

多风速段下低风阻导线抗风能力实验分析及 导线截面结构参数优化

姚远¹, 赵文彬¹, 卢武¹, 党朋², 魏建华¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电缆研究所, 上海 200093)

摘要: 低风阻导线具有能降低导线所受风载荷、减小输电线路杆塔所受风压的优点。前期研究发现改变低风阻导线截面凹槽参数会对导线抗风能力造成一定影响, 但针对具体的导线截面结构优化并无深入研究。以四种不同截面形状的低风阻导线为研究对象, 在风洞试验条件下探究了导线风阻系数在不同风速段中的变化规律, 并利用基于最小二乘的多项式曲面拟合对风阻系数与截面结构参数之间的相关性进行回归分析。研究表明: 在低风速 10~20 m/s 区间内, 导线风阻系数随导线截面粗糙度增加而线性递增。在中高风速 20~60 m/s 区间内, 导线风阻系数由截面凹槽数量与凹槽半径构成的双变量二次函数决定。通过求解函数最小值可以获得低风阻导线的优化截面结构参数。基于纳维-斯托克斯方程在 COMSOL 有限元软件中模拟了优化导线模型与普通低风阻导线模型在多风速段中的流场变化情况, 验证了本次拟合结果的有效性。

关键词: 输电线路; 低风阻导线; 导线截面结构优化; 导线风压; 风洞试验

Wind resistance test and optimal design of cross-sectional structure of a drag-reduced conductor at multiple wind speed levels

YAO Yuan¹, ZHAO Wenbin¹, LU Wu¹, DANG Peng², WEI Jianhua¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Cable Research Institute, Shanghai 200093, China)

Abstract: A drag-reduced conductor has advantages of reducing the wind load on the conductor and the wind pressure on the transmission line tower. Previous studies found that changing the parameters of the drag-reduced conductor cross-section groove will have a certain impact on the wind resistance of the conductor, but there is no in-depth study on the specific optimization of conductor cross-section structure. In this paper, four kinds of drag-reduced conductor with different cross-section shapes are taken as the research objects, and the variation of wind resistance coefficient in different wind speed sections is explored in a wind tunnel test. The correlation between wind resistance coefficient and cross-section structure parameters is analyzed using polynomial surface fitting based on least squares. The results show that in the low wind speed range of 10 m/s~20 m/s, the wind resistance coefficient increases linearly with the increase of conductor cross-section roughness. In the middle and high wind speed range of 20 m/s~60 m/s, the wind resistance coefficient of the conductor is determined by the bivariate quadratic function composed of the number of grooves and the radius of grooves. By solving the minimum value of the function, the optimal section structure parameters of the conductor with low wind resistance can be obtained. Based on the Navier Stokes equation, the flow field changes of the optimized wire model and the ordinary low wind resistance wire model in multiple wind speed segments are simulated in COMSOL finite element software. This verifies the effectiveness of the fitting results.

This work is supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 51707113).

Key words: transmission line; drag reduced conductor; optimal cross-sectional structural parameter; wind pressure coefficient; wind tunnel test

0 引言

我国华东沿海各省市是全世界遭受台风灾害最

严重的地区之一。据统计, 每年登陆我国东南沿海地区的台风平均可达 7.2 次, 并伴有最大风速可达 17 级(56 m/s)的大风和 400 mm 以上的特大暴雨^[1]。台风袭击所带来的极端大风天气可能会导致输电线路导线风偏跳闸和停运^[2-4]。严重情况下, 超过杆塔

设计风速的强台风甚至会造成杆塔断裂倒塌等机械过载事故^[5-6]。强台风对输电线路的破坏力巨大，如何在提高线路造价的前提下，最大限度地提高线路抗风能力^[7]，是近年来国家电网公司对华东地区输电线路优化改造的重要内容之一。

研究表明，架空输电线路中导线所受风压占整个线路所受风压的 50% 以上^[6,8]。降低导线所受风压不仅可以减少导线风偏跳闸的风险，还可以减少杆塔因导线传递的风载荷而诱发的倒塔和折弯事故。20 世纪 70 年代，日本首先开展了用于架空输电线路的低风阻导线的研究。在传统圆型绞合线截面结构的基础上，低风阻导线在导线圆周上等间距地增加了许多小凹槽。这些小凹槽的存在增加了低风阻导线的表面粗糙度，有助于使低风阻导线在流场中维持超临界状态，导致其背面回流区小于普通导线，从而显著降低导线风阻系数^[9]。日本某公司先后研发出外径为 38.4 mm 和 28.5 mm 的两种低风阻导线。经过在 154~330 kV 线路上长期运行观测发现，当环境中的平均风速达到 36 m/s 时，两种低风阻导线与常规导线相比较，风阻系数分别降低了 20% 和 5%^[10-11]。近年来，我国也开始加快低风阻导线在东南沿海输电线路上的应用与推广。2017 年由某公司研发的低风阻中强度全铝合金导线被首次应用于福建省忠田-湄洲 110 kV 线路上，在设计基本风速为 37 m/s 的使用条件下，该导线的使用可以降低 30% 的导线风压^[12]。

在输电线路使用低风阻导线替代普通导线，可以在不改变输电线路结构的情况下显著降低导线所受风载荷，从而大大降低输电线路整体负荷，达到优化线路结构和降低线路造价的效果。然而，目前低风阻导线的抗风性能通常是在强台风等级最低风速段 37~40 m/s 条件下开展。具有不同圆周凹槽半径及数量等截面结构参数的低风阻导线在不同风速段的抗风能力存在明显差异^[6,13]。但是，强台风袭击时极端风速具有局部性，同一地点的相邻区段输电线路在台风天气受到的风压可能存在较大差异，

直接参考强台风的最大风速设计低风阻导线结构将会造成杆塔建造材料的浪费。因此，研究低风阻导线在不同风速段的差异化最优截面结构，对于提高低风阻导线在我国东南沿海地区应用的技术经济效益至关重要。

本文以 4 种具有不同截面结构参数的低风阻导线模型为研究对象，在风速为 10~60 m/s 的不同风洞试验条件下模拟低风阻导线在沿海台风多发地区所承受的风环境。利用与导线模型相接的六维力学传感器实时记录导线模型的风阻系数在不同风洞风速下的变化情况，分析了导线截面凹槽大小及截面粗糙度等截面结构参数对导线风阻系数变化的影响规律。利用基于最小二乘的多项式曲面拟合法对不同风速段的风阻系数结果进行回归分析，计算得到每个风速区间内使导线风阻系数降到最小的优化截面结构参数。基于纳维-斯托克斯 N-S 方程在 COMSOL 有限元软件中对经过优化后的低风阻导线模型的抗风性能提升效果进行了数值分析。

1 试验平台与试验方法

1.1 低风阻导线试样

本文以 4 种用于 110 kV 输电线路的低风阻导线试样为研究对象，同时选取 1 种外径与低风阻导线相似的传统圆型绞合线试样作为测试标准。5 种导线试样的详细截面结构如图 1 所示。5 种导线的外径均为 33.8 mm。与传统圆导线相比，低风阻导线模型的最外层由具有扇形圆弧截面形状的耐热铝合金线股构成，每两个相邻扇形圆弧截面之间形成一个凹槽，使低风阻导线表面具有一定的粗糙度。1~4 号低风阻导线试样的截面圆周上分别增加了 15 个半径为 0.8 mm 的凹槽、12 个半径大小为 0.26 mm 的凹槽、8 个半径大小为 1.42 mm 的凹槽和 4 个半径为 3.5 mm 的凹槽。其中仅 1 号低风阻导线试样的圆周外侧以弧面形式光滑连接相连。2~4 号低风阻导线试样的圆周外侧弧面凹槽明显可见。

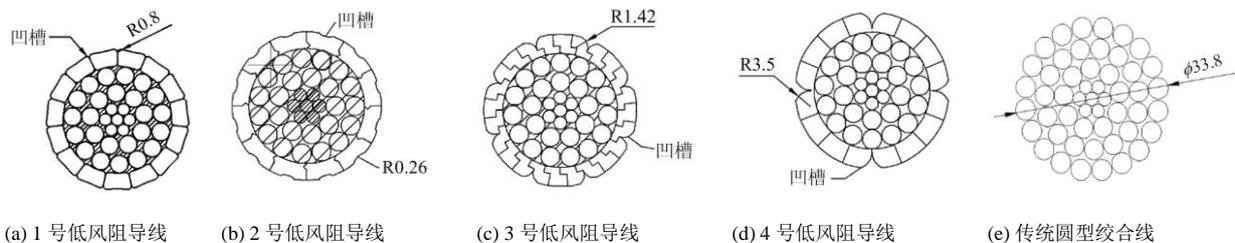


图 1 导线试样的截面结构示意图

Fig. 1 Cross-sectional view of tested overhead conductors

1.2 试验系统

本次抗风性能测试在低速回流风洞实验室进行, 该风洞实验室是一座闭口竖向回流式矩形截面低速风洞, 其三维尺寸为 27.0 m×7.3 m×4.2 m, 整体结构示意图如图 2 所示。表 1 所示为风洞制造的流场品质参数。正式测试时, 导线试样放置于尺寸为 1.6 m×1.6 m×4.8 m 的试验区, 风机产生的 10~60 m/s 层流风按顺时针方向作用于导线试样上, 用于模拟导线在台风多发地区所受到的典型风压情况。最低风速 10 m/s 相当于标准 5 级劲风, 最高风速 60 m/s 相当于标准 17 级强台风。

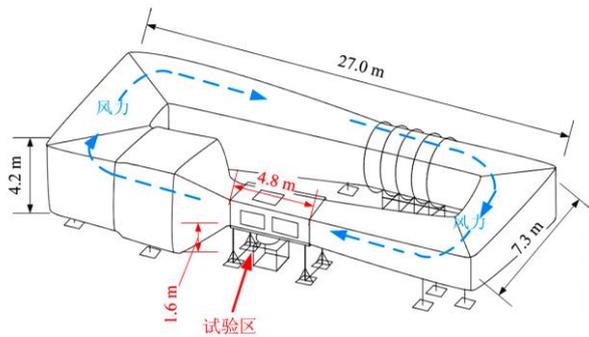


图 2 低速回流风洞结构示意图

Fig. 2 Configuration of low-speed wind tunnel

表 1 风洞流场品质参数

Table 1 Key parameters of flow field in wind tunnel

气流稳定性	流场不均匀度	气流紊乱度	气流偏角	环境噪声
≤±0.3%	≤±0.3%	≤0.2%	≤0.3°	<85 dB

目前国内外关于低风阻导线的抗风能力测试方法并无权威试验标准。大部分科研人员在风洞试验条件下进行低风阻导线的抗风能力测试时往往采用导线试样与试验区底面垂直放置的方式^[14-15], 即将导线垂直立于试验区底面, 导线底部安装过渡法兰并和风洞平台固定。这种导线放置方式的操作较为简单。但由于风洞制造的层流风流速在风洞截面方向上的分布随高度的不同而有所差异, 靠近风洞截面底部位置的风流速高于截面中上部^[16]。垂直放置的导线试样整体在流场中的受力不均匀, 从而影响导线试样抗风能力的测量^[17]。

本文为了避免层流风场的空间分布特性对导线抗风能力测试带来的影响, 将 5 种导线试样通过金属夹具固定在支架上, 与试验区底面水平放置于试验区中。支架底部通过 8 个六角螺栓与试验区底面的六维力学传感器相连。导线试样的具体放置方式如图 3 所示。考虑到风洞尺寸的限制以及避免强风条件下导线可能发生的扭曲变形, 5 种导线试样的

长度均设置为 1 m。

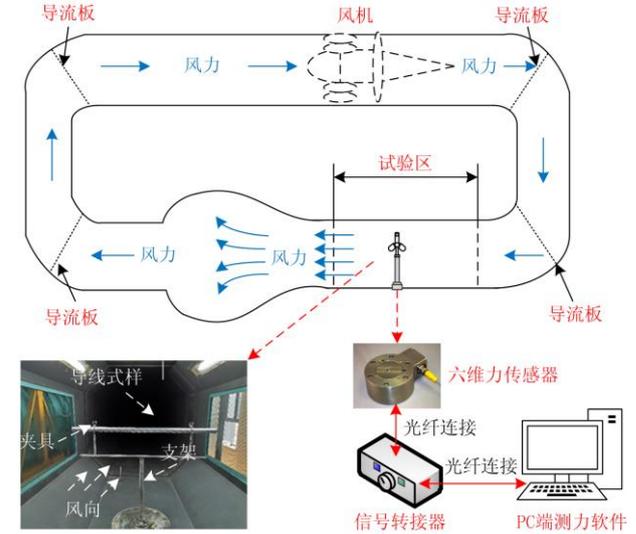


图 3 风洞试验现场布置示意图

Fig. 3 Field arrangement of wind tunnel tests

1.3 试验方法

导线试样在风洞试验区布置完成后, 以 5 m/s 为测量步长, 在 10~60 m/s 风速范围内, 利用与导线相连的六维力学传感器实时测量在不同风速下导线所受风力大小。导线受力数据的采集在风速达到平稳状态下进行, 传感器采样频率为 1 000 Hz。采集的受力数据表现形式为导线在所测风速下的三向受力 F_x 、 F_y 、 F_z 。其中, F_x 为导线沿迎风面方向受力, F_y 为导线沿轴向方向受力, F_z 为导线沿垂直于试验区底面方向受力。

参考我国现行的输电线路导线所受风载荷计算规范^[17], 本文采用风阻系数作为导线抗风能力的评价指标。处于层流风作用下的单根导线的风阻力系数为

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho v^2 L d} \quad (1)$$

式中: ρ 为环境空气密度, kg/m^3 ; v 为导线所处的流场风速, m/s ; L 为单位导线的长度, m ; d 为导线外径尺寸, mm 。每个风速等级下均进行三次导线沿迎风面受力 F_x 的测量并利用公式(1)计算得到导线的风阻系数, 取风阻系数的平均值作为该试验条件下导线的抗风能力。

2 试验结果分析与讨论

2.1 风速大小与导线风阻系数关系

图 4 为不同风速段下 5 种导线试样风阻系数的变化规律。

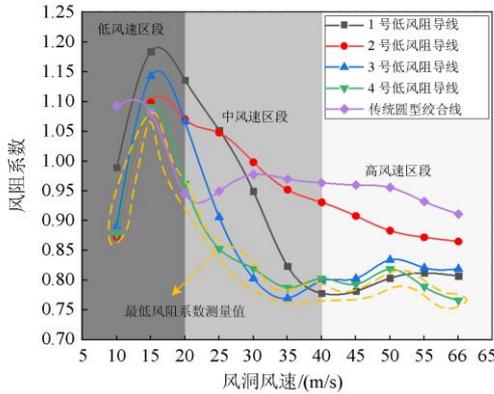


图4 导线风阻系数与风洞风速之间的关系

Fig. 4 Relationship between wind resistance coefficient of conductor models and wind speed of the tunnel

由图4可得到以下规律:

1) 在 10~60 m/s 风速区段内, 4 种低风阻导线试样的风阻系数均随着风速的增加而先增加后降低并最终趋于稳定。在风速为 15 m/s 时, 1 号低风阻导线的风阻系数为 1.18, 为所有风速段内的最大测量值; 在风速为 60 m/s 时, 4 号低风阻导线的风阻系数为 0.77, 为所有风速段内的最小测量值。与此同时, 传统圆形绞合线的风阻系数随风速的增加而逐渐降低并最终趋于稳定, 最终在 40~60 m/s 的高风速区段内风阻系数稳定在 0.91~0.93。

2) 在 10~20 m/s 的低风速区段内, 由风阻系数的测量结果可知, 4 种低风阻导线试样的抗风性能与传统圆型绞合线相比并无明显优势。但当风速超过 20 m/s 时, 4 种低风阻导线试样的风阻系数下降速率明显高于传统圆形绞线。当风速达到 35 m/s 及以上时, 所有低风阻导线的风阻系数均小于传统圆导线。测试结果证明低风阻导线通过改变截面形状, 其抗风性能在 20 m/s 以上的风速条件下要优于传统圆形绞线。

3) 4 种低风阻导线在不同风速段内的抗风性能存在差异。在 20~30 m/s 及 50~60 m/s 的风速段内, 4 号低风阻导线的风阻系数为 5 种导线的最小值, 相比于传统圆导线最高降幅为 11.2% 和 15.4%; 在 30~40 m/s 的风速段内, 3 号低风阻导线的风阻系数为 5 种导线的最小值, 相比于传统圆导线最高降幅为 20.62%; 在 40~50 m/s 的风速段内, 1 号低风阻导线的风阻系数为 5 种导线的最小值, 相比于传统圆导线最高降幅为 18.64%。测试结果表明截面形状的变化对低风阻导线在不同风速段内的抗风性能存在差异化影响。

2.2 截面结构参数与导线风阻系数关系

低风阻导线的截面形状变化可以由其圆周表面上等距排列的凹槽形成的截面粗糙部分与基体截面部分的比值变化, 即导线的截面粗糙度系数变化情况决定^[18]。以 3 号低风阻导线为例, 计算截面粗糙度的低风阻导线截面结构几何如图 5 所示。

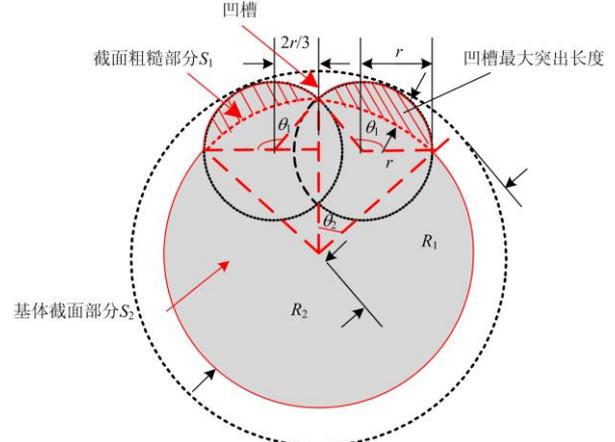


图5 3号低风阻导线截面结构几何示意图

Fig. 5 Typical geometric cross-sectional structure of No. 3 drag reduced conductors

设导线截面粗糙度系数为 T , 其表达式为

$$T = \frac{NS_1}{S_2} = \frac{NS_1}{\pi R_2^2} \quad (2)$$

其中: S_1 为相邻两个凹槽之间形成的截面粗糙部分面积, mm^2 ; N 为圆周凹槽的个数; S_2 为导线的基体面积, mm^2 ; R_2 为导线外径 33.8 mm 减去凹槽最大突出长度后的基体内径。

每一个凹槽与基体截面相交于基体表面上的两点, 这两点与凹槽圆心的连接线构成的弧度计为 θ_1 , 与基体圆心的连接线构成的弧度计为 θ_2 , 设计上相邻两凹槽圆心的直线距离一般为 $4r/3$, r 为凹槽半径, mm 。由图 5 可推算出 R_2 的长度为 $2.25r$, θ_1 为 132.27° , θ_2 为 47.73° , 则 S_1 的计算公式可以表示为

$$S_1 = \frac{1}{2} \left[2\pi r^2 \frac{\theta_1}{2\pi} - \left(\pi R_2^2 \frac{2\theta_2}{2\pi} - \frac{0.74r \cdot 1.33r + 3.33r \cdot 1.51r}{2} \right) \right] = \frac{2.31r^2 - (4.22r^2 - 3r^2)}{2} = 0.55r^2 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得到 3 号低风阻导线粗糙度的最终表达式为

$$T = \frac{NS_1}{\pi R_2^2} = \frac{8 \cdot 0.55r^2}{\pi \cdot (2.25r)^2} = 0.28 \quad (4)$$

使用相同的计算方法, 得到的 5 种导线试样的截面粗糙度系数如表 2 所示。

表 2 被测导线试样的截面粗糙度系数

Table 2 Cross-sectional roughness coefficients of five tested conductors

对象	导线截面粗糙度系数 T
1 号低风阻导线	0.36
2 号低风阻导线	0.30
3 号低风阻导线	0.28
4 号低风阻导线	0.20
传统圆型绞合线	0.00

5 种导线试样中, 1 号导线的截面粗糙度系数最大, 为 0.36, 圆线粗糙度系数最小, 为 0.00。在不同风速段内, 5 种导线的风阻系数随截面粗糙度系数的变化规律如图 6 所示。

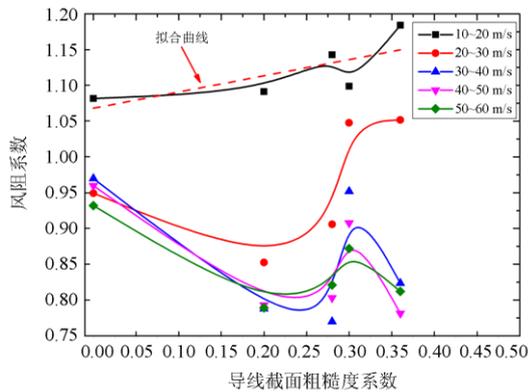


图 6 导线风阻系数与截面粗糙度系数之间关系

Fig. 6 Relationship between wind resistance coefficient and cross-sectional roughness coefficient

由图 6 可得出以下规律。

1) 在 10~20 m/s 的低风速区段内, 导线风阻系数随导线截面粗糙度系数近似成线性递增关系。即导线横截面粗糙度系数越小, 导线截面结构越光滑, 抗风性能越好。对 5 种导线风阻系数随截面粗糙度系数变化的曲线进行线性拟合, 得到:

$$C_d = 0.23T + 1.07 \quad (5)$$

2) 在 20 m/s 以上的中高风速区段内, 导线风阻系数与截面粗糙度系数之间整体呈现随截面粗糙度系数先降低后增加再降低的复杂趋势, 无法建立单调函数关系。寻求优化截面结构参数是低风阻导线选型与设计的关键与难点。

2.3 低风阻导线截面结构优化设计

由式(2)一式(4)可知, 导线截面的粗糙度由导线圆周的凹槽半径和凹槽数量共同决定。为得到在

20 m/s 以上的中高风速区段内, 使低风阻导线风阻系数最小的优化截面结构参数, 应用基于最小二乘的多项式曲面拟合对风阻系数与凹槽半径、凹槽数量三者之间的相关性进行回归分析^[19]。

将 20~30 m/s、30~40 m/s、40~50 m/s、50~60 m/s 风速段内的所有测量数据转换为三维坐标数据集 (x_i, y_i, z_i) , 其中, x_i 为凹槽数量, y_i 为凹槽半径, z_i 为导线风阻系数, i 为 1 至 5。

设计曲面拟合方程为

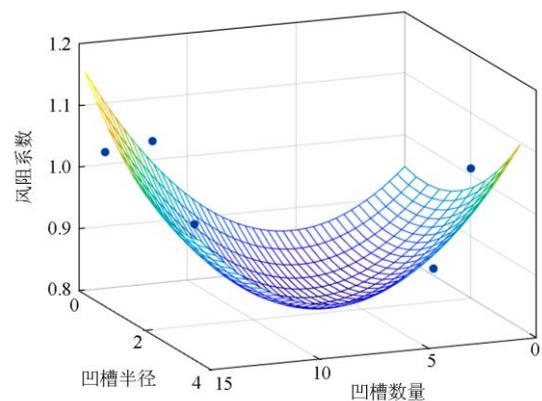
$$z = a_1x^2 + b_1y^2 + a_2x + b_2y + a_3xy + b_3 \quad (6)$$

令 $A^T = (a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3)$ 为曲面方程系数构成的一维矩阵, 利用 Matlab 中基于最小二乘的多元非线性回归函数 `nlinfit`, 代入不同风速区段中的风阻系数及截面结构参数进行分析, 得到不同风速区间曲面方程系数 A 的具体数值如表 3 所示, 本次数据拟合各点拟合优度数值如表 4 所示, 各点在不同风速区间内相对误差均小于 5%, 因此可判定本次拟合数据的精确度较高。不同区间内低风阻导线风阻系数与截面结构参数的拟合曲面如图 7 所示。

表 3 基于最小二乘的多项式曲面拟合方程系数

Table 3 Function coefficients for surface fitting based on least squares

方程系数	风速区段/(m/s)			
	20~30	30~40	40~50	50~60
a_1	0.003 2	0.000 7	0.001 9	0.001 4
b_1	0.018 6	0.028 2	0.021 7	0.025 7
a_2	-0.033 0	-0.012 7	-0.029 3	-0.023 8
b_2	-0.022 6	-0.137 5	-0.088 4	-0.106 2
a_3	-0.006 0	0.002 1	-0.002 1	0.000 8
b_3	0.948 9	0.959 4	0.920 0	0.921 0



(a) 20~30 m/s 风速区段

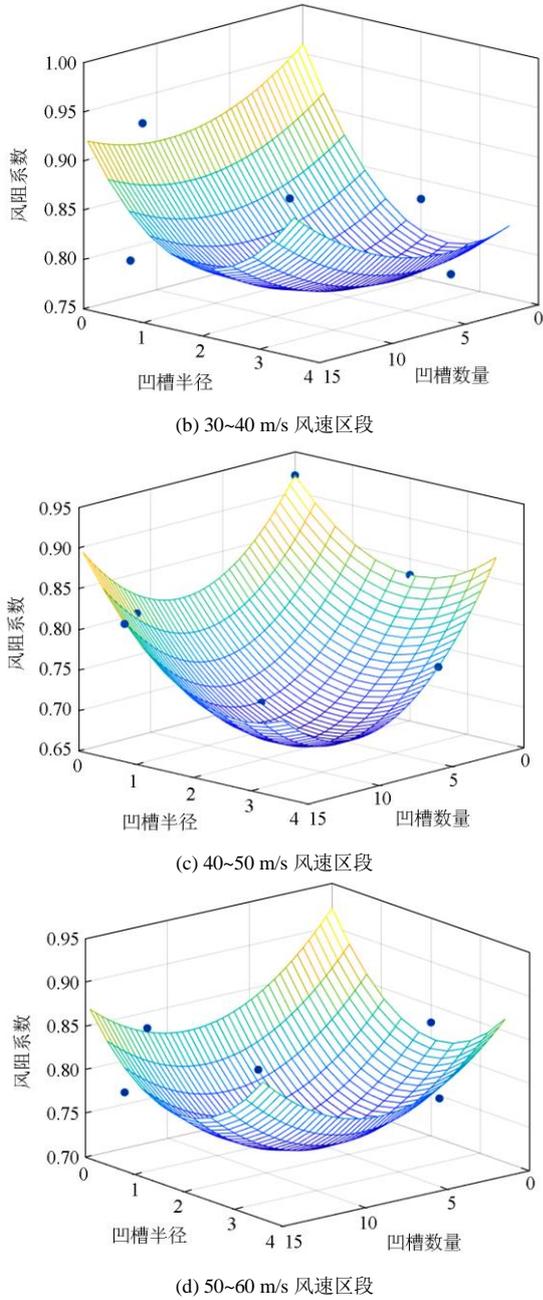


图 7 风阻系数与截面结构参数的拟合曲面图

Fig. 7 Fitted curve for wind coefficient and cross-sectional structure parameters

表 4 各点拟合优度数值

Table 4 Goodness of fit value of each point

点云坐标	风速区段内相对误差/%			
	20~30 m/s	30~40 m/s	40~50 m/s	50~60 m/s
(x_1, y_1, z_1)	3.957	3.566	1.095	3.697
(x_2, y_2, z_2)	2.336	2.955	1.774	1.978
(x_3, y_3, z_3)	1.735	1.204	2.360	2.056
(x_4, y_4, z_4)	1.601	1.238	2.037	2.457
(x_5, y_5, z_5)	1.574	2.330	2.664	1.577

通过观察图 7 可以看到，在风速大于 20 m/s 的四个不同风速区间内，拟合曲面均存在极值点，即导线风阻系数均存在一个最小值，将该极值处的截面结构参数定义为低风阻导线在此风速区段内的优化截面结构参数，如表 5 所示。

表 5 拟合后导线优化截面结构参数

Table 5 Optimal cross-sectional structure parameter of drag reduced conductor based on surface fitting

风速区段/(m/s)	优化凹槽数量	优化凹槽半径/mm
20~30	7	1.7
30~40	6	2.2
40~50	9	2.7
50~60	8	1.9

3 导线截面结构优化仿真

为验证由风阻系数与截面凹槽数量、凹槽半径构成的双变量二次函数计算得到的低风阻导线优化截面结构参数的准确性，本文利用 COMSOL 有限元软件通过求解 $N-S$ (Navier-stokes)方程对 10~60 m/s 风速范围内低风阻导线周围的流场变化进行了仿真研究。由于风洞实验条件下的风速远远低于音速，因此在仿真中将导线周围空气流场视为不可压缩流体进行研究^[20-21]。

任意瞬时刻，导线圆周表面上任一点 (x_i, x_j) (其中， i, j 分别代表流场中沿迎风面方向和沿垂直于试验区底面方向)受到的沿迎风面方向受力 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \bar{f}(t) + f'(t) \quad (7)$$

式中： $\bar{f}(t)$ 为风阻力的大尺度分量， $f'(t)$ 为风阻力的小尺度分量。

大尺度分量 $\bar{f}(t)$ 可以通过直接求解可解尺度的 $N-S$ 方程得到^[22]，即

$$\begin{cases} \bar{f}(t) = \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial^2 x_j} \right) \\ \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： ρ 为流体的密度； μ 为流体的运动粘性系数， P 为流体的压力； u_i, u_j 分别为流体迎风面方向和沿垂直于试验区底面方向的速度分量； \bar{u}_i, \bar{u}_j 分别为两个方向上速度分量的雷诺平均值。

小尺度分量 $f'(t)$ 无法直接通过 $N-S$ 方程进行求解，需要采用亚格子模型对大、小尺度之间的相互作用关系进行建模^[23-24]，经过各向同性滤波器处理后的亚格子应力控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ \tau_{ij} = \rho (\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \end{cases} \quad (9)$$

式中, τ_{ij} 为亚格子应力项, 表征大尺度量与小尺度量之间的动量输运关系。由于亚格子应力是由非线性对流在滤波作用下产生的一种应力关系, 它无法通过微分方程求解得到, 只能通过封闭建模进行研究。本文使用对湍流进行数值模拟中常见的 Smagorinsky-Lilly 模型对亚格子应力进行建模^[25-26], 如式(10)所示。

$$\tau_{ij} = 2L_s^2 \left| \bar{S}_{ij} \right| \bar{S}_{ij} \quad (10)$$

式中: L_s 是亚格子尺度混合长度; \bar{S}_{ij} 为应变率张量。两者的详细表达式为

$$\begin{cases} \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \\ L_s = \min \left\langle \kappa s, C_s V^{\frac{1}{3}} \right\rangle \end{cases} \quad (11)$$

式中: κ 为卡门常数; s 为计算单元与最近壁面间的距离; C_s 为 Smagorinsky 常数, 本文取值 0.1^[27]。

COMSOL 中建立的低风阻导线二维轴对称模型几何结构及剖分情况如图 8 所示。模型计算区域中导线圆柱外径 $D=33.8$ mm, 整个计算域的范围为 $40D \times 30D$ 。导线模型位于计算区域中心位置, 与上、下计算区域的边界距离均设为 $15D$ 。在进行网格剖分时, 由于计算结果精度会受到模型外围凹槽的网格划分精密程度的影响, 为了不影响整体计算时间, 同时保证计算结果的精确性, 对导线凹槽部分采取极细化网格, 其他部分均为较细化的网格剖分方式。数值计算时采用有限体积法离散控制方程, 入口设定为速度边界条件, 给定流体流速, 出口设定为压力出口。导线表面设定为壁面。

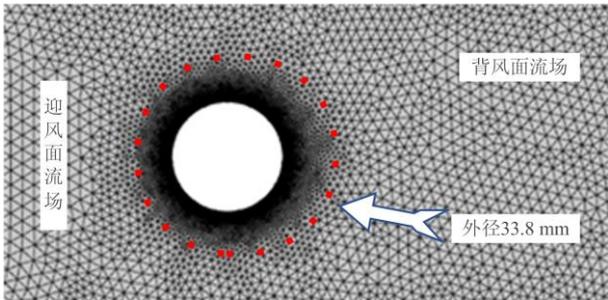


图 8 导线模型几何结构及网格划分

Fig. 8 Geometric structure and meshing of drag reduced conductor model

对 10~60 m/s 风速段内, 实测中风阻系数最小的试样与经过曲面拟合得到的优化截面形状的仿真流场分布进行了比对, 如图 9 所示。通过仿真结果可以计算出各风速段内实测中风阻系数最小的试样与经过曲面拟合得到的优化截面形状的风阻系数, 具体数值对比如表 6 所示。

表 6 导线截面优化后风阻系数对比

Table 6 Comparison of wind resistance coefficient after optimization of conductor section

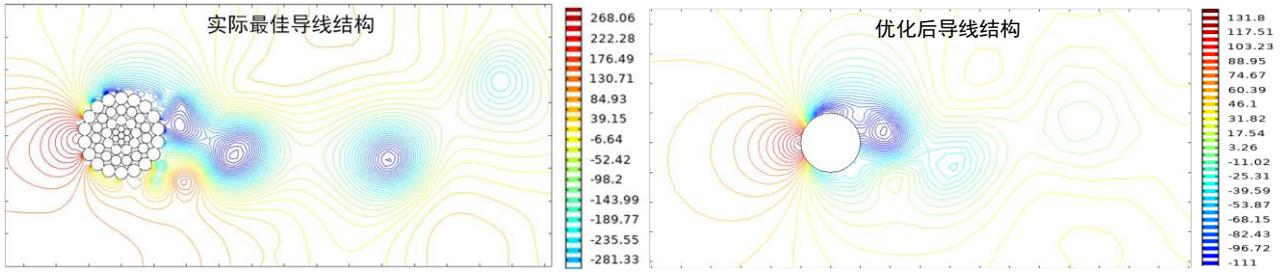
风速区段/(m/s)	实测试样 风阻系数	优化试样 风阻系数	优化数值/%
10~20	1.091 3	1.081	0.94
20~30	0.852	0.803	5.75
30~40	0.788	0.776	1.52
40~50	0.781	0.759	2.82
50~60	0.812	0.794	2.22

图 9(a)为风速区段 10~20 m/s 范围内, 实测风阻系数最小的传统圆导线与拟合后的最优导线结构模型的流场比对情况; 图 9(b)为风速区段 20~30 m/s 范围内, 实测风阻系数最小的 4 号低风阻导线与拟合后的最优导线结构模型的流场比对情况; 图 9(c)为风速区段 30~40 m/s 范围内, 实测风阻系数最小的 3 号低风阻导线与拟合后的最优导线结构模型的流场比对情况; 图 9(d)为风速区段 40~50 m/s 范围内, 实测风阻系数最小的 1 号低风阻导线与拟合后的最优导线结构模型的流场比对情况; 图 9(e)为风速区段 50~60 m/s 范围内, 实测风阻系数最小的 4 号低风阻导线与拟合后的最优导线结构模型的流场比对情况。

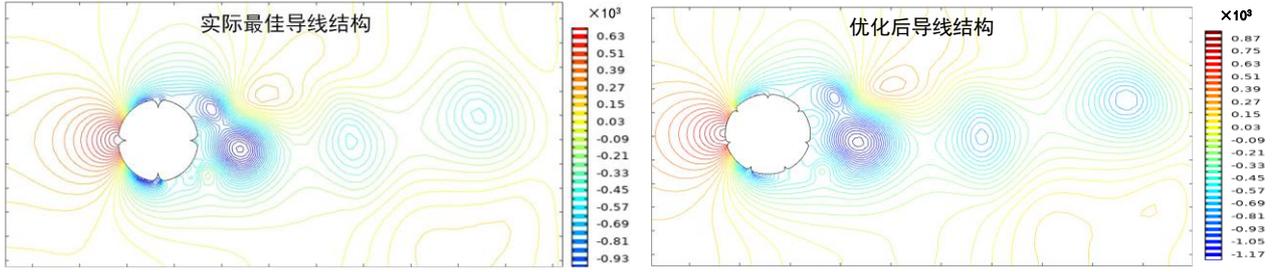
从图 9 可以看出, 每种低风阻导线模型在其对应风阻系数最小的风速区间内, 其背风面都产生了许多大小不同且不规则的涡旋, 符合流体力学中圆柱体绕流的基本规律。但仔细观察可以发现, 无论是何种导线, 在导线圆周凹槽周围形成的涡旋更为密集。这些涡旋不断向后运动并增大最终在导线背风面产生了体型更大的涡旋, 这些大型涡旋在流场中产生的作用力与风洞流体作用力方向相反。

因此可以推断低风阻导线截面凹槽对流经导线表面流场会产生干扰, 使得导线背风面涡旋脱落速度发生变化, 并使得导线背风面产生大量与风洞流体流动方向相反的涡旋。这些涡旋进而对导线形成一个反向推力, 最终达到降低导线自身所受风阻的目的。

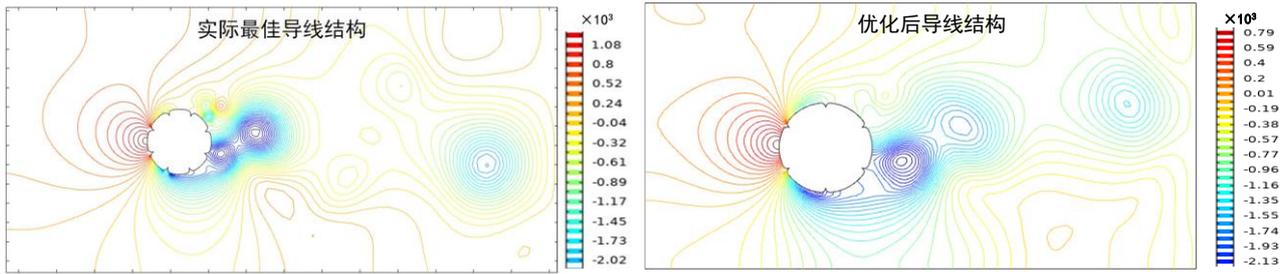
通过对比各风速段内拟合优化模型与相应对比模型周围流场分布, 发现拟合优化模型背风面涡旋



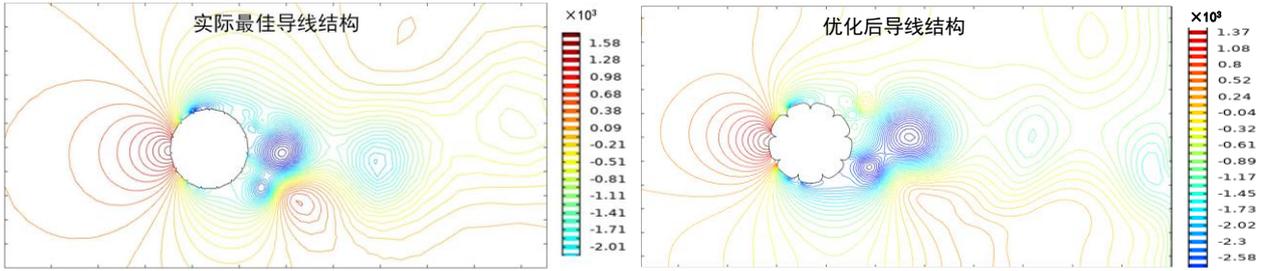
(a) 10~20 m/s 风速区段



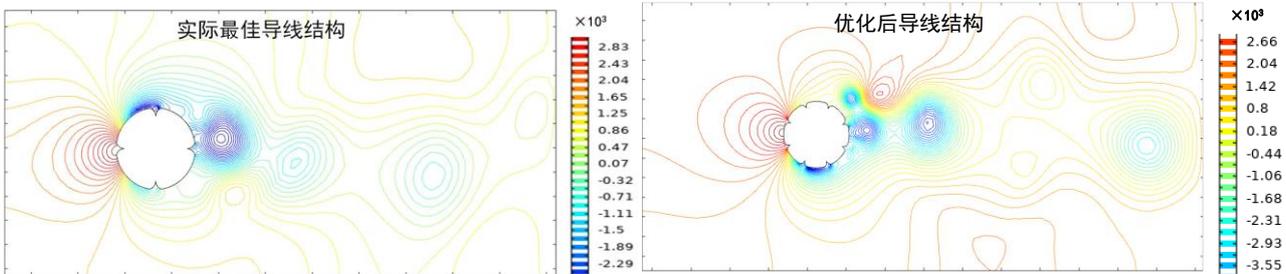
(b) 20~30 m/s 风速区段



(c) 30~40 m/s 风速区段



(d) 40~50 m/s 风速区段



(e) 50~60 m/s 风速区段

图 9 不同风速段内实测与理论优化低风阻导线流场分布对比

Fig. 9 Flow fields surrounding comparison of tested optimal and calculated optimal drag reduced conductors at different wind speeds

更大更密集,产生的反向压强也更大,以40~50 m/s风速区段内的仿真数据为例,拟合最优模型背风面的漩涡密集程度相对对比模型增加了将近一倍。同时对比表6中优化试样与实测试样风阻系数,发现优化试样风阻系数在除风速区段10~20 m/s范围外,在其他风速区间内其风阻系数相较于实测试样的优化数值均大于1%。

因此可以验证本次拟合结果的准确性,也证明了在20 m/s以上风速段,低风阻导线风阻系数由截面凹槽数量与凹槽半径构成的双变量二次函数决定。基于实测数据的拟合结果,可以计算得到低风阻导线在不同风速段内具有优化抗风性能的差异化截面形状。

4 结论

1) 本文以4种具有不同截面形状的低风阻导线模型为研究对象,在10~60 m/s的风洞试验条件下,探究了低风阻导线抗风性能随风洞风速的变化规律。研究表明在10~20 m/s的低风速区段,低风阻导线与传统圆绞线的抗风性能并无明显差异,但是当风速超过20 m/s时,由于低风阻导线圆周表面小凹槽的存在,使得导线背风面产生大量与风洞流体流动方向相反的涡旋并对导线形成反向推力,降低导线自身所受风阻,使得低风阻导线的抗风能力优于传统圆导线。

2) 当风速超过20 m/s后,低风阻导线风阻系数与导线圆周凹槽数量、半径之间服从双变量二次函数关系,可以基于此关系获得各风速区间内优化后截面结构参数,使导线风阻系数降到最小。

3) 通过对比各风速段内拟合得到的最优模型与风洞实验结果中最优模型周围流场分布,发现计算得到的优化后模型在背风面产生的涡旋效果更为显著,对产生更大的反向推力,从而可以进一步降低低风阻导线在该风速段的风阻系数。也为后续科研人员在低风阻导线模型设计上提供一定参考。

参考文献

[1] 刘倩,高路,赵鹏,等. 2000—2016年中国热带气旋灾害时空特征研究[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(5): 50-57.
LIU Qian, GAO Lu, ZHAO Peng, et al. Study on the temporal-spatial characteristics of tropical cyclone disasters in China in 2000-2016[J]. China Flood and Drought Management, 2020, 30(5): 50-57.

[2] 王勇,苗虹,莫思特,等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 178-187.
WANG Yong, MIAO Hong, MO Site, et al. Review on

anti icing, de icing and de icing technologies for high voltage overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 178-187.

[3] 黄欢,雷加智,曾华荣,等. 极端外部环境下输电线路的综合风险评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 119-127.
HUANG Huan, LEI Jiazhi, ZENG Huarong, et al. Integrated risk assessment system of transmission line under extreme external environment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 119-127.

[4] 伍弘,张利花,何宁辉,等. 架空线路交叉穿越对超高压线下感应电压的影响研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 104-110.
WU Hong, ZHANG Lihua, HE Ninghui, et al. Influence of overhead line crossing on induced voltage under UHV transmission line[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 104-110.

[5] SINA K, MICHAEL L. Large eddy simulations of stratified turbulence: the dynamic Smagorinsky model[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 773(1): 327-344.

[6] ALI P. Analysis of mesh effects on turbulent flow statistics[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2019, 475(1): 839-860.

[7] 梁庆国,梁世容,彭家宁,等. 输电线路中杆线结构的抗风监测技术[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 181-186.
LIANG Qingguo, LIANG Shirong, PENG Jianing, et al. Research on wind resistance and monitoring technology for pole-line structure in transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 181-186.

[8] JOCHEN F, DOMINIC T. Hybrid LES/RANS methods for the simulations of turbulent flows[J]. Progress in Aerospace Science, 2008, 44(5): 349-377.

[9] 王黎明,王琼,陆佳政,等. 500 kV覆冰四分分裂导线舞动特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2284-2291.
WANG Liming, WANG Qiong, LU Jiazheng, et al. Galloping characteristics of 500 kV iced quad bundle conductor [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2284-2291.

[10] 尤传永. 输电线路低风阻导线的开发研究[J]. 电力建设, 2010, 31(12): 1-6.
YOU Chuanyong. Research and development of low wind pressure conductor of transmission line[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(12): 1-6.

[11] 楼文娟,吴登国,苏杰,等. 超高压输电线路风偏闪络及导线风荷载取值讨论[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1249-1255.
LOU Wenjuan, WU Dengguo, SU Jie, et al. Discussion on wind-induced swing flashover and conductor wind load of EHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1249-1255.

[12] SAKAKIBARA A, IISAKA H, MORI N T, et al. Development of low-wind-pressure conductors for compact overhead transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 103(10): 3117-3124.

[13] KIKUCHIA N, MATSUZAKIA Y, YUKINO T, et al. Aerodynamic drag of new-design electric power wire in a heavy rainfall and wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1-2): 41-51.

[14] ACHENBACH E. Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 46(2): 321-335.

[15] 庄文兵, 祁创, 熊小伏, 等. 计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 6-13.
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, XIONG Xiaofu, et al. Transmission line icing prediction considering time cumulative effect of meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 6-13.

[16] 谢强, 孙启刚, 管政. 多分裂导线整体阻力系数风洞试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1106-1112.
XIE Qiang, SUN Qigang, GUAN Zheng. Wind tunnel test on global drag coefficients of multi-bundled conductors[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1106-1112.

[17] 党朋, 吴细毛, 刘斌, 等. 新型同心绞导线风阻力系数风洞试验[J]. 电线电缆, 2014(4): 30-33.
DANG Peng, WU Ximao, LIU Bin, et al. Wind tunnel test on drag coefficient of new type concentric-lay-stranded conductors[J]. Electric Wire and Cable, 2014(4): 30-33.

[18] 王琼, 王黎明, 卢明, 等. 覆冰四分裂导线风洞试验与舞动研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1608-1615.
WANG Qiong, WANG Liming, LU Ming, et al. Study on wind tunnel test and galloping of iced quad bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1608-1615.

[19] 110 kV-750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 2010.
Code for design of 110 kV-750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010[S]. 2010.

[20] MADHIARASAN M. Accurate prediction of different forecast horizons wind speed using a recursive radial basis function neural network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 230-238. DOI: 10.1186/s41601-020-00166-8.

[21] 产品几何技术规范(GPS). 表面结构、轮廓法、术语、定义及表面结构参数: GB/T 3505—2009[S]. 2009.
Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture, profile method, terms, definitions and surface texture parameters: GB/T 3505—2009[S]. 2009.

[22] 朱凌, 陈涛威, 周晨, 等. 考虑风速风向联合分布的大风灾害下电力断线倒塔概率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 115-122.
ZHU Ling, CHEN Taowei, ZHOU Chen, et al. Probability prediction of power outage and tower collapse under gale disaster considering joint distribution of wind speed and direction[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 115-122.

[23] 殷想, 汪怡平, 杜敏韬, 等. 不同亚格子尺度模型对气动噪声仿真精度的影响[J]. 实验流体力学, 2019, 33(6): 78-83.
YIN Xiang, WANG Yiping, DU Mintao, et al. Influence of different sub-grid scale models on simulation accuracy of aerodynamic noises[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(6): 78-83.

[24] 周超, 陈作, 李力, 等. 基于有限元的低风压导线结构分析[J]. 图学学报, 2018, 39(1): 129-135.
ZHOU Chao, CHEN Zuo, LI Li, et al. Structural analysis of low wind pressure conductor based on finite element method[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(1): 129-135.

[25] 范松海, 毕茂强, 龚奕宇, 等. 自然条件下导线覆冰形状及对融冰过程的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 184-191.
FAN Songhai, BI Maoqiang, GONG Yiyu, et al. Study on icing shape of conductor under natural conditions and its influence on ice melting process[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 184-191.

[26] 王津宇, 李哲, 刘善峰, 等. 基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警方法[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 194-199.
WANG Jinyu, LI Zhe, LIU Shanfeng, et al. Transmission line icing galloping warning method based on risk coefficient[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 194-199.

[27] 孙利朋, 蒋正龙, 赵纯, 等. 覆冰实验均匀风场形成方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 185-192.
SUN Lipeng, JIANG Zhenglong, ZHAO Chun, et al. Study on the formation method of uniform wind field in icing experiment[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 185-192.

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-26

作者简介:

姚远(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事架空输电线路及防风线缆方面的研究工作; E-mail: 13262813597@163.com

赵文彬(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事气体放电、电磁兼容和输变电设备状态管理方面的研究工作; E-mail: wembinmax@163.com

卢武(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事液体放电、电磁兼容和输变电设备状态管理方面的研究工作。E-mail: wuluee@shiep.edu.cn

(编辑 葛艳娜)