

极端气候下输电线路防风偏技术创新与应用

李林选 祁志平

摘要：极端气候条件下输电线路风偏问题已成为制约电网安全稳定运行的关键技术难题。本文以气动力学、结构动力学及智能监测理论为基础，系统分析极端气候特征对输电线路风致响应的作用机理，重点研究基于气动减阻原理的导线防风构件结构优化、复合高强轻质材料的应用性能及多层减振阻尼与可调刚度连接结构的创新设计，同时探讨物联网传感监测、人工智能识别与大数据评估技术在防风偏体系中的集成应用。研究结果表明，防风偏技术的创新融合可显著提升输电线路的抗风稳定性与智能防护水平，为构建高可靠、高韧性输电系统提供理论支撑与工程路径。

关键词：极端气候；输电线路；防风偏技术

引言

随着气候变化引发极端天气事件的频发，强风、台风、冰冻与沙尘暴等复杂环境对高压输电线路的安全运行构成严重威胁，导致结构风偏、导线碰撞及塔体疲劳等工程问题日益突出。传统防风措施多依赖经验设计与静态防护，难以适应极端气候下多源荷载的动态变化。防风偏技术创新应从气动优化、结构控制与智能感知等多维方向入手，通过多学科交叉融合构建主动防护与动态响应的系统框架。

1. 极端气候特征及其对输电线路的作用机理

极端气候特征及其对输电线路的作用机理研究是防风偏技术创新的理论基础，其核心在于揭示强风、冰冻、台风、沙尘暴及极端温差等气候因素对输电线路结构力学性能与运行稳定性的耦合作用规律。极端气候条件下，风场分布具有高度非均匀性与瞬变特征，强对流气流及湍流脉动引起导线横向振动、线间碰撞及塔体结构周期性应力集中，导致疲劳累积损伤与结构变形；当风速超过临界气动稳定阈值时，导线及金具在涡激振动、驰振与颤振耦合作用下易发生大幅度风偏，形成电气安全间距不足及机械拉力失衡等隐患。冰冻气候条件下，覆冰荷载与风荷载的叠加效应显著放大导线受力不均与塔体横向弯矩，造成结构应力突变与材料脆化破坏；台风环境中高湿度与突变风向作用使导线气动力参数呈非线性变化，产生耦合共振效应，影响输电线路整体稳定性。沙尘暴气候中，由于颗粒冲蚀与空气密度变化，导线表面粗糙度增加、气动特性恶化，进一步降低抗风稳定性能。极端温差引起的热胀冷缩效应则改变导线张力与垂度平衡，叠加强风作用导致应力集中与结构疲劳的加剧。

2. 防风偏结构创新设计与材料优化研究

2.1 基于气动减阻原理的导线防风构件结构优化设计

基于气动减阻原理的导线防风构件结构优化设计是提升输电线路抗风性能与运行稳定性关键技术路径，其核心在于通过空气动力学参数控制与结构形态优化，实现气动载荷分布的均衡化与流场扰动效应的最小化。防风构件设计应以导线表面流体分离特征与压力分布规律为基础，采用数值模拟与风洞实验相结合的研究方法，对不同风速、风向及雷诺数条件下的导线气动特性进行动态分析。通过在导线表面附设流线型扰流结构、减阻环及导流鳍片等气动构件，可有效改变局部流场结构，削弱尾涡脱落频率与流致振动幅度，降低气动升力与横向振动响应。结构优化过程中应综合考虑导线外径、表面粗糙度、螺旋角度及附加构件布局等参数，通过多目标优化算法建立气动阻力系数与结构强度间的协调模型，实现防风构件在减阻性能、重量分布与安装适应性之间的动态平衡。同时，应引入流固耦合分析与频域响应计算模型，对导线在强风作用下的气动弹性特性进行仿真验证，确保结构形态调整不引发新的流场不稳定区域。为提高结构适应性，可设计可调节气动防风构件，通过柔性转轴与可控偏角机构实现流向自适应调节，从而在不同风场条件下保持最佳减阻状态。

2.2 复合高强轻质材料在防风装置中的应用性能分析

复合高强轻质材料在输电线路防风装置中的应用性能分析是实现防风构件轻量化、耐候性与结构强度平衡的关键环节，其设计理念基于材料力学性能优化与服役环境耦合响应分析。传统防风装置多采用金属结构，虽具较高强度但存

在密度大、耐腐蚀性差与疲劳寿命有限等问题。复合材料通过多相增强结构与层合界面控制技术，可在降低质量的同时显著提升比强度、比刚度与抗疲劳性能。碳纤维增强树脂基复合材料在导线支撑环、扰流罩及抗振构件中的应用，可有效减轻塔线系统自重，降低结构风荷载响应；玻璃纤维与芳纶纤维复合材料在高湿、高盐与低温环境下表现出优良的抗老化与耐介质性能，显著提升防风装置的环境适应性。为实现材料性能的最优匹配，应建立多尺度材料力学模型，对纤维铺设角度、树脂基体模量及界面结合能进行参数化优化，确保结构在复杂风振作用下保持高强度与低变形性能。通过热-力-湿耦合环境模拟，可进一步分析材料在长期载荷与循环应力作用下的疲劳演化规律及界面损伤机理，为材料选择与结构设计提供寿命预测依据。此外，应结合防风构件的安装工艺与运维特征，采用模块化成型与可更换式结构设计，以便于现场装配与快速维护。复合高强轻质材料的应用不仅降低了防风装置的整体重量与安装应力，还通过结构韧性提升与阻尼性能优化有效抑制了风致振动与疲劳损伤的累积，为防风偏技术的工程化推广提供了高性能材料支撑与结构安全保障。

2.3 多层减振阻尼系统与可调刚度防风连接结构的设计创新

多层减振阻尼系统与可调刚度防风连接结构的设计创新是极端气候条件下提升输电线路抗风偏能力与动态稳定性的关键技术创新，其核心在于通过多级阻尼能量耗散与结构柔性调控实现系统抗风性能的自适应优化。传统刚性防风连接结构在高风载作用下易出现共振放大与疲劳裂纹问题，而多层阻尼系统通过粘弹性、摩擦及流体阻尼等多种耗能机制的叠加，可在不同频段内对风致振动进行广谱抑制。设计中应采用主从结构模型，将高阻尼橡胶层、磁流变阻尼器与液压缓冲单元按分层布置形成多能量耗散路径，使结构在高频振动时以粘弹吸能为主，在低频大幅位移下以流体缓冲与磁控调节为核心，实现风荷载作用下的全域减振控制。可调刚度防风连接结构通过形状记忆合金、磁响应材料或可变截面弹性构件的应用，能够根据风速、风向与振动幅度自动调节结构刚度与阻尼特性，保持塔线系统的动态平衡。其控制原理基于自适应反馈算法与实时应变监测，通过传感器采集导线振动频谱与应力信号，驱动智能执行单元调节连接件力学特性，实现“刚柔并济”的抗风自调节机制。结构设计中

应重点优化连接节点的应力分布与能量传递路径，确保在强风冲击下连接部位不产生应力集中与疲劳失效。多层次减振与可调刚度系统的协同应用不仅显著提高了输电线路的动态稳定性与抗风偏能力，还实现了结构从被动防护向主动控制的技术转型，为输电线路在极端气候下的安全运行提供了系统化、智能化与高可靠性的防风控制新模式。

3. 极端气候下输电线路防风偏技术创新与应用

3.1 物联网传感技术在输电线路风偏实时监测中的集成应用

物联网传感技术在输电线路风偏实时监测中的集成应用是实现极端气候条件下输电线路动态安全管理与智能预警的重要支撑体系，其核心在于构建由多类型传感器节点、边缘计算模块与无线通信网络组成的高精度数据采集与信息传输体系。监测系统以分布式感知为基础，布设风速传感器、加速度传感器、应变计、位移测量单元与温湿度模块，对导线振动响应、塔体应力变化及环境气象参数进行多维采集，实现风荷载与结构响应的实时同步监测。通过嵌入式数据融合算法与信号降噪技术，可对传感数据进行动态滤波与异常识别，确保监测结果的准确性与稳定性。无线传输系统采用多协议融合通信结构，实现近场低功耗通信与远程高带宽数据回传的自适应切换，提高数据传输的鲁棒性与可靠性。为应对极端气候下的能量供应问题，系统集成太阳能与风能微型供电模块，实现节点的长期自供能运行。边缘计算单元在前端实现数据预处理、风偏趋势预测与风险等级初判，降低数据回传负荷并提升响应速度。系统平台通过云端集中处理与数据可视化展示，实现输电线路风偏状态的三维动态重构与地理信息映射，为运行人员提供实时决策依据。该技术体系突破了传统定点监测与周期巡检的局限，构建了“感知—传输—分析—预警”的全流程智能监测架构，实现输电线路风偏的精准检测、智能识别与动态控制，为防风偏技术的数字化与智能化转型奠定了基础。

3.2 基于人工智能算法的风荷载识别与风险预警模型研究

基于人工智能算法的风荷载识别与风险预警模型研究是极端气候条件下输电线路防风偏智能化管理的核心技术，其主要目标在于通过算法学习与数据推理实现风荷载作用规律的动态识别与风偏风险的自适应预警。风荷载识别模型以机器学习与深度神经网络为核心，利用多源传感数据对风速、风向、气压与导线振动信号进行特征提取与时序建模，

通过卷积神经网络识别风场非线性特征，结合长短期记忆网络捕捉风荷载变化的动态趋势，从而实现复杂气动载荷与结构响应之间的耦合识别。在风险预警层面，模型引入模糊逻辑与贝叶斯推理算法，根据导线应变能、塔体位移及风速突变率等参数构建多维风险指标体系，并通过自学习机制动态调整阈值，实现风偏等级的自动分级与预警信号的智能发布。为提高模型的泛化能力与适应性，应在样本训练阶段引入气象模拟数据与历史事故样本进行强化学习，构建多维样本集以增强模型在极端风场条件下的预测精度。预警系统通过与物联网监测平台的集成，实现数据流的实时输入与模型计算结果的自动更新，支持风偏趋势的短时预测与局部风险区域的提前识别。算法输出结果以可视化形式呈现于智能调控终端，结合地理信息系统实现输电线路状态的分级显示与动态追踪。该模型的应用实现了风荷载识别的智能化、风险评估的定量化与预警响应的自动化，为输电线路的安全运行提供了实时决策支持与预测性防控手段，标志着防风偏技术由经验型管理向数据驱动型智能控制的转变。

3.3 大数据驱动的风偏特征参数识别与状态评估技术

大数据驱动的风偏特征参数识别与状态评估技术是实现输电线路防风偏科学决策与智能管理的重要基础，其核心在于通过多维数据采集、特征提取与智能分析构建输电线路风偏行为的动态评估体系。该技术以气象数据、结构监测数据与环境参数为基础，形成包含风速、风向、温湿度、振动幅值、应变响应及塔线姿态等多维信息的时空数据集，通过分布式大数据平台实现数据清洗、归一化与特征重构。利用聚类分析与主成分分析方法识别风偏关键特征参数，提取反映结构动态特性的主导因子，为风偏机理模型与风险预测提供数据支撑。状态评估体系基于多变量回归与自适应模糊评价模型，对导线横向位移、应力峰值及风荷载作用频率进行综合计算，建立风偏程度、结构安全裕度与稳定系数的量化指标体系。在分析算法上，应引入图神经网络与强化学习框

架，对风偏传播路径与空间分布模式进行识别，实现复杂风场中局部风险点的动态追踪与状态预测。评估结果通过可视化决策系统进行三维动态呈现，结合历史数据与实时监测结果生成风偏演化趋势图与健康状态等级图，实现从被动评估向主动诊断的转变。该技术体系不仅能够实现对输电线路风偏状态的精确量化与动态评估，还可通过数据挖掘揭示不同地形条件、气候区域与线路结构之间的耦合规律，为输电线路防风偏设计、运行维护与应急调度提供数据驱动的决策依据，推动输电线路防风偏技术从经验分析向科学预测、从静态防护向智能调控的系统化升级。

结语

极端气候背景下输电线路防风偏技术的发展标志着电力工程从传统结构安全设计向智能化、数字化与自适应控制的转型。通过气动减阻、材料优化与结构调控的协同创新，结合物联网监测、人工智能识别与大数据评估的系统集成，可实现输电线路全寿命周期的动态防护与风险预警。防风偏技术的系统化创新不仅提升了输电线路的抗风可靠性与环境适应性，也为构建韧性电网与智慧输电体系提供了技术支撑。

参考文献：

- [1] 董绍春, 石海峰. 大跨越输电线路防风振方案辅助设计技术探析 [J]. 电力设备管理, 2024,(18):14–16.
- [2] 王帅. 某地区 500 kV 超高压输电线路防风偏治理技术措施分析 [J]. 流体测量与控制, 2023,4(06):36–39.
- [3] 徐晖. 输电架空线路防风加固技术策略分析 [J]. 农村电气化, 2023,(05):14–16.
- [4] 王亮. 大跨越输电线路防风振方案辅助设计技术初步研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2020.
- [5] 刘婷婷, 刘红松. 配网大档距裸导线风偏技术探讨 [J]. 农村电气化, 2023,(12):1–4.