

文章编号: 1674-2974

# 角度风作用下多分裂导线的干扰效应和阻力系数

沈国辉<sup>1†</sup>, 包玉南<sup>1</sup>, 钱程<sup>1</sup>, 郭勇<sup>2</sup>, 宋刚<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:**采用风洞试验方法研究角度风作用下多分裂导线的干扰效应和体型系数, 对比不同风速和湍流度导线和同直径圆柱的阻力系数, 获得不同风向角下多分裂导线的子线和整体的阻力系数, 并与规范及他人结果进行对比. 研究表明, 高风速下导线的阻力系数比光滑圆柱小13%, 说明绞线外形可以减小圆柱的阻力系数; 子线之间存在前后遮挡效应时后方子线的阻力系数显著减小, 子线间距越小时阻力系数越小; 存在显著干扰效应的风向角下多分裂导线的整体阻力系数较小; 直径23.94 mm、间距400 mm的多分裂导线阻力系数包络建议值为: 1.02(单导线和二分裂)、1.00(四分裂)、0.97(六分裂)、0.93(八分裂).

**关键词:**多分裂导线; 阻力系数; 风洞试验; 子导线; 风向角

**中图分类号:** TU312.1

**文献标志码:** A

## Interference Effect and Drag Coefficients of Multi-bundled Conductors under Skewed Azimuths

SHEN Guohui<sup>1†</sup>, BAO Yunan<sup>1</sup>, QIAN Cheng<sup>1</sup>, GUO Yong<sup>2</sup>, SONG Gang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Zhejiang Electric Power Design Institute Company Limited, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Wind tunnel testing methods were employed to study the interference effect and drag coefficients of multi-bundled conductors under various azimuths. Drag coefficients of isolated conductor and circular cylinder with the same diameter were compared under various wind velocities and turbulence intensities. The drag coefficients of sub-conductor and total drag coefficients of multi-bundled conductor were obtained and their results are compared with those obtained from Codes and other researchers. The results show that the drag coefficient of the isolated conductor is 13% less than that of the circular cylinder under high velocity, indicating that the twisted shape can reduce the drag coefficient of the circular cylinder. When two sub-conductors are in front-back arrangement, the drag coefficient of the back sub-conductor decreases significantly, and the less distance between them, the more the drag coefficient decreases. The total drag coefficient of multi-bundled conductors is small under certain azimuth when the significant interference effect is considered. The enveloped drag coefficients of multi-bundled conductors with 23.94 mm in diameter and 400 mm in distance are recommended as 1.02, 1.00, 0.97 and 0.93 for isolated conductor, two-bundled conductor, four-bundled conductor, six-bundled conductor and eight-bundled conductor, respectively.

**Key words:** multi-bundled conductors; drag coefficient; wind tunnel test; sub-conductor; wind azimuth

\* 收稿日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51838012), National Natural Science Foundation of China(51838012)

作者简介: 沈国辉(1977—), 男, 浙江台州人, 浙江大学副教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: ghshen@zju.edu.cn

特高压输电线路中大量使用了多分裂导线,多分裂导线与单导线相比具有不同的气动力系数,上风向的子导线对下风向的子导线产生屏蔽效应,会造成多分裂导线整体阻力系数的降低.针对多分裂导线的这个特性,国内外学者已进行了一些研究.

通常采用测力风洞试验方法研究导线的阻力系数.对于单导线,李名珍等<sup>[1]</sup>研究了低风压导线的阻力系数;党朋等<sup>[2]</sup>获得了新型同心绞导线的阻力系数;晏致涛等<sup>[3]</sup>分析了表面粗糙度对导线风荷载的影响.对于多分裂导线,楼文娟等<sup>[4]</sup>研究单根子线的干扰效应和阻力系数特征;谢强等<sup>[5]</sup>、左太辉等<sup>[6]</sup>分别给出了多分裂导线的干扰效应和子导线之间的屏蔽效应;试验表明多分裂导线的整体阻力系数均小于规范取值<sup>[7-12]</sup>.现场测试方面,Shan等<sup>[13]</sup>提出单导线现场实测方法,并与风洞试验结果进行比较;Pan等<sup>[14]</sup>提出了利用汽车相对风速来获得覆冰导线阻力系数的测试方法,给出了覆冰导线的阻力系数.各国规范<sup>[15-20]</sup>均给出了单根导线的阻力系数,但对于多分裂导线未做规定.

本文针对 23.94 mm 直径、400 mm 间距的多分裂导线阻力系数进行系统的研究,分析风速和湍流度对单导线阻力系数的影响,对比同直径光滑圆柱的阻力系数以分析表面粗糙度的影响,给出二、四、六、八分裂导线的子导线和整体阻力系数,并与规范和他人结果进行对比,最后给出角度风作用下多分裂导线整体阻力系数的建议值.

### 1 试验模型和研究工况

针对 LGJ 300/40 导线进行研究,外径为 23.94 mm,子线直径为 3.99 mm,节径比为 12,分裂间距为 400 mm.制作 1:1 的试验模型,长度为 800 mm,内芯采用轻质木材,外表面缠绕圆形泡沫条,泡沫条的直径、节径比和实物一致,以模拟导线的表面粗糙度.进行单导线和二、四、六、八分裂情况的风洞试验,试验风向角如图 1 所示.图中涂黑的子导线为进行气动力测试的子导线,不同分裂数的不同风向角间隔设置主要是为了体现子导线之间的干扰效应.

在浙江大学 ZD-1 风洞中进行测试,试验段截面为 4 m × 3 m.将试验平台垫高 20 cm,超过了风洞地板的黏滞层厚度;在模型顶部放置盖板,用来形成模型试验的二维流场.单导线和多分裂导线的风洞试验情况如图 2 所示.测力天平采用德国 ME-SYSTEM 公司生产的高频底座测力天平,量程为  $F_y = 20$

$N、F_z = 40 N、T_{xyz} = 4 N \cdot m$ ,测量精度为 0.3% F.S.

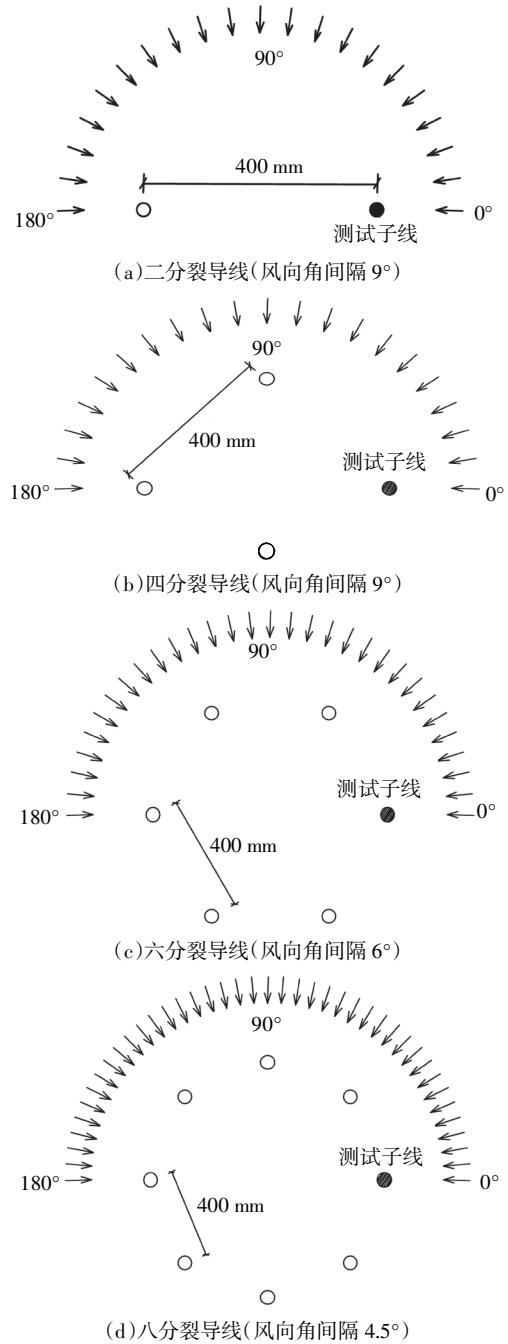


图 1 多分裂导线的试验风向角

Fig.1 Wind azimuths of multi-bundled conductors



(a)单导线



(b)二分裂导线



(c)四分裂导线



(d)六分裂导线



(e)八分裂导线

图 2 多分裂导线的试验模型

Fig.2 Testing models of multi-bundled conductors

进行直径 24 mm 光滑圆柱的测力试验,以分析表面粗糙度对阻力系数的影响.为了分析湍流度对阻力系数的影响,还进行了 4%、8%和 12%均匀湍流场的风洞试验.均匀湍流场通过多功能尖劈隔栅组合装置生成,风洞获得的平均风速  $U$  和湍流度剖面  $I_u$  沿风洞高度  $H$  的变化如图 3 所示,可知风洞中均匀流和均匀湍流场模拟精度很高.

导线阻力系数  $C_D$  和升力系数  $C_L$  的计算公式如下:

$$C_D = F_D / (0.5\rho v^2 A), \quad (1)$$

$$C_L = F_L / (0.5\rho v^2 A). \quad (2)$$

式中:  $F_D$  和  $F_L$  分别为天平测试获得的顺风向阻力和横风向升力;  $A$  为所有杆件的面积(直径与长度的乘积)之和;  $v$  为来流风速;  $\rho$  为空气密度.

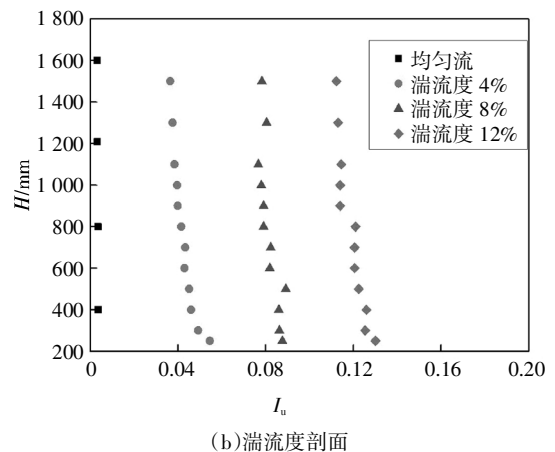
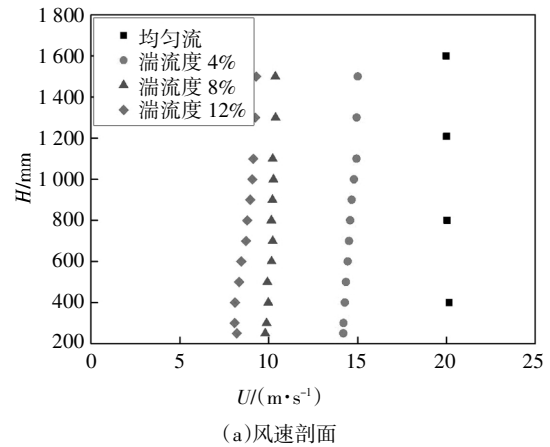


图 3 风洞模拟的均匀湍流场

Fig.3 Turbulent fields simulated in wind tunnel

## 2 单导线和光滑圆柱的阻力系数

单导线的阻力系数如图 4 所示,可知:1)均匀流下,单导线阻力系数随风速增加呈缓慢减小的趋势,25 m/s 风速下的阻力系数为 1.02;2)均匀湍流场下,小风速情况均匀湍流场下的阻力系数大于均匀流,但当风速接近 15 m/s 时,导线在均匀湍流场和均匀流的阻力系数比较接近,因此可以认为高风速下湍流度对单导线阻力系数的影响并不显著.

光滑圆柱的阻力系数如图 5 所示,可知:1)均匀流下,光滑圆柱阻力系数随风速增加呈缓慢增大再

呈不变的趋势,25 m/s 风速时阻力系数为 1.17;2)均匀湍流场下,小风速情况阻力系数大于均匀流;当风速接近 15 m/s 时,光滑圆柱的阻力系数与均匀流接近,可见,高风速下湍流度对光滑圆柱阻力系数的影响不大.

对比图 4 和图 5 可知:1)25 m/s 风速下,单导线的阻力系数 1.02 比光滑圆柱的阻力系数 1.17 小了 13%,绞线外形可以减小圆柱的阻力系数;2)当风速较大(如大于 15 m/s)时,湍流度对单导线和光滑圆柱阻力系数的影响并不显著,因此在后面的多分裂导线阻力系数研究中,不再考虑湍流度的影响.

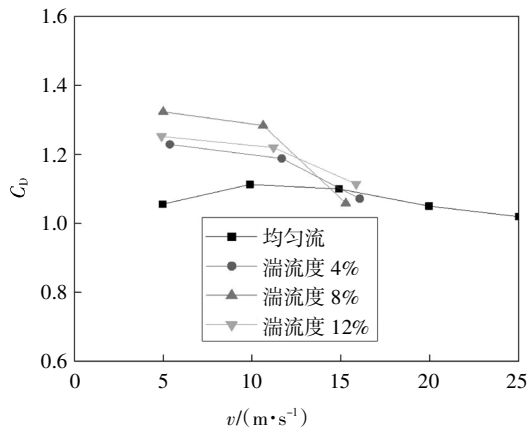


图 4 单导线的阻力系数

Fig.4 Drag coefficients of isolated conductor

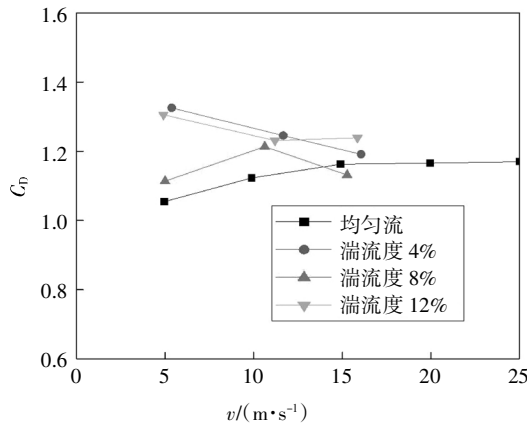


图 5 光滑圆柱的阻力系数

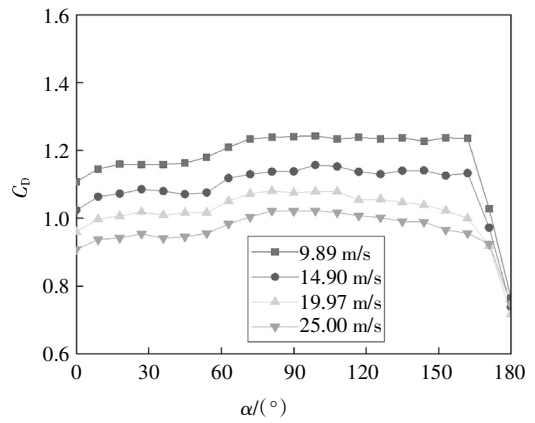
Fig.5 Drag coefficients of circular cylinder

### 3 多分裂导线的阻力系数

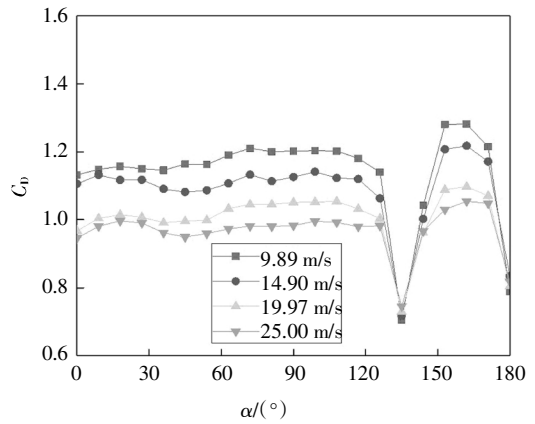
#### 3.1 多分裂导线单根子线的阻力系数

各分裂导线单根子线的阻力系数随风向角  $\alpha$  的变化如图 6 所示,可知:1)子线的阻力系数随着风速

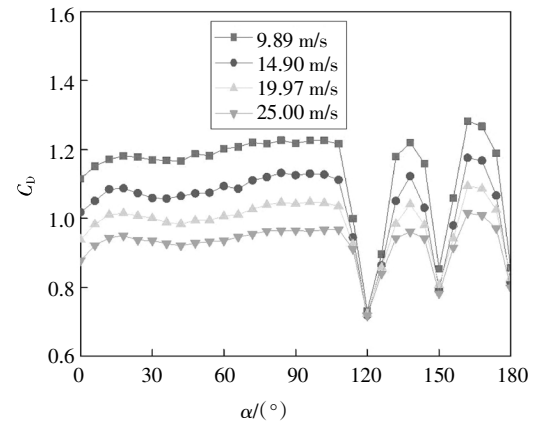
的增加呈减小趋势;2)对于二分裂导线,180°风向出现最大的遮挡效应;3)对于四分裂导线,135°风向出现最大的遮挡效应,180°风向出现较大的遮挡效应;4)对于六分裂导线,120°风向出现最大的遮挡效应,150°风向遮挡效应次之,180°风向遮挡效应再次之;5)对于八分裂导线,112.5°风向发生最大的遮挡,135°、157.5°和 180°风向的遮挡效应依次减弱;6)对于非遮挡效应的风向角,单导线的阻力系数变化不大.



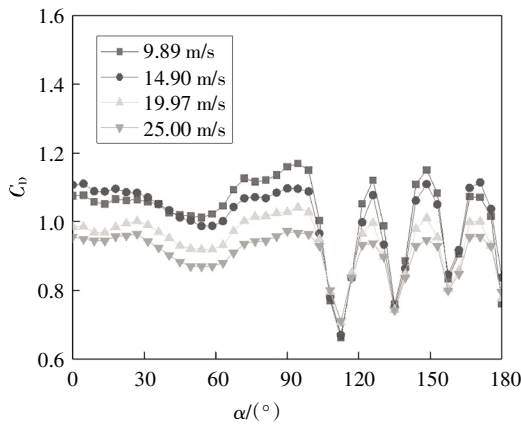
(a)二分裂导线



(b)四分裂导线



(c)六分裂导线



(d)八分裂导线

图 6 分裂导线单根子线的阻力系数

Fig.6 Drag coefficients of multi-bundled sub-conductors

图 7 给出了多分裂导线干扰效应最显著的风向角顺序,用第 1~4 干扰来体现干扰程度,可知:1)在干扰效应显著的风向角,单根子导线的阻力系数均出现较小值;2)出现前后遮挡效应的风向,后方子线的阻力系数会显著减小,且子导线间距越小遮挡效应越显著,如八分裂导线,112.5°、135°、157.5°和 180°风向角子线距离分别为 400 mm、739 mm、966 mm、1 045 mm,25 m/s 风速下子线的阻力系数分别为 0.71、0.74、0.80 和 0.79。

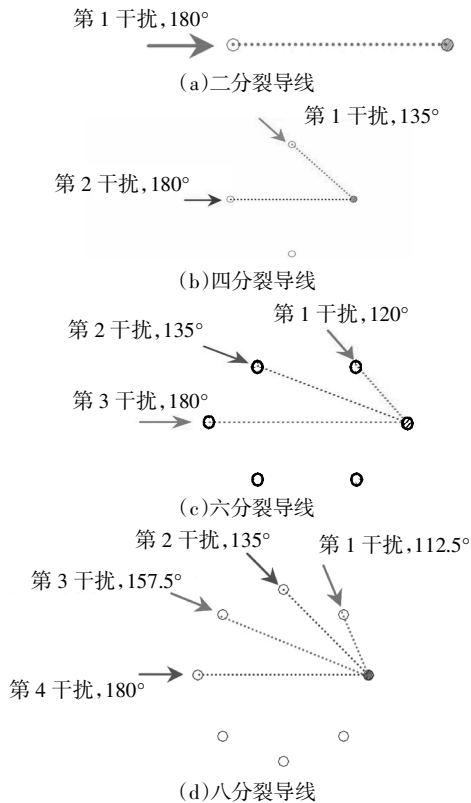
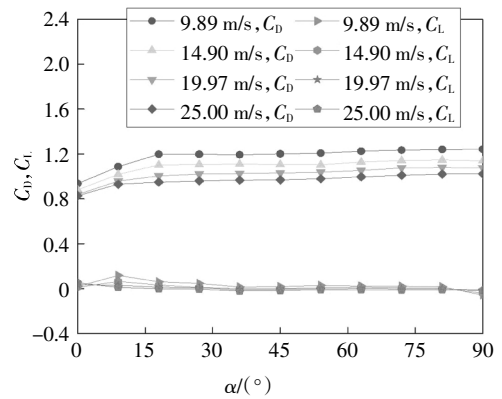


图 7 分裂导线单根子线干扰效应排序

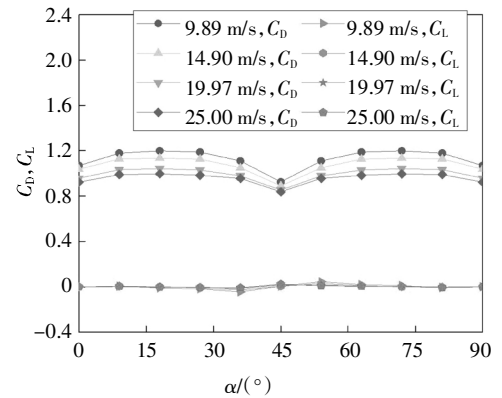
Fig.7 Orders of interference effect of multi-bundled sub-conductors

### 3.2 多分裂导线整体阻力系数和升力系数

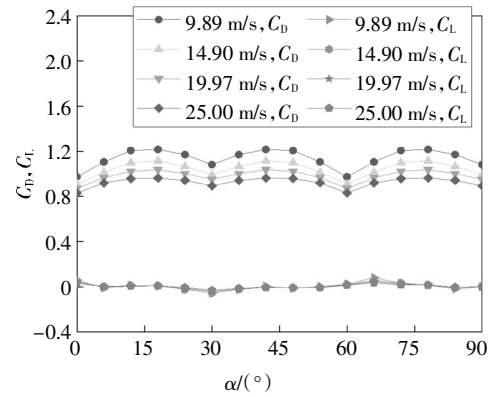
多分裂导线整体的阻力系数和升力系数如图 8 所示,可知:1)所有工况的升力系数很小;2)根据对称性,二分裂导线阻力系数关于 90°风向对称,四分裂导线阻力系数关于 45°、90°风向对称,六分裂导线阻力系数关于 30°、60°、90°风向对称,八分裂导线阻力系数关于 22.5°、45°、67.5°、90°风向对称;3)多分裂导线整体阻力系数随着风速的增加呈减小趋势;4)遮挡效应显著的风向下分裂导线整体阻力系数存在谷值,遮挡效应显著的风向角有:0°风向(二分裂);0°、45°、90°风向(四分裂);0°、30°、60°、90°风向(六分裂);0°、22.5°、45°、67.5°、90°风向(八分裂)。



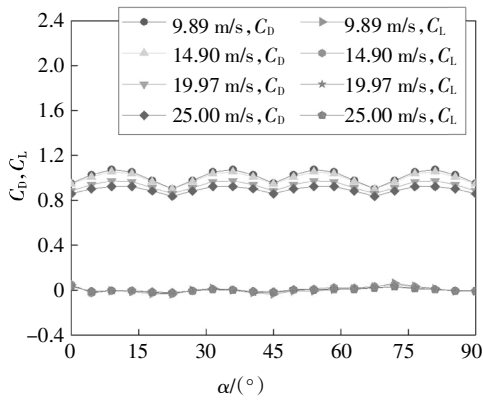
(a)二分裂导线



(b)四分裂导线



(c)六分裂导线



(d)八分裂导线

图8 多分裂导线的阻力系数和升力系数

Fig.8 Drag and lift coefficients of multi-bundled conductors

### 4 试验结果与以往结果的对比

#### 4.1 单分裂导线的阻力系数对比

图9给出了均匀流下单导线的阻力系数和比较,可知:1)本文结果随风速的变化规律与其他文献非常接近,在10~15 m/s 风速范围内阻力系数较大,然后随着风速增大呈减小趋势,在高速下趋于稳定;2)25 m/s 风速下本文结果与文献结果非常接近,均约为1.0;3)与25 m/s 风速结果相比,BS 规范<sup>[20]</sup>建议值偏大,GB 50545 规范<sup>[15]</sup>建议值稍大,而 ASCE<sup>[17]</sup>、IEC 60826<sup>[18]</sup>、EN 50341-1<sup>[19]</sup>和 DL/T 5551 规范<sup>[16]</sup>的建议值和试验结果比较接近.

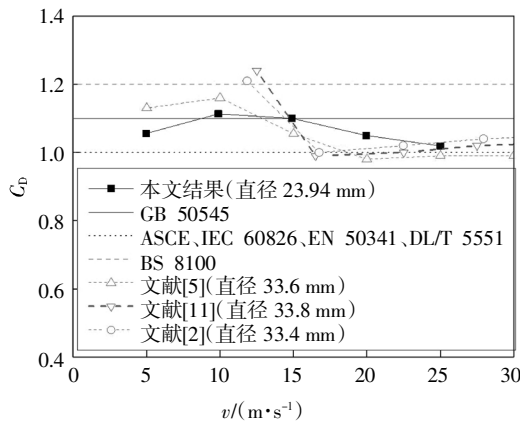
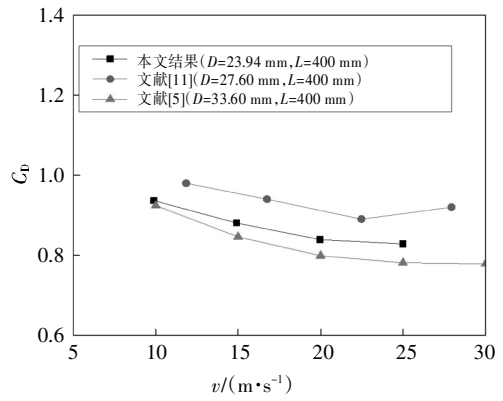


图9 单导线的阻力系数及其比较

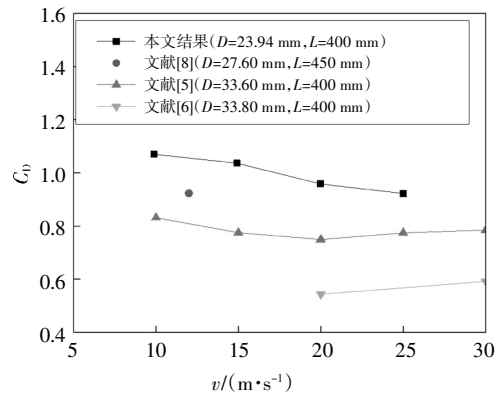
Fig.9 Drag coefficients of isolated conductor and comparison

#### 4.2 多分裂导线整体阻力系数的对比

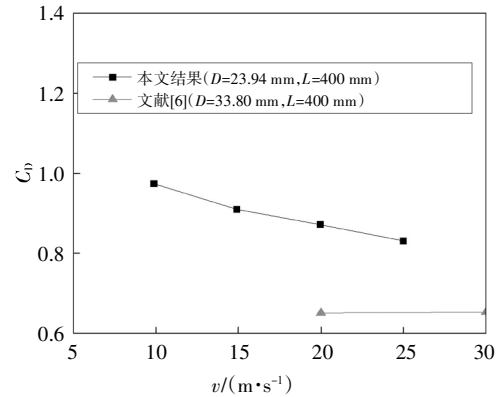
图10给出了均匀流多分裂导线的整体阻力系数及其比较,由图可知:1)本文结果随风速的变化规律与文献结果非常接近,即随着风速的增大呈减小趋势,在高速下趋于稳定;2)对于四、六、八分裂导



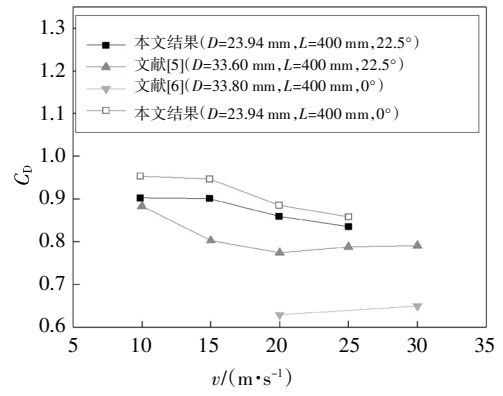
(a)二分裂导线



(b)四分裂导线



(c)六分裂导线



(d)八分裂

图10 多导线的阻力系数及其对比

Fig.10 Drag coefficients of multi-bundled conductors and comparison

线,本文结果比其他文献结果偏大,其原因主要为本文试验导线直径(直径 23.94 mm)较小,而文献[5-11]的导线直径为 27.60 mm 和 33.60 mm,在前后子导线干扰情况下,可以预见,子导线直径越大,对后方子导线的干扰效应越显著,导致后方子导线的阻力系数较小。

### 5 多分裂导线整体阻力系数建议值

考虑实际导线的设计风速,以 25 m/s 均匀流风速的测试结果作为建议值,即针对直径 23.94 mm、间距 400 mm 的多分裂导线,其阻力系数在各风向下的建议值如图 11 所示。可知:1) 多分裂导线阻力系数随着风向角变化存在显著的对称性,其中四、六、八分裂导线分别关于 45°、30°和 22.5°风向对称;2) 对于存在干扰效应的风向角,其整体阻力系数小于不存在干扰效应风向的数据;3) 随着分裂数的增加,多分裂导线整体阻力系数呈减小趋势;4) 试验获得的阻力系数均小于 GB 50545 的数据。

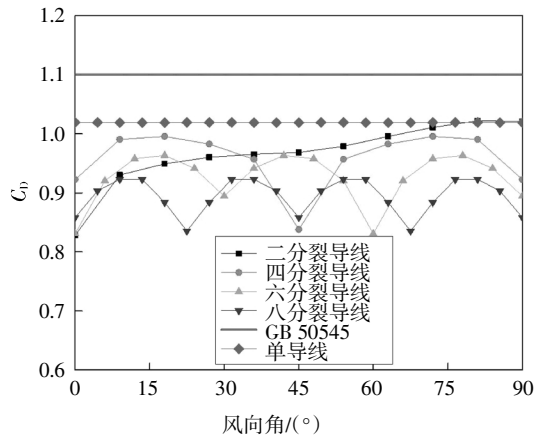


图 11 各风向角下多分裂导线整体的阻力系数

Fig.11 Drag coefficients of multi-bundled conductors under various azimuths

从图 11 的阻力系数中取出最大值和最小值如图 12 所示,可知:1)多分裂导线阻力系数最大值对应于干扰不显著的工况,随着分裂数的增加最大值呈减小趋势;2) 多分裂导线阻力系数最小值对应于干扰最显著的工况,最小值与导线分裂数的关系并不大;3)保守起见,直径 23.94 mm、间距 400 mm 的多分裂导线阻力系数建议值:单导线和二分裂导线为 1.02,四分裂导线为 1.00,六分裂导线为 0.97,八分裂导线为 0.93。

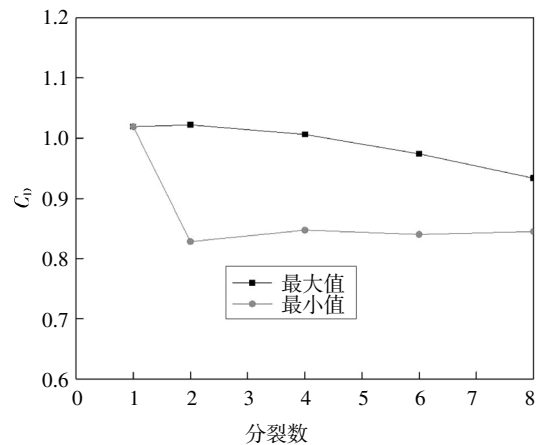


图 12 多分裂导线阻力系数的极值

Fig.12 Extreme values of drag coefficients of multi-bundled conductors

### 6 结论

针对 23.94 mm 直径、400 mm 间距的多分裂导线阻力系数进行研究,主要结论如下:

1) 高风速下单导线的阻力系数比光滑圆柱的阻力系数小 13%,绞线外形可减小圆柱的阻力系数;风速较大时湍流度对单导线和光滑圆柱的阻力系数影响很小。

2) 单根子导线的阻力系数随着风速的增加呈减小趋势;子线间的气动干扰效应非常明显,只要出现前后遮挡效应,后方子线的阻力系数会显著减小。

3) 多分裂导线整体阻力系数随着风速的增加呈减小趋势;在遮挡效应显著的风向角下分裂导线总的阻力系数存在谷值。

4) 对于各种分裂导线,本文结果比其他文献结果偏大,其原因主要为本文试验导线直径较小,在前后干扰情况下导线直径越小,干扰效应越不显著。

5) 给出了各风向角多分裂导线整体阻力系数的建议值;阻力系数随着风向角存在显著的对称性,四、六、八分裂导线分别关于 45°、30°和 22.5°风向对称; 23.94 mm 直径、400 mm 间距多分裂导线阻力系数包络值建议为:单导线和二分裂导线为 1.02;四分裂导线为 1.00;六分裂导线为 0.97;八分裂导线为 0.93。

### 参考文献

[1] 李名珍,朱红良,黎汉林,等. 低风压架空导线的风洞试验[J]. 电线电缆,2017(5):9-12.

- LI M Z, ZHU H L, LI H L, *et al.* Wind tunnel test of drag reduced overhead conductor [J]. *Electric Wire and Cable*, 2017(5):9—12. (In Chinese)
- [2] 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 P, WU X M, LIU B, *et al.* Wind tunnel test on drag coefficient of new type concentric-lay-stranded conductors [J]. *Electric Wire and Cable*, 2014(4):30—33. (In Chinese)
- [3] 晏致涛, 王灵芝, 刘军, 等. 表面粗糙度对导线风荷载及涡激振动的影响[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(3):146—151.
- YAN Z T, WANG L Z, LIU J, *et al.* Effects of surface roughness of conductors on their wind loads and vortex-induced vibration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(3):146—151. (In Chinese)
- [4] 楼文娟, 李天昊, 吕中宾, 等. 多分裂子导线气动力系数风洞试验研究[J]. *空气动力学学报*, 2015, 33(6):787—792.
- LOU W J, LI T H, LÜ Z B, *et al.* Wind tunnel test on aerodynamic coefficients of multi-bundled sub-conductors [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, 33(6):787—792. (In Chinese)
- [5] 谢强, 谢超, 管政. 特高压8分裂导线风荷载干扰效应风洞试验[J]. *高电压技术*, 2011, 37(9):2126—2132.
- XIE Q, XIE C, GUAN Z. Wind tunnel test on the interference effect on wind load of UHV 8-bundled conductors [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(9):2126—2132. (In Chinese)
- [6] 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 T H, NIU H W, MIN X, *et al.* Research on interference effects of wind load on bundle conductors [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(2):37—42. (In Chinese)
- [7] 牛华伟, 洪飞, 欧阳克俭, 等. 拉线门塔在下击暴流作用下的响应分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3):72—81.
- NIU H W, HONG F, OUYANG K J, *et al.* Analysis on downburst induced response of guyed portal tower [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2018, 45(3):72—81. (In Chinese)
- [8] 蔡萌萌, 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—114.
- CAI M Q, YAN B, LIU X H, *et al.* Analysis on drag coefficients of bundled conductors under wind load [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(1):110—114. (In Chinese)
- [9] 王述良, 梁枢果, 邹良浩, 等. 基于刚性节段模型风洞试验的输电导线阻力系数研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(3):32—40.
- WANG S L, LIANG S G, ZOU L H, *et al.* Study on drag coefficients of conductors based on wind tunnel tests of rigid sectional model [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(3):32—40. (In Chinese)
- [10] 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 Q, SUN Q G, GUAN Z. Wind tunnel test on global drag coefficients of multi-bundled conductors [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(4):1106—1112. (In Chinese)
- [11] 孙启刚, 谢强. 串列双分裂导线屏蔽效应风洞试验研究[J]. *电力建设*, 2013, 34(10):6—11.
- SUN Q G, XIE Q. Wind tunnel test on shielding effect of serial 2-bundled conductors [J]. *Electric Power Construction*, 2013, 34(10):6—11. (In Chinese)
- [12] WARDLAW R L, COOPER K R, KO R G, *et al.* Wind tunnel and analytical investigations into the aeroelastic behavior of bundled conductor [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1975, 94(2):642—654.
- [13] SHAN L, JENKE L M, CANNON D D. Field determination of conductor drag coefficients [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 41(1/3):835—846.
- [14] PAN G, WANG D W, LI S L, *et al.* Transiting test method for galloping of iced conductor using wind generated by a moving vehicle [J]. *Wind and Structures*, 2019, 28(3):155—170.
- [15] GB 50545—2010 110 kV~750 kV 架空输电线路设计技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2010:31—34.
- GB 50545—2010 Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line [S]. Beijing:China Planning Press, 2010:31—34. (In Chinese)
- [16] DL T 5551—2018 架空输电线路荷载规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2018:21—22.
- DL T 5551—2018 Load code for the design of overhead transmission line [J]. Beijing:China Planning Press, 2018:21—22. (In Chinese)
- [17] ASCE SEI 74 Guidelines for electrical transmission line structural loading[S]. Reston, Virginia:ASCE, 2009:21—35.
- [18] IEC 60826—2003 Design criteria of overhead transmission lines [S]. Geneva:International Electrotechnical Commission, 2003:27—28.
- [19] EN 50341-1:2012 Over electrical lines exceeding AC 1kV—part 1: general requirements—common specifications [S]. London: British Standards Institution, 2013:12—13.
- [20] BS 8100—1986 Lattice towers and masts [S]. London:British Standard Institution, 1986:21—33.