

能源物联网及其关键技术

刘俊勇, 潘力, 何迈

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 飞速发展的物联网技术为能源转型提供了有益支撑, 物联网与能源各领域的深度融合形成了能源物联网, 能源物联网成为能源互联网发展的物联基础。首先, 分析了能源物联网的含义及其和传统能源网络的多维度差异, 构建了能源物联网的体系架构; 其次, 讨论了能源物联网的若干关键技术; 随后, 提出了与能源物联网相关的应用场景; 最后, 展望了能源物联网的发展前景与面临的挑战, 以期为后续能源物联网的实践和深入研究提供有益参考。

关键词: 能源物联网; 能源转型; 物联网; 可再生能源

中图分类号: TP391.44

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00198

Internet of energy things and its key technologies

LIU Junyong, PAN Li, HE Mai

School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: The rapid development of the Internet of things technology provides beneficial support for the energy transition. The deep integration of the Internet of things and various fields of energy has formed the Internet of energy things, which has become the basis of the development of the energy Internet. Firstly, the meaning of the Internet of energy things and its multi-dimensional differences compared with traditional energy networks were analyzed. The architecture of the Internet of energy things was designed. Secondly, several key technologies of the Internet of energy things were discussed. And then the related application of scenarios the Internet of energy things were proposed. Finally, the development prospects and challenges of the Internet of energy things were looked forward to. Hope that a useful reference for the subsequent practice and the in-depth research of the Internet of energy things was provided.

Key words: Internet of energy things, energy transition, Internet of things, renewable energy

1 引言

能源转型已形成全球性共识, 大部分国家已实施相关的可再生能源支持政策来大力开发利用可再生能源、提升能源利用效率、降低二氧化碳排放量。在能源转型过程中, 大规模清洁能源将逐步替代一次能源, 大规模电能将逐步替代终端能源, 并以电力和电网为核心支撑, 构建多种能源互补互济、协同发展的新一代能源系统, 推动能源供应和消费方式发生革命性变化^[1-3]。

在能源转型的大背景下, 物联网技术的不断发展使得物联网与传统行业的融合越来越密切, 如“物联网+农业”催生的智慧农业^[4-5]、“物联网+电网”形成的智能电网^[6]、泛在电力物联网^[7-8]等。物联网技术正促使能源网络迈向万物智联的新阶段, 面向能源互联网快速发展^[9], 利用信息化、数字化、现代化手段为传统能源领域赋能, 实现能源生产、传输、存储、交易、消费各环节设备及客户的状态全面感知、信息交互和数据共享、需求快速响应。

能源物联网作为物联网技术和能源领域有机

收稿日期: 2020-08-11; 修回日期: 2020-09-24

通信作者: 何迈, hemai@scu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2018YFB0905200)

Foundation Item: The National Key R&D Program of China (No.2018YFB0905200)

结合的产物,将助力实现能源转型,形成能源互联网的物联基础。鉴于此,本文对能源物联网的基本概念和体系架构进行了归纳,讨论能源物联网涉及的关键技术,介绍能源物联网的若干应用场景,并对泛在能源物联网的未来发展进行分析和展望,希望为实现能源转型和能源物联网提供一定的参考。

2 物联网与能源物联网

2.1 物联网

物联网一词最早由麻省理工学院的 Kevin Ashton 提出^[10]。从狭义上看,物联网即为实现物与物连接的局域网络;从广义上讲,物联网可实现人、物、系统和信息资源在任何时间和任何地点的连接,具备泛在网络的特点。物联网是通过感知设备,按照约定协议连接人、物、系统和信息资源,实现对物理世界和虚拟世界的信息进行处理并做出反应的智能服务系统^[11-12]。

2.2 能源物联网含义

能源物联网是以传感量测、边缘计算与云计算、区块链等先进技术为手段,以智能感知、智能计算、智能处理、智能决策、智能控制为目标,在能源生产、存储、配送、消费环节实现在电力、热力、燃气、新能源、电气化交通等能源领域的数据共享、高效协同、供需平衡的一种信息—物理—社会系统^[3,13-14]。

2.3 能源物联网与传统能源网络的区别

电力网、石油网、天然气网等传统能源网络的能源传输与共享是在各自网络中实现的,能源物联网可实现各种异构能源系统的互联和源荷两侧的平等接入。其中,电能可作为所有一次能源的表现形式,因此,以电网为核心的能源网络将是能源物联网的物理主干网,承载着不同能源网络物理上的互联互通。

能源物联网和传统能源网络的特点比较如表 1 所示。相较于传统能源网络追求大系统、集中式的发展,能源物联网分布式特性高。从信息层面来看,能源物联网信息化程度高,信息的获取、处理、分析等能力较强,信息可实时交互、分享。从物理层面来看,在能源物联网中,能源可双向流动、多点互动、即插即用,能源损耗较小。从社会层面来看,能源物联网的开放性提高了用户与供能侧的平等性和用户的主动参与程度。

表 1 能源物联网和传统能源网络的特点比较

对比内容	能源物联网	传统能源网络
网络传输内容	能源、信息	主要为能源
能量	灵活	不灵活
传输控制	可点对点传输	传输路径单一
管理方式	协同参与式	高度集中式

2.4 能源物联网的体系架构

能源物联网的体系架构如图 1 所示,主要包含设施层、感知层、网络层、平台层和应用层。

1) 设施层包含变压器、充电桩、电动汽车、智能表计、分布式发电等。

2) 感知层是能源物联网的基础层,通过传感设备和量测装置对基础设施、设备及其周围环境等进行感知,感知层包含传感设备、感知网络等。

3) 网络层将感知层采集的信息传递至平台层,如通信专网、5G 无线网络、以太网等。

4) 平台层实现各类采集数据的存储、管理、分析功能,通过云计算、大数据等技术实现对感知数据的处理和分析,数据经加密后可进行互传,挖掘海量数据的深度价值,同时提供数据应用开发的应用程序接口。

5) 应用层实现能源物联网的智能管理应用,如充电运营、储能监控、电气设备智能运行维护、楼宇能效管理等。

3 能源物联网关键技术

能源物联网以能源网络为基础,以大数据为核心,需要融合传感、通信、计算、安全等多种技术。

3.1 智能感知技术

能源物联网是以数据为前提和核心进行运作的,需要以智能感知为触手全面采集能源网络的有效数据,因此,智能感知技术是能源物联网的基石。能源物联网中不同能源设备的数量巨大、种类繁多,且在辽阔地域中分布广泛,能源物联网的高效运作需要先进的感知装置和其构成的感知网络发挥首要作用。

能源物联网规模庞大、结构复杂,为了更准确、精细、全面地获知设备及系统的运行情况,需要研究精度高、功耗低、寿命长、体型轻巧的传感器,开发新的传感技术,进一步提升传感器的量测精度、可靠性和稳定性,为系统决策和协同调控提供大数据支持。目前,应用于能源物联网的传感设备

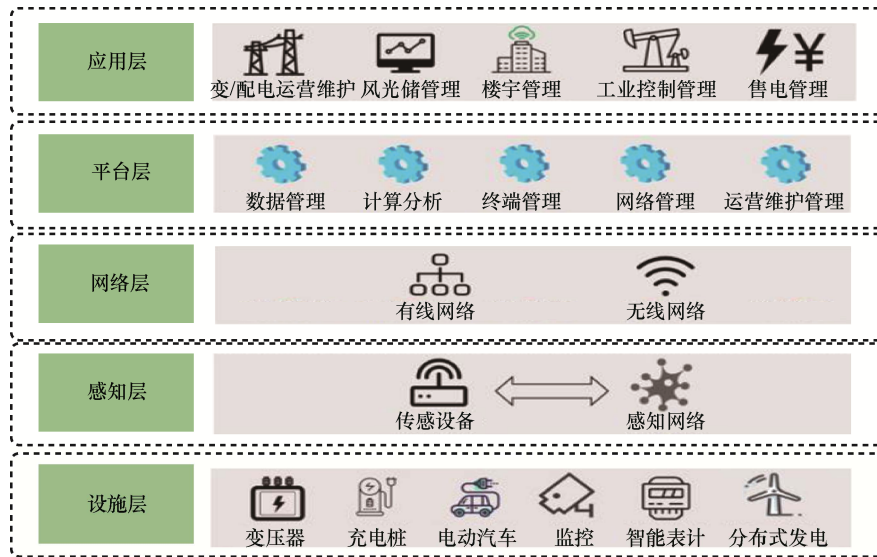


图1 能源物联网的体系架构

多种多样，如电力系统中的电网故障行波传感器^[15]、非接触式测量的电场耦合传感器^[16]和导线温度传感器^[17]、天然气系统中的甲烷气体检测传感器^[18-19]等。

除了定点感知以外，还需要从系统全局的角度实现时空维度上人与物的全面感知，体现能源物联网广覆盖、海量连接的特性。因此，需要构建一体化的能源物联网感知网络，融合异构网络的信息传输技术，全面覆盖、连接传感器和能源基础设施。文献[20]在矿山物联网中提出了人—机器—环境状态信息描述方法，可实现矿山安全生产状态信息的全面精准感知。文献[21]构建了泛在电力物联网智能感知体系架构。

3.2 通信网络技术

通信是能源物联网中必不可少的部分，它可以互联每个设备并确保可靠的信息交换。由于能源物联网的开放性，用户可以通过各地的客户端应用程序获取系统操作数据并与机器设备进行交互。

通信网络分为有线通信网络和无线通信网络。在实际情况下，能源物联网中的信息具有分布广、分散性强的特点，传统的有线网络通信技术难以适用于大规模应用，因此能源物联网通信的主要手段是无线通信技术。其中，5G的高带宽、低时延、低功耗等优势可为能源物联网发展提供强大助力，5G可应用于万物互联、海量量测、宽带通信、高效计算等方面^[22-23]。此外，以NB-IoT和LoRa技术为代表的低功耗广域网络(LPWAN, low power wide area network)技术以其远距离、低功耗、海量接入、

低运行维护成本等优点逐步在物联网领域得到应用，LPWAN在功耗、覆盖范围、接入量、传输速率等方面比广域通信网（如通用分组无线业务）更有优势，其远距离、强覆盖、海量接入等特性为能源物联网的普及应用提供了重要的网络链路保障^[24-25]。文献[26]为构建LPWAN能源物联网云平台有效解决了多协议中间件、多源异构数据接入等问题。文献[27]基于LPWAN传输和管理配电设备绝缘状态的感知数据。文献[28]基于LPWAN技术，对电力通信专网进行升级改造，实现了电力通信专网与LPWAN物联网技术的融合，构建了能源电力物联网专网。文献[29]介绍了基于LPWAN技术的泛在电力物联网的体系架构，指出完善感知层和网络层基础设施是建设泛在电力物联网的前提。

海量信息的传输不仅需要先进的传输方式，还需要建立统一的通信标准，构建一体化的通信网络。开放共享的能源物联网需要每台机器和每个用户可以用简单的方式交互信息，但是能源各行业采用的系统和通信设备、网络不在统一标准下，导致数据无法有效共享和管理，形成信息“壁垒”。因此，需要制定统一的数据模型和通信协议，新投入使用的设备和系统平台必须遵循相应的通信标准。此外，对于已投入使用的设备和系统平台，可开发转换技术对原有的通信协议进行兼容，从而消除信息“壁垒”，实现对通信网信息的统一管理。如文献[30]鉴于电力物联网中信息交互方式无法统一造成的问题，研发了相应的标准化模型，使网络层中的数据以标准化信息模型交互传输。

3.3 数据分析处理和智能决策技术

物联网以数据联网为本质核心^[31],而能源物联网有海量的用户与设备,其量测与感知采集的数据是非常有价值的。一方面,利用海量数据使得能源行业可以充分认识自身特性,为能源行业的低碳绿色发展、提高能效、节能降耗、经济运行、系统规划等提供新的技术支撑手段;另一方面,基于深度学习、人工智能等技术分析处理数据,可以为能源系统提高生产效率,为用户提供更好的消费服务,为系统运营者提供更高效率的决策支撑。但是,目前这些数据的价值还未得到充分挖掘,主要原因是数据分析智能化程度低。只有对能源生产、配送、消费各环节的数据进行多方面的深入挖掘,才能释放数据价值,实现物理互联、信息互通等目标,为各行业发展规划与决策提供重要支撑。因此,需要加强能源大数据的应用建模与智能算法研究,促进能源物联网向数字化、智能化的方向发展。

文献[32]基于深度学习网络,处理和提取物联网非法入侵的数据,识别不同非法入侵的特征,判断其类型,获得了高精度的物联网入侵行为识别结果。文献[33]在泛在电力物联网环境下,基于深度强化学习,提出了一种基于比例优先级采样机制的深度强化学习算法,解决综合能源系统自动发电控制面临的强随机扰动问题。文献[34]提出了基于云一边一端协同的用户侧数据应用框架,充分利用用户侧的电网大数据,使用边缘计算赋能电力物联网。

3.4 信息安全技术

安全和隐私是能源物联网能否稳定、快速发展的决定因素之一。能源物联网涉及海量的数据信息和复杂的现实环境,国家重要的能源基础设施、社会服务领域、个人信息都与能源物联网有密切的关系,因此,完善物联网技术应用、保障能源领域的信息安全和网络安全,是能源物联网大规模部署的必要条件。

物联网中的信息安全需求有物理实体安全、信息采集传输与处理安全,物联网安全的最终目标是确保信息的完整性、机密性和真实性^[35-36]。文献[37]阐述了我国关键信息基础设施安全保护面临高烈度对抗、无险可守和长期性3个重大风险,提出要树立科学的网络安全观。文献[38]在物联网的设备层面量化分析了安全威胁数学模型,提出了用适当的安全控制措施消除安全漏洞。文献[39]从数据安

全共享角度出发,提出了一种访问结构隐藏的属性基加密方案,该方案在保证物联网数据隐私的情况下,可实现密文数据的细粒度访问控制。文献[40]从安全通信角度出发,提出了椭圆曲线上的无证书公钥密码体制结合物理不可克隆函数的方案,实现无秘密参数存储的物联网节点设备之间的消息安全传递。

为了应对能源物联网安全威胁,需要具体分析能源物联网各个层面的安全问题,并提出相应的应对策略,同时构建面向能源业务的跨层安全框架。

3.5 网络管理技术

能源物联网是依托于物联网、云计算、人工智能等技术发展而来的一种综合性网络,随着相关技术的不断发展,能源物联网衍生了很多传统能源网络所没有的新特点,这些新特点决定了能源物联网管理发展的新趋势。

文献[41]提出了在信息化和非信息化条件下的物联网管理模式,文献[42]在电动汽车(EV, electric vehicle)的充/换电服务网中,针对电池管理的身份识别、时空追踪、状态感知、动态资产管理、编组管理、运行效率统计和分析合法规范使用等问题,提出了基于物联网技术的解决方案。文献[43]以智能管理、传输控制、现场执行作为整体架构,设计了基于物联网的智能用电管理系统。文献[44]就工业物联网能耗增长、污染等问题,提出了一种基于云技术与雾技术融合的工业物联网能源管理架构,从而提高能源管理效率。现阶段,能源物联网的发展需要结合其新特点进行管理技术的创新,以有效地提升能源物联网系统管理的质量和水平。

3.6 能源市场化交易技术

得益于政策引导、需求侧扩大、市场开放和技术支撑等因素,使能源作为商品进行市场化交易成为可能。从电力系统角度来讲,可以将可交易能源概括为一套通过经济手段和控制手段,以价值为参数调节系统全局供需动态平衡的电力系统运行机制^[45-46]。因此,需要考虑相关市场主体,如终端消费者、分布式电源、售电商、运营者、产消者等,设计相应的能源交易机制。如文献[47]在车联网与电力网、交通网、互联网连接的背景下,基于区块链技术构建了车联网平台中的分布式能源交易体系,并提出不同的车联网平台运营模式。同时,还需要构建能源交易系统以实现能源交易机构在相应的交易机制下发布需求、交易匹配、执行合约,实现发起、确认、

执行、验证等各交换环节的实际运行。

区块链技术的公正开放、去中心化、互联共享等特性与分布式能源交易的特点有较好的契合度^[48]，区块链的关键技术在多能互补交易^[49-51]、能源交易市场信用风险管理^[52]等方面均有应用。能源物联网的成功建设将为能源交易奠定基础，在此过程中，利用区块链技术可以降低交易成本、提高交易效率，帮助能源交易机构更好地进行监管，指导传统能源行业逐步转型。

4 能源物联网应用场景

4.1 EV

EV 为提升清洁能源消纳、实现节能减排带来了新途径，可以在能源物联网的需求侧为系统灵活运行提供大量潜在的可调控资源，EV 可通过电网调频、车入网（V2G, vehicle-to-grid）等方式参与电网的运行优化。以 EV 作为交集，配电网与交通网、充电服务网三者的耦合关联程度日益紧密^[53]。EV 充/换电服务网络如图 2 所示，该网络是一种包含了智能电网、物流网、交通网和互联网的复杂网络，充分体现了信息化、智能化、网络化的特点，能为 EV 用户提供可靠、便捷、优质的服务。在能量流方面，EV 充/换电服务网络为用户提供可靠、便捷、优质的充/换电能；在信息流方面，它可以识别及收集 EV 和电池的当前工作状态，管理整个 EV 充/换电业务；在资金流方面，它通过与电网运行管理系统的信息交互，并且根据市场情况来制定 EV 充/换电费用。

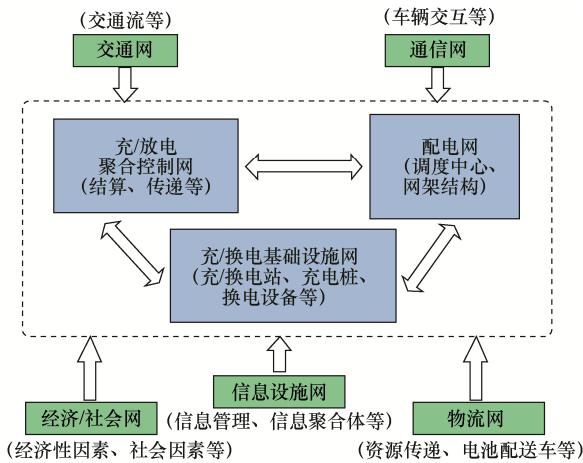


图 2 EV 充/换电服务网络

此外，采用传感器、射频识别设备、感知网络等，结合 GPS 定位、5G 通信等技术构建三网监控

系统如图 3 所示，其中，三网指充电服务网、电力网、交通网。三网监控系统可以实时感知 EV 运行状态、充电桩与充电站状态、道路交通与配电网状态等，助力三网的联动及高度互动，实现 EV 集群在三网融合下较大规模的能量调控，最终实现以 EV 为引导的能源互联网优化运行。

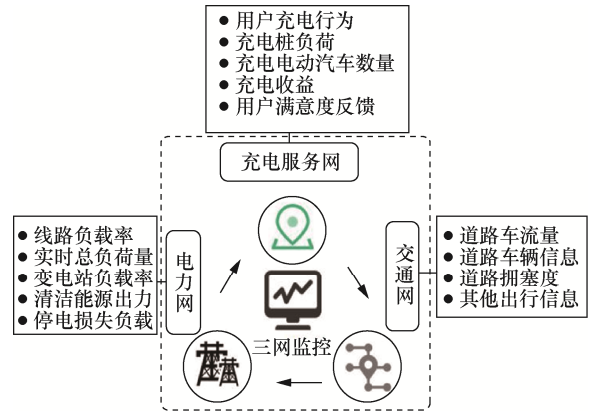


图 3 三网监控系统

4.2 智慧农业

农业和能源呈耦合互补的关系，体现在农业活动消耗电力为机械设备供电、驱动温控和供水系统等农业园区设施，安装于农业设施内的可再生发电装置可直接向农业生产供电，也可余电外送，或者利用农业活动副产品的生物质能进行热电联产或沼气产出。

融合智慧能源的农业大棚架构如图 4 所示，该架构基于通信技术、信息技术、物联网技术等深度融合，实现新能源与现代农业的高效协同运作与可持续发展。如通过信息共享将农业系统的用电需求、发电出力等预测信息和电网进行协调配合，指导农业用户操作。将物联网与农业设施结合，利用物联网技术来构建智慧全控型农业园区，促进农业生产的信息化与自动化。

4.3 梯级水光蓄互补联合发电

梯级水光蓄互补联合发电技术将梯级小水电、光伏和抽水蓄能 3 种发电方式有机结合起来，实现多种可再生能源的互补优化^[54]。分散的光伏出力、梯级小水电均具有随机性和波动性，且两者出力特性各异。因此，针对光伏发电系统，可通过光敏传感装置、气象数据采集装置获得的历史数据进行功率预测或实时感知，实现光伏面板根据日照和天气变化情况随时调整工作状态；针对梯级小水电发电机组，可通过安装在机组内、水库中的传感器，及时了解机组运行工况的技术指标和相关参量，增强

对水电机组的实时监控能力和对周围水文环境的感知。可运用机器学习技术实现数据学习本地化，在梯级水光蓄互补联合发电系统的调度和控制时，实现具有自决策、自纠偏能力的互补系统智能调度和优化控制，并进行中长期电量互补、短期电力互补以及实时控制互补。

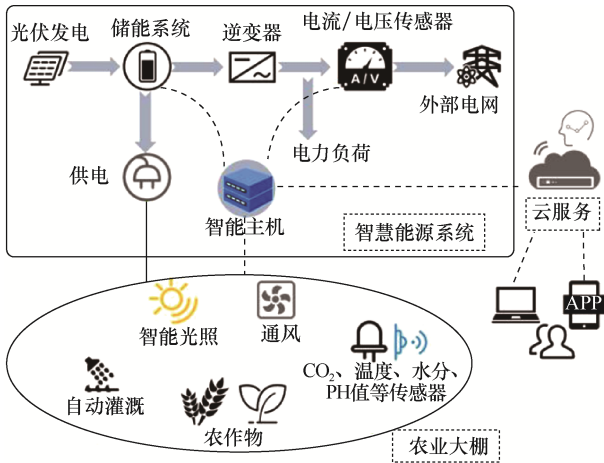


图4 融合智慧能源的农业大棚架构

5 结束语

本文主要对能源物联网的基本概念进行了总结，提出了能源物联网的体系架构，讨论了其涉及的关键技术，提出了能源物联网的若干应用场景。物联网技术赋予能源网络新的动力，将为能源物联网的未来发展奠定重要的物联基础。但目前，能源物联网的发展处于初始阶段，面临以下挑战：1) 对能源物联网涉及的海量对象和广域覆盖范围进行全面感知；2) 对能源物联网数据和通信涉及的相关标准进行规定与统一；3) 深度挖掘能源物联网中数据的价值，开发相关智能应用；4) 落脚于具体能源行业，探索更多的关键技术和应用场景。

在未来，能源物联网不断发展，将释放更多的能量推动能源转型，为实现更好的绿色环境和可持续发展带来了巨大的可能性。

参考文献:

[1] 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述: (一)转型要素及研究范式[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 1-15.
SHU Y B, XUE Y S, CAI B, et al. A review of energy transition analysis part one elements and paradigms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 1-15.

[2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

ZHOU X X, CHEN S Y, LU Z X, et al. Technical characteristics of China's new generation power system in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

[3] 薛禹胜, 朱洪波, 王琴, 等. 物联网对能源转型的支撑[J]. 物联网学报, 2019, 3(1): 1-7.
XUE Y S, ZHU H B, WANG Q, et al. Support of the Internet of things for energy transformation[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(1): 1-7.

[4] LIU J Y, CHAI Y X, XIANG Y, et al. Clean energy consumption of power systems towards smart agriculture: roadmap, bottlenecks and technologies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 273-282.

[5] 付学谦, 周亚中, 孙宏斌, 等. 园区农业能源互联网: 概念、特征与应用价值[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 152-161.
FU X Q, ZHOU Y Z, SUN H B, et al. Park-level agricultural energy internet: concept, characteristic and application value[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 152-161.

[6] 龚钢军, 孙毅, 蔡明明, 等. 面向智能电网的物联网架构与应用方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 52-58.
GONG G J, SUN Y, CAI M M, et al. Research of network architecture and implementing scheme for the Internet of things towards the smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 52-58.

[7] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 9-20.
YANG T, ZHAI F, ZHAO Y J, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power Internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20.

[8] 李钦豪, 张勇军, 陈佳琦, 等. 泛在电力物联网发展形态与挑战[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 13-22.
LI Q H, ZHANG Y J, CHEN J Q, et al. Development patterns and challenges of ubiquitous power Internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 13-22.

[9] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.
SUN H B, GUO Q L, PAN Z G, et al. Energy Internet: driving force, review and outlook[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013.

[10] ASHTON K. That "Internet of things" thing[J]. FRID Journal, 2009.

[11] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1-9.
SUN Q B, LIU J, LI S, et al. Internet of things: summarize on concepts, architecture and key technology problem[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3): 1-9.

[12] LIN J, YU W, ZHANG N, et al. A survey on Internet of things: architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(5): 1125-1142.

[13] 冯庆东. 能源物联网关键技术与发展愿景[J]. 能源, 2018(10): 25.
FENG Q D. Key technologies and development vision of energy Internet of things[J]. Energy, 2018(10): 25.

[14] MUHANJI S O, SCHOONENBERG W C H, FARID A M. Transforming the grid's architecture: enterprise control, the energy Internet of things, and heterofunctional graph theory[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(5): 71-81.

[15] 张灵芝, 王杨帆, 刘基典, 等. 电网故障行波传感器研究及测试[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 142-149.

- ZHANG L Z, WANG Y F, LIU J D, et al. Research and experiments on the transmission characteristics of traveling wave sensor for power fault[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2): 142-149.
- [16] 张宇, 汪金刚, 王永华, 等. D-dot 场式电压传感器试验系统[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(8): 63-69.
- ZHANG Y, WANG J G, WANG Y H, et al. Simulation system of field voltage sensor based on the D-dot sensor[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2017, 40(8): 63-69.
- [17] 徐云水, 沈龙, 梁仕斌, 等. 基于光纤传感的输电导线温度监测[J]. *云南电力技术*, 2018, 46(4): 79-82.
- XU Y S, SHEN L, LIANG S B, et al. Temperature monitoring of transmission conductor based on optical fiber sensing[J]. *Yunnan Electric Power*, 2018, 46(4): 79-82.
- [18] 郭岩宝, 刘承诚, 王德国, 等. 甲烷传感器气敏材料的研究现状与进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(14): 1456-1470.
- GUO Y B, LIU C C, WANG D G, et al. Advances in the development of methane sensors with gas-sensing materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1456-1470.
- [19] WU Z Q, CHEN X D, ZHU S B, et al. Room temperature methane sensor based on graphene nanosheets/polyaniline nanocomposite thin film[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(2): 777-782.
- [20] 袁亮, 俞啸, 丁恩杰, 等. 矿山物联网人一机一环状态感知关键技术研究[J]. *通信学报*, 2020, 41(2): 1-12.
- YUAN L, YU X, DING E J, et al. Research on key technologies of human-machine-environment states perception in mine Internet of things[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(2): 1-12.
- [21] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 70-82, 375.
- ZHOU F, ZHOU H, DIAO Y L. Development of intelligent perception key technology in the ubiquitous Internet of things in electricity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 70-82, 375.
- [22] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1575-1585.
- WANG Y, CHEN Q X, ZHANG N, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric Internet of things: application analysis and research prospects[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [23] CHETTRI L, BERA R. A comprehensive survey on Internet of things (IoT) toward 5G wireless systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 16-32.
- [24] SONG Y H, LIN J, TANG M, et al. An Internet of energy things based on wireless LPWAN[J]. *Engineering*, 2017, 3(4): 460-466.
- [25] 邵嘉, 庞成鑫, 卢小姣, 等. LPWAN 技术在能源物联网领域应用研究[J]. *物联网技术*, 2018, 8(12): 44-47.
- SHAO J, PANG C X, LU X J, et al. Application of LPWAN technology in the field of energy Internet of things[J]. *Internet of Things Technology*, 2018, 8(12): 44-47.
- [26] 白若琛, 庞成鑫, 贾佳, 等. 多协议融合 LPWAN 能源物联网云平台的设计[J]. *计算机科学*, 2019, 46(S1): 589-592.
- BAI R C, PANG C X, JIA J, et al. Design of cloud platform for energy Internet of things based on LPWAN multi-protocol[J]. *Computer Science*, 2019, 46(S1): 589-592.
- [27] 于泊宁, 任明, 张志斌, 等. 配电设备分布式局部放电感知技术的实现方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(6): 1929-1938.
- YU B N, REN M, ZHANG Z B, et al. Implementation method of distributed partial discharge sensing technology for power distribution equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6): 1929-1938.
- [28] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于 LPWAN 技术的能源电力物联网[J]. *电信科学*, 2017, 33(5): 143-152.
- CHEN Y B, TANG Y, AI X W, et al. Electricity Internet of things based on LPWAN technology[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(5): 143-152.
- [29] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 1-8.
- CHEN H Y, CHEN Y B, WANG X J, et al. Ubiquitous power Internet of things based on LPWAN[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 1-8.
- [30] 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, 38(2): 532-537.
- JING M C, WANG J Y, CHENG Z H, et al. Research and application of sensor information model for power Internet of things[J]. *Power Grid Technology*, 2014, 38(2): 532-537.
- [31] 张琦, 杨浩, Tony Q. S. Quek, 等. 物联网的核心本质——数据联网[J]. *物联网学报*, 2017, 1(3): 10-16.
- ZHANG Q, YANG H, QUEK TONY Q S, et al. Kernel of Internet of things: Internet of data[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2017, 1(3): 10-16.
- [32] 张妮. 基于深度学习网络的物联网非法入侵识别研究[J]. *微电子学与计算机*, 2020, 37(6): 75-78.
- ZHANG Y. Research on Internet of things illegal intrusion recognition based on deep learning network[J]. *Microelectronics & Computer*, 2020, 37(6): 75-78.
- [33] 席磊, 余璐, 张弦, 等. 基于深度强化学习的泛在电力物联网综合能源系统的自动发电控制[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50(2): 221-234.
- XI L, YU L, ZHANG X, et al. Automatic generation control of ubiquitous power Internet of things integrated energy system based on deep reinforcement learning[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50(2): 221-234.
- [34] 原吕泽芮, 顾洁, 金之俭. 基于云-边-端协同的电力物联网用户侧数据应用框架[J]. *电力建设*, 2020, 41(7): 1-8.
- YUAN L Z R, GU J, JIN Z J. User-side data application framework based on cloud-edge-user collaboration in power Internet of things[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(7): 1-8.
- [35] 张玉清, 周威, 彭安妮. 物联网安全综述[J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(10): 2130-2143.
- ZHANG Y Q, ZHOU W, PENG A N. Survey of Internet of things security[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2017, 54(10): 2130-2143.
- [36] ABDI F, CHEN C Y, HASAN M, et al. Preserving physical safety under cyber attacks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6285-6300.
- [37] 李旻照, 沈昌祥, 田楠. 用科学的网络安全观指导关键信息基础设施安全保护[J]. *物联网学报*, 2019, 3(3): 1-4.
- LI Y Z, SHEN C X, TIAN N. Guiding the security protection of critical information infrastructure with scientific network security concept[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2019, 3(3): 1-4.
- [38] RIZVI S, PIPETTI R, MCINTYRE N, et al. Threat model for securing Internet of things (IoT) network at device-level[J]. *Internet of Things*, 2020, 11: 100240.
- [39] 赵志远, 王建华, 朱智强, 等. 面向物联网数据安全共享的属性基

- 加密方案[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(6): 1290-1301.
ZHAO Z Y, WANG J H, ZHU Z Q, et al. Attribute-based encryption for data security sharing of Internet of things[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(6): 1290-1301.
- [40] 李森森, 黄一才, 郁滨, 等. 基于 PUF 的低开销物联网安全通信方案[J]. 电子学报, 2019, 47(4): 812-817.
LI S S, HUANG Y C, YU B, et al. A PUF-based low cost secure communication scheme for IoT[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(4): 812-817.
- [41] 王谦. 物联网管理模式: 基于以物联网为代表的新一轮信息革命浪潮的管理思辨[J]. 四川大学学报(哲学社会科学版), 2014(5): 119-126.
WANG Q. The Internet of things management model: based on IoT as the representative of a new round of information revolution[J]. Journal of Sichuan University (Social Science Edition), 2014(5): 119-126.
- [42] 薛飞, 雷宪章, 张野飏, 等. 基于物联网的电动汽车智能充换电服务网络电池管理[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 41-46.
XUE F, LEI X Z, ZHANG Y B, et al. Battery management of smart charging and swapping service network for electric vehicle based on Internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 41-46.
- [43] 刘志刚. 基于物联网的智能用电管理系统研究与实现[J]. 湖北工业大学学报, 2015, 30(5): 73-76.
LIU Z G. Intelligent power management system based on Internet of things[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2015, 30(5): 73-76.
- [44] 赖春媛, 闫文卿, 亓晋. 基于云雾融合的工业物联网能源管理架构[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 2-9.
LAI C Y, YAN W Q, QI J. An energy management framework based on fog-cloud combining for industrial Internet of things[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 2-9.
- [45] 陈启鑫, 王克道, 陈思捷, 等. 面向分布式主体的可交易能源系统: 体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 1-7.
CHEN Q X, WANG K D, CHEN S J, et al. Transactive energy for distributed agents: architecture, mechanism and technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7.
- [46] RAHIMI F, IPAKCHI A. Using a transactive energy framework: providing grid services from smart buildings[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(4): 23-29.
- [47] 张元星, 江冰, 刁晓虹, 等. 基于车联网平台的分布式能源交易体系[J]. 电力建设, 2019, 40(7): 10-17.
ZHANG Y X, JIANG B, DIAO X H, et al. Distributed energy trading system based on Internet of vehicles platform[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(7): 10-17.
- [48] 王蓓蓓, 李雅超, 赵盛楠, 等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 53-64.
WANG B B, LI Y C, ZHAO S N, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64.
- [49] 高镇, 崔琪楣, 张雪菲, 等. 区块链在物联网系统中的应用探讨[J]. 物联网学报, 2020, 4(2): 10-17.
GAO Z, CUI Q M, ZHANG X F, et al. Discussions about application of blockchain in IoT systems[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(2): 10-17.
- [50] 余维, 顾志豪, 杨晓宇, 等. 异构能源区块链的多能互补安全交易模型[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3193-3201.
SHE W, GU Z H, YANG X Y, et al. A model of multi-energy complementation and safety transaction on heterogeneous energy blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3193-3201.
- [51] 穆程刚, 丁涛, 董江彬, 等. 基于私有区块链的去中心化点对点多能源交易系统研制[J/OL]. 中国电机工程学报, 2020.
MU C G, DING T, DONG J B, et al. Development of decentralized peer-to-peer multi-energy trading system based on private blockchain technology[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2020.
- [52] 平健, 严正, 陈思捷, 等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7137-7145, 7487.
PING J, YAN Z, CHEN S J, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145, 7487.
- [53] 刘俊勇, 向月, 姚昊天, 等. 三网融合下充电服务网规划与运营探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 1-12.
LIU J Y, XIANG Y, YAO H T, et al. Discussion on planning and operation of charging service network integrated with power and transportation networks[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 1-12.
- [54] 韩晓言, 丁理杰, 陈刚, 等. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2711-2722.
HAN X Y, DING L J, CHEN G, et al. Key technologies and research prospects for cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2711-2722.

[作者简介]



刘俊勇(1963—), 男, 四川成都人, 博士, 四川大学电气工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为电力市场、泛在电力物联网、EV等。



潘力(1995—), 男, 四川达州人, 四川大学电气工程学院博士生, 主要研究方向为可交易能源、EV等。



何迈(1965—), 女, 四川西充人, 四川大学电气工程学院高级实验师, 主要研究方向为电力系统计算机应用。