

# 风电机组发电机滑环碳粉积聚问题及清洁维护策略

逢致富

大唐山东新能源分公司 山东 济南 250000

**【摘要】**：风电机组发电机滑环碳粉积聚易引发接触不良、绝缘降低等故障，严重影响机组运行稳定性与可靠性。明确碳粉积聚的成因与危害，构建科学高效的清洁维护体系，是保障风电机组持续安全运行的关键。深入剖析碳粉积聚的核心诱因，探究其对滑环接触性能、绝缘性能及机组运行效率的影响，在此基础上制定针对性的清洁维护策略，可有效缓解碳粉积聚问题，降低故障发生率。通过合理选择清洁方式、优化维护流程与周期，能够提升滑环运行状态，延长相关部件使用寿命，为风电机组的稳定运行提供保障。

**【关键词】**：风电机组；发电机滑环碳粉积聚；清洁维护运行稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.002

## 引言

风电机组长期处于户外复杂环境中，发电机滑环作为电能传输的核心部件，其运行状态直接关系到机组的整体效能。滑环与电刷的摩擦过程中极易产生碳粉，碳粉的持续积聚逐渐成为制约滑环乃至整个发电机稳定运行的突出问题。碳粉积聚可能导致滑环表面接触电阻增大、火花放电等异常现象，进而引发部件磨损加剧、故障停机等后果，造成显著的经济损失。深入探究碳粉积聚的内在机理，精准把握其危害特征，研发切实可行的清洁维护手段，对于化解这一运行难题、提升机组运行的安全性与经济性具有重要意义。这一课题的深入推进，能够为风电设备运维提供关键技术支撑，推动风电行业的高质量发展。

## 1 风电机组发电机滑环碳粉积聚的成因解析

滑环与电刷的摩擦副相对运动是碳粉生成主因，滑环铜合金与碳石墨电刷的材质特性，使后者在高速摩擦中易剥落形成碳粉。接触压力不均或滑动速度过高会加剧磨损，压力失衡引发局部过热，速度过快破坏电刷氧化膜，均会增加碳粉产量。野外、沿海等复杂环境助推碳粉积聚，风沙灰尘与之混合形成顽固附着物，盐雾腐蚀增加滑环表面附着位点，高湿度降低碳粉流动性，温差导致部件间隙波动<sup>[1]</sup>。电压电流参数偏差同样加剧问题，电晕放电让碳粉带电更易吸附，旋转精度不足则引发冲击摩擦，形成碳粉积聚恶性循环。

## 2 风电机组发电机滑环碳粉积聚的危害表征

### 2.1 碳粉积聚导致滑环接触性能劣化

碳粉在滑环表面的持续积聚，会显著破坏其接触性能。碳粉本身具有一定的电阻，积聚在滑环与电刷的接触界面之间，会导致接触电阻增大，使电能传输过程中的能耗增加，同时引发接触点温度升高。随着碳粉积聚量的增加，接触界面的有效导电面积逐渐减小，可能出现接触不良的情况，表现为电压波动、电流不稳定等现象。当碳粉积聚形成较厚的堆积层时，会导致滑环与电刷之间出现间歇性脱离，引发火花放电。火花放

电产生的高温会进一步灼伤滑环表面，形成凹凸不平的损伤，加剧接触性能的劣化，严重时甚至会导致导电回路中断，影响发电机的正常电能输出。

### 2.2 碳粉堆积引发绝缘性能下降风险

碳粉具有一定的导电性，其在滑环周边绝缘部件上的堆积会显著降低绝缘性能。滑环周围的绝缘材料用于隔离不同电位的部件，防止漏电与短路故障。当碳粉积聚在绝缘表面时，会形成导电通道，使绝缘材料的表面电阻与体积电阻大幅下降，无法有效隔离电位。在高湿度环境下，碳粉吸附水分后导电性进一步增强，绝缘性能下降更为明显，极易引发漏电现象。若碳粉积聚量持续增加，导电通道逐渐贯通，会直接导致绝缘击穿，引发短路故障。短路故障不仅会损坏滑环及发电机相关部件，还可能引发更大范围的设备损坏，严重威胁风电机组的安全运行。

### 2.3 碳粉积聚加速部件损耗影响机组运行效率

碳粉积聚不仅会直接影响滑环与电刷的性能，还会加速相关部件的损耗，进而影响风电机组的整体运行效率。碳粉进入滑环的轴承等转动部件后，会充当研磨剂的作用，加剧轴承内零件的磨损，导致轴承间隙增大、旋转精度下降，增加运行过程中的振动与噪声。振动与噪声的增大又会进一步影响滑环与电刷的接触稳定性，加剧二者的磨损，形成恶性循环<sup>[2]</sup>。碳粉积聚引发的接触不良与绝缘问题，会导致发电机的电能转换效率下降，使机组输出功率降低。为维持机组正常运行，相关设备需承担更大的负荷，进一步加速了部件的老化与损耗，缩短了设备的使用寿命，增加了运维成本。

## 3 风电机组发电机滑环碳粉清洁技术手段探究

### 3.1 物理清洁技术在滑环碳粉清除中的应用

物理清洁技术凭借操作简单、对设备无化学损伤的优势，在滑环碳粉清除中得到广泛应用。压缩空气吹扫是较为常用的一种物理清洁方式，通过高压空气流直接作用于滑环表面及周边缝隙，将积聚的碳粉吹离。在吹扫过程中，需控制好空气压

力与吹扫角度，避免高压气流对滑环表面造成损伤，同时确保吹扫方向远离电气控制部件，防止碳粉扩散至其他精密部件。机械擦拭清洁则是通过专用的擦拭工具，配合合适的擦拭材料对滑环表面进行人工或半自动擦拭。擦拭材料需具备良好的吸附性与柔软性，避免划伤滑环表面<sup>[3]</sup>。真空吸尘清洁技术可通过负压吸附的方式，将滑环表面及周边的碳粉直接吸除，该技术能有效减少碳粉的扩散，清洁效果更为彻底，适用于碳粉积聚量较大的场景。

### 3.2 化学清洁剂在碳粉去除中的适配性应用

化学清洁剂清洁适用于碳粉与油污、灰尘等混合形成的顽固积聚物，其核心在于选择适配的清洁剂类型，避免对滑环及周边材料造成腐蚀。中性清洁剂具有温和的清洁性能，不会损伤滑环的铜合金表面与绝缘材料，适用于常规碳粉积聚的清洁，通过溶解与乳化作用，使碳粉脱离滑环表面，再配合擦拭或冲洗完成清洁。对于一些顽固性的碳粉积聚层，可选用专用的导电材料清洁剂，这类清洁剂具有更强的渗透力，能快速分解积聚层的粘结结构，同时具备良好的挥发性能，清洁后无残留，不会影响滑环的导电性能。在使用化学清洁剂时，需严格控制使用量与清洁流程，清洁前需对清洁剂进行兼容性测试，清洁后需确保滑环表面完全干燥，避免残留清洁剂引发绝缘问题或腐蚀损伤。

### 3.3 在线实时清洁系统的构建与应用优势

在线实时清洁系统通过自动化设备实现对滑环碳粉的持续清除，有效弥补了传统离线清洁的局限性。该系统通常由清洁执行机构、检测传感器、控制系统等部分组成，检测传感器实时监测滑环表面的碳粉积聚状态，当检测到积聚量达到设定阈值时，控制系统启动清洁执行机构进行清洁作业。清洁执行机构可根据实际需求选用旋转刷、高压气流喷射等方式，实现对滑环表面的精准清洁。在线实时清洁系统能够在机组不停机的情况下完成清洁作业，避免了离线清洁导致的停机损失，显著提升了机组的运行效率。实时监测与清洁的模式可有效防止碳粉积聚量过大引发的各类故障，延长了滑环及相关部件的使用寿命。系统的自动化运行减少了人工干预，降低了运维人员的工作强度，提升了清洁维护的规范性与可靠性。

## 4 风电机组发电机滑环碳粉积聚的维护策略构建

### 4.1 基于运行状态的动态维护周期优化

基于运行状态的动态维护周期优化，核心是通过监测滑环的运行参数与碳粉积聚状态，制定个性化的维护计划，打破固定周期维护的局限性。借助在线监测设备，持续采集滑环的接触电阻、表面温度、振动频率等运行数据，结合环境参数的变化，建立碳粉积聚量的预测模型，精准判断碳粉积聚的发展趋势<sup>[4]</sup>。当监测数据显示滑环运行状态出现异常波动，或预测碳粉积聚量即将达到临界值时，及时启动清洁维护作业。对于运

行环境恶劣、碳粉生成量较大的机组，适当缩短维护间隔；对于运行状态稳定、碳粉积聚缓慢的机组，则可延长维护周期。动态维护周期的优化能够确保维护作业的针对性与时效性，避免过度维护造成的资源浪费，同时防止维护不及时引发的设备故障。

### 4.2 滑环与电刷选型匹配的维护保障措施

滑环与电刷的选型匹配是减少碳粉生成、降低积聚风险的基础维护保障措施。在选型过程中，需结合机组的运行参数、环境条件等因素，综合考量滑环与电刷的材料特性、规格参数。滑环材料应选择耐磨性强、导电性能优良的铜合金材质，并确保表面加工精度符合要求，减少摩擦过程中的材料损耗。电刷的选型需重点关注其硬度、电阻率、摩擦系数等指标，确保与滑环材料形成良好的摩擦匹配。对于高转速、大电流的风电机组，应选用高性能的金属石墨电刷，以提升耐磨性与导电稳定性；对于运行环境干燥、粉尘较多的场景，可选用含润滑剂的电刷，减少摩擦磨损。需严格控制滑环与电刷的安装精度，确保二者接触均匀，避免因安装偏差导致局部磨损加剧，从源头减少碳粉的生成。

### 4.3 运行环境调控下的碳粉积聚预防维护

运行环境调控通过改善滑环周边的环境条件，降低碳粉积聚的可能性，是预防维护的重要环节。针对风沙较大的区域，在滑环所在的机舱部位加装密封装置，减少风沙、灰尘等颗粒物进入，同时定期清理密封装置上的积尘，确保密封效果。沿海高盐雾区域，需对滑环及周边部件采取防腐蚀处理，涂抹专用的防腐蚀涂层，同时加装除湿装置，降低环境湿度，减少盐雾与水分对碳粉积聚的助推作用。对于温度变化剧烈的区域，优化机舱的温控系统，使滑环运行环境温度保持在稳定范围内，减少热胀冷缩对部件间隙的影响，降低碳粉积聚的风险。定期对机舱内部进行清洁，及时清除散落的碳粉与杂物，避免碳粉在机舱内扩散积聚，形成二次污染。

## 5 风电机组发电机滑环碳粉积聚防控体系的实践应用

### 5.1 防控体系的核心构成与运行逻辑

风电机组发电机滑环碳粉积聚防控体系以碳粉生成源头控制、过程清洁清除、运行状态监测为核心构成，形成“预防-清洁-监测”的闭环运行逻辑。源头控制模块通过滑环与电刷的精准选型、安装精度把控及运行参数优化，从根本上减少碳粉的生成量；过程清洁模块整合物理清洁、化学清洁与在线实时清洁技术，根据碳粉积聚状态灵活选用清洁方式，及时清除已积聚的碳粉；运行状态监测模块借助各类传感器与数据采集设备，实时捕捉滑环的接触电阻、表面温度、碳粉积聚量等关键信息，为源头控制与过程清洁提供数据支撑<sup>[5]</sup>。各模块之间通过数据传输与反馈机制实现协同运行，监测模块将采集到的

运行数据传输至控制中心，控制中心通过分析判断，向源头控制模块与过程清洁模块下达调整指令，确保防控体系能够精准应对碳粉积聚问题。

### 5.2 防控体系在不同工况下的适配调整

防控体系需根据风电机组的不同运行工况进行适配调整，以确保在各类环境与运行条件下均能发挥良好的防控效果。在低风速、低负载的工况下，滑环与电刷的摩擦强度较低，碳粉生成量较少，此时可适当降低在线监测的频率，延长清洁维护周期，同时优化滑环的运行参数，避免因负载过低导致接触不良。在高风速、高负载的工况下，摩擦强度与电流负载均大幅提升，碳粉生成量显著增加，需提高监测频率，缩短清洁间隔，同时启用在线实时清洁系统，确保碳粉及时清除。对于极端环境工况，如强风沙、暴雨、高温等，需强化源头控制的密封与防护措施，增加清洁维护的频次，必要时暂停机组运行进行全面清洁与检查，避免恶劣环境加剧碳粉积聚与设备损伤。

### 5.3 防控体系应用效果的提升路径

防控体系应用效果的提升需从技术优化、数据驱动与经验积累三个维度推进。技术优化方面，持续研发更高效的清洁技术与监测设备，提升清洁的彻底性与监测的精准度，同时优化

防控体系各模块的集成方式，增强系统运行的稳定性与兼容性。数据驱动方面，建立完善的运行数据库，整合不同机组、不同工况下的碳粉积聚数据与防控效果数据，通过大数据分析挖掘碳粉积聚的规律与防控体系的优化方向，实现对防控策略的精准调整。经验积累方面，总结不同场景下防控体系的应用经验，梳理常见问题与解决对策，形成标准化的运维规范，指导防控体系的规范化应用。通过多维度的提升路径，不断增强防控体系应对碳粉积聚问题的能力，进一步提升风电机组运行的稳定性与经济性。

## 6 结语

本文围绕风电机组发电机滑环碳粉积聚问题及清洁维护策略展开深入探讨，明确了碳粉积聚的成因与危害，探究了多种清洁技术手段，构建了针对性的维护策略与防控体系。碳粉积聚对滑环接触性能、绝缘性能及机组运行效率的负面影响显著，科学的清洁技术与完善的维护策略是化解这一问题的关键。防控体系的实践应用能够实现碳粉积聚的精准防控，有效降低故障发生率。未来需持续优化清洁维护技术与防控体系，为风电机组的长期稳定运行提供更可靠的技术支撑，推动风电行业运维水平的持续提升。

## 参考文献：

- [1] 尹彦博,许伯强,吴京隆,等.考虑潜变量影响的风电机组双馈感应发电机故障检测方法[J/OL].电工技术学报,1-15[2026-01-09].
- [2] 马岩溪.基于循环神经网络与数据的风电机组发电机健康诊断研究[D].沈阳工业大学,2025.
- [3] 柯福惠.海上风电机组发电机轴承异常状态监测研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(02):172-174.
- [4] 钟行.双馈风电机组发电机轴承维护研究[J].中国机械,2024,(23):65-68.
- [5] 王家旺.某风电场风电机组发电机碳刷替代技术研究与应用[C]//中国农业机械工业协会风能装备分会.第十一届中国风电后市场交流合作大会论文集.国华(丰宁满族自治县)新能源有限公司;,2024:286-289.