

以间隔棒为载体的输电线路全息智能监测技术设计应用

裴东锋,赵晓鹏,张涵瑞,葛绪伍

(国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司,河北 邯郸 056002)

摘要:针对输电线路运行中的导线舞动、弧垂增大、导线断线等问题,设计了一种集“多传感芯片、矩阵式通信、三合一电源”为一体的智能全息远程监测装置。通过分布式工况、环境等信息,矩阵式通信传输,集中监测线路运行状态,实现线路运行监测信息直采直传和故障先兆诊断。结果表明,该方法较传统单一在线监测准确率提升 24% 以上,能够有效的监测输电线路运行情况。

关键词:架空线路;全息监测;远程监控;故障预警

中图分类号:TM726 **文献标志码:**B **文章编号:**1001-9898(2026)01-0065-06

Design and Application of Holographic Intelligent Monitoring Technology for Transmission Lines Using Spacers as Carriers

PEI Dongfeng,ZHAO Xiaopeng,ZHANG Hanrui,GE Xuwu

(Handan Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd, Handan, 056002, China)

Abstract: Aiming at problems such as conductor galloping, increased sag, and conductor breakage in transmission line operation, a smart holographic remote monitoring device integrating "multi-sensor chip, matrix communication, and three-in-one power supply unit" is designed. By collecting distributed working condition and environmental parameter information, and transmitting the information via matrix communication, the operation status of the transmission line is centrally monitored, realizing the direct collection and transmission of line operation monitoring data as well as the detection and diagnosis of fault precursors. The results show that this method has an accuracy improvement of over 24% compared to traditional single online monitoring, and can effectively monitor the operation of transmission lines.

Key words: overhead lines; holographic monitoring; remote monitoring; fault warning

0 引言

近年来,智能电网的建设工作在我国已经全面展开,输变电设备状态监测系统作为智能电网输变电环节建设的重要组成部分,是实现输变电设备状态运行、检修管理,提升生产运行管理精益化水平的重要手段。然而,输电线路受自然环境影响较大,极易受到雷击等恶劣天气、鸟害等自然环境以及工农业污染等因素影响,因此,实现对输电线路远程监控与实时故障预警迫在眉睫。

输电线路在线监测技术起源于 20 世纪 90 年代。在监测技术上,文献[1]提出一种基于间隔棒跟踪的输电线舞动检测方法,通过跟踪摄像头视频信息生成运动轨迹,计算线路舞动幅值和

频率;文献[2]提出了基于九轴惯性组合传感监测技术分析导线舞动的监测装置;文献[3-4]提出了通过压电式加速度计的微风振动传感器采集导线的振动加速度的方法;文献[5-6]提出了基于多源数据设计了输电线路舞动在线监测系统,为输电线路监测提供了广阔思路。但以上方法大都针对单一参数,无法满足线路运行工况下的近线、舞动、倾斜度等多种参数要求。在通信方式上,文献[7-8]分析了输电线路在线监测传输数据需求及当前通信网络存在的问题,为输电线路在线监测网络建设提供了参考;文献[9]提出了输电线路一体化智能监测装置架构,实现了 3 km 内的数据高效传输;文献[10-11]设计了基于 GPRS 和 LoRa 的山区输电线路传输架构,提

收稿日期:2024-12-16

修回日期:2025-04-01

作者简介:裴东锋(1980—),男,高级工程师,主要从事电网监控与设备运维工作。

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5204HD230004)。

高了山区输电线路监测能力;文献[12]构建了一种新型的 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)无线电力专网,可提升信号的抗干扰能力与编码的差错控制能力。但现有通信覆盖存在盲区和通信链路的实时性需求仍未解决。在取电方式方面,单一的取电方式无法应对电池衰减、线路停电等问题,文献[13]提出使用磁感应效应从地线收集能量的方法;文献[14]分析了太阳能电池板不同工况下对蓄电池的充电效率;文献[15-16]提出利用双磁芯并联相互交替供电获取电能的方法;文献[17]提出了一种两个半圆磁芯的吸能铁芯结构,一定程度上解决了磁饱和问题;文献[18-19]设计了一种基于交流电场感应的取能供电电源;文献[20]设计一种 CT 线圈感应取电和锂电池结合的供电电源,为监测装置取电提出了新思路,有效提高了电场感应取能电源的输出功率。但仍无法满足输电监测装置一主一备的供电电源要求。

本文研发的输电线路综合工况全息智能监测装置,集“多传感芯片、矩阵式通信、三合一电源”为一体的智能监测和双向交互功能模块,能精准监测线路运行环境参数,智能研判导线的多种安全隐患,并主动提前预警和定位故障位置,实现对输电线路进行实时远程监控和故障预警,预防各类事故发生,减少故障损失,提升电力系统的安全、经济、高可靠性。

1 输电线路全息智能监测总体方案

现有在线监测装置一般是安装在铁塔上,以画面监拍装置作为主要传感设备,在关键的传感、通信及电源等技术方面存在问题,在数据处理和诊断决策方面存在不足,因此有必要研发新型监测装置,进一步提升监测运行可靠性、数据采集准确性以及产品智能化水平,将隐患消灭于萌芽,确保电网安全稳定运行。

本文研发了一种以间隔棒为载体的架空线路全息智能监测装置,集“多传感芯片、矩阵式通信、三合一电源”于一体,其整体框架如图 1 所示。该装置一方面能够精准监测线路运行环境参数,智能研判导线舞动、弧垂加大、导线断线、线下着火、吊车碰线等安全隐患,主动提前预警和定位故障位置。另一方面,通过全息采集输电线路运行环

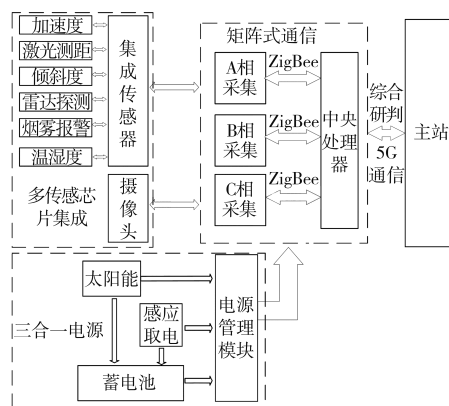


图 1 输电线路全息智能监测装置框架

境参数,进一步开展运行参数整理、分析、挖掘等大数据统筹应用工作,积极构建输电线路运行工况监测数据库,为输电线路勘察、建设、运行等工作提供数据支撑。

1.1 有边缘计算能力的多元件集成芯片设计

为满足各种复杂工况的信息采集及计算需求,高度集成加速度传感器、倾斜度传感器、激光测距仪、光电式烟雾传感器等多种传感设备,进而精准采集导线舞动、导线弧垂、异物靠近等多种线路运行环境参数,构建线路运行状况数据模型,芯片及传感器集成示意如图 2 所示,传感器类型及功能如表 1 所示。

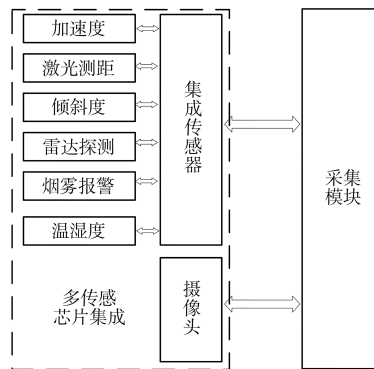


图 2 芯片及传感器集成示意

表 1 传感器类型及功能

传感器类型	功能
加速度传感器	检测导线运动时的加速度,监测导线的舞动情况
激光测距仪	调制激光的某个参数实现对目标的距离测量
倾斜度传感器	检测导线与地面之间的角度
雷达探测传感器	探测导线周围是否存在移动物体
烟雾报警传感器	烟雾浓度高于预设浓度阈值时,控制器控制烟雾报警器报警
温湿度传感器	检测导线及环境的温湿度

运行参数经采集模块边缘计算处理后,综合研判导线运行状况,向主站直接发送导线舞动级别、导线一(多)相断线、线下着火、吊车碰线等异常研判结果,从而消除大量的冗余信息,数据传输效率大大增加,主站接收查阅更加直观。

1.2 三相协同的高功率无线通信装置研发

1.2.1 通信装置研发

基于 ZigBee 协议近距离组网、5G 通信远距离传输方式,实现了监测数据的安全、快速、加密传输,包括无线通信模块,无线通信模块与控制器通信连接,将控制器生成的预警信息发送至电子设备。

无线通信模块采用 ZigBee 近距离无线组网通信技术,将分别安装在 A、B、C 三相导线上的 3 个采集模块列为一组设备,在其之间构建局域网, A 相和 C 相模块采集到的数据进行 A/D 转换,通过工频 433 波段(覆盖范围 100 m)进行无线发射,发送至 B 相采集模块进行汇总、计算。通信方式如图 3 所示。

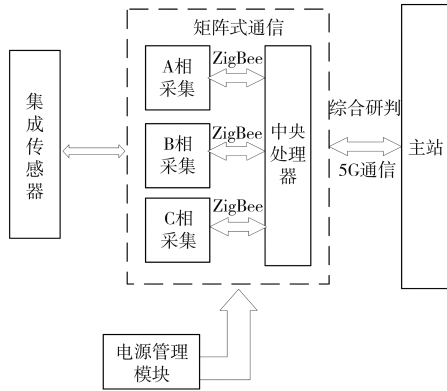


图 3 输电线路智能监测装置通信方式

无线通信模块包括 5G 通信卡并兼容 4G 通信网,使用公共通信网或电力通信专网,完成与主站系统之间的通信。系统中的电路,采用连通的周期性金属网做电磁屏蔽措施,在网栅厚度 $t \ll \lambda$, $2a \ll g$ 的条件下,电磁波垂直入射时,其归一化导纳为:

$$y = f_0 (\ln \sin \frac{\pi a}{g}) (\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})^{-1} \quad (1)$$

式中: λ 为入射波长; $2a$ 为网栅线宽; g 为网栅周期; $f = g/\lambda$ 为归一化入射频率; $f_0 = 1 - 0.27(a/g)$ 为归一化谐振频率。

通常情况下,电磁波波长远大于网栅周期,此时网栅的归一化导纳近似为:

$$y = \frac{-g}{\lambda} (\ln \sin \frac{\pi a}{g}) \quad (2)$$

电磁波透射率表示为:

$$T(0,0) = \frac{4y^2}{1-4y^2} \quad (3)$$

$T(0,0)$ 表示电磁波的入射角、偏振角均为 0,即电磁波垂直入射。

因为网栅的线宽远小于周期,所以谐振频率 f_0 近似为 1 Hz,谐振波长近似等于网栅周期。在 12~18 GHz 波段,根据式(1)可以看出 $y^2 \ll 1$,金属网栅的电磁波透射率

$$T(0,0) = \frac{4y^2}{1-4y^2} (\ln \sin \frac{\pi a}{g})^2 \quad (4)$$

电磁屏蔽效能转换为分贝表示:

$$S = -10 \log_{10} T \quad (5)$$

本文采取线宽和周期分别是 1 mm、20 mm,既保证金属网栅的机械强度,又保证在输电线电磁波 0.1~10 MHz 波段,屏蔽效能大于 55 dB,而对工频 433 MHz 的通信电磁波,屏蔽效能小于 10 dB,提高通信的抗干扰措施。

1.2.2 全息智能监测装置原理

输电线路全息智能监测装置一边连接数据采集的传感器模块,一边连接传输数据的通信模块,其原理如图 4 所示。

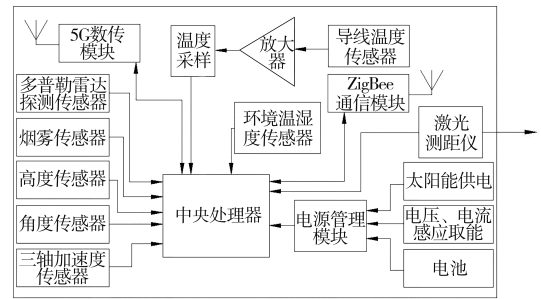


图 4 输电线路全息智能监测装置原理框图

监测装置将输电线路的状态参数及图像信息传输至主站,改变了主站根据单一的图像数据进行特征提取判断的模式,通过增加数据维度,增强了主站对线路故障的识别能力及灵活性,提升了故障分类及预处理方案的准确率。

1.3 “三合一”浮充式自取能装置电源

为提高监测装置在线路热备用、光照不足等工况下的供电可靠性,本文利用电磁感应原理和光伏特效效应原理,基于软磁合金作为电磁交换

介质,设计了“太阳光伏+互感取能+蓄电池”3种取能方式集成一体的电源装置,如图5所示。

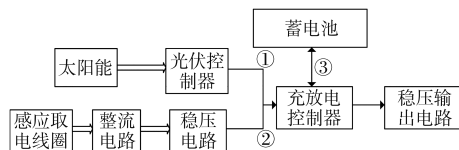


图5 “三合一”浮充式自取能装置原理

正常情况下,太阳能光伏①和互感取能②同时工作,优先为负载供电,多余电能浮充存入蓄电池;当线路空载、热备用导致无法感应取电时,由控制器切断感应供电回路,防止光伏对感应取电回路反充,由光伏①带蓄电池及负载;光照不足时由感应取电②主供;极端情况下,由蓄电池③直接带负载。

1.3.1 太阳光伏发电

1) 太阳能板功率计算

太阳能电池板的平均功率由式(6)、式(7)得出。

$$W_t \times T_h \times \eta_h = P_L \times 24 \quad (6)$$

$$W_t = \frac{P_L \times 24}{T_h \times \eta_h} \quad (7)$$

式中: W_t 为电池板光照时间内的平均功率; P_L 为负载的平均功率; T_h 为光照发电时间; η_h 为电池的效率。

2) 基于向日葵原理的云边协同光线跟踪技术

光伏发电技术在架空输电线路监测装置应用较广泛,但常规的固定式太阳能板发电存在光电转化效率低的问题,因此本文提出一种基于向日葵原理的云边协同可自动跟踪光线变化调整太阳入射角的光伏发电技术,在太阳能板上安装可控制式驱动轴,实现太阳能板的任一方位变换,大幅提升了光电转化效率。

在该驱动轴与太阳能板连接处的太阳能板外端装有感光单元,感光单元可以感知太阳入射角信息并转化为对应的光电流信号传递给芯片,芯片通过式(8)、式(9)计算出太阳的高度角 α 和方位角 β ,进而得到太阳能板的方位角,并将该调整量传递至边端芯片,控制太阳能板驱动轴调整太阳能板,使其垂直于太阳入射光,从而实现光电转化效率最大化。

$$\alpha = \arcsin(\sin q \times \sin \gamma + \cos q \times \cos \gamma \times \cos t) \quad (8)$$

$$\beta = \arccos \frac{\sin \alpha \times \cos q - \sin \gamma}{\cos \alpha \times \cos q} \quad (9)$$

式中: q 为当地的纬度,可由GPS设备获得; t 为

太阳时角,等于当时的时间与中午12点的小时数差值乘以 15° ; γ 为太阳赤道纬度角。

$$\gamma = 23.45 \times \sin\left[\frac{2\pi}{365} \times (T + 284)\right] \quad (10)$$

式中: T 为当年的天数,即从当年1月1日算起,计算到当时的天数;23.45为地球轴倾角(黄赤交角)值;284为调整正弦函数相位的经验常数,作用为确保公式周期性地球公转季节同步。

考虑到太阳入射角在短时间内并不会变化过大,且日出和日落时间段附近的太阳光强度较低,即便调整太阳能板垂直于太阳入射角,光伏发电效率依然较低,因此本文设计感光单元和太阳能板每15 min调整一次,且只在晴天日间进行自动跟踪,雷雨、阴云等全天太阳光强较低的天气不跟踪。控制模式流程如图6所示。

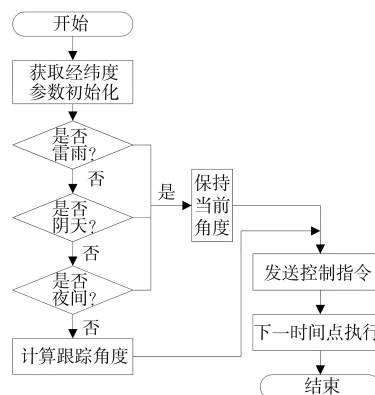


图6 太阳跟踪控制模式流程

此模式一方面解决了固定式太阳能板不能随太阳光入射角变化而变化的弊端,另一方面通过“边端数据采集+云端计算”的方式降低了边端的算力能耗。此外,由于装置本身就需要将线路状况的监测信息传输至云端,因此在光伏发电中进行云边数据传输并未额外增加过多的传输成本。

1.3.2 互感取能

根据电磁感应原理,线路周围会产生交变磁场,如果将次级绕组放置在交变磁场中,则次级绕组上将产生电能。穿心电流信号 $i_0(t)$ 和二次线圈两端的感应电压,即输出信号 $e(t)$ 的关系为

$$e(t) = L \frac{di_0(t)}{dt} \quad (11)$$

式中: L 为电感量。

$$L = \mu \frac{NS}{l} \quad (12)$$

式中: N 为二次线圈匝数; S 为磁芯截面积; l 为

磁路长度, μ 为磁芯材料磁导率。

将开合式导线互感取能线圈套在输电导线上,将产生的电能引出,经过整流、DC/DC 变换等一系列处理后形成稳定直流电压,可向系统和蓄电池供电。导线取能原理如图 7 所示。

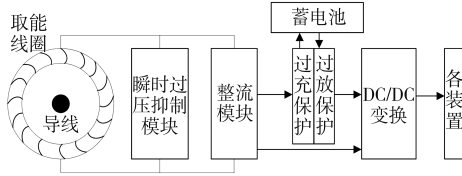


图 7 导线取能原理

通过取能线圈感应输电导线上的电能,电路前端接瞬时过电压抑制模块形成瞬时过电压保护,经过整流桥将感应到的交流电变为直流电。不同状态下的充电方式如表 2 所示。

表 2 不同状态下的充电方式

状态	充电方式
空载	通过过充保护模块对锂电池进行充电
负载	当输电导线上电流不足时,可由锂电池通过过放保护模块对负载进行供电

1.3.3 电场能量俘获取能

为减小长距离输电过程中的损耗,电网通常运行在很高的电压等级,且与电流随负载变化不同,输电线路的运行电压一般保持不变。由于电场能量俘获取能(electric energy harvesting, EEH)的能量来源是电场,因此也被称为电场感应取能,等效电路如图 8 所示。

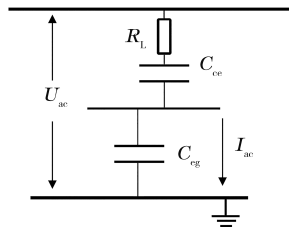


图 8 电场感应取能等效电路

设输电线路的额定工作电压为 U_{ac} , 频率为 ω , 状态监测装置的等效阻抗为 R_L , 寄生电容的等效阻抗分别为 $Z_{ce}=1/j\omega C_{ce}$ 和 $Z_{eg}=1/j\omega C_{eg}$, 根据等效电路对位移电流 I_{ac} 进行计算, 可得:

$$I_{ac} = \frac{U_{ac}}{R_L Z_{ce} / (R_L + Z_{ce}) + Z_{eg}} \quad (13)$$

由于 R_L 远小于 Z_{ce} 和 Z_{eg} , 因此可得:

$$I_{ac} \approx \frac{U_{ac}}{Z_{eg}} = \frac{U_{ac}}{1/j\omega C_{eg}} = j\omega U_{ac} C_{eg} \quad (14)$$

式中: C_{eg} 与取能电极对地距离等参数有关。

当 C_{eg} 与输电线路电压 U_{ac} 、频率 ω 等参数确定后, I_{ac} 近似恒定。电场感应取能的取能电极安装在输电线路, 采用管状, 处理电路和状态监测装置集成在管状电极空腔内。

2 实例分析

为了测试实际应用效果, 验证监测数据的正确性及稳定性, 在某地市供电公司选取 3 条不同等级的输电线路, 与传统监测技术进行对比分析, 装置的功能参数如表 3 所示。

表 3 监测装置功能参数表

序号	采集元件	装置功能	数据范围
1	“太阳光伏+互感取能+蓄电池”	装置电源	400/5, 5 VA
2	加速度传感器	导线舞动监测	0.06~20 m
3	激光测距仪	弧垂增大监测	0.1~100 m
4	多普勒雷达	异物碰线监测	5~20 m
5	烟雾感应器	线下着火监测	10~50 m
6	倾斜度传感器 激光测距仪	导线断线监测	3~200 m
7	非接触式温湿度传感器	环境温湿度监测	-40~125 ℃
8	温湿度传感器	导线温度监测	-40~85 ℃
9	风速传感器	环境风速	1~12 级
10	测量 CT	导线电流监测	0~1 600 A
11	摄像头	导线环境抓拍	300 万像素
12	ZigBee+4G/5G	三相合一通信	>3 000 m

2.1 应用分析

对产品整体安装组合, 在某地市供电公司各选取一条 110 kV、220 kV、500 kV 线路三跨点区段进行为期 3 个月的常规大气监测装置使用试验。统计结果如表 4 所示, 对比图如图 9 所示。选取易覆冰、覆雪、雷击、大风的 110 kV、220 kV 山区线路各两条, 在恶劣天气下进行装置可靠性验证, 统计结果如表 5 所示, 对比图如图 10 所示。

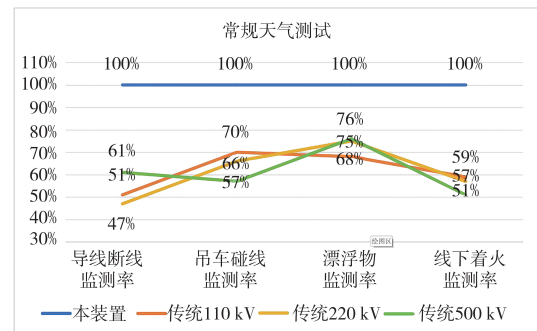


图 9 常规天气使用对比

表 4 架空输电线路全息智能监测装置常规天气使用情况统计

	监测功能	导线舞动范围	弧垂增大范围	导线断线监测率	吊车碰线监测率	漂浮物监测率	线下着火监测率	温度湿度监测率	导线温度监测率
110 kV	数据监测	<0.8 m	<2 m	100%	100%	100%	100%	90%	90%
	传统数据监测	>1.2 m	>2.5 m	51%	70%	68%	59%	无监测	无监测
	精准度提升	>50%	>40%	49%	30%	32%	41%	—	—
220 kV	数据监测	<1 m	<4 m	100%	100%	100%	100%	90%	90%
	传统数据监测	>1.5 m	>5 m	47%	66%	75%	57%	无监测	无监测
	精准度提升	>33%	>25%	53%	34%	25%	43%	—	—
500 kV	数据监测	<2 m	<3 m	100%	100%	100%	100%	90%	90%
	传统数据监测	>2.5 m	>5 m	61%	57%	76%	51%	无监测	无监测
	精准度提升	>40%	>67%	39%	43%	24%	49%	—	—

表 5 架空输电线路全息智能监测装置恶劣天气使用情况统计

	监测功能	数据传输率	导线舞动范围	弧垂增大范围	导线断线监测率	漂浮物监测率	温度湿度监测率	导线温度监测率
110 kV	数据监测	100%	<1.2 m	<2.6 m	100%	100%	90%	90%
	传统数据监测	71%	>1.9 m	>3.2 m	43%	61%	无监测	无监测
	精准度提升	29%	>58%	>23%	57%	39%	—	—
220 kV	数据监测	100%	<1 m	<4 m	100%	100%	90%	90%
	传统数据监测	75%	>1.5 m	>5 m	52%	65%	无监测	无监测
	精准度提升	25%	>50%	>25%	48%	35%	—	—

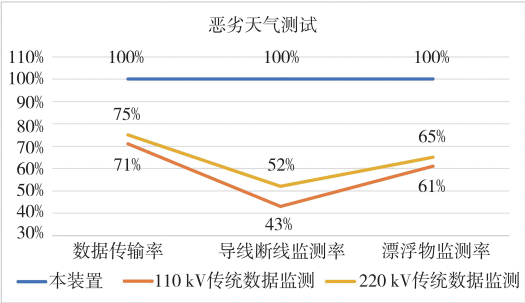


图 10 恶劣天气使用对比

对比可知,“三合一”电源的线路工况全息监测装置高度集成多种传感设备,能够精准采集导线舞动、导线弧垂、导线温度、环境温度、环境湿度、环境烟雾、异物靠近等多种线路运行参数。校验监测功能正常,各类监测数据较传统监测装置精准度提升达 24%~57%。恶劣天气下检测数据传输率达 100%,导线断线监测率、漂浮物监测率提升 35% 以上。

2.2 效益分析

成果自应用以来,在该地区平均每年发现吊车碰线、异物挂线等危急线路运行的隐患 21 项,随时可能引起线路故障的 9 项,占以往同期线路故障停运次数的 50%。截至目前,共避免因吊车碰线、异物挂线等原因导致的线路停运 36 次。

经计算,该成果增供电量及节约人工成本可实现经济效益 1 065.7 万元。目前,该成果已实际应用

于某供电公司 110 kV 至 220 kV 输电线路的监测。

3 结论

本文提出的智能电网输电线路全息监测技术能够完成输电线路的运行风险诊断、安全隐患排查、故障点定位和故障智能处置等工作,实现了线路运行监测信息直采直传和故障先兆诊断,也是对常规线路运行监测方法的一次重要提升。同时,将依赖人工、无人机、机器人等巡检方式进化为具备信息化、自动化、智能化等显著特征的数字化解决方案。

本文可应用于平原及山地地区,对密集输电通道、山地线路舞动、线下树障等重点位置的监测有重要意义,可有效预警并协助快速处置,能够大幅提升高压架空输电线路安全隐患监测工作质量和效率,后续将在高寒、多雾等地区实测,根据测试数据进行下一步研究。

参考文献:

[1] 任佳颖,李小雨,房体育,等.基于间隔棒跟踪的输电线舞动检测[J].济南大学学报(自然科学版),2022,36(4):424-432.
[2] 祝贺,邢宏超,袁鸣,等.输电导线舞动特性分析及监测系统Ⅱ[J].应用力学学报,2022,39(2):283-290.
[3] 黄新波,王玉鑫,朱永灿,等.基于遗传算法与模糊逻辑融合的线路覆冰预测[J].高电压技术,2016,42(4):1228-1235.
[4] 陈梓枫.架空输电线路隐患在线监测方案研究[J].电工材料,2024(3):45-48.

(下转第 85 页)

- [2] 冯立杰,邓坤鹏,张虎翼.基于双闭环模糊 PID 四旋翼无人机姿态控制[J].计算机仿真,2024,41(8):19-24,373.
- [3] 王安琪,李俊丽,夏国锋,等.四旋翼无人机预设性能自适应 PID 控制[J].控制工程,2024,31(5):865-875.
- [4] 邵克勇,李林霞.基于分数阶滑模控制的无人机轨迹跟踪控制器设计[J].控制工程,2024,31(3):416-424.
- [5] 杨永刚,尹宜坤.带扩张观测器的旋翼无人机动态面滑模控制[J/OL].控制工程,1-9[2025-03-06].https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220491.
- [6] 李云鹏,张立宪,韩岳江,等.基于模型预测控制的子母式无人机编队飞行控制方法[J].自动化学报,2025,51(2):312-326.
- [7] 於悻丰,任思维,张鑫帅,等.基于数据驱动模型预测控制的无人机轨迹跟踪方法[J].兵器装备工程学报,2024,45(11):272-282.
- [8] 王子恒,李伊陶,熊兴中.基于分布式模型预测控制的实时可交互无人机群编队方法[J].计算机应用研究,2024,41(12):3600-3606.
- [9] 王子龙,贾杰,张帆,等.基于滤波反步法的共轴双旋翼无人机控制[J].飞行力学,2024,42(6):31-35,49.
- [10] 沈昕格,金海,郭亮.基于反步法的四旋翼无人机自适应控制研究[J].电子科技,2022,35(3):32-37.
- [11] 张佳龙,赵迪,张普,等.通讯受限下无人机集群自适应追踪控制[J].系统工程与电子技术,2025,47(10):3401-3410.
- [12] 何嘉幸,曾智,李砚,等.航磁探测下多旋翼无人机自适应稳定飞行控制研究[J].计算机测量与控制,2025,33(9):118-126.
- [13] 吴海涛,刘俊辉,游志锐,等.四旋翼无人机悬停的多模型自适应控制[J].自动化应用,2025,66(2):1-5.
- [14] 李壮.基于反步法的四旋翼无人机编队跟踪控制研究[D].合肥:安徽工程大学,2024.
- [15] ZHAO J J, WANG Y F, WANG Q D. Event-triggered formation-containment control for multiple Euler-Lagrange systems with input saturation[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2022, 45(4): 313-323.
- [16] 彭艺,雷云揆,杨青青,等.改进 PID 搜索算法的山地环境无人机路径规划[J/OL].系统仿真学报,1-12[2025-03-06].https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0721.
- [17] 张博,黄宜庆.基于变指数干扰观测器的无人机非奇异终端滑模控制[J].长春理工大学学报(自然科学版),2024,47(5):48-56.
- [18] HWANG C L, CHEN Y H. Fuzzyfixed-time learning control with saturated input, nonlinear switching surface, and switching gain to achieve null tracking error[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 28(7): 1464-1476.
- [19] DING Y B, WANG X G, BAI Y L, et al. Robust fixed-time sliding mode controller for flexible air-breathing hypersonic vehicle[J]. ISA Transactions, 2019, 90: 1-18.
- [20] 石喜玲.多旋翼飞行器姿态测量及控制技术研究[D].太原:中北大学,2020.
- [21] CHEN F Y, JIANG R Q, ZHANG K K, et al. Robust backstepping sliding-mode control and observer-based fault estimation for a quadrotor UAV[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5044-5056.
- [22] WANG N, DENG Q, XIE G M, et al. Hybrid finite-time trajectory tracking control of a quadrotor[J]. ISA Transactions, 2019, 90: 278-286.

本文责任编辑:秦明娟

(上接第 70 页)

- [5] DU X K, QU W J, YU X, et al. Research on online monitoring system of fusion transmission line based on multi-source data[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2360(1): 12-21.
- [6] 马明辉,谢晖,徐世斌.基于激光传感器的输电线路塔杆倾斜监测系统[J].传感器与微系统,2024,43(9):71-75.
- [7] PENG T W, TIAN F, LYU J, et al. Design and improvement of transmission line online monitoring communication network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2006(1): 39-50.
- [8] 赵坤,何勇,代亮亮.基于 LoRa 的高压输电线路工况监测系统[J].仪表技术与传感器,2022(9):72-76.
- [9] 戴栋,张敏,赵东生,等.输电线路在线监测装置研制及其通信组网应用[J].高电压技术,2015,41(12):3902-3908.
- [10] 刘宇,胡上茂,刘刚,等.基于 LoRa 和 GPRS 的山区输电线路监测信号无线传输方案[J].高压电器,2023,59(2):177-183,189.
- [11] 宋新明,谢从珍,夏云峰,等.高压交流电场对 WIFI 无线通信影响的实验研究[J].高压电器,2019,55(12):125-131.
- [12] 钟家兴.输电线路在线监测系统通信方式研究[D].广州:广东工业大学,2021.
- [13] 邹军,马晨璐.高压交流输电线路地线磁感应取能方法[J].南方电网技术,2021,15(10):95-101.
- [14] 朱永灿,黄新波,张冠军,等.输电线路在线监测设备供电电源应用分析[J].高压电器,2018,54(7):231-236.
- [15] 公东生,蔡富东.输电线路在线监测装置供电电源的研究与设计[J].电子质量,2022(6):205-208.
- [16] 刘宏伟,郑遵国,李玉付,等.一种基于交流电场感应的取能电源设计[J].电力工程技术,2023,42(6):214-222.
- [17] XUE K J, LIU J Y, KANG N D, et al. Power supply for on-line monitoring device of power lines based on double-half ring core[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 336(1): 12-21.
- [18] 李玉付.基于电场感应的输电线路在线监测装置供电电源研究[D].北京:华北电力大学(北京),2022.
- [19] 程钰,曾翔君,马朝瑜,等.一种用于输电线路视频监测的取能电源的设计[J].高压电器,2024,60(10):156-163,170.
- [20] 孙小雨.高压输电线路在线监测装置感应取能电源的研究[D].长沙:中南大学,2023.

本文责任编辑:李璠