

# 基于激光雷达-视频联控的变电站空域异物入侵检测系统

许彬

(国网福建省电力有限公司超高压分公司,福建 福州 350000)

**摘要:**空域漂浮物入侵变电站,搭接或缠绕在电力线路或设备上,可能引起线路或设备短路故障,是影响变电站稳定运行的棘手问题之一。人工巡检、视频系统及雷达监测等常规漂浮入侵物检测方法都存在一定的局限性。为及时排除变电站漂浮入侵物的隐患,设计并研制基于激光雷达-视频联控的变电站空域漂浮异物监控系统。该系统可有效结合视频监控系统和雷达监控系统的优点,通过激光雷达系统的入侵物位置判别和摄像头的定点图像获取,完成变电站周界空域漂浮异物的全天时全天候监测。该方法不仅可降低大量的人力巡检成本,同时还能对入侵物的形貌特征进行抓取,对入侵物的危险程度进行初步判别,方便工作人员及时查证与清理,保障变电站乃至整个电力系统的安全稳定运行。

**关键词:**变电站;异物入侵;激光雷达;视频联动

中图分类号:TP277;TP391.44 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)03-0142-05

## Airborne Foreign Object Intrusion Detection System in Substation Based on Lidar Video Joint Control

XU Bin

(State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Ultrahigh Voltage Branch, Fuzhou 350000 China)

**Abstract:** It is one of the difficult problems affecting the stable operation of substation that the airspace floating objects invade the substation which lap or wrap around the power lines or equipment. It may cause short-circuit fault of electric power lines or equipment. The methods of conventional floating objects intrusion detection such as manual inspection, video system and radar monitoring all have limitations. In order to eliminate the hidden danger of floating intrusions in substations in time, this paper designs and develops the airborne foreign object intrusion detection system in substation based on lidar video joint control. The system can effectively combine the advantages of video surveillance system and radar monitoring system. Through the lidar system of position identification of intrusions and the camera of fixed point image acquisition, the all-day all-weather monitoring of floating foreign bodies in the airspace around the substation is completed. This method can not only liberate a large number of manpower inspection costs, but also grasp the morphological characteristics of intrusions and make a preliminary judgment of risk degree of intrusions. So as to facilitate the staff to timely verify and clean up, and ensure the safe and stable operation of the substation and even the whole power system.

**Keywords:** substation; foreign object intrusion; lidar; video joint control

### 0 引言

变电站作为电力系统的重要组成部分,是电能输送的关键环节,其可靠性直接关系到整个电力系统的安全稳定。根据中国电力科学研究院统计数据,我国每年由于变电站故障导致的经济损失达26亿元以上<sup>[1-2]</sup>。其中,变电站周界漂浮异物一直是影响变电站乃至电网安全稳定运行的隐患之一。由于变电站电力设施设备大多处于露天环境,周围存在塑料薄膜、风筝、气球、横幅、广告牌等漂浮物。由于天气或人为等各类因素,这些漂浮物可能进入变电站的领空,搭接或缠绕在电力线路或设备上<sup>[3-4]</sup>。

在雷雨等恶劣天气下,由于雨水的作用,搭接漂浮物可能引起电力线路或设备短路故障。轻微的可能引起站内单间隔设备跳闸,导致设备非计划停运,严重的还可能造成电网的负荷损失,社会经济影响较大。

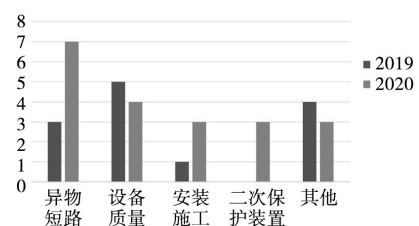


图1 福建省110 kV及以上变压器跳闸原因分布

近年来,由于漂浮异物引起的变电站故障屡见不鲜。2014年10月,甘肃某变电站因异物入侵导致A相接地短

\*基金项目:福建省电力有限公司科技项目(SGFJJX00XMJS1900288)

收稿日期:2023-09-06

路,随着故障扩大,变电站全停。2019年7月,浙江某220 kV变电站线路开关跳闸,重合失败。经现场排查,初步判断事故原因为短时局部气旋将线路周边漂浮异物吹至线路导地线上,引起线路跳闸。而东南沿海地区,全年多风,空域漂浮异物给变电站安全运行带来的挑战更为严峻。根据福建省统计数据,2020年全省110 kV及以上主变压器跳闸事故20起,其中由漂浮物或异物引起短路事故7起。而随着变电站保护措施的不断完善,漂浮物治理不到位逐渐成为110 kV及以上主变跳闸次数增多的最主要原因,且呈现出快速增长的严峻趋势。其原因是变电站周界安全隐患不断增加,以某沿海地区所辖的十余座500 kV变电站为例,周边蔬菜大棚薄膜、广告牌等飘浮物常年存在且不断增加,而地方民俗导致气球、彩带等飘浮物较多。在2020年10月的变电站及线路漂浮物隐患专项排查治理行动中,福建全省共清理各类漂浮物886处,涉及321座变电站或线路。可见,空域漂浮物已成为影响电网安全运行的隐患之一。

变电站通常会在其周界修建围墙、栏杆或搭配电子围栏等对异物入侵进行阻挡。但是这种物理阻挡的方式,对于高空漂浮物的入侵束手无策。针对空域漂浮入侵物,目前变电站最常采用的监测方式是人工巡检<sup>[5]</sup>。这种方法主要依靠巡检人员的定期定点观测,需要较多的人力,耗时长、成本高、效率较低<sup>[6]</sup>,受到光线及天气等因素影响较大,且容易出现漏检、误检,难以保证巡检质量<sup>[7]</sup>。若未及时处理,将为变电站的安全稳定运行埋下安全隐患<sup>[8-9]</sup>。智能化巡检系统可以大幅减小人力巡检成本,提升巡检效率<sup>[10]</sup>。近年来,国家电网不断推进巡检智能化进程。智能机器人巡检在一定程度上解决了人工巡检工作效率低的问题<sup>[11]</sup>,但其在复杂环境下存在巡航轨迹偏差等问题。而对于漂浮异物入侵检测,巡检时间不连续、漏检误检、易受到光线及恶劣环境的影响等问题依旧无法得到合理解决。基于图像处理的视频监控系统可实现漂浮物连续不间断监测<sup>[12-13]</sup>,但由于变电站周界较广,对图片质量提出了较高要求<sup>[14]</sup>,同时,天气、光照强度及昼夜等环境因素也对结果的准确性影响较大。近年来,激光雷达<sup>[15]</sup>等监测手段也逐步应用于变电站空域异物入侵监测。此方法可克服常规方法对光照条件的需求,实现变电站周界的全天时全天候监测<sup>[16]</sup>。但受制于激光雷达的检测特性,通常无法准确地判断出入物的大小及形貌等特征,不利于工作人员对漂浮入侵物进行危险等级判断及后续处理。

为实现变电站周界漂浮入侵物的全天时全天候监控,本文结合视频监测系统及雷达监测系统,提出了一种基于激光雷达-视频联动的变电站空域异物入侵监控系统。该系统首先利用激光雷达完成空域漂浮入侵物的检

测,获取入侵物位置等基本信息,再驱动视频监控系统调用入侵物附近的摄像头获取较为清晰的漂浮入侵物形貌及速度等信息,及时对危险入侵情形进行预警,有效保障变电站稳定运行。

## 1 激光雷达-视频联控系统总体设计

本研究结合激光雷达与视频监控搭建变电站周界漂浮异物入侵监控系统,其系统结构框图如图2所示。整个系统由激光雷达的探测系统通过控制器与上位机的视频系统进行联动,同时上位机再连接到报警系统以及现场监控系统完成从探测到记录保存,再到报警的一系列过程<sup>[17-19]</sup>。

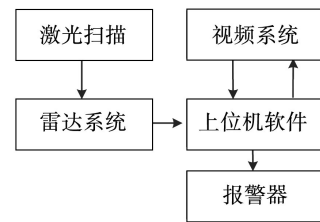


图2 激光雷达-视频联控系统结构框图

根据变电站常规布局,以变电站单面围墙为例,激光雷达-视频联控系统布置如图3所示。

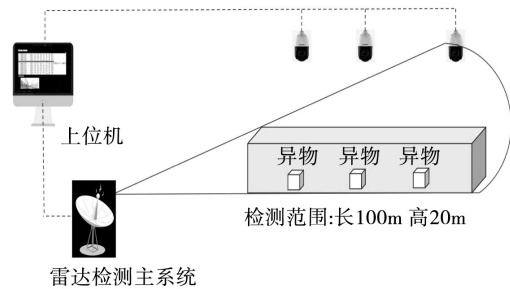


图3 雷达-视频联控系统布局图

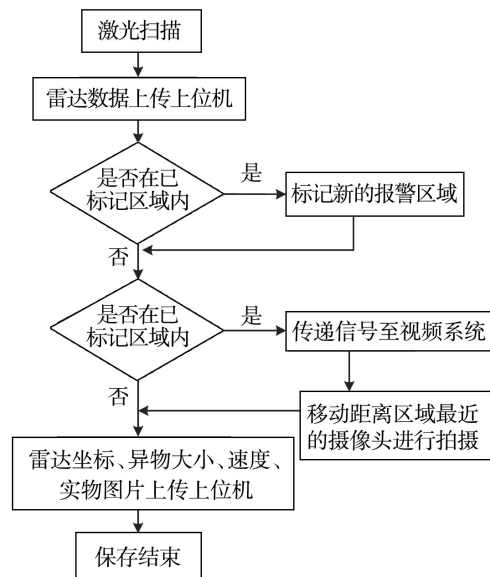


图4 系统工作流程图

雷达系统放置在围墙或围栏的一侧,其监测范围覆盖围墙地面及以上空域。激光雷达通过检测发射光束与反射光束之间的光学路径、时间差或相位差来检测自身与被测物体之间的距离、方位、形状,从而对被测物体进行识别与跟踪,并将得到的数据上传到上位机软件中。上位机软件接收到雷达数据后,首先判断标记区域是否有更新,以此判断是否标记新的报警区域,以防同一位置的重复误判。之后,确认区域是否存在入侵物。明确后,由上位机调动离入侵物最近的视频球机,控制摄像头转向目标区域,调整焦距及光照条件,拍摄并保存实景照片,完成入侵物形貌及轨迹等特征抓取。同时将入侵物的大小,移动速度等数据、雷达坐标位、照片信息全部上传上位机,交由工作人员进一步核实,最后判断是否进行清理,工作流程图如图4所示。

### 1.1 雷达系统

雷达工作时,以一定频率向周围水平面发射激光束,可以实时对平面上探测距离以内的异物进行探测,并迅速做出报警。其核心原理为:激光雷达的激光发射器向障碍物发射光束,发射光束遇到障碍物后折返,由激光接收器接收。通过计时器记录激光光束从发射到折返的时间差,将时间差乘上激光的传播速度。得出被测物体与雷达之间的距离,即方位信息。

本系统的目标是对入侵变电站周界的漂浮物进行监测及预警。综合考虑变电站设备的高度及漂浮物的飞行高度,本系统将对变电站围墙以上约20 m的空域进行实时监控。此时,目标探测平面是与地面垂直的竖直平面。以变电站一边为例,将长度为100 m变电站围墙周界20 m高度内的空域作为系统的目标探测区域。

为完成既定目标区域的实时监控,项目所选用一款水平探测激光雷达探头,其最远探测距离为180 m;采用多次回波的工作模式。拥有水平1 750,垂直700的扫描分辨率,水平15°,垂直8°的视场角,水平0.01°,垂直0.01°的角分辨率,1 fps~30 fps帧频。本研究将激光雷达探头横向放置,调整其扫描角度为15°。此时,雷达探头的扫描检测范围为如图3所示。由图可知,雷达可以监测到所有穿过目标监测平面的物体,并可获取入侵物的位置坐标及大小、速度等基本信息,对变电站周界漂浮异物入侵进行监控与预警。

### 1.2 联动球机的选用和运作

视频雷达联控系统使用的联动视频监控器是电网系统常用的定制球机。其实物图如图5所示。通过设计相关参数,选取1/2.8" progressive scan CMOS类型的传感器,快门满足1~1/30 000 s的范围,非常契合系统中激光雷达1~5 s的呼吸步长;4.8~110 mm,23倍光学变倍的焦距,支持半自动、自动、手动三种聚焦方式;最大图

像尺寸在1 920×1 080,并且支持白天、夜晚的自动定时切换,支持背光补偿、强光抑制、3D降噪,采取IP66防护;DC12 V;PoE+(802.3at)的供电方式,最大功率为18 W。该球机是电力系统监控中常用的视频监控探头,在现有变电站监控系统中广泛存在。本研究中所搭建的雷达视频联控系统可以在现有变电站视频监控系统的基础上进行升级改造。而视频球机的日夜模式可以很好地满足了本系统对变电站空域异物入侵进行全天时全天候不间断监测的需求。



图5 联动球机实物图

### 1.3 上位机系统

在激光雷达视频联控系统中,激光雷达探头与视频球机通过上位机有机地结合起来。通过激光雷达不间断地扫描待监测空域,若发现目标入侵物,及时地将入侵物的位置信息发送给上位机,通过上位机向视频系统发送指令,球机转动角度、调整角度与光照条件,完成入侵物形貌特征的拍摄。

在本研究中,当激光雷达采集激光探测信息后,上位机将采用基于平衡二叉树的K-dimension tree(简称KD-Tree)近邻查询的加速欧式聚类算法对信息进行处理。普通的二分树已经无法满足激光雷达产生的三维数据存储需求,此时须利用KD-Tree的数据结构,采用式(1)计算K维数据集中每一维度的方差,并从中选取具有最大方差的维度k。

$$\max\left(\frac{\sum(X-\mu_x)^2}{N_x}, \frac{\sum(Y-\mu_y)^2}{N_y}, \frac{\sum(Z-\mu_z)^2}{N_z}, \dots\right) \quad (1)$$

将维度k上的数据从小到大排列,得到数据集合,计算中值m,按照中值m分割为两个集合,并创建一个用于存储的树节点;对得到的两个子集合,重复上述中值分割集合的步骤,直到所有的子集合不能再进行划分为止。对过滤后的每一帧点云进行聚类处理,获取待测目标空域中的物体信息并保存<sup>[20-22]</sup>。然后,逐一对比前后帧的物体信息,获取物体的运动状态和速度,通过速度判断标准判定是否为移动物体,并根据范围和物体长宽高的信息对移动物体进行筛选,如此反复,通过获取多帧数据,最终确定漂浮入侵异物,及其速度、坐标及几何尺寸等信息,并将报警数据上报给联动软件,联动系统通过的运算判断,将数据发送到摄像头并调用其运动。

此外,考虑到雷达和摄像球机在空间上是有偏差的,所以本联动系统通过坐标转换,将雷达坐标信息转换为摄像头坐标信息,并调动摄像头进行精准拍摄。

坐标转换算法思路是设已知A点为雷达所在点,B点为相机所在点,以A点为球心的球面坐标系记为A0坐标系,任意一点C在该坐标系下的坐标记为 $(dC, \alpha C, \beta C)$ ,其中 $dC$ 表示距离, $\alpha C$ 表示方向角, $\beta C$ 表示俯仰角,另外B点在A0坐标系下的坐标为 $(dB, \alpha B, \beta B)$ ,通过标定获取求C点在以B点为球心的球面坐标系B0下的坐标 $(lC, \varphi C, \theta C)$ ,其中 $lC$ 表示距离, $\varphi C$ 表示方向角, $\theta C$ 表示俯仰角,其中前提是A0,B0坐标系的方向角 $0^\circ$ 方向一致,俯仰角 $0^\circ$ 方向一致,都是指向天空。首先计算A0坐标系对于B0坐标系的位置及两坐标系的相对夹角,然后通过转轴变化公式进行坐标计算,示意图如图6。

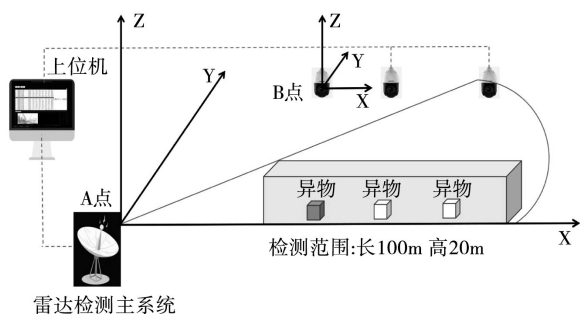


图6 坐标计算示意图

在经过上位机算法筛选校准之后,摄像机转动至面对入侵物的方向,调整焦距及光线,捕捉入侵物体实时画面。该画面将与激光雷达所获取的入侵物坐标、大小、位置等报警信息一起显示在上位机的监控界面上。如图7所示为雷达视频联控系统的报警信息在上位机系统上的显示。

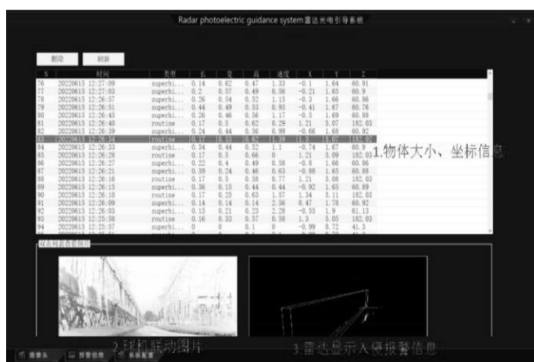


图7 报警信息在雷达光电引导系统上的显示

上位机通过激光雷达与视频监控器的联动,使得雷达在发现入侵异物后,视频监控器能够第一时间转向标记的警告区域进行拍摄并保存,工作人员即可在监控室完成对于入侵异物的分析和位置信息,做出下一步的判断及清理工作。真正实现了雷达探测与实景视频拍摄的

系统交互联动。

## 2 实验测试结果

为验证所设计的变电站激光雷达视频联控空域异物监测系统的可靠性和可行性,本文开展了原理性测试实验。实验目标监测区域为长60 m,宽3 m的空域范围。实验布置现场如图8所示,激光雷达探头位置为原点,球机位置距离激光雷达装置15 m。实验中主要以激光雷达装置的位置为原点,A为漂浮异物的距离,B为球机的距离。测试中,模拟漂浮异物(白色塑料袋)分别从距激光雷达装置13 m和16 m的位置穿过目标测试区域,测试现场如图8所示。

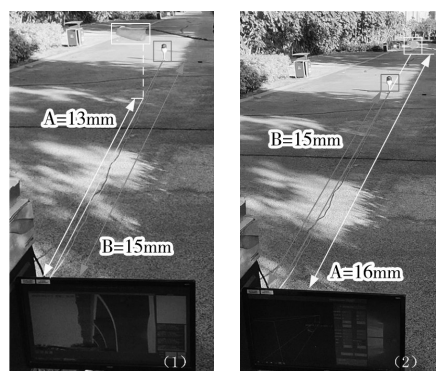
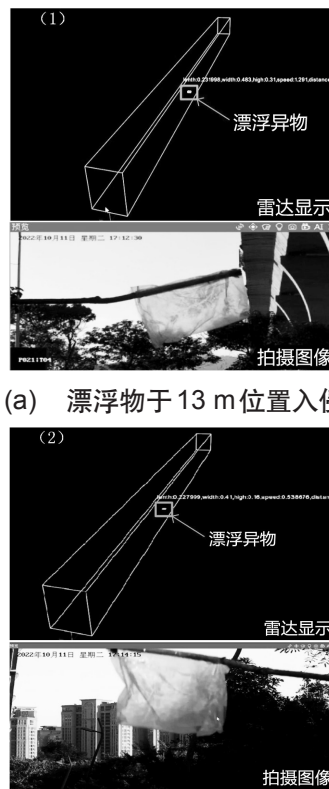


图8 不同距离的漂浮异物测试现场



(a) 漂浮物于13 m位置入侵



(b) 漂浮物于16 m位置入侵

图9 雷达显示漂浮异物入侵信息和球机拍摄图像

(下转第150页)