

文章编号: 1000-582X(2013)01-110-05

## 多分裂导线风压阻力系数分析

蔡萌琦<sup>a</sup>, 严波<sup>a,b</sup>, 刘小会<sup>a</sup>, 胡景<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 资源及环境科学学院工程力学系; b. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 通过风洞试验测试获得在不同风速和风攻角下四分裂导线的风压阻力系数, 同时采用数值模拟方法计算得到与试验模型对应的导线阻力系数, 试验和数值结果较吻合。进而利用数值方法对八分裂和六分裂导线的绕流问题进行模拟, 得到不同风速和风攻角下分裂导线的阻力系数。与我国现行标准和 IEC 标准中导线风荷载计算方法进行比较, 表明在计算多分裂导线的风压时, 其阻力系数按国内现行标准取值可能偏大而过于保守, 有必要进一步通过理论和风洞试验研究后进行调整。

**关键词:** 分裂导线; 风压阻力系数; 风洞试验; 数值模拟

**中图分类号:** TM753; TM039

**文献标志码:** A

## Analysis on drag coefficients of bundled conductors under wind load

CAI Mengqi<sup>a</sup>, YAN Bo<sup>a,b</sup>, LIU Xiaohui<sup>a</sup>, HU Jing<sup>a</sup>

(a. Department of Engineering Mechanics; b. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Drag coefficients of quad-bundled conductor under different wind speeds and attack angles are firstly determined by means of wind tunnel test. Meanwhile, the drag coefficients are obtained by numerical simulation method and the results are consistent with those by the wind tunnel test. Furthermore, cross flows around six-bundled and eight-bundled conductors are numerically investigated, and the drag coefficients are then determined. Compared with the determination method of wind load on conductor in current Chinese code and the IEC code for the design of transmission line, the drag coefficients defined in the Chinese code may be too large for bundled conductors, and may need to be adjusted based on further theoretical and wind tunnel test investigation.

**Key words:** bundled conductor; wind pressure drag coefficient; wind tunnel test; numerical simulation

随着中国“西电东送”和“北电南送”工程的启动, 采用四分裂导线的超高压输电线路已大量建成。近年特高压输电线路示范工程已经试运行<sup>[1]</sup>, 特高压输电线路一般采用六分裂和八分裂导线。在设计线路时如何合理地确定作用于导线上的风荷载具有十分重要的意义。

根据中国 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程<sup>[2-3]</sup>, 在计算作用于导线上的风荷载时, 导线阻力系数的取值没有区分单导线和分裂导线的情况。对于分裂导线仅将所有子导线的截面积求和, 没有考虑分裂导线上风子导线尾流对下风子导线气动力的影响。在最近由中国电力工程顾问集团公司制定

**收稿日期:** 2012-08-10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51277186); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2009BB7367); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11240009)

**作者简介:** 蔡萌琦(1987-), 女, 重庆大学博士研究生, 研究方向为工程力学。

严波(联系人), 重庆大学教授, 博士, (E-mail) boyan@cqu.edu.cn.

的1 000 kV交流架空输电线路设计技术导则(草案)中,仍然延续了这一计算方法<sup>[4]</sup>。在IEC送电线路设计标准中,明确指出对于分裂导线无需考虑各子导线之间气动力的相互影响,即风压计算按各子导线分别计算后直接叠加即可<sup>[5]</sup>。但其阻力系数的取值小于国内标准。体型系数的取值不当,可能导致作用于导地线上的风荷载计算值偏大,进而可能导致杆塔结构设计过于保守,由此产生的经济损失无容忽视。

事实上,多分裂导线在风荷载作用下的气动特性对作用于各子导线上的风荷载影响明显。文献[6]在研究分裂覆冰导线气动特性时,指出各子导线上的空气动力参数存在明显差异。文献[7-8]通过对现行设计规程中风偏角计算公式的分析,提出引入风荷载调整系数对风偏角计算公式进行修正的方法。笔者课题组在研究覆冰四分裂导线舞动时,也证实这一差异不容忽视<sup>[9-11]</sup>。文献[12]利用风洞试验研究了典型的八分裂导线的气动特性,得到的阻力系数均小于中国标准中给出的取值。

为此,笔者首先给出一典型四分裂导线阻力系数的风洞试验结果,同时采用数值方法模拟研究了四分裂、六分裂和八分裂导线的阻力系数。结果表明,国内现行设计标准中计算作用于导线上的风荷载时,阻力系数取值偏大,有必要进行深入研究。

## 1 现行设计规程中导线风压阻力系数取值

根据我国110~500 kV架空送电线路设计规程,在计算作用于导线上的风荷载时,导线及地线风荷载的标准值按下式计算<sup>[2]</sup>

$$W_x = W_0 \alpha \mu_z \mu_{sc} \beta_c d L_P \sin^2 \theta, \quad (1)$$

$$W_0 = V^2 / 1\ 600, \quad (2)$$

式中: $W_x$ 是垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值,kN; $\alpha$ 为风压不均匀系数; $\beta_c$ 为500 kV线路导线及地线风荷载调整系数,仅用于计算作用于杆塔上的导线及地线风荷载(不含导线及地线张力弧垂计算和风偏角计算); $\mu_{sc}$ 为风压高度变化系数; $\mu_{sc}$ 为导线或地线的阻力系数,又称体型系数,线径小于17 mm或覆冰时(不论线径大小)取 $\mu_{sc}=1.2$ ;线径大于或等于17 mm时, $\mu_{sc}$ 取1.1; $d$ 为导线或地线的外径或覆冰时的计算外径;分裂导线应取所有子导线外径的总和,m; $L_P$ 为杆塔的水平档距,m; $\theta$ 为风向与导线或地线方向之间的夹角,度; $W_0$ 为基准风压标准值,kN/m<sup>2</sup>,应根据基准高度的风速 $V$ ,m/s,按式(2)计算。根据规程,在由式(1)计算分裂

导线的风荷载时,式中 $d$ 的取值为所有子导线的外径总和,即认为每一根子导线所受的风荷载完全相同。

由中国电力工程顾问集团公司起草的尚未正式颁布的1 000 kV交流架空输电线路设计技术导则<sup>[3]</sup>,其中导线和地线的阻力系数取值与110~500 kV架空送电线路设计规程相同。这一取值大于IEC标准取值1.0<sup>[4]</sup>。对于分裂导线,由于上风子导线的尾流会对下风子导线的气动力产生影响,可能降低后者的阻力。由此引起的风荷载降低的大小与分裂导线分裂数、各子导线之间的间距、风攻角以及风速等有关。

## 2 分裂导线风洞试验结果及其数值模拟

### 2.1 四分裂导线风洞试验

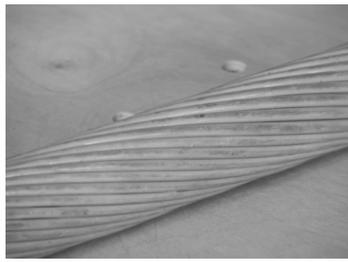
取一四分裂导线模型,通过风洞试验测试各子导线的阻力。子导线直径为27.6 mm,导线间距为450 mm。试验在中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所1.4 m×1.4 m风洞中完成。该风洞为直流式低速风洞,截面形状为切角矩形,试验段长2.8 m,风速范围为0~65 m/s。使用TG0151A和TG0151B天平测量导线模型的阻力,测力试验数据采集系统为PXI系统。四分裂导线模型安装在装置中间,两杆式天平分别安装在对称的两根导线模型内部。试验模型如图1所示。导线布置示意图如图2所示。

### 2.2 四分裂导线绕流数值模拟及其与试验结果比较

采用Fluent流体动力学软件模拟分裂导线绕流场。采用有限体积法和SIMPLEC算法求解,湍流模型选用Spalart-Allmaras模型<sup>[13]</sup>。导线模型尺寸与风洞试验模型一致。由于四分裂导线属于典型的细长结构,子导线间的尾流效应及气动力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<sup>[14-15]</sup>。

计算区域大小为12 m×12 m。零攻角时,计算区域左边设置为入口,右边设置为出口,上下设置为对称边界。网格划分在各子导线周围区域加密,网格总数约为60万。由于网格非常细密,为清晰起见,图3仅给出导线周围局部区域的网格。

分别计算模拟了风攻角为0°和45°,风速为12 m/s的情况。图4所示为风速12 m/s时2种风攻角下四分裂导线的速度分布图。可见,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。



(a) 导线模型



(b) 安装模型

图 1 试验模型

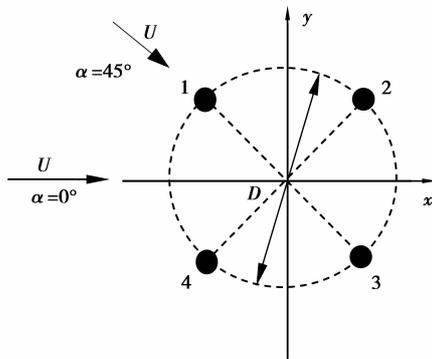
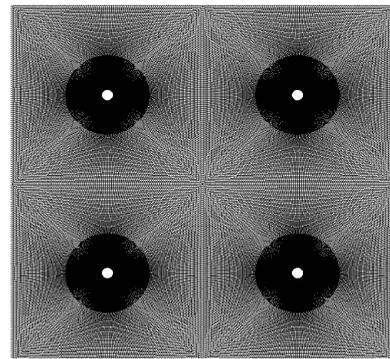


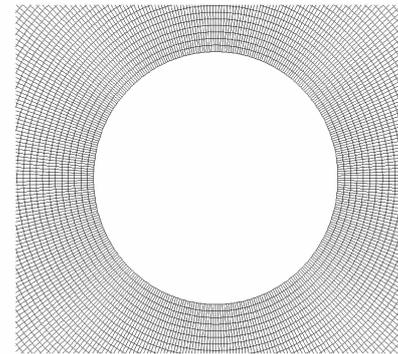
图 2 四分裂导线布置示意图

这种影响导致背风侧子导线的阻力明显减小。由风洞试验和数值模拟得到的各子导线的阻力系数如表 1 中所列。从表中数值模拟和风洞试验结果均可见,风攻角为  $0^\circ$  时,处于迎风侧的子导线 1 和 2 的阻力系数明显大于处于背风侧的子导线 3 和 4(导线编号参见图 2)。当风攻角为  $45^\circ$  时,子导线 3 受子导线 1 的尾流影响较大,其阻力系数明显低于其他子导线。

此外,比较数值模拟与风洞试验结果可见,两者存在一定差异。这可能是由于风洞试验模型采用绞股线模型,如图 1(a) 所示,而数值模型用光滑圆截面

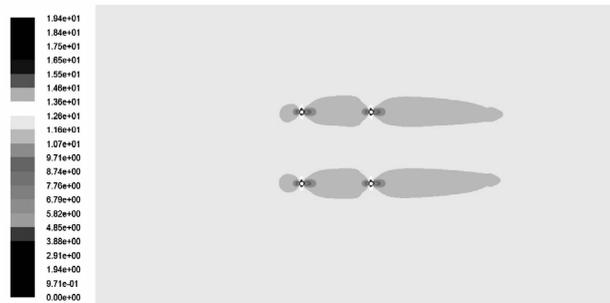


(a) 四分裂导线周围网格

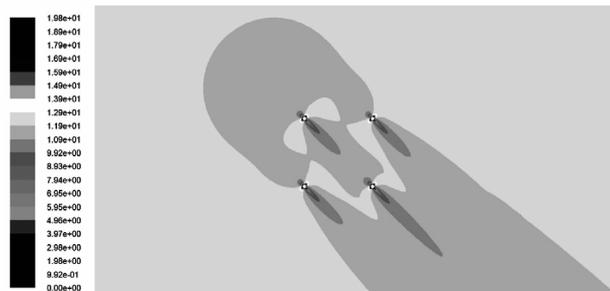


(b) 单根子导线周围局部网格

图 3 四分裂导线绕流计算局部网格



(a) 风攻角  $0^\circ$



(b) 风攻角  $45^\circ$

图 4 风速 12 m/s 时四分裂导线速度场分布图(局部放大)

面二维简化模型所致。且流场计算也存在一定的误

差。四根子导线阻力系数数值模拟和试验平均值的最大误差为 5.8%。表明数值模型可以用以分析分裂导线的绕流问题。

表 1 四分裂导线风压阻力系数数值模拟和试验结果(风速 12 m/s)

攻角/ (°)	子导线	阻力系数	
		数值结果	试验结果
0	1	0.954	1.112
	2	0.783	0.734
	3	0.786	0.734
	4	0.953	1.112
	平均值	0.869	0.923
45	1	0.967	1.071
	2	1.037	1.128
	3	0.892	0.821
	4	1.037	1.128
	平均值	0.983	1.037

此外,比较数值模拟与风洞试验结果可见,八根子导线阻力系数数值和试验平均值的最大误差为 7%。

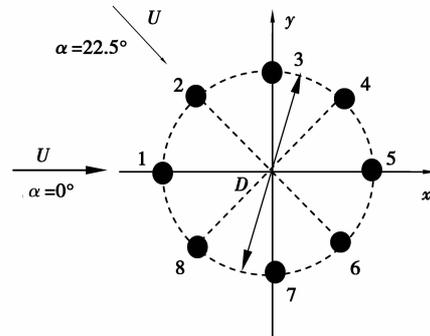


图 5 八分裂导线布置示意图

### 2.3 八分裂导线风压阻力系数与试验结果比较

为进一步验证数值模型的合理性,对文献[10]中的八分裂导线风洞试验模型进行数值模拟。该八分裂导线模型的布置如图 5 所示。导线接圆直径  $D$  为 1 000 mm,导线直径为 18.25 mm,风速为  $V=12$  m/s。模拟计算了风攻角分别为  $0^\circ$  和  $22.5^\circ$  2 种情况。

图 6 所示为风速 12 m/s 时 2 种风攻角下八分裂导线的速度分布图。文献[10]给出的风洞试验结果和本文数值模拟得到的各子导线的阻力系数如表 3 中所列。结合图 6 和表 2 数据可见,风攻角为  $0^\circ$  时,子导线 3、4、5 受尾流影响较明显,且各相邻子导线之间都有相互干扰。当风攻角为  $22.5^\circ$  时,子导线 4 和 6 受尾流影响较明显,该 2 根子导线上的阻力系数明显低于其他子导线。

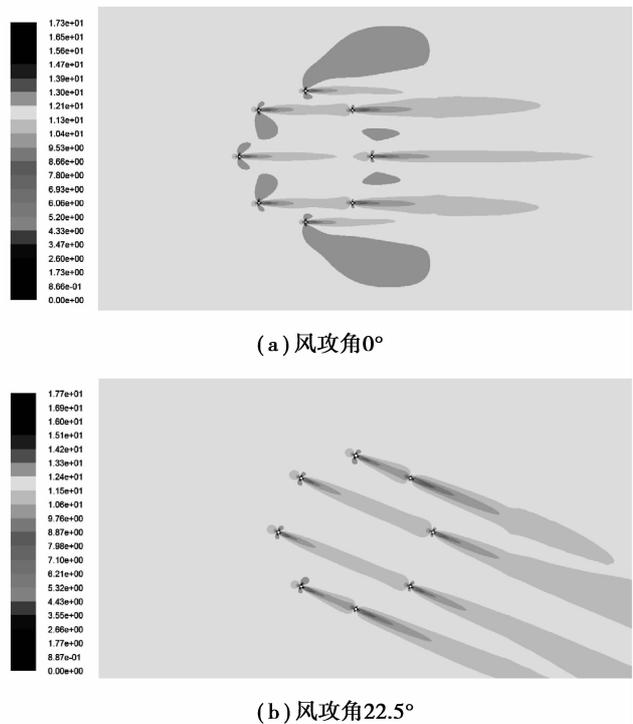


图 6 风速 12 m/s 时八分裂导线速度场分布图(局部放大)

表 2 八分裂导线风压阻力系数数值模拟和试验结果<sup>[11]</sup>

攻角/ (°)	模型	阻力系数								平均值
		子导线 1	子导线 2	子导线 3	子导线 4	子导线 5	子导线 6	子导线 7	子导线 8	
0	数值	1.025	1.061	1.060	1.035	0.971	1.034	1.059	1.063	1.039
	试验	0.936	1.011	0.971	0.957	0.912	0.957	0.971	1.011	0.966
22.5	数值	1.017	1.015	1.007	0.729	1.005	1.009	0.728	1.004	0.939
	试验	0.973	0.973	1.022	0.683	1.026	1.026	0.683	1.022	0.926

### 3 多分裂导线的风压阻力系数及其取值讨论

下面采用数值方法计算不同风攻角、不同风速下分裂导线各子导线的阻力系数。为和现行设计标准中的阻力系数进行比较,仅给出各子导线风压阻力系数的平均值,如表 3 中所列。表中给出了四分裂、六分裂和八分裂导线,在不同风速和风攻角情况下的数值模拟结果。六分裂导线直径为 33.6 mm,分裂导线的接圆直径  $D=900$  mm。四分裂和八分裂导线模型如前节所述。

表 3 多分裂导线风压阻力系数数值模拟值

风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	阻力系数					
	四分裂导线		六分裂导线		八分裂导线	
	攻角 $0^\circ$	攻角 $45^\circ$	攻角 $0^\circ$	攻角 $30^\circ$	攻角 $0^\circ$	攻角 $22.5^\circ$
12	0.869	0.983	1.025	0.974	0.987	0.957
18	0.829	0.960	0.981	0.933	0.957	0.923
30	0.794	0.935	0.941	0.901	0.917	0.893

从表中结果可见,除了六分裂导线在攻角为  $0^\circ$  和风速 12 m/s 时的阻力系数大于 1.0 以外,其他均小于 1.0。该数值小于我国标准中导线直径大于 17 mm 时的 1.1,而与 IEC 标准的取值 1.0 较接近。可见,按我国现行标准取值可能过于保守。

值得一提的是,导线的风压阻力系数与分裂导线的分裂数、各子导线之间的间距、风攻角以及风速等有关。为了给出多分裂导线阻力系数的合理取值,有必要进一步地结合理论分析和风洞试验进行深入研究。

### 4 结 论

结合风洞试验和数值模拟方法,研究了四分裂超高压和六分裂及八分裂特高压输电导线的风压阻力系数的取值。得到如下结论:

1) 通过四分裂和八分裂导线风洞试验结果与数值模拟结果的一致性,验证了本文建立的数值模型是合理的。

2) 四分裂、六分裂和八分裂导线在不同风攻角和不同风速下的阻力系数结果表明,上风子导线尾流对下风子导线的阻力影响明显。此外,风速越大,阻力系数越小。

3) 这里得到的分裂导线风压阻力系数均小于我

国现行规范中规定的取值,而与 IEC 国际标准的取值接近。按我国现行标准取值可能过于保守。由于风压阻力系数的取值直接影响风荷载的计算,进而影响杆塔的设计,因而值得深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 胡志鹏. 特高压输电影响深远[J]. 电器工业, 2007, 8(4): 31-33.  
HU Zhipeng. Deep significance of UHV power transmission[J]. China Electrical Equipment Industry, 2007, 8(4): 31-33.
- [2] 中华人民共和国电力行业标准. DL/T 5092—1999P 110~500kV 架空送电线路设计技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 1999.
- [3] 国家电力公司东北电力设计院, 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2 版, 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 中国电力工程顾问集团公司企业标准. Q/DG 1·A010-200X 1000kV 交流架空输电线路设计技术导则[S]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2010.
- [5] IEC. IEC60826 Design criteria of overhead transmission line[S]. 3rd ed. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2003.
- [6] 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.
- [7] Yan B, Liu X H, Liu B A. Dynamic response analysis of windage yaw of overhead transmission lines[J]. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2006, 1(1): 90-97.
- [8] Yan B, Lin X S, Luo W, et al. Numerical study on dynamic swing of suspension insulator string in overhead transmission line under wind load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 248-259.
- [9] Liu X H, Yan B, Zhang H Y, et al. Nonlinear numerical simulation method for galloping of iced conductor[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2009, 30(4): 489-501.
- [10] Hu J, Yan B, Song Z, et al. Parameter study on galloping of iced bundled conductors[C]// Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 28-31, 2010, Chengdu, China. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-4.

- Technology, 2007, 57(2): 380-387.
- [13] Panizza M, Cerisola G. Electro-fenton degradation of synthetic dyes[J]. Water Research, 2009, 43(2): 339-344.
- [14] Wang C T, Chou W L, Chung M H, et al. COD removal from real dyeing wastewater by electro-fenton technology using an activated carbon fiber cathode[J]. Desalination, 2010, 253(1/2/3): 129-134.
- [15] 王程远, 胡翔, 李毅, 等. 电化学氧化法处理高浓度氨氮废水的研究[J]. 工业用水与废水, 2008, 39(3): 59-61.
- WANG Chenyuan, HU Xiang, LI Yi, et al. Treatment of wastewater containing high concentration ammonia-nitrogen by electrochemical oxidation process [J]. Industrial Water & Wastewater, 2008, 39(3):59-61.
- [16] Zhang H, Zhang D B, Zhou J Y. Removal of COD from landfill leachate by electro-fenton method [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 135 (1/2/3): 106-111.
- [17] 石岩, 王启山, 岳琳, 等. 三维电极-电 Fenton 法处理垃圾渗滤液 [J]. 天津大学学报, 2009, 42 (3): 248-252.
- SHI Yan, WANG Qishan, YUE Lin, et al. Treatment of landfill leachate by three-dimensional-electrode electro-fenton process [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42 (3): 248- 252.
- (编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第 114 页)

- [11] Liu X H, Yan B, Zhang H Y, et al. Numerical simulation for galloping of iced quad-bundled conductor under stochastic wind load[C]//Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 28-31, 2010, Chengdu, China. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [12] 肖正直, 晏致涛, 李正良, 等. 八分裂输电导线结冰风洞及气动力特性试验[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 90-94.
- XIAO Zhengzhi, YAN Zhitao, LI Zhengliang, et al. Wind tunnel and aerodynamic characteristics tests for ice-covering of transmission line adopting 8-bundled conductor [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 90-94.
- [13] 吕翼, 楼文娟, 孙珍茂, 等. 覆冰三分裂导线气动力特性的数值模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(1):174-179.
- LÜ Yi, LOU Wenjuan, SUN Zhenmao, et al. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of three bundled iced transmission lines [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44 (1):174-179.
- [14] Braun A L, Awruch A M. Aerodynamic and aeroelastic analysis of bundled cables by numerical simulation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 284 (1/2): 51-73.
- [15] Shehata A Y, Damatty A A E, Savory E. Finite element modeling of transmission line under downburst wing loading [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 42(1):71-89.
- (编辑 郑洁)