

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003645

强风环境下腕臂绝缘子雪晶沉积特性仿真分析

李彦哲¹ 李 刚¹ 李宝学² 牛建雄³

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院 兰州 730070; 2. 中国铁路兰州局集团有限公司嘉峪关供电段 嘉峪关 735100; 3. 中国铁路兰州局集团有限公司银川供电段 银川 750000)

摘 要:中国铁路线大量分布在风区雪区,研究接触网腕臂绝缘子表面雪晶沉积特性,对预防冬季“雪闪”和提高供电可靠性有重要意义。利用有限元仿真软件模拟风速环境下 QBG-25 型铁路用绝缘子雪晶沉积量,计算绝缘子表面流场速度和静压分布,分析雪晶类型和风速风向对绝缘子表面雪晶沉积的影响。仿真结果表明,在相同风速风向下,雪晶类型对绝缘子表面雪晶沉积量影响较小,其中实心枝状雪晶沉积量最大;绝缘子表面雪晶沉积量在平安装方式下随风速的增大而增大,斜安装方式下随风速的增大呈现先增大后逐渐减小的趋势;当风速为 10 m/s、风向在 $\pm 45^\circ$ 范围内,绝缘子表面雪晶沉积量与风向关系呈现“V”型分布,风向倾角为负角度时,安装方式对雪晶沉积量影响严重;伞裙表面雪晶沉积量随风向倾角的增大而增大,伞裙迎风面雪晶沉积量大于伞裙背风面沉积量。

关键词: 腕臂绝缘子;沉积特性;有限元仿真;风速;风向

中图分类号: TM852 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4037

Simulation analysis of snow crystal deposition characteristics of cantilever insulators in strong wind environment

Li Yanzhe¹ Li Gang¹ Li Baoxue² Niu Jianxiong³

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Jiayuguan Power Feed Section, Jiayuguan 735100, China;
3. China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Yinchuan Power Feed Section, Yinchuan 750000, China)

Abstract: Chinese railway lines are widely distributed in the windy and snowy areas. The study of the deposition characteristics of snow crystal on the surface of the cantilever insulator is of great significance in preventing snow flash in the winter and improving the reliability of power supply. In this paper, the finite element simulation software was used to simulate amount of snow crystal deposition of railway insulators under wind speed. The velocity and static pressure distribution of flow field on insulator surface are calculated to analyze the influence of wind speed, wind direction and snow crystal type on the surface deposition of insulators. The simulation results show that the snow crystal type has little effect on the insulator amount of snow crystal deposition under the same wind speed and direction. Solid dendritic snow crystal deposition is the largest. The amount of snow crystal deposition of insulator was installed horizontally increased with the increase of wind speed and the amount of snow crystal deposition of insulator was installed obliquely increased first and then decrease with the increase of wind speed, When the wind angle is negative, the installation method has a serious impact on the snow crystal deposition. The relationship between amount of snow crystal deposition on the surface of insulator and wind direction presents a “V”-shaped distribution when the wind speed was 10 m/s and wind direction was within $\pm 45^\circ$. The snow crystal deposition distribution on the surface of shed increases with the increase of the wind direction, and the snow crystal deposition on the windward side of shed is larger than that on the leeward surface of the shed.

Keywords: cantilever insulator; deposition characteristics; finite element simulation; wind speed; wind direction

0 引言

我国地域辽阔气候复杂多变,积雪分布具有由南向北递增和随海拔升高而明显增厚的总趋势^[1],且东北、华北和西北地区冬季常伴有大风天气^[2],冬季风雪天气容易造成绝缘子表面大量积雪,融化后使绝缘子表面污秽受潮发生闪络事故,影响铁路供电可靠性和列车运行安全性^[3-4]。因此,分析风速环境下气流及雪晶对接触网腕臂绝缘子性能的影响,对预防冬季“雪闪”、提高供电可靠性和绝缘子优化设计具有重要意义。

目前,国内外学者分别采用户外人工积雪试验、室内人工模拟试验和数值计算方法对绝缘子积雪及沉积特性进行了大量研究,包括积雪内空气、雪晶和液态水含量对雪粘附能力的影响,以及温度、气压、海拔对雪体体积密度的影响。绝缘子“雪闪”的因素包括雪晶结构、温度、湿度及绝缘子表面污秽类型和结构安装方式^[5]。在不同风速环境下,针对不同粒径颗粒(一般 $<50\text{ }\mu\text{m}$)^[6-7],风速增大会加重绝缘子表面积污,风速过大则会降低碰撞概率^[8-10]。对于粒径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的污秽颗粒,其运动轨迹主要取决于流体曳力,而 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 时,电场力作用更为明显,且在直流输电线路下积污最为严重^[11-13]。上述研究主要针对积雪自身属性和风速环境下小粒径颗粒积污特性,对粒径大于 $1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 质量小于 0.1 mg 的雪晶沉积研究具有一定的局限性。绝缘子仿真方法主要为物理仿真和数学仿真,物理仿真主要通过有限元软件,建立真实物理模型,对绝缘子表面电场分布、积污特性以及受力损坏情况进行仿真分析,数学仿真以数学方程式相似为基础,建立抽象数学模型,主要针对绝缘子电弧放电模型、图像处理和优化算法模拟分析^[14-15]。绝缘子积污仿真采用欧拉-拉格朗日方法,先将空气视为连续相进行求解,再将颗粒视为离散相求解计算,也采用欧拉-欧拉两相流法,将颗粒和空气都作为连续相仿真计算^[16-17]。

本文针对接触网绝缘子出现的“雪闪”现象,以铁路既有线路腕臂绝缘子 QBG-25 为研究对象,采用有限元仿真软件,建立流场、颗粒跟踪场及流体-颗粒相互作用的多物理场仿真模型,将碰撞系数和分布系数作为雪晶沉积量的特征参数,分析不同雪晶类型、风速风向对不同安装方式下腕臂绝缘子表面雪晶沉积特性的影响及雪晶分布变化趋势。

1 数学模型及控制方程

1.1 有限元原理

工程问题主要通过偏微分方程形式描述,但偏微分方程求解困难,求解出的解析解与实际工程问题有很大

偏差。通过有限元法将整体结构离散为多个单元组成的模型,单元间通过单元节点连接,将整体结构理想化假设与具体工程问题的物理场控制方程结合,并施加于结构内各个单元,组成刚度方程,结合边界条件求解,在单元求解过程中,引入形函数插值和高斯数值积分,求解出各个单元节点处状态变量的近似解,最终得出整体结构的偏微分方程近似解。绝缘子在强风环境下的积雪沉积特性主要通过流场和颗粒场耦合求解计算,采用欧拉-拉格朗日计算方法,将空气视为连续相求解后,对颗粒进行离散相计算。

1.2 流场数学模型及控制方程

在流场模块中,绝缘子在风速作用下的工况,将空气视为不可压缩的牛顿流体,考虑绝缘子表面空气流体容易发生弯曲,模型采用 RANS $k-\varepsilon$ 湍流模型^[16]。其控制方程组为:

$$\left\{\begin{aligned} \rho(v \cdot \nabla)U &= \nabla \cdot [-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla v + (\nabla v)^T) - \frac{2}{3}\rho kI] + F \\ \nabla \cdot v &= 0 \\ \rho(v \cdot \nabla)k &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho\varepsilon \\ \rho(v \cdot \nabla)k &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \\ &C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ \mu_T &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ p_k &= \mu_T [\nabla v : (\nabla v + (\nabla v)^T)] \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: v 为流体速度; I 为应力张量; μ_T 、 μ 分别为湍流动力粘度和空气动力粘度; ρ 为空气密度; F 为体积力; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; C_μ 为黏度系数; σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为湍流模型参数; p_k 为湍动能源项。

1.3 颗粒场数学模型及控制方程

在流体颗粒跟踪场中,将雪晶等效为球形颗粒;雪晶的初速度与流场速度相同且具有湍流扩散性;雪晶直径与类型直接相关,一般为 $0.5 \sim 4\text{ mm}$;电场力主要作用在直流电场且粒径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒,腕臂绝缘子运行环境为交流电场,颗粒直径远 $>50\text{ }\mu\text{m}$,因此电场力对雪晶作用很小,不考虑电场力的影响。颗粒跟踪场中只考虑雪晶所受的重力和曳力。其控制方程组为:

$$\left\{\begin{aligned} \frac{m_p dv_p}{dt} &= F_g + F_D \\ F_g &= m_p g(\rho_p - \rho)/\rho_p \\ F_D &= [m_p(v - v_p)]/\tau \\ \tau &= (\rho_p d^2)/(18\mu) \end{aligned}\right. \quad (2)$$

式中： m_p 为颗粒质量； v_p 为颗粒速度； t 为颗粒运动时间； F_g 、 F_D 分别为颗粒所受的重力和曳力； ρ_p 为颗粒密度； g 为重力加速度； τ 为松弛时间； d 为颗粒直径。

2 仿真分析

2.1 物理模型建立

腕臂绝缘子是电气化铁路接触网支持装置的一部分,安装方式分为水平安装和斜安装,平安装绝缘子与支柱倾角为 0°,斜安装绝缘子与支柱倾角为 45°。铁路既有线路大量采用瓷质棒式绝缘子 QBG-25,结构如图 1 所示,腕臂绝缘子主要由金具、伞裙和杆径 3 部分组成,其中伞裙又分为上表面、下表面和伞边缘,采用 SolidWorks 绘制绝缘子三维模型,如图 2 所示。

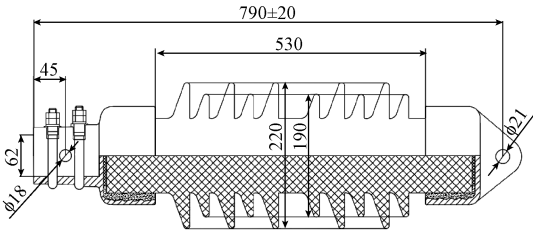


图 1 绝缘子结构示意图
Fig. 1 Sketch map of insulator structure

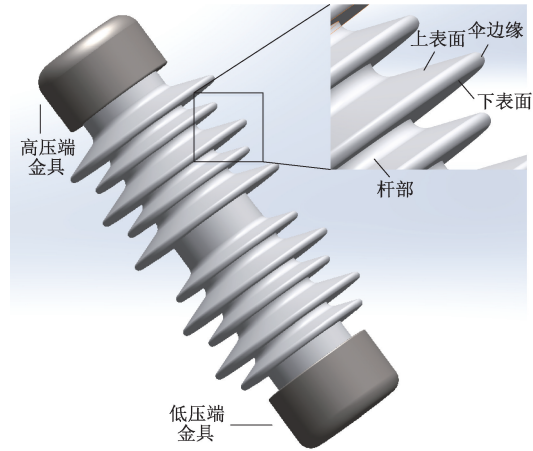


图 2 三维绝缘子模型
Fig. 2 Three-dimension model of insulator

以图 2 三维腕臂绝缘子模型作为研究对象,构建绝缘子风洞模型如图 3 所示。为减小计算误差,提供足够的计算域模拟充分发展的湍流,风洞模型大小为绝缘子结构高度的 5 倍,本文设置风洞模型大小为 4 800 mm×4 800 mm×4 500 mm,入口出口侧分别设置为速度入口和压力出口;风洞外壁面为滑移壁面,减小外壁面对风洞计算的影响,绝缘子壁面为内壁面,设置为无滑移黏附

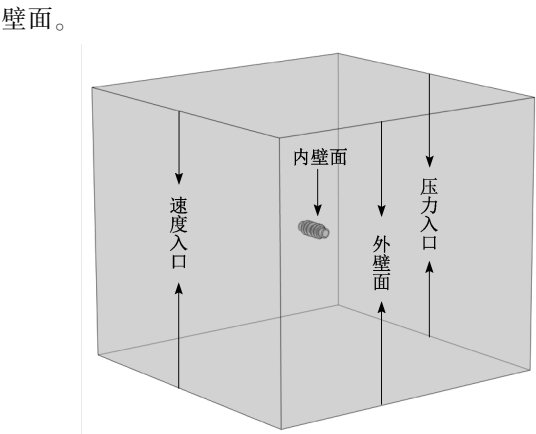


图 3 风洞仿真模型
Fig. 3 Model of wind tunnel simulation

由于单位体积内雪晶含量总数超过千万个,为准确描述雪晶在绝缘子将碰撞系数 λ 和分布系数 δ 作为雪晶沉积量的表征参数,碰撞系数表征绝缘子雪晶沉积程度,分布系数表征绝缘子各部位雪晶沉积分布情况,其表达式为:

$$\lambda = N_i / N \tag{3}$$

式中： N_i 为绝缘子表面黏附的雪晶总数； N 为释放的雪晶总数。

$$\delta = N_i / N_i \tag{4}$$

式中： N_i 为绝缘子表面不同部位对应的黏附雪晶数。

2.2 雪晶类型对沉积特性的影响

雪晶结构由外部温度和水汽过饱和度决定,温度在 -4 ℃ ~ -10 ℃ 时,雪晶结构为柱状,-10 ℃ ~ -22 ℃ 时,雪晶结构为板状,当温度进一步下降时,在 -23 ℃ 时再次变为显著的柱状。空气中水汽饱和程度将进一步影响晶体结构,雪晶从空心板状(过饱和度 0.1 g·m⁻³ 时)变为空心枝状(过饱和度 0.2 g·m⁻³ 时),当过饱和度进一步上升时变为实心枝状(过饱和度 0.3 g·m⁻³ 时)。根据最常见的 3 种雪晶结构,分别设置 1 mm 板状、1 mm 柱状、4 mm 空心枝状和 4 mm 实心枝状 4 种雪晶类型,根据雪晶拟合公式计算质量,其表达式为:

$$m = AD^B \tag{5}$$

式中： A 、 B 为雪晶对应的拟合系数； m 为雪晶质量； D 为雪晶粒径。各类雪晶对应的 A 、 B 值及相关系数如表 1 所示。

表 1 雪晶拟合系数
Table 1 Fitting coefficient of snow crystal

雪晶类型	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i> /mm
板状	0.021 9	1.828	0.2~1.8
柱状	0.035 7	2.355	0.15~1.6
枝状	0.006 7	2.101	1.5~4.0

以腕臂绝缘子两种安装方式为前提,风速为 10 m/s 的条件下,分析四种雪晶类型绝缘子表面沉积特性,结果如图 4 所示。

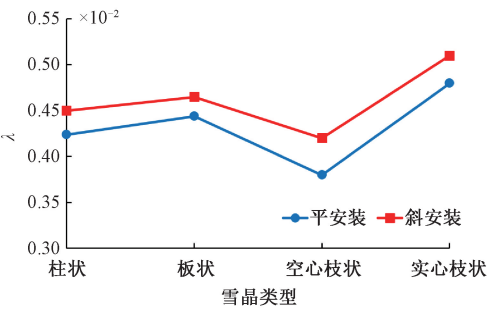


图 4 绝缘子表面雪晶碰撞系数与雪晶类型的关系
Fig. 4 Relation between snow crystal collision coefficient and snow crystal type on insulator

4 种雪晶类型对绝缘子表面碰撞系数影响较小,碰撞系数变化范围小于 20%,斜安装方式下绝缘子表面雪晶碰撞系数高于平安装碰撞系数 6%,雪晶类型对不同安装方式下腕臂绝缘子表面雪晶沉积影响较小。

雪晶实心枝状所受曳力和重力最大,对气流的跟随性较好,增加了与绝缘子表面碰撞的可能性,因此碰撞系数较高。空心枝状受曳力大小与实心枝状所受曳力大小相同,但其重力仅为实心枝状的 30%,雪晶在绝缘子表面产生的垂直碰撞力无法与重力达到平衡状态,且重力引起的沉降作用无法抵消一定程度的气流漩涡影响,雪晶黏附在绝缘子表面概率较低,导致雪晶碰撞系数较低。

2.3 风速对沉积特性的影响

风是绝缘子积污的主要因素之一,风速对绝缘子表面雪晶碰撞系数有着显著影响。绝缘子表面风速和静压分布反映了风速环境下流体中雪晶与绝缘子碰撞的剧烈程度。以腕臂绝缘子两种安装方式为前提,分析风速在 10、15、20、25 和 30 m/s 五种工况下,板状雪晶与绝缘子表面碰撞系数的关系,结果如图 5 所示。图 6、7 所示分别为风速 10 和 30 m/s 时,绝缘子速度云图和表面静压分布情况。

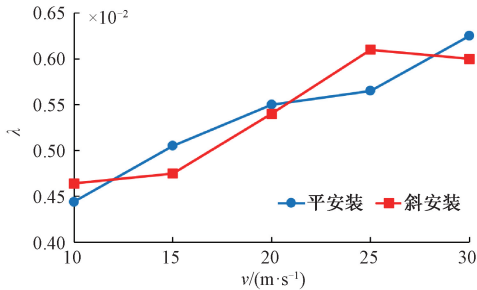


图 5 绝缘子表面雪晶碰撞系数的风速的关系
Fig. 5 Relation between snow crystal collision coefficient and wind speed on insulator

由图 5 可知,两种安装方式下,雪晶所受曳力占主导地位,曳力随风速的增大而增大,平安装雪晶碰撞系数呈现近似线性增长,斜安装碰撞系数随风速的增大呈现先增大后逐渐下降的趋势,在 25 m/s 时达到碰撞系数峰值。

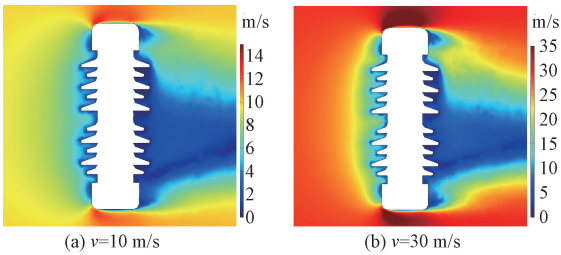


图 6 不同风速下的速度云图
Fig. 6 The velocity nephogram under different wind speeds

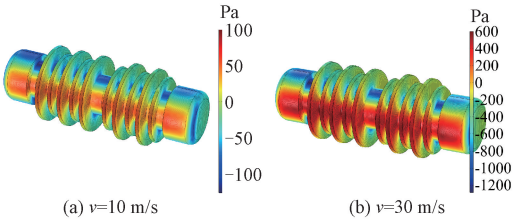


图 7 不同风速下的绝缘子表面静压分布
Fig. 7 Static pressure under different wind speeds

由图 6 可知,空气流体在绝缘子表面形成一定厚度的边界层,边界层厚度随风速的增大逐渐减小,湍流脉动更为剧烈,雪晶与绝缘子表面碰撞系数提高。由图 7 可知,迎风侧静压远高于背风侧静压,风速从 10 增加到 30 m/s 的过程中,绝缘子表面静压极大值从 65.1 Pa 增大到 583.9 Pa,风速增大使得绝缘子表面静压显著增大,雪晶与绝缘子表面碰撞的程度加剧。斜安装绝缘子因其 45°倾角的安装方式,风速增大过程中,绝缘子表面流体变得更为复杂,风速达到 25 m/s 后,湍流强度的增大和边界层加剧分离,导致雪晶跟随性下降,与绝缘子表面的碰撞系数逐渐减小,积雪量随之减小。

2.4 风向对沉积特性的影响

接触网腕臂绝缘子沿线路两侧布置,其表面承受不同方向的气流,气流角度 β 表征风向,垂直于绝缘子轴向为 0°,气流偏向高压端金具时倾角为负,反之为正,风向范围 $\beta \in [-45^\circ, 45^\circ]$ 。不同风向下,绝缘子表面雪晶碰撞系数与风向关系如图 8 所示。

由图 8 可知,两种安装方式下,绝缘子表面雪晶碰撞系数呈现“V”型分布, $\beta = 0^\circ$ 时,雪晶与绝缘子碰撞系数最小,碰撞系数随着风向倾角的增大而逐渐增大。 $\beta \in [-45^\circ, 0^\circ]$ 时,由于绝缘子安装倾角不同,气流呈

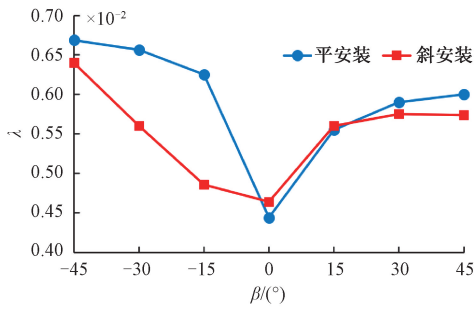


图 8 绝缘子表面雪晶碰撞系数与风向关系

Fig. 8 Relation between snow crystal collision coefficient and wind direction on insulator

现不同的湍流作用,平安装绝缘子雪晶碰撞系数大于斜安装碰撞系数,安装方式对雪晶沉积量影响严重。如图 9 所示,风向倾角逐渐增加,伞裙背风面边界层逐渐加厚,伞裙表面湍流脉动加剧,气流与伞裙垂直接触面逐渐增大,雪晶与绝缘子表面碰撞概率变大,碰撞系数随之提高。

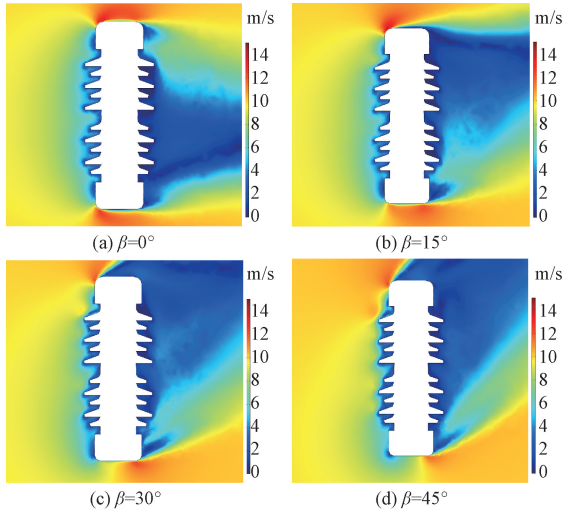


图 9 不同风向下的速度云图

Fig. 9 The velocity nephogram under different wind directions

2.5 沉积分布特性分析

绝缘子不同部位的积污量分析是优化设计绝缘子的重要参数,由图 2 的三维绝缘子模型,将其分为金具、伞裙和杆径 3 部分,伞裙又分为上表面、下表面和伞边缘。在不同的安装方式下,风速为 10 m/s 时,绝缘子表面雪晶分布系数与风向关系如图 10 所示,图 11 所示为风向倾角 $\beta = 45^\circ$ 和 $\beta = 0^\circ$ 时,高、低压端金具方向的绝缘子表面静压分布。

由图 10 可知, $\beta \in [-45^\circ, 45^\circ]$ 时,绝缘子安装方式对其表面雪晶分布系数影响较小,随着风向倾角的逐渐增大,伞裙碰撞系数增大,伞裙雪晶分布系数也逐渐增

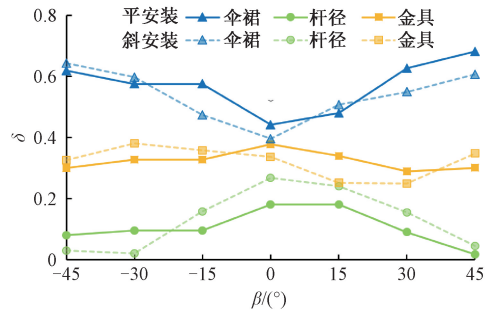


图 10 绝缘子表面雪晶分布与风向关系

Fig. 10 Relation between snow crystal distribution coefficient and wind direction on insulator

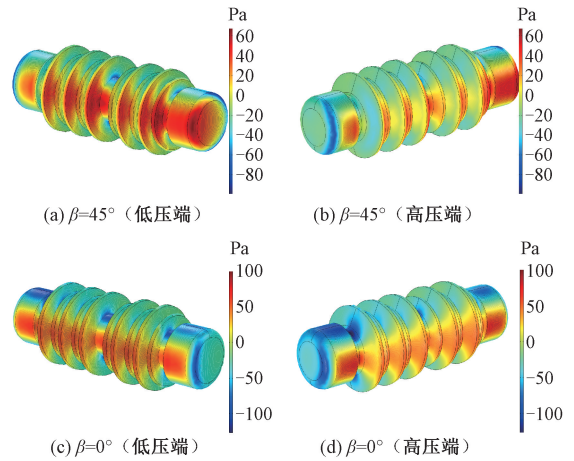


图 11 不同风向下的绝缘子表面静压分布

Fig. 11 Static pressure under different wind directions

大;杆径与气流垂直接触面随着风向倾角的增大而逐渐减小,其分布系数也逐渐减小。由图 11 可知, $\beta = 0^\circ$ 时,绝缘子表面迎风面静压分布均匀,风向倾角逐渐增大,迎风侧金具和伞裙表面静压增大,背风侧金具和伞裙表面静压逐渐减小,雪晶沉积位置逐渐向迎风侧偏移。

绝缘子两种安装方式下,伞裙表面雪晶分布系数与风向的关系如图 12 所示。

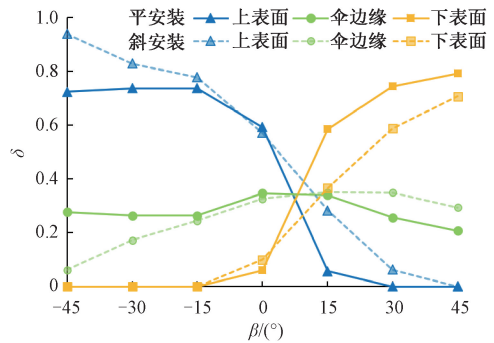


图 12 伞裙表面雪晶分布系数与风向关系

Fig. 12 Relation between snow crystal distribution coefficient and wind direction on insulator shed

伞裙表面雪晶分布系数的变化与风向倾角紧密相关,风向倾角增大,伞裙正静压力逐渐向迎风侧伞裙表面偏移,其分布系数逐渐增大。当 $\beta \in [-45^\circ, 0^\circ]$ 时,伞裙表面分布系数规律如下:下表面<伞边缘<上表面,气流垂直接触面主要是上表面,其表压静压较大,碰撞概率大,雪晶沉积量较大;当 $\beta \in [0^\circ, 45^\circ]$ 时,伞裙表面分布系数规律如下:上表面<伞边缘<下表面,气流垂直接触面主要为下表面,雪晶主要与下表面发生碰撞;风向倾角变化对伞边缘气流垂直接触面影响较小,其分布系数几乎不改变。

3 结 论

在相同风速风向下,雪晶类型对绝缘子碰撞系数影响较小,其中实心枝状雪晶沉积严重,安装方式对4种雪晶的碰撞系数几乎无影响。

平安装绝缘子表面雪晶沉积量随风速的增大而增大,斜安装绝缘子表面雪晶沉积量随风速的增大呈现先增大后逐渐减小的趋势,且在25 m/s时达到峰值。

风速相同时,风向倾角 $\beta \in [-45^\circ, 45^\circ]$ 时,绝缘子表面雪晶沉积量呈现为“V”型分布,风向倾角为负角度时,安装方式对雪晶沉积量影响严重。

伞裙表面雪晶沉积量随风向倾角的增大而增大,杆径表面雪晶沉积量随风向倾角的增大而减小,伞裙迎风面雪晶沉积量大于伞裙背风面沉积量。

参考文献

- [1] 张洪宇, 孟亮, 戴贤春. 铁路高影响天气分析及应对策略研究[J]. 中国铁路, 2019(5): 12-16.
ZHANG H Y, MENG L, DAI X CH. Analysis of extreme weather conditions and study of railway's coping strategies[J]. China Railway, 2019(5): 12-16.
- [2] 熊敏途. 近30年中国地面风速分区及气候特征[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 39-49.
XIONG M Q. Climate regionalization and characteristics of surface winds over China in recent 30 years[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(1): 39-49.
- [3] 张若兵, 李剑超, 王黎明, 等. 变电站支柱绝缘子的覆雪闪络特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3823-3829.
ZHANG R B, LI J CH, WANG L M, et al. Flashover characteristics of snow-covered post insulators in substations[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3823-3829.
- [4] 梅红伟, 史青林, 卢明, 等. 110 kV 交流支柱绝缘子的人工覆雪闪络特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3944-3950.
MEI H W, SHI Q L, LU M, et al. Flashover characteristics

- of 110 kV snow-covered post insulators[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3944-3950.
- [5] YAJI K, HOMMA H, SAKATA G, et al. Evaluation of snow accretion properties of insulators by field observation and artificial test-focusing on packed and wet snow condition [C]. 14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 2011.
- [6] 宿志一. 雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2284-2290.
SU ZH Y. Influence of fog-haze on external of transmission on and distribution equipments[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2284-2290.
- [7] 宿志一, 刘燕生. 我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 13-17.
SU ZH Y, LIU Y SH. Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces suspension and post insulators with DC and AC stress in northern China's inland areas[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 13-17.
- [8] RAVELOMANANTSOA N, FARZANEH M, CHISHOLM W A. A simulation method for winter pollution contamination of HV insulators[C]. Electrical Insulation Conference (EIC), IEEE, 2011: 373-376.
- [9] LV Y K, LI J G, ZHANG X M, et al. Simulation study on pollution accumulation characteristics of XP13-160 porcelain suspension disc insulators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2196-2206.
- [10] 吕玉坤, 李金岗, 刘云鹏, 等. 低风速下瓷三伞绝缘子积污特性数值模拟研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 55-61.
LV Y K, LI J G, LIU Y P, et al. Numerical simulation study on pollution accumulation characteristics of three umbrella porcelain insulators under low wind speed condition[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2016, 43(5): 55-61.
- [11] 宋玮, 贾男, 杨升杰, 等. 雾霾天气下动车组车顶绝缘子积污特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2018, 61(2): 186-190.
SONG W, JIA N, YANG SH J, et al. Study on the contamination characteristics of roof insulator of locomotive under fog-haze condition[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018, 61(2): 186-190.
- [12] 张东东, 张志劲, 蒋兴良, 等. 典型悬式绝缘子风洞直流积污特性与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4636-4645.

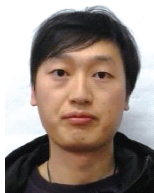
- ZHANG D D, ZHANG ZH J, JIANG X L, et al. Wind tunnel DC contamination performance of typical suspension insulator and its analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (19): 4636-4645.
- [13] 吕玉坤, 赵伟萍, 庞广陆, 等. 典型伞型瓷及复合绝缘子积污特性模拟研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 209-216.
- LV Y K, ZHAO W P, PANG G L, et al. Simulation of contamination deposition on typical shed porcelain and composite insulators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 209-216.
- [14] 陈庆, 闫斌, 叶润, 等. 航拍绝缘子卷积神经网络检测及自爆识别研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 942-953.
- CHEN Q, YAN B, YE R, et al. Insulator detection and recognition of explosion fault based on convolutional neural networks[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(6): 942-953.
- [15] 成林俞, 戴瑜兴, 熊书华, 等. 直流系统在线绝缘监测的研究及其实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 860-865.
- CHENG L Y, DAI Y X, XIONG SH H, et al. Online insulation supervising for DC system and its realization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 860-865.
- [16] 王黎明, 刘霆, 梅红伟, 等. 基于计算流体力学的支柱绝缘子积污特性研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2741-2749.
- WANG L M, LIU T, MEI H W, et al. Research on contamination deposition characteristics of post insulator based on computational fluid dynamics[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2741-2749.
- [17] FU P, FARZANEH M. A CFD approach for modeling the rime-ice accretion process on a horizontal-axis wind turbine[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2010, 98(s4-5): 181-188.

作者简介



李彦哲, 1988 年于兰州交通大学获得学士学位, 1999 年于兰州交通大学获得硕士学位, 2016 年于兰州交通大学获得博士学位, 现为兰州交通大学教授, 主要研究方向为铁道电气化、高电压与绝缘技术。
E-mail: 503021710@qq.com

Li Yanzhe received her B. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 1988, received her M. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 1999, and received her Ph. D. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2016. Now she is a professor at Lanzhou Jiaotong University. Her main research interests include railway electrification, high voltage and insulation engineering.



李刚, 2018 年于兰州交通大学获得学士学位, 现为兰州交通大学硕士研究生, 主要研究方向为铁道电气化、高电压与绝缘技术。
E-mail: 523606436@qq.com

Li Gang received his B. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include railway electrification, high voltage and insulation engineering.