

叶片表面结冰对风电机组出力性能的影响分析

孙 淼 易 辉

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司 湖南 长沙 410000

【摘要】：叶片表面在寒冷湿润环境中易出现结冰现象，其附着形态改变了叶片前缘几何特征，使边界层分离提前、升力系数下降、阻力系数增加，导致整体气动效率明显衰减。结冰使叶片攻角敏感性增强，失速特性恶化，进而引起风电机组实际功率偏离设计值，并加剧振动载荷，影响运行稳定性。通过对典型结冰特征、气动变化机理及功率输出偏差的综合分析，可揭示结冰条件下出力衰减的主导因素，为机组低温运行策略、除冰技术及预测模型的构建提供理论依据。

【关键词】：叶片结冰；气动性能；功率衰减；风电机组；低温环境

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.088

引言

风电机组在寒冷地区运行时常面临叶片结冰问题，这一现象会改变原有流场结构，使能量转化效率不再保持设计状态。结冰不仅影响叶素局部的气动行为，还会传导至整机出力，使风能利用率在短时间内快速下降。近年来，随着风电装机规模扩大，冬季功率波动与出力偏差逐渐突出，结冰对机组性能的影响成为运行与研究领域关注的焦点。分析叶片表面结冰与气动特性、功率输出之间的关系，有助于理解低温环境下机组性能退化的根源，为提升高寒区域风资源利用水平提供重要基础，并为后续技术改进奠定思路。

1 叶片结冰引发出力下降的关键矛盾

叶片表面在寒冷湿润气候中暴露于冻结条件时，会出现不同程度的冰层附着，冰层改变了叶片迎风面的曲率与粗糙度，使原本平滑的外形被迫偏离设计状态。叶片前缘微小的几何突变即可引发流动分离提前，边界层稳定性削弱，升力曲线呈现明显下移，阻力却不断攀升。此类气动偏差在低雷诺数条件下表现得更为明显，使叶片在额定范围内无法保持预期的气动效率^[1]。伴随结冰厚度增加，升阻比持续下降，攻角灵敏度上升，导致叶素区域的气流附着更加困难，气动劣化呈非线性扩散趋势。从微观气动机理向整机性能延伸，结冰已成为影响风电机组出力稳定性的初始诱因。

受冰层附着影响的并非局部气动形态，还包括整机的转矩响应和功率调节过程。实际运行中，机组在低温阶段常出现功率曲线偏离标准模型的现象，即在相同风速下输出显著低于理论值。冰层造成风能捕获效率下降，使轮毂转速无法维持最佳状态，桨距调节系统面临更大的调节压力。当气动失衡加剧时，叶根弯矩与塔架振动分量出现放大趋势，结构动态特征被

迫改变，运行系统对风速变化的适应能力减弱。控制系统为维持安全边界，会自动采取降载、限功率等保护措施，使原本应当输出的能量进一步损失。由此可见，结冰并非单纯的表面附着问题，而是引发整机动力学、控制行为与能量转换链路多层次变化的根源。

在寒冷地区的实际工程运行中，结冰影响呈阶段性与突发性并存的特点，使机组无法稳定运行于最优气动区间。轻度冰层往往不易被即时识别，却足以造成升阻比削弱；中度冰层会使局部叶素提前进入失速状态；重度冰层甚至可能引发机组振动偏移、功率骤降等风险性事件。复杂的冰型形态及不同温湿条件下的冻结方式，使问题呈现多变量叠加效应，对运行状态判断带来挑战。只要冰层附着仍在持续，叶片将不断偏离设计气动形态，出力下降趋势难以逆转。机组在此过程中暴露的关键矛盾，就是设计工况与实际结冰工况之间的气动偏差持续扩大，导致能量转化链路中断性增强、输出性能难以维持在稳定水平。

2 结冰对叶片气动特性的变化机理

结冰附着在叶片表面的过程会使原有的流体边界条件发生显著改变，冰层形成后，前缘曲面被粗糙突点取代，局部压力梯度被迫重分布。气流在接触粗糙表面后更易出现能量衰减，边界层由层流向湍流的转捩提前，附面层厚度随之增大。在这一过程中，升力系数不再呈线性变化，压力面与吸力面之间的压差减弱，使整体升力产生能力下降^[2]。阻力分量则因分离点后移困难而持续增加，导致升阻比大幅削弱。气流绕流状态一旦被冰型扰动，其影响会沿叶素展向方向扩散，使局部气动特性偏离设计曲线。冰型形态的不同还会造成失速边界提前，使叶片在较低攻角下便进入非稳定工作区，风能捕获能力随之受到抑制。

冰层对流场的干扰不仅体现在外形粗糙度的增加

上,还会改变叶片前缘的有效迎角。实际运行中,冰层附着会形成棱状、壳状或羽状结构,使叶片在旋转过程中产生非对称气动载荷。迎角偏移造成吸力峰提前出现,流体分离更加敏感,从而使叶片表面的压力分布曲线失去原有平滑性。随着冰厚增加,叶片整体的气动中心会向后移动,配平特性受到破坏,诱发更强烈的失速涡结构。风轮在低温环境中旋转时,叶尖区域雷诺数本已较高,在冰层作用下流场呈现更复杂的剪切层发展形态,尾涡结构被拉长,涡能耗散延迟,使气动损失进一步扩散到下游区域。旋转体系中的流固耦合作用因冰型扰动而加强,导致气动系数在时间尺度上呈现剧烈波动。

气动变化的累积效应最终会对整机工作状态产生连锁性影响。由于升力能力削弱,风轮难以维持设计转速,叶尖马赫数水平下降,能量吸收效率降低。阻力提升又使驱动扭矩需求增大,造成气动阻尼上升,机组在风场中的调节能力受到限制。桨距控制系统面临更高的调节压力,一旦攻角偏移超出可控范围,局部叶素会出现周期性的流动分离,使气动载荷产生脉动式变化。此类变化会传递至传动链与塔架结构,使整机振动特征发生变化。气动效率下降与结构响应增大的叠加,使风能转换链路持续处于低效状态。冰型对流体动力行为的干扰贯穿整个旋转周期,使叶片在任何位置都难以保持稳定的气动性能,从而为出力衰减、振动放大与控制困难等一系列问题埋下根源。

3 结冰条件下机组功率偏差的形成路径

结冰导致的气动退化会沿着能量转换链逐级传递,使机组功率输出逐步偏离理论模型。在轻度结冰阶段,叶片局部升阻比下降,使风轮难以维持目标转速,转矩响应减弱。实际风速与风轮吸能能力之间形成差距,风能捕获效率呈现隐性衰减。随着冰层进一步加厚,气动失速提前出现,旋转周期内的压力分布变得不稳定,风轮的有效扭矩波动加剧,使输出功率曲线产生可测偏移^[3]。标准功率曲线基于光滑叶片设定,而结冰造成的气动扰动使机组运行点不断从最优区域偏移,导致额定区及变速区的能量转换能力持续走低,功率偏差由局部影响向整体扩散。

冰层造成的气动变化会影响控制系统的判断,使机组的调控策略出现偏移。在变桨调节过程中,桨距角调节基于风轮负载、转速与风速之间的动态匹配关系,当叶片气动性能下降后,调节系统持续面临负荷信号与实际气动反馈不一致的问题。攻角偏移扩大了控制系统的调节幅度,使机组难以保持稳定的转速控制目标。部分区域的叶素进入周期性分离状态,导致

空气动力载荷呈现高频脉动,使控制系统不断触发保护逻辑,如限功率运行、降载运行或停机保护。这些过程均导致发电量进一步减少,使功率偏差从气动效应转化为控制系统层面的输出损失。在强结冰条件下,机组甚至无法保持并网要求的功率品质,输出曲线出现明显的阶跃下降。

功率偏差在传动链与结构响应中会进一步放大。由于叶片气动效率下降,传动链输入功率不足,使发电机在部分工况下处于非最优磁化状态,电能输出效率降低。气动载荷的非均匀性会导致轮毂偏航力矩波动增强,使塔架振动与机舱姿态变化更加频繁,内部控制模型难以准确预测瞬时负载,导致输出功率的稳定性进一步削弱。在低温强风环境中,冰层的形态会反复变化,使功率偏差呈现突发性与累积性叠加特征,形成持续性的发电损失。整体来看,气动退化、控制偏移与结构响应变化在结冰条件下相互叠加,使机组功率偏差形成一条从气动源头到电能输出的连续路径,并贯穿整机运行周期。

4 结冰影响下的性能恢复与优化策略

在结冰条件下维持机组性能的关键在于削弱冰层对叶片气动环境的扰动,使风轮尽可能接近原有设计工况。为减轻冰层对前缘曲率的破坏,可通过加热型前缘结构、导电薄膜或相变材料涂层改变叶片表面温度场,使冰晶难以形成稳定附着点。部分机组采用的热风循环系统通过内部加热通道提高叶片流体接触面的温度,使冰层在形成初期即被破坏^[4]。若处于更严苛的低温高湿环境,可借助疏水涂层削弱水膜在微观表面的铺展趋势,降低冰层与基体之间的机械黏附力。气动性能的恢复依赖于冰层在早期被抑制,其核心目标在于保持前缘光滑性与流场连续性,使升阻比衰减得以控制在可接受范围。

当冰层已明显影响风轮吸能能力时,运行策略的调整成为恢复机组性能的重要途径。气动退化会改变风轮的最优攻角区间,使原有桨距控制参数不再适配结冰后的流动条件。为了减轻气动失速带来的转矩波动,可通过调整桨距控制曲线,使攻角维持在更稳态的区域,避免叶素进入周期性分离状态。在低温风场中,风速脉动较强,而结冰加剧了叶片对风速变化的敏感程度,因此适度延展桨距变化的缓冲区间,可提升系统的适应性。对难以通过控制恢复的严重结冰情况,可采用短时停机除冰,使叶轮在较低热交换速率下利用环境辐射与人工辅助方式加速冰层剥离。运行策略的核心在于调节气动和转速之间的匹配关系,使机组在一定程度的气动损失下仍能维持稳定功率输

出。

在复杂结冰环境中，为使机组性能恢复更具针对性，需要借助监测与预测技术提升评估的精度。通过安装前缘温湿传感器、冰层厚度监测模块以及基于振动信号的冰型识别算法，可实现对冰层形态与分布的实时判断，使控制系统能够依据气动退化程度实施差异化调控。数值模型可基于冰型变化重构气动参数，使机组在调节过程中获得更准确的负载预测值。结合风场中多机组的运行数据，可建立数据驱动式气动衰减模型，用于识别出力偏差的临界节点，从而为控制策略切换与除冰措施启动提供依据。性能恢复的最终目标是使风能转换链中的气动段、控制段与结构段重新建立协调关系，使叶片在结冰环境下仍具备较高的稳定性与能量吸收能力。

5 结冰对出力特征的综合评估与归纳

结冰对机组出力变化的影响贯穿气动性能、能量转换效率与控制过程全过程，其特征呈现多维度叠加的复杂形态。冰层附着后，叶片升阻比下降导致有效扭矩衰减，使风轮在不同风速区间的响应能力不断削弱。轻度结冰阶段的出力变化往往表现为功率曲线下移，偏差幅度随冰型增长呈加速趋势^[5]。随着冰层厚度增加，气动中心后移、流动分离扩大，使风轮在变速工况中出现明显的调节滞后，导致实际运行点偏离最大功率捕获区域。出力特征逐渐从稳定下降转变为不规则波动，功率信号中包含更多高频成分，反映出叶素载荷周期性改变带来的非稳态影响。

在中度至重度结冰条件下，机组出力表现出阶段化的衰减模式。叶片局部流动结构改变后，风轮吸能能力下降，控制系统为保证转速稳定会频繁调节桨距角，使功率输出呈现间断性起伏。在此过程中，某些风速区间的实际功率无法达到额定性能，形成较明显

的“功率凹陷带”。当旋转周期内气动载荷分布更加不均时，传动链扭矩信号出现周期性扰动，进一步影响发电机的磁化状态，使电能输出质地发生变化。严重结冰状态下，机组为避免结构风险会触发保护机制，使出力突然下降甚至完全中断，呈现阶跃式特征。这种突变型出力偏移是冰型恶化与控制逻辑交互作用的结果，反映出结冰环境下机组稳定性难以依靠单一环节维持。

在整个运行周期中，结冰导致的出力变化并非单一趋势，而是受气动衰减程度、控制系统适应能力以及外部气象条件共同影响。风场温湿度变化会改变冰型发展速度，使出力偏差呈现时段性波动；不同机组的气动设计差异也会导致结冰敏感性的变化，使同一风速条件下机组之间的出力偏移程度并不一致。通过功率曲线偏移量、扭矩波动幅度以及载荷谱分布等指标，可以构建结冰对出力影响的综合评估框架，用于识别气动劣化的关键节点。将监测数据与数值模型结合后，可更清晰地刻画出出力变化的阶段特征，从而揭示结冰影响在气动、控制与结构响应之间的传递路径，使出力偏差的形成规律得以更系统地呈现。

6 结语

结冰对风电机组的影响贯穿气动退化、控制偏移与结构响应多层环节，使出力性能呈现持续衰减与波动叠加的特征。冰层改变叶片的流体边界条件，使能量转换链条在多个节点产生偏差，进而导致功率曲线下移与运行稳定性下降。不同冰型和环境条件又使出力特征表现出明显的阶段性差异，凸显结冰问题的复杂性。围绕气动恢复、策略调控与实时监测展开的多维措施，能够在一定程度上减轻结冰带来的性能损失，使机组在低温环境中保持更高的运行可靠性，为提升寒区风电的可利用水平提供坚实技术基础。

参考文献：

- [1] 王华彪.基于风速预测改进风电机组性能路径探析[J].襄阳职业技术学院学报,2025,24(06):82-86.
- [2] 刘灿邦.风电机组大型化趋缓产业链走向深度集成[N].证券时报,2025-12-09(A04).
- [3] 齐杰.智能监控系统在新能源风电机组安全运维中的应用分析[J].电力设备管理,2025,(22):176-178.
- [4] 刘红祥.寒区海上风力发电机叶片结冰及除冰技术研究[D].大连海事大学,2024.
- [5] 刘哲.结冰对风力机叶片气动性能的影响研究[D].兰州理工大学,2022.