DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0119-05.

基于可视探测感知的风电场全自动灭火系统

刘智超[1]，李昕龙[2]，姜禹含[1]，左秀江[2]，王大威[1]
（1.蒙东协合新能源有限公司，内蒙古 通辽 028000；
2.国家电投集团内蒙古能源有限公司，内蒙古 通辽 028000）

摘 要：针对火灾位置识别效果差、成本较高，且不能实现远程监控等问题，提出一种基于可视探测感知的风电场全自动灭火系统。使用ZigBee无线传感技术设计风电场火灾报警子系统，经过modbus通信协议、模糊路基数码处理信息；采用中值过滤去除采集图像的噪声，将处理后图像映射至二维空间上，结合双CCD算法求解象空间与物空间成像的空间坐标，得出图像是否存在火灾隐患和隐患的空间位置，自动启动灭火设备，实现风电场全自动灭火。实验表明，系统的图像识别分辨率高，能够实现精准化灭火，且吞吐量大，具有较高的实用价值。

关键词：风电场；探测器；远程火灾监控；自动灭火；图像识别
中图分类号：TP273；TP391.41 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)02-0119-05

Automatic Fire Extinguishing System of Wind Farm Based on Visual Detection and Perception

LIU Zhi-chao[1], LI Xin-long[2], JIANG Yu-han[1], ZUO Xiu-jiang[2], WANG Da-wei[1]
(1. Mengdong Xiehe New Energy Co., Ltd., Tongliao 028000 China;
2. State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao 028000 China)

Abstract: Aiming at the problems of poor fire location recognition, high cost, and inability to realize remote monitoring, a fully automatic fire extinguishing system for wind farms based on visual detection and perception is proposed. ZigBee wireless sensor technology is used to design the wind farm fire alarm subsystem, and the information is processed through modbus communication protocol and fuzzy subgrade digital processing. The median filter is used to remove the noise of the collected image, and the processed image is mapped to the two-dimensional space. The space coordinates of the image space and the object space are solved by using the dual CCD algorithm to determine whether there are fire hazards and the space location of the hidden dangers in the image. The fire extinguishing equipment is automatically started to realize the full automatic fire extinguishing of the wind farm. Experiments show that the system has high image recognition resolution, can achieve accurate fire fighting, and has high throughput, and has high practical value.

Keywords: wind farms; detector; remote fire monitoring; automatic fire extinguishing; image recognition

0 引言

现阶段，风能发电成为各国可再生能源发展航标。我国为了加快风能发电的进程，在短时间内大量生产风电场所需各种设备，并将其投放生产运作，但是相关监测技术没有跟上生产力的需求，致使安全事故没有被及时发现和处理，引发了更大的安全事故[1]。而在风电场运作安全事故中，火灾事故占据很大比重，如果没有及时灭火，会导致设备一部分或者全部烧毁，经济损失严重。同时随着风电场各设备的运作时间的增加，各设备的部件磨损、老化，这也大大增加故障发生概率，进而增加了发生火灾的风险[2]。

风电场所处地理位置险峻，且环境条件恶劣，对灭火系统使用有很大影响，已有的灭火系统主要是针对民用住宅、商业建筑等，远远满足不了风电场灭火的需求，为此各国对灭火系统研究越加重视。国外学者Khoroshko V V等人首先对燃烧物进行定位，并将定位信息发送至预警子系统，由预警子系统对该信号进行处理，再转发至灭火子系统，灭火子系统根据信号信息情况，自动启动相应灭火设备，进而完成灭火[3]。黄新静等人根据烟雾、温度等多种传感器，并结合物联网建立自动灭火系统，通过SVG图像识别出火源点，随后采用喷水设备对其进行灭火[4]。郑学樑等人根据压力传感器、温度传感器等获取烟雾、温度信息，将该信息传送至ZigBee网络，经过分析发出预警并给出火源空间位置信息，随后启动灭火装置

*基金项目：国家电投集团项目（DNYZC-2022-06-01-280-3）
收稿日期：2023-09-06

进行灭火[5]。

当前灭火系统缺少可视化功能，增加了误判的概率，同时信息传输时存在大量冗余信号，进而增加灭火时延。基于此，提出一种以可视探测感知技术为基础的风电场全自动灭火系统设计方案。通过ZigBee无线传感技术构建可视探测感知火灾报警子系统，有效提高报警准确度，利用中值滤波、双CCD设计火灾识别子系统，提升火灾定位精度，进而实现精准化灭火。

1 可视探测感知的风电场全自动灭火系统

风力发电火灾具有以下特征：

(1) 易燃物种类繁多，火灾荷载密度较大。风力发电过程中使用电动器材、风机叶片、润滑油等诸多设备，在狭小的空间内聚集大量的热量，这大大增加了易燃物品燃烧的风险；

(2) 火灾存在隐患诸多，如电气火灾、液体火灾等。齿轮箱、发电机、电动机等设备都是导致火灾发生的重要因素；

(3) 设备成本高，火灾损失严重，每台风力发电机组的成本均在千万元以上。

火灾灭火难度系数极高，同时火灾掉落碎片给灭火人员生命安全带来极大威胁。风力发电场多布置在偏远郊区、近海附近，消防力量不足，难以及时进行灭火。假设风电场有全自动灭火系统，能够及时进行扑救，就能使损失降至最低。

系统选择理念：无需人员看守，选取自动灭火系统；需要选用更换简单，且生命周期长的灭火设备；选取对作业人员安全且对电力发电机组干扰小的灭火剂；系统必须做到及时、有效灭火，将火灾损失降至最小。文中通过可视探测感知设计风电场全自动灭火系统，其主要分为四部分，即火灾报警子系统、作业人员感知子系统、系统管理子系统、火灾识别子系统。

1.1 火灾报警子系统

本文利用ZigBee无线传感技术[6]与可视探测感设计风电场火灾报警子系统，系统设计流程图如图1所示。

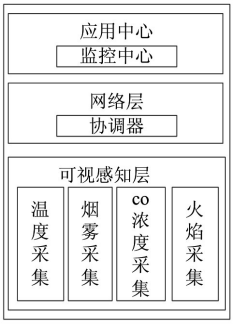


图1 火灾报警子系统设计流程图

风电场火灾报警子系统由上、中、下三层组成，即应用层、网络层与感知层。

上层为火灾报警子系统核心环节，其负责收到网络层发出的信号数据，并对发出数据进行处理。首先接收数据，因为ZigBee传感设备具有双向无线通讯特性[7]，当数据经过串口时，如果上位机若想使用该数据，就需要对该数据进行分析，由于传感器传送两种类型的信号数据，即安全、非安全，为此上层中监测中心主要负责识别这两种信号，并给出相应的反馈结果。

中层用于连接上层与下层的作用，负责接收传感器输送的信息并传送给上层，同时承接下层探测器的信号，并将该信号转发到剩余探测器上。中层有两种运行方式，即正常与报警的运行方式。在正常运行方式下，因为信息传输量少，能耗低；在报警运行方式下，探测器传送的信号量大，能耗高。该层需要借助协调器，将信息转换成上层能够接收的信号，进而及时传送火灾数据信号。

下层由各个探测器构成，当探测器获取风电场内部环境信息后，由探测器内部的芯片、转换器将信号变换成数据信号并进行压缩，随后向中层发送。

1.2 作业人员感知子系统

作业人员感知子系统用于监视系统的电压、电流运行情况，与系统数据传输、探测信号接收、指令接收等。作业人员感知子系统运行示意图如图2所示。

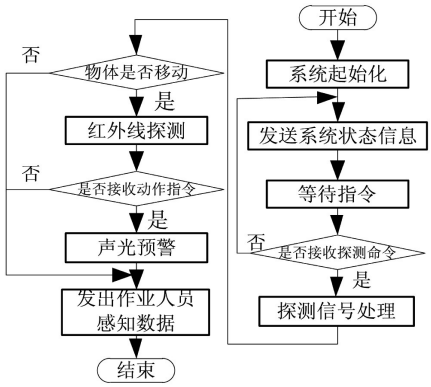


图2 作业人员感知子系统运行示意图

作业人员感知子系统使用modbus通信协议[8]，通过发布各自的数据链表就能完成集成应用。为了确保通信的质量，防止通信信息缺失，设置通信缓存列队模块，进而得出通信重复的数据量。探测信号处理模块采用模糊路基数码完成信号处理，该方法能够对周围进行温度补偿，且抗干扰能力极强，降低误报率，进而提升系统的灵敏度与精度。

1.3 系统管理子系统

系统管理子系统主要负责信息库备份、用户管理、权限管理以及个人信息管理等，完成每一个用户权限与信息管理，进而维护风电场全自动灭火系统的安全性。

1.4 火灾识别子系统

火灾识别定位子系统如图3所示。

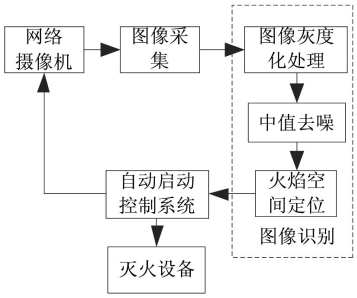


图3 火灾识别定位子系统

火灾识别定位子系统用来识别火灾图像，并给出火灾空间坐标，进而启动临近的水炮，发射高压水柱，精准灭火。

1.4.1 火灾图像识别

灰度图是只有亮度信息，没有色彩信息的图像，也就是从暗到明且变换连续的黑白照片。为此，要想得到灰度图，就需要对其进行量化处理。一般将0−225划分成256个亮度等级，等级越小表示越暗，等级越大表示越亮。

由于RGB的值都是相同的，同时图像数据信息(调色板索引值)也就是现实中RGB的亮度结果，且其有256个色的调色板，图像信息中任意一个字节都表示不相同的像素，为此，本文火灾图像选用灰度图进行处理，降低图像处理难度，为灭火争取大量时间[9]。

在YUV色彩表示方法中，Y分量值代表亮度值，其包含灰度图的全部信息，通过Y分量值即可展示一幅图像。YUV与RGB之间关系如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.48 & 0.27 \\ -0.17 & -0.28 & 0.58 \\ 0.69 & -0.47 & -0.107 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{1}$$

根据式(1)可知，通过R、G、B的值即可算出Y值，进而将原始火灾图像变换成灰度图。

由于摄像机安置地方有灰尘、烟雾，致使火灾原始的图像存在一定噪声，为此采用中值过滤方式将火灾灰度图像上噪声进行平滑处理，该过程就是图像去噪的过程。

中值过滤方法通过一个窗口在火灾灰度图像上进行扫描，将窗口内图像的像素根据灰度等级大小进行排列，选取灰度值中心的像素灰度值当作该窗口中心像素的灰度值，进而完成中值滤波[10]。该计算过程如式(2)所示。

$$g(m,n) = Mediam\{f(m-k,n-l)(k,l) \in B\} \tag{2}$$

式中，$g(m,n)$表示去噪后的图像；$f(m,n)$为加权函数值；k、l属于常数。

为了保证窗内有个中间像素，一般窗内像素点数量为奇数，则中值取中间两个像素灰度值的平均值。

根据式(2)可以发现中值滤波属于一种非线性滤波，即：

$$Mediam\{y(m)+x(m)\} \neq Mediam\{x(m)\} + Mediam(y\{m\}) \tag{3}$$

式中，x、y表示图像上两个像素值大小。

该方法能够在消除噪声同时保留火灾灰度图的边缘信息。

1.4.2 火灾空间定位

传统风电场火灾探测方法因探测距离与高度等因素限制，致使其不能及时、有效地监测出火灾空间位置，为此，根据火灾光学特征，并结合可视探测定位方法设计一种火灾空间位置定位模块，该过程无接触即能完成火灾空间定位。火灾自动定位是自动灭火核心部分。火灾早期可能只在空间某点发生，为了确保有效灭火，同时保证其他区域不受到水的浸渍，造成不必要的损失，为此需要精准找出火源空间位置后，自动启动灭火设备对其进行自动定位灭火[11]。

将处理后的火灾图像映射至二维空间平面上，视觉坐标系如图4所示。

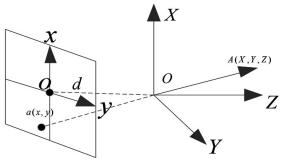


图4 视觉坐标系

设定O为视点，d为平面与原点的间距，则空间平面上点$a(x,y)$与空间对应点$A(X,Y,Z)$的关系如式(4)所示。

$$\begin{cases} x = d\dfrac{X}{Z} \\ y = d\dfrac{Y}{Z} \end{cases} \tag{4}$$

为了实现风电场的火源空间位置的自动定位，建立火灾图像坐标与火灾实际坐标之间的关系。

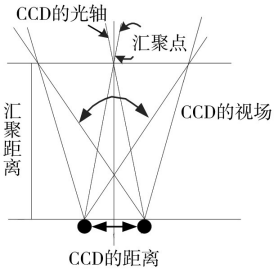


图5 立体摄像过程

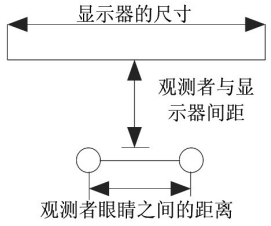


图6 立体显示过程

立体视觉感通过双CCD完成的，由此双CCD方法是建立立体视觉的必要前提。一般情况下，双CCD立体视觉系统由两个功能、结构相同的CCD构成，同时这两个设备需要对称摆放。这两个系统都是由摄像机与显示设备两部分组成，立体摄像过程如图5所示，立体显示过程如图6所示。

在双CCD立体视觉系统中，物空间的任意一点都变换成人们人眼看到的立体图像上的任意一点，空间变换流程如图7所示。

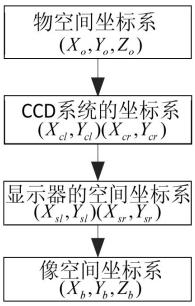


图7 空间变换流程

设定xoy表示摄像机空间坐标系，XOY表示监测空间的物方空间坐标系，则象空间与物空间成像计算过程为：

$$\begin{aligned} x &= -\frac{D_1X + D_2Y + D_3}{D_7X + D_8Y + 1} \\ y &= -\frac{D_4X + D_5Y + D_6}{D_7X + D_8Y + 1} \end{aligned} \tag{5}$$

式中，x，y为影像的坐标，X，Y为监测空间的地平面坐标。

D_1、D_2、D_3、D_4、D_5、D_6、D_7、D_8均为这两个空间的定向参数；根据这些参数即可得出X，Y空间坐标，也就是火灾所在位置，即：

$$\begin{aligned} X &= -\frac{(xD_8 + D_2)Y + x + D_3}{xD_7 + D_1} \\ Y &= \frac{(y + D_6)(xD_7 + D_1) - (x + D_3)(yD_7 + D_4)}{(xD_8 + D_2)(yD_7 + D_4) - (yD_8 + D_5)(xD_7 + D_1)} \end{aligned} \tag{6}$$

通过式(6)得出火灾所在空间位置，随后自动启动灭火设备，实现风电场全自动灭火。

2 实验过程与结果分析

2.1 实验环境

实验在Matlab软件下搭建系统。选用蓄电池组220 V，180 Ah；电容器组容量8 F，耐压240 V；直流斩波器A、直流斩波器B滤波电感值为1 mH；电网相电压380 V。

2.2 实验分析

风电场火灾识别实验选在白天进行，为了降低图像识别难度，并将原始图像进行灰度化处理，如图8所示。

为证实可视探测感知设计风电场全自动灭火系统性能良好，对风电场自动化灭火系统的图像识别效果、时延与响应时间进行分析，并将物联网技术与ZigBee技术作为实验对比技术[12]。



图8 风电场火灾灰度图

2.3 火灾识别效果分析

图9(a)为可视探测感知技术识别出火灾图像；图9(b)是物联网技术识别出火灾图像；图9(c)为ZigBee技术识别出火灾图像。

从图9可以明显看出，所提技术识别效果最佳，因为可视探测感知技术采用中值滤波方式能够将灰度后图像存在噪声平滑处理，进而有效去除该图像上噪声，得出图像分辨率高；对比技术都没有去噪环节，因此获得图像分辨率较低。



(a) 可探测感知 (b) 物联网技术 (c) ZigBee技术

图9 灭火系统的火灾识别效果对比

2.4 系统吞吐量对比分析

吞吐量是指系统单位时间内传输信息的数量，吞吐量越大表示系统承受压力越大，系统性能越好，反之，其承受压力越小，系统性能越差。因此吞吐量作为评估系统性能关键指标之一。吞吐量计算过程为：

$$F = \frac{N \times R}{T} \tag{7}$$

式中，F为吞吐量；N为虚拟用户数量；R为虚拟用户发出请求个数；T为整个过程所用时间。下面对三种技术设计的风电场自动灭火系统的吞吐量进行对比分析，结果如

(下转第149页)