

准椭圆形覆冰导线气动力特性试验研究

马文勇, 顾明, 全涌, 黄鹏

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过刚性节段模型高频天平测力风洞试验, 对圆形截面、裸导线截面及 6 种不同类型的准椭圆形覆冰导线气动力特性进行了研究, 讨论了紊流度、风向角、覆冰饱满度、覆冰厚度等因素对导线气动力特性的影响以及准椭圆覆冰导线驰振稳定性的一般规律. 结果表明, 紊流度的增加使得模型力系数绝对值在一定范围内变小; 覆冰形状和风向对导线气动力特性有很大影响; 准椭圆形覆冰导线一定风向角范围内存在驰振可能. 试验得到的数据和结论可以为这类覆冰导线的风致响应计算及破坏机制的分析提供基础数据.

关键词: 输电线; 准椭圆形覆冰; 风洞试验; 气动力; 驰振稳定性

中图分类号: TU 312.1

文献标识码: A

Testing Study on Aerodynamic Force Characteristics of Quasi-oval Shape Iced Conductor

MA Wenyong, GU Ming, QUAN Yong, HUANG Peng

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By applying high frequency balance technique on rigid section models in wind tunnel, aerodynamic force characteristics of cylinder, bare conductor and six quasi-oval shape iced conductor models were investigated in different turbulence intensities and wind directions. Galloping instability of quasi-oval shape iced conductor models were also studied. The analysis shows that absolute values of the force coefficients decrease with the increasing turbulence intensities and the shape of the iced conductors, wind directions have great influences on the force coefficients acting on the conductors and galloping of quasi-oval shape iced conductors can occur in some wind direction. The results could be used as the basis of analysis of their wind induced response and failure mechanism.

Key words: transmission line; quasi-oval shape iced

conductor; wind tunnel test; aerodynamic force; galloping instability

输电导线覆冰不仅增加了导线的重力荷载, 同时引起导线截面气动力的变化还可能进一步引发导线的不稳定振动(驰振), 从而对输电线路的安全形成巨大威胁. 在过去的几十年中, 研究人员对覆冰输电导线的驰振问题进行了大量的研究. 常用于覆冰导线驰振分析的覆冰截面形状主要有 D 形截面^[1-2]、月牙形截面(或者类似月牙形)^[1,3-6]、几种实际覆冰形状^[1,7-9], 这些形状都是对真实导线覆冰形状的简化, 这种简化需要真实覆冰形状接近且满足发生驰振的条件. 结合实际观测我国导线的覆冰规律^[10], 准椭圆形(又称月牙形)和扇形(包括 D 形)比较具有代表性且形状易于量化. 除了驰振分析方法外, 影响驰振分析结果最重要的因素就是覆冰导线的气动力特性, 而目前系统研究不同形状覆冰导线气动力特性及各种参数对覆冰导线气动力影响的文章仍然非常匮乏.

以准椭圆形覆冰导线截面为研究对象, 通过覆冰导线刚性节段模型高频天平测力风洞试验, 得到不同形状的覆冰导线截面的气动力特性, 并分析了紊流度、风向角、覆冰饱满度、覆冰厚度等因素对导线截面气动力特性的影响以及准椭圆形覆冰导线驰振稳定性的一般规律.

1 试验模型及风洞试验概况

对于刚性节段模型高频天平测力试验, 模型应具备较高的频率, 因此模型应尽量轻但又有较高刚度. 试验所有模型均采用泡沫内芯, 外覆 1 mm 厚的航模木质层板. 为了保证作用在模型上的风力足够

收稿日期: 2009-06-16

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(50621062); 国家自然科学基金重点资助项目(50638010)

作者简介: 马文勇(1981—), 男, 博士生, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: mawenyong@126.com

顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

大,从而使测量结果有足够的信噪比,导线模型的基本直径是实际导线直径的2倍.另一方面,为了保证模型的雷诺数和实际导线的雷诺数相同,试验风速为实际风速的1/2.模型基本形状和编号(A~H)见图1,基本圆柱模型A(A模型)为光滑表面圆柱模型,直径 $D_i = 76.8$ mm;基本圆柱模型B(B模型)为钢芯铝绞线模型,导线原型为LGJ 800/55(参考国标LGJ GB1179—83),在航模木质层板外表面再采用泡沫材料模拟裸导线外形;其他模型均采用木表皮

包裹泡沫的方法模拟不同形状椭圆覆冰导线,模型有效长度50 cm,质量为150~250 g.对这类模型,采用 $\lambda = 0.5\lambda_1 + 0.5\lambda_2$ 作为准椭圆形覆冰导线的形状参数,其中 λ_1 为椭圆的饱满度参数,描述覆冰椭圆的长轴与短轴之比, $\lambda_1 = H_i/D_i$, H_i 为椭圆长轴(图1b), D_i 为导线直径,其值等于椭圆短轴; λ_2 为椭圆的厚度参数,描述覆冰厚度, $\lambda_2 = h/D_i$, h 为覆冰模型的总高度(图1b).各试验模型形状参数见表1.

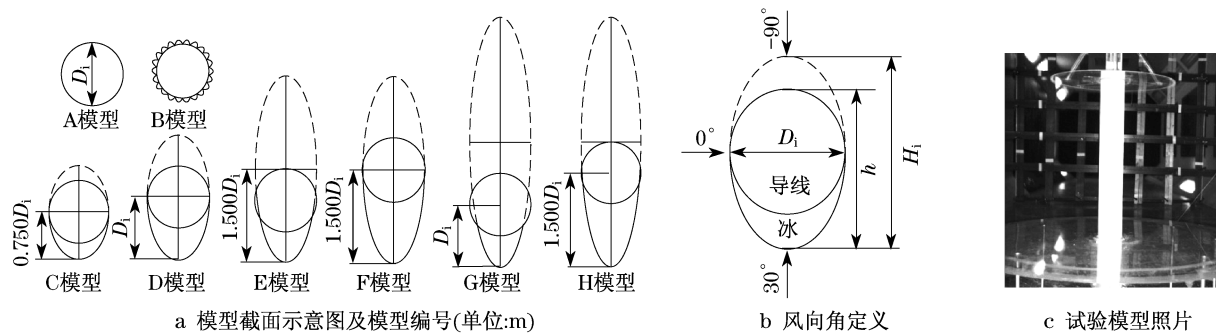


图1 试验模型及风向角定义

Fig.1 Tested models and Wind directions

表1 试验模型形状参数
Tab.1 Shape parameters of tested modals

模型	λ_1	λ_2	λ	模型	λ_1	λ_2	λ
A	1.00	1.00	1.00	F	3.00	2.00	2.50
C	1.50	1.25	1.38	G	4.00	1.50	2.75
D	2.00	1.50	1.75	H	4.00	2.00	3.00
E	3.00	1.50	2.25				

试验前,经敲击测试,模型与天平系统频率70~90 Hz接近,远远高于关心的气动力频率范围.试验时,为消除端部流动分离的影响,保证导线模型的二元流动,模型上下端部均安装端板,端板和模型之间保持最小缝隙.图1b和图1c分别给出风向定义和模型照片.试验在通过格栅模拟得到15%和10%2种紊流风场中进行.试验风速取为 $9.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (试验雷诺数和实际导线在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右风速的雷诺数相当),采样频率200 Hz.

试验风向为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,以 10° 为增量.考虑到大多数实际情况是导线迎风面覆冰,对A模型在 $80^\circ \sim 90^\circ$ 风向区间内以 2° 增量进行加密,考虑到导线迎风覆冰的特点,部分模型取消 $0^\circ \sim -90^\circ$ 风向角.

2 气动力特性分析

2.1 气动力系数定义

按照传统方法定义气动阻力、升力、扭矩系数.

$$C_D(t) = \frac{2F_D(t)}{\rho v^2 D_i L}, \quad C_L(t) = \frac{2F_L(t)}{\rho v^2 D_i L},$$

$$C_M(t) = \frac{2M_z(t)}{\rho v^2 D_i^2 L} \quad (1)$$

式中: $C_D(t)$ 为阻力系数; $F_D(t)$ 为阻力; ρ 为空气密度, $\rho = 1.225 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; v 为试验风速; L 为模型长度; $C_L(t)$ 为升力系数; $F_L(t)$ 升力; $C_M(t)$ 为扭矩系数; $M_z(t)$ 为扭矩.下文分别用 C_D, C_L, C_M 代表阻力系数、升力系数和扭矩系数均值.

2.2 圆柱模型(A和B模型)的气动力特性

根据试验结果,获得了A,B模型的气动力系数及斯托罗哈数(见表2).文献[11]中给出不同粗糙度圆柱模型试验的结果,其阻力系数均值为0.7~1.2之间、斯托罗哈数为0.18~0.20,表明本文试验结果与文献[11]的结果基本一致.

表2 A,B模型气动力系数

Tab.2 Aerodynamic force coefficients of model A and B

紊流度	模型	阻力系数		升力系数 均方根	斯托罗 哈数
		均值	均方根		
10%	A	1.19	0.11	0.27	0.214
	B	1.23	0.15	0.25	0.222
15%	A	0.86	0.12	0.23	0.198
	B	0.98	0.15	0.22	0.211

表2中的数据表明在相同紊流强度下,B模型(表面粗糙度较大)的阻力系数均值和均方根值大于A模型(表面基本光滑)的对应值,斯托罗哈数也略大一些.以阻力系数均值为例,10%紊流度和15%紊流度情况下,与A模型相比,B模型的阻力系数均值增幅分别为3.40%和11.63%.紊流度增加使得平均阻力系数降低.和10%紊流度结果相比,15%紊流度下A,B模型的阻力系数均值分别降低27.7%和20.3%,斯托罗哈数也略有下降.此外,均方根阻力系数受紊流度影响不大,而均方根升力系数随紊流度增大而下降.

2.3 准椭圆形覆冰导线平均气动力特性

图2给出了C,D模型气动力系数均值.可以看出,阻力系数的最大值出现在迎风面最大的 0° 风向角附近,最小值发生在背对覆冰的风向角下(-90°).由于背对覆冰风向角下尾流区覆冰形状曲线比较缓和,其阻力系数值小于正对覆冰风向角下

(90°)的阻力系数值.在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 风向角范围内,最小阻力系数并没有发生在迎风面最小的 90° 风向角下,且不同的覆冰形状发生位置不同,C模型发生在 60° 风向角下,D模型发生在 70° 风向角下.升力系数的最小值出现在 60° 风向角下,由于 $0^\circ\sim 60^\circ$ 之间升力系数呈现下降趋势,因此按照传统DenHartog驰振机理,对于准椭圆形覆冰导线而言,在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内都是有可能发生驰振的不稳定工况,并且C模型和D模型在 45° 风向角附近升力系数值下降速率比较大.同样的根据Nigol驰振机理, $60^\circ\sim 90^\circ$ 风向角下出现了扭转不稳定工况.

由图2分析得到了,准椭圆形覆冰截面气动力均值的一些基本特性.其中 0° 风向角, 60° 风向角对应的气动力系数是决定阻力系数最大值、升力系数最小值(绝对值最大)、扭矩系数最大值、升力系数下降幅度以及扭矩系数下降幅度等覆冰导线气动力特性的主要节点.

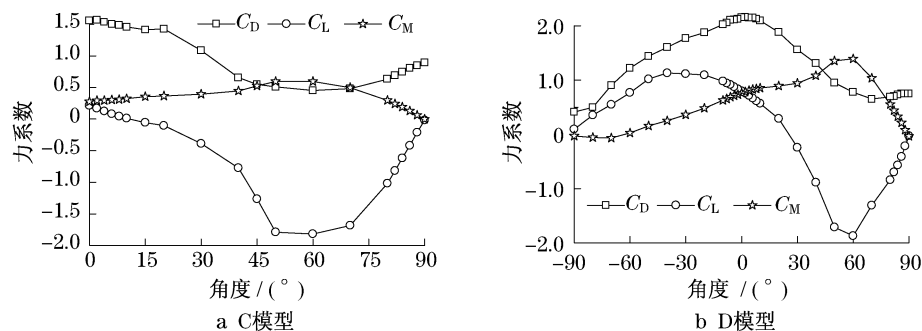


图2 模型气动力系数均值

Fig.2 Mean aerodynamic force coefficients

2.4 紊流度对气动力系数的影响

10%和15%紊流度下的D模型气动力系数均值见图3.图中数据说明,紊流度的增加使得气动力绝对值减小,即若气动力均值为正值,紊流度增加将减小气动力均值,若气动力均值为负值紊流度增加

会增大气动力值.紊流度的增加减小了气动阻力,但并未改变气动阻力随风向角变化的趋势和规律.使得升力系数和扭矩系数随着风向角的变化更加平缓,有效地降低了升力系数和扭矩系数下降段(升力系数 $0^\circ\sim 60^\circ$ 、扭矩系数 $60^\circ\sim 90^\circ$)的下降速率.

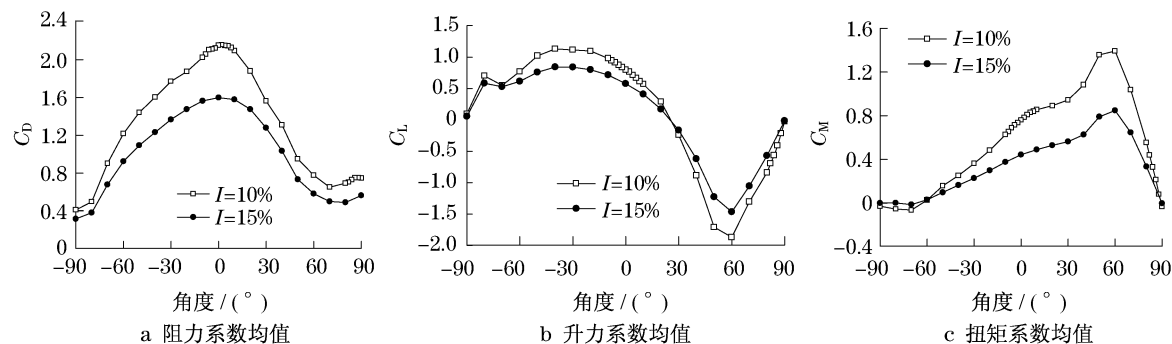


图3 不同紊流度下D模型气动力系数均值

Fig.3 Mean aerodynamic force coefficients of model D in different turbulence intensities

2.5 覆冰形状对气动力系数均值影响

图4和图5分别给出了 0° 和 45° 风向角下准椭圆形覆冰导线的气动力系数均值.通过等值线图不仅可以近似估计各种饱满度和覆冰厚度组合下的气动力系数值,同时观察等值线的走向也可以判断覆冰形状对导线气动力特性的影响.图4a为 0° 风向角下阻力系数受覆冰饱满度和覆冰厚度两因素的影响情况,由等值线的走向可以看出,阻力系数受覆冰厚

度的影响较大,覆冰厚度越大,阻力系数越大,且覆冰厚度较小时,变化非常明显.覆冰越饱满,阻力系数越小,并且在覆冰厚度较大时这种趋势更明显.由图4b,4c知升力系数和扭矩系数受覆冰厚度影响较大,其中图4c中平行线说明扭矩系数几乎不随覆冰饱满度的变化而变化,覆冰厚度增大,升力系数值减小(绝对值增大),扭矩系数值增大.

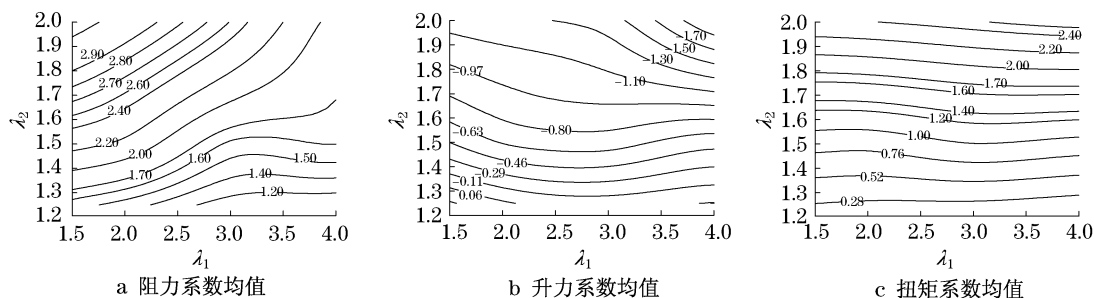


图4 0° 风向角下准椭圆形覆冰的导线气动力系数均值

Fig.4 Isoline of mean aerodynamic force coefficients in direction of 0°

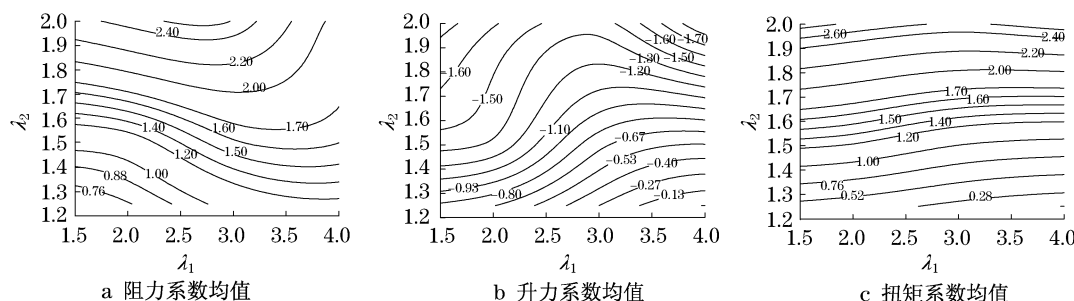


图5 45° 风向角下准椭圆形覆冰的导线气动力系数均值

Fig.5 Isoline of mean aerodynamic force coefficients in direction of 45°

图5的曲线走向比较复杂,等压线的凸起或者凹下说明力系数随某个参数的变化不是单调的.例如,当覆冰厚度较大时($\lambda_2 \geq 1.7$),随着覆冰饱满度的增加覆冰阻力系数先减小后增大;升力系数随着覆冰饱满度的增加先增大后减小. 45° 风向角下,扭矩系数仍然可以认为只随覆冰厚度变化.

对比图4和图5中的数值可发现, 45° 风向角下的阻力系数和升力系数值小于 0° 风向角下对应值,扭矩系数大于 0° 风向角下值.这些规律与图2中的结论一致,因此D模型得到的准椭圆形覆冰导线的规律是可以推广到本文中的其他模型中的.

图6给出了2种紊流度下 0° 风向角的阻力系数、升力系数和 90° 风向角下的阻力系数,同时拟合出力系数随 λ 的变化曲线.由于迎风面增大, 0° 风向角下 C_D 值随着 λ 的增大而变大,高紊流度下的 C_D 明显小于低紊流度对应值. 0° 风向角下模型的 C_L 反

映了模型不对称引起的升力,对应于不同类型的覆冰形状, C_L 值随着形状参数 λ 的增大呈现图示抛物线规律.由 90° 风向角下的 C_D 图可以看出,较大紊流度(15%)下 C_D 小于低紊流度(10%)下的对应值,同时随着 λ 的增大, C_D 呈指数规律下降.此外,紊流度对于 0° 风向角下各个模型的 y 向力系数影响不大.

2.6 准椭圆形覆冰导线驰振稳定性分析

以C,D模型为例,采用DenHartog驰振机理^[12],分析准椭圆形覆冰导线驰振稳定性的一般特点.图7给出了C,D模型气动力系数及其7次多项式拟合,气动力系数表示为 $C_D = \sum_{i=0}^7 B_{di} \alpha^i$, $C_L = \sum_{i=0}^7 B_{li} \alpha^i$,其中 B_{di} 和 B_{li} 分别为拟合多项式系数, α 为以弧度单位表示的风向角.

定义DenHartog系数为 δ_D ,可根据DenHartog系数 δ_D 的正负判断单自由度横风向驰振稳定性,若

$\delta_D < 0$ 则系统不稳定,反之系统稳定. C, D 模型的 DenHartog 系数见图 8.

风向驰振不稳定风向角范围为 $20^\circ \sim 60^\circ$, 其中最有可能发生横风向驰振的风向角在 45° 附近.

由图 8 可知,准椭圆形覆冰导线的单自由度横

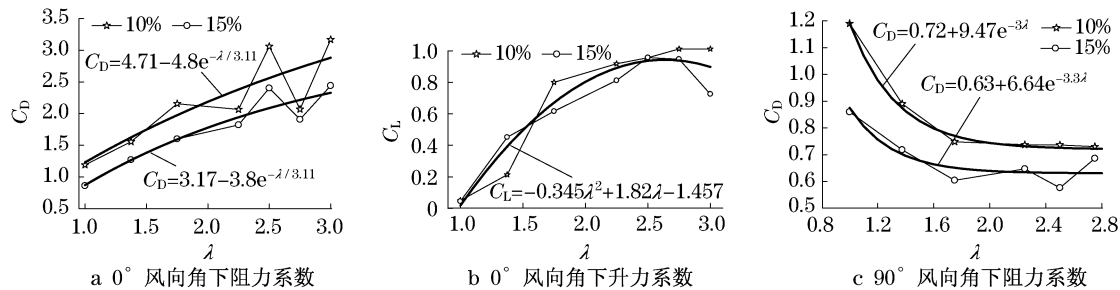


图 6 不同紊流度下的平均气动力系数

Fig. 6 Mean aerodynamic force coefficients in different turbulence intensities

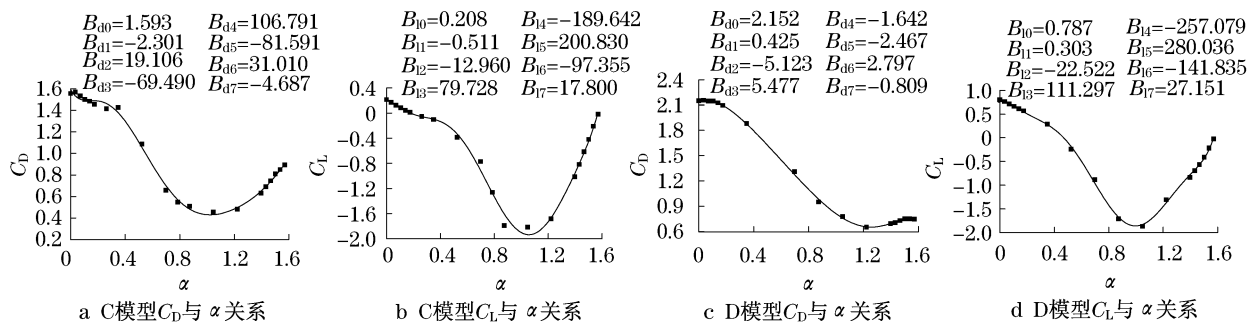


图 7 模型气动力多项式

Fig. 7 Aerodynamic force coefficients polynomial

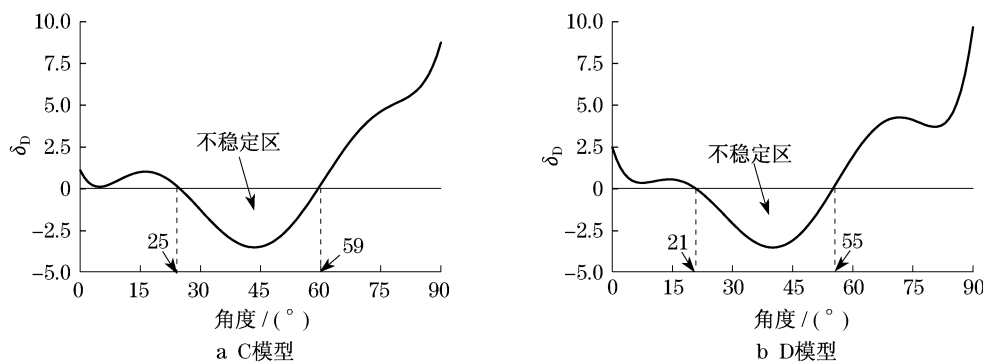


图 8 DenHartog 系数

Fig. 8 DenHartog coefficients

3 结论

研究表明,雷诺数为 4.8×10^5 时粗糙度较大的裸导线气动阻力较圆柱大;紊流度的增加使各模型力系数绝对值在一定范围内减小;覆冰厚度和覆冰饱满度对准椭圆形覆冰导线力系数影响较大,但对不同方向力系数影响差别较大;准椭圆形覆冰导线力系数随着覆冰形状参数变化有一定的规律,可以按照文中典型工况拟合出的规律估计准椭圆覆

冰形状导线气动力系数;准椭圆形覆冰导线单自由度横风向驰振不稳定风向角范围为 $20^\circ \sim 60^\circ$, 其中 45° 风向角发生横风向驰振的可能性最大.

参考文献:

[1] Desai Y M, Yu P, Shah A H, et al. Perturbation-based finite element analyses of transmission line galloping[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 191(4): 469.

(下转第 1427 页)