

基于数值模拟与风洞试验的多分裂导线 阻力系数干扰效应

郭向华¹, 邓锋华¹, 肖雁², 林锐³, 翁兰溪³, 陈伏彬²

(1. 国网福建省电力有限公司建设分公司, 福建 福州 350003; 2. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建 福州 350003)

摘要:为研究分裂导线阻力系数随风攻角与分裂间距的变化规律, 采用 CFD 数值模拟方法研究了不同分裂数与分裂间距下的低风压导线阻力系数随风攻角的变化规律。通过在边界层风洞中开展 90 cm 长的导线节段模型试验, 获得了低风压导线不同风攻角条件下导线阻力系数随雷诺数、尾流干扰的变化规律, 并与数值模拟结果进行对比。研究表明: 多分裂导线阻力系数干扰效应明显, 随着分裂数的增加, 平均阻力系数可降低 20% 以上; 多分裂导线阻力系数随风攻角变化明显, 在风偏的情况下将出现风阻系数峰值; 二分裂导线在风攻角为 18°~24° 出现峰值, 四分裂导线在风攻角为 22.5°~30° 出现峰值; 分裂导线风荷载设计应考虑风偏下的不利影响, 以及干扰效应影响。

关键词:分裂导线; 风阻系数; 干扰效应; 风洞试验; 数值模拟

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.022 中图分类号: TM75 文章编号: 1673-9140(2022)01-0186-07

Study of interference effect of bundled conductors drag coefficient based on numerical simulation and wind tunnel test

GUO Xianghua¹, DENG Fenghua¹, XIAO Yan², LIN Rui³, WENG Lanxi³, CHEN Fubin²

(1. Construction branch of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;
2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114;
3. Power China Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: To study the variation law of drag coefficient for the bundled conductor with the wind attack angle and splitting distance, the CFD numerical simulation method is employed to study the drag coefficient variation law with the wind direction angle of drag reduced conductor under different splitting numbers and spacing. A model test is carried out in the boundary-layer wind tunnel for a 90-cm conductor. Under different wind attack angles, the drag coefficient variation of the drag reduced conductor, concerning Reynolds number and interference effect, are obtained and then compared with numerical simulation results. Research results show that the interference effect of the multi-bundled conductor drag coefficient is noticeable, and the average drag coefficient can be reduced by more than 20% with the

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(51778072); 长沙理工大学实践创新项目(SJCX202021)

通信作者: 陈伏彬(1981-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事工程结构抗风研究; E-mail: fbchen88@126.com

increase of splits. The multi-bundled conductor drag coefficient varies obviously with the wind attack angle. The peak value of the wind drag coefficient will appear in the case of windage yaw. The peak value of 2-bundled conductor appears at a wind attack angle of $18^{\circ}\sim 24^{\circ}$, and the peak value of 4-bundled conductor appears at a wind attack angle of $22.5^{\circ}\sim 30^{\circ}$. The wind load design of bundled conductors should consider the adverse influence of windage yaw and the interference effect.

Key words: bundled conductor; drag coefficient; interference effect; wind tunnel test; numerical simulation

随着电力基础设施的建设不断地完善,高压长距离输电技术得到了很大的发展与进步,输电线路的抗风性能越来越凸显作用^[1]。根据研究表明,作用于长距离高压输电导线的风荷载约占输电线路所受总体风荷载的 $60\%\sim 80\%$ ^[2],如何减小导线的风荷载对提高输电线路抗风安全性具有重要意义,同时对降低工程成本也起到重要作用。因此,研发高效降低风荷载的低风压导线极具重要意义^[3-4]。

由流体力学可知,导线风压阻力系数 C_d 主要取决于雷诺数 R_e 。为了让输电导线在设计风速下阻力系数较小,通过外层设计改变表面粗糙度,雷诺数 R_e 在临界风速满足设计要求时,阻力系数 C_d 达到最小值^[5]。低风压导线就是一种具有特殊外形的特别导线,通过对导线表面结构进行特殊设计,使迎风侧边界层分离发生在超临界区,从而降低导线的风阻系数,例如高尔夫表面低风压导线,如图 1 所示,其利用表面凹痕促使湍流转捩发生,造成背后的低压区减小,从而减少了阻力^[6]。国内外许多输电线路工作者和科研机构通过风洞试验或数值模拟方法开展了低风压导线研究,并取得了丰硕成果^[7-12]。文献[7]详细阐述了低风压导线的特性,并预测了其发展趋势;文献[8]研究发现现场实测得到的导线阻力系数和风洞试验结果有较大差异;文献[9]分析了造成导线风洞试验测量误差的多种可能因素,并推广至工程应用。中国对低风压导线的研究起步相对较晚,文献[10]运用流体力学理论对低风压导线的运行机理作了分析,提出了开发低风压导线的关键技术;文献[11]对 3 种典型导线的刚体节段模型和真型节段模型进行了风洞试验,研究了影响导线阻力系数的主要因素(紊流度、风速、迎风角度和导线直径等),结果表明现行规范在计算大截面分裂导线风荷载时比较保守,可以考虑分裂导线的屏蔽效应。

文献[12]对不同风速和迎风角度下的多分裂导线节段模型进行试验,分析雷诺数、尾流干扰对导线阻力系数均值的影响,总结了多分裂导线阻力系数的屏蔽效应规律。

本文以 JL3X/LHA1(DFY)-210/220 型低风压导线为研究对象,参数如表 1 所示,分别基于数值模拟与风洞试验研究了导线在不同分裂数、分裂间距、不同风速、不同风攻角条件下的阻力系数与导线屏蔽系数。研究成果为其在工程上的应用提供了有效的技术支撑。

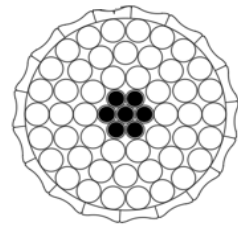


图 1 低风压导线的结构

Figure 1 Structure diagram of drag reduced conductor

表 1 低风压导线参数

Table 1 Parameters of drag reduced conductor

导线参数	单位	数值
计算截面	mm^2	425.88
直径	mm	25.62
质量	kg/km	1 164
计算拉断力	kN	97.59
弹性模量	GPa	55
线膨胀系数	$1/^{\circ}\text{C}$	23×10^{-6}

1 数值模拟研究

1.1 有限元模型

采用 Fluent 流体动力学软件对 JL3X/LHA1(DFY)-210/220 型低风压导线进行 CFD 模拟。湍

流模型选用 Shear Stress Transport $k-\omega$ Model(简称 SST 模型),采用有限体积法和 SIMPLEC 算法求解,导线模型尺寸与实际尺寸一致。由于导线属于典型的细长结构,分裂导线间的尾流效应及气动特性主要由横截面间的互相位置关系及形状决定,因此可采用二维简化模型^[13]。

计算区域外边界取为 $3\text{ m}\times 4\text{ m}$ 的矩形,满足阻塞比小于 3% 的基本要求。 0° 风攻角时,计算区域左边设置为速度入口边界,右边设置为压力出口边界,上下设置为对称边界。网格划分在导线周围区域加密,网格总数约为 10 万。由于网格非常精细,图 2 给出了导线周围局部区域的网格。

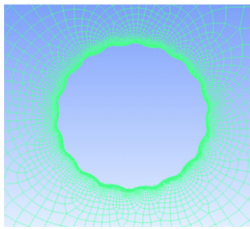


图 2 导线周围局部区域的网格

Figure 2 Grid diagram of conductor local area

对于二维数值分析,导线体轴分力系数中阻力系数定义为^[14]

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho U^2 d} \quad (1)$$

式中 F_x 为导线在体轴坐标系上的阻力; $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$,为空气密度; U 为来流风速,本文分别取 10、20、30、37 m/s; $d=25.62\text{ mm}$,为导线截面直径。

本文研究中的风攻角定义如图 3 所示。来流风速在 20 m/s、 0° 风攻角下四分裂导线的速度分布如图 4 所示。由图 4 可知,迎风侧子导线的尾流对背风侧子导线周围的流场影响明显。

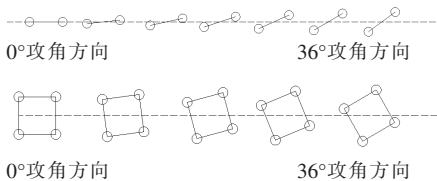


图 3 不同分裂导线风攻角变化

Figure 3 Variation of wind attack angle of different bundled conductors

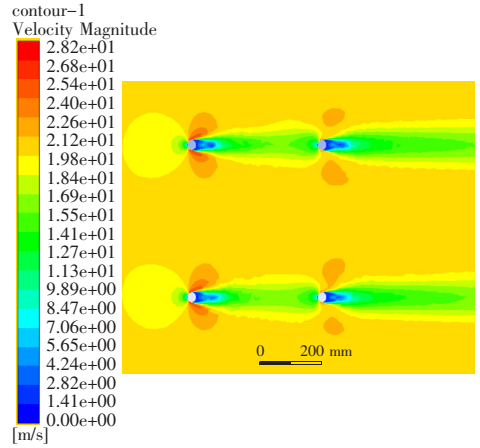


图 4 20 m/s 时四分裂导线的速度分布

Figure 4 Velocity distribution of 4-bundle conductor at 20 m/s

1.2 结果分析

本文模拟计算了低风压导线模型在不同风速、不同分裂间距和不同风攻角条件下的风压阻力系数。单分裂导线阻力系数 C_d 在 20 m/s 风速下随时间的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,大部分情况下,阻力系数曲线为幅值稳定、频率单一的正余弦曲线。

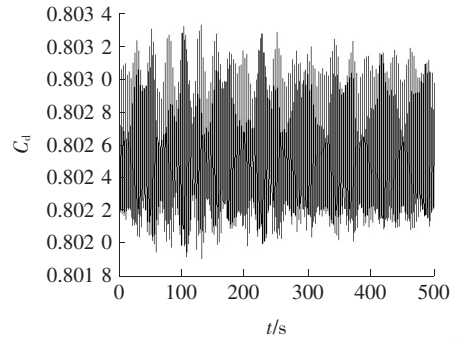


图 5 单分裂阻力系数变化曲线

Figure 5 Variation curve of drag coefficient of single conductor

风攻角为 0° 条件下不同分裂导线在分裂间距为 400、450、500 mm 时的阻力系数如图 6 所示。由图 6 可知,低风压导线的阻力系数 C_d 受雷诺数效应(风速)影响比较明显。当风速为 10~30 m/s 时,低风压导线由于表面有明显的粗糙度,其表面边界分离提前由层流分离变为湍流,然后再附在导线表面形成分离泡,最后形成湍流分离,即提前进入了临界区,在此范围内阻力系数 C_d 随风速增大而迅速减小;当高于此临界风速时,风压阻力系数 C_d 趋于稳定。

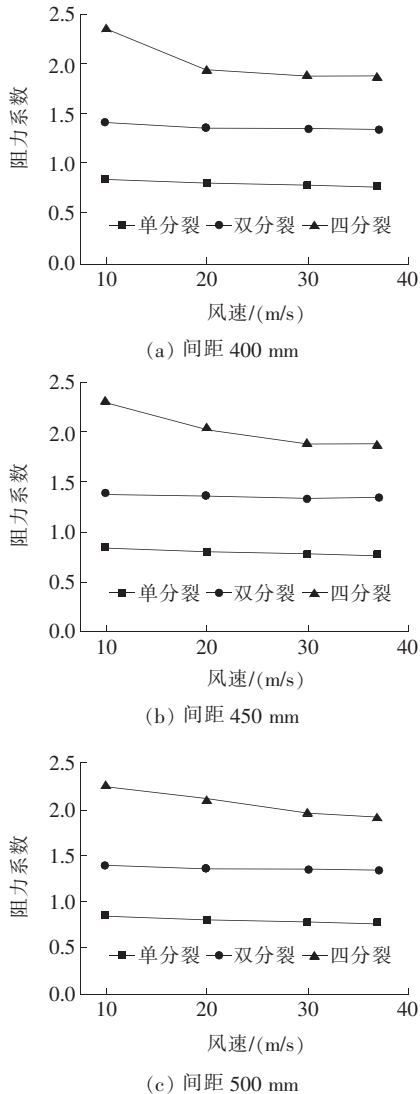


图 6 不同分裂间距导线阻力系数随风速变化曲线

Figure 6 Variation curve of drag coefficient with wind speed for conductors with different bundle spacing

2 风洞试验研究

导线风洞试验在长沙理工大学大学风工程与风环境研究中心高速试验段进行,该高速试验段截面尺寸为 $4.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 21.0\text{ m}$,转盘直径 3.0 m ,风速 $1.0 \sim 45.0\text{ m/s}$ 连续可调。

2.1 模型制作与安装

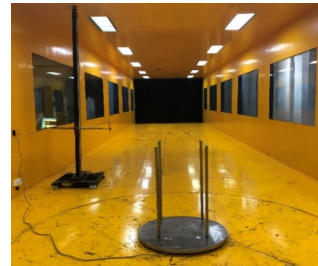
导线模型由内部直径 12 mm 的钢筋和外包铝绞线组成,模型外形与导线原型保持一致,模型具有足够的刚度,导线模型长度为 90 cm ,端部另有 2 cm 长度的螺杆,用于固定于底座上,如图 7 所示。底座固定在测力天平上,试验测试时,通过转动转盘模拟不同风攻角工况。



(a) 单分裂



(b) 双分裂



(c) 四分裂

图 7 分裂导线模型安装

Figure 7 Installation diagram of bundled conductor model

2.2 数据分析

与输电线路杆塔设计技术规定^[15]一致,输电线的风阻力可以按照下式计算:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho U^2 A_n C_d \quad (2)$$

式中 A_n 为有效迎风投影面积。

由式(2)可以得到导线阻力系数为

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho U^2 A_n} \quad (3)$$

F_d 可以通过测力天平数据得到,有效迎风面积为

$$A_n = D \cdot L \quad (4)$$

式中 D 为单根导线模型的直径; L 为导线模型的有效长度。

2.3 试验工况

本文开展了均匀流场下不同分裂导线在不同风速(10 、 20 、 30 、 37 m/s)、不同分裂间距(400 、 450 、

500 mm)、不同风攻角工况下风洞试验研究。风攻角定义如图3所示,气流方向不变(由左至右),利用风洞转盘调整分裂导线相对于来流方向的风攻角。各分裂导线的起始风攻角为0°,两分裂导线按每6°偏转一次,四分裂导线按每7.5°偏转一次。

3 结果分析

3.1 阻力系数

本文给出了0°风向下、分裂间距为400 mm的试验结果,如表2所示。便于对比分析,表2同时给出了相同条件下数值模拟结果。由表2可知,数值模拟与试验结果吻合良好,偏差在5%以内,从而验证了数值模拟结果的可靠性。

表2 导线阻力系数

Table 2 Drag coefficients of bundled conductors				
导线类型	风速/(m/s)	阻力系数 C_d		偏差/%
		数值模拟	风洞试验	
单分裂	10	0.88	0.92	4.35
	20	0.82	0.85	3.53
	30	0.78	0.82	4.88
	37	0.76	0.78	2.56
双分裂	10	1.37	1.42	3.52
	20	1.33	1.33	0.00
	30	1.32	1.34	1.49
四分裂	37	1.32	1.32	0.00
	10	2.18	2.22	1.80
	20	1.92	1.89	-1.59
	30	1.86	1.91	2.62
	37	1.85	1.87	1.07

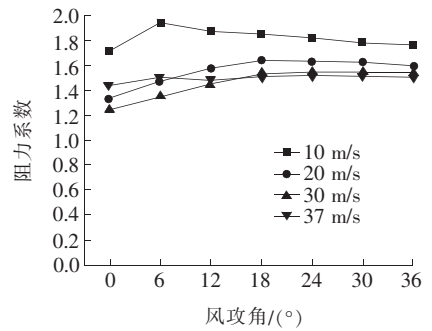
3.2 风攻角对阻力系数的影响

由风洞试验得到的两分裂和四分裂导线在不同风攻角、不同风速、不同分裂间距下的整体平均阻力系数如图8、9所示。

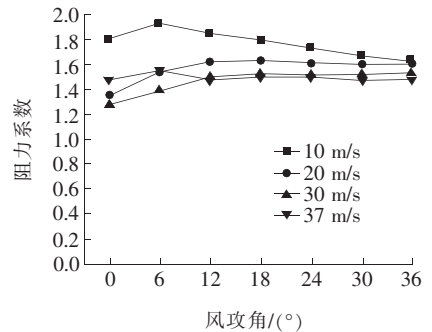
由图8、9可知,双分裂导线的阻力系数随着风攻角的增加而增大,在18°~24°出现一个峰值,之后风攻角的增加对导线的阻力系数基本无影响;四分裂导线阻力系数随风偏角的增加呈现先增大后减小

的趋势,在22.5°~30°出现一个峰值,主要原因是分裂导线的迎风投影面积随风攻角的变化而发生改变,从而导致导线所受风荷载改变。

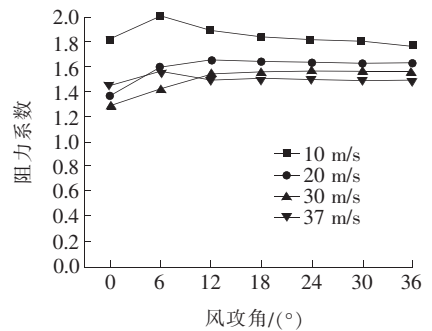
分裂导线阻力系数随风攻角的变化情况反映了串列和并列双圆柱绕流现象,即前后导线随着纵向和横向间距的改变导致上游导线漩涡脱落对下游导线影响程度的变化,从而导致整体风阻力的改变。风压阻力系数会在某个迎风角度下出现最大值,则此风攻角对建立导线风荷载模型是不利的。在输电线路抗风设计时,应选择合适迎风角度进行输电塔一线体系的抗风安全性与经济性设计^[16]。



(a) 分裂间距 400 mm



(b) 分裂间距 450 mm



(c) 分裂间距 500 mm

图8 两分裂导线阻力系数变化曲线

Figure 8 Variation curve of drag coefficient of 2-bundled conductor

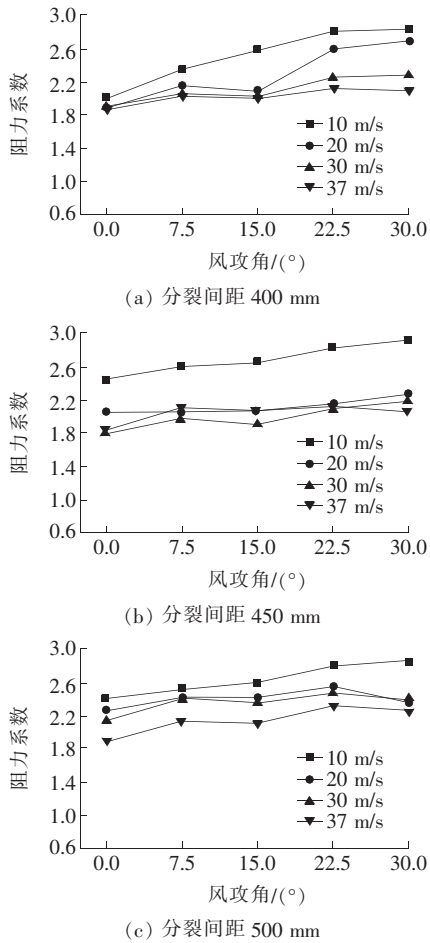


图 9 四分裂导线阻力系数变化曲线

Figure 9 Variation curve of drag coefficient of 4-bundled conductor

3.3 屏蔽效应研究

对于多分裂导线,各导线间存在干扰现象使得其整体阻力系数减小,这种由于导线间的相互干扰引起的阻力系数降低的效应定义为干扰效应。本文以多分裂导线阻力系数、单根导线阻力系数与分裂数乘积的比值,即干扰效应系数来表征干扰效应的影响程度。干扰效应系数一般小于 1,越接近 1 说明干扰效应越不明显。干扰效应系数^[17]为

$$C_s = \frac{C_{dn}}{nC_d} \quad (4)$$

式中 C_{dn} 为多分裂导线阻力系数; n 为分裂根数; C_d 为单根导线阻力系数。

两分裂、四分裂导线的干扰效应系数在不同风速下随分裂间距与迎风角度的变化情况如图 10、11 所示。由图 10、11 可知,多分裂导线的阻力系数与迎风角度及分裂间距有关,两分裂和四分裂的干扰效应系数最小值分别为 0.76、0.55,多分裂导线有利于降低导线风荷载。

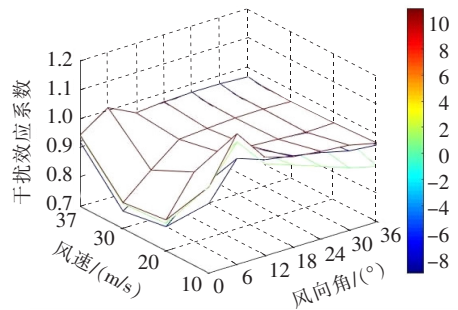


图 10 干扰效应系数随分裂间距与迎风角度的变化

Figure 10 The interference coefficient variation with bundle spacing and wind attack angle

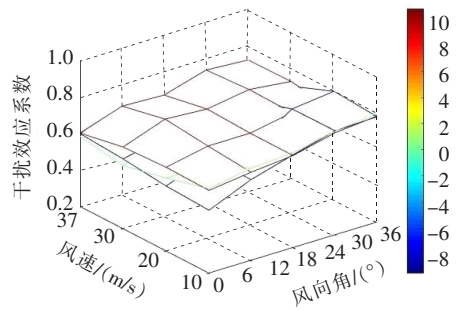


图 11 干扰效应系数随分裂间距与迎风角度的变化

Figure 11 The interference coefficient variation with bundle spacing and wind attack angle

4 结语

本文基于 JL3X/LHA1(DFY)-210/220 型低风压导线,采用数值模拟和风洞试验分别研究了导线在不同分裂数、分裂间距、不同风速、不同风攻角条件阻力系数,得出以下结论。

1)随着风速的提高,雷诺数也随之增大,阻力系数呈现降低趋势,当风速达到约 30 m/s 时,雷诺数达到临界值,阻力系数出现一个最小值,风速再增加则趋于稳定。

2)不同分裂数导线的整体阻力系数数值模拟和风洞试验结果吻合较好,偏差均在 5% 以内,从而验证了数值模拟的精度。

3)迎风角度对多分裂导线阻力系数的影响较大,在某种风偏角度下会增大风阻系数,二分裂导线在风攻角为 18°~24° 出现峰值,四分裂导线在风攻角为 22.5°~30° 出现峰值,设计中需要考虑这种极端工况以确保设计安全。

4)多分裂导线之间存在明显的干扰效应,随着分裂数的增加,平均阻力系数可降低 20% 以上。在输电线路的设计与制作过程中,可以通过风洞试验

或乘以一个折减系数来求得分裂导线的平均阻力系数,使其更加经济合理。

参考文献:

- [1] 李涛,王谦,吴登国,等.台风风场下的1 000 kV输电塔风洞试验与风振响应分析[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):76-82.
LI Tao, WANG Qian, WU Dengguo, et al. Wind tunnel test and wind induced response analysis of 1 000 kV transmission line under typhoon wind fields[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 76-82.
- [2] 李清,马伦,解健,等.大档距多分裂输电导线扭转刚度计算分析[J].高压电器,2020,56(2):158-162.
LI Qing, MA Lun, XIE Jian, et al. Calculation and analysis on torsional stiffness of large-span multi-conductor bundle [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 158-162.
- [3] 朱金涛,辛业春.柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J].智慧电力,2021,49(3):1-11.
ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 1-11.
- [4] 魏建华,赵文彬,李敏,等.基于有限元的低风压导线发热分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):56-64.
WEI Jianhua, ZHAO Wenbin, LI Min, et al. Heating analysis of a low-wind-pressure conductor based on finite elements [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 56-64.
- [5] 邸悦伦,蔡泽林,李丽,等.环渤海地区大范围输电线路舞动风场特征分析[J].电网与清洁能源,2021,37(7):121-129.
DI Yuelun, CAI Zhelin, LI Li, et al. Analysis of wind characteristics of wide range transmission line galloping in bohai rim[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7): 121-129.
- [6] 彭志勇,周羽生,何洋,等.对流换热对覆冰导线高频融冰温度分布的影响[J].电测与仪表,2020,57(20):23-29.
PENG Zhiyong, ZHOU Yusheng, HE Yang, et al. Effect of convective heat transfer on temperature distribution of high-frequency excitation deicing for ice-covered wires[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 23-29.
- [7] SAKAKIBARA A, LISAKA H, MORI N, et al. Development of low-wind-pressure conductors for compact overhead transmission line[J]. IEEE Power Engineering Review, 1984, 103(10): 3117-3124.
- [8] LANDERS P G, PALO A. EPRI-sponsored transmission line wind loading research[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(8): 2460-2466.
- [9] BALL N G, RAWLINS C B, RENOWDEN J D. Wind tunnel errors in drag measurements of power conductors [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1-3): 847-857.
- [10] 张武能,汪毅,张留斌,等.输电铁塔螺栓连接结构健康监测技术进展与展望[J].中国电力,2021,54(2):18-26.
ZHANG Wuneng, WANG Yi, ZHANG Liubin, et al. Development and prospect of structure health monitoring technologies for bolted joints of transmission towers[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 18-26.
- [11] 盛望群.强风地区电气化铁路附加导线设置方案研究[J].供用电,2021,38(5):83-88.
SHENG Wangqun. Study on the additional wire setting scheme for electrified railways in strong wind regions [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 83-88.
- [12] 左太辉,牛华伟,闵绚,等.分裂导线平均风荷载阻力系数干扰效应研究[J].实验流体力学,2015,29(2):37-42.
ZUO Taihui, NIU Huawei, MIN Xuan, et al. Research on interference effects of wind load on bundle conductors [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(2): 37-42.
- [13] 蔡萌琦,严波,刘小会,等.多分裂导线风压阻力系数分析[J].重庆大学学报,2013,36(1):110-120.
CAI Mengqi, YAN Bo, LIU Xiaohui, et al. Analysis on drag coefficients of bundled conductor under wind load [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(1): 110-120.
- [14] DLT 5551—2018.架空输电线路荷载规范[S].
- [15] GB 50545—2010.110~750 kV架空输电线路设计技术规范[S].
- [16] 沈国辉,包玉南,钱程,等.角度风作用下多分裂导线的干扰效应和阻力系数[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(11):9-16.
SHEN Guohui, BAO Yunan, QIAN Cheng, et al. Interference effect and drag coefficients of multi-bundled conductors under skewed azimuths [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(11): 9-16.
- [17] 谢强,管政.八分裂导线阻力系数屏蔽效应风洞试验[J].中国电机工程学报,2013,33(19):149-156.
XIE Qiang, GUAN Zheng. Wind tunnel test on shielding effects on drag coefficient of 8-bundled conductors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 149-156.