

## Research on Monitoring System for Transmission Lines Against External Damage Based on Edge Information Fusion<sup>\*</sup>

FANG Gang<sup>1</sup>, PING Xueliang<sup>1</sup>, WANG Mingmin<sup>2</sup>, WANG Wenrui<sup>3\*</sup>, ZHENG Jinping<sup>2</sup>, QIAN Lei<sup>1</sup>

(1.State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi Jiangsu 241000, China;

2.State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210009, China;

3.Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201120, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of power grid accidents and personnel accidents caused by accidental touching of high-voltage transmission lines for the large engineering vehicles during the construction process, through data fusion of power frequency electric field sensor, lidar, and binocular vision ranging system based on edge computing, a transmission line anti-external damage monitoring device is developed, a transmission line anti-external damage monitoring platform and mobile application program are also developed, and on-site application verification is carried out. This system provides a new technical means for preventing external breakage of transmission lines. It can effectively improve the intelligent level of transmission line safety management and control, and has high application value and good social promotion value.

**Key words:** transmission lines; edge computing; data fusion; lidar; binocular vision

EEACC: 7220; 8130H

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.035

## 基于边缘信息融合的输电线路防外破监测系统研究与应用<sup>\*</sup>

方 刚<sup>1</sup>, 平学良<sup>1</sup>, 王铭民<sup>2</sup>, 王文瑞<sup>3\*</sup>, 郑金平<sup>2</sup>, 钱 磊<sup>1</sup>

(1.国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司, 江苏 无锡 24100; 2.国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210009;

3.中国科学院上海高等研究院, 上海 201120)

**摘 要:** 针对大型工程车辆施工过程中误碰高压输电线路造成电网事故和人员事故的问题, 基于边缘计算对工频电场传感器、激光雷达、双目视觉测距系统进行数据融合, 研制了输电线路防外破监测装置, 开发了输电线路防外破监控平台和移动终端应用程序, 并进行了现场应用验证。该系统为输电线路防外破提供了新的技术手段, 能够有效提高输电线路安全管控的智能化水平, 具有很高的应用价值和良好的社会推广价值。

**关键词:** 输电线路; 边缘计算; 数据融合; 激光雷达; 双目视觉

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2023)01-0210-08

输电线路在电网中起重要作用, 近年来, 随着国家基础设施建设的快速发展, 居民和企业对用电的需求日益增长, 为了保障高质量的电能输送, 需要建设大量的高压输电线路<sup>[1-2]</sup>。输电线路具有点多、面广、线路长的特点。过去输电线路的维护主要靠人工巡视的方式, 维护工作量大, 人员需求量多、危险性高<sup>[3-4]</sup>。随着智能电网建设的不断推进, 基于4G网络、WiFi等无线通信技术的远程监控系统在输电线路逐渐推广, 基于无人机的电力线路安全巡检在各个地市公司也得以推广和应用<sup>[5]</sup>, 这些技术大大提高了线路巡检和安全管控的效率, 但是在输电线路防外破方面还存在一些不足: 视频监控覆盖范围有限, 需要人员对监控画面进行查看, 容

易出现遗漏和异常事件; 无人机飞行时间有限, 同时无人机操控需要专业人员, 难以实现全天候对所有线路进行监控。因此, 需要研究新的技术手段来减少输电线路外力破坏事故的发生。

近年来, 国内外一些高校、科研院所和企业基于新型传感器技术、人工智能技术、物联网技术等新一代信息技术对输电线路防外破进行研究。文献[6]基于图像识别技术, 采用YOLOv4算法对输电线路的外破隐患进行识别; 文献[7]基于深度学习模型CNN-RVM对输电线路杆塔的外破振动进行识别; 文献[8]研制的基于磁场测量的架空输电线路防外破监控系统, 实现了大型车辆对输电线路外破的预警; 文献[9-11]基于机器视觉对运动目标进行检测, 实

项目来源: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020051)

收稿日期: 2021-10-10 修改日期: 2021-12-09

现了大型工程车辆施工过程中输电线路防外破报警。文献[12]基于工频电场传感器研制的输电线路防外破预警系统,实现了对吊车等大型工程车辆对输电线路外力破坏的实时预警;文献[13]将基于前景杆塔识别的精准复拍方法应用在无人机电力巡检中,实现了无人机位置和相机姿态出现较大偏差时的精准调整,提高了无人机在输电线路防外破应用中拍摄图像的准确性。以上方法主要采用单一的检测传感器对输电线路、杆塔进行防外破监测和预警,难以保障监测的准确性和可靠性。

针对上述问题,提出基于双目视觉、激光雷达、工频电场传感器和北斗定位的多源信息融合的输电线路防外破监测系统。该系统主要应用在吊车、泵车等工程车辆上,对其施工过程进行防外破监测,监测数据通过4G网络发送到远程服务器,通过移动终端和监控平台查看防外破预警信息。

## 1 系统架构设计

基于多源信息融合的输电线路防外破监测系统将双目视觉测距、激光雷达测距、工频电场测距在边缘侧进行信息融合获取装置与输电线路的距离数据。通过高精度北斗定位将输电线路地理信息数据、线路架设方式、线路电压等级、输电线路安全距离报警模型和传感所测得的装置与线路的距离进行边缘计算,从而判断出装置是否在输电线路的安全距离以内,实现输电线路防外破监测与预警。该系统包括安装在吊车臂上的监测装置、远程服务器、移动终端应用程序、监控平台。其中监测装置集成双目视觉传感器、激光雷达传感器、工频电场传感器、高精度北斗定位模块、4G通信模块等,其系统架构如图1所示。

输电线路防外破监测装置安装在吊车臂的顶端,其结构上固定双目测距模块、激光雷达传感器和工频电场传感器,通过工频电场可以判断出吊车是否在输电线路附近施工,当吊车在输电线路附近施工时,输电线路防外破监测装置上运行的目标检测算法和边缘检测算法提取到双目测距模块拍摄的输电线

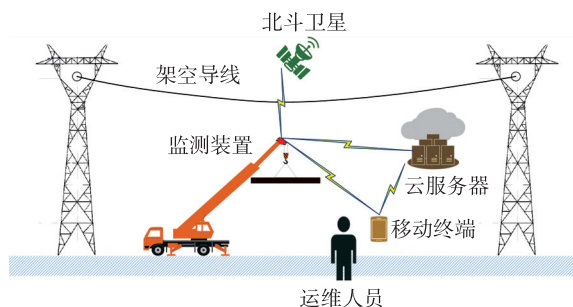


图1 系统架构

路在拍摄照片中的位置,并在其深度图像中提取到其距离数据。激光雷达传感器获取到其测量范围内的三维点云数据,利用双目视觉提取的输电线路的位置从激光雷达的三维点云数据中提取到输电线路的距离数据。工频电场传感器根据不同电压等级的电场与距离的关系获取到监测装置与输电线路的距离。在考虑传感器测量误差、外界干扰等因素的情况下,基于多源信息融合的方法,对三种传感器的距离数据进行融合和加权平均,得到监测装置与输电线路相对准确的距离数据,并将测量到的距离数据和位置数据上报到远程服务器,通过移动终端运行的应用程序将监测装置的位置与输电线路的架设方式、电压等级等进行配置,并设定施工作业的安全距离,实现吊车作业过程中吊臂进入到输电线路安全距离范围内的实时预警。

远程服务器主要用于接收监测装置上报的设备状态、距离、位置等数据,并提供监控平台和移动终端应用程序的数据接口。移动终端主要实现对监测装置的状态查看、报警提醒等功能,可以通过4G网络与远程服务器连接获取数据,同时支持直接与监测装置进行连接获取相关的数据。

## 2 输电线路防外破监测装置

输电线路防外破监测装置采用模块化设计,主要包括:核心处理器、内存、存储、外设接口、WiFi、以太网口、4G模块、北斗定位模块和供电模块等。硬件架构如图2所示。

核心处理器采用英伟达公司的Jetson平台,包括4核ARM A57 CPU和128核Maxwell架构的GPU<sup>[14]</sup>。其中CPU主要负责边缘端应用程序,GPU主要用于边缘计算算法加速。内存采用4GB LPD-DR4,存储包括16GB eMMC和128GB SSD硬盘。外设接口包括USB和串口,主要用于与传感器之间的数据交互。WiFi模块主要用于装置离线时与移动终端直接连接。供电模块为系统提供所需的12V、5V、3.3V电压,同时支持太阳能充电和电源

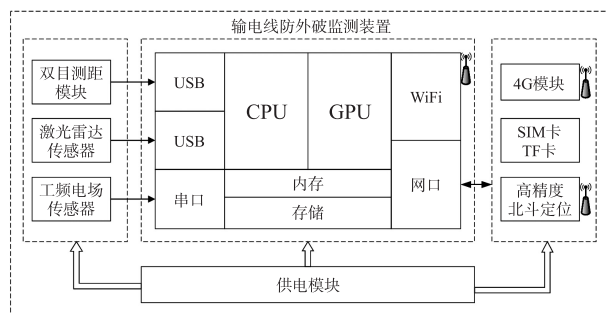


图2 硬件架构

适配器充电。充电芯片采用 TI 公司的 BQ24610 芯片,该芯片是高集成度的锂电池充电控制器,充电电

压范围为 5 V~28 V,能够满足系统 12 V 锂电池供电的需求。充电模块原理图如图 3 所示。

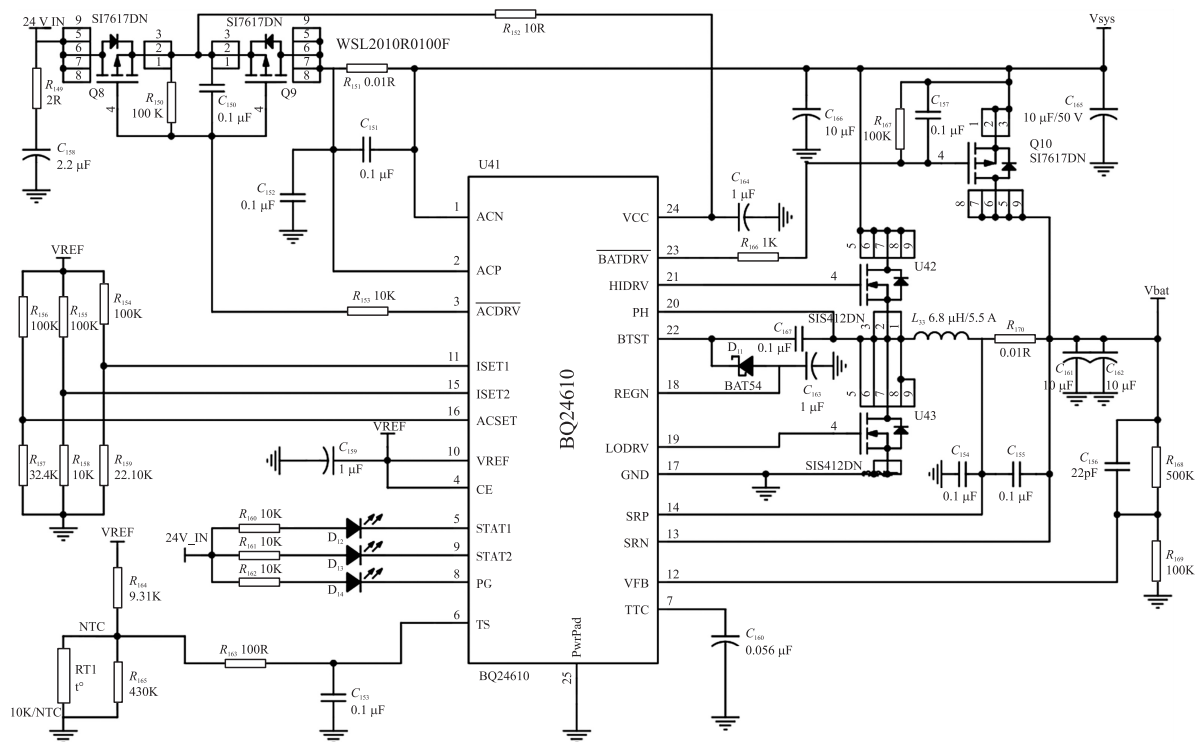


图3 充电电路

4G 模块和北斗定位模块采用江苏省电力试验研究院研制的公专一体通信模块,便于装置接入电力内网服务器。该模块支持电力 4G 专网和 4G 公网,具有高精度北斗定位模块,能够实现厘米级高精度定位和本地授时,通过安全 TF 卡加密数据传输和 VPN 通道实现监测装置快速接入电力内网。该模块通过以太网口与核心处理器进行数据交互。

供电模块为监测装置各个模块提供所需的电能。图4左图为监测装置的实物图,通过右图中的辅助结构固定在吊车臂顶端。



图 4 监测装置和安装结构实物图

### 3 输电线路防外破监测传感器原理

输电线路防外破监测装置上的传感器包括双目视觉测距传感器、激光雷达传感器和工频电场传感器,下面对各个传感器的原理和功能进行介绍。

### 3.1 双目视觉测距传感器

基于视觉传感器进行测距不但能够满足测距的需求,还可以基于机器学习算法对视觉图像进行目标识别,从而能够实现对特定目标的识别和测距。双目视觉测距的原理是基于双目成像过程中双目所拍摄的物体在摄像头视野中的位置不一致,从而可以通过位置偏差引起的投影偏差对视野范围内的物体进行距离计算<sup>[15-16]</sup>。双目视觉测距系统中摄像头的放置方式有平行式和会聚式两种,本文选用的双目测距系统采用平行的方式放置摄像头,两个摄像头的光轴相互平行,在距离摄像头相同距离所拍摄的图像共面<sup>[17-19]</sup>。双目视觉成像模型如图5所示。

图 5 中双目视觉测距系统的左右摄像头性能及参数完全相同,摄像头的焦距为  $f$ ;  $O_L$  和  $O_R$  模拟人

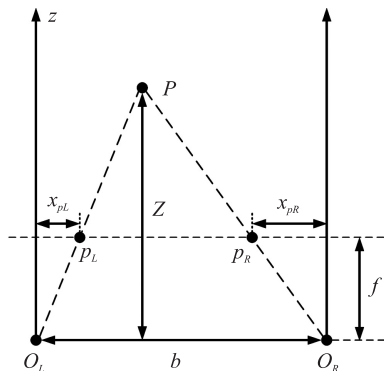


图5 双目视觉测距模型

的左右眼,表示左右摄像头的光学中心位置;两者之间的距离  $b$  为基线;以左侧摄像头光学中心为原点建立三维坐标系  $xyz$ ,左右摄像头在  $x$  轴上,摄像头拍摄的物体在  $z$  轴方向; $P$  为实际拍摄图像中的被侧目标点,其在左右摄像头的成像平面上的投影点为  $p_L$  和  $p_R$ ;  $x_{pL}$  和  $x_{pR}$  为左右投影点  $p_L$ 、 $p_R$  在左右摄像头的成像平面坐标系上的  $x$  坐标;其中  $O_L$ 、 $p_L$  和  $P$  三点共线,  $O_R$ 、 $p_R$  和  $P$  三点共线,且  $P$  点为其唯一焦点;被测点的深度为  $Z$ ,左右摄像机的光轴平行且垂直于基线,所拍摄的  $P$  点照片共面。

由于左右摄像头成像平面到成像原点的距离不同而形成双目测距的视差  $d$ ,其中  $d = x_{pL} - x_{pR}$ ;三角形  $Pp_Lp_R$  和三角形  $PO_LO_R$  相似,因此深度  $z$  和视差之间关系如下:

$$\frac{b}{Z} = \frac{(b - x_{pR}) - x_{pL}}{Z - f} \quad (1)$$

可以求解出  $Z$  为:

$$Z = \frac{bf}{x_{pL} - x_{pR}} = \frac{bf}{d} \quad (2)$$

通过上式可以计算出目标点与双目摄像头的垂直平面之间的距离。为了获得被测目标的三维坐标与双目视觉系统中图像的坐标系对应的位置关系,需要对双目视觉系统的摄像头所拍摄图片进行畸变校正和立体校正,基于 MATLAB 软件的 TOOLBOX\_calib 对双目摄像头的参数进行标定,所选用的摄像头分辨率为  $1280 \times 720$  pixel,两个摄像头之间的基线距离为  $200$  mm,其实物图如图 6 所示。



图6 双目视觉测距传感器模块

### 3.2 激光雷达传感器

激光雷达传感器基于飞行时间法 (Time of Flight, TOF) 进行测距的,即通过测量发射的激光信号和被目标物体反射回来的回波信号之间的时间差计算出目标物体的距离。与微波雷达相比,激光雷达体积小、功耗低、抗干扰能力强,被广泛用于距离的测量<sup>[20]</sup>。激光雷达分为机械式、固态式和混合式。固态激光雷达与机械扫描式激光雷达相比,具有数据采样均匀、体积小、成本低的特点<sup>[21]</sup>。因此本文选用固态激光雷达作为输电线路防外破的测距传感器之一。

固态激光雷达对目标物体进行成像的原理为:采用多个激光发射器发射激光信号,通过多个接收

器接收反射的回波信号,利用相位和强度信息来提取空间的图像信息。主要采用光学相控阵 (Optical Phased Array, OPA) 技术,由多个激光发射单元组成阵列,通过核心处理器调节各个光源的发光时间、光学特性和光波波束方向,从而实现对空间的扫描<sup>[22-23]</sup>。可以实现远距离高精度测量,同时具有结构紧凑、抗振动等优点,图 7 为光学相控阵激光雷达扫描的示意图。

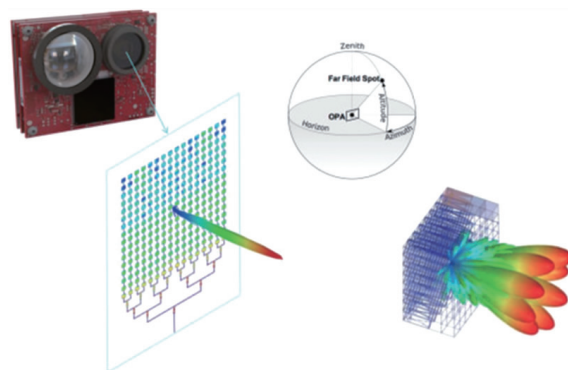


图7 激光雷达扫描示意图

本文选用的为混合固态激光雷达传感器,该传感器拥有  $300$  线的分辨率,能够实现图像级点云输出,测量距离可达  $280$  m。该传感器采用  $1$  个光源加上旋转镜,通过棱镜的反射实现了  $300$  线的分辨率精度,从而达到探测成像的效果。其坐标系如图 8(a) 所示。采用激光雷达对高压输电线路进行三维图像扫描,获取到输电线路的三维点云数据,使用 ROS 系统中的显示软件 RVIZ 对激光雷达的点云数据进行显示,如图 8(b) 所示。

从图 8(a) 中可以看出激光雷达以前方为  $Z$  轴正向,左侧为  $Y$  轴正向,上方为  $X$  轴正向,其垂直视场角为  $40^\circ$  ( $-20^\circ \sim +20^\circ$ ),水平视场角为  $100^\circ$  ( $-50^\circ \sim +50^\circ$ )。点云数据以此坐标系输出,将激光雷达在高压输电线路下面进行扫描测量后能够显示出线路的形态,同时输出线路上各个点的坐标。因此,激光雷达能够测量出与高压输电线路的距离。

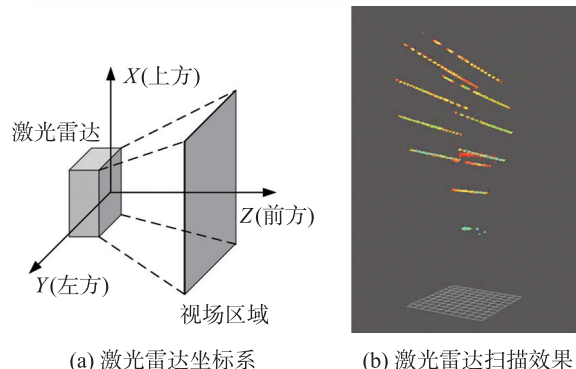


图8 激光雷达坐标系与扫描效果图

### 3.3 工频电场传感器

工频电场传感器主要通过检测输电线路附近的工频电场值,并将工频电场与输电线路的距离进行匹配,本文采用球形工频电场传感器,其原理是采用球形电容检测感应电压的方法来检测工频电场,球形工频电场传感器的结构如图 9 所示,将空心金属球切割成两个半球,通过绝缘物质将两个半球连接在一起,并在两个半球中间并联一个测量电容,两个半球分别构成了传感器的两个电极<sup>[24-25]</sup>。

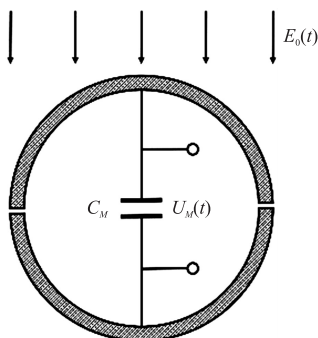


图 9 球形工频电场传感器的结构图

球形电容传感器放入电场后,其外壳表面的电荷量与球心处的电场强度  $E_0(t)$  成正比<sup>[26]</sup>:

$$Q(t) = KE_0(t) \quad (3)$$

式中: $K$  为比例系数。球形电容传感器球壳上的感应电荷在测量电容  $C_M$  上产生一个微小的电压,其电压  $U_M(t)$  为:

$$U_M(t) = Q(t)/C_M \quad (4)$$

将式(2)代入式(1)可以得出测量电压  $U_M(t)$  为

$$U_M(t) = KE_0(t)/C_M \quad (5)$$

通过接入外部电路测出测量电容上的电压  $U_M(t)$ ,根据式(3)求得  $E_0(t)$ ,即为该点的电场。

通过在不同电压等级下对工频电场传感器测量的工频电场值与距离进行标定,建立工频电场与距离的模型,同时通过工频电场的变化能够判断监测装置是否在输电线路附近。工频电场传感器的实物如图 10 所示。



图 10 工频电场传感器实物图

## 4 基于传感器数据融合的边缘计算算法

本文研制的输电线路防外破监测装置采用三种传感器进行测距,主要考虑三种传感器适用场合的互补性,首先,工频电场传感器通过感应电场的变化判断装置附近是否有高压输电线路,当工频电场小于设定阈值时判断附近没有高压输电线路,监测装置仅有工频电场传感器工作,其低功耗的特点能够有效降低系统功耗。当双目视觉和激光雷达进行工作时,阴雨天气时激光雷达受到周围环境散射的影响难以准确进行测距,此时以双目测距为主;当光照过于强烈时双目视觉拍摄的图像会出现过曝光的情况,影响双目测距的精度,此时以激光雷达测距为主。其次,本系统能够在保障有一个传感器正常工作的情况下即可正常工作,提高了系统的可靠性。

当三种传感器同时工作时需要对传感器的距离数据进行融合。由于需要实时对双目视觉的图像数据、激光雷达的点云数据和工频电场数据进行计算,将这些数据通过 4G 模块发送到远程服务器计算一方面对传输带宽要求较高,另外一方面数据传输会造成一定的时延,难以实现对吊车吊臂与输电线路距离的实时测量,因此,需要在边缘侧对多传感器进行目标融合模型计算,最终获得相对精确的距离数据。

工频电场测距、激光雷达测距与双目视觉测距系统分别有各自独立的坐标系,需要将三者的测距数据在一个坐标系内进行空间对准<sup>[27]</sup>。如图 5 所示在传感器安装时,将双目视觉测距与激光雷达传感器的原点对准为同一点,便于根据获取的  $x, y, z$  的坐标得到距离值。而工频电场传感器直接测量出监测装置距离高压工频电场场源的直线距离,无需进行坐标计算。在对工频电场传感器、双目视觉测距传感器和激光雷达传感器进行数据融合过程中,需要对不同传感器的数据采集进行时钟同步,从而保证数据采集时间的一致性,工频电场传感器为每 5 个工频信号周波获取一次距离数据,其距离的计算频率为 10 Hz;激光雷达传感器每秒输出 30 帧点云图,其采样频率为 30 Hz;双目视觉系统每秒输出 20 帧深度图像,其采样率为 20 Hz。为解决三个传感器采样时间不同步的问题,同时结合监测装置安装在吊臂上处于运动状态,为了能够及时测量出监测装置距离高压输电线路的距离,以每 500 ms 时间间隔对传感器数据进行一次融合,即 500 ms 内各个传感器根据其采样的频率先进行均值处理。为了实现三种传感器在空间上的数据匹配,对测量的输电

线路距离信息变换到统一的空间坐标系内,从而精确识别出高压输电线路的距离、位置。

在工程车辆施工过程中,吊臂上安装的监测装置识别高压输电线路并对其位置和距离进行测量,采用 D-S 证据理论对工频电场测距传感器、激光雷达和双目视觉测距的数据进行概率分配,优化传感器组合中各个传感器的局部估计,得到输电线路与监测装置相对位置的最优估计值<sup>[28]</sup>。

监测装置基于边缘计算实现多传感融合算法,主要步骤包括:

步骤 1 监测装置获取工频电场传感器、激光雷达、双目视觉系统的数据,并对数据进行时间对齐。

步骤 2 通过测距标定获取三个传感器的标准差,采用加权最小二乘法对三个传感器的权重进行分配,并计算出加权系数。

步骤 3 基于 D-S 证据理论通过全局最近邻算法(Global Nearest Neighbor, GNN)获得  $k$  时刻目标位置的估计值  $\hat{X}_{i,k}, i=1,2,3$ 。

步骤 4 通过概率分配函数计算估计值和量测值的概率分配值  $A_i, i=1,2,3$  和  $B_i, i=1,2,3$ 。

步骤 5 将概率分配值进行 D-S 判据融合,得到融合后的信任函数,并对目标位置数据进行更新。

基于边缘多传感数据融合的输电线路防外破监测装置流程如图 11 所示。

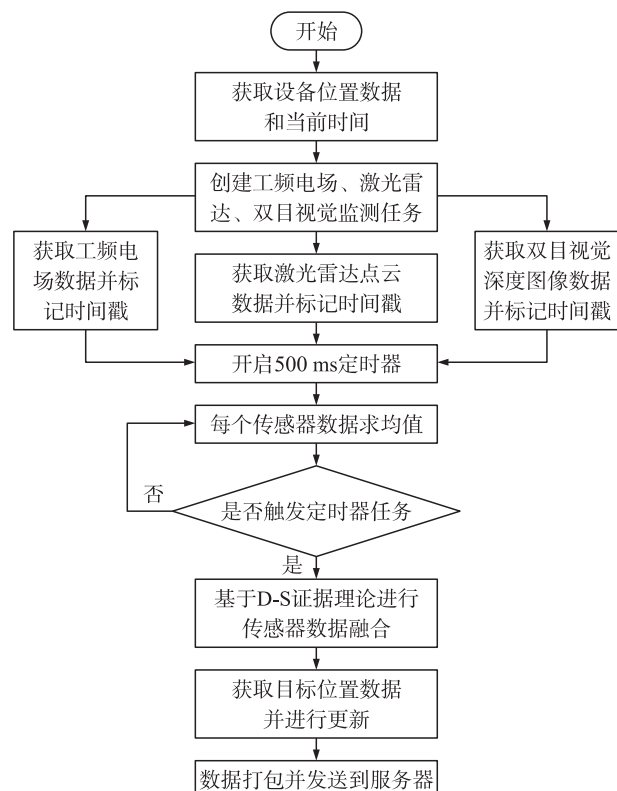


图 11 监测装置运行流程图

## 5 输电线路防外破监测系统现场应用实例

应用基于边缘计算的多传感器数据融合的输电线路防外破监测系统,在无锡某 220 kV 输电线路进行应用验证,图 12 为现场部署方案,监测装置安装在吊车臂的顶端,远程服务器上部署云平台,通过移动终端上面的应用程序能够查看设备位置、设备状态和告警信息。图 13 为现场照片。

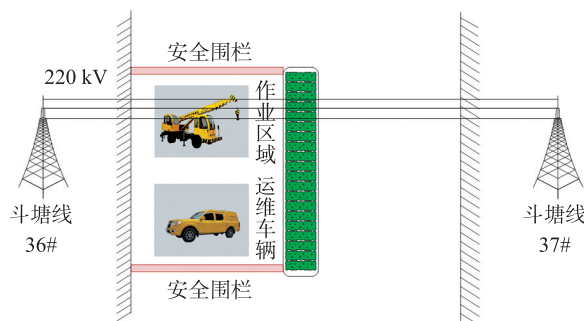


图 12 现场部署方案图



图 13 试验现场照片

试验现场在施工场地由输电线路运维班组人员安装输电线路防外破监测装置,吊车在输电线路下方外侧进行模拟施工作业,考虑现场施工的安全性和作业人员的反应时间等因素,将 220 kV 输电线路的安全报警距离设定为 10 m,当吊车距离输电线路小于 10 m 时远程监控平台和移动端应用程序收到报警信息推送,作业现场的施工监督人员提醒吊车作业人员停止作业。图 14 为发生防外破预警后监控平台显示的设备状态信息,并进行报警推送。图 15 为移动终端上面显示的设备状态信息。

通过现场应用验证表明,基于边缘多传感器数据融合的输电线路防外破监测系统能够为施工现场的工程车辆提供有效的监测手段,大大降低了工程车辆施工过程中碰触高压输电线路造成线路外破事故和人员事故。

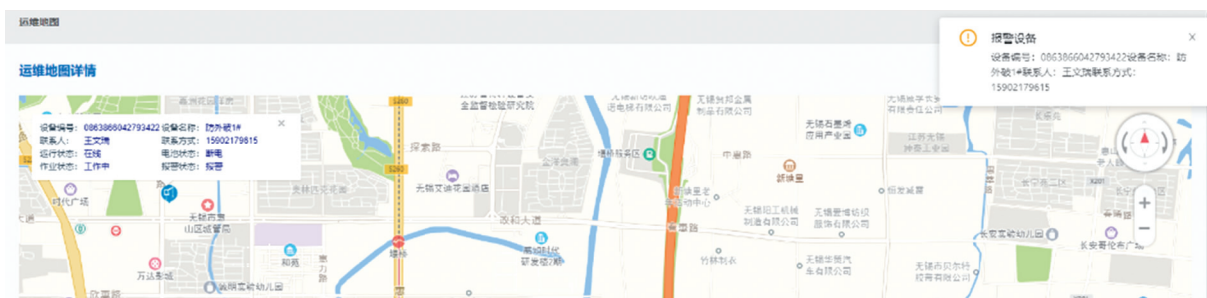


图 14 监控平台数据展示



图 15 移动终端数据展示

## 6 结论

本文研制了基于边缘信息融合的输电线路防外破监测系统,基于边缘计算对测距传感器数据进行融合,在边缘侧实现吊臂与输电线路相对位置的测量,并将测量数据与监测装置的位置数据发送到远程服务器,通过移动终端实现工程车辆施工过程中输电线路防外破的预警。该系统便于现场部署,通过现场应用验证表明了所研制的防外破监测系统的可行性和可靠性。有效提高了输电线路防外破监测和线路运维的效率和智能化水平,丰富了输电线路防外破预警的手段,节约了人力成本和运维人员的工作量,具有良好的经济及社会效益。

## 参考文献:

- [1] 张烨,黄新波,陈小雄,等. 输电线路防外力破坏智能预警系统研究[J]. 高压电器,2015,51(8):54-61.
- [2] 陆佳政,周特军,吴传平,等. 某省级电网 220 kV 及以上输电线路故障统计与分析[J]. 高电压技术,2016,42(1):200-207.
- [3] 陈泽师,邢波,邱志新,等. 可移动式输电线路防外力破坏系统的应用研究[J]. 电气应用,2020,39(10):106-111.
- [4] 周远翔,陈健宁,张灵,等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术,2021,47(7):2396-2408.
- [5] 邵瑰玮,刘壮,付晶,等. 架空输电线路无人机巡检技术研究进展[J]. 高电压技术,2020,46(1):14-22.
- [6] 田二胜,李春蕾,朱国栋,等. 基于 YOLOv4 的输电线路外破隐患识别算法[J]. 计算机系统应用,2021,30(7):190-196.
- [7] 张安安,邓芳明. 基于 CNN-RVM 的输电杆塔外破振动识别方案[J]. 计算机仿真,2020,37(4):76-80.
- [8] 陈峻宇. 基于磁场测量的架空输电线路防外力破坏监控技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [9] 黄琴. 输电线路防外破智能视频预警系统算法研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [10] 贺日升. 输电线路防外破智能监测系统研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.
- [11] 高林. 输电线路视频防外破系统的算法研究与设计[D]. 兰州:兰州理工大学,2018.
- [12] 钱磊,平学良,周晓娜,等. 输电线路防外力破坏预警技术应用研究[J]. 电子器件,2018,41(6):1441-1446.
- [13] 万能,周千昂,郭可贵,等. 基于前景杆塔识别的电力巡检精准自动复拍方法[J]. 计算机应用,2021,41(S1):298-303.
- [14] 徐频捷,王海喆,李策,等. 基于脉冲神经网络与移动 GPU 计算的图像分类算法研究与实现[J]. 计算机工程与科学,2020,42(3):397-403.
- [15] 李昊,王建,熊小伏,等. 基于双目图像测距的输电线路净距计算与安全告警方法[J]. 广东电力,2021,34(6):10-20.
- [16] 颜桂佳,李宏胜,任飞. 基于 SSD 和改进双目测距模型的车辆测距方法研究[J]. 激光杂志,2020,41(11):42-47.
- [17] Deng F, Zhang L, Gao F, et al. Long-Range Binocular Vision Target Geolocation Using Handheld Electronic Devices in Outdoor Environment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020,29:5531-5541.
- [18] 黄俊杰,杨健晟,刘晓波,等. 基于双目视觉监控的输电线路立体空间建模[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(19):102-108.
- [19] 黄刚. 双目视觉系统实现羽毛球实时跟踪[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(6):117-123.
- [20] 麻卫峰,王成,王金亮,等. 点云数据温度变化环境下输电线路形态模拟[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(9):90-96.

- [21] 陈敬业,时尧成. 固态激光雷达研究进展[J]. 光电工程,2019,46(7):47-57.
- [22] Wang H, Wang C, Xie L. Lightweight 3-D Localization and Mapping for Solid-State LiDAR[J]. IEEE Robotics and Automation Letters,2021,6(2):1801-1807.
- [23] 王盛杰,刘博,李和平,等. 基于面阵三维成像激光雷达的目标点云分割技术[J]. 半导体光电,2020,41(5):749-756.
- [24] 刘聪汉,何为,汪金刚,等. 便携式工频电场测量装置的设计[J]. 高压电器,2012,48(3):57-62.
- [25] 蒋国雄,杨建中. 工频电场测量和一种新型测量探头的研究[J]. 高电压技术,1985,11(4):1-5.
- [26] Zhang J, Yang D, Zhang C, et al. A Single Chip LiNbO<sub>3</sub> Photonic 2D Electric Field Sensor Using Two Perpendicular Electrodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020,32(23):1501-1504.
- [27] 刘志强,张光林,邱惠敏. 基于多传感融合的目标跟踪方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(2):1-7.
- [28] 杨剑锋,秦钟,庞小龙,等. 基于深度学习网络的输电线路异物入侵监测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(4):37-44.



方刚(1976—),高级工程师,硕士学历。主要从事电力系统运维检修及安全管理研究工作,36706422@qq.com;



王文瑞(1988—),男,硕士学历,工程师,研究方向:智能检测与控制技术、物联网等,wangwr@sari.ac.cn。