

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.013

典型覆冰导线碰撞系数仿真分析

黄新波¹, 郑心心¹, 朱永灿², 王玉鑫¹, 李弘博¹, 崔运涛¹

(1. 西安工程大学电子信息学院, 西安 710048; 2. 西安电子科技大学机电学院, 西安 710071)

摘要: 覆冰碰撞系数是导线覆冰生长预测的关键参数。基于气液两相流标准湍流模型和欧拉—拉格朗日原理建立导线外部二维流场数学模型, 计算水滴的运动轨迹, 实现对圆形、椭圆形、翼形3种典型导线覆冰的碰撞系数仿真; 并分别给出不同迎风攻角下椭圆形、翼形覆冰的碰撞系数。仿真结果表明: 在相同气象条件下, 圆形截面覆冰导线碰撞系数较长短轴比4:3的椭圆形高出4.79%~6.21%, 较翼形高出4.04%~8.14%; 相同导线覆冰形状在0°~30°迎风攻角范围内, 攻角越大, 碰撞系数越高。

关键词: 覆冰导线; 碰撞系数; 迎风攻角; 数值模拟; 流体力学

Simulation Analysis of Collision Coefficient on Typical Shaped Iced-conductors

HUANG Xinbo¹, ZHENG Xinxin¹, ZHU Yongcan², WANG Yuxin¹, LI Hongbo¹, CUI Yuntao¹

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Electro-mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Icing collision coefficient is a key parameter for predicting the growth of conductor icing. Based on the standard turbulence model of gas liquid two phase flow and Euler Lagrange principle, the mathematical model of the two dimensional flow field is established, and the collision coefficient of three typical conductor icing is calculated. The airfoil ice and ellipse ice collision coefficients at different attack angles are calculated. The simulation result shows that the collision coefficient of circular cross section ice is 4.79%~6.21% more than elliptical ice with a axial ratio of 4:3 and 4.04%~8.14% more than wing shape ice under the same weather conditions. The shape of the ice cover in the same wire is in the range of 0°~30°, the higher the attack angle, the higher the impact coefficient is.

Key words: iced-conductors; coefficient collide; attack angle; numerical simulation; fluid dynamics

0 引言

世界各地架空线路由于积雪严重影响了输电线路的可靠性。中国受大气候和微地形、微气象条件的影响, 冰灾事故频繁发生, 许多地区因冻雨覆冰而使输电线路的荷重增加, 造成断线、倒杆(塔)、闪络等事故, 给社会造成了巨大的经济损失^[1-3]。

碰撞系数反映导线捕获过冷却水滴的有效程度^[4], 是导线覆冰生长预测的关键参数。为保证输电线路的安全可靠持续运行, 国内外学者研发了覆冰

在线监测系统^[5-6], 可以实时采集重冰雪地区多冰况下的覆冰参数, 对线路预警起到了重要作用。但由于覆冰在线监测系统仅针对一两档, 广域的覆冰实时监测往往是不现实的。因此, 在模拟常规微气象条件下建立覆冰模型, 分析覆冰机理, 可为除冰、抗冰提供有效参考价值。目前, 国内外学者建立了诸多输电线路覆冰预测数学模型。典型的数学模型有 Imai 模型^[7]、Lenhard 模型^[8]、Goodwin 模型^[9]和 Makkonen 模型^[10-12]。新模型如 McCombe-Govoni 雾淞覆冰模型^[13]、刘和云^[14]等提出认为覆冰增长与风速、降水率和过冷却水滴直径有关的模型。蒋兴良^[15]

收稿日期: 2016-01-19; 修回日期: 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(51177115); 陕西省重点科技创新团队项目(2014KCT-16); 陕西省协同创新计划项目(2014XT-07)。

Project Supportd by National Natural Science Foundation of China(51177115), Key Scientific and Technological Innovation Team of Shaanxi Province(2014KCT-16), Collaborative Innovation Project of Shaanxi Province(2014XT-07).

等以 Makkonen 模型为基础, 由一种较为完善的流体力学模型得出单位时间内单位长度导线上的覆冰量模型。刘春成^[10]等通过引入覆冰强度、碰撞系数、冻结系数、收集系数和导线覆冰形状等参数, 给出圆形截面的覆冰质量及覆冰厚度计算模型。上述模型中, 碰撞系数都是重要因素。然而, 覆冰导线由于气象、自身重力引起的旋转、导线的扭转刚度等因素均会形成不同冰形、迎风攻角^[17-19]。根据长期观测, 自然环境中的覆冰导线的截面形状大多呈椭圆形、翼形、扇形等多种形状^[20-21]。但目前几乎所有估算方法均假设导线的覆冰横截面为圆形, 这种假设往往与大多数输电线路实际覆冰情况不符^[22]。对于不同覆冰截面形状碰撞系数的研究, 还鲜有报道。

文中根据流体力学的基本原理, 利用流体力学软件 FLUENT 建立导线外部二维流场数学模型, 选用气液两相流标准湍流模型和拉格朗日原理计算水滴的运动轨迹, 得出覆冰过程中导线的水滴碰撞系数, 以期从理论上提高碰撞系数的精度。研究覆冰过程中不同冰形、迎风攻角导线的水滴碰撞规律, 仿真得出总体和局部碰撞系数, 并分析其影响因素。

1 输电线路覆冰数学模拟方法

1.1 覆冰增长模型

为更好地分析各种因素对覆冰碰撞系数的影响, 首先介绍导线覆冰增长的 Makkonen 模型, 该论证了覆冰的基本物理特性, 将导线覆冰时间、风吹角度、降水率、导线半径、气温及风速等参量作为模型的输入量, 通过数值计算方法分析和计算了这种覆冰模型(考虑冰柱生长)。式(1)为 Makkonen 公式

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w \cdot A \cdot V. \quad (1)$$

式(1)中: $\frac{dM}{dt}$ 为覆冰增长量; α_1 为碰撞系数; α_2 为结合系数; α_3 为冻结系数; w 为液态水含量; A 为横截面积; V 为风速(垂直物体方向)。一般情况下 α_2 取 1。尽管此模型可宏观描述覆冰增长量, 却并未对碰撞系数 α_1 给出详细计算。Laugmuir^[23]等人提出通过计算对象周围的气流和球形粒子在气流中的运动从理论上得到碰撞系数 α_1 的值。即经验公式

$$\alpha_1 = A - 0.028 - C(B - 0.0454). \quad (2)$$

式(2)中: $A = 1.066K^{-0.00616} \exp(-1.103K^{-0.688})$; $B = 3.641 K^{-0.498} \exp(-1.497K^{-0.694})$; $C = 0.00637(\varphi - 100)^{0.381}$ 。其中, K 为斯托克司常数, φ 为朗缪尔常数。此方法的对于碰撞系数的研究有重要意义, 并广泛应用于圆柱覆冰导线模型中。但局限性在于忽略了冰形和

迎风攻角, 默认导线横截面为圆形, 与实际导线覆冰存在差异。

1.2 流体力学基本流程

上述导线覆冰生长预测模型, 大多将液滴的碰撞系数设定为一个特定常数或者根据经验公式进行简单计算, 这使得求解的导线覆冰碰撞系数存在很大误差。为此, 引入流体力学仿真, 建立覆冰导线仿真模型, 实现对多形态覆冰导线碰撞系数的研究。

1.2.1 控制方程与湍流模型

文中假设: ①气流的温度、密度、粘度等各项物理参数在整个过程中不发生改变; ②水滴为球形, 均匀分布在空气气流场中, 不影响空气气流场。③水滴初始速度与空气气流速度相同; ④水滴在运动过程中不发生热交换、不蒸发, 物性参数不变。基于以上假设, 空气和水滴控制方程没有耦合关系, 对二维不可压缩粘性流体, 在笛卡尔坐标系下其运动规律可用雷诺平均 Navier-Stokes 方程来描述, 建立控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}). \quad (4)$$

式(3)、(4)中: ρ 为空气密度; $x_i, u_j (i, j=1, 2)$ 分别为二维笛卡尔直角坐标系上的坐标分量、速度分量; p 为流体压力; μ 为空气动力粘度系数; $-\rho \overline{u_i u_j}$ 项为雷诺压力。

文中采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型。使用 Boussinesq 假设, 将雷诺压力与平均速度梯度联系起来, 得到

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \sigma_{ij}. \quad (5)$$

式(5)中

$$u_t = c_\mu f_\mu \rho k^2 / \varepsilon. \quad (6)$$

湍流输运方程可以利用湍流能量输运方程(7)和能量耗散输运方程(8)来进行表示。

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho k_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon + \phi_k; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \phi_\varepsilon. \quad (8)$$

式(7)、(8)中右端项分别表示生成项、耗散项和壁面项。其中:

$$c_\mu = 0.09, c_{\varepsilon 1} = 1.45, c_{\varepsilon 2} = 1.92,$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

近壁衰减函数:

$$f_\mu = \exp[-3.4/(1+0.02R_\mu^+)^2];$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_e^2);$$

$$R_e = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}。$$

壁面项:

$$\phi_k = 2\mu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2;$$

$$\phi_\varepsilon = 2\mu \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \mu_t}{\partial y^2} \right)^2。$$

其中 μ_t 为平行于壁面的流动速度。积分到壁面的无滑移边界条件是: $k=0, \varepsilon=0$ 。基本流程见图1。

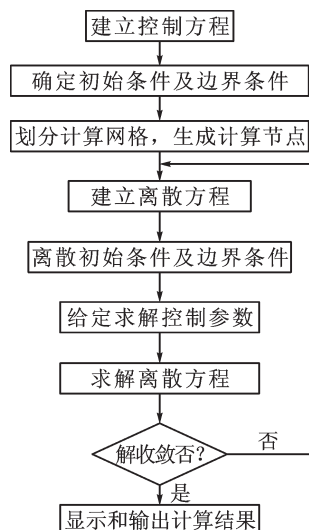


图1 流体力学基本流程图

Fig. 1 Basic flow chart of fluid dynamics

1.2.2 液滴轨迹求解

文中运用欧拉—朗格朗日法求解水滴轨迹。分析水滴受力情况,作用于水滴上的力可表示为

$$F = N + G + f + M。 \quad (9)$$

式(9)中, N 、 G 、 f 、 M 分别为水滴受到的曳力、水滴自身重力、空气浮力、其他作用力。经分析求解只考虑水滴曳力的影响,依据牛顿第二定律建立单位质量水滴微分方程为

$$\frac{F}{m} = \frac{dv}{dt} = \frac{18 \mu C_D R_e}{24 \rho_d d^2} (v - u)。 \quad (10)$$

式(10)中: m 为水滴质量; v 为水滴速度; u 为空气速度; ρ_d 为水滴密度; d 为水滴直径; C_D 为曳力系数; R_e 为水滴雷诺数。对水滴受力式(10)进行积分即可求得水滴运动轨迹。

1.3 碰撞系数物理意义

1.3.1 总体碰撞系数

假设离导线无穷远含有过冷却水滴的气流以均匀速度吹向导线,并作层流流动。气流在导线附近将发生偏转,水滴在导线附近的运动轨迹由于受到气流的扰动也会发生偏转,见图2。设离导线无穷

远处与 x 轴距离为 Y_0 的一个水滴粒子以速度 v 向导线运动,正好在与导线表面相切,且所有在切线轨迹之内的水滴将碰撞导线,而在切线之外运动的水滴都将绕过导线,与导线不会发生碰撞,定义碰撞系数为

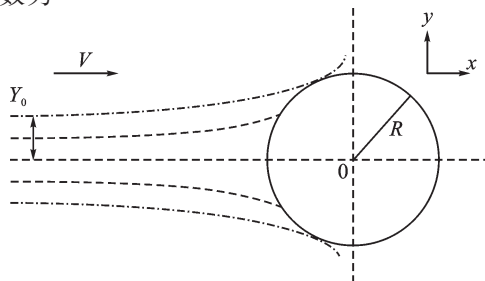


图2 碰撞系数物理模型

Fig. 2 Physical model of coefficient collide

$$\alpha_i = Y_0 / R。 \quad (11)$$

1.3.2 局部碰撞系数

水滴碰撞到导线表面上,其沿导线表面的分布是不均匀的。定义局部碰撞率是指微元表面上实际水滴碰撞率与该微元表面上最大可能的水滴碰撞率之比,因此它是表征微元表面的水收集能力的一个参数,见图3。在离导线无限远处有两个相距为 dY 的水滴粒子 (N_{i-1}, N_i),它们均以速度 V 向输电线路方向运动并与输电线路发生碰撞,碰撞点之间的表面长度为 dL ,则该处局部碰撞率定义为

$$\beta_i = dY / dL \quad (12)$$

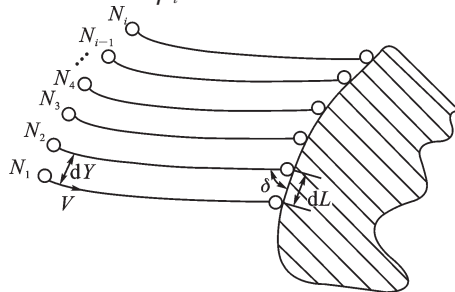


图3 液滴碰撞示意图

Fig. 3 Schematic diagram of droplet collision

2 实验模型及实验概况

2.1 实验概况

微气候覆冰实验室见图4,长4.2 m、宽3.2 m、高2.2 m,可模拟输电线路导线、绝缘子覆冰、融冰过程。导线原型 LGJ-240/30(参考国标 LGJB117983)。导线覆冰模拟装置见图5,导线覆冰模拟装置上4根参数相同的导线模型半径10.8 mm,长100 cm,通过同时测量4根导线模型的碰撞系数取均值进而提高实验精确度。实验液滴中值体积直径取 $50 \mu\text{m}$,环境温度 -5°C ,风速在 $0.5 \sim 10 \text{ m/s}$ 范围,以

0.5 m/s 为增量测量一组覆冰导线碰撞系数。

仿真采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, SIMPLE 算法。将文中仿真的碰撞系数与经验公式^[23]和实验结果进行对比, 结果见图 6, 在设置范围内非常接近, 误差小于 5%, 仿真模型可以很好的应用于典型覆冰模型。

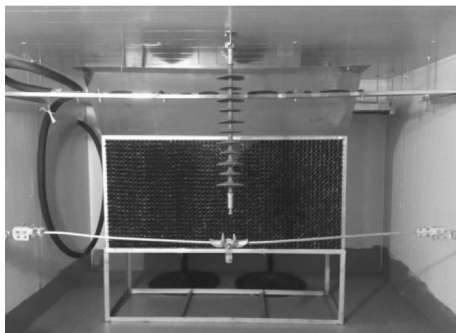


图 4 微气候覆冰实验室

Fig. 4 Micro climate ice laboratory



图 5 导线覆冰模拟装置

Fig. 5 Conductor ice simulation device

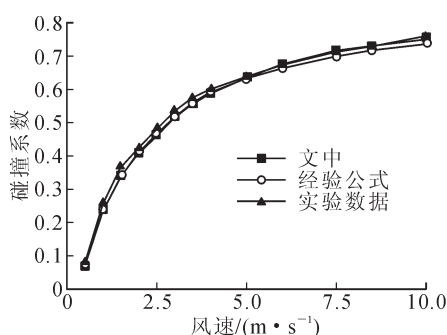


图 6 模型验证

Fig. 6 Model validation

2.2 实验模型

架空输电导线因风速、风向等因素会发生旋转。当过冷却滴撞击导线表面时,覆冰首先在导线迎风侧上生长。当迎风侧覆冰达到一定厚度,其质量足以使导线扭转时,导线发生扭转。扭转后的导线,随时间的积累,覆冰会进一步增长,最终在导线上形成有规则或近似规则截面形状的覆冰,如圆

形、椭圆形。以及非规则截面的覆冰,如翼形、新月形等覆冰形状^[16,19],产生不同的迎风攻角 θ (逆时针为正),见图 7。结合实际观测我国导线的覆冰规律^[24],椭圆形覆冰导线较有代表性且易于量化。

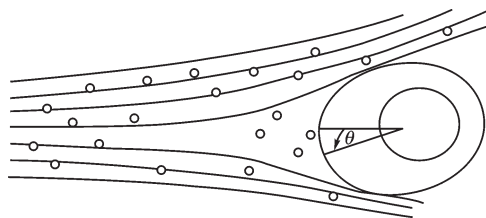
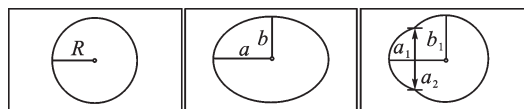


图 7 迎风攻角(以覆冰截面椭圆形为例)

Fig. 7 Attack angle (case of the ellipse)

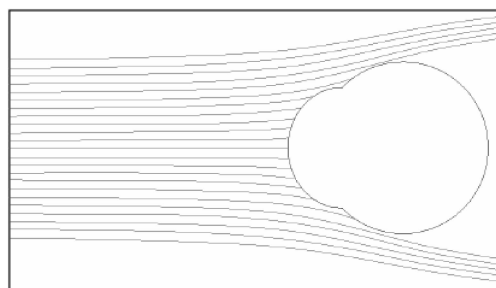
文中以半径为 10.8 mm 的圆形、长轴 14.4 mm 轴比 4:3 的椭圆形和非规则截面的翼形覆冰导线截面作为仿真对象,并对其分别在 0° 、 10° 、 20° 、 30° 迎风攻角下的碰撞系数进行数值模拟。模型参数见图 8。仿真的 0° 攻角下液滴碰撞翼形覆冰导线轨迹见图 9。



(从左至右依次为圆形: $R=10.8$ mm;
椭圆形: $a=14.4$ mm $b=10.8$ mm;
翼形: $a_1=a_2=14.4$ mm $b_1=10.8$ mm)

图 8 模型参数

Fig. 8 Model parameters



(MVD=20 μ m, $v=5$ m/s, $\alpha=0.162$)

图 9 翼形导线覆冰液滴运动轨迹仿真

Fig. 9 Simulation of aerofoil iced-conductor trap

3 仿真结果与分析

3.1 冰形对碰撞系数的影响

3.1.1 0° 迎角的总体碰撞系数

设置液滴中值体积直径(MVD)恒定为 50 μ m,在风速 2.5、5、7.5、10、12.5、15 m/s 条件下,不同形状覆冰导线的液滴碰撞系数仿真结果见图 10。

1) 当风速增大时,3 种典型冰形碰撞系数均随之增大,且逐渐趋于稳定。原因在于较大的风速会赋予液滴更大的动能,气液两相流横掠导线时水滴由于拥有了更大的动能更易偏离气体流线而与导

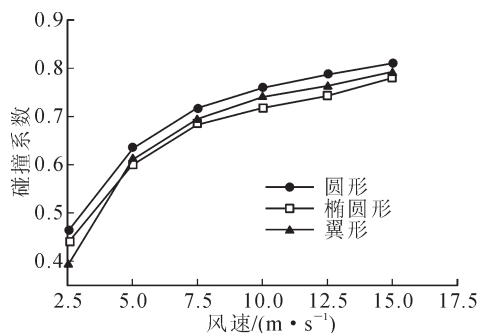


图10 风速对不同冰形碰撞系数影响

Fig. 10 Influence of wind speed on different ice shape collision coefficient

线发生碰撞。当风速达到一定程度($v > 5$ m/s),碰撞系数增长幅度降低。这是由于过大的风速导致空气流动速度大于液滴与导线表面的局部碰撞速度,使液滴更易随着气流轨迹,偏离导线。

2)由仿真数据可得,风速为 2.5~15 m/s 范围内,圆形碰撞系数始终最高,椭圆形次之,翼形最低。这是由于椭圆形、翼形导线迎风侧覆冰有效直径均小于圆形覆冰导线,使导线外表面阻尼减小,液滴在覆冰表面更易偏离。

3)由仿真数据可得,在液滴中值体积直径一定,风速 < 15 m/s 范围内,圆形覆冰导线碰撞系数较椭圆形高出 4.789%,较翼形高出 4.039%。

保持其他条件不变,设置环境风速恒定为 5 m/s,在液滴中值体积直径 10、20、30、40、50、60 μm 条件下,不同形状覆冰导线的液滴碰撞系数仿真结果见图 11。

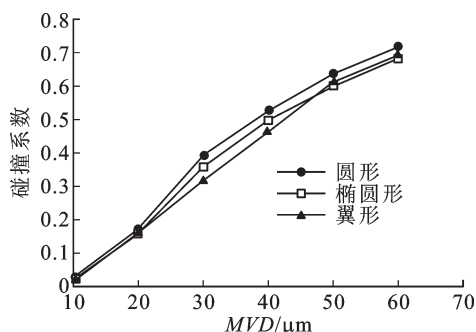


图11 液滴中值体积直径对不同冰形碰撞系数影响

Fig. 11 Influence of MVD on different ice shape collision coefficient

1)随着液滴中值体积直径的增大,圆形、椭圆形、翼形的碰撞系数均增大。原因是等速的大液滴比小液滴拥有更大动能,更易被导线捕获。

2)由仿真结果可得,在风速一定,MVD 为 10~60 μm 范围内,圆形覆冰导线截面液滴碰撞系数始终最高。这是由于翼形与椭圆形迎风侧有效直径均小于圆形,随液滴中值体积直径的增大,液滴的动

能越大,液滴越不容易随着空气绕过导线,最终与导线发生碰撞。当 MVD 在 20~47 μm 时,椭圆形碰撞系数高于翼形;当 MVD 在 47~60 μm 时,翼形碰撞系数高于椭圆形覆冰的碰撞系数。

3)由仿真数据可得,在风速一定,MVD 为 < 60 μm 范围内,圆形导线覆冰碰撞系数较椭圆形高出 6.21%,较翼形高出 8.176%。

3.1.2 0° 迎角的局部碰撞系数

在液滴中值体积直径 50 μm , 风速 5 m/s 条件下局部碰撞系数分布见图 12。相同条件下局部碰撞系数由于覆冰形状的不同而存在差异。翼形覆冰碰撞角度最大,约为 $\pm 75^\circ$,圆形碰撞角度次之,约为 $\pm 70^\circ$,椭圆形范围最小,约为 $\pm 62^\circ$;导线迎风面驻点两侧椭圆形覆冰局部碰撞系数最大,圆形最小,翼形居中;由碰撞系数与碰撞角度的关系曲线,观察到圆形覆冰局部碰撞系数曲线较平滑近似抛物线,椭圆形局部碰撞系数曲线在 $\pm 38.4^\circ$,翼形在 $\pm 38.7^\circ$ 处均出现拐点。这是由于导线迎风侧有效直径变化导致气流分离点的改变致使拐点的出现。以翼形导线为例,前端有效直径较小,在拐点处局部碰撞系数下降变缓,这是由于导线前端宽度越大,空气越易受到阻隔,使得液滴的动能变小,更容易随着空气绕过导线,最终使得局部碰撞率降低。当导线前端宽度增大时,覆冰导线上的最大碰撞角减小。

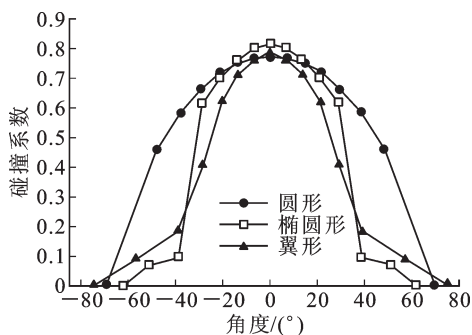


图12 局部碰撞系数

Fig. 12 Local collision coefficient

3.2 攻角对碰撞系数的影响

3.2.1 攻角对椭圆形覆冰导线碰撞系数影响

保持其他条件不变,设置液滴中值体积直径 50 μm ,得到椭圆形覆冰导线在 0° 、 10° 、 20° 、 30° 迎风攻角下风速与碰撞系数的关系曲线,见图 13(a)。在风速范围 2.5~15 m/s, 0° 攻角时椭圆形覆冰导线碰撞系数始终最小, 30° 攻角时最大。

保持其他条件不变,设置风速 5 m/s,得到椭圆形覆冰导线在 0° 、 10° 、 20° 、 30° 迎风攻角下液滴中值体积直径与碰撞系数的关系曲线,见图 13(b)。当 MVD 为 10~20 μm 时,4 种攻角下的碰撞系数相近;

当 MVD 为 $20\sim 60\ \mu\text{m}$ 时,不同攻角下的碰撞系数存在显著差异,随着液滴中值体积直径的增大及攻角的增大,碰撞系数越大。

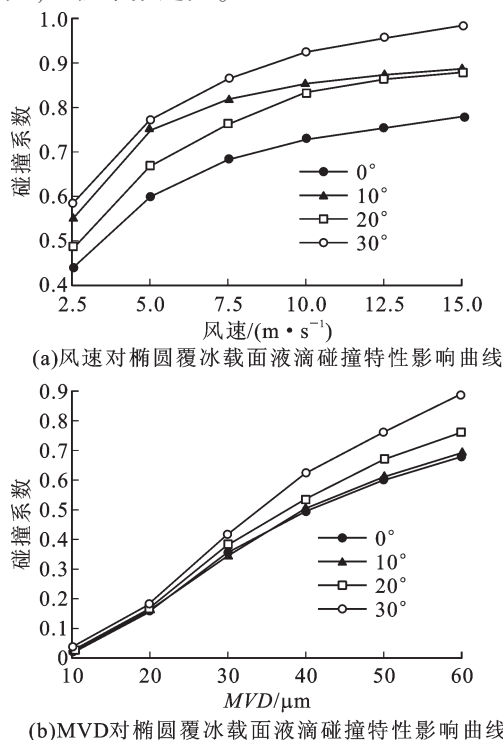


图 13 椭圆形覆冰在不同攻角下碰撞系数仿真结果
Fig. 13 The ellipse ice collision coefficient simulation results under different angle of attack

3.2.2 攻角对翼形覆冰导线碰撞系数影响

保持其他条件不变,设置液滴中值体积直径 $50\ \mu\text{m}$,得到翼形覆冰导线在 0° 、 10° 、 20° 、 30° 迎风攻角下风速与碰撞系数的关系曲线,见图 14(a)。在 $2.5\sim 15\ \text{m/s}$ 范围内,攻角为 30° 时碰撞系数最大, 20° 攻角次之, 0° 与 10° 时的碰撞系数较低。当风速为 $2.5\sim 5\ \text{m/s}$ 时,攻角为 10° 的碰撞系数大于攻角为 0° 的碰撞系数;当风速为 $5\sim 11\ \text{m/s}$ 时,攻角为 0° 的碰撞系数超越了攻角为 10° 的碰撞系数;在风速 $11\ \text{m/s}$ 时,攻角为 0° 、 10° 的碰撞系数趋于同一数值。

保持其他条件不变,设置风速 $5\ \text{m/s}$,得到翼形覆冰导线在 0° 、 10° 、 20° 、 30° 迎风攻角下液滴中值体积直径与碰撞系数的关系曲线,见图 14(b)。对翼形覆冰而言,在 MVD 为 $0\sim 60\ \mu\text{m}$ 范围内,攻角为 30° 时的碰撞系数始终最大,攻角为 20° 次之, 0° 和 10° 最小。当 MVD 在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 、 $50\sim 60\ \mu\text{m}$ 范围时,攻角为 0° 的碰撞系数略大于攻角为 10° 的碰撞系数;当 MVD 为 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 时,攻角为 10° 的碰撞系数大于攻角为 0° 的碰撞系数。

对比图 13(a)、14(a)可得,在攻角、液滴中值体积直径一定的条件下,随风速增大,椭圆形、翼形的碰

撞系数均呈上升趋势,且缓慢趋于稳定。在液滴中值体积直径一定, $0^\circ\sim 30^\circ$ 迎风攻角范围内,随风速的增大,椭圆形覆冰导线碰撞系数平均值高于翼形碰撞系数平均值,更易覆冰;对比图 13(b)、14(b),在攻角、风速一定的条件下,随液滴中值体积直径增大,椭圆形、翼形的碰撞系数均呈上升趋势。在风速一定, $0^\circ\sim 30^\circ$ 迎风攻角范围内,随液滴中值体积直径的增大,翼形导线覆冰碰撞系数平均值高于椭圆形的碰撞系数平均值,更易于覆冰。

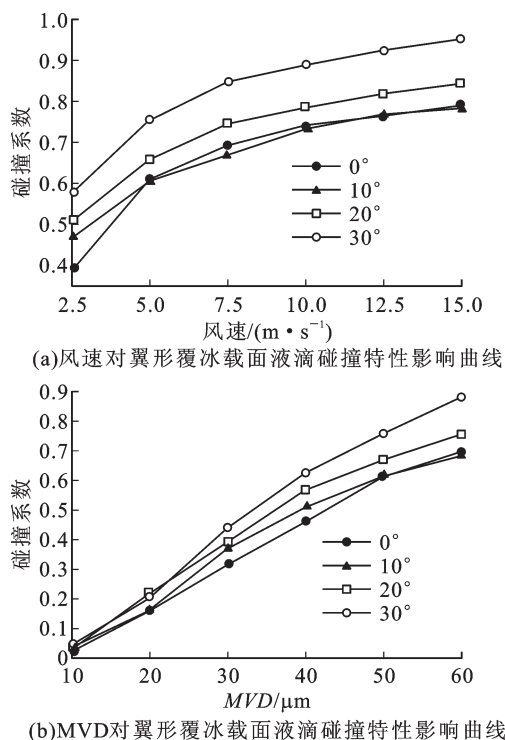


图 14 翼形覆冰在不同攻角下碰撞系数仿真结果
Fig. 14 Airfoil ice collision coefficient simulation results under different angle of attack

对比图 13、14 可得,保持其他因素一定,相同截面覆冰导线在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 迎风攻角范围内,攻角越大,碰撞系数越高。这是由于在不同迎风攻角下,迎风侧的覆冰导线有效直径不同,随风速的增加,液滴具有更大的动能,较大的有效直径使导线捕获的液滴也越多;翼形覆冰导线迎风侧表面不平滑,曲率变化明显,在较小的迎风攻角下 ($0^\circ\sim 10^\circ$) 体现出了碰撞系数的不稳定性。

4 结论

基于欧拉两相流理论,分别对圆形、椭圆形、翼形 3 种典型覆冰形状的碰撞系数仿真,并在不同迎风攻角下对椭圆形、翼形覆冰的碰撞系数曲线进行对比分析,得出以下结论:

1) 覆冰导线因截面形状的不同其局部碰撞系数

存在明显差异,碰撞系数与覆冰导线迎风侧有效直径,以及迎风侧表面的平滑度都有关系。观察到圆形覆冰局部碰撞系数曲线较平滑近似抛物线,而椭圆形、翼形覆冰导线由于迎风侧有效直径的改变,致使局部碰撞系数曲线存在拐点。椭圆形局部碰撞系数曲线在 $\pm 38.4^\circ$ 均有拐点出现;翼形局部碰撞系数曲线在 $\pm 38.7^\circ$ 处出现拐点。

2)迎风攻角对不同覆冰导线截面的碰撞系数影响存在差异,当其他因素一定的条件下,圆形截面的碰撞系数始终最高。在液滴中值体积直径一定的条件下, $0^\circ \sim 30^\circ$ 攻角范围内,随风速的增大,椭圆形覆冰导线碰撞系数平均值高于翼形碰撞系数平均值,更易覆冰。在风速一定的条件下, $0^\circ \sim 30^\circ$ 攻角范围内,随液滴中值体积直径的增大,翼形导线覆冰碰撞系数平均值高于椭圆形的碰撞系数平均值,更易于覆冰。

3)碰撞系数受环境风速、迎风攻角、液滴中值体积直径、覆冰导线截面形状多重因素影响。保持其他因素一定的条件下,相同截面覆冰导线在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 迎风攻角范围内,攻角越大,碰撞系数越高。

参考文献:

- [1] MASOUD F. 电网的大气覆冰[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
MASOUD F. Atmospheric icing of power networks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 李成榕,吕玉珍,崔翔,等. 冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 14-22.
LI Chengrong, LYU Yuzhen, CUI Xiang, et al. Research issues for safe operation of power grid in China under ice-snow disasters[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 14-22.
- [3] 李正,杨靖波,韩军科,等. 2008年输电线路冰灾倒塌原因分析[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 31-35.
LI Zheng, YANG Jingbo, HAN Junke, et al. Analysis on transmission tower toppling caused by icing disaster in 2008[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 31-35.
- [4] 林锐,陈允清,蒋兴良. 基于碰撞特性的导线雾凇覆冰厚度预测模型研究[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 43-48.
LIN Rui, CHEN Yunqing, JIANG Xingliang. A model for predicting thickness of rime ice accretion on conductor based on collision characteristic[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 43-48.
- [5] 黄新波,孙钦东,丁建国,等. 基于GSM SMS的输电线路覆冰在线监测系统[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 72-76.
HUANG Xinbo, SUN Qindong, DING Jianguo, et al. Transmission line icing monitoring system based on GSM SMS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 72-76.
- [6] FARZANCH M. Ice accretions on high-voltage conductors and insulators and related phenomena[J]. Philosophical Transaction of the Royal Society, 2000, 358(1775): 2997-3005.
- [7] IMAI I. Studies on ice accretion[J]. Researches on Snow and Ice, 1953, 3(1): 35-44.
- [8] LENHARD R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1966, 36(3): 1-5.
- [9] GOODWIN E J. Predicting ice and snow loads for transmission lines[C]//Proceedings of the First International Workshop on Atmospheric.[S.l.]:IEEE, 1983: 267-273.
- [10] MAKKONEN L. Modeling power line icing in freezing precipitation[C]//7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.[S.l.]:IEEE, 1996: 195-200.
- [11] MAKKONEN L. Modeling of ice accretion on wires[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(6): 929-939.
- [12] MAKKONEN L. Heat transfer and icing of a rough cylinder[J]. Cold Regions and Technology, 1985, 23(10): 105-116.
- [13] MCCOMBER P, COVONI J W. An analysis of selected ice accretion measurements on a wire at mount Washington [C]//Proceeding of the Forty-second Annual Eastern Snow Conference.[S.l.]:IEEE, 1985: 785-791.
- [14] 刘和云,周迪,付俊萍,等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 45-48.
LIU Heyun, ZHOU Di, FU Junping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 45-48.
- [15] 蒋兴良. 输电线路导线覆冰机理和三峡地区覆冰规律及影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学, 1997.
JIANG Xingliang. Transmission line icing mechanism and the three gorges region icing rule and influence factor research[D]. Chongqing: Chongqing University, 1997.
- [16] 刘春城,刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨淞覆冰模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 241-248.
LIU Chuncheng, LIU Jiao. Ice accretion mechanism and glaze loads model on wires of power transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 241-248.
- [17] FU P, FARZANEH M. Simulation of the ice accretion process on a transmission line cable with differential twisting[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(2): 147-155.
- [18] 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系[J]. 中国电力, 2005, 38(3): 35-39.
XIE Yunhua. The relation between meteorological elements and ice accretion in three gorges region[J]. Electric Power, 2005, 38(3): 35-39.
- [19] 顾明,马文勇,全涌,等. 两种典型覆冰导线气动力特性及稳定性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 1328-1332.
GU Ming, MA Wenying, QUAN Yong, et al. Aerodynamic

(下转第95页)

- 新型消弧线圈[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 77-81.
- CHENG Lu, CHEN Qiaofu, ZHANG Yu, et al. Novel arc-suppression coil based on the theory of transformer with controllable load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 77-81.
- [9] 唐 轶, 王志萍. 滞后相接电容自动跟踪漏电流全补偿技术[J]. 煤矿安全, 1995, 26(4): 10-13.
- TANG Yi, WANG Zhiping. Auto tracking full current compensation by connecting capacitor in lagged phase[J]. Safety in Coal Mines, 1995, 26(4): 10-13.
- [10] 唐 轶, 陈 奎, 陈 庆, 等. 单相接地故障全电流补偿的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 92-96.
- TANG Yi, CHEN Kui, CHEN Qing, et al. Research on the full current compensation of one-phase-to-ground fault[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(5): 92-96.
- [11] 董一脉. 有源全补偿消弧控制的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- DONG Yimai. Research on active & full-compensating arc suppression control[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [12] 曲铁龙. 全补偿消弧线圈及其控制方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- QU Yilong. Research on full-compensation arc-suppression coil and its control technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [13] 赵 莹. 有源全补偿消弧控制 H_∞ 控制算法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- ZHAO Ying. Research on the active full compensation & arc-suppression control based on the H_∞ control theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [14] 马 垚. 有源全补偿消弧线圈及接地电流检测算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- MA Yao. Research on active and full compensation arc suppression coil and grounding current detection algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [15] 曲铁龙, 董一脉, 谭伟璞, 等. 基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 29-33.
- QU Yilong, DONG Yimai, TAN Weipu, et al. Research on new type arc-suppression coil based on single-phase active power filter technology[J]. Relay, 2007, 35(3): 29-33.
- [16] 陈 庆. 谐振接地系统关键技术的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- CHEN Qing. Research of key technologies on resonance grounding system[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2009.
- [17] 贾晨曦, 王崇林, 杨龙月. 基于动态相量建模的全补偿消弧线圈无源性控制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 650-655.
- JIA Chenxi, WANG Chonglin, YANG Longyue. The passivity-based control algorithm for full compensation arc suppression coil using dynamic phasor models[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 650-655.
- [18] 王崇林. 中性点接地方式与消弧线圈[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- WANG Chonglin. Methods of neutral point to earth and arc-suppression coil [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.

贾晨曦(1987—), 女, 博士, 主要研究方向为供配电安全与智能电器(通信作者)。

王崇林(1956—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为供配电安全与配网自动化。

杨龙月(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电能质量监测。

(上接第 88 页)

- force characteristics and stabilities of two typical iced conductors[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37(10): 1328-1332.
- [20] 范松海, 龚奕宇, 刘益岑, 等. 自然覆冰条件下的输电线路覆冰形状特征[J]. 四川电力技术, 2014, 37(4): 14-17.
- FAN Songhai, GONG Yiyu, LIU Yiyin, et al. Transmission line icing shape characteristics under natural icing conditions[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014, 37(4): 14-17.
- [21] 向 泽, 蒋兴良, 胡建林, 等. 雪峰山试验站自然条件下导线覆冰厚度形状校正系数[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3606-3611.
- XOAMG Ze, JIANG Xingliang, HU Jianlin, et al. Shape correction coefficient of the icing thickness on conductors under natural icing condition at Xuefeng mountain test station[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3606-3611.
- [22] 肖良成, 李新民, 江 俊. 典型覆冰导线的气动稳定性分析[C]//第 21 届全国结构工程学术会议论文集, 沈阳: 中国力学学会工程力学编辑部, 2012: 306-311.
- [23] MASOUD F. Atmospheric icing of power networks[M]. Canada: Springer, 2008.
- [24] 李立涅, 阳 林, 郝艳捧. 架空输电线路覆冰在线监测技术评述[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 237-243.
- LI Licheng, YANG Lin, HAO Yanbang. Review of on-line monitoring of ice coating on overhead transmission line[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 237-243.
- 黄新波(1975—), 男, 博士(后), 教授, 主要研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术研究。