

基于物联网的 110 kV 电缆管井 智能监测系统建设与应用

刘云龙¹,周大明¹,周勇¹,黄会贤²,曾祥瑞¹,谢弦¹,邵愚¹,刘英健¹

(1. 国网重庆市江北供电分公司,重庆 401120; 2. 国网重庆市电力公司,重庆 400015)

摘要:电力电缆在城市供电系统中起关键作用,电缆管井用于电缆接头制作或检修施工使用。日常运行过程中,电缆管井可能会出现电力电缆本体或中间接头过热,环境温度过高、水位过高等异常状态,大量非正常烟雾及非法入侵等现象也威胁着电缆供电系统的可靠性。介绍了一套用于对 110 kV 电缆管井智能监测的系统,包括智能感知系统、监控主机系统及在线监测终端系统。首先,介绍了由多智能传感器组成的感知系统,通过 LoRa 技术同井上监控主机无线通信,数据推算及实际测试结果表明本套系统依靠电池能够满足长时间续航要求;然后,介绍了多功能后台远程监测终端系统,后台系统基于物联网 NB-LoT 技术无线连接远端监控主机。本套系统在深管井中得到应用,能实时感知系统运行健康状况,极大便利运行维护人员,对确保电力电缆安全运行,提高供电可靠性具有重要意义。

关键词:电力电缆;电缆管井;智能感知;物联网

中图分类号:TM757 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)06-0075-06

Construction and Application of Intelligent Monitoring System for 110 kV Cable Bank Well Based on Internet of Things

Liu Yunlong¹, Zhou Daming¹, Zhou Yong¹, Huang Huixian², Zeng Xiangduan¹,
Xie Xian¹, Shao Yu¹, Liu Yingjian¹

(1. State Grid Chongqing Jiangbei Electric Power Supply Branch, Chongqing 401147, China;
2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China)

Abstract: The power cable plays a key role in urban power supply system, and the cable bank well provides a channel for the cable placement. In the daily operation process, the power cable body or intermediate joint will overheat, and there will be overhigh temperature of cable bank well environment and overhigh water level, and a large number of abnormal smoke and illegal invasion and other phenomena also threaten the stability of cable power supply system. A set of intelligent monitoring system for 110 kV cable bank well is introduced, including intelligent sensing system, monitoring host system and online monitoring terminal system. Firstly, the sensing system composed of multi intelligent sensors is introduced. Through the wireless communication between LoRa technology and the monitoring host in the well, it is determined by data calculation and experimental test that the system can meet the long-term endurance requirements by relying on batteries. Then, the multi-functional background remote monitoring terminal system is introduced. The background system is based on NB-LoT technology of the Internet of things to connect the remote monitoring host wirelessly. The system is applied to the drainage well system, which can sense the health status of the system in real time, and greatly facilitate the operation and maintenance personnel to find faults in time and deal with them in time. It is of great significance to ensure the safe operation of power cables and improve the reliability of power supply.

Key words: power cable; cable bank well; intelligent perception; the Internet of things

0 引言

随着城市建设加快,城区范围内电力电缆线路

逐渐取代架空输电线路,成为城区电网中关键的部分^[1-2]。电力电缆隧道及电缆管井等是提供庞大数量的电缆安装和巡视的通道,具有全封闭的特征,数量日益增加^[3]。110 kV 电缆易出现电缆中间

接头发热等问题,且电缆管井长期运行后,容易因各种原因造成井内积水过多^[4]。若敷设在电缆管井中的电力电缆长时间浸泡在水中处于高温高湿^[5-7]的情况下,不及时处理会造成电缆隧道环境恶化,导致电缆绝缘性能极大降低^[8],最终造成击穿短路故障等恶果^[9-10]。目前,私自施放用户电缆占用电缆通道公共资源及不法分子偷盗电缆导致片区停电的事情也时常发生。这些问题均会损害电缆的正常输电功能,造成国民经济的巨大损失。

因此有必要建立一套可实时监测^[11]电缆本体及电缆中间接头温度、电缆管井中温度^[12-14]、水位^[14]、烟雾、防入侵且具有较长时间续航的系统,确保电缆工作环境健康。

目前国内对于电缆管井内状态监测的研究大多存在状态监测量少、感知不全面^[16-19]的问题,无法同时在线监测电缆管井内的温度、水位及电缆自身温度等的发展态势。且由于电缆管井内待监测位置多,要同时完成井内监测终端同远端在线监测终端的无线通讯与数据传输^[20],对整个系统的可持续工作时间提出了较高要求^[21]。

针对上述问题,研发了一套针对 110 kV 电缆管井的智能监测系统,通过一整套系统即可实时监测 110 kV 电缆自身及电缆管井环境量等参量,并能与后台综合监测系统实现无线通信及数据传递,经测算及试验可知系统不间断工作时间可超 1000 天。该系统对于感知、改善电缆及电缆管井环境,对确保电力电缆的可靠运行具有重要意义。

1 总体设计

图 1 为所设计的基于泛在电力物联网的 110 kV 电缆排管工作井综合在线监测系统总体结构框图。该监测系统包含智能状态感知系统、井上监控主机系统和远程终端监测系统 3 部分。

其中,智能状态感知系统由众多低功耗传感器构成,传感器采集量包含电力电缆运行温度、电缆中间接头温度等电缆自身运行状态以及工作井内温湿度、烟雾、水位、入侵等环境状态,且可根据实际需求增加传感器的数量与类型。

井内传感器按预设值周期性采集数据,并通过功耗低、传输距离远的 LoRa 技术将采集信号无线传输至井上监控主机。监控主机用以接收、汇集转

换各传感器采集的信号,并基于物联网 NB-loT 技术实现同远程在线监测终端系统无线通信以及数据双向传递。

相比于 NB-loT 技术,LoRa 技术工作于频率低于 1 GHz 的非授权频段,可有效控制使用成本。同时,LoRa 节点可根据具体使用需求调整休眠时间,可以更好降低感知终端的功耗以提高续航时长。而 NB-loT 技术使用授权频段,追求最优频段利用率,具有更好的网络质量,比 LoRa 技术更适用于井上监控主机同远程终端的长距离通讯。

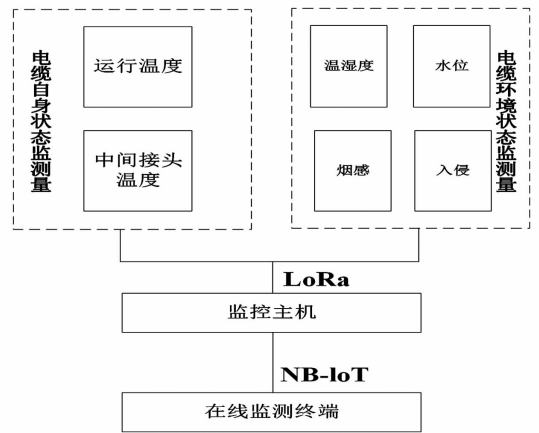


图 1 电缆管井综合在线监测系统结构

2 监测单元系统

2.1 传感器设计

2.1.1 温度传感器

电缆排管工作井在线监测系统中,电缆本体、中间接头及工作井环境温度的精确监测对其健康状况的感知至关重要,因此必须确保温度传感器具有在强电磁干扰及高温环境下的可靠性。自主设计的温度传感器如图 2 所示为表带形状,中间是测温单元,两边长度可根据电缆实际情况定制。

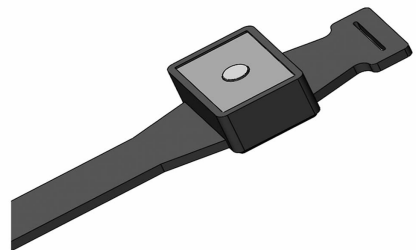


图 2 温度传感器

接触式温度传感器通过表带卡扣,使中间测温

部分与电缆有良好的接触,通过传导达到热平衡状态,测取电缆的温度情况。采用过低功耗无线测温传感器,静态功耗小于 $10\ \mu\text{A}$,可分布式多点监测电缆本体、电缆中间接头及环境的温度。在 $5\% \sim 99\%$ 环境湿度、 $55 \sim 110\ \text{kPa}$ 大气压强下能够保持正常长期工作,且内部不凝露、不结冰,满足电磁兼容性国标要求。可测量温度范围为 $-40\ ^\circ\text{C} \sim 90\ ^\circ\text{C}$,测量误差控制在 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 内。

2.1.2 水位传感器

水位传感器用以监测电缆管井内水位高低,选用浮球式液位传感器作为系统水位传感器。浮球式水位传感器运用液体对磁性浮球的浮力原理,由磁性浮球、测量导管、信号单元、电子单元、接线盒及安装件组成。磁性浮球可漂于水面上沿测量导管上下移动,导管内装有测量元件,在外磁作用下将被测液位信号转换成电信号,以 $4 \sim 20\ \text{mA}$ 信号进行输出。能够对密闭容器及地下的介质液位进行准确的测量。为实现水位的井下准确测量,水位传感器有效量程为 $5\ \text{m}$,测量精度最小分辨率为 $15\ \text{mm}$ 。

2.1.3 烟雾传感器

烟雾传感器通过监测烟雾浓度实现火灾防范。对电缆管井内 CO 、 HS 、甲烷及空气含氧量变化准确监测。采用离子式烟雾传感器,对微小的烟雾粒子感应灵敏。当烟雾窜逃外电离室,干扰带电粒子正常运动,根据电压电流的改变量,可感知烟雾浓度的变化。选用烟雾传感器测量范围 $0 \sim 2000\ \text{mL}/\text{m}^3$,误差范围 $\pm 7\%$,报警信号响应时间不大于 $25\ \text{s}$ 。

2.1.4 侵入传感器

施工单位私自施放用户电缆或低压线路占用电缆通道公共资源较为普遍,不法分子偷盗电缆等情况也时有发生,严重影响电缆网络的供电可靠性。为第一时间发现并能及时阻止此类现象发生,该系统配备有防盗防入侵传感器。

传感器包括前端探测器、传输模块及报警主机。前端探测器采用主动红外探测器及被动红外探测器组成。主动红外探测器通过红外发射器发射经调制过的红外光线投向接收器端。当在特定位置有物体遮挡时,接收器输出信号变化,报警主机发生报警。被动红外探测器由菲涅尔透镜及热释电传感器组成。当有人体移动或外物侵入时,周围环境温度同常态温度存在差异,通过菲涅尔透镜被热释电传感器监测到,输出报警信号。

2.1.5 供电与封装

因传感器均安装在地下电缆管井内,难以稳定供电,因此该系统所有在线监测传感器均采用锂亚电池供电,电池容量 $2600\ \text{mAh}$,可提供直流 $3.6\ \text{V}$ 的电压。锂亚电池稳定性好,自放电电流小,自身寿命大于 5 年。传感器与井上监测主机之间通过LoRa协议无线通信,短时间内无损将监测信息传输至监测主机端。

传感器在采集各项数据时,不改变被监测设备的接线方式、密封性能以及接地性能,同时不影响现场其他相关设备的安全运行。传感器不能因被监测对象出现异常状况而造成损坏,需要每个传感器探头的防护等级达到一定要求。采用防水透气膜可阻止水渗透情况的出现,实现传感器探头防水防尘。

2.2 物联网通信主机设计

物联网通信主机采用LoRa技术,用以接收通信范围内所有传感器的监测数据,并且将数据整合后转发至后台服务器,采用物联网NB-loT通讯协议。通信主机在整个电缆排管井环境在线监测中起到承前启后关键中间作用,其设计图如图3所示。

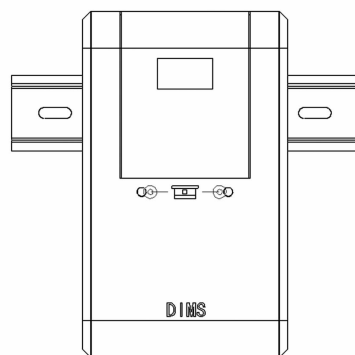


图3 物联网通讯主机设计图

为避免信号受井内复杂环境干扰,通信主机挂装在近电缆管井口位置,采用 $3.6\ \text{V}$ 锂电池供电,平均工作电流控制在 $100\ \mu\text{A}$ 内,无线发射最大功率不低于 $20\ \text{dB}$,能够接受超过 32 个传感器传输的信号,灵敏度大于 $168\ \text{dB}$,且最远信号通信传输距离超过 $10\ \text{km}$ 。

3 无线传感通信

电缆管井最深可达 $30 \sim 40\ \text{m}$,井内智能传感器要通过LoRa协议实现与井口通讯主机无线通信,需确保数据传输距离不小于 $50\ \text{m}$ 。同时,传感器由

内部3.6 V锂电池供电,需控制数据传输的功耗以提高电池工作寿命。为确保电池寿命、发射功率及传输距离之间的平衡,实现基于LoRa协议的监测数据无线传输,还需在智能传感器前端配置最优方案。

3.1 LoRa 技术

LoRa 技术工作在1 GHz 以下,有868 MHz、915 MHz、433 MHz 3个工作频率。相比于其他无线通信技术,其具有传输距离长、信息容量大、功耗低等特点。可达0.3~50 kbit/s的数据传输功率,增强了通信信号的容量及质量。基于Chirp spread spectrum的特殊扩频调制技术,使得通讯距离10 km以上时的工作电流可控在10 mA以下。

LoRa 系统是由终端设备、网关及应用服务器组成的星形拓扑网络结构。其中,终端设备作为叶子节点,向第一级的网关传输数据。LoRaWAN 协议作为在LoRa 物理层传输技术基础上的以MAC层为主的协议标准,提供网关与终端设备之间的通信。LoRaWAN 的上行链路信息帧结构包含前导码(Preamble)、物理帧头(PHDR)、循环冗余校验的物理帧头(PHDR_CRC)、有效负荷(PHYPay-load)、循环冗余校验(CRC)等。下行链路信息由服务器发送经由网关转发后发送给某感知终端,较上行链路少了CRC结构。终端设备与网关之间的通信根据带宽及比特率的不同,划分成多个频率的信道。为了降低能耗并能增加各信道的容量,每个设备应按需调整位速率。

LoRa 的数据传输共ClassA/B/C 3种模式:A类传输功耗最低,但接收信号的窗口固定,服务器无法主动激活终端设备,下行通信受限;B类传输在预设时间内可开放其他信号接收窗口(Ping Slot),同时,支持通信网络的时间同步,可以在固定时间内周期性地打开终端设备的接收窗口;C类传输可持续性的打开接收窗口,仅仅在上行通讯的时候关闭,但会提高功耗,仅适用于下行数据量大的情况。所设计的无线通信系统,为降低功耗,选用A类数据传输模式。

3.2 智能传感器设计

智能传感器安装于被监测对象上,实时采集监测数据,并通过远距离无线扩频通信技术,向物联网通信主机发送数据,传感器结构框图如图4所示。

智能传感器由传感器模块、集成控制模块以及

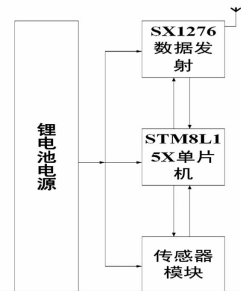


图4 传感器结构框图

数据发射模块组成,其中传感器模块与控制模块采用I²C通信。数据发射模块选用Semtech公司推出的具有新型LoRa扩频技术的SX1276芯片,控制模块选用休眠电流5.4 μA、工作电流192 μA的低功耗单片机STM8L15X系列。低功耗单片机可唤醒并控制传感器采集、数据发射模块输出,并提供时钟功能。

数据发射LoRa模块SX1276芯片同单片机通过SPI通信,具有功耗低、容量大、传输距离远、抗干扰能力强等优点。接收灵敏度达-148 dbm,输出功率增益可达20 dbm,输出信号频率范围137~1020 MHz,在电缆管井下实际复杂电磁干扰的环境中最近传输距离能达至少100 m。而且具有9.9 mA低工作电流,1.2 μA休眠电流。SX1276芯片接收单片机模块处理后的传感器信息并通过LoRa协议无线传输数据。

3.3 低功耗运行情况

1) 功耗理论计算

为提高效率,控制功耗,智能传感器在常态下对电缆及电缆管井的监测及传送数据是周期性的。计算以温度传感器为例,传感器在每分钟内唤醒一次,工作时间500 ms,且工作电流为9.8 mA。

智能传感器终端中各模块总功耗由两部分组成:静态功耗和动态功耗。静态功耗指系统在静态时由晶体管消耗能量,为微安级别电流。动态功耗指负载消耗能量。计算公式为

$$I_{DD} = I_{Static} + I_{Dynamic} \times f \quad (1)$$

式中: f 指时钟频率,在一天的24 h中,设在时间 t 内传感器处于数据采集以及无线通信状态,则在 $(24-t)$ 内处于休眠状态。在无线通信状态下,传感器采集数据,STM单片机运行,SX1276射频发射数据,功耗由三者共同构成。在休眠状态,单片机仅提供时钟功能,3个模块的静态功耗组成静态功耗。

根据前面的介绍,将系统中传感器在动态及静态

下的电流大小进行总结,如表1所示,以1 min为一个周期,各模块选用最大电流进行估算。其中休眠状态下,电流大小为 $10\ \mu\text{A} + 5.4\ \mu\text{A} + 1.2\ \mu\text{A} = 16.6\ \mu\text{A}$ 。

表1 温度传感器不同模式电流值

模式	电流/mA	时间/ms
休眠	0.016 6	59 500
工作:传感器采集	9.8	
单片机工作	0.192	500
发射数据	9.9	

由表1可以计算出一个周期内最大的平均电流消耗为0.182 mA。

通过计算出的平均消耗电流和电池容量可估算出电池工作时间 $T_{\text{估算}}$ 为595.24天。

2) 功耗实测

使用带宽100 MHz的RIGOL RP1004C型电流探头,配合实时采样率100 GSa/s、带宽200 MHz的SDS 1202X-E型示波器,以获取温度传感器实际的功耗。检测锂电池正极出线上的实时电流,获得传感器一个完整工作周期内的电流波形变化如图5所示。

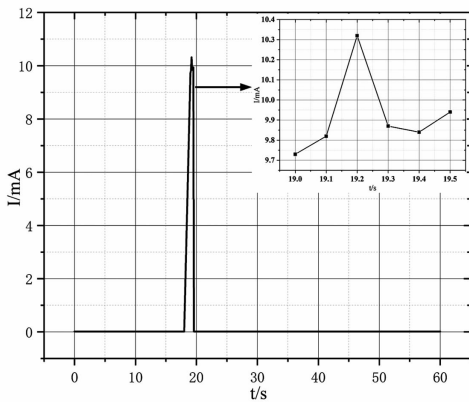


图5 电流实测结果

根据图5可知,与理论计算结果相同,在60 s工作周期的大部分时间内传感器处于工作电流近似为0的低功耗休眠状态。在第19 s出现了较大幅度的电流脉冲,持续时间0.5 s。但其大小与理论估算结果不同,电流幅值最大仅10.32 mA,低于理论值。经分析可知,在工作状态下,传感模块、单片机及数据模块并非同时唤醒、同时运行的。

在软件中计算图5的积分面积,并除以60 s的时间可得到在一个周期内的平均电流消耗为0.101 mA,并计算出电池实际使用寿命为1 072.61天。

其余前端智能传感器的发射功率、续航时间、传输距离与温度传感器相似,同样极佳平衡了三者之

间的关系。由表1可知主要的功率消耗来自传感器对数据的采集过程以及LoRa芯片射频数据发射过程。而在满足高传输增益、传输距离超过100 m前提下,该系统电池续航寿命超过1000天,能够实现长时间不间断监测电缆排管井各项数据,满足实际的运行需要。

4 在线监测终端系统

监控主机基于物联网NB-loT技术将井内传感器采集信号无线传输至后台在线监测终端,电缆及通道多维感知系统智能终端可实时显示电缆及电缆排管工作井相关数据。界面如图6、图7所示。



图6 温度地图



图7 多维感知系统界面

4.1 数据分析功能

在线监测系统具备数据分析功能,能够实时显示各传感器采集到的电缆本体温度、电缆中间接头温度、局部放电信号、环境温度、环境水位、环境烟感、非法入侵等状态检测量。并可导出监测数据,提供离线分析功能。能够通过大数据分析工具,对这些实时数据进行建模分析,并能基于BP神经网络对各数据发展方向做出预测。

在线监测系统通过图形、曲线、报表等数据分析手段,对各状态监测历史数据智能统计、分析和展

示,便于对各监测位置的历史数据进行查询和分析。

当系统感知电缆出现异常状态时,能够通过分析数据,定位故障发生位置。并且根据监测数据变化幅度、频率,智能判断故障的严重程度,指导运行维护人员检修工作。

4.2 报警功能

通过前期工作,根据电缆正常运行工况确定各项监测参数的报警阈值,当监测数据超过预设阈值时,系统异常报警,将故障位置及故障类型展示在可视化系统界面上。当发现监测数据异常时,监测系统由自动监测切换成人工监测,可人工缩短传感器测量、传递数据的周期,短时间内多次监测数据,感知数据变化。

4.3 通信功能

在线监测系统具备时钟同步功能,确保后台监测终端时间和各传感器及监控主机同步。监控主机和在线监测系统之间通过 NB-LoT 物联网通讯协议进行实时数据交换,确保物联网网络稳定、可靠、安全,满足信息安全防护方面的相关要求。

4.4 其他功能

为提高在线监测系统的可靠性,系统设置了自诊断及自恢复功能。自动提示系统中设备出现的异常状况,且具备装置及软件的定时监控、自启动、断电保护、通讯自诊断等功能。

5 结 语

针对现有的排管井监测方案存在的感知量不足、续航短、通信不稳定等不足,研发了一套电缆及电缆管井综合监测系统,能够实现对监测对象的全景态势实时感知,具有耗能低、可靠性强、监测范围广、网络稳定和续航时间长等优势,并具备如下的实际使用效果:

1) 电缆运行状况评估

利用同一根电缆所有测温点的数据进行大数据建模分析,对电缆本体及中间头的运行状况进行评估。通过边缘计算发现系统薄弱点及隐患点,对温度异常点进行预警以及重点监测起到了重要作用。

2) 火灾在线监测

通过接触式温度传感器,多点分布监测电缆温度,实时采集温度数据和建模分析,并对电缆火灾可能发生位置进行预警、报警。

3) 异常诊断决策

通过边缘计算发现电缆及通道薄弱点和故障点;通过人工智能分析将电缆及通道状态自主快速感知信息与平台层数据联动,实现更精准的诊断和分析。

4) 在线环境监测

可以实现对电缆井通道温度、水位、气体等状态的实时状态感知。当通道环境异常时,汇聚节点或接入节点主动调用管理平台运行信息、不良工况和停电试验等多状态量进行边缘计算,及时向运行维护人员推送环境异常、通道火灾等安全风险预警信息。

5) 防盗入侵检测

通过在电缆通道管井处安装防入侵监测终端,实现对电缆盖板是否被非法打开、通道是否有人非法入侵等情况自动监测并告警,能够有效杜绝用户私自占用电缆通道公共资源和不法分子偷盗电缆等现象。

参考文献

- [1] 赵群辉,张发刚,胡斌,等. 电力电缆隧道综合监控系统的设计与实现[J]. 电工技术,2019(16):61-63.
- [2] Wilson F M, Nelson R A. Cable through Mountain Tunnel Links Power Systems [J]. Electrical Engineering, 1952, 71(1):36-36.
- [3] 吴华,张晔,杨国田,等. 巡检机器人用漏泄通信线路在高压电缆隧道中的感性耦合影响[J]. 高电压技术, 2015,41(8):2697-2705.
- [4] 王明磊. 基于物联网技术的电力电缆隧道积水水位在线监测和主动排水系统[J]. 物联网技术,2019,9(8):28-30.
- [5] Weedy B M. Air Temperatures in A Deep Cable Tunnel [J]. Electric Power Systems Research, 1988, 15(3):229-232.
- [6] Ichino T, Suzuki T, Wada T, et al. Measurement of Conductor Temperature of Power Cable by Optical Fiber Sensor[C]. 7th International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 1996:303-306.
- [7] Fang Lin, Wu Mengjun, Wang Guangdi, et al. Comparative Analysis on Stress State of Submerged Floating Tunnels in Different Anchor Cable Arrangement Modes [J]. Procedia Engineering, 2016,166:279-287.

(下转第91页)

重而道远。所介绍的综合能源管理平台方案,通过融合工业互联网技术,基于5G技术高可靠、大带宽的网络传输通道,为用户提供“1+5”场景基础应用(包括全景能源监测、企业能效管家、智慧运维服务、智能楼宇控制、在线能源商城)以及额外场景服务定制。一方面使用户智享能源保障服务;另一方面也架起了能源服务行业多方合作共赢的桥梁。接下来,将以该平台为重心,推进区域用户的全量接入,广泛开放业务合作,并不断推进新技术的融合运用,赋予业务、数据产品快速开发及迭代能力,形成一个可推广、具有行业价值的综合能源服务平台;另外,对公司服务模式、商业模式的数字化转型也进行了路径探索。

参考文献

[1] 王琳黎. 四川天府新区打造人城境业深度融合的公园城市[N]. 成都日报, 2020-04-28.

[2] 皮亦鸣. 共建工业互联网平台, 共享数据要素, 推进成渝地区双城经济圈合作[N]. 人民邮电报, 2020-07-16.

[3] 刘洋, 安岗. 工业互联网融合5G网络切片技术演进发展浅析[J]. 信息通信技术, 2019, (S1): 27-31.

[4] 陈晓红. 数字经济时代的技术融合与应用创新趋势分

析[J]. 社会科学家, 2018(8): 1-8.

[5] 国家发改委、能源局、工信部联合印发《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》: 发改能源[2016]392号[S]. 2016.

[6] 林杰, 刘畅, 张劲. 能源互联网的“先行者”, 四川天府新区的“试验田”——四看泛在电力物联网在成都天府新区试验[N]. 经济日报, 2019-07-19.

[7] 赵雯, 杨林华, 范娟娟, 等. 电网公司综合能源服务业务混合所有制改革模式探析[J]. 电力与能源, 2019, 40(1): 70-80.

作者简介:

潘雪佼(1995), 女, 学士, 助理工程师, 研究方向为电力市场与电力系统分析;

何冰(1974), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护与能源互联网;

谢天祥(1982), 男, 硕士, 高级经济师, 研究方向为柔性输电技术及应用;

乔云池(1993), 男, 学士, 助理工程师, 研究方向为电力设计与电力系统及其自动化;

胡圆圆(1986), 女, 博士, 高级经济师, 研究方向为工商管理;

向柯霓(1994), 女, 学士, 助理工程师, 研究方向为电力市场。

(收稿日期: 2020-10-09)

(上接第80页)

[8] 冯显英, 葛荣雨. 基于数字温湿度传感器 SHT11 的温湿度测控系统[J]. 自动化仪表, 2006(1): 59-61.

[9] 崔江静, 黄顺涛, 仇炜, 等. 改进的 Faster R-CNN 方法及其在电缆隧道积水定位识别中的应用[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 219-223.

[10] 费斐. 电力隧道监控系统设计[J]. 科技信息(科学教研), 2007(23): 386.

[11] Min L, Zhou Z, Li H, et al. Research and Development of the Smart Telemonitor System for Power Cable Tunnel [C]// Transmission & Distribution Conference & Exposition, 2010.

[12] 韩丹翱, 王菲. DHT11 数字式温湿度传感器的应用性研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(13): 83-85.

[13] Liu G, Lei C, Liu Y. Analysis on Transient Error of Simplified Thermal Circuit Model for Calculating Conductor Temperature by Cable Surface Temperature[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 212-217.

[14] 李俊廷. 电缆隧道综合监控技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.

[15] 艾福超. 高压电缆及电缆隧道综合监控系统研究与

应用[D]. 济南: 山东大学, 2015.

[16] 刘凯. 大连地区电缆隧道在线监测系统的设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

[17] 蒋松云. 电缆隧道运行状态在线监测系统的设计与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

[18] 杨联宇. 变电站电缆层及电缆隧道综合监控系统设计及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[19] 蒋亚坤, 王彬筌, 黎强, 等. 基于物联网技术的变电站监控架构方案[J]. 云南电力技术, 2019, 47(4): 57-59.

[20] Uysal - Biyikoglu E, Gamal A E. On Adaptive Transmission for Energy Efficiency in Wireless Data Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3081-3094.

[21] Kansal A, Hsu J, Zahedi S, et al. Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks[J]. Acm Transactions on Embedded Computing Systems, 2007, 6(4): 32.

作者简介:

刘云龙(1989), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压电缆、高电压与绝缘技术研究。

(收稿日期: 2020-07-10)