，融合了当今先进的电子技术、计算机技术和通信技术，并随着硬件和软件不断发展而更新。电能计量自动化是用来实现对民用或工业用电能表所计电能量的自动记载，是一种利用计算机技术和通信技术来实现对每个电能表记载数据的自动正确采集、准确传递、记录和整理，从而达到提高工作效率的目的。供电管理部门可以掌握每个用户消耗的电能情况，准确地统计各类供电线路、各个用户的实

际用电情况，从而进行合理的调度，以提高电力系统和地区整体的经济效益。此外还能及时发现供电和用电中的问题，确保安全供电和用电，最终达到科学用电、节能降耗的目的。电能计量自动化技术的实现是迈向智能用电的第一步，有助于提高电力系统用电管理的现代化水平，将是电网管理未来发展的主要方向，并已日益引起电力管理部门和电能表及相关行业的关注和投入。

考虑目前厂站电能量遥测系统、大客户负荷管理系统、低压电力用户集中抄表系统技术已经成熟，在电力企业范围内均已经开始推广建设。同时配电变压器监测及管理系统在部分供电部门也做了有益的试点，配电变压器无功补偿技术也开始逐步应用。在线损理论计算工作方面也有长足的进步，建设电能计量自动化系统条件已逐渐成熟。今后电力企业应该是一个全面集成的数字化企业，并能够通过集成化的企业战略框架不断加以改进，以适应电力行业的不断发展。通过建设电能计量自动化系统，解决目前统计线损中数据不全、统计口径不一、计算困难、误差影响因素等实际问题，将线损“四分”管理、需求侧管理落到实处，并统筹考虑各地区大客户负荷管理系统、配电变压器监测计量管理系统、厂站电能量遥测系统、居民集中抄表系统建设方案，避免重复投资、重复开发、重复建设。

因此，适应智能电网的电能计量自动化系统建设已成为智能电网发展的迫切需求。高级计量架构（AMI）是在智能表计与公共企业系统间的通信硬件和软件及相关的系统和数据管理软件共同形成的一个网络，并具备为公共事业单位、客户、零售商等其他机构收集传递数据信息的功能。AMI 是一个用来测量、收集、储存、分析和运用用户用电信息的完整的网络和系统。可见，AMI 是实现供用电环节“信息化、数字化、自动化、互动化”的坚实基础。在 AMI 的基础上，根据各个层面的管理需要，在电厂、变电站、专用变压器大客户、公用变压器和低压客户等环节均设立计量点，安装配套智能计量设备等，然后建立各层的系统，最后将所有系统进行整合集成，最终完成电能计量自动化系统的建设。

随着电力市场的开放，电能计量自动化系统在电力系统中的地位与作用与日俱增，具体体现在电能计量、电量结算、负荷预测、经济运营等。计划经济体制阶段，实行统配电力电量、固定时间、固定电价、计量简单、不带时间标志，在未来的电力市场体制下，采用竞价上网、实时电价、分时电价、严格要求测量数据带有时间标志，因为计量的准确性关系到电能计费结算的准确性，涉及各利益主体的经济效益，并对系统的运行具有参考和指导意义。在电力市场商业化运营下，除了要对设定模式下的电能数据进行分时段、分费率电能统计结算，还要根据电网实时运行状态，对一定特殊情况下的电能进行计量结算。对于负荷预测，在垄断经营条件下，可用限电方式来保持发用电的基本平衡，但在电力市场条件下，任何拉电限电行为都将是违反合同行为，必须进行经济赔偿负荷预测和负荷分析直接关系到各方的利益，因此对负荷预测的准确性要求更高。

电力改革的不断深入，将使电力营销在电力企业中越发被重视起来，无论是发电企业还是供电企业，都清醒地认识到随着电力行业的市场化，打破垄断，引入竞争，提高效率，降低成本，健全电价机制，优化资源配置，促进电力发展，推进全国联网，构建政府监管下的政企分开、公平竞争、开放有序、健康发展的电力市场体系势在必行，电力营销将是电力企业的核心竞争力的重要组成部分。而在电力营销体系当中，电能计量是其中很重要的一个因素。电能要经过发电、输电、配电、变电等多个环节才能输送到最终客户处，发电厂与电网公司之间、电网与电网之间、电网公司内部各供电公司之间、供电公司内部各区所之间、直

至供电所与最终用户之间，都要进行经济结算，而经济结算的依据就是由在电网的各个节点安装的电能计量装置提供的电能信息。因此，建立电能计量自动化系统，以提高电力系统管理自动化水平和经营效益水平已成大势所趋。

1.2 智能电网

1.2.1 智能电网的概念

随着能源需求不断增加，电力市场化的进程不断深入，用户对电能可靠性和质量的要求也在不断提升。电力行业面临前所未有的挑战和机遇，建设更加安全、可靠、环保、经济的电力系统已经成为全球电力行业的共同目标。在这种逐渐变化的环境下，如果建立一个电力系统网络，将能源资源开发、转换（发电）、输电、配电、供电、售电、服务以及蓄能与能源终端用户的各种电气设备和其他用能设施，通过数字化信息网络连接在一起，并通过智能化控制使整个系统得以优化。这一系统将充分利用各种能源资源，特别是低碳的天然气、风、光、水等可再生能源、核能以及各种废弃的资源等，依靠分布式能源系统、能源梯级利用系统、蓄能系统和蓄电交通系统等组合优化配置，实现精确供能、对应供能、互助供能和互补供能，将能源利用效率和能源供应安全提高到一个全新的水平，令环境污染与温室气体排放降低到一个可以接受的程度，使用户成本和投资效益达到一种合理而有利的状态。人们普遍将这样的电力系统网络称为智能电网。

智能电网是以包括发电、输电、变电、配电、用电、调度和信息等各环节的电力系统为对象，不断研发新型的电网控制技术、信息技术和管理技术，并将其有机结合，实现从发电到用电所有环节信息的智能交流，系统地优化电力生产、输送和使用。智能电网的本质就是能源替代和兼容利用，它需要在创建开放的系统和建立共享的信息模式的基础上，覆盖包括从需求侧设施到广泛分散的分布式发电，再到电力市场的整个电力系统及相关环节，促进电力流、信息流、业务流的高度融合和统一。电力企业通过促成技术与具体业务的有效结合，使智能电网建设在企业生产经营过程中切实发挥作用，最终达到提高运营绩效的目的。

1.2.2 智能电网发展历程

智能电网是当今世界电力系统发展变革的最新动向，并被认为是 21 世纪电力系统的重大科技创新和发展趋势。以欧美等发达国家为代表，如欧盟委员会、美国能源部以及各种类型的电力企业与组织，纷纷投入相当的精力，力图尽早取得突破。中国、日本、韩国、加拿大、澳大利亚等也开始注意到电网这一新的发展动向，正在积极推进。

1.2.2.1 美国智能电网

在过去 30 年间，虽然信息、通信技术发生了翻天覆地的变化，但日渐老化的美国电网并没有跟上技术变革的步伐，用户也对电力供应提出了越来越高的要求，国家安全、环保等各方面政策都对美国电网的建设和管理提出了更高的标准。为了争取更多用户，在市场竞争中取胜，美国各电力企业纷纷提高服务水平，加强与用户的交互，提供更多产品供用户选择，最好地满足不同类型用户的需求。与此同时，近年在基础材料、电力技术、信息技术的研究中，出现了不少可以明显改善电网可靠性、效率等运行指标的技术。这些技术的推广应用为电网运行管理水平的提高创造了条件。为解决电网存在的问题，美国电力行业目前普遍公认的解决方案是建设一个基于全新技术和架构的“智能电网”，利用日新月异的信息技术对电网

进行彻底改造，以期建成一个高效能、低投资、安全可靠、灵活应变的电力系统。2001 年，美国电力科学研究院创立了智能电网联盟，推动“IntelliGrid”研究。IntelliGrid 项目有两个目标：①分析出电力系统运行的商业需求，包括现在、未来的各种需求，如自愈电网概念等；②以基于这些分析得出的电力系统的需求作为基础，提出支撑未来电力系统的信息需求系统，使用战术性的方法来建立一个战略视图，以战略的高度建立一个不依赖于具体技术的视图框架。这两个目标明确了未来电力系统是一个融合两种基础设施（电力输送能源基础设施和信息基础设施）的能源系统。这两种基础设施的融合表明，未来的能源系统必须在两个方面同时进行。

为了使美国电网实现现代化，保证经济安全和国家安全，美国能源部（Department of Energy, DOE）于 2003 年发布了“Grid2030”，对美国未来电网远景进行了阐述。DOE 于 2004 年又进一步发布了“国家输电技术路线图”，为实现“Grid2030”进行战略部署。在这两份文件以及工业界的指导下和在 DOE 的支持下，电网智能化项目（GridWise）于 2004 年启动，其目标包括：①利用信息技术对能源系统进行更新换代；②通过发展和部署技术方案，为所有参与者创造商业价值；③通过在电力网络中融合信息技术，促进电力更加稳定可靠，更富灵活性和自适应性；④鼓励用户参与电网，并从中获利。

电网智能化联盟成员包括：跨国技术公司有 AREVA、GE、IBM；电力公司和电网运营商有 AEP（美国电力公司）、巴纳维亚（Bonneville）电力管理局、PJM 及法国电力集团（EDF）等，研究机构有 EPRI、巴特尔（Battelle）、RDS 和 SAIC（科学应用国际公司）等。2005～2006 年，DOE 与美国国家能源技术实验室（NETL）合作，发起了“现代电网”倡议，任务是进一步细化电网现代化愿景和计划，并在全国范围内达成共识。“现代电网”倡议创立一个全国范围内共享的关于现代电网主要特性及关键技术领域的一个蓝图。这个蓝图分析了电网的性能和技术缺口，提出了现代电网的国家级概念，鼓励工业界对现代电网的认可并协调区域技术的集成项目。“现代电网”倡议还建立了现代电网的视图，提出了现代电网的目标、性能、主要特征、关键技术以及评价体系等。它符合 DOE 的使命，并和其他一些工业界的努力和行动形成互补，如 EPRI 领导的 IntelliGrid 项目、Galvin Electric Initiative、GridApps 联盟，还有其他致力于提高国家电网性能的机构。同时，DOE 又成立了电网智能化架构委员会（Grid Wise Architecture Council, GWAC）。该委员会的主要工作是将合适的实体组织起来，促进各电力公用事业单位之间在电力系统方面的互操作性，为互操作概念和标准的发展提供参考准则，为智能电网的实现提供工业层面上的指导和必要的工具。国际电工委员会 IEC 于 2008 年底筹建了 SG3 智能电网战略工作组，以制定智能电网的相关标准，推进智能电网的进程，促进各国在智能电网发展过程中的一致性。智能电网战略工作组于 2009 年 4 月底在法国巴黎召开了首次会议，会议的目的是系统研究现有标准，提出智能电网的标准研究框架。会后战略工作组已开始与 IEC 各专业委员会联系，首先提出与智能电网有关的标准列表，经初步评估和分析后征集各专业委员会意见，研究讨论了建立智能电网标准框架。2009 年 1 月，美国白宫发布的《复苏计划尺度报告》宣布：将铺设或更新 3000 英里输电线路，并为 4000 万美国家庭安装智能电能表。2009 年 4 月，奥巴马政府公布了 40 亿美元智能电网技术投资计划，计划划拨约 40 亿美元的刺激资金用于开发新的电力传输技术，其中 34 亿美元用于智能电网技术开发，6.15 亿美元用于智能电网的演示项目。美国政府希望推动新的人工智能电网的开发，大大提高电力设施的效率。2009 年 6 月，美国又公布了一项简称为“IEEE P2030”

的智能电网标准和互通原则，其核心就是推动电力工程、通信和信息技术的互动。

2009 年 4 月，美国 National Grid 向马塞诸塞州公共事业部提交了一个持续两年、总投资达 5700 万美元的智能电网示范工程项目。该项目将包含新英格兰地区的 15000 个用户，为所有用户安装智能电能表、可编程的恒温器，提供电子账单，并在一些变电站接入可再生能源。公司还计划集成分布式电源和即插即用混合动力汽车。

1.2.2.2 欧洲智能电网

智能电网成为欧洲电网的发展趋势，有其独特的发展背景：其一，经过逾百年的长期发展，欧洲各国的电力系统已走完了以外延扩张为主的发展阶段，早已具备了可以满足经济社会运转需求的较为充裕的输配电供应能力，对电力行业的要求转向了更加高效、灵活、环保且有利于市场化等方面；其二，欧洲各国的能源政策更加强调对环境的保护和可再生能源发展，尤其是风能、太阳能和生物质能等可再生能源的发展是近年来欧盟委员会能源政策的基本着力点和中心目标，因此，基于可再生能源的分布式电源发展成为欧洲电力市场的必然；其三，欧洲天然气管网发达、应用广泛且已市场化，为基于天然气的分布式发电技术的广泛应用提供了良好的能源供应基础和市场基础。

2004 年，欧盟委员会启动了相关的研究与建设工作，提出了在欧洲要建设的智能电网的定义。2006 年欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的 and 安全的电能策略》明确强调欧洲已经进入一个新能源时代，智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。实际上欧洲电网属于分布发电与交互式供电的发展模式，更适宜建立智能电网。因此，智能电网在英国、法国、德国等都有潮流性发展趋势。

作为欧洲 2020 年及后续的电力发展目标，未来欧洲电网应满足如下需求：①灵活性，在适应未来电网变化与挑战的同时，满足用户多样化的电力需求；②可接入性，使所有用户都可接入电网，尤其是推广用户对可再生、高效、清洁能源的利用；③可靠性，提高电力供应的可靠性与安全性以满足数字化时代的电力需求；④经济性，通过技术创新、能源有效管理、有序市场竞争及相关政策等提高电网的经济效益。

2006 年 4 月，未来电力网络技术平台顾问委员会发布了《欧洲未来电力网络视图和战略》(Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future)。在这个视图中指出，未来的电力市场和网络必须能为用户提供一个可靠、灵活、可访问和低成本的电力供应系统。充分利用大型集中的发电厂和小型分布式的电源。终端用户在电力市场和电网上均体现更重要的互动性。电力将由集中和分散的电源提供，电网系统在欧洲各层次上更加互联，促进安全和高效。这个新概念的电力网络称为智能电网视图。

随着智能电网视图的发布，顾问委员会在来自大学、策办以及电力企业的支持和建议下，研究机构、工业界发展了战略研究议程 (Strategic Research Agenda, SRA)。SRA 有 5 个主要的研究领域，并共分成 19 个研究任务。这是一个战略性的文件，希望告知、鼓励和简化欧洲及各成员国之间研究项目上的一致性。SRA 是一个加强各利益相关者共同研究的参考性文件，它为未来的研究项目提供了一个框架。

2007 年，欧洲委员会发布了最新的第七框架计划 (The 7th Framework Programme, FP7)，执行期从 2007 年 1 月到 2013 年 12 月，旨在使欧洲经济成为最富活力、最具竞争力的经济体。该计划包括 10 个子项目，其中第 5 个和第 6 个分别为能源和环境（包括气候变暖）。这两部分和电力工业的发展息息相关，将直接影响电力工业的革新。能源子项目主要包括氢能源

和燃料电池、可再生电力、再生燃料生产、供热供冷的再生、CO₂ 捕获和储存以实现零排放发电、洁净煤炭技术、智能能源网络、能效和节能以及能源决策分析知识。

能源计划的发布将进一步促进欧洲智能电网的发展和部署。

2008 年底，欧洲公用事业电信联合会（UTC）发布了一份名为《智能电网——构建战略性技术规划蓝图》（*Smart Grids: Building a Strategic Technology Road map*）的报告，以帮助公用事业公司做充分的规划准备工作，进而更好的制订智能电网发展计划，实现智能电网的发展目标。

在智能电网的实践方面，欧洲已经有大量的电力企业如火如荼地开展智能电网建设，内容覆盖发电、输电、配电和售电等环节。

意大利的电力公司早在 2001 年就安装和改造了约 3000 万台智能电能表，实现自动抄表和管理，建立一个全新的、智能化计量管理网络。该项目的实施预计为该电力公司节省约 5 亿欧元管理费用；高峰负荷减少 2.5% 以上，优化和减少电网建设和改造投资；客户服务成本降低 40% 以上；电费回收周期减少 2 天，计费不准引起的纠纷减少 50%，欠费问题减少；提高了对客户用电需求和负荷模式的认识水平以及服务水平，更好的编制供电计划；基于实时客户需求，创造新的服务，增加企业收入。

1.2.2.3 韩国智能电网

韩国电力系统自 1970 年随着经济的发展而不断发展。2006 年，韩国总发电容量达到 64.5GW，峰值电量达到 58.99GW。预计到 2020 年，韩国电力将保持稳步增长，这就需要未来在发电、输电、配电等方面巨大的投资。

为了满足韩国电力未来的需求，韩国需要持续建设传统的大型热电厂，包括核电、煤电、液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG）等。但是由于环保要求的限制，建设这样大的电厂已经越来越困难了，导致韩国电力系统不断地出现各种分布式能源，如冷热电联供、风电和太阳能发电等，这些分布式能源的出现对电力系统的运行和控制增加了难度。

韩国政府启动的“电力信息化工程”于 2004 年 12 月开始，为了增强电力系统的可靠性和安全性，通过资产管理减少运行维护费用，通过需求响应增加电力市场效率，提供新的电力行业服务，为制造厂提供新的商业机会。参加电力信息化工程的单位和部门有 100 多个，主要包括知识经济部、电力信息化国家项目中心（CPIT）、KEPCO、KPX、KERI、LSIS、Hyosung 重工业公司、Hyundai 重工业公司、KDN、半导体高级研究联盟、韩国电力工业技术研究联盟、韩国电力制造协会、韩国电力工程和科学研究机构等。该工程在 2005~2010 年提供大约 2000 亿美元的经费，主要用于 10 个大型的项目、10 个小型的项目，还有两个基础设施项目。大型项目的研究时间是 4~5 年，而小型项目是 1~2 年。小型项目是用来支撑重点项目或者是作为重点项目间的连接桥梁。两个基础设施项目包括研究生和工业研究人员的教育和培训项目，电力 IT 相关的系统、设施和设备等的标准化研究。韩国信息化工程是由一系列独立的项目组成，每个项目都基于其自身的研究内容和技术范畴来发展，每个项目都包含用途、应用主题、服务和基础设施。该工程总共由 10 个项目组成，这些项目及其涉及的领域如下：

- （1）韩国能量管理系统；
- （2）基于 IT 的柔性交流输电系统；
- （3）智能输电网络监测和运行系统；

- (4) 基于数字控制技术的高级变电站自动化系统;
- (5) 智能配电管理系统;
- (6) 电力设施监测的主动遥测系统;
- (7) 用于 IT 能量商业服务的用户人口系统;
- (8) 宽带电力线通信;
- (9) 用于分布式发电和工业逆变应用的电力半导体;
- (10) 服务于微网的能量管理和测试系统。

在这 10 个研究项目中,第 3 项、第 8 项和第 9 项主要用于实现智能电网的设备和组件的发展。尽管韩国电力信息化工程的方法是基于每个独立的项目,但是整个智能电网的实现可以通过集成每一个技术和项目来完成。2009 年 3 月,韩国政府宣布计划建立一个智能电网综合性试点项目,届时能提高韩国环保能源的能力。韩国知识经济部认为这种电网能将普通导线和 IT 技术以及卫星通信系统结合起来,可实时监控电力需求和输出。韩国知识经济部将大力推进利用 IT 技术将电力网智能化的商用化。韩国知识经济部决定,2009~2012 年,投入 2547 亿韩元开发商用化技术,并将名称定为绿色电力 IT。绿色电力 IT 是在发电站、送电塔、电线杆、家电产品上安装传感器,生产、流通各种电力信息的技术,主要包括智能型能源管理系统、基于 IT 的大容量电力输送控制系统、智能型送电网络监视及运营系统、电线通信普及技术等。韩国希望在未来 20 年内将绿色能源在总能源中所占的比例由 2.4%提高到 11%,智能电网将会是这项工作的一部分。

1.2.2.4 中国智能电网

我国电力工业也面临着类似于欧美国家的情况:在宏观政策层面,电力行业需要满足建设资源节约型和环境友好型社会的要求,适应气候变化的需要;在市场化改革层面,交易手段与定价方式正在发展,市场供需双方的互动将会越来越频繁。这说明智能电网建设也将成为我国电网发展的一个新方向。另外,我国的电网规模正在快速扩张,用户的用电行为也在发生变化。以建设智能电网为抓手,借助电网扩张的机遇,能够比较方便地建成满足未来需要的下一代电力网络,直接占领电网技术的最高点。

我国关于智能电网方面的研究进展缓慢,2007 年 10 月,华东电网公司启动了智能电网可行性研究项目。2008 年,国家电网公司开始推行电力用户用电信息采集系统,规划用 3~5 年时间实现全网的电能信息采集,实现“全覆盖、全采集、全预付费”的目标。在 2009 年 5 月举行的特高压输电技术国际会议上,国家电网公司正式对外公布了“坚强智能电网”计划。国家电网公司同时提出规划和目标:将按照统筹规划、统一标准、试点先行、整体推进的原则,在加快建设由 1000kV 交流和 ± 800 、 ± 1000 kV 直流构成的特高压骨干网架,围绕发电、输电、变电、配电、用电、调度等主要环节和信息化建设等方面,分阶段推进坚强智能电网发展。

国家电网公司将分三个阶段推进坚强智能电网建设:2009~2010 年是规划试点阶段,重点开展坚强智能电网发展规划,制定技术和管理标准,开展关键技术研发和设备研制,开展各环节的试点;2011~2015 年是全面建设阶段,将加快特高压电网和城乡配电网建设,初步形成智能电网运行控制和互动服务体系,关键技术和装备实现重大突破和广泛应用;2016~2020 年是引领提升阶段,将全面建成统一的坚强智能电网,技术和装备达到国际先进水平。届时,电网优化配置资源能力大幅提升,清洁能源装机比例达到 35%,分布式电源实现“即

插即用”，智能电能表得到普及应用。

1.2.3 通信与量测技术

1.2.3.1 通信技术

建立高速、双向、实时、集成的通信系统是实现智能电网的基础，没有这样的通信系统，任何智能电网的特征都无法实现，因为智能电网的数据获取、保护和控制都需要这样的通信系统的支持，因此建立这样的通信系统是迈向智能电网的第一步。同时通信系统要和电网一样深入到千家万户，这样就形成了两张紧密联系的网络——电网和通信网络，只有这样才能实现智能电网的目标和主要特征。高速、双向、实时、集成的通信系统使智能电网成为一个动态的、实时信息和电力交换互动的大型的基础设施。当这样的通信系统建成后，它可以提高电网的供电可靠性和资产的利用率，繁荣电力市场，抵御电网受到的攻击，从而提高电网价值。

高速双向通信系统的建成，智能电网通过连续不断地自我监测和校正，应用先进的信息技术，实现其最重要的特征——自愈特征。它还可以监测各种扰动，进行补偿，重新分配潮流，避免事故的扩大。高速双向通信系统使得各种不同的智能电子设备（Intelligent Electronic Device, IED）、智能表计、控制中心、电力电子控制器、保护系统以及用户进行网络化的通信，提高对电网的驾驭能力和优质服务的水平。

在这一技术领域主要有两个方面的技术需要重点关注：其一就是开放的通信架构，它形成一个“即插即用”的环境，使电网元件之间能够进行网络化的通信；其二是统一的技术标准，它能使所有的传感器、智能电子设备（IED）以及应用系统之间实现无缝的通信，也就是信息在所有这些设备和系统之间能够得到完全的理解，实现设备和设备之间、设备和系统之间、系统和系统之间的互操作功能。这就需要电力公司、设备制造企业以及标准制定机构进行通力合作，才能实现通信系统的互联互通。

1.2.3.2 参数量测技术

参数量测技术是智能电网基本的组成部件，先进的参数量测技术可获得数据并将其转换成数据信息，以供智能电网的各个方面使用。它们评估电网设备的健康状况和电网的完整性，进行表计的读取、消除电费估计以及防止窃电、缓减电网阻塞以及与用户的沟通。

未来的智能电网将取消所有的电磁表计及其读取系统，取而代之的是可以使电力公司与用户进行双向通信的智能固态表计。基于微处理器的智能表计将有更多的功能，除了可以计量每天不同时段电力的使用和电费外，还有储存电力公司下达的高峰电力价格信号及电费费率，并通知用户实施什么样的费率政策。更高级的功能有用户自行根据费率政策，编制时间表，自动控制用户内部电力使用的策略。

对于电力公司来说，参数量测技术给电力系统运行人员和规划人员提供更多的数据支持，包括功率因数、电能质量、相位关系（WAMS）、设备健康状况和能力、表计的损坏、故障定位、变压器和线路负荷、关键元件的温度、停电确认、电能消费和预测等数据。新的软件系统将收集、储存、分析和处理这些数据，为电力公司的其他业务所用。

1.3 高级计量架构

最近几年，得益于通信技术和信息技术的长足进步，以及环境保护方面政府条例的推动，

高级计量架构（AMI）因其在系统运行、资产管理特别是负荷响应所实现的节能减排方面的显著效果而成了整个电力行业最热门的项目。AMI 是一套完整的包括硬件及软件的系统。它利用双向通信系统和能记录用户详细负荷信息的智能电能表，可以定时或即时取得用户带有时标的分时段的或实时（或准实时）的多种计量值，如用电量、用电需求、电压、电流等信息。因此，AMI 是智能电网的一个基础性功能模块，也称为智能量测体系（SMI），AMI 的技术和范畴还在不断地发展。

1.3.1 AMI 的概念

AMI 并非一个独立的技术实现过程，而是一个全面可配置的基础设施，并且必须集成于现在和将来的电力网络和运行过程之中。这个基础设施主要包括家庭网络系统、智能表计、本地通信网络，连接电力公司数据中心的 Back-haul 通信网络、表计数据管理系统以及数据集成平台等。此外，AMI 提供了一个向整个电网智能化的智能过渡。

在用户层面上，智能表计同时将耗能情况传递给本地用户和电力公司。智能表计通过本地实时数据显示告知用户耗能情况，而电力公司提供的实时电价信息则有利于本地负荷控制设备调节耗电量。高级用户还会根据电价信息布置分布式能源，通过分析 AMI 数据实现智能的节能方案。

电力公司利用 AMI 的历史数据和实时数据来帮助优化电网运行，降低成本以及提升用户服务，如通过 AMI 提供的实时的用户停电信息和电能质量信息，电力公司能快速分析电网的不足。AMI 的双向通信能力支撑电网在变电站级和线路级的自动化。通过 AMI 获得大量数据有利于企业资产的改进或者更好地进行资产维护、增加或者替换。所有这些都将使电网更加高效和稳定。

2006 年 8 月，在法律及自由市场贸易的驱动下，美国联邦能源政策委员会定义了 AMI 的概念：AMI 是一个计量系统，它能够每小时或以更高频率记录用户的用电行为或者其他参数，并通过通信网络将测量的数据传送到一个中心。

高级计量架构建设包含智能电能表、通信系统、电能表资料管理及相关应用程序等软硬件的建设与开发。根据国外建设经验，AMI 可提供诸多优点，如量测及收集能源使用咨询，支援紧急尖峰电价计量的用户计费；提供用户了解能源使用状态并进行节能；支持传送信号进行用户负载控制，以应付电价改变的自动响应；支援故障侦测、故障定位及复电等停电管理；进行变压器及馈线等配电设备资产管理；改善负载自动预测；用户用电品质管理；提升线路损失计算精确度；减少区域线路阻塞；降低不平衡率等。

2008 年被美国加州公共电业委员会（California Public Utility Commission, CPUC）将加州的 AMI 列为重点方向，并核准美国 PG&E、SDG&E、SCE 等电力公司建设 AMI。CPUC 提出的 AMI 建设计划必须针对每项功能需求做详细的投资成本与效益分项分析，且必须体现成本效益才能被 CPUC 核准，加州 AMI 需达到下列 5 项最基本的功能需求准则：

- （1）支持各种不同价格反映的费率，如紧急尖峰电价方案、时间电价、即时电价；
- （2）记录使用效率并提供用户每小时用电性能与能源成本的相关性等资讯；
- （3）相容于用户教育及能源管理资讯、开制电费单及申诉的解决等应用；
- （4）相容于提升系统运转效率及改进供电可靠性的电力系统运用；
- （5）提供负载控制通信技术界面功能。

部署高级计量体系是实现电网智能化的基础工作。AMI 为满足智能电网的互动特性

提供了框架性基础。AMI 是一种集成技术，能够使电力事业单位和用户之间实现智能通信，可为用户提供进行决策所需要的信息，提供执行决策所需要的能力，以及其他一系列可选功能。电力事业单位能够根据 AMI 提供的数据更精细地维持电力运行和资产管理，从而更好地为用户服务。通过将多项技术（如智能计量、家庭网络、集成通信、数据管理应用以及标准软件接口等）集成于电力运行以及资产管理过程中，AMI 提供了一个必要的纽带来联系电网、用户及其负荷、发电和存储装置。这些联系是实现智能电网的基本要求。

现代电网中定义的七个特性都将进一步依赖于 AMI：

- (1) AMI 增强了用户参与电网的主动性和积极性；
- (2) 通过 AMI 技术实时监视和控制用户周边的分布式发电和储能装置；
- (3) 通过 AMI 技术联系用户和电网，增加市场的活跃性，用户主动参与电网，根据价格信息调整负荷或将能源输送给电网；
- (4) AMI 智能表计装备电能质量检测模块能快速测量、诊断、调整电能质量；
- (5) AMI 能实现分布式的电网运行模型，从而减少外界对电网攻击的影响；
- (6) AMI 通过快速而精确的辅助停电管理系统以及故障定位系统来实现电网自愈，同时，AMI 能提供一个广域的分布式通信体系来加速高级配电运行（Advanced Distribution Operation, ADO）的应用；
- (7) AMI 提供了精细和及时的数据信息，有利于更好地改进资产管理和电网运行。首先，有关客户需求和使用模式的详细而精确的数据能帮助电力企业选择合适的设备投资；其次，通过防窃电、推迟投资、预期维修设备等办法，可帮助电力公司监控和更有效地使用配电设备，将电能可靠地分配到客户。

AMI 是实现智能电网的 4 个主要里程碑中的第一个，这 4 个里程碑分别是：高级计量架构（AMI）、高级配电运行（ADO）、高级输电运行（Advanced Transmission Operation, ATO）、高级资产管理（Advanced Asset Management, AAM）。通过顺序跨越上述里程碑，有利于智能电网的成本效益控制。合理安排各里程碑跨越的先后顺序，将有利于前期成果的利用，从而加速后期里程碑的跨越，如表 1-1 所示。

表 1-1 各里程碑先后实践顺序为后续提供的作用

AMI	(1) 同用户建立通信联系； (2) 提供带时标的系统信息
ADO	(1) 使用 AMI 的通信收集配电信息； (2) 使用 AMI 信息改善运行
ATO	(1) 使用 ADO 信息改善运行和管理输电阻塞； (2) AMI 使用户能够访问市场
AAM	使用 AMI、ADO、ATO 的信息与控制，改善运行效率和资产使用

1.3.2 AMI 的组成及结构

一个 AMI 系统是由若干技术和应用组成的，AMI 是许多技术和应用集成的解决方案。它的 4 个主要组成部分是：智能电能表、通信网络、量测数据管理系统（Meter Data Management System, MDMS）和用户户内网络（Home Area Network, HAN）。图 1-1 给出了 AMI 的结构示意图。