

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211302

双碳目标下 NB-IoT 能源物联网安全构架及关键技术

王延峰¹, 申永鹏¹, 唐耀华², 钟建英³, 张友鹏³

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450000;
3. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 围绕 NB-IoT 能源物联网安全构架及关键技术, 分析了“双碳”目标下能源系统新特征, 从绘制碳足迹、优化能源供给、优化能源交易和构建双向信息流四个方面剖析了能源物联网对“双碳”目标的支撑作用。总结了“双碳”目标下能源物联网的特性及需求, 归纳了以 NB-IoT 为代表的 LPWAN 与能源物联网的匹配关系。探索构建了包含 NB-IoT 物联网安全模组和安全服务平台的能源物联网安全构架。重点分析了基于 eSIM+ESAM NB-IoT 的物联网安全模组硬件、基于 GlobalPlatform 可信框架的 NB-IoT 物联网安全模组软件, 以及基于区块链的物联网卡全链条安全管理关键技术。该技术可为能源生产、传输、存储、交易和消费领域提供安全、可信的 LPWAN 物联网解决方案, 为构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供可信数据支撑, 助力“3060 双碳目标”实现。

关键词: “双碳”目标; NB-IoT; LPWAN; 能源物联网; 安全

Framework and key technologies for NB-IoT energy internet of things to achieve carbon peak and neutrality goals

WANG Yanfeng¹, SHEN Yongpeng¹, TANG Yaohua², ZHONG Jianying³, ZHANG Youpeng³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. Rundian Energy Science Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;
3. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

Abstract: Focusing on the security architecture and key technologies of the NB-IoT Energy IoT, this paper first analyzes the new characteristics of the energy system under the "dual carbon" goal and the supporting role of the energy IoT to the "dual carbon" goal from four aspects: mapping carbon footprint, optimizing energy supply, optimizing energy trading, and building a two-way information flow. Then, it summarizes the characteristics and requirements of the energy IoT, and summarizes the matching relationship between NB-IoT LPWAN and the energy IoT. It explores the energy IoT security architecture including the NB-IoT security module and security service platform, and focuses on the analysis of eSIM+ESAM NB-IoT security module hardware, NB-IoT security module software based on the GlobalPlatform trusted framework, and key technologies for security management of the IoT cards based on blockchain. It can provide safe and credible LPWAN IoT solutions for energy production, transmission, storage, transaction and consumption. It also supplies credible data support for the construction of a clean, low-carbon, safe and efficient energy system, and helps achieve the "3060 dual carbon target".

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61803345, No. 51807013, and No. 52177068).

Key words: carbon peak and neutrality goals; NB-IoT; LPWAN; energy internet of things; safety

0 引言

2030 年达到峰值、2060 年前实现碳中和的“双

碳”目标是我国接下来相当长一个时期涉及能源、环境、工业等国民经济各领域的发展导向^[1]。能源领域是碳排放的主要来源。2020 年, 全国能源消费产生的碳排放占碳排放总量的 85%, 约占全部温室气体排放的 70%^[2]。因此, 能源领域的节能减排将是实现“双碳”目标的重中之重。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61803345, 51807013, 52177068)

能源事关国计民生,涉及电力、煤炭、供热、石油等重要行业。“双碳”目标下,能源的生产、利用、消费等环节均将呈现出新的特征,数字化和智能化是确保下一阶段能源领域高质量发展的基础支撑。建设安全、可信的能源物联网,梳理全社会能源脉络,绘制碳足迹,可为能源生产、传输、存储、交易和消费提供大数据支撑,为构建碳中和基础理论体系,实现能源体系 Pareto 优化,促进资源配置效率提升,引导能源系统扁平化发展提供数据基础设施保障,助力碳排放权市场化交易,培育创新业务模式,构建清洁低碳、安全高效的能源体系,最终实现“双碳目标”^[3-4]。

能源物联网具有数据类型多、采集范围广、产业链条长、迭代速度快等特征,各类业务场景的业务规模、责任主体、数据种类和信息传播形态存在差异,为物联网安全管理带来了挑战。因此,从感知层、网络层、应用层和运维层构建多元能源物联网安全体系,对于促进能源数字化转型和“双碳”目标的实现至关重要。

围绕“双碳”目标下 NB-IoT 能源物联网安全构架及关键技术,本文首先分析了“双碳”目标下能源系统呈现出的生产去中心化、利用集约化、消费结构持续优化等特征。然后在分析能源物联网技术与“双碳”目标之间的支撑关系、能源物联网基本特性及其需求的基础上,对 NB-IoT LPWAN (Low-Power Wide Area Network) 特性与能源物联网需求之间的匹配进行归纳,探索了包含 NB-IoT 物联网安全模组和安全服务平台两个方面的能源物联网安全构架及关键技术,为 NB-IoT 在电力、燃气、热力、石油等能源领域的物联网数据采集终端的安全应用提供了安全解决方案。具体创新性工作如下:

(1) 从绘制碳足迹、优化能源供给、优化能源交易和构建双向信息流四个方面剖析了能源物联网对“双碳”目标的支撑作用,总结了能源物联网特性及需求,归纳了以 NB-IoT 为代表的 LPWAN 与能源物联网的匹配关系。

(2) 探索构建了包含 NB-IoT 物联网安全模组和安全服务平台的能源物联网安全构架,并重点分析了基于 eSIM+ESAM NB-IoT 的物联网安全模组硬件、基于 GlobalPlatform 可信框架的 NB-IoT 物联网安全模组软件以及基于区块链的物联网卡全链条安全管理关键技术。

1 “双碳”目标与能源物联网

1.1 “双碳”目标下能源系统新特征

构建清洁低碳安全高效的能源体系,实现能源

生产、能源利用、能源消费的全链条高效低碳运行,是促进“双碳”目标实现的重要保障^[5-7]。未来能源系统将呈现以下特征。

(1) 能源生产的去中心化

与以煤炭为基础的传统集中式能源系统相比,分布式能源具有以下优点:一方面,可充分利用能源消费地的风、光、天然气、地热等资源禀赋,降低能源远距离传输设备设施的建设、运维、损耗成本,减小对外部能源依赖,提高能源安全保障;另一方面,可通过多联供、多能互补、能源梯级利用等方式实现能源利用效率的提升,从而大幅降低集中供能带来的污染物及碳排放。未来分布式能源将朝着以下方向发展:①通过对终端用能客户消费习惯的数据采集与分析,实现对用户消费模式和消费特征的深度挖掘,进而实现面向终端的能源优化;②分布式能源之间、分布式能源与集中式能源之间在时间和空间两个维度上的深度耦合,实现能源供给的最优化。

(2) 能源利用的集约化

贯穿于经济社会发展全过程的能源集约化利用,将确保能源的高效、低碳消耗,具体包括:①电力在终端用能中的比重将进一步增大,燃煤、燃油等终端能源消费形式将逐渐被电能替代;②能耗限额标准、终端能耗监测系统、碳排放统计核算系统将进一步覆盖行业、企业、产品,能效统计监测和计量体系将进一步健全、提升;③能源消费的分散化、多元化必须依赖精准、实时的数据支撑,信息流与能量流的高度融合,将进一步促进对海量用能终端的精准量测、决策、控制,支撑能源的高效利用。

(3) 能源消费结构的持续优化

“富煤、贫油、少气”的资源禀赋造就了我国以煤为主的能源消费结构,能源消费结构的持续优化将重点围绕:①推广煤制油气、醇类燃料替代,实现煤炭的高效清洁利用和高质量发展;②大力发展天然气、核能以及风、光等可再生能源,进而打造多元化的能源消费结构;③可再生能源将成能源消费增量主体,电力系统的灵活调节能力将进一步增强,储能在高比例新能源电力系统中的作用将进一步凸显,电力系统全面数字化将推动构建高效、智慧的调度运行体系,实现源网荷储深度融合^[8]。

(4) 能源新模式新业态的不断涌现

低碳降耗的内在要求,以及物联网、人工智能等技术与能源领域的深度融合将催生新模式和新业态,包括:①传统单一能源供应向多元清洁综合能源供应商转型,实现“电、热、冷、气、水、氢”多能协同;②能源服务向多元化、综合化发展,能

源消费者与供应者的关系从单向供需关系向双向互动模式转变, 逐步参与生产、交易和储存等环节; ③ 物联网和人工智能技术将进一步挖掘各类能源全生命周期数据价值, 成为提升能源系统整体效率的重要支撑^[9]。

1.2 能源物联网全方位助力“双碳”目标实现

“双碳”目标下能源系统呈现出的生产去中心化、利用集约化、消费结构持续优化等特征, 均进一步凸显了物联网和数字化技术对于促进能源体系能效提升的重要性。研究表明, 我国能源体系能效需要比目前提升 3 倍才能实现“双碳”目标^[10]。能源物联网对提升我国能源体系能效, 助力“双碳”目标实现的作用主要体现在以下方面。

(1) 绘制碳足迹, 构建碳中和基础理论体系

“碳达峰”“碳中和”是当今全世界范围内的热门话题, 但是有关碳在能源生产、转化、消费、交易、存储等环节中的足迹、能源系统全局优化等方面, 目前尚未有经济学、社会学、能源科学等领域的基础理论, 无法构建系统性的分析框架, 进而无法为探索科学的碳中和技术路径及宏观政策提供理论支撑^[11]。

能源物联网是能源系统的“神经末梢”, 其海量接入特性可为精确绘制碳足迹提供数据支撑, 在保障能源供应安全的前提下, 为构建碳中和和经济学范式、社会学范式和能源范式, 建立符合中国国情的碳中和理论体系奠定基础。

(2) 优化能源供给, 实现能源体系 Pareto 优化

能源物联网作为数字经济的基础设施, 可实现系统级和社会级两个层面的能源供给优化。一方面, 在智慧园区、智慧工厂等系统层面, 能源物联网可构建电力、燃气、热力等多种能源的能流图、碳流图, 为实现能源利用效率、能源供给可靠性等多目标的 Pareto 优化提供支撑。另一方面, 在区域能源布局、国家能源战略等社会级层面, 能源物联网可构建能源转换路径、经济发展、生态环境影响之间的映射关系, 为实现区域及全社会范围内的能源配置、能源安全、生态安全等多目标的 Pareto 优化提供支撑。

(3) 优化能源交易, 促进资源配置效率提升

由于市场不完善和信息不对称造成的能源要素配置扭曲会部分抵消技术进步的作用, 阻碍经济高质量发展, 并且其再配置效应随着时间的推移呈现出明显的上升趋势^[12-14]。能源物联网可有效缓解能源产销、能源供需两侧的信息不对称性和时间不确定性, 为能源市场主体提供点对点精准交易信息保障, 降低能源交易过程中的无效损耗, 提高能源交

易效率和资源配置效率^[2]。

(4) 构建双向信息流, 引导能源系统扁平化发展
传统的能源消费、交易环节通常为非实时单向信息流动, 系统响应速度和用户参与程度都存在局限性。能源物联网为能源供应者和消费者提供了双向互动的信息基础设施, 可鼓励、引导用户通过有序用电、有序用气、V2G(Vehicle-to-Grid)等方式参与调峰, 甚至成为能源的供应者。进一步地, 促进了碳交易、碳税等相关机制、制度的建设和完善, 以及多主体、多元化的低碳能源交易市场的建立^[2]。

能源物联网是物联网技术在能源领域的延伸。我国政府高度重视物联网及其安全建设对能源体系能效提升的基础性支撑作用, 表 1 所示为近年来我国相关部门发布的物联网产业发展相关政策。

1.3 能源物联网特性及需求分析

除具有对象广、范围大、智能化程度高、连接复杂的物联网基本特征之外, 能源生产的去中心化、能源消费的分散化/多元化、能源服务的综合化, 赋予了能源物联网以下特征。

(1) 数据类型多, 采集范围广, 安全保护难度大

能源物联网数据采集类型多, 包含电压、电流、有功功率、无功功率等电参数, 温度、压力、质量、流量、频率等物理参数, 酸碱度、浓度等化学参数。海量异构数据将涵盖各能源生产主体的全方位信息, 并且成为其重要的数据资产, 在采集、传输、存储的各个阶段均有被泄漏安全风险。

(2) 产业链条长, 安全责任界限模糊

以燃煤火电的生产和消费为例, 其产业链条纵向直接涵盖煤矿开采企业、运输企业、火电厂、电网企业、终端用户等主体, 间接涵盖煤矿开采设备企业、火力发电及控制设备企业、烟气处理设备、电力设备企业。横向涵盖设备制造商、运营商、用户等多方利益主体, 一旦发生数据安全泄漏问题, 安全责任难理清。

(3) 迭代速度快, 安全升级风险凸显

当前, 能源物联网的构架尚未统一, 商业模式与盈利模式尚未明确, 各能源市场主体之间的通信规约尚未形成统一标准。再加上行业发展迅速, 新事物、新模式层出不穷, 能源物联网终端必须具有便捷的软件迭代速度, 以适应新模式、新需求。因此, 能源物联网终端必须具有高安全度的升级管理功能。

鉴于能源物联网的上述特性, 结合能源物联网的基本属性, 其应具备以下属性。

(1) 具备低功耗海量连接特性, 以便于区域内的多节点部署, 以电池供电场景下的长期可靠工作。

表 1 物联网及 NB-IoT 发展相关的国家政策
Table 1 National policies about IoT and NB-IoT

时间	文件名称	关键词
2016年10月	《新一代信息技术产业规划(2016-2020)》	建设 NB-IoT 网络被列为信息通信业“十三五”规划重点工程之一
2017年5月	《电信网编号计划(2017 年版)》，工信部	新编号中增加了物联网网号，将“140XX~ 144XX”明确为物联网网号
2017年6月	《关于全面推进移动物联网(NB-IoT)建设发展的通知》，工信部	进一步提出夯实物联网应用基础设施、推进5G NB-IoT网络部署和拓展行业应用的具体要求
2017年6月	《工业和信息化部关于国际移动通信系统(IMT)频率规划事宜的通知》(工信部无[2012]436号)，工信部	从六个方面明确了5G NB-IoT系统频率的使用要求
2019年5月	《关于开展深入推进宽带网络提速降费、支撑经济高质量发展2019 专项行动的通知》，工信部、国资委	提出进一步升级5G NB-IoT 网络能力和网络覆盖
2020年5月	《关于深入推进移动物联网全面发展的通知》，工信部	2020 年底，5G NB-IoT 网络实现县级以上城市主城区普遍覆盖；打造一批5G NB-IoT应用标杆工程和5G NB-IoT百万级连接规模应用场景
2021年6月7日	《能源领域5G 应用实施方案》发改委、能源局、中央网信办、工信部	带动能源生产和消费模式创新，为能源革命注入强大动力

(2) 具有完整的物理数据安全、可信服务管理、安全升级管理和密钥升级管理等感知层安全功能。

(3) 具有完善的网络层安全解决方案，采用统一通信制式，以便于实现全球范围内的统一部署，且具有完善的物联网卡安全管理链条。

(4) 具有 AS(Access Stratum)和 NAS(Non Access Stratum)网络层安全特性。

2 NB-IoT LPWAN 及其特性分析

NB-IoT(Narrow Band Internet of Things)是 3GPP R13 在 LTE 技术基础上提出的精简物联网新型终端通信技术，是为实现大连接、广覆盖、低功耗等要求而设计的专门用于物联网的窄带无线蜂窝通信技术，已成为 5G 时代的核心 LPWAN 技术。从基本特性、网络层安全特性、能源领域应用情况等方面来看，NB-IoT 高度匹配能源物联网需求。

2.1 NB-IoT 基本特性

(1) 深度覆盖：下行 Stand alone 模式为 43 dBm/180 kHz，功率谱密度比 LED 增强 17 dB，In band 模式 35 dBm/180 kHz，功率谱密度比 LTE 增强 9 dB。上行 23 dBm/15 kHz，Single tone 模式，功率谱密度比 LTE 增强 10.8 dB。采用多次重传提升 HARQ 增益，以更慢速率换取覆盖增益。下行最大重传 2 048 次，上行最大重传 128 次。总体上，NB-IoT 的覆盖半径约为 GSM/LTE 的 4 倍^[15-16]。

(2) 超低功耗：设计有 PSM 模式和 eDRX 模式，大幅降低了模组功耗。PSM 模式下，终端仍旧注册在网但信令不可达，从而使终端更长时间驻留在深

度睡眠状态，以达到省电的目的。eDRX 增大了空闲模式下巡护信道侦听周期，空闲模式不连续接收周期由秒级至小时级，连接模式不连续接收周期支持 5.12 s 和 10.24 s，大幅提升了低功耗运行时的下行可达性。极低功耗可确保电池供电 NB-IoT 物联网装置长达 10 年的使用寿命(视具体应用情况而定)^[17-18]。

(3) 超低成本：通过简化协议栈、简化射频电路、简化基带处理复杂度，NB-IoT 不支持 MIMO、无需双工器、降低了带外及阻塞指标，基带复杂度和射频电路分别降低了 10% 和 65%^[19-21]。目前(2021 年 6 月)NB-IoT 模组成本已降至 15 元以下。

(4) 海量连接：采用窄带技术，上下等效功率提升，进而大幅提升了信道容量。通过减小空口信令开销，提升了频谱密度。通过基站和核心网优化，实现了独立的准入拥塞控制、下行数据缓存和终端上下文存储，可实现 5 万连接数/小区^[22-23]。

2.2 NB-IoT 网络层安全特性

(1) 对于同时支持控制面优化传输方案 and 用户面优化传输方案的终端，NB-IoT 采用 AS 和 NAS 两层安全机制，前者确保了接入网中的 RRC(Radio Resource Control)安全和用户面安全，后者确保了 EPC(Evolved Packet Core)中的 NAS 安全。

(2) 通过定义 ASME(Access Safe Management Entity)，实现了接入网从 HSS(Home Subscriber Server)接收最高级密钥。此外，NB-IoT 构建了包含终端和 HSS 间共享的密钥、终端和 ASME 间共享的密钥、终端和 MME(Mobility Management Entity)

间共享的密钥、终端和基站间共享的密钥四层密钥构架。

(3) 通过 SMC(Security Mode Control)来完成接入层和非接入层的安全性激活,并且可以通过 RRC 连接重建过程和 RRC 连接恢复过程重新激活接入层安全。

(4) 通过使用完整性保护密钥和完整性校验码(由计数值、承载识别、上下行方向指示、数据内容构成)构建了数据完整性保护机制,确保了数据完整性^[24]。

2.3 NB-IoT 在能源领域的应用

目前,NB-IoT 已经在能源领域得到了初步的应用。文献[25]通过抽象化泛在物联网的信息论表述,量化比较了包含 NB-IoT 技术在内的泛在电力物联网在数据传输容量上的优势,综合估算了智能感知网络规模,探讨了泛在电力物联网边缘算法的可分解性与下沉系数,定义了描述边缘算法可分解程度的范式。文献[26]以典型电力物联网业务为例,分析了电力物联网的通信需求,从包含 NB-IoT 在内的面向电力物联网新业务的电力通信网关键技术应用和电力通信网发展趋势两个方面对电力通信网的发展进行了探索。此外,市场上已经初步涌现出一批围绕电力、热力、燃气等能源领域的 NB-IoT 物联网解决方案,相关企业已经开发出了 NB-IoT 数据采集终端、NB-IoT 能源物联网数据监测系统等相关产品,民用能源表计是(燃气表、热力表、电表等)NB-IoT 的最大应用场景,年新增接入数已超过两千万。

NB-IoT 的基本特性、网络层安全特性以及在能源领域的应用表明,其具备承载能源物联网规模部署的能力。但是能源物联网数据类型多、采集范围广、产业链条长、迭代速度快等基本特征也对其模组硬件、模组软件以及物联网卡管理提出了严格的安全需求。

3 NB-IoT 能源物联网应用场景安全构架

3.1 “双碳”目标下能源物联网应用场景

“双碳”目标下,NB-IoT 能源物联网的核心功能是在能源生产、传输、存储、交易和消费全生命周期内,为生产经营者、消费者和管理部门提供可信数据支撑。

电力物联网是能源物联网的核心,在发电厂、变电站、输电线路、配电站、储能,以及工业、民用、电动汽车等各类用电场景,电压、电流、有功功率、无功功率、断路器位置、刀闸位置、设备温

度等各类信息的传输均由电力物联网完成^[23]。

在燃气领域,能源物联网主要应用于井场、集气站、液化天然气接收站、储气设施、液化设施、压缩设施、各类高压/中压/低压管道和燃气用户等场合中流量、压力、温度、泄漏浓度等运行参数的传输,以及阀门开度、压力等控制变量的传输。

在热力领域,能源物联网主要应用于热源厂、供热管网、中继泵站、隔压换热站和用户等场合中热量、温度、压力、流量等运行参数的传输,各类泵、阀门的运行状态的监测,以及阀门开度、运行状态等控制变量的传输。

在石油领域,能源物联网主要用于油井、石化厂、输油管路和加油站等场合中流量、温度、压力等运行参数的传输,各类泵、阀门的运行状态的监测,以及流速、运行状态等控制变量的传输。

各类温度、压力等运行状态参数将为能源的可靠生产、储运和消费提供参考,同时电量、流量、热量等运行参数将直接服务碳排放量的在线检测核算,为碳排放量控制、碳排放配额设计及碳排放交易提供可信数据支撑。

3.2 NB-IoT 能源物联网安全构架

围绕“双碳”目标下 NB-IoT 能源物联网的安全需求,所构建的包含安全模组和安全服务平台的 NB-IoT 物联网安全构架如图 1 所示。

(1) NB-IoT 物联网安全模组硬件

NB-IoT 物联网安全模组的软硬件结构如图 2 所示。硬件上,由支持 NB-IoT R13/R14 或更高版本的高集成度 SoC、支持 AES/3DES 和 SM1-SM4 的 ESAM(Embedded Secure Access Modules)和 eSIM 构成,也可采用 ESAM 和 eSIM 的集成方式实现,例如中国移动推出的 SE-SIM 解决方案 CS18S。

(2) NB-IoT 物联网安全模组软件

软件功能上,包括 NB-IoT SoC SDK 软件、RTOS 软件、加密算法、eSIM 应用软件和 eSIM OS 等部分构成。加密算法包括 TDES/AES/SSF33/SM1/SM4 等对称加密算法,SM9/SM2/ECC/RSA 等非对称算法,以及 SHA1/SHA224/SHA256/SM3 摘要算法^[27]。

软件结构上,基于 GlobalPlatform,由包含运行于富执行环境(Rich Execution Environment, REE)的 RTOS 及驱动、REE 应用程序,以及运行于可信执行环境(Trusted Execution Environment, TEE)的可信 OS 及可信 APP 构成,如图 2 所示。GlobalPlatform 可信框架示意图如图 3 所示^[28]。

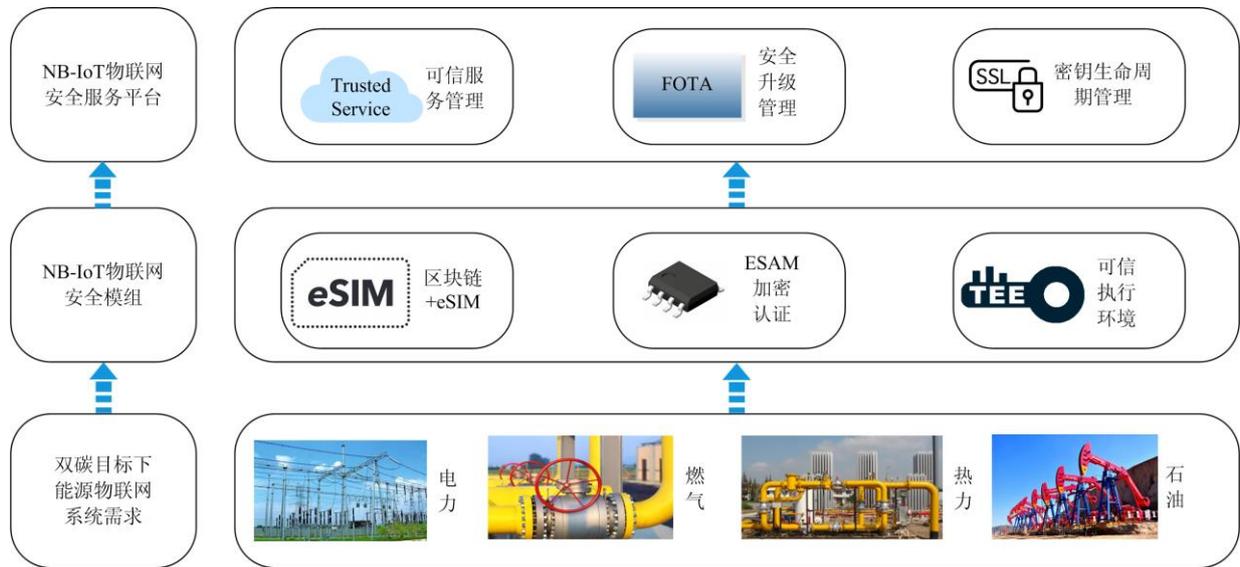


图 1 “双碳”目标下 NB-IoT 能源物联网安全构架

Fig. 1 Security framework of NB-IoT energy IoT to achieve carbon peak and neutrality goals

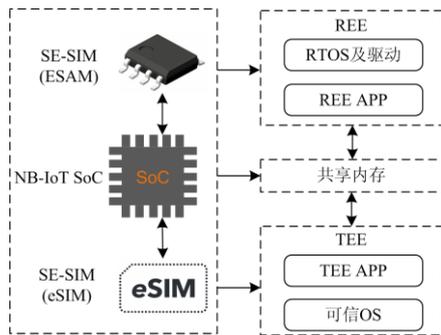


图 2 NB-IoT 物联网安全模组软硬件结构
Fig. 2 Software and hardware frameworks of NB-IoT security modules

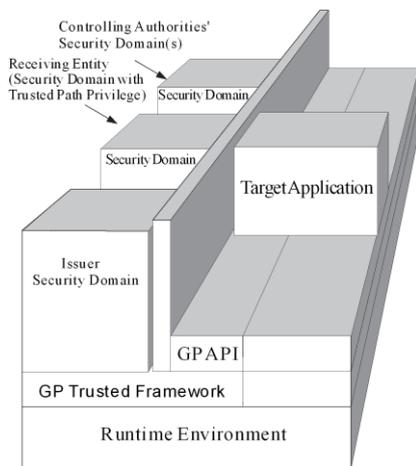


图 3 GlobalPlatform 可信框架
Fig. 3 GlobalPlatform trusted framework

(3) 区块链物联网卡全链条安全管理机制

作为典型的低功耗广域网(Low-Power Wide-Area Network, LPWAN), NB-IoT 物联网卡 eSIM 的安全可信是确保终端满足接入安全要求的源头保障^[29-31], 也是增强物联网内生安全的重要环节。

采用链式结构数据单元、数字签名和共识算法机制的区块链系统具有以下显著特征: ① 去中心化: 系统中的所有节点均为对等节点, 平等地发送、接收、存储、维护系统中的所有数据; ② 不可篡改: 由于所有节点均参与数据的存储和维护, 数据一经验证达成共识被写入区块后, 区块链系统利用哈希函数的单向性、数字签名的防伪认证功能和分布式共识的容错能力, 任何节点无法对数据进行篡改; ③ 可追溯性: 区块链数据结构中的时间戳以及链式数据存储结构, 为数据提供了时间维度, 便于检索数据库从源头到最新状态之间的完整变更过程; ④ 可靠性: 系统中的每一个节点均对等地维护数据并参与到整个系统的共识中, 单一节点出现故障不会对系统的运行造成任何影响^[32-34]。

eSIM 交易流转具有以下特征: (1) 多主体性: 运营商、制造商、销售商和消费者属于多边利益主体, 传统中心化管理平台难以实现多边利益均衡; (2) 虚拟交易: eSIM 无物理载体, 其交易属于完全虚拟交易流转; (3) 高可信性: eSIM 的安全交易流转是能源物联网安全的源头, 只有当各主体间存在高度互信环境时, 系统才能协调工作。

基于区块链和 eSIM 交易流转的上述特征, 区块链天然适用于开展物联网卡全链条安全管理。由

运营商、制造商、销售商和消费者参与的区块链物联网卡全链条安全管理机制如图 4 所示^[35-36]。通过将缓存于 REST 服务器的交易信息分布记账于多个

区块, 可确保不依赖于第三方的去中心化管理, 实现端到端透明化和高可信性, 实现了依托于智能合约的 eSIM 分布式管理。

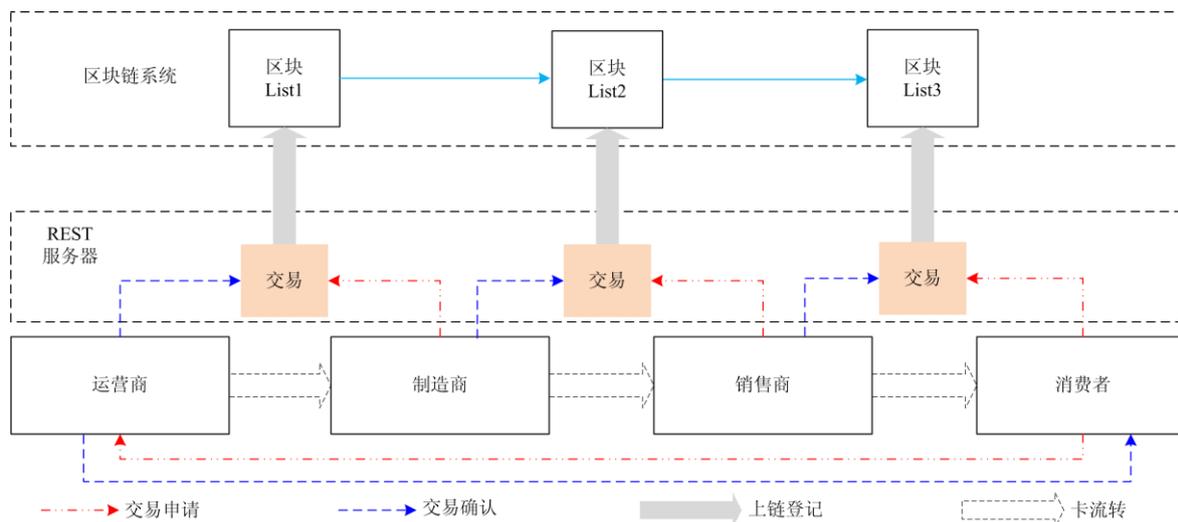


图 4 区块链物联网卡全链条安全管理机制^[35]

Fig. 4 Security management mechanism of IoT card based on blockchain^[35]

4 结语

作为提高国家自主贡献力度的重要举措, “3060 双碳目标”是我国接下来相当长一个时期内, 能源领域发展的风向标^[37-39]。NB-IoT 物联网的基本特性、网络层安全特性、能源领域应用情况以及国家的政策支持均表明, 其高度适合电力、燃气、热力、石油等能源领域大规模数据传输需求, 其具备承载能源物联网规模部署的能力。

本文提出的 eSIM+ESAM NB-IoT 物联网安全模组硬件、基于 GlobalPlatform 可信框架的 NB-IoT 物联网安全模组软件, 以及基于区块链的物联网卡全链条安全管理关键技术可为 NB-IoT 能源物联网提供数据安全支撑, 确保能源物联网的安全运行。

未来, 伴随着 3GPP R15、R16 及更高版本的逐步商业化部署, NB-IoT 的终端功耗将进一步降低、频谱效率将进一步增强。同时, NB-IoT 和 NR 共存、PRACH 覆盖增强、接入 5G 核心网等新功能将扩展其在能源物联网领域更广阔的应用空间。持续构建 NB-IoT 能源物联网安全风险防御体系, 实现 NB-IoT 全业务、全流程、端到端的安全可控, 是确保能源物联网支撑“3060 双碳目标”实现的重要保障。

参考文献

[1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2021.

[2] 国家能源局. 提质增效 “数字能源”与“双碳”目标偕行 [EB/OL]. [2021-08-06]. http://www.nea.gov.cn/2021-08/06/c_1310111981.htm.
National Energy Administration. Improve quality and efficiency, "digital energy" and "dual carbon" goal together [EB/OL]. [2021-08-06]. http://www.nea.gov.cn/2021-08/06/c_1310111981.htm.

[3] 陈皓勇, 蔡伟钧, 陈健润. 能量与信息融合的电力物联网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 8-17.
CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power internet of things technology with energy and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 8-17.

[4] 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, 2020, 48(3): 1-8.

[5] 刘俊勇, 潘力, 何迈. 能源物联网及其关键技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(4): 9-16.
LIU Junyong, PAN Li, HE Mai. Internet of energy things and its key technologies[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(4): 9-16.

[6] DZOBO O, MALILA B, SITHOLE L. Proposed framework for blockchain technology in a decentralised energy network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-11.

- [7] 苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001-1009.
SU Jian, LIANG Yingbo, DING Lin, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001-1009.
- [8] 李世峰, 朱国云. “双碳”愿景下的能源转型路径探析[J]. 南京社会科学, 2021(12): 48-56.
LI Shifeng, ZHU Guoyun. Analysis of the energy transition path under the "double carbon" vision[J]. Social Sciences in Nanjing, 2021(12): 48-56.
- [9] DELOITTE. 2022 年中国经济与行业展望[EB/OL]. [2021-12-01].
<https://www2.deloitte.com/cn/zh/pages/about-deloitte/articles/deloitte-research-issue-70.html>.
DELOITTE. China's economy and industry outlook in2022[EB/OL]. [2021-12-01]. <https://www2.deloitte.com/cn/zh/pages/about-deloitte/articles/deloitte-research-issue-70.html>.
- [10] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[EB/OL]. [2021-09-01]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6689062e-43fc-40c8-9659-01cf96150318/AnergysectorroadmaptocarbonneutralityinChina.pdf>.
- [11] 陈新华. 认清碳的身份-碳中和如何科学理性[J]. 科学大观园, 2021(10): 26-29.
CHEN Xinhua. Recognize the identity of carbon-how carbon neutrality is scientific and rational[J]. Grand Garden of Science, 2021(10): 26-29.
- [12] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革[J]. 中国科学院院刊, 2021(9): 1010-1018.
HUANG Zhen, XIE Xiaomin. Energy revolution under vision of carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021(9): 1010-1018.
- [13] 陈晓红, 胡东滨, 曹文治, 等. 数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析[J]. 中国科学院院刊, 2021(9): 1019-1029.
CHEN Xiaohong, HU Dongbin, CAO Wenzhi, et al. Path of digital technology promoting realization of carbon neutrality goal in China's energy industry[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021(9): 1019-1029.
- [14] 许光清, 陈晓玉. 考虑能源的中国经济要素再配置效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(3): 128-137.
XU Guangqing, CHEN Xiaoyu. China's factor reallocation effect considering energy[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(3): 128-137.
- [15] MARTINEZ B, ADELANTADO F, BARTOLI A, et al. Exploring the performance boundaries of NB-IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5702-5712.
- [16] RATASUK R, VEJLGAARD B, MANGALVEDHE N, et al. NB-IoT system for M2M communication[C] // 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 3-6, 2016, Doha, Qatar: 1-5.
- [17] KANJ M, SAVAUX V, LE GUEN M. A tutorial on NB-IoT physical layer design[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2408-2446.
- [18] WANG Y P E, LIN X, ADHIKARY A, et al. A primer on 3GPP narrowband internet of things[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3): 117-123.
- [19] HOGLUND A, MEDINA-ACOSTA G A, VEEDU S N K, et al. 3GPP release-16 preconfigured uplink resources for LTE-M and NB-IoT[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2020, 4(2): 50-56.
- [20] BALLERINI M, POLONELLI T, BRUNELLI D, et al. NB-IoT versus LoRaWAN: an experimental evaluation for industrial applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(12): 7802-7811.
- [21] LI Y, CHENG X, CAO Y, et al. Smart choice for the smart grid: narrowband internet of things (NB-IoT)[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 5(3): 1505-1515.
- [22] SULTANIA A K, MAHFOUDHI F, FAMAHEY J. Real-time demand response using NB-IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(12): 11863-11872.
- [23] ZAYAS A D, MERINO P. The 3GPP NB-IoT system architecture for the internet of things[C] // 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), May 21-25, 2017, Paris, France: 277-282.
- [24] 陆婷, 方惠英, 袁弋非, 等. 窄带物联网(NB-IoT)标准协议的演进—从R13到R16的5G物联网之路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
- [25] 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 Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. 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.
- [26] 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.
- [27] 陈永波, 刘建业, 陈继军. 智慧能源物联网应用研究与分析[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(1): 37-42.

- CHEN Yongbo, LIU Jianye, CHEN Jijun. Applications of intelligent energy internet of things[J]. ZTE Technology Journal, 2017, 23(1): 37-42.
- [28] GlobalPlatform, Inc. GlobalPlatform technology card specification version 2.3.1[EB/OL]. [2018-03-01]. https://globalplatform.org/wp-content/uploads/2018/05/GPC_CardSpecification_v2.3.1_PublicRelease_CC.pdf.
- [29] 中华人民共和国国家标准. 信息安全技术-物联网感知终端应用安全技术要求: GB/T 36951—2018[S]. National standards of People's Republic of China. Information security technology-security technical requirements for IoT perception terminal applications: GB/T 36951—2018[S].
- [30] 史可, 贾雪琴, 林晨, 等. 基于 5G 的区块链 eSIM 应用与研究[J]. 邮电设计技术, 2020(11): 36-39. SHI Ke, JIA Xueqin, LIN Chen, et al. Application and research of blockchain eSIM based on 5G[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(11): 36-39.
- [31] MEKKI K, BAJIC E, CHAXEL F, et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment[J]. ICT Express, 2019, 5(1): 1-7.
- [32] 杨玉博, 卢达, 白静芬, 等. 基于区块链技术的充电桩运维系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 141-147. YANG Yubo, LU Da, BAI Jingfen, et al. Research on a blockchain-based charging pile maintenance system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 141-147.
- [33] 黄虹, 文康珍, 刘璇, 等. 泛在电力物联网背景下基于联盟区块链的电力交易方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 22-28. HUANG Hong, WEN Kangzhen, LIU Xuan, et al. Power trading method based on consortium blockchain under ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 22-28.
- [34] 徐美强, 高志远, 王伟, 等. 基于区块链技术的智能变电站配置版本管理[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 60-67. XU Meiqiang, GAO Zhiyuan, WANG Wei, et al. Smart substation configuration version management based on blockchain technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 60-67.
- [35] 中国信通院物联网安全创新实验室. 物联网终端安全白皮书[EB/OL]. [2019-11-01]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201911/P020191115523217021278.pdf>. Internet of Things Security Innovation Lab of China Academy of Information and Communications Technology. IoT terminal security white paper[EB/OL]. [2019-11-01]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201911/P020191115523217021278.pdf>.
- [36] 李刚, 赵琳颖, 关雪, 等. 基于博弈策略的能源区块链安全交易机制[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 127-135. LI Gang, ZHAO Linying, GUAN Xue, et al. Security transaction mechanism of energy blockchain applying game strategy[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 127-135.
- [37] 国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展白皮书[EB/OL]. [2020-12-01]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm. State Council Information Office. White paper on China's energy development in the new era[EB/OL]. [2020-12-01]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm.
- [38] 邱纯, 应展烽, 冯奕, 等. 计及碳配额的混合储能综合微能源网优化运行研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 119-127. QIU Chun, YING Zhanfeng, FENG Yi, et al. Optimal operation of hybrid energy storage integrated micro-energy network considering carbon quote[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 119-127.
- [39] 王利兵, 张赞. 中国能源碳排放因素分解与情景预测[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 1-9. WANG Libing, ZHANG Yun. Factors decomposition and scenario prediction of Energy-R related CO2 emissions in China[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 1-9.

收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2022-03-06

作者简介:

王延峰(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网通信、信息化电器与智能计算; E-mail: wangyanfeng@zzuli.edu.cn

张友鹏(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压电器。E-mail: 39100445@qq.com

(编辑 张爱琴)