

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202085

# 电力物联网：数据科学视角及商业模式

陈皓勇, 李志豪, 陈锦彬, 蔡伟钧, 段声志

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 当前电力(能源)系统正在向数字化转型, 电力物联网的建设进入新阶段。大量感知设备和智能终端接入电力物联网, 在电力系统内部和外部产生并积累了大量的数据。特别是电力系统的用电数据蕴藏巨大的价值, 内含丰富的社会经济信息。针对用电数据, 电力物联网有着多种可能的商业模式。介绍了电力物联网的3重涵义, 结合电力物联网中不同类型用电数据的来源阐述其背后的信息, 探讨信息/数据融合的理论和技术, 并指出数据驱动下电力物联网商业模式的关键问题和具体业务, 最后分析了电力物联网数据服务所面临的挑战。

**关键词:** 电力物联网; 用电数据; 社会经济信息; 商业模式

## Power internet of things: data science perspective and business models

CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Jinbin, CAI Weijun, DUAN Shengzhi

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Currently power (energy) systems are undergoing digitalization, and the development of the power internet of things has entered a new stage. A large number of sensing devices and smart terminals are connected to the power internet of things, and a large amount of data are generated and accumulated inside and outside the power systems. The electricity consumption data have great value and reflect social and economic information. For electricity consumption data, the power internet of things has a variety of business models. This paper introduces the triple meanings of the power internet of things, explains the socioeconomic information embedded in various power consumption data according to their sources, discusses the theories and techniques of information/data fusion, points out the key problems and specific business models of data-driven services, and finally analyzes the challenges faced by data services of the power internet of things.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51937005).

**Key words:** power internet of things; electricity consumption data; socioeconomic information; business model

## 0 引言

当前电力(能源)系统朝着数字化方向转型, 电力改革进程不断加快。智能电网、电力物联网、电力市场改革、新能源革命以及“互联网+”智慧能源等改革在各项政策的支持下继续推进。文献[1]阐述了智能电网研究方向, 提出要以赛博安全为标准建立具有足够韧性的坚强智能电网, 强调了智能电网建设的紧迫性和长期性。2019年, 国家电网公司系统地阐述了电力物联网的发展方向、目标和应用场景, 南方电网公司开始探索数字电网概念和技术<sup>[3]</sup>。

在加快建设世界一流能源互联网和数字电网的

背景下, 海量电力设备和用户智能终端需要接入电力系统, 带来了大量的碎片化、零散化的信息<sup>[4]</sup>, 传统的传输和处理技术已经不能满足当前需要, 亟需寻求满足海量信息传输的网络通信技术以及更高效的数据处理方法。文献[5]较为系统地阐述电力物联网的关键技术, 如终端智能化、通信技术、数据的处理与价值挖掘, 以及业内应用场景。

为适应电力(能源)行业的数字化转型, 需从数字化的要求出发, 运用云计算、人工智能、大数据分析等先进手段对数据进行挖掘, 推动数据业务发展和商业模式转变。文献[6]以电力通信网为切入点, 对电力物联网的新业务场景进行需求分析, 指出适应当前电力物联网发展背景的通信网关键技术。文献[7]通过小微智能传感器收集电网数据, 引出高效处理海量数据的难题, 并挖掘用电大数据潜

在价值, 促进用户智慧用电。文献[8]以电力电缆井盖为切入点, 通过云服务低成本实现井盖智能化。文献[9]利用末端节点采集、大数据分析、云平台等方法搭建电力物联网的可再生能源政策评估系统模型, 为可再生能源政策提供决策支持。

电力信息中具有海量的小数据, 虽然单数据价值密度低、收集困难, 但通过当前多样的感知和通信技术进行收集和传输, 并进行整合处理后, 将呈现出大数据特征, 蕴含的潜在价值高, 对其分析处理后可满足不同行业需求。文献[10]在大数据分析的同时考虑用户隐私安全, 提出打破系统内部数据孤岛的联邦学习框架, 建立用于电力计量的训练模型。文献[11]以智能测量终端处理数据时拥堵、延迟等问题为研究对象, 提出了基于边缘计算与MapReduce的数据处理方法。文献[12]以荷兰智能家庭用户为数据源, 通过云计算和雾计算处理大量零散数据, 并挖掘它们的价值。文献[13]对电力物联网收集到的实时数据和历史数据进行数据分析, 从大数据角度挖掘出电力系统灾变因子, 以求实现“孕灾-传灾-报灾-防灾”的防控手段。

目前, 相关行业对电力数据有着极大需求, 电力物联网可为用户提供数据相关服务, 满足用户业务的需求, 实现数据变现, 促进相关行业的不断发展。文献[14]以内部、外部数据总结电力大数据的主要来源, 并引用哈佛商学院 Michael E.Porter 教授的价值链观点, 建立了电力大数据价值链的模型, 更好地进行电力大数据的利用与价值挖掘。文献[15]研究分析了虚拟电厂的商业模式, 指出电力物联网背景下未来虚拟电厂商业模式的运行发展方向。文献[16]以智能小区为例, 从投资建设、运营管理、盈利模式等方面进行商业分析。文献[17]指出电力物联网的发展需要引入商业模式利益驱动。在良性循环的商业模式中, 为数据科学注入动力, 促进电力物联网数据处理研究的发展。

本文探讨了当前电力物联网的架构及其含义, 并介绍了关键的通信方式。重点阐述了在电力物联网中所获取的电力数据及其背后的社会经济信息, 指出了信息/数据的融合方式。最后总结了数据驱动下电力物联网商业模式的关键业务, 并分析了其所面临的挑战。

## 1 电力物联网概念及技术架构

### 1.1 电力物联网的概念

1991 年美国麻省理工学院(MIT)的 Kevin Ash-ton 教授首次提出物联网的概念, 目的是在任何时间将物品和物品、物品和人、人和人相互来连接

起来。物联网以传感网络为基础<sup>[18]</sup>, 采集任何需要的信息, 通过网络接入技术, 实现大范围、全覆盖的连接, 为平台管理和应用奠定基础。

物联网的技术架构大致分为四个层级: 感知层、网络层、平台层、应用层。如图 1 所示, 感知层是物联网的基础, 包括现场采集部件和智能终端等, 对物联网的基础设备和环境进行感知, 并接入网络层; 网络层包括接入网、骨干网、业务网、支撑网, 将感知层测得的信息传送给平台层作下一步的处理; 平台层通过一体化的云平台, 建立全业务统一的数据中心和物联管理中心, 提高数据的处理效率, 建设企业中台, 实现统一管理; 应用层通过平台层, 实现对内和对外业务的承接和办理, 提供最终的服务。而电力物联网就是围绕电力系统的各个环节, 如发输配电网络、家用电器、电力设备等, 通过不同连接方式, 实现全面感知和数据的高效处理。

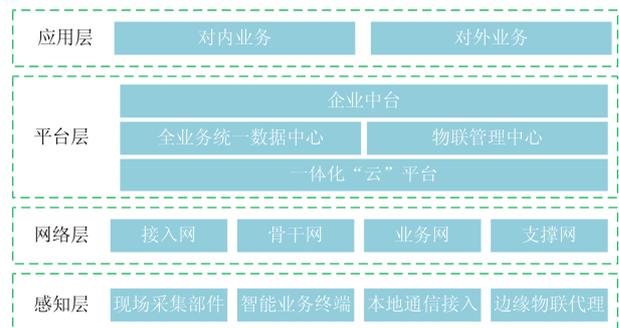


图 1 电力物联网技术架构

Fig. 1 Technology architecture of power IoT

电力物联网作为物联网的一种具体形态, 从不同学科视角, 具有以下 3 方面的涵义。

1) “物联网+”电力(自动化科学视角), 即物联网技术, 如低功耗广域网络(LPWAN)<sup>[19]</sup>、5G<sup>[20]</sup>等在电力行业的应用, 作为传统电力信息化、自动化的延伸, 其主要作用是获取传统信息化、自动化系统未覆盖的边缘数据, 并应用于电力系统规划、运行与控制。

2) “电力+”物联网(数据科学视角), 即以用电数据为中心, 基于数据科学方法对各类电力用户的用电行为进行分析。由于电力用户几乎涵盖全社会的所有行业, 通过数据科学方法可以处理用电数据中所包含的大量有价值的社会经济信息, 并为各行各业提供决策支撑。

3) “电网即物联网”(通信科学视角), 即基于电力线通信的物联网技术。利用电力线作为通信介质(如宽带电力线载波 HPLC), 网随电通, 可传输其他非电气量数据(如水、电、气、热四表合一集抄)。

## 1.2 电力物联网的主要通信技术

电力物联网有主要的三大类通信技术: LPWAN、5G、电力线载波通信。

文献[19]对 LPWAN 进行了大致的概述, 并给出了其在电力物联网的组网方案。LPWAN 有着覆盖面广、能耗小、寿命长、连接量大的优点, 一台 LPWAN 设备可以连接很多台传感器, 加上价格低廉的优点, LPWAN 可以应用在传感器量多且分散的环境。电力物联网目前基础小数据众多, 分布面广, LPWAN 的特点正好可以连接这些状态变化慢、采集频率低、高度分散分布的基础小数据<sup>[21]</sup>, 为之后的数据挖掘奠定基础。

5G 技术拥有着高宽带、海量连接、低时延、高可靠性的特点<sup>[22]</sup>, 5G 技术的峰值速率、区域速率、边缘速率都比 4G 有了极大提高<sup>[23]</sup>, 每平方公里还可以连接 100 万个终端。5G 凭借其特点可以在电力物联网中的配电网差动保护、PMU、精准控制、虚拟电厂、智能巡检、网络精准授时有着广阔的应用前景<sup>[20]</sup>, 进行大量的实时数据分析。

电力线载波通信(Power Line Communication, PLC)是目前电力系统广泛采用的通信技术, 即利用已有的输配电线路作为通信介质, 实现数据、语音、图像等信号的传输。电力线有着极其庞大的覆盖率, 无需重新建设即可实现用户接入。从使用带宽来看, 电力线载波可以分为在 1 Mbit/s 以下且带宽在 3~500 kHz 之间的窄带电力线载波<sup>[24]</sup>和宽带电力线载波。窄带电力线载波通信多采用普通的 FSK 技术、PSK 技术、直接序列扩频技术和线性调频 Chirp 等技术, 通信速率比较小; 宽带电力线载波, 也称为高速电力线载波(HPLC), 目前主要应用于电信息采集系统中。它利用电力线作为数据通信载体, 多采用正交频分复用 OFDM 等技术, 免布线、低成本地实现用电信息的自动采集和计量、异常监测、电能质量分析、相关信息发布、分布式能源监控、智能用电设备的信息交互等功能, 可应用于配网自动化、多表采集、智能家居、楼宇通信管理、城市照明控制。由于靠近用户侧, 用户可以通过电力线很方便地组网, 如智能家居网络, 无需架设新线节省成本, 以插座为基本单元点, 实现家居平台的搭建, 可扩展性强, 可实现较低成本的永久在线。将家电通过电力线载波通信技术专用设备联入家庭网关, 再连入互联网, 实现智能家电的远程控制。除了智能家居外, HPLC 还可以应用于台区识别、台区拓扑识别、停电主动上报、相位识别、远程升级、高频采集等方面。

## 2 电力物联网中数据科学与信息通信技术的融合应用

### 2.1 电力物联网获取电力行业边缘数据

电力数据分别在电力行业的各个环节, 包含有电力行业内部发输配电侧和大多非电力行业的用户侧。如图 2 所示, 在发输配电侧, 数据的种类繁多, 涉及如湿度等环境数据, 还有设备状态数据。除此之外, 在铁塔、变电站、电缆隧道附近的安全防范数据、建筑物的状态数据、地理环境、气象的附属设施数据都是电力物联网中可以运用各种传感、通信技术进行采集的电力行业边缘数据。

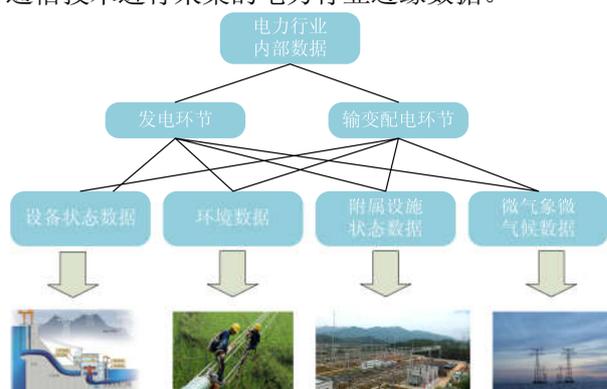


图 2 电力系统边缘数据

Fig. 2 Edge data of power systems

这些电力行业内部的边缘数据, 对电力设施规划建设、电力设备监视、用电安全防护、电力负荷预测、故障分析和智慧能源新业务有着重要的作用。

### 2.2 用电数据反应社会经济信息

电力行业内部的数据固然重要, 但电力物联网用户侧的数据有更大的发掘和发展空间。如图 3 所示, 用户侧主要涉及: 居民家庭, 包括各种家用电器、电箱和开关、内部线路和保护措施; 农业工业, 包括电动机械设备、车间照明; 城市中心 CBD 的商业大厦群和其他各类建筑物, 包括中央空调、电梯扶梯、楼宇系统; 所有的公共基础设施, 如电动公交车、城轨、地铁、城市照明和交通灯。

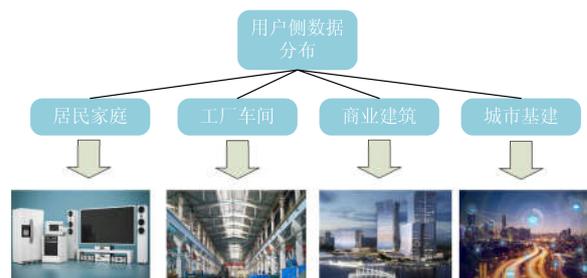


图 3 多样化的用电数据

Fig. 3 Various electricity consumption data

用户侧电力小数据众多, 各类电力用户的用电行为包含了大量社会经济信息。借助电力大数据平台, 通过用户分类、用户用电行为影响因子(自我影响因子、自然环境影响因子、社会环境影响因子)的分析计算<sup>[25]</sup>, 区别不同种类用户的用电特征, 分析其用电行为, 寻找数据间的联系与规律, 并与经济学、社会学等结合, 挖掘出其背后的社会信息。

1) 电力数据反映经济发展状况。电能作为一种应用最广泛和最方便的二次能源, 可以准确计量消费情况, 相对于其他行业具有一定的先行性, 可为修正宏观经济数据提供重要参考, 能够准确反映现代工业和市场主体经济的产出能力。另一方面, 从电力大数据出发, 挖掘电力数据和经济之间的关系, 构建经济预测指数, 可以预测经济周期及其走势<sup>[26]</sup>通过电力数据预测 GDP。

2) 电力数据折射复工复产情况。2020 年疫情期间, 政府需要掌握各地情况, 相比各级政府逐级上报的方式, 电力数据具有全面、准确、高效、直观的优势, 可以有效克服工作人员不足的情况。根据用电信息采集系统中企业历史用电量情况和当日用电量情况, 参考复工企业数量比例, 构建企业复工复产电力指数, 精准分析企业复工复产情况。

3) 电力数据揭示企业发展状况。企业的生产经营活动离不开电力, 记录每一家企业不同时段的不同用电情况, 挖掘数据之间隐藏的深度关联关系, 对企业进行状态评估, 推断中小企业的生命周期阶段和发展规模, 预测企业发展潜力。

4) 电力数据助力金融服务。通过对含用电量的用电数据的分类分析, 重点推荐信用评价高、发展前景好的优质融资客户。对高能耗用户、高价值的企业进行深度分析, 建立企业经营情况指标体系, 尽早识别高风险企业, 辅助银行进行预防, 提高风险防范。构建城市 CBD 的“电力热点图”, 使电力数据可视化。

5) 电力数据评估中小企业信用风险。通过长期用电规律、缴费情况、基本信息判断企业的信用可靠情况, 对中小企业进行筛选, 信用好的企业推荐给银行, 形成信用信息的共享。

6) 电力数据审查开发商偷税漏税。重点关注用电账户开户时间久但用电量极低的记录, 再实地取证, 稽查偷税漏税。

7) 电力数据估计家庭情况。合理地从智能电表中调取家庭每种电器的用电信息, 结合房屋面积, 可以估算出一个家庭的收入情况和居住人口。商家和政府可根据用电信息, 提供针对性的服务和产品, 或采取政策上的调整。美国加州大学洛杉矶分校的

研究者利用人口信息和电力公司提供的信息, 设计出可展示当下用电量的“电力地图”, 以分析社会群体的用电行为习惯。

8) 电力数据反映医疗健康状况。同一季度中, 医疗机构的用电量与患者的数量或重症比例呈明显的正相关关系, 患者增多或重症患者比例变大, 需要启用的医疗设备也越多, 耗电量也趋升。对于单个用电用户来说, 越少运动且越长时间呆在家里, 越晚睡觉, 用电量也会越多, 健康程度也会普遍下降。哈佛大学曾经做了一个个人健康状况和用电量之间的调查, 调查表明, 得克萨斯地区糖尿病人、肥胖症病人、空闲时间缺乏运动的人数与平均每天用电量呈正相关关系。

9) 基于电力数据合理安排电动汽车充电服务。通过大数据平台收集电动汽车充电站、充电桩等电动汽车充电基础设施的数据, 以及电池资产信息的管理数据, 可推算最佳的充电时间和充电地点。

10) 电力数据协助缉毒及其他公共服务。针对有异常用电现象的地点进行排查筛选, 可以协助公安机关确定犯罪分子的制毒窝点。也可助力电气安全、消防安全等公共服务。

电能的使用遍及社会的各个领域, 电力用户是电力系统的终端, 电力数据反映一系列的社会信息, 如何结合社会科学知识挖掘出用电数据背后的规律, 将是电力物联网下一步的重要研究方向。

### 2.3 电力物联网的信息/数据融合技术

电力物联网目前的基础数据信息众多, 来源各异, 差异化大, 单数据价值密度低, 集合后成大数据特征, 蕴含潜在价值高, 但传统的数据分析技术不能直接应用于电力物联网。而且, 电力系统的阶段性、实时性将导致物联网平台上积累大量控制、监测、计量等历史和实时数据。

传统的信息/数据处理集中式算法由于只有一个处理中心, 可能存在计算负荷重而且安全性不够的问题, 如果计算中心发生故障, 会使整个系统瘫痪<sup>[27]</sup>。而分布式信号处理由于处理节点互相独立, 不依赖处理中心, 只对迭代计算的结果进行交互, 鲁棒性更强, 更能适应电力物联网数据信息融合的要求。

5G 新技术的出现, 其低时延大带宽的优势, 给电力系统数据处理带来新的契机。可建立分布式感知网络, 提高对重点区域的覆盖率, 减少冗余感知节点的投放。通过 5G 边缘计算, 在采集到用户侧数据时, 可采用边缘计算方式把数据增值计算下沉至数据源头, 对用电行为进行实时分析, 将使整体网络服务响应更快、效率更高。

另一方面, 可建立云计算平台, 在能量约束、有限通信带宽的限制下, 通过云边协同计算降低数据处理复杂度、保证处理的实时性以及通信系统的鲁棒性, 寻求全局估计与局部估计在功能上的平衡和优化, 并根据需求变化进行动态调整<sup>[27]</sup>。

在理想的信息融合架构下, 每个传感节点将估计结果传输至相邻传感节点并对估计结果进行修正, 将大幅度降低计算量, 减小通信代价, 缩短响应时间, 提高实时性、可扩展性和鲁棒性。

在信息采集节点, 针对稀疏信号, 融入压缩感知技术, 可以有效解决传统奈奎斯特采样定理因采样频率高产生海量采样数据而造成资源浪费, 并加重数据存储和传输负担的问题<sup>[28]</sup>。此方法不仅能重构原始信号, 还能去除信号中的大部分噪声, 抗干扰能力强, 无需解压缩即可进行信号的特征提取, 减少检测的复杂度, 可以由远低于采样定理要求的采样点进行重建恢复, 一边采样一边压缩, 减小数据采集、存储与传输的压力。

### 3 电力物联网的商业模式

电力(能源)系统要进行数字化转型, 要从企业单独运营变成平台模式运营, 如图 4 所示, 把供应方、输送方、消费者、设备商、服务商聚集在统一平台内, 吸引各类市场主体参与, 实现跨界融合、合作共赢。在此基础上, 以数据的采集、传输、处理、分析、应用为核心, 以数据驱动为特色, 推动数字化转型, 将数据视为重要的资产, 实现从传统资产为核心到以数据为核心的转变。以客户为中心, 通过数据分析出客户的需求并进行主动对接, 为客户提供精准的多样化服务。

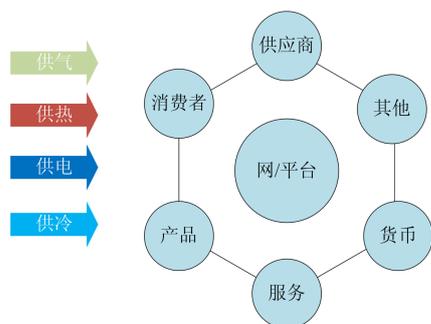


图 4 电力物联网统一平台

Fig. 4 Unified platform of power IoT

#### 3.1 电力物联网商业化运营的关键问题

要实现电力物联网的商业化运营, 首先是做好数据获取的基础设施建设, 也就是感知层建设, 并通过网络层对信号进行接入和传输; 平台层汇集了

海量的数据资源, 对数据进行管理并对外提供接口, 是电力物联网商业模式实现的核心环节; 应用层承载了各类具体业务内容, 可以实现数据的增值服务, 是商业模式最终得以实现的层次。

由于电力系统内具有大量的多源异构数据, 不同厂商的设备也有着不同的数据格式, 数据采集后分析困难。需要进行统一数据标准, 确定基础的数据模型, 建设统一的数据调用和服务接口标准, 才方便进行数据统一分析和深入挖掘。开展电力物联网云平台服务系统建设, 实现数据全面共享、业务全程在线, 优化客户服务、计量计费供电服务业务。借助数据分析, 预测客户消费需求, 为客户提供精准化营销服务, 提升客户粘性。

通过给用电设备编码, 建立实物 ID 和虚拟编号, 使每一个电力数据都有附带设备信息, 把电力数据从区域、住户再细分到设备。可以通过移动终端实地扫码或输入虚拟编号快速调阅设备参数和各种信息等, 实现产品的精准评价。亦可通过电力大数据分析用电设备的使用情况, 从而实现全寿命周期管理。

#### 3.2 电力物联网数据驱动的商业模式

电力物联网的商业模式以数据为核心, 覆盖行业的方方面面。

1) 虚拟电厂。在现有的电网和热网架构上, 通过用电数据采集分析电高峰, 在电力交易平台和调度系统上对储能设备、分布式供电系统、可控负荷进行聚合优化。如图 5 所示, 连接风电、光电、火电、储能站、工业园区参与电力市场的各类交易, 实现热电解耦最优化及供应效益最大化, 实现发电侧的多能互补和用户侧的灵活互动。在数据驱动的电力物联网环境下, 虚拟电厂能为电网增加可靠性和更高的容量, 辅助服务于电力系统, 并促进可再生能源的高效优化整合, 提高电力系统的经济性。

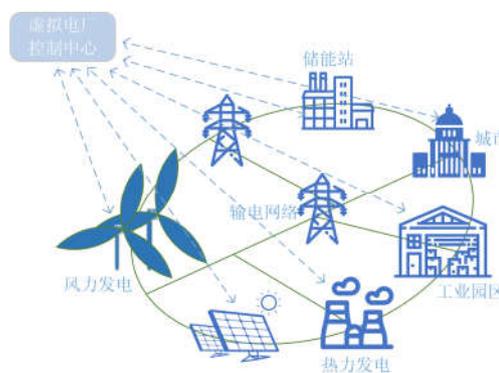


图 5 基于物联网技术的虚拟电厂

Fig. 5 Virtual power plant based on IoT

2) P2P 能源交易。在搭建的综合能源服务云平台上,能源用户通过“互联网+智慧能源”的方式与能源公司自由交易,用户利用电价低时储存的电量或清洁能源发电与能源公司自由买卖能源,平台从中抽取一定的费用,来实现盈利和维护物联网平台的基础设施。同时,用户也可作为小型的售电单位,在平台上实现个人对个人的能源交易。

3) 数据促进跨界融合。基于电力物联网,冷、热、电、气、燃油供应商可组建商业联盟或综合能源服务解决方案联合供应商,解决各类能源不能很好地供应、调控问题。利用电力数据的特点,对生产活动进行调节和优化,制定更个性化的生产流程和用户服务流程,促进与电力行业的合作融合,实现更好的社会服务和企业盈利。

4) 数据衍生新型业务。电力用户的用电设备、日常用电行为都会在用电数据留下痕迹。电力物联网具有庞大的用户群体,基本覆盖社会全阶层,拥有超高数量级的用户数据,可以由它辐射互联网或者金融行业,拓展新的业务<sup>[29]</sup>。

5) 云计算服务。电力物联网将计算资源放入云中,用户通过网络以按需、易扩展的方式获得所需资源和服务,免去招聘员工和软硬件的购买,精简架构,只需一次性支付,即可通过互联网获取云计算服务。

6) 数据资产运营<sup>[30]</sup>。将采集到的数据视为与软硬件设备一样的重要资产,保证其基本安全并进行合理利用。通过数据资产运营,实现数据有效管理,作为内部评估或者规划企业未来发展路线的资产,可以更好地进行数据增值,发挥其资产作用。

7) 数据共享与租赁。电力物联网具有海量的感知设备,会产生大量的原始数据,在数据中台都有记录,比如配电网中关键节点的电力数据、分区域分时段的用电量、电能质量数据等。可以通过共享或租赁的方式,将原始电力数据开放给电网内部或者对原始电力数据有需求的电网外部高校和科研机构,实现客户服务质量提升和数据变现。

8) 数据分析预测服务。基于“数据→问题”范式,直接利用电力大数据解决问题。例如,基于深度学习等人工智能方法对采集到的海量信息进行分析和处理,得到具有通用性和自适应性的结果。对于电力行业内部,可以广泛应用于电力系统运行控制、输变电设备检测、配用电管理、电能质量分析;对于电力行业外部,可以协助政府、企业、客户进行更好的决策。

9) 售电公司个性化服务。售电公司、综合能源公司基于电力数据服务商所提供的用电数据分析,

根据客户需求开展用电管理服务,为客户制定合理的用电方案、电力套餐、激励措施<sup>[31]</sup>,以降低能耗并节省用电支出。通过数据采集和处理,建立用户画像,挖掘具有增值服务潜力的用户,通过合同能源管理等商业模式开展相关项目,实现多方共赢。

10) 政府职能数据化服务。电力大数据服务商通过“电力数据采集+算法模型分析+决策系统优化”,为政府职能部门、第三方服务公司提供决策支持。

电力物联网还可为电能质量治理、云平台自助服务、5G 商业应用等建立新的商业模式。针对不同的客户类型,提供个性化定制的解决方案,将为电力物联网的商业模式注入全新的活力。

### 3.3 电力物联网数据服务所面临的挑战

电力物联网的数据服务需要采集大量的数据,其基础是海量的可感知设备和完善的通信网络,而目前电力物联网亟需海量、大范围、具有普遍性的物联接入,由于目前智能传感器的普及率仍不高,感知层的建设仍是电力物联网建设的重点之一。当前信息通信技术快速发展,除常规的有线、无线、光纤、微波、电力线载波等通信方式外,水声通信、气体声波通信、声表面波通信、可见光通信等也有可能应用于电力物联网,但很多问题仍有待研究,不同通信技术也未能很好地互相融合。

目前的数据分析研究,从不同的视角出发,所面临的问题、挑战和关注点都不同,例如,知识范式或数据范式、更好的算法或更多的数据、数据密集型或计算密集型等方面的取舍。电力物联网背景下的数据处理需求可能将超出现有的存储与计算能力<sup>[32]</sup>,如何用简单模型及模型集成方法实现较高的智能、如何从海量数据中快速洞察有价值的信息、如何通过试验设计和模拟仿真实现数据到智慧的转变等,也都是需要考虑的问题<sup>[33]</sup>。

大数据挖掘、人工智能技术应用、数据分析与领域知识的融合等是数据科学研究方向的重点。要考虑如何从不同专业视角解读电力物联网数据,解决相互重叠和冲突之处,发现其中的差异性和共性。大数据挖掘专注在高维统计分析多个变量的相关性,深度学习等人工智能技术则从浅层特征到深层特征建立含多个隐层的“黑箱”方法模型,从而满足高维数据的学习场景,人工智能与大数据技术的融合是必然趋势,也将在电力物联网中发挥巨大作用。

## 4 结论

电力物联网建设正在全方位开展,其中的电力数据蕴藏着尚未被挖掘的巨大价值,将成为重要的新型资产,因此本文侧重从数据科学视角进行分析。

电力物联网数据反映了电网内部的运行工况和电网外部的社会经济信息, 其分析处理既富有挑战性, 也具有重大的潜在价值。本文详细阐述了电力物联网的含义, 分析了不同来源电力数据所包含的社会经济信息的特征及用途, 并提出了数据驱动的电力物联网商业模式, 以期为电力物联网的建设和发展提供参考。

## 参考文献

- [1] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 1-5.  
YU Yixin. Urgency and long-term nature of smart grid implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 1-5.
- [2] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.  
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [3] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.  
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [4] 郑楷洪, 徐兵, 肖勇, 等. 交互式电能大数据人工智能平台构建[J]. 南方电网技术, 2019, 13(8): 52-58.  
ZHENG Kaihong, XU Bing, XIAO Yong, et al. Interactive artificial intelligence platform solution for electric energy big data[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(8): 52-58.
- [5] 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, 53.  
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20, 53.
- [6] 刘林, 祁兵, 李彬, 等. 面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3114-3130.  
LIU Lin, QI Bing, LI Bin, et al. Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric internet of things[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3114-3130.
- [7] 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 Qin hao, ZHANG Yongjun, CHEN Jiaqi, et al. Development patterns and challenges of ubiquitous power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 13-22.
- [8] 郑琳子, 张莉. 基于云服务和物联网访问技术的智能电缆井盖研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 103-105, 110.  
ZHENG Linzi, ZHANG Li. Study on intelligent cable manhole cover based on cloud service and internet of things accessing and controlling technologies[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 103-105, 110.
- [9] 曾鸣, 王雨晴, 闫彤, 等. 基于泛在电力物联网平台的可再生能源政策评估系统设计与模型研究[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4263-4273.  
ZENG Ming, WANG Yuqing, YAN Tong, et al. System design and model research of renewable energy policy evaluation system based on platform of ubiquitous power internet of things[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4263-4273.
- [10] 郑楷洪, 肖勇, 王鑫, 等. 一个面向电力计量系统的联邦学习框架[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2020-09-07]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191332>.  
ZHENG Kaihong, XIAO Yong, WANG Xin, et al. A federated learning framework for power grid metering system[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2020-09-07]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191332>.
- [11] 罗鸿轩, 肖勇, 杨劲锋, 等. 基于边缘计算与 MapReduce 的智能量测终端数据处理方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 22-29.  
LUO Hongxuan, XIAO Yong, YANG Jinfeng, et al. Data processing method for smart metering terminal based on edge computing and MapReduce[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 22-29.
- [12] HUSSAIN M, SUFYAN B M M, ALAM M S. Fog computing for big data analytics in IoT aided smart grid networks[J]. Wireless Personal Communications, 2020: 1-24.
- [13] 李存斌, 计丽妍, 赵德福, 等. 基于数据驱动的电力系统灾变演化及防控研究与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 1-12.  
LI Cunbin, JI Liyan, ZHAO Defu, et al. Research and prospect of data-driven based disaster evolution and prevention of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 1-12.
- [14] 高骞, 胡广伟, 林辉, 等. 电力大数据价值链及其价值创造模式研究[J]. 中国科技资源导刊, 2020, 52(1): 6-13, 34.  
GAO Qian, HU Guangwei, LIN Hui, et al. Analysis on the value chain and value creation models of power big data[J]. China Science & Technology Resources Review, 2020, 52(1): 6-13, 34.
- [15] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3175-3183.  
WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous internet of things[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [16] 王澄, 徐延才, 魏庆来, 等. 智能小区商业模式及运营策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 147-154.

- WANG Cheng, XU Yancai, WEI Qinglai, et al. Analysis of intelligent community business model and operation mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 147-154.
- [17] 杨秀媛, 刘凤鸣, 陈麒宇, 等. 利益驱动的泛在电力物联网[J]. 现代电力, 2020, 37(1): 1-9.  
YANG Xiuyuan, LIU Fengming, CHEN Qiyu, et al. Profit-driven ubiquitous power internet of things[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(1): 1-9.
- [18] CHEN H, WANG X, LI Z, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.
- [19] 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 Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [20] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.  
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [21] BILBAO J, PERALTA G, HERNANDEZ D M, et al. Energy and coverage study of LPWAN schemes for Industry 4.0[C] // 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM), May 24-26, 2017, Donostia-San Sebastian, Spain.
- [22] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [23] JABER M, IMRAN M A, TAFAZOLLI R, et al. 5G backhaul challenges and emerging research directions: a survey[J]. IEEE Access, 2017, 4: 1743-1766.
- [24] 马晓奇. 电力线载波通信技术发展现状及其应用前景[J]. 机电设备, 2014, 31(3): 36-40.  
MA Xiaoqi. The development status and application prospect of power line carrier communication technology[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2014, 31(3): 36-40.
- [25] 辛苗苗, 张延迟, 解大. 基于电力大数据的用户用电行为分析研究综述[J]. 电气自动化, 2019, 41(1): 1-4, 27.  
XIN Miaomiao, ZHANG Yanchi, XIE Da. Summary of researches on consumer behavior analysis based on big power data[J]. Electrical Automation, 2019, 41(1): 1-4, 27.
- [26] 李赋欣, 罗晓伊, 沈军. 基于电力数据的经济景气指数模型研究[J]. 四川电力技术, 2018, 41(4): 64-68.  
LI Fuxin, LUO Xiaoyi, SHEN Jun. Power data-based research on economic prosperity index model[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(4): 64-68.
- [27] 陈皓勇, 王晓娟, 蔡永智, 等. 复杂电力(能源)系统的分布式感知与协同估计/检测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 1-10.  
CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, CAI Yongzhi, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy and energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 1-10.
- [28] 杨真真, 杨震, 孙林慧. 信号压缩重构的正交匹配追踪类算法综述[J]. 信号处理, 2013, 29(4): 486-496.  
YANG Zhenzhen, YANG Zhen, SUN Linhui. A survey on orthogonal matching pursuit type algorithms for signal compression and reconstruction[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(4): 486-496.
- [29] 杨东升, 王道浩, 周博文, 等. 泛在电力物联网的关键技术与应用前景[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 107-114.  
YANG Dongsheng, WANG Dao hao, ZHOU Bowen, et al. Key technologies and application prospects of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 107-114.
- [30] 蔡泽祥, 孙宇嫣, 郭采珊. 面向泛在电力物联网的支撑平台与行业生态构建[J]. 机电工程技术, 2019, 48(6): 1-4, 17.  
CAI Zexiang, SUN Yuyan, GUO Caishan. Construction of supporting platform and industry ecosystem towards electric internet of things[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(6): 1-4, 17.
- [31] MING H, XIA B, LEE K Y, et al. Prediction and assessment of demand response potential with coupon incentives in highly renewable power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 124-137. DOI: 10.1186/s41601-020-00155-x.
- [32] KAISLER S, ARMOUR F, ESPINOSA J A, et al. Big data: issues and challenges moving forward[C] // 2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences, January 7-10, 2013, Wailea, Maui, HI, USA: 995-1004.
- [33] 朝乐门, 邢春晓, 张勇. 数据科学研究的现状与趋势[J]. 计算机科学, 2018, 45(1): 1-13.  
CHAO Lemen, XING Chunxiao, ZHANG Yong. Data science studies: state-of-the-art and trends[J]. Computer Science, 2018, 45(1): 1-13.

收稿日期: 2020-09-14

作者简介:

陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、运行与控制, 综合能源系统与能源物联网, 新能源发电与智能电网技术, 电力经济与电力市场等; E-mail: eehychen@scut.edu.cn

李志豪(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制、电力物联网;

陈锦彬(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统、电力物联网。

(编辑 许威)