

八分裂输电导线结冰风洞及气动力特性试验

肖正直¹, 晏致涛¹, 李正良¹, 汪之松¹, 黄汉杰²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆市 沙坪坝区 400030;
2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川省 绵阳市 621000)

Wind Tunnel and Aerodynamic Characteristics Tests for Ice-Covering of Transmission Line Adopting 8-Bundled Conductor

XIAO Zheng-zhi¹, YAN Zhi-tao¹, LI Zheng-liang¹, WANG Zhi-song¹, HUANG Han-jie²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400030, China;
2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: By means of wind tunnel test for ice-covering transmission line adopting 8-bundled conductor, the ice-covering process and regularity of conductor are revealed, and test results show that the temperature, wind speed and moisture content in air are important factors impacting ice-covering of conductor. The aerodynamic characteristics tests of 8-bundled conductors with or without ice-coating are systemically conducted for two different types of ice, and the aerodynamic force coefficients of the 8-bundled conductor are given; the disturbance of conductor in advanced position to flow field and the influence of wake flow on aerodynamic characteristics of conductor are analyzed. Test results reflect the aerodynamic characteristic regulation of 8-bundled conductor, thus it is available for reference to the research on the galloping of ice-coated conductors.

KEY WORDS: ice-coated transmission conductor; 8-bundled conductor; UHV; wind tunnel test of icing

摘要: 通过八分裂输电导线的结冰风洞试验, 揭示了导线的覆冰过程与规律, 温度、风速及空气中的含水量都是影响导线覆冰量的重要因素。针对两类不同冰型, 系统地进行了八分裂导线和覆冰八分裂导线的气动力特性试验, 给出了八分裂导线的三分力系数。分析了上游导线对流场的干扰和尾流的作用对导线气动力特性的影响。试验结果反映了八分裂覆冰导线的气动力特性规律, 为覆冰导线的舞动研究提供了参考。

关键词: 覆冰导线; 八分裂导线; 特高压; 结冰风洞试验

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678181, 50708118); 国家电网公司科技项目资助(SGKJ2007413)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50678181, 50708118).

0 引言

导线覆冰后在风荷载的激励下容易发生大幅低频舞动^[1-2]。这种振动对线路的安全运行造成的危害十分严重, 如线路频繁跳闸与停电、导线的磨损、烧伤与断线, 金具的损坏等。导线舞动对输电线路的危害已引起人们的重视, 中国是世界上输电线路覆冰最为严重的国家之一^[3]。特别是从 2008 年 1 月 10 日开始, 我国华中、华东部分地区出现长时间持续的大强度、大范围低温雨雪冰冻天气, 导致湖南、江西、安徽、湖北等地的电网发生倒塔、断线、舞动、覆冰闪络等多种灾害^[4]。受灾区域内 626 条 500 kV 线路, 累计停运 119 条, 停运率 19.01%; 3 658 条 220 kV 线路, 累计停运 343 条, 停运率 9.38%^[5-6]。随着西部大开发、西电东送电力发展战略的实施及 1 000 kV 交流、±800 kV 直流超高压、特高压输电线路的建设, 将有越来越多的输电线路跨越峡谷、河流、微气象地区, 输电线路覆冰现象将不可避免, 因此对特高压输电线路使用八分裂导线覆冰机理及覆冰导线的气动力特性研究是十分必要的^[7-8]。

文献[9]用自制的试验箱研究了输电导线的覆冰过程和规律。文献[10-13]详细论述了输电导线的覆冰增长率模型; 文献[14]通过一系列的结冰风洞试验验证了覆冰增长率模型; 文献[15]通过仿真计算得出了环境温度、风速、水滴直径、空气中液态水含量及导线传输电流等参量之间的关系, 并提出通过提高线路传输电流减少或防止导线覆冰; 文献[16]对现有的主要雨淞覆冰模型进行了分析, 提出

了一个相对简单的覆冰预测模型；文献[17-18]分别对湖南电网及庐山地区的冰灾情况进行了现场取样实测，分析导线覆冰的天气原因及其特点；文献[19]针对覆冰导线的气动力特性和驰振机理进行了风洞试验；文献[20-22]等对覆冰分裂导线的气动力特性进行了研究，分析了分裂导线尾流间的相互作用和冰厚、风速等因素对气动力特性的影响；文献[23]根据流体力学 N-S 方程和边界层理论建立了覆冰导线的数学模型，通过数值计算模拟了新月型覆冰导线的阻力系数和升力系数；文献[24-25]分别对高雷诺数下覆冰导线和新月形覆冰导线的气动力特性进行了数值模拟。由于试验条件的限制，从试验的角度探讨导线覆冰机理和防覆冰措施的研究成果国内外还不多见。本文将在输电导线结冰试验的基础上对特高压输电线路应用的八分裂导线结冰前后的气动力特性进行详细的分析。

1 输电导线结冰风洞试验

1.1 试验方法

输电导线结冰风洞试验在中国空气动力研究与发展中心低速所结冰风洞进行。该风洞为国内唯一的结冰试验风洞。风洞为回流式低速风洞，试验段断面为 0.3 m(宽)×0.2 m(高)的切角矩形，稳定风速约为 5~40 m/s，温度为-40℃~10℃。输电导线模型选用 LBGJ-210 钢绞线，外径 18.75 mm，总截面积 209.85 mm²，试验模型长度为 180 mm。为获得较好的二维性，在模型的两端安装了直径为 150 mm 的端板。风洞试验段及输电导线模型如图 1 所示。

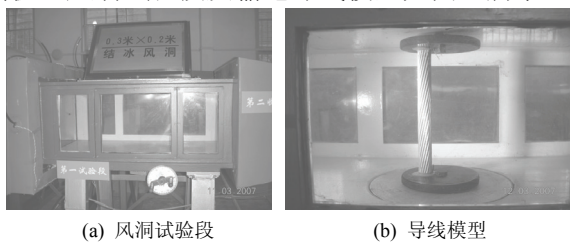


图 1 风洞试验段及导线模型
Fig. 1 Wind tunnel test section and conductor model

试验包括导线结冰量随时间的变化以及风速和温度对结冰量的影响。试验过程中，先运行风机和压缩机，直到风速和温度均稳定到试验风速和温度后再打开喷雾开关并计时，到达时间点后及时测量模型质量、覆冰厚度及冰型。

1.2 覆冰量随时间的变化

Doree Jacques 提出了恒覆冰率模型和恒相对覆冰率模型^[3]。恒覆冰率为

$$M(t)=M(0)+kt \tag{1}$$

恒相对覆冰率为

$$M(t)=M(0)e^{kt} \tag{2}$$

式中： $M(t)$ 为 t 时刻的累计覆冰量； $M(0)$ 为初始覆冰量； k 为常数，与温度和含水率有关系，通过现场实测数据确定。

将温度恒定为-5℃，喷雾量及雾滴大小均相同，在不同风速下，输电导线结冰后覆冰质量随时间的变化如图 2 所示。覆冰质量随时间的变化基本上呈线性增长关系，与 Doree Jacques 的恒覆冰率模型模拟较好。随风速不同，增长率有较大的差异，在 $v=15\text{m/s}$ 时有极值，冰型为扇形，其他风速下，冰型均为新月形。图 3 为-5℃条件下结冰 24 min 时输电导线中间部位的冰型形状，因上下端板对气流、水雾分布有一定影响，图中仅列出导线中间位置处的冰型形状。

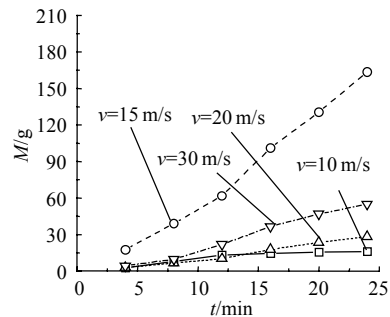


图 2 不同风速下覆冰量与时间的关系
Fig. 2 Ice mass vs time at different wind speed

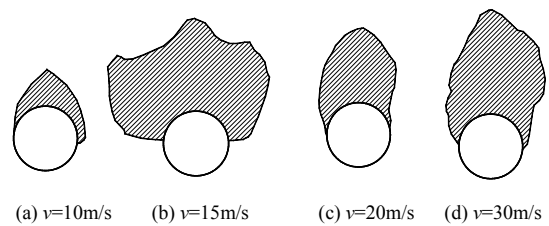


图 3 导线冰型
Fig. 3 Conductor ice model

1.3 温度及风速对覆冰量的影响

1.3.1 温度对覆冰量的影响

试验风速为 15 m/s、20 m/s，喷雾量及雾滴大小在试验过程中保持不变，试验温度在-5℃~-25℃间变化，结冰时间为 16 min。图 4 为不同风速下覆冰量与温度的关系。

在风速、喷雾量、雾滴直径及时间相同的条件下，覆冰量与温度不呈线性关系，在-10℃时有极大值。在风速 15 m/s 时的覆冰量要比 20 m/s 时要大。风速过大，撞击到导线上的部分雾滴没能凝结就被风吹散，故覆冰量要小。

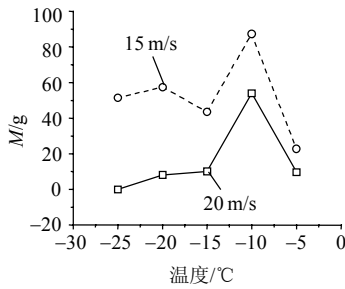


图4 覆冰量与温度的关系

Fig. 4 Ice mass vs temperature

1.3.2 风速对覆冰量的影响

试验气温为 -10°C ，喷雾量及雾滴大小在试验过程中保持不变，试验风速在 $10\text{ m/s}\sim 30\text{ m/s}$ 间变化，结冰时间为 16 min 。图5为覆冰量与风速的关系。

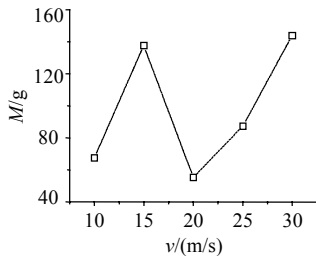


图5 覆冰量与风速的关系

Fig. 5 Ice mass vs wind speed

本次试验采用喷头供水，单位时间的喷雾量和雾滴直径恒定，当增大风速 v 时，空气中单位体积的含水量 W 相应下降，实际维持 VW 不变^[8]，即试验测定的风速对导线覆冰量的影响，不是在恒定空气中含水量的条件下测出的。覆冰量与风速不呈线性关系，在风速 $v=15\text{ m/s}$ 时有极大值。

1.4 导线的结冰形状

在不同气象条件下，输电导线可以结成不同形状的冰型。通过中山口舞动现场的观测，导线冰型主要有新月形和扇形。试验表明，新月形覆冰主要在气温适中、喷水雾化良好的条件下形成。冷却的雾滴在到达试件表面时，一触即凝。

扇形覆冰主要在气温较高，雾滴直径和风速适中的情况下形成。在气温较高时，雾滴达到导线表面时不能及时凝结，在未凝结之前，强风将雾滴推向两边，逐渐形成向两边扩展的扇形冰块。

2 八分裂导线气动力特性试验

2.1 试验方法

覆冰导线的气动力特性是研究导线舞动的前提，本次试验着重研究附着2种不同冰型的单根导线的气动力参数和八分裂覆冰导线不同间距下尾流的影响。试验在中国空气动力研究与发展中心低

速所 $1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}$ 风洞进行，风洞为直流式低速风洞，试验段为截面 $1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}$ 的切角矩形，试验段长 2.8 m ，稳定风速为 $10\sim 50\text{ m/s}$ 。试验用TG0151A杆式六分量应变天平测量试验模型3个方向的力和力矩。导线模型用有机玻璃棒和空心铝管加工而成，模型长 900 mm ，直径为 22.5 mm ，模型比例为 $1:1.33$ 。将其中一根导线模型与天平连接，通过旋转装于模型两端转盘，测试在不同位置时杆件的阻力，经过整理得到分裂导线的阻力系数，几何参数及导线布置如图6所示。

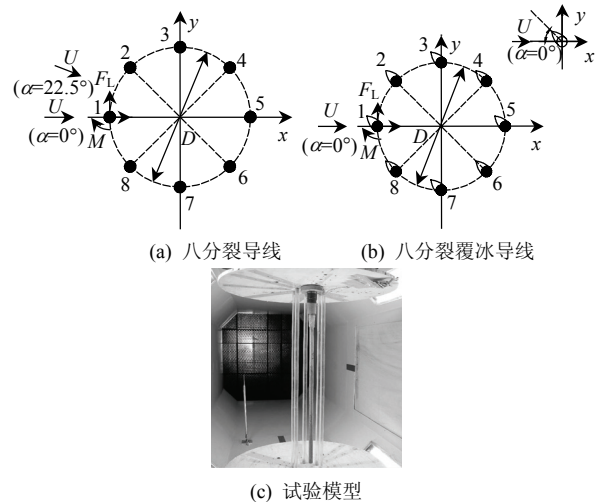


图6 八分裂导线布置及几何参数示意图

Fig. 6 Sketch map of 8-bundled conductor and parameter

D 表示分裂导线之间的间距，原型导线间的距离分别为 1000 mm 、 800 mm 、 600 mm 、 400 mm 、 300 mm 。 α 表示风向与分裂导线模型的夹角， β 为风向与冰型的夹角。试验在均匀流中进行，风速 $v=12\text{ m/s}$ 。试验得到的气动力特性系数 C_L 、 C_D 、 C_M 均按风轴系给出

$$\begin{cases} C_D = F_D / 0.5\rho V^2 dL \\ C_L = F_L / 0.5\rho V^2 dL \\ C_M = M_z / 0.5\rho V^2 d^2 L \end{cases} \quad (3)$$

式中： V 为参考风速； ρ 为空气密度； d 、 L 分别为导线的参考直径和参考长度。

2.2 八分裂导线气动力特性

在 $\alpha=0^{\circ}$ 、 22.5° 风向角下，各根分裂导线阻力系数及八分裂导线阻力系数如图7所示。考虑到对称性，图中只给出了1~5号导线的阻力系数。从图可知，由于上游导线对流场的干扰和尾流的作用，处于下游位置导线的阻力系数会有明显变化。在 0° 风向角时，1~3号导线阻力系数变化不大；4号导线阻力系数明显降低，5号导线阻力系数又有所回

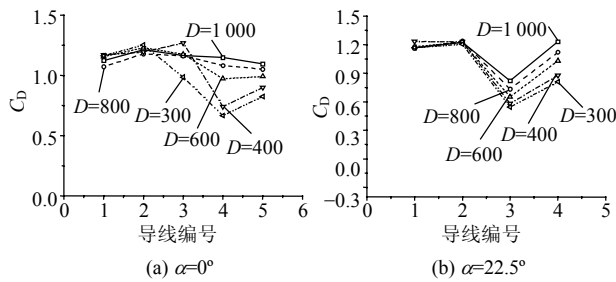


图7 不同间距下各根导线的阻力系数

Fig. 7 Conductors resistance coefficient at different interval
 升。在 22.5° 风向角时，1~2 号导线阻力系数变化不大；3 号导线阻力系数明显降低，4 号导线阻力系数又有所回升。分裂间距越小，这种变化趋势越明显。导线模型为圆形截面，单根导线的升力系数和扭矩系数都很小，图中未列出。

图 8 为八分裂导线在不同间距下的总体阻力系数。由图可知，随着分裂间距的减小，遮挡效应越明显，阻力系数越小。在 22.5° 风向角时的遮挡效应要比 0° 风向角时大。

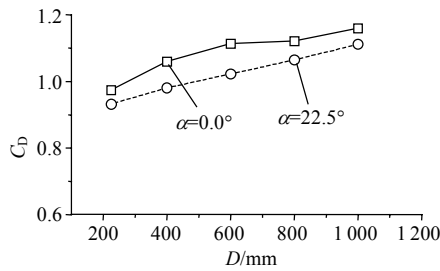


图8 八分裂导线的阻力系数

Fig. 8 Resistance coefficient of 8-bundled conductors

2.3 单根覆冰导线气动力特性

单根附着新月形和扇形覆冰导线三分力系数如图 9 所示，覆冰厚度及形状分别取图 3(b)和图 3(d)的冰型厚度和形状。考虑对称性覆冰导线的气动力参数只给出了 $\beta=0^\circ\sim 180^\circ$ 的值。由图可知， $\beta=0^\circ$ 时，新月形冰型由于其气动阻力特性较好，导线阻力系数远小于扇形冰型导线，但由于其侧面尺寸较大， $\beta=90^\circ$ 附近时，阻力系数已大于扇形冰型导线，最大值为 4.01。试验测得单根无冰导线的阻力系数为 1.22，覆冰时导线的阻力系数明显大于无冰情况。

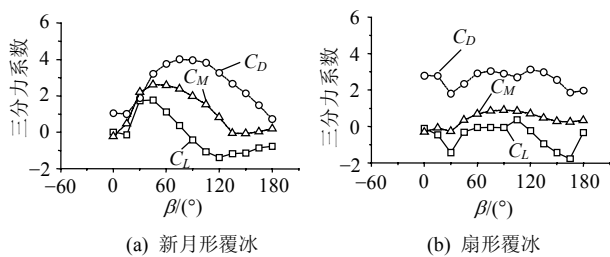


图9 单根覆冰导线三分力系数

Fig. 9 Three static forces coefficient of single Iced conductor

覆冰导线的升力、扭矩系数随风向角有类似变化。

2.4 八分裂覆冰导线气动力特性

新月形和扇形冰型的八分裂导线模型在分裂导线间距 $D=1\ 000\text{ mm}$ ，来流风向角 $\alpha=0^\circ$ ，冰型与来流夹角 $\beta=0^\circ、45^\circ、90^\circ、135^\circ、180^\circ$ ，覆冰导线的三分力系数如图 10 所示。

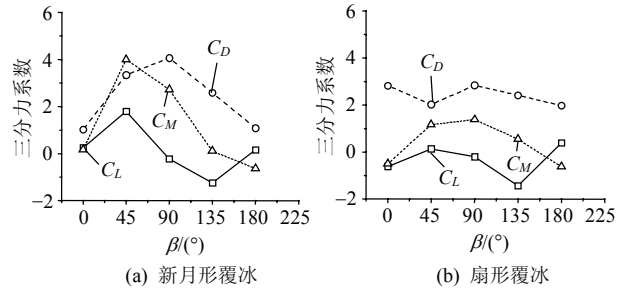


图10 八分裂覆冰导线三分力系数

Fig. 10 Three static forces of iced 8-bundled conductors

八分裂新月形覆冰导线三分力系数变化规律比较复杂，冰型与来流夹角在 $\beta=0^\circ、180^\circ$ 时阻力系数与不带冰型相当，其他角度下各根导线的阻力系数都比不带冰型时大， $\beta=90^\circ$ 时各根导线的挡风面积最大，所有阻力系数也最大。升力系数在 $\beta=45^\circ、135^\circ$ 时有极大值。上游导线对下游各导线间也存在屏蔽作用，各风向角下，八分裂新月形覆冰导线的三分力系数约为单根覆冰导线的 0.965 倍。

八分裂扇形覆冰导线气动力特性与新月形覆冰有较大区别。各角度下，其阻力系数 C_D 都比新月形大，并且无多大变化。升力和扭转系数在各角度下都维持在一个比较稳定的范围。上游导线对下游各导线间也存在屏蔽作用，各风向角下，八分裂新月形覆冰导线的三分力系数约为单根覆冰导线的 0.866 倍。

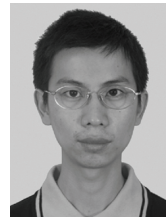
3 结论

- 1) 覆冰质量随时间的变化基本上呈线性增长关系，与 Doree Jacques 的恒覆冰率模型模拟较好。
- 2) 温度及风速对覆冰量的影响很大，但与覆冰量不呈线性关系。风速和温度越低，覆冰量越大。
- 3) 新月形和扇形覆冰导线的气动力特性截然不同，气动力系数随风向角变化。覆冰形状及厚度是影响气动力特性的主要因素。
- 4) 对八分裂导线，由于上游导线对流场的干扰和尾流的作用使得下游导线的阻力系数有明显变化，分裂间距越小影响越大。
- 5) 2 种冰型的八分裂导线气动力特性有较大区别，由于导线的挡风面积增大，阻力系数比无冰时

要大。上游导线对流场的干扰和尾流的作用对下游导线的气动力特性影响很大。八分裂覆冰导线的整体三分力系数均小于单根覆冰导线的三分力系数。

参考文献

- [1] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping Part II -torsional mechanism[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(5): 708-720
- [2] Wang J W, Lilien J L. Overhead electrical transmission line galloping: a full multi-span 3-dof model, some applications and design recommendations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 909-916
- [3] 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: 4-12.
- [4] 马俊, 蒋兴良, 张志劲, 等. 交流电场对绝缘子覆冰形成的影响机理[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 7-11.
Ma Jun, Jiang Xingliang, Zhang Zhijin, et al. Impact mechanism of ac electric field on formation of iced on insulators[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 7-11(in Chinese).
- [5] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-22.
Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-22(in Chinese).
- [6] 杨靖波, 李正, 杨风利, 等. 2008 年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(4): 4-8.
Yang Jingbo, Li Zheng, Yang Fengli, et al. Analysis of the features of covered ice and collapsed tower of transmission line snow and ice attacked in 2008[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(4): 4-8(in Chinese).
- [7] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
Chang Hao, Shi Yan, Yin Weiyang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6(in Chinese).
- [8] 蒋兴良, 马俊, 王少华, 等. 输电线路冰害事故分析及原因分析[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 27-30.
Jiang Xingliang, Ma Jun, Wang Shaohua, et al. Transmission lines' ice accidents and analysis of the formative factors[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 27-30(in Chinese).
- [9] 龙小乐, 鲍务均, 郭应龙, 等. 输电导线覆冰研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(5): 102-107
Long Xiaole, Bao Wujun, Guo Yinglong, et al. Study of coagulated ice on power transmission conductors[J]. J Wuhan Univ of Hydr & Elec Eng, 1996, 29(5): 102-107(in Chinese).
- [10] Imai I. Studies on ice accretion[J]. Researches on Snow and Ice, 1953, 3(1): 35-44.
- [11] Lenhard R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1955, 36(3): 1-5.
- [12] Goodwin E J, et al. Predicting ice and snow loads for transmission lines[C]. Proceedings First IWAIS, 1983, Hanover, HN.
- [13] Makkonen L. Modeling power line Iced in freezing precipitation [C]. 7th International Workshop on Atmospheric Iced of Structures, 1996, Canada.
- [14] Ping Fu, Farzaneh M, Bouchard G. Two-dimensional modeling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors [J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 46: 132-146.
- [15] 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 141-145.
Sun Caixin, Jiang Xingliang, Xiong Qixin, et al. Analysis of critical iced conditions of conductor and wet-dry growth[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(3): 141-145(in Chinese).
- [16] 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): 44-47.
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): 44-47(in Chinese).
- [17] 黄强, 王家红, 欧名勇. 2005 年湖南电网冰灾事故分析及其应对措施[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 16-19.
Huang Qiang, Wang Jiahong, Ou Mingyong. Analysis on accidents caused by iced damage in hunan power grid in 2005 and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 16-19(in Chinese).
- [18] 周宏. 庐山地区配电线路的覆冰特点及防御措施[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 106-108.
Zhou Hong. Features and countermeasures for ice coating on power distribution grid in Lusan China[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 106-108(in Chinese).
- [19] Chabart O, Lilien J L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998 (74-76): 967-976.
- [20] 李万平, 杨新祥, 张立志. 覆冰导线群的静气动力特性[J]. 空气动力学学报, 1995, 13(4): 427-434.
Li Wanping, Yang Xinxiang, Zhang Lizhi. Static aerodynamic characteristics of the galloping of bundled iced power transmission lines [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1995, 13(4): 427-434(in Chinese).
- [21] 李万平. 覆冰导线群的动态气动力特性[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(4): 413-420.
Li Wanping. Dynamic Aerodynamic characteristics of the galloping of bundled iced power transmission lines[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(4): 413-420(in Chinese).
- [22] 李万平, 黄河, 何铿. 特大覆冰导线气动力特性测试[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(8): 84-86.
Li Wanping, Huang He, He Zeng. Aerodynamic characteristics of heavily iced conductors[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2001, 29(8): 84-86(in Chinese).
- [23] 黄河, 刘建军, 李万平. 覆冰导线气动力特性的数值模拟[J]. 工程力学, 2003(增刊): 201-204.
Huang He, Liu Jianjun, Li Wanping. Numerical simulations of iced conductors' aerodynamic characteristics[J]. Engineering Mechanics, 2003(S1): 201-204(in Chinese).
- [24] 姚育成. 高雷诺数下覆冰导线气动力特性的数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [25] 滕二甫, 段忠东, 张秀华. 新月形覆冰导线气动力特性的数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2008(121): 86-88
Teng Erfu, Duan Zhongdong, Zhang Xiuhua. Numerical simulations of lunular iced conductor's aerodynamic characteristics[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008(121): 86-88(in Chinese).



肖正直

汪之松(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事输电塔抗风研究;
黄汉杰(1973—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事空气动力研究。

收稿日期: 2008-09-15。

作者简介:

肖正直(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事输电塔抗风研究, E-mail: xzdz1979@126.com;

晏致涛(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事大跨度桥梁及高耸结构抗风研究;

李正良(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨度桥梁及输电塔抗风研究;

(编辑 王晔)