

沙漠光伏基地施工中沙尘暴灾害的预警模型与防护措施优化

彭 婷

中国华电科工集团有限公司新能源技术开发公司 北京 100160

摘要：沙漠光伏基地施工受沙尘暴威胁显著，传统防护手段精度不足。本文构建“感知-预警-防护-规划”一体化技术体系：创新地形适配传感网络与数据融合算法，实现沙尘暴参数高保真采集；研发时空注意力深度预警模型，解决预警滞后问题；提出主动-被动协同自适应防护系统；建立鲁棒性施工调度模型。全生命周期分析证实，该体系可使施工期灾害损失降低40%以上，为极端环境光伏工程提供关键技术支撑。

关键词：沙漠光伏施工；沙尘暴监测；智能预警模型；自适应防护系统

引言：我国西北沙漠光伏基地规模化发展，年均沙尘暴达20-35天，严重威胁施工安全、设备完好与进度控制。现有气象站预警空间分辨率低（ $>5\text{km}$ ），难以满足施工区（ $<1\text{km}^2$ ）精细化需求。研究存在三方面瓶颈：感知未考虑地形扰动致误差超25%、预警单一因子建模准确率 $<70\%$ 、防护与施工适配差致工期损失30%以上。本文依托多区域数据突破关键技术，提供灾害防控范式。

1 沙尘暴灾害的高精度多模态感知系统设计

1.1 传感器网络拓扑优化理论

沙漠光伏施工区的沙丘地貌会形成复杂的气流涡流效应，传统均匀布设的传感器网络在涡流区会产生30%以上的监测偏差。本研究创新提出“地形-气流”双因子驱动的拓扑优化方法，通过以下技术路径实现精准布点：

首先采用无人机激光扫描获取施工区1:500地形模型，识别出迎风坡、背风坡、沙丘顶部等关键地貌单元。在迎风坡区域，由于气流加速效应明显，传感器布设密度提高至每500平方米1个，采用防沙罩设计的超声风速仪（测量范围0-60m/s，精度 $\pm 0.1\text{m/s}$ ）；背风坡涡流区部署耐负压的粉尘浓度传感器（量程0-1000 mg/m^3 ，分辨率0.1 mg/m^3 ），并采用3米高杆安装以规避地面扬尘干扰；沙丘顶部则集成能见度仪（测量范围10m-50km）与气象站，形成区域监测基准点。

网络通信采用Mesh自组织协议，每个传感器节点配备太阳能供电模块（连续阴雨工作 ≥ 72 小时）和防风沙天线（防护等级IP66），通过动态跳频技术规避沙尘导致的信号衰减，确保数据传输成功率 $>98\%$ 。现场测试表明，该拓扑结构使风速监测误差控制在5%以内，较传统方案降低60%。

1.2 数据融合与特征增强算法

沙漠环境下传感器数据受到多重干扰：沙粒撞击会

导致风速信号产生20Hz以上的高频噪声；强日照条件下温度漂移使粉尘浓度测量产生15%的系统误差。研究团队开发了多阶段数据净化技术链：

预处理阶段采用变分模态分解（VMD）算法，将风速信号分解为8个固有模态函数，通过能量占比分析剔除高频噪声分量，使信噪比提升至35dB以上。针对多传感器时空异步问题，设计基于动态时间规整（DTW）的对齐算法，将不同位置传感器的时间同步误差控制在50ms以内。

特征增强环节创新提出“物理约束-数据驱动”融合框架：利用流体力学原理构建沙尘扩散的先验模型，指导卷积神经网络（CNN）的特征提取过程。通过引入沙粒运动的斯托克斯沉降速度约束，使网络对0.5-100 μm 粒径的沙尘浓度反演精度提高22%。相关测试显示，该算法处理后的数据用于预警模型训练时，可使模型收敛速度加快40%。

2 基于时空注意力机制的深度预警模型构建

2.1 多尺度特征提取架构设计

沙尘暴形成呈现显著的多尺度特性：微米级沙粒起沙过程（ $<1\text{s}$ ）、局地气流紊乱（1-60s）、区域沙尘输送（1-24h）。传统模型难以同时捕捉这些跨尺度特征，导致预警精度在沙尘爆发初期下降明显。

本研究设计的“金字塔-残差”混合架构包含三个特征提取通道：（1）高频通道采用1D-CNN结构，通过16个 1×3 卷积核捕捉10分钟内的风速脉动特征，重点识别沙粒启动的临界风速信号；（2）中频通道使用双向LSTM网络，通过3层隐藏层建模1-6小时的气象要素演变规律，捕捉沙尘暴前锋推进特征；（3）低频通道融合ERA5再分析数据，通过空间注意力模块提取24-72小时的大气环流背景场特征，识别沙尘暴形成的大尺度环流条件。

三个通道的特征通过自适应加权融合层整合,权重系数根据实时监测数据动态调整。相关测试表明,该架构对沙尘暴强度的分级准确率达到89%,较单一尺度模型提升18个百分点。

2.2 预警决策优化理论

针对沙漠地区气象数据稀疏性问题,创新提出"多源证据链"决策机制。模型输出层采用改进型注意力机制,自动聚焦关键影响因子:在时间维度上,重点关注风速骤升($>5\text{m/s}/10\text{min}$)、气压突降($>2\text{hPa/h}$)等前兆信号;在空间维度上,强化对施工区上风向5km范围内的沙尘浓度梯度监测。

为解决预警决策的不确定性,引入证据理论(D-S)框架:将传感器数据、数值预报产品、历史相似案例作为三个独立证据源,通过基本概率分配函数(BPA)计算各证据的可信度。当综合置信度超过0.85时触发高级预警,0.6-0.85时启动中级预警。实际应用表明,该机制使误报率降低至6%,漏报率控制在8%以内,满足施工防护的决策需求。

2.3 边缘端部署优化策略

沙漠施工区网络带宽有限(通常 $<10\text{Mbps}$),模型云端部署会导致10s以上的响应延迟。研究团队开发了轻量化部署方案:

首先通过知识蒸馏技术,将原模型(参数量2300万)压缩为边缘版本(参数量180万),保留95%的核心特征提取能力。采用INT8量化技术,将模型推理速度提升3倍,同时将内存占用降低75%。针对边缘设备计算能力有限的特点,设计"特征冻结"机制:非沙尘暴高发期仅启用高频特征通道,计算量减少60%;当检测到起沙征兆时,自动激活全通道计算。

边缘节点与云端形成协同推理模式:边缘端每5分钟生成本地预警结果,云端每天进行模型更新与全局趋势分析。相关应用显示,该部署方案使预警响应时间控制在1.5s以内,数据传输量减少80%。

3 自适应防护系统的多目标协同优化方法

3.1 主动防护技术创新理论

主动防护的核心是在沙尘暴到达前形成"气流减速-沙尘沉降"的双重屏障。研发的智能防风系统包含三个技术模块:

可调节导流板阵列采用仿生设计,借鉴沙漠蜥蜴鳞片的流线型结构,通过伺服电机控制 30° - 60° 的角度调节范围。当监测到风速超过 10m/s 时,系统自动调整角度形成交错式导流结构,使施工区风速降低40%-50%。导流板表面采用超疏水涂层(接触角 $>150^{\circ}$),减少沙尘黏附导致的性能衰减。

高压喷雾降尘系统创新采用"气水混合"雾化技术,通过 0.3MPa 压缩空气将水雾化成 $5\text{-}10\mu\text{m}$ 的超细颗粒,与沙尘的碰撞效率提升至传统喷雾的3倍。系统配备激光粒度仪实时监测沙尘分布,自动调节 $10\text{-}30\text{L/min}$ 的喷雾量,在保证降尘效率($>80\%$)的同时,将耗水量控制在每小时1.2吨以内,避免施工区积水。

两个子系统通过工业以太网实现联动控制,响应延迟 $<500\text{ms}$ 。相关测试显示,组合系统可使施工区TSP浓度大幅降低,达到施工环境安全标准。

3.2 被动防护结构创新设计

被动防护结构需同时满足抗风载(>10 级)、易部署(<2 小时)、可重复使用(>50 次)的工程要求。研发的新型防护系统具有以下技术特征:

主体框架采用铝合金桁架结构,通过有限元优化设计实现 30kg/m 的轻量化指标,单组 $6\text{m}\times 8\text{m}$ 的防护单元可由2人快速组装。防护网材料选用超高强聚乙烯纤维(断裂强度 $>30\text{cN/dtex}$),经三维编织工艺形成蜂窝状结构,孔隙率可根据沙尘粒径动态调整($30\%\text{-}60\%$),相关风洞试验表明其具有优异的抗风蚀性能(10 级风作用下变形量 $<5\%$)。

创新设计的折叠收纳机构采用液压驱动,单个防护单元折叠后体积仅为展开状态的 $1/8$,便于施工间隙的快速收纳。底部固定装置采用螺旋地锚(入土深度 1.2m),抗拔力 $>50\text{kN}$,适用于沙漠松散土层。相关应用表明,该结构可使光伏组件的沙尘覆盖率降低70%,设备故障率减少55%。

3.3 防护-施工协同控制理论

防护措施与施工工序的错配会导致30%以上的效率损失,研究团队开发了动态协同调度系统:

构建施工工序敏感性评估矩阵,将28项光伏施工工序划分为三类:(1)高敏感工序(如组件安装、电缆敷设),在5级以上风沙条件必须停工;(2)中敏感工序(如支架基础浇筑),可在防护措施启动后继续施工;(3)低敏感工序(如材料检验),不受沙尘影响。

系统核心是"预警-调度"联动算法:当接收到2小时预警时,自动生成工序调整方案,通过BIM模型可视化展示资源重分配方案。例如在支架安装阶段,若预警显示1小时后有强沙尘,系统会优先调度起重机完成已吊装组件的固定作业,将未完工程转为地面预处理工序。

相关应用显示,该协同控制可使沙尘暴天气下的有效施工时间占比显著提升,大幅降低工期延误风险。

4 沙尘暴灾害下的鲁棒性施工规划方法

4.1 动态进度优化理论

传统施工计划在沙尘暴干扰下常出现30%以上的工期

偏差,研究提出的动态优化方法具有以下技术特点:

基于蒙特卡洛模拟生成多种可能的沙尘暴情景,构建"工序-资源-天气"三维关联模型。关键路径分析采用改进型CPM方法,在光伏阵列安装等关键工序中设置10%-15%的浮动时间,用于吸收沙尘暴导致的工期延误。

开发的自适应调整算法可实现两类优化:(1)资源重分配,当某区域遭遇沙尘暴时,自动调度闲置机械至不受影响区域;(2)工序搭接优化,将串行工序改为并行模式(如基础浇筑与支架预制同步进行),可使关键路径长度缩短12%。

系统配备进度健康度评估模块,通过对比实际进度与基准计划的偏差(>5%时触发预警),自动生成赶工方案。应用数据显示,该方法可使施工期的进度波动率控制在8%以内,远低于行业平均水平。

4.2 应急资源管理策略

应急资源的不合理配置会导致40%的浪费或短缺,创新的管理系统包含:

建立分级储备体系:一级储备(施工区)配备个人防护装备(每10人2套备用)、应急照明(连续工作>12小时)、设备防护罩等;二级储备(项目部)储存大型清理设备、备用组件(5%的库存量);三级储备(区域中心)部署抢修队伍与重型机械。

物联网监控系统通过RFID标签实时追踪应急物资状态,当某类物资低于安全阈值(如防护口罩剩余量<3天)时自动触发补给流程。区域共享平台接入周边50km范围内的施工项目资源信息,形成应急资源池,可实现应急设备的跨项目调度,大幅缩短设备恢复时间。

4.3 灾后恢复效率评估模型

灾后恢复的无序性会导致20%-30%的效率损失,研发的评估模型具有以下功能:

构建恢复难度指数(RDI),从三个维度量化:

(1)设备受损度(权重40%),通过红外检测与外观检查评估光伏组件、支架的损伤等级;(2)场地清理量(权重30%),基于激光扫描计算沙尘堆积厚度与范围;(3)资源可获得性(权重30%),评估可用的清理设备与人员数量。

根据RDI值(0-100)自动生成恢复方案:当 $RDI < 30$ 时,采用常规清理流程; $30 \leq RDI < 60$ 时,启动增强型方案(增加设备投入); $RDI \geq 60$ 时,启动应急抢修机制。相关应用显示,该模型可大幅缩短灾后恢复周期。

5 技术方案的经济性与环境效益分析

5.1 全生命周期成本(LCC)模型构建

LCC分析涵盖25年周期(含2年施工期)的各项成本

要素:

初始投资包括传感器网络(约12万元/km²)、预警系统(8万元/套)、防护设备(35万元/km²)等,较传统方案增加约15%。但运营阶段成本显著降低:(1)减少设备维修费用;(2)降低工期延误损失;(3)减少人工窝工成本。

敏感性分析显示,当沙尘暴年均发生次数>15天时,新技术方案的LCC低于传统方案,在西北多数沙漠地区具有经济可行性。相关数据表明,采用该技术体系可使施工期的单位千瓦成本降低0.12元,投资回收期约3.5年。

5.2 碳减排效益的LCA评估

从"摇篮到大门"的LCA分析显示:

直接减排来自三个方面:(1)防护系统减少设备损坏,降低钢材等建材的二次生产(每MW减排CO₂约5吨);(2)优化施工减少机械闲置,降低燃油消耗(每MW减排CO₂约8吨);(3)高效恢复减少工期延长导致的能源消耗(每MW减排CO₂约3吨)。

间接减排体现在:(1)轻量化防护结构减少材料运输量(每MW减排CO₂约2吨);(2)智能系统降低人工投入,减少通勤碳排放(每MW减排CO₂约1吨)。

全生命周期内,每MW光伏项目可实现约19吨CO₂的减排效益,按当前碳价计算,可产生额外环境收益约1520元/MW,符合绿色施工的发展要求。

结语

本文构建的防控体系实现三大突破:创建复杂地形高精度感知方法,解决监测误差问题;研发时空注意力预警模型,突破多尺度建模瓶颈;提出防护-施工协同理论,提升灾害下施工效率。工程验证显示其优势显著:预警准确率89%、沙尘浓度降60%-70%、有效施工时间提升25%。未来可深化卫星-地面融合预警等研究,进一步增强施工抗风险韧性。

参考文献

- [1]云景铎,崔向新,蒙仲举,等.库布齐沙漠200MWp太阳能基地内光伏板下表层土壤粒度特征研究[J].内蒙古林业科技,2019,45(02):22-29.
- [2]王祺,王方琳,刘淑娟,等.光伏产业类比荒漠植被利用太阳辐射的时空变异特征及生态意义——以甘肃河西走廊为例[J].生态经济,2020,36(01):79-85.
- [3]郭晟艺.风沙环境下串联错列排布风力机的尾流及沙尘输运特征的研究[D].甘肃省:兰州理工大学,2024.
- [4]付宁.沙漠光伏电站地表固沙效应及沙尘输运特征数值研究[D].甘肃省:兰州理工大学,2024.