

# 雷电气象灾害对风电设备的影响与防护对策

李学伦, 黄小妹

(1. 清远市展宏防雷工程有限公司阳山分公司, 广东 清远 513100;

2. 广东省阳山县气象局, 广东 清远 513100)

**摘要** 随着风电装机容量增长, 风力发电机单机容量与叶片尺寸持续提升, 雷电已成为威胁风电场安全运行的首要自然因素。本文结合观测、试验与模拟方法, 分析了风力发电机雷电附着特性与危害机制, 开展不同极性雷电接闪特性试验, 验证了改进型先导发展模型的准确性; 通过参数化模拟提出基于边缘接闪器的优化防雷方案, 以期为大型风电机组防雷设计提供参考。结果表明: 正极性雷电对现有接闪系统存在屏蔽效应, 60° 叶片姿态下碳纤维叶片防雷失效概率可达 80%; 在叶片边缘增设点状接闪器可将正极性接闪效率提升至 100%, 有效改善防雷性能。

**关键词** 风力发电机; 雷电防护; 极性效应; 接闪器优化; 数值模拟

中图分类号: TM614

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.039

## 0 引言

风能是最具发展潜力的可再生能源之一, 随着风力发电机单机容量向十兆瓦级跨越, 陆上风力发电机轮毂高度达 245 m, 海上风力发电机叶片直径超 280 m, 高耸结构使风电机组成为雷电首要侵袭目标。据研究表明, 风电场 60% 以上自然灾害事故与雷电相关, 其中叶片损伤占 7%~10%, 控制系统损伤占 43%~51%, 电气系统损伤占 20%~32%。并且, 高耸结构及复杂电气系统易遭雷击, 不仅导致叶片损伤、设备烧毁, 而且对风力发电机停机检修会严重影响电力供应的稳定与安全。本文通过对风力发电机遭受的雷击特性和危害机制进行研究分析, 进一步探究风力发电机防雷举措, 延长风力发电机使用周期, 提高电力供应稳定性和安全性, 为提升风电场防雷能力提供理论支撑与技术参考, 助力风电产业高质量发展。

## 1 风力发电机雷电特性及危害机制

### 1.1 雷电附着的空间分布特征

现场观测表明, 风力发电机叶片雷击点呈显著尖端集中效应。其中, Vestas 公司对 236 支 39 m 叶片的观测显示, 88% 雷击发生在距叶尖 1 m 范围内, 剩余 12% 位于距叶尖 4 m 范围内; 中国电科院对 1 332 台机组的统计显示, 75% 雷击点位于距叶尖 2 m 范围内, 93% 位于距叶尖 4 m 范围内<sup>[1]</sup>。并且, 长度超过 50 m 的叶片中, 叶尖 5 m 区域是雷击风险最高的区域, 如图 1 所示。

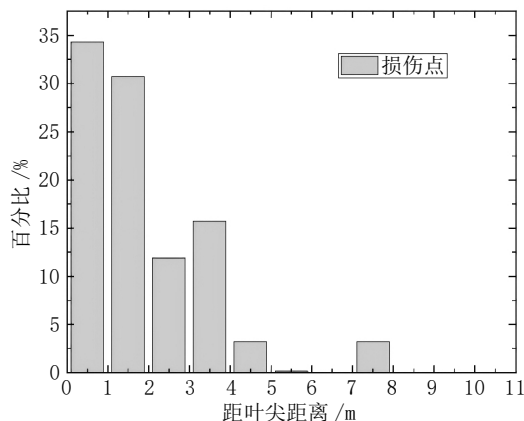


图 1 雷击点分布图

### 1.2 雷电类型与极性效应

风力发电机叶片遭受雷击类型主要为下行雷击和上行雷击。其中, 高度超 100 m 的风力发电机雷击损伤破坏 94% 来自上行雷击。进一步研究分析可知, 雷击的极性 (即电荷的正负) 是决定接闪器能否有效拦截上行雷击, 从而避免叶片损伤的关键因素<sup>[2]</sup>。雷电极性分为负极性雷电和正极性雷电。其中, 正极性冲击下接闪器表面会形成均匀正离子空间电荷云, 对上行负先导产生屏蔽效应, 导致雷电优先附着于叶片无接闪器区域, 接闪失效概率显著提升。

### 1.3 复杂工况的影响机制

在实际环境中, 风力发电机因为长期处于动态、复杂且恶劣的工况下, 且这些工况会显著改变叶片周

作者简介: 李学伦 (1981-), 男, 专科, 技术员, 研究方向: 气象防雷。

围的电场分布、空间电荷行为以及绝缘性能,从而严重干扰甚至破坏风力发电机防雷措施。

## 2 试验过程与数值模拟

### 2.1 试验系统与方法

1. 试验平台搭建。通过 Solidworks 建模软件和 COMSOL Multiphysics 仿真软件协同交互,实现风力发电机叶片雷击仿真模拟试验<sup>[3]</sup>。并在试验基础上,设计了三种叶片类型,分别为 TS 型、TSC 型和 TSE 型。其中,TS 型为玻璃纤维叶片,且叶尖和叶片一侧均连接有接闪器;TSC 型为碳纤维叶片,且叶尖和叶片一侧均连接有接闪器;TSE 型为碳纤维叶片,且除了叶尖连接有接闪器外,叶片相邻侧壁也均连接有接闪器。叶片设置 0° 和 60° 两种典型姿态,每种工况开展 10 次重复冲击试验,通过高速相机与长曝光拍摄记录放电通道。

2. 数值模型构建。采用 COMSOL Multiphysics 建立静电场与空间电荷耦合模型<sup>[4]</sup>,包含泊松方程与电荷输运方程,同时采用改进型先导发展模型模拟雷电附着过程,计算不同位置接闪概率,公式如下。

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_+ + \rho_- \quad (1)$$

式(1)中, $\nabla$ 为散度算子, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\epsilon_r$ 为材料的相对介电常数, $E$ 为电场强度矢量, $\rho_+$ 为正空间电荷密度, $\rho_-$ 为负空间电荷密度。

$$J_{\pm} = \pm D \nabla \rho_{\pm} \pm \mu_{\pm} \rho_{\pm} E \quad (2)$$

式(2)中, $J_{\pm}$ 为正、负离子电流密度矢量, $D$ 为离子的扩散系数, $\mu_{\pm}$ 为正、负离子的迁移率, $\nabla \rho_{\pm}$ 为电荷密度的梯度,驱动扩散过程, $\mu_{\pm} \rho_{\pm} E$ 为电场驱动下的迁移电流。

$$\frac{\partial \rho_{\pm}}{\partial t} + \nabla \cdot J_{\pm} + v \cdot \nabla \rho_{\pm} = -R \frac{\rho_+ \rho_-}{e} \quad (3)$$

式(3)中, $\frac{\partial \rho_{\pm}}{\partial t}$ 为电荷密度随时间的变化率, $\nabla \cdot J_{\pm}$ 为电流密度的散度,表示电荷的净流出, $v$ 为气流

速度矢量, $v \cdot \nabla \rho_{\pm}$ 为对流项,表示气流携带电荷运动, $R$ 为正负离子的复合系数, $e$ 为元电荷, $-R(\rho_+ \rho_-)/e$ 为复合项,表示正负电荷相遇中和而消失的速率。

同时,采用改进型先导发展模型(SLIM)<sup>[5]</sup>模拟雷电附着过程,考虑不同极性先导的起始判据与发展速度,计算不同位置的接闪概率。

### 2.2 模型验证与结果对比

1. 电场分布模拟结果。对 TSC 型和 TSE 型两种风力发电机叶片进行不同电极位置与不同叶片状态下的电场强度数值模拟分析(见图2)。

模拟可知,电极位于叶片正上方时,0° 叶片下顶部侧接闪器电场最高,电场强度达到 80 176 V/m;叶片旋转至 60° 时,叶片边缘区域电场显著提升至 56 964 V/m,远超侧接闪器的 14 647 V/m,表明侧接闪器无法有效覆盖叶片边缘区域。

2. 试验与模拟结果对比。对风力发电机叶片每种工况进行 10 次重复冲击试验,由数值模拟和试验对比分析可知,风力发电机叶片负极性冲击试验结果与模拟基本一致,且 100% 雷电通道均附着于叶尖接闪器。但是,在正极性雷电冲击下,电极位于叶片正上方,且叶片处于 60° 时,TS 型玻璃纤维叶片接闪失效率为 20%,TSC 型碳纤维叶片提升至 30%;针状电极向叶片内侧偏移 50 cm 时,TS 型叶片失效率达 70%,TSC 型碳纤维叶片高达 80%,与模拟结果误差小于 5%,验证了模型的准确性。

### 2.3 不确定性与误差分析

为进一步评估数值模型与试验结果的一致性及其工程可信度,本文从试验系统误差、数值模型误差和统计波动三个维度开展不确定性分析。其中,试验不确定性主要来源于电极定位偏差与叶片材料参数离散性,

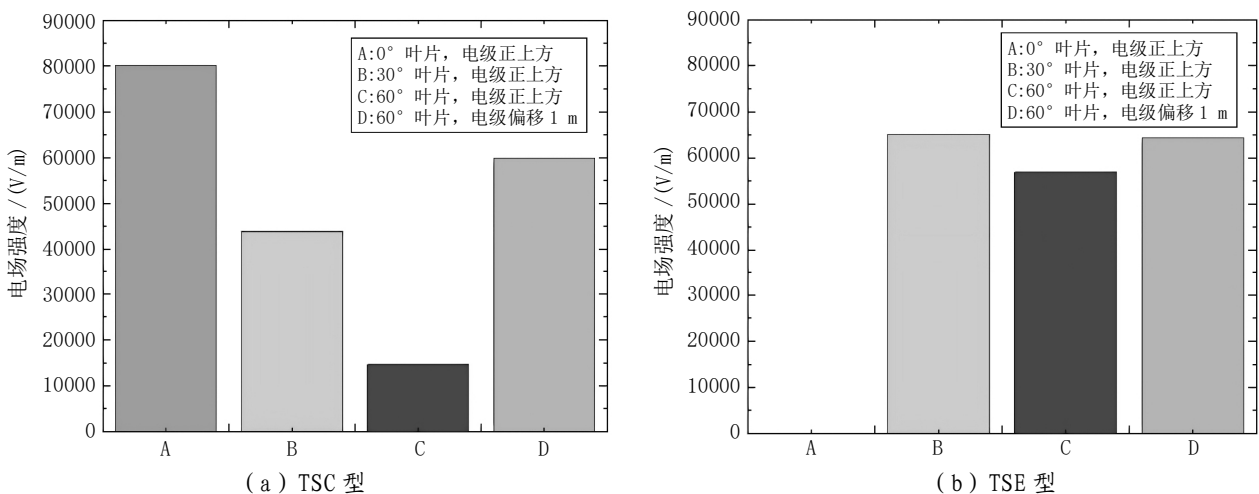


图2 叶片不同状态下接闪器与边缘区域电场强度对比图

模型不确定性主要来源于几何与物理过程简化。另外，为保证模型结果的可重复性与工程可比性，本文基于试验实测数据与数值仿真结果，对关键输出量开展定量误差评估，即通过监测相邻两级网格在同一监测点的偏差，以及采用 10 次重复冲击试验结果的相对标准偏差可知，关键监测点电场强度相对误差可控制在 2% 以内，核心工况下接闪效率相对误差可控制在 5% 以内。

### 3 参数优化与防雷性能提升

#### 3.1 优化方案设计

对于正极性雷电接闪失效问题，提出 TST 型风力发电机及 TST 型为碳纤维叶片，且除了叶尖连接有接

闪器外，在叶片边缘每隔 5 cm 连接一个接闪器，接闪器采用螺钉式可更换设计，与内部引下线可靠连接。

#### 3.2 TST 型数值模拟研究

通过 COMSOL Multiphysics 对风力发电机叶片上接闪器的安装位置与高度进行接闪次数模拟研究（见图 3）。

由此可得，接闪器间距从 10 cm 减小至 5 cm 时，接闪效率从 85% 提升至 100%，继续减小间距对性能提升不显著；接闪器凸起高度从 2 mm 增加至 5 mm 时，接闪效率提升 12%，过高凸起会增加叶片气动阻力，最优高度为 3~5 mm；叶片转速从 0 rpm 提升至 15 rpm 时，

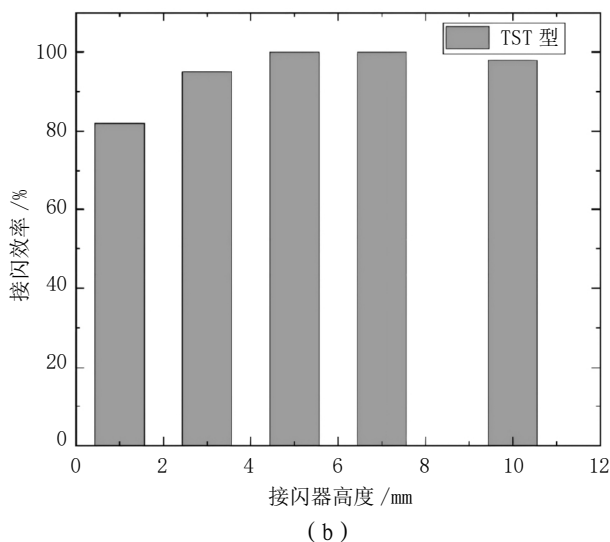
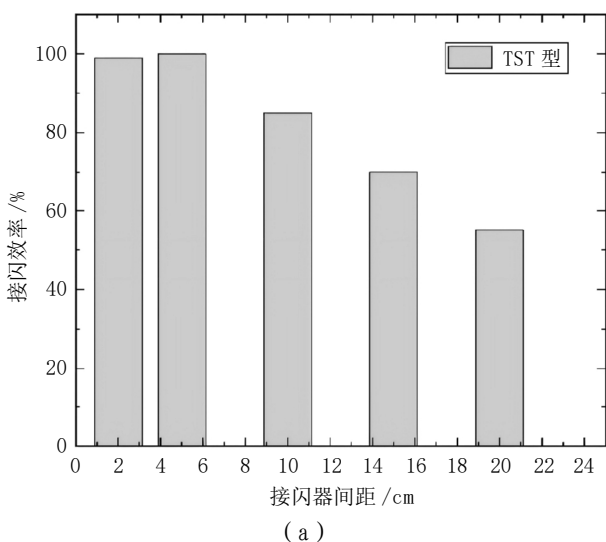


图 3 叶片不同状态下接闪器与边缘区域电场强度对比图

正极性接闪效率从 92% 提升至 100%，表明旋转效应可与边缘接闪器形成协同提升作用。

### 4 结论

本文通过观测、试验与模拟相结合的方法，系统研究风力发电机雷电附着特性与优化防雷方案，并通过 Solidworks 和 COMSOL Multiphysics 软件，进一步提高仿真模拟准确性。研究结果表明：（1）叶片处于 60°，且电极偏移 50 cm 的极端工况下，碳纤维叶片的接闪失效率可达 80%，是导致冬季严重雷击损伤的主要原因。（2）叶片边缘是电场保护盲区，当处于 60° 下边缘电场强度比侧接闪器高 2~3 倍，是接闪失效的高发区域。（3）本文提出的 TST 型风力发电机可有效破坏正离子云的屏蔽效应，将正极性雷电接闪效率提升至 95% 以上，且不影响负极性接闪性能，有效提升风力发电机防雷性能。在大型碳纤维叶片、高海拔与高纬度多雷地区的风力发电机中，可优先采用 TST 型，

显著降低雷击损伤风险，为新一代超大容量风力发电机防雷提供理论基础和数据支撑。

#### 参考文献：

- [1] 胡春林. 考虑不同雷击位置和防雷措施的风电场雷电暂态特性及防护研究 [J]. 电气技术与经济, 2025(09):55-63.
- [2] 边晓燕, 吴勇, 周歧斌, 等. 考虑极性效应的风机下行雷击风险的定量表征 [J]. 电瓷避雷器, 2024(06):73-84.
- [3] 傅毓斐. 风力发电机玻璃纤维增强复合材料叶片雷击防护系统优化研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [4] 吉倩, 李梓樱, 仇云利. 基于 COMSOL 软件探究电磁场中的三维运动问题: 以“螺旋运动”教学为例 [J]. 物理教学, 2026, 48(03):12-15.
- [5] 韩以昆, 杨智博, 姚京源, 等. 雷击风机上行先导发展模型及其稳定起始拐点判据 [J]. 电气应用, 2025, 44(01): 108-117.