

基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾 预警防控系统

张贵龙¹, 何俊杰¹, 陈从禹², 刘国正²

1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610000

2. 四川天微电子股份有限公司, 四川 成都 610200

DOI:10.61369/WCEST.2025010017

摘要 : 目前的风力发电场的火灾防控主要基于火灾发生后的处置, 而对风电机组的火情隐患提前进行预警成为了越来越重要的研究课题。本文介绍的基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾预警防控系统, 便是一种新型的风电火情提前预警系统。该系统主要包含热阵列成像仪, 紫外火花探测器, 风电智能主控器, 灭火装置, 风电场火情预警智慧管理软件等。通过对采集的数据进行分析, 并结合机器学习算法, 能够对风电机组的火情隐患进行早期的预警以及处置。

关键词 : 风电; 热阵列; 紫外火花探测; 机器学习; 早期预警

Wind Power Fire Early Warning and Prevention System Based on Thermal Array and Ultraviolet Spark Detection Mechanism

Zhang Guilong¹, He Junjie¹, Chen Congyu², Liu Guozheng²

1. Yalong River Basin Hydropower Development Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

2. Sichuan Tianwei Electronics Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610200

Abstract : Currently, the primary focus of fire prevention and control in wind farms is on post-incident response. However, early warning systems for potential fire hazards in wind turbines are becoming increasingly important. This paper introduces a new wind power fire early warning system that uses thermal arrays and UV spark detection technology. The system includes a thermal array imager, an UV spark detector, an intelligent wind power controller, a fire extinguishing device, and smart management software for wind farm fire warnings. By analyzing collected data and using machine learning algorithms, the system can provide early warnings and effective responses to potential fire hazards in the wind turbine nacelles.

Keywords : wind power; thermal array; ultraviolet spark detection; machine learning; early warning

引言

本世纪二十年代以来,我国的风力发电行业继续保持快速发展的趋势。而陆上风电场一般位于草场或者山地,一旦发生火灾,就会造成难以估量的损失。风电机组最容易发生火灾的轮毂、机舱距离地面有上百米左右,加上交通不便等因素,都制约着火灾发生后人员及消防设备的及时到达和处置。对风电机组的火情隐患进行预警便成为了重要的研究课题。

雅砻江流域水电开发有限公司与四川天微电子股份有限公司成立了联合课题组,合作开发了“基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾预警防控系统”。雅砻江流域水电开发有限公司属下的腊巴山二期风电场,位于四川省凉山州德昌县。腊巴山风电项目是国家首批大型风电光伏基地之一,共安装48台风力发电机组。我们选取了其中1台风电机组,加装该风电火灾预警系统,作为试点工程。

目前常用的风电消防手段是安装火焰烟雾探测器(简称烟感)和火焰高温探测器(简称温感),以及舱内配置手提式泡沫灭火剂,通过探测火灾后期的间接产物进行火灾告警。如何通过先进的探测手段、有效的数据分析和智能的预警技术手段,提前发现风电火灾隐患发现,预留充分的处置时间,将火灾隐患消灭在萌芽阶段,便成为很重要的课题。

一、火花的生产及探测原理

火花形成的原因有多种，常见的包括电线老化、电力电路接触不良、静电放电、电容式感应等。在风电机舱内有电气柜、发电机组、电力传输装置、电力传输线缆等多种电气设备，发电机组的刹车盘会由于摩擦而产生火花，电器线缆老化、破裂会产生电火花。另外环境中会存在机油或者润滑油，这些都是易燃性物质，当连续的火花溅射到这些可燃性物质上时，被引燃的概率会相当大，发生火灾的可能性非常高。为了预防火灾，在火灾发生初期，对火花的监测是发现火情隐患的一个重要手段。

物质燃烧会产生可见光辐射、不可见光辐射，火花也具备这些特性。从光辐射来讲，燃烧所形成的光和热会形成紫外光（UV）、可见光（VIS）、红外光（IR），它们拥有各自的光辐射波长：

紫外－辐射波长：185～260nm；

可见光－辐射波长：400～700nm；

近红外－辐射波长：0.7～1.1μm；

宽频红外－辐射波长：0.7～7μm；

窄频红外－辐射波长：4.3～4.4μm；

燃烧时的火焰（火花）光谱如图1所示：

从图上可看出火花从紫外光谱一直到红外光谱都会有电磁波辐射，而太阳光在可见光谱段和红外光谱段同样有电磁波的辐射，太阳光光谱如图2所示：

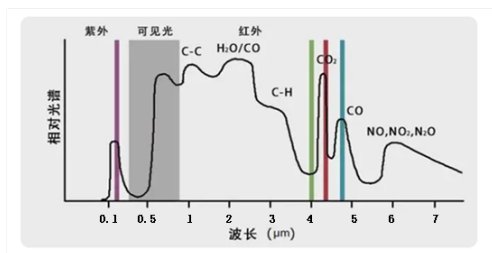


图1：燃烧时的火焰（火花）光谱

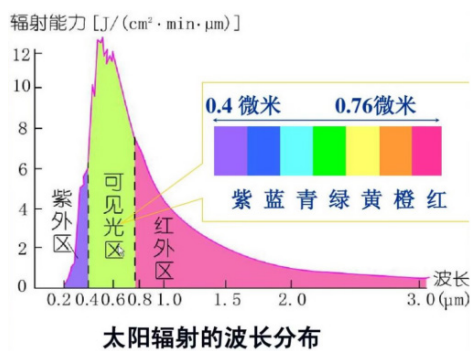


图2：太阳光光谱图

从光谱图可以看出到达地面的太阳光和作为电光源的非紫外透明材料发出的光波都大于300nm，因此火花探测采用220nm至280nm的紫外波段进行监测，这一波段属于太阳光谱盲区（日盲区）和日常大部分光源盲区，通过对这一波段的紫外线检测可大大降低干扰，提高火花监测的准确度。

当可燃物质燃烧或爆炸刚点燃的瞬间，会以极快的速度（3～4毫秒）辐射出较强能量的紫外线。在这个时间紫外线传感

器就可以探测到火花的生产，具有灵敏度高、响应速度快的优点。这种用紫外光谱测量火焰的测量方法是基于光谱学原理^[1]。

二、风电火灾预警系统整体设计

如图3所示，风电火灾预警系统主要包括：热阵列双光红外成像仪、紫外火花探测器、风电智能主控器、智能灭火装置、风电场火情预警智慧管理软件等。

风电火灾预警系统的工作原理是：风电机舱内的热阵列成像仪、紫外火花探测器等采集的数据实时上报到风电智能主控器，由后者进行处理。根据采集数据进行分析判断，一旦达到灭火条件，便给灭火装置下达指令。通过触摸式液晶屏进行信息展示、人机交互，以及系统设置。

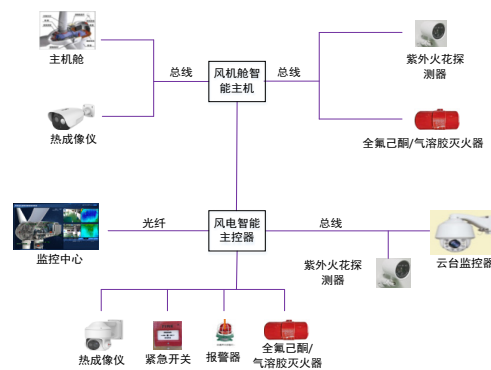


图3：风电火灾预警系统整体架构图

三、系统各组成模块设计

（一）热阵列双光红外成像仪

通过红外热像仪，可以将物体温度差异以不同颜色的图像标识^[2]。温度越高，辐射能量就越大。热阵列双光红外热成像仪基于红外成像的原理，对目标温度进行实时呈现和测量。采用双光（可见光、红外）功能模式，既能实现温度点、线、面的数据化呈现，也能进行视频证据保全和视野画面监控。风电机舱内的轮毂、齿轮箱、刹车盘等关键设备通过安装热阵列双光红外热成像仪，可以将设备温度的变化趋势进行数据化、图像化呈现，结合深度学习算法^[3-4]，就可以对目标的火灾隐患提前预警，便于监控人员对火灾隐患进行处置，避免火灾的发生，如图4。



图4：热阵列双光红外成像仪实物图

（二）紫外火花探测器

紫外火花探测器是利用光敏元件将紫外线信号转换为电信号的传感器，它的工作模式通常分为两类：光伏模式和光导模式。光伏模式是指不需要串联电池，串联电阻中有电流，而传感器相当于一个小电池，输出电压，但是制作比较难，成本比较高；光导模式是指需要串联一个电池工作，传感器相当于一个电阻，电阻值随光的强度变化而变化，这种制作容易，成本较低。

采用只对185nm ~ 260nm 狭窄范围内的紫外线响应，而对其它频谱范围的光线不敏感的紫外线传感器，同时它是光子检测手段，因而信噪比高，具有极微弱信号检测能力。利用它可以对火花中的紫外线进行检测。其工作原理示意图如图5所示：

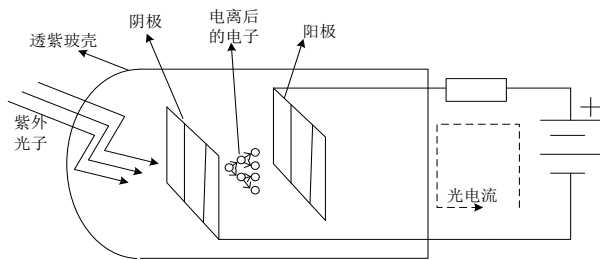


图5：紫外管工作原理示意图

紫外火花探测器核心器件采用四川天微电子股份有限公司自主研制的紫外光电管，该型紫外光电管具有结构牢固、探测距离远、工作状态稳定、寿命长等特点。紫外光电管的工作原理是金属的光电效应^[5]，如上图所示。在阳极和阴极之间加上电压，就在两极之间建立了电场。紫外线射到光电阴极上时，阴极材料自由电子获得紫外光子能量后，超出材料逸出功临界值而发生电子跃迁释放光电子，在电场作用下向光电管阳极移动，产生光电发射效应。

（三）风电智能主控器

风电智能主控器如图6所示：



图6：风电智能主控器

风电智能主控器包含：微控制器(MCU)、液晶显示屏、主备电切换及充放电管理、主备电源、电源电路、通讯电路、驱动控制电路、存储电路等。

微控制器(MCU)选用GD32F103RET6，集成了ARM Cortexm-M3 32位处理器内核，工作频率微108兆赫。提供高达3MB的片内闪存，和96 KB的RAM。增强型I/O和外设连接到两条APB总线。另外还能提供3个12位ADC、2个12位DAC、10个通用16位定时器、2个基本定时器、以及2个脉宽调制高级控制定时器，如图7。

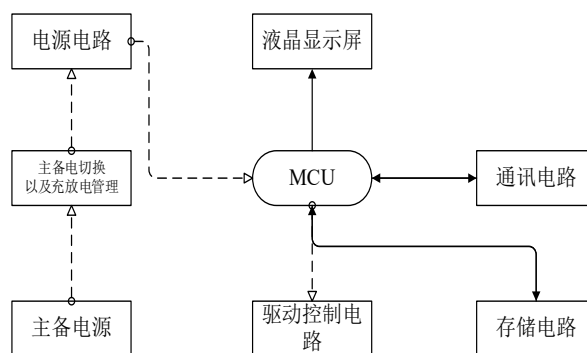


图7：风电智能主控器电路组成图

风电智能主控器外部输入电源是220VAC，经过电源适配器转换后得到24V，然后DC/DC转换成12VDC，再由LDO转换后得到3.3V电压。其中，24V转12V采用芯片TPS5430进行转换。

TPS5430的默认输入启动电压为5.3V（典型值）。ENA引脚可用于禁用TPS5430，将电源电流降低至18μA。当ENA引脚悬空时，内部上拉电流源实现运行。TPS5430包括内部慢启动电路，此电路可在启动期间减慢输出上升时间，以减少浪涌电流和输出电压过冲。最小输出电压为内部1.221V反馈基准。通过过压保护(OVP)比较器最大限度地减少输出过压瞬变。激活OVP比较器时，关闭高侧MOSFET，直至输出电压低于所需输出电压的112.5%。内部逐周期过流保护限制集成式高侧MOSFET中的峰值电流。对于连续过流故障情况，TPS5430将进入断续模式过流限制。热保护可防止器件过热。

图8为风电智能主控器在液晶显示屏上的人机交互界面：



图8：风电智能主控器人机界面

（四）全氟己酮/S型脉冲式热气溶胶智能灭火装置

风电火灾预警系统中使用的灭火剂基于全氟己酮或者S型脉冲式热气溶胶。

S型脉冲式热气溶胶灭火剂具有高效、无毒无害、安全、绿色环保的特点^[6]。适用于通讯机房及计算机房、风电舱、电池舱、发动机舱、电池箱等相对封闭的场所。全氟己酮是一种新型灭火剂，具有环保、无色、无毒的特点。标准大气压下的沸点为49.2℃，凝固点为-108℃，介电强度≥110KV，绝缘性很高。

智能灭火装置通过总线与风电智能主控器连接。灭火装置接收到风电智能主控器发出的指令后，启动灭火操作。

（五）风电场火情预警智慧管理软件

风电场火情预警智慧管理软件安装于监控中心，图9为风电场

火情预警智慧管理软件的界面。

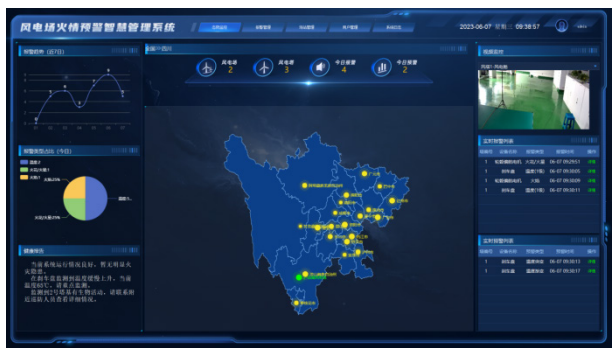


图9：风电场火情预警智慧管理软件界面

风电场火情预警智慧管理软件主要实现对轮毂、风电舱、塔筒、塔基室外四个部位内安装的紫外火花探测器、热阵列双光红外成像仪等探测的数据进行统一搜集、管理和分析，通过大数据建模和分析，实现对风电塔内关键设备火情状态的预警分析，同时通过预警分析结果实现三方面的处置与管理：其一，风电塔关键设备火情隐患预警，便于风电维护和管理人员提前对隐患单元进行处置和处理；其二，根据采集的数据分析，实现设备健康诊断，方便设备日常维护管理；其三，根据监测结果与风电智能主控制器实现信息交互，并将交互信息提炼进行展示与回查。

风电场火情预警智慧管理软件同时具备操作权限设置、预警

阈值参数设置、设备管理、实时报警、远程预警等基本功能，还具备远程监控双光视频窗口实时展示功能。

四、运行结果

根据位于四川凉山州德昌县腊巴山二期风电场试点工程的运行，该风电火灾预警系统具有如下的特色及优势：

（1）军转民用的紫外火花探测技术，结合热阵列双光成像等技术，可以提前快速探测、预警、并处置火情，减少乃至杜绝火灾的发生；

（2）通过红外热成像的深度学习，以及大数据平台，对火灾异常征兆以及危险点进行分析，实现电火灾风险感知及诊断；

（3）基于全氟己酮或 S 型脉冲式热气溶胶的智能灭火装置，使得灭火更加高效，实现快速灭火并防止复燃。同时对人员、环境更加环保无污染。

五、结论

课题组研制的“基于热阵列与紫外火花探测机理的风电火灾预警防控系统”通过试运行，实现了火情早期预警的功能。根据试运行的结果，今后可在其他的风电场或者风电机组上进行推广。

参考文献

[1] 乔伊·贾罗辛斯基. 燃烧现象－火焰形成、传播和熄灭机制 [M]. 科学出版社，2021.
[2] 常本康，蔡毅. 红外成像阵列与系统 [M]. 科学出版社，2006.
[3] 白帆，曹昭睿. 基于深度学习的白光－热成像双通道图像识别系统设计 [J]. 科学技术与工程，2018，18(21)：264–267.
[4] 陈鹏，秦伦明. 基于深度学习的电力设备红外图像识别 [J]. 上海电力大学学报，2021，37(3)：217–220
[5] 郑冬梅，闫迎利. 光电效应与光电器件的应用 [J]. 现代物理知识，2006，18(2):2.
[6] 卞建峰，郭鸿宝. 气溶胶灭火机理及应用探讨 [J]. 消防科学与技术，2001(4):3.