

能源互联网信息通信关键技术综述

王继业¹, 郭经红², 曹军威³, 高灵超¹, 胡紫巍², 周静², 明阳阳³, 方正伟¹

(1. 国家电网信息通信部; 2. 国网智能电网研究院; 3. 清华大学信息技术研究院)

Review on Information and Communication Key Technologies of Energy Internet

Jiye Wang¹, Jinghong Guo², Junwei Cao³, Lingchao Gao¹, Ziwei Hu², Jing Zhou²,

Yangyang Ming³, Zhengwei Fang¹

(1. Information and Communication Department of State Grid, 2. State Grid Smart Grid Research Institute

3. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University)

ABSTRACT: The large-scale exploitation and utilization of renewable energy will become a major global energy development trends. How to implement extensive interconnection of distributed renewable energy and how to increase energy efficiency and flexibility of the energy system are key problems. Energy Internet based on the concept of the Internet has become the main trend in this area. Energy Internet will bring great changes to energy exploitation, allocation, consumption and all aspects of human life, and this series of changes bring a more comprehensive and stringent requirements to information and communication systems. This paper full analyses features for Energy Internet and needs for information and communication technologies, and then presents the information and communication architecture for Energy Internet based on power electricity. Against the background of the Energy Internet application, paper introduces more than twenty key information and communication technologies from collecting and monitoring, processing, analysis decision, fundamental resource, security guarantee and support system. At last, prospect on hot spots and the development direction of Energy Internet is concluded.

KEY WORDS: Energy Internet, renewable energy, information and communication technology, architecture.

摘要: 可再生能源的大规模开发和利用将成为全球能源领域发展的主要趋势,同时也面临如何实现分布式可再生能源的广泛互联、如何提升能源系统效率和灵活性等问题与需求,以互联网理念为基础的能源互联网成为行业主要发展方向。能源互联网将给能源开发、配置、消费和生产生活各环节带来变革,这一系列变革对信息通信系统提出了更加全面而严苛的需求。本文充分分析能源互联网及其信息通信技术的需求,给出了以电能为载体的能源互联网信息通信总体架构,并以能源互联网为应用背景,介绍了采集监控类、流程作业类、分析决策类、基础资源类、安全保障类和支撑体系类共二十余项信息通信关键技术,最后对能源互联网的热点应用及发展方向做出了展望。

关键词: 能源互联网; 可再生能源; 信息通信技术; 架构。

1 能源互联网概述

1.1 能源互联网的产生背景

随着互联网应用在全世界普及,人类的生产生活在互联网技术驱动下也不断发生改变。同时,互联网正在不断向各行各业渗透。基于此发展趋势,各国纷纷提出了自己的互联网驱动工业技术进步发展策略。如美国的第三次工业革命和Grid2030,德国的工业4.0,中国的坚强智能电网、感知中国、“互联网+”以及中国制造2025等。这些计划的重要特征在于利用通信技术、互联网技术和物联网技术对传统行业进行改造。

为应对石化能源消耗带来的环境等问题,世

界各国都部署开发利用可再生能源战略,并提出了今后20~50年的全球能源转型目标。虽然可再生能源具有分布广、可再生的特点,但也存在生产间歇性,能源密度低的缺点,需要进行大规模部署,并用一种形式将其互联起来,使之互通有无,提高效率,降低成本。现有全球能源供给体系仍存在着互联程度不够,接入和使用不灵活,开放性不够,用户参与性不高等问题,在第三次工业革命的思潮下,能源互联网的概念被提出并逐渐受到业界关注^[1-4]。

1.2 能源互联网与信息互联网

能源互联网借鉴了信息互联网的相关特征,但

同时也有所区别，双方在网络功能、结构、设备、协议、服务、安全和服务对象等方面有所类似和不同^[5-9]。具体区别和关联见下表：

表 1 信息互联网与能源互联网对比

维度	信息互联网	能源互联网
网络功能	实现一个通信、传输和信息共享的基础平台。	采用信息-物理融合技术，保证电能能源的按需传输和交换共享。容易接入分布式可再生能源。
	实现人与人，人与机器之间的通信。	实现人与物，物与物之间的通信。
网络结构	广域网：信息互联网的广泛接入。	大区域输电网(特高压，超高压，高压)。
	城域网：信息互联网在城市内的接入。	城市配电网(中压)。
	局域网：包含个域网，实现信息互联网的区域性接入。	小区电网和微网(低压)。
网络协议	OSI 协议。 基于 TCP/IP 协议栈。	暂无。
网络服务	信息接入、信息结算、信息消费	电力接入、电力结算、电力消费。
	通过 www(基于 DNS) 进行内容查找。	通过用户标识、设备标识和 IP 地址进行查找
	通过 SNS 进行社交活动。 通过 E-mail 交换信息。	通过信息手段进行沟通
网络设备	网络交换机：局域网内部数据交换。	能源交换机：微网，小区内部电力交换。
	网络路由器：广域网数据交互。	能源路由器：不同微网间能量传输控制与交换。
网络安全	防火墙、入侵检测设备、隔离设备。	保护装置，继电保护和自动化设备。
服务对象	信息提供者。	能量提供者。
	信息消费者。	能量消费者。

能源互联网和信息互联网本质上均采用互联

网思维，但能源互联网需要利用低层的信息传输为能量传输进行控制与服务，且对电能质量要求高，需要实现信息传输与能源传输的有效耦合。

借鉴信息互联网的发展趋势，能源互联网将向着扁平化、分散式域控制，以及以能量为中心的网络通信(类似于信息中心网络，实现能量与位置分离)等方向发展^[10-15]。然而，能源互联网不能只借用因特网的形式表征，还需要从本质规律和体系架构上进行深入研究。

1.3 能源互联网与智能电网

能源互联网通过分布式采集和使用的交互形式，结合互联网平台技术，实现能源互联和公众对能源的共享^[16]。电力能源属于二次能源，其发电和用电可以不受距离的影响，瞬时完成能量的传输，实现对能源的实时使用。而其它主要一次能源只能以分散的形式进行运输和使用，其清洁性、安全性和传输效率远不如电力能源。因此，目前所形成的能源系统是以电力承载为最终形态，能源互联网也主要通过电力互联网的形态体现。

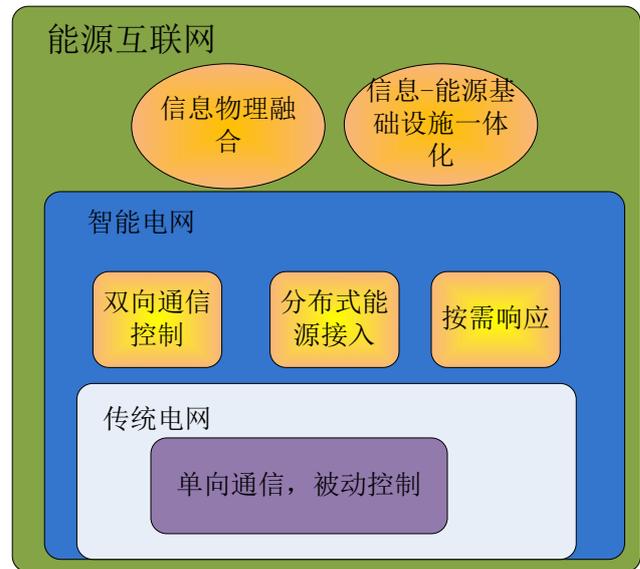


图 1 从智能电网到能源互联网

如图 1 所示，根据电力系统的发展历史和技术特点，信息通信与电力结合发展可分为三个阶段^[13]：

第一个阶段为数字化、信息化阶段。此时，信息通信为能源电力行业提供服务，带来方便、快捷等好处。但传统电网存在着单向通信，被动控制的缺点。

第二个阶段为智能化阶段，也就是智能电网阶段。在该阶段，信息通信成为能源电力基础设施不

可或缺的组成部分，以信息流与能量流的结合为特征。

第三个阶段为信息物理融合阶段，也就是信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网阶段。

随着分布式可再生能源的大量并网，以智能电网为核心的全球能源互联网已成为历史发展的必然选择，也将成为第三次工业革命的基石。

本文的总体结构如下：

第一章为能源互联网概述，具体描述能源互联网的内容和发展现状。第二章介绍能源互联网特点和信息通信需求。第三章介绍能源互联网信息通信总体架构。第四章进行能源互联网信息通信技术综述。第五章介绍能源互联网热点应用。第六章进行能源互联网的展望。

2 能源互联网信息通信需求和特点

2.1 能源互联网信息通信技术需求

能源互联网对信息通信能力的需求可总结为以下五个方面：

第一，多样的信息采集能力和灵活的网络接入能力。分布式能源以多种形式接入电网，需要适应不同环境的信息采集方式和网络通信方式，灵活的网络接入可以保障已有网络的稳定运行。从另一角度看，多种网络接入方式可便于广大用户随时随地参与到能源交易中。

第二，高速可靠的网络传输能力和海量信息存储能力。能源互联网的发展必然带来海量数据，而高速可靠的网络传输能力可以实现局域内部信息共享和广域信息实时交互，海量信息存储能力可以保障数据资源的全面和完整。

第三，高效的数据处理能力和规范的业务处理能力。能源互联网同样将面临数据洪流问题，高效的数据处理能力可以实现数据有效筛选与管理，规范的业务处理能力能够保障企业标准化高效运作，为用户提供更优质的服务。

第四，智能的数据分析和决策能力。能源互联网主要目标是实现能源网络内部和之间的能源合理配置，实现绿色高效，而智能分析与决策能力将是实现这一目标的关键。

第五，强大的网络和信息安全保障能力。能源安全、电力交易等关系到国家稳定和广大用户的切身利益，工控安全、网络安全和信息安全都是能源互联网建设必不可少的环节。

面向未来能源互联网的构建，须建设开放、泛

在、智能、互动、可信的下一代电网信息通信基础设施，实现信息通信从内部支撑电网业务为主，到“对内支撑业务，对外服务大众”并重的转变。

2.2 能源互联网信息通信特点

信息通信技术已经成为现代工业信息化、智能化发展的关键要素。基于能源互联网对信息通信技术的上述需求，支撑能源互联网信息通信技术需具备以下特点：

开放互联。传统的电网、天然气网等为代表的能源网络基本处于自封闭状态，而能源互联网则要实现开放性，需要可再生能源、储能以及用能装置的“即插即用”，实现产能与用能实体的灵活接入和实时平衡，完成区域到广域的能源互联，这需要跨能源域、多种形式能源实体的互联协议的支持。开放互联是能源互联网体系构建的基本特征，为能源信息交互与精确控制提供前提条件。

对等分享。与传统电网自顶向下的树状结构相比，能源互联网的形成为自下而上能源自治单元之间的对等互联。在能源互联网架构体系中，所有包括大规模发电厂、储能站、家庭用户在内的能源实体都以对等的形式存在，任何能源连接在网络中都是动态互为备用，对能源互联网的分布式形态有很好的支撑，具有很强的灵活性，且可以保证冗余和可靠性。此外，能源互联网借鉴互联网的信息分享机制，实现不同子网、区域关键信息的共享，从而支撑跨域能源调度与管理。

智能高效。与传统电网相比，能源互联网的智能化突出体现在多种能源的协同传输与控制、强调用户与能源基础设施与平台的互动操作和能源互联网智能化认知体系。而能源互联网的高效性则体现在能源接入与能源网络架构的灵活高效设计、能源储存转发和调度的高效响应机制和能源互联网状态分析与决策的快速计算能力等方面。

3 能源互联网信息通信总体架构

以电网为基础的能源互联网是能源与信息深度融合的复杂系统，未来电网在能源传输、能源接入和控制、能源消费等领域将发生深刻的变革，而信息通信技术（ICT）则是这次变革中的催化剂和支撑器。

如图2所示，ICT系统在能源互联网中的作用类似于人体高度发达的智慧系统，自上而下分别是决策分析层、流程作业层、采集控制层和公共基础资源层技术，网络与信息安全技术是人体强大的免

疫系统。

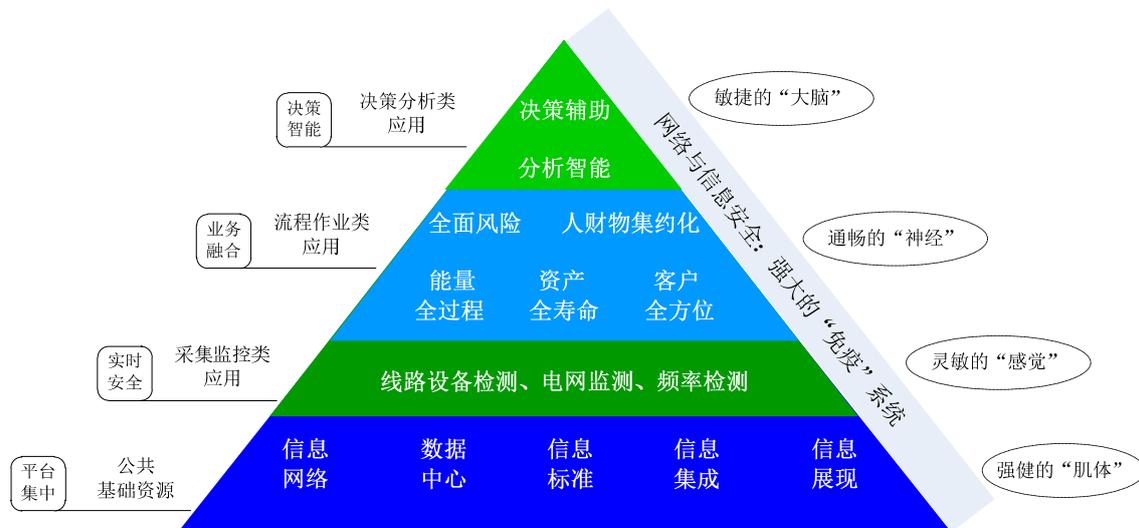


图 2 能源互联网中的 ICT 系统

其中最高层的“决策分析层”类似于人体的“大脑”，通过接收来自电网全身各处传入的信息，采用大数据、模式识别、人工智能等先进信息技术进行信息加工、协调和处理，成为协调电网整体行动的决策信号，或者存储在大脑内成为电网学习、记忆和“思考”的神经基础；“采集监控层”类似于人体的“感觉”系统，通过对电网相关设备、线路状态进行在线的数字化采集，时刻感知智能电网各环节的各种状态，实现各环节重要运行参数在线监测和控制，同时在大脑（决策分析层）的控制下完成对外部的一切反映；“流程作业层”类似于人体的“神经”系统，将电网末梢（采集监控层）感知、收集的一切外部信息在基本的作业和流程层面进行处理、加工和反馈，实现对系统或设备的高效管理、控制，此外，该层还将处理后的部分信息汇聚到神经中枢，起着承上启下的作用；“公共基础资源层”类似于人体强健的肌体，支撑上述各层功能的基本实现，包括实现各类数据安全传输通信信息网络、各类数据存储和处理的数据中心以及实现各类数据展现的企业门户等，其中，网架坚强、广泛覆盖的信息通信网络是支撑未来电网信息可靠传输的基本要素。“网络与信息安全层”类似于人体强大的免疫系统，是电网的重要支撑系统，贯穿电网各个生产环节，通过“攻（攻击）”、“防（防范）”、“测（检测）”、“控（控制）”和“管（管理）”等措施，实现全方位的信息通信安全保障。

上述五个层面的信息通信技术从平台集中、安全实时、业务融合、决策智能 4 个方面推进对能源

互联网的支撑。一方面，通过打造一体化的信息通信平台（如，信息通信网络、数据集成与共享平台、大数据平台、云计算服务平台等），实现发电、输电、变电、配电、用电和电网调度六大环节信息的采集、传输、存储、处理和展现，实现电力流与信息流的深度融合；通过对六大环节的规划设计、建设、运行、管理全链条的信息化支撑，实现电力流与业务流的紧密协作、高效运转。另一方面，不断提升信息通信全方位服务能力（如：终端接入能力、通信交换能力、数据存储与处理能力、访问渠道等），构建开放互动、决策智能的电网业务应用系统，推进信息通信对电网全业务应用的深度覆盖，实现信息流与业务流的高度共享。通过充分发挥 ICT 的“智慧系统”作用，使电网生产和经营业务的信息贯通六大环节以及规划、设计、建设、运行等生产经营全过程，实现电力流、业务流、信息流“三流合一”，形成了信息与电网的信息物理融合系统，如图 3 所示。

能源互联网信息通信总目标是通过广泛应用云计算、大数据等最新信息技术，建设信息高度共享、业务深度协同、用户灵活互动、覆盖面更广、集成度更高、实用性更强、安全性更好的一体化信息通信系统，构建“大平台、微应用、多场景”，贯穿电网各环节，实现生产控制、经营管理、市场服务 3 大领域的业务与信息化的融合，打造经营决策智能分析、管理控制智能处理、业务操作智能作业的 3 层智能决策，实现电力流、信息流、业务流“三流合一”，全面支撑能源互联网发展。

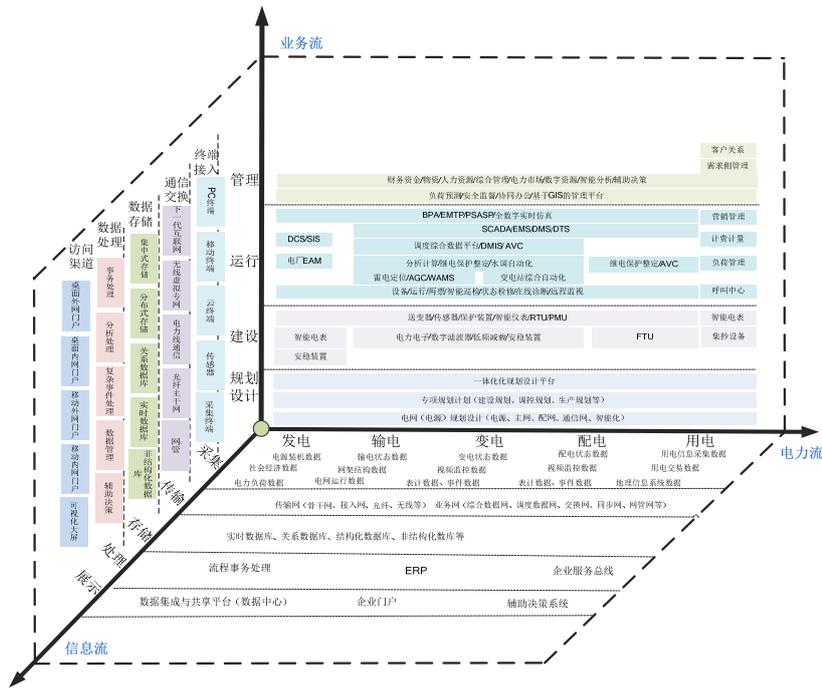


图 3 能源互联网中的“三流合一”

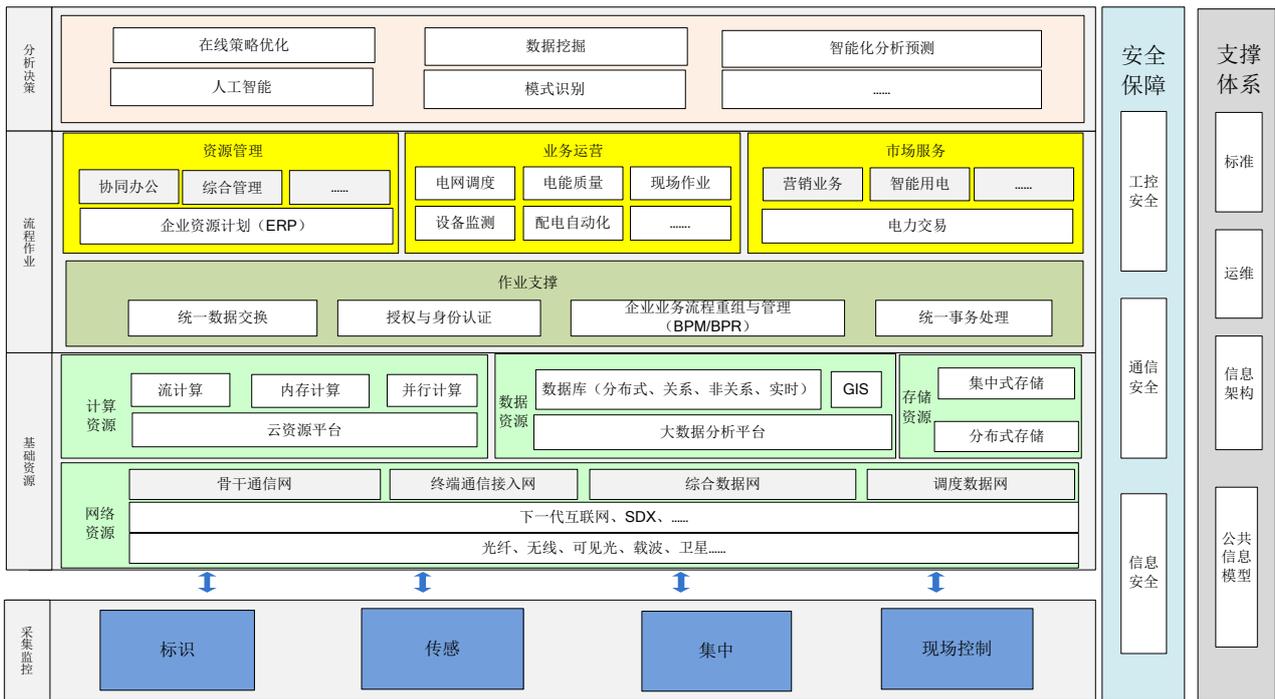


图 4 能源互联网信息通信体系结构

围绕总体目标，本文提出的能源互联网信息通信体系结构如图 4 所示，该技术架构总体上可以分为四层两纵，四层分别是指采集监控层、基础资源层、流程作业层和决策分析层，两纵分别是指安全保障体系和支撑体系。

4 能源互联网信息通信关键技术

本章将结合图 4 中的能源互联网信息通信体系

架构，从采集监控类、流程作业类、分析决策类、基础资源类、安全保障类、支撑体系类共六个方面介绍能源互联网中的信息通信关键技术。

4.1 采集监控类

采集监控是能源互联网运行的基础，采集监控结果的实时性、精确性和完整性决定了能源互联网的整体性能。采集监控类包含标识、传感、集中、

现场控制等四类技术。

4.1.1. 标识技术

标识技术包括 RFID、二维码、三维码、生物特征识别（虹膜、指纹）等，其中 RFID（射频识别）技术在电力系统应用最为广泛。

利用 RFID 技术结合定位技术，可以实现智能电网中的资产管理和远程信息管理系统构建^[17-19]。同时，在电力线上实现 RFID 技术也有人提出^[20]。

能源互联网中，人与设备或设备与设备之间的通信必不可少，随着技术的发展，RFID 标识技术将与传感等技术相融合，实现标识、传感、控制的一体化，其感知距离和准确度也将大幅提高。

4.1.2. 传感技术

传感功能一般通过使用嵌入式传感器（或传感器网络），对电网内主要设备、线路和环境进行监测或控制，采集设备的状态量、电气量或量测量。

用于电力的物联网传感器网络已经被广泛研究，包括信息模型及其应用^[21]，可以帮助数据包避开拥塞区域的路由协议^[22]，及其在网络的安全性问题^[23]。基于传感器网络，用于电网需求侧能量管理的网页服务也被提出^[24]，可以为智能家居节省能源。

传感是智能感知和智能量测的基础，在能源互联网中将得到广泛应用。传感设备将向着网络通信自组织化、高带宽利用率、受环境影响小、能源自供给等方面发展。

4.1.3. 信息集中技术

为了合理利用网络频谱资源和时间资源，减少传输开销，本地信息集中具有重要意义。

考虑集中器的影响，有团队对电网的智能测量基础设施的性能估计进行了仿真研究^[25]，上传数据在本地集中。基于 PMU 设备，可以通过优化相位集中器安装减少智能电网广域监测系统的流量^[26]。另外，不同等级的数据集中对远程监控和控制系统的性能也存在影响，如端到端通信时延^[27]。

由于能源互联网所收集的数据量巨大，且存在着噪声和丢失，因此数据集中将是一项很有价值的工作。未来的数据集中将着重于提高本地信息处理性能和效率，降噪，提取本质特性数据等方面。

4.1.4. 现场控制技术

利用电力网络通信，可以对相关设备进行自动化现场控制，主要控制设备包括变送器、保护装置，

继电保护和自动化设备等。受控设备可以及时接收网络故障定位结果，自动实现故障隔离，保护相关设备。

智能功率管理系统可以实现对无人子站的完全自动控制^[28]。而且，智能系统控制与智能电网之间存在相互促进作用^[29]。有文献提出将扩展智能量测基础设施用于分布式自动化的概念，并介绍了标准化体系结构^[30]。

自动化现场控制在能源互联网中显得更加重要，因其需要支持分布式能源的大规模接入和保证网络运行的平稳性。现场控制系统将向着信息网络全覆盖，完全自动化和通信低时延保证等方向发展。

4.2 流程作业类

为了支撑能源互联网业务流转、系统集成、数据交换，需要研究能源互联网流程类技术。流程作业主要包括企业流程管理与业务重组、授权与身份认证、数据交换、事务处理、企业资源计划和电力交易等技术。

4.2.1. 企业流程管理与业务重组（BPM/BPR）

信息通信在 BPM/BPR 中应用主要是提供企业流程平台、企业流程监控工具、流程辅助分析和监控工具，以流程化的方式以业务主线为线索对各个相关业务应用进行横向、纵向集成，实现业务流程闭环管理^[31,32]。

面对能源互联网需求，需要研究流程工具如何支持能源互联网能源流、物流、资金流、信息流闭环管理，研究相关流程管理、流程监控、流程分析等工具，研究云计算、大数据、物联网、移动信息化等技术应用和企业业务流程和管理的相互作用。

4.2.2. 授权与身份认证

认证和授权决定了谁能够访问业务系统，能访问业务系统中的何种资源以及如何访问这些资源^[33]。信息认证与授权是成熟的技术，典型的安全认证包括：口令认证机制、数字证书认证机制、基于生物特征的认证等。授权技术包括授权管理基础设施和基于角色的访问控制等。

在能源互联网的环境下，将开展基于可信计算的互联网交互终端可信认证模型研究，构建互联网交互终端可信认证框架。同时，可以采用基于角色的访问控制来实现对用户权限的管理，防止未经授权的非法访问。实现统一认证、统一授权、统一目

录管理。

4.2.3. 数据交换

数据交换广泛应用在能源行业，主要功能包括：即时数据交换、批量数据交换、数据库同步复制、数据转换整合、规范化数据集成、监控管理等^[34,35]。

在能源互联网应用下需要研究广域、多源、大数据量数据交换技术以及数据库复制技术。研究分布式、集中式、跨域、级联相结合的数据交换技术，满足新能源接入、电能替代、节能环保要求。针对未来智能电网终端接入广泛互联、信息应用开放互动、分析决策高度智能等变化，研究相关数据交换技术。

4.3 分析决策类

随着电力信息系统的飞速发展和电力数据的快速增长，为了支撑能源互联网及时可靠准确进行分析决策，需要研究模式识别、数据挖掘、人工智能、在线策略优化、智能化分析预测等方面的技术。

4.3.1. 数据挖掘

数据挖掘^[36]是指从大量的数据中通过算法搜索隐藏于其中信息的过程。

电力行业信息化和工业化融合发展促使电力数据迅速增长和不断融合，电力大数据时代已经到来。在电网中迅速积累了大量的电网运行数据，这就需要对大数据进行分析，通过对电力大数据复杂关联特征分析需求，实现数据价值的深度挖掘。

大数据分析的理论核心就是数据挖掘算法，通过对电力海量数据进行处理，促进电力大数据在电力生产和企业经营管理中的应用，更好地服务节能减排、服务经济社会发展、服务资源节约型和环境友好型企业建设。

4.3.2. 人工智能

应用于电力系统的人工智能技术被广泛地应用于求解非线性问题,较之于传统方法有着不可替代的优势。目前,国内外已开发了多种人工智能工具,并开展了在电力系统中的应用和研究^[37-38]。

能源互联网未来将能够具备自我学习、自我进化的能力，智能的发电、用电、储电设备通过互联网广泛地接入能源互联网平台，各类终端之间将具备自我对话的能力，通过先进的算法和工具实现机器智能学习功能，使能源终端和策略自动更新优化，提高能源互联网的智能化水平。

4.3.3. 智能化分析预测

智能化分析预测技术在电力方向的应用与研究主要集中在电力负荷主成分分析、确定影响电力负荷的主要因素、负荷预测建模以及负荷预测算法^[39]。

无论能源互联网形态是微网还是广域网，灵活的能源调度与自治管理都需要智能化的分析预测技术作为支撑，这种分析可以分为短期、中期和长期三阶段，同时可以充分考虑天气、人口分布、能源形态与分布等多因素，从而为能源的生产、配置与消费决策提供前期支撑。

4.4 基础资源类

作为支撑底层数据的可靠有效传输、各类业务正常运行和智能决策的快速部署，基础资源类技术是构建能源互联网至关重要的部分。基础资源主要包括网络资源、计算资源、存储资源和数据资源四个方面。

4.4.1. 网络资源

为支撑能源互联网的建设，需要加强多项通信网络技术的应用，包括光纤、无线、可见光、电力线载波和卫星等物理层通信技术，以及下一代互联网、SDX 等网络技术。

首先，现有远/短距、公/局域网无线通信技术在用电信息采集、配用电自动化等方面已有较为广泛的应用^[40]。5G 技术将凭借其超高的频谱利用率，从无线覆盖性能、传输时延、系统安全和用户体验多个方面满足能源互联网不同应用需求，此外，基于 IEEE802.15 协议的高能效通信方式将受到进一步关注^[41]。

第二，目前我国电力一级骨干网已经全面支持 IPv6 协议，取得了显著的下一代互联网科研与建设成效^[42]。寻求新型网络体系架构的基础理论研究一直得到国内外相关机构的高度重视，美国的 GENI 计划^[43]和欧盟的 FIRE 计划^[44]就是典型代表。能源互联网会带来海量的智能设备与物联网终端，因此 IPv6 技术是能源互联网发展的必然选择。与此同时，兼具智能、互动、灵活等特征的智慧标识网络、信息中心网络 (ICN) 等突破创新型架构研究也势在必行，以适应不断变化的能源互联网业务需求。

第三，软件定义架构(SDX)是一种从技术层面应用层面回归的体系架构。在国际上，南加州大学的 Goodney, A.提出了基于 SDN 技术的相量测量方案^[45]；Dorsch, N.给出了智能电网下 SDN 技术应

用方案，并分析了技术优势与面临的挑战^[46]。如何实现能源互联网中不同设备的统一管控，从更全的视角观察网络运行状况，并作出及时的决策与指令下发，SDX 架构提供了有效的解决思路。

4.4.2. 计算资源

流计算、内存计算、并行计算和以此为基础的云计算平台将组成能源互联网的基础计算资源。

能源互联网的构建强调物理世界与信息世界的融合，如何充分利用流计算实时处理大量流数据，利用内存计算和并行计算提升数据处理效率，将网络感知到的环境数据及时转变成有价值的信息从而为生产生活创造更大收益将成为能源互联网企业占领信息制高点的关键。

云计算是一种提供可用的、便捷的、按需的网络访问平台，形成可配置的计算资源共享池（资源包括网络，服务器，存储，应用软件，服务），这些资源能够被快速提供，也可以称为云资源平台。

文献[47]探讨了云资源平台在电力系统应用的可行性和必要性，针对仿真计算领域详细设计了仿真云计算中心系统架构的几个层次；云计算资源管理平台已经在电力系统灾备中心进行实际应用，解决了灾备中心面临的问题，并使灾备业务由原来的手工操作模式转变为具备 IT 支撑的流程化自动化模式^[48-49]。

能源互联网需要建立能源与数据的云资源平台，以供区域内和跨区所有相关资源的共享，将成为能源互联网构建的重要基础设施支撑，不仅包含计算资源，还包括存储资源、数据资源和软件资源等。

4.4.3. 数据资源

能源互联网的数据资源主要包括数据库技术、大数据平台和地理信息等。

大数据平台技术关注传统计算理论及技术在高性能要求和大数据环境下的技术革新、应用迁移和效能提升。国外相关技术与业务发展集中在数据存储、处理和分析核心领域，已形成成熟开源或商业框架及产品，拥有较为完善的生态圈，在智能电网配用电领域的分布式能源接入、需求侧响应、实时电价管理等方面已有成熟应用案例，国内相关技术研发以互联网企业为主，也集中在数据存储处理分析等核心领域^[50-52]。能源互联网中信息伴随能源流动，形成广域分布的全领域数据应用环境，面对海量数据层层汇集、高速交换所带来的挑战，运用

大数据技术可增强信息跨域集成、数据多级计算以及智能化分析能力，满足能源互联网多层次异构及协同数据处理和复杂关联分析的需求。

4.4.4. 存储资源

能源互联网将实现分布式能源与大规模能源的协调发展，而其信息存储也将呈现集中是与分布式共存现象。

在电力大数据的平台构建和部署应用中，充分考虑了分布式技术的作用。为了提供更高的存储效率，G. Dimakis 在文献[53]中给出了基于网络编码技术的分布式存储系统。Alexandros 给出分布式存储解决方案^[54]，以减少 P2P 分布式系统的带宽和存储开销。文献[55]给出了电力企业核心业务数据存储方案的典型分析与设计。

分布式存储与集中式存储协调共存将为能源互联网云计算和大数据平台的构建提供强大的基础技术支撑，而网络编码和虚拟化技术与之结合将是未来的技术发展方向。

4.5 安全保障类

为了保障监测控制、流程作业、分析决策和基础资源的安全稳定运行，需要有信息通信安全的防护保障。信息通信安全包括工控安全、信息安全和通信安全共三大类。

4.5.1. 工控系统安全

电力系统作为典型的工控系统面临着大量的终端和现场设备的脆弱性、通信网及规约上可能存在漏洞、采用线路搭接等手段对传输的电力控制信息进行窃听或篡改等安全威胁^[56,57]。美国国家标准技术研究院（NIST）已出台电力工控系统信息安全体系架构的标准。

能源互联网环境下，我们将开展电网工控终端监测数据采集、基于规约行为分析的工控终端典型攻击检测与深度分析、现场作业安全审计与管控技术等技术研究，形成自主安全产品和装置，实现对电网工控通信协议及应用层威胁的深层次发掘与监测，提升电力工控系统安全可控水平。

4.5.2. 数据隐私保护

随着电网的智能化，数据量逐渐增加，用户的用电等敏感信息也存在安全隐患，因此能源互联网中的隐私保护是一个非常重要的问题。

目前国内外尚未有专门针对电力数据隐私保护的相关研究。为了防范数据发布中的隐私泄漏问题，研究者们在许多不同的应用领域提出了相应的

解决方案，例如，通过结合不同时间段发布的数据集或链接已发布数据集和已有额外信息，但是大量的可泄漏情况仍然存在^[58,59]。

下一步我们将开展能源互联网环境中的数据隐私保护方案及保护算法模型研究，如在不同的阶段采用不同的方法对隐私进行保护，最终能达到这些数据既可用，同时又不泄露用户的隐私。隐私保护方案可以从数据上传、用户查询、数据发布这三个方面来考虑。

4.5.3. 可信主动防护

全球能源互联网的安全防护体系要做到消除共享壁垒，支持开放互动。因此应建立可信主动防御体系。

可信技术的核心思想是在系统平台中引入一个物理的或软件的安全模块，采用密码技术建立信任根，然后建立一条由信任根、操作系统、应用程序组成的信任链，信任链中的各实体通过完整性度量机制一级认证一级，进而一级信任一级，然后把信任机制从信任根扩展到整个终端平台，从而实现整个系统安全的目标^[60]。

全球能源互联网下，我们将开展基于 TCM 的互联网交互终端可信技术、基于 TNC 的互联网交互终端可信网络连接及传输协议及证书安全存储技术研究，建立基于可信计算的互联网交互终端可信认证模型，构建互联网交互终端可信认证框架，实现全球能源互联网的可信主动防护。

4.6 支撑体系类

能源互联网信息通信支撑体系包括标准体系、运维体系、信息化架构和企业公共信息模型等。

4.6.1. 信息化架构

图 5 给出的是 SG-EA 总体架构图，针对能源互联网信息通信建设的实际需求，能源互联网信息化架构总体上也应按照“四横五纵”和架构管控体系进行信息化系统的建设实施。



图 5 SG-EA 总体架构图

能源互联网涉及的管理对象多变、业务类型复杂、流程协作频发，需要一套行之有效的方法论将其发展战略贯彻到信息化建设中，以期保障信息化建设与能源互联网发展战略一致。信息化架构将是信息化、业务与能源互联网战略衔接的桥梁。

4.6.2. 企业公共信息模型 (CIM)

公共信息模型 (CIM) 是电力系统域高度抽象的一个业务模型，作为元数据模型它涵盖了电力企业发电、输电、配电等各大系统，可以解决统一模型的问题。文献[61]介绍了电力企业信息化建模理论、方法和实践的全过程。文献[62]给出了电力企业数据中心场景下的 CIM 理论及应用方法。

从技术和经济角度考虑，能源互联网是以电能作为能源承载和交换的形式，因此丰富公共信息模型的理论及其应用，对能源互联网的发展与实现将起到巨大的支撑与推进作用。

5 能源互联网热点应用

按照能源互联网的各个环节，其热点应用主要集中在分布式能源接入、运行与生产、传输控制、经济调度、能源管理与供给五大方向。



图 6 能源互联网热点应用场景

5.1 分布式能源接入

分布式能源接入包括分布式电源和新能源并网，而电力负荷预测和实时通信对接入的稳定性起着重要作用。

分布式新能源接入将在能源互联网中得到更广泛的应用，未来将向着提升分布式电源与新能源电站与电网、负荷的信息互动水平，加强对分布式电源和新能源协调控制，增强新能源消纳能力等方向发展。为了保证能源互联网的运行稳定性和实现大规模新能源接入，电力负荷预测将起到非常重要的作用，未来的负荷预测将向着建立多维度、多时间尺度电力负荷预测模型，提升电力负荷和用电量预测能力，加强信息决策支撑等方向发展。

5.2 运行与生产

通过信息通信技术，能源互联网的运行与生产将变得更加智能与高效，这体现在建立新一代智能变电站，实现设备在线状态监测与诊断预警等方面。

新一代智能变电站将广泛应用于能源互联网，并向着统一智能化电子标签，减少信息传输冗余，提高变电站信息交互的水平和质量等方向发展。智能化的能源互联网离不开在线状态监测与诊断预警，它将向着实时进行数据分析和处理，研究评估诊断分析的可视化技术，提升设备状态分析的准确性和快速性等方向发展。

5.3 传输控制

根据能源互联网的特点，使用已有通信技术，电网的传输控制将实现集中决策与分层分布控制共存，同时实现调控一体化。

电力系统在主干电力传输采用集中决策的同时，对分布式电源的接入采用分层分布控制。此结构既保证了主干电网的整体稳定性，同时也方便了分布式电源的大规模接入，为微网间的能源自由共享提供了基础。控制决策将向着大范围通信协调、多级调度协同、充分发挥大电网的资源优化配置能力等方向发展。

电网调控一体化会对能源互联网系统的整体性能起着不可忽视的作用，该应用将向着推动变电自动化系统和调控主站之间的通信协同互动，提升大电网协同运行和设备集中监控能力等方向发展。

5.4 经济调度

经济调度以配电部分和用电部分海量信息采集与处理和营配调一体化为基础，通过智能用电服务实现能源互联网调度的经济性。

配用电海量信息采集与处理是能源互联网智能决策和优化运行的基础，该应用将向着提升配用电数据采集成功率、采集频度和计算效率，为智能配用电应用提供在线数据支撑和计算服务等方向发展。

能源互联网中，营配调一体化能有效实现信息共享和应用集成，同时提升系统的整体性能。该应用将向着全网实现营配调多业务、多系统间标准化集成，有效提升营配调一体化应用水平等方向发展。

智能用电服务需要综合利用能源互联网在发、输、变、配、用、调等各个方面采集到的信息，而不仅局限于用电部分。该应用将向着实时管控，提

高营销管理精益化水平，为客户提供个性化的优质服务等方向发展。

5.5 智能管理与供给

按用电区域的大小，智能用电包括家庭式能源管理、区域性能源管理和全球性能源供给模式三个方面。

随着分布式能源生产的家庭化，结合家庭内的储能设施，采用类似微网的能源调度技术和家庭间通信，可以实现基于能源互联网的家庭式能源管理，最大限度地提高家庭能源消费的经济性，并减少对周围环境的破坏。该应用将向着管理精细化，供电个性化，方便通信接入管理等方向发展。

以家庭为单位进行能源管理有时无法实现全局用能优化，其中区域能源管理必不可少。小到一栋建筑物，一个社区，一条街道，大到一个城市，一个省份，可以以区域为单位进行能源管理，实现区域的能源优化。

在能源互联网中，不同的电能产生形式在时间和空间上具有互补特性，多能互补和区域间能源互补是提高能源利用效率的有效途径。建立全球资源配置平台，实现全球资源共享是全球能源互联网的发展目标。

6 展望

能源互联网将考虑分层分级发展方式，以大电网为“主干网”，以微网、分布式能源等能量自治单元为“局域网”，局域网内通过能源交换机实现能量的内部交换，广域网内通过能源路由器实现不同局域网能量的控制、路由和交换，以开放对等的一体化架构实现能源双向按需传输和动态平衡使用，从而适应新能源的接入与消费。其组网示意图如图7所示。

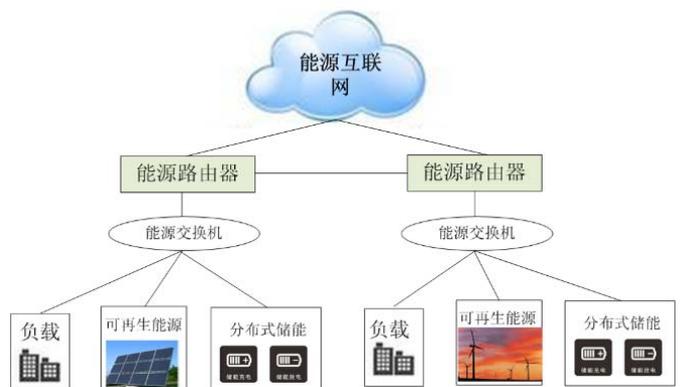


图 7 能源互联网组网示意图

随着能源互联网相关技术的成熟，及其经济性、环保性和高效性的不断体现，能源互联网的规

模将不断扩大,从局域网的验证性项目,扩展到广域网的示范性项目,并不断发展、改造国家性主干网,最后发展到洲际和全球的能源互联网。

为适应全球能源互联网的发展,迫切需要在信息通信技术领域有更大的创新和突破。未来能源互联网的研究可以从基础理论研究、原型系统设计、系统开发等方面逐步推进。

在信息获取与高效处理方面,开展基于物联网的信息采集与传输、基于云计算架构的能源信息处理、基于大数据技术的信息挖掘、网络信息安全防护等研究。在数据处理方面,需应用混合云、信息物理融合,解决全球能源互联网运行控制、交易管理中分析处理速度瓶颈问题,提高对海量数据的处理速度和精度,实现全球电力调度及交易。

在信息通信网络方面,需应用相干光通信、5G、北斗卫星通信等技术构建电力天地互联的通信体系网络,实现大空间尺度通信网络全面覆盖、资源高效灵活调度、信息大容量智能交互。

在信息通信系统方面,基于信息传输和能量传输在本质上的不同,应尽量选择与能量传输特点相匹配的信息通信方式,以加强其对能源互联网的支撑作用。基于此思想,可以尝试利用SDN, Overlay Network, ICN等新型通信网络技术的特点与思想,便于支撑能源互联网的能量共享和传输。

在系统研制方面,考虑集成新一代信息技术、柔性输电技术、大规模储能技术和电力电子控制等方面技术的最新成果,研发新一代能量管理系统实现分散协同式的能量交换和路由管理,研制具有产业化前景的中低压大容量的能源路由器样机。研制基于软件定义的能源局域网、能源广域网、能源主干网和能源互联网网络通信平台,开发适应能源互联网业务要求的信息支撑平台、业务应用平台和信息安全保障系统。

参考文献

[1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 上海: 电力工业出版社, 2015.
 [2] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
 [3] 里夫金. 第三次工业革命[M]. 北京: 中信出版社, 2012.
 [4] Lee E. Computing foundations and practice for cyber-physical systems: A preliminary report[R]. University of California at Berkeley, 2007.
 [5] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展. 2015(03).
 [6] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报. 2013, 36(01): 143-167.
 [7] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科

学:信息科学. 2014, 44(06): 714-727.
 [8] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化. 2014(15): 1-11.
 [9] Wan Y, Cao J, Zhang S, et al. An Integrated Cyber-Physical Simulation Environment for Smart Grid Applications[J]. Tsinghua Science and Technology. 2014, 19(02): 133-143.
 [10] Junwei C, Mingbo Y. Energy Internet -- Towards Smart Grid 2.0[C]. Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing (ICNDC), 2013.
 [11] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet[J]. Proceedings of the IEEE. 2011, 99(1): 133-148.
 [12] Yi X, Jianhua Z, Wenye W, et al. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet[C]. IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2011.
 [13] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术. 2014, 08(04): 1-10.
 [14] Jianhua Z, Wenye W, Bhattacharya S. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic[C]. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012:1-8.
 [15] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学. 2014, 44(06): 702-713.
 [16] 徐秋玲. 发展能源互联网是大势所趋[N]. 中国电力报, 2014-12-08.
 [17] Wang X W, Dang Q, Guo J L, et al. RFID Application of Smart Grid for Asset Management[J]. International Journal OF Antennas and Propagation. 2013.
 [18] 曹文霞, 刘畅. 基于RFID技术的智能电网远程信息管理系统构建[J]. 电源技术. 2014(09): 1741-1742.
 [19] Zou Q, Qin L, Ma Q. The application of the Internet of things in the smart grid[C]. International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, 2010.
 [20] Washiro T. Applications of RFID over power line for Smart Grid[C]. 16th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012:83-87.
 [21] 荆孟春, 王继业, 程志华, 等. 电力物联网传感器信息模型研究与应用[J]. 电网技术. 2014(02): 532-537.
 [22] Bin H, Gharavi H. Greedy backpressure routing for Smart Grid sensor networks[C]. IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2014:32-37.
 [23] Yufei W, Weimin L, Tao Z. Study on security of Wireless Sensor Networks in smart grid[C]. International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2010:1-7.
 [24] Asad O, Erol-Kantarci M, Moutfah H. Sensor network web services for Demand-Side Energy Management applications in the smart grid[C]. IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011:1176-1180.
 [25] Panchadcharam S, Taylor G A, Ni Q, et al. Performance evaluation of smart metering infrastructure using simulation tool[C]. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012:1-6.
 [26] Wen M H F, Li V O K. Optimal phasor data concentrator installation for traffic reduction in smart grid wide-area monitoring systems[C]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013:2622-2627.
 [27] Kun Z, Al-Hammouri A T, Nordstrom L. To concentrate or not to concentrate: Performance analysis of ICT system with data concentrations for Wide-area Monitoring and Control Systems[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012:1-7.
 [28] Tang G Q. Smart grid management & visualization: Smart Power

- Management System[C]. 8th International Conference & Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT), 2011:1-6.
- [29] Yu X. Interplay of Smart Grids and Intelligent Systems and Control[C]. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011:1.
- [30] Bavarian S, Lampe L, Siew C, et al. Leveraging the smart metering infrastructure in distribution automation[C]. IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (Smart Grid Comm), 2012:157-162.
- [31] 张淑娟. 基于BPM企业信息管理系统的设计与实现[J]. 湖北科技学院学报. 2014(03): 42-43.
- [32] 王玉娟. 基于SOA的科技管理BPM平台设计与实现[J]. 计算机科学. 2013(S2): 423-425.
- [33] 余智勇. 基于PKI技术的身份和权限的统一认证[D]. 西安电子科技大学, 2006.
- [34] 赵晶, 马宁, 王桂茹, 等. 调度数据网与配网数据传输网的统一数据交换机制[J]. 企业改革与管理. 2015(02): 166-167.
- [35] 王德文, 阎春雨, 毕建刚, 等. 输变电状态监测系统的分布式数据交换方法[J]. 电力系统自动化. 2012, 36(22): 83-88.
- [36] 祁晓笑. 数据挖掘在电力系统暂态稳定评估中的应用[D]. 西安理工大学, 2005.
- [37] 徐志国. 人工智能(AI)在电力系统中的应用[J]. 现代电子技术. 2006(21): 147-150.
- [38] 王同文, 管霖, 张尧. 人工智能技术在电网稳定评估中的应用综述[J]. 电网技术. 2009(12): 60-65.
- [39] 李扬. 电力系统负荷分析预测[D]. 河北大学, 2010.
- [40] 徐珂航. 无线通信技术在电力系统的应用[J]. 通讯世界. 2013(21): 122-123.
- [41] Miyahara Y. Next-generation wireless technologies trends for ultra low energy[C]. 2011 International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), 2011:345-345.
- [42] Wang J, Cheng Z, Guo J. Distributed IPv6 Sensor Network Networking Method Based on Dynamic Regional Agents[C]. The 2013 International Workshop on Mobile Cloud Computing (MCC2013), 2013.
- [43] <http://www.geni.net/>[Z].
- [44] <http://www.euchina-fire.eu/>[Z].
- [45] Goodney A, Kumar S, Ravi A, et al. Efficient PMU networking with software defined networks[C]. 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2013:378-383.
- [46] Dorsch N, Kurtz F, Georg H, et al. Software-defined networking for Smart Grid communications: Applications, challenges and advantages[C]. 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014:422-427.
- [47] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 云计算:构建未来电力系统的核心计算平台[J]. 电力系统自动化. 2010(15): 1-8.
- [48] 朱征, 顾中坚, 吴金龙, 等. 云计算在电力系统数据灾备业务中的应用研究[J]. 电网技术. 2012(09): 43-50.
- [49] 王继业, 程志华, 彭林, 等. 云计算综述及电力应用展望[J]. 中国电力. 2014(07): 108-112.
- [50] Chen C, Zhang C Y. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data[J]. Information Sciences. 2014, 275: 314-347.
- [51] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术. 2013(04): 927-935.
- [52] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报. 2015(01): 2-12.
- [53] Dimakis A G, Godfrey P B, Wu Y, et al. Network Coding for Distributed Storage Systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory. 2010, 56(9): 4539-4551.
- [54] Dimakis A G, Ramchandran K, Wu Y, et al. A Survey on Network Codes for Distributed Storage[J]. Proceedings of the IEEE. 2011, 99(3): 476-489.
- [55] 张健. 电力企业核心业务数据存储方案设计[D]. 电子科技大学, 2010.
- [56] 《关于加强工业控制系统信息安全管理的通知》(工信部协[2011]451号) .
- [57] 《工业控制网络安全风险评估规范》(GB/T 26333-2010)
- [58] Juels A, Jr. Kaliski B S. PORs: Proofs of Retrievability for Large Files[J]. IACR Cryptology ePrint Archive. 2007, 2007.
- [59] Shacham H, Waters B. Compact Proofs of Retrievability[J]. IACR Cryptology ePrint Archive. 2008, 2008.
- [60] 林闯, 彭雪海. 可信网络研究[J]. 计算机学报. 2005(05): 751-758.
- [61] 王珊. 电力信息建模的理论与实践[D]. 浙江大学, 2008.
- [62] 王家凯, 王继业. 基于IEC标准的电力企业公共数据模型的设计与实现[J]. 中国电力. 2011(02): 87-90.

收稿日期: 2015-05-11。Times New Roman, 六号, 行距 12pt。

作者简介: 中文六宋, 数字及英文为 Times New Roman. 行距 12pt, 首行缩进 0.63cm, 标点除括弧为半角外, 其余均为全角。

(编辑 ###)