

《四川电力技术》
编辑委员会

主任委员 刘 勇
副主任委员 王 平
刘俊勇
委 员 (按姓氏笔画笔形为序)
丁理杰 邓亚军 甘德刚
田立峰 李镇义 朱国俊
朱 康 刘天琪 苏少春
杨子辛 肖 红 吴广宁
余 熙 邹见效 陈 纓
胡 灿 袁邦亮 徐 波
董秀成 韩晓言 曾嘉志
秘 书 李世平
程文婷

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN 1003-6954

CN 51-1315/TM

2020 年第 43 卷第 6 期(总 270 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:陈 纓

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得文化传播有限公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数]CN 51-1315/TM*1978*

b*A4*94*zh*P*¥6.00*3000*17*

2020-12

目 次

篇头语	(1)
· 人工智能 ·	
基于自适应遗传算法的分布式电源优化配置	
..... 郝文斌,谢明洋,谢 波,曾 鹏,史晨豪,徐灵渊,张明玉	(2)
基于多视角跨模态的电力现场作业行人重识别网络架构技术研究	
..... 张 森,张 颀,王 尧,刘锦隆,闫 斌,尚赵伟	(6)
基于竞争神经网络的变电站集中监控全面监视周期分类方法	
..... 张宇泽,张心洁,刘宪棚,王 建	(11)
基于机器视觉技术的电缆结构参数检测系统研究	
..... 胡立锦,杨永全	(16)
基于深度学习模型小型化技术的输电线路智能巡检研究与应用	
..... 冯 原,王晓迪,辛 颖,韩树民	(21)
基于知识图谱的电力行业与外部数据融合研究	
..... 刘锦隆,马 进,邹 双,宋立华,王秋琳	(26)
基于区块链的电力数据共享研究初探	
..... 余佐超,李 喆,刘浩宇	(31)
· 大数据应用与分析 ·	
基于产业转移粘性电力系数对成渝双城经济圈发展的启示	
..... 魏 阳,刘淑宾,郭 飞,梁 健,关 蓉	(39)
地址模糊匹配在电力企业应用中的研究与实践	
..... 刘浩宇,李 喆,余佐超,应卓君,王 薇,赵志浩	(43)
基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法	
..... 况 华,沐欣欣,覃日升	(49)
· 工业互联网 ·	
基于家庭异构网的智能用电终端系统设计	
..... 张云翔,李厚恩,钟晓雄,张 盛	(55)
基于 5G 配电网差动保护安全防护策略研究	
..... 张 泰,杨 雪,汪晓帆	(60)
基于 5G 通信技术的配电网线路纵差保护研究及应用	
..... 郭 立,何 峰,梁 艳,韦 翔,张 丹	(66)
北斗系统在输电线路防灾监测中的应用探索	
..... 李 喆,刘浩宇,余佐超	(71)
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,周大明,周 勇,黄会贤,曾祥瑞,谢 弦,邵 愚,刘英健	(75)
基于 HPLC 宽带电力线载波技术的配电电压质量在线监测方法研究	
..... 余 敏	(81)
数字新基建在公园城市能源互联网建设的落地与实践	
..... 潘雪佼,何 冰,谢天祥,乔云池,胡园园,向柯霓	(86)
2020 年全年总目录	(92)

CONTENTS

Preface	(1)
· Artificial Intelligence ·	
Optimal Configuration of Distributed Generators Based on Adaptive Genetic Algorithm	Hao Wenbin, Xie Mingyang, Xie Bo, Zeng Peng, Shi Chenhao, Xu Jiongyuan, Zhang Mingyu(2)
Research on Network Structure of Pedestrian Recognition for Power Operation Field Based on Multi-view Cross-modal Image Processing	Zhang Sen, Zhang Jie, Wang Yao, Liu Jinglong, Yan Bin, Shang Zhaowei(6)
Comprehensive Monitoring Cycle Classification Method of Centralized Monitoring in Substation Based on Competitive Neural Network	Zhang Yuze, Zhang Xinjie, Liu Xianxu, Wang Jian(11)
Research on Cable Structure Parameter Detection System Based on Machine Vision Technology	Hu Lijin, Yang Yongquan(16)
Research and Application of Intelligent Inspection for Transmission Lines Based on Deep Learning Model Miniaturization	Feng Yuan, Wang Xiaodi, Xin Yin, Han Shumin(21)
Research on Fusion of Electric Power Industry Data and External Data Based on Knowledge Graph	Liu Jinlong, Ma Jin, Zou Shuang, Song Lihua, Wang Qiulin(26)
Research on Power Data Sharing Based on Blockchain	She Zuochao, Li Zhe, Liu Haoyu(31)
· Big Data Application and Analytics ·	
Inspiration of Coordinated Development of Chengdu - Chongqing Economic Circle Based on Viscous Power Coefficient of Industrial Transfer	Wei Yang, Liu Shubin, Guo Fei, Liang Jian, Guan Rong(39)
Research and Practice of Address Fuzzy Matching in Application of Power Enterprise	Liu Haoyu, Li Zhe, She Zuochao, Ying Zhuojun, Wang Wei, Zhao Zhihao(43)
Loss Optimization Method Based on Demand-side Response Model with Multiple Time Scales	Kuang Hua, Mu Xinxin, Qin Risheng(49)
· Industrial Internet ·	
Design of Intelligent Power Terminal System Based on Family Heterogeneous Network	Zhang Yunxiang, Li Houen, Zhong Xiaoxiong, Zhang Sheng(55)
Research of Security Protection Strategy for Differential Protection of Distribution Network Based on 5G	Zhang Tai, Yang Xue, Wang Xiaofan(60)
Research and Application of Longitudinal Differential Protection of Distribution Network Based on 5G Communication Technology	Guo Li, He Feng, Liang Yan, Wwei Xiang, Zhang Dan(66)
Exploration of Application of Beidou Navigation System to Disaster Prevention Monitoring for Transmission Line	Li Zhe, Liu Haoyu, She Zuochao(71)
Construction and Application of Intelligent Monitoring System for 110 kV Cable Bank Well Based on Internet of Things	Liu Yunlong, Zhou Daming, Zhou Yong, Huang Huixian, Zeng Xiangduan, Xie Xian, Shao Yu, Liu Yinjian(75)
Research of Online Monitoring Scheme for Distribution Voltage Quality Based on HPLC Broadband Power Line Carrier Technology	Yu Min(81)
Implementation and Practice of New Digital Infrastructure in Energy Internet Construction for Park City	Pan Xuejiao, He Bing, Xie Tianxiang, Qiao Yunchi, Hu Yuanyuan, Xiang Keni(86)
Contents of 2020	(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2020 Vol. 43 No. 6
(Ser. No. 270)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, Chengdu, Sichuan,
China

Postcode: 610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Chen Ying

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

篇 头 语

今年以来,党中央和国务院提出加快推进“数字新基建”建设工作,为响应国家号召,国家电网有限公司于 2020 年 6 月 15 日在北京举行“数字新基建”重点任务发布会,发布了电网数字化平台、能源大数据中心、电力大数据应用、电力物联网等“数字新基建”十大重点建设任务,以信息基础设施、融合基础设施和创新基础设施为重点带动产业发展,推动电网转型升级。

以 5G、人工智能、工业互联网等为代表的新技术正深刻改变传统电力生产运营模式,加速推动传统电网向能源互联网发展,为电力行业构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供有力的技术支撑。“数字新基建”与电网深度融合也带来了新的挑战,如电网企业建设管理缺乏互联网思维制约了数字化转型发展,跨界复合型人才缺乏也制约了电网“数字新基建”发展。

为进一步推动数字新基建在电网的发展,分析电力“数字新基建”建设面临的问题与挑战,总结“数字新基建”建设成效,促进同行交流,形成典型经验,《四川电力技术》组织了本期“数字新基建”专刊。

本专刊共收录文章 17 篇,主要研究领域包括人工智能、大数据分析、5G、电力北斗、工业互联网等。

1) 人工智能

郝文斌、谢明洋等从经济性出发,提出了以投资成本、运维成本、网络损耗成本和购电成本之和最小为目标的分布式电源选址定容优化算法。张森、张颀等设计了一种基于多视角跨模态的电力现场作业行人重识别网络架构,缓解模态间数据差异,提高行人重识别模型的精度。张宇泽、张心洁等提出了基于竞争神经网络的变电站全面监视周期分类算法,提高集中监控工作的质量和效率。胡立锦、杨永全等提出通过机器视觉技术实时采集电缆截面图像,优化电缆检测程序。冯原、王晓迪等提出了基于深度学习模型小型化技术的电力输电线路智能巡检方案,解决目前智能巡检图像采集真空期长和效率低的问题。刘锦隆、马进等提出了一种基于知识图谱的内外数据融合应用思路,支撑电力行业与外部多源异构数据融合建模。余佐超、李喆等利用区块链 P2P 网络、密码学以及智能化合约技术,构建包括网络、区块链目录、认证及信任服务以及数据资源智能交换的电力数据共享模型。

2) 大数据应用与分析

魏阳、刘淑宾等构建产业转移电力粘性系数模型,具体分析成渝双城经济圈规划四川 16 个地区 34 个细分制造业行业的产业转移四梯度区域特征、行业异质特征等特征。刘浩宇、李喆等基于数据样本对地址识别方法的准确性及运行速度进行研究分析。况华、沐欣欣等提出了基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法,选择了粒子群算法作为优化算法。

3) 工业互联网

张云翔、李厚恩等设计了一种兼容 WirelessHART 协议、PLC 通信以及以太网通信架构,并用于家庭异构网的智能用电终端系统。潘雪佼、何冰等提出基于工业互联网和 5G 技术的综合能源服务平台方案,并在天府新区兴隆湖示范区落地实施。

希望本专刊能对读者有所助益。

基于自适应遗传算法的分布式电源优化配置

郝文斌¹, 谢明洋², 谢波¹, 曾鹏¹, 史晨豪², 徐灵渊², 张明玉²

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 上海电力大学, 上海 200090)

摘要:针对能源互联网背景下大量分布式电源接入配电网的优化配置问题,从经济性出发,建立了以投资成本、运行维护成本、网络损耗成本和购电成本之和最小为目标的分布式电源的选址定容优化模型。利用前推回推法计算配电网潮流,采用了自适应遗传算法对所提模型进行求解。结合 IEEE 33 节点构造算例进行分析,结果表明该模型在保证经济性的同时,能有效减少网络损耗并提高电压质量。

关键词:分布式电源; 选址定容; 优化配置; 自适应遗传算法

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2020)06-0002-04

Optimal Configuration of Distributed Generators Based on Adaptive Genetic Algorithm

Hao Wenbin¹, Xie Mingyang², Xie Bo¹, Zeng Peng¹, Shi Chenhao², Xu Jiongyuan², Zhang Mingyu²

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the optimal configuration problem of a large number of distributed generators connected to distribution network under the background of Energy Internet, starting from economy, an optimization model for the location and capacity of distributed power generation is established with the goal of minimizing the sum of investment cost, operation and maintenance cost, network loss cost and power purchase cost. The power flow of distribution network is calculated by using forward and backward method, and an adaptive genetic algorithm is adapted to solve the proposed model. Combining with the analysis of IEEE 33 node structure example, the results show that the proposed model can effectively reduce the network loss and improve the voltage quality while ensuring the economy.

Key words: distributed generators; siting and sizing; optimal configuration; adaptive genetic algorithm

0 引言

全球经济的迅速发展和人们用电需求的提升导致以化石能源为主的自然资源逐渐枯竭^[1]。基于风、光等可再生能源的分布式电源具有环境友好、调度灵活等特点,能有效促进社会的可持续发展^[2]。随着能源互联网建设工作的持续推进,大量分布式电源随机接入城市配电网,导致配电网潮流改变,带来严重的安全问题^[3-5]。如何在配电网中确定分布式电源的接入点和安装容量以提升系统的安全性和经济性是当前的研究重点。

目前,已有较多学者对分布式电源如何接入配

电网进行了研究。文献[6]提出了采用带惯性权重的粒子群算法进行分布式电源选址和定容的计算方法,通过算例验证了所提算法有较强全局搜索能力和收敛速度。文献[7]建立了光伏电源选址和定容的配电网损耗最小、节点电压偏移最小和接入费用最小的多目标优化模型,并提出一种基于遗传算法改进的并列选择法,通过算例验证了该方法的可行性。文献[8]以降低配电网运行线损为优化目标,采用了粒子群优化与非支配遗传排序协同进化算法,结合算例得出了分布式电源最优接入容量。上述文献的侧重点局限于以电压和网损作为优化目标,或通过改进求解算法提高收敛速度,并未充分考虑站在电网规划角度,以投资运行成本等经济性指

标为优化目标对分布式电源进行优化配置。

在未知分布式电源的接入点、容量和接入个数的前提下,建立了以投资成本、运行维护成本、网络损耗成本和购电成本之和最小为目标的分布式电源的选址定容优化模型,结合前推回推潮流计算法,利用自适应遗传算法求解该模型。潮流计算过程中,将分布式电源视为 PV 节点,以其接入配电网的位置和对应的容量为主要变量,从而对其进行优化配置。通过 IEEE 33 配电网节点进行算例仿真,得到了同时满足安全性和经济性的分布式电源优化配置方案,同时有效减少了网络损耗,提高了电压水平。

1 分布式电源选址定容优化模型

1.1 目标函数

站在电网运行角度,综合考虑分布式电源接入的投资成本、运行维护成本、网络损耗成本和购电成本,建立了目标函数:

$$\min Z = \min(Z_{\text{INV}} + Z_{\text{OP}} + Z_{\text{PL}} + Z_{\text{B}}) \quad (1)$$

式中: Z 为总运行成本; Z_{INV} 为投资成本; Z_{OP} 为运行维护成本; Z_{PL} 为网损成本; Z_{B} 为购电成本。

1) 投资成本

$$Z_{\text{INV}} = \sum_{k=1}^N \left(x_k c_{\text{inv}} P_{\text{DG},k} \frac{r(r+1)^n}{(r+1)^n - 1} \right) \quad (2)$$

式中: N 为配电网的节点数量; x_k 表示是否在节点安装分布式电源; c_{inv} 为单位容量的投资成本; $P_{\text{DG},k}$ 为装在第 k 个节点上分布式电源的容量; r 为年投资回报率; n 为规划年限。

2) 运行维护成本

$$Z_{\text{OP}} = \sum_{k=1}^N x_k c_{\text{op}} P_{\text{DG},k} \quad (3)$$

式中, c_{op} 为单位容量的分布式电源运行维护成本。

3) 网络损耗成本

$$Z_{\text{PL}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{L}}} c_e \tau_{\text{max}} \frac{P_i^2}{(\lambda U_{\text{N}})^2} R_i \quad (4)$$

式中: N_{L} 为配电网支路总数; c_e 为单位电价; τ_{max} 为年最大电网损耗小时数; P_i 为配电网第 i 条支路上的有功功率; λ 为系统功率因数; U_{N} 为系统额定电压; R_i 为第 i 条支路上的电阻阻值。

4) 购电成本

分布式电源接入配电系统后可直接为负荷供电,从而减少电网向发电企业的购电费用。

$$Z_{\text{B}} = c_e T_{\text{max}} \left(\sum_{j=1}^N P_{\text{load},j} - \sum_{k=1}^{N_{\text{DG}}} x_k P_{\text{DG},k} \right) \quad (5)$$

式中: T_{max} 为年最大电网利用小时; $P_{\text{load},j}$ 为第 j 个节点的负荷。

1.2 约束条件

1) 潮流平衡约束

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = P_i \\ \sum_{j=1}^N f_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = Q_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: e 为节点电压实部分量; f 为节点电压虚部分量; G_{ij} 为节点导纳矩阵中的电导; B_{ij} 为节点导纳矩阵中的电纳; P_i 和 Q_i 分别为注入节点 i 的有功功率和无功功率。

2) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (7)$$

式中: U_i 为第 i 个节点的电压; $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 处电压的上、下限。

3) 分布式电源接入总容量约束

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{DG}}} P_{\text{DG},k} < \mu \sum_{j=1}^N P_{\text{load},j} \quad (8)$$

式中, μ 为分布式电源总容量限制系数,这里取 0.22。

4) 分布式电源接入节点容量约束

为避免分布式电源的接入改变潮流,对其接入点容量进行约束。

$$0 \leq P_{\text{DG},k} \leq P_{\text{DG},k}^{\max} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{DG},k}^{\max}$ 为第 k 个节点允许安装分布式电源的最大容量。

2 求解方法

遗传算法(genetic algorithm, GA)是根据生物界的自然选择机制演变而来的一种随机搜索算法。类似于遗传过程中染色体的分裂重组,GA 主要算子包括选择、交叉和变异,通过一系列运算后将最大适应度的个体作为最优解。传统遗传算法中的交叉、变异概率为定值,不具备物种进化过程中的自适应特性,容易陷入局部最优,制约算法全局搜索能力。为此,自适应遗传算法应运而生,其自适应交叉概率和变异概率根据式(10)一式(11)动态生成,提高了遗传多样性,避免过早陷入局部最优。

$$P_c = \begin{cases} P_c^{\max} - \text{gen} \times (\frac{P_c^{\max} - P_c^{\min}}{M}), & f' > f_{\text{avg}} \\ P_c^{\max}, & f' \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_c 为自适应交叉概率; gen 为当前迭代次数; $P_c^{\max}$ 为最大交叉概率; $P_c^{\min}$ 为最小交叉概率; M 为最大迭代次数; f' 为即将交叉运算中较大的适应度; f_{avg} 为当前迭代次数中所有个体的适应度平均值。

$$P_m = \begin{cases} P_m^{\min} + \text{gen} \times (\frac{P_m^{\max} - P_m^{\min}}{M}), & f > f_{\text{avg}} \\ P_m^{\min}, & f \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_m 为自适应变异概率; $P_m^{\max}$ 为最大变异概率; $P_m^{\min}$ 为最小变异概率; f 为当前代数变异过程中个体的适应度; f_{avg} 为当前迭代次数中所有个体的适应度平均值。

基于自适应遗传算法^[9-10]的分布式电源优化配置模型的求解步骤如下:

1) 参数设置。求解前先设置算法的环境变量参数,如最大迭代次数、种群规模、最大最小交叉概率 $P_c^{\max}$ 和 $P_c^{\min}$ 、最大最小变异概率 $P_m^{\max}$ 和 $P_m^{\min}$ 等。决策变量为 $X = \{x_1, x_2, x_3, \cdots, x_N\}$,其中: N 为配电网节点总数, x_i 表示节点 i 处分布式电源的安装情况(功率大小和位置), $x_i = a(0 \leq a \leq A \text{ 且 } a \text{ 为整数})$;具体容量为 $P_{\text{DG},k} = aP_N$, P_N 为单位基准容量(取10 kW),且 $A = P_{\text{DG},i}^{\max}/P_N$, $P_{\text{DG},i}^{\max}$ 为节点 i 处允许安装分布式电源的最大值。

2) 初始化种群。在 Matlab 中通过前推回推潮流计算方法,在满足约束的情况下,计算目标函数值和各个个体适应度。

3) 按照适应度排序保留前 N_{gen} 个个体,当随机变量小于自适应交叉概率时,进行双亲双子单点交叉,并将父代、子代合并形成新种群。对于该新种群,当随机变量小于自适应变异概率时,执行变异。消除无效个体,按照适应度保留 N_{gen} 个个体。

4) 重复上述步骤,直到达到最大迭代次数。具体流程如图1所示。

3 算例分析

选取了 IEEE 33 节点配电网构造算例,该配电

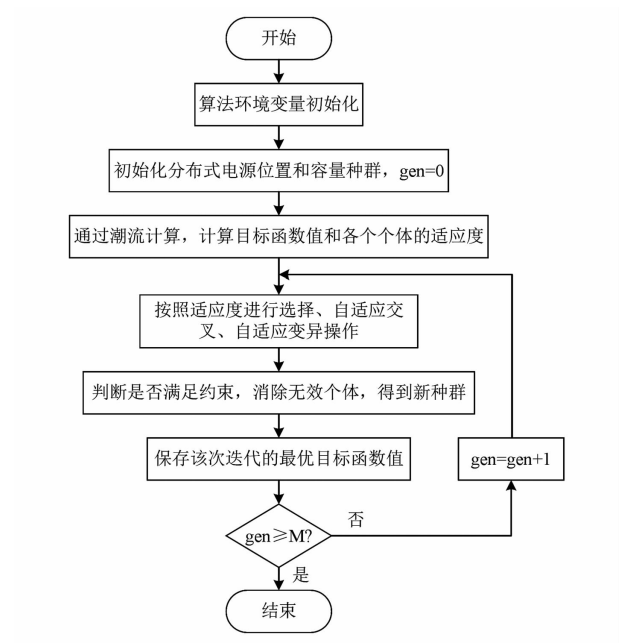


图1 算法流程

网结构如图2所示。该配电网额定电压为12.66 kV,总有功负荷为3715 kW,总无功负荷为2300 kvar。单位容量投资成本 c_{inv} 为1500元/kW,年投资回报率 r 为0.1,规划年限 n 为20年,单位运行维护成本 c_{op} 为500元/kW,单位电价 c_e 为0.5元/kWh,年最大电网损耗小时 τ_{max} 为3200 h,系统功率因数 λ 为0.9,年最大电网利用小时 T_{max} 为5600 h。

自适应遗传算法参数设置:种群数 $N_{\text{gen}} = 100$;最大迭代次数 $M = 150$;最大交叉概率 $P_c^{\max}$ 为0.9;最小交叉概率 $P_c^{\min}$ 为0.4;最大变异概率 $P_m^{\max}$ 为0.1;最小变异概率 $P_m^{\min}$ 为0.01。

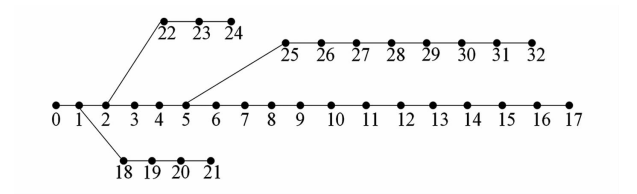


图2 IEEE 33 节点配电系统

表1为分布式电源的配置方案,分布式电源接入总容量为880 kW,小于总有功负荷的22%,满足要求。结合图2可知,分布式电源都安装于网络末端,这是由于网络末端传输功率较长,就地提供功率能有效减少线路损耗。

表2为接入分布式电源前后的成本,接入分布式电源前,系统不需考虑投资和运行维护成本,但是网络损耗成本和购电成本较高。分布式电源接入后,通过在辐射网络末端供电,使得网络损耗成本降

低了17.78 万元,减少购电费用206.64 万元,虽然增加了投资和运行维护成本,但是总成本减少了168.97 万元。由此可见所提方法对分布式电源的优化配置,给配电网运行带来了可观的经济效益。

表1 分布式电源配置方案

接入节点	接入容量/kW
14	160
16	330
30	330

表2 分布式电源接入前后成本 单位:万元

项目	无 DG	接入 DG
投资成本	0	41
运行维护成本	0	14.45
网损成本	33.9	16.12
购电成本	1 040.2	833.56
总成本	1 074.1	905.13

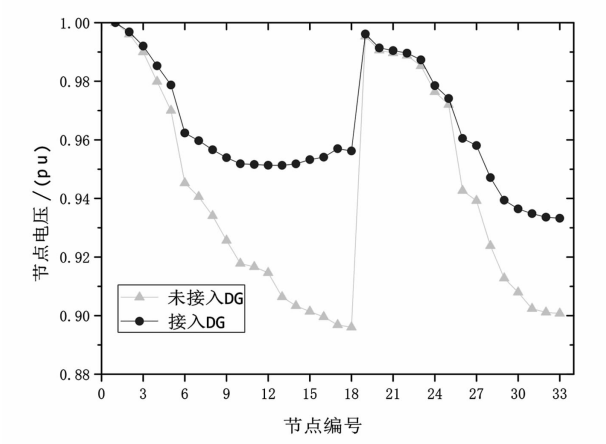


图3 分布式电源接入前后节点电压对比

图3 为分布式电源接入前后节点电压对比,经所提配置方法将分布式电源合理接入配电网,有效提高了各节点尤其是最小电压节点的电压水平,增加了在负荷增加时系统的承受能力,极大提高了配电网运行的安全稳定性。

图4 为分布式电源接入前后线路有功损耗对比,由图可知,系统接入分布式电源后,线路有功损耗由原来的211.92 kW 降低到了100.75 kW,减少了52.46%,有效促进了电网的节能降耗。

图5 为自适应遗传算法和传统遗传算法收敛曲线对比图,由图可知,采用自适应遗传算法,极大地提高了系统的收敛速度,有效避免了陷入局部最优。

4 结 语

站在电网规划角度,充分考虑经济效益,提出了

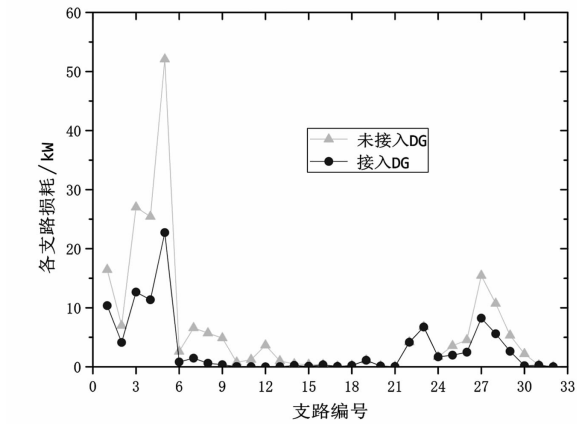


图4 分布式电源接入前后线路有功损耗对比

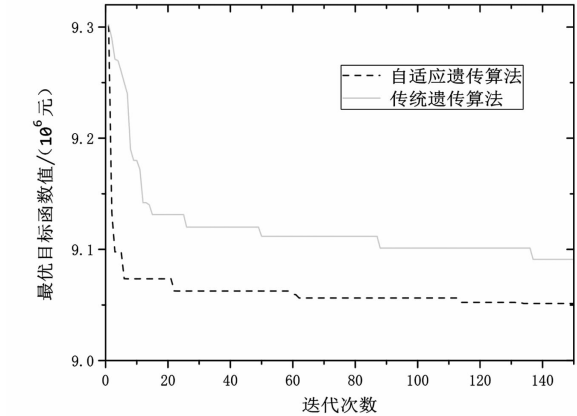


图5 算法收敛性对比

一种基于自适应遗传算法的分布式电源接入配电网的优化配置方法,经 Matlab 程序仿真验证,得出结论如下:

- 1)所建分布式电源优化配置模型能够有效减少配电网运行成本,降低网络有功损耗,提高电压质量,可为分布式电源接入配电网的规划设计提供参考。
- 2)将自适应遗传算法应用于分布式电源的选址定容中,提高了全局搜索能力,避免过早陷入局部最优。

参考文献

[1] 成升魁,沈镭,封志明,等. 中国自然资源研究的发展历程及展望[J]. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1757 – 1772.

[2] 张艺镨,艾小猛,方家琨,等. 基于极限场景的两阶段含分布式电源的配网无功优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2):301 – 309.

[3] 卢艺,戴月,马伟哲,等. 含分布式电源和储能装置的配电网分散式动态最优潮流[J]. 电网技术, 2019, 43(2):434 – 442.

(下转第20页)

基于多视角跨模态的电力现场作业 行人重识别网络架构技术研究

张 森¹,张 颀²,王 尧³,刘锦隆²,闫 斌⁴,尚赵伟¹

(1. 重庆大学计算机学院, 重庆 400000; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司凉山供电公司, 四川 西昌 615000; 4. 电子科技大学自动化学院, 四川 成都 611731)

摘 要:可见光到红外光跨模态行人重识别目的是实现在白天和夜间环境下对行人身份的识别判断,在视频监控领域具有重要研究价值。因可见光和红外光成像原理的不同,给跨模态重识别问题带来了挑战。设计了一种新的网络结构,用于缓解模态间数据差异,提高行人重识别模型的精度。网络结构分为两部分:基于注意力的模态迁移模块嵌入特征网络的输入级,可缩小跨模态差异;基于分块的多粒度特征分解模块,同时考虑整体信息和局部信息并了提高有效信息的利用率。在公开数据集 SYSU-MM01 上,所提方法的累计匹配特性指标的 rank1 达到了 56.45%,平均精确度指标达到了 53.52%,比当前最佳方法(XIV, AAAI-2020)分别提高了 6.53% 和 2.79%,有效提高了可见光到红外光跨模态行人重识别的性能。

关键词:行人重识别; 跨模态; 注意力; 多粒度特征

中图分类号:TP394.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0006-05

Research on Network Structure of Pedestrian Recognition for Power Operation Field Based on Multi-view Cross-modal Image Processing

Zhang Sen¹, Zhang Jie², Wang Yao³, Liu Jinglong², Yan Bin⁴, Shang Zhaowei¹

(1. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400000, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Liangshan Electric Power Supply Company, Xichang 615000, Sichuan, China; 4. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract:The purpose of cross-modal pedestrian recognition from visible to infrared light is to realize the identification and judgment of pedestrian identity in day and night environments, which is of great research value in the field of video surveillance. Due to the different imaging principles of visible light and infrared light, cross-modal recognition is a challenge. A new network structure is designed to alleviate the data difference between modal and improve the accuracy of pedestrian recognition model. The proposed network structure is divided into two parts: attention-based modal transfer module embedded in the input stage of the feature network, which can reduce the difference across modal, and block-based multi-granularity feature decomposition module, which can consider both global information and local information and improve the utilization rate of effective information. The experimental results on the open data set SYSU-MM01 show that, the rank 1 of the cumulative matching characteristic (CMC) index and the mean average precision (mAP) index of the proposed method reaches 56.45% and 53.52%, respectively, which are 6.53% and 2.79% higher than the current best method (XIV, AAAI-2020), and effectively improves the performance of cross-modal pedestrian recognition from visible to infrared light.

Key words:pedestrian recognition; cross modal; attention; multi-granularity feature

0 引 言

电力是经济发展的能源基础,电力信息化对于

中国的能源安全而言无疑是一个有效的保障。近几年,视频作为安全管理和风险控制的重要手段,在电力各个业务板块得到广泛应用。行人重识别(person re-identification, ReID)是计算机视觉领域

的一个重要研究方向,要求根据某个摄像头捕捉到的行人图像在其他摄像头捕捉的图像中进行检索,以找出相同身份的行人^[1],能够根据行人的穿着、体态、发型等信息认知行人,实现对无法获取清晰拍摄人脸的行人进行跨摄像头连续跟踪,增强数据的时空连续性。随着新基建的建设快速推进,在电力行业的智慧工地、变电站监控、作业施工管控等场景中,作为人脸识别技术在身份确认方面的重要补充技术手段,行人重识别有着重要的应用价值。

在视频监控网络中,行人因受到视角、姿态变化、背景、光照、摄像头设置等多种因素影响,会导致同一个人在同一摄像机的不同时刻,或不同摄像机在同时刻捕捉的图像存在很大差异,造成行人识别精度低,特别是在白天和夜晚环境下,摄像机在可见光和红外光不同模式下成像的差异更大,给跨模态(cross modal)行人重识别问题(即在可见光图像库中如何准确检索出与给定红外图像相同身份的行人)带来相当大的困难。现有研究主要集中于使用共享参数的多层卷积网络直接提取两种模态数据中的共享信息。但数据本身跨模态差异大,这些方法均仍未达到实用效果。为此提出一种新的网络结构,实验表明,可有效提取出两种模态中的共享信息,提高行人重识别精度。

1 跨模态行人重识别相关的研究

针对可见光与红外光的跨模态图像行人重识别问题,文献[2]在国际计算机视觉大会上首次发布大规模可见光-红外跨模态行人重识别数据集 SYSU-MM01,并提出深度零值填充(deep zero padding)的网络模型,开启了可见光-红外行人重识别问题的先河。文献[3]在国际人工智能联合会议上引入生成对抗网络的思想训练一个跨模态生成对抗网络模型(cmGAN),使用可见光和红外光两种模态图像进行互相生成以降低模态间差异。文献[4]在国际人工智能联合会议上提出一个双流网络结构分别提取两个模态的特定特征,随后通过权重共享提取两个模态的共享特征,并于 2020 年^[5]使用新的基准模型对其进行改进实现了较大的精度提升。文献[6]针对跨模态问题设计了五元组损失函数,在提高同一模态类间差异的同时降低跨模态类内差异。文献[7]在国际计算机视觉与模式识别会议上使用生成

对抗的思想将两种模态图像进行互相生成,但训练不稳定且效果一般。文献[8]在美国人工智能协会 2020 大会上通过引入一个辅助的 x 模态将双模态重识别转化为可见光、红外光、x 模态的三模态重识别问题,实现了较好的效果。以上研究尽管取得了一定的成就,但存在以下问题:

1)直接使用共享参数提取与模态无关的身份信息,忽视了不同模态数据本身的差异。可见光图像为红绿蓝三通道数据,包含了丰富的色彩信息,而红外图像为单通道,其灰度值反映了目标的红外辐射量,成像机理完全不同导致跨模态行人重识别领域相关研究效果较差。

2)仅考虑了图片整体特征或仅考虑局部特征,对图像信息的利用不充分。

为解决以上两个不足,下面提出的网络结构可有效提取出两种模态中的共享信息,提高跨模态行人重识别模型精度:

1)基于注意力机制设计了轻量化的模态迁移模块,可有效地在特征嵌入网络的输入级缩小跨模态差异,并且额外参数量可忽略不计。

2)设计了基于分块的多粒度特征分解模块。同时考虑输入图像的整体信息和丰富的局部信息,提高了有效信息的利用率。

3)整个模型可以端到端进行训练,并且两种模块可以独立使用,也可以与其他相关研究进行组合。

2 网络模块设计

2.1 整体网络架构

目前基于深度学习的跨模态行人重识别,多采用使用共享参数的多层卷积神经网络进行特征提取^[4-8],将可见光图像特征和红外光图像特征嵌入同一个特征空间用于后续分类(或相似度度量)。这里也采用此类网络架构,其总体框架如图 1 所示。对于可见光图像,首先输入到模态迁移模块,利用通道间的注意力机制将 RGB 3 个通道进行非线性加权,减弱可见光图像特有的颜色信息,模拟红外光的红外辐射信息,实现输入级模态间差异的削减;接着模态迁移模块的输出和原始红外图像一起,通过共享参数的卷积神经网络来提取特征。文献[9]中已有实验论证,将 ResNet50 的最后一层下采样层

(down sampling layer)的池化步长(stride)从2修改为1,可有效避免尺寸减小带来的信息损失,提高特征提取性能,因此在行人重识别的多项工作^[6-8]中都将其作为特征提取的基准分类模型。为了证明所提方法的有效性,同样选择该微改的 ResNet50(下面简称为 ResNet50)作为基础模型进行对比。另外,在去掉最后 ImageNet 的全连接层基础上,使用 ImageNet 大规模数据集上预训练的权重参数,进行迁移学习后所提取的特征经过多粒度特征分解模块,通过水平分块将特征分为两级细粒度特征。再将全局特征和细粒度特征分别进行三元组损失函数计算,经过全连接层进行交叉熵损失函数计算,完成整个网络的端到端的训练。

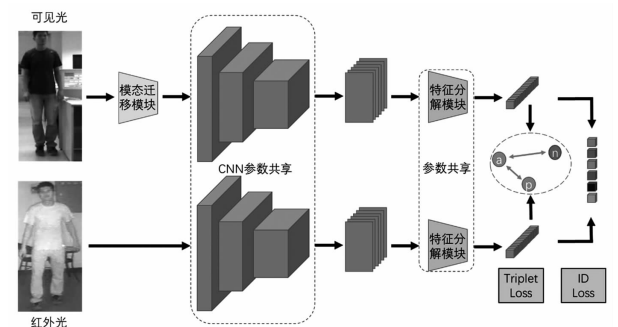


图1 网络整体结构

2.2 模态迁移模块

由于不同模态图像灰度值反映的信息语义不同,且两种模态信息并没有已知的对应关系,因此,为了模拟行人图像的跨模态迁移减小图片级模态差异,使用注意力机制中的通道注意力,期望通过反向传播让模型拟合可见光模态到红外模态的通道级转换。具体结构如图2所示。

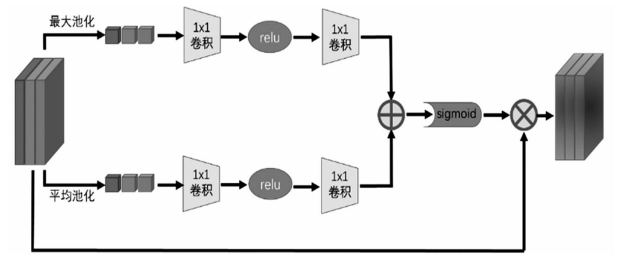


图2 模态迁移模块结构

可见光图像首先经过最大池化和平均池化得到两个长度为3的一维向量特征表示,再经过 1×1 卷积和非线性的relu激活层再次叠加 1×1 卷积层用于拟合模态迁移变换。将两条路径得到的输入进行像素级叠加;再经过sigmoid激活函数提高非线性,得到不同通道的注意力权重;再与原始图像进行通

道级相乘,得到注意力加权后的三通道图像,用于后续特征提取。

2.3 特征分解模块

同一个行人在不同光照条件、视角差异、姿态变化等情况下摄像头所捕获到的图像有较大差异。若仅观察整体特征不利于行人身份的准确识别,如2个不同行人若身体姿态相似,则极易被误判为同一人,因此考虑行人图像的局部细粒度特征在一定程度上可提高模型鲁棒性。根据特征大小不同应当考虑不同粒度,如面部佩戴的眼镜、帽子等应该使用较细的粒度,裤子外观应该使用较粗粒度。据此设计了多粒度特征分解模块,如图3所示。前级特征提取得到了深层网络多维特征,分别经过3个不同分支,包括全局特征分支、粗粒度特征分支和细粒度特征分支。其中全局特征分支提取原始的图像整体特征,粗粒度特征分支将原特征进行水平分块为3组,细粒度特征分支将原特征水平分块为6组,总共得到10组特征,之后每组特征都经过全局平均池化层化为特征向量,再经过 1×1 卷积层进行降维,最后接批量归一化层(batch normalization, BN层)将各组的特征实现通道级拼接得到一个总体多粒度特征,将其作为该输入图像的特征表示,用于后续损失函数计算和预测阶段的特征匹配。其中全局特征分支降维为512通道,粗粒度特征分支降维为256通道,细粒度特征分支降维为128通道。

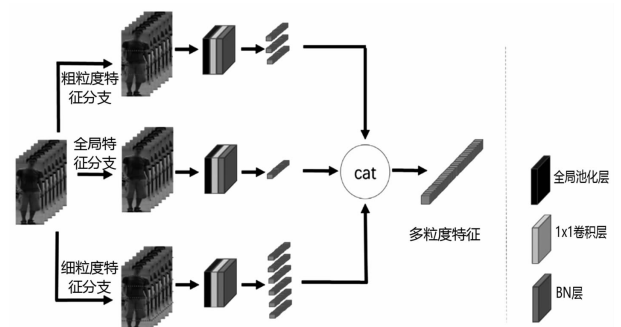


图3 多粒度特征分解网络结构

3 实验结果与分析

3.1 数据集及评价指标

所选择的数据集为可见光-红外光跨模态行人重识别领域使用最广泛的公开数据集 SYSU-MM01,共包含287 628张可见光行人图片和15 792张红外光行人图像,来自于6个摄像头,包括室内场

景和室外场景。整个数据集共包含 491 个不同身份的行人,每个行人都至少有一张可见光图像和一张红外光图像。SYSU – MM01 数据集已经预先划分了训练集、测试集和验证集,其中训练集共 296 个 ID 的行人,测试集共 96 个,验证集共 99 个。目前普遍使用的处理方式是将原始的训练集和验证集合并到一起训练。测试集中的红外图像样本称为 query 集,也叫查询集,可见光图像样本称为 gallery 集,也叫待查集。测试模式包括全部场景(all)和室内(indoor)场景以及单发(single shot)和多发(multi – shot)两种情况互相组合。

评价指标使用累计匹配特性(cumulative matching characteristics, CMC)和平均精确度(mean average precision, mAP)两项指标,其中 mAP 指标在目标检测领域早已广泛使用,而 CMC 指标一般只在图像检索、重识别等问题中使用。模型在测试时将 query 集和 gallery 集全部样本输入网络提取各自的特征向量计算相似度,从而对于 query 集每个样本都能得到 gallery 集全部样本的相似度降序排列。对于 CMC 指标一般使用 rank – k 命中率进行计算。将 query 集中全部样本的 rank – k 计算平均值即可得到最终的 rank – k 结果。一般最常选择的 k 值为 1、10 和 20。

3.2 结果分析

实验采用的数据增强包括随机图像剪切(crop)、水平翻转和随机擦除,最后图像大小为 288 × 144 像素,网络使用 Adam 优化器,权重衰减系数为 5×10^{-4} ,初始学习率为 0.01,并且学习率衰减使用 warm – up 策略,即前 10 个 epoch(1 个 epoch 为将所有训练样本训练 1 次)学习率从 0.001 线性增长到 0.01,10 到 30 个 epoch 学习率保持 0.01,30 到 60 个 epoch 学习率为 0.001,60 到 80 个 epoch 学习率为 0.000 1。一共训练 80 个 epoch。ResNet50 由于使用了预训练参数,因此其学习率设置为模型学习率的 0.1 倍。使用 $P \times K$ 的采样策略,即每次迭代选择 P 个 ID,每个 ID 选 K 张可见光图像和 K 张红外光图像,实验设置 P 为 6, K 为 4。因此每次训练的 batch 大小为 48 张图片。模型在 SYSU – MM01 数据集的 4 种模式下进行测试,结果如表 1 所示。

根据表 1 可知,在全场景模式下,单发和多发两种情况下所提方法指标都高于现有方法,其中单发的 rank – 1 高于当前最佳方法 6.53%,mAP 也高出最佳方法 2.79%,多发模式下也有相同结果;并且室内场景下由于难度有所下降,各项指标都有所提高,但仍然优于现有其他方法:证明了所提方法的有效性。

3.3 对比实验

为进一步证明所设计的两种模块各自的有效

表 1 SYSU – MM01 数据集不同方法结果对比

方法	全场景								室内场景							
	单发				多发				单发				多发			
	r1	r10	r20	mAP	r1	r10	r20	mAP	r1	r10	r20	mAP	r1	r10	r20	mAP
GSM	5.29	33.71	52.95	8.00	6.19	37.15	55.66	4.38	9.46	48.98	72.06	15.57	11.36	51.34	73.41	9.03
A – FC	9.30	43.26	60.38	10.82	13.06	52.11	69.52	6.68	14.59	57.94	78.68	20.33	20.09	69.37	85.80	13.04
Two – stream	11.65	47.99	65.50	12.85	16.33	58.35	74.46	8.03	15.60	61.18	81.02	21.49	22.49	72.22	88.61	13.92
One – stream	12.04	49.68	66.74	13.67	16.26	58.14	75.05	8.59	16.94	63.55	82.10	22.95	22.62	71.74	87.82	15.04
Zero – padding	14.80	54.12	71.33	15.95	19.13	61.40	78.41	10.89	20.58	68.38	85.79	26.92	24.43	75.86	91.32	18.64
cmGAN	26.97	67.51	80.56	27.80	31.49	72.74	85.01	22.27	31.63	77.23	89.18	42.19	37.00	80.94	92.11	32.76
BDTR	27.32	66.96	81.07	27.32	—	—	—	—	31.92	77.18	89.28	41.86	—	—	—	—
eBDTR	27.82	67.34	81.34	28.42	—	—	—	—	32.46	77.42	89.62	42.46	—	—	—	—
D2RL	28.90	70.60	82.40	29.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HPILN	41.36	84.78	94.51	42.95	47.56	88.13	95.98	36.08	45.77	91.82	98.46	56.52	53.05	93.71	98.93	47.48
XIV	49.92	89.79	95.96	50.73												
所提方法	56.45	88.32	94.78	53.52	59.89	92.45	95.78	48.33	59.12	93.35	98.88	63.21	64.21	95.32	99.21	50.32

注:A – FC 为 Asymmetric – FC;“—”为原文未公布,加粗表示最佳效果。

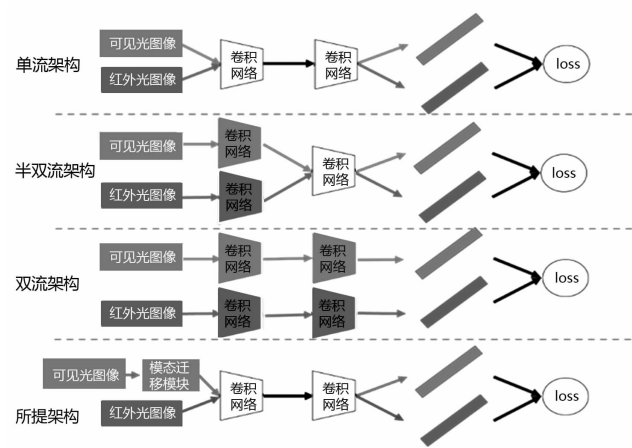


图 4 不同网络架构对比

性,对比实验设计包括不同网络架构的对比和不同不同基础模型的对比。对于跨模态行人重识别问题,基于深度学习的方法其模型可归类为 3 种网络架构:单流架构、双流架构、半双流架构,如图 4 所示。将 3 种网络架构和所提方法一起进行对比,为了控制变量,本部分实验都不采用所提出的特征分解模块,并且 4 种架构的基础模型均采用前面所述的 ResNet50,其中半双流架构的共享卷积层使用 ResNet50 的 layer1 - 4。在全场景单发模式下实验结果证明了使用所提的注意力模块后的网络架构的有效性,如表 2 所示。

表 2 不同网络架构对比

方法	r1	r10	r20	mAP
单流	40.85	81.13	88.23	37.45
双流	35.22	73.57	84.45	31.67
半双流	49.91	83.26	89.33	46.29
所提方法	52.14	85.3	92.56	47.83

为了对比所提出的特征分解模块的有效性,分别使用 4 种不同的经典预训练模型作为特征提取的基础模型,分别为 ResNet50、ResNet18、SqueezeNet、DenseNet121,每种基础模型都进行是否使用特征分解模块的对比。在全场景单发模式下实验结果如表 3 所示。

表 3 不同基础模型对比

方法	r1	r10	r20	mAP
ResNet18	50.22	83.35	89.89	48.27
DenseNet121	51.88	84.96	91.79	47.34
SqueezeNet	49.66	82.99	88.39	47.56
ResNet50	52.14	85.3	92.56	47.83
ResNet18'	53.88	86.56	93.23	51.21
DenseNet121'	55.74	87.68	93.99	51.77
SqueezeNet'	53.21	85.93	89.12	47.76
ResNet50'	56.45	88.3	94.78	53.52

注:“'”表示使用特征分解模块。

从表 3 结果可看出,不同的预训练模型效果有差别,但使用所提特征分解模块后各项指标均有所提高,证明所提特征分解模块的有效性。

4 结 语

针对可见光和红外光跨模态行人重识别问题,提出了一种新的网络结构,包括基于注意力的模态迁移模块用于缓解巨大的跨模态差异以及基于图像分块的多粒度特征分解模块用于提取图像全局和局部的多粒度特征。在 SYSU - MM01 公开数据集上进行的测试表明,所提两种模块能有效提高行人重识别模型精度,与现有多种方法比较达到了目前更好的效果。但与可见光单模态行人重识别相比,跨模态行人重识别模型效果仍然有很大的提升空间。考虑到深度学习中注意力机制有多种实现方式,接下来将进一步改进模态迁移模块,探究可见光和红外光之间更有效的特征变换结构,进一步减小跨模态差异,提高算法性能。

参考文献

[1] Liang Zheng, Yi Yang, Alexander G Hauptmann. Person Re - identification: Past, Present and Future[J]. arXiv preprint arXiv:1610.02984, 2016.

[2] A. Wu, W. S. Zheng, H. Yu, et al. RGB - infrared Cross - modality Person Re - identification[C]// in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017:5380 - 5389.

[3] P. Dai, R. Ji, H. Wang, et a. Cross - modality Person Re - identification with Generative Adversarial Training [C]//in Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2018: 677 - 683.

[4] Mang Ye, Zheng Wang, Xiangyuan Lan, et al. Visible Thermal Person Re - identification via Dual - constrained Top - ranking[C]. In IJCAI'18:Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2018:1092 - 1099.

[5] Mang Ye, Xiangyuan Lan, Zheng Wang, et al. Bi - Directional Center - constrained Top - ranking for Visible Thermal Person Re - identification[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 15: 407 - 419.

(下转第 15 页)

基于竞争神经网络的变电站集中监控 全面监视周期分类方法

张宇泽, 张心洁, 刘宪棚, 王 建

(国网天津市电力公司城西供电分公司, 天津 300190)

摘要:对变电站集中监控全面监视周期的影响因素进行了分析,包括变电站电压等级、集中监控缺陷发生频次、设备运行情况、变电站重要程度、变电站运行环境和设备平均负载6个方面。在此基础上提出了基于竞争神经网络的变电站全面监视周期分类方法,利用机器学习手段实现变电站全面监视周期的科学合理分类。仿真分析结果表明该方法可行有效。

关键词:变电站;集中监控;全面监视周期;竞争神经网络;聚类

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0011-05

Comprehensive Monitoring Cycle Classification Method of Centralized Monitoring in Substation Based on Competitive Neural Network

Zhang Yuze, Zhang Xinjie, Liu Xianxu, Wang Jian

(Chengxi Electric Power Supply Branch Company of State Grid Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300190, China)

Abstract:The influencing factors of comprehensive monitoring cycle of the centralized monitoring in substation are analyzed, including the voltage level of the substation, the frequency of the centralized monitoring defects, equipment operation situation, the importance of the substation, the operation environment and the average load of the equipment. On this basis, a comprehensive monitoring cycle classification method based on competitive neural network is proposed, and machine learning method is used to achieve a scientific and reasonable classification of comprehensive monitoring cycle of the substations. The simulation results show that the method is feasible and effective.

Key words:substation; centralized monitoring; comprehensive monitoring cycle; competitive neural network; clustering

0 引言

变电站全面监视是指值班监控员对所辖集中监控变电站进行全面的巡视检查,巡视检查内容包括变电站设备运行工况等。全面监视的时间要求为330 kV及以上变电站每值至少两次,220 kV及以下变电站每值至少一次。对于供电公司而言,所辖各变电站的运行工况水平、运行特点、发生缺陷的可能性各异,采用同样的全面监视周期不利于提高集中监控工作的效率和管理水平。

《天津市电力公司监控运行管理规定》中指出“下列情况,值班监控员应对相关受控站及设备加强监视,缩短巡回检查周期:新设备投运后;设备发

生严重缺陷时;雷雨、大风、大雾、冰雹等恶劣天气时……”。该规定仅针对电网或设备运行遇到特殊情况,对于正常情况下如何确定各变电站的监视周期未作说明。随着社会经济发展,变电站的数量和规模不断扩大,差异化制定变电站集中监控全面监视周期,对重要性较高、运行隐患较多的变电站有针对性地加强监视力度,使用有限的监控值班人力资源完成日益增长的变电站监视工作量,成为了供电公司普遍面临的问题之一。

在分析了变电站集中监控全面监视周期影响因素的基础上,提出了基于竞争神经网络的变电站集中监控全面监视周期分类方法。根据各变电站的固有属性,利用人工智能手段对变电站的全面监视周期进行分类,提高集中监控工作的质量和效率,提高电网运行可靠性。

1 变电站集中监控全面监视周期影响因素

变电站集中监控全面监视周期的影响因素按影响作用由大到小包括以下几个方面：

1) 变电站电压等级。电压等级越高,变电站供电面积越大,在电网中起到的枢纽作用越大,变电运维人员巡视周期越短,相应地,全面监视周期也应越短。

2) 变电站集中监控缺陷发生频次。集中监控缺陷包括可以通过监控系统告警窗发现的集中监控缺陷和无法通过告警窗发现的集中监控缺陷。前者例如某断路器“测保装置异常”信号动作、某主变压器“本体轻瓦斯告警”信号动作等;后者例如某段母线电压遥测值不能正常刷新、某主变压器分接头遥调失败、主变压器油温遥测值异常等。集中监控缺陷如未能及时发现处理,可能引起变电站设备故障跳闸、保护越级动作、变电站全停等严重后果,因此变电站集中监控缺陷发生的频次越高,越应加强监视,缩短全面监视周期。

3) 设备运行情况。设备运行情况主要取决于设备当前存在的缺陷情况、设备运行隐患和运行年限。若设备存在缺陷而未完成消缺(尚未超出缺陷时限),已知设备存在家族性缺陷,某些预试数据接近、达到或超过规程中的注意值,设备有不良工况记录^[1],设备运行年限较长时,则应缩短全面监视周期。

4) 变电站重要程度。变电站重要程度主要取决于所在区域供电等级(A+、A、B、C、D、E)和所供用户中是否含有重要用户、敏感用户、电采暖用户、防汛用户和其他保电用户等。变电站所在区域供电等级越高,所供负荷中包含上述用户级别越高、数量越多,则重要程度越高,用户对电网供电可靠性的要求越高,则设备故障跳闸或由于存在缺陷等原因被迫停运造成的后果越严重,因此应加强监视力度,即安排较短的全面监视周期。

5) 变电站运行环境。根据运行经验,室内设备发生缺陷的概率明显低于室外设备。若变电站为室外站,周边环境较为恶劣,处于重污区、重冰区,经常遭受强风、雷雨、冰雪等天气,则应适当加强监视力度,缩短全面监视周期。

6) 变电站设备平均负载情况。设备平均负载率越高,发生母线电压越下限、主变压器油温超过允

许值等缺陷的可能性越大,相应地应缩短全面监视周期,及时发现并排除隐患。

以上内容中,变电站电压等级、所在区域供电等级、变电站所供用户中是否含有重要用户等、变电站集中监控缺陷日志、设备存在缺陷而未完成消缺的情况、设备负载情况等信息由调度专业掌握;设备运行隐患、运行年限和变电站运行环境等信息由变电运检专业掌握。

2 竞争神经网络

竞争神经网络只有 2 层,其结构如图 1。竞争神经网络中输出层又称为核心层。 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 为输入神经元, $y_1, y_2, \cdots, y_n$ 为输出神经元。在一次计算中,只有 1 个输出神经元获胜,获胜的神经元标记为 1,其余输出神经元均标记为 0^[2],即“胜者为王,败者为寇”。最初,输入层到输出层的权值是随机给定的,每个输出层神经元获胜的概率相同,但最后会产生一个兴奋最强的输出神经元。该神经元“战胜”了其他神经元,在权值调整过程中其兴奋程度得到进一步加强,而其他神经元的兴奋程度保持不变。竞争神经网络通过这种方式获取训练样本的分布信息,每个训练样本都对应一个获胜神经元,也就是对应一个类别。

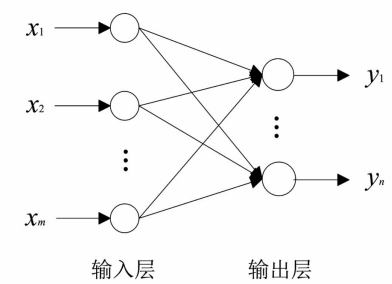


图 1 竞争神经网络结构

竞争神经网络的学习规则是由内星规则发展而来的 Kohonen 规则^[3],其基本原理如下:假设网络输入层包含 m 个输入神经元 $x_1, x_2, \cdots, x_m$,输入向量记为 $\boldsymbol{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_m]$,即每个样本为一个 m 维向量。输出层包含 n 个输出神经元 $y_1, y_2, \cdots, y_n$,输出向量记为 $\boldsymbol{Y} = [y_1, y_2, \cdots, y_n]$ 。网络权值 $\boldsymbol{\omega}$ 为一个 $m \times n$ 的矩阵。三者之间的关系为

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{\omega} \tag{1}$$

在 n 个输出神经元中必有一个取得最大值,成为获胜神经元。假设获胜神经元为 y_k ,则相应的权

值按式(2)进行调整^[2]:

$$\Delta\omega_{ik} = \eta(x_i - \omega_{ik})y_k \tag{2}$$

式中, η 为学习步长。

网络权值以 η 为步长向输入的样本值 x_i 靠近。在下一轮计算中, y_k 以更大的概率胜出成为获胜神经元。当 η 取适当值时,网络权值经过逐步学习最终等于输入样本向量。竞争神经网络继续接收其他输入样本,每一个样本都对应一个获胜神经元,并使对应的权值向量向输入向量方向调整。相似的输入样本对应同一个获胜神经元,表示它们被划分为同一类;该神经元对应的权值向各个输入向量的方向做调整,最终稳定为输入向量的平均值^[2]。

3 基于竞争神经网络的变电站集中监控全面监视周期分类方法

由前面论述可知,变电站集中监控全面监视周期的影响因素包括变电站电压等级、集中监控缺陷发生频次、设备运行情况、变电站重要程度、变电站运行环境和设备平均负载情况 6 个方面。按照下列步骤进行变电站集中监控全面监视周期的分类。

1)将上述 6 个方面因素进行量化。电压等级方面,220 kV、110 kV 和 35 kV 变电站的电压等级指数分别定义为 4、2、1。集中监控缺陷发生频次方面,定义集中监控缺陷发生频次指数为该座变电站投运后平均每年发生集中监控缺陷的次数。设备运行情况方面,定义所有变电站的设备运行情况指数初始值为 0,设备每存在一项严重缺陷、一般缺陷而未完成消缺时分别加 1、0.5,设备存在运行隐患时视情况加 0~1,变压器、母线、断路器等主要设备运行年限在 20 年以上、10~20 年、5~10 年、5 年以下时分别加 1、0.5、0.25、0.125。变电站重要程度方面,定义所有变电站的重要程度指数初始值为 0,所在区域供电等级为 A+、A、B、C、D、E 分别加 1、0.5、0.25、0.125、0.1、0.075,所供用户中每包含一个重要用户、敏感用户分别加 0.5、0.25,每包含一个电采暖用户或防汛用户加 0.1,每包含一个其他保电用户视情况加 0.1~0.5。变电站运行环境方面,定义所有变电站的运行环境指数初始值为 0,室外站和室内站分别加 1、0.5,室外站视周边环境恶劣程度加 0~1,视所在地区气候情况加 0~1。设备平均

负载方面,定义变压器平均负载率为 0.75 以上、0.5~0.75、0.25~0.5、0.25 以下时设备平均负载指数分别 4、2、1、0.5。需说明,各供电公司可根据自身特点和供电要求确定各项指标的评分标准。通过以上指标量化方法,每座变电站可用一个六维特征向量表示,即

$$\mathbf{S}_i = [s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, s_{i4}, s_{i5}, s_{i6}] \tag{3}$$

式中: $\mathbf{S}_i$ 表示第 i 座变电站的特征向量; s_{i1} 、 s_{i2} 、 s_{i3} 、 s_{i4} 、 s_{i5} 、 s_{i6} 分别表示第 i 座变电站的电压等级指数、集中监控缺陷发生频次指数、设备运行情况指数、重要程度指数、运行环境指数和设备平均负载指数。

2)建立自组织特征映射网络。根据文献[4~6],变电站巡视周期分类宜分为 3~5 类,相应的值班监控员全面监视周期亦宜分为 3~5 类。这里选择将变电站集中监控全面监视周期分为 4 类进行论述,各供电公司可根据实际情况及特点合理选择分类类别数。由于输入向量维数为 6,因此设置自组织特征映射网络的输入层神经元节点数为 6 个。网络竞争层选用 2×2 六边形结构,即最终分类的类别数为 4 类。网络的竞争层包含 4 个节点,训练完毕后,每一个输入向量,即每座变电站,属于一个竞争层节点。

3)使用 Matlab 工具箱函数 `competlayer` 实现竞争神经网络聚类。代码如下:

```
x0 = [ s11, s21, s31, ..., sn1;  
      s12, s22, s32, ..., sn2;  
      s13, s23, s33, ..., sn3;  
      ...  
      s16, s26, s36, ..., sn6 ];  
net = competlayer(4);  
net.trainParam.epochs = 400;  
tic  
net = train( net, x0 );  
Toc  
y = net( x0 );  
classes = vec2ind( y )
```

4)根据竞争神经网络给出的分类结果,确定每座变电站的全面监视周期。

4 仿真分析

选择某地区电网共 35 座变电站作为算例进行仿真分析,各变电站的属性如表 1 所示。

表 1 某地区电网变电站

变电站编号	电压等级指数	集中监控缺陷 发生频次指数	设备运行 情况指数	重要程度指数	运行环境指数	设备平均 负载指数
S1	2	3.18	0.625	1.85	1.3	0.5
S2	2	1.04	0.950	3.70	2.1	2.0
S3	2	1.12	0.650	3.10	2.6	1.0
S4	2	1.10	0.450	3.75	1.3	0.5
S5	2	1.92	0.825	1.85	2.2	1.0
S6	2	6.23	1.900	1.65	2.1	4.0
S7	2	3.17	1.100	4.15	2.6	1.0
S8	2	7.60	1.250	3.90	2.4	0.5
S9	2	5.92	1.700	1.90	1.2	2.0
S10	2	5.29	1.500	3.65	1.6	0.5
S11	2	4.31	2.000	3.60	1.1	1.0
S12	1	4.95	0.425	1.75	1.0	1.0
S13	1	1.84	1.900	3.10	2.4	0.5
S14	1	4.68	1.400	4.80	1.6	2.0
S15	1	2.77	0.950	4.00	2.3	0.5
S16	1	4.71	1.200	2.80	1.2	2.0
S17	1	7.54	1.125	3.65	1.7	1.0
S18	1	3.95	1.700	3.35	0.7	2.0
S19	1	2.35	1.100	1.30	2.2	1.0
S20	1	2.61	1.500	4.55	1.7	1.0
S21	1	1.85	0.450	3.10	2.3	4.0
S22	1	2.28	1.800	1.50	2.0	1.0
S23	1	2.42	0.425	4.30	2.1	1.0
S24	1	4.19	0.950	2.60	1.6	0.5
S25	1	3.86	1.450	2.00	2.7	1.0
S26	1	4.01	0.950	3.75	1.7	1.0
S27	1	7.80	0.700	1.50	2.2	2.0
S28	1	0.68	1.200	2.75	1.4	1.0
S29	1	1.97	1.400	2.90	1.0	1.0
S30	1	2.36	0.825	4.00	1.6	1.0
S31	1	2.45	1.050	3.40	1.4	0.5
S32	1	6.66	1.250	1.75	1.3	1.0
S33	1	5.66	0.550	2.15	2.7	2.0
S34	1	7.95	0.750	2.60	1.8	1.0
S35	1	2.13	0.600	3.00	1.6	1.0

使用所提出的方法进行分类,结果如表 2 所示。

表 2 变电站巡视周期分类结果

变电站 编号	分类 等级	变电站 编号	分类 等级	变电站 编号	分类 等级
S1	3	S13	3	S25	3
S2	4	S14	3	S26	3
S3	4	S15	3	S27	1
S4	4	S16	3	S28	4
S5	4	S17	2	S29	3
S6	1	S18	3	S30	3
S7	3	S19	3	S31	3
S8	2	S20	3	S32	2
S9	1	S21	4	S33	1
S10	2	S22	3	S34	2
S11	3	S23	3	S35	3
S12	3	S24	3		

由表 2 可看出,S6、S9、S27、S33 共 4 座变电站被划分为第 1 类,S8、S10、S17、S32、S34 共 5 座变电站被划分为第 2 类,S2、S3、S4、S5、S21、S28 共 6 座变电站被划分为第 4 类,其他 20 座变电站被划分为第 3 类,验证了所提方法的有效性。分类结果完全取决于变电站本身实际情况,不受主观因素影响。

5 结 语

针对差异化制定变电站集中监控全面监视周期问题,首先分析了变电站全面监视周期的影响因素,按影响作用由大到小包括变电站电压等级、集中监控缺陷发生频次、设备运行情况、变电站重要程度、变电站运行环境和设备平均负载 6 个方面。电压等级越高,集中监控缺陷发生频次越高,设备运行情况越差,

变电站重要程度越高,运行环境越恶劣,设备平均负载率越高,越应加强监视力度,缩短全面监视周期。

提出了基于竞争神经网络的变电站集中监控全面监视周期分类方法,其步骤可概括为:将变电站全面监视周期的 6 个影响因素进行指标量化,得到表征每座变电站全面监视周期影响因素的六维特征向量;建立竞争神经网络,输入层神经元个数为 6 个,输出层神经元个数取变电站全面监视周期想要分类的类别数;使用 Matlab 工具箱函数 competlayer 实现竞争神经网络分类;根据竞争神经网络给出的分类结果,确定每座变电站的全面监视周期。

所提方法可利用竞争神经网络实现变电站集中监控全面监视周期的科学合理分类,为供电公司差异化安排变电站集中监控全面监视周期提供技术支撑。

参考文献

[1] 谢金泉,李晓华,何毅,等. 变电设备状态巡视策略研究[J]. 广东电力, 2012, 25(9):5-9.

[2] 陈明. Matlab 神经网络原理与实例精解[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[3] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[4] 陈宏彬,李悦宁,刘琨. 基于状态检修的无人值班变电站状态巡视管理[J]. 现代营销(经营版), 2019(4):150.

[5] 王少博,刘辉,张兰钦,等. 基于设备状态分析的无人值班变电站巡视模式研究[J]. 河北电力技术, 2013,32(2):10-12.

[6] 彭业. 引入状态评估分析的变电站设备巡视优化策略的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.

作者简介:

张宇泽(1990),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统分析与控制。
(收稿日期:2020-07-06)

(上接第 10 页)

[6] J. W. Lin, H. Li. HPILN: A Feature Learning Framework for Cross-modality Person Re-identification[J]. arXiv preprint arXiv:1906.03142, 2019.

[7] Z. Wang, Y. Zheng, Y. Y. Chuang, et al. Learning to Reduce Dual-level Discrepancy for Infrared-visible Person Re-identification[C]//in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 618-626.

[8] Diangang Li, Xing Wei, Xiaopeng Hong, et al. Infrared

-visible Cross-modal Person Re-identification with An X Modality[C]// The Thirty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-20), 2020.

[9] Hao Luo, Wei Jiang, Youzhi Gu, et al. A Strong Baseline and Batch Norm Neutralization Neck for Deep Person Reidentification[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020,22(10):2597-2609.

作者简介:

张 森(1995),男,硕士研究生,研究方向为计算机视觉。
(收稿日期:2020-10-26)

基于机器视觉技术的电缆结构参数检测系统研究

胡立锦, 杨永全

(国网重庆市电力公司建设分公司, 重庆 410021)

摘要:随着电力技术的快速发展, 电力基础设施电缆化程度不断提升, 各种电缆故障和事故亦愈加频发。为了提高电力工程中电缆入场和安装前结构参数检测精度, 有效预防和减少物理缺陷对电缆安全稳定运行造成的隐患, 研究了基于机器视觉技术的电缆结构参数检测系统。该系统通过机器视觉模块实时采集电缆截面图像, 通过优化图像处理算法并开发检测程序, 拓宽现场条件下电缆结构尺寸参数可检测种类, 实现检测数据的保存和输出。非接触检测的便捷性和数据的可追溯性, 有利于纵向提升电缆入场和安装前的质量管控精准度。通过对比分析及现场测试表明该系统具有良好的实际操作性和较强的实用价值。

关键词:电缆故障; 机器视觉; 安全稳定; 图像处理

中图分类号: TM726.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2020)06-0016-05

Research on Cable Structure Parameter Detection System Based on Machine Vision Technology

Hu Lijin, Yang Yongquan

(Construction Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 410021, China)

Abstract: With the rapid development of power technology, the degree of power infrastructure cabling is increasing, and various cable failures and accidents happen more frequently. In order to improve the detection accuracy of cable structure parameters before entering into the site and installation, and to effectively prevent and reduce the hidden dangers caused by physical defects for the safe and stable operation of cables, a cable structure parameter detection system based on machine vision technology is studied. The system collects the section images of cable in real time through machine vision module, optimizes the image processing algorithm and develops the detection program, widens the types of cable structure size parameters that can be detected under the field conditions, and realizes the storage and output of detection data. The convenience of non-contact detection and the traceability of data are conducive to improving the accuracy of quality control before cable entry and installation. Through comparative analysis and field test, it shows that the proposed system has a good practical operation and strong practical value.

Key words: cable failure; machine vision; safety and stability; image processing

0 引言

为满足社会经济飞速发展和人民生活水平提升对电力供应的需求, 电力设施建设规模和速度不断加快, 中国以特高压为主的电力平衡传输网络日益成熟, 次级配套网架也不断深化, 常规电网安全性和稳定性明显提升。在保证电力供应基本功能需求的前提下, 现代城市电力设施与周围环境的相容性越来越被关注, 加之城市用地紧张与电力走廊占地的

矛盾不断加深, 电缆化成为城市电力的发展趋势。

电缆化一方面催生电缆制造业飞速增长且电缆应用范围向不同电压等级延伸; 另一方面也给电力系统安全稳定运行带来新的风险和隐患。电力电缆为封闭、紧凑型构造, 绝缘合成材料或油浸纸构成的复合绝缘包裹于线芯之外。由于长时间运行于电缆隧道或电缆沟等有限、狭小空间中, 故障不易判定且维修难度大, 不能及时消缺易导致停电事故。研究典型电缆事故案例并结合电缆运行经验发现, 安装不当和外力机械破坏是造成电缆故障的主要主观原

因,而电缆系统的结构质量则是主要的客观原因^[1-3]。

目前,国内外关于电缆故障方面的研究多集中于前期故障和永久故障的检测方面,包括故障机理分析、故障定位测距、故障在线监测等。美国、德国和英国等研究起步较早,技术已经得到大规模应用。近年来,国内研究也取得较大进步,文献[4]提出,随着信息存储与计算技术的进步,实时更新、存储、调用电缆故障数据库信息,并对故障样本进行动态学习,不断丰富和完善智能故障诊断专家系统,从而实现电缆故障在线检测。文献[5]将小波分析理论应用到电缆故障诊断中,通过对故障信号的时域和频域进行多层分解,提取特征信号,从而实现电缆故障定位。文献[6-10]对电缆故障发生的基本原理进行了深入研究,对比分析了国内外电缆故障诊断技术发展现状和趋势,将引力搜索算法和神经网络运用到电缆故障诊断研究中,提出通过希尔伯特变换进行故障识别和定位,改进电缆故障诊断模型,合理优化诊断算法。

然而,对于电缆故障的事前控制研究鲜有涉猎,电缆系统的结构质量仅依靠电缆抽样送检,送检样本截取、抽样频率、送检周期等诸多因素制约了电缆入场和安装的质量把控。鉴于此,从提升电缆结构质量检测手段出发,提出基于机器视觉技术的电缆结构和相序检测系统研究,以期改善电缆入场、安装前可检项目种类和检测精度,从源头增强电缆安全稳定运行可靠度。

1 电缆故障与电缆检测

电缆故障按照故障表现通常可分为开路故障(即电缆导体断裂)、短路故障(包括导体对导体短路和导体对地短路)、绝缘故障(老化或击穿,绝缘电阻大幅下降)^[11]。

诱发电缆故障的成因可分为主观原因(如安装工艺缺陷、误操作、制造和设计缺陷等)和客观原因(如运行环境恶劣、非人为外力破坏、超期老化等)两个方面^[12],目前研究多集中在外部原因方面,而对电缆本身质量问题研究较少。

1.1 电缆主要质量问题分析

随着电缆化程度的不断提升,电缆事故发生的频次也逐步增加,电缆实体质量和安装质量验收愈发重

要。电缆导体缺斤少两或铜材纯度不足将直接降低电缆载流量,使同等条件下电缆发热量增加,当发热量超过电缆承受范围后可能引发火灾等安全事故^[13]。

绝缘屏蔽烧蚀击穿是电缆故障频发的重要诱因。目前,电缆绝缘屏蔽的烧蚀损伤缺乏有效的检测手段。而导致高压电缆绝缘屏蔽烧蚀除了受运行条件、环境影响外,绝缘屏蔽层本身质量也是主要因素之一,加强绝缘屏蔽层最大、最小厚度检测,对预防绝缘屏蔽烧蚀击穿有积极意义。

1.2 电缆检测项目与标准分析

1) 导体及线芯截面积

电力电缆通常由多股铜芯导线构成,电缆导体表面应干净、无损伤,无明显质量缺陷,导体截面积应满足相应规范,并不小于厂家供货参数中的标称截面积。当实际截面积小于标称截面积 90% 时应重点关注并对电缆进行强制实验室检验。

2) 绝缘层厚度

绝缘层的主要作用是实现线芯电气隔离、保证电能正常输送。绝缘层厚度平均值不应小于规范规定的标称值,绝缘层最小测量厚度应大于 0.9 倍标称值,且在相同截面测得的绝缘偏心度应小于 0.1。

3) 屏蔽层厚度

高电压等级电力电缆一般还有导体屏蔽层和绝缘屏蔽层。屏蔽型电缆在缆芯外应有铜/聚酯复合膜构成的屏蔽层,并在内侧有 1.0 mm 裸铜线贯穿整个电缆长度,以便接地用,屏蔽层重叠绕包的重叠率应不小于 15%。

4) 金属铠装层厚度

电缆铠装层多为镀锌钢带铠装,两层螺旋绕包于绝缘层外,外层的中间大致在内层间隙上方,绕包应圆整光滑,铠装层厚度应满足规范要求。

5) 不圆度

电缆不圆度会改变电缆的截面积,也会改变绝缘及护套的厚度,从而改变电缆的电阻和击穿电压。一般情况下,电缆不圆度应满足:

$$\text{不圆度} = \frac{\text{电缆最大外径} - \text{电缆最小外径}}{\text{电缆最大外径}} \leq 15\%$$

2 机器视觉模块

2.1 视觉测量技术

视觉测量技术是通过高倍工业相机获取高质量

数字图像,通过软件编程对图像做进一步的数据挖掘,从而获取需要的数据^[14-16],相机系统模型如图1所示。

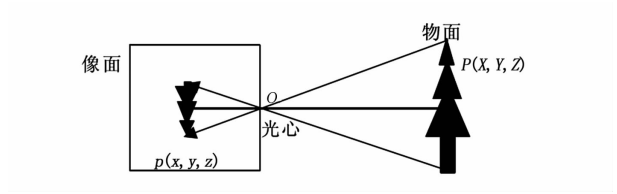


图1 显微成像系统模型

图中实物坐标为 $P(X,Y,Z)$, 镜像坐标为 $p(x,y,z)$, 成像原点为 $O(0,0,f)$, 则实物与镜像对应关系为

$$(x,y)=\left(f\frac{X}{f-Z},f\frac{Y}{f-Z}\right)\tag{1}$$

2.2 视觉测量系统

视觉测量系统中最重要的部分为工业相机,它是采集高质量数字图像的关键,并直接影响以此为基础的检测精度^[17]。相机的选择主要考虑镜头和分辨率两个因素,一般工业相机测量系统如图2所示。

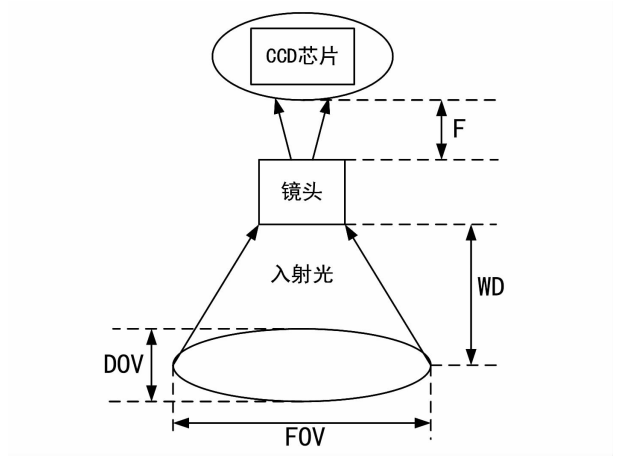


图2 视觉测量系统

镜头的相关的参数包括焦距 (F)、工作距离 (WD)、景深 (DOV)、电荷耦合芯片 (CCD) 及视场 (FOV),其中焦距是镜头最重要的参数。相关参数之间的关系为

$$\frac{F}{WD}=\frac{CCD\text{ 的宽度或高度}}{FOV\text{ 的宽度或高度}}\tag{2}$$

2.3 视觉测量标定与精度分析

视觉测量系统标定的本质是从图象出发恢复出空间点三维坐标的过程,亦即实现世界坐标系(参考坐标系)、摄像机坐标系、图像物理坐标系、像素坐标系的统一^[18],坐标系转换示意如图3所示。

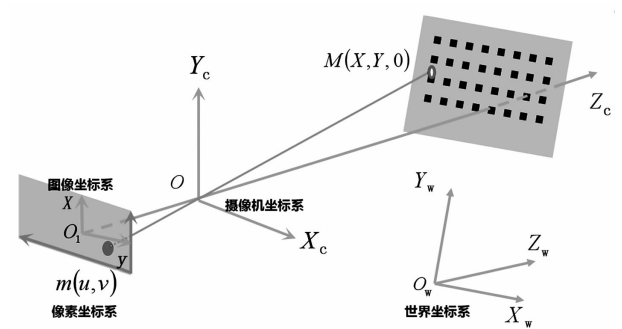


图3 坐标系转换

真实点 M 和它的镜像点 m 关系为

$$s\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\mathbf{K}\begin{bmatrix}r_1r_2r_3t\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\Y\\0\\1\end{bmatrix}=\mathbf{K}\begin{bmatrix}r_1r_2t\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\Y\\1\end{bmatrix}\tag{3}$$

式中: $\mathbf{K}$ 为相机内参数矩阵; $[r_1\ r_2\ r_3]$ 是镜像点对真实点的旋转坐标; t 是镜像点对真实点的平移向量。

令 $H=[h_1\ h_2\ h_3]=\lambda\mathbf{K}\begin{bmatrix}r_1\ r_2\ t\end{bmatrix}$, 则可得 $r_1=\frac{1}{\lambda}\mathbf{K}^{-1}h_1, r_2=\frac{1}{\lambda}\mathbf{K}^{-1}h_2$, 将 $r_1^Tr_2=0$ 和 $\|r_1\|=\|r_2\|=1$ 带入可得内参数矩阵的基本约束,进而通过线性约束求出内参数矩阵 $\mathbf{K}$ 。

$$\begin{cases}h_1^T\mathbf{K}^{-T}\mathbf{K}^{-1}h_2=0\\h_1^T\mathbf{K}^{-T}\mathbf{K}^{-1}h_1=h_2^T\mathbf{K}^{-T}\mathbf{K}^{-1}h_2\end{cases}\tag{4}$$

标定是对世界坐标系和像素坐标系关系的固定,本质是确定相机内参数、外参数、畸变参数等,标定的精度影响测量准确度。标定方法一般分为绝对标定法和相对标定法,绝对标定法是先通过标定尺或者标定块来计算相机像素值代表的真实值,再由像素值进行测量的方式;相对标定法则是同时测得标准件和被测件的像素个数,由标准件的实际尺寸倒推得到被测件的测试结果^[19]。

假设标准件尺寸为 b ,实测像素值 B ,再将标准件作为待测工件进行图像测量,测得像素个数为 $B\pm\Delta$ 不考虑亚像素定位精度,理论误差小于1个像素,则相对标定测量精度为 $\frac{b}{B}\cdot\frac{1}{B\pm\Delta}\approx\frac{b}{B^2}$ 。

而对于绝对标定,理论测量精度为 $\frac{b}{B}\cdot\frac{1}{b}=\frac{1}{B}$,从数量级上来看, $b\ll B$, 则相对标定测量的精度远高于绝对标定。

2.4 图像处理软件开发平台

通过 Python 编程调用 OpenCV 函数库来实现图像处理,程序流程如图4所示。

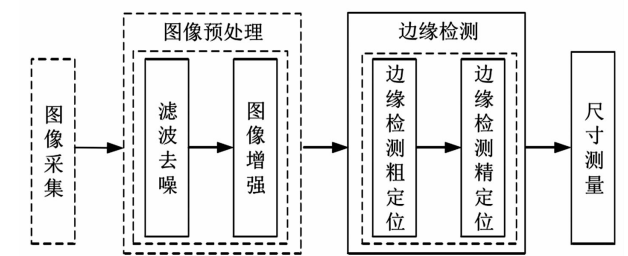


图4 图像处理程序流程

3 图像处理模块

3.1 图像预处理

对相机采集到的电缆高质量数字图像进行双边滤波预处理,充分考虑图像的空间邻近度以及像素值相似度,同时参考空域信息和灰度相似性,去除图像噪声信号。

电缆的图像经过双边滤波后的对比效果如图5所示。

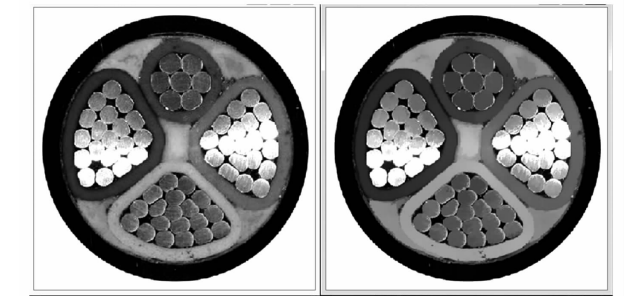


图5 双边滤波后的对比效果

然后,通过 ACE 增强算法将图像分成高频和低频两个部分,对高频部分乘以增益值,然后重组得到自适应对比度增强的电缆图像,数学推导如下:

假设选定电缆图像中某点 $x(i,j)$,以 (i,j) 为中心,在窗口大小为 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的区域内,其局部均值和方差可以表示为式(5)和式(6):

$$m_x(i,j) = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} x(k,l) \quad (5)$$

$$\sigma_x^2(i,j) = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} [x(k,l) - m_x(i,j)]^2 \quad (6)$$

式中: m_x 代表图像背景; $x - m_x$ 代表图像的高频细节部分。放大 $x - m_x$,获得增强图像,如式(7)所示:

$$f(i,j) = m_x(i,j) + G(i,j)[x(x,j) - m_x(i,j)] \quad (7)$$

增益 G 与局部均方差成反比:

$$f(i,j) = m_x(i,j) + \frac{D}{\sigma_x(i,j)}[x(x,j) - m_x(i,j)] \quad (8)$$

对局部均方差较大的图像高频部分,放大系数适当减小,避免图像过亮;对局部均方差很小的图像平滑区域,放大系数适当增加,让图像中对比较弱的部分的增强效果更加明显。ACE 增强算法处理后电缆图像对比效果如图6所示。

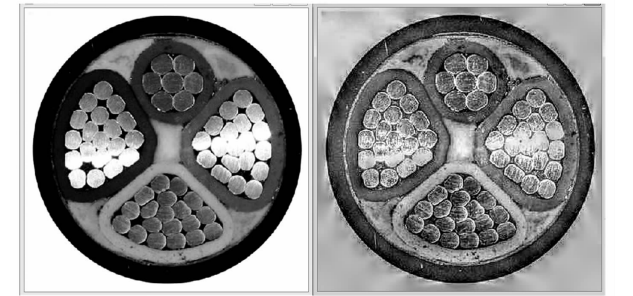


图6 ACE 算法增强后的对比

3.2 边缘检测

对增强后的图像采用标准边缘检测算法实现边缘粗定位,获取边缘图像,然后使用亚像素细分算法,在有效减小背景噪声对边缘信息干扰的同时,通过增加计算精度来平滑、连续图像边缘的完整性,有效降低算法在非边缘位置的冗余计算,提升噪声干扰下的稳定性。

定位处理后的电缆图像对比效果如图7所示。

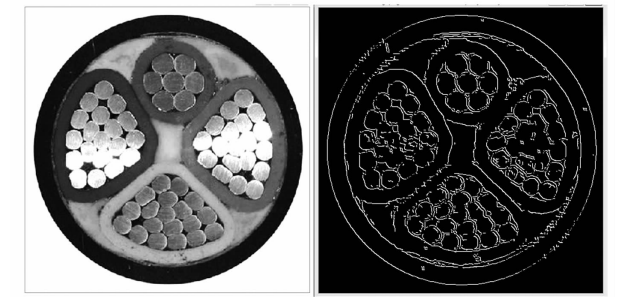


图7 定位对比

最后,对定位处理后的图像进行标定换算即可获得相应需求参数。

4 结 语

前面在分析电缆故障成因的基础上,立足工程实际,重点介绍电缆本体结构质量缺陷引发的管理局限性,提出基于视觉测量技术的电缆结构参数检测系统研究,通过软件编程实现电缆截面图像获取和处理。系统将相机采集到的电缆图像进行 Bilateral

Filters 算法去噪预处理;再选用 ACE 算法提高图像的视觉效果;最后通过标准边缘检测算法确定图像边缘,通过亚像素边缘检测算法得到小数级别的像素距离,提升测量精度。经过实际测试,该系统实现了电缆结构参数的实时在线检测,拓宽了电缆入场和安装前可检项目种类,提高了检测精度,对从源头强化电缆安全稳定运行可靠度有积极的促进作用。

参考文献

[1] 朱朝旭. 基于 STDR/SSTD R 的铁路信号电缆故障在线检测系统的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2012.

[2] 申海霞. 基于混沌序列的 SSTDR 检测方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.

[3] 刘洋,刘忠,姜波,等. 高压电缆故障分析与检测方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015, 34(1):107 - 111.

[4] 袁燕岭,周灏,董杰,等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. 高电压技术,2015,41(4): 1194 - 1203.

[5] 姚海燕,张静,留毅,等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(9):115 - 123.

[6] 鹿洪刚,覃剑,陈祥训,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术,2004(20):58 - 63.

[7] 王少华,叶自强,梅冰笑,等. 电力电缆故障原因及检测方法研究[J]. 电工电气,2011(5):48 - 51.

[8] 王传旭. 高压电缆故障分析及其状态检测技术[J]. 电气技术,2014(9):70 - 73.

[9] 袁燕岭,李世松,董杰,等. 电力电缆诊断检测技术综

述[J]. 电测与仪表,2016,53(11):1 - 7.

[10] 余靖. 基于扩展频谱时域反射法的电力电缆故障在线检测研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[11] 杨景豪,刘巍,刘阳,等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程,2016,24(2):300 - 308.

[12] 全燕鸣,黎淑梅,麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程,2013,21(4):1054 - 1061.

[13] 张潘杰. 基于机器视觉的复杂工件形位尺寸的高精度测量技术研究[D]. 济南:济南大学,2019.

[14] 叶帆. 大尺寸构件激光辅助视觉测量中图像处理方法[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[15] 崔恩坤. 高精度双目立体视觉测量系统关键技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2018.

[16] 伏圣群. 行波反射法电缆故障检测关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.

[17] 谢家欣. 基于机器视觉工件尺寸测量方法研究[D]. 长春:长春工业大学,2018.

[18] 吴凤英,魏章波,席金强,等. 基于单目视觉的球形电机转子方位测量方法[J]. 电测与仪表,2019, 56(22):95 - 102.

[19] 杨斌,李明贞,周承科. 基于泄漏电流的高压电缆线路故障测距方法[J]. 电测与仪表,2020,57(5):120 - 124.

作者简介:

胡立锦(1986),男,硕士,主要从事输电线路工程建设管理和技术经济性分析等方面的研究;

杨永全(1973),男,高级工程师,主要从事特高压电力工程建设管理方面的研究。

(收稿日期:2020 - 10 - 12)

(上接第 5 页)

[4] 郭春菊. 分布式电源接入对配电网运行的影响[D]. 上海:上海交通大学,2013.

[5] Minglei B, Yi D, Changzheng S. Reference of International Energy System Transformation to Energy Internet Construction in China [J]. Distributed Energy, 2017 (2):11 - 19.

[6] 张婷婷,张勤,张传雪,等. 配电网规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电子元器件应用,2010(11):56 - 59.

[7] 包广清,杨国金,杨勇,等. 基于改进遗传算法的光伏发电并网优化配置[J]. 电力建设,2014, 35(6): 13 - 17.

[8] 王涛,贺春光,周兴华,等. 基于分布式电源选址定容的配网降损方法研究[J]. 可再生能源,2020,38(9):

1246 - 1251.

[9] 张聪,许晓慧,孙海顺,等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(14):19 - 24.

[10] Ze - Heng Y, Run - Lan T, Xiao - Feng W. Radar Signal Feature Selection Based on Self - adaptive Genetic algorithm[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019 - 01.

作者简介:

郝文斌(1976),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统规划及调度运行研究;

谢明洋(1995),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化调度运行。

(收稿日期:2020 - 10 - 12)

基于深度学习模型小型化技术的输电线路智能巡检研究与应用

冯 原,王晓迪,辛 颖,韩树民
(百度在线网络技术(北京)有限公司,北京 100193)

摘 要:为了解决目前输电线路智能巡检图像采集真空期长以及效率低的问题,提出了基于深度学习模型小型化技术的电力输电线路智能巡检方案。通过飞桨的模型压缩库 PaddleSlim,将可以进行输电线路异常识别的模型小型化;再将小型化模型部署在端侧推理引擎 Paddle Lite 驱动的无源无线的移动设备中,实现了在低算力、低功耗情况下的输电线路智能巡检。方案成果在某电网公司中应用实践,验证了方案的实用性。
关键词:输电线路巡检;飞桨深度学习框架;深度学习模型小型化技术;边缘计算
中图分类号:TP391 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)06-0021-05

Research and Application of Intelligent Inspection for Transmission Lines Based on Deep Learning Model Miniaturization

Feng Yuan, Wang Xiaodi, Xin Yin, Han Shumin
(Baidu Online Network Technology Co., Ltd., Beijing 100193, China)

Abstract: A intelligent inspection method for transmission lines based on deep learning model miniaturization is proposed to solve the long vacuum period and low efficiency of image acquisition in the current intelligent inspection of transmission lines. Using the PaddleSlim, the model miniaturization tools from PaddlePaddle deep learning framework can compress the model of identification abnormal situation around transmission lines. Then the compressed model is deployed in wireless mobile devices driven by the edge-computing inference engine Paddle Lite. The proposed solution is applied in a power grid utility to verify its practicability.
Key words: transmission lines inspection; PaddlePaddle deep learning framework; deep learning model miniaturization; edge computing

0 引 言

随着城市化建设推进和生活用电需求不断增长,预计2020年中国输电线路总长将超1 590 000 km,其中全国20%的输电线路建设于无人区、山区等自然条件恶劣的地方。自然环境、恶劣天气和外力破坏都可能对输电线路造成严重损坏,引发大面积停电,造成严重的经济损失。由此可见,开展输电线路在线巡检应用研究对于避免电网事故、保障线路安全至关重要。

以往,电力巡检通常依赖人工,这一方式工作量大、劳动强度高,同时工作效率较低,巡视质量不一,

且受恶劣天气等外界因素影响,常常是事故发生了一段时间之后,才能发现并予以补救。基于深度学习和人工智能的电力输电线路巡检已经展开了诸多研究与应用。文献[1]提出利用图像自相似性进行自学习单幅图像超分辨(signal image super-resolution, SISR),在不使用任何外部训练数据库的情况下取得很好的超分辨性能,结合特征相似性有效提升电力设备状态可视化检测的精度。文献[2]基于迁移学习的小样本电力巡检图像处理方法,通过图像裁剪、翻转、旋转等数据增强技术对小样本图像进行扩充,同时采用生成对抗网络(GAN)来扩充基础样本,使用迁移学习技术将基于大规模图像数据的预训练深度卷积模型进行定制。文献[3]提出了一

套无人机巡检系统,但是仍需要将图像传回至地面站才能处理。文献[4-5]分别提出应用卷积神经网络的深度学习算法训练模型,智能识别出输电线路现场的安全隐患,建立起前端采集图像、数据无线传输、后台识别分析、隐患定向推送的智能监控系统。文献[6]深入探究了基于深度卷积神经网络 Faster-RCNN 的原理,进行高压输电线路图像识别。文献[7]使用 VGG-16 深度网络进行特征提取,并在最后一个卷积层后加入一个 ROI 池化层优化模型。文献[8-9]增加设计边缘数据处理层,在线处理部分障碍严重的巡检图像,通过图像预处理技术处理剩余巡检图像,利用图像投影提取输电线路巡检图像特征,大幅度缩减了资源和时间的消耗,但是仍没有解决模型在边缘设备侧运行的目标。

目前的研究与应用集中在部署可视化监拍装置,再结合人工巡检。随着方案的规模化推广,可有效地减少人员工作量和停电跳闸次数。但大多数设备拍照间隔均在半小时以上,采集真空期依然较长,对于短时隐患的预警及突发情况的追溯不足。换言之,时效落后、预警缺位等关键痛点,仍然未得到根本解决。火灾或工业机械造成高压电网损坏等问题,依然会不可逆地为生活生产用电带来影响,可以说是防不胜防。如果能让智能分析设备真正“智能”起来,自动识别电网设备周围的安全隐患并主动上报,这些问题就可以迎刃而解。

下面提供了一种基于深度学习模型小型化技术的电力输电线路智能巡检方案。将传统的深度学习模型基于飞桨^[10]的模型压缩库 PaddleSlim^[11]蒸馏、剪切、量化之后,在保持有效精度的情况下,极大地压缩了模型的体积与所需要的资源。之后,将小型化之后的模型部署在端侧推理引擎 Paddle Lite 中,实现了基于无源无线的移动设备进行处理分析,轻松地实现移动端模型的部署,从而完成整个输电通道智能巡检预警系统的上线部署。最后,基于所述方案开展在某电力公司进行了部署使用,验证了技术的可行性。

1 相关技术

提出的基于深度学习模型小型化技术的电力输电线路巡检研究与应用,主要涉及以下几个方面的关键技术。

1.1 PaddleSlim 模型蒸馏技术

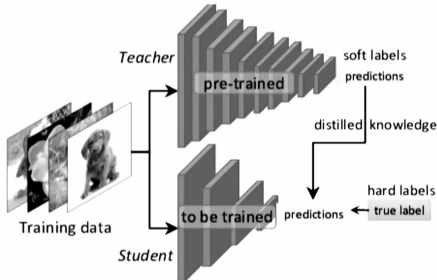


图 1 模型蒸馏原理

模型蒸馏是将复杂网络中的有用信息提取出来,迁移到一个更小的网络中去。原理见图 1。考虑到蒸馏策略对损失 loss 更敏感的情况,PaddleSlim 在提供基于传统的蒸馏方法和基于 FSP(flow of solution procedure) 蒸馏方法的同时,也支持了用户自定义 loss 的蒸馏策略。针对不同任务,用户可以根据实际情况定义自己的 loss。蒸馏方法在分类、检测等相关任务上验证精度收益明显,如表 1 所示。

1.2 PaddleSlim 模型剪裁技术

在 PaddleSlim 中,进行剪裁的主要步骤是在给定业务数据上对卷积网络进行敏感度分析,然后根据敏感度信息对网络进行剪裁。依次对单个卷积剪掉不同比例的通道数,观察在测试数据上的精度损失,便可得出一个卷积层对测试数据所代表的任务的敏感度。

将多个卷积的敏感度绘制如图 2 所示,其中,名为 conv_10 的卷积层的敏感度明显低于其它卷积层,所以可以优先剪裁该卷积层。

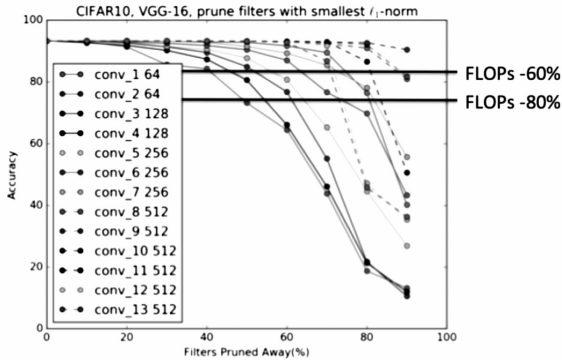


图 2 卷积层敏感度折线

PaddleSlim 新增了一系列接口辅助用户对敏感度进行计算和操作,包括敏感度的计算、合并、存储和读取。用户可以根据敏感度信息和根据敏感度信息绘制出的折线图自行选取一组合适的剪裁率,选择性的使用这些接口,对敏感度进行多机多进程的并行计算。

根据一组剪裁率对网络进行剪裁时,最大的难点就是正确处理 concat,elemenwise add 等操作,找出网络中所有与被剪卷积相关的节点。通常的做法是进行遍历,PaddleSlim 则采用了以网络节点为视角的游走的方法,此方法相当于把复杂网络的遍历任务分摊给了各个类型的网络节点,从而提升了可扩展性,理论上可以支持任意复杂的网络。

如图 3 所示,每种剪裁操作对应实现一个 walker 类,单个 walker 工作流程:

- 1)感知某个输入或输出变化的信号;
- 2)根据输入或输出的变化,调整自身状态;
- 3)根据输入或输出的变化,调整其它输入和输入的 shape;
- 4)向关联的所有 walker 发出信号。

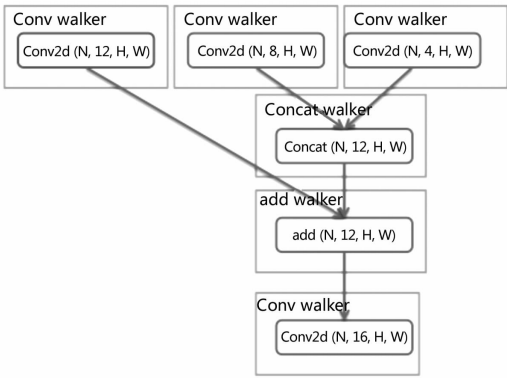


图 3 PaddleSlim 剪裁功能实现原理

除了提供剪裁接口,PaddleSlim 还将提供网络节点分组功能,支持用户自定义的卷积组合重要性分析方法,以便用户扩展探索更高级的剪裁功能。基于敏感度剪裁方法的部分实验结果如表 2 所示。

1.3 PaddleSlim 量化训练

量化训练(training aware)支持对卷积层、全联

接层、激活层、bias 等的 int8 量化,原理如图 4 所示。用户可选择只对权重进行量化存储来减小模型大小,也可选择对整个计算过程进行量化计算来加快速度。量化存储可将模型大小减小到原来的 1/4,量化计算在 ARM – RK3288 上基于 PaddleLite 可实现一倍的加速,在 P4 GPU 上基于 TensorRT 可实现 3 倍的加速。

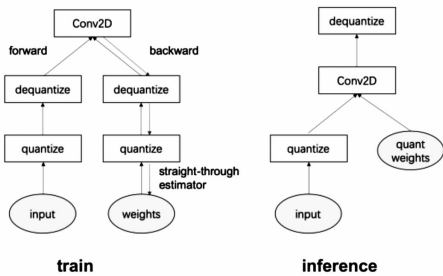


图 4 PaddleSlim 量化训练原理

1.4 Paddle Lite 端侧推理引擎

Paddle Lite 端侧推理引擎的架构设计着重考虑了对多种硬件和平台的支持,并且强化了多个硬件在一个模型中混合执行的能力,多个层面的性能优化处理,以及对端侧应用的轻量化设计。如图 5 所示,Paddle Lite 的架构设计示意图。其中,Analysis Phase 包括了 MIR(Machine IR) 相关模块,能够对原有模型的计算图针对具体的硬件列表进行算子融合、计算裁剪在内的多种优化。Execution Phase 只涉及到 Kernel 的执行,且可以单独部署,以支持极致的轻量级部署。

将基于飞桨的模型压缩库 PaddleSlim 和端侧推理引擎 Paddle Lit,将小型化之后的模型部署在无源无线的移动设备对输电线路的图像数据进行处理分析,实现基于边缘计算的输电线路智能巡检。

表 1 模型蒸馏策略部分实验结果

任务	数据集	Teacher 结构	Teacher 精度/%	Student 结构	Student 精度/%	精度收益/%
分类	ImageNet	ResNet50_vd	79.1	MobileNetV2	72.1	74.2 (+ 2.1)
检测	VOC	MobileNet – V1 – YOLOv3	82.6	ResNet34 – YOLOv3	76.2	79.0 (+ 2.8)
检测	COCO	MobileNet – V1 – YOLOv3	36.2	ResNet34 – YOLOv3	29.3	31.4 (+ 2.1)

表 2 基于敏感度的剪裁方法的部分实验结果

模型	数据集	FLOPs/%	mAP/%	模型体积/MB
MobileNet – V1 – YOLOv3	Pascal VOC	Baseline	76.20	94
MobileNet – V1 – YOLOv3	Pascal VOC	– 52.88	77.60 (+ 1.40)	31
MobileNet – V1 – YOLOv3	COCO	Baseline	29.30	95
MobileNet – V1 – YOLOv3	COCO	– 20.00	29.56(+ 0.26)	68

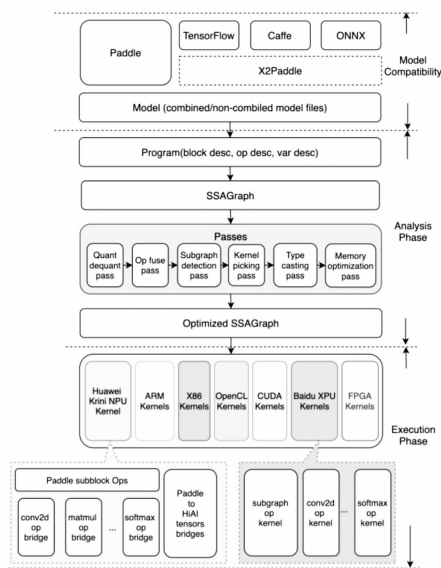


图 5 Paddle Lite 架构设计

2 深度学习模型小型化技术的电力输 电线路智能巡检方案

深度学习模型小型化技术的电力输电线路智能巡检方案中使用无源无线的移动设备进行处理分析。设备如图 6 所示。



图 6 无源无线的移动设备

这样的移动设备面临算力小、功率低的问题。为了解决这些问题,引入目标检测 one - stage 的经典方案 yolo - v3。该模型源自飞桨目标检测库 PaddleDetection。最初使用基础的 yolo - v3,在芯片上模型占用内存 360 M,运行速度是 3500 ms,而方案中存量的移动设备为 8916 芯片,只用 200 M 不到的空余内存可用来支持。为了降低使用内存、提高运算效率,引入模型压缩库 PaddleSlim 工具对模型进行裁剪、蒸馏和量化,从而达到降低模型大小、减少运算耗时。模型处理流程如图 7 所示。

PaddleSlim 通过分析各卷积层的敏感度得到各卷积核的适宜裁剪率,通过裁剪卷积层通道数来减

少卷积层中卷积核的数量,实现减小模型体积、降低模型计算复杂度的作用。通过裁剪,使得模型的占用内存大小由 360 M 降低至 130 M。

为了使得小模型的准确率不下降,使用 PaddleSlim 的蒸馏工具,对小模型进行优化。使用大模型 (resnet34 的骨架网络) 作为教师网络 teacher, mobilenet - v3 的骨架裁剪网络作为学生网络 student,在不增加计算量的情况下,提升了裁剪后的小模型的准确率。

同时使用 PaddleSlim 的量化工具,将神经网络中 32 位的全精度数据处理成 8 位或 16 位的定点数,同时结合硬件指定的乘法规则,就可以实现低内存带宽、低功耗、低计算资源占用以及低模型存储需求等。最终将模型的占用内存降低至 122 M,处理时间也由 3500 ms 降低至 2000 ms。

在模型小型化完成后,使用了端侧推理引擎 Paddle Lite 作为移动终端设备的部署平台。Paddle Lite 的高易用性、广泛的硬件支持和领先的性能,轻松实现移动端模型的部署。使用 Paddle Lite 带来的识别精度提升非常大,以吊车、塔吊等大型施工机械的识别为例,Paddle Lite 可以达到 96% 的识别准确率,而传统前端智能分析仅有 80%。另外,应用 Paddle Lite 的方案功耗仅有 0.4 W。

综上,所提方案针对输电线路巡检及线路隐患模型进行定制优化提升,在低算力、低功耗下仍有较高推理性能。采用了云边协同,可以随着云端样本更新和模型训练的迭代升级,进一步优化和适配识别算法的适用场景,不断提升识别精度,降低漏报及误报。

3 应用实例

所提方案在国网某公司进行了应用部署与实践。相比旧版的智能分析设备,所提方案可视化监拍装置拍照间隔从 0.5 h 缩短到 5 min,且实现了图像端侧的边缘智能分析,5 s 内就可以识别出吊车、导线异物、烟火、塔吊、各类施工机械等安全隐患,分析准确率超过 90%。同时模型大小缩小 60%,综合功耗也降低了 30%。最关键的是,从发现隐患到报警的速度从几小时缩短至 20 s,电力工作人员得以及时反应,避免造成生产生活的损失。

2020 年年初,某郊区发生火情,正位于国家电网高压线路下方,可视化监拍装置第一时间拍摄画

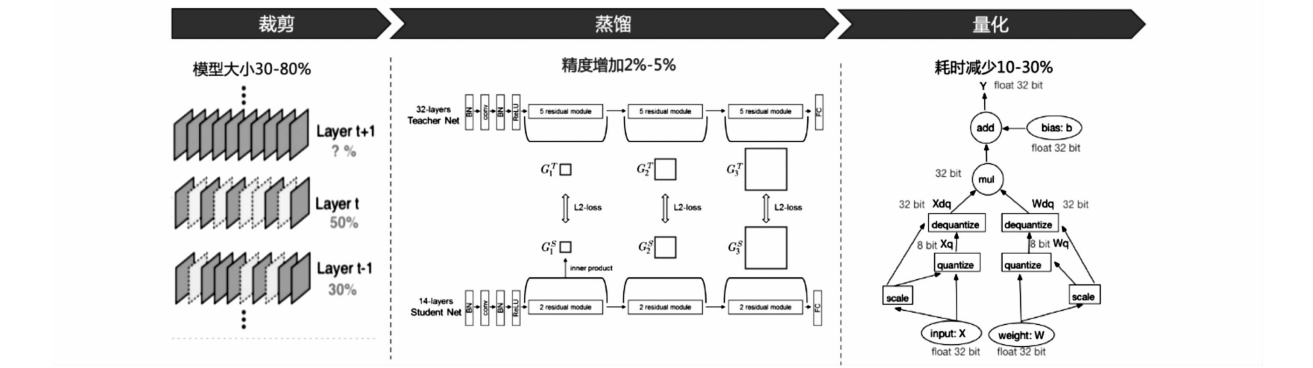


图7 基于 Paddle Lite 模型小型化设计

面并判断为安全隐患(现场情况与识别结果如图8所示),并同步向当地国网供电公司输电工区运检室的值班人员发出告警信息,值班人员立刻申请线路紧急避险,同时协调运检人员即刻赶往现场处理,一个多小时后,火情被及时扑灭,避免了一场灾难的发生,居民和工厂的用电也未受到影响。



图8 火情现场画面与识别结果

所提出的技术方案基于飞桨模型压缩库 PaddleSlim 和端侧推理引擎 Paddle Lite,很好地解决了模型难以在小内存设备中运行的问题,而且应用识别效果良好,在实践中取得了很好的效果。

4 结 语

所提出的一种使用无源无线的移动设备,基于飞桨的模型压缩库 PaddleSlim 和端侧推理引擎 Paddle Lite 的输电线路智能巡检方案,实现了将图像分析部署于边缘计算设备中,将可视化监拍装置拍照间隔从 0.5 h 缩短到 5 min,大幅度提高了输电线路智能巡检、监管的效率和质量,提高了输电线路运行安全。在某省电网公司开展的工程实践应用中,成功及时地进行火情报警,避免了电网安全事故的发生,验证了方案的实用性与高效性。随着研究与应用的不断深入,相信基于深度学习模型小型化技术的电力输电线路智能巡检方案可以更好地助力电网公司的安全管理工作,保障电网的平稳运行。

参考文献

[1] 陈智雨,巩少岩,俞学豪,等. 基于自学习超分辨率的电力线路巡检可视化[J]. 电力信息与通信技术, 2019,17(9):11-16.

[2] 陆继翔,李昊,徐康,等. 基于迁移学习的小样本输电线路巡检图像处理办法[J]. 全球能源互联网,2019,2(4):409-415.

[3] 李宁,郑仟,谢贵文,等. 基于无人机图像识别技术的输电线路缺陷检测[J]. 电子设计工程,2019,27(10):102-106.

[4] 孔汇环. 电力人工智能图像识别技术研究及在架空输电线路巡检业务中的应用[D]. 合肥:安徽大学,2019.

[5] 徐振磊,曾懿辉,郭圣,等. 基于图像识别技术的输电线路智能监控系统应用[J]. 计算机系统应用,2020,29(1):67-72.

[6] 许志君. 基于深度卷积神经网络的高压输电线路图像识别[D]. 广州:华南理工大学,2019.

[7] 张骥,余娟,汪金礼,等. 基于深度学习的输电线路外破图像识别技术[J]. 计算机系统应用,2018,27(8):176-179.

[8] 蒙黔赣,曾路. 基于移动边缘计算的电网输电线路巡检图像识别研究[J]. 环境技术,2020,38(4):173-177.

[9] 王艳如,刘海峰,李琳,等. 基于边缘智能分析的图像识别技术在输电线路在线监测中的应用[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(7):35-40.

[10] Yanjun Ma, Dianhai Yu, Tian Wu, et al. PaddlePaddle: An Open-Source Deep Learning Platform from Industrial Practice[J]. Frontiers of Data and Computing, 2019, 1(1): 105-115.

[11] Yuning Du, Chenxia Li, Ruo Guo, et al. PP-OCR: A Practical Ultra Lightweight OCR System [J]. arXiv: 2009.09941.

作者简介:

冯原(1987),男,硕士,资深研发工程师,研究方向为深度学习的目标检测、实例分割、自监督学习及其在工业巡检领域的相关技术应用。(收稿日期:2020-11-04)

基于知识图谱的电力行业与外部数据融合研究

刘锦隆¹, 马 进², 邹 双³, 宋立华⁴, 王秋琳⁴

- (1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;
2. 四川凯普顿信息技术股份有限公司, 四川 成都 610046;
3. 四川公众项目咨询管理有限公司, 四川 成都 610041;
4. 福建亿榕信息技术有限公司, 福建 福州 350001)

摘 要:针对电力行业与外部多源异构数据融合利用的难题,提出了一种基于知识图谱的内外部数据融合应用思路。通过对现有文本信息提取以及知识图谱构建主流技术路线的分析,提出优化的文本信息提取方案及知识图谱构建方案,实现对多源异构数据融合建模工作的支撑。技术研究成果在某省电力公司开展了工程项目过程管理领域风险识别试点应用,验证了所提技术方案的可行性。

关键词:多源异构数据融合;文本信息提取;知识图谱构建;企业管理风险识别

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0026-05

Research on Fusion of Electric Power Industry Data and External Data Based on Knowledge Graph

Liu Jinlong¹, Ma Jin², Zou Shuang³, Song Lihua⁴, Wang Qiulin⁴

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Sichuan Captain Information Cooperation, Chengdu 610046, Sichuan, China;
3. Sichuan Gongzhong Project Consultation Management Co. , Ltd. , Chengdu 610041, Sichuan, China;
4. Fujian Yirong Information Technology Co. , Ltd. , Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract: Aiming at the problem of fusion and utilization of electric power industry data and external multi - source heterogeneous data, an application idea of internal and external data fusion based on knowledge graph is proposed. Through the analysis of the existing text information extraction and the mainstream technology route of knowledge map construction, an optimized text information extraction scheme and knowledge map construction scheme are proposed to support the modeling work of multi - source heterogeneous data fusion. A pilot application of risk identification in the field of engineering project process management are carried out in a provincial electric power company, which verifies the feasibility of the proposed technical scheme.

Key words: multi - source heterogeneous data fusion; text information extraction; knowledge graph construction; enterprise management risk identification

0 引 言

近年来,随着数据中台的建设及电力大数据技术的充分发展,电力行业逐步实现了行业数据的逻辑集中,对各类电力信息系统产生的海量数据的采集、存储、加工、处理和全价值链的分析处理能力也得到逐步完善。基于大数据的分析已在电力企业获

得广泛应用并将更加深入,为管理提升、优化整合及服务转型提供技术支撑^[1]。

然而,互联网及政务大数据的高速发展同样导致行业外部数据的爆发式增长,来自互联网的公开数据资源逐渐成为电网企业经营风险监测、电网运行维护、供应商优选及各类决策分析中不可或缺的重要组成部分。有必要开展内外部数据融合,将电力行业内部数据与外部的互联网公开数据及社会数据中的关键元数据及信息字段提取出来,融合形成

统一的数据结构,开展数据分析及挖掘利用。

要实现内外部多源异构数据的融合,首先要解决的是融合数据的统一表示。学术界先后提供网络本体语言(web ontology language, OWL)、资源描述框架(resource description framework, RDF)等数据表示方案。2012 年,谷歌公司提出知识图谱技术,由于其兼具严谨且务实的数据表示能力以及包括图数据库、图嵌入、图挖掘等成熟的技术配套,逐步成为多源数据融合表示的主流方法,是当前将多源数据融合在产业中落地的首选。

下面提出一种基于知识图谱实现企业内外部数据融合利用的技术方法,依托文本信息提取等人工智能技术的应用,将来自互联网的、难以分析的非结构化数据转换为结构化数据,而后进一步利用知识图谱技术,实现内外部数据的融合,为各电力应用需求提供支撑。基于所述技术开展了电力营销客服领域的应用研发并在某电力公司进行了部署使用,验证了该技术的可行性。

1 相关技术现状

所提出的基于知识图谱的电力行业与外部数据融合,主要涉及以下几个方面的关键技术。

1.1 文本信息提取技术

文本信息提取,也称为命名实体抽取,是指从文本中提取出特定的实体^[2]。在实际项目中最常用的是专有命名实体提取。不同于通用命名实体,专有命名实体通常带有更多的限定,比如从电力营销退补工单中提取出“故障开始时间”,而不是所有的“时间”,所以不能采用通用命名实体的预训练模型。因此,专有命名实体通常也成为“关键信息抽取”,下面以“关键信息抽取”作为简称。

文本中关键信息的抽取,比较主流的有以下两类方案^[3-4]:

1) 基于规则的关键信息提取

基于规则的关键信息提取,是将人工观察到的待提取信息在上下文中出现的规律,固化为事先定义好的程序规则,通常使用正则表达式或基于正则表达式的扩展文本模式匹配技术。以正则表达式为例,其提供了一系列面向文本匹配的特殊语法,通过组合应用,实现对特定模式文本内容的准确提取。例如,提取电子邮件的正则表达式为 $\wedge(\backslash w) + (\backslash . \backslash w$

$+) * @ (\backslash w) + ((\backslash . \backslash w\{2,3\})\{1,3\}) \$ /$, 其中的 $\backslash w$ 代表任意字符, $\{2,3\}$ 代表出现 2 次或 3 次,该正则表达式可以识别出 xxx@xxxx.xxx 格式的电子邮件地址。正则表达式表达灵活,可以匹配几乎任何模式的文字。应用正则表达式的前提是对拟提取信息的“模式”或“规则”要非常明确。

2) 基于序列标注的方法

主流算法是序列标注算法中的条件随机场(conditional random field, CRF)算法。根据特征提取方式的不同,又可以分为人工特征工程 + CRF 以及深度学习特征提取 + CRF,后者最主流的技术路线是 BI-LSTM(双向循环长短文本文记忆神经网络) + CRF。具体过程如图 1 所示。

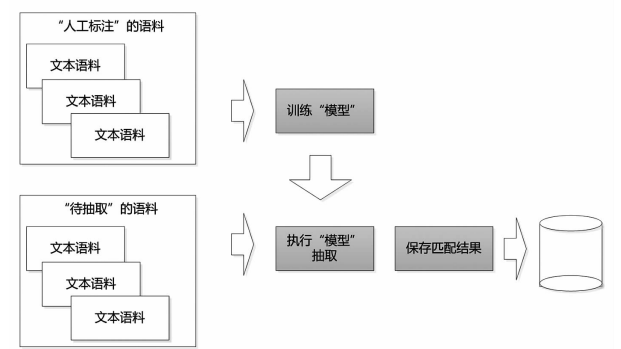


图 1 基于序列标注技术的信息抽取过程

基于“序列标注”的方法具有适应性强的优点,其不需要由专家编写规则,所以对于没有明显模式(人工很难观察到特定规则)的关键信息的抽取具有较强的抽取能力;其缺点是需要一定数量的、已经标注好的语料作为导入,这部分语料的标注工作需要人工编写。待抽取的关键信息越缺乏模式、要求抽的结果越精确,需要导入的语料就越多。另外,序列标注算法的缺点是不够稳定,其执行过程是“黑盒”(不像规则判断能够回溯),准确率不由算法决定,而主要取决于用以训练的标注语料是否和目标测试语料比较一致,所以该方法构建出的“抽取模型”常常难以判断是否能够满足业务对于抽取准确性的要求。

综上所述,现有两种文本关键信息抽取的技术路线各有以下优缺点和适用范围:

1) 基于规则的方法抽取效果稳定,且不需要实现进行人工标注,但是限定性太强,匹配的范围比较小,对于没有固定模版的文本抽取不适用;

2) 序列标注方法匹配范围较大,但需要事先准

备较多的人工标注语料,且抽取效果不稳定,准确性难以预估,对抽取准确性有比较严格要求的场景不太适用。

1.2 知识图谱技术

知识图谱是一种由节点和边组成的图数据结构,本质上是结构化的语义知识库。通过把专业业务领域中多源异构信息连接在一起,得到实体关系网络,知识图谱能够提供从“关系”的角度去分析问题的强大能力。最初,知识图谱的提出主要用于解决与实体相关的智能问答问题,目前已经广泛地应用到信息检索、数据挖掘领域。在电力行业,基于知识图谱之上的关系计算、图挖掘等能力与异常分析、静态分析、动态分析等数据挖掘方法相结合,可用于企业经营风险分析中的反欺诈、不一致性验证以及电网设备故障分析、灾害防御预警、主数据质量优化等领域。

知识图谱的构建大致可以划分为两个主要步骤。首先,结合相关领域的业务知识,将业务领域的关键概念实体及其之间的关系,描述为知识图谱本体;而后,利用实体抽取^[5]、实体消歧及链接^[6]、实体关系抽取^[7]、知识推理^[8]等技术,从实际业务数据中抽取出实体、关系相关信息字段,进行消歧融合,按照知识图谱的本体进行“填充”,获得知识图谱数据实例,进行知识图谱存储。知识图谱技术应用的主要挑战包括知识图谱构建过程自动化水平不高以及数据本身存在错误、冗余而导致的数据噪声等问题。

下面将应用知识图谱,开展电力行业数据与外部数据的知识融合,为相关业务的趋势洞察及辅助决策分析等提供数据支撑。

2 基于知识图谱的数据融合

所提出的电力行业数据与外部数据融合方案,主要依托两个步骤。首先是将外部的非结构化文本数据进行关键信息提取,将难以分析的非结构化数据转换为结构化数据;而后通过对相关领域业务实体关系的分析,设计知识图谱结构,将外部数据与电力行业结构化数据融合到知识图谱中,为下一步各类高级应用提供数据基础。下面重点介绍其中的关键环节。

2.1 文本预处理

为了开展基于非结构化文本的分析及知识图谱构建,需要对数据进行一定的预处理步骤,包括:

1)中文分词。待分析中文文本通常是连续的文字序列,不能直接进行分析,需要通过中文分词,将其切分为有意义的词。中文分词技术在信息检索等文本分析挖掘领域都有广泛应用。所提方法主要采用的是基于统计语言模型的序列标注方法,其基本原理是:首先准备标注数据,并基于人工标注的词性和统计特征,对待分词的文本进行建模与参数训练,该模型即可一定程度上描述词元素相对于上下文的分布;而后,利用模型对待提取文本中分词出现的概率进行预测,将概率最大的词作为分词分析结果。这类序列标注算法的代表是 CRF 算法。

2)构建词向量模型。计算机不能直接处理文本、图像、声音等内容,需要将其转化为数字特征后才能处理,词向量就是文本中的单词转后的计算机能够处理的数字化特征。所采用的是词嵌入(word embedding)技术。其基本过程是将文本嵌入到一个数学空间里,从而使得文本中语义相似的词用相似的向量表示。采用的具体模型是 word2vec。

2.2 文本信息提取

在第 1.1 节中,介绍了目前文本信息提取的主流技术路线。针对现有文本关键信息抽取的缺点,提出一种创新的方法,能够充分利用现有技术方法的优点,同时很大程度上规避其缺点,因而具有广泛适用性,其主要原理和步骤如下:

1)利用“规则抽取”准确性高、匹配范围小的特点,编写少量的规则,实现从大量的语料中匹配出少量但准确的抽取对象,并作为后续过程的导入。

2)将步骤 1 中获得的抽取结果,切割出一定比例(如 80%),作为导入到“自动序列标注”方法的训练语料,替代“人工标注”过程。

3)利用步骤 2 得到的训练语料,结合开源的“自动序列标注”类算法,构建“抽取模型”。

4)利用步骤 3 的结果,对步骤 2 切割出的、剩余的语料(如 20%)进行自动化抽取,并对抽取结果进行自动判断;如果模型自动判断的准确性尚未达到业务要求,则前往步骤 1,编写更多的正则表达式,形成更多的“标注语料”,作为模型训练导入;如果模型自动判断的准确性已经达到业务要求,则停止该过程,并将该模型作为文本抽取最终模型部署应用。

完整过程如图 2 所示。

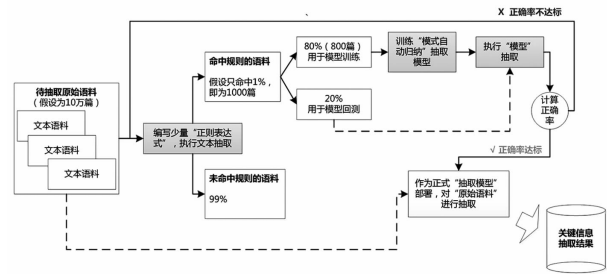


图 2 文本信息提取技术过程

相对于现有技术方案,所提方案在文本关键信息抽取问题上取得以下提升:用基于少量规则的“规则判断”替代“人工标注”获得初始标准语料,大大降低了初期人工投入;对“序列标注”模型的抽取结果进行自动化回测,确保模型的准确性符合业务需求;整个过程是可增量迭代的。如果“序列标注”训练得到的模型的抽取效果不理想,仅需要增加编写少量的规则(正则表达式),执行同样的过程循环,即可有效提升模型抽取效果,前期编写的规则不会被废弃。

2.3 知识图谱构建

完成文本信息提取后,将外部的非结构化数据转换为结构化的关键字段信息;而后,结合相关业务知识,即可开展知识图谱本体结构的设计。采用文献[9]所述的知识图谱表示方法对知识图谱进行建模。首先,根据业务域知识,参照电力公共数据模型(common information model, CIM),设计知识图谱的结构,并完成图数据库中对对应图结构的创建;而后,将文本信息提取的结果按照图谱结构组织,调用图数据库接口导入实体关系数据,即可将电力行业结构化数据及外部非结构化文本的关键字段整合到知识图谱中。

知识图谱本质上是一种图数据结构,通常采用图数据库进行存储。这里采用开源图形数据库 Neo4J 存储知识图谱。

如图 3 所示,Neo4J 为知识图谱的创建、应用提供了全过程支撑。在数据入库阶段,可采用批量导入的方式将抽取好的命名实体与实体关系导入至图形数据库中;在知识探索阶段,采用 Cypher 语言查询所有节点及关系即能获得整个知识图谱的全貌,也可搜索所需的节点及关系信息,可以为使用者提供个性化的知识服务;在应用集成阶段,采用编程的方式可以调用 Neo4J 的 RREST API 接口进一步开发知识图谱界面。

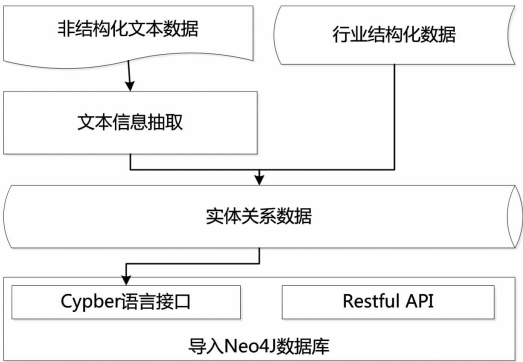


图 3 基于 Neo4J 的知识图谱存储及利用

2.4 基于知识图谱的内外部数据融合分析

通过上述步骤构建的知识图谱,能较好地实现内外部数据的融合,并为数据分析提供丰富的关系查询、计算手段。在实际应用中,可基于知识图谱这一良好的数据结构,结合业务需求与规则,开展更为丰富的多维风险防控及辅助决策。主要包括以下两种方法。

1) 基于图规则。当前,知识图谱主要以图数据库为载体。以所选用的 Neo4J 为例,其提供的 Cypher 查询语言支持丰富的实体、属性及关系计算查询能力,可以高效地执行多维条件关系查询,筛选出符合特定关系条件的实体关系集合。在执行风险分析、辅助决策时,可以将相关的业务规则转换为图规则 Cypher 语句进行查询。基于图规则的知识图谱挖掘也是目前工业界使用的主流方案。

2) 基于图神经网络。图神经网络的关键思想是将知识图谱的实体和关系转化为连续的向量空间,从而能够与深度学习算法结合,基于项目风险等样本的知识图谱表示进行建模,基于图结构的相似性识别出潜在的同类风险。图神经网络目前是知识图谱挖掘应用的研究热点,有很大的应用潜力,但由于相关的理论、算法还在持续发展完善过程中,目前还未在工业界得到广泛应用。

3 应用实例

所提出的技术方案在电网工程项目管理风险预警领域进行了实践,基于电网工程项目管理过程中涉及的电力行业及外部异构数据构建风险知识图谱,开展基于知识图谱的项目管理风险预测。

1) 数据梳理与采集

包括电力行业数据和外部数据两个部分。其

中,电力行业数据主要包括项目合同主数据、项目执行过程数据、供应商评价数据等;外部数据包括招标公告、中标公告、企业工商数据、企业失信数据等。

2)信息提取及知识图谱构建

利用第2 章提出的文本清洗及关键信息提取方法,将内外部数据中关键的实体字段提取出来,并汇集到对应的业务实体及其关系,主要数据结构如图4 所示。

A	B	C	D	E	F	G	H
	实体	属性	关系	属性	关系	属性	关系
A 招标公告							
B 中标公告							
C 供应商《公司》							
D 合同							
E 项目							
F 项目进度信息							
G 供应商不良行为信息							
H 关系							
I 说明							
J 关系							
K 关系							
L 关系							
M 关系							
N 关系							
O 关系							
P 关系							
Q 关系							
R 关系							
S 关系							
T 关系							
U 关系							
V 关系							
W 关系							
X 关系							
Y 关系							
Z 关系							

图4 电网工程管理风险知识图谱实体关系结构

编制脚本,将提取出的实体、属性及关系信息按照图数据库 Neo4J 的结构导入到知识图谱中,形成的最终知识图谱。

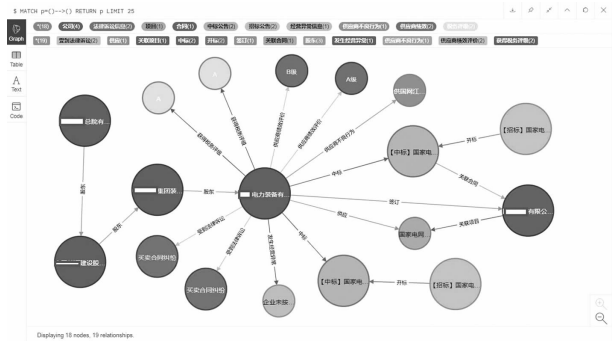


图5 工程项目过程管理领域风险知识图谱

图5 展示了所构建的知识图谱的局部内容,通过执行图查询“MATCH P = = () - - > () RETURN p LIMIT 25”获得,所以限定展示最多25 个节点。图5 中展示了公司、法律诉讼、项目、合同、招标公告、中标公告、供应商不良行为、供应商绩效等节点以及节点之间的10 类关系。项目过程环节的主要信息,如采购、招标、中标、执行等主要环节的实体、属性及关系都在风险知识图谱中进行了清晰的展示。

基于知识图谱中完整、规范的数据,结合图查询、图计算等技术,即可进行如下探查和分析:

1)关联交易合规性风险分析。从工商数据中获取电力公司与相关供应商的股权关系,维护到知识图谱中,形成“公司-公司股权关系”,与“公司-项目中标关系”“公司-项目采购关系”结合,通过图规则查询,即可筛选出同一甲方单位采购的项目中,被具有股权关系的乙方单位中标的个数、金额与比例,与设定的阈值比较,即可识别出关联交易的规模,识别是否存在关联交易风险。

2)项目执行过程管控风险。从项目执行过程中产生的不同电子文件中抽取项目关键属性(包括项目编号、项目名称、项目合同签订时间、项目开工时间、项目约定工期、项目实际完成时间等),整合到知识图谱。通过图规则查询,即可筛选出哪些项目签订时间晚于开工时间,即“倒签核查”风险;还有项目已开展的时间大于合同约定工期,即“工程延期”风险。还可以进一步将风险项目所对应的征信数据进行对比,如果在存在上述风险的同时,供应商在征信方面也存在已知风险,则相应增加其风险等级。此场景体现了知识图谱对多源数据融合的价值。

3)项目单位履约及承载力不足风险分析。提取历史中标公告、合同数据中的关键属性,如甲方、乙方、项目开始时间、项目工期、项目金额等,整合到知识图谱中,即可通过图规则汇总项目单位在一段时间内承担的项目个数、金额,将当前数据与历史同期数据比较,即可筛选出相对于历史同期承担的项目个数、金额超过一定阈值的情况,识别可能存在的“乙方承载力不足”风险,进行提前预警。

4 结 语

行业数据与外部数据的融合分析,是大数据技术向纵深领域发展的主要趋势之一。以电力行业现实需求为背景,针对外部非结构化数据与行业内部数据融合分析问题,提供基于自然语言处理的非结构化文本关系信息提取方法以及融合知识图谱的构建方法,实现支撑业务所需的多源异构数据的融合,为上层高级业务应用提供坚实的知识数据基础。在某省电力公司开展的工程项目过程管理领域风险识别试点应用,能够较好地将内外部异构数据整合到

(下转第38 页)

基于区块链的电力数据共享研究初探

余佐超,李 喆,刘浩宇

(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘 要:针对电力数据共享在实践中存在的相互信任困难、数据安全防护不足、数据一致性问题、数据追溯性差、共享过程监控不足及信息共享范围不广等诸多问题,通过深入分析当前电力数据共享的痛点、制约因素和运行机制,结合区块链 P2P 网络、密码学以及智能合约的技术特性,构建包括网络、区块链目录、认证及信任服务以及数据资源智能交换的电力数据共享模型。该模型对有效解决电力数据共享应用中的互不信任、数据所有权、共享管理、标准一致性和数据实时同步等方面的问题具有较好的理论和实际应用价值。同时,列举了部分基于区块链技术的电力数据共享应用场景,使电力数据共享在企业内部各业务部门以及电力企业与政府、金融等多元主体联合数据应用等场景下具有较强适应性,对电力企业把握数字化转型机遇、实现传统能源企业生产经营与服务升级的目标具有积极意义。

关键词:区块链;数据共享;智能合约

中图分类号:F821 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2020)06 - 0031 - 08

Research on Power Data Sharing Based on Blockchain

She Zuochao, Li Zhe, Liu Haoyu

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In the practice, there are so many problems of power data sharing, such as hard mutual trust, insufficient data security protection, data consistency issues, poor data traceability, insufficient monitoring of sharing process and limited scope of information sharing, etc. Through the in - depth analysis of pain points, constraints and operating mechanisms of the current power data sharing, and combined with the technical characteristics of the blockchain P2P network, cryptography and smart contracts, a power data sharing model is established including a network system, a blockchain catalog system, a certification and trust service system and an intelligent exchange system of data resources. The proposed model has good theoretical and practical application value for effectively solving the problems of mutual distrust, data ownership, sharing management, standard consistency and real - time data synchronization in power data sharing applications. At the same time, some application scenarios of power data sharing based on blockchain technology are listed, which makes power data sharing more adaptable in scenarios such as joint data applications of various business departments within the enterprise, or joint data applications of power companies, government and finance. In short, it is of positive significance to help power companies grasp the opportunities of digital transformation and achieve the goals of production, operation and service upgrades in traditional energy companies.

Key words:blockchain; data sharing; smart contract

0 引 言

随着国家经济、科技等方面的进步,城市治理呈现出科学化、人性化、智慧化的发展方向。近年,各大城市提出了智慧城市,旨在利用云计算、大数据、物联网、移动互联网、数字孪生等信息化、数字化的

新技术、新理念融入城市治理,通过打通城市的政务、交通、能源、制造、教育、医疗、金融等行业领域的系统、数据,推动城市资源共建共享,提升资源的运转、运用效能,优化城市管理和 服务,改善市民生活质量。为此,对交通、能源、制造、教育、医疗、金融等行业的数字化转型提出了更高要求。

电力企业作为基础能源的支撑企业,经过多年

的信息化建设及应用,逐步完成了生产、经营、管理等业务从分散向集中、线下向线上、孤岛向集成的转变,初步实现了业务线上流转,同时积累了较为丰富的数据资源。当前,电力数据作为社会经济运行“晴雨表”和“风向标”,具有实时、真实、体量大、颗粒度细的特点。政府部门、行业协会、监管机构、社会企业等众多组织机构高度关注和迫切期待电力数据的共享应用。

新冠疫情期间,电力数据在企业复产复工监测分析、商业景气指数分析、涉疫小区人员流动及防控等方面也逐渐凸显决策支撑作用。但是,电力数据在共享应用方面,仍然存在安全和信任问题以及安全保障机制、数据不一致、数据可溯性差、共享模式不确定等诸多问题。因此,依据区块链技术具有去中心化、透明化以及智能合约、可追溯性、高数据安全等优势或特点,在国内外学者针对区块链技术对合同管理、数据交易、电子政务等领域的研究、探索及实践的基础上,构建了基于区块链的电力数据共享模型,并列举了部分区块链下的电力数据共享应用场景,为进一步解决电力数据共享中存在的信任孤岛、数据所有权、标准一致性控制等问题提供新的实现路径。

1 区块链概念

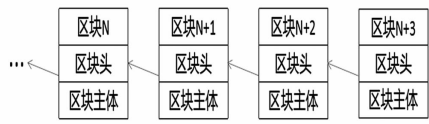
1.1 区块链的原理

1.1.1 区块链的定义

区块链是 N 个带有标识的区块通过其特定的逻辑进行有序链接形成的一种数据链条。区块,即为数据等信息的集合,存储了所有的相关信息和记录,是区块链的基本单元。为了保证区块链的可追溯性,每个区块都包含时间戳、Hash 值等信息作为唯一标识。区块由两部分组成:1) 区块头,包含有前一区块基础信息等数据,以此指向/链接到前一顺序位置的区块;2) 区块主体,记录了本区块在该链 P2P 网络中的所有数据。每个区块的区块头都存储有基础信息,以此辅助本区块链接到前一个区块,从而形成含有特定逻辑顺序的链式结构,区块链示意图 1。

1.1.2 区块链加密技术

区块链采用了非对称加密算法,以实现该链内各用户之间的相互信任。非对称加密算法以两个密



钥为基本条件:公钥和私钥。每组公开密钥与私有密钥一一对应:采用公开密钥加密数据,则需使用对应的私有密钥才能进行解密;反之,采用私有密钥加密数据,则要用对应的公开密钥才能解密其数据。

在每个区块链网络中,每个参与的用户都拥有专属的公钥和私钥,其中专属公钥广播给该网络中的所有用户,而私钥仅由用户掌握。

用户用私钥加密信息,同时在数据尾部进行数字签名;网络中的其他用户通过公钥在获取信息的同时,也明确地知道或验证了数据源,以此实现可信交互。

1.2 区块链技术的特点

区块链特殊的数据结构组织形式,使区块链技术具有 5 个主要特点:去中心化、透明化、智能合约、可追溯性以及数据安全性^[1]。

1.2.1 去中心化

区块链与传统的信息技术在实现信息系统集中化、扁平化等方面相比,最本质的区别在于“去中心化”的架构。即整个区块链网络中,所有的节点优先级相同,不存在一个或多个优先级特殊的控制中心。同时,由于数据在多个节点存储备份,使得基于区块链的数据储存具有较高的可靠性和鲁棒性。

1.2.2 透明化

透明化,部分论述中也称为数据集体维护,指整个区块链系统的运作规则是公开透明的。类似于一个分布式数据库^[2],区块链中的每个节点都记录了相同的信息,每一条信息的更新都需要多节点共同认证。通过节点间相互监督来保证数据正确性的方式,从根本上弥补了传统数据处理流程中的不足,同时更好地平衡各节点间的处理能力^[3]。

1.2.3 智能合约

智能合约是指在每个区块链内设定的规则下,各个区块能够自动执行合约签订的功能。在智能合约中,当每一个用户达到提前设定好的判定条件后,区块链系统会触发该用户强制与合约条件所属的约定用户执行合约签订并形成电子合约。这提高了合约执行的效率,更是强有力地保障了区块链内各参

与方的合约执行情况^[4]。

1.2.4 可追溯性

可追溯性,是指区块自新增到区块链中起,其各种信息会被永久存储记录,确保了所有信息的可追溯。同时,在每一笔交易中,数据尾部均绑定了交易者的秘钥信息(即数字签名),以此确保所有的数据在递传的过程中的全部信息可追溯,且不可被摧毁或篡改^[5]。

1.2.5 数据安全性

区块链中的每个区块都有唯一对应的 Hash 值,且每个区块都会记录上一个区块的 Hash 值。同时修改所有区块 Hash 值几乎是不可能的,从而保证了区块链中的数据可靠性。此外,由于区块链中每一条数据都带有对应用户唯一识别的数字签名,以此来保证数据的安全性^[6]。

2 电力企业数据共享应用的痛点及国内外数据共享研究情况

目前,电力企业通过物联感知设备、信息系统等信息化建设,逐步实现生产、经营、管理等业务从分散向集中、线下向线上、孤岛向集成的转变,具备了业务线上流转的基础条件。随着信息系统的投入使用,发电厂、供电公司、售电公司等电力企业均积累了较为丰富的数据资源。但是,电力数据在共享应用方面,仍然存在以下问题。

2.1 数据标准化问题

一方面,相关系统主要采用专业主导的建设模式进行设计开发、建设部署、运行维护,跨专业信息和数据共享需求也考虑不充分,在数据共享方面存在技术壁垒;另一方面,系统存在数据重复录入、多源维护等“数据烟囱”的客观现象,数据缺乏标准化治理,且数据在流转前的预处理、归属权在现有系统中都未实现自动标识,无法进行共享应用。

2.2 数据产品信用问题

近年来随着互联网技术的成熟和网络大规模普及,数据总量呈现出指数级增长的趋势。但在现有数据的共享过程中,缺乏自动化的监管手段,制约着数据共享的发展。如数据或数字产品在其共享过程中,无法向数据所属方提供可信的浏览次数、引用次数、使用单位等信息,导致数据在没有得到许可的情况下,被他人擅自使用。又如,数据被第三方进行篡

改后使用,对数据所属方造成不良影响,都折射出数据共享背后的信用问题。

2.3 数据追溯问题

随着数据共享应用的发展,将会出现大量的数据服务产品。以产品属性存在的数据或数字服务,需明确其所有权及责任。现有的系统架构及模式,缺乏精准的数据追溯手段。特别是对于多方参与的融合类数据应用,自动化的数据追溯手段在颗粒度、时效方面都存在技术盲区,不利于数据产品的推广。后续数据产品形成服务产业化,众多客户群体将基于其接收的数据或数字产品进行决策,如果涉及纠纷等负面事件,数据溯源的作用将被放大^[7-8]。

2.4 国内外数据共享模型的研究情况

随着数据应用的价值不断提升,国内外专家在数据共享方面开展了诸多的研究实践,推动了数据共享解决方案的不断完善。但是,针对电力数据跨公司、跨单位共享的信任问题、数据安全问题,一直没有较好的解决方案。

国际方面,早期专家为了解决数据共享问题,提出了数据空间的概念^[9],意图通过将数据以资源视图或关联的形式进行共享。经过技术的不断发展和演变,形成了各种类型的数据空间模型,通过不断优化、规范地进行数据管理和关联展示,实现数据共享。

国内方面,近年随着大数据等新技术在各个行业领域的不断发展融合,在科学数据、医疗数据共享方面,也出现了不同的数据共享模型^[10-11],分别通过区块链、语义关联等形式,实现数据共享。基于区块链技术,还有专家提出过学分管理等应用模型^[12]。在电力数据共享方面,文献[13]曾提出设计了一种数据共享平台,受传统系统架构及当时的信息技术限制,仅通过系统权限分离部分实现了数据的监护功能,但缺乏对数据操作的全过程监督,数据安全存在较大的信任问题,无法实现跨机构、跨单位数据共享的推广应用。文献[14]基于 Hadoop 架构的电力企业数据共享模型,解决了以前通过数据总线进行数据共享的扩展能力低、低效容错等问题,但在数据安全、信任机制等方面考虑不足,更适宜在具有大数据应用平台的企业内部使用。文献[15]研究了一种基于区块链技术的数据共享机制,其机制注重于在保护数据私密性的前提下进行数据共享,却未考虑在其机制中实现数据的可追溯等数据安全问题。文献[16]探索研究了基于区块链技术的数

据共享交易模型,重点研究区块链技术在电力数据防篡改、可溯源的监管机制等方面的支撑应用,以实现能源互联网下区块链技术和大数据技术的优势互补;但是,未能充分考虑区块链技术下的数据共享还具备智能合约的特性,故在其数据共享模型中缺乏共识机制、智能合约等数据共享过程中的应用模型。

为此,在国内外研究的基础上,结合上面介绍的区块链五大技术特性,围绕数据共享的信任问题、数据安全问题,同时辅以在不同单位间数据共享的智能合约需求,初步构建了一个电力数据共享模型,实现数据在数据共享链上的全生命周期审计,推动电力数据在企业内外部的数据共享。

3 电力数据共享研究

3.1 区块链的数据共享模型

电力数据共享对于提高电力企业自身管理及优化客户服务、降低单位能耗、推动政府智慧决策等方面具有重要意义。目前,电力企业积极响应国家数字化转型战略,在打破数据壁垒、建设数据中台等方面进行探索。

以推进电力数据跨单位、跨部门的共享应用为目的,搭建基于区块链的数据资源共享模型如图 2 所示。区块链模型主要有两个角色:数据的提供方/输出方和数据的接收方/使用方。无论是财政、税务、公安等政府部门,还是金融、医疗、能源等领域的企业单位等,都作为区块链的用户适用于本模型。在本区块链逻辑上,数据的提供方/输出方和数据的接收方/使用方形成 $N:N$ 的关系,组成区块链网络,链上共享着各类信息,包括政府机关、电力企业等能

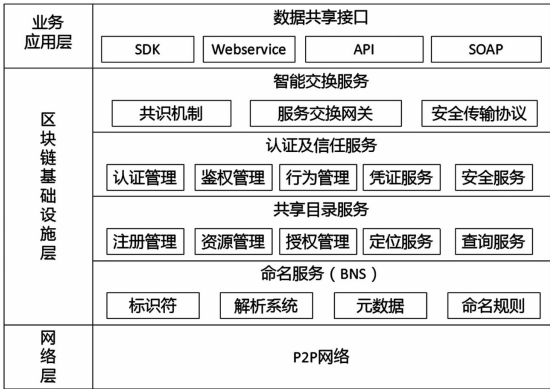


图 2 区块链的数据共享模型架构

源行业、金融机构等数据方提供的可共享的数据。

基于区块链的电力数据资源共享模型的逻辑架构,主要划分为网络层、区块链基础设施层和业务应用层。

1)网络层:P2P 网络具有去中心化的特点。网络层的核心作用是为区块链中的各个节点提供点对点(P2P)的网络服务,确保各节点的有效通信,是区块链数据共享应用的基础。该网络主要负责区块链上各节点之间的数据共享、智能合约的信息传输等功能,与每个用户或数据输出的出口进行连接。为了实现网络连接,每个节点将会在网络中广播自身的地址信息,同时将收集的其他节点的地址信息保存形成清单。地址信息主要包括 IP 地址及端口号等内容。

2)区块链基础设施层:是整个模型中的核心层,为电力数据共享中互信、互认、互操作提供基础服务能力。主要包括 4 项服务,即:区块命名服务(BNS)、共享目录服务、认证及信任服务和智能交换服务。

3)业务应用层:提供了针对电力数据共享与传输的程序或接口,用户通过部署在应用层的各种总线系统、API 接口等方式进行交互。

该模型下的区块如图 3 所示。

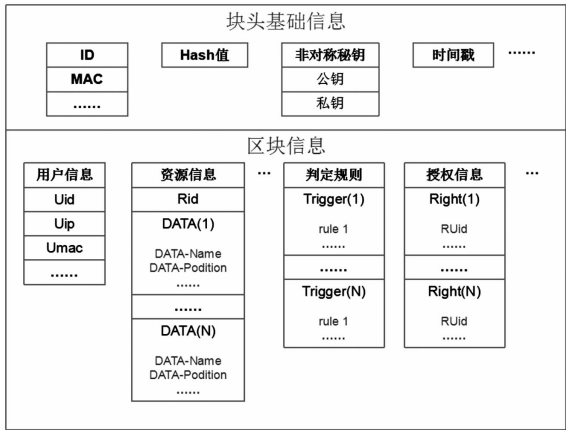


图 3 数据共享模型中的区块

由于网络层、业务应用层功能相对单一且易于理解,下面对数据共享模型架构的区块链基础设施层进行详细介绍。

3.1.1 共享区块链的命名服务(BNS)

目前,区块链中各个节点的账户、智能合约等基本信息,在链上体现为一个特定的逻辑顺序地址,该地址是每个节点/用户在本区块链网络中的唯一标识。当一个节点在建立时,通过区块链中已制定的

规则自动生成,同时匹配用户生成对应的一组私钥和公钥,用于后续的数据加密传输及数据标签。生成的公钥,将通过 P2P 网络广播给其他节点,用于数据共享的加密传输,同时作为地址信息;生成的私钥,则由该节点用户自行保存,用于数据共享过程中的数字签名。

业务应用层虽然可以直接使用区块的地址信息,但是这些地址信息数据长且编码复杂,对于用户在实际的数据共享过程中较难使用。为此,参照网络模型中的域名解析服务器(DNS),在区块链的基础设施底层搭建区块命名服务系统(BNS),使业务层基于业务逻辑就能链接到对应区块,降低区块链运行维护和使用人员管理大量区块地址的难度,让所有链上的参与者通过业务逻辑便捷地识别、定位和调用数据。数据共享过程对比如图 4 所示。

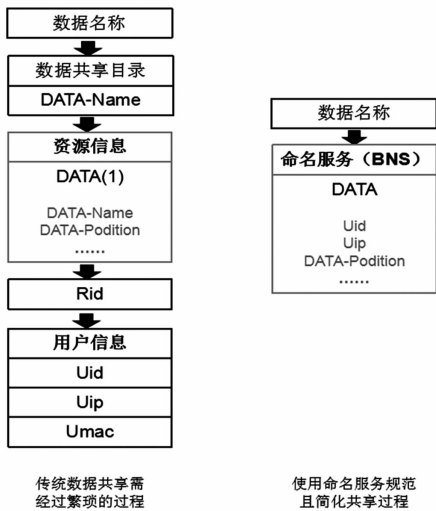


图 4 传统数据查询与 BNS 对比

3.1.2 共享目录服务

在电力数据共享中,需要一套台账来实现对区块链内所有用户及资源的统一管理,让系统运维单位、各数据节点实现对数据的全生命周期管理,同时快速知悉链上数据,这就是设计共享目录服务的初衷。台账中包括各个节点、各类数据的相关属性,还包括数据的可使用范围、数据与源系统的对应关系、数据的有效期、数据在数据库中的位置信息等等,实现对信息资源从上链到使用、从存储到资源定位等覆盖数据全生命周期的增、删、查、改功能。

通过共享目录,构建基于区块链的数据信息。每次数据交互时,均产生相关信息。其信息定义为

$$\text{共享数据} = \text{Uid} \oplus \text{T} \oplus t \oplus \text{data} \oplus \text{Hash} \cdots \oplus r$$

式中:Uid 为数据方;T 为日期,T(YY,MM,DD);t 为时间,以秒计,t {1,2,⋯,86400};data 为具体共享的数据信息;Hash 为对应时间的 hash 值;r 为具体的授权信息。

1)注册管理。类似于云平台的租户概念,每个上链的用户或者节点,需要在平台进行自动注册,在经过身份鉴别、可共享数据资源等审查机制后,加入到区块链中。注册信息包括用户或节点的基础信息、数据目录/清单、对应业务系统、数字证书等。

2)资源管理。辅助用户、区块链运维人员管理上链的资源,主要为数据资源/要素。对于单节点用户,需要维护用户资源、业务资源、数据要素等;对于建立了多个节点的用户,还需要管理节点关系等内容。其中,业务资源包括业务逻辑、业务分类、业务关系等。数据要素则指具体的数据,也就是需要共享的明细数据或者中间结果。

3)授权管理。对区块链中的数据资源进行授权管理。

4)定位服务。为区块链中的各种资源提供定位,包括物理存储位置信息、逻辑位置信息等,便于数据提供者对其数据的掌握。

5)查询服务。提供组织机构查询、用户查询、数据查询等功能。

3.1.3 认证及信任服务

以前由于数据在没有技术监控的情况下,存在数据质量差、数据操作不可监督、数据安全得不到保障等隐患,数据共享存在复杂的信任问题,导致电力企业与政府部门、外部单位和公众无法实现电力数据共享。此外,电力数据共享本身就涉及在电力企业内部的跨系统业务数据共享问题。因此,为了实现不同机构、不同系统的数字共享,先要解决数据共享的互信问题。搭建认证及信任服务,解决电力企业内部的跨系统、跨部门数据共享的信任问题,同时促进不同机构、单位在统一的认证与信任体系之下实现数据共享,以此解决数据互信的问题。认证及信任服务的主要功能如下:

1)认证管理。为用户、数据要素、信息系统提供认证服务。特别是针对系统的认证服务,通过为不同的系统提供数字证书(CA)认证,实现跨系统数据间的可信交互。

2)鉴权管理。为用户或共享模型提供权限鉴

别服务。根据权限规则匹配,对每一个用户的数据输出、数据接收操作进行权限鉴别,以指导是否进行下一步数据共享的操作。

3)行为管理。对用户的行为监控,可看成行为审计系统。

4)凭证托管。为数据的存储提供凭证,并能让每个用户都可以将凭证进行托管,便于数据共享基于智能合约的自动应用。

5)安全服务。为区块链基础设施各种安全模块提供安全服务,适配各种密码、算法以及数字证书等内容,以满足国家密码法等法规。

3.1.4 智能交换服务

在所提电力数据共享模型中,电力企业的各部门以及电力企业的上下游、合作方之间已通过区块链的P2P网络奠定了数据共享交互的基础。链上的各个参与方,通过共享目录服务、认证及信任服务,已经完成了数据交换的资源展示、定位并解决了互信问题,接下来需要搭建智能交换服务,利用区块链技术实现对数据共享过程的支撑。在数据共享前,需要共享的双方或多方达成共识,先将各方的信息资源进行标准化的描述、分类,然后形成智能合约,经链上流转达成一致后,数据经由数据交换网关和安全传输协议实现共享交互^[17]。

1)共识机制。在所提电力数据共享模型中,共识机制为各区块链节点交换数据的标准一致性、有效性校验等功能服务,促成资源交互涉及的各方就交换信息达成一致。

2)数据交换网关。负责监听和验证各个节点的数据交换、智能合约判定等请求。如果验证通过,网关将数据、合约等信息按照BNS的解析地址进行传输;如果验证不通过,直接丢弃该申请。

3)安全传输协议。在数据传输的过程中,为各方通信提供安全可靠的传输协议。

3.2 区块链的数据共享工作机制

电力企业在传统的数据共享模式下,各业务数据共享是通过系统接口对接来实现数据的交互共享,不同的系统对同一数据在语法、语义等方面都存在差异,例如电网设备信息在营销、运检等专业存在不同的命名规则及系统编号,缺乏共享的标准化处理。因此,在基于区块链的电力数据共享的服务中,部门间通过共识机制将相同设备进行统一,经过

1-1对应后,实现1-N其他属性数据的互联互通,促进跨专业数据共享。

随着业务场景对数据应用需求的不断深入,将衍生出过程数据在不同阶段的跨专业应用需求,即单类数据的多方操作。传统架构较难支撑相同数据在不同业务流程、系统中的流转校验、可追溯以及数据安全保障。通过区块链数据共享模型,利用共识机制对多方的操作进行规则约束,利用智能合约对工程进行监督和记录,利用安全传输协议保证数据传输的安全性,并在全过程对数据进行实时的一致性校验、审计,从而支撑跨层级、跨部门的信息共享和业务协同。根据所提模型设计的电力数据共享流程如图5所示。

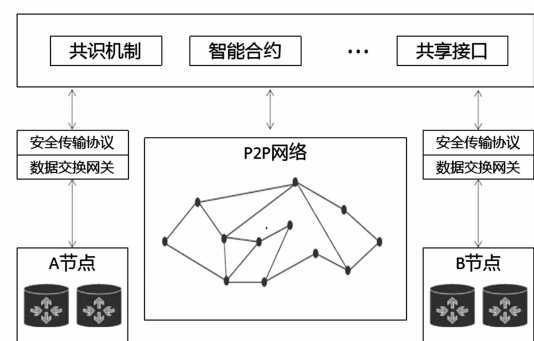


图5 电力数据共享的流程

从图5的业务流程可以看出,在数据共享的过程中,如A节点向B节点申请共享或交换信息,A节点首先通过数据交换网关将数据请求在P2P网络广播,各节点判定条件查询和验证。B节点满足条件,与A节点达成共识、生成智能合约。B节点通过数据定位、授权管理等服务向A节点进行授权。A、B双方将区块信息存储到链上。数据交换网关在校验A、B双方的权责并通过验证后,通过模型中的安全传输协议,对A、B节点的数据进行加密传输,最终实现数据共享。

4 基于区块链的电力数据共享场景

综上所述,区块链下的数据共享应用可以分为两类模式:资源共享、业务协同。

1)资源共享服务模式:支持两个及以下的业务部门之间共享数据,通过去中心化的特性实时同步各节点数据,通过透明化及智能合约特性,在规则下有记录地实现内部数据资源的授权共享。

2) 业务协同服务模式:利用智能合约在区块链上的触发生成和自动运转的特性,实现线上数据通过条件判定的形式,在多部门、多单位间安全可靠的流转。

在外部数据共享上,更多将采用业务协同的模式。各数据合作方共同组建联盟链或私有链,在创建基础区块链时明确各区块的数据资源归属、用户权限等问题。例如以下场景:链上某一个特定节点(算法模型),设定其能够查阅地产、电力相关数据,同时能够对地产及电力数据进行联合分析并生成新的数据在链上进行共享。那么对应节点在上链前,需设定相应的权限,其分别在电力节点、政务节点具有相关数据的访问和查询权限,分别计算形成分阶段的成果,再将结果反馈到本节点进行联合分析,以此实现电力企业与外部机构/单位数据共享需求。

4.1 电子合同

电力行业项目建设涉及的上下游企业或客户相对分散,且行业跨度大。传统的合同流转,涉及的审批盖章流程繁琐,甚至存在多单位均使用不同的线上合同系统,须待所有相关单位流转完毕后再共同签订成倍数量的合同,耗时长且效率低,同时还存在合同成本高、公章管控难以及合同管理不规范等问题。依托区块链技术,上下游企业共同加入联盟司法链,通过线上流转达成共识、不可篡改、具有防伪证书的电子合同,在电子合同链上实现实时、安全的合同智能管理。帮助企业高效管理合同,更能提高合同的安全性、可靠性。

4.2 电子发票

电力企业客户群体巨大,特别是企业客户,每月都需要电费发票进行税务抵扣。所以,电力营销业务涉及大量的增值税发票开具。同时,电力行业聚集了大量的技术技能工人,行业内部的交流频繁且人员培训已进入常态化,每日有大量的差旅、培训费用报销需求。在过去的发票工作中,涉及人员开票、单据粘贴、报销审核等多个环节以及繁琐的信息复核工作,且发票多处抵扣等税务风险无技术手段进行监控。基于区块链技术打造区块链电子发票,依托特定的算法约束,用户使用手机、电脑等信息化渠道完成费用的线上支付,并填写开票信息,即可完成开票、报销流程,流程中产生的税务数据若能与国家税务局共同上链,实时电子发票的内容自动链上验证、同步记录电子发票的关键要素并代替财务人员

自动完成信息填报的过程,自助生成报销凭证,实现“交易即开票,开票即报销”,减免了对公司所有外部客户、内部人员的开票、报销流程的讲解或培训,将大大节约企业内部的经营成本,更提升了电力企业的优质服务能力。此外,区块链不可篡改的特性,将保障链上的所有机构、单位、部门和人员的财务数据一致,账目数据准确完整,大幅度降低财务报销人员的检查、复核的工作量,规避人工对待账务的误操作风险(如数据录入错误等),从根本上避免虚假票据、票据重复使用等税务风险。

5 结 语

利用上述基于区块链的数据共享模型,可推动电力企业内部跨专业的数据共享,提升企业经营管理质效。同时,依托电力企业数据共享链,可带动上下游企业、数据应用相关机构或单位共同探索数据要素管理,形成数据共享应用的联盟生态,有助于行业纵向及横向的数字化发展,乃至为综合能源的区块链应用奠定基础。但是,所提模型仅针对所分析的数据共享难点,在架构层面对基于区块链技术的数据共享场景进行了设想,缺乏技术验证及真实环境的实践,是否能解决电力企业数据共享的信任问题,还需电力企业甚至信息行业随着技术发展及时间进一步证明。同时,数据跨企业共享在数据标准、数据确权等方面的问题有待解决。随着区块链等技术在电力数据共享应用方面的不断深入,在不久的将来,电力企业数据共享、数据应用会为企业管理、社会发展带来更多的便捷,为智能电网、智慧城市赋能。

参考文献

[1] 沈鑫,裴庆祺,刘雪峰. 区块链技术综述[J]. 网络与信息安全学报, 2016(11): 11-20.

[2] 谢辉,王健. 区块链技术及其应用研究[J]. 信息网络安全, 2016(9): 192-195.

[3] 张晗. 基于区块链技术的金融产业革新[J]. 中国集体经济, 2018(36): 88-90.

[4] 闫树,卿苏德,魏凯. 区块链在数据流通中的应用[J]. 大数据, 2018(1): 3-12.

[5] 余益民,赵昆,陈韬伟. 跨境电商技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2017: 259.

[6] Cui Jindong, Wang Shengwen, Xin Yechun. Research on

基于产业转移粘性电力系数对成渝双城经济圈发展的启示

魏 阳¹,刘淑宾¹,郭 飞²,梁 健¹,关 蓉¹

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
2. 国网四川彭州市供电有限责任公司,四川 彭州 611930)

摘 要:制造业结构优化是实施制造战略强国的有效途径,以电力大数据为基础,从产业和空间上研究制造业转移的“粘性”,为成渝双城经济圈优化制造业空间布局提供决策参考。从产业集中程度、产业发展阶段、产业规模程度3个维度构建产业转移电力粘性系数模型,并通过模型测算与验证,具体分析成渝双城经济圈规划四川16个地区34个细分制造业行业的产业转移四梯度区域特征、行业异质特征等,为四川成渝双城经济圈产业集群建设提供中心辐射策略、产业转型策略、产业迁移策略意见。

关键词:产业转移;产业转移粘性;成渝双城经济圈;电力数据

中图分类号:F061.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0039-04

Inspiration of Coordinated Development of Chengdu – Chongqing Economic Circle Based on Viscous Power Coefficient of Industrial Transfer

Wei Yang¹, Liu Shubin¹, Guo Fei², Liang Jian¹, Guan Rong¹

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Pengzhou Electric Power Supply Company, Pengzhou 611930, Sichuan, China)

Abstract:Regional structural adjustment is an effective way to build a strategic powerful manufacturing industry. Based on the big data of electric power, the "stickiness" of manufacturing industrial transfer is studied from the industry and the space, which is of great significance for Chengdu – Chongqing economic circle to provide the basis for optimizing the spatial distribution of manufacturing industries. It focus on the industrial concentration degree, the degree of industrial development and industrial scale to build the power ECN viscous coefficient model of industrial transfer. And through the model calculation and verification, the regional industry characteristics, industry heterogeneous characteristics etc. are analyzed for 16 regions and 34 subdivided manufacturing industrial segments of industrial transfer in Chengdu – Chongqing economic circle. It provides suggestions on the construction of industrial clusters in Chengdu – Chongqing economic circle for Sichuan, including the strategies of central radiation, industrial transformation and industrial migration.

Key words: industrial transfer; industrial transfer stickiness; Chengdu – Chongqing economic circle; power data

0 引 言

当前,制造强国战略已然成为当前中国经济结构调整转型期的广泛共识。《中国制造2025》明确要求深入制造业结构性调整。制造业转型升级不仅仅是提高个体企业的生产效率,而更有效的途径是从区域经济统筹发展角度上推进制

造业区域结构调整,通过产业梯度转移带动技术扩散,升级区域产业集群。

成渝双城经济圈建设中,产业转型升级是重要抓手,推进产业协作是成渝地区双城经济圈建设的重中之重。制造业产业转移粘性电力系数测算及分析,对成渝双城经济圈整合优势产业,统筹产业转移,建设具有比较优势的产业生态圈,创新产业链具有重要启示。

1 产业转移粘性内涵

随着产业专业化程度的加深、成熟度的不断提高以及区域市场环境的变化,迫使企业需要以区域间的产业分工和合作,谋求产业结构优化和纵深发展。由此产生的产业空间布局的优化调整,便是产业转移。随着产业转移政策的实施,产业转移粘性问题的逐渐凸显并引起学者们的关注。文献[1]认为产业粘性是产业在原产地由产业内外部因素导致产业转移阻力的现象。文献[2]从产业梯度推移的角度出发,认为产业粘性是对产业梯度推移进程的延缓现象。文献[3]将产业转移粘性与产业内部因素、市场及政策因素的关系联系起来定义产业转移粘性。学术界从产业投资吸引力、产业要素迁移滞缓、违背梯度推移概念、产业空间调整优化的阻力等方面对产业转移粘性内涵、成因进行了研究,但产业转移粘性概念并未统一,关于产业转移粘性的测算方法较少。

下面基于“产业转移”和“粘性”深度剖析产业转移粘性内涵。“产业转移”^[4]本质是产业的空间扩张或迁移,一方面表现为生产要素的跨区域流动;另一方面表现为产业产量或产值的空间变化。而“粘性”则体现为产业在原产地形成的关联性而对转移产生的阻力,表现为各生产要素及经济指标的变动和调整不及时。因此,“产业转移粘性”^[5]其实是产业对区域的依附度和区域对产业的吸引力,是由推动与阻碍产业转移的两种力量作用而成的结果。制造业的用电数据与经济指标具有高度相关性,且电力数据比经济指数对行业变化表现得更为敏感、实时,可避免由于经济指标滞后导致的分析不准确现象。因此,利用电力大数据构建制造业产业转移粘性电力指数对研究产业转移粘性具有可行性和实用性。

2 制造业产业转移粘性电力系数模型构建

产业转移是一项复杂性工程,受区域间劳动力成本、盈利状况、市场环境、产业集聚规模效应、政府政策差异等多方面影响,给产业转移粘性测算带来一定困难。从产业外在发展特征与产业粘性关系出

发进行分析,包括产业集中化程度、产业成长阶段、产业规模化程度 3 个维度。

产业集中程度体现为一个地区产业专业程度,一般产业集中度越高,地区对产业的转移粘性越高。产业集中电力因子用 L_{QR} 表示,通过产业用电量与地区全体产业相对占比表示。

产业成长阶段体现为地区产业发展成熟度,是处于初始期、成长期还是稳定期等,一般产业越成熟越稳定,其产业转移粘性越高。产业成长电力因子用 I_{CR} 表示,可通过产业用电量增长速率的横向相对比较体现成长速率差异。

产业规模程度体现为地区产业当量大小,一般产业规模越大,其产业转移粘性越高。产业规模电力因子用 I_{GR} 表示,可通过产业用电量规模的横向比较体现产业规模差异。

根据上述分析,产业转移电力粘性因子用 E_{NC} 表示,构建 i 地区 j 产业的 E_{NCij} 具体模型如下:

$$E_{NCij} = f_0^{100} \left(\frac{L_{QRij} \times I_{CRij}}{I_{GRij}} \right)$$

$$\left\{ \begin{aligned} L_{QRij} &= \frac{e_{ij}}{E_i} \div \frac{\sum_{i=1}^n e_{ij}}{\sum_{i=1}^n E_i} \\ I_{CRij} &= \frac{e_{ij}}{\sum_{i=1}^n e_{ij}} \\ I_{GRij} &= f_0^1 \left(\frac{n \times \nabla e_{ij}}{\sum_{i=1}^n \nabla e_{ij}} \right) \end{aligned} \right.$$

式中: e_{ij} 表示 i 地区 j 产业近 3 年平均用电总量; E_i 表示 i 地区近 3 年平均全行业用电总量; n 为所研究地区的数量; ∇e_{ij} 表示 i 地区 j 行业近 3 年平均增长率; f_0^1 为归一化处理用于消除增长率为负数带来计算上的误差; f_0^{100} 为转换为 0 ~ 100 区间的数值,优化数据的表现形式。

3 制造业产业转移粘性电力系数测算分析

3.1 制造业产业转移粘性电力系数区域比较

以 2017—2019 年四川省成渝双城经济圈 16 个地区的制造业用电数据计算制造业的产业集中电力因子、产业规模电力因子以及产业成长电力因子,计

算 16 个地市的制造业转移粘性电力系数。具体如图 1 所示。

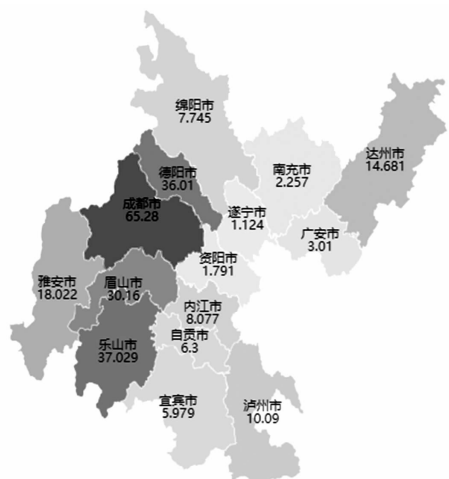


图 1 产业粘性电力系数区域分布

通过地区间的比较,产业转移存在梯度性,这为产业转移方向提供了依据。其中:成都属于第一梯度,制造业转移粘性电力系数达 65.280;乐山、德阳、眉山属于第二梯度。因此政府可加强措施,促进在第一、第二梯度内对产业间进行协调发展,实现制造业在成都、乐山、德阳、眉山地区内的建设产业生态圈,或推进产业向第三梯度、第四梯度地区进行转移。

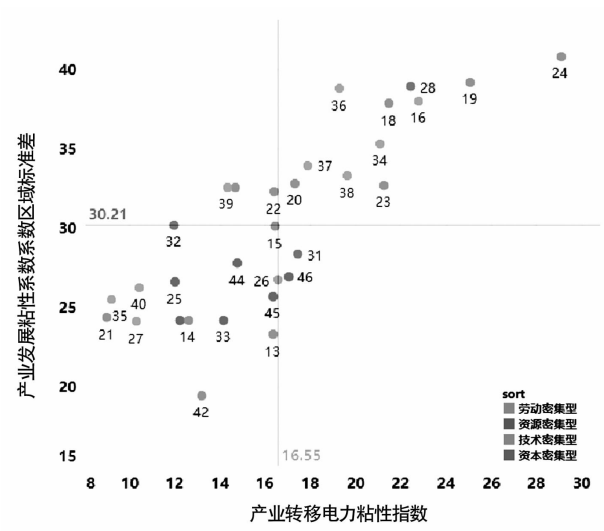
雅安、达州、泸州属于第三梯度;内江、天府新区、绵阳、自贡、宜宾、广安、南充、资阳、遂宁属于第四梯度。第三梯度、第四梯度地区可适度承接第一、第二梯度地区的转移产业,有序而缓慢实现梯度间平衡发展。

3.2 制造业细分行业产业转移粘性分析

产业区域转移具有异质性,不同行业的转移粘性具有明显差异。下面主要分析制造业以及电力、热力、燃气及水的生产供应业两大行业的 34 个细分行业,并将 34 个细分行业划分为劳动密集型、技术密集型、资本密集型、资源密集型^[6]等 4 个类型。计算各细分行业的产业转移电力粘性系数以及产业转移电力粘性系数区域标准差,见图 2,用以分析不同细分产业、不同类型属性产业的特征与表现。

根据图 2 可见,不同的行业属性、不同细分行业的产业转移电力粘性系数具有明显差异。

对于右上角区域的行业,属于产业转移电力粘性系数区域标准差偏高且产业转移粘性系数偏高的行业,表明该类产业区域间分布差异大且产业转移阻力大。这类行业则可通过强化产业合作、建立产



注 1:纺织业(17)/非金属矿物制品业(30)与其他行业差异大,未在图上显示。

图 2 产业转移电力粘性系数与标准差的关系

业协同生态圈等方式,实现产业整体发展。

对于左下角区域的行业,属于产业转移电力粘性系数区域标准差偏低且产业转移粘性系数低的行业,说明区域间发展同质化程度较高但区域产业转移阻力小。这类行业产业转移,可通过打造产业集群,弱化产业间竞争,提升产业竞争力。

其中,纺织业属于产业转移粘性过度行业,产业集聚程度加深导致产业生产效率降低,相关部门应积极调整该产业空间布局,逐步弱化产业集聚程度对产业生产率的负面影响,优化产业发展。

非金属制造业属于产业转移粘性非常低的行业,产业集聚的不断加深,有助于产业规模经济效益。对于此类产业,相关机构应扩大产业规模,发挥产业集聚边际效用递增的作用,促进行业规模经济的形成。

产业转移粘性适度的行业,随着产业聚集程度的加深,产业生产效率也不断提高,但产业集聚程度对生产效率提高的边际效应递减。因此,对于该类产业应将其集聚规模控制在一个合理区间,通过提升行业技术,推动产业可持续优化发展。

3.3 细分行业产业分地区的转移粘性分析

基于正态分布原理,将产业转移电力粘性系数按照 5% 分位数、平均值、95% 分位数划分了产业转移梯度分布区间:离散区、适度区 I、适度区 II、聚集过度区。

小于 5% 分位数的地区为离散区,产业转移粘性特别低,表明发展产业集群的基础非常薄弱。大

于95%分位数地区为过度区,产业粘性极高,表明在这类地区该产业聚集,可能存在过于拥挤的情况,应合理对产业进行转移。在5%分位数和95%分位数区间分布的地区为适度区,可根据产业属性、特征等合理进行转移或协同。

通过分析,确定了34个细分行业产业转移离散区、适度区Ⅰ、适度区Ⅱ、过度区所包括的地区范围。其中,34个行业在离散区中出现次数最多的地区是遂宁(9次)、达州(6次)、资阳(6次)、雅安(5次),过度区中出现次数最多是成都,达21次,占62%。

根据细分行业的各区域产业转移粘性梯度分布,结合行业的类型属性、地区功能定位,可明确具体行业产业协同或迁徙方向。

如纺织服装、服饰业,皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业,文教、工美、体育和娱乐用品制造业,纺织业等劳动密集型产业可从成都、绵阳、德阳这些地区向雅安、内江、资阳、南充等地区转移,降低成都、绵阳、德阳这些地区的劳动密集型产业转移粘性,进一步提高雅安、内江、资阳、南充劳动密集型产业的粘性。

非金属矿物制品业可选择产业转移电力粘性系数高的广安、乐山地区发展产业集群。废弃资源综合利用业,可选择产业转移电力粘性系数高的内江发展产业集群。

通用设备制造业,铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业,电气机械和器材制造业等技术密集型产业在成都、绵阳、德阳地区的产业转移粘性较高,在其他地区均较低,该类地区技术密集型产业可从提高生产效率角度进行升级转型。

4 结 语

成渝双城经济圈四川地区制造业整体产业布局转型提档,既需要助力产业规模效应的适度产业集聚战略,也需要优化产业结构,提升生产效率的产业调整战略。通过制造业产业转移粘性电力系数的分析,可得到推动成渝双城经济圈四川地区产业发展的3点启示:

1)加强成都核心城市辐射功能。成都地区制造业的产业粘性系数远远高于其他地区,天然对其

他地区产业有吸附效应。在保障核心城市高质量发展的同时,关键是发挥成都作为核心城市的辐射作用,加强与乐山、绵阳、德阳地区制造业的互动协同,建立制造业生态圈,弱化同质化竞争。

2)引导推进产业转移稳定有序。以成渝双城经济圈各地区功能定位为导向,以产业转移电力粘性系数为制造业细分行业转移的依据,根据不同行业的属性和地区的实际状况,因地制宜优化产业布局,推动生产要素均衡流动,向有利于经济增长方式的结构转变。

3)明确亟需转型升级产业对象。从具体细分产业上,如通用设备制造业,铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业,电气机械和器材制造业等技术密集型产业在成都、绵阳、德阳地区的产业转移粘性较高,该类地区技术密集型产业可从提高生产效率角度进行升级转型。

所监测分析的成渝双城经济圈四川地区制造业产业转移粘性结果,为产业空间布局的动态调整提供支撑,助力于相关部门优化产业调整政策。在后续研究中,将继续深入研究产业转移粘性电力系数在不同地域空间和宏观政策下的协同性和适应性,为产业集群和生态链发展研究提供思路。

参考文献

[1] 程必定. 产业转移“粘性”及安徽的战略选择[J]. 江淮论坛,2009(5):17-21.

[2] 李鹤虎,段万春. 梯度推移理论创新——虹吸理论[J]. 经济问题探索,2010(11):55-61.

[3] 杜传忠,韩元军,张宪国. 我国区际产业转移的动力及粘性分析[J]. 江西社会科学,2012(5):5-11.

[4] 沈能,赵增耀,周晶晶. 生产要素拥挤与最优集聚度识别——行业异质的视角[J]. 中国工业经济,2014(5):84-95.

[5] 姜宁. 我国产业梯度转移粘性问题的实证研究[D]. 济南:山东大学,2014.

[6] 汪彩君. 过度集聚、要素拥挤与产业转移研究[D]. 浙江:浙江工业大学,2011.

作者简介:

魏 阳(1987),女,硕士,工程师,从事企业运营监控、数据挖掘应用相关工作。

(收稿日期:2020-10-21)

地址模糊匹配在电力企业应用中的研究与实践

刘浩宇,李 喆,余佐超,应卓君,王 薇,赵志浩
(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘要:地址识别作为大数据应用中自然语言处理的重要场景之一,是重要且极具实用价值的技术手段。目前电力企业正在积极推进大数据应用演进进程,使用大数据技术为电力企业发展赋能的需求也愈加旺盛。而电力企业众多数据资产中的地址信息,作为联系设备—客户—企业的核心字段,其分析挖掘价值极高。首先,针对电力企业常见地址信息涉及的业务应用场景进行分析,瞄准需求要点,对核心应用场景的地址识别需求制定提取匹配方法;然后,基于数据样本对地址识别方法的准确性及运行速度进行研究分析,比对算法的实用性;最后,对算法进行了总结,并对未来算法的提升方式进行展望,以供电力企业相关业务在实际应用中进行参考。

关键词:自然语言处理;模糊匹配;地址识别;电力企业;大数据

中图分类号:TM76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0043-06

Research and Practice of Address Fuzzy Matching in Application of Power Enterprise

Liu Haoyu, Li Zhe, She Zuochao, Ying Zhuojun, Wang Wei, Zhao Zhihao
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Address recognition, as one of the important scenarios of natural language processing in big data applications, is an important and highly practical technical means. At present, power enterprises are actively promoting the evolution of big data applications, and the demand of using big data technology to empower the development of power enterprises is also increasing. The address information in many data assets of power enterprises, as the core field of connecting equipment – customer – enterprise, is extremely valuable for analysis and mining. The common address information application scenarios of power enterprises are first analyzed, and aiming at the key points, the extracting and matching methods are formulated for the address recognition requirements of the core application scenes. And based on the data samples, the accuracy and operating speed of the address recognition methods are studied and analyzed, and the practicability of the algorithms is compared. Finally, the algorithms are summarized and the future algorithm improvement methods are prospected, which gives a reference for the practical application to the related businesses of power enterprises.

Key words:natural language processing; fuzzy matching; address recognition; power enterprises; big data

0 引言

各项研究证据显示人类的活动信息基本与地理位置相关。在电力企业各项业务中同样如此,用电地址、报修工单、设备位置等等,地理位置均是其核心字段。目前常规模式基本都是人工提取各类信息中所含地址字段进行匹配,对于电力企业的相关工作人员均是较为繁琐、耗时的一项工作。如果能快

速准确地识别相关内部业务和客户诉求中所含的地理位置信息,可以很好地辅助电力企业快速响应各方需求、提高服务能力、提升数据资产价值。

下面旨在探索实践如何自动快速准确地进行地理位置匹配,以各类常见信息中地理位置为基础,实现地理位置的自动提取与匹配,并基于 Python 编写多种地址提取匹配方法,综合考量匹配准确率及运行速度两类指标,探索较为适用于电力企业的方法。

1 研究背景

1.1 技术概述

最早的自然语言理解方面的研究工作是机器翻译。由美国人威弗于1949年首先提出了机器翻译设计方案。20世纪60年代,国外对机器翻译曾有大规模的研究工作,耗费了巨额费用;但当时人们显然是低估了自然语言的复杂性,且语言处理的理论和技术均不成熟,机器翻译整体进展缓慢。当时的主要做法为存储两种语言的单词、短语对应制作大辞典,翻译时一一对应,技术上只是调整语言的同条顺序,但面对日常语义交流时,表现较差。

现在自然语言处理已经是计算机科学领域与人工智能领域中的一个重要方向。其研究的是如何实现人与计算机之间用自然语言进行有效通信的方法。自然语言处理本身为语言学、计算机科学、数学于一体。因此,自然语言处理的研究将涉及人们日常使用的语言。

例如,对于中文文本来说,其形式上由汉字(包括标点符号等)组成的一个字符串。字可组成词,词可组成词组,词组可组成句子,进而由一些句子组成段、节、章、篇。无论在上述各种层次的字(符)、词、词组、句子、段中,同样的词语在各层级之间都存在着歧义和多义现象,即形式上一样的一段字符串,在不同的场景或不同的语境下,可以理解成不同的词串、词组串等^[1]。一般情况下,它们中的大多数都是可以根据相应的语境和场景的规定而得到解决的。也就是说,对于个人来说,并不造成无法理解的情况,这就是常见的联系上下文分析。但是为了正确理解语义,是需要基于极其大量的基础常识进行推理得出。而如何将这些基础常识较完整地进行收集和整理,又如何通过合适的方式,将其又快又好地存入计算机当中去,并且如何合理地利用它们来解析语义,都是工作量巨大且非常困难的工作。这不是一个在短时间内可以完成的工作,还有待长期的、系统的探索专研。

目前自然语言处理在应用领域包括“语言分词”“语义分析”“语言翻译”等等^[2],而模糊识别是该领域重要的方法思路之一,其指在大量复杂的信息中,识别出有用的部份,即对接收的信息与以往的记忆和经验进行有关联认识,剔除无关的信息。无

论是什么对象(语言、文字、图像等),其需要识别的核心点均具备自己特有的关键特征^[3],对于中文地址来说,它的核心特征则是地址中的关键字,比如“市”“区”“街道”等等,常见方法则是基于关键字有效定位文章中地址位置,并基于分词、比对、校验等方式对地址模拟匹配,实现文章地址信息的提取^[4]。

1.2 电力企业与地址相关业务现状

电力企业与地址相关的业务包括客户新装、报修以及设备安装管理等方面,除了目前地理位置信息存在不准确、不规范等问题外,还存在地址提取匹配耗时长、工作量大等问题。从场景应用上来看大致可以分为以下3类场景:

1)电力企业对内的检修、巡视、停电等工作情况录入。例如输电、变电等专业开展设备运行维护时,其当日工作情况需录入系统,特别是在发生故障时需在系统内录入故障内容(包括故障原因、故障地点等),该内容主要为人工填写。

2)电力企业对外的客户诉求处理。例如95598接单是根据客户诉求,形成工单明细内容,在工单派发前,需拟为工单标准格式,如图1所示,需要人工完善所属辖区、地址信息等内容。

供电单位	所属区县	业务类型	业务子类型	受理时间	处理状态	主叫号码	联系地址	联系人	联系电话	受理人	受理内容	处理部门
城北客户服务中心	南江	故障报修	居民客户内部故障	2017-01-31 23:37:46	归档		四川南江 2166号				【早上川地居民客户下派故障】2017-01-31 22:03分接报100元,维修下派失败,原因是线路不在该片区,原由南江中安处处理;GPS信号较弱或不稳定;2、GPS模块故障;3、SIM卡故障、欠费等。	

图1 客户诉求工单样例

3)大数据应用,各专业管理部门根据专业管理需求,开展大数据分析,很多场景都需要结合地址信息开展相关工作。例如运检需要根据设备故障位置,制定下一步配电网可靠性提升方案;营销部需要根据投诉内容,针对性开展营销服务优质提升等。如果在没有准确地址信息的情况下,需要基于故障内容信息或者不规范的地址信息,通过人工观察定位的方式梳理地理位置,如果工作量较大,可能会一定程度上舍弃数据分析的颗粒度。

前两种应用场景是工作流程中必须涉及的工作内容,虽然看似简单,但是大量且固化的工作也在不经意地耗去了庞大的人力资源,而第3种情况,更是

会制约电力企业的精益化管理发展。

除此上诉 3 类场景之外,目前随着电力企业大数据进程的不断演进,针对地址信息进行的数据挖掘也在不断增多,因此现在亟需高效、准确的地址识别方法。

1.3 国内外研究现状

目前国内外在地址模糊匹配上,受制于语言的不同,国外项目课题难以直接应用。同时相关研究的主要内容是研究针对算法的准确性进行不断提升,而算法的复杂决定了其在运行上较为缓慢,并且有关算法较为针对特定场景及内容,不代表能直接在电力企业相关场景应用。下面将在各项主流方法的基础上,探索实践较为适用电力企业应用场景的地址匹配方法。

2 数据准备

2.1 文章信息准备

中文地址信息一般为“省 - 市 - 县 - 区 - 街道 - 街道号”,而目前日常经常接触的文章内容,主要包括以下几类样例:

1) 网页信息填报类型。其表现为格式相对规范,基本不会出现多个地址信息,识别地址信息位置标志物明显,如图 2 所示。

基本信息		
服务对象	自然人	办件类型
法定办结时限	30 法定办结时限说明	法定办结时限单位
承诺办结时限	5	承诺办结时限单位
审批结果	审批结果类型	审批结果名称
	证照	律师执业证
是否收费	否	办理形式
通办范围	无	特殊环节 (特别程序)
办理地点	南宁市柳城街道著名的柳小路6号	

图 2 网页信息填报样例

2) 信息公开类型。一般为通知、公告,格式内容较为正式,地址信息较为清晰,但可能出现多个地址^[5]。信息公开样例如图 3 所示。

3) 文章信息类。一般为新闻报道、客户诉求等等,文字内容较多,地址信息不规范,存在多个地址信息等,该类情况相对较为复杂。例如“今日,在成都武侯区将进行计划检修停电,停电范围覆盖长寿路、桐梓林小区、成都中医院、四川省体育馆……成都晚报 12:00 发布消息”。

经过前期收集整理,收集文章地址信息 500 余

2020年疫情期开放时间调整详情

调整日期: 从5月16日(本周六)开始

开放时间: 调整为9:30-19:00

购票地点: 广州风景秀丽的海珠中路33号

图源: 本地宝 酷吧

部分游玩项目恢复开放:

怒族旋转屋 (伍王府项目恢复开放, 惊奇又刺激的怒族旋转屋等你来探险, 在伍王府数码!

*具体演出时间以现场公告为准

温馨提示:

1、疫情期间, 游客入园时须出示本人身份证等有效身份证件(与购票姓名相同);

2、进入景区时排队或游玩时, 请与他人保持1.5米距离, 服从现场工作人员指导;

3、若有发热、咳嗽等身体不适, 请及时告知景区工作人员;

小编提示: 微信搜索公众号【广州生活宝典

图 3 信息公开样例

条,整合了所述 3 种常见情况,使得匹配样本尽可能贴近真实应用场景,以确保算法在实际应用具有可操作性及实用性。

2.2 地址库信息准备

通过线上线下数据收集的方式,收集地址库 63 万条,在地址库样本范围上确保完全覆盖所需匹配的文章地址信息,并且加入相似、相近地址,进一步接近实际场景应用情况。地址库数据如图 4 所示。

province	city	district	township	street	street_num	locationx	locationy
安徽省	阜阳市	界首市	西城街道	界光路	561号	115.3678097	33.27176266
安徽省	阜阳市	颍州区	文峰街道	临泉路	428号	115.8003975	32.8978435
安徽省	阜阳市	颍州区	文峰街道	炮楼街	51号	115.811045	32.90747175
安徽省	阜阳市	颍州区	文峰街道	颍州中路	99号	115.8251926	32.8943316
安徽省	阜阳市	颍州区	文峰街道	清河东路	571-3号	115.8110317	32.89035383
安徽省	阜阳市	临泉县	城关镇	光明北路	199号	115.263916	33.05625
安徽省	阜阳市	阜南县	鹿城镇	谷河东路	42号	115.5918	32.638973
安徽省	阜阳市	颍泉区	中市街道	北京中路	103号	115.8297977	32.813523
安徽省	阜阳市	颍泉区	中市街道	慧湖路	115号	115.8202989	32.8962381
安徽省	阜阳市	阜南县	鹿城镇	谷河东路	113号	115.589262	32.636218
安徽省	阜阳市	颍泉区	中市街道	青年路	338号	115.833522	32.9029845
安徽省	阜阳市	颍州区	阜阳开发区京九街道	新安大道	297号	115.8487543	32.8615465
安徽省	阜阳市	颍州区	阜阳开发区京九街道	新安大道	927号	115.861156	32.849521
安徽省	阜阳市	颍州区	阜阳开发区京九街道	新安大道	829号	115.8492254	32.84022806
安徽省	阜阳市	临泉县	城关镇	解放路	45号	115.2541064	33.0612256
安徽省	阜阳市	界首市	东城街道	东升路	91号	115.3775075	33.26317216
安徽省	阜阳市	颍州区	鼓楼街道	一人巷商业街	4号	115.8123067	32.90026233
安徽省	阜阳市	颍州区	鼓楼街道	解放中路	35号	115.8139107	32.805427
安徽省	阜阳市	颍州区	文峰街道	中路	12号	115.820033	32.888002
安徽省	阜阳市	太和县	城关镇	环城南路	2号楼	115.6239265	33.16294683

备注:本次算法测试运行配置为 2.6 GHz/CPU,内存 16GB。根据数据保密有关要求,地址库数据仅截图展示,同时此处展示的坐标已做调整,非真实坐标,但不会影响所研究内容。

图 4 地址库数据展示

3 算法思路及实现

3.1 方案 1:地址信息搜索加权

经验证直接利用正则表达式制定提取样式^[6],难以实现地址的提取,特别是街道号,因此形成思路如下:将文章内容直接纳入地址库进行匹配,对应地址库每一行的 6 个字段,匹配上的字段为 1,没有匹配上的为 0,加总后除以 6 即为该地址的匹配率。最后找到匹配率最高的地址作为文章的匹配地址。基础代码实现如下:

数据读取:将地址库数据读入 Jupyter 运行环境,如图 5 所示。



图5 数据读取

逐一搜索加权:将 500 篇文章信息循环进行读取,并逐一将地址库字段纳入文章中进行比对,如果该字段在文章出现则该地址加 1,并选出数值最大的地址信息作为匹配结果,代码如下图 6 所示。

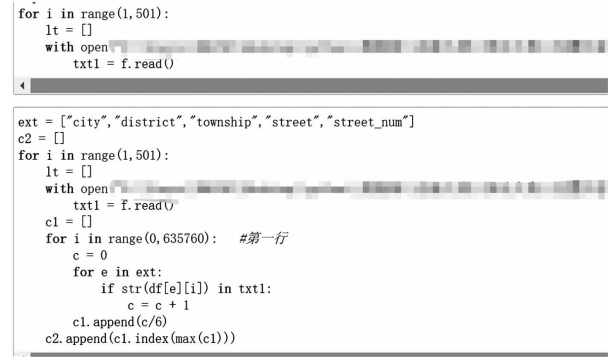


图6 地址搜索加权实现

结果比对:循环抽取测试结果与正确答案表进行比对验证,计算正确结果数量以及算法准确率,代码实现及运行结果详见图 7。

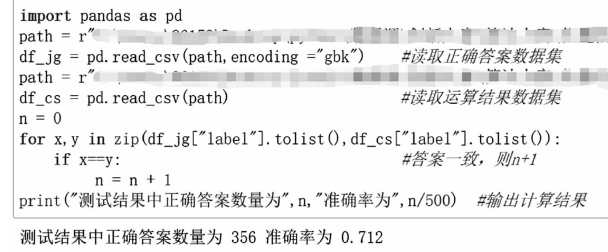


图7 方案1 计算结果验证

从计算结果上来看,该方法的准确率为 71.21%,但从计算速度上,500 条文章完成所有匹配耗时为 4 h,平均每条耗时约 0.5 min,完全无法达到实用水平。

3.2 方案 2:模拟人工地址筛查

经过前一种方法的实验,准确率上虽然基本能够达到优化条件,但是运行效率低下,因此需要重新调整思路。经分析,方案 1 耗时长的主要原因为每篇文章均需要与地址库 63 万条数据进行匹配,运算量大。实际可以无需每次进行 63 万条的匹配,一方面可以对字段进行去重,例如地址库的省只有 6 个、城市 80 个、县区 1000 个,因此可以通过不断定位

省-市-县-区,逐步缩小匹配范围,以此大幅降低运算复杂程度。从上述思路来看,该方法基本类似于人工筛查的方式(逐个提取关键字段信息,然后在地址库中进行筛选,不断缩小范围实现最终定位)。其基本实现方式如下:

1)基于 Python 集合自带的去重功能,对地址库的省、市、县、区、街道、街道号等字段进行合并去重,形成地址库各字段的去重列表,代码如下图 8 所示。

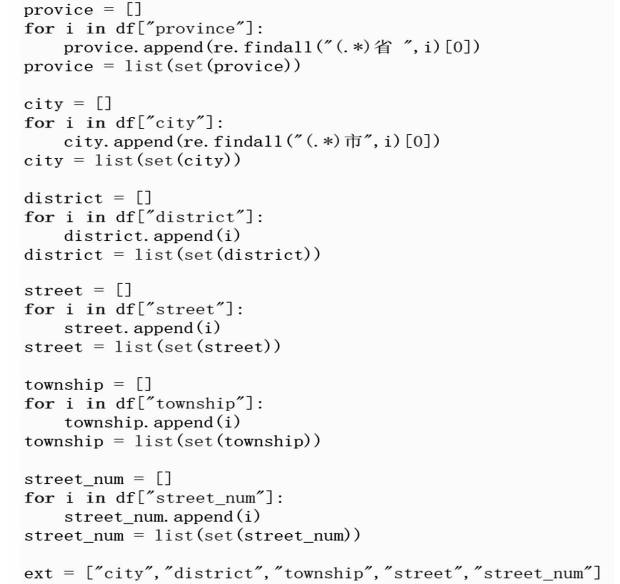


图8 核心地址字段去重

2)将地址库地址信息列表放入地址库中进行循环匹配,匹配成功则进行提取,形成匹配结果字典,代码如下图 9 所示。

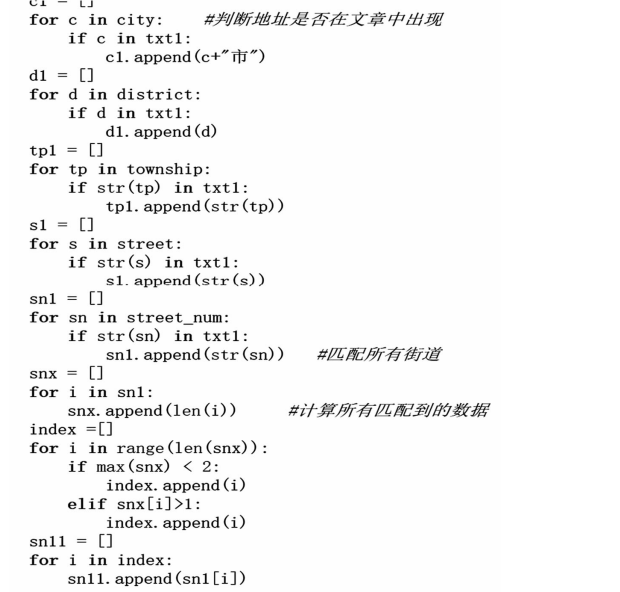


图9 文章地址信息提取

3) 按照匹配结果字典,根据匹配字段数量纳入地址库中进行定位,例如匹配到了“城市 - 街道 - 街道号”,则匹字段数字为 3,则在地址库对应 3 个字段进行 3 次筛查,逐步缩小匹配范围完成对地址位置的定位,详见图 10。

```
if len(jk)==2:
    al = []
    for i in jk_va[0]:
        al.append(df[df[jk_keys[0]]== i])
    df1 = pd.concat(al)
    if len(df1)>0:
        a2 = []
        for i in jk_va[1]:
            a2.append(df1[df1[jk_keys[1]]== i])
        df2 = pd.concat(a2)
        if len(df2)>0:
            c_2 = []
            for i in range(0, len(df2)):
                c1.update({df2.index.tolist()[i]:len(df2["SUM1"].tolist()[i])})
            max_value = max(c1.values())
            for m, n in c1.items():
                c_2.append(m)
            if len(c_2)>1:
                cf = []
                for i in range(0, len(c_2)):
                    df["SUM1"][c_2[i]]
                    jb = jieba.lcut(df["SUM1"][c_2[i]])
                    cf.append(len(jb) - len(set(jb)))
                if len(set(cf)) ==1:
                    bqdict.update({page:c_2})
                    c2.append(c_2[cf.index(min(cf))])
            else:
                c2.append(c_2[0])
        else:
            c1.update(((len(df1["SUM1"].tolist()[0]):df1.index.tolist()[0])))
            c2.append(c1[max(c1.keys())])

if len(jk)==3:
    al = []
    for i in jk_va[0]:
        al.append(df[df[jk_keys[0]]== i])
    df1 = pd.concat(al)
    if len(df1)>0:
        a2 = []
        for i in jk_va[1]:
            a3.append(df2[df2[jk_keys[2]]== i])
        df3 = pd.concat(a3)
        if len(df3)>0:
            c_2 = []
            for i in range(0, len(df3)):
                c1.update({df3.index.tolist()[i]:len(df3["SUM1"].tolist()[i])})
            max_value = max(c1.values())
            for m, n in c1.items():
                c_2.append(m)
            if len(c_2)>1:
                cf = []
                for i in range(0, len(c_2)):
                    df["SUM1"][c_2[i]]
                    jb = jieba.lcut(df["SUM1"][c_2[i]])
                    cf.append(len(jb) - len(set(jb)))
                if len(set(cf)) ==1:
                    bqdict.update({page:c_2})
                    c2.append(c_2[cf.index(min(cf))])
            else:
                c2.append(c_2[0])
        else:
            c1.update(((len(df2["SUM1"].tolist()[0]):df2.index.tolist()[0])))
            c2.append(c1[max(c1.keys())])
```

图 10 根据地址提取信息进行筛选匹配

4) 验证该方法的准确性,详见图 11。

```
import pandas as pd
path = r"..."
df_jg = pd.read_csv(path, encoding = "gbk") #读取正确答案数据集
path = r"..."
df_cs = pd.read_csv(path) #读取运算结果数据集
n = 0
for x,y in zip(df_jg["label"].tolist(), df_cs["label"].tolist()):
    if x==y:
        n = n + 1
print("测试集中正确答案数量为",n,"准确率为",n/500) #输出计算结果

测试集中正确答案数量为 325 准确率为 0.65
```

图 11 方案 2 计算结果验证

该方案在运行速度上提升明显,500 篇文章基于 63 万条地址库的匹配,运行完成仅需 5 min,平均每篇文章匹配仅需 0.6 s,在运行速度上完全满足实

用化要求,但是在准确率上,现阶段该方案也仅有 65% 左右,无法达到实用化水平(一般设计算法,置信率要达到 95% 以上)。

解决运行速度慢的问题后,总结错误匹配原因,逐个解决错误匹配问题,进行算法优化。

经逐个分析,出现错误的原因有以下几点:

- 1) 地址信息相似性极高的情况下,出错率高。例如 xx 区 - 城西街道 16 号与 xx 区 - 城西街道 6 号。
- 2) 可能会筛查出两个以上答案。例如文章为城西 5 号,地址库为城西区城西街道、城西区城西 5 号。
- 3) 个别答案匹配不上。例如文章为成都武侯区 xx 街道(同时西安市也有该街道名的情况),可能就会因匹配顺序问题导致结果无法正确输出(因为城市与街道无法对应的问题)等,错误匹配结果如图 12 所示。

filename\label	原文
174. html	福建省\$福州市\$长乐区\$吴航街道\$胜利路\$114号\$1胜利路114号
180. html	福建省\$泉州市\$丰泽区\$东湖街道\$东湖街\$298号\$1丰泽区东湖街道风景秀丽的湖心街298号
223. html	安徽省\$合肥市\$蜀山区\$芙蓉社区\$翡翠路\$翡翠路\$385号
320. html	广东省\$广州市\$白云区\$均禾街道\$新石路\$新石路\$白云区新石路79号

图 12 错误结果样例

3.3 方案 3:模拟人工地址筛查(场景问题优化)

对于地址雷同、重复等问题导致匹配不准确的情况,常规解决方式可以在匹配前进行分词;但是由于地址名称复杂度高、非常用名称多^[7],常用的 cpca 库无法使用,即使是分词效果最为良好的 jieba 分词方法^[8],依然难以对地址名称进行准确分词。因此只能进行场景设计解决。

由于所有匹配不准确的地址问题均出在“街道号”这一字段,可以从“街道号”的字符长度进行处理,伪代码实现:

- 1) 如果最长的街道号也不足 1,则直接纳入需要匹配的结果;
- 2) 如果不是均为短值,则将街道号长度在 2 以上的数据纳入需要匹配的结果,避免过多无效数据进入需要匹配的内容;
- 3) 做进一步判断,避免如 3 号、33 号的重复出现。代码实现如图 13 所示。

对于存在多个地址信息的情况下,例如成都 - 64 号、西安 - 223 号,前后不对应的问题,解决思路为:定位匹配到的街道在文章中出现的位置以及街道号所出现的位置,比较两者位置距离,两者相近的为 一组,就可以实现地址前后字段的准确关联。伪

```
sn1 = []
for sn in street_num:
    if str(sn) in txt1:
        sn1.append(str(sn))    #匹配所有街道号
snx = []
for i in sn1:
    snx.append(len(i))        #将街道号长度纳入snx，用作下一步判断
index = []
for i in range(len(snx)):
    if max(snx) < 2:           #如果最长的街道号也不足1，则直接纳入需
        index.append(i)
    elif snx[i]>1:             #如果不是均为短值，则将街道号长度在2以上
        index.append(i)
sn11 = []
for i in index:               #做进一步判断，避免3号、33号的重复出现
    sn11.append(sn1[i])

n = len(sn11)
lt2 = []
for i in sn11:
    lt3 = []
    for c in range(0,n):
        if i in sn11[c]:
            lt3.append(1)
        else:
            lt3.append(0)
    lt2.append(sum(lt3))
n = -1
sn111 = []
for i in lt2:
    n = n + 1
    if i <2:
        sn111.append(sn11[n])
```

图 13 文章地址提取预处理

代码如下：

- 1) 找到所需匹配的街道在文章中的位置 strlc；
- 2) 找到街道对应位置最近的街道号码；
- 3) 提取街道 – 街道号码进行组合；
- 4) 将组合好的结果纳入地址库进行筛查。

匹配文章中出现的街道名称,并定位街道名称在文章出现的位置,基于该位置找到离街道名称最近的街道号码,代码实现如图 14 所示。

```
strlc = []
if len(c1)>1:    #找到所需匹配的街道在文章中的位置strlc
    for i in c1:
        strlc.append(txt1.find(i))
else:
    strlc.append(txt1.find(c1[0]))
jk = {}
num = []
if len(c1)>1:
    n = 0
    for i in strlc:
        num.append(re.findall(' \d+', txt1[i:i+8]))    #25个字符修改为8字节
        jk.update({c1[n]:re.findall(' \d+', txt1[i:i+8])})
        n = n + 1
else:
    num.append(re.findall(' \d+', txt1[strlc[0]:strlc[0]+8]))
    jk.update({c1[0]:re.findall(' \d+', txt1[strlc[0]:strlc[0]+8])})

for k in list(jk.keys()):    #去除没有街道号的街道名称
    if not jk[k]:
        del jk[k]
```

图 14 定位街道字符串在文章中的位置并找到最近街道号地址提取的运行结果如图 15 所示,而未优化前的运行结果如图 16 所示。

通过对比,可以看到算法优化后,大幅减少了匹配到的街道号码,同时针对有多个地址的文章实现了街道名称与街道号码的一一对应,可以避免出现上下不对应导致无法匹配的情况。

计算结果验证如图 17 所示。经过验证,虽然在

```
{ '溪源宫路': ['96']}
{ '开禾路': ['88']}
{ '长虹南路': ['31']}
{ '胜利路': ['117', '7']}
{ '八七路': ['1056']}
{ '大东街': ['49']}
{ '南洋路': ['1819']}
{ '安福西路': ['307']}
{ '天波路': ['84']}
{ '北环东路': ['8', '10']}
{ '前进路': ['53']}
{ '白泉街': ['19']}
{ '下杭路': ['35', '37']}
{ '城东路': ['110']}
{ '云顶中路': ['98', '金山街': ['3']}
{ '盘龙大道': ['141']}
{ '滨江大道': ['154']}
{ '金岗路': ['202', '2']}
```

图 15 优化后实现“街道 – 街道号码”相对应

```
36 { 'township': ['治父山镇'], 'street_num': ['11', '17', '46', '45', '10', '47',
57 { 'street': ['国货西路'], 'street_num': ['11', '46', '14', '201', '6号', '46号
58 { 'street': ['岗东路', '龙岗东路'], 'street_num': ['15', '27', '27号', '7号']}
61 { 'street': ['赤岗北路'], 'street_num': ['15', '18', '8号', '18号', '赤岗']}
69 { 'street': ['太南路', '沙太南路'], 'street_num': ['30', '10', '0号', '330号',
72 { 'street': ['西洋中路', '洋中路'], 'street_num': ['18', '10', '3号', '183号',
92 { 'street': ['龙潭路'], 'street_num': ['16', '19', '30', '202', '8号', '38号']}
94 { 'street': ['惠兰路'], 'street_num': ['16', '17', '19', '18', '23', '29', '30
96 { 'street': ['直街', '龙新直街'], 'street_num': ['16', '19', '30', '202', '4号
99 { 'street': ['镇龙里'], 'street_num': ['16', '19', '30', '202', '镇龙', '7号']}
109 { 'street': ['仙岳路'], 'street_num': ['11', '17', '23', '46', '45', '10', '6
132 { 'street': ['洪山园路'], 'street_num': ['16', '24', '29', '30', '45', '10',
133 { 'street': ['园镇路'], 'street_num': ['11', '17', '46', '45', '10', '47', '8
135 { 'street': ['公园路'], 'street_num': ['10', '14', '48号', '48号楼', '148号',
136 { 'street': ['内蒙古路'], 'street_num': ['10', '1号']}
```

图 16 优化前多个街道和街道号结果不对应且未精确定位

运行速度上,优化后的算法运行需要 10 min,是未优化前的 2 倍,但是也基本满足应用需求,同时优化后准确率提升到了 98.6% ,完全满足实际应用需要。

```
import pandas as pd
path = r"
df_jg = pd.read_csv(path,encoding = "gbk")    #读取正确答案数据集
path = r"
df_cs = pd.read_csv(path)                      #读取运算结果数据集
n = 0
for x,y in zip(df_jg["label"].tolist(),df_cs["label"].tolist()):
    if x==y:
        n = n + 1
print("测试结果中正确答案数量为",n,"准确率为",n/500)    #输出计算结果

测试结果中正确答案数量为 493 准确率为 0.986
```

图 17 方案 3 计算结果验证

除以上 3 种方案外,前期还通过查阅相关文献,并结合课题内容进行实践,淘汰了纯正则表达式法提取、cpca 地址库提取等方法。第 3 种方案在准确率和运行速度上基本满相关业务场景应用需求。同时基于 Python 的 Pyinstaller 代码封装,可实现在电力企业各类工作电脑上直接运用,具备较高的可操作性及灵活性。3 种方案综合对比如表 1 所示。

表 1 3 种方法的综合对比

算法	准确率/%	运行速度	综合评价
地址搜索加权	71	4 h	速度慢、准确率低
模拟人工筛查	65	5 min	速度极快、准确率低
模拟人工优化	98.6	10 min	速度快、准确率高

(下转第 85 页)

基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法

况 华¹, 沐欣欣², 覃日升³

(1. 云南电网有限责任公司, 云南 昆明 650011; 2. 云南电网公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100;
3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘 要:合理利用需求侧响应可以提高和优化配电网经济运行水平,降低电网网损。针对中长期需求响应特性及短期需求响应特性进行研究,提出了基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法,选择了粒子群算法作为优化算法,基于编制的潮流计算程序,加入了一定的约束条件,对 IEEE 30 节点的配电网进行算例分析,仿真结果较好地验证了所提出的基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法的可行性和有效性。所提方法主要是为网损优化提供了新思路,有助于电力企业提高经济效率。

关键词:网损优化;多时间尺度建模;需求侧响应;分时电价优化

中图分类号:TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0049-06

Loss Optimization Method Based on Demand – side Response Model with Multiple – time Scales

Kuang Hua¹, Mu Xinxin², Qin Risheng³

(1. Yunnan Electric Power Grid Co. , Ltd. , Kunming 650011, Yunnnn, China;
2. Yuxi Electric Power Supply Bureau of Yunnan Electric Power Grid Co. , Ltd. , Yuxi 653100, Yunnan, China;
3. Electric Power Research Institute of Yunnan Electric Power Grid Co. , Ltd. , Kunming 650217, Yunnan, China)

Abstract:The rational use of demand side response can improve and optimize the economic operation level of distribution network and reduce the network loss. The characteristics of medium – and long – term demand response and short – term demand response are studied, and a loss optimization method based on demand – side response model with multi – time scale is proposed. Particle swarm optimization (PSO) is chosen as the optimization algorithm. Based on the compiled power flow calculation program after adding certain constraints, the IEEE 30 node distribution network is analyzed and the simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed method based on the demand – side response model of multi – time scale. The research mainly provides a new idea for the optimization method of network loss, which is helpful to improve the economic efficiency of electric power enterprises.

Key words:loss optimization; multi – time scale modeling; demand side response; time – sharing price optimization

0 引 言

新电改 9 号文中提出“管住中间,放开两头”的电力运营模式,使得需求侧响应有更大的实施空间。需求侧响应对电能的供需平衡、电网的潮流特性会造成巨大的影响,同时也会影响到配电网的经济运行水平和网损特性^[1],因此利用需求侧响应来提高和优化配电网经济运行水平、降低电网网损已成为

人们关注的热点问题。

目前国内外许多专家对网损优化做了相关研究。文献[2-7]分析了线路损耗的造成原因、计算方法以及优化网损的建议。关于优化网损方面,现有文献[8-16]基于设备改造、电网改造、线损率、交直流输电、安全经济调度、中低压电网等方面进行了研究。文献[8-9]考虑了设备改造,其中文献[8]通过确定电容器的位置及其类型和大小,升高线路电压,达到降低损耗的目的;文献[9]分析了变

压器和导线的优化配置方法来实现降损的目的。文献[10]通过合理改变电网的运行方式,优化了电网的网架结构,提高了电网供电可靠性,达到节能降损的目的。文献[11-12]考虑了线损率,其中文献[11]提出一种基于极限线损率和极限降损率指标的配电网降损措施优化方法;文献[12]以线损二项式为分析工具,分析了过网电量、功率因数变化以及供电量增长等因素对线损率的影响,提出降损的方案。文献[13]提出了交直流混合电网的网损优化模型,利用拉格朗日乘子对优化模型进行求解。文献[14]提出了电力系统安全经济调度的网损协调优化方法。文献[15]分析了配电网降损规划工作的主要流程,并提出了配电网降损规划辅助决策模型。现有文献都能有效地降低网损,但很少有文献从需求侧响应的角度进行网损优化研究。仅有文献[16]在电力市场环境下,考虑需求侧响应建立了峰谷分时电价模型,达到网损优化的目标;但是其峰谷分时电价模型仅考虑了短期需求响应特性。

因此提出了新电改背景下^[17]基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法。首先,对中长期需求响应特性及短期需求响应特性进行研究,建立了多时间尺度需求侧响应模型。该模型是在分时电价的需求弹性量化模型的基础上,通过同时考虑短期电价和中长期电价对需求侧响应的影响,能够反应出中长期电价波动情况下的短期需求响应特性。然后,从经济性角度出发,以网络损耗造成的经济损失最小为目标,将不同时段网损分别乘上各自时段的电价,可以得到损失的电费,并以此最小为目标函数。最后以IEEE 30节点进行仿真分析,验证了所提方法的有效性。

1 多时间尺度需求侧响应建模

1.1 需求侧响应特性分析

1.1.1 中长期需求侧响应特性分析

中长期需求特性一般是以年为单位,时间跨度在几年到十几年之间。

中长期需求模型为

$$\ln q = 0.601 \ln y - 8 \ln p + 0.877 \ln S + 2000 \tag{1}$$

式中: y 为人均可支配收入; p 为长期电价; S 为人均居民住宅面积; q 为年均电力需求量。

根据式(1),分别取4组人均可支配收入和人均居民住宅面积的参数,如表1所示。

表1 参数设置

模型	人均可支配收入/ (元/年)	人均居民住宅面积/ (m ² /人)
曲线1	25 000	45
曲线2	20 000	35
曲线3	15 000	25
曲线4	10 000	15

根据表1设置的参数,得到了中长期电力需求量与中长期电价之间的关系,如图1所示。

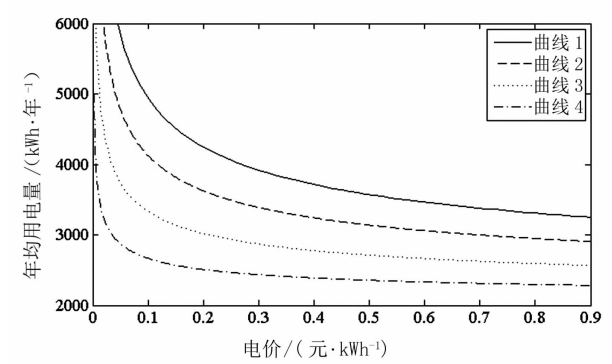


图1 中长期电量电价关系

1.1.2 短期需求响应特性分析

在短期电量电价的模型^[18-19]中,可以引入负荷转移率的概念。负荷转移率的含义是用电需求高的时段向用电需求低的时段转移的用电量,与用电需求高的时段的用电量之比,得到短期需求模型如式(2)。

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_j - p)/p < A \\ K(p_j - p)/(p - A), & A \leq (p_j - p)/p \leq B \\ K(B - A), & (p_j - p)/p > B \end{cases} \tag{2}$$

式中: λ_{ij} 为*j*时段的电价变化后,引起了*i*时段需求量的变化; p_j 为*j*时段的电价; p 为常量,指代的是电价; K 为用户反应度模型的斜率; A 为死区阈值; B 为饱和区阈值。

将分时电价分为峰、平、谷3个时段,得到9个相关的短期电量电价模型如式(3)至式(11)所示,式中的*p*暂时都取值0.5, $(p_j - p)/p$ (下标*j*分别用代表峰、平、谷时段的*f, p, g*表示)的范围设置为0~1。

$$\lambda_{ff} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_f - p)/p < 0.05 \\ 0.4((p_f - p)/p - 0.05), & 0.05 \leq (p_f - p)/p \leq 0.4 \\ 0.4(0.4 - 0.05), & (p_f - p)/p > 0.4 \end{cases} \tag{3}$$

$$\lambda_{ip} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_p - p)/p < 0.02 \\ 0.27(p_p - p)/p - 0.02, & 0.02 \leq (p_p - p)/p \leq 0.3 \\ 0.27(0.3 - 0.02), & (p_p - p)/p > 0.3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda_{ig} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_g - p)/p < 0.02 \\ 0.1(p_g - p)/p - 0.02, & 0.02 \leq (p_g - p)/p \leq 0.2 \\ 0.1(0.2 - 0.02), & (p_g - p)/p > 0.2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{pf} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_f - p)/p < 0.02 \\ 0.1((p_f - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_f - p)/p \leq 0.5 \\ 0.1(0.5 - 0.02), & (p_f - p)/p > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_{pp} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_p - p)/p < 0.02 \\ 0.5((p_p - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_p - p)/p \leq 0.4 \\ 0.5(0.4 - 0.02), & (p_p - p)/p > 0.4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_{pg} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_g - p)/p < 0.02 \\ 0.25((p_g - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_g - p)/p \leq 0.4 \\ 0.25(0.4 - 0.02), & (p_g - p)/p > 0.4 \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda_{gf} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_f - p)/p < 0.02 \\ 0.06((p_f - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_f - p)/p \leq 0.6 \\ 0.06(0.3 - 0.02), & (p_f - p)/p > 0.6 \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_{gp} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_p - p)/p < 0.02 \\ 0.3((p_p - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_p - p)/p \leq 0.3 \\ 0.3(0.3 - 0.02), & (p_p - p)/p > 0.3 \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda_{gg} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_g - p)/p < 0.02 \\ 0.7((p_g - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_g - p)/p \leq 0.4 \\ 0.7(0.4 - 0.02), & (p_g - p)/p > 0.4 \end{cases} \quad (11)$$

1.2 多时间尺度需求响应模型

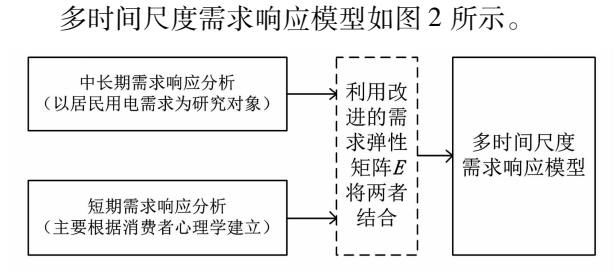


图 2 模型结构

需求弹性矩阵中需求弹性系数可以表示为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta q_i/q_i}{\Delta p_j/p_j} \quad (12)$$

式中： ε_{ij} 为需求弹性系数； $\Delta q_i/q_i$ 为 i 时段需求量变化率； $\Delta p_j/p_j$ 为 j 时段电价变化率。当 $i=j$ 时， ε_{ij} 为自弹性系数，即同一时段在分时电价前后的需求量变化，这一部分变化的负荷也可以称作可削减负荷，人们可能随着电价的提高而避免这部分负荷，达到减少电费支出的目的。当 $i \neq j$ 时， ε_{ij} 代表互弹性系数，即 j 时段的电价变化与 i 时段需求量变化之比，这一部分负荷也可以称作可转移符合，人们可能随着 j 时段电价的降低，减少 i 时段的用电量，并将这部分电量转移到 j 时段。

需求弹性矩阵为

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \cdots & \varepsilon_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中：对角线元素为自弹性系数；非对角线元素为互弹性系数。

则多时间尺度需求侧响应模型为

$$\boldsymbol{q}_{\text{DR}} = [\boldsymbol{q}_f \ \boldsymbol{q}_p \ \boldsymbol{q}_g]^T + \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_f & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{q}_p & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{q}_g \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{E} \cdot \begin{bmatrix} \frac{p_f - p}{p} \\ \frac{p_p - p}{p} \\ \frac{p_g - p}{p} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $\boldsymbol{q}_{\text{DR}} = [\boldsymbol{q}_{f\text{-DR}} \ \boldsymbol{q}_{p\text{-DR}} \ \boldsymbol{q}_{g\text{-DR}}]^T$ ； $\boldsymbol{q}_{f\text{-DR}}$ 、 $\boldsymbol{q}_{p\text{-DR}}$ 、 $\boldsymbol{q}_{g\text{-DR}}$ 为需求侧响应执行后各时段用电量； $\boldsymbol{q}_f$ 、 $\boldsymbol{q}_p$ 、 $\boldsymbol{q}_g$ 为实施前各时段用电量。

按照峰、平、谷 3 个时段，可以得到：

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ff} & \varepsilon_{fp} & \varepsilon_{fg} \\ \varepsilon_{pf} & \varepsilon_{pp} & \varepsilon_{pg} \\ \varepsilon_{gf} & \varepsilon_{gp} & \varepsilon_{gg} \end{bmatrix} \quad (15)$$

结合式(3)至式(11)可以计算 $\varepsilon_{ij}(i = f, p, g; j = f, p, g)$ 的值。

2 网损优化模型

2.1 目标函数

电能 在传输过程中由于线路的阻抗不可避免地会发生损耗，这部分损耗没有带来任何效益，却带来

了巨大的经济损失。需求侧响应会通过改变电力网络中各个负荷输入的有功功率,从而改变网损结果以达到经济损失较少的目的。这里通过需求侧响应改变了用户的用电量,相当于改变网络中的功率分布,最终达到经济损失减少的目的。

优化网损的目标是使得网络损耗造成的经济损失最小,因此将不同时段的网损分别乘上各自时段的电价,可以得到损失的电费,将这个值取最小即是优化目标。函数表达式为

$$\min(p_f \times \sum_{i=1}^n q_{if} + p_p \times \sum_{i=1}^n q_{ip} + p_g \times \sum_{i=1}^n q_{ig}) \quad (16)$$

式中: p_f 、 p_p 、 p_g 分别为执行分时电价后峰、平、谷 3 个时段的电价; $\sum_{i=1}^n q_{if}$ 、 $\sum_{i=1}^n q_{ip}$ 、 $\sum_{i=1}^n q_{ig}$ 分别为峰、平、谷 3 个时段通过潮流计算所得各个节点的网损之和, n 为电网中节点个数。

2.2 优化变量

基于以网络损耗造成的经济损失最小为目标函数的优化模型有 4 个优化变量,即 $[p_f, p_p, p_g, p]$ 。

峰价 p_f 大于长期电价,它的增大会导致峰时段的负荷降低,同时使得平时段、谷时段的需求量增加,它与长期电价差值越大,峰时段负荷降低,平、谷时段负荷增加量越明显。

平价 p_p 如果大于 p 会导致峰时段、谷时段需求量的增加;如果小于 p 则会引起峰时段、谷时段的需求量降低。一般不会与长期电价相差太多。

谷价 p_g 小于长期电价,它的减小会导致峰时段负荷、平时段需求量降低,谷时段需求量提高,它与 p 的差值越大,则这些需求量的变化越大。

改变长期电价 p 则会引起一天中电力需求总量的变化,并且 p 与另外 3 个电价的差值也影响了最终各时段的需求量,因此 p 在该模型中有很大的影响。

2.3 约束条件

电价约束:

$$\begin{cases} p_f > p \\ p_f > p_p \\ p_f > p_g \\ p_p > p_g \\ p > p_g \end{cases} \quad (17)$$

初始价格约束:

$$\begin{cases} 0.1 \leq p_f \leq 3 \\ 0.1 \leq p_p \leq 1 \\ 0.1 \leq p_g \leq 1 \\ 0.3 \leq p \leq 0.7 \end{cases} \quad (18)$$

需求量约束:

$$\begin{cases} q_{f-DR} > q_{p-DR} \\ q_{f-DR} > q_{g-DR} \\ q_{p-DR} > q_{g-DR} \end{cases} \quad (19)$$

需求侧响应约束:

$$q_{f-DR} \times p_f + q_{p-DR} \times p_p + q_{g-DR} \times p_g \leq q \times p \quad (20)$$

还需要增加一些潮流计算时保证电力系统正常运行的约束条件:

1)所有节点电压的约束

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

2)所有电源节点的有功功率和无功功率约束

$$\begin{cases} P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \\ Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \end{cases} \quad (22)$$

PQ 节点的有功功率和无功功率已经按照条件给定,PV 节点的有功功率、平衡节点的有功功率和无功功率都需要满足上述条件。

3)有些节点之间的电压还需要满足相位要求

$$|\delta_i - \delta_j| < |\delta_i - \delta_j|_{\max} \quad (23)$$

有些线路两端的电压相位差必须要在一定范围内,这样可以保证系统稳定运行。潮流计算如果不能满足上述要求,则需要修改一些参数或者运行方式,重新计算。

2.4 求解算法

求解算法种类众多,但都有各自的优点和缺点,目前还没有完美的算法,考虑到高速计算的同时又能获取高精度的最优解,选择了粒子群算法作为优化算法^[20]。通过粒子群算法来优化需求侧响应后得到的用电量,所得的用电量作为潮流计算的输入,再用 MATpower 进行潮流计算^[21],求出各节点的总净注入功率来表示网损。

网损优化模型的具体流程如图 3 所示。

3 算例分析

3.1 参数设置

峰、平、谷时段初始用电量设置如表 2 所示。

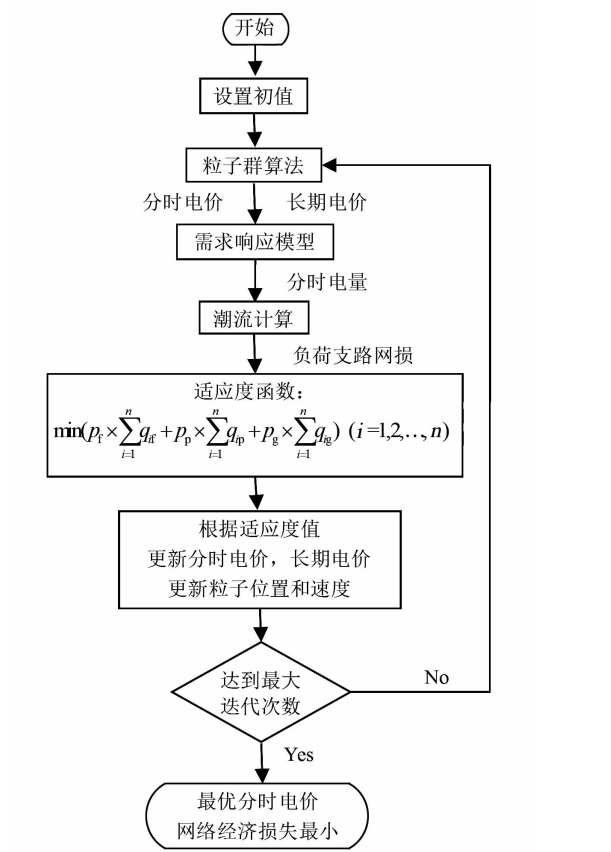


图3 网损优化模型的流程

表2 需求侧响应参数设置

人均收入 y/元	人均住宅 面积 S/m ²	分时电价 前 q _f	分时电价 前 q _p	分时电价 前 q _g
19 109	34.48	0.45q	0.35q	0.2q

人均用电量 q 是通过中长期需求模型的函数表达式计算得出的,这是一年中的平均用电量,要计算一天中的用电量只需要将 q 除以 365。进行网损优化时,将 IEEE 30 节点配电网中的一部分节点用需求侧响应求出的用电量来代替,由于电量和功率单位不同,这里需要稍作转换。由于默认每个时段为 8 h,只需要将电量的值除以 8 就可以得到按小时计算的功率,并假设每个节点承担了 80 位居民的负荷,这样在计算某时段网损时,每个节点的负荷就是 10 倍的此时段用电量。

对粒子群算法的参数设置如表 3 所示。

表3 粒子群算法参数设置

粒子数 n	学习因子 c1	学习因子 c2	最大速度 $V_{\max}$	维度 D	循环次数 K	惯性权重 W
40	2	2	0.4	4	2000	1

将所提网损优化应用于 IEEE 30 节点系统,系统总的负荷为 2.834 + j1.390 (标么值)。基准功率

为 100 MVA。IEEE 30 节点系统包括 6 台发电机 (节点 1,2,5,8,11 和 13,其中节点 1 为平衡节点,节点 2,5,8,11 和 13 为 PV 节点)、21 个负荷节点、37 条线路,4 台可调变压器 (支路 6—9、6—10、4—12 和 27—28) 和 2 个无功补偿点 (节点 10 和 24)。图 4 是 IEEE 30 节点配电网结构图。

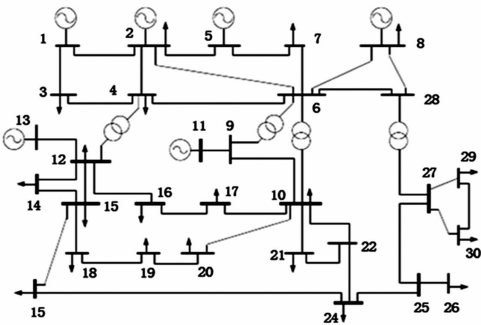


图4 IEEE 30 节点配电网结构

3.2 结果分析

网损优化后得到的结果如下:

1) 需求弹性矩阵

$$E = \begin{bmatrix} -0.2566 & 0.2464 & 0.0270 \\ 0.0857 & -0.4563 & 0.1425 \\ 0.0541 & 0.2738 & -0.3990 \end{bmatrix} \quad (24)$$

2) 电价

网损优化后的电价如表 4 所示。

表4 网损优化后的电价 单位:元/kWh

长期电价	峰时段电价	平时段电价	谷时段电价
0.533	0.607	0.411	0.178

表 4 中的数据显示峰价有所上升,但上升不多,原因在于本次优化将电价作为目标函数的一个因子,峰价受到了约束。平价略有下降,谷价下降较多,与预期一致。

3) 优化过程

从图 5 的优化过程可以看到粒子群算法的寻优过程,迭代过程中出现过不同的局部最优值,最终找到了全局最优,经过 800 次左右的优化,数值从 68.34 降低到 58.15,实现了预期的目标。表明该模型对降低网损造成的经济损失有效,符合预期。

4) 优化结果比较

实施网损优化前后电量、电费以及经济损失的比较如表 5、表 6、表 7 所示。

对基于网损优化的多时间尺度需求侧响应模型进行仿真后,可以看出峰谷差负荷由原先的

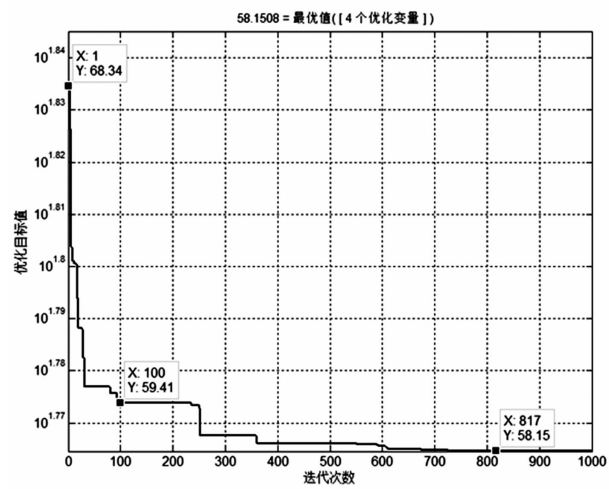


图 5 粒子群算法优化过程

表 5 网损优化前后电量比较 单位:kWh

指标	峰负荷	平负荷	谷负荷	总负荷	峰谷差
优化前	3. 145	2. 446	1. 398	6. 989	1. 747
优化后	2. 799	2. 499	1. 692	6. 989	1. 107

表 6 网损优化前后电费比较 单位:元

指标	峰电费	平电费	谷电费	总电费
优化前	1. 675	1. 303	0. 744	3. 722
优化后	1. 698	1. 026	0. 300	3. 024

表 7 网损优化前后经济损失比较

指标	峰网损/平网损/ kWh	谷网损/ kWh	总网损/ kWh	网损经济 损失/(元/h)
优化前	81. 118 42. 977	12. 009	136. 104	72. 475
优化后	59. 860 45. 240	18. 317	123. 417	58. 151

1. 747 kWh 优化到 1. 107 kWh,总负荷量基本不变。平时段负荷减少了 0. 053 kWh,变化不大;峰时段负荷减少了 0. 346 kWh,减少较多;谷时段负荷增加了 0. 294 kWh,增加较多,表明所提出的模型能有效地将负荷由峰时段转移到谷时段。

电费方面,平时段电价下降了 0. 277 元;谷时段电价下降了 0. 444 元;峰时段电价上升了 0. 023 元,峰时段变化不大,平时段、谷时段都有下降,且总电费下降明显,这能够提升居民的满意度。

网损方面,峰时段网损下降了 21. 258 kWh;平时段上升了 2. 263 kWh;谷时段上升了 6. 308 kWh;总的网损下降了 9. 3%,网损造成的经济损失也下降了 19. 8%,表明基于网损优化的多时间尺度需求侧响应模型能有效地降低网损,同时减少了网损造成的经济损失。

4 结 语

所提网损优化建模考虑了消费者心理学,并将长期需求模型与短期需求模型通过需求弹性矩阵结合在一起,建立了基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法。所提出的基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法对网损优化提供了一种新思路,为电价的制定提供了一个参考。

所提方法以网损的降低为目标,不同时段网损分别乘上各自时段的电价,可以得到损失的电费。网损是通过 MATpower 进行潮流计算获得。在算例中将 IEEE30 中的一部分节点用需求侧响应求出的用电量来代替,再通过 MATpower 进行潮流计算得到峰、平、谷 3 个时段各负荷支路的有功损耗,最终累加得到各个时段的网损。

参考文献

[1] 袁秋霞. 电网降损规划方法的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.

[2] 邹宁. 浅议降低线路损耗的方法及措施[J]. 机电信息, 2012(9): 169 – 171.

[3] 余卫国,熊幼京,周新风,等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54 – 58.

[4] 彭娇. 电力市场下电力系统网损计算与分析[J]. 中国新技术新产品, 2017(2): 48 – 49.

[5] 胡远婷, 郭庆阳, 徐冰亮, 等. 基于电网结构的降损方法研究与经济效益分析[J]. 黑龙江电力, 2017, 39(3): 208 – 215.

[6] 王佳, 常文焕, 卢东伟, 等. 电力系统网损分析及降损方法的研究[J]. 技术与市场, 2014, 21(11): 57 – 59

[7] 江北, 刘敏, 陈建福, 等. 地区电网降低电能损耗的主要措施分析[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 62 – 65.

[8] M E Baran, F E Wu. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 729 – 734.

[9] 卢志刚, 秦四娟, 李海涛, 等. 配电网技术线损分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 177 – 180.

[10] 陈家庚, 林其友. 优化完善电网结构在节能减排领域中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 118 – 121.

[11] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27 – 35.

(下转第 65 页)

基于家庭异构网的智能用电终端系统设计

张云翔¹, 李厚恩¹, 钟晓雄², 张 盛²

(1. 深圳市供电局有限公司, 广东 深圳 518001;

2. 清华大学深圳国际研究生院智能传感网络工程中心, 广东 深圳 518055)

摘要:为了实现用户对用电设备的智能化控制及节约用电的目的,设计了一种基于家庭异构网的智能用电终端系统。首先,阐述了兼容 WirelessHART 协议、PLC 通信以及以太网通信的智能用电终端系统的作用;然后,再详细描述

了系统的软硬件设计;最后,通过测试结果充分验证了设计方案的有效性。

关键词:智能用电终端;异构网;WirelessHART 协议;PLC 通信;以太网通信

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0055-05

Design of Intelligent Power Terminal System Based on Family Heterogeneous Network

Zhang Yunxiang¹, Li Houen¹, Zhong Xiaoxiong², Zhang Sheng²

(1. Shenzhen Electric Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, Guangdong,

China; 2. Smart Sensor Network Engineering Center of Shenzhen International

Graduate School of Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract:In order to achieve the user's intelligent control of electrical equipment and the purpose of saving electricity, an intelligent power terminal system based on family heterogeneous network is designed. Firstly, the function of intelligent power terminal system is described which is compatible with WirelessHART protocol, PLC communication and Ethernet communication. Then, the hardware and software design of the system is described in detail. Finally, the test results fully verify the effectiveness of the proposed design scheme.

Key words:intelligent power terminal; heterogeneous network; WirelessHART protocol; PLC communication; Ethernet communication

0 引 言

电网,一般是指排除发电侧之外的,由变电装置和输配电线路组成的整体。智能电网是以物理电网为基础,将现代先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成新型电网^[1]。

在未来的智能电网架构中,灵活的智能用电管理将成为其中的重要环节。在用电方面,智能电网的重要目标是鼓励和促进用户参与自身运行和管理,实现用户互动^[2-4]。因此,研究合理、高效的智能

基金项目:国家自然科学基金(61802221)

用电方法有利于电力资源的合理利用和节能减排。
文献[5]改进了 k-means 算法,能够精确、高效地挖掘出智能用电海量数据的潜在有用信息,将为制定最优的用电策略、开展阶梯定价提供有利的指导。文献[6]设计了一种以 DSP 为处理核心的智能用电终端,能够实现智能电网下对市政、商区以及居民住宅等用电设备的高级用电检测和远程用电控制。文献[7]提出了一种稳定且能够自适应各类模式的 DR 系统架构,能够调节电网动态需求和用户动态意愿之间的平衡以及电力公司和用户之间的平衡。

但是上述的几种方法均是针对电网公司或者国家部门用来制定电价或者宏观调控的,而不是针对

用户自身来实现智能用电,从而达到节约用电的目的。于是设计了一种基于家庭异构网^[8]的智能用电终端系统,它是一种兼容 WirelessHART 自组网络、PLC 通信以及以太网通信的异构型网络终端系统,能够实现智能控制用电终端(如智能化控制家用电器)以及远程手动控制的功能。最后通过实验验证了系统的可行性,并探讨了异构网络环境下家用电器智能化的发展方向。

1 系统软硬件设计

智能用电终端系统是一种融合多种家用通信网络技术以及传感器技术,通过获取、分析周围环境的各种因素,实现智能化控制家用电器、节省电能等功能的设备。下面设计一种基于 WirelessHART 和 PLC 的家庭异构网的智能用电终端系统,能够实现智能化控制家电,从而实现节约用电的功能。

1.1 系统设计的目标和原则

1.1.1 系统设计目标

所设计系统的主要目的是实现一个兼容 WirelessHART 协议与 PLC 技术的智能用电终端系统,设计的功能目标如下:

- 1) 支持 WirelessHART 网络。WirelessHART 网络可以通过和支持 WirelessHART 网络的智能电表互连互通,达到对电表系统的控制以及计量信息获取的功能。
- 2) 支持 PLC 设备,并将 PLC 互连设备组成一个网络,在网络内部实现信息互通的目的。
- 3) 支持人体感应探头作为传感器设备,获取周围环境中的信息。
- 4) 支持以太网,使得智能的互联网终端可以远程访问系统,支持服务器端图表显示终端信息,支持服务器控制终端。
- 5) 支持系统对外部电器的控制。

1.1.2 系统设计原则

为了能让系统长期稳定可靠地工作,在设计过程中需要遵循一定的原则。

- 1) 可靠性:系统的可靠性是指系统不但可以工作于正常的环境下,在一定程度的恶劣环境下也能准确计量并与后台进行正常通信。
- 2) 智能性:作为所设计系统的核心功能,智能性表现在系统可以快速侦测环境的变化,并将信息反馈至主控模块,由主控模块分析处理,然后向驱动

模块发送控制指令。系统的智能性特点需要靠上层软件完善的逻辑结构来完成。

3) 低功耗性:系统在工作模式下应该可以以较低的功耗进行工作,以节省能源。

1.2 系统方案设计

所设计的系统需要工作在一个家庭网络内,并组成网络协同工作。如图 1 所示,图中左边方框为所设计的系统,而右半部分则为系统的典型应用背景。

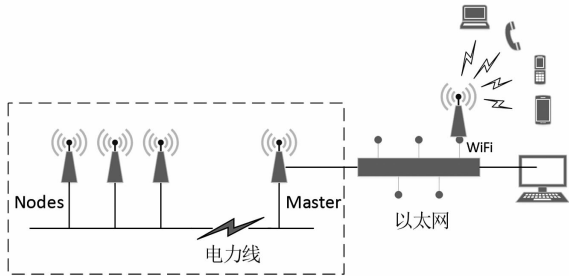


图 1 智能用电终端系统

在图 1 的左半部分,由数个智能用电终端组成。其中一个终端与以太网连接,充当服务器端节点 (Master) 的角色,与外界网络进行通信;其他终端则承担普通节点 (Nodes) 的角色,相互之间可以进行数据传输,但无法直接与外界通信。将系统与外界网络隔绝,一定程度上保障了数据安全与系统的稳定性。每一个智能用电终端都包含 WirelessHART 无线网络模块,用于和其他终端进行无线通信;同时也包含 PLC 模块,通过电力线连接起来,可以进行相互通信。

1.2.1 普通节点的系统设计

在所设计的智能用电终端系统中,每一台设备,包括网关节点,都具备普通节点的功能。对于每一个普通节点,希望它兼容 WirelessHART 网络以及 PLC 网络,又能驱动传感器和外围设备工作,设计方案如图 2 所示。

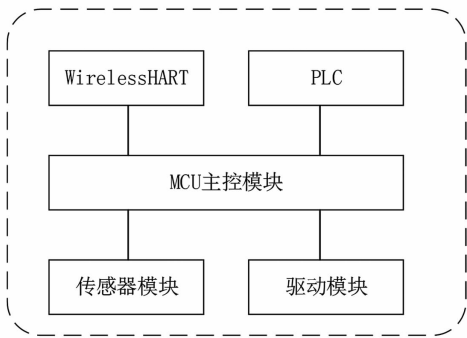


图 2 普通节点的设计

一个普通的节点主要包含微控制器主控模块、

WirelessHART 无线通信模块、PLC 模块、传感器模块以及驱动模块。

1.2.2 服务器端节点的系统设计

服务器端节点,除了包含上述模块外,还应该包含一个以太网模块,如图 3 所示。

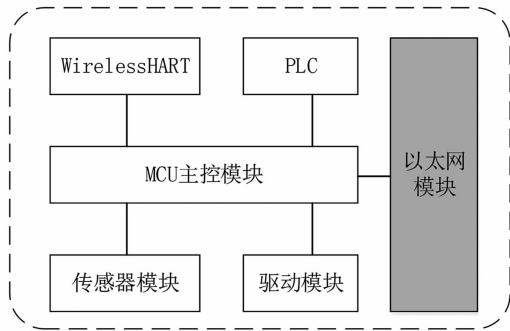


图 3 服务器节点的设计

服务器端的以太网模块,使得系统可以通过互联网传输数据。

1.3 系统硬件设计及实现

1.3.1 微控制器主控模块

微控制器主控模块是整个系统的核心,考虑到系统的复杂性和网络的多元性,选取 STM32F103ZET6 芯片作为核心的微控制器。这是一个 32 位的 Cortex - M3 内核的 ARM 处理器,最高可达 72 MHz 的处理速度,具备睡眠、停止和挂起 3 种低功耗工作模式,最大限度地降低能源消耗,且所需要的外围支持比较少,仅需要一些基本的电源和外部晶振即可工作^[9]。

1.3.2 WirelessHART 模块

WirelessHART 模块主要由主控芯片 MSP430 和 RF 模块 CC1100E 组成。其中,MSP430 是 TI 公司的一个 16 位低功耗、低成本的 MCU,而 CC1100E 为 TI 公司的一个应用于 1 GHz 频段以下并支持多种解调格式的射频通信模块^[10]。

1.3.3 电力载波模块

电力载波模块负责电力线通信,考虑到成本以及符合中国国家标准,采用 KQ330 超低功耗载波通信接收模块^[11]。

1.3.4 传感器模块

为了演示系统的智能控制作用,需要在系统中添加一个人体感应传感器。可以探测 10 m 以内有没有活动物体走动,并在被触发时生成一个脉冲信号,进而可以把这个脉冲信号通过 GPIO 端口送入到微控制器。

传感器模块主要由一个芯片及其周围电路组成,选择了 CS9803 作为人体感应芯片^[12]。

1.3.5 驱动模块

驱动模块是用来控制外围设备的电路,在这里,选取 220 V 家用电灯作为被控制电器,以表现系统的通用性。驱动模块采用达林顿电路驱动的方式。达林顿电路由 2 个达林顿三极管组成,2 个三极管级联,大大提高系统的灵敏度,可以有效地放大输入信号,并有很强的电流驱动能力。

1.3.6 以太网模块

服务端的以太网模块是供服务端与外界进行互联通信的基础,它不但为 UART - PLC 网络提供网关功能,将内部数据转发到外部网络,还要为外部的智能终端设备提供查询、控制等功能。选取 ENC28J60 模块作为以太网通信芯片,该芯片是 28 引脚以太网控制器,具备低引脚数、低成本且高效易用等优点^[13]。

1.3.7 硬件接口

各个模块之间信息的传输以及指令的发送,都是通过特定的通信接口完成,通用的芯片间通信接口有 UART、SPI、I2C 等几种,其中 UART 以及 SPI 接口都具备成本低廉、简单易用、易于集成等特点。这里采用 UART 以及 SPI 接口作为芯片间通信的主要协议。

UART 是一种收发协议,广泛应用于 EIA、RS - 232 等接口,它能够把信息通过并/串转换成字节流来传输,也可以将字节流汇聚起来通过串/并转换来还原信息^[14]。

SPI 是一种可以工作在全双工模式下的同步的数据链路标准^[15]。SPI 通信的参与者分为主机和从机,其中主机可以指定数据帧结构,系统中的多个从机是通过片选引脚来决定是否处于工作状态。

1.4 系统软件实现

系统的硬件是支持系统应用的基础,系统的上层软件则是应用的具体实现。这里采用 IAR EWARM v5.30 作为开发工具,选用 C 语言作为开发语言,选用 ST 公司发布的 STM32 Firmware Library v2.0.3 作为开发库^[16]。

1.4.1 软件设计框架

如图 4 所示,软件系统主要由三层模块组成,其中 STM32 固件层是由 ST 公司官方提供的一个供 STM32 内部模块的 C 语言库,包括操作 RCC 时钟、GPIO 接口、中断向量表等功能;微控制器主控模块负责协

调各个模块工作以及资源分配、系统计时、数据处理等任务;应用层包含的范围比较广,包括硬件电路模块上的 LED 指示灯的操作、UART 串口设备组网通信、传感器控制以及外围设备驱动控制模块。

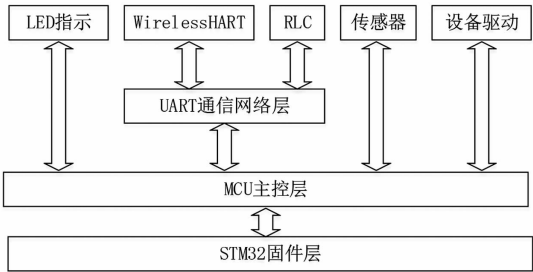


图 4 软件系统架构

1.4.2 微控制器主控模块

微控制器主控层包含主要的调度和控制模块。微控制器主控层需要对 STM32 进行初始化配置,主要包括 RCC 时钟配置、GPIO 引脚配置等。

首先,配置复位和时钟控制。系统先调用 RCC_Deinit() 函数对 RCC 时钟进行初始化设置;再通过调用 RCC_HSEConfig() 函数来配置 STM32 采用外部晶振作为时钟源,并启用该晶振;接着开启 STM32 内部 Flash 预存取功能,然后设置内部高级外设总线 APB1 和 APB2 高速通道时钟,并启用内部的 PLL 锁相环模块作为系统时钟。

其次,系统调用 NVIC_SetVectorTable() 函数对微控制器的嵌入式中断控制器进行初始化。

最后,系统调用 GPIO_Configuration() 函数对各个引脚进行初始化。

1.4.3 WirelessHART 模块

WirelessHART 模块,通过 UART 接口与微控制器进行通信。其中接口主要有两个:发送数据接口和接收数据接口。发送数据接口函数通过调用主控模块的函数库 USART_SendData() 以及 USART_ReceiveData() 两个函数来实现数据的发送,网络层及更下层的传输功能由 MSP430 芯片负责。接收数据接口是一个缓冲区数据字符,并利用触发中断来通知 MSP430 对数据做进一步处理。

1.4.4 电力载波模块

所采用的 PLC 模块,可以通过 UART 接口与微控制器进行数据传输,将 PLC 模块的 TXD 接口直接连接到微控制器的 UART1 的 RX 数据接收端,将 PLC 模块的 RXD 接口通过 2K 限流电阻,连接到微控制器的 TX 数据发送端。

PLC 模块具备两种工作模式:透明工作模式与

自定义工作模式。为了便于开发,采用自定义工作模式。

1.4.5 服务器端以太网模块

如图 5 所示,以太网模块主要由 ENC28J60 的硬件抽象层 (hardware abstract layer)、SPI 接口、TCP/IP 协议栈以及上层的 Web 服务器组成。其中 SPI 接口负责与微控制器进行通信,进行数据传输;TCP/IP 协议栈实现基本的 TCP/IP 网络功能;Web 服务器提供一个有限功能的 Web 服务器,以便与用户进行交互。

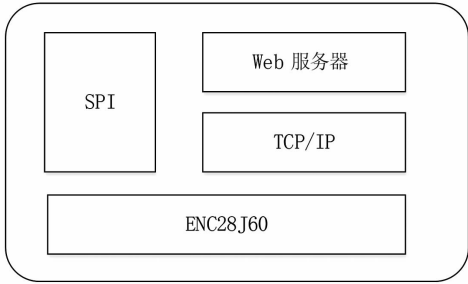


图 5 以太网模块

2 实 验

智能用电终端系统测试部分的测试主要有几个方面:传感器动作、家用电器的工作状态显示及手动控制功能;对等节点间的电力线组网以及通信功能;WirelessHART 通信以及 Mesh 网络组建等功能。

2.1 家用电器工作状态显示及手动控制功能测试

该功能的测试仅需要服务器端单节点即可完成。首先将服务端节点外接上传感器模块、继电器驱动模块以及以太网模块,并将以太网模块连接到局域网内,使用笔记本通过无线网络连接到同一个局域网内。对系统进行上电,更改系统源代码里的 IP 地址和子网掩码,以能接入到以太网进行通信。更改系统的访问密码,然后将测试代码下载到主控芯片内,并运行。测试步骤如下:

1)测试人员远离系统,等继电器模块断开,家用电灯熄灭后,系统进入稳定状态。此时,通过笔记本访问同局域网内网址 <http://219.223.168.254/h403/> 页面,可以观察到电灯处于熄灭状态。

2)逐渐靠近传感器模块,在离传感器约 4 ~ 5 m 的范围时,无线传感器上的 LED 指示灯自动点亮,同时,继电器闭合,家用电灯点亮。说明所设计系统的传感器模块工作正常。

3)访问网址并刷新页面,可以看到电灯处于点

亮状态。说明所设计系统对于家用电器的工作状态显示功能正常。

4)在网页中手动点击“关闭”命令,继电器断开,家用电灯熄灭,说明所设计系统的手动控制功能可以正常工作。

结果表明,该系统对4~5 m 范围内的人员能够迅速做出反应,打开照明系统,并且可以通过 Web 服务器端查询和手动控制照明系统的工作状态。

2.2 电力组网及通信功能测试

将服务端的电力载波模块连接到主控模块上,并加入5个包含继电器驱动模块以及电力载波模块的客户端节点。编辑测试代码,将每个节点的UART地址修改为单独的地址。在测试中,将服务端的UART地址更改为1,5个客户端节点的地址依次更改为2~6。对各个板子上电,将测试代码分别下载到各个板子上运行。测试步骤如下:

1)访问 <http://219.223.168.252/h403/> 页面,可以看到页面上多出了5个灯,每个灯均处于熄灭状态,如图6所示。说明所设计系统的组网功能正常。

2)在网页上任意点击一个LED灯的“闭合”按钮,相应客户端节点的继电器闭合,点亮相应的LED灯,此时网页上指示该灯处于点亮状态。说明所设计系统电力线通信完全正常。

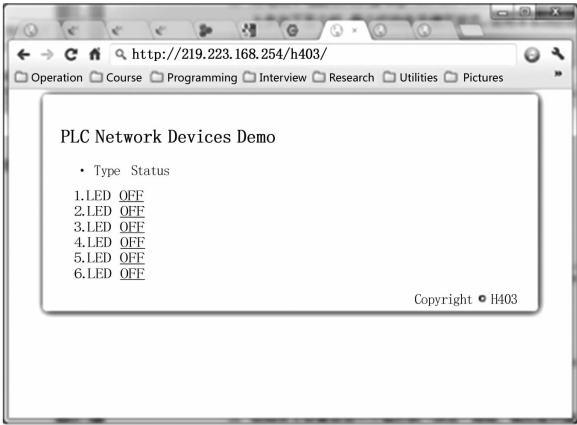


图6 PLC 网络通信测试

2.3 WirelessHART 自组网通信功能测试

首先,将 WirelessHART 接收、发送模块通过 RS232 电平转换模块和 USB – RS232 转换模块分别连接到两台笔记本电脑的 USB 接口;然后,在两台笔记本上打开串口调试助手,接收模块监听串口数据,发送模块往串口发送数据,测试接收端是否能完整接收数据;最后,将连接发送模块的笔记本固定放置在马路上,将作为接收方的笔记本逐渐远离发送

模块,观测是否能正常接收。

经过测试,在马路上,丢包率≤3%的条件下,使用两个节点进行互相通信,得到的通信数据如表1所示。

在进行了普通测试以后,还对设备进行了穿透能力测试,以普通承重墙作为障碍物,在丢包率≤3%的条件下,得到两个节点的传输数据如表2所示。

表1 WirelessHART 普通传输条件测试数据

接收发送设备 离地距离/m	通信速率/ (kb · s ⁻¹)	最长通信距离/ m
2.5	250	240
2.5	150	640
5.0	250	560
5.0	150	700

表2 WirelessHART 穿透条件测试数据

接收发送设备 离地距离/m	通信速率/ (kb · s ⁻¹)	最长通信距离/ m
2.5	250	25
2.5	150	32

3 结 语

针对家居用户,提出了一种基于家庭异构网的智能用电终端系统,在结合如无线传感器的外围设备情况下,实现了系统智能化控制家居电器的目的,并支持以太网实现了远程手动控制终端。由于系统结构的简单性以及软硬件的结合,保证了系统工作的可靠性、智能性以及低功耗性。

在未来,异构网络环境下的智能用电终端系统将会朝着更高的兼容性方向发展,比如兼容更多的无线传感设备。同时,在提高兼容性的过程中,提高系统的负载能力也是必不可少的。

参考文献

[1] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
[2] 冯庆东,何战勇. 国内外智能用电发展分析比较[J]. 电测与仪表,2012,49(2):1-6.
[3] 章鹿华,王思彤,易忠林,等. 面向智能用电的家庭综合能源管理系统的设计与实现[J]. 电测与仪表,2010,47(9):35-38.
[4] 李江浩,曹敏,张建伟,等. 智能用电终端的设计[J]. 云南电力技术,2015,43(1):73-74.

(下转第70页)

基于 5G 配电网差动保护安全防护策略研究

张 泰¹,杨 雪²,汪晓帆²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司眉山供电公司, 四川 眉山 620010)

摘 要:对 5G 承载配电网差动保护的网络安全防护策略进行了讨论。首先,给出了配电网差动保护的架构和实现原理;其次,对比分析了 5G 和 4G 的安全防护策略和机制,并在此基础上结合 5G 的自身安全挑战,分析了基于 5G 配电网差动保护安全防护需求,首次提出了两种 5G 独立组网和非独立组网模式下基于 5G 配电网差动保护的安全防护策略和目标;最后,根据配电网差动保护业务数据流向和边界条件给出了基于 5G 配电网差动保护的安全风险点和应对措施。
关键词:5G;差动保护;网络安全防护
中图分类号:TM77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0060-06

Research of Security Protection Strategy for Differential Protection of 5G – based Distribution Network

Zhang Tai¹,Yang Xue²,Wang Xiaofan²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Meishan Electric Power Supply Company, Meishan 620010, Sichuan, China)

Abstract:The security protection strategy for differential protection of 5G – based distribution network is discussed. Firstly, the architecture and implementation principle of differential protection of distribution network are given. Secondly, the security of 5G and 4G networks is compared and analyzed. Combined with the security challenges of 5G, the security protection requirements for 5G – based distribution network are analyzed, and then two security protection goals for differential protection of 5G – based distribution network with SA and NSA are proposed. Finally, the security risk points and countermeasures are given based on the data flow and boundary conditions of the differential protection. The results demonstrate that the proposed security protection strategy is effective.
Key words:5G; differential protection; security protection of network

0 引 言

配电网是国民经济和社会发展的重要公共基础设施,担负着保障国家经济发展和居民生活质量的重要使命。当前,随着分布式电源、柔性负荷大量接入以及供需互动用电不断深入,配电网的故障特性发生了显著改变,给配电网的安全可靠运行带来了新的挑战。此外,配电网分布广、拓扑结构复杂、中性点接地方式多样,发生故障时,故障点查找、隔离与恢复极为困难,如不能及时排除,将威胁人身及设备安全,甚至引发大面积停电事故。

随着配电网逐渐往主动配电网过渡^[1-3],新的构建模式使得配电网的运行面临新的挑战:1)分布式电源的引入将电网由单端辐射型网络变成了多源异构复杂网络,电网可能面临传统三段式电流保护失去选择性和灵敏性降低的风险;2)分布式电源类型复杂,短路电流难以准确计算,传统三段保护之间的级差配合困难;3)当变电站出线断路器跳闸,将导致后级多条线路均被纳入故障停电范围;4)故障发生后,当前恢复送电策略使恢复供电时间较长。因此,传统的过流保护作为配电网线路的主保护存在无法兼顾快速性和选择性要求以及定值困难等问题,其诱发越级跳闸和大范围停电事件的风险越来越

越高,难以满足用户对供电可靠性不断提高的要求。配电网差动与区域保护具有可以实现故障区间的快速定位与隔离、定值易整定等优点,但光纤通信敷设的纵联通道方案,存在成本高、难度大、通道利用率低等问题,无法适应分布式电源日益增多的接入电网需求。

随着全球能源互联网的建设推进,大量电厂、电网、用电侧的设备接入国家电网公司网络。在主网通信接入网建设方面,主要依赖光纤组网方式满足保护、安控等控制类业务的通信传输需求。在配电网的通信建设方面,在A+、A类供电区域,为确保电力的可靠供应,与之配套的电力通信网往往采用光纤专网的方式进行,但建设成本居高不下,运行维护压力巨大,无法满足配电网对通信传输可靠性的要求。此外,A+、A类供区,城市建设快、市政施工频繁导致配电网引起的光纤中断后无法快速恢复,配电网自动化只能采用盲调方式,严重制约配电网自动化的运行效率。随着配电自动化的建设推进,在B、C、D类供电区域,如果仍然采用光纤专网的方式将给公司带来巨大的经营压力,组网及维护成本过高等问题始终难于解决。

2019年6月6日,工业和信息化部正式向中国电信、中国移动、中国联通、中国广电四家运营商发放5G商用牌照,这标志着中国正式进入5G商用元年。5G技术的低时延、高可靠、海量连接特征,与国家电网公司电网状态全息感知、数据全面连接、业务全程在线、服务全新体验的“能源互联网”建设目标高度吻合。5G主要在4G技术体系基础上的终端接入速率、基站终端连接容量和业务基础时延方面显著提升,在电网中的主要应用场景^[4-6]包括:1)增强型移动宽带(enhanced mobile broadband,eMBB),在人口密集区为用户提供1 Gbps用户体验速率和10 Gbps峰值速率,较4G接入速率提升10倍,适用于高清视频监控、无人机巡检、维修培训等对带宽的需求非常高的业务。2)超高可靠与低延迟的通信(ultra reliable low latency communications,URLLC),提供毫秒级的端到端时延和接近100%的业务可靠性保证,适用于配电自动化、精准控制等对时延的要求高的业务。3)大规模机器类通信(massive machine type of communication,mMTC),提供具备超千亿网络连接支持能力,适用于电网信息的采集、状态检测等海量连接和数据采集应用场景。此外,5G

通信技术具有高带宽、低时延及安全可靠的特点,可以满足配电网差动保护与区域保护纵联通道数据传输时间的要求。利用5G通信技术承载配电网纵联保护通道,可在较低成本投入下实现保护快速准确动作,并兼顾保护间的优化配合,可快速隔离故障区间,最大程度缩小故障停电范围和停电时间。

1 基于5G配电网差动保护架构

目前,配电网保护可采用过流保护、差动保护和基于GOOSE的网络拓扑保护,主流方式仍然是采用基于过流速断的级差保护机制,均通过光纤连接实现。现阶段,尚无10 kV线路站内开关过流I段设置级差的最佳方案,10 kV城网线路无法实现故障区域的快速和最小范围隔离。随着配电网络不断延伸扩容、拓扑结构日趋复杂,过流保护定值在复杂配电网配合困难、选择性差、速动性差的问题日益凸显。此外,配电通信网覆盖范围大,覆盖终端数量多,大量设备安装于户外,运行情况复杂,光纤通信线路受市政施工破坏严重,使用缺陷量大,缺陷处理任务繁重。且由于10 kV配电网新投入运行时异动量较大,导致相应的通信接入网频繁变动,对网络结构影响大,光纤敷设难度大且成本高。基于5G承载配电网差动保护不仅具有良好的经济效益,且是践行国家数字新基建的具体举措。

配电网差动保护试点工程架构如图1所示,在保留原过流保护的基础上,增设了10 kV相关5G差动保护设备,包括5G保护装置(实现差动保护及相关配电网自动化功能)、客户端前置设备(customer premise equipment,CPE,实现通道5G数据的收发传输)、对时装置(接受北斗/GPS卫星对时,辅助两侧保护装置实现采样同步),并采用5G网络进行数据传输(本次试点工程采用移动运营商网络)。

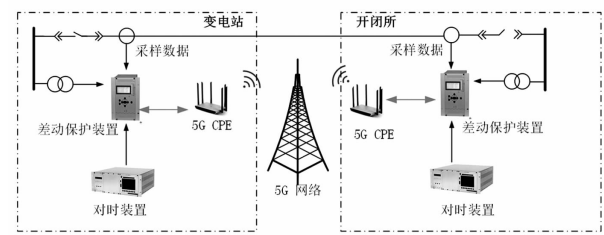


图1 基于5G配电网差动保护架构

2 基于5G 的配电网差动保护安全概述

2.1 5G 技术的安全挑战^[7-8]

相比4G 网络,5G 不仅要考虑语音和数据的安全性,更要考虑万物互联场景下垂直行业的应用安全。此外,面对各种异构网络(如4G、WiFi 等)和设备的接入,5G 相较于过往的移动通信技术具有新的安全挑战。

首先是新的业务场景下的安全,5G 的三大场景对安全的要求不同。在 eMBB 场景下,AR/VR 的安全和行业应用安全不同;在 mMTC 场景下,存在设备认证成本高、易产生信令风暴的问题,需要群组认证机制,此外,考虑到设备的能耗,应该设计轻量级的安全算法和简单高效的安全协议;在 uRLLC 场景下,必须考虑时延和安全开销的折中,并需要考虑到身份认证的时延、数据安全保护引入的时延、网络节点加解密引入的时延和安全上下文切换引入的时延等。

其次,作为5G 核心网服务化架构(service based architecture, SBA),必然引入了软件定义网络(software defined network, SDN)和网络功能虚拟化(network functions virtualization, NFV)技术来实现其功能,这与传统网络中依赖设备隔离的安全防护方式截然不同,如NFV 中虚拟化管理层的安全问题,因此存在SDN 控制网元和转发节点的安全隔离和管理问题等;再者,网络切片被认为是5G 保障安全的有力手段,但切片之间的安全隔离、虚拟网络的安全部署和管理问题也需要重点考虑;网络开放功能,需要核心网与第三方网元以及核心网元之间支持更高更灵活的安全能力,实现业务签发、发布和每用户每服务都有安全通道。

此外,各种接入技术有不同的安全要求,对隐私的保护程度也不同,用户数据可能穿越不同接入网络和厂商提供的功能网络实体散布在网络各处,通过数据挖掘可能分析出更多用户隐私。4G 已经暴露出泄露用户身份标识(IMSI)的漏洞,因此5G 网络需要通过加强的安全机制对用户身份进行隐私保护。

2.2 5G 安全机制分析^[9-11]

为应对上述安全挑战,5G 网络使用多种技术,使网络具备新的安全能力。

2.2.1 保护用户设备(UE)与网络之间的通信

1)独立组网(standalone, SA)安全:通过 PDCP

(packet data convergence protocol),分组数据汇聚协议)保护 UE 和 gNB(5G 基站)之间的控制面和用户面数据。

2)非独立组网(non-standalone, NSA)安全:通过 NSA-MM(移动性管理)保护用户和 AMF(接入和移动管理功能)之间的 NSA 信令。

2.2.2 保护公共陆地移动网(public land mobile network, PLMN)内部网元的通信

1)回传保护。

2)核心网保护。

3)接入认证。

4)伪基站检测和防护机制。

2.2.3 保护网络之间的通信

1)运营商互联安全。

2)多层次切片安全:包括 UE 和切片间、切片内外 NF(网络功能)间安全、切片内 NF 间安全。

2.2.4 向应用提供5G 安全能力

1)统一认证框架(EAP),适配多种安全凭证和认证方式,并且认证能力开放(AKMA)能为第三方提供认证服务和安全通道。

2)二次认证,即在用户接入网络时所做认证(被称为“主认证”)之后为接入特定业务建立数据通道而进行的认证。例如,当5G 网络用于为高保障业务系统提供通信时,用户通过接入认证后并不能直接与业务系统建立连接,而是利用业务相关的信任凭证与用户终端进行认证,并在认证通过的情况下才允许5G 网络为用户建立与业务系统之间的通信链路。二次认证的实质是为构建在5G 网络之上的第三方应用提供“5G 接入认证+第三方应用认证”的双重认证机制,从而提升应用的接入安全性。

3)应用认证与密钥管理,通过用户身份 SUPI 加密,提升隐私保护能力,其对称算法密钥长度延长至 256 bit;

4)差异化安全保护,即用户面按需保护。

5)安全能力开放,让运营商网络安全能力深入地渗透到第三方业务生态环境中。

2.3 配电网差动保护的风险点分析

利用5G 来承载配电网差动保护业务,面临着来源于5G 网络和5G 关键技术等各种恶意攻击等风险,同时也面临着配电网本身数据泄露的风险。

基于5G 的配电网差动保护业务可能面临的风险如表1 所示。

表 1 基于 5G 配网差动保护的安全风险

风险层面	风 险 描 述	风险等级
5G 网络安全威胁	终端安全威胁	设备及硬件威胁:硬件设备被盗,物理防护设施破坏等。
		操作系统威胁:操作系统漏洞利用,恶意程序入侵等。
		业务应用威胁:差动保护业务应用程序入侵,业务盗用等。
	接入网安全威胁	空口信道威胁:阻塞攻击,干扰攻击等。
		接入与认证威胁:用户传输数据窃听,认证过程受到中间人攻击或钓鱼攻击等。
		空口密钥泄露:归属核心网生成的密钥在信令链路传输过程中泄露。
	核心网安全威胁	核心网非授权访问。
		终端侧对核心网攻击:信令风暴,拒绝服务攻击等。
		网络功能服务的非授权或越权访问。
		能力开放安全威胁:能力开放接口非授权访问,能力开放资源滥用。
5G 关键技术安全威胁	边缘计算(MEC)安全威胁	MEC 设备威胁:物理攻击、硬件木马攻击,侧信道攻击,身份伪造攻击等。
		MEC 平台威胁:虚拟化基础设施入侵,虚拟机或容器逃逸,平台配置恶意更改等。
		MEC 应用威胁:资源滥用,侧信道攻击,非授权访问,恶意软件植入,拒绝服务攻击等。
		通信层威胁:数据窃听,分组欺骗攻击,通信路由攻击。
	SDN安全威胁	应用层安全威胁:恶意程序注入,隐私信息泄露。
		数据层安全威胁:拒绝服务攻击,控制流表篡改,数据泄露。
		控制器安全威胁:拒绝服务攻击,控制流表篡改恶意程序注入、安全策略绕行等。
		南北向接口威胁:中间人攻击,通信内容篡改、窃听,传输协议漏洞等。
	NFV安全威胁	NFVI 安全威胁:虚拟机或容器逃逸,恶意软件注入,漏洞利用,侧信道攻击,拒绝服务攻击等。
		VNF 安全威胁:身份仿冒,非授权访问,敏感信息泄露,漏洞利用,拒绝服务攻击,恶意配置等。
数据风险	切片安全威胁	MANO 安全威胁:漏洞利用,非法授权使用,接口数据篡改,与 VNF 之间的通信安全威胁等。
		切片非法接入,资源耗尽,切片之间的通信安全威胁,切片之间的侧信道攻击,切片间隔离性破坏等。
数据风险	数据安全威胁:数据传输过程中的攻击篡改、窃听、中间人攻击,数据存储系统的非法访问等。	高

3 基于 5G 配电网差动保护网络安全防护策略

3.1 基于 5G 配电网差动保护安全隐患

图 2 所示为基于 5G 配电网差动保护数据流向图。

CPE 插入 USIM 卡,接入 5G 网络即完成了 CPE 与核心网的一系列网元秘钥派生的过程,秘钥长度允许 256 bit,保证了 CPE 与基站之间在空口的数据安全。数据的完整性保护可选,需要向运营商确认。中心-分布单元(center unit - distributed unit, CU - DU)到用户面功能(user - plane function, UPF)是通过 IPSEC 协议进行安全保护,因此,差动保护装置

到 CPE 再到基站,数据安全能得到保证。但是,根据安全边界和数据流,配电网差动保护仍存在如下的安全风险。

1) 风险 1:应用层业务数据的安全性风险。由于应用域安全不在 5G 安全标准规定的网络保障范围内,因此,应用层面数据存在在进入 5G 信道之前

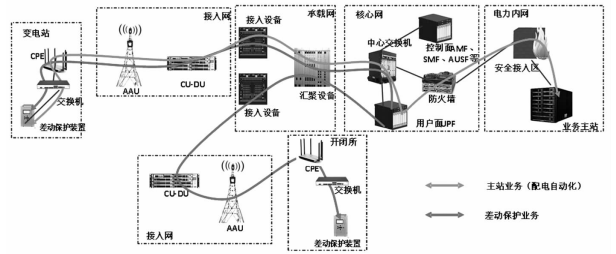


图 2 基于 5G 配电网差动保护数据流向

被篡改的风险。

解决措施:业务数据加密。

2) 风险 2: CPE、DTU 存在被攻破、植入恶意代码的可能,影响业务的正常运行。

如某型号 CPE 存在漏洞 (CVE - 2017 - 8155、8156),串口访问无认证,攻击者可控制该设备;协议漏洞,TR - 604 协议 (LAN 侧 DSL 设备管理配置协议)漏洞导致攻击者不需要任何认证,可直接对 CPE 设备状态进行重新配置、恶意操作;病毒、木马、蠕虫、勒索软件、间谍软件、流氓软件植入;拒绝服务攻击 (DDos)。

解决措施:CPE 安全防护、IPS/IDS、安全加固、漏扫。

3) 风险 3: USIM 卡和通讯终端存在被盗/异常风险。

解决措施:USIM 卡位置绑定,机卡绑定。

除了上述解决措施外,还提出以下安全防护策略:

1) 在 CPE 处开启安全设置,开启防护墙、防 Dos 攻击设置 (ICMP_FLOOD、UDP_FLOOD、TCP_SYN_FLOOD 过滤)。

2) 部署 IPS/IDS,对 CPE、DTU 的异常行为或威胁进行检测,对源地址进行检查,发现被感染的恶意终端。

3) 使用加密芯片对业务数据加密,防止数据被篡改。

4) 与运营商确认是否开启空口数据完整性保护。

5) 要求运营商支持 USIM 卡位置绑定、支持机卡绑定认证。

6) 定期进行漏洞扫描、渗透测试、安全加固、版本升级、等保评级。

7) 部署认证与授权应用,提供对配电站终端的二次认证与授权机制,保证应用安全。

3.2 两种组网模式下的防护方案

考虑到目前 5G 网络建设的进程,设计在两种组网模式下,即 NSA 和 SA 的安全防护方案。NSA 非独立组网模式兼顾 4G 和 5G 网络,而 SA 独立组网模式只有 5G 网络,因此,两种模式下安全防护方案也不尽相同。

1) NSA 模式下的配电网差动保护业务整体安全防护方案如表 2 所示。

表 2 NSA 5G 配电网差动保护安全防护方案

防护目标	防护方案
认证授权	终端身份认证,终端数据与存储系统授权访问
通信加密	终端数据加密存储,通信过程中的数据加密传输
防火墙	监控进出变电站和开闭所的网络流量,防护针对终端的网络攻击行为
入侵检测系统 (IDS)	主机入侵检测 (HIDS): 监测针对终端操作系统和应用软件的攻击或异常行为,并进行告警和处置 网络入侵检测 (NIDS): 采集进出终端的网络通信数据,检测其中的网络攻击行为并进行告警和处置
服务质量 (QoS) 监测	监测差动保护数据传输质量,对时延抖动过大、带宽异常等情况进行告警

2) SA 组网模式下基于电力专用 MEC 的配电网差动保护业务整体安全防护方案如表 3 所示。

表 3 SA 5G 配电网差动保护安全防护方案

防护内容	防护目标
认证授权	终端身份认证,终端数据与存储系统授权访问 终端与 MEC 业务系统二次认证 MEC 业务系统授权访问、业务应用认证
通信加密	终端数据加密存储,通信过程中的数据加密传输 MEC 业务系统数据加密存储,通信过程中的数据加密传输
防火墙	监控进出变电站和开闭所的网络流量,防护针对终端的网络攻击行为 监控进出 MEC 平台的网络流量,防护针对业务系统的网络攻击行为
入侵检测系统 (IDS)	主机入侵检测 (HIDS): 监测针对终端和 MEC 业务系统的操作系统和应用软件的攻击行为,并进行告警和处置 网络入侵检测 (NIDS): 采集进出终端和 MEC 业务系统的网络通信数据,检测其中的网络攻击行为,并进行告警和处置
服务质量 (QoS) 监测	监测差动保护数据传输质量,对时延抖动过大、带宽异常等情况进行告警

IDS 系统方案的设计需考虑以下情况:

1) 5G 网络边缘环境通常资源有限,系统应具备较高的资源利用率;

2) 5G 网络中的安全威胁类型多、变化快,系统应具备灵活、快速部署各种检测功能的能力。

由于目前配电网差动保护尚未涉及边缘计算 (multi - access edge computing, MEC) 和 5G 网络切片,因此暂不考虑这两方面的安全防护策略。

4 结 语

基于 5G 的配电网差动保护能实现保护范围内的全线速动,无需与其他保护配合,具有优良的速动性、灵敏性和选择性,且不受系统方式潮流的影响,是目前为止电网保护领域特性较好的保护机制之一。但作为国家能源的重要基础设施,配电网的安全稳定运行尤为重要,因此,全面分析了基于 5G 的配电网差动保护安全隐患,提出以下安全防护策略和方案,切实保障配电网安全稳定运行:

- 1)给出了配电网差动保护的架构和实现原理;
- 2)对比分析了 5G 和 4G 网络安全性能;
- 3)基于 5G 的自身安全挑战分析了基于 5G 的配电网安全防护需求,继而根据差动保护的数据流向和边界条件给出了基于 5G 配电网差动保护的安全风险点和应对措施;
- 4)提出了两种组网模式下基于 5G 配电网差动保护的安全防护实现目标。

参考文献

[1] 潘本仁,王和春,张妍,等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(15):102-107.

[2] 白加林,高昌培,王宇恩,等. 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(18):157-162.

[3] 毛文晋,李红伟,李超. 一种考虑 DG 出力优化分配的

=====

(上接第 54 页)

[12] 田宏杰. 线损分析预测在供电管理中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010,38(7): 77-80.

[13] 孙雁斌,刘恺,陈亦平,等. 异步联网的交直流输电网损在线优化方法及其在南方电网的实现[J]. 电网技术, 2016, 40(4):1018-1024.

[14] 王楠,张粒子,黄巍,等. 电力系统安全经济调度网损协调优化方法[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 105-108.

[15] 杨文锋,王彬宇,程卓,等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2598-2604.

[16] 陈沧杨,胡博,谢开贵,等. 计入电力系统可靠性与购电风险的峰谷分时电价模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2141-2145.

[17] 沈红宇,陈晋,归三荣,等. 新一轮电力改革对电网

配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(13):57-63.

[4] 张平,陶运铮,张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报,2016,37(7):15-29.

[5] Gupta A, Jha R K. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies[J]. IEEE Access,2015, 3:1206-1232.

[6] Agyapong P, Iwamura M, Staehle D, et al. Design Considerations for A 5G Network Architecture[J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52(11): 65-75.

[7] 冯登国,徐静,兰晓. 5G 移动通信网络安全研究[J]. 软件学报, 2018, 29(6): 1813-1825.

[8] 李晖,付玉龙. 5G 网络安全问题分析与展望[J]. 无线电通信技术,2015, 41(4): 1-7.

[9] 杨红梅,赵勇. 5G 安全风险分析及标准进展[J]. 中兴通讯技术 2014, 52(11): 65-75.

[10] Zou Y, Zhu J, Wang X, et al. A Survey on Wireless Security: Technical Challenges, Recent Advances, and Future Trends[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(9):1727-1765.

[11] 李宏佳,王利明,徐震,等. 5G 安全:通信与计算融合演进中的需求分析与架构设计[J]. 信息安全学报, 2018, 3(5): 1-14.

作者简介:

张 泰(1982),男,博士,高级工程师,研究方向为电力通信、网络安全;

杨 雪(1985),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信;

汪晓帆(1993),女,硕士,助理工程师,研究方向为电力通信。

(收稿日期:2020-11-04)

企业配电网规划的影响与对策[J]. 电力建设,2016, 37(3):47-51.

[18] 罗运虎,邢丽冬,王勤,等. 峰谷分时电价用户响应模型参数的最小二乘估计[J]. 华东电力,2009, 37(1):67-69.

[19] 阮文骏,王蓓蓓,李扬,等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 86-92.

[20] 顾苏雯,马宏忠,王华芳,等. 基于动态多种群粒子群算法的低压配电网电压无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(6):91-96.

[21] 郭桂静,徐道安,师秀凤. 基于 Matpower 的电力系统潮流计算[J]. 企业导报,2016(12):172-174.

作者简介:

况 华(1973),男,高级工程师,主要从事配电网电压、电能质量方面的研究。

(收稿日期:2020-10-29)

基于5G通信技术的配电网线路纵差保护研究及应用

郭立,何峰,梁艳,韦翔,张丹

(国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司,新疆乌鲁木齐 830000)

摘要:随着5G技术的兴起及组网共建共享的深入,电力业务应用对网络延时、带宽、可靠性等指标提出更高需求,5G+业务建设步入快车道。分析了5G配电网线路纵差原理,提出了系统架构、通信组网及调试方案。在试验室环境下,对双套纵差保护装置进行通信系统搭建、参数配置、联机调试,并以10 kV配电网线路为应用实例,新建室内分布式系统以满足5G网络通信要求,横向对比两种不同的5G组网方式。测试结果表明,独立组网方式要优于非独立组网网络,超低网络通道延时,超高网络带宽,可满足5G纵差通道应用条件,整体方案的实施及应用对今后智能分布式配电保护、自愈控制系统的建设有着借鉴作用。

关键词:5G网络;组网方式;纵差保护;通道延时

中图分类号:TM773 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0066-05

Research and Application of Longitudinal Differential Protection of Distribution Network Based on 5G Communication Technology

Guo Li, He Feng, Liang Yan, Wei Xiang, Zhang Dan

(State Grid Urumqi Electric Power Supply Company, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: With the rise of 5G technology and the deepening of network co-construction and sharing, power business applications have put forward higher demands on network delay, bandwidth, reliability and other indicators, and 5G+ business construction has entered the fast lane. The principle of the longitudinal difference of 5G distribution network is analyzed, and a system architecture, communication networking and commissioning plan are proposed. In the laboratory environment, the communication system construction, parameter configuration and online commissioning of double longitudinal difference protection device are carried out, and taking 10 kV distribution network line for application example, a new indoor distributed system is built to meet the requirements of 5G network communication, and two different 5G networking methods are horizontally compared. The test results show that SA networking method is superior to NAS network and is ultra-low. The network channel delay and ultra-high network bandwidth can meet the application conditions of 5G longitudinal differential channels. The implementation and application of the overall plan can be used as a reference for the construction of intelligent distributed power distribution protection and self-healing control systems in the future.

Key words: 5G network; networking mode; longitudinal differential protection; channel delay

0 引言

5G网络方式分为非独立组网方式(non-standalone, NSA)和独立组网方式(standalone, SA)两种。NSA是5G和4G LTE的联合组网,SA是独立的5G核心网络,三家运营商选择NSA/SA双模基站。在技术发展方面,NSA技术成熟,现已商用化,而SA尚处于建设初期;在网络覆盖面积方面,NSA实现

基金项目:国网新疆电力有限公司重点研发计划资助项目(5230WJ200011)

国内50余个城市覆盖,SA则需软、硬件重建,大面积覆盖还需要时间;在技术标准方面,NSA是最终的商用技术标准,SA尚未确认。全球大部分国家都会从NSA组网逐步过渡到SA组网,SA组网方式才是公认的5G最终形态^[1-4]。

国内外5G技术赋能于大众用户和垂直行业,场景应用涵盖交通、农业、水文、煤矿、医疗、教育等各个方面^[5-11]。有些科研院所及企业也已开展了5G配电网线路纵差保护测试。文献[12]提出一种

基于5G无线通信的配电网拓扑自适应差动保护技术,示范工程满足指标要求,但未进行外场试验。文献[13]基于5G组网的电网业务外场试验环境,验证网络时延及抖动对差动保护的影响。文献[14]基于5G通信系统实现差动保护装置间数据传输,依据配电网拓扑变化动态调整差动保护配置,达到降本增效的目的。文献[15]采用NSA架构的5G网络适合现阶段智能电网应用,可满足智能电网输电、变电、配电及用电各环节差异化业务需求。但是,在针对NSA、SA组网方式下的指标数据测试,尤其是外场试验的应用研究方面,相关文献资料比较少见。5G纵差保护应用面临的诸多技术挑战,如5G电力物联网^[16-18]、通信技术^[19-20]、传输资源需求等方面^[21-24]。鉴于5G网络低时延、高速率、大容量、高带宽等优点,加快5G技术应用于电力行业的探索步伐,下面对“5G+继电保护专业”技术方案及外场试点测试取得的成效予以阐述。

1 纵差保护原理

保护装置支持5G通信,可直接与5G无线终端配合,实现5G差动保护功能。电流差动继电器由比率差动继电器和差动联跳继电器两部分组成。

1.1 比率差动继电器

当发生故障时,由电流变化量、相过流元件和零序电流元件组成的启动元件满足启动条件后,将开放差动判据判别,若保护装置的差流和制动电流关系满足动作方程(见式(1),动作曲线见图1),则置本侧差动允许,且向对侧发送差动允许信号。当装置同时收到本侧差动允许和对侧差动允许信号,则差动保护可以动作。

$$\begin{aligned} I_{d\phi} &> 0.6 I_{r\phi} \\ I_{d\phi} &> I_{DIF} \\ I_{d\phi} &= |\dot{I}_{M\phi} + \dot{I}_{N\phi}| \\ I_{r\phi} &= |\dot{I}_{M\phi} - \dot{I}_{N\phi}| \end{aligned} \tag{1}$$

式中: ϕ 代表A相、B相、C相; $I_{d\phi}$ 为差动电流,即两侧电流矢量和的幅值; $I_{r\phi}$ 为制动电流,即两侧电流矢量差的幅值; I_{DIF} 为差动动作电流定值。

1.2 差动联跳继电器

长距离输电线路出口经高过渡电阻接地时,近故障侧保护能立即启动,但由于助增的影响,远故障

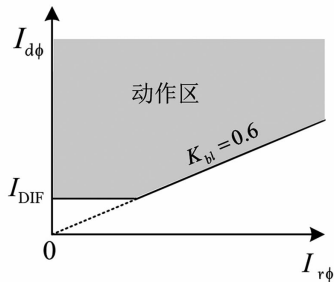


图1 比率差动方程动作曲线

侧可能故障量不明显而不能启动,差动保护不能快速动作。针对这种情况,装置设有差动联跳继电器,本侧任何保护动作元件动作(如过流保护、零序保护等)后立即发对应相联跳信号给对侧,对侧收到联跳信号后,启动保护装置,并结合差动允许信号联跳断路器。

2 应用方案

2.1 系统架构

系统主要由5G核心网络、线路差动保护装置、时钟同步授时装置、数据终端、5G通信卡组成,见图2。两侧数据终端通过5G核心网络通信交互数据,时钟同步授时装置对双套线路纵差装置进行采样对时,实现电流数据同步采样实时作差。

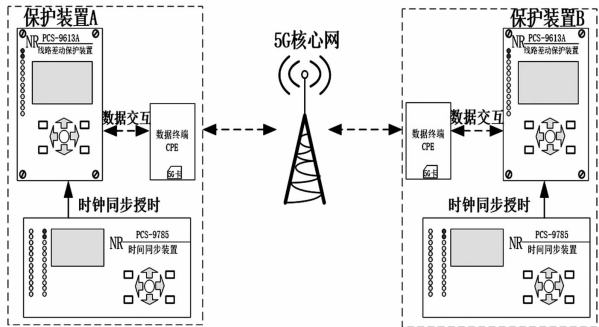


图2 5G线路纵差保护配置架构

2.2 通信组网

5G通信卡IP实现静态地址,客户终端设备(customer premise equipment, CPE)采用工业级数据终端,双套线路纵差保护进行程序下装及固化,配置程序见图3,运营商搭建5G网络接入点。纵差保护装置可选择CPU网口3—网口8中的任一口作为5G数据接口,通过通信参数中的[5G数据网口号]参数指定。将5G数据网口同5G终端设备(CPE)相连,并通过通信参数中的[5G网口IP地址]设置该口的IP地址,实现5G组网通信参数设置,见图4。

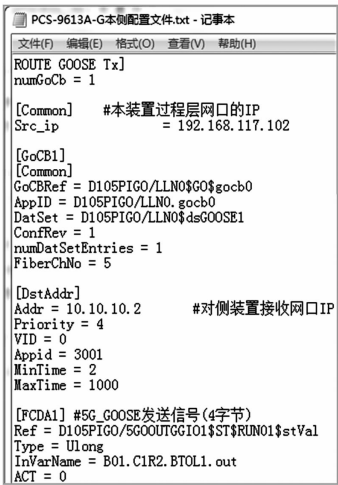


图 3 配置文本文件部分程序

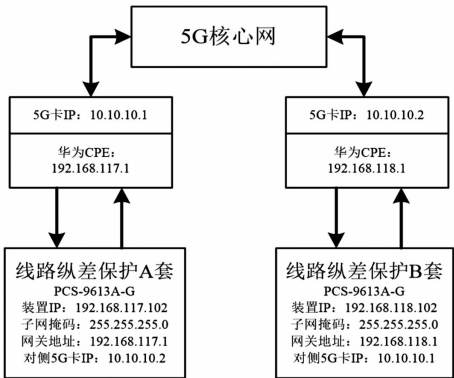


图 4 5G 组网通信参数设置

2.3 联机调试

双套线路纵差保护装置进行通道、零漂、采样值及开关量检查,5G 通信正常,装置无告警信息,零漂值在 0.01In(或 0.05 V)以内。电流、电压采样值与实际加入量的误差应小于 $\pm 2.5\%$ 或 ± 0.01 倍额定值,相角误差小于 2° ;两侧联调同步外部采样,若试验点线路上有实际负荷,则可通过 CT 采样来验证同步;若试验仪外加模拟量,要求试验仪同步输出;以上两点都不能实现,则装置无法通过差流或相位的方式来验证同步,只能选择在一处试验点进行模拟量试验,比较本地施加量和对侧接收量验证采样传输的精度,但无法进行区外故障等复杂测试。单侧加量相当于单侧电源故障试验,受一侧弱馈的影响,保护动作时间会有一定的延迟。单侧纵差调试接线见图 5。

3 试点实例

3.1 试点方案

在试验室环境下,双套纵差保护装置进行联机

调试,见图 6。本次试点 110 kV 甲站 10 kV 甲苑线,线路长度 3.1 km,电气接线方式如图 7 所示。

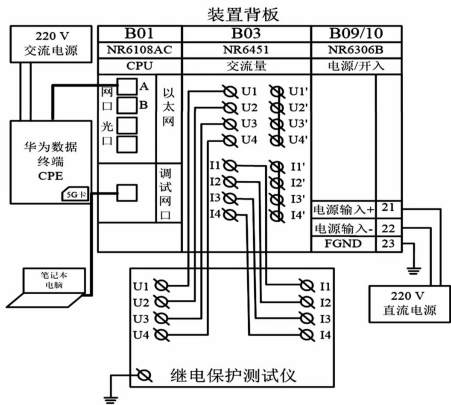


图 5 单侧纵差调试接线



图 6 试验室环境下 5G 纵差保护联机调试

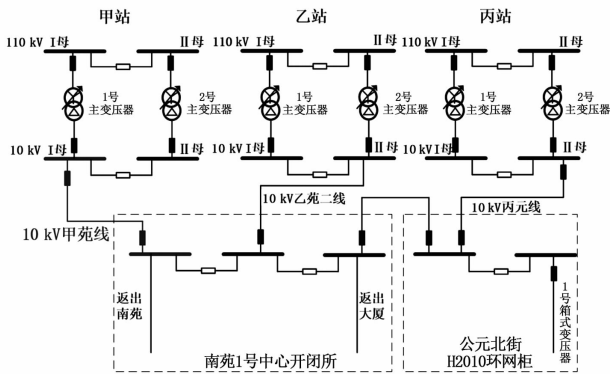


图 7 试点线路电气主接线

甲站侧纵差保护 CT 采用 5A 制,考虑正常运行安全性、跳闸可靠性,建议该侧装置挂网试运行。采用双套配置,原装置正常运行,正常动作出口跳、合断路器;南苑 1 号中心开闭所侧纵差保护 CT 采用 1A 制,考虑其为负荷终端站,线路保护装置只投功能不投跳闸,经现场勘察,无合适安装位置,建议掏屏换型改造,并加装对时装置。试点安装地处于干扰区、盲弱区,经运营商对 5G 网络状态测试,试点线路两侧信号强度较弱或无 5G 网络信号状态,

本试点采用 5G 网络室内分布式系统以满足纵差保护应用条件,见图 8。试点装置运维信息远程传送给运维中心或主站,快速实现配电网线路区段或配电网设备的故障判断及准确定位。

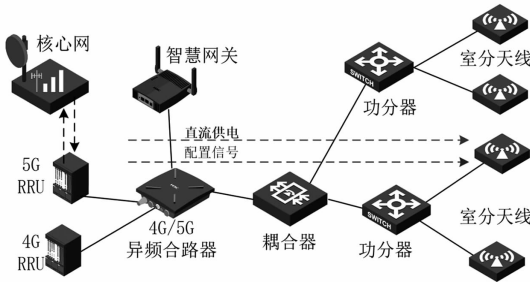


图 8 5G 网络室内分布式系统

3.2 通道延时

对 NSA 网络单模、SA 网络双模 5G 纵差保护装置网络通道状态加以对比,由表 1 可知,NSA 网络环境下,5G_SV 接收通道 1 平均延迟 95.6 ms 左右,装置出现通道异常及网络延时超范围信号,不满足纵差保护通道延时应用要求;SA 网络环境下,5G_SV 接收通道 1 平均延迟 11.2 ms,装置显示 5G 通信、差流值和对时状态正常,SA 网络平均上、下行带宽为 NSA 网络的 14 倍左右。

表 1 NSA 单模、SA 双模网络通道延时对比

5G 通道一状态	NSA 网络单模	SA 网络双模
5G_SV 接收通道 1 延迟/ μ s	110 333	8219
5G_SV 接收通道 1 平均延迟/ μ s	95 559	11 215
5G_SV 接收最大通道延迟/ μ s	125 489	42 562
5G_SV 接收最小通道延迟/ μ s	18 305	7358
5G_SV 接收延迟小于 20 ms 帧数	169	1 802 675
5G_SV 接收延迟小于 40 ms 帧数	94	138
5G_SV 接收延迟小于 60 ms 帧数	78	65
5G_SV 接收延迟小于 80 ms 帧数	90	0
5G_SV 接收延迟超过 80 ms 帧数	1 801 543	0
网络平均带宽(上行)/Mbps	18	258
网络平均带宽(下行)/Mbps	85	1200

4 结 语

探究了“5G + 配电网线路纵差保护”的架构与

方案,实现了 10 kV 配电网线路的试点应用。经多次测试验证,SA 组网方式具有超低延时、高带宽、大容量等特点,适用于 5G 纵差保护应用条件,摆脱了常规光纤纵差保护的点对点光纤敷设成本及外破可能性。有线光纤载体转型为无线 5G 通信方式,全面提升了配电网保护动作的选择性、安全性和供电可靠性。通过 5G 配电网纵差保护应用指标分析,验证了整体系统架构的合理性和技术方案的可行性,为“5G + 电力业务”技术的推广及应用提供参考。

参考文献

[1] 朱学芳,王贵海,祁彬斌. 5G 时代数字信息资源智能服务研究内容及进展[J/OL]. 情报理论与实践:1 - 10 [2020 - 07 - 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1762.G3.20200630.1524.014.html>.

[2] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术,2019,43(5): 1575 - 1585.

[3] Ssaifi 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.

[4] Matias J, Garay J, Toledo N, et al. Toward An SDN - enabled NFV Architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 187 - 193.

[5] 焦燕鸿,王韬,李富强,等. 5G 高铁无线网建设关键技术与解决方案研究[J/OL]. 电信科学:1 - 13 [2020 - 07 - 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2103.TN.20200604.1311.025.html>.

[6] 王永军. 基于 5G 技术的机车大容量无线转储系统研究[J/OL]. 控制与信息技术, 2020(4): 1 - 5 [2020 - 07 - 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1546.TM.20200803.0843.002.html>.

[7] 刘昊,李静,鲁旭涛. 5G 背景下智慧农业通信节点部署策略[J]. 西安交通大学学报, 2020(10): 1 - 9.

[8] 史东华,龙少颖. 5G 通信技术在水文自动监测的应用前景分析[J/OL]. 人民长江:1 - 7 [2020 - 07 - 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20200718.1903.002.html>.

[9] 范京道,闫振国,李川. 基于 5G 技术的煤矿智能化开采关键技术探索[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 92 - 97.

[10] 田伟. 5G 技术应用于远程医疗的探索与展望[J]. 中华外科杂志, 2020(1): 1 - 4.

[11] 卢向群, 孙禹. 基于 5G 技术的教育信息化应用研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 120 - 128.

[12] 王廷凰, 余江, 许健, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. 供用电, 2019, 36(9): 18 - 21.

[13] 王常玲, 赵元. 基于 5G 承载网的电力差动保护业务时延抖动分析[J]. 通信世界, 2019(32): 33 - 36.

[14] 吕玉祥, 杨阳, 董亚文, 等. 5G 技术在配电网电流差动保护业务中的应用[J]. 电信科学, 2020, 36(2): 83 - 89.

[15] 张君怡, 任鑫博. 非独立组网架构下 5G 网络在智能电网中的应用[J]. 通讯世界, 2020, 27(2): 11 - 12.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 陈艳, 宋英华. 新型配电物联网后台系统架构设计与

关键技术研究[J]. 供用电, 2020, 37(2): 41 - 46.

[19] 李洪全, 张冀川, 丁浩, 等. 基于 IPv6 的配电物联网通信单元设计[J]. 供用电, 2020, 37(1): 21 - 29.

[20] Joung J, Ho C K, Adachi K, et al. A Survey on Power - amplifier - centric Techniques for Spectrum - and Energy - efficient Wireless Communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 315 - 333.

[21] 王扬. 5G 终端加速发展 行业市场全面打开[N]. 人民邮电, 2020 - 07 - 30(006).

[22] 钟鹏. 5G 系统毫米波频段上的无线传输技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.

[23] 孙东雪, 王主丁, 田园, 等. 基于分区分压的配电网供电能力计算实用方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3081 - 3091.

[24] 张晶, 代攀, 吴天京, 等. 新一代智能电网技术标准体系架构设计及需求分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 12 - 20.

作者简介:

郭立(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护运行技术。

(收稿日期: 2020 - 09 - 27)

(上接第 59 页)

[5] 赵莉, 候兴哲, 胡君, 等. 基于改进 k - means 算法的海量智能用电数据分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2715 - 2720.

[6] 徐茂鑫, 余涛, 徐豪. 基于 DSP 的智能用电终端设计与实现[J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 24 - 29.

[7] 高志远, 曹阳, 田伟, 等. 需求响应概念模型及其实现架构研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016(11): 8 - 13.

[8] Wu G, Mizuno M, Havinga P J M. MIRAI Architecture for Heterogeneous Network[J]. Communications Magazine IEEE, 2002, 40(2): 126 - 134.

[9] STM32 Reference Manual. STMicroelectronics Co., Ltd. [Online]. available: http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f1-series/stm32f103/stm32f103ze.html, 2017.

[10] CC1100E datasheet. Texas Instruments Co., Ltd. [Online]. available: <http://www.alldatasheet.com/view.jsp> Searchword = CC1100E, 2017.

[11] KQ130F 数据手册. 四川省科强电子技术有限责任公

622104574. html, 2017.

[12] CS9803 数据手册. 森川电子科技深圳公司[Online]. available: http://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp Searchword = CS9803&sField = 2, 2017.

[13] ENC28J60 datasheet, Microchip Technology Inc [Online]. available: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/102687/MICROCHIP/ENC28J60.html>, 2017.

[14] Shouqian Y U, Lili Y I, Chen W, et al. Implementation of A Multi - channel UART Controller Based on FIFO Technique and FPGA[C]//2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007: 2633 - 2638.

[15] SPI 总线简介[Online]. available: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus, 2017.

[16] STM32 Firmware Library v2. 0. 3 开发库[Online]. available: <http://www.st.com/internet/com/software/firmware.jsp>, 2017.

作者简介:

张云翔(1981), 男, 硕士, 工程师, 从事物联网与智能电网研究工作。

(收稿日期: 2020 - 06 - 18)

北斗系统在输电线路防灾监测中的应用探索

李 喆,刘浩宇,余佐超

(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘要:输电线路覆盖范围广、输送距离长,沿途所经区域环境条件恶劣、地质地形复杂,存在巡检效率低、复巡周期长、监测数据不精确等问题。针对220 kV线路一基杆塔受地质扰动影响而出现塔基沉降杆塔发生主材形变、倾斜度增加,利用北斗系统及地基增强系统,采用综合分析法准确、可靠地获取毫米级监测数据,全面掌握各类风险的实时状态信息构建输电线路杆塔变形及塔基地质隐患防灾监测应用体系,为线路防灾应用提供技术参考。

关键词:输电线路;地质扰动;北斗卫星导航系统;铁塔沉降监测

中图分类号:P237 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)06-0071-04

Exploration of Application of Beidou Navigation System to Disaster Prevention Monitoring for Transmission Line

Li Zhe, Liu Haoyu, She Zuochao

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Transmission lines cover a wide range, and have long transmission distances, bad environmental conditions and complex geological terrain, so there are many problems such as low efficiency of inspection, long cycle of re-inspection, inaccurate monitoring data and so on. In view of a 220 kV transmission line, there are tower foundation settlement caused by geological disturbance, the deformation of main materials and the increase of inclination of the tower. The Beidou navigation system and the foundation reinforcement system are used to accurately and reliably obtain high-precision monitoring data of millimetre level and comprehensively grasp the real-time status information of various risks. Through constructing the disaster prevention monitoring system for tower deformation and geological hazards of tower foundation in transmission lines, the field application and data analysis provide a technical reference for the application of line disaster prevention.

Key words: transmission line; geological disturbance; Beidou navigation system; monitoring of tower settlement

0 引言

四川省的地势复杂,地形地貌类别多样,包括了盆地、平原以及山地特征。紧邻龙门山脉的输电线路较多,龙门山脉地质条件复杂、降雨丰沛、人类工程活动强烈,部分区域地质灾害发生类别多、程度重、辐射广、频度高,倒杆断线的风险较高。这对输电线路的破坏性最强,电网容灾的能力不容乐观,亟需通过有效的监测手段,设置地灾观测点,对电力设施地质环境位移、沉降等状态进行高精度监测并及时告警,提升电网地灾隐患应急处置能力。文献[1]利用电力北斗技术,通过其中三大功能之一的短报文通信,开展了北斗系统的地质环境监测信息采集,

实现地面以下的监测等典型应用。文献[2]通过完善形成建筑物坐标监测体系,对北斗系统在城市中建筑物防灾减灾应用提供了一种新思路,也启发了编写思路。文献[3]采取载波相位差分技术(real-time kinematic, RTK)论证关于杆塔变化中达到厘米程度变化的有关理论。文献[4]阐述了北斗系统在高纬度东北区域短基线的统计精度。文献[5]明确了北斗系统在短基线条件下的毫米级分析能力,能够达到目前市场中所有的精度监测的实际需求。

按照已有的论证成果,下面主要基于杆塔发生沉降的突出情况,通过RTK技术对地质扰动的杆塔沉降情况进行数据监控预警^[6],从而保障了杆塔设备安全稳定的运行。同时对相关数据也进行分析论证^[7],全方位描述北斗系统在实际使用中的应用情况^[8]及取得的成效。

1 案例基本情况

成都市 220 kV 桃圣线 M 号塔位于成都市主城区某乡的砂石厂内,杆塔型式为 SJ901 - 30.5 (30),基础根开 12.550 m;基础形式为人工挖孔桩基础,A、B、C 腿桩基高度 9 m、D 腿桩基高度 7.5 m,直径 1.2 m。该基杆塔位于砂厂内,其中 AD、BC、CD 面堆放大量砂石且存在塔脚保护帽被埋、小材轻微变形的缺陷。



图1 220 kV 桃圣线 M 号塔

铁塔周围有大量砂石堆积,导致铁塔基础附近地质受挤压后发生持续变化。220 kV 桃圣线某塔其中 A、B、C 腿第一层平台主材包钢处,以及第一层平台横材均出现不同程度的变形。在夏季连续暴雨天气中,将该处点位作为重点关注进行多次基础测量,结果如表 1 所示。

由于该塔出现不同程度的变形,对电网安全运行构成极大风险,采用北斗系统杆塔沉降监测装置对铁塔塔基位移进行远程实时监测,可对杆塔沉降情况及时预警。

2 塔基沉降精准定位原理

2.1 基于塔基沉降定位相关原理

北斗精准定位系统由基准站、北斗地面监测站

和数据解算中心 3 部分构成^[9]。其中基准站需要安装在地势平稳的位置,为运行中的监测站提供相对参考位置^[10],基准站与监测站之间的距离小于 20 km,原则上不超过 3 m 距离,且需要达到联动效果,才能够真实体现出监测对象的变化。上述两个设备的观测数据通过无线传输实时地传输至数据解算中心^[11]。工作人员可以远程对数据变化情况进行监控。北斗基准站和监测站需要由全球导航卫星系统天线、全球导航卫星系统接收机、供电系统和通信设备构成。全球导航卫星系统天线采用新型扼流圈型天线,对电磁干扰进行处理^[12-13]。基准站、监测站同时采用蓄电池和市电进行供电。

2.2 北斗载波相位定位技术

利用载波相位观测方法实现北斗高精度差分定位,需设立基准点和监测点。基准点通过当前自身位置信息和北斗卫星实时位置分析得到其真实间距,同时通过载波技术统计得到两者的实际距离,再以上述实际距离和测量距离的差值为修正数据,修正卫星到监测点的测量距离,以减少大气电离层、接收机钟差、卫星钟差和对流层折射误差的影响,得到准确的位置信息数据,原理详见图 2。

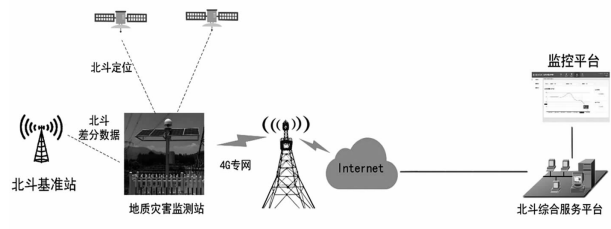


图2 地质灾害监测系统原理

3 输电线路防灾监测应用体系

3.1 应用体系框架

在国家电网公司卫星技术数据物联体系的统一架构上,细化公司的数据物联体系。构建多源卫星遥感数据接入架构;基于多源卫星遥感数据、时空序

表 1 塔腿根开测量数据 单位:m

测量部位	2019 年测量值	设计值	与设计差值	规范准许误差	是否满足规范	2020 年 3 月测量值	2020 年 8 月测量值	2020 年 9 月测量值
AB	11.809	12.55	-0.741	0.025 1	否	11.556 0	11.790	11.567
BC	12.234	12.55	-0.316	0.025 1	否	11.861 0	12.200	11.816
CD	12.303	12.55	-0.247	0.025 1	否	11.782 9	12.280	12.280
DA	12.421	12.55	-0.129	0.025 1	否	12.087 8	12.384	12.067

列数据、关系数据型数据,构建支撑时空服务总线运行的中间层数据库,支撑上层应用按照时间、空间、关系等维度开展各种图分析;构建精准位置数据、授时授频数据、短报文数据的存储处理新架构,对数据进行集中存储和管理,为时空数据服务总线提供时空数据挖掘分析工具。

电网输电设备防灾监测应用体系框架将北斗准确的坐标定位技术作为关键点。将基准点(新建设或者其他供应商提供)、杆塔(包括附近环境)以及北斗电力平台系统等组合为全方位的输电线路高精度变形监测体系,同时通过全面的比较能够得到平稳、精准的相关记录,给输电线路防灾减灾带来支撑。基于电力北斗高精度定位技术可实现杆塔位移、滑坡及偏移的分析,同时可以利用北斗双天线姿态技术实现杆塔塔形的精确测量^[14]。而在现实的场景中,可根据实际需要选择实时解算或后处理解算两种处理模式,实现杆塔与附近地质隐患点数据实时、全天候的自动化采集和监控,它能够对发生变化的杆塔和附近山体变化带进行全方位实时有效的毫米级统计。该体系能够适用于发电场与变电站地面沉降区以及跨越高速、高铁、江河等的危塔,对其进行载体变形位移、倾斜监测等。

3.2 输电线路地质灾害监测

为了对极端地区地质灾害杆塔进行实时监测,可以通过北斗地基增强网和地灾北斗监测点,对频繁发生山体变化的地质进行全方位实时监测,从而可以提升至毫米级的统计分析。设备安装在铁塔附近的危急处,可以按照无线公网、光伏发电的模式进行供电。通过使用北斗监测装置能够全方位监测隐患点地表变形情况,实时观测统计分析数据的变化情况,预先开展防灾预警,确保电网稳定有效地运行。

参考成都 220 kV 杆塔可能存在山体滑坡的风险,根据现场勘察,在杆塔附近地面稳定且地势较高处建立电力北斗地灾监测站。通过电力北斗基准站和后台解算系统,得到此处 30 天左右的实际变化情况;同时采用全面统计了解的方法对该监测点每天数据进行计算分析,形成毫米级监测变形量、变形累积量、变形速率数据。通过结合该区域地质情况分析,能够全面地了解到此处点位发生变化的具体情况。

4 塔基沉降位移监测装置的安装与运行

4.1 监测测试

1)对现场环境开展基础信号测试。采用目测方式检查周围环境是否存在遮挡,同时监控实地的传输网络的通信水平、整体冗余度等指标,指标率不能低于 99%。2)电磁环境测试。在完成通信环境测试之后,利用频谱仪测试现场的电磁环境。包括测试 1.575 GHz 和 1.25 GHz 频段是否存在周围环境的扰动^[15],如载波信号、高次谐波^[16]等,整个过程中应不大于 -40 dBm。

4.2 监测装置安装

经过现场勘察后,发现 D 号塔基位于泥土层内部,因此其产生变化的概率高,同时 D 号腿的方向对于信号接收较为顺畅,从而决定了沉降监测装置放置在 D 号腿相连的平台上,然后通过浇筑水泥、嵌入固定物体后将监测站点位装置牢固立在塔基旁,确保两者之间无任何运动发生的可能性。北斗观测天线对中固定在观测杆上,如图 3 所示。



图 3 基于塔基沉降的地质灾害监测装置

为了提高监测站的定位精度,基准站以就近原则安装在监测站附近的平地,远离地质扰动区域,且基础坚固、距离监测站约在 100 m 范围的附近。

4.3 监测数据分析

以 2020 年 9 月 7 日至 9 月 30 日共计 24 天为例,运行数据如图 4 所示。经过持续不间断监测 D 号腿在 9 月 14 日出现水平与垂直抖动,后又迅速修正,可判定为卫星抖动。而后水平 X、Y 方向呈往返波动,没有出现偏移;垂直方向在 9 月 24 日等多日出现正向位移,但不久后呈往返波动,确定不存在位移趋势。D 号腿位移量始终小于 10 mm,属于正常

的抖动偏差范围。按照上述判定原则,截至 10 月 1 日,塔基实际变化情况为:D 号腿垂直方向、水平方向累计无明显偏移,位移量位于误差范围内。

为了能够全方位地掌握塔基的变化情况,通过沉降装置与系统对该杆塔的塔基开展为期约 30 天的连续监测分析,保障了该铁塔在迁改前的安全稳定运行。

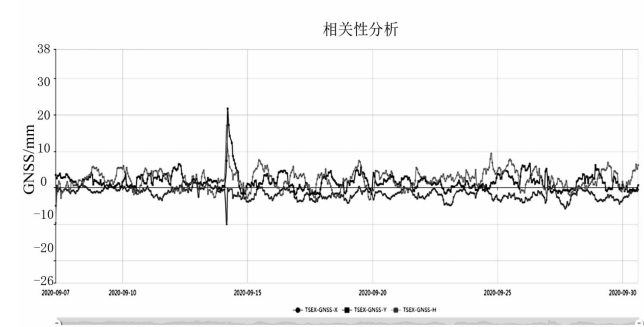


图 4 2020 年 9 月 7 日至 9 月 30 日运行数据

5 结 语

北斗系统的输电线路地质灾害监测预警系统拓展延伸了北斗系统的多项优点,能够全面匹配与融合输电杆塔所在位置的周边情况,达到对地质灾害隐患的输电线路杆塔的不间断分析,为杆塔发生扰动、沉降的监测给予了全面详实的参考技术路线,因此可对输电设备企业未来的深化应用提供技术支撑。如今,通过电力北斗应用对输电线路杆塔进行地质灾害监测预警还处于初级探索时期,可能会受到多个参考因素的影响,相关的实施应用范围和技术方案也有待于进一步优化与提升。随着基于杆塔沉降监测装置的深化应用,各类地灾监测场景会不断丰富。在未来研究中,增加电力北斗杆塔沉降监测预警系统的认知能力,从而提升优化后的预警成效,促进电力公司的数字化转型与运检智能化水平的提升。“北斗+电力”也为输电专业运维检修和防灾减灾提供了技术参考,为智能电网发展模式进行了积极的探索和应用。

参考文献

[1] 罗郢,殷秀兰,周毅,等. 基于北斗卫星的地质环境监测信息实时传输技术研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 159-163.

[2] 张凌,李亦纲,聂高众,等. 北斗系统在地震灾情监测中的应用探讨[J]. 城市与减灾, 2014, 17(1): 25-28.

[3] 丛犁,杜秋实,窦增,等. 基于北斗 RTK 技术的电力铁塔变形监测技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(12): 24-29.

[4] 丁盼,席瑞杰,肖玉钢. 北斗卫星导航系统用于东北地区高精度变形监测性能分析[J]. 测绘通报, 2016, 62(4): 33-37.

[5] Xi R, Xiao Y, Liu X, et al. Feasibility Analysis of High-precision Deformation Monitoring Using Beidou Navigation Satellitesystem[C]//China Satellite Navigation Conference(CSNC) 2015 Proceedings, 2015.

[6] 杨秋实,徐爱功,祝会忠,等. BDS 单参考站载波相位差分定位方法[J]. 导航定位学报, 2016, 4(4): 59-64.

[7] 刘伟平,郝金明,田英国. 北斗卫星导航系统双差动力法精密定轨及其精度分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 131-139.

[8] 张明,顾晓雪. 北斗接收机定位误差分析[J]. 电子与封装, 2015, 15(9): 40-43.

[9] 万军. GNSS 周跳探测与修复融合算法研究[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2016.

[10] 雷波,陈华德,李青,等. 基于动态差分 GPS 的滑坡位移监测系统[J]. 中国计量学院学报, 2011, 22(3): 203-207.

[11] 王冰,隋立芬,王威,等. GPS/陀螺组合测姿中整周模糊度的快速解算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(1): 128-133.

[12] 冯晓超,金国平,范建军,等. GNSS 接收机伪距测量中的多径效应试验分析[J]. 现代电子技术, 2013(5): 77-81.

[13] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.

[14] 李天斌,孟陆波,朱劲,等. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2429-2436.

[15] 李勇. 北斗卫星导航定位接收机电磁兼容性设计研究[J]. 电子测试, 2017(11): 53-54.

[16] 杨满天,陶丁涛,李婷婷,等. 谐波分析在配电网规划设计中应用探讨[C]. 2018 智能电网信息化建设研讨会论文集, 2018: 323-325.

作者简介:

李 喆(1989),男,硕士研究生,工程师,从事 5G、电力北斗技术应用等工作;

刘浩宇(1991),男,硕士研究生,工程师,从事数据质量管理、电力大数据分析等工作;

余佐超(1990),男,助理工程师,从事信息系统安全防护工作。

(收稿日期:2020-09-29)

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, 曾祥端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-IoT 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-IoT 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。

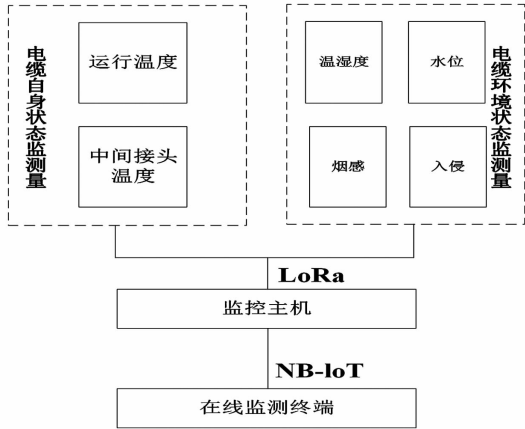


图 1 电缆管井综合在线监测系统结构

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。

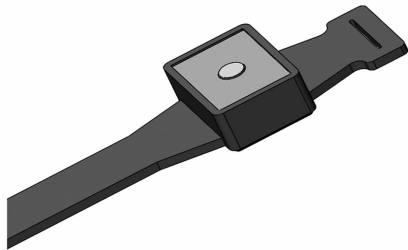


图 2 温度传感器

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 μ 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% ~ 99% 环境湿度、55 ~ 110 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 $^{\circ}$ C ~ 90 $^{\circ}$ C,测量误差控制在 ± 1 $^{\circ}$ 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 ~ 20 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 m,测量精度最小分辨率为 15 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 ~ 2000 mL/ m^3 ,误差范围 $\pm 7\%$,报警信号响应时间不大于 25 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 mAh,可提供直流 3.6 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。

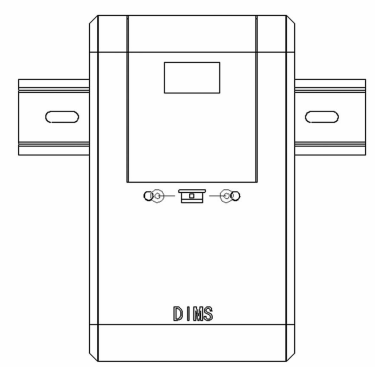


图 3 物联网通讯主机设计图

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 V 锂电池供电,平均工作电流控制在 100 μ A 内,无线发射最大功率不低于 20 dB,能够接受超过 32 个传感器传输的信号,灵敏度大于 168 dB,且最远信号通信传输距离超过 10 km。

3 无线传感通信

电缆管井最深可达 30 ~ 40 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 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

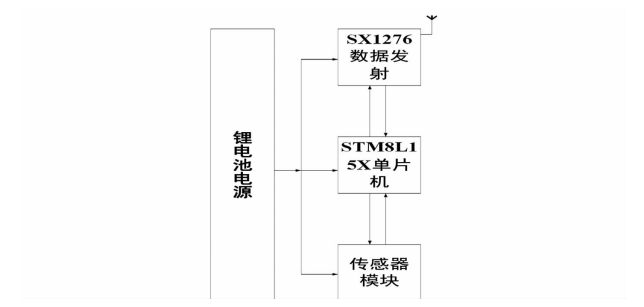


图4 传感器结构框图

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 $10\text{ }\mu\text{A}+5.4\text{ }\mu\text{A}+1.2\text{ }\mu\text{A}=16.6\text{ }\mu\text{A}$ 。

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。

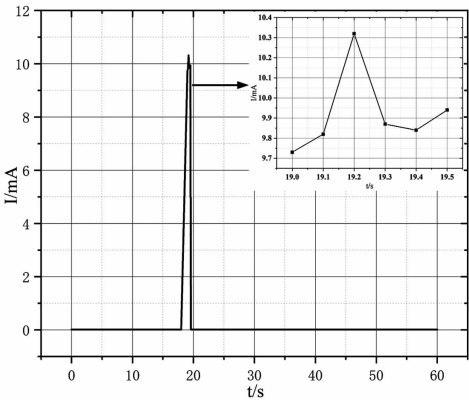


图 5 电流实测结果

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 - IoT 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)

基于 HPLC 宽带电力线载波技术的配电电压质量 在线监测方法研究

余 敏

(国网四川省电力公司自贡供电公司, 四川 自贡 643000)

摘 要:在电力配电工作中,电压是衡量电能质量的关键指标之一,也是影响电力设备正常工作的关键性因素。加强对台区低压用户电压质量的监测、管理对提高供电质量、提升供电企业社会形象均具有举足轻重的作用。然而,现有管理手段无法精准监测到用户侧的低电压。为此,提出一种基于 HPLC 宽带电力线载波技术的配电电压质量在线监测设计方案,在现有采集系统的基础上,通过将下行通信方式改为 HPLC 宽带电力线载波技术,完成全范围智能电表电压、电流、功率、相位等计量数据的精准、高频采集,实现配电电压质量的精准在线监测,进而为低电压治理提供数据支撑。

关键词:HPLC; 在线监测; 宽带载波; 数据采集; 电压质量

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0081-05

Research of Online Monitoring Scheme for Distribution Voltage Quality Based on HPLC Broadband Power Line Carrier Technology

Yu Min

(State Grid Zigong Electric Power Supply Company, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract:In distribution network, voltage is one of the key indicators to measure the power quality, and it is also a key factor affecting the normal operation of power equipment. Strengthening the monitoring and management for voltage quality of low-voltage users in the substation area plays an important role in improving the quality of power supply and improving the social image of power supply company. However, the existing management methods cannot accurately monitor the low voltage, especially on the user side. Therefore, a design scheme for on-line monitoring of distribution voltage quality is proposed based on HPLC broadband power line carrier technology. On the basis of the existing acquisition system, through changing the downlink communication mode to HPLC broadband power line carrier technology, the accurate and high-frequency acquisition of voltage, current, power, phase and other measurement data of smart electricity meters is completed. Furthermore, the precision of distribution voltage quality is realized, and the data for low voltage governance is supported.

Key words:HPLC; online monitoring; broadband carrier; data acquisition; voltage quality

0 引 言

用电负荷的逐年增加致使部分配电网线路无法满足当前用电需求。在用电高峰期,仍然存在台区及用户电压偏低的现象^[1-4]。现有研究表明,台区及用户侧的电压偏离会显著影响电流稳定性,进而引发电力火灾及安全事故^[3-4]。因而在电力配电工作中,电压是衡量电能质量的关键指标与影响电力

设备正常工作的核心因素^[5]。同时,配变台区是供电环节的最后节点,是直接影响用户供电电压质量的关键。如何加强对台区低压用户电压质量的监测和管理,提升台区配电系统稳定性与可靠性,是供电服务“最后一公里”问题的核心^[6],对改善用户体验、提升供电公司社会形象具有良好的促进作用^[7]。

目前,居民电压质量监测技术主要通过基于配电路径供电区域分类的典型用户电压质量监测完

成,存在着自动化程度不高、覆盖范围有限、准确率较低的问题,无法精准监测到低电压用户,更无法通过系统数据分析低电压产生的原因。如何在现有系统上扩大采集系统数据覆盖范围,提升数据采集质量,对居民配电系统改善及电网安全稳定运行具备重要意义。

智能电表通常装在产权分界点处,是供电企业到电力用户的终端智能化设备。同时为了计算线损,智能电表也会装于配电变压器的出口侧。智能电表的各项计量数据,如用户侧的电压、电流、功率等,可通过采集系统实现精准采集,进而完成对台区低压用户电压质量的监测。然而,现有的采集系统下行通信是采用窄带电力线载波通信技术,频率范围为 3 ~ 500 kHz,相对较窄的带宽不仅限制了通信服务的传输速率,且无法保证通信链路抗干扰能力,在实际中一次抄表成功率很难突破 90% 以上^[8],主要用于自动抄表、线损计算等基本功能。HPLC 是一种高速宽带电力线载波通信技术,频率范围为 0.5 ~ 12 MHz,相比窄带载波通信速率提升了数十倍,最高可达 1 Mbit/s^[9-10],是目前智能电网、能源管理等应用的主要通信手段^[11]。宽阔的频域使得 HPLC 技术具备传输速率高、实时性强、抗干扰能力优异、传输可靠率高^[12-13]的优势。同时,现有 HPLC 模块均配有过零点检测单元,可以记录过零点时刻,从而实现模块的相位识别及台区过零周期特征值获取。随着用电信息数据量的逐渐增加及智能电网对通信实时性要求的不断提高,HPLC 技术更能适应现在及未来的数据采集和通信要求^[14]。

下面,针对现有网络通信技术的不足,基于 HPLC 宽带电力线载波技术,提出了一种配电电压质量在线监测方案。

1 功能实现准备

1.1 整体架构

方案整体架构如图 1 所示。用电信息采集系统主要由主站、通信信道、采集设备 3 部分组成^[15]。

目前国网四川省电力公司采用的通信方式依托于集中器进行收集、传递。首先,集中器通过窄带电力线载波通信模块采集智能电表数据,而后再通过

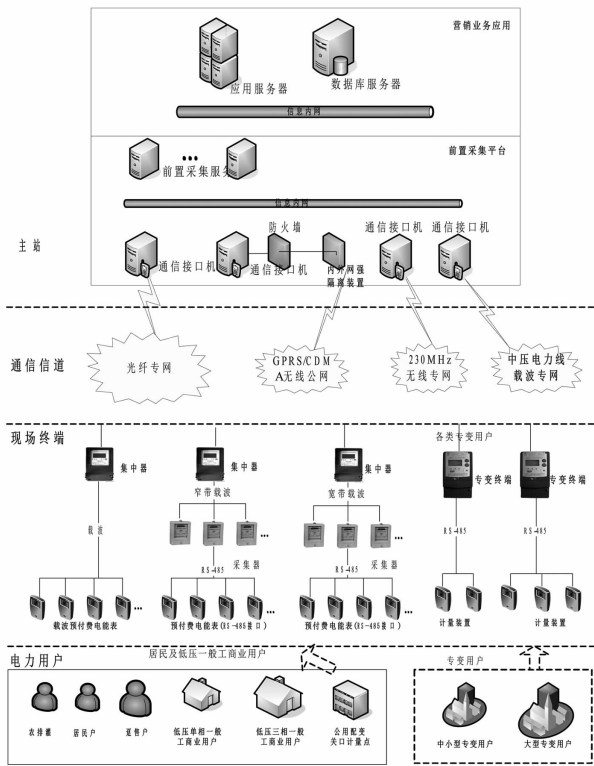


图 1 用电信息采集系统架构

4G 无线公网将数据传送至采集系统主站。针对现存网络通信技术的不足,将集中器下行通信模块和表计通信模块更换为 HPLC 宽带电力线载波模块,同时将集中器和智能电表更换为满足 Q/GDW 1364—2013 及以上功能要求的设备,通过对集中器、模块和主站进行高频采集任务配置,完成每 15 min 一次的台区侧及用户侧智能电表的电压、电流等相关数据采集^[16],进而实现配电电压质量的精准在线监测。利用采集到的数据,通过建立系统数据分析模型,还可以实现低电压产生原因的初步判断。

1.2 高频采集任务配置

高频采集的数据交互方式如图 2 所示。2013 版的智能电表本身就存储有每 15 min 的电压、电流等冻结数据,智能电表和其 STA 模块之间通过 DL/T 645—2007 或者 DL/T 698. 45—2017 协议进行通信,STA 模块和集中器的 CCO 下行模块之间通过 HPLC 协议进行通信,集中器 CCO 下行模块和集中器之间通过 Q/GDW 1376. 2—2013 协议进行通信,多级传递将电表的冻结数据传输给系统主站。

为了实现高频采集,还需要对集中器、模块、主站进行高频采集任务配置。其中,集中器的抄表任务需要从传统窄带模式下的路由主动、集中器主动抄表机制向宽带模式下的并发抄表机制调整。同

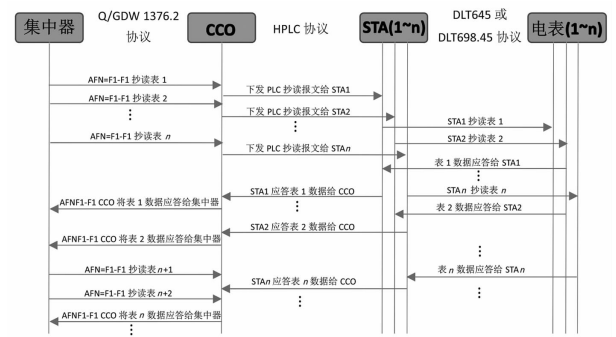


图 2 高频采集数据交互

时,对集中器和表计的采集任务进行合理调度。对集中器而言,需穿插进行短周期任务和长周期任务,避免出现长周期任务挤占短周期任务的现象。对表计而言,普通表计采集任务和重点表计采集任务也要穿插进行,以避免普通表计挤占重点表计采集任务,造成短周期任务或重点表计任务成功率不高的问题。

在高频数据采集中,STA 模块和 CCO 模块没有特殊的开发内容,实现基本的并发抄表功能即可。CCO 收到集中器的报文后,将其封装成 HPLC 协议帧发给 STA。CCO 端需要有一定的数据缓存能力,来存储集中器的连续多帧下行数据。STA 收到 CCO 的 HPLC 应用层协议后解析,若是并发抄表帧且含有多个电表协议报文,则需将多个电表协议报文解析出来后分别与电表进行通信。STA 收到电表的应答后进行缓存,当多帧应答收集完成或者超时间到期后,组装成完整的 HPLC 应用层报文回复给 CCO。CCO 收到 STA 的抄表应答帧后,将抄读结果发给集中器。

2 系统功能设计

2.1 低电压监测功能

通过 HPLC 宽带载波模块的高频采集功能,将智能电表每 15 min 的电压、电流等冻结数据采集回主站后,通过主站集中数据分析,结合低压界定规范,综合判断电表的低电压状况。依据低电压出现位置,还可以将低电压现象分为台区级低电压和用户级低电压。通过 HPLC 模块的相位识别功能,可以判断低电压所在的相位,并在系统中进行展示。系统的详细功能部署界面见图 3、图 4。

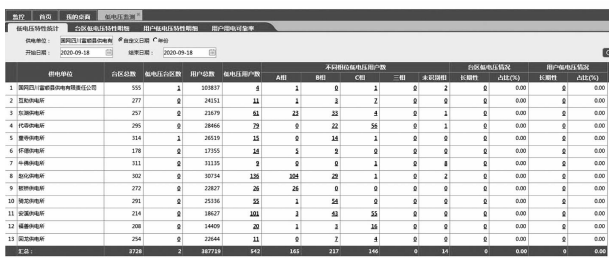


图 3 低电压界面展示



图 4 电压数据展示

2.2 低电压原因初步判断

低电压的产生具备典型的系统性,影响决策变量多且繁杂。其中,造成该现象的主要原因有 3 种:三相负荷不平衡、供电半径过长或者线路线径过小、公用变压器负载过重。在具体原因判断上,可结合本系统提供数据进行初步判断,再结合现场运行状况进行综合考虑^[1]。

1) 三相负荷不平衡

在实际工作开展过程中,由于工作人员技术水平以及现场施工难度等条件的限制,难以实现将单相负荷均匀分布在三相线路上,从而出现三相负荷分布不平衡。三相负荷不平衡会致使各相电压幅值不相等,电压偏低相会出现设备无法正常工作,而电压偏高相会导致设备过额运行,可能会影响设备的使用寿命^[1]。

在三相负荷不平衡问题的监测上,可在监测低电压的同时同步监测三相负荷不平衡情况,通过采集的配电变压器出口侧量测数据是否出现单相或者两相低电压,以及该变压器的三相电流不平衡度是否持续 2 h 大于 25% 来判断三相负荷不平衡是否是造成低电压产生的原因。系统功能的部署界面如图 5 所示。

[10] 王鸿玺,唐如意,吴一敌,等. 基于 HPLC 的智能抄表技术在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用[J], 电力系统保护与控制,2020,48(3):92-97.

[11] 陶鹏,王鹏,张艳. 不同通信方式对用电信息采集系统采集成功率的影响分析[J]. 河北电力技术, 2017(1): 3-4.

[12] 王凤祥,梁波,孔晶,等. 宽承载波技术应用及效益分析[J]. 国网技术学院学报, 2018, 21(3): 35-38.

[13] 周春良. 电力专用宽带电力线载波通信芯片的设计与应用[J]. 信息技术与网络安全, 2017, 36(11): 34-36.

[14] 薛晨. 中压配电网电力线载波通信系统自适应频点

(上接第 48 页)

4 结 语

经过测试,所提的地址提取匹配方法具备一定的实用性,可以应用于电力企业相关业务场景,但同时该技术主要面向于地址库中包含的地理位置信息,在此条件下能具备一定的准确性、运行速度和灵活优势。

在缺点方面,该方案对于日常可能会遇到的地址信息未包含在地址库内的情况没有进行设计处理,因此未来可以在上述方案的基础上进一步加入“最近地址提取法”^[9]。现阶段形成思路如下:1) 基于独热编码方式对地址库各地址信息进行解析,将文字进行量化处理;2) 将处理后的地址库按区县进行分区,减少模型运算量,增加模型数量;3) 基于随机森林、人工神经网络等方式定位分区中地址库每个字段的经纬度权重^[10];4) 对未能直接匹配成功的文章地址信息,进行独热化处理,并按照所属区域纳入模型进行计算,得出其经纬度;5) 根据模型计算的经纬度,计算与地址库之间欧式距离或者曼哈顿距离找到最相近地址^[11]。下一步将继续提升所提方案的全面性及可用性,为电力企业在管理及服务等方面应用提供参考。

参考文献

[1] 陈开昌. 自然语言处理技术中的中文分词研究[J]. 信息与电脑(理论版),2016(19):61-63.

[2] 韩程程,李磊,刘婷婷,等. 语义文本相似度计算方法[J].

选择算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 24-29.

[15] 徐文涛. 基于 HPLC 通信技术的用电信息采集系统设计[J]. 微型电脑应用,2020, 35(12): 117-120.

[16] 徐文涛. 基于 HPLC 通信模块的智能电表改进分析[J]. 微型电脑应用,2019,35(11): 156-158.

[17] 李睿. 低压配电网电压质量问题分析与治理[J]. 电工技术,2020(1):110-112.

作者简介:

余 敏(1987),女,工程师,硕士,主要从事电能计量技术和用电信息采集技术的应用研究。

(收稿日期:2020-10-23)

华东师范大学学报(自然科学版),2020(5):95-112.

[3] 张磊. 文本分类及分类算法研究综述[J]. 电脑知识与技术,2016(34):225-226.

[4] 王春柳,杨永辉,邓霏,等. 文本相似度计算方法研究综述[J]. 情报科学,2019(3):158-168.

[5] 徐培治,刘晓春,秦首科,等. 网页信息提取方法和装置:CN108399167A[P]. 2018-08-14.

[6] 王瑞波,王钰,李济洪. 面向文本数据的正则化交叉验证方法[J]. 中文信息学报,2019(5):54-65.

[7] 张大威. 微博数据的地理位置信息提取方法:CN105069071A[P]. 2015-11-18.

[8] 石凤贵. 基于 jieba 中文分词的中文文本语料预处理模块实现[J]. 电脑知识与技术,2020,16(14): 254-257.

[9] 刘德喜,聂建云,张晶,等. 中文微博情感词提取:N-Gram 为特征的分类方法[J]. 研究中文信息学报,2016(4):193-205.

[10] 徐聪,张丰,杜震洪,等. 基于哈希和双数组 trie 树的多层次地址匹配算法[J]. 浙江大学学报(理学版), 2014(2):217-222.

[11] 李想. 基于社交媒体的灾害事件提取与时空分析——以地震灾害为例[D]. 兰州:兰州交通大学, 2018.

作者简介:

刘浩宇(1991),男,硕士,工程师,从事数据质量管理、电力大数据分析等工作;

李 喆(1989),男,硕士,工程师,从事 5G、电力北斗技术试点应用等工作;

余佐超(1990),男,助理工程师,从事信息系统安全防护工作。

(收稿日期:2020-10-09)

数字新基建在公园城市能源互联网建设的落地与实践

潘雪佼¹, 何冰¹, 谢天祥¹, 乔云池², 胡园园¹, 向柯霓¹

- (1. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要:“新基建”是国网公司立足于高科技的基础设施建设, 聚焦大数据中心、工业互联网、5G 应用及人工智能 4 个领域, 明确建设能源互联网新战略下的数字新基建工作思路。国网天府新区供电公司有机融合了天府新区“公园城市”的建设理念, 提出基于工业互联网和 5G 技术的综合能源服务平台, 构建基于能源互联网的开放共享、绿色环保、智能高效的公园城市绿色生态体系。首先, 简单介绍了“5G + 工业互联网”技术; 然后, 介绍了综合能源系统的功能; 最后, 提出了一个以客户为中心、逐步构建产业生态圈、可持续发展的综合能源服务平台方案, 并聚焦天府新区兴隆湖示范区落地实施, 获得了卓有成效的建设成果。

关键词:数字新基建; 能源互联网; 工业互联网; 5G; 综合能源系统

中图分类号:TK01 **文献标志码:**B **文章编号:**1003 - 6954(2020)06 - 0086 - 06

Implementation and Practice of New Digital Infrastructure in Energy Internet Construction for Park City

Pan Xuejiao¹, He Bing¹, Xie Tianxiang¹, Qiao Yunchi², Hu Yuanyuan¹, Xiang Keni¹

- (1. State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The "new infrastructure" is the infrastructure construction based on new and high technologies. Focusing on big data center, industrial Internet, 5G application and artificial intelligence, State Grid Corporation of China determines new working thoughts of digital infrastructure under the development of energy Internet. The integrated energy service platform based on industrial Internet and 5G technology is proposed by Tianfu New Area Electric Power Supply Company, which mixes the idea of "park city" together, and a green and environmental, intelligent and efficient city ecosystem with open sharing is established based on energy Internet. The technology of "5G + industrial Internet" is introduced as well as the functions of the integrated energy system. A plan of gradually building an industrial ecosystem is proposed tanking customers as the center and for sustainable development, and focusing on the implementation of Xinglong Lake Demonstration Area in Tianfu New Area, the fruitful achievements have been achieved.

Key words: new digital infrastructure; energy Internet; industrial Internet; 5G; integrated energy system

0 引言

2018 年 2 月, 习近平总书记在四川成都天府新区考察时提出“特别要突出公园城市特点, 把生态价值考虑进去^[1]”。作为公园城市“首提地”, 天府新区着力打造“人城境业”高度融合的公园城市。这

就在绿色低碳生产和经营效益方面对区域内企业提出了更高的发展要求。目前, 天府新区多数企业使用的能源管理服务平台建设水平仍处于能源数据集抄阶段, 部分虽具备子系统的节能控制功能, 但多与数据集抄系统是分割独立的, 且受限于 RS485 和电力载波技术条件, 无法升级到监控管一体化, 因此搭建一个高速、稳定、可靠的控制网络和传输网络是实

现智慧能源管理的关键。

立足于区域内企业智慧能源管理需求,提出基于“5G+工业互联网”技术的综合能源服务平台方案,促进综合能源业务融合,服务数字化城市建设、企业节能降耗和能源市场发展;从电网资源、数据、服务产品等多个方面重构业务运营管理方式,促进业务跨界融合,服务能源互联网建设与公司数字化转型。下面将从平台关键技术、建设目标、建设思路、平台系统架构、应用功能、应用案例进行介绍。

1 5G+工业互联网

工业互联网作为新基建七大领域之一,为数据采集、汇聚、共享、应用提供了基础^[2]。广义上来说,通过工业互联网平台实现了全流程资源及要素的连接,数据经过计算机的处理、存储、运算,达到自我学习优化的良性循环。工业互联网的诞生,有利解决数据孤岛、产业链协同及劳动力缺失等行业痛点。以数据为基础,依托平台实现多维度、多要素产业链的协同调控、统一管理,推动不同行业融通发展,实现效率提升、生产力提升。可以说,工业互联网是整个产业的数字化、信息化、智能化转型,能够推动传统产业升级,加速实体经济数字化进程。

5G 高速率、低功耗、低时延的特性能够服务以传感和数据采集为基础的应用场景智慧化、精准化升级,能够为工业互联网产业及技术体系,如数据的大容量稳定传输、多场景的独立运算处理、受控设备的快速响应提供有效支撑^[3]。

2 综合能源系统

综合能源系统是一种终端一体化多能互补、节能减排的有效方案。传统综合能源系统耦合多种单一能源系统,通过云平台集中管理实现不同能源优化调度,解决因响应时间、性能特性、所处环境等特征不同导致系统出现的安全、可靠、稳定等运行隐患。

能源领域应用工业互联网技术主要实现设备管理、智能运维、能效管理等功能,与综合能源系统功能具有联系相通之处。近年来,国家在能源方面出台了多项改革政策,且用户对高质量、可持续发展的

需求逐渐凸显,因此,综合能源系统发展向多维度延伸、智能化升级成为了趋势,这就对系统建设所采用的核心技术提出了能满足数据监测精度高、系统反应灵敏、能源信息维度与范围覆盖广、云平台存储量大、运算速率快等要求^[4]。

因此,天府公司结合综合能源系统功能及“5G+工业互联网”技术,提出搭建一个服务公园城市数字化建设与能源互联网落地的综合能源服务平台方案。

3 搭建综合能源服务平台

平台主要功能包括以下方面:

- 1)能源数据的计量及监测:实现对用户侧多能源流数据实时、稳定、准确的采集。
- 2)海量数据的分类及存储:对不同类型的数据分类处理,实现数据在云平台上可靠存储。
- 3)各种设备及执行器的可靠控制:通过对接通讯协议或者加装控制终端实现对设备状态的远程控制。
- 4)重要设备状态、能耗管理:基于设备电气状态量、环境量、负荷曲线、历史维护信息等数据,通过建模或算法实现设备的安全、维护提醒、生命周期等功能的集中管理。
- 5)能耗统计、能源账单、用能预测:按照客户需求定期汇总生成能源管理报告,包括能源数据的分类统计、汇总能源账单、能源的短期或者长期预测等内容,实现与客户的友好互动。
- 6)能效测评、能效公示、能效对标、能效审计。
- 7)提供节能建议报告:根据客户用能习惯及能耗数据分析,出具节能建议报告。

综上,综合能源服务平台通过信息系统的固化和支撑业务流程,以数据反映企业能源消费活动情况;推动能源数据采集上云,运用物联设备,实现用户资源要素的泛在接入。能源业务的信息化转型、产业链的网络化协同为形成自学习、自调节、自主、自治能力的智能化能源服务奠定了基础,促进区域用户能源服务模式智慧化转变。推进公司业务模式、产品服务数字化转型发展。通过着手推进区域企业能源管理模式数字化升级,为公园城市高质量建设打下坚实的基石。

4 平台设计

4.1 建设目标

国网天府新区供电公司融合互联网 + 思维^[5], 致力打造汇聚行业智慧、转化创新成果、运营开放共享的创新服务支撑平台, 构建覆盖能源生产和能源消费全产业链的共生共赢的创新服务生态, 提出综合能源服务平台建设四大目标^[6]。

1) 以“人”为本, 乐享服务, 不停电

以服务客户为根本, 面向客户提供经济、可靠电力保障服务。通过在用户侧加装电气量、水浸、温度、湿度等传感终端, 全方位深入融合用户侧感知数据, 依托云平台对用户用电异常情况监测管理, 实现配用电状态精准感知和专业化电力运维及抢修服务, 保障目标客户“不停电”的建设目标。

2) 以“城”为基, 智享能源, 不费电

以“城市”为基础, 依托平台向客户提供综合能源服务, 服务企业用户节能降耗, 高效用能。推进智慧建筑建设, 依托平台实现建筑监、管、控一体化运行, 提升用户建筑能效比, 支撑绿色城市“不费电”的建设目标。

3) 以“境”为重, 欣享景致, 不见电

基于公园城市建设理念, 以“环境”为重点, 依托电力大数据分析, 辅助政府环保治理。依托区域用户的海量电力数据, 综合智能评估用地成效, 为改善城市环境贡献“电力智慧”, 服务公园城市“不见电”的建设目标。

4) 以“业”为先, 共享市场, 不止电

以服务新兴产业升级为先导, 新型数字基础设施建设为基础, 推动产业数字化转型。开展综合能源服务, 收集用户需求, 设计设备智慧运维和企业节能降耗等典型应用场景, 推出多种电力套餐产品, 提高新兴业务产值; 拓展新兴市场、促进多方跨界合作, 构建产业生态圈, 推进平台“不止电”的建设目标。

4.2 建设思路及技术路线

以创新为引擎, 秉承“互联网 + ”开放、共享的理念, 以科技创新带动模式创新, 面向新能源全产业链提供创新服务模式; 以平台为依托, 以一平台、多场景, 微应用、微服务的技术思路为指导, 构建开放平台, 服务共建共享、链接产业链相关方;

以服务为载体, 借鉴互联网运营理念和方法, 聚集服务提供方在平台上构建数据服务、应用服务、业务服务, 转化科研成果, 形成丰富的市场化创新服务产品市场; 以生态为目标, 用业务价值吸引产业链相关各方, 数据拥有方也是数据消费方、服务提供方也是服务消费方, 取各家所长、聚产业智慧, 互相依存, 共生共赢, 形成健康持续生态; 以分享为模式, 新能源产业链各方根据自身需求在平台上选用服务产品, 完成与服务提供方的交易, 服务提供方获取服务收益。服务提供方与平台分享服务收益。

其中, 服务器开发采用业界成熟的服务开发技术单独部署。主站选择 Java EE 技术规范(Java EE 规范采用 8.0 以上版本, JDK 采用 1.8 版本), 开发平台选择 ACloudV1.5 实施建设, 开发过程涉及关系数据库 MySQL5.6.45 及实时数据库 InfluxDB1.7.8 的数据调用。为开发高性能、高可靠性的配电变压器终端采集程序, 采集选取 Netty 技术。网络传输利用 5G 专用网络进行, 并利用 MEC 系统 CT + IT 融合化部署, 实现数据边缘化卸载, 应用边缘化投放, 有效降低数据回传时延、保障数据私密性、为不同时延要求的 5G 类应用提供孵化部署平台。用户面下沉级别为现场级边缘云, 专用 UPF、MEC 内置于企业、园区站点内, 企业和 5GC CP 中的 5G 基站(gNB), 移动运营商边缘云中的 UDM 在私有和公共网络之间共享(RAN 和控制平面共享)。gNB、5GC CP 和 UDM 在逻辑上在专用网络和公用网络之间分开, UPF 和 MEC 在物理上分开。

4.3 系统架构

基于用户需求及业务场景, 系统的整体架构包括边缘层、网络层、平台层和应用层 4 部分, 如图 1 所示。

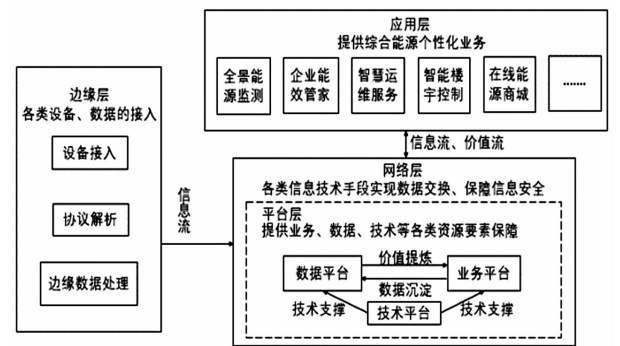


图 1 系统架构

1) 边缘层

边缘层是直接通过网络体系连接监测、控制及生产流程的物理设备(包括用户机电设备、管理设施等)实现用户侧重要元素的泛在连接,包括相关数据的采集及物理设备的控制。采集内容包括电气量、热工量和设备状态量,并通过边缘数据处理形成数据信息。

2) 网络层

网络层能够依靠各类信息技术手段将采集数据可靠传输至平台层。平台应用 5G 通讯技术,通过加装基带处理单元(BBU)、射频拉远集线器(RHUB)、射频拉远单元(PRRU)等 5G 网络通信设备,实现试点区域的 5G 网络覆盖。基于移动运营商公用 5G 网络资源构建私有 5G 网络,采集数据通过传输网络定向流入 MEC UPF, UPF 根据分流策略对数据进行策略匹配,实现私有数据分流至本地服务器保障私有数据安全,其余数据传输至数据平台支撑能源业务开展。

3) 平台层

平台层包含核心业务组件,是开展创新服务业务的基础支撑。主要功能包括对下层软件、设备、资源模块的集中管理;对设备数据和业务数据的接、存、管、用;通过数据建模及大数据分析处理对应用构建和运化部署的支撑,实现应用层业务协同开展、资源统一调配。核心平台的定位在于,基于统一的数据获取和使用机制,支持开放共享的应用服务构建和运营。

4) 应用层

应用层主要包括以微服务框架及开发工具为核心的能源业务开发平台,是平台与客户进行服务互动、挖掘新型服务场景的载体。运营平台通过新能源应用运行支撑服务提供友好易用的应用与服务安装部署环境,通过运行环境、基础中间件服务、大数据服务等支持数据应用的落地部署上线。支持开放应用市集以开放竞争的方式对外服务。并对运营门户为服务提供方、服务消费方、运营管理等用户提供统一入口,打造生态聚集地。

4.4 功能架构及典型场景

综合能源服务平台按照政府需求、客户需求与公司内部需求,遵循“一平台,多场景,微服务、微应用”的开放共享建设思路,在完成设备或系统的实时监控的同时实现数据的汇总与分析。采集终端通

过网络将数据送入平台数据中心,通过使用数据处理工具,如 Spark 内存计算、Storm 流计算、Excel、SQL 完成数据清洗、数据分类、数据存储等一系列数据质量管理流程。平台提供开放应用市集和运营支撑,服务创新服务的快速落地、部署、发布。目前主要构建了五大典型服务场景,具体涵盖全景能源监测、企业能效管家、智慧运维服务、智能楼宇控制、在线能源商城五大业务^[7]。

1) 全景能源监测。多角度展示能源网络的实时运行情况及能源消费结构,园区、行业、企业多维度的能效、碳排放横向对标情况,支撑城市能源规划、政策引导和监管决策。

2) 企业能效管家。定期开展“能效体检”工作,辅助提供能源管理、设备运行优化建议,评估能效水平,促进企业节能降耗经济运营。

3) 智慧运维服务。通过在用户侧加装电气量、水浸、温度、湿度等传感终端,全方位深入融合用户侧感知数据,建立客户侧设备运行管理电子档案,为运维团队提供实时数据信息、平台技术支撑、设备操作步骤、定期检查试验提醒、故障主动报警等功能。

4) 智能楼宇控制。集成建筑设备管理系统,以感知数据为基础,制定智能化设施控制策略。通过对接通讯协议或加装控制装置,一方面实现对楼宇照明、空调、电梯、门禁、大功率负荷等用电设备的节能优化控制;另一方面实现安防监控、出入口控制、火灾报警及应急响应等安全防控功能。

5) 在线能源商城。构建产业生态圈,为企业和综合能源服务商搭建交易撮合平台,提供综合能源服务产品在线化交易,并附带精准营销、企业评级以及能源金融服务等产品。

4.4.1 全景能源监测

大屏幕运行监控作为显示主体,提供各种监视界面,实现区域配电网的“中压馈线-配电站房-末端设备”全域监控,界面展现技术采用 Client 模式和 Browser 模式结合的成熟界面展现技术,并提供多种显示属性,包括 Zoom-in、Layer and Level、Panning、Navigation Window 等显示功能,图形按图层配置为 PUBLIC、SCADA、高级应用及客户定制层,切换各个应用时,图形自动切换到该应用层+共有层(PUBLIC)。通过分层能够为工作人员提供对不同需求的不同监测需要,实时数据在界面上可根据不同条件选择显示,如全显示、仅电压、仅电流、仅功

率、仅负荷等。

4.4.2 企业能效管家

系统提供可订制时段(5 min、15 min、1 h、某日、某月、某年)的能源计量数据统计计算功能。完成不同用户(园区、商业综合体、写字楼等)类别的分类分项能耗数据的实时计量、统计分析和展示。系统支持峰、平、谷电度电量和电度电费分析,提供同期环比分析报告。可根据智能终端采集的配变和分支馈线的各类数据进行用能评估,并按照客户耗能情况进行高耗能、一星级节能、二星级节能、三星级节能、节能达人和节能专家评估。可拓展提供其它能源,如水、热、气能耗的分项计量报告,系统支持提供当日及近半年能耗分析报告,包括能耗曲线、柱状图等,可自定义时间周期查看。

4.4.3 智慧运维服务

电气量统计分析直观的展示单个客户概况、设备档案和运行状况,集中展示负荷曲线、电量信息和分级告警,让运维管理人员和客户及时了解站点监控情况和设备告警信息。系统支持数据报表导出功能,运维管理人员和客户可按照小时、日、月方式对站点电气量有效值、最大值、最大值发生时刻、最小值、最小值发生时刻和平均值进行统计。系统支持对各站点电能质量的集中监测统计功能,从电压、功率因数、频率、谐波和三相不平衡 5 个维度,通过长期的数据积累,为配网的整体网络的改善提供数据分析判断依据。系统支持查看运维人员的各项信息和查询,统计运维人员的出勤次数、工作时长及巡检、消缺和抢修情况。

4.4.4 智能楼宇控制

系统支持楼宇控制方案的模块化定制,以用户物联网数据、用电设备特征为基础,通过对接通讯协议或在设备侧加装控制器,实现楼宇设施高效运行及安全监控,包括:照明系统远程集中控制、分时差异化运行控制,空调、清风系统与环境监测量的联动控制,水泵的本地及远程启停控制,门禁系统的自动识别控制等。智能楼宇的实现既降低了日常管理人力成本,同时也是能源互联网在建筑方面应用的落地体现。

4.4.5 在线能源商城

在线能源商城通过服务目录、交易管理、计费管理等服务,支持开放应用市集以开放竞争的方式对外服务,并提供运营门户为服务提供方、服务消费

方、运营管理等用户提供统一入口,打造生态聚集地。平台提供服务商入驻功能,经后台工作人员对服务商资质审核通过存入供应商库中,通过大数据分析、人工智能等技术挖掘客户潜在需求后平台进行交易撮合。平台提供客户评价反馈功能,并依据公司资质、业务接单量、响应速度、客户评价等要素为服务商综合评分,减少因买卖双方信息不对等而造成的风险及市场收益不均等问题,打造良性循环的能源业务生态圈。

5 示范区试点应用

综合能源服务聚焦天府新区兴隆湖示范区集中落地推广,定位服务群体为工业、商业、城市综合体、工业园区等企业级客户。通过平台监测功能,以面向客户提供电力安装、咨询、节能等服务、技术支持设备的智慧运维,推出经济省心的服务套餐获取经济效益;实现已参与业务服务用户综合能源服务平台的逐步接入,通过在用户侧加装传感器等设备、运用 5G 通讯技术,实现用户侧数据深入、精确、迅速全方位感知;通过与政府相关部门合作,依托平台推进示范建筑项目智慧化升级,打造绿色星级建筑,服务公园城市建设高质量发展;结合用户营销系统档案、电费、电量、停电次数、时长等系统数据,制定用户特定标签,完成用户用电特征的精准画像,及时、深入挖掘用户潜在服务场景,线上进行交易撮合,开展主动服务。

目前,兴隆湖示范区域内已签约服务企业用户共计 68 户,其中,接入综合能源系统平台数 28 户。通过对用户用能情况的全方位分析,平台提供用能结构调整、设备运行管理建议策略,服务客户平均有效提升综合能效 5% ~ 10%;结合实时监测数据,开展智慧运维服务累计 100 余次,有效节省用户人工运维及设备维护成本,缩短故障停电时长;充分利用大数据分析、人工智能等技术手段,开发增值数据产品并不断迭代升级。通过实践证明,以综合能源服务平台为基础开展的智慧能源服务具有一定的用户市场,其中“5G + 工业互联网”技术对系统稳定运营、业务有效开展提供了有力支撑。

6 结 语

综合能源的发展关系到国计民生,能源改革任

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高度融合的城市[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,研究方向为柔性输配电技术及应用;

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;

胡园园(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)

2020 年《四川电力技术》总目录

第 1 期

基于 IEEE Std 80 与 GB/T 50065 的变电站接地差异分析
..... 张 顺,许 斌,曹 亮(1)

基于线性拟合和差值补偿的跳线计算方法研究.....
..... 李铁鼎,雷雨泽,程述一,刘文勋,周古月(6)

海上风电送出交流高压单芯电缆并联通流特性研究.....
..... 李浩原,周国梁,李文津,刘 超(12)

特高压交流输电线路电气不平衡度及换位研究.....
..... 陈麒任,罗楚军,李 健,刘文勋,张 瑚,但京民(17)

基于频域反射法的高压电缆外破故障定位研究.....
..... 马 骁,刘云龙,余华兴,顾 博,张午阳,黄会贤(22)

发电厂 500 kV GIS 升压站主变压器合闸过电压分析
..... 刘守豹,侯玉成,童 理,赵宇航(26)

弹簧应力松弛对 GIS 故障关合接地开关关合特性的影响研究
..... 朱 青,刘 波,李万民,曹亚钊(31)

新能源汇集的多端柔性直流系统运行方式及控制策略分析
..... 周登钰,张新燕,赵理威,王开泽,孙 凯,王志浩(35)

促进新疆新能源消纳中电化学储能容量需求分析.....
..... 闫广新,林雪峰(40)

电压暂降期间工业园区分布式风机转子电流动态响应及其
灵敏度分析..... 许 中,莫文雄,马智远,周 凯(45)

基于 Stachelberg 博弈的光伏增值服务定价模型.....
..... 贾楚蕴,李华强(52)

一起线路故障引发站内设备故障的多重电网故障分析.....
..... 苟小刚,段 然,崔明德(59)

一起变压器 M 型有载分接开关事故的分析
..... 谢 茜,刘 睿,张宗喜,冯 运,龙震泽,白 欢(63)

某 500 kV 组合电器断路器分闸不到位故障发现及分析 ...
..... 张仕民,李卫伟,杨 洋,
时士峰,蔡英俊,陈安明,岳小斌,李 坚,周 旭,卢贵有(67)

浅谈变电站老旧二次设备的改造方案及改进.....
..... 姚 亮,凌 岩,孙晓龙(72)

基于泛在电力物联网理念的电力工作现场安全远程稽查系
统建设与应用 姚锦松,周伟绩,印 欣,刘博文(77)

基于互易原理的电流互感器校验仪准确性试验分析.....
..... 刘 刚,艾 兵,刘 鹄,张杰夫,张福州,何 娜(82)

燃煤锅炉用户电能替代方案对比研究.....
..... 唐 虎,崔 浩,陈爱伦,谢婷婷(88)

第 2 期

计及风电不确定性的风 – 水短期联合优化调度方法.....
..... 苗树敏,滕予非,罗 彬,陈 刚,王 亮(1)

热电联产机组的控制优化策略研究.....
..... 叶 晨,李红军,唐志东,崔双喜,孙 凯(7)

含分布式电源的城市电网故障分析方法研究.....
..... 马子钦,廖 凯,杨健维(12)

采取电采暖方式消纳清洁能源的综合效能分析.....
..... 姚锦松,常喜强,于 冰,郭小龙,徐吉智,刘博文(17)

一种新型的 MMC 直流故障保护三电平子模块拓扑
..... 常 非,赵 金(21)

用户供电质量需求识别与优质供电增值服务策略.....
..... 马智远,莫文雄,许 中,周 凯(24)

基于高频分量的高压直流输电线路单端保护方法.....
..... 李小鹏,戴文睿,林 圣,李世龙(33)

基于告警信息的保护跳闸识别方法研究.....
..... 段翔兮,何 锐,李小鹏,冯世林,吴海瑕(36)

水力发电厂 GIS 升压站雷电侵入波阻碍电抗器研究.....
..... 刘守豹,侯俊宏,方 圆,李 欣,杨 剑(41)

10 kV 配电变压器雷电过电压及其防治方法研究
..... 雷 潇,兰 强,刘守豹,崔 涛(48)

500 kV 交流海底电缆过电压保护与绝缘配合研究
..... 李浩原,李 健(53)

500 kV GIL 管廊接地系统分析.....
..... 赵新宇,张益赓,贾振宏,张瑞永,吴述关,谭沛文(59)

六氟化硫气体泄漏成像仪检测方法应用研究.....
..... 罗 洋,董汉彬,王嘉易,谢 茜(63)

智能变电站二次设备缺陷试验验证方法.....
..... 李 霞,周文越,朱 鑫,丁宣文(67)

某 500 kV 输电导线耐张线夹断裂失效分析
..... 陈家慧,赵兴虹,刘 曦,冯 杰,林德源(70)

一起防跳回路异常引起的断路器误动事件分析.....
..... 丁宣文,刘明忠,郑永康,王 平(74)

一起换流变压器绝缘油氢气异常分析.....
..... 谭华安,刘春涛,黄学民,齐向东,罗 新(77)

一种超声波局部放电检测辅助装置的研制·····	
····· 董小顺,刘 鹏,王 喆,宋昆峰,马海军,何海丹(80)	
网络安全等级保护在大型水电站的实践·····	
····· 钟 健,倪雅琦(84)	
基于 G1 赋权法的配电网带电作业安全综合评估 ·····	
····· 杨慎涛,陈劲松,袁 林(91)	

第 3 期

基于阻抗模型的集中式光伏电站谐波放大机理研究·····	
····· 王若瀚,徐琳,郑连清,董乘甫(1)	
基于局部放电与 PDC 法的油膜介质老化程度研究 ·····	
····· 赵凯林,张晨萌,侯世英,高晨璐,程 铭(8)	
宽频暂态电场测量装置的研究·····	
····· 董乘甫,熊振中,谢施君,郑连清,王若瀚,向 军(12)	
罗氏线圈电子式电流互感器的宽频域传变特性研究·····	
····· 邢昊中,吴 杰,贺子润(17)	
电网超低频振荡影响因素综合分析与抑制措施研究·····	
····· 贺子润,陈 振,邢昊中(24)	
基于组合支持向量回归的排污企业生产识别·····	
····· 靳 旦,唐 伟(29)	
基于电力数据的居民人口流动情况评估·····	
····· 刘 畅,滕予非,唐 伟,靳 旦,李赋欣(33)	
春节期间主要行业用电波动特性研究·····	
····· 戴松灵,唐 权,任志超(38)	
电力作业现场可穿戴安全保障系统设计与实现·····	
····· 常政威,彭 倩,张 泰,谢晓娜(43)	
电力机器人的自主导航与视觉辅助定位融合方法·····	
····· 谢晓娜,刘 曦,常政威,彭 倩,许 硕(48)	
无人机智能巡检在输电线路中的应用与发展研究·····	
····· 李倩竹,杜永永,杨 阳(53)	
主动式配电网铁磁谐振消谐方法研究 ·····	
····· 朱子民,秦艳辉,朱咏明,段青熙,亢朋朋,刘 勇,董雪涛,樊国旗(57)	
10 kV 线路调压器在低电压治理中的应用 ·····	
····· 罗 洋,蒋 伟,张星海,魏书超(64)	
LCL 滤波器无源阻尼和有源阻尼对多逆变器并网谐振影响对比分析 ·····	
····· 郑嘉龙,杨 鸽,刘一均,刘 蓓(68)	
基于频响法的电力变压器剩磁检测技术研究·····	
····· 谭志红,张 榆,单 飞,穆 舟,程 铭(73)	
基于 Unity3d 的监控告警信息展示系统的设计与实现 ·····	
····· 段翔兮,邹 琬,高 剑,李 熠,杨紫苓,宋永娟(78)	
一种改进前推回代法的配电网潮流计算·····	
····· 张 捷,徐 焰,张学飞(85)	

接线错误对抽头式电流互感器变比影响分析·····	
刘 刚,覃 剑,胡 娟,艾 兵,何 娜,刘 鹏,张福州(91)	
第 4 期	
基于运行数据的水电站 MILP 模型最优代表水头选取方法 ·····	
····· 王 亮,苗树敏,滕予非,王永灿,张 弛,杜成锐,王金龙(1)	
水火机组调速器死区对超低频振荡的影响分析·····	
····· 范成围(5)	
变压器复杂电磁暂态下涌流特征及其对差动保护影响分析 ···	
····· 李 舟,何安阳,王 辉,师 琛,谈 震,王 琨,李宗博,焦在滨(9)	
基于改进的电力现货交易下调度研究····· 樊国旗,樊国伟,	
刘昌东,蔺 红,王吉利,刘瑞丰,程 林,罗 庆,刘大贵(15)	
一种基于典型接线模式的城市复杂中压配电网的可靠性评	
估算法·····	
····· 张 顺,文承毅,何礼鹏,陈明帆,吕 懿,李琳玮(20)	
动态无功补偿装置在特殊供电负荷中的应用研究·····	
····· 左 龙,吴晓蓉,林 波,郭明阳(24)	
梯级水电站联合调度 AGC 的研究····· 刘江涛,周 政(28)	
基于声电联合及振动的变压器类设备局部放电现场综合诊	
断方法·····	
····· 王 超,许本茂,冯 藩,严敏超,李雨哲,张 劲(33)	
基于小波分析诊断和支持向量机的避雷器在线监测数据故	
障分析 ·····	
····· 詹仲强,陈文涛,李金良(38)	
杆塔接地参数大数据云平台及信息化测量仪的设计与应用	
·····	
····· 王牧浪,彭红刚,邱 烜,徐 研(42)	
变电站分层土壤模型构建对土壤电阻率测量深度的要求	
·····	
····· 钟 山,周炜明,周德才(47)	
光伏升压柔性直流工程设计及调试技术研究·····	
····· 张 舵,蒋艾町,夏 雪,李嘉逸(51)	
风电功率外送输电容量规划的经济性研究·····	
····· 于志勇,宋新甫,张增强,辛超山,李海峰(56)	
斜坡地形输电线路桩基础设计研究·····	
·····	
····· 陈俊帆,蒋 锐,黄 兴,韩大刚,杨 洋(61)	
基于风光互补的直流电网规划模型研究·····	
····· 王 康,戴明明,李 强,邓亚伟,王奎红,李志永(66)	
雅中换流站大件运输道路小关沟段滑塌特征及治理措施分	
析·····	
····· 黄建平,朱 军,任 泽,郭松林,孔 韬,王 林,胡国强(70)	
台区三相不平衡运行监测和治理分析·····	
·····	
····· 唐 伟,贺星棋,滕予非,靳 旦(75)	
主变压器采用双分支接线形式的改造方案·····	
····· 邹经鑫,程 华,刘 鑫,袁明哲,赵志浩(80)	

六统一母线保护的旁路代路问题及改进方案·····	
····· 何振宇,张 治,方 顺,卿俊杰,汪祺航(84)	
某 300 MW 燃煤锅炉空气预热器差压高分析与处理·····	
····· 刘建航,石贤捷,马国智,欧兆华(88)	
某变压器消防控制回路异常的分析与处理·····	
艾 飞,陈巧勇,胡冬良,张新来,郭世晓,何颖梅,王寅锋(91)	

第 5 期

风电场箱式变压器铁芯发热故障分析·····	
····· 刘守豹,杨耀武,袁 志,童 理,方 圆,韦昌伟(1)	
基于气象参数聚类分析的高原地区输电线路在线监测装置 电源选择 ····· 马小敏,王 超,袁 志,刘 凡,范松海(5)	
高烈度地震触发山区输电线路震害发育分布规律·····	
····· 刘翔云,黄 兴,廖邢军,宋玲林(11)	
110 kV“上”字型输电线路复合材料横担耐雷水平研究 ·····	
····· 柏继云,王亿勃,程范贤(14)	
一起 110 kV 高压交流电缆外护套烧损故障原因分析 ·····	
刘云龙,邵 愚,周大明,黄会贤,袁子超,王 聪,谢 弦,张丽萍(18)	
基于 500 kV 变电站的直击雷防护设计比较 ·····	
····· 殷 勤,任 杰(23)	
多代理粒子群算法光储电站控制策略·····	
····· 张宇宇,王海云,刘树伟(27)	
基于故障分量的系统侧谐波阻抗计算方法 ····· 龚华麟, 卿俊杰,李官宇,张择策,曾 雪,令狐静波,陈子阳,李媛媛(32)	
110 kV 变电站保护改造方法分析 ·····	
····· 霍 丹,吴 靖,田 骏,张 魁,叶李心(37)	
国内外高压断路器操作回路比较研究·····	
····· 刘 超,李 倩,肖 异,贺 磊(43)	
济南 R3 线短路试验研究 ·····	
····· 柳 鑫,吴 双,张桂林,刘光辉(49)	
10 kV 不接地系统单相接地故障接地相判别分析 ·····	
····· 李 飞,王文松,王能进,聂慧元,李 成(53)	
基于故障状态模拟的输电线路短路点定位方法·····	
····· 张铃珠(56)	
基于新型站内引入光缆方案的研究与分析·····	
····· 冯 平,袁 亮,钟 于,吴成锋(62)	
考虑网源协调发展的四川电网多适应性规划体系研究·····	
····· 汪荣华(65)	
基于改进 MGM 的省级用电量中长期预测 ·····	
····· 余 金,于国康,关洪浩,高贵亮,任 娟(73)	
新型变电物资综合信息管理平台的构建研究 ····· 谭洋洋, 刘 君,杨红权,姜 波,钟 鹏,郭松宁,王 钢,舒文靖(79)	

某热电联产企业供热管损大分析 ····· 王 波,屈焕成(84)	
高压开关紧固螺钉预紧力拆卸力矩值异常分析与计算·····	
····· 刘 波,夏亚林,崔 闪(88)	

第 6 期

篇头语 ·····	(1)
基于自适应遗传算法的分布式电源优化配置·····	
····· 郝文斌,谢明洋,谢 波,曾 鹏,史晨豪,徐昊渊,张明玉(2)	
基于多视角跨模态的电力现场作业行人重识别网络架构技术 研究·····	
····· 张 森,张 颀,王 尧,刘锦隆,闫 斌,尚赵伟(6)	
基于竞争神经网络的变电站集中监控全面监视周期分类方 法 ····· 张宇泽,张心洁,刘宪栩,王 建(11)	
基于机器视觉技术的电缆结构参数检测系统研究·····	
····· 胡立锦,杨永全(16)	
基于深度学习模型小型化技术的输电线路智能巡检研究 与应用 ····· 冯 原,王晓迪,辛 颖,韩树民(21)	
基于知识图谱的电力行业与外部数据融合研究·····	
····· 刘锦隆,马 进,邹 双,宋立华,王秋琳(26)	
基于区块链的电力数据共享研究初探·····	
····· 余佐超,李 喆,刘浩宇(31)	
基于产业转移粘性电力系数对成渝双城经济圈发展的启示 ····· 魏 阳,刘淑宾,郭 飞,梁 健,关 蓉(39)	
地址模糊匹配在电力企业应用中的研究与实践·····	
····· 刘浩宇,李 喆,余佐超,应卓君,王 薇,赵志浩(43)	
基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法·····	
····· 况 华,沐欣欣,覃日升(49)	
基于家庭异构网的智能用电终端系统设计·····	
····· 张云翔,李厚恩,钟晓雄,张 盛(55)	
基于 5G 配电网差动保护安全防护策略研究 ·····	
····· 张 泰,杨 雪,汪晓帆(60)	
基于 5G 通信技术的配电网线路纵差保护研究及应用 ·····	
····· 郭 立,何 峰,梁 艳,韦 翔,张 丹(66)	
北斗系统在输电线路防灾监测中的应用探索·····	
····· 李 喆,刘浩宇,余佐超(71)	
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, 周大明,周 勇,黄会贤,曾祥瑞,谢 弦,邵 愚,刘英健(75)	
基于 HPLC 宽带电力线载波技术的配电电压质量在线监测 方法研究 ····· 余 敏(81)	
数字新基建在公园城市能源互联网建设的落地与实践·····	
····· 潘雪佼,何 冰,谢天祥,乔云池,胡园园,向柯霓(86)	