DOI:10.11918/202411087

直流复合绝缘子电场和覆冰相互影响机制分析

韩兴波[1],陈孜铭[1],袁路强[1],蒋兴良[2]

(1.重庆交通大学 机电与车辆工程学院,重庆 400074;
2.输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学),重庆 400044)

摘 要: 为保障电网及输电线路的安全运行,研究复合绝缘子覆冰规律,提出了耦合场下的复合绝缘子覆冰模型。以FXBW-35/70复合绝缘子为试品,通过建立电场与气流场耦合下的水滴运动控制方程,分析水滴碰撞复合绝缘子在不同位置时所受的电场力分布,探讨风速和水滴粒径对局部碰撞系数α_1和水滴受电场偏移程度Δs的影响,计算并分析不同冰棱分布下复合绝缘子表面整体碰撞系数β_1。最后,开展复合绝缘子干湿增长试验,验证所提模型的有效性。结果表明:伞裙边缘、表面、芯棒处的电场强度依次减弱;带电水滴与不带电水滴均在驻点处α_1最大,并随两侧逐渐减小,增大风速或水滴粒径均能提升两者的α_1;带电水滴相比不带电水滴在直流电场吸引作用下α_1更高,其受电场偏移程度由高压端至低压端逐渐降低,最高偏移率可达30%;降低风速、减小水滴粒径或增大冰棱长度、增加冰棱数量均会降低β_1;干增长条件下,覆冰形态在无电场作用下整齐规则,而在带电条件下覆冰速率加快,形态杂乱;湿增长条件下,水滴捕获形成水膜流动并促进冰棱生长,无电场作用下覆冰速率明显降低,带电条件下冰棱出现弯曲且形状不规则。研究成果为明确带电条件下复合绝缘子覆冰生长机制及数值模拟提供技术参考。

关键词: 绝缘子覆冰;水滴运动;直流电场;冰棱生长;数值模拟
中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)09-0083-10

Analysis of interaction mechanism between electric field and ice coating of DC composite insulator

Han Xingbo[1], Chen Ziming[1], Yuan Luqiang[1], Jiang Xingliang[2]

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. State Key Laboratory of Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: To investigate the icing mechanism of composite insulators and ensure the safety of power grids and transmission lines, a coupled-field numerical model for composite insulator icing was proposed. Using the FXBW-35/70 composite insulator as the test specimen, the motion control equation of water droplets under the interaction of airflow and electric fields was established. The electric force distribution acting on droplets at different locations of the insulator surface was analyzed. The Influence of wind speed and droplet diameter on the local collision coefficient (α_1) and the droplet deflection(Δs) under a DC electric field was examined. Furthermore, the overall collision coefficient (β_1) of the insulator surface under different icicle distributions was calculated and analyzed. Finally, dry and wet icing growth experiments were conducted to verify the numerical results. The results show that the electric field strength decreases successively from insulator shed edge to the insulator surface and rod. For both charged and uncharged droplets, α_1 reaches its maximum at the stagnation point and decreases gradually toward both sides. Increasing wind speed or droplet diameter enhances α_1 for both droplet types. Charged droplets experience stronger electric field attraction, leading to a higher α_1 than uncharged droplets, and the deflection due to the electric field gradually decreases from the high-voltage to the grounded end, with a maximum deflection of up to 30%. Reducing wind speed or droplet diameter, or increasing the length or number of icicles, significantly decreases β_1. Under dry growth conditions, the icing morphology is more regular without an electric field, whereas under a DC electric field, the icing rate increases and the morphology becomes irregular. Under wet growth conditions, water droplets coalesce into a film, promoting icicles growth. Without an electric field, the icing rate decreases markedly, while under a DC field, icicles become curved and distorted. This study provides a technical

收稿日期: 2024-11-28;**录用日期:** 2025-01-04;**网络首发日期:** 2025-05-07
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250502.1937.002
基金项目: 国家自然科学基金(52307161);重庆市教育委员会科学技术研究计划项目(KJQN202000727)
作者简介: 韩兴波(1992—),男,副教授,硕士生导师;蒋兴良(1961—),男,教授,博士生导师
通信作者: 陈孜铭,631476873@qq.com

reference for understanding the icing mechanism of composite insulators under electric fields and for developing accurate numerical simulation methods.

Keywords: insulator icing; water droplet motion; DC electric field; icicles growth; numerical simulation

在寒冷潮湿环境中,空气中的过冷却水滴容易在物体表面发生冻结,形成覆冰。对于电力系统而言,输电导线和绝缘子是最易受覆冰影响的关键部位,其中直流复合绝缘子的覆冰问题尤为突出,常引发电晕、闪络等电气故障,严重威胁电力系统的安全与稳定[1-4]。相比交流系统,直流系统中由于电场的持续作用,水滴更易在绝缘子表面聚集、冻结,尤其是在风速较大、液态水含量较高的环境下,极易形成不规则的冰棱结构,对绝缘性能造成不利影响。

已有研究[5-7]表明,冰棱的存在会导致绝缘子表面电场分布发生畸变,局部电压梯度急剧增加,进一步诱发局部放电、闪络等问题。为此,该领域研究人员围绕覆冰机理开展了大量试验与数值研究,探索不同气象条件、绝缘子结构参数对覆冰速率与形态的影响[8-16]。例如,有研究人员基于 Makkonen 模型研究了水滴在绝缘子表面的碰撞与冻结行为[8],并通过优化伞裙结构改进其抗冰闪性能[16];也有研究[17-19]从风速、水滴粒径等环境因素出发,建立了冰层增长模型与冻结动态分析方法;此外,还有研究人员通过人工试验研究了不同材料和表面状态下的覆冰特性,进一步推动了复合绝缘子防冰策略的探索[20-22]。

尽管上述研究在理解绝缘子覆冰机制方面取得了重要进展,但大多数工作仍侧重于外部环境参数的影响,而对直流电场与冰棱结构之间的耦合作用研究不足。目前,仍缺乏对冰棱不同形态下电场分布、水滴运动轨迹及碰撞特性之间内在联系的系统分析。基于上述背景,本文以过冷却水滴在气液二相流与电场共同作用下的运动为切入点,构建耦合气液二相流、表面电场的物理模型,并通过带电覆冰试验对其进行验证。通过对比分析伞裙结构、电场分布、冰棱生长对水滴轨迹及碰撞行为的影响,揭示复合绝缘子电场与覆冰行为之间的相互影响机制,为提升其在复杂气象条件下的防冰性能提供技术参考。

1 复合绝缘子选型及控制方程

在开展复合绝缘子仿真建模之前,需充分考虑其伞裙设计对耐污性能和闪络特性的影响,具体包括伞裙间距、伞径和大小伞组合方式等关键结构参数[23-25]。其中,最大伞间距与伞伸出量应满足比例关系 $d_1/p_1 \geqslant 0.8$[16],以保证绝缘子具备良好的抗闪络能力。同时,与等径伞结构相比,采用不等径伞不仅能够有效增加爬电距离和最大伞间距与伞伸出量之比,还能降低冰棱桥接引发闪络的风险[24]。因此,本文选用 FXBW-35/70 复合绝缘子作为研究对象,其结构如图 1 所示,具体的结构与材料参数分别见表 1 和表 2。其中,D_1、D_2为伞径,H 为结构高度,θ 为伞倾斜角。

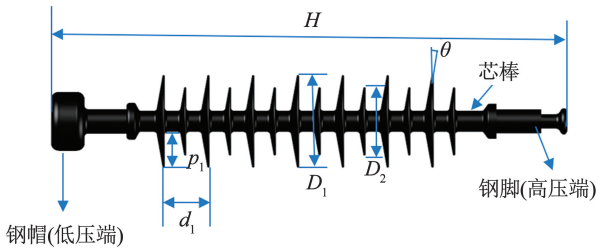


图 1 复合绝缘子 FXBW-35/70 结构

Fig. 1 Structure of composite insulator FXBW-35/70

表 1 FXBW-35/70 结构参数

Tab. 1 Structure parameters of FXBW-35/70

(D_1/D_2)/mm	H/mm	θ/(°)	d_1/p_1
110/80	615	8	1.32

表 2 FXBW-35/70 材料参数

Tab. 2 Material parameters of FXBW-35/70

部件	材料	相对介电常数
钢脚	H 型 Q235 钢	100 000
钢帽	H 型 Q235 钢	100 000
芯棒	玻璃纤维环氧树脂	3.7
伞裙	硅橡胶	11.7
冰棱	冰	70

1.1 空气流场下水滴运动控制方程

覆冰过程中复合绝缘子外流场与直流电场耦合下空气中过冷却水滴的运动是一个复杂的多物理场问题,涉及流体力学、电磁学和热力学等领域的内容。在流体力学层面,空气中的水滴受横向风力的影响随气流运动。在远处时,水滴轨迹可近似等同于气流轨迹;在靠近复合绝缘子表面时,水滴随气流进行绕流运动,部分水滴在自身惯性作用下撞击绝缘子表面,形成了覆冰水的主要来源。水滴受力 F_0 主要有重力 G、浮力、压差阻力、表观质量力、气流曳力 F_d等,忽略较低量级的力,则主要受到 G 和 F_d的影响。

$$F_0 = F_d + G = \frac{1}{2}\rho_a S_w C_a |U - V|(U - V) + mg \quad (1)$$

式中:ρ_a为水滴密度,kg/m^3;$S_w = \pi R_d^2$ 为水滴横截面面积(R_d 为水滴半径,m),m^2;C_a为空气阻尼系数;U 和 V 分别为风速和水滴运动速度,m/s;m 为水滴质

量，kg；g 为重力加速度，m/s^2。

在复合绝缘子周围，由于气流流速相对较低，为合理描述其气流场特性，本文选取不可压缩流体动力学中的 N-S 方程作为控制方程，并采用标准 k-ε 湍流模型对湍流进行数值求解。仿真分析借助 COMSOL Multiphysics 有限元多物理场仿真平台完成，其几何模型（包括复合绝缘子本体和外包长方体气流场计算域）在 AutoCAD 中构建，随后导入 COMSOL 环境进行物理场耦合计算。复合绝缘子的空间布置与边界条件如图 2 所示。其中，计算域左侧设为气液二相流入口，右侧为出口；所有固体壁面边界采用无滑移条件处理，壁面附近的速度与压力分布通过壁函数法进行修正与求解。水滴的发射及运动轨迹计算与气流场采用相同的计算区域，初始状态下水滴速度为零，随着气流的运动，碰撞至绝缘子或计算域壁面后视为冻结并消失。此外，COMSOL 提供自动网格划分功能，针对几何模型中存在如伞裙边缘具有尖锐特征的位置，可通过用户自定义方式对局部网格的单元尺寸与曲率控制参数进行精细化设置，以提高仿真精度。

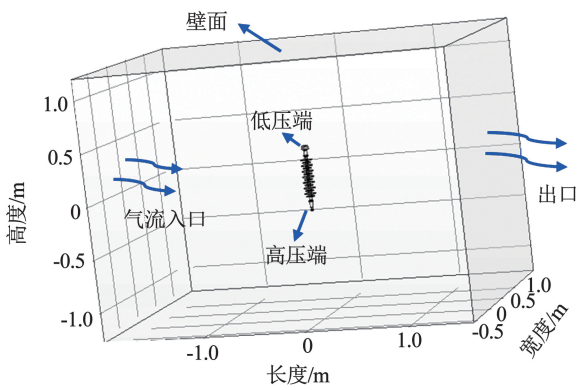


图 2　COMSOL 中复合绝缘子耦合场计算模型

Fig. 2　Calculation model of coupling field of composite insulator in COMSOL

1.2　电场作用下水滴受力分析

当带电水滴随气流运动至绝缘子周围并进入电场时，带电水滴将受到电场产生的电场力、极化力与库伦力[6]，其中库伦力相比电场力和极化力小几个量级，在此忽略不计。电场使水滴内部的正电荷和负电荷分离，形成一个偶极子。由于电场的非均匀性，水滴的不同部分受到的电场强度也不同。因此，作用在水滴上的力并不平衡，导致水滴受到极化力 F_p，其计算式为：

$$F_p = M_0 \cdot \nabla E_0 \tag{2}$$

$$M_0 = 4\pi\varepsilon_0 R_d^3 E_0 \frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2} \tag{3}$$

式中：E_0 为电场强度，V/m；M_0 为偶极矩，C · m；ε_0、ε_p 分别为空气、水滴的相对介电常数。

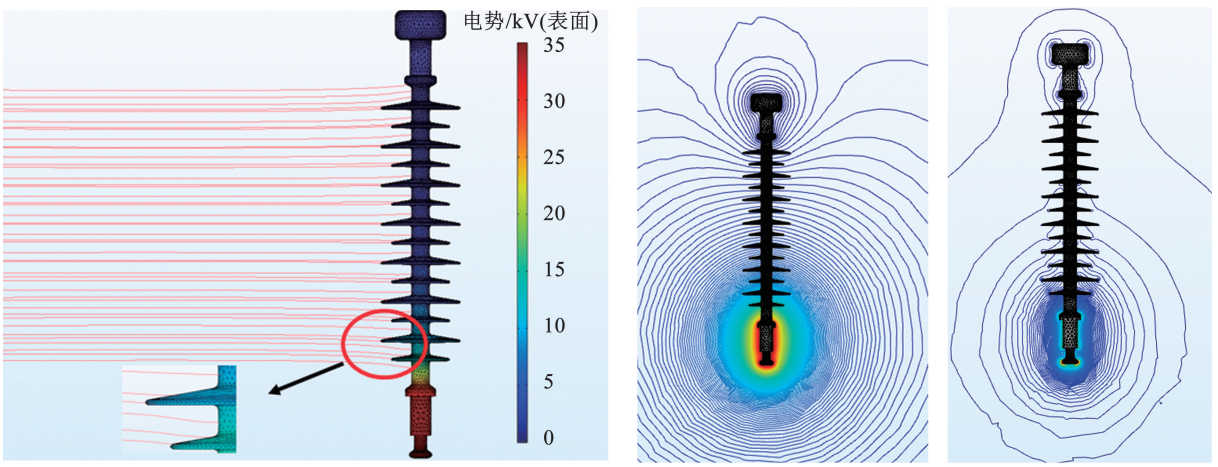
当水滴进入电场区域时，若其本身携带电荷或在电场作用下发生极化，将受到电场力的作用。该电场力不仅会改变水滴的运动轨迹，还会引起其速度变化，使其发生偏转、加速，从而使其向电场强度较高的区域移动，增加其撞击绝缘子表面的可能性。在此过程中，水滴所受的电场力为

$$F_e = QE_0 \tag{4}$$

为简化模型，假设水滴所带电荷量 Q 始终保持不变。

$$Q = 12\pi\varepsilon_0 E_0 R_d^2 \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p + 2} \tag{5}$$

在 35 kV 直流电场中，如图 3 所示，带负电水滴随气流运动碰撞复合绝缘子的伞裙边缘、伞裙表面和芯棒，水滴轨迹受气流曳力和电场力等共同作用，一部分水滴跟随气流绕过复合绝缘子，另一部分水滴由于惯性原因无法绕过而碰撞复合绝缘子成为覆冰水的主要来源。碰撞位置处受到的电场力如图 4 所示。

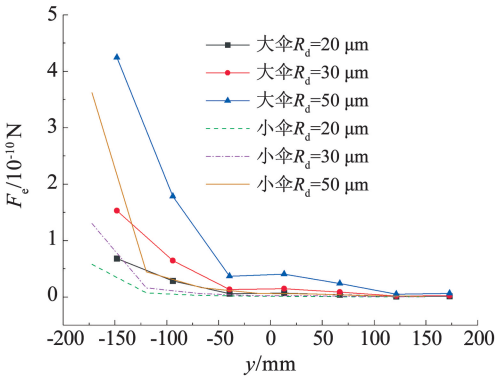


(a) 竖截面水滴碰撞轨迹　　(b) 电势等线图　　(c) 电场等线图

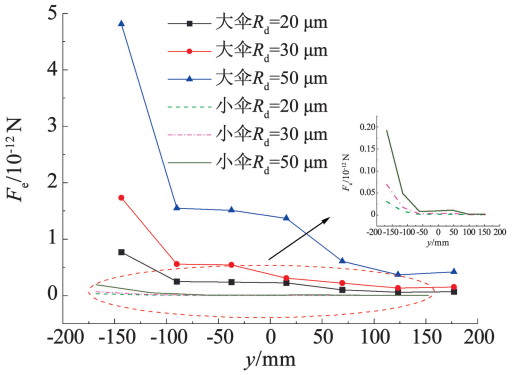
图 3　复合绝缘子电位分布

Fig. 3　Potential distribution of composite insulator

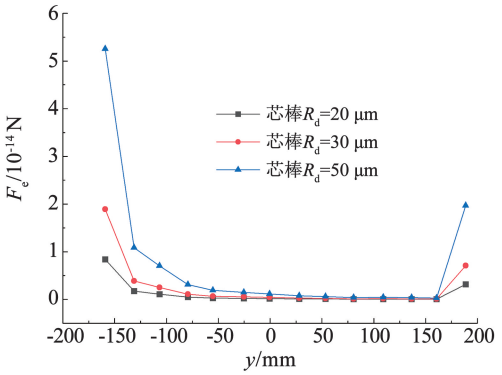
由图 4 可以看出:带电水滴在伞裙边缘所受电场力的量级(10^{-10})远比伞裙表面(10^{-12})和芯棒(10^{-14})要大,粒径较大的水滴受到的电场力更强;水滴撞击大伞裙受到的电场力比小伞裙大得多,且沿高压端至低压端(y 轴)均呈下降趋势;撞击芯棒的水滴受到的电场力最初呈现下降趋势,最后靠近低压端时突然升高。上述现象的原因是:电场强度在高压端发散,呈梯度下降,相邻大伞裙位置处的电场强度高于小伞裙;水滴由远及近靠近伞裙边缘,并越过伞裙表面,最终撞击芯棒的过程中,电场强度由弱变强再变弱,导致水滴所受到的电场力也呈现先增大后减小的趋势,在伞裙边缘处达到最大,越过伞裙边缘时逐渐降低,并在芯棒处达到最低;靠近芯棒高压端和低压端的电场强度始终高于芯棒中部,芯棒中部的电场强度最弱,水滴所受电场力最小。



(a) 伞裙边缘



(b) 伞裙表面



(c) 芯棒

图 4 绝缘子各碰撞位置处所受的电场力

Fig. 4 Electric field force at each collision position of the insulator

2 冰棱条件下水滴碰撞模型

2.1 无冰棱下水滴运动碰撞分析

复合绝缘子覆冰和导线覆冰虽然均经过水滴碰撞、捕获和冻结过程,但具有一定的差异。导线可以作为光滑的圆柱体,可采用二维计算方法,并且目前有许多拟合公式;而复合绝缘子只能作为三维或二维旋转体,按照 Makkonen 关于覆冰速率的计算式进行计算。

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t_1}=\alpha_1\alpha_2\alpha_3 wUS \tag{6}$$

式中:$\mathrm{d}M/\mathrm{d}t_1$ 为绝缘子表面单位上的覆冰速率,m/s;α_1、α_2、α_3 分别为碰撞、捕获、冻结系数,假设水滴碰撞后被全部捕获,α_2 为 1;w 为空气中液态水含量,g/m^3;S 为水滴碰撞面积,m^2。

在无冰棱情况下,复合绝缘子覆冰碰撞过程可采用局部碰撞系数表征,如图 5 所示。初始组成面积 S_0 的相邻 3 个水滴(A、B、C)以一定的初速度碰撞复合绝缘子表面并重新排列组成面积为 S_1 的新三角形($\triangle A_1B_1C_1$),则局部碰撞系数可表示为

$$\alpha_1=\frac{S_0(V_1+V_2+V_3)}{3S_1U_0} \tag{7}$$

式中:V_1、V_2、V_3 分别为水滴 A_1、B_1、C_1 的最终碰撞速度,U_0 为水滴的初速度。

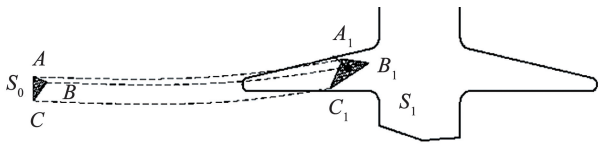


图 5 水滴局部碰撞示意

Fig. 5 Schematic diagram of local collision of water droplets

用偏移率 Δs 量化水滴轨迹在有电场作用下与无电场下的偏移程度,其计算式为

$$\Delta s=\frac{\sqrt{(x_{\mathrm{uc}}-x_{\mathrm{c}})^2+(y_{\mathrm{uc}}-y_{\mathrm{c}})^2+(z_{\mathrm{uc}}-z_{\mathrm{c}})^2}}{U_0\mathrm{d}t_2} \tag{8}$$

式中:x_{uc}、y_{uc}、z_{uc} 为带电情况下水滴碰撞的终点位置,x_{c}、y_{c}、z_{c} 为不带电情况下水滴碰撞的终点位置,$\mathrm{d}t_2$ 为跟踪的时间步长。

沿 z 轴方向从远至近发射一横排水滴,两侧边缘水滴随气流运动偏离复合绝缘子,更多的水滴则碰撞到复合绝缘子的伞裙边缘和芯棒位置,如图 6 所示。图 7 为不同粒径和风速条件下,复合绝缘子伞裙边缘和芯棒位置处的局部碰撞系数 α_1 对比。由图 7(a)和图 7(c)可以看出,水滴粒径越大,α_1 越大,且芯棒处的 α_1 增长幅度明显大于伞裙边缘处。

由图 7(b)和图 7(d)可以看出，风速越大，α_1 越大，但伞裙边缘处的增长幅度相对较小。由图 7 可以看出：在相同环境条件下，带电水滴的 α_1 高于不带电水滴；伞裙边缘的 α_1 高于芯棒处。上述现象的原因可归结为以下几点：水滴粒径较小时，水滴的惯性较小，易被气流改变运动方向，从而偏离复合绝缘子；而在带电条件下，水滴受到电场力的作用，发生聚集效应，导致 α_1 显著提高，对于小粒径水滴而言，主要受气流的曳力影响，而较大粒径水滴则更受惯性作用，电场力对其影响较小，所以中等粒径水滴的 α_1 增长幅度最为显著。风速增大时，气流的作用变强，带电水滴在气流和电场的共同作用下，更容易被推向复合绝缘子的表面，从而增加碰撞率；而在不带电的情况下，当风速较小时，水滴受电场力的影响较小，气流的曳力也较弱，导致碰撞率最低。

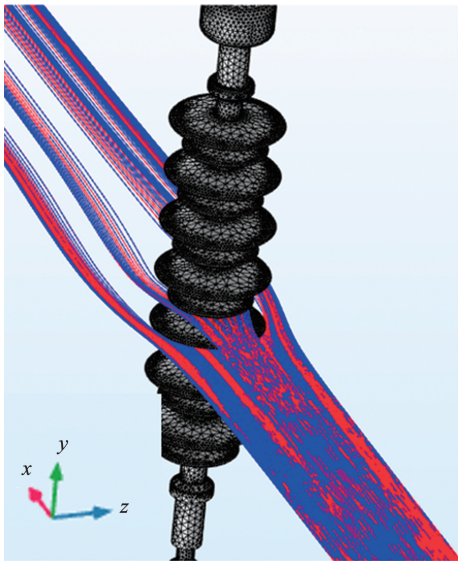
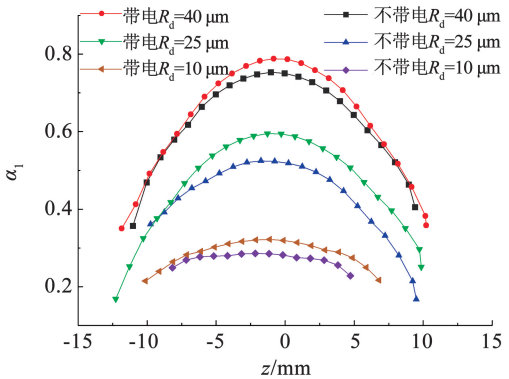
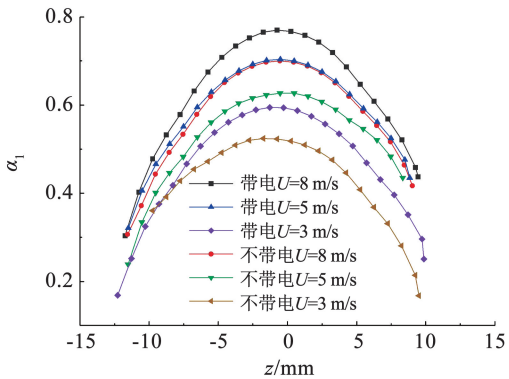


图 6　水滴发射碰撞轨迹

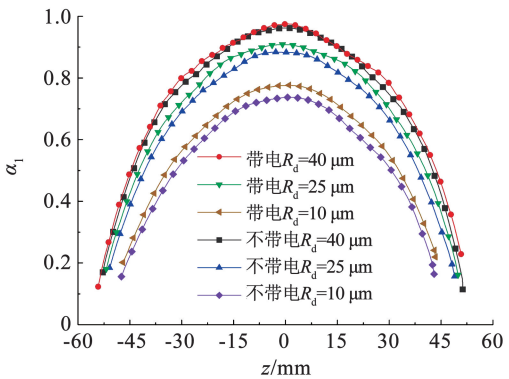
Fig. 6　Collision trajectory of water droplet emission



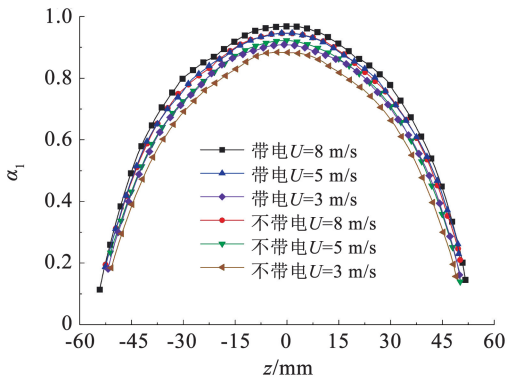
(a) 不同R_d(芯棒), U=3 m/s



(b) 不同风速(芯棒), R_d=25 μm



(c) 不同R_d(伞裙边缘), U=3 m/s



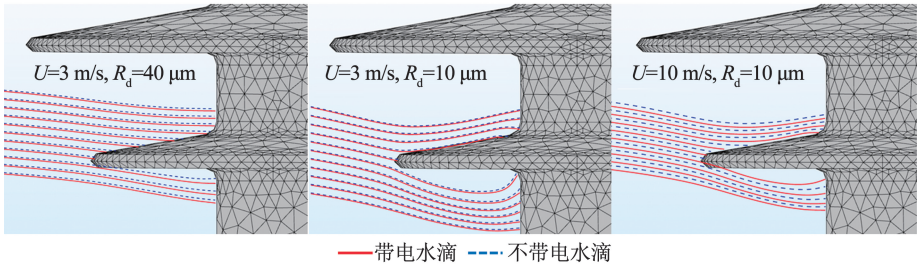
(d) 不同风速(伞裙边缘), R_d=25 μm

图 7　不同粒径和风速下伞裙边缘和芯棒位置处的局部碰撞系数对比

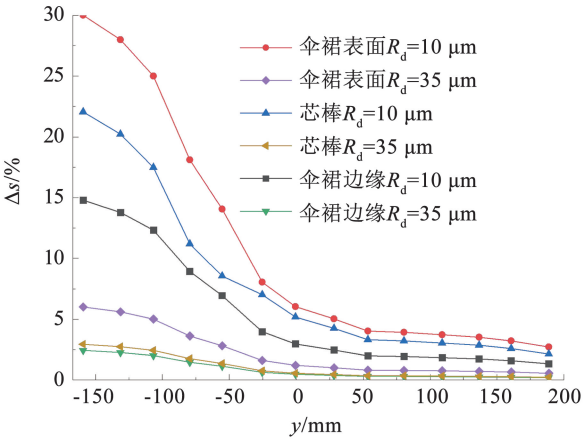
Fig. 7　Comparison of local collision coefficients at the between insulator shed edge and rod position under different droplet diameter and wind speed

根据式(8)计算不同粒径水滴在带电与不带电条件下的轨迹偏移率，结果如图 8 所示。其中，图 8(a)为不同粒径带电水滴轨迹。由图 8(a)可以发现：带负电水滴比不带电水滴更偏向下侧高压端；在风速较小(U = 3 m/s)的情况下，粒径(R_d = 10 μm)较小的水滴靠近芯棒时，运动轨迹明显偏移；随着风速或粒径的增大，偏移程度显著下降，尤其是在粒径(R_d = 40 μm)较大的情况下，水滴几乎径直撞向复合绝缘子。图 8(b)为水滴轨迹偏移率。由图 8(b)可以发现：沿着复合绝缘子从高压端到低压端(y 轴正向)跟踪水滴轨迹，相同粒径条件下，低压端的偏移率最高，随后沿 y 轴正方向迅速下降；同

一伞裙位置处,伞裙表面的偏移率最高,芯棒位置次之,伞裙边缘的偏移率最低,尤其是在低压端伞裙表面位置处,粒径(R_d = 10 μm)较小的水滴的偏移率达到了 30%。



(a) 不同粒径带电水滴轨迹



(b) 水滴轨迹偏移率Δs

图 8 电场下带电水滴偏移程度

Fig. 8 Deviation degree of charged water droplets under electric field

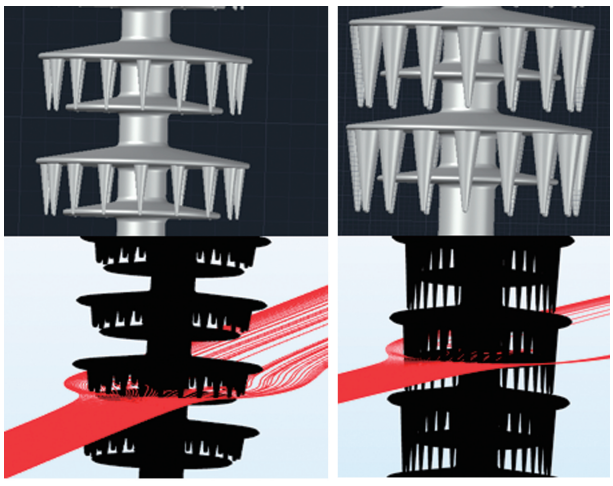
在风速较大的条件下,水滴运动主要受气流曳力主导,电场力难以对其轨迹产生显著影响,导致其偏转角度和偏移距离较小。对于粒径较小的水滴,由于质量轻、惯性小,更易受电场力吸引而发生明显偏移。而粒径较大的水滴惯性较强,即使受气流和电场的共同作用,其运动轨迹仍相对稳定,偏移效应不明显。再者,伞裙表面具有一定的倾斜度,既考虑了电场力的大小,又考虑了水滴飞行的作用时间,因此,偏移率在此位置最高。尽管伞裙边缘的电场强度最大,但水滴在此区域的作用时间最短,因此,偏移率最低。最后,随着水滴粒径的增大,即使携带更高的饱和电荷,相比电场力对其运动轨迹的影响,惯性仍占主导地位,从而导致偏移率明显降低。

2.2 带冰棱下水滴运动碰撞分析

在湿增长过程中,部分水滴会被冻结在伞裙或芯棒上,其余部分水滴会形成水膜流向伞裙边缘进而形成冰棱。如图 9 所示,在 AutoCAD 中,以光滑三棱锥均匀分布在复合绝缘子伞裙边缘模拟冰棱进行仿真计算。在有冰棱的情况下,部分水滴会碰撞冰棱,进而成为冰棱生长部分水量的来源。此时,由于不连贯性,不能采用局部碰撞系数表征水滴碰撞捕获情况,而是采用整体碰撞系数β_1表示,其计算式为

$$\beta_1 = \frac{N_R}{N_A} \tag{9}$$

式中:N_A为发射的水滴总量,N_R为碰撞至绝缘子的水滴量。



(a) 半桥接 (b) 接近桥接

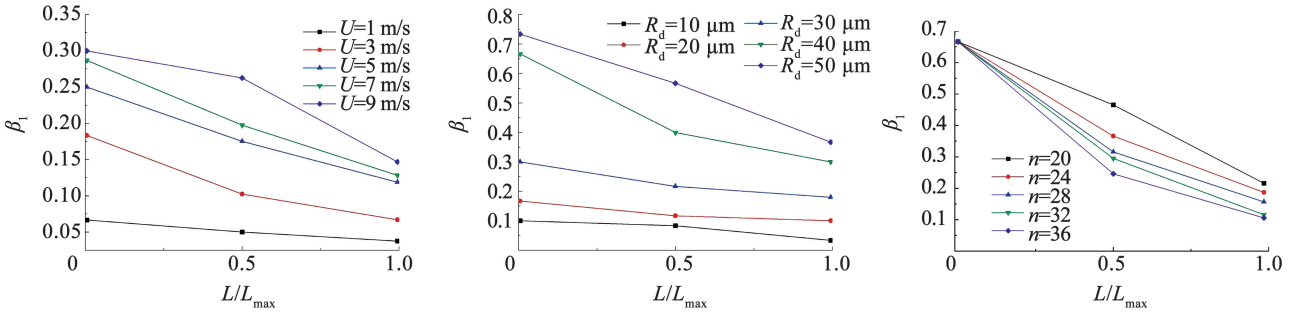
图 9 复合绝缘子及其附带的冰棱

Fig. 9 Composite insulator and its attached icicles

不同冰棱条件下复合绝缘子表面整体水滴碰撞系数计算结果如图 10 所示。由图 10 可以看出:1)随着冰棱长度的增加(L/L_{max} = 0.5,L 为当前冰棱的长度,L_{max}为冰棱接近桥接时的长度),不同粒径、风速下复合绝缘子的β_1均降低,而在冰棱接近桥接时(L/L_{max} = 1.0),β_1进一步下降。在此期间,粒径或

风速较大的情况下，β_1 下降较快；粒径或风速较小的情况下，β_1 下降较为平缓。2）随着风速或粒径的增大，β_1 均增大；水滴粒径的增大对 β_1 的提升幅度明显超过风速的增大。3）随着冰棱数量 n 的增加，β_1 显著下降。

复合绝缘子周围的气流场因冰棱而变成紊乱的湍流，部分水滴受湍流作用偏离正常轨迹而绕过复合绝缘子，因此导致 β_1 降低。风速和水滴粒径的增大使水滴惯性增强，抵抗气流偏移的能力提高，因而减弱了湍流对其运动轨迹的影响，有助于 β_1 的升高。当冰棱进一步增长，水滴在气流的扰动作用下更易撞击冰棱表面，成为冰棱继续生长的主要水源之一。此外，单个冰棱对气流的扰动有限，部分水滴仍能撞击复合绝缘子表面，随着冰棱数量的增加，气流的扰流区域变大，冰棱对气流的阻挡和偏转作用增强，使得水滴的运动轨迹更加复杂和不规则，更多的水滴被阻挡，难以到达绝缘子表面，致使碰撞系数明显下降。特别是在多个冰棱逐步连接形成桥接结构时，水滴几乎完全被冰棱阻挡。

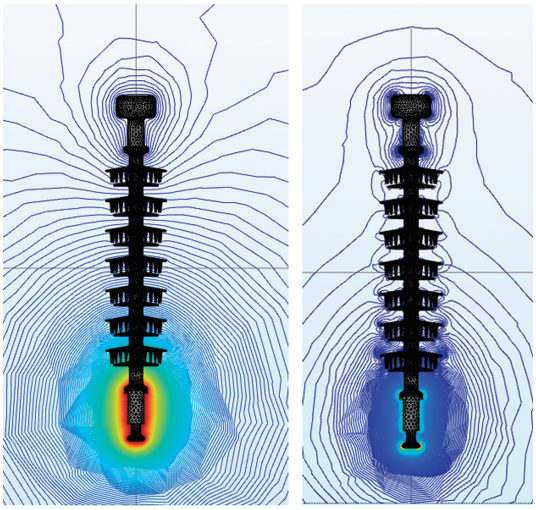


(a) 不同风速，R_d=25 μm　　(b) 不同水滴粒径，U=3 m/s　　(c) 不同冰棱数量，R_d=20 μm，U=3 m/s

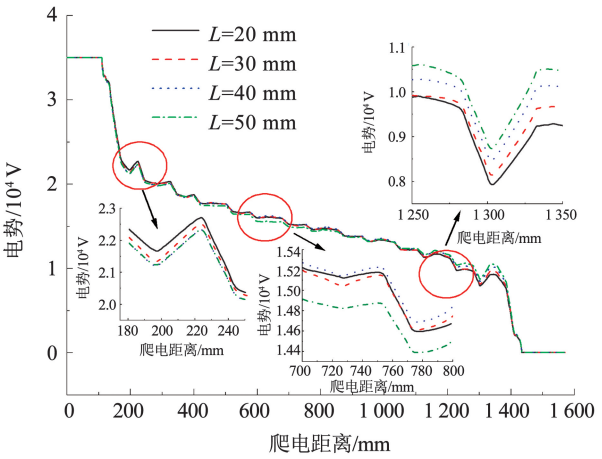
图 10　不同冰棱条件下复合绝缘子整体水滴碰撞系数

Fig. 10　Overall droplet impact coefficient of composite insulator under different icicle conditions

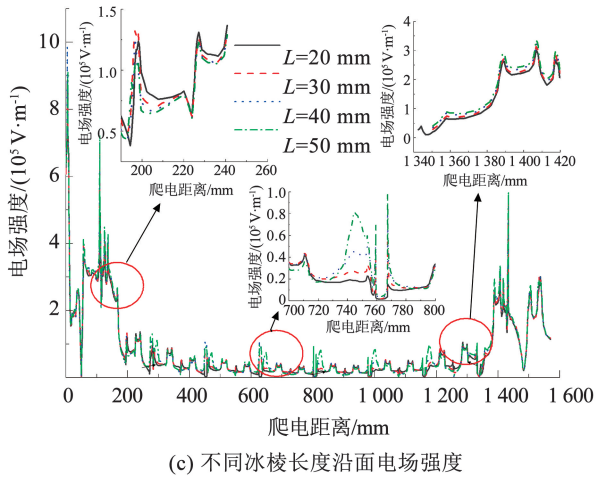
此外，随着冰棱长度的增大，复合绝缘子表面的电场分布也受到影响，如图 11 所示。冰棱的存在导致高压端电势电场降低，低压端电势电场增大，而中部的电场强度增幅更加明显；且冰棱越长，该变化越为显著。由于受到冰棱的尖端效应影响，高压端和低压端的电场更加集中。而在复合绝缘子中部，冰棱的形状和分布不规则，气隙、电导率和介电常数的局部变化使电场分布不均，导致中部的电场强度起伏不定。冰棱越长，电场越容易在尖端和不规则处集中，形成局部高电场强度区域，增大了复合绝缘子整体发生局部放电乃至闪络的概率。



(a) 带冰棱下电势(左)及电场(右)等线图



(b) 不同冰棱长度沿面电势



(c) 不同冰棱长度沿面电场强度

图 11　不同冰棱条件下复合绝缘子沿面电势及电场强度

Fig. 11　Surface potential and field strength of composite insulators under different icicle conditions

3 复合绝缘子覆冰试验

本次试验在多功能人工气候实验室(图 12)中进行。人工气候实验室可调节环境参数,具体包括温度(-45 ~ 45 ℃)、风速(1 ~ 12 m/s)和水滴粒径 R_d(4 ~ 50 μm)。±600 kV 高压电源可对复合绝缘子试品施加直流电压。

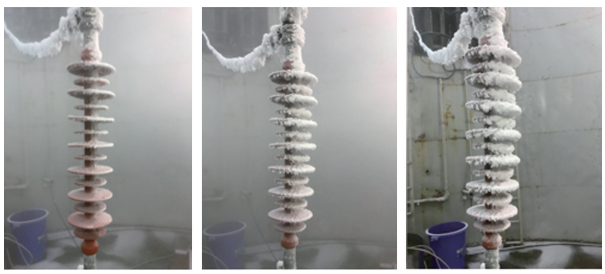


(a) 多功能人工气候实验室 (b) 控制面板

图 12 多功能人工气候实验室覆冰装置

Fig. 12 Multi-function artificial climate laboratory ice covering device

设定环境参数 $U = 3$ m/s,$R_d = 5 \sim 10$ μm,温度 $T = -3$ ℃,对复合绝缘子 FXBW-35/70 进行干增长覆冰试验。首先,对试品不加电压覆冰持续 1 h,并在每个时间点 t(5、30、60 min)进行覆冰观测;然后,去除覆冰和清理污垢,对试品带电压重新覆冰 1 h,并在相同时间点进行覆冰观测。试验结果如图 13 所示。



t=5 min *t*=30 min *t*=60 min

(a) 不带电覆冰



t=5 min *t*=30 min *t*=60 min

(b) 带电覆冰

图 13 复合绝缘子干增长覆冰形态

Fig. 13 Dry growth icing shape of composite insulator

由图 13 可以看出:在不带电条件下,覆冰沿复合绝缘子表面呈现出相对稳定且规则的斜向生长模式,整体倾角约为 45°,冰层表面较为平整、连续,粗糙度较低,生长速率均匀。而在带电条件下,覆冰形态发生显著变化,表面结构明显变得粗糙、不规则,生长方向多变,覆冰速率明显加快。产生上述差异的原因在于:无电场作用时,覆冰生长主要受气流推动和重力作用,水滴在气流引导下撞击复合绝缘子表面,并沿着气流方向沉积和冻结,从而形成具有一致生长方向和平滑表面的冰层;相比之下,在施加电压后,非均匀电场显著改变了水滴、冰晶及冰层的行为,水滴在电场力作用下发生偏移,不再沿单一方向运动,局部电荷的积聚进一步影响冰晶的生长方向和形貌,导致覆冰呈现出不规则、多方向扩展的生长特征。电场的干扰不仅加剧了冰层的表面粗糙度,还加速了整体覆冰过程。

其他环境参数不变,增大释放的粒径 R_d(15 ~ 25 μm),复合绝缘子表面捕获的水滴无法完全冻结而形成流动的水膜,覆冰由干增长转化为带水膜和冰棱的湿增长,试验结果如图 14 所示。



t=30 min *t*=60 min

(a) 不带电覆冰



t=30 min *t*=60 min

(b) 带电覆冰

图 14 复合绝缘子湿增长覆冰形态

Fig. 14 Wet growth icing shape of composite insulator

由图 14 可以看出:在不带电湿增长覆冰条件下,冰棱沿复合绝缘子表面生长表现为长度均匀、形态规整,整体结构稳定,冰柱直径差异较小;而在施加电场的情况下,冰棱生长明显呈现出长度不一、形态畸变的特征,局部区域甚至出现明显的偏斜与不对称分布。造成上述差异的主要原因在于:无电场条件下,冰棱的生长过程主要受气流分布、重力方向

和温度梯度控制，水滴在撞击绝缘子表面后均匀沉积、冻结，形成结构对称的冰棱。而在电场作用下，空气中带电或极化的水滴运动轨迹受到电场力扰动，撞击位置发生偏移，改变了覆冰的沉积分布；同时，冰棱尖端处的水滴在滴落和冻结过程中亦受到电场力影响，进一步加剧了冰棱生长的不均匀性，导致其长度参差不齐、形状畸变。

4　结　论

1）建立了直流电场与气流场耦合作用下的水滴运动控制方程，分析了水滴在碰撞复合绝缘子表面过程中所受电场力的变化规律及环境参数对局部碰撞系数 α_1 的影响。结果表明：复合绝缘子伞裙边缘处水滴所受电场力最大，伞裙表面次之，芯棒处最小；带电水滴与不带电水滴均在复合绝缘子驻点处 α_1 最大，且向两侧逐渐减小；增大风速或水滴粒径均会提升两种水滴的 α_1；带电水滴受电场吸引，碰撞系数更高，水滴轨迹偏移率随复合绝缘子高压端至低压端而逐渐降低。

2）建立了不同冰棱形态下的复合绝缘子湿增长模型。冰棱长度越长、数量越多，复合绝缘子整体碰撞系数 β_1 越小。

3）复合绝缘子干湿增长试验表明：在不带电干增覆冰条件下，水滴碰撞位置和水膜流动均匀，覆冰粗糙度小，冰棱分布均匀，形态规则；在带电情况下，电场对水滴运动、碰撞的影响显著，水滴运动轨迹发生偏移，碰撞位置不规律，冰棱分布不均匀且发生弯曲现象。

4）本文采用不同的环境参数、冰棱分布及电场力，通过改变外部气流场与电场的方式改变水滴的运动轨迹，最终影响水滴碰撞系数。未来的研究可进一步探索直流电场与气流场耦合下复合绝缘子结构尺寸、放置方式对复合绝缘子表面电场、覆冰过程的影响。

参考文献

[1]蒋兴良，易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京：中国电力出版社，2002：10
Jiang Xingliang，Yi Hui. Icing and anti-icing of transmission lines [M]. Beijing：China Electric Power Press，2002：10

[2]陈雅芳. 输电线路绝缘子覆冰预测及防护方法综述[J]. 山东电力技术，2023，50(3)：48
Chen Yafang. Review on prediction and protection methods of ice coating on insulators of transmission lines[J]. Shandong Electric Power，2023，50(3)：48

[3]陆佳政，皮新宇，朱思国，等. 新型电力系统源网设备典型外部灾害防治挑战与展望[J]. 新型电力系统，2024，2(1)：36
Lu Jiazheng，Pi Xinyu，Zhu Siguo，et al. Challenges and prospects in prevention and control of typical external disasters power generation and network equipments in the new type power systems[J]. New Type Power Systems，2024，2(1)：36. DOI：10.20121/j.2097－2784.ntps.230044

[4]刘晓亮，鲁海鹏，苟方杰，等. 输电线路覆冰防治措施分析[J]. 电力安全技术，2023，25(8)：17
Liu Xiaoliang，Lu Haipeng，Gou Fangjie，et al. Analysis on prevention measures against wire ice covering for transmission lines [J]. Electric Safety Technology，2023，25(8)：17

[5]Hu Yuyao，Jiang Xingliang，Shu Lichun，et al. DC flashover performance of ice-covered insulators under complex ambient conditions[J]. IET Generation，Transmission and Distribution，2016，10(10)：2504. DOI：10.1049/iet－gtd.2015.1463

[6]韩兴波，蒋兴良，黄亚飞，等. 复合绝缘子直流电场下的水滴运动及覆冰特性[J]. 电工技术学报，2020，35(9)：2042
Han Xingbo，Jiang Xingliang，Huang Yafei，et al. Icing properties of composite insulator and droplet movement under DC electric field [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2020，35(9)：2042. DOI：10.19595/j.cnki.1000－6753.tces.190244

[7]丁思瑜，马建桥，张瑞谦，等. 接触网腕臂绝缘子覆冰特性分析及结构优化设计[J]. 电气工程学报，2023，18(4)：349
Ding Siyu，Ma Jianqiao，Zhang Ruiqian，et al. Analysis of icing characteristics and structural optimization design of catenary cantilever insulator[J]. Journal of Electrical Engineering，2023，18(4)：349. DOI：10.11985/2023.04.037

[8]蒋兴良，韩兴波，胡玉耀，等. 冰棱生长对绝缘子覆冰过程的影响分析[J]. 电工技术学报，2018，33(9)：2089
Jiang Xingliang，Han Xingbo，Hu Yuyao，et al. Analysis of icicles influences on icing process of insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2018，33(9)：2089. DOI：10.19595/j.cnki.1000－6753.tces.170372

[9]Hu Qin，Wang Shijing，Shu Lichun，et al. Influence of shed configuration on icing characteristics and flashover performance of 220 kV composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2016，23(1)：319. DOI：10.1109/TDEI.2015.005453

[10]张海平，童璟，何旬，等. 青海地区 330 kV 输电线路覆冰条件下雷击风险评估[J]. 电瓷避雷器，2025(6)：1
Zhang Haiping，Tong Jing，He Xun，et al. Lightning risk assessment of 330 kV transmission line under icing conditions in Qinghai province[J]. Insulators and Surge Arresters，2025(6)：1. DOI：10.16188/j.isa.1003－8337.2025.06.001

[11]刘勇，李超，辛岳芃，等. 覆冰绝缘子直流电弧运动特性及燃弧时间的影响因素[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4222
Liu Yong，Li Chao，Xin Yuepeng，et al. DC-arc motion characteristics and influencing factors of arcing-time on ice-covered outdoor insulators[J]. High Voltage Engineering，2024，50(9)：4222. DOI：10.13336/j.1003－6520.hve.20231457

[12]潘杨. 复合绝缘子雾凇覆冰特性与伞形结构优化研究[J]. 电气应用，2022，41(8)：1
Pan Yang. The rime icing characteristics of composite insulator and the optimization of shed configuration [J]. Electrotechnical Application，2022，41(8)：1

[13]王斌，李立涅，魏发生，等. 不均匀覆冰下的架空地线覆冰在线监测力学计算模型改进[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4538
Wang Bin，Li Licheng，Wei Fasheng，et al. Research on improvements in the mechanical calculation model of on-line icing

monitoring of overhead ground wires under uneven icing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4538. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20211011

[14]胡聪, 王岩, 石俏, 等. FXBW4-35/70 绝缘子覆冰特点及污秽闪络特性研究[J]. 电力学报, 2021, 36(4): 315
Hu Cong, Wang Yan, Shi Qiao, et al. Study on icing characteristics and pollution flashover characteristics of FXBW4-35/70 insulator[J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(4): 315. DOI:10.13357/j.dlxb.2021.039

[15]张东东, 刘锦, 黄宵宁, 等. 基于空间电场的复合绝缘子非接触式覆冰监测方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(4): 99
Zhang Dongdong, Liu Jin, Huang Xiaoning, et al. Non-contact icing monitoring method for composite insulators based on spatial electric field[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(4): 99. DOI:10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.04.013

[16]汪诗经. 覆冰地区交流复合绝缘子伞形结构优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 31
Wang Shijing. Study on optimization design of shed configurations of AC composite insulators used in ice regions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015: 31

[17]李隆基, 文清丰, 张弛, 等. 沿海地区输电线路覆冰雪规律与闪络预测研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(5): 93
Li Longji, Wen Qingfeng, Zhang Chi, et al. Research on ice-snow covering characteristics and flashover prediction of coastal-region transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(5): 93. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000400

[18]胡玉耀, 刘宗源, 李欣, 等. 正极性直流电场对绝缘子雾凇覆冰的影响机理及覆冰试验验证[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 793
Hu Yuyao, Liu Zongyuan, Li Xin, et al. Influence mechanism of positive DC electric field on rime ice accretion on the insulators and its experimental verification[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 793. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20230079

[19]Liu Zongyuan, Hu Yuyao, Jiang Xingliang, et al. Three-dimensional numerical simulation of rime ice accumulation on silicone rubber insulator and its experimental verification in the natural environment[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213: 108713. DOI:10.1016/j.epsr.2022.108713

[20]李静, 刘航, 于龙滨, 等. 环境因素对复合绝缘子积污特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7772
Li Jing, Liu Hang, Yu Longbin, et al. Influence of environmental factors on pollution accumulation characteristics of composite insulators[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(18): 7772. DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2023.23.18.07772

[21]郭思华. 悬式绝缘子覆雪闪络特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 23
Guo Sihua. Study on flashover characteristics of suspension insulators[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 23

[22]余美玲, 谭新玉. 超疏水涂层应用于绝缘子表面防覆冰作用探究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 108
Yu Meiling, Tan Xinyu. Study on anti-icing performance of superhydrophobic coating on insulator surface[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2023, 45(2): 108. DOI:10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2023.02.017

[23]王黎明, 张楚岩, 任贵清, 等. 特高压交流复合绝缘子伞裙结构的优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2335
Wang Liming, Zhang Chuyan, Ren Guiqing, et al. Optimization of composite insulators' sheds for 1000 kV UHV AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2335. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.2009.10.033

[24]俞宜任, 杨雪峰. 绝缘子耐污伞形设计原则与选用要求[J]. 电瓷避雷器, 2001(4): 16
Yu Yiren, Yang Xuefeng. Design aspects and application of pollution-proof insulator sheds[J]. Insulators and Surge Arresters, 2001(4): 16. DOI:10.16188/j.isa.1003-8337.2001.04.004

[25]曹云东, 冯宇宁, 李静, 等. 直流覆冰绝缘子电气特性及伞裙结构抗冰性能优化研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 177
Cao Yundong, Feng Yuning, Li Jing, et al. Electrical characteristics of DC ice-covered insulators and anti-icing function optimization of shed structure[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 177. DOI:10.16188/j.isa.1003-8337.2021.01.027