第 52 卷 第 4 期：1793-1802 高电压技术 Vol.52, No.4: 1793-1802
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250265

风机叶片雷击接闪特性模拟试验

王 欢，胡 琴，黄旭东，林晖尧，舒立春，蒋兴良
（重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站，重庆 400044）

摘 要：目前，风机叶片时常遭受雷击而损坏，导致严重的经济损失；但针对叶片接闪特性的试验研究较为缺乏且不全面。为此，在雪峰山野外站搭建了缩比风机叶片雷击放电试验平台，考虑雷电的极性与位置，模拟试验研究了静止和自然旋转叶片的接闪特性，分析了雷击概率及失效机制。结果表明：风机叶片的正负极性雷击接闪特性具有极性效应，接闪点及其雷击概率在负极性时较为集中，而在正极性时较为分散。负极性雷击时，叶片接闪系统的拦截性能较好，尤其是接闪器 1(但附近会出现烧蚀损伤)。正极性雷击时，接闪器 1 的雷击概率明显下降并向其余接闪点转移，使得其他接闪器非常重要；叶身的整体雷击风险约为 10%，并且旋转叶片的叶身遭受迎风面的雷击风险高达 25%，故必须重视正极性雷击防护。与静止相比，叶片旋转会导致潜在接闪点的雷击概率值发生变化。避雷针可以很好拦截来自背风面的雷电以保护机舱。具有绝缘性的玻璃纤维增强复合材料叶片对内部引下线的电场屏蔽作用有限是导致接闪器拦截失败的原因，建议叶片外覆导体屏蔽引下线电场以优化接闪系统的防护性能。该文模拟试验结果可为风机叶片接闪系统的优化设计提供指导。
关键词：风机叶片；静止与旋转；接闪特性；雷击概率；失效机制

Simulation Experimental of Lightning Attachment Characteristics of Wind Turbine Blades

WANG Huan, HU Qin, HUANG Xudong, LIN Huiyao, SHU Lichun, JIANG Xingliang
(Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract：At present, wind turbine blades are often damaged by lightning strikes, resulting in serious economic losses; however, experimental studies on the lightning attachment characteristics of the blades are relatively lacking and incomplete. In this paper, a lightning discharge experimental platform for scaled-down wind turbine blades was set up at Xuefeng Mountain field station;moreover,the polarity and location of lightning were taken into consideration, and the lightning attachment characteristics of static and naturally rotating blades were simulated experimentally investigated and the probability of lightning strikes and the failure mechanism were analyzed. The results show that the positive and negative lightning strike attachment characteristics of wind turbine blades have a polarity effect, and the attachment point and its lightning strike probability are more centralized in the negative polarity, while more scattered in the positive polarity. In negative lightning strike, the overall interception performance of the blade lightning protection system (LPS) is better, especially receptor 1 (but ablation damage occurs in the vicinity). Under positive lightning strike, the lightning strike probability of receptor 1 is significantly reduced and transferred to the rest of the attachment point, enabling the other receptor to be very important; however, the overall lightning strike risk to the blade body is about 10%, and the risk of lightning strikes on the windward side of the rotating blade body is up to 25%, so it is necessary to pay attention to the protection of the positive lightning. Compared with stationary, blade rotation will lead to changes in the probability value of lightning strike at potential attachment points. Lightning rods are good at intercepting lightning from the leeward side to protect the nacelle. The limited shielding effect of glassfibre reinforced plastics blades with insulating properties on the electric field of the internal lead wires is the reason for the failure of receptor interception, and it is recommended that the outer conductor of the blades shield the lead wires from the electric field to optimize the protection performance of the LPS. The simulation results of this paper can provide guidance for the optimized design of wind turbine blade LPS.
Key words：wind turbine blades; static and rotating; attachment characteristics; lightning strike probability; failure mechanisms

基金资助项目：中央高校基本科研业务费专项资金(2023CDJYXTD-005)；国家自然科学基金(51977016；52077020)。
Project supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (2023CDJYXTD-005), National Natural Science Foundation of China (51977016, 52077020).

0 引言

为响应我国“双碳”目标，风电装机容量及其发电量占总发电量的比重均逐年提升[1-2]。然而，风机常建设在风能资源丰富的山区、沿海、沙戈荒等雷电多发区，使得叶片面临较高的雷击风险[3]；尤其是随着单机容量的不断增加，叶片因雷击而损坏问题更加突出，严重影响风电场的安全运行[4]。因此，开展风机叶片雷击接闪特性模拟试验研究，可为叶片接闪系统的理论研究和优化设计提供帮助。

为保护叶片免遭雷击，风机叶片配置有多个接闪器并经引下线接地的接闪系统[5]，但现场观测数据表明叶片接闪系统仍然会出现拦截失败的情况，这会导致叶片遭受雷击而损坏，如：分层、脱黏、外壳或尖端脱离[6]。为此，学者们对叶片的雷击放电进行了自然观测、仿真计算及模拟试验研究[7]。其中，虽然空气间隙放电具有非线性特征，通过缩比模型开展模拟试验并不能从物理层面完全还原真实的雷击过程，但在放电规律上具有相似性，并且可进行重复性试验[8]；同时标准 IEC 61400-24 也建议进行模拟试验[5]。因此，开展长间隙雷击放电模拟试验是研究叶片接闪特性的有效方式，所得结论可外推至实际风机叶片以提供一定的参考价值[9]。

叶片引雷能力是指其主动吸引雷电放电的能力，与叶片的材料、状态及所处环境、接闪器形状有关。学者们通过向弧形电极施加冲击电压对含单个接闪器及其引下线的叶片开展放电试验，通过击穿电压和放电过程，研究了叶片旋转[8]、接闪器形状[9-10]、间隙尺度[11-12]和接地电阻[13]等对叶片引雷能力的影响，但并未考虑正极性雷击和下行先导与叶片的相对位置的影响，并且也不适合研究含多个接闪器的叶片接闪系统的拦截性能和失效机制。

叶片接闪特性是指叶片遭受雷击时接闪系统有效拦截并将雷电流安全疏导至接地系统的能力。文献[14]通过试验对比棒与弧形两种电极形式下的旋转风机叶片雷击放电物理过程，发现棒电极更容易起始下行先导，下行先导长度较长，这与实际雷击过程相似，故推荐采用棒电极研究风机叶片的雷击接闪特性。当采用棒电极时，文献[15]对 5 m 长的叶尖样段(仅含有叶尖接闪器)开展了雷电极性和叶片角度及侧面距离对接闪特性的影响，并未考虑多接闪器和旋转的影响。利用缩比风机，文献[16]开展了旋转对叶片接闪特性影响机制的研究，但仅考虑了电极在机舱正上方；文献[17]开展了多个下行先导位置和叶片角度下的接闪特性试验，但并未分析叶片旋转和正极性放电的情况；文献[18]在[17]的基础上探讨了冲击电压波形和雷电极性的影响，但并未考虑叶片旋转；文献[19]开展了相邻风机对接闪特性的影响，但也未考虑叶片旋转。

综上所述，针对叶片引雷能力的研究较多，但对叶片接闪特性的研究较为缺乏且不够全面。因此，为了真实模拟雷击风机叶片的放电过程，完善并获得可信的叶片雷击接闪特性数据。本文在重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站(简称：雪峰山野外站)搭建了缩比风机叶片长间隙雷击放电试验平台，以标准操作波模拟真实雷击放电，并且考虑雷电的极性和下行先导的不同方位，通过模拟试验获得了叶片在静止和自然旋转下的雷击接闪特性，分析了其雷击概率，讨论了叶片雷击接闪的极性效应和失效机制。

1 试验的对象、平台及方法

1.1 试验对象

现有文献表明，遵循相似性原则开展缩比模型放电试验可行[17]，并已在输电线路[20]、引雷塔[21]、飞机[22]及风机叶片[16-19]的雷击放电模拟试验中广泛采用。某 3 MW 风机叶片长度约为 50 m，每支叶片配置有 3 组接闪器，并且间隔 10.4 m 等距布置，机舱处安装有长度约 2.1 m 的避雷针。因此，本文以该 3 MW 风机为原型，设计了 1:30 的缩比风机作为试验对象，如图 1 所示。

其中，塔筒高度为 3.5 m，叶片长度为 1.68 m、材质为玻璃纤维增强复合材料；单支叶片接闪系统包含 3 个直径均为 8 mm 的接闪器，分别距叶片尖端 3 cm/38 cm/73 cm，分别称为接闪器 1、2、3，并经 2.5 mm^2 的引下线相连；机舱处安装了长度和直

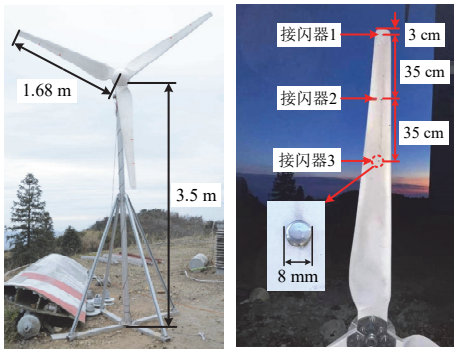


图 1 试验对象

Fig.1 Experimental object

径分别为 7 cm 和 0.8 cm 的避雷针。

1.2　试验平台

雪峰山野外站的海拔为 1 500 m、最大风速为 35 m/s，相邻山脉建设有风电场，所以其环境条件与实际风电场十分相似，具有环境等效性；并且建设有 4 800 kV 冲击电压发生器及其控制平台、分压器，十分适合开展风机叶片长间隙雷击放电模拟试验。因此，考虑到气压、温湿度和海拔影响雷击放电发展过程[23]，进而潜在影响叶片的雷击接闪特性；本文以雪峰山野外站为试验场所较为合理，可以较好模拟实际叶片的接闪特性，搭建的缩比风机叶片长间隙雷击放电试验平台示意如图 2 所示。其中，为真实模拟下行先导，选择棒电极作为高压电极[15-16]；使用单反相机记录放电路径和接闪点。

自然雷击属于超长间隙放电现象，现有试验技术无法直接全过程模拟，但可以遵循相似性理论，通过模拟下行先导发展的最后阶段来研究叶片的雷击接闪特性[17]。雷电击距很好地刻画了先导发展最后阶段的跃变过程[24]，所以为保证模拟试验与自然雷击放电的等效性，采用 IEC 62305-1:2006 推荐的雷电击距公式来确定放电间隙，即[9, 17-19]：

$$d = 10 \times I_{\mathrm{p}}^{0.65} \tag{1}$$

式中：d 为雷电击距，m；I_{p} 为雷电流峰值，kA。

选择 30 kA 的典型雷电流峰值，计算得到雷电击距约为 91 m；结合 1:30 的缩小比例，将棒电极与缩比风机中心 O 点的距离确定为 3 m。考虑到自然雷击放电发展路径的随机性和多样性，将棒电极分别置于风机塔筒的正上方(位置 A)、迎风面(位置 B)、背风面(位置 C)及侧面(位置 D)，以模拟叶片遭受不同方位上的雷击，并且位置 B、C、D 处于同一水平面且与中心点 O 的水平距离为 2.2 m，见图 2。

1.3　试验方法

实际风机叶片遭受雷击时可能处于停机或运行状态。因此，为获得较为真实、可信的试验数据，本文对叶片在静止(不同角度)和自然旋转下的雷击接闪特性进行模拟试验研究，试验方法如下：

1）试验波形：操作波产生的空间电场与自然雷击放电在近地面产生的电场近似[14,16,25]，故本文选择±250/2 500 μs 的标准操作波为试验波形，以模拟叶片遭受真实雷击。

2）叶片状态：叶片在静止状态时的角度分别设置为典型值 0°、30°和 60°，如图 3(a)所示。现有文献采用变频电机驱动叶片旋转，以模拟 2~3 种典型转速，但实际叶片转速随风速的改变而变化；叶片遭受雷击时处于复杂气流场中并且其转速具有随机性；为此，本文为更为真实模拟叶片遭受雷击时的情况，首次采用自然风速驱动叶片旋转，模拟试验中接闪时的叶片瞬时转速如图 3(b)所示。

3）接闪模拟试验：(1)确定电极位置和叶片状态(静止或旋转)。(2)选择电压极性，并对棒电极施加电压，其电压值保证接闪点可随机分布在叶片的任意位置及机舱上。(3)通过单反相机视频记录放电的过程和接闪点，并且每种工况下进行 20 次重复放电试验；(4)对记录的数据进行处理和分析，得到叶片接闪时的转速、电弧路径和接闪点。

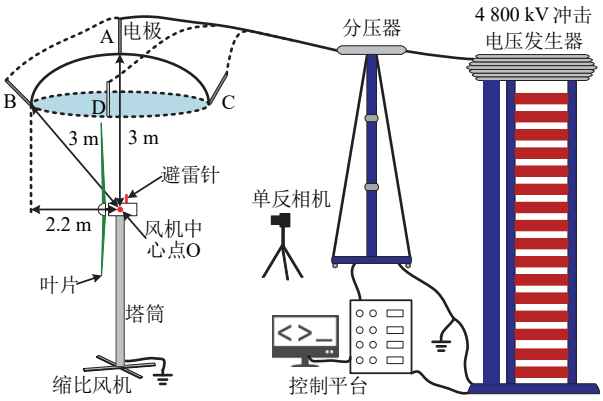
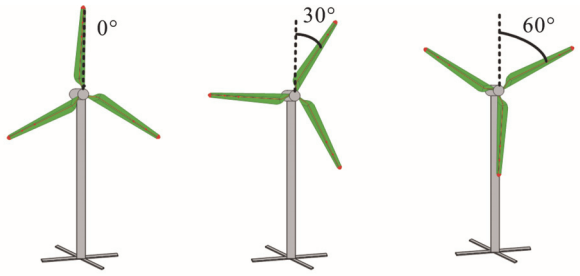
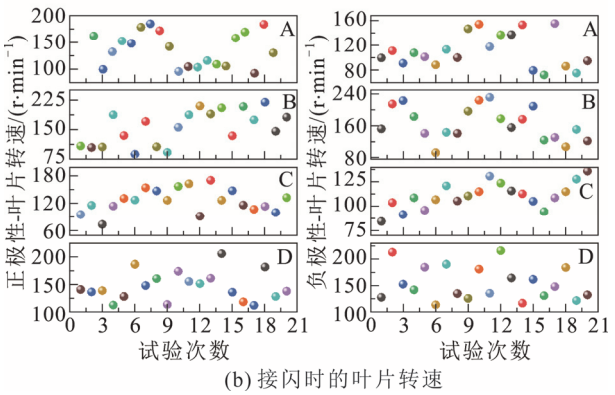


图 2　试验平台

Fig.2　Experimental platform



(a) 静止状态下的叶片角度



(b) 接闪时的叶片转速

图 3　风机叶片状态

Fig.3　State of wind turbine blades

2 试验结果与分析

当雷电下行先导发展时，风机潜在接闪点有接闪器 1—3、叶身及避雷针，并分别以 N_1、N_2、N_3、N_4 和 N_5 代表其遭受的雷击次数。因此，本文定义某一情况下风机潜在接闪点的雷击概率 P_i 为：

$$P_i=\frac{N_i}{N_{\text{all}}}\times 100\% \tag{2}$$

式中：i=1、2、3、4、5，为与雷击次数对应的接闪点；N_{all} 为某情况下的雷击放电总次数；P_i 为接闪点 i 的雷击概率。其中，叶身的雷击概率用于刻画其遭受的雷击风险，而各潜在接闪点的雷击概率之和为 1。

2.1 叶片负极性雷击接闪特性

2.1.1 叶片负极性接闪模拟试验结果

根据前述试验方法，得到静止与旋转状态叶片在负极性雷击下的模拟试验结果分别如表 1 和表 2 所示。静止叶片典型负极性雷击放电路径如图 4 所示。由图 4 可知。

1）叶片静止时，接闪点分布较为集中。当电极在正上方和侧面时，随着叶片角度的增加，接闪点均为接闪器 1，其典型放电路径分别为图 4(a)和(d)。当电极在迎风面时，接闪点为接闪器 1 和 2，且仅在 60°时出现 2 次击中接闪器 2，图 4(b)为 60°时击中接闪器 1 的放电路径；当电极在背风面时，接闪点为接闪器 1 和避雷针，且随着叶片角度的增加，接闪点从接闪器 1 向避雷针转移，并在 60° 时全部击中避雷针，如图 4(c)所示。

2）叶片旋转时，接闪点分布较为集中。当电极在正上方和侧面时，接闪点均为接闪器 1；当电极在迎风面时，接闪点为接闪器 1 和 2，但仅出现 1 次击中接闪器 2；当电极在背风面时，接闪点为接闪器 1 和避雷针，并有 8 次击中避雷针的情况。

3）叶片静止与旋转时的模拟试验结果对比，发现叶片在负极性雷击时均未出现击中叶身的情况，接闪点的分布均较为集中，而当电极在背风面时，避雷针的雷击次数均较高，说明避雷针不可或缺，对保护机舱免遭雷击起着重要作用。

2.1.2 叶片负极性雷击概率分布

基于表 1 和表 2 的模拟试验结果，通过式(2)计算每个或所有电极位置下，叶片静止与旋转时潜在接闪点的雷击概率分布，结果分别如图 5 和图 6 所示。从而可知：

表 1 静止叶片的接闪特性(负极性)

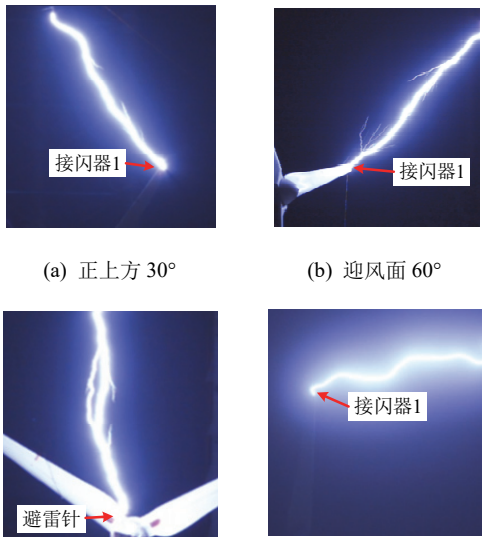
Table 1 Attachment characteristics of stationary blades(negative)

位置	角度/(°)	接闪点雷击次数				
		接闪器 1	接闪器 2	接闪器 3	叶身	避雷针
A	0	20	0	0	0	0
	30	20	0	0	0	0
	60	20	0	0	0	0
B	0	20	0	0	0	0
	30	20	0	0	0	0
	60	18	2	0	0	0
C	0	20	0	0	0	0
	30	4	0	0	0	16
	60	0	0	0	0	20
D	0	20	0	0	0	0
	30	20	0	0	0	0
	60	20	0	0	0	0

表 2 旋转叶片的接闪特性(负极性)

Table 2 Attachment characteristics of rotating blades(negative)

位置	接闪点雷击次数				
	接闪器 1	接闪器 2	接闪器 3	叶身	避雷针
A	20	0	0	0	0
B	19	1	0	0	0
C	12	0	0	0	8
D	20	0	0	0	0



(a) 正上方 30° (b) 迎风面 60°

(c) 背风面 60° (d) 侧面 0°

图 4 静止叶片负极性雷击放电路径

Fig.4 Negative lightning discharge path of stationary blades

1）叶片静止时，接闪点的雷击概率分布较为集中。当电极在正上方、迎风面和侧面时，接闪器(或者说叶片接闪系统)的雷击概率为 100%，尤其接闪器 1 的雷击概率不低于 96.67%，接闪器 2 仅在迎风面时有 3.33%的雷击概率；当电极在背风面时，接闪器 1 和避雷针的雷击概率分别为 40%和 60%，说明避雷针能有效拦截背风面的雷电下行先导，对保护机舱有重要作用。在所有电极位置下，接闪器 1—3、叶身和避雷针的雷击概率分别为 84.17%、0.83%、0%、0%和 15%。因此，本文的模拟试验结果表明：叶片静止时，叶身的雷击风险为 0，接闪器 1 和避雷针对保护叶片免遭雷击具有重要作用，而接闪器 2 虽然雷击概率较小，但其保护作用同样不可忽视。

2）叶片旋转时，接闪点的雷击概率分布也较为集中。当电极在正上方、迎风面和侧面时，接闪器的雷击概率为 100%，尤其是接闪器 1 的雷击概率不低于 95%，而接闪器 2 仅在迎风面时有 5%的雷击概率；当电极在背风面时，接闪器 1 和避雷针分别为 60%和 40%，说明避雷针能有效拦截来自背风面的下行先导，以保护机舱免遭雷击。在所有电极位置下，接闪器 1—3、叶身和避雷针的雷击概率分别为 88.75%、1.25%、0%、0%和 10%。因此，本文的模拟试验结果表明：叶片旋转时，叶身的雷击风险也为 0，接闪器 1 和避雷针对保护叶片免遭雷击具有重要作用，而接闪器 2 的雷击概率虽然只有 1.25%，但其保护作用同样不可忽视。

3）叶片静止与旋转时的模拟试验结果对比，发现叶片旋转会改变叶片邻域空间电荷分布，进而使得各潜在接闪点的雷击概率值发生变化。比如：来自迎风面的负极性雷电下行先导击中接闪器 2 的概率增加 1.67%，而背风面的负极性雷电下行先导击中接闪器 1 的概率增加 20%，但避雷针的雷击概率恰好减少 20%，说明叶片旋转会影响接闪器 2 和避雷针的负极性雷击接闪特性。然而，无论叶片静止与旋转，叶身的雷击概率均为 0%，说明叶片接闪系统对负极性雷击放电具有很好的拦截效果。

2.1.3　叶片负极性雷击电弧现象

在雷击放电模拟试验中，与静止叶片相比，叶片旋转会影响其附近空间的电荷分布，进而影响雷击放电通道，导致接闪器附近出现明显的“拉弧”现象，如图 7 所示，与文献[26]中的实际观测结果相符，说明本文模拟试验可信。

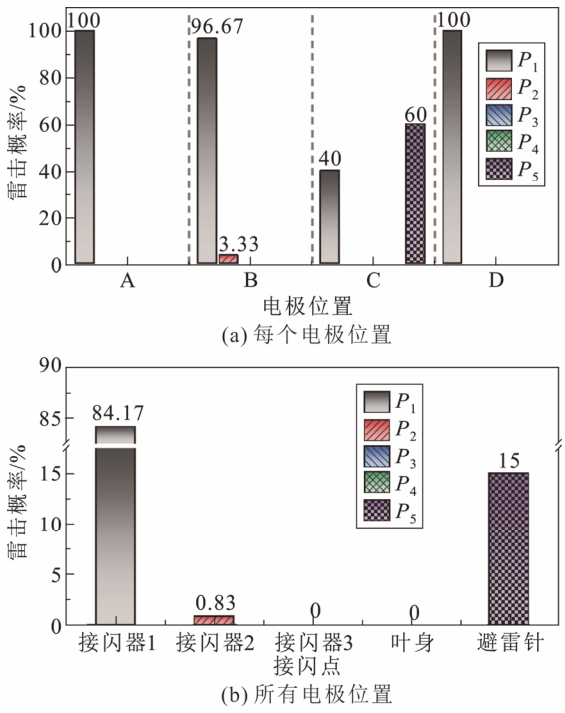


图 5　静止叶片的负极性雷击概率分布

Fig.5　Negative lightning strike probability distribution for stationary blades

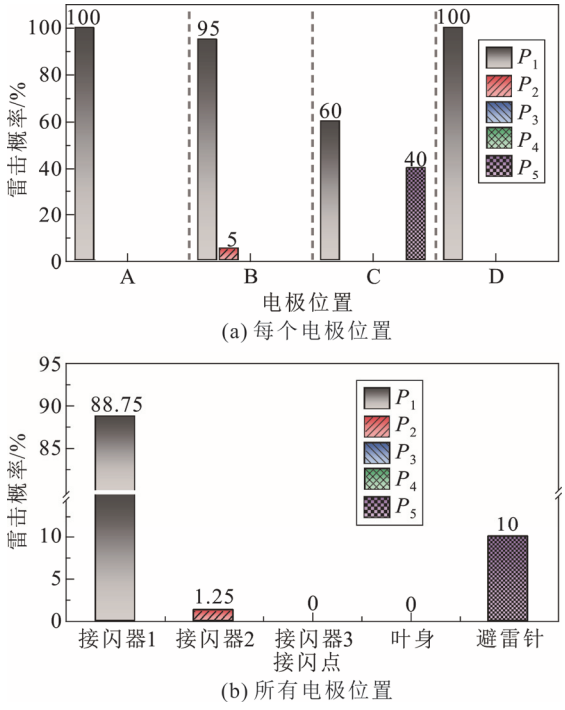


图 6　旋转叶片的负极性雷击概率分布

Fig.6　Negative lightning strike probability distribution for rotating blades

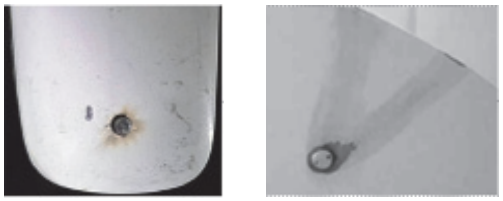
此外，虽然接闪器和避雷针能很好地保护叶片免遭负极性雷击，但成功接闪并不意味着不会损坏叶片和接闪器。本文模拟试验发现，接闪器附近出



(a) 本文试验结果 (b) 实际观测结果[26]

图 7 叶片旋转造成的“拉弧”现象

Fig.7 “Arcing” due to blade rotation



(a) 本文试验结果 (b) 实际观测结果[27]

图 8 叶片接闪器附近的烧蚀痕迹

Fig.8 Ablation marks near blade receptor

现了电弧烧蚀痕迹，与文献[27]中的实际观测结果相符，如图 8 所示。因本文采用冲击电压模拟真实雷击导致能量较小，仅在接闪器附近留下轻微的电弧痕迹，并未造成叶片损伤；但自然雷击的电流多为数十千安，其能量非常大，可能会造成接闪器熔毁或者接闪器与叶片的交界处严重受损，故接闪器与叶片连接处的防雷击烧蚀损伤问题也应予以重视，例如可在交界处加入陶瓷等耐烧蚀绝缘材料。

2.2 叶片正极性雷击接闪特性

2.2.1 叶片正极性接闪模拟试验结果

根据前述试验方法，得到静止与旋转状态叶片在正极性雷击下的模拟试验结果分别如表 3 和 4 所示。叶片典型正极性雷击放电路径如图 9 所示。从而可知：

1）叶片静止时，接闪点分布较为分散。当电极在正上方和迎风面时，接闪点均为接闪器和叶身，随着叶片角度的增加，接闪器 1 的雷击次数逐渐减小，接闪点从叶尖向叶根移动，并且均在 30°时出现击中叶身的情况，图 9(a)为正上方 30°时击中接闪器 1 和 2 之间的叶身，图 9(b)为迎风面 60°时击中接闪器 3。当电极在背风面时，接闪点为接闪器 2、叶身和避雷针；随着叶片角度的增加，叶身的雷击次数减小，而避雷针的雷击次数增加，图 9(c)为 0°时击中接闪器 2 和 3 之间的叶身。当电极在侧面时，接闪点为接闪器 1 和 2、叶身，仅在 0°时分别出现 2 次击中叶身和接闪器 2，随着叶片角度的增加，接闪点全都聚集在接闪器 1。

2）叶片旋转时，接闪点较为分散。当电极在正上方时，所有潜在接闪点均被击中。当电极在迎风面时，除避雷针外，其余接闪点均被击中，且此时叶身的雷击次数最高为 5 次，如图 9(d)击中接闪器 2 和 3 之间的叶身。当电极在背风面时，接闪点为叶身和避雷针，且避雷针的雷击次数达 18 次，可见背风面的雷电下行先导更加偏好避雷针。当电极在侧面时，接闪点为接闪器 1 和 2。

表 3 静止叶片的接闪特性(正极性)

Table 3 Attachment characteristics of stationary blades(positive)

位置	角度/(°)	接闪点雷击次数				
		接闪器 1	接闪器 2	接闪器 3	叶身	避雷针
A	0	20	0	0	0	0
	30	12	2	0	6	0
	60	4	5	11	0	0
B	0	16	4	0	0	0
	30	5	10	3	2	0
	60	1	10	9	0	0
C	0	0	4	0	11	5
	30	0	0	0	3	17
	60	0	2	0	0	18
D	0	16	2	0	2	0
	30	20	0	0	0	0
	60	20	0	0	0	0

表 4 旋转叶片的接闪特性(正极性)

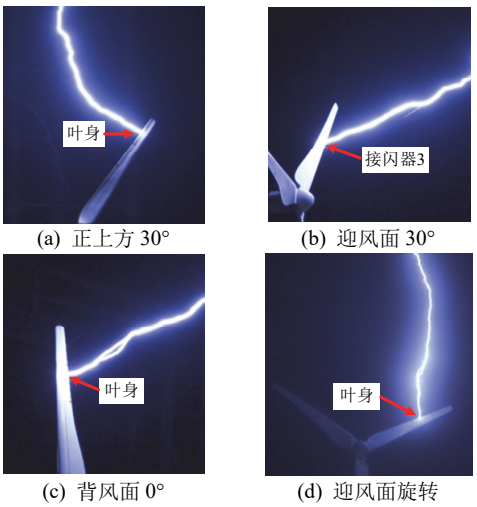
Table 4 Attachment characteristics of rotating blades(positive)

位置	接闪点雷击次数				
	接闪器 1	接闪器 2	接闪器 3	叶身	避雷针
A	13	3	1	2	1
B	5	8	2	5	0
C	0	0	0	2	18
D	17	3	0	0	0

3）叶片静止与旋转时的模拟试验结果对比，发现叶片在正极性雷击时接闪点分布均较为分散，均出现击中叶身的情况；但击中叶身次数最多时电极位置有所不同，静止时电极位于背面，旋转时电极为位于迎风面，可见叶片旋转会影响接闪特性。而当电极在背风面时，避雷针的雷击次数均较高，说明避雷针对保护机舱起着重要作用。

2.2.2 叶片正极性雷击概率分布

基于表 3 和 4 的模拟试验结果，通过式(2)计算



(a) 正上方 30°　(b) 迎风面 30°

(c) 背风面 0°　(d) 迎风面旋转

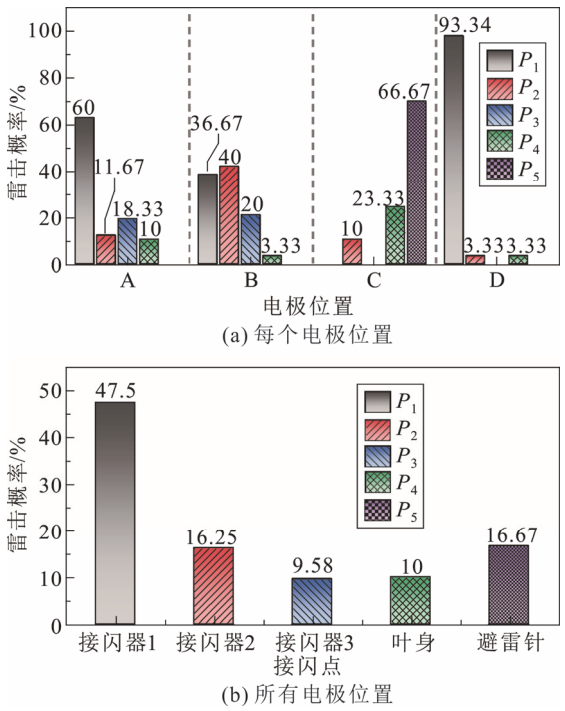
图 9　叶片正极性雷击放电路径

Fig.9　Positive lightning discharge path of blades

每个或所有电极位置下，叶片静止与旋转时潜在接闪点的雷击概率分布，结果分别如图 10 和 11 所示。从而可知：

1）叶片静止时，接闪点的雷击概率较为分散。当电极在正上方和迎风面时，雷击概率分布相似，只是不同接闪点的概率值有明显差异，与正上方相比，迎风面时接闪器 1 和叶身的雷击概率分别下降 23.33%和 6.67%，而接闪器 2 和 3 的雷击概率分别升高 28.33%和 1.67%。当电极在背风面时，叶身的雷击概率高达 23.33%；当电极在侧面时，接闪器 1 和 2 的雷击概率分别为 93.34%和 3.33%。此外，不同电极位置下，叶身均有不低于 3.33%的雷击概率；说明叶身存在雷击风险，并且在背风面时最大(高达 23.33%)，正上方次之(达 10%)。所有电极位置下，接闪器 1—3、叶身和避雷针的雷击概率分别为 47.5%、16.25%、9.58%、10%和 16.67%，与静止叶片负极性雷击时相比，除避雷针的雷击概率外均变化较为明显，接闪器 1 下降了 36.67%，接闪器 2 和 3 分别增加了 15.42%和 9.58%，而叶身的雷击概率从无增加至 10%，说明接闪器 1 的雷击概率在向其余接闪点转移。因此，本文模拟试验结果表明：静止叶片叶身的正极性雷击风险为 10%，并且接闪器 1 的拦截效果有限，使得接闪器 2 和 3 对叶片正极性雷击保护极为重要。

2）叶片旋转时，接闪点的雷击概率较为分散。当电极在正上方时，接闪器 1—3 的雷击概率逐渐减小，而叶身和避雷针的雷击概率分别为 10%和 5%。当电极在迎风面时，接闪器 1—3 均有不低于 10%的雷击概率，而叶身的雷击概率更是高达 25%。当

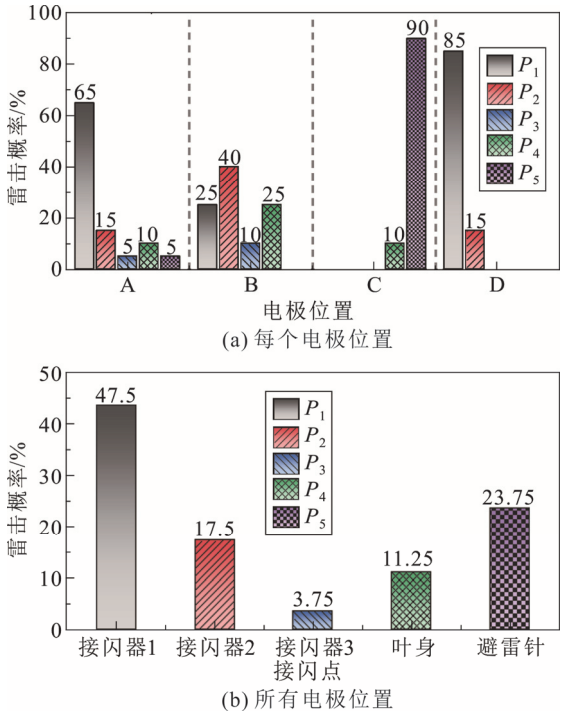


(a) 每个电极位置

(b) 所有电极位置

图 10　静止叶片的正极性雷击概率分布

Fig.10　Positive lightning strike probability distribution for stationary blades



(a) 每个电极位置

(b) 所有电极位置

图 11　旋转叶片的正极性雷击概率分布

Fig.11　Positive lightning strike probability distribution for rotating blades

电极在背风面时，叶身和避雷针的雷击概率分别为 10%和 90%。当电极在侧面时，接闪器 1 和 2 的雷击概率分别为 85%和 15%。所有电极位置下，接闪

器 1—3、叶身和避雷针的雷击概率分别为 43.75%、17.5%、3.75%、11.25%和 23.75%；与旋转叶片负极性雷击时相比，接闪器 1 的雷击概率下降明显，下降幅度达 45%，其余接闪点的雷击概率均增加，如接闪器 2、3 和避雷针的雷击概率分别增加了 16.25%、3.75%和 13.75%，而叶身的雷击概率从 0%增加至 11.25%，说明接闪器 1 的雷击概率在向其余接闪点转移。因此，本文模拟试验结果表明：旋转叶片的叶身正极性雷击风险为 11.25%，并且接闪器 1 的拦截效果有限，使得接闪器 2、3 和避雷针对旋转叶片正极性雷击保护尤为重要。

3）叶片静止与旋转时的模拟试验结果对比，发现叶片旋转会改变叶片邻域空间电荷分布，使得接闪点的正极性雷击概率值发生变化。比如：电极在侧面时，与静止叶片相比，旋转叶片的接闪器 1 和叶身的雷击概率分别下降 8.34%、3.33%，而接闪器 2 的雷击概率则上升 11.67%；静止叶片的叶身在电极为背风面时出现最大概率 23.33%，而旋转叶片在电极为迎风面时出现最大概率 25%。从整体看，旋转叶片的叶身雷击风险相较于静止叶片高 1.25%，说明叶片旋转时叶身更易遭受正极性雷击。

3 讨论

3.1 风机叶片正负雷击接闪对比

根据前述分析，发现无论叶片状态如何，叶片在正负极性雷击下的接闪特性具有极性效应。即：叶片在负极雷击下，接闪点及其雷击概率分布较为集中，主要为接闪器 1 和避雷针(仅当雷电在背风面时)。叶片在正极性雷击下，接闪点及其雷击概率分布较为分散。这是因为与负极性雷击时相比，叶片在遭受正极性雷击时：(1)上行先导起始难度更大，导致下行先导需要更进一步发展而提供更强的电场，但这会造成各潜在接闪点之间的场强差异减小，并且考虑到某点上行先导起始后并不会抑制其他部位形成上行先导，因此会形成多竞争负极性上行先导，导致接闪器拦截失败。(2)上行先导对下行先导的吸引能力更弱，仅仅依靠上下行先导自由发展并成功连接，但竞争先导的存在使得上下行先导的连接更具随机性。

综合考虑所有电极位置，当叶片静止时，负、正极性雷击下，叶身的雷击风险分别为 0%和 10%，避雷针的雷击概率分别为 15%和 16.67%；当叶片旋转时，负、正极性雷击下，叶身的雷击风险分别为 0%和 11.25%，避雷针的雷击概率分别为 10%和 23.75%。因此，叶片接闪系统对负极性雷击的拦截性能较好，但会造成接闪器附近表面出现烧蚀现象而导致叶片损伤，以及接闪器可能发生熔毁，必须予以重视；而叶片接系统对正极闪性雷击的拦截性能有待提高，会导致叶片直接击穿而受损，考虑到正极性雷击对叶片造成的危害比负极性雷击更大，故在进行叶片接闪与防护试验时，必须考虑正极性雷击的影响。此外，正负极性雷击下，避雷针对机舱的保护作用均比较明显，其作用性不言而喻。

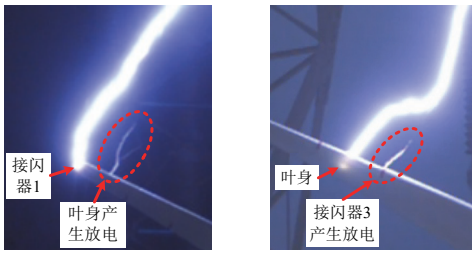
3.2 风机叶片接闪的失效机制

叶片接闪的物理过程可统一描述为[28]：当雷电下行先导发展时，叶片各潜在接闪点的电场强度不断增大，导致周围空气电离并起始电晕放电；当电荷量积累到一定程度时，不稳定先导起始并逐渐发展，直至形成稳定上行先导，并朝下行先导发展方向发展直至成功连接，因此各潜在接闪点的电场强度决定最终的接闪点。

当前风机多采用玻璃纤维增强复合材料叶片，其具有绝缘属性；当雷电先导向下发展时，不能很好地对叶片内部的引下线起着电场屏蔽的作用，导致接闪器没有绝对的接闪优势，使得接闪器和引下线附近均会聚集电荷，形成感应电场并在场强畸变处产生流注或者先导放电；叶片介质的阻挡会导致电荷在叶片内表面聚集，会使得叶片外表面场强增大并诱导产生流注或先导放电，导致叶片表面形成与接闪器竞争的上行先导。当叶片表面的上行先导优先与下行先导连接时，出现击穿叶片而附着于引下线的情况，从而造成接闪器拦截失败。在模拟试验过程中观测到的叶片放电现象也证实该观点，即：

当叶片遭受来自正上方的正极性雷击时：(1)如图 12(a)所示，静止叶片的接闪器 1—2 之间的引下线产生了放电，并在叶片外表面形成了与接闪器 1 具有竞争的流注或者上行先导放电，但竞争优势较弱，使得接闪器 1 成功拦截；(2)如图 12(b)所示，旋转叶片的接闪器虽然产生流注或者先导放电，但引下线产生的放电导致叶片表面形成流注并转化为上行先导，并且与接闪器 3 相比具有明显的竞争优势，造成其优先与下行先导连接，导致接闪器拦截失败，出现击穿叶片的现象。

因此，在进行叶片雷击防护优化设计时，可考虑在叶片外表面增加合适的接地导体，不仅可以屏蔽引下线的电场，以抑制其产生起始放电，而且增



(a) 静止状态　(b) 旋转状态

图 12　叶片接闪器或引下线接闪的试验现象

Fig.12　Experimental phenomena of lightning attachment to blade receptors or ground conductor

强了叶片外表面的接闪能力，从而提高叶片接闪系统的拦截性能。

4　结论

1）风机叶片在正负极性雷击下接闪特性具有极性效应。即：负极性雷击下，叶片的接闪点及其雷击概率分布较为集中，接闪器 1 的雷击概率非常高；叶片接闪系统的拦截性能较好，叶身无雷击风险。正极性雷击下，叶片的接闪点及其雷击概率相对较为分散；接闪器 1 的雷击概率明显下降并向其他接闪点转移，使得接闪器 2、3 和避雷针对叶片的保护尤为重要；而叶片接闪接闪系统拦截性能有待改善，叶身存在较大的雷击风险。

2）负极性雷击下，接闪器 1 成功拦截时，其附近表面会出现烧蚀现象，可能导致叶片损伤，接闪器融毁；而正极性雷击下，叶身的雷击风险约 10%，尤其是旋转叶片遭受迎风面的雷击时叶身的雷击风险高达 25%，导致叶片直接击穿而受损。因此，叶片接闪系统的雷击防护有待改善，尤其是提高对其正极性雷击的拦截性能。此外，正负极性雷击下，避雷针均可以很好拦截背风面的雷电下行先导，故其保护作用不可忽视。

3）旋转会影响叶片邻域空间的电荷分布，进而影响其接闪特性，导致潜在接闪点的雷击概率值发生变化；尤其是正极性雷击下，叶片旋转比静止时叶身更容易遭受雷击。

4）玻璃纤维增强复合材料叶片对内部引下线的电场屏蔽作用有限，使得引下线产生流注和先导放电，进而诱导雷电击穿叶片，故建议在叶片外表面增加导体，以屏蔽引下线电场而改善接闪性能。

值得注意的是，虽然本文采用缩比风机模型进行重复性雷击放电模拟试验不能完全反映实际风机叶片遭受雷击的情况，但这却是当前研究风机叶片雷击放电的重要手段，所得数据和结论可为叶片雷击放电规律和接闪系统的优化设计提供数据支持和参考价值。因此，未来还将对不同材质和结构的叶片开展雷击接闪特性试验，并进行对比研究。

参考文献　References

[1] 胡　琴，王　欢，舒立春，等. 覆冰条件下风力发电机叶片防/除冰方法综述[J]. 电工技术学报，2024，39(17)：5482-5496.
HU Qin, WANG Huan, SHU Lichun, et al. Review of anti-/de-icing methods for wind turbine blades under icing conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5482-5496.

[2] 李　勇，常樊睿，彭衍建，等. 分散式新能源并网稳定性问题分析与控制方法[J]. 高电压技术，2025，51(4)：1543-1559.
LI Yong, CHANG Fanrui, PENG Yanjian, et al. Analysis and control methods of stability problems for decentralized renewable generations integrated into grid[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1543-1559.

[3] 施广全，张义军，陈绍东，等. 风力发电机组防雷技术进展综述[J]. 电网技术，2019，43(7)：2477-2487.
SHI Guangquan, ZHANG Yijun, CHEN Shaodong, et al. Review of lightning protection technique progress of wind turbines[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2477-2487.

[4] 蔡　力，柯逸丰，王建国，等. 张北风电场雷击风机光电同步观测[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2171-2179.
CAI Li, KE Yifeng, WANG Jianguo, et al. Simultaneous photoelectric observations of natural lightning stroke on wind turbines in Zhangbei wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2171-2179.

[5] IEC. Wind energy generation systems-part 24: lightning protection: IEC 61400-24: 2019[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2019.

[6] CANDELA GAROLERA A, MADSEN S F, NISSIM M, et al. Lightning damage to wind turbine blades from wind farms in the U. S.[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1043-1049.

[7] 文习山，邓冶强，王　羽，等. 风力发电机叶片雷击接闪特性研究综述[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2511-2521.
WEN Xishan, DENG Yeqiang, WANG Yu, et al. Review of research on lightning striking performance of wind turbine blade[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2511-2521.

[8] 文习山，屈　路，王　羽，等. 叶片转动对风机引雷能力影响的模拟试验研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(7)：2151-2158.
WEN Xishan, QU Lu, WANG Yu, et al. Experimental study of the influence of the blade rotation on triggered lightning ability of wind turbine's blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2151-2158.

[9] RADIČEVIĆ B M, SAVIĆ M S. Experimental research on the influence of wind turbine blade rotation on the characteristics of atmospheric discharges[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1181-1190.

[10] 屈　路，文习山，王　羽，等. 接闪器对旋转风机引雷能力影响的试验研究[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1628-1634.
QU Lu, WEN Xishan, WANG Yu, et al. Experimental study on the influence of the air terminal on triggered lightning ability of rotation wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1628-1634.

[11] 邓冶强，王　羽，文习山，等. 不同间隙尺度下叶片旋转对风力发电机引雷能力影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(19)：6399-6410.
DENG Yeqiang, WANG Yu, WEN Xishan, et al. Experiment of blade

rotation on lightning strikes of wind turbines at different gap scales[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6399-6410.

[12] WANG Y, DENG Y Q, LIU Y L, et al. Influence of blade rotation on the lightning stroke characteristic of a wind turbine[J]. Wind Energy, 2019, 22(8): 1071-1085.

[13] 方超颖，李炬添，张　曾，等. 接地电阻对风机桨叶引雷能力影响模拟试验[J]. 电网技术，2015，39(6)：1709-1713.
FANG Chaoying, LI Jutian, ZHANG Zeng, et al. Experimental study of the influence of the grounding resistance on triggered lightning abilities of wind turbine's flabellum[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1709-1713.

[14] WU Q, YANG Q H, FANG C Y, et al. Scaled experiment and observation of the lightning discharge process of rotating wind turbines under different shapes of high-voltage electrodes in the laboratory[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 231: 110339.

[15] GUO Z X, LI Q M, MA Y F, et al. Experimental study on lightning attachment manner to wind turbine blades with lightning protection system[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 635-646.

[16] 郭子炘，李庆民，于万水，等. 旋转状态下风机叶片雷击接闪特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(16)：4951-4959.
GUO Zixin, LI Qingmin, YU Wanshui, et al. Experimental study on lightning attachment manner of the rotating wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4951-4959.

[17] 王　宇，王建国，周　蜜，等. 双接闪器叶片风电机组缩比模型雷击附着特性[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5307-5315.
WANG Yu, WANG Jianguo, ZHOU Mi, et al. Lightning attachment characteristic of wind turbine blade with two-receptors[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5307-5315.

[18] WANG J G, WANG Y, ZHOU M, et al. Lightning attachment behavior of wind turbine generator with blades equipped with two lightning receptors[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(5): 663-670.

[19] ZHOU M, HUANG J K, ZHAO W H, et al. Experimental evaluation of lightning attachment characteristic of two adjacent wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 879-887.

[20] 何俊佳，蒋正龙，贺恒鑫，等. 直流输电线路绕击耐雷性能及防护措施试验分析[J]. 高电压技术，2011，37(1)：21-27.
HE Junjia, JIANG Zhenglong, HE Hengxin, et al. Experimental analysis on lightning shielding performance and protective measures of DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 21-27.

[21] 王　羽，黄　强，彭向阳，等. 接地电阻对高塔引雷能力影响的模拟试验研究及放电观测[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4211-4219.
WANG Yu, HUANG Qiang, PENG Xiangyang, et al. Discharge process observation and experiment of the influence of the grounding resistance on triggered lightning abilities of high tower[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4211-4219.

[22] 李继国，郎需义. H425 直升机雷击分区[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1420-1424.
LI Jiguo, LANG Xuyi. Lightning strike zoning of helicopter H425[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1420-1424.

[23] 马宇飞，张　黎，闫江燕，等. 风机叶片雷击上行先导的起始物理机制与临界长度判据[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5975-5982.
MA Yufei, ZHANG Li, YAN Jiangyan, et al. Inception mechanism of lightning upward leader from the wind turbine blade and a proposed critical length criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5975-5982.

[24] 周歧斌，刘灿祥，程　彧，等. 风机叶片雷击附着区域数值仿真及防护[J]. 高电压技术，2017，43(8)：2739-2745.
ZHOU Qibin, LIU Canxiang, CHENG Yu, et al. Numerical simulation and protection of wind turbine blade lightning attachment zones[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2739-2745.

[25] 蒋凌峰，蒋正龙，谢鹏康，等. 融冰风机叶片的接闪特性试验[J]. 高电压技术，2024，50(1)：331-338.
JIANG Lingfeng, JIANG Zhenglong, XIE Pengkang, et al. Experimental study on lightning attachment characteristics of the ice-melting wind turbine blades[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 331-338.

[26] MIKI M, MIKI T, WADA A, et al. Observation of lightning flashes to wind turbines[C]//Proceedings of 2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Cagliari, Italy: IEEE, 2010: 1-7.

[27] PEESAPATI V, COTTON I, SORENSEN T, et al. Lightning protection of wind turbines-a comparison of measured data with required protection levels[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(1): 48-57.

[28] 于万水. 不同极性雷云下旋转风机叶片邻域的空间电荷演化特性与雷击先导发展模型[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2022.
YU Wanshui. The evolution characteristics of space charge in the neighboring domain of rotating wind turbine blade under positive/negative thundercloud and lightning leaders propagation model[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2022.



王　欢
1993—，男，博士生
主要从事外绝缘与风电叶片防雷防冰技术方面的研究工作
E-mail: 1173394186@qq.com

WANG Huan
Ph.D. candidate



胡　琴(通信作者)
1981—，男，博士，教授，博导
主要从事复杂环境电气外绝缘、电网防冰减灾技术方面的研究工作
E-mail: huqin@cqu.edu.cn

HU Qin
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-02-27　在线出版日期　2025-06-25　　编辑　曹昭君