



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Clean Energy—Review

## 基于广域低功耗网络的能源物联网

宋永华<sup>a,b,c</sup>, 林今<sup>a,c,\*</sup>, 唐明<sup>b,c</sup>, 董树锋<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>b</sup> College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

<sup>c</sup> Center of Internet of Energy Things, Tsinghua-Sichuan Energy Internet Institution, Chengdu 610213, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 9 February 2017

Revised 26 Mar 2017

Accepted 3 May 2017

Available online 1 Aug 2017

#### 关键词

能源物联网

广域低功耗网络

NB-IoT

LoRa

需求侧

### 摘要

为了应对严峻的环境压力以及化石能源的枯竭危机,能源行业正在世界范围内共同推进能源互联网这一新型能源系统,目标以智能电网为骨架,综合电、气、热等多种能源形式,大幅提升能源系统对可再生能源的消纳能力。能源的需求侧是能源互联网的发展重点,也是新能源消纳灵活性的全新来源,具有巨大的技术发展潜力与市场空间。然而现有的能源信息技术并不能完全适应能源需求侧的运行特点,难以被高效经济地应用于能源互联网的需求侧管控之中,已成为当前能源需求侧技术发展的瓶颈。为了突破这一技术难点,本文提出利用通信领域近年来高速发展的广域低功耗网络(low power wide area network, LPWAN)技术,构造全新的能源物联网,从而为能源互联网需求侧的发展带来了全新的技术突破。LPWAN是一类具有远距离、低功耗、海量接入、低运维成本的通信技术的总称,与Wi-Fi、蓝牙、紫蜂(ZigBee)等局域物联网技术相比真正实现了大区域的低成本覆盖。本文介绍以窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)和远程(long range, LoRa)为代表的LPWAN技术,提出基于该技术实现的能源物联网体系架构。最后,本文展望了能源物联网技术驱动下,能源互联网需求侧的典型应用场景。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

伴随着严峻的环境压力以及化石能源的枯竭危机,能源系统向清洁化、低碳化转型已成为国内外能源行业的集体共识。为了提高可再生能源利用率,近十年来,智能电网的概念得到了广泛的认可[1,2]。2016年以来,国家发展和改革委员会联合国家能源局以及工业和信息化部联合发布《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》。国家能源局下发《关于组织实施“互联

网+”智慧能源(能源互联网)示范项目的通知》[3,4]。多部委的密集发文彰显了国家意志,将能源互联网提升至国家战略层面,明确提出能源互联网是推动我国能源革命的重要战略支撑。

构建广泛互联、开放互动、高度智能的能源互联网,以大规模地消纳清洁的可再生能源,需要全面深入、高渗透率的信息技术提供信息化支撑[5]。从控制理论视角看,最大限度地获取能源系统各节点的详细信息可以不断提高能源系统的可观性,进而增强整个系统的可控

\* Corresponding author.

E-mail address: [linjin@tsinghua.edu.cn](mailto:linjin@tsinghua.edu.cn)

性。因此，为了平衡一个复杂的能源系统，必须从供需双方获得大量的一手数据。互联网的固有属性使其各节点的数据收集成本近乎为零，信息化程度极高，相比之下，能源网络由于历史原因、技术限制、受重视程度、运维成本等因素，在信息化、智能化方面仍显落后。

相比于能源的生产和输送侧，能源需求侧的信息化程度差距更大[6]。例如，配电系统的基础通信设施很不完善。即使经过智能电网近十年的快速发展，这一局面依然没有得到本质的改善：配电系统的信息化建设相对落后，且偏远地区电网与多数用电设备依然处于能源系统的视野盲区[7]。

这一问题不仅是由现有的电力管理体系所导致的，还在于以IEC61850/60870为标准的电力自动化体系[8]主要是面向发电、输电的应用场景设计，虽然有效地保障了输电网的安全运行，但并不完全适合于分布式能源与能源互联网时代的发展要求。在需求侧的实施过程中，组网复杂、投资与运维成本高，用户需要具备完整而系统的专业知识。需求侧信息技术的普及门槛较高，这使得智能电网时代所提出的典型应用，如需求响应等难以在行业内被大规模普及[9,10]。

近年来，通信领域中广域低功耗网络（low power wide area network, LPWAN）技术的突飞猛进为能源物联网带来了崭新的发展机遇。LPWAN是一类具有远距离、低功耗、海量接入、低运维成本的通信技术的总称，与Wi-Fi、蓝牙、ZigBee等相比真正实现了大区域的低成本覆盖[11]。其中，工作在授权频段的窄带物联网（narrow band internet of things, NB-IoT）技术[12]和非授权频段的远程（long range, LoRa）技术[13]是LPWAN的典型代表。NB-IoT技术构建于蜂窝网络，可直接部署于GSM（global system for mobile）网络、UMTS（universal mobile telecommunications system）网络或LTE（long term evolution）网络，是电信运营商主推的物联网技术[14]。LoRa技术得益于其免费频段的自组网优势，可以由用户自行架设于环境恶劣地区、偏远地区等运营商蜂窝网络的信号盲区，可以实现区域内的无线专网覆盖[15]。

LPWAN技术的高速发展，从技术上首次为能源需求侧的运营管控提供了廉价、易用且满足性能需求的信息通道。基于LPWAN打造能源物联网，将为我国能源互联网需求侧应用的落地与普及提供全新的技术手段。本文介绍以NB-IoT和LoRa为代表的LPWAN技术，提出了基于该技术实现的云端能源物联网架构体系。最后，

本文展望了能源物联网技术驱动下，能源互联网需求侧的典型应用场景。

## 2. LPWAN 技术

LPWAN代表了物联网演进的新趋势。不同于3G/4G或Wi-Fi，这些技术并不致力于高通信速率和低延时，而更关注低功耗、可扩展和强覆盖等功能。其中，NB-IoT和LoRa是LPWAN的典型代表，本节将简要介绍这两种技术的特点，并与现有的广域通信技术和局域物联网技术进行比较。

### 2.1. LoRa

LoRa是LPWAN工作在非授权频段的典型技术代表，由Semtech公司于2013年8月推出，是一种基于1 GHz以下频谱的超长距低功耗数据传输技术[16]。由于工作在非授权频段，LoRa技术具有网络搭建灵活、部署成本低、商品化速度快、运营方式灵活等特点，可以同时适用于运营商主导的广域公开网络和私人部署的专用局域网络，且可以根据行业/客户需求修改协议细节，提高数据通信安全性，满足行业性应用和分散性应用。

为了充分适应物联网的业务需求，LoRa技术在网络架构和协议栈设计、终端工作模式、安全加密机制等方面做了诸多改进[17,18]。首先，LoRa协议栈的物理层采用扩频技术提高接收灵敏度，使用线性扩频调制技术增加通信距离，Shannon-Hartley定理表明在发射功率恒定的前提下，增加带宽是应对低信噪比的有效方法。LoRa的接收灵敏度达到了惊人的-148 dBm，与业界其他先进水平的sub-GHz芯片相比，最高的接收灵敏度改善了20 dB以上，这确保了网络连接的可靠性。其次，LoRa采用自适应数据（ADR）速率调节策略，根据通信距离和网络状况动态调整数据速率，达到优化网络性能、降低功耗和节约资源的目的，这使得即使不同扩频序列的终端使用相同的频率同时发送数据也不会相互干扰。再次，LoRa终端可以工作在双向终端（A类）、支持下行时隙调度的双向终端（B类）和最大接收时隙的双向终端（C类）三种不同功耗的工作模式，用户可以根据不同的应用场景灵活地配置终端工作模式。最后，LoRa基于AES128算法对终端节点和服务器之间的消息交互进行加密处理，使用会话密钥和应用密钥保证LoRa网络传输的安全性。

目前, LoRa技术已经广泛应用于智能抄表、车辆追踪、智能家居、智慧医疗等领域[19],并在56个国家开始进行试点工作,荷兰KPN电信公司和韩国SK电信公司均于2016年上半年部署了覆盖全国的LoRa网络[20]。随着物联网的蓬勃发展和LoRa联盟的积极推动,LoRa作为一种低功耗、低成本、远距离传输的广域物联网非授权频段网络技术,具有广阔的应用前景。

## 2.2. NB-IoT

NB-IoT是一种新的窄带蜂窝通信LPWAN技术,由现有的LTE网络构建而成。它于2016年由3GPP(3rd generation partnership project)标准组织提出,满足低复杂度、低成本、低功耗、广覆盖的物联网应用需求。

NB-IoT采用了窄带通信技术,提高了灵敏度和覆盖范围[21,22]。此外,由于解调的频谱比单个传输宽得多,从而可以使多个上行链路同时传输。基站可以同时解码多个复杂的窄带信道,而不用确切地知道它们的频率。NB-IoT的优点包括它将室内最小耦合损耗(minimum coupling loss, MCL)提升为164 dB,能实现广域覆盖和深度覆盖,同时可以实现大量低速率需求终端设备的海量接入。如3GPP指南所示,NB-IoT的设计目标包括低成本、增强覆盖(相比于传统的GPRS技术增强20 dB)、电池寿命长(10年以上)以及海量接入(大于52 000个连接设备)。NB-IoT对延迟的要求放宽,上行报告时延小于10 s。

在网络部署方面,3GPP定义了NB-IoT的三种部署场景[23]。

(1) 独立部署(stand-alone):利用现有的空闲频谱或者新的频谱部署NB-IoT。

(2) 保护带部署(guard-band):利用LTE网络频段的带宽,最大化频谱资源利用率。

(3) 带内部署(in-band):利用LTE网络频段中的资源块(resource block, RB)用以部署NB-IoT。

和LoRa相比,NB-IoT工作在授权频段,且可直接部署于GSM、GPRS(general packet radio service)、CDMA(code division multiple access)等2G/3G无线蜂窝通信网络,实现设备和技术的平滑升级,因此得到爱

立信、诺基亚、华为等电信设备供应商和AT&T、国内三大运营商的推广和支持。

到目前为止,NB-IoT已经开始商业化,垂直行业应用主要聚焦于智能交通、物流管理、健康医疗、智能抄表、工业制造、企业能耗管理等领域[24-26]。我国的部分重点城市,已启动了NB-IoT网络的试运行,将在2017年实现城市级别的网络全覆盖[27]。

## 2.3. 与广域通信网的区别

广域通信网无线通信技术以GSM和GPRS为代表[28-32]。GSM是全球应用最为广泛的移动电话通信标准,被认为是第二代移动通信标准(2G),通信速率为9 kbps左右,目前由3GPP管理和开发。GPRS介于第二代和第三代移动通信技术之间,被称为“2.5G”。目前的第三代移动通信技术(3G)和第四代移动通信技术(4G)具有更快的数据传输速率,能够更好地支持语音、图像和视频的传输交互[33-35]。

表1从功耗、覆盖范围、接入量、传输速率等角度对GPRS和LPWAN两种通信技术进行了对比,接入LPWAN的终端设备能耗仅为GPRS的1/10,且LPWAN的覆盖能力更强,比GPRS提升了20 dB增益。

## 2.4. 与局域物联网的区别

目前,局域物联网中应用较为广泛的无线通信技术主要有ZigBee[36]和Wi-Fi[37]等,这些技术具有不同的特点和性能。Wi-Fi技术的特点是高数据速率和低延迟,但功耗远远高于ZigBee。ZigBee是为需要无线连接的小型项目而设计的,它用于创建小型、低功耗的区域网络,如楼宇自动化、智慧家庭能源、工业控制和监测、健康监护和医疗保健等领域以及其他低功耗低数据速率场景。虽然ZigBee已经对网络进行了优化,但最突出的问题是覆盖距离和设备的可伸缩性。因此,Wi-Fi和ZigBee也被称为局域物联网,用以支持有限区域内的网络连接[38-40]。

表2从覆盖范围、接入量、传输速率等角度对比了ZigBee、Wi-Fi、LPWAN三种物联网无线通信技术的区别。相比于ZigBee、Wi-Fi等局域物联网通信技术,

表1 GPRS和LPWAN技术对比

| Technology | Power consumption | Latency        | Coverage   | Data rate                          |
|------------|-------------------|----------------|------------|------------------------------------|
| GPRS       | High              | Low            | MCL 130 dB | Maximum 171.2 kbps                 |
| LPWAN      | Low               | Not guaranteed | MCL 150 dB | Adaptive from 0.1 kbps to 250 kbps |

表2 ZigBee、Wi-Fi和LPWAN技术对比

| Technology | Communication distance | Maximum connection                  | Data rate                          |
|------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| ZigBee     | 10-75 m                | ≤ 255                               | Maximum 171.2 kbps                 |
| Wi-Fi      | 100 m                  | ≤ 255                               | > 10 Mbps                          |
| LPWAN      | 3 km to city scale     | ≤ 50 000 (NB-IoT), ≤ 200 000 (LoRa) | Adaptive from 0.1 kbps to 250 kbps |

LPWAN的远距离、强覆盖、海量接入等特性为物联网的普及应用提供了重要的网络链路保障,以LoRa和NB-IoT为代表的新型LPWAN技术的迅猛发展也为能源互联网的需求侧管控提供了有效的技术手段。

### 3. 基于 LPWAN 的能源物联网架构

#### 3.1. 无线直达云端的物理架构

对比以GPRS为代表的广域通信网与以ZigBee/Wi-Fi为代表的局域物联网技术,LPWAN的技术优势在于信号覆盖范围广、通信功耗低,其劣势在于通信速率低、通信延时长、终端处理能力有限。依靠云计算和大数据技术的发展,可使用无线直达云端的物理架构,以充分发挥LPWAN的技术特点。该架构与现有局域网物联网架构的对比如图1所示。

如图1(a)所示,基于LPWAN的能源物联网在实际架设的时候通常包含三个物理层面:能源感知控制层、LPWAN传输层和云端应用层。局域物联网的物理构架如图1(b)所示。

基于LPWAN的能源物联网的物理架构与现有的局域网物联网相比,最大区别在于省去了局域网的自建网关与网关通信层,利用LPWAN具有广域覆盖能力的公用网关(NB-IoT)或专有网关(LoRa),降低了组网难度,

提升了LPWAN的采集能力与采集深度。利用云端的存储与计算能力,弥补了物联网终端处理能力的不足。

#### 3.2. 能源感知控制层

能源感知控制层直接与能源领域中实体设备对接,综合了能源传感器技术、嵌入式技术、分布式控制技术和无线通信技术。它能通过各种集成化的能源传感器对能源系统中的各节点进行实时监测,全方位感知并采集其状态信息。此外,可以通过LPWAN传输层实现与云端计算中心的通信,获得云端指令,实现对能源实体设备的控制。

能源感知与控制终端通常包含嵌入式系统,包含轻量级中央处理器(central processing unit, CPU)、随机存取存储器(random access memory, RAM)、中断、定时器以及丰富的IO接口和其他无线通信模块,能够进行复杂度不高的本地实时控制、通信协议转换和M2M(machine-to-machine)通信。

可见,能源感知控制层既具备采集和监控的功能,又能在一定程度上减轻云端的计算工作,并可以在特定的场景下将云计算合理地转化为雾计算,以提高整个系统的事件响应和处理速度[41]。

#### 3.3. LPWAN 传输层

能源行业通常地域分布广袤,Wi-Fi、蓝牙、Zig-

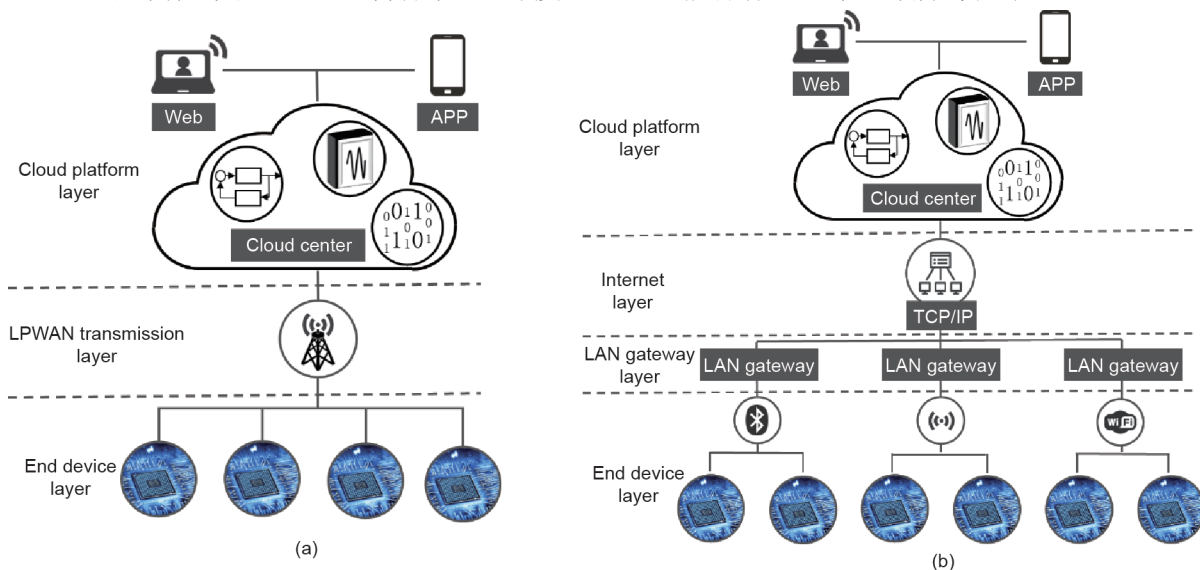


图1. (a) 能源物联网物理架构; (b) 局域物联网物理架构。

Bee等局域网无线通信技术的应用受限,促成了NB-IoT、LoRa等LPWAN技术在能源行业大放异彩。

LPWAN传输层的主要功能是实现能源感知应用层中海量采集终端的便捷接入、快速组网及高可靠性、高安全性的远距离传送。对于运营商网络难以覆盖的偏远地带,且需要密集接入的应用场景适合采用LoRa技术。通过单个基站的海量接入可省去众多局域网网关,从而削减数据接入成本,降低网络系统架构的复杂度;图2展示了在农村变电站中布置LoRa基站来实现分布式光伏、风机、储能等数据传输的场景。此外,对于有运营商网络可靠覆盖的城市应用场景中适合采用NB-IoT技术,无需架设任何网关和基站,只需给运营商支付少许流量费,即可完成能源感知层的数据接入,并实现一步到云。图3展示了NB-IoT在城市智能家庭和电动汽车中的应用场景。对于有特定的可靠性和安全性要求的专用网络,一方面可以利用NB-IoT网络,通过特定的加密通信方式或虚拟专用网络(virtual private network, VPN)方式,实现可靠的双向通信;

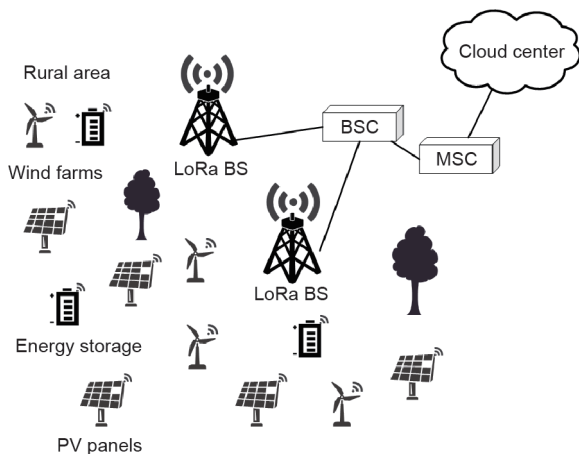


图2. LoRa在农村中的应用场景。

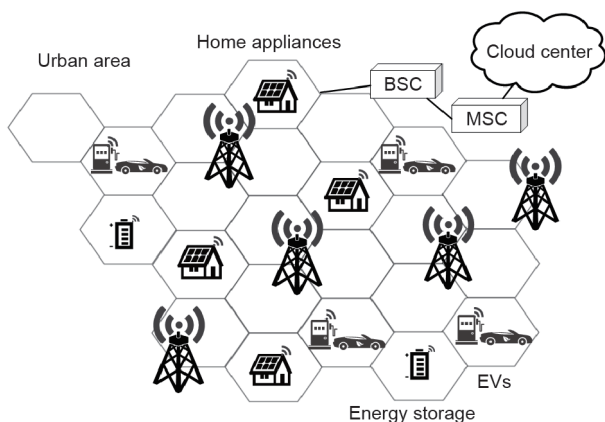


图3. NB-IoT在城市中的应用场景。

另一方面,也可以利用LoRa技术组成加密通信专网,在物理链路层面实现通信网络的隔离与保护。

### 3.4. 云端应用层

云端应用层是能源物联网发展的驱动力和最终目标,是将先进通信技术转换为能源生产力的重要层级。为了应对能源系统中众多节点产生的海量数据流,云端应用层需实现能源物联网监控终端在云端的信息转换、集成与交互,如图4所示。云端应用层主要包括以下功能。

(1) 终端通信规约的解析。能源物联网所链接的能源终端种类繁多,但终端的数据处理与编程能力有限,通信规约难以就地管理。因此,云端应用层将集成典型能源工业装置的通信协议,并允许用户以友好的方式在云端实现通信规约的自定义解析。将复杂专业的嵌入式通信编程问题,转换为便捷友好的云端应用程序设计问题,提升能源终端的接入能力。

(2) 通信终端间的通信。能源物联网的一个重要特点是要实现能源设备间的相互通信(M2M)。考虑到LPWAN的无线带宽限制,可采用基于消息队列总线的“订阅—推送”技术实现M2M通信。该技术可以提供近乎无限的终端寻址能力,实现无线通信资源的高效利用,丰富计算中心对物联网终端的控制手段,提升无线直达云端监控体系的安全性及可靠性。

(3) 海量数据的存储与分析。海量的终端接入必然会带来海量数据的存储与分析需求。依托先进的大数据技术和实时数据库,实现满足能源系统运行需求的高速数据处理;依托分布式数据库,实现能源系统历史大数据的海量存储与处理。

(4) 能源互联网的用户互动。现有能源信息系统相对封闭,一般仅满足能源系统运行用户的管控需求,交互能力较弱。而能源物联网的云端属性带来了高度开放性,所交互的用户层级更具多样性。因此,需建立能够实现海量监控终端虚拟化和组态的云操作系统,来应对海量能源终端的数据接入需求。云操作系统具备跨平台的灵活部署能力,此外,基于云端的运行控制编程引擎,可实现优化控制策略的云端编辑与运行,同时满足能源系统管理、运行及二次开发等多层次用户的应用需求。

## 4. 能源物联网的应用场景

LPWAN技术拥有大范围、高穿透、强覆盖、多链

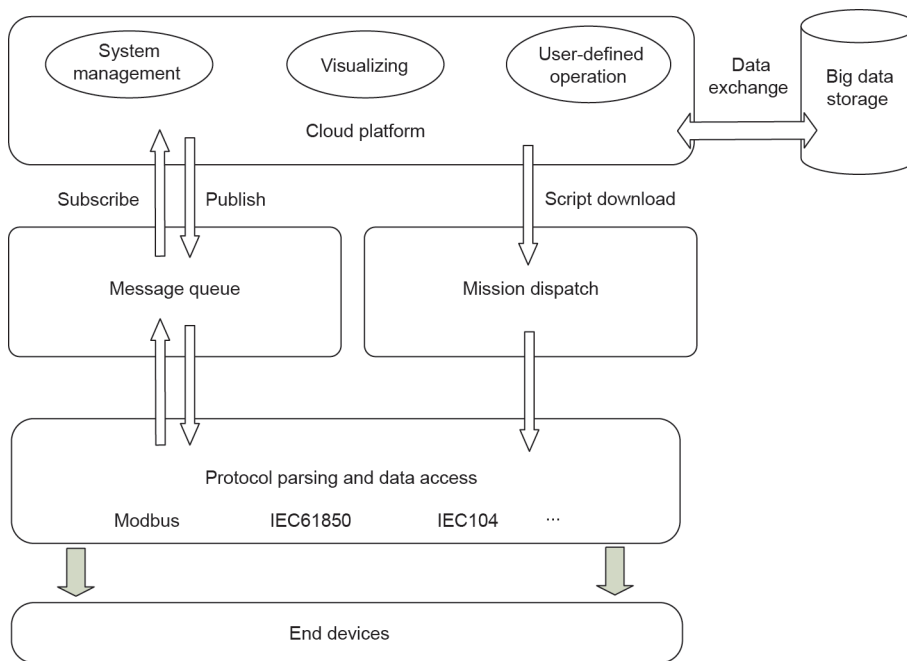


图4. 云端应用层构架。

接、低成本等技术优势，能够满足能源系统终端设备的信息采集与控制需求。同时，物联网终端极低的边际接入成本也十分符合互联网的发展特征，特别适合能源互联网需求侧的应用需求，将推动能源需求侧向精细化、高效化、多元化的方向发展，引发能源系统的全新革命。能源物联网的应用场景主要体现在以下几个方面。

#### 4.1. 智能家电与智慧家居系统

智能家电是家电行业的重要发展方向，以节能降费为目标的智慧用能技术不仅是智慧家居系统中的核心技术，也是国内外能源行业关注和研究的重点。现有的智慧家居系统通常依托ZigBee或Wi-Fi等局域网技术组网，因此需要自建网关实现与云端的接入和操作[42]。这直接导致了平台一致性差、标准化程度低、互操作能力弱。常常一个品牌的家电就需要设置一个独立网关，硬件装置和软件集成具有封闭性，导致了应用的碎片化，用户体验差。

具有城市规模覆盖能力的NB-IoT网络能够很好地满足智能家电与智慧家居系统的应用需求。在NB-IoT网络的支撑下，智能家电通过内置的终端芯片，利用无线直达云端的能源物联网物理架构便可实现与云端计算中心的互联互通，打破了自组局域网的技术壁垒，实现了终端装置的即插即用[12]。同时，基于

云端的操作系统，可以实现家电装置与软件集成间的解耦。因此，通过NB-IoT的物联网网络，可以实现智慧家居系统的集成管理，充分利用大数据、需求响应等技术，引导海量用户实现智慧用能和高效的能效管理。

#### 4.2. 微电网和分布式能源系统

以新能源微电网为代表的分布式能源系统具有较高的清洁能源利用率和供电保障能力，特别适用于投资巨大且难以修建大型电网的海岛、山丘、河谷、戈壁、高原等远离负荷中心、人烟稀少、地势险要的偏远地区[43]。

微电网和分布式能源系统需要灵活可靠的通信系统实现优化控制，然而此类分布式系统一般地理分散性强、信息采集难度大，直接布线进行有线传输面临施工和运维成本过高的问题，而采用传统的Wi-Fi、ZigBee、蓝牙等局域网无线通信技术也面临通信距离太短需要大量网关等中继设备的问题[44]，因此，采用LPWAN技术是最佳选择。

一般偏远区域的信号强度非常弱，几乎处于运营商网络信号的盲区。若采用运营商的蜂窝网络，则需支付新建铁塔和基站等基础设施的经费，还需持续向运营商缴付高昂的流量费。经济性成为制约分布式能源通信系统发展的首要因素。

因此，微电网与分布式能源系统更适合采用LoRa

技术进行通信组网,可有效降低通信成本。LoRa通信技术工作于非授权频段,允许用户自行组网,同时,LoRa网络的强覆盖和海量接入属性可以满足大多数微电网和分布式能源系统的物联网需求。

#### 4.3. 主动配电网与集群需求响应

以分布式能源与分散式储能高比例接入为代表的主动配电网是目前智能电网建设的新方向。当前的主动配电网自动化技术完全基于传统的RTU/SCADA/DMS架构实现,系统的扩展性不够灵活。尤其对于数量众多的新增节点或节点新增电气量,电源线、信号线等布线工作繁琐,甚至某些工况已无空间新增布线[45,46]。因此,具有广域覆盖能力的低功耗无线通信技术成为主动配电网智能化的必然选择。

此外,在偏远地区的末端电网和台区以下的用户侧电网同样面临着智能化升级改造所带来的通信模式选择问题。目前,京津冀和长三角等发达地区已基本普及智能电表,但受限于运营商巨额的流量费用,海量电表采集的实时数据并未第一时间全部上传至云端形成报表,而是暂存于局域网网关中,待需要查询时才将数据反馈至云端[47]。

因此,基于NB-IoT或LoRa技术均可作为主动配电网提供能源物联网基础支撑。一方面可将用户侧的电力数据直接送达云端,省去了高额的流量资费并保障了用户数据的安全性;另一方面可依托能源物联网,形成准实时的需求响应集群,允许以配电网为出发点,为智能电网提供场站级别的需求侧管理能力,为实现系统级别削峰填谷、响应规模化可再生能源的功率变化奠定基础。

#### 4.4. 电动汽车与绿色交通系统

以电动汽车为代表的绿色交通系统是提升清洁能源消纳能力、实现节能减排、应对环境压力的重要手段[48]。特别是插电式纯电动汽车,已经在世界范围内得到了广泛应用,为能源互联网的需求侧的灵活运行提供了大量潜在的可调资源,可通过参与调频、有序充电及电动汽车入网(V2G)等技术手段,参与到能源互联网的运行优化之中[49]。

然而,电动汽车充放电过程的灵活管理,同样依赖于高效灵活的通信网络。但是在多数应用环境下,为公共停车场、小区停车场、地下停车场等场所布置有线通信网络不但在技术上组网较为困难,而且投资也难以回

收。因此,基于LPWAN技术的能源物联网是电动汽车和绿色交通系统参与能源互联网系统优化运行的全新技术手段,目前NB-IoT和LoRa技术均已被应用于智能停车场等实际环境的测试之中。在现有平台技术上加以扩展,有望大规模地实现电动汽车集群乃至绿色交通系统有序的能量调控,最终实现交通系统与能源系统在运行中的互济互补。

#### 4.5. 能源局域网与综合能源系统

以电转热(P2H)、电转气(P2G)、冷热电联供(CCHP)以及空调热泵等技术为代表的能量存储、转换与梯级利用技术为基础,将在能源互联网的需求侧形成综合能量枢纽(energy hub)[50,51]。以能源枢纽为核心节点构建的区域能源网络,被称为能源局域网。以能源局域网为代表的分布式综合能源系统,能够利用热力网络和气体网络的能量储存能力,对能源系统进行多能协同优化,并可在保障区域能源供给能力的条件下,跟踪能源系统中可再生能源的大规模功率波动,具有极强的运行灵活性。

能源局域网需要连接热力、气体网络等非电力能源系统,因此,量测与分布式控制系统需要有极强的环境适应能力,以解决多能监控中组网困难、通信环境复杂等技术难题。因此,以LPWAN为基础的能源物联网可能成为能源局域网的基础通信网络。搭载NB-IoT模块或LoRa模块的量测芯片功耗小、对通信环境的要求低,且能够长期稳定运行于复杂的能源环境之中,可为未来综合能源系统的各类智能量测、交互终端提供通信连接。同时,基于云端的计算中心,可以实现复杂能源网络的优化调控。

## 5. 总结

以NB-IoT和LoRa技术为代表的LPWAN技术是物联网在通信技术领域的重要突破。与GPRS等广域通信技术相比,具有部署灵活、低功耗、低成本等优势,与ZigBee、Wi-Fi等局域物联网技术相比,具有大范围、高穿透、强覆盖、易组网等显著的技术优势。基于LPWAN技术的能源物联网和无线直达云端的物理架构,利用最新的云计算与大数据技术,充分发挥了LPWAN的技术特点,形成强大的广域能源监控网络。能源物联网特别适用于能源互联网需求侧的应用需求,有助于推动智能家电与智慧家居系统、微电网和分布式能源系

统、主动配电网与集群需求侧响应、电动汽车与绿色交通系统以及能源局域网和综合能源系统等能源需求侧典型应用技术的发展。将推动能源需求侧向精细化、高效化、多元化的方向发展，为引发能源系统的全新革命奠定基础。

## 致谢

本项工作由国家高技术研究发展计划（“863”计划）（2014AA051901）、国家国际科技合作专项项目（2014DFG62670）、国家自然科学基金项目（51207077、51261130472、51577096）支持。

感谢江艺宝博士和陈晓爽博士对本文做出的贡献。

## Compliance with ethics guidelines

Yonghua Song, Jin Lin, Ming Tang, and Shufeng Dong declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- Farhangi H. The path of the smart grid. *IEEE Power Energy M* 2010;8(1):18–28.
- Massoud Amin S, Wollenberg BF. Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century. *IEEE Power Energy M* 2005;3(5):34–41.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology. Instruction on promoting the development of “Internet plus” smart energy, No. [2016]392 (Feb 24, 2016). Chinese.
- National Energy Administration. Notification of National Energy Administration on processing “Internet plus” smart energy demonstration project, No. [2016]200 (Jul 26, 2016). Chinese.
- Bui N, Castellani AP, Casari P, Zorzi M. The Internet of energy: A web-enabled smart grid system. *IEEE Network* 2012;26(4):39–45.
- Palensky P, Dietrich D. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Trans Ind Inform* 2011;7(3):381–8.
- You Y, Liu D, Yu W, Chen F, Pan F. Technology and its trends of active distribution network. *Autom Electr Pow Sys* 2012;36(18):10–6. Chinese.
- Sidhu TS, Yin Y. Modelling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems. *IEEE Trans Power Deliv* 2007;22(3):1482–9.
- Mohsenian-Rad AH, Wong VWS, Jatskevich J, Schober R, Leon-Garcia A. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Trans Smart Grid* 2010;1(3):320–31.
- Lopes JAP, Soares FJ, Almeida PMR. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proc IEEE* 2011;99(1):168–83.
- Petajajarvi J, Mikhaylov K, Roivainen A, Hanninen T, Pettissalo M. On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In: Proceedings of the 14th International Conference on ITS Telecommunications; 2015 Dec 2–4; Copenhagen, Denmark. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2015. p. 55–9.
- Ratasuk R, Vejlggaard B, Mangalvedhe N, Ghosh A. NB-IoT system for M2M communication. In: Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops; 2016 Apr 3–6; Doha, Qatar. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016. p. 428–32.
- Mikhaylov K, Petäjajarvi J, Haenninen T. Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. In: Proceedings of the 22th European Wireless Conference on European Wireless; 2016 May 18–20; Oulu, Finland. Frankfurt am Main: VDE Press; 2016.
- Mangalvedhe N, Ratasuk R, Ghosh A. NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT. In: Proceedings of the 27th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications; 2016 Sep 4–8; Valencia, Spain. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016.
- Wixted AJ, Kinnaird P, Larjani H, Tait A, Ahmadinia A, Strachan N. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2016 IEEE SENSORS; 2016 Oct 30–Nov 3; Orlando, FL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016.
- Vangelista L, Zanella A, Zorzi M. Long-range IoT technologies: The dawn of LoRa™. In: Atanasovski V, Leon-Garcia A, editors Future access enablers for ubiquitous and intelligent infrastructures. Cham: Springer International Publishing AG; 2015. p. 51–8.
- Petrić T, Goessens M, Nuaymi L, Toutain L, Pelov A. Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN. In: Proceedings of the 27th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications; 2016 Sep 4–8; Valencia, Spain. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016.
- Knight M, Seeber B. Decoding LoRa: Realizing a modern LPWAN with SDR. In: Proceedings of the 6th GNU Radio Conference; 2016 Sep 12–16; Boulder, CO, USA. [s.l.]: The GNU Radio Foundation, Inc.; 2016.
- Bardyn JP, Melly T, Sellar O, Sornin N. IoT: The era of LPWAN is starting now. In: Proceedings of the 42nd European Solid-State Circuits Conference; 2016 Sep 12–15; Lausanne, Switzerland. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016. p. 25–30.
- Trasviña-Moreno CA, Blasco R, Casas R, Asensio Á. A network performance analysis of LoRa modulation for LPWAN sensor devices. In: García C, Caballero-Gil P, Burmester M, Quesada-Arencibia A, editors Ubiquitous computing and ambient intelligence. Cham: Springer International Publishing AG; 2016. p. 174–81.
- Wang YPE, Lin X, Adhikary A, Grövlén A, Sui Y, Blankenship Y, et al. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things (NB-IoT). 2016 Jun 13. arXiv:1606.04171.
- Gozalvez J. New 3GPP standard for IoT [mobile radio]. *IEEE Veh Technol Mag* 2016;11(1):14–20.
- Roselli L, Mariotti C, Mezzanotte P, Alimenti F, Orecchini G, Virili M, et al. Review of the present technologies concurrently contributing to the implementation of the Internet of Things (IoT) paradigm: RFID, green electronics, WPT and energy harvesting. In: Proceedings of 2015 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks; 2015 Jan 25–28; San Diego, CA, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2015.
- Bontu CS, Periyalar S, Pecun M. Wireless wide-area networks for Internet of Things: An air interface protocol for IoT and a simultaneous access channel for uplink IoT communication. *IEEE Veh Technol Mag* 2014;9(1):54–63.
- Goursaud C, Gorce JM. Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges. *EAI Endorsed Trans Internet Things* 2015;1(1):e3.
- Mahmoud MS, Mohamad AAH. A study of efficient power consumption wireless communication techniques/modules for Internet of Things (IoT) applications. *Adv Internet Things* 2016;6(2):19–29.
- Lin X, Adhikary A, Wang YPE. Random access preamble design and detection for 3GPP narrowband IoT systems. *IEEE Wirel Commun Le* 2016;5(6):640–3.
- Mouly M, Pautet MB. The GSM system for mobile communications. Reno: Telecom Publishing; 1992.
- Rahnema M. Overview of the GSM system and protocol architecture. *IEEE Commun Mag* 1993;31(4):92–100.
- Cai J, Goodman DJ. General packet radio service in GSM. *IEEE Commun Mag* 1997;35(10):122–31.
- Feng HW, Tsai YC. Using priority, buffering, threshold control, and reservation techniques to improve channel-allocation schemes for the GPRS system. *IEEE Trans Veh Technol* 2005;54(1):286–306.
- Damnjanovic A, Montojo J, Wei Y, Ji T, Luo T, Vajapeyam M, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wirel Commun* 2011;18(3):10–21.
- Hanzo L, Haas H, Imre S, O'Brien D, Rupp M, Gyongyosi L. Wireless myths, realities, and futures: From 3G/4G to optical and quantum wireless. *Proc IEEE* 2012;100(Special Centennial Issue):1853–88.
- Jiang H, Wang Y, Lee K, Rhee I. Tackling bufferbloat in 3G/4G networks. In: Proceedings of the 2012 Internet Measurement Conference; 2012 Nov 14–16; Boston, MA, USA. New York: Association for Computing Machinery, Inc.; 2012. p. 329–42.
- Pagani M, Fine CH. Value network dynamics in 3G-4G wireless communications: A systems thinking approach to strategic value assessment. *J Bus Res* 2008;61(11):1102–12.
- Kinney P. ZigBee technology: Wireless control that simply works. In: Proceedings of Communications Design Conference; 2003 Sep 29–Oct 2; San Jose, CA, USA; 2003.
- Evennou F, Marx F. Advanced integration of WiFi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning. *EURASIP J Appl Sig P* 2006;2006:86706.
- Lee JS, Su YW, Shen CC. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In: Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society; 2007 Nov 5–8; Taipei, Taiwan, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2007. p. 46–51.
- Gill K, Yang SH, Yao F, Lu X. A zigbee-based home automation system. *IEEE Trans Consum Electr* 2009;55(2):422–30.
- Balasuubramanian A, Mahajan R, Venkataramani A. Augmenting mobile 3G using WiFi. In: Proceedings of the 8th International Conference on Mobile



- Systems, Applications, and Services; 2010 Jun 15–18; San Francisco, CA, USA. New York: Association for Computing Machinery, Inc.; 2010. p. 209–22.
- [41] Bonomi F, Milito R, Zhu J, Addepalli S. Fog computing and its role in the Internet of Things. In: Proceedings of the 1st ACM Mobile Cloud Computing Workshop; 2012 Aug 17; Helsinki, Finland. New York: Association for Computing Machinery, Inc.; 2012. p. 13–6.
- [42] Jin T, Noubir G, Sheng B. WiZi-Cloud: Application-transparent dual Zig-Bee-WiFi radios for low power internet access. In: Proceedings of 2011 IEEE INFOCOM; 2011 Apr 10–15; Shanghai, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2011. p. 1593–601.
- [43] Alanne K, Saari A. Distributed energy generation and sustainable development. *Renew Sust Energ Rev* 2006;10(6):539–58.
- [44] Kanabar PM, Kanabar MG, El-Khattam W, Sidhu TS, Shami A. Evaluation of communication technologies for IEC 61850 based distribution automation system with distributed energy resources. In: Proceedings of 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting; 2009 Jul 26–30; Calgary, AB, Canada. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2009.
- [45] Djapic P, Ramsay C, Pudjianto D, Strbac G, Mutale J, Jenkins N, et al. Taking an active approach. *IEEE Power Energy M* 2007;5(4):68–77.
- [46] Albadi MH, El-Saadany EF. A summary of demand response in electricity markets. *Electr Pow Syst Res* 2008;78(11):1989–96.
- [47] Bates RJ. GPRS: General packet radio service. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.; 2001.
- [48] Situ L. Electric vehicle development: The past, present & future. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications; 2009 May 20–22; Hong Kong, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2009.
- [49] Kempton W, Tomić J. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *J Power Sources* 2005;144(1):268–79.
- [50] Vasebi A, Fesanghary M, Bathaee SMT. Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm. *Int J Elec Power* 2007;29(10):713–9.
- [51] Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *Int J Hydrogen Energ* 2013;38(5):2039–61.