第 52 卷 第 4 期：1627-1641 高电压技术 Vol.52, No.4: 1627-1641
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250977

风电机组火灾特性及防控技术研究进展综述

黄道春[1,2]，钟广林[1,2]，赵朔阳[1,2]，王一鸣[1,2]，邓　军[3]，谢志成[3]
（1. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；2. 武汉大学新型电力系统与国际标准研究院，武汉 430072；
3. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院，广州 510663）

摘　要：随着“双碳”目标的推进，新能源发电装机容量持续增长。其中，风电在能源结构调整中占据关键地位。风电机组是风力发电系统的核心装置，但存在火灾风险，其火灾主要发生于机舱、叶轮、塔筒等关键区域，严重影响风电机组的安全运行。为此，该文综述了风电机组火灾的发生特性、监测预警技术与灭火技术，重点分析了火灾诱因、结构热平衡特性、材料失火特性、监测预警方法、灭火剂与灭火设备及系统的相关研究现状。通过分析对比现有技术，提出了风电机组火灾防控技术的研究建议，可为多因素耦合工况下的风电机组火灾防控提供支撑。
关键词：风电机组；火灾特性；监测技术；预警技术；灭火技术

Review on Fire Characteristics and Prevention and Control Technology of Wind Turbines

HUANG Daochun[1,2], ZHONG Guanglin[1,2], ZHAO Shuoyang[1,2], WANG Yiming[1,2], DENG Jun[3], XIE Zhicheng[3]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Institute of Next Generation Power Systems and International Standards, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Electric Power Research Institute, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract：With the advancement of the “dual-carbon” goals, the installed capacity of new energy power generation continues to increase,among which the wind power plays a critical role in the energy structure adjustment. Wind turbines are the core components of wind power generation systems; however, the fire risks exist. Fires primarily occur in key areas such as the nacelle, blades, and tower, significantly jeopardizing the safe operation of wind turbines. This paper reviews the characteristics of wind turbine fires, monitoring and warning technologies, and fire-extinguishing techniques, with a focus on analyzing the causes of fires, structural thermal balance characteristics, material combustion properties, monitoring and warning methods, fire-extinguishing agents, and fire-extinguishing equipment and systems. Through a comparative analysis of existing technologies, recommendations for research on wind turbine fire prevention and control are put forward. These recommendations can serve as a foundation for enhancing fire safety under complex multi-factor operating conditions.
Key words：wind turbine; fire characteristic; monitoring technology; warning technology; fire extinguishing technology

0　引言

随着全球对新能源和低碳电力需求的不断增长，以及传统能源使用所带来的环境污染和能源供应压力的日益加剧，风能在全球能源结构中的地位愈发凸显。

在“双碳”目标的推动下，风电已成为我国第四大电源组成部分。《2025 年全球风能报告》指出，到 2024 年，全球风电总装机容量达到 1 136 GW。其中，中国、美国、巴西、印度、德国分别排至前五[1]。国内风电行业处于发展的“风口”，风电新增装机容量占全球新增装机容量的近 70%。《2024 年中国风电吊装容量统计简报》统计表明[2]：2024 年，全国(除港、澳、台地区外)新增装机 14 388 台，容量约 86.99 GW；其中陆上风电新增装机容量 81.37 GW，占全部新增装机容量的 93.5%，海上风电新增装机容量 5.619 GW，占全部新增装机容量的 6.5%，2019—2024 年国内新增风电装机容量如图 1 所示[3]。其中，截至 2024 年，我国海上风电累计并网容量稳居全球第一位，超过第 2—5 名国家海上风电并网容量总和[4]。据海上风电现代产业链共链行动大会信息报道，我国海上风电装机规模已连续 4 年位居全球首位[5-6]。海上风电技术的不断突破，不仅开拓了

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFF0611300)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFF0611300).

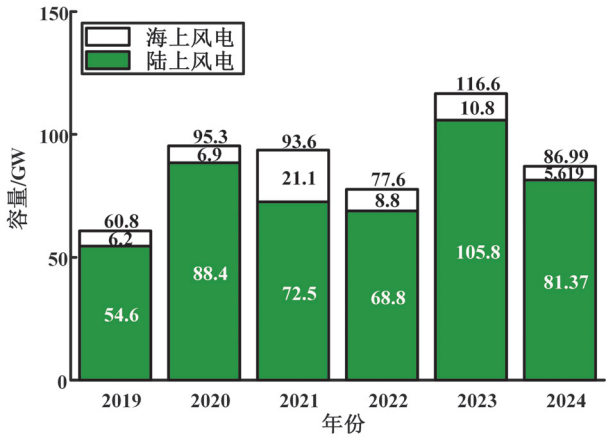


图 1 2019—2024 年(截至 10 月底)国内新增风电装机容量示意图

Fig.1 Schematic diagram of new domestic installed wind power capacity from 2019 to 2024 (as of end-October)

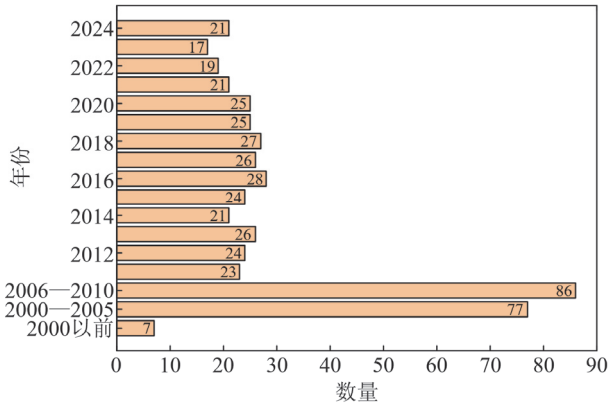


图 2 SAS 风电机组火灾数据统计

Fig.2 Statistics of SAS wind turbine fire data

表 1 国内外典型的风电机组火灾事故案例

Table 1 Typical cases of wind turbine fire accidents both domestically and internationally

日期	事件描述	地区
2024 年 2 月 9 日	克莱门特峡风电场发生火灾事故，导致一台价值 220 万澳元的风机损坏，同时火灾碎片导致周边 30 公顷草原被点燃[10]	澳大利亚
2023 年 1 月 5 日	由于电气故障，风电机舱内部着火；消防力量赶到现场但无能为力(涡轮机高度 67 m)；造成数十台风机停用[11]	澳大利亚
2023 年	防雷系统螺栓连接不良，避雷器电缆与连接点间形成电弧，引燃电缆终端及转子叶片上的液压油残渣；叶片被闪电击中后逐渐燃烧，燃烧碎片落入机舱引发二次火灾；风机全部报废，发电中断 150 天，造成约 200 万欧元的损失[12]	美国
2023 年	3.2 MW 风机发电机机械故障(发电机风扇滑环故障产生火花)；叶轮产生的火花点燃风扇过滤垫，进而点燃发电机罩上的绝缘层，并蔓延至整个涡轮机；风机完全烧毁，造成了约 80 万欧元的损失[13]	德国
2023 年	断路器的螺纹连接没有正确拧紧(可能由于安装不当、维护不善或振动松动)导致过热起火；火灾未蔓延到整个机舱；超过 500 欧元的损失[14]	丹麦
2021 年 8 月 15 日	海上的一台风力发电机发生火灾，造成机舱严重损坏，并导致其中一个叶片出现重度烧伤[15]	英国
2021 年 3 月 14 日	变频器柜内元件故障，柜底电容器组炸毁；机舱内空间狭小，可燃物及设备密集，机舱罩壳材质为可燃物，不具有阻燃功能，超细干粉灭火弹未全部爆开，未能扑灭火灾；机舱内部着火，引发机舱整体烧毁，风机叶片根部烧损[16]	中国

更多的风力资源，还有助于缓解风电场对土地占用或视觉景观的影响。

风电机组作为风力发电系统的重要组成部分，其造价、运输和维护成本高昂，因此投入运营后保持安全稳定运行至关重要[7]。风电机组因其可能引发火灾的风险，成为影响自身稳定运行的关键因素之一，并对风能产业的可持续发展构成潜在威胁。据苏格兰反风电宣传组织(Scotland Against Spin，SAS)数据库(截至 2024 年 9 月 30 日)的不完全统计，火灾已成为风电机组事故中除机械失效外的第二大原因，共记录 497 起火灾事故(历年事故数据如图 2 所示[8])。近年来，国内外发生的多起典型风电机组火灾事故(详见表 1)表明，一旦火势蔓延至机舱、叶片或风场周边区域，往往导致重大设备损毁和巨额经济损失。同时，国家政策层面也高度重视相关火灾隐患。2025 年 3 月 31 日，国家林草局、国家能源局等部门联合印发的《“林电共安”攻坚战三年行动方案》，作为首个系统性治理林牧区电力设施火灾隐患的政策文件，其核心目标是通过三年攻坚，最大限度消除“树线矛盾”及林牧区工矿商贸和风光电企业电力设施引发的火灾隐患，以保障生态安全与电网稳定运行[9]。上述频发的事故案例与最新的国家政策导向，凸显了强化风电机组火灾防控技术研究与应用的紧迫性和必要性。

本文首先分析了风电机组火灾原因、结构热平衡研究、材料失火特性研究现状，进一步综述了近年来风电机组火灾监测与预警技术、灭火剂与灭火装置、火灾消防技术与系统的研究进展，分析了存在的问题，从仿真设计、材料试验及监测预警方面，提出了尚需开展的研究工作建议。

1 风电机组火灾发生特性

1.1 风电机组火灾原因

风电机组因其塔架高、设备复杂以及运行环境

偏远等特点，呈现出显著的火灾发展特性，并带来严峻的火灾防控挑战。当前，全球陆上最高风机塔筒高度已达 185 m[17]，中国自主研制的“18 MW 半直驱海上风电机组”风轮直径达 260 m[18]；此外，部分风电设施部署于深远海区域，如中国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”，其发电地点距离海岸线超过 100 km[19]。上述特点决定了风电机组一旦发生火灾，传统的地面防控手段往往难以实施，亟需发展适用于高空、高海拔或远海环境安全可靠的风电机组火灾防控技术。

风电机组一般由机舱、叶轮和塔筒 3 部分构成，内部集成有复杂的电气系统、机械结构及多种可燃材料，存在较高的火灾风险。风电机组结构图如图 3 所示。其中，机舱是火灾危险性最高的区域，可燃物集中，包括润滑油、液压油、软管、隔音棉、电缆和密封材料等[20]。一旦起火，极易形成快速蔓延的高强度燃烧过程。

在山区风电场中，火灾风险更为复杂。受地形起伏和风速增强效应的影响，燃烧产物或高温碎片可能从高处抛射至山坡下方，引燃周围草坡、灌木或林地，从而引发山火。此外，山地风电场多处于偏远或交通不便地区，救援资源难以快速介入，导致扑救难度大、次生灾害风险高。干燥天气等不利气象条件下，更可能加剧火势蔓延范围与强度。

赵发明等(见表 2)对风电机组各主要区域的火灾风险分布与成因进行了系统总结，指出风电机组火灾具有“扑救难度大、隐患点多、类型复杂、后果严重”等典型特征[22-26]，为风电火灾防控策略提供了理论支撑和实践参考。

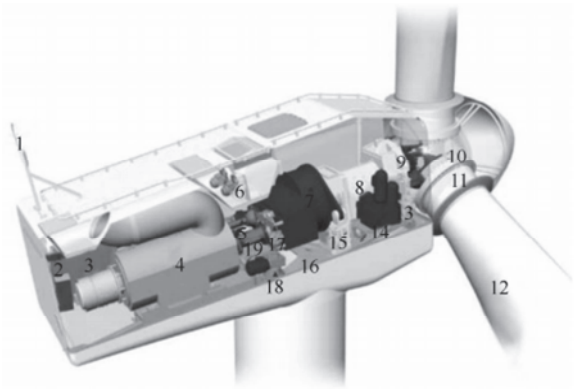
1.2 风电机组结构热平衡研究

研究风电机组结构热平衡的目标在于确保各关键部件(发电机、齿轮箱、变流器、变压器、轴承、控制系统等)在设计允许温度范围内稳定运行，避免过热导致的性能下降、材料老化加速或灾难性故障。由于不同区域的功能分工与结构封闭程度差异，导致热量产生、传递与耗散过程形成局部微平衡系统。

为深入探究系统的运行机制，下面简要分析其 3 大核心区域(机舱、叶轮、塔筒)的热源分布特征。

1.2.1 机舱区域

作为风电机组的“动力心脏”，机舱内部集成了齿轮箱、发电机、刹车系统等关键设备，形成了强热源集中且散热受限的封闭环境。根据现场实测数据，夏季机舱内部温度可达 50 ℃以上[27]，最高能到 70 ℃[28]。其热环境特征主要体现在：



1—超声波风传感器；2—维修用吊车；3—带变频器的 VMP 顶部控制器；4—发电机；5—斜角调节液压缸；6—油/水冷却器；7—齿轮箱；8—主轴；9—斜角调节系统；10—叶片轮壳；11—叶片轴承；12—叶片；13—风轮锁定系统；14—液压控制单元；15—扭乱世臂；16—机舱底座；17—碟式机械制动器；18—偏航齿轮；19—复合型碟式偶合器

图 3 风电机组结构图[21]

Fig.3 Structural diagram of wind turbine[21]

表 2 风电机组火灾风险区域及成因[25]

Table 2 Areas and causes of wind turbine fire risk[25]

结构	组成	风险区域	成因
机舱	发电机、齿轮箱、刹车系统、润滑散热系统、控制柜和变流柜等	控制柜、变流柜、发电机、润滑系统、高速刹车和接线盒等	高温运行、散热不良、电气元件质量不过关、电气元件过热老化、润滑油泄漏和高速制动等
叶轮	叶片、导流罩、轮毂和变桨电机及控制系统	叶片、变桨电机及控制系统等	叶片遭受雷击、电机超负荷运行、控制系统的线路过热和线路老化击穿等
塔筒	爬梯、传输控制电缆、控制柜、变频柜和开关柜等	传输控制电缆、变频柜、控制柜等	传输控制电缆过流或绝缘降低、控制柜散热不良、电气元件过热和绝缘老化击穿等

1）机械热源：机械异常热源的原因多样，通常有齿轮磨损或损坏、轴承过热、疲劳、用油不当、油温异常、振动及过载[29]。例如，齿轮箱在能量传递过程中因机械摩擦产生的热量在润滑不足或对中偏差时，局部温升可骤增至危险水平。高速制动时，刹车系统若出现严重机械故障，如卡钳松动、移位、高速轴窜动等，刹车卡钳或刹车片摩擦刹车盘易产生大量热量和火花，若引燃周围可燃物，会引发机组火灾[30]。

2）电气热源：机舱内火灾风险较高的电气部件包括断路器、逆变器、电容器、谐波滤波器、变流器、控制系统、电池及变压器等[29]。电气热源通常源于异常电流发热：过载、短路、接地故障及电

弧会直接引发高温；机舱持续振动则会导致连接点松动，进而因电阻增大持续过热。当这些热量作用于易损部件，比如因谐波谐振损坏的电容器、会释放易燃气体的铅酸电池、油品可助燃的油浸变压器、变流器的IGBT结温(易随负载电流的连续波动而变化)异常等，在设备缺陷、维护不足和谐振等因素共同作用下，上述热源易转化为火灾风险[31]。

3）辅助系统热源：液压系统泄漏的油液接触高温表面会引发挥发性可燃气体释放，而机舱加热器在温控失效时持续工作，易成为引燃相邻电缆的潜在火源。

机舱区域的多热源耦合效应与其封闭结构形成对立，即设备需要散热维持热平衡，但受限空间阻碍热量有效排出，因此容易形成“热累积—材料老化—电阻增加—热量再累积”的恶性循环。

1.2.2 叶轮区域

叶轮作为将风能转化为机械能的核心总成，通过轮毂与主轴相连，其热环境受旋转运动和雷电效应的双重影响：

1）变桨系统热累积：IGBT作为变桨柜内主要热源，其热负荷随着风力发电机电容的增大而增加[32]；变桨电机在频繁调节桨距角时持续工作，尤其在风速波动剧烈区域，电机绕组过热可达绝缘材料临界温度；变桨控制柜内电子元件密集排列，散热通道受限。

2）雷电热冲击：复合材料(玻璃纤维/碳纤维)叶片遭雷击时，数万摄氏度的电弧会灼蚀材料表面，导致树脂基体高温分解、纤维熔融或碳化，引发内部层间开裂乃至贯穿性损伤[33]。

3）旋转热传递：轮毂的持续旋转运动阻碍热量的径向传递，导致热量沿轴向传导至主轴轴承，易加剧机舱内机械系统的热负荷[34]。

1.2.3 塔筒区域

塔筒作为连接机舱与基础的垂直通道，其热环境表现出显著的垂直温度梯度与气流动力学特征：

1）电气设备热释放：塔基变频柜在满负荷运行时的功率损耗约可达机组额定功率的2%[35]；电缆因集肤效应和邻近效应产生的热量随电流波动而变化[36]。

2）烟囱效应强化：塔筒底部与顶部的气压差形成自下而上的气流。烟囱效应在火灾初期促进新鲜空气补充，加速燃烧；而当塔门破损后形成上下通风路径，火势蔓延速度则可提高数倍。

3）热分层现象：热空气自然上升导致塔筒上部温度显著高于下部，形成的温度梯度可使顶部电缆接头等薄弱环节更易因过热失效。

1.2.4 现有研究现状

周年勇等以3 MW海上风机为例，建立机舱热平衡方程，并计算舱内部件载荷、对流换热系数及正压维持新风量。研究还考虑了温度、速度、舱体表面灰度等因素对热平衡的影响[37]。刘海涛等建立了某兆瓦级海上双馈机组冷却系统散热布置设计与系统特性匹配之间的关系，并根据机组传动链特点及适应机舱紧凑布局，对其冷却系统散热布置进行了优化[38]。陈成城等开展了机舱内热源散热形式和流动特性的分析，提出了结合计算流体力学和热力学对系统进行数值仿真的方法，在CFD软件上对不同物理模型的散热性能进行了评价，其温度场仿真结果如图4所示[39]。Yang等研究表明，应用于风机变桨柜的脉动热管冷却系统性能卓越，在17.3 r/min转速与1 000 W热负荷下，该系统能使蒸发器出口温度稳定在76.1 ℃，较之风冷方案，IGBT温度显著降低了20.4 ℃。该研究为兆瓦级机组的热设计提供了有效的解决方案参考[32]。

RENGEL等对某2.5 MW风机进行了火灾危险分析，采用计算流体动力学模拟电气柜火灾的初期影响。结果通过机舱内氧气浓度、温度和能见度的变化，得出了特定时间内的定量值，用以评估火灾风险[40]。吴根勇等人利用CFD模拟，深入分析了2 MW风电机组机舱附近流动结构，特别是机舱顶部散热器及射流的影响，发现风速仪高度存在最优区间，且散热器对风速仪处风速有特定影响而射流能削弱此影响[41]。焦宇等通过FDS软件对油泄漏火灾进行了数值模拟，研究探讨了不同通风口位置、风速和环境温度对机舱火灾场景特性的影响[42]。端和平等针对风电机组变压器内置塔筒所带来的发热与环境温度升高的问题，研究采用CFD技术对塔筒双层机械通风散热系统进行了数值模拟。通过分析

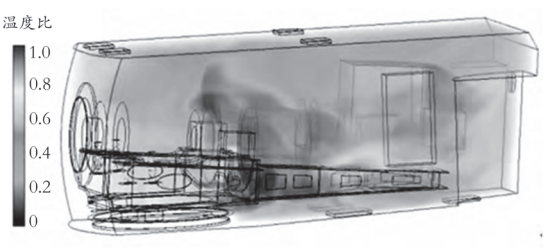


图4 空间温度场分布[39]

Fig.4 Distribution of spatial temperature field[39]

速度场和温度场，提出了 3 种递进式优化方案。如图 5 所示，最优方案的变压器罩内挡板下空气温度低，高温集中于铁芯四周，利于排气[43]。

综上所述，风电机组结构热平衡方面的相关研究，主要是基于 CFD 软件仿真，对机组结构进行优化设计与改进，以提升散热效率、抑制热累积。其中，涉及的仿真技术参数如表 3 所示。

现有研究主要集中在温度场与流体场中温度、速度等关键参数的数值模拟。通过仿真研究参数间的耦合关系，探究外界因素对风电机舱的散热影响，对于风电机舱等结构的设计优化具有指导意义。

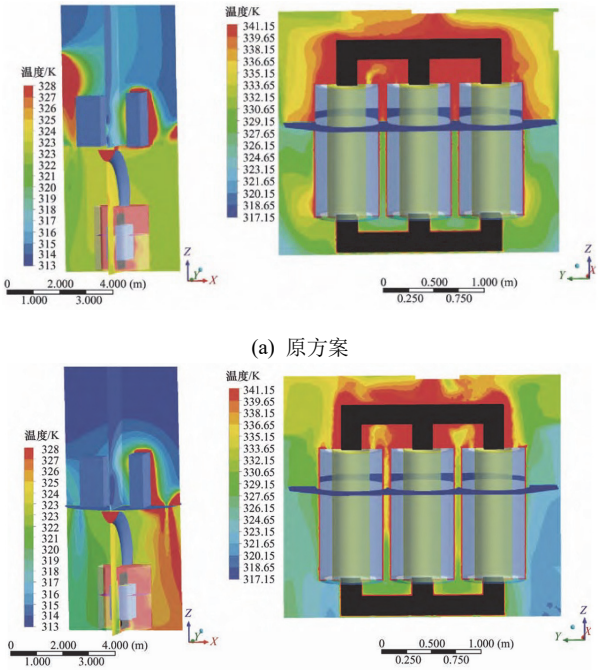
1.3 风电机组材料失火特性研究

在持续加热或遭遇火灾时，风电机组中的可燃物会发生热解和蒸发，释放热量，同时还会产生烟雾及有毒气体。研究材料失火特性，分析其热释放气体组分，有助于指导火灾防控技术的优化与灭火剂的选择。

复合材料、高分子绝缘材料及润滑油脂等在风电机组中应用广泛，而这些材料均属于可燃物，构成了机组内部的火灾载荷。风电机组核心区域材料的燃烧特性如表 4 所示。

在材料特性研究中，常用仪器有锥形量热仪和热重分析仪。对于小规模的火灾试验，锥形量热仪常用来研究材料在真实火灾场景下的燃烧反应特性，包括在固定辐射热通量作用下的加热、鼓泡、蒸发、气化、热解、点火以及炭化等行为。其主要分析指标包括点火时间、热释放速率、质量损失率和烟雾产生率。而热重分析仪常用于使用毫克级样品研究不同加热速率下的材料热分解特性。

对于风电机组内部典型可燃物的热解和燃烧特性研究，文献[44]对风机叶片常用复合材料的基本组分(环氧树脂、热塑性聚氨酯、碳纤维和玻璃纤维)进行热转化性能研究。研究结果得到以上 4 种基本组分的热解产物均含有 CO_2 和 CO，环氧树脂和热塑性聚氨酯在热转化过程中会生成一些芳香物质。文献[45]针对风机叶片的 3 种复合材料体系：玻璃纤维增强树脂(glass fiber reinforced resin，GFRP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate，PET)泡沫夹芯 GFRP 及轻木夹芯 GFRP，进行了热解特性研究。结果表明，当 GFRP 部件在 400 ℃下进行热解时，CH_4、CO 和 CO_2 是其热解气体的主要成分，酚类是热解油中的主要可检测成分；当填充 PET 泡沫时，CO_2是热解气体中的主要



(a) 原方案

(b) 优化方案

图 5 原方案与优化后方案温度云图[43]

Fig.5 Temperature contour maps of the original and optimized plans[43]

表 3 仿真技术参数

Table 3 Simulation technology parameters

文献	研究问题	仿真方法	研究参数/对象
[37]	机舱热生成、热流分配和热平衡问题	Fluent	机舱内外空气温度、速度、舱体表面灰度
[38]	机舱冷却系统的散热效率问题	Fluent	散热器布置方式和散热通道综合设计
[39]	机舱热源分析和简化数值计算以进行散热设计分析	Fluent	机舱内的空气温度场和流体场
[40]	风电机组内部火焰动力学计算分析	FDS	机舱电气柜燃烧后的温度和烟雾演变
[41]	散热器几何与散热射流对机舱风速仪测量结果的影响	CFX	速度廓线、时均速度云图、截面速度云图
[42]	探究外界因素对机舱火灾燃烧、烟气蔓延的影响	FDS	机舱通风开口位置、环境风速和外界环境温度
[43]	塔筒双层通风散热数值模拟研究	Fluent	速度场、温度场

组分，而苯甲酸的含量与热解油中的酚类物质相当；当填充轻木时，可检测到多种烃类物质。文献[46]通过热重分析仪和锥形量热仪，综合评估了风电机舱中典型可燃物(变压器油、液压油、齿轮油和润滑脂)的可燃性危害。结果表明，变压器油最易点燃且热释放率最高，而润滑脂最难点燃但产烟量最大。

随后，该团队又通过测定叶片样本的可燃性水平、阻燃等级和对火反应特性，进一步评估其热和非热危害。采用极限氧指数(limit oxygen index，LOI)、垂直火焰试验(vertical flame test，VFT)和锥形量热仪试验(cone calorimeter test，CCT)等试验技术，对实际含有无碱玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂复合材料的风机叶片样本进行测试。根据 LOI 数据判断叶片可燃性，VFT 数据判断阻燃性，重点基于 CCT 数据，分析热危害(如热释放速率、总释放热等参数)和非热危害(如烟气消光面积、烟气释放速率等参数)相关指标随辐射热通量的变化[47]。通过试验以确定叶片样本的可燃性和无阻燃等级，并阐述叶片燃烧过程中的热和非热危害及其对周边的影响。

值得注意的是，有以下试验设置可供参考，如表 5 和表 6 所示。其中，采用 Janssens 法对典型材料的点火时间进行分析。该方法采用点火时间与辐射热流密度的关系式为：

$$\dot{q}''_{\mathrm{e}}=\dot{q}''_{\mathrm{cr}}\left(1+\frac{0.73\lambda\rho C}{h_{\mathrm{ig}}^{2}t_{\mathrm{ig}}}\right)^{0.55} \tag{1}$$

式中：$\dot{q}''_{\mathrm{e}}$ 为辐射热流密度，kW/m²；$\dot{q}''_{\mathrm{cr}}$ 为点火临界热流密度，kW/m²；h_{ig} 为点火时表面传热系数，kW/(m²·K)；t_{ig} 为点火时间，s；λ 为导热系数；ρ 为密度；C 为比热容；$\lambda\rho C$ 为热惯量，kW²·s/(m⁴·K²)。

试验步骤总结如下：首先，获得材料在液态和半固态的物理特性(密度、沸点、克利夫兰开杯闪点试验)；然后，分析材料的点火时间、热释放速率、质量损失率和烟雾产生率；最后，得到可燃物的有效点火、热性能和热释放量。

1.4 存在问题

改进机舱内部结构设计方面，在温度-流体场的分析上，认为电磁因素也不容忽视。在简化仿真模型中，逐渐引入足尺火灾仿真试验所得参数，从而对仿真模型进行修正。具体对风电机组火灾仿真方面的看法：

1）仿真建模分析火灾发生机制，评估不同场景下的火灾蔓延路径与风险等级。

2）基于历史数据和智能算法技术建立火灾风险预测模型，优化维护策略。

3）缺乏对不同工作条件下的散热结构比较。特别是，海上高湿高盐环境导致散热片积垢，使换热效率年衰减的概率更大。亟需开发自清洁涂层与防腐蚀散热结构。

表 4 风电机组核心区域材料的燃烧特性[44]

Table 4 Combustion characteristics of materials in the core area of wind turbines[44]

部位	典型材料	材料功能	燃烧特性
机舱	润滑油(矿物油/合成油)、液压油、高分子灌封材料(环氧树脂、聚氨酯)、玻璃钢外壳、电缆绝缘(聚氯乙烯、交联聚乙烯)	驱动系统润滑、控制系统冷却、电气绝缘与防护	液体油类具有低闪点，遇高温易燃烧；灌封材料与电缆绝缘层为可燃性有机物，燃烧后释放大量有毒气体(如CO、HCl)及烟雾；壳体复合材料在火灾中持续燃烧且释放焦油状产物
轮毂	高温润滑脂、密封橡胶(三元乙丙橡胶、硅橡胶)	主轴承润滑与密封	虽体积小但为可燃材料，在温度上升时可能助燃或引发局部起火
叶片	玻璃纤维增强树脂、碳纤维增强树脂、结构胶(环氧/聚氨酯)、表面涂层	主承力结构、风能转化、抗老化防腐	树脂为高热值可燃材料，纤维增强体虽难起燃但助燃作用强；整体热释放速率高，叶片一旦被雷击或摩擦引燃，极难扑灭
塔筒底部	电缆(聚烯烃绝缘、聚氯乙烯护套)、变压器油(矿物油/酯类)、灌封材料	电力传输、变压器冷却、底部支撑	电缆绝缘层和护套材料热稳定性差，遇短路易燃；变压器油为强可燃介质，具爆燃潜在风险；灌封材料也属于可燃高分子

表 5 锥形量热仪试验设置

Table 5 Experimental setup of cone calorimeter

设置项	详情
设备型号	锥形量热仪(英国消防测试技术有限公司)
试验参照标准	ISO5660
材料	变压器油、液压油、齿轮油、润滑油
制样方式	材料试样约为 40 mL；样品燃料水平放置于不锈钢改良圆形锅中
辐射热通量	15、25、35、50、75 kW/m²
点火方式	火花点火

表 6 热重分析仪试验设置

Table 6 Experimental setup of thermogravimetric analyzer

设置项	详情
设备型号	Q5000 红外热重分析仪(美国 TA 仪器公司)
试验方式	加热速率以 5 ℃/min、10 ℃/min、20 ℃/min、40 ℃/min 的速率从室温加热至 800 ℃
结果形式	热重(thermogravimetry，TG)-差热重(derivative thermogravimetry，DTG)曲线

风电机组材料失火特性研究方面，现有研究关注风机叶片常用复合材料较多，其次是变压器油、液压油、齿轮油和润滑脂，利用热重分析仪、锥形量热仪等仪器，关注材料的热解气体及浓度。需进一步开展热失控临界点判据研究，基于材料热解动

力学的温度-时间-可燃物浓度模型，开展锥形量热仪试验，量化典型可燃物(环氧树脂、矿物油、PET泡沫)的热释放率特性，确定热失控临界点与火灾监测、预警联动，进行极早期风电机组火灾防控。

2 风电机组消防技术

典型的风电机组消防系统由中央控制模块、现场控制模块和消防执行装置组成，实现火灾监测与联动控制。其中，中央控制模块：主要由远程监控系统构成，负责整体的状态监控与远程控制；现场控制模块：由消防控制器、火灾探测器、声光报警器、紧急控制键等构成，负责接收火灾报警信号，并启动灭火装置；消防执行装置：通常配备含气溶胶或超细干粉等灭火剂的装置，负责实施灭火。系统的具体功能是：火灾报警时，能自动或远程启动视频系统进行火情确认，进而实现实时监控并执行消防联动控制。

2.1 火灾监测与预警技术

一般系统通过传感器和探测器采集风电机组的火灾特征参量（如电气故障信号、特定材料热解组分、烟雾、温度等），基于智能算法和预设报警阈值识别火灾状态，并控制火灾抑制与灭火装置，从而实现火灾的感知、预警和自动处置。

在进行风电机组火灾监测与预警系统的技术设计时，应符合现行国家标准，例如《火灾自动报警系统性能评价》(GB/Z 24978)、《火灾自动报警系统组件兼容性要求》(GB 22134)等规定。我国目前通过自主研究或采标国际标准，已形成若干风机运维相关的国家标准，具体如表 7 所示。随着“数智化”技术的发展，风场涌现出多种智能化巡检设备，包括在线振动监测系统、叶片声纹识别系统、无人机叶片巡检系统、视频监控系统、运行热成像智能系统、螺栓振动检测装置等。现有主流风电机组状态监测预警方法的对比见表 8。

基于风电机组运行环境，WANG 等基于温度、烟雾浓度、CO 气体浓度 3 种传感器的原始数据判断火灾发生概率，利用 RBF 算法测试表明可以高精度预测火灾发生、阴燃和无火灾[48]。ZHANG 等采用故障树分析方法，构建了变压器火灾故障树评估模型。通过计算变压器子系统(变压器本体、绕组、铁芯、套管、分接开关、引线等)火灾概率，确定了复合火灾探测器的测量点数量(绕组和铁芯：8 个；套管：2 个；分接开关：1 个)，并合理安排了测量点的位置，以实时监测变压器的运行状态[49]。

表 7 风机运维相关国家标准

Table 7 National standards related to wind turbine operation and maintenance

标准名称	标准号	涉及内容
风力发电机组噪声测量方法	GB/T 22516—2015，IEC 61400-11:2012	规定了适用于各类陆上及海上风力发电机组(含小型机组)的噪声测量全流程规范(含测点设置、参数采集、数据处理等)
风力发电机组及其组件机械振动测量与评估	GB/T 35854—2018	规定了测量和评估风力发电机组及其组件机械振动的条件和方法，适用额定功率大于200 kW
风力发电机组防雷装置检测技术规范	GB/T 36490—2018	适用于 600 kW 及以上的陆上机组的防雷装置检测，规定了风力发电机组防雷装置的检测程序、检测项目、检测要求、检测方法
风力发电机组运行及维护要求	GB/T 25385—2019	规定了陆上并网型风力发电机组在运行和维护过程中，涉及安全、人员、设备、环境及管理等方面的综合性技术要求
风力发电机组风轮叶片红外热像检测指南	GB/T 37431—2019	规定了风力发电机组风轮叶片红外热像检测的一般原则与方法，适用于风轮叶片生产过程、交付、局部损伤修复、运行维护等阶段的检测
风力发电机组风轮叶片超声波检测方法	GB/T 42592—2023	规定了风力发电机组风轮叶片接触式超声脉冲反射法/穿透法检测的一般要求、检验程序和结果处理
风能发电系统电气特性测量和评估、风力发电机组谐波模型及应用	GB/Z 44528—2024，IEC TR 61400-21-3:2019	聚焦于风力发电机组谐波模型的标准化构建与验证方法，旨在为陆上及海上风电项目的电气基础设施设计、谐波性能评估、滤波器优化等工程应用提供技术指南
风能发电系统风力发电机组功率性能测试的数值场标定方法	GB/Z 44048—2024，IEC TR 61400-12-4:2020	聚焦于复杂地形下风力发电机组功率性能测试的数值场标定方法，通过建立标准化的数值建模流程与验证准则，解决传统场地标定方法成本高、周期长的问题

WAN 等基于 XGBoost 算法和数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition，SCADA)数据构建多参数预测模型，以对不同型号的海上风机进行火灾预警。其中，选取风电机组舱内平均温度、室外平均温度、舱内平均湿度、大气平均湿度 4 项指标，通过计算其预测值与实测值的误差来确定火灾判断阈值。最终，将−3~3 ℃设定为舱内平均温度和室外平均温度的火灾预警阈值；将−6%RH~6%RH(RH 为相对湿度)设定为平均舱室湿度和平均大气湿度的火灾警报阈值。该模型预测

的平均最大似然比为 0.022，平均均方根误差为 1.469[51]。陈俊佑等设计了一种海上风电场火灾自动报警系统，如图 6 所示。其中，由风电机组侧、海上升压站和陆上控制中心侧组成，设计消防联动控制系统用于接收火灾探测系统的报警信号[52]。肖立军等集成了剩余电流传感器、合成器、差电流合成单元及信号处理单元，通过精确监测与识别站用变压器及其出线电缆的剩余电流，可实现对电气火灾隐患的高效探测[53]。邬春明等提出了一种基于 ZigBee 技术的风电机舱火灾预警系统，通过 CC2530 处理器与 GPRS 网络实现远程监控，设计了电子硬件装置和监测软件，试验证明该系统运行稳定、预警准确[54]。刘宏伟针对国产 2 MW 风电机组，为解决高速轴刹车片温度监测问题，探讨了两种方案：一是新增 PT100 传感器监测高速轴刹车片温度；二是新增非接触式红外测温传感器监测高速轴刹盘温度。经过比较，PT100 传感器安装位置相对可靠，不会增加风险点。而方案 2 一旦密封失效，易发生雨水渗透等风险，相对来说故障率高[30]。朱谨益等分析风机火灾情况后提出，光纤测温系统相比常用火灾监测方式，具有高精度、远距离及多点监测、不受环境影响等优势，在风机消防监测中应用潜力显著[55]。

表 8 现有主流风电机组状态监测预警方法比较

Table 8 Comparison of current mainstream wind turbine condition monitoring and early warning methods

监测技术	检测对象	主要优势	局限性	市场价格
在线振动监测系统	齿轮箱、发电机、主轴承	提前数天预警机械故障，误报率<8%，争取维修时间[50]	需固定安装传感器，不适用于低速部件故障	约 1.16~2.24 万元/台
叶片声纹识别系统	叶片裂纹、覆冰、雷击损伤	非接触式，可识别微观裂纹	强风环境下信噪比低	约 3 万元/台
无人机叶片巡检	叶片表面损伤、涂层脱落	全覆盖检测，支持激光雷达三维建模	受天气限制，无法实时预警	约 1 400 元/台
视频监控系统	塔筒倾斜、叶片宏观变形	低成本部署，支持安全防盗	夜间/雾天易失效	约 2.53 万元/台
运行热成像智能系统	电气接头过热、机械摩擦点	预警电气短路、轴承缺油	无法穿透机舱外壳，需外露安装	约 1.35 万元/台
螺栓振动检测装置	塔筒/叶片螺栓预紧力失效	预防结构性松动，降低倒塌风险	仅限关键螺栓点位，覆盖率有限	约 3~50 万元/台

注：市场价格来源于保标招标网、阿里巴巴等网络平台，统计时间为 2025 年 8 月 5 日。

综上所述，深入开展智能化火灾监测与预警系统是未来趋势：(1)开发基于物联网、机器学习和大数据的火灾监测与预警系统，提升异常状态监测精度和报警准确性；(2)引入多传感器融合技术(如温度、烟雾、气体、振动等相关传感器技术)，在多设备增加传感器实现风电机组火灾风险的多维感知。常规火灾探测器及工作原理如表 9 所示；(3)当前技术正从单点监测向“感知—分析—决策”一体化演进，如国际商业机器公司发布的混合可再生能源预测系统整合气象、SCADA 系统、热力数据，提升发电量预测精度 10%[56]。未来需进一步突破多源数据融合瓶颈，推动风电运维从“故障响应”转向“零停机预测”。

2.2 火灾防控技术

对于风场环境火灾控制算法的研究，KIM 提出

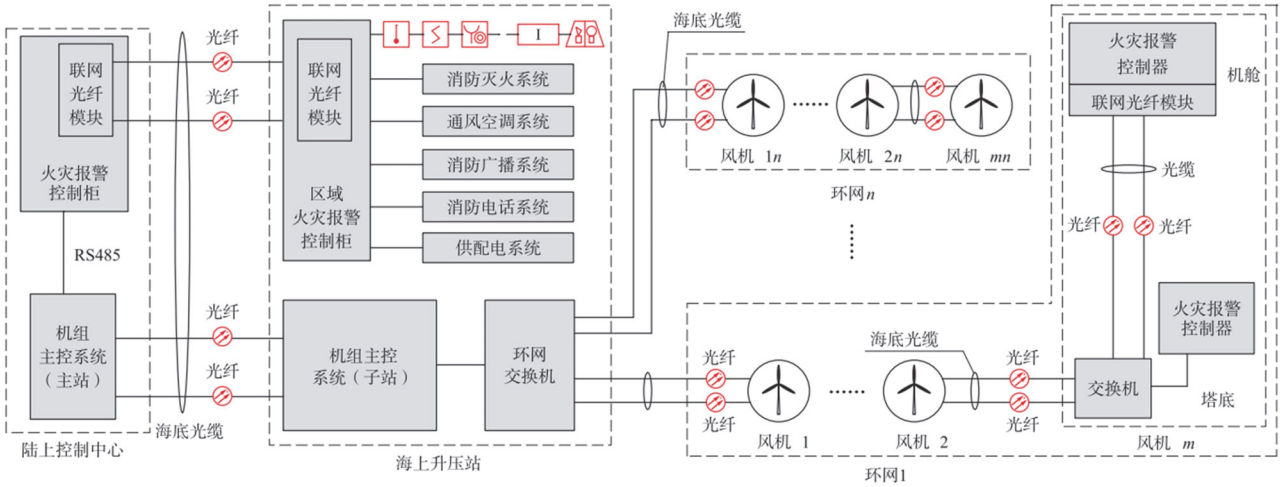


图 6 海上风电场火灾自动报警系统结构图[52]

Fig.6 Structural diagram of automatic fire alarm system for offshore wind farm[52]

表 9 风电机组常用火灾探测器

Table 9 Common fire detectors for wind turbines

探测器类型	工作原理	探测对象	适用范围
红外火焰探测器	通过检测火焰发出的红外光谱(单波段、多波段或紫外/红外组合)	明火(碳氢化合物燃烧、金属火)	远距离(如电线电缆等)
线性探测器	依靠温度变化或光纤传导的信号检测火灾	烟雾颗粒(早期阴燃)	沿线布设，可覆盖大范围(如电线电缆、变压器等)
点型感温探测器	通过探测空气温度变化来触发报警	温度异常	局部点状区域(如机舱、齿轮变速箱等)
吸气式烟雾探测器	利用内置吸气泵将环境空气通过采样管网送入探测器，实时检测烟雾浓度变化	超微烟雾颗粒(极早期火灾)	连续大范围监测，需要全区域预警的场所(电线电缆、开关柜等)
点型感烟探测器	主要基于光散射或离子感应原理，对空气中的烟雾颗粒进行探测(利用单一传感器)	可见烟雾颗粒(明火阶段)	小范围(如齿轮变速箱等含油部件)
多点型感烟探测器	工作原理同上(设备内集成多个感烟探头，分别监测多个固定点)	烟雾+温度/CO(综合判断)	中等范围(如机舱、变压器等)
线性感烟探测器	利用连续传感技术(如光束减光法)沿一条线检测烟雾分布	遮挡红外光束的烟雾(扩散后)	长距离、连续大范围(如电线电缆等)
视频图像火灾探测器	利用普通摄像头采集可见光视频，通过图像处理算法检测火焰、烟雾等特征	明火、烟雾形态	机舱外部、叶片等区域
红外图像火灾探测器	利用红外热成像捕捉温度异常和火焰释放的热辐射	高温热源、热辐射(适用于无烟或低烟火灾)	齿轮箱、发电机、轴承等机械部件
紫外图像火灾探测器	基于火焰释放的紫外辐射进行检测，专注于紫外信号变化	紫外波段火焰信号(适用于短时间内高温燃烧的火灾)	高压电气设备(如变压器、电气控制柜、电缆接头等)
多光谱融合火灾探测器	综合利用可见光、红外、紫外等多种波段信息，通过数据融合提高检测鲁棒性和准确性	结合紫外、红外、可见光等多种光谱特征	机舱内部核心区域(如发电机、电缆等)

了一种优化风机桨距控制的方法以适用于风速较低的地区，其采用模糊推理系统和怀卡托智能分析环境(waikato environment for knowledge analysis，WEKA)的聚类分析技术进行实时风速、风向和温度分析。此外，提出了防止过流引发火灾的控制措施，包括真空断路器、模块化主断路器和局部放电信号分析。为了控制工程成本，风电机组变压器往往内置于塔筒或机舱中，但这也带来发热量增大、散热困难等问题[57]。

对于设计风电机组消防系统，朱坤阳等研发高压细水雾型消防系统为方向，旨在保障人员、设备安全及环保，实现“三无”消防，提升能源生产效率及应用价值[58]。曹学华等设计了一种基于红外传感器的风电机组智能消防系统，通过加设 A/D 转换电路计算药剂用量完成硬件设计，依据风电机组运行原理确定隐患部位并安装传感器与灭火装置，利用红外传感器检测温度与烟雾浓度实现软件设计。试验证明，该系统的平均复燃概率为 13.9%，响应时间仅需 97 ms[59]。宋玉标结合《风力发电机组防火技术规程》及机组机型，计算了超细干粉、热气溶胶灭火装置的使用量，基于 PLC 与 KingSCADA 软件构建了风电机组自动消防系统。通过感温感烟装置采集火情、自动消防控制器获取数据、服务器上位机平台监测，经多个风场测试，该系统运行可靠稳定，可供工程参考[60]。万井江以 Vestas 的 V90 机组为例研发了一种自动消防系统。该系统分析了火灾探测、灭火、消防联动及监控系统，验证了 S 型热气溶胶产品的可靠性及灭火效能，设计了包含感温、感烟、感光探测功能及防雷防窒息措施的自动消防系统，并通过模拟火灾试验验证了其良好的灭火效果。工程应用显示，该系统有效降低了机舱火灾风险，提升了应急能力，减少了周边火灾发生概率[61]。矫宇航等设计了一种自动消防系统方案，并联动试验进行了分析探讨，将自动消防系统方案分为主动式(机舱区域报警)与被动式(机舱独立报警)，前者通过带联动功能的消防控制器联合相关装置以及视频监控系统，后者采用机械式探测器结合火探管装置。两者相比，被动式成本更具优势，主动式则在操控性、安全性上更适配风电机组应用[62]。王万通等在尺寸为 96.0 m×2.0 m×2.5 m 的隧道内进行了火灾试验，分析了移动风机纵向排烟的风量推算方法，并通过 PyroSim 全尺寸模型数值模拟验证。结果表明：无纵向送风时烟气层高度为 0.60~0.64 m；送风工况下，风机出口风量推算准确，烟气逆流距离一致，验证了推算方法的正确性[63]。张晋等提出采用二氧化碳灭火系统保护风电机舱，通过国内首

台风电机组火灾模拟试验装置，验证其在常温和低温状态下的灭火能力。结果表明，该系统适用于狭小复杂空间，且低温下灭火效能不减[64]。然后，该课题组又通过模拟试验，分析了 6 种火灾探测器在风力发电机组中的性能。结果表明：感烟、感温探测器易受通风系统影响；感光型探测器报警快，但易受遮挡；缆式线型感温探测器则适合重点防火部位[65]。汪礼苗等研究了一种由塑料容器、引发器和泡沫灭火剂(主要成分为高聚合度磷酸铵盐、抗溶剂和抗烧剂等)构成的灭火装置，通过搭建风电机舱电缆、控制柜、刹车系统及轮毂四个火灾试验模型，验证了其灭火效果良好。另外，该团队又开展了 1.5 MW 风电机组的灭火试验：在风电机组罩壳(9 m×3.7 m×3.9 m)内放置风机控制柜及若干废旧线缆，分别设置配电柜火、机舱油盘火、机舱木垛火场景。试验表明，该装置可在 11.2 s 内实现灭火[66]。CHEN 等通过构建燃烧面积为 1 m^2 的试验模型，探究了 3 种不同浓度低膨胀的泡沫灭火剂在不同条件下对热油火灾的抑制效果。通过分析不同泡沫产生方式、供给强度、泡沫类型以及火灾条件对灭火效率和火灾发展趋势的影响。试验表明，扑救热油火灾时，使用低膨胀的水成膜泡沫灭火剂或抗醇型水成膜泡沫灭火剂，并配合良好的发泡设备，可有效防止沸溢现象[67]。

2.3 灭火剂及灭火装置

风电机组主流可用灭火剂主要是干粉灭火剂、热气溶胶、七氟丙烷灭火剂、二氧化碳灭火剂[68]，灭火剂比较如表 10 所示。其中，二氧化碳灭火剂是最为适用的，但由于风电机组内部空间狭窄等因素导致其应用受限。

目前，市面上涌现出的其他新型灭火剂中，全氟己酮是一种高效灭火剂，其具有良好的灭弧能力和绝缘性能，适用于风力发电机的机舱、塔架以及控制柜的火灾抑制，其通过破坏燃烧链反应、降低温度来迅速扑灭火源，有效控制火势，并保护关键部件不受损害[69]。刘国强等针对我国停止哈龙灭火剂生产使用、全氟己酮作为替代品的现状，提出了一种探测灭火一体的全氟己酮火灾防控系统，该系统面向变压器室、电气开关柜和电缆沟等场景，经试验证明有效[70]。对于混合灭火剂的应用，杨迎昕等通过试验与 Chemkin 软件数值模拟，探究了不同体积分数的细水雾与 CO_2 对化学当量比条件下 20%H_2/CH_4/空气混合物爆炸的抑制作用及其化学动力学机理。结果表明，细水雾与 CO_2 均能有效抑制火焰结构和爆炸压力，且两者共同作用时抑制效果更佳。细水雾蒸发产生的水蒸气与 CO_2 作为稳定的第三体减缓了爆炸链式反应，而 CO_2 还削弱了甲烷氧化的基元反应并促进了氢自由基的消耗[71]。

表 10 风电机组可用灭火剂比较

Table 10 Comparison of available fire-extinguishing agents for wind turbines

类型	特点	市场价格
干粉灭火剂	通过覆盖燃烧物形成隔离层并析出不可燃气体来降低氧气浓度，但使用后产生粉尘易造成污染、难清理，且腐蚀金属	约 15 元/kg
热气溶胶	通过负催化和破坏燃烧反应链来灭火，但会产生含碳酸盐和金属氧化物的粉尘，且对金属具有腐蚀性	250~3 000 元/kg
七氟丙烷灭火剂	无色、无味、不导电，化学灭火速度快且不产生二次污染，但价格昂贵	50~120 元/kg
二氧化碳灭火剂	通过窒息和部分冷却作用实现物理灭火，灭火后不产生二次污染且价格低廉	50 元/kg

注：市场价格来源于保标招标网、阿里巴巴等网络平台，统计时间为 2025 年 8 月 5 日。

基于灭火剂原理，在风电机组常用的灭火装置如表 11 所示[59-72]。

2.4 消防技术专利

国内较早的风电机组消防技术相关专利是 2011 年德阳东方汉德电力工程有限公司申请的实用新型专利，该专利申请保护的是一种风电机舱火灾自动预警系统。此系统主要是通过烟雾探测器和温度探测器采集信号之后，将信息向系统主机传输以决策是否报警[73]。2023 年，三一重能股份有限公司的一项授权专利中提出了一种风电机组的消防方法。该方法通过监测实时运行数据(风电机组各部件的电流、电压数据)与实时消防数据(各部件温度数据、机组内部烟雾浓度数据、光线强度数据)，经预训练的消防预警系统，可实现较高的预警准确率[74]。李林川等通过模块化设计的方式提出了一种风电机组智能消防系统，集灭火装置布置、火情监测、分析、预警与远程控制方法于一体[75]。其中，灭火装置布置参考环境数据、历史火灾数据和设备功能，通过对机组内部实施实时视频和温度监测以实现火灾防控。刘洋等提出通过可见光—红外图像融合构

表 11 常用灭火装置

Table 11 Common fire-extinguishing devices

类型	工作原理或特点	适用范围	市场价格
悬挂式干粉灭火装置	绝缘性好，可灭电气火灾；灭火速度快	风电机舱内的机械部件区域(齿轮箱、发电机)及塔基设备层	4 kg 的装置价格约 75 元
非贮压式超细干粉灭火器	超细干粉被高温熔化形成玻璃状覆盖层，隔绝空气	叶轮、机舱等	3 kg 的装置价格为 95~990 元
组合固定式热气溶胶灭火装置	由烟感器、温感器、主动式热气溶胶灭火装置、感温探头组成，通过形成气溶胶烟雾(反应产生浓密 N_2、少量的 CO_2、H_2O 等气相成分和碳酸盐、金属氧化物等成分)，充满空间，通过稀释氧气、吸热降温和化学抑制扑灭火焰	叶轮、机舱、电气柜等	QRR5/SL 型 5 kg 的装置价格约 980 元
七氟丙烷灭火装置	利用高效、清洁的七氟丙烷气体灭火剂，通过物理冷却(吸收热能)和化学抑制双重机制灭火	风电机组的电气设备密集区(如主控系统)	2 kg 七氟丙烷灭火器价格约 299 元
全氟己酮灭火装置	全氟己酮属于清洁灭火剂，不导电，灭火后完全蒸发无残留，沸点是 49.2 ℃，常温下为无色、无味的透明液体，通过快速汽化吸热、降低氧浓度灭火	电气柜等	1 kg 手提式全氟己酮灭火装置约 450 元

注：市场价格来源于保标招标网、阿里巴巴等网络平台，统计时间为 2025 年 8 月 5 日。

建特征互补样本集，结合火灾常识图文数据集对 VILA 模型进行参数优化，实现风电机舱异常目标的动态识别定位与火灾预警性能提升[76]。

当前，风电机组消防技术主要包括自动化装备、结构性防火设计以及智能监测预警 3 大领域。然而，针对极早期预警技术的探索，尤其是从火灾机理层面揭示多参量耦合作用规律的研究尚显薄弱。综上所述，亟需强化研发极早期特征的提取技术，其中包括参量间耦合关系的研究以及优化诊断算法的准确性；同时还需提升系统智能化水平，以此增强环境适应性，从而更好应对复杂多变的风场环境和机组内部环境。具体建议如下：(1)针对海上风电场及极端环境的火灾防控需求，开发具备耐腐蚀、防水、抗寒等性能的专用消防设备；(2)建立远程火灾监控与快速响应系统，以缓解因地理位置限制带来的应急处置难题。

3 结论

风电机组因封闭空间特性，火灾蔓延速度快且扑灭难度大。电气故障时的高电压与大电流会产生高能电弧，易引发电气设施重大火灾；且火灾多由电弧作用和过热作用触发，除了严重的瞬发故障外，大部分致火故障都有早期发展阶段，但由于电力设施存在高电压、大电流、强干扰等环境特点，加之设备内部故障具有隐蔽性，早期探测较为困难；机舱内的多数可燃物受热或燃烧后会释放出毒性气体，进一步增加了火灾事件监测与预警的复杂性。

1）加强多因素、多工况耦合作用下风电机组火灾发生的多物理场仿真研究。通过建立高效精准的火灾仿真模型，考虑温度场、流体场、电磁场等之间的耦合关系，探究火灾发生极早期材料、环境的变化特征。基于设备小模型试验和材料样本试验(尤其是在使用针火焰试验的分类方法无法准确表征电弧效应下点火及蔓延特性的情况)对模型参数进行修正。通过研究相关特性、模拟火灾演变过程，为风电机组的内部结构改进、材料选择、防火控制系统设计、灭火剂选择以及灭火装置布局等提供理论依据。

2）提升风电机组极早期的状态监测与故障诊断能力。基于远程多传感器、多参量的融合技术突破风电机组潜在致火故障的风险评估精度；在小样本数据约束下，提升风电机组设备极早期故障隐患识别与主动预警效能。

3）强化风电机组设备或材料的寿命预测能力。基于材料在极端事件和不同工况下的多维数据，加强数据处理，以提升设备或材料绝缘失效分析与预测的能力；提供设备或材料维护、更换的决策能力，从可燃物源头实现风电机组的火灾预防。

4）加强海上风电机组的火灾特性研究。海上风场运行环境特殊，远离陆上消防支援，一旦发生火灾，外部救援力量难以及时有效介入。需深入开展极端海洋环境下的火灾机理研究，以此突破海上风电群的火灾联防联控关键技术。

参考文献 References

[1] Ben Backwell. Global Wind Report 2025[R]. Abu Dhabi, The United Arab Emirates: Global Wind Energy Council (GWEC), 2025.

[2] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2024 年中国风电吊装容量统计简报发布[EB/OL]. 北京：中国可再生能源学会风能专业委员会，2025(2025-08-05)[2025-08-05]. https://www.cweea.com.cn/xwdt/html/39900. html.

Wind Energy Professional Committee of China Renewable Energy Society. 2024 China wind power lifting capacity statistical briefing released[EB/OL]. Beijing, China: Wind Energy Professional Committee of China Renewable Energy Society, 2025(2025-08-05)[2025-08-05]. https://www. cweea. com. cn/xwdt/html/39900. html.

[3] 王绍绍. 逐“绿”前行 能源低碳转型持续推进[EB/OL]. 北京：人民网，2024(2024-11-27)[2024-12-21]. http://finance.people.com.cn/n1/2024/1127/c1004-40370398. html.
WANG Shaoshao. Advancing towards green energy and continuously advancing low carbon transformation[EB/OL]. Beijing, China: People's Daily Online, 2024(2024-11-27)[2024-12-21]. http://finance.people. com. cn/n1/2024/1127/c1004-40370398. html.

[4] 国家能源局. 我国海上风电累计建成并网 3910 万千瓦[EB/OL]. 北京：国家能源局，2024(2024-11-22)[2024-12-21]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1212407828. htm.
National Energy Administration. China’s offshore wind power has accumulated 391 million kilowatts of grid connected construction[EB/OL]. Beijing, China: National Energy Administration, 2024(2024-11-22)[2024-12-21]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1212407828. htm.

[5] 央视网. 超 20 万亿元！“风电+多产业”融合发展 挺近海上风电新蓝海[EB/OL]. 北京：上观新闻，2024(2024-11-17)[2024-12-21]. https://news.cctv.cn/2024/11/17/ARTITozIO0ehYyv0eRyR4zyi241117. shtml.
CNTV. Over 20 trillion yuan! The integrated development of "wind power+multiple industries" supports the new blue ocean of offshore wind power[EB/OL]. Beijing, China: Upward News, 2024(2024-11-17)[2024-12-21]. https://news.cctv.cn/2024/11/17/ARTITozIO0ehYyv0eRyR4zyi241117. shtml.

[6] 刘 昕. 向海图强 中国风电产业扬帆远航[EB/OL]. 北京：国际商报，2024(2024-12-11)[2024-12-21]. http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/202412/11/t20241211_39231394. shtml.
LIU Xin. Towards the sea, we aim to strengthen China’s wind power industry and set sail for the future[EB/OL]. Beijing, China: International Business, 2024(2024-12-11)[2024-12-21]. http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/202412/11/t20241211_39231394. shtml.

[7] LETTMANN A, SESSELMANN J, KAWOHL A. Fire risk assessment of onshore wind turbines[J]. Stahlbau, 2018, 87(1): 10.

[8] Scotland Against Spin. Turbine accident statistics[R]. Scotland: Scotland Against Spin, 2024.

[9] 人民网. 国家林草局国家能源局等联合印发《“林电共安”攻坚战三年行动方案》[EB/OL]. 北京：人民网，2025(2025-06-25)[2025-08-25]. http://finance.people.com.cn/n1/2025/0331/c1004-40450511. html.
People’s Daily Online. The National Forestry and Grassland Administration, National Energy Administration, and others jointly issued the “Three Year Action Plan for the 'Forest and Electricity Safety’ Campaign”[EB/OL]. Beijing, China: People’s Daily Online, 2025(2025-06-25)[2025-08-25]. http://finance.people.com.cn/n1/2025/0331/c1004-40450511. html.

[10] 每日邮报. 南澳大利亚州雷德希尔的风力涡轮机起火：坠落的瓦砾烧焦了 30 公顷的草原，点燃了大火[R]. 澳大利亚：每日邮报，2024.
Daily Mail. Wind turbine catches on fire in Redhill, South Australia: spot fires spark up from falling debris scorching 30 hectares of grassland[R]. Australia: Daily Mail, 2024.

[11] SEBASTIÁN M A, BROCAL F. Analysis of open resources from INSHT for application to university teaching of industrial safety technology[J]. Procedia Engineering, 2015, 132: 228-235.

[12] JAROTA M. Artificial intelligence in the work process. A reflection on the proposed European Union regulations on artificial intelligence from an occupational health and safety perspective[J]. Computer Law & Security Review, 2023, 49: 105825.

[13] PERERA A T D, ZHAO B Y, WANG Z, et al. Optimal design of microgrids to improve wildfire resilience for vulnerable communities at the wildland-urban interface[J]. Applied Energy, 2023, 335: 120744.

[14] OLIVER E, RUDRAPADA G, SARADA S. Recommendations for design basis approach to fire protection and safety systems for US offshore wind industry[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston, USA: OTC, 2023: OTC-32202-MS.

[15] BBC 新闻. 诺福克海岸附近的 Scroby Sands 风力涡轮机火灾自行灭火[R]. 英国：BBC 新闻，2023.
BBC News. Scroby sands wind turbine fire off norfolk coast self extinguishes[R]. UK: BBC News, 2023.

[16] 湖南省可再生能源学会. 警醒！内蒙古公主岭风场“3.14”风机着火事故详细通报！[EB/OL]. 湖南：湖南省可再生能源学会，2022(2024-07-30)[2025-09-25]. https://www.nea.gov.cn/2021-06/18/c_1310015721. htm.
Hunan Renewable Energy Society. Be alert! Detailed report on the “314” fan fire accident at Gongzhuling Wind Farm in Inner Mongolia![EB/OL]. Hunan，China：Hunan Renewable Energy Society，2022(2024-07-30)[2025-09-25]. https://www.nea.gov.cn/2021-06/18/c_1310015721. htm.

[17] 秦皇岛新闻网. 强信心 增动能——高质量发展一线报道|“金风在秦按下绿色发展快进键”系列报道之一 全球最高钢混塔风电项目建设如火如荼[EB/OL]. 秦皇岛：秦皇岛新闻网，2024(2024-05-04)[2024-12-21]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1798085502439535560&wfr=spider&for=pc.
Qinhuangdao News Network. Strengthening confidence and boosting momentum-frontline report on high quality development | one of the series reports on “Goldwind Press the Green Development Fast Forward Button in Qin”: the construction of the world’s tallest steel-concrete tower wind power project is in full swing[EB/OL]. Qinhuangdao, China: Qinhuangdao News Network, 2024(2024-05-04)[2024-12-21]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1798085502439535560&wfr=spider&for=pc.

[18] 新华社. 我国企业自主研制的 18 兆瓦半直驱海上风电机组吊装成功[EB/OL]. 北京：新华社，2024(2024-06-05)[2024-12-21]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1801024458460772428&wfr=spider&for=pc.
Xinhua News Agency. The 18 MW semi direct drive offshore wind turbine unit independently developed by Chinese enterprises has been successfully hoisted[EB/OL]. Beijing, China: Xinhua News Agency, 2024(2024-06-05)[2024-12-21]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1801024458460772428&wfr=spider&for=pc.

[19] 人民日报. 我国首座深远海浮式风电平台将投用[EB/OL]. 北京：人民日报，2024(2023-03-27)[2024-12-21]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-03/27/content_5748418. htm.
People's Daily. China's first deep-sea floating wind power platform will be put into use[EB/OL]. Beijing, China: People’s Daily, 2024(2023-03-27)[2024-12-21]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-03/27/content_5748418. htm.

[20] 彭 振. 新能源风力发电机组消防安全管理研究[J]. 消防界(电子版)，2024，10(12)：7-9.
PENG Zhen. Research on fire safety management of new energy wind turbine units[J]. Fire Protection Industry (Electronic Version), 2024, 10(12): 7-9.

[21] 徐大军，张 晋，刘连喜，等. 风力发电机组火灾特性与消防系统应用研究[J]. 消防科学与技术，2010，29(12)：1081-1083，1086.
XU Dajun, ZHANG Jin, LIU Lianxi, et al. Research on features of fire

and the application of fire protection system on wind turbine[J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(12): 1081-1083, 1086.

[22] WANG Y X, XING H, WU Z H, et al. An overview of fire risk and fire protection solutions for wind turbines[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (EESD 2012). Jilin, China: Trans Tech Publications Ltd, 2012: 500-505.

[23] 邹小洪. 风力发电机组火灾原因分析及管理措施[J]. 红水河，2018，37(5)：37-40.
ZOU Xiaohong. Cause analysis and management measures of wind turbine generator system fire[J]. Hongshui River, 2018, 37(5): 37-40.

[24] 王立刚. 高山林地风电机组火灾原因和防护措施[J]. 黑龙江科学，2022，13(10)：103-105.
WANG Ligang. Fire causes and protection measures of alpine woodland wind turbine[J]. Heilongjiang Science, 2022, 13(10): 103-105.

[25] 赵发明. 风力发电机组火灾事故原因及防范措施[J]. 科技创新与应用，2023，13(22)：112-116.
ZHAO Faming. Causes and preventive measures of wind turbine fire accidents[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(22): 112-116.

[26] 金奇斐. 风力发电机组火灾风险评估与防火策略研究[J]. 消防界(电子版)，2024，10(11)：87-89.
JIN Qifei. Research on fire risk assessment and fire prevention strategies for wind turbine generators[J]. Fire Protection Industry (Electronic Version), 2024, 10(11): 87-89.

[27] 吴小锋. 1.5 MW 风电机组塔筒通风散热系统研究及改造探析[J]. 中国设备工程，2022(19)：16-18.
WU Xiaofeng. Research and renovation of ventilation and heat dissipation system for 1.5 MW wind turbine tower[J]. China Plant Engineering, 2022(19): 16-18.

[28] 中国新闻网. 风机“守护者”：夏季机舱最高达到 70 ℃检修时汗如雨下[EB/OL]. 北京：中国新闻网，2025(2025-07-30)[2025-09-25]. https://www.chinanews.com.cn/sh/shipin/cns-d/2025/06-17/news1023113.shtml.
China News Network. Wind turbine “Guardian”: sweating profusely during maintenance when the cabin reaches a maximum temperature of 70 ℃ in summer[EB/OL]. Beijing, China: China News Network, 2025(2025-07-30)[2025-09-25]. https://www.chinanews.com.cn/sh/shipin/cns-d/2025/06-17/news1023113. shtml.

[29] YOU F, SHAIK S, ROKONUZZAMAN M, et al. Fire risk assessments and fire protection measures for wind turbines: a review[J]. Heliyon, 2023, 9(9): e19664.

[30] 刘宏伟. 国产某机型风电机组实现高速刹车温度监测功能研究[J]. 能源科技，2020，18(4)：64-68.
LIU Hongwei. Study on the realization of high-speed brake temperature monitoring function of a domestic wind turbine[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(4): 64-68.

[31] 白鹏飞. 双馈风电变流器 IGBT 功率模块动态结温计算及寿命预测[D]. 重庆：重庆大学，2018：3-59.
BAI Pengfei. Dynamic junction temperature calculation and life prediction of IGBT power module for doubly-fed wind power converters[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018: 3-59.

[32] GAO Y, XU Z M, ZHAI E D, et al. Cooling pitch cabinets in wind turbines using a pulsating heat pipe: a case study[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 50: 103461.

[33] 防雷李工. 海上风电项目 直击雷防护[EB/OL]. 河南：搜狐网，2025(2025-08-05)[2025-08-05]. https://news.sohu.com/a/915071420_121984437.
Lightning Protection Worker Li. Direct lightning protection for offshore wind power projects[EB/OL]. Henan, China: Sohu website, 2025(2025-08-05)[2025-08-05]. https://news.sohu.com/a/915071420_121984437.

[34] LI W L, LIU X K, LI D, et al. Thermal analysis of direct-drive offshore permanent magnet synchronous generator with peak–valley heat sinks[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025, 81: 104365.

[35] 韩 飞，杨 斌. 高压变频器散热系统设计分析[J]. 山东工业技术，2017(3)：252.
HAN Fei, YANG Bin. Design and analysis of heat dissipation system for high voltage inverter[J]. Shandong Industrial Technology, 2017(3): 252.

[36] 胡钰骁，李江涛，张文娇，等. 柔性高压直流双极带金属回线系统电缆电磁暂态建模与极线故障特性[J]. 高电压技术，2025，51(10)：5003-5013.
HU Yuxiao, LI Jiangtao, ZHANG Wenjiao, et al. Electromagnetic transient modeling and pole-to-ground fault characteristics of cables in VSC-HVDC bipolar system with metallic return[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5003-5013.

[37] 周年勇，蒋彦龙，刘志丽，等. 3 MW 海上风力发电机机舱热平衡设计[J]. 世界科技研究与发展，2011，33(5)：854-857.
ZHOU Nianyong, JIANG Yanlong, LIU Zhili, et al. Heat balance research on 3 MW marine wind turbine’s engine room[J]. World Sci-Tech R & D, 2011, 33(5): 854-857.

[38] 刘海涛，章双全，王海龙. 海上双馈机组的散热布置优化研究[J]. 机电工程，2014，31(5)：634-638.
LIU Haitao, ZHANG Shuangquan, WANG Hailong. Cooling layout optimization of offshore double-fed wind turbine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(5): 634-638.

[39] 陈成城，程晨光，吴根勇，等. 数值仿真技术在风力发电机机舱散热设计中的应用研究[J]. 机电工程，2016，33(4)：430-433，457.
CHEN Chengcheng, CHENG Chenguang, WU Genyong, et al. Application of numerical simulation in thermal design of wind turbine nacelle[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(4): 430-433, 457.

[40] RENGEL B, PASTOR E, HERMIDA D, et al. Computational analysis of fire dynamics inside a wind turbine[J]. Fire Technology, 2017, 53(5): 1933-1942.

[41] 吴根勇，陈成城，王晓东，等. 散热孔射流对机舱风速影响的数值模拟[J]. 太阳能学报，2020，41(6)：41-46.
WU Genyong, CHEN Chengcheng, WANG Xiaodong, et al. Numerical investigations of influence of heat dissipation hole jet on nacelle wind speed[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(6): 41-46.

[42] 焦 宇，陈 冉，陈晓晓，等. 通风工况下风力发电机舱火灾场景特性模拟[J]. 安全与环境工程，2022，29(4)：255-264，272.
JIAO Yu, CHEN Ran, CHEN Xiaoxiao, et al. Simulation on fire field characteristics of the wind turbine cabin under ventilation conditions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 255-264, 272.

[43] 端和平，姜婷婷，罗勇水，等. 基于 CFD 的风电机组塔筒通风散热数值模拟及优化分析[J]. 电气工程学报，2022，17(1)：122-128.
DUAN Heping, JIANG Tingting, LUO Yongshui, et al. Numerical simulation and optimization analysis of wind turbine tower ventilation and heat dissipation based on CFD[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(1): 122-128.

[44] GE L C, JIANG H, FENG H C, et al. Study on the thermal transformation of basic components of wind turbine blade[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2023, 18(5): e2938.

[45] XU M X, JI H W, MENG X X, et al. Effects of core materials on the

evolution of products during the pyrolysis of end-of-life wind turbine blades[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 175: 106222.

[46] WANG Z H, YOU F, REIN G, et al. Flammability hazards of typical fuels used in wind turbine nacelle[J]. Fire and Materials, 2018, 42(7): 770-781.

[47] WANG N, CHENG Z Y, YOU F, et al. Thermal and non-thermal fire hazard characteristics of wind turbine blades[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, 149(18): 10335-10351.

[48] WANG C T, YUAN T C, SUN X T. Fire detection and identification of wind turbines based on information fusion[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology. [S.l.]: Atlantis Press, 2015: 860-864.

[49] ZHANG F Q, YANG Z R, LI T, et al. Research on the early warning method of transformer fire fault in ocean booster station based on fault tree model[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 252: 02044.

[50] 潘丛虎，李建东. 风电机组振动监测与故障诊断技术研究[J]. 电力设备管理，2025(3)：109-111.
PAN Conghu, LI Jiandong. Research on vibration monitoring and fault diagnosis technology for wind turbine units[J]. Electric Power Equipment Management, 2025(3): 109-111.

[51] WAN A P, DU C Y, GONG W B, et al. Using transfer learning and XGBoost for early detection of fires in offshore wind turbine units[J]. Energies, 2024, 17(10): 2330.

[52] 陈俊佑，姚春羽. 海上风电场火灾自动报警系统设计[J]. 建筑电气，2021，40(2)：27-31.
CHEN Junyou, YAO Chunyu. Design of automatic fire alarm system for offshore wind farm[J]. Building Electricity, 2021, 40(2): 27-31.

[53] 肖立军，莫　凡. 站用变压器电气火灾预警系统[J]. 新技术新工艺，2021(10)：77-79.
XIAO Lijun, MO Fan. Electrical fire early warning system for station transformers[J]. New Technology & New Process, 2021(10): 77-79.

[54] 邬春明，杨　涛，张金强. 基于 ZigBee 的风电机舱火灾预警系统设计[J]. 电子器件，2016，39(1)：216-221.
WU Chunming, YANG Tao, ZHANG Jinqiang. The fire alarm system of wind turbine engine room based on zig bee[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(1): 216-221.

[55] 朱谨益，蒋冒闰，廖永强. 光纤测温系统在风力发电机组中的应用研究[J]. 四川水力发电，2022，41(1)：24-26，42.
ZHU Jinyi, JIANG Maorun, LIAO Yongqiang. Research on application of optical fiber temperature measurement system in wind turbine generators[J]. Sichuan Water Power, 2022, 41(1): 24-26, 42.

[56] SAPRA Y. BI for renewable energy: optimizing solar and wind farm operations in 2025[R]. Gurugram, India: IBM, 2025.

[57] KIM J H, PARK S H, PARK S J, et al. Wind turbine fire prevention system using fuzzy rules and WEKA data mining cluster analysis[J]. Energies, 2023, 16(13): 5176.

[58] 朱坤阳，曹　健. 海上风电机组新型消防系统应用研究[J]. 消防界(电子版)，2023，9(21)：37-39.
ZHU Kunyang, CAO Jian. Research on the application of new fire protection system for offshore wind turbine units[J]. Fire Protection Industry (Electronic Version), 2023, 9(21): 37-39.

[59] 曹学华，张建辉，杨月波. 基于红外传感器的风电机组智能消防系统设计[J]. 电子设计工程，2024，32(13)：167-171.
CAO Xuehua, ZHANG Jianhui, YANG Yuebo. Design of intelligent fire protection system for wind turbine based on infrared sensor[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(13): 167-171.

[60] 宋玉标，范福林，仲川平，等. 基于 PLC 与 King SCADA 风电机组自动消防系统设计[J]. 机械工程师，2023(1)：73-76，80.
SONG Yubiao, FAN Fulin, ZHONG Chuanping, et al. Design of wind turbine automatic fire fighting system based on PLC and King SCADA[J]. Mechanical Engineer, 2023(1): 73-76, 80.

[61] 万井江. V90 风电机组自动消防系统研究与应用[D]. 广州：华南理工大学，2017：5-79.
WAN Jingjiang. A research and application on V90 wind turbine automatic fire protection[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2017: 5-79.

[62] 矫宇航，王雪丽，王　鹏. 风电机组自动消防系统设计及联动试验研究[J]. 今日消防，2023，8(12)：29-31.
JIAO Yuhang, WANG Xueli, WANG Peng. Research on the design and linkage test of automatic fire protection system for wind turbines[J]. Fire Protection Today, 2023, 8(12): 29-31.

[63] 王万通，赵荣煊，郭赞权. 基于试验与模拟的隧道火灾移动风机应用研究[J]. 消防科学与技术，2023，42(1)：18-22.
WANG Wantong, ZHAO Rongxuan, GUO Zanquan. Application research of tunnel fire mobile fan based on experiment and simulation[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(1): 18-22.

[64] 张　晋，徐大军，田　亮，等. 二氧化碳灭火系统扑灭风电机组舱内火灾试验研究[J]. 中国安全科学学报，2015，25(3)：41-46.
ZHANG Jin, XU Dajun, TIAN Liang, et al. Experimental study on suppression of wind turbine fires with carbon dioxide extinguishing system[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(3): 41-46.

[65] 张　晋，徐大军，薛　岗，等. 火灾探测器在风力发电机组的性能试验研究[J]. 消防科学与技术，2015，34(12)：1634-1637.
ZHANG Jin, XU Dajun, XUE Gang, et al. Experimental study on the usage of fire detector in wind generating set[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(12): 1634-1637.

[66] 汪礼苗，陈琳光，汪杨天骄. 新型泡沫灭火装置在风电机组中的应用[J]. 消防科学与技术，2013，32(1)：52-55.
WANG Limiao, CHEN Linguang, WANG Yangtianjiao. The application of new foam fire extinguishing device in wind turbine generator system[J]. Fire Science and Technology, 2013, 32(1): 52-55.

[67] CHEN T, ZHANG P, WANG D Z, et al. Research on suppression effect of low-expansion AFFF, AFFF/AR and FFFP foam on hot oil fire for oil-immersed transformers[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 43: 101991.

[68] 谢　晔. 气体灭火设备应用于风力发电机舱中的测试方法探讨[J]. 产业与科技论坛，2022，21(1)：36-37.
XIE Ye. Exploration of testing methods for gas fire extinguishing equipment applied in wind turbine nacelles[J]. Industrial & Science Tribune, 2022, 21(1): 36-37.

[69] 猛犸全氟己酮灭火装置. 全氟己酮灭火装置在风力发电中的应用[EB/OL]. 山东：猛犸全氟己酮灭火装置，2024(2024-10-30)[2024-12-21]. https://www.163.com/dy/article/JFOBDALA0553Y9JT.html.
Mammoth Perfluorohexane Fire Extinguishing Device. Application of perfluorohexane fire extinguishing device in wind power generation[EB/OL]. Shandong, China: Mammoth Perfluorohexane Fire Extinguishing Device, 2024(2024-10-30)[2024-12-21]. https://www.163. com/dy/article/JFOBDALA0553Y9JT. html.

[70] 刘国强，李贵海，赵志鹏，等. 全氟己酮灭火剂在输变电系统火灾防控中的应用[J]. 山东电力技术，2022，49(1)：36-40.
LIU Guoqiang, LI Guihai, ZHAO Zhipeng, et al. Application of perfluorohexanone fire extinguishing agent in fire prevention and control of power transmission and transformation system[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(1): 36-40.

[71] 杨迎昕，焦一飞，曾文慧，等. CO_2 和细水雾对地下变电站变压器火灾抑制作用研究[J]. 四川电力技术，2024，47(3)：87-94.

YANG Yingxin, JIAO Yifei, ZENG Wenhui, et al. Research on suppression effect of CO_2 and water mist on transformer fire in underground substation[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2024, 47(3): 87-94.

[72] 吴　刚，张日红，石吁波，等. 新型气体灭火剂七氟丙烷的性能及其应用研究[J]. 消防界(电子版)，2024，10(17)：38-40.
WU Gang, ZHANG Rihong, SHI Yubo, et al. Research on the performance and application of a new gas fire extinguishing agent heptafluoropropane[J]. Fire Protection Industry (Electronic Version), 2024, 10(17): 38-40.

[73] 张仁勇. 风电机舱火灾自动预警系统：CN202075831U[P]. 2011-12-14.
ZHANG Renyong. Automatic fire early warning system of wind power cabin: CN202075831U[P]. 2011-12-14.

[74] 常志坤，彭坤丽，姜海苹. 风电机组消防方法、装置、存储介质和消防控制台：CN111079855B[P]. 2023-08-11.
CHANG Zhikun, PENG Kunli, JIANG Haiping. Wind turbine generator fire-fighting method and device, storage medium and fire-fighting console: CN111079855B[P]. 2023-08-11.

[75] 李林川，赵　陈，黄　莹，等. 一种用于风电机组的智能消防系统：CN119327072A[P]. 2025-01-21.
LI Linchuan, ZHAO Chen, HUANG Ying, et al. Intelligent fire extinguishing system for wind turbine generator: CN119327072A[P]. 2025-01-21.

[76] 刘　洋，朱　珉，张潮海，等. 多模态大模型融合多光谱图像的风电机舱火灾预警方法：CN119478367B[P]. 2025-09-19.
LIU Yang, ZHU Min, ZHANG Chaohai, et al. Wind power cabin fire early warning method based on multi-modal large model fused with multi-spectral image: CN119478367B[P]. 2025-09-19.



黄道春
1976—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为特殊环境条件下高压输变电设备绝缘失效机理与风险评估、高压输变电设备状态智能感知与智能运维等
E-mail: huangdc99@163.com

HUANG Daochun
Ph.D., Professor



钟广林(通信作者)
1997—，男，博士生
研究方向为高压电力设备的状态监测与故障诊断
E-mail: gino97@163.com

ZHONG Guanglin
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2025-07-01　在线出版日期　2025-10-28　　编辑　陈　蔓