

面向输变电场景的无线传感网体系架构设计

Design of Wireless Sensor Network Architecture for Power Transmission and Transformation Scenarios

■ 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院 路永玲 王 真 薛 海 胡成博 朱雪琼

摘 要 针对现有输变电设备状态感知业务中，大量采用私有协议无法相互兼容，且目前通用的无线通信协议在采集、传输、组网等方面无法满足实际业务需求的问题，开展电力业务场景及传感数据特征分析，介绍了物理层低功耗选型、低功耗接入与组网通信协议设计思路，构建了输变电设备物联网感知层统一、完整的无线传感网体系架构，并选取典型业务场景进行试点应用，实现了复杂业务场景下多类型无线传感器的统一接入与互联互通。

关键词 输变电 电力物联网 无线传感网 体系架构

Abstract: In view of the problems that a large number of private protocols cannot be compatible with each other in the existing state sensing services of power transmission and transformation equipment, and the current common wireless communication protocols cannot meet the actual business needs in terms of collection, transmission, networking, etc., this paper analyzes the power business scenarios and sensing data characteristics, and constructs a unified and complete wireless sensing network architecture for the IoT sensing layer of power transmission and transformation equipment. This paper mainly introduces the low power selection for physical layer, low power access and network protocol design, and constructs a unified and complete wireless sensing network architecture for the IoT sensing layer of power transmission and transformation equipment, and select typical business scenarios for pilot application, it realizes unified access and interconnection of multiple types of wireless sensors in complex business scenarios.

Keywords: power transmission and transformation; power Internet of Things; wireless sensor network; architecture

1 输变电设备无线传感业务需求分析

1.1 输电场景分析

输电线路在空间位置分布方面，主要呈链状分布，由输电线路和输电杆塔构成，输电杆塔间的距离通常为 300~500 m，单条输电线路长度为几十或上百公里^[1-2]。输电线路监测用无线传感器大多分布在杆塔四周、少数分布在线路中央，每个杆塔周围传感器数量约上百个，线路中央传感器通常数十个^[3]。

在网络覆盖范围及单跳通信距离方面，鉴于线路中央不适宜部署汇聚节点设备，仅能将汇聚节点设备部署在杆塔上。考虑到在某个汇聚节点失效时其他节点仍能够继续工作，汇聚节点单跳通信距离大于 1 km^[4-6]。若在每个杆塔处部署 1 个汇聚节点，则传感器节点的通信距离应不小于 500 m。

在网络拓扑方面，由传感器和汇聚节点构成的无线网为星形网络，由汇聚节点和接入节点构成的节点设备网络物理上呈链状分布，适用于链状组网

的通信协议性能更佳；在供电方面，大多输电线路处于偏远地带，无法采用有线供电方式；另外，电池的使用寿命较短，无法长期工作，需要定期更换；即便是采用光伏电池，在没有光照的场合，其将发挥很小的效用，且其体积较大^[7-10]。

1.2 变电场景分析

典型变电站覆盖范围通常为块状区域，近似方形或者圆形，覆盖半径通常和电压等级成正比，多为 100~500 m。变电站内存在多种金属设备，易引起无线信号的绕射^[11-12]。在无线传感器部署位置及数量方面，变电站状态监测传感器、局部放电监测传感器的部署位置受限于监测设备，环境量监测传感器均匀分布在整个区域中，小型变电站全部部署时总传感器个数约 1 000 个，大型变电站全部部署时总传感器个数约 4 000 个，且相对集中^[13-14]。

在网络覆盖范围及单跳通信距离方面，假设一个变电站部署 1 个接入节点，要求无线传感网络覆盖半径不小于 500 m。单从无线传感网络覆盖范围来讲，其对单跳通信距离及跳数要求不高。然而，变电站中存在大量金属设备，对无线信号传输影响较大，仍旧对无线传感网络具有较强的抗衰减、抗干扰能力^[15]。

在网络拓扑方面，变电站无线传感器分布相对集中，适用于星形、树形组网的通信协议均适用。在供电方面，传感器节点部署位置受限于一次设备位置，大多存在供电难题，需要电池供电；汇聚节点部署位置基本不受限，尽量部署在可直接供电的位置处，但对于室外变电站来说，为了实现传感器的全覆盖，仍有部分汇聚节点需要部署在无供电区域，并依靠电池供电^[16-17]。

1.3 传感数据特征分析

输变电应用场景中会用到的多种传感器，通过对常用输变电线路监测装置进行调研统计^[18]，提炼出输变电线路监测传感器工作的采样频率、数据长度等技术参数，见表 1、表 2。

为了有效分析不同输变电设备物联网感知数据可靠传输需要，将传感器根据采样频率、发送数据

表 1 输电传感器发射频次、报文大小统计表

序号	传感器种类	发射间隔 时间 /min	报文大小 / Byte
1	导线温度传感器	5	21
2	风偏传感器	5	27
3	杆塔倾斜传感器	5	27
4	绝缘子泄漏电流 传感器	5	21
5	导线电流传感器	5	21
6	微气象传感器	20	48
7	无线温度传感器	5	24
8	无线无源温度 传感器	5	24

表 2 变电传感器发射频次、报文大小统计表

序号	传感器种类	发射间隔 时间	报文大小 / Byte
1	无线温度传感器	5 min	24
2	无线无源温度 传感器	5 min	24
3	无线温湿度传感器	5 min	29
4	无线水浸传感器	5 min	28
5	无线形变传感器	5 min	28
6	无线烟感传感器	5 min	22
7	无线六氟化硫微水 监测传感器	1 h	18
8	无线水位传感器	5 min	38
9	无线噪声传感器	5 min	38
10	无线通用控制器	默认 6 h	13
11	特高频传感器	24 h	14 450
12	高频传感器	24 h	14 450
13	超声波传感器	24 h	14 450
14	变压器铁芯电流 传感器	4 h	104
15	振动传感器	4 h	174
16	避雷器泄漏电流 传感器	4 h	50

长度等业务需求分为两类，具体如下。

(1) 微功率无线传感器

采集频次高（一般为分钟级别）、小数据量（Byte

级)、数值类采集、平均通信功耗大概在 μA 级的无线传感器,如温度、温湿度、形变、倾角等传感器。

(2) 低功耗无线传感器

采集频次低(小时级)、数据量较大(kB级)、波形类采集、平均通信功耗大约在 mA 级别无线传感器,如局部放电、振动波形、机械特性等传感器。

2 设计思路

(1) 物理层选型

通信体制选型:基于传感器主流厂家的工作基础,选用 LoRa、BLE、ZigBee 物理层方式,一方面以上 3 种通信芯片具备低功耗的特点,其休眠电流小于 $1 \mu A$,同时发送功率和接收功率为数十 mA 级别,可满足窄带物联网业务需求,另一方面兼容当前主流传感器厂家的硬件配置。

频段合法性:满足国家无线电管理委员会的微功率频段使用规定,选用 2.4 GHz 频段和 470~510 MHz 频段,具体对应为 2.4 GHz LoRa、470 MHz LoRa、2.4 GHz BLE5.0、2.4 GHz ZigBee,其中 LoRa 具有远距离传输优势。

(2) 微功率无线接入协议

针对高频次、小数据量(k级以下)、对功耗要求苛刻的无线传感器标准化接入需求设计微功率无

线接入协议,能够满足温度、倾角、压力等无线传感器长寿命(6年以上)、免维护运行,实现不同厂家传感器互联互通。

(3) 低功耗传感器接入及节点组网协议

针对波形类等数据量较大(百 kB 级)、mA 级别功耗传感器接入及节点组网需求设计低功耗传感器接入及节点组网协议,满足局放、机械特性等传感器统一接入、同步采样、可靠组网覆盖等要求。

(4) 大数据组包分片传输方式

针对低功耗传感器百 kB 级的数据量传输需求,在数据压缩的基础上,对这些大业务量的数据采取了组包分片的措施,即将一个大数据包分割成若干个小数据包进行传输。依托于时隙调度的系统,节点在收到终端分片传输的数据后,可以明确是哪一个终端上传的数据,并在节点侧进行数据的重组以得到原始的业务数据。

通信数据(PDU),用以承载网络层数据或业务数据(SDU)。SDU 的长度最大为 1 400 Byte。传感器的业务数据分片和节点侧组包恢复数据的过程如图 1 和图 2 所示,以特高频局放传感器的业务数据举例,该传感器的发送频次为 24 h/次,每次的报文长度为 14 450 Byte,该报文分片首先分为若干个 SDU,每个 SDU 代表一部分业务数据,将 SDU 塞入若干个 PDU,最终业务数据以 PDU 的方式上传,并被节点

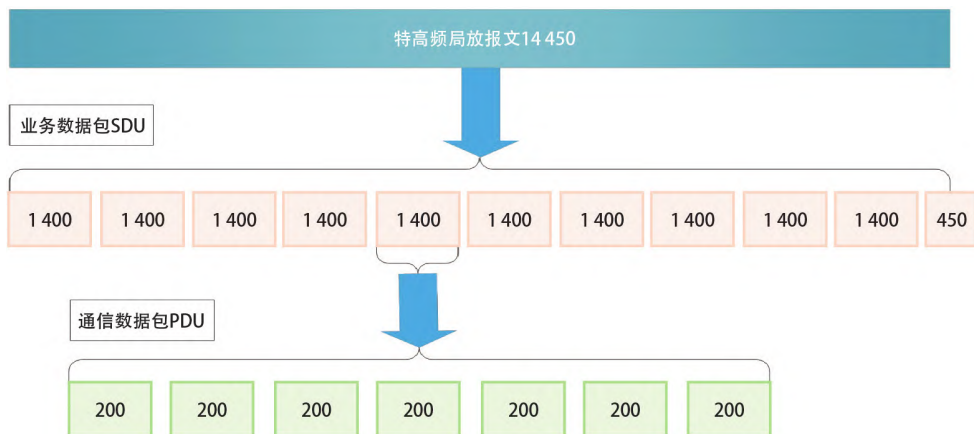


图 1 传感器业务数据分片 (单位: Byte)

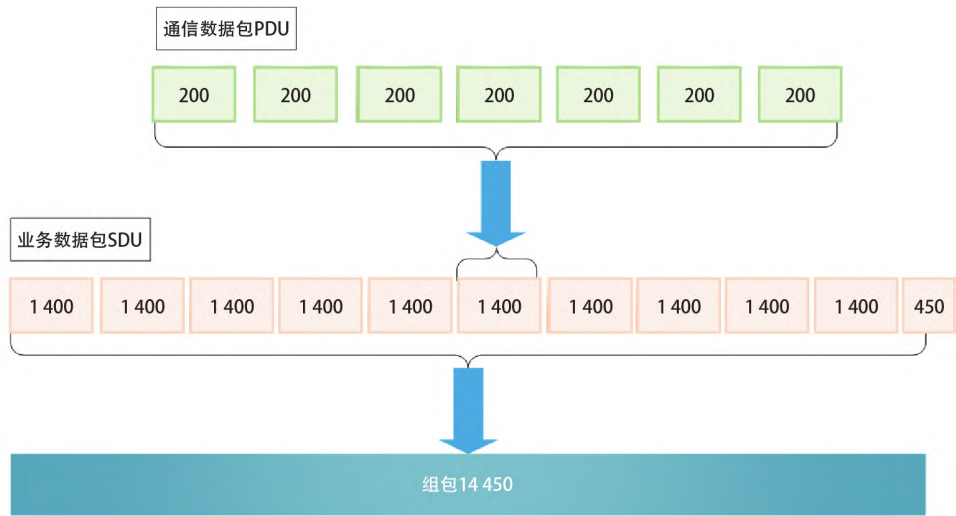


图2 节点侧组包 (单位: Byte)

接收。

如果 SDU 无需组包或分片, 则标记通信数据中的组包分片指示 $b_2=0$, 那么 $PDU=SDU$; 如果 SDU 需要组包或者分片, 则标记通信数据中的组包分片指示 $b_2=1$, 并且在 PDU 中加入组包分片头, 具体 PDU 的定义见表 3, 其中各部分具体含义如下:

表3 带有组包分片的 PDU 格式定义

类别	组包分片头					包数据
组	FLAG	SSEQ	Priority	PSEQ	SIZE	DATA
长度	2 bits	6 bits	1 bits	7 bits	8 bits	变长

(1) FLAG 用 2 bits 表示了分片的 4 种状态, 即“没有进行分片”“第一个分片”“后续还有分片”“最后一个分片”;

(2) SSEQ 表示该 PDU 所承载的 SDU 的序号, 即该 PDU 是哪一个业务数据的分片;

(3) Priority 对 PDU 的优先级做了划分, 使得重要数据或突发数据可以优先传输;

(4) PSEQ 规定了 PDU 的序号, 这也使得节点在收到若干分片数据之后, 可以再按顺序将分片进行组包;

(5) SIZE 和 DATA 则分别是分片的大小和具体内容。

组包分片功能只用于下行共享信道或者上行共享信道, 具体过程如下:

(1) 数据包队列根据调度资源的大小, 进行数据组包分片, 其长度需小于等于可用的资源;

(2) 分片传输数据的帧格式, 参见下行共享信道和上行共享信道的帧格式;

(3) 所有组包分片的数据包, 有应答确认 (本步骤为可选项);

(4) 当存在丢包时, 可以重传, 或者多次重传失败后可整包丢弃 (本步骤为可选项)。

(5) 当收到所有数据包后, 复原网络层数据 (SDU)。

使用了组包分片的技术, 使得局放传感器以及业务量更大的低功耗传感器的业务数据可以分包上传, 解决了传统的窄带无线传感网无法传输大包数据的问题, 满足了低功耗传感器百 kB 级业务数据量

的需求。

3 无线传感网架构设计

传感网是输变电设备物联网感知层的核心部分，其总体架构设计决定了感知数据的可靠性和时效性，但是目前存在两方面的问题：一是传统在线监测系统涵盖多类在线监测装置，但监测装置存在组网困难、可靠性差、有线部署复杂、维护工作量大的问题，难以满足对设备设施的状态监测要求；二是近年越来越多的无线传感器终端在电力业务进行应用，相对于传统监测终端，其数量将超出若干量级，且大多采用私有协议，无法相互兼容替代，导致传感网系统大量重复建设；同时在输变电复杂现场环境中，通用无线传感网技术（BLE、LoRa 等）在功耗控制、

传输距离、组网灵活性等方面无法完全满足业务需求。

针对以上问题，需要开展面向输变电业务的统一无线传感网架构设计，实现海量微功率/低功耗无线传感器的统一接入与不同业务场景下节点设备灵活组网覆盖，同时兼容有线传输网络，促进物联网传感器开放、统一接入生态形成，大幅提升输变电设备状态智能感知水平。

3.1 总体架构

本文综合考虑无线传感器功耗与接入规模、现场组网灵活性、业务数据传输可靠性，设计统一、合理的总体架构，在有效降低传感器通讯功耗的同时，可根据业务需求实现无线网络全面覆盖。

无线传感网总体架构分为传感器层和数据汇聚层，如图 3 所示。

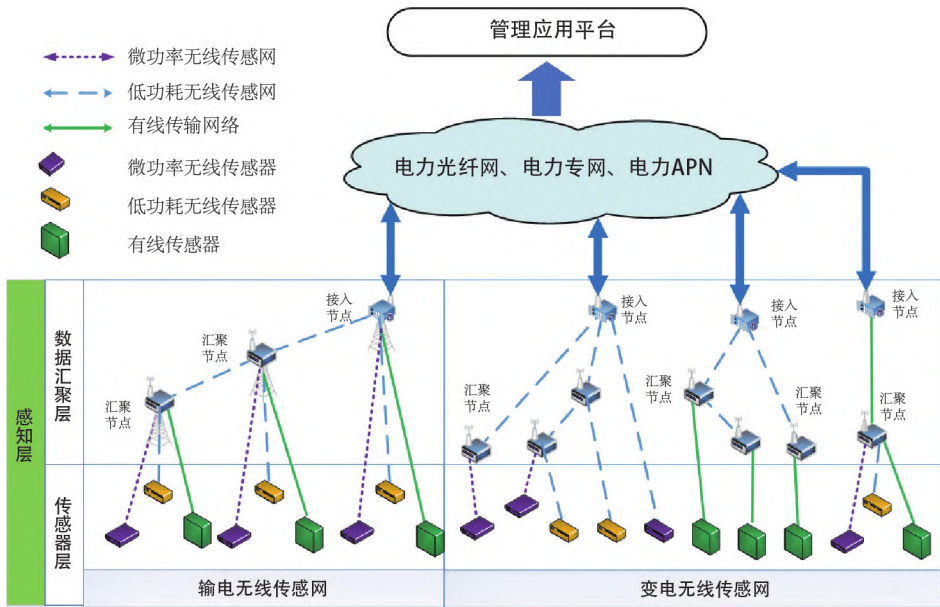


图 3 无线传感网总体架构

传感器层包括微功率无线传感器（ μW 级）、低功耗无线传感器（ mW 级）、有线传感器，节点设备与传感器之间组成星型拓扑网络结构，支持多物理层传感终端的接入适配，节点设备起到终端的接入控制的作用，接入网络支持汇聚节点和传感终端间

的单向、双向通信。

数据汇聚层包括接入节点和汇聚节点两种设备类型，根据输变电设备的空间分布特征实现节点间树形或链状自动组网，并实现接入节点北向路由，为海量传感器提供通信连接。其中汇聚节点主要用

于接收、汇聚一定范围内的微功耗传感器、低功耗传感器和有线传感器上传的数据，起到通信中继、暂存作用；接入节点是无线传感网与电力专用网络的接口设备，对网络内的所有节点和传感器进行管理和数据采集，接入节点可部署较强的边缘计算内核实现对数据进行初步的运算和清洗，再通过回程网络将状态数据、管理数据、分析结果数据送入电力内网的管理平台。

3.2 不同场景下组网方案

针对电力设备管理不同业务场景下对数据汇聚层多形态组网需求，实现多形态组网，如图 4 所示。

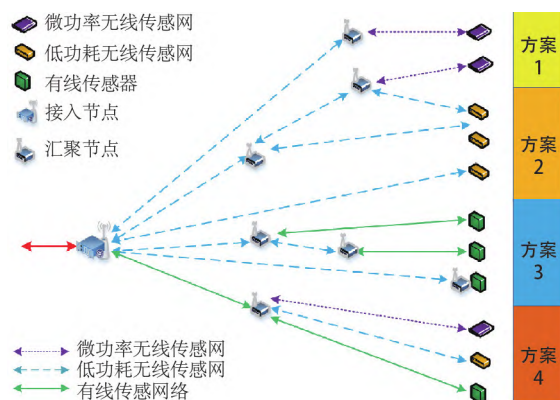


图 4 变电多形态组网

3.2.1 变电多形态组网

针对站房设备接触式测温等小数据量微功耗传感器，设计了双层的通用接入方案（方案 1）。

针对特高频、超声波等采样频率低、单次发送数据量大的低功耗传感器，低功耗传感器与汇聚节点、接入节点间均为采用低功耗传感网络协议，节点间支持多形态组网（方案 2）。

针对传统的在线监测传感器改造需求，利用传统传感器或者 IED 与汇聚节点间采用有线连接。汇聚节点、接入节点采用低功耗传感网协议进行灵活的网格（MESH）组网（方案 3）。

针对部分室内布置的传感器，为了降低网络结构复杂度，设计了节点设备有线组网接入方案：微功耗无线传感器、低功耗无线传感器、有线传感器

分别通过不同的传感网协议将数据上传至汇聚节点；汇聚节点与接入节点间采用有线连接（方案 4）。

3.2.2 输电链状组网

针对传感器逐塔配置的链状分布情况，采用双层组网方式，如图 5 所示。

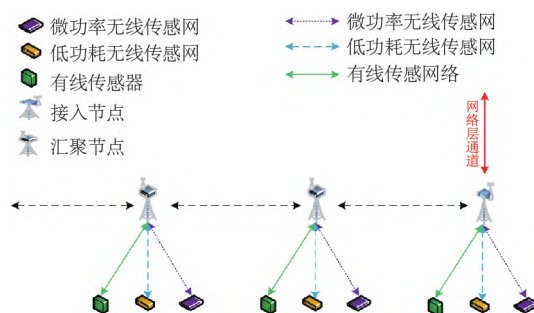


图 5 输电链状组网

(1) 传感器通过微功耗无线传感网、低功耗传感网或有线电缆等方式与就近的汇聚节点或接入节点连接；

(2) 汇聚节点、接入节点间采用低功耗无线传感网进行链状多跳组网，最终通过接入节点对接至网络层。

针对零星部署的线路传感器，通过微功耗无线传感网、低功耗传感网或有线电缆等方式直接与接入节点连接，如图 6 所示。

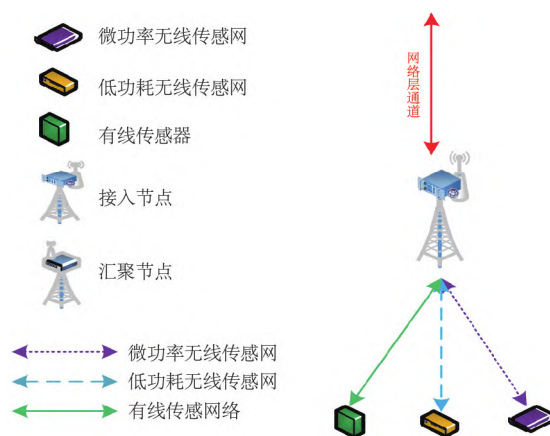


图 6 输电单点接入组网

4 无线传感网架构试点应用

为验证无线传感网架构的有效性,分别选取典型户外变电站(某地某 220 kV 变电站)、室内变电站(某地某 110 kV 变电站)进行无线传感网架构组网试点应用。220 kV 变电站户外环境较为空旷,汇聚节点的覆盖半径可达 150~200 m,通过部署 1 台无线汇聚终端及 8 台汇聚节点组成树型拓扑实现全站网络覆盖,组网构架图如图 7 所示,110 kV 变电站的环境较为复杂,墙体和电力设备遮挡较为严重,因此每层每室至少部署了一台汇聚节点。通过部署 1 台无线汇聚终端及 9 台汇聚节点组成树型加链状多跳的网络拓扑实现全站覆盖,组网图如图 8 所示。

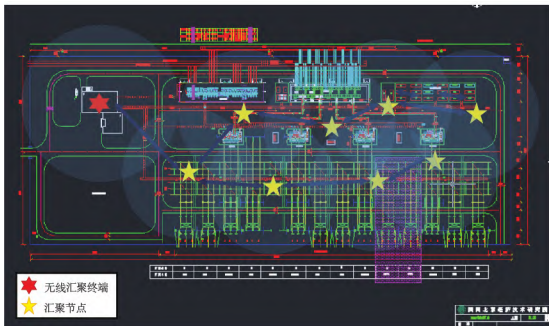


图 7 某地 220 kV 某变窄带类设备组网架构图

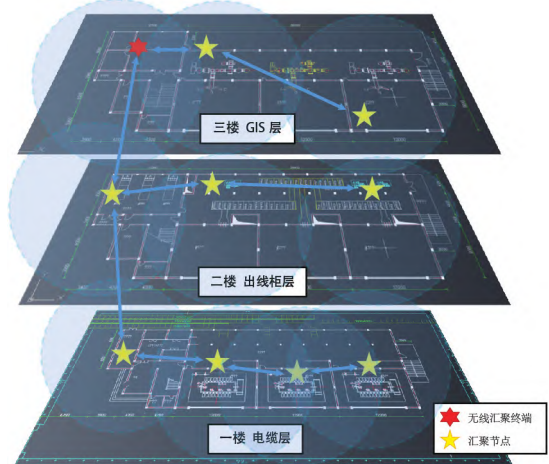


图 8 某地 110 kV 某变窄带类设备组网架构图

在无线传感网构架试点应用中,已完成网络拓扑状态实时显示、设备在线/离线状态查询、无线设

备远程升级及升级情况上报、传感终端指令及时响应、监测模块与感知装备工作状态自检及异常状态择机上报等功能。

5 结语

本文系统分析了不同电力业务场景及感知数据特征,基于通信功耗控制与无线网络组网覆盖两方面需求,将无线传感网体系架构分为接入层和组网层,并根据无线传感器功耗与接入规模、现场组网灵活性、业务数据传输等方面采用不同通信协议,实现了复杂业务场景下多类型无线传感器的统一接入与互联互通。

参考文献

- [1] 张晓华,刘道伟,李柏青,等.智能电力物联网功能架构体系设计及创新模式探讨[J].电网技术,2022,46(5): 1633-1640.
- [2] 刘清源,刘瑞佳,王健,等.基于边缘计算的泛在电力物联网群组密钥管理算法研究[J].电测与仪表,2022,59(7): 48-56.
- [3] 周振宇,王翌,廖海君,等.电力物联网 5G 云-边-端协同框架与资源调度方法[J].电网技术,2022,46(5): 1641-1651.
- [4] 陈元桦,蔡泽祥,孙宇嫣,等.电力物联网边缘计算终端部署与业务分配优化方法[J].南方电网技术,2022,16(3): 100-107.
- [5] 薛宏利,蔡泽祥,谭炜豪,等.面向电力物联网的 LoRa 通信建模与性能仿真分析[J].南方电网技术,2022,16(3): 108-115.
- [6] 张国江,李勇,陈挺,等.泛在电力物联网中基于网络虚拟化的节能卸载机制[J].电力建设,2022,43(2): 18-25.
- [7] 毛水强,洪健,任华,等.面向电力物联网的 5G 移动边缘计算任务卸载方法[J].电测与仪表,2022,59(2): 105-111.
- [8] 赵保华,王志皓,陈连栋,等.电力物联网设备持

- (收稿日期：2023-03-26)

(上接第 58 页) 2018.

- (收稿日期: 2023-04-14)