

文章编号: 1001-4888(2020)02-267-09

覆冰四分裂导线动态气动系数风洞试验^{*}

蔡萌琦¹, 周林抒², 严波³, 刘小会⁴, 黄汉杰⁵

(1. 成都大学 建筑与土木工程学院, 成都 610106; 2. 四川省电力工业调整试验所, 成都 610016; 3. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 4. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 5. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘要: 覆冰导线舞动是由这些导线的气动不稳定性引起的。由于导线动态空气动力特性不同于静态气动系数, 本文针对新月形冰形制作了覆冰四分裂导线模型, 通过风洞试验动态测试的装置设定可测量不同扭转频率下的空气动力系数。风洞试验得到了不同扭转运动频率、风速和覆冰厚度等关键工况下新月形覆冰四分裂导线的动态空气动力系数。风洞试验结果显示, 动态气动系数与静态气动系数存在显著差异。不同于静态气动系数, 动态气动系数曲线是环形的, 多种参数对气动系数影响明显。结果表明, 风洞试验结果为覆冰分裂导线运动研究及其防治技术提供了必要的数据。

关键词: 四分裂导线; 覆冰; 动态空气动力系数; 风洞试验

中图分类号: TM753; O39

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-134

0 引言

由于自然环境的复杂性和不稳定性, 覆冰输电线路的安全运行受到广泛关注。输电线路振荡可能以舞动(覆冰状态下)、尾流驰振和冰跳的形式体现。线路振荡是一种典型的流固耦合运动。线路振荡会导致短路、硬件故障、导线故障甚至铁塔倒塌, 从而导致电力中断。因此, 对线路振荡的防治一直是电气工程中的热点问题。众所周知, 由于分裂导线较大的扭转刚度, 因此在分裂导线上相比于在单导线更常见形成非圆形的覆冰截面^[1-3]。为了解决电力供需不平衡问题, 四分裂导线 500kV 超高压输电线路得到了广泛的应用。常用的超高压输电线路多采用四分裂导线, 复杂线路将导致更严重的舞动问题。然而, 由于对覆冰导线舞动响应缺乏深入的了解, 阻碍了防舞技术的发展。覆冰导线舞动是由于其气动不稳定性引起的, 因此有必要对输电线路导线, 尤其是重冰地区的覆冰四分裂导线的气动力特性进行研究。

为了研究覆冰分裂输电线路的舞动特性, 首先要确定其气动特性, 包括升力、阻力和扭矩特性。现有的研究主要是采用准静态风洞试验对气动系数进行测试分析。针对单导线的气动系数, 国内外学者进行了一系列研究。在 Den Hartog 的试验中, 测量并分析了不同类型的覆冰导线模型的空气动力系数, 研究指出: 基于准稳态理论(QST)得到的气动参数, 可以用于分析导线舞动^[4]。Nigol 等人通过对覆冰单导线的试验研究, 提出了舞动的扭转运动机理和防治措施^[5-7]。Chabart 和 Lilien 利用风洞试验测量了单导线的静态气动特性。上述试验研究的重点是单导线的静态空气动力特性^[8]。

多分裂导线之间的尾流效应对各子导线的气动系数存在一定影响。为了研究气流对分裂导体的影响, 李万平等进行了风洞试验, 分别对新月形和扇形覆冰导线群(三分裂导线)进行了试验测定, 并初步

^{*} 收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51507106; No. 51277186; No. 51308570)

通讯作者: 黄汉杰(1973-), 男, 博士, 研究员。主要研究领域: 结构风工程。Email: hansjie@hotmail.com

分析了子导线之间的绕流对覆冰分裂导线空气动力特性的影响^[9,10]。顾明和马文勇等人通过风洞试验测量了分裂导线在不同覆冰形状下(准椭圆形和扇形)的静态空气动力系数^[11,12]。王昕等对导线进行了一系列风洞试验,以获得不同湍流度、冰厚等工况下新月形和 D 形六分裂覆冰导线气动力系数^[13]。张宏雁等通过风洞试验给出了不同风速以及冰厚下新月形覆冰四分裂导线在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 攻角的静态气动系数^[14]。同时,在有限元 ABAQUS 软件中,数值模拟了不同工况下覆冰四分裂导线的舞动特性^[15]。肖正直等人为了测量覆冰八分裂导线(冰形:新月形和扇形)的空气动力系数,对八分裂导线预先进行了结冰风洞试验,该试验模型采用光滑表面的导线;文献同时研究了不同风攻角下导线的空气动力特性^[16]。谢强等对分裂导线的阻力系数进行了研究^[17-19]。楼文娟等对二、四、八分裂导线的气动系数进行了系统的风洞试验研究^[20]。Zhou 等对均匀流作用下典型新月形覆冰八分裂导线的气动系数进行了风洞试验测量,同时实施了覆冰导线节段模型的驰振试验,基于试验结果进行了覆冰八分裂导线的舞动有限元模拟^[21]。Wu 等利用有限体积法(CFD)FLUENT 软件计算了两分裂导体在不同导体间距下的气动系数,并研究了双分裂导线的次档距振荡^[22]。

上述研究成果都是基于准稳态理论,通过风洞试验,以得到静态空气动力系数。目前,由于对覆冰分裂导线的动态气动载荷的研究数据相对较为缺乏,因此迫切需要获得覆冰分裂导线每个子导线在风场作用下的动态气动载荷。李万平^[23]对覆冰导线群(三分裂)进行了动态气动力特性试验,对比分析了三分裂导线静态、动态气动系数的异同。杨秀萍等^[24]基于 FLUENT 软件,研究了在横向振动作用下,覆冰四分裂导线的气动系数的变化规律,并进一步结合有限元数值模拟分析了舞动振幅和频率对气动力的影响。

由于导线发生舞动时,各子导线的气动力随导线的振动会发生变化,准静态风洞试验结果会与实际情况存在一定的差异,因此需要获得分裂导线的动态气动系数。本文希望探索分裂导线在受到扭转振动作用时的气动特性规律。为了研究 500kV 输电线路的覆冰分裂导线的动态空气动力系数,本文通过风洞试验获得了扭转运动作用下的新月形覆冰四分裂导线的动态空气动力特性。本文风洞试验还获得了不同扭转运动频率、风速和冰厚等参数作用下覆冰四分裂导线随风攻角变化的动态气动参数。

1 试验方法

1.1 导线模型

本次试验模拟的四分裂导线型号为 4XLGJ-400/50,导线直径为 27.6mm。相邻导线间隔距离为 450mm,导线节段模型见图 1(a)。四分裂导线的试验模型布置在风洞中($1.4\text{m} \times 1.4\text{m}$)。为了模拟实际导线表面,在一些橡胶管上建立了导线模型的外层,因此导线试验模型表面为绞股线模型(图 1(b))。风洞试验段长度为 2.8m。为了便于安装天平,导线模型与原型直径比例为 1.2 : 1,导线长度选择 710mm。

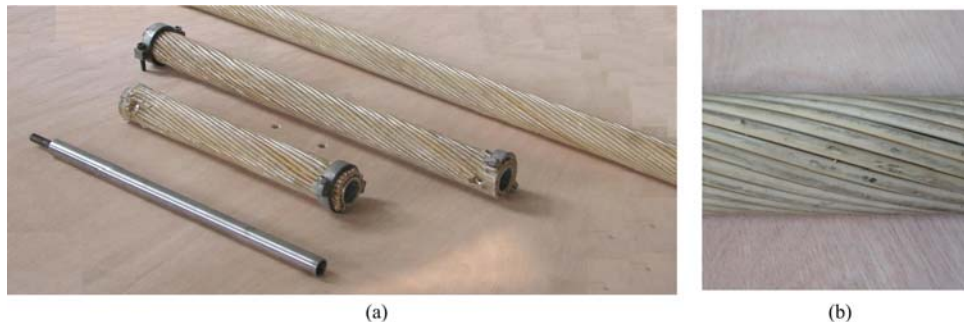


图 1 导线试验模型:(a)导线模型;(b)局部放大

Fig. 1 The test model of quad bundle conductor: (a) the conductor model; (b) local magnification

结合实际观测,在各类天然覆冰中,主要常见的冰形为新月形。覆冰模型比例与导线模型比例一致,材料为轻木,长度也取值 710mm。冰形截面形状为对称的新月形(见图 2(a))。为研究覆冰厚度对气动特性的影响,新月形冰形厚度分别取值为 14mm、24mm 和 33mm,冰形模型见图 2(b)。

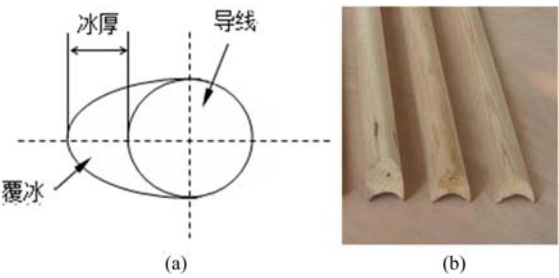


图 2 冰形模型：(a) 新月形；(b) 轻木冰形模型

Fig. 2 The model of ice quad-bundle conductor: (a) crescent shape; (b) the model of ice

1.2 天平装置

利用 TG0151 天平测量了覆冰四分裂导线的气动系数(即阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 和扭矩系数 C_M)(图 3(a))。数据采集系统是 PXI 系统,通过相应的工控计算机系统实现角度和速度的控制。设备之间的通信通过网络通信进行传输。天平精准度如表 1 所列。



图 3 TG0151 天平

Fig. 3 The TG0151 balance

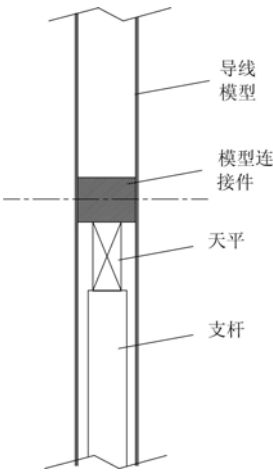


图 4 模型与天平连接机构

Fig. 4 The model of test conductor and balance

表 1 TG0151 天平量程及精度
Tab. 1 Scale and precision of TG0151

项目	Y	MZ	X	MX	Z	MY
载荷范围	60N	8Nm	20N	1Nm	60N	8Nm
静校准度/%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
极限误差/%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

杆式天平安装在测力导线模型内部,模型与天平通过连接件连接,连接件固定在导线模型中间位置。天平上端固定在钢制支杆上,支杆固定于导线测力试验模型专用支撑装置的固定架上,支杆上留有凹槽用以容纳天平信号线。图 4 为模型与天平连接机构示意图,TG0151 杆式天平安装在导体模型内。导线模型和平衡由连接件连接,连接件固定在导线模型的中间位置(图 5)。天平的上侧设置在钢支架上,钢支架固定在导线模型专用支撑装置的刚架上。钢支架有一个槽,以容纳平衡信号线。导线模型垂直安装在风洞试验段转盘中心的特殊支撑装置上。专用支撑装置分为底座、转轴(驱动电机)和固定架三部分。驱动电机由钢制成,上面覆盖一个圆形的上端板。转盘和固定架直接固定,通过轴承与底座连接。转轴和固定架直接固接,与底座之间通过轴承连接。动态测试系统测定的是瞬态角度导线的气动系数,采样频率为 128Hz。

试验定义的风攻角是气流和模型轴向方向的夹角。导线在水平放置的风洞中竖直安装。动态四分

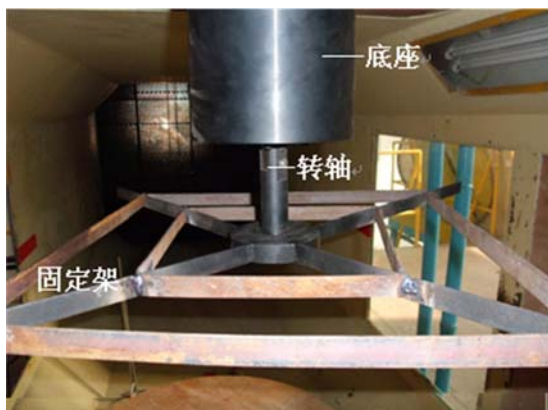
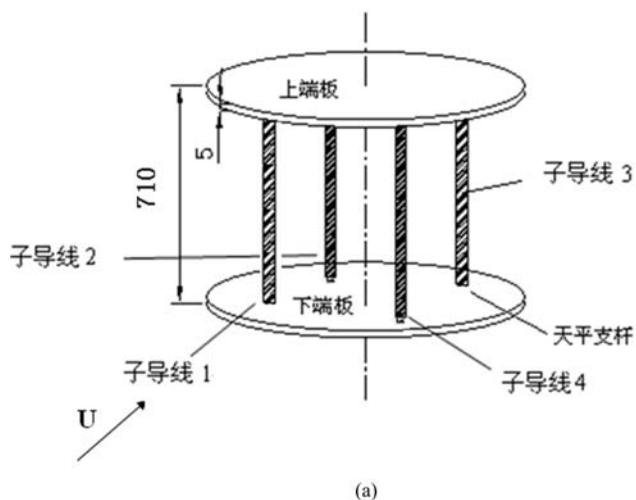


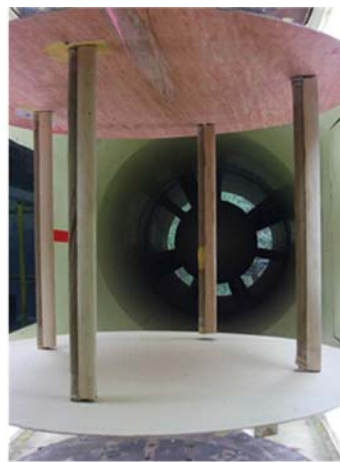
图 5 导线测力试验模型支撑装置

Fig. 5 Support device for test conductor model

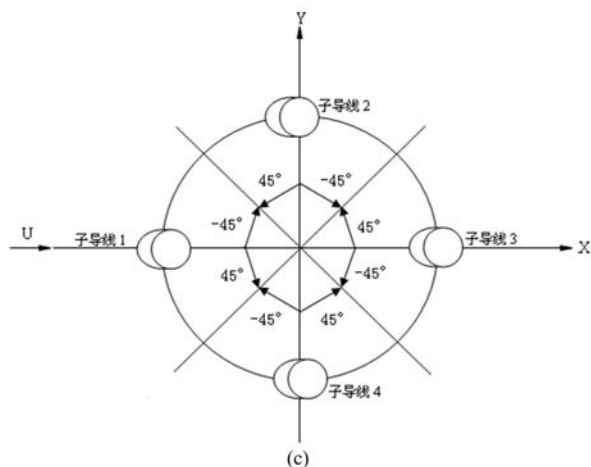
裂导线测力装置中间是四根导线模型,四根导线模型分布情况与文献[14,15]中的静态四分裂导线测力装置相同。安装天平的导线模型下端与下端板之间留有约 5mm 的缝隙,其余 3 根导线模型两端与上、下端板固接。为减轻重量,将下端板更换为轻质层板制作的圆形端板。动态四分裂导线测力装置子导线布置图见图 6(a),动态导线测力试验装置见图 6(b),动态四分裂导线测力装置子导线布置见图 6(c)。动态试验专用驱动机构由伺服电机和减速器构成,放置于四分裂导线节段模型支撑装置底座中,与转轴轴承固连。动态试验时,驱动模型扭振(往复扭转简谐运动)。



(a)



(b)



(c)

图 6 动态四分裂导线测力装置导线布置图:(a)导线安装示意图;(b)动态测力试验装置;(c)二维平面图

Fig. 6 Support device for test conductor model: (a) Schematic diagram of installation;

(b) Cross-section of sub-conductors; (c) Cross-section of sub-conductors

2 动态空气动力系数

动态试验时,专用驱动机构驱动导线测力试验模型扭振, f 取值为 0.1 Hz、0.2 Hz 和 0.33 Hz,模型相对于中心的转动角为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 。覆冰导线动态空气动力特性风洞试验测得的空气动力参数包括阻

力系数(C_D)、升力系数(C_L)和扭矩系数(C_M)。这些无量纲的空气动力参数定义如下:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U_z^2 L d}, \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U_z^2 L d}, \quad C_M = \frac{F_M}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U_z^2 L d} \quad (1)$$

式中, F_D 、 F_L 和 F_M 分别代表导线试验模型在风荷载作用下所受的阻力、升力和扭矩; U_z (取 10m/s、12m/s、14m/s 和 18m/s) 为风速; ρ_{air} 为试验时室温下的空气密度; L 为导线模型的有效长度(710mm); d 为四分裂导线各个单根子导线模型参考直径(33mm), 坐标系是风轴系。动态试验前测量了模型的动态惯性力, 模型的动态气动力是风洞吹风时天平测量的气动力与模型动态惯性力之差。由于导线测力试验模型垂直于气流的截面宽度, 即迎风面积较小, 所以风洞阻塞度很小, 数据将不进行阻塞修正。

3 覆冰四分裂导线动态气动特性分析

3.1 不同编号子导线系数

图 7 所示为新月形覆冰四分裂导线不同子导线的动态气动系数特性曲线。子导线 1 动态阻力系数 C_D 曲线呈现中间低、两头高的近似抛物线形状回线, 极值点在风向角 0° 附近, 动态升力系数 C_L 和动态扭矩系数 C_M 曲线呈现 S 状回线。子导线 2 的 C_D 曲线呈现波浪形, 但在风向角 -45° 附近, C_D 值受尾流影响发生突降, 在风向角 -35° 附近有一个局部极大值, C_L 、 C_M 曲线呈现 S 状回线。子导线 3 的 C_D 曲线呈现光滑的 M 形, C_D 极小值在风向角 0° 附近, 受上游子导线尾流的影响, C_D 值在风向角 -45° 、 45° 附近发生突降, 在 -35° 、 35° 附近各有一个局部极大值, C_L 、 C_M 曲线呈现 S 状回线。由图 7(a) 可以看出, 子导线 4 的 C_D 曲线呈躺倒的 S 形状, 和子导线 0 的 C_D 曲线的波浪形状刚好相反, 子导线 4 的极大值(凸起的峰)在右侧, 而子导线 2 的极大值(凸起的峰)在左侧。子导线 4 的尾流影响发生在风向角 45° 附近, C_D 值在 45° 附近发生突降, 在风向角 35° 附近有一个局部极大值, C_L 、 C_M 曲线呈现 S 状回线。

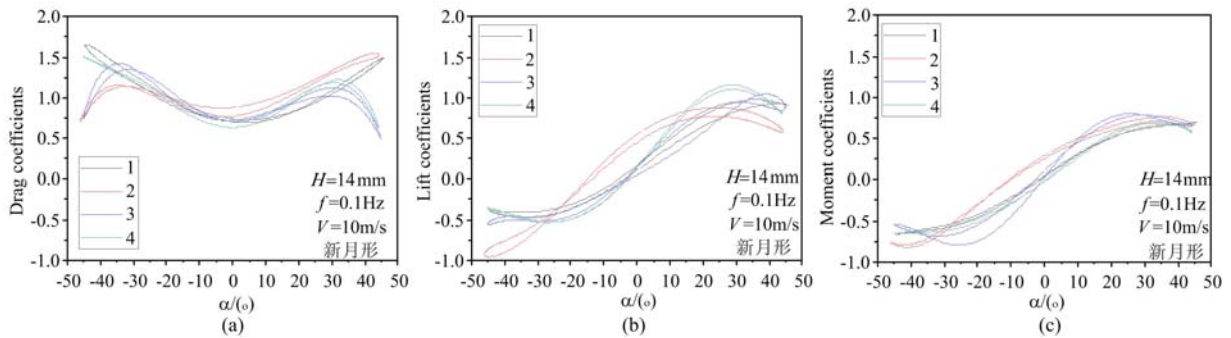


图 7 不同子导线动态气动系数:(a)阻力系数;(b)升力系数;(c)扭矩系数

Fig. 7 The dynamic aerodynamic coefficients of each iced sub-conductors:

(a) drag coefficients; (b) lift coefficients; (c) moment coefficients

3.2 不同风速对动态气动特性的影响

图 8 给出了不同风速下(10m/s、12m/s、14m/s 和 18m/s), 新月形覆冰子导线 1 的动态气动特性(覆冰厚度 $H=14\text{mm}$, 扭振频率 $f=0.1\text{Hz}$)。阻力系数 C_D 曲线呈现中间低、两头高的近似抛物线形状回线, 底点在风向角 0° 附近。同时可以看出, C_D 值随风速的增加而略有减小(见图 8(a)), C_L 值变化很小(见图 8(b)), C_M 值基本不变(见图 8(c))。其中, C_D 曲线在风攻角两端(-45° 和 45°)达到极值。在 10m/s 风速时 C_D 峰值最大, 18m/s 风速时 C_D 峰值最小。曲线在 -35° 和 35° 附近处各有一尖峰(负角度峰向下)。

在风洞试验测试中, 雷诺数(Re)是一个重要的流量特征参数。升力和力矩系数表现出强烈的变化过渡。

$$Re = \frac{\rho U L_0}{\mu} = \frac{U L_0}{\nu} \quad (2)$$

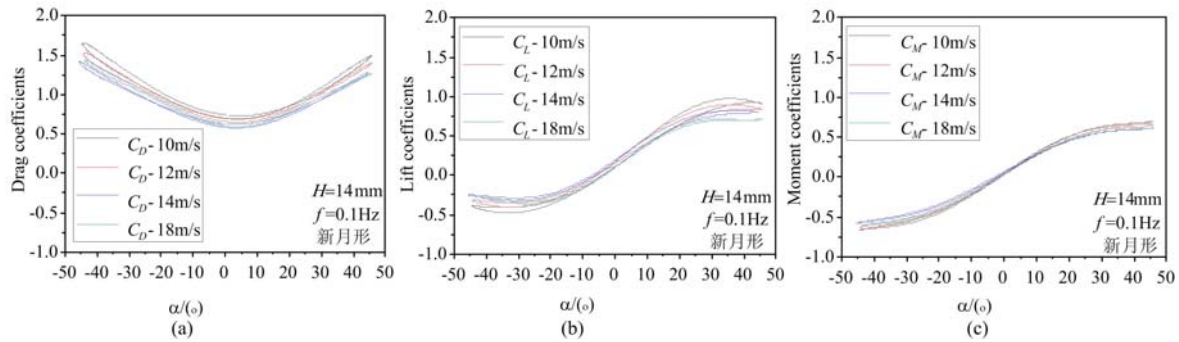


图 8 不同风速下新月形覆冰子导线 1 动态气动系数:(a)阻力系数;(b)升力系数;(c)扭矩系数

Fig. 8 The dynamic aerodynamic coefficients of crescent shape iced sub-conductor 1 under different wind velocities:
(a) drag coefficients; (b) lift coefficients; (c) moment coefficients

式中, μ 是指空气粘度; $\nu = \rho/\mu$ 是空气的运动粘度。 L_0 是一个简化条件下的导线直径和覆冰厚度之和。在这里, 空气运动粘度为 1.7894×10^{-5} 。本次试验的风速范围从 10 m/s 到 18 m/s, 对应的雷诺数量级为 2.0×10^4 到 5.0×10^4 这个范围。结果表明, 在 Re 为 (10^4) 量级范围内, 空气动力系数的变化与 Re 变化无关。

3.3 不同扭振频率对动态气动特性的影响

图 9 所示为新月形覆冰四分裂导线的子导线 1 在不同扭振频率下的动态气动系数曲线和文献[14, 15]中所获得的静态气动系数曲线。由图 9 可见, 频率越高, 升力、扭矩动态曲线包络线越大, 阻力曲线变化相对较小。对比新月形覆冰四分裂导线动、静态气动特性曲线发现, 新月形覆冰单导线动、静态气动特性比较曲线规律相似, 但由于存在扭转频率, 动态曲线为包络线形式, 而静态曲线则为变化单根曲线。同时, 升力和扭矩静态曲线处于动态曲线的包络范围内, 但动态阻力系数则低于静态阻力系数。

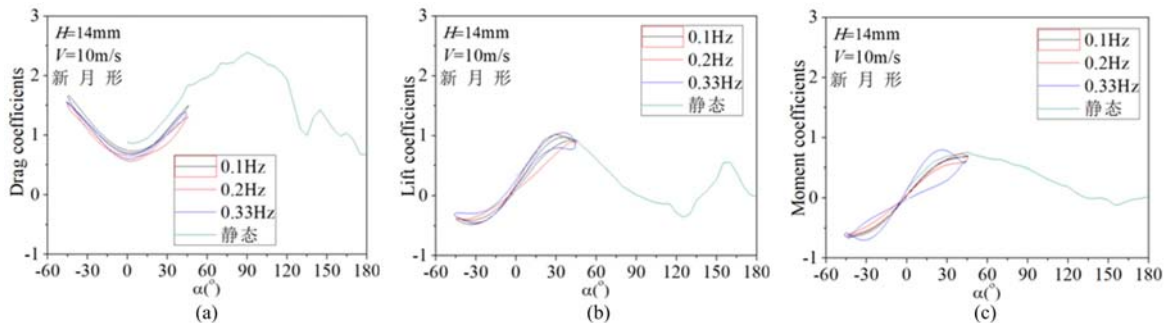


图 9 不同频率下新月形覆冰子导线 1 动态气动系数:(a)阻力系数;(b)升力系数;(c)扭矩系数

Fig. 9 The dynamic aerodynamic coefficients of crescent shape iced sub-conductor 1 under different frequencies:
(a) drag coefficients; (b) lift coefficients; (c) moment coefficients

3.4 不同冰厚对动态气动特性的影响

为了研究冰厚对动态气动特性的影响, 测量并分析了新月形覆冰四分裂导线 (14mm、24mm 和 33mm) 子导线 1 的动态气动系数。图 10 所示为具有不同冰层厚度的子导线 1 的动态空气动力系数。在风攻角 ($45^\circ \sim 45^\circ$) 下, 图 10(a) 显示了具有不同冰厚 (14mm、24mm 和 33 mm) 的新月形覆冰子导体 1 的动态阻力系数。当冰层厚度增加到较厚的冰层厚度 (24mm 或 33mm) 时, 子导体 1 的动态阻力系数在风攻角 0° 处突然下降, 这主要是因为导线的轮廓在迎风角 0° 附近随来流而突然变化, 即风攻角 0° 是临界角。同时可以看出, 在风攻角 ($-45^\circ \sim 45^\circ$) 下, 迎风侧子导体 1 的动态阻力系数基本对称。同时, 当风攻角在 $45^\circ \sim 15^\circ$ 和 $15^\circ \sim 45^\circ$ 附近时, 子导体 1 的动态阻力系数随冰厚的增加而减小。

图 10(b) 显示了具有不同冰厚的新月形覆冰子导体 1 的动态升力系数。新月形覆冰子导体 1 的动

态升力系数在迎风角($-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$)范围下随冰层厚度的增加而增加,特别是在 $\pm 20^{\circ}$ 的风攻角附近。造成这种现象的原因是随着覆冰厚度的增加,新月形覆冰导线的动态升力系数迅速增加。在风攻角($-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$)下,新月形覆冰导线的动态扭矩系数迅速增加,冰厚对新月形覆冰子导体1的动态扭矩系数同样有很大影响(图10(c))。

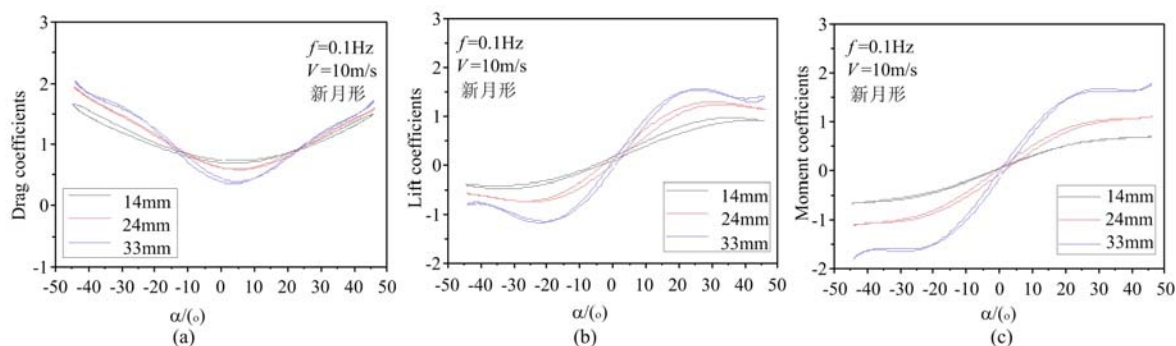


图10 不同冰厚下新月形覆冰子导体1动态气动系数:(a)阻力系数;(b)升力系数;(c)扭矩系数

Fig. 10 The dynamic aerodynamic coefficients of crescent shape iced sub-conductor 1 under different frequencies:

(a) drag coefficients; (b) lift coefficients; (c) moment coefficients

4 结论

在本研究中,我们利用风洞试验来获得覆冰四分裂导线的动态空气动力系数,并详细研究了几种关键参数对不同风攻角下覆冰四分裂导线动态气动特性的影响。根据试验结果,可以得出以下结论:

(1) 由于周围流场的干扰,各子导体的动态气动特性存在明显的差异。尾流对覆冰四分裂导线的动态阻力系数有明显的影 响,但对动态升力系数和扭矩系数的影响较小。

(2) 与静态空气动力系数不同,覆冰分裂导线的动态系数的曲线呈环形。动态阻力系数则低于静态阻力系数。

(3) 在给定的风速范围内,导线的升力系数和扭矩系数几乎没有影响,阻力系数受影响较小。

(4) 相同条件下,频率对动态气动特性影响较为明显。频率越高,动态曲线包络线越大。覆冰导线静态气动特性曲线基本在动态特性曲线包络范围内。

(5) 随着冰层厚度的增加,在整个风攻角下,覆冰四分裂导线的动态阻力系数、升力系数和扭矩系数均随之增大。

参考文献:

- [1] 刘天翼,刘习军,霍冰,等.连续体覆冰导线模型的舞动实验研究[J].实验力学,2016,31(2):186-192 (LIU Tianyi, LIU Xijun, HUO Bing, et al. Experimental investigation on the galloping of iced transmission lines as a continuum[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(2):186-192 (in Chinese))
- [2] 蔡萌琦,严波,吕欣,等.覆冰四分裂导线空气动力系数数值模拟[J].振动与冲击,2013,32(5):132-137 (CAI Mengqi, YAN Bo, LÜ Xin, et al. Numerical simulation investigation on wake galloping of quad bundle conductor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5):132-137 (in Chinese))
- [3] 朱宽军,刘彬,刘超群,等.特高压输电线路防舞动研究[J].中国电机工程学报,2007,33(11):12-20 (ZHU Kuanjun, LIU Bin, LIU Chaoqun, et al. Research on anti-galloping for UHV Transmission Line[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 33(11):12-20 (in Chinese))
- [4] Den Hartog J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1932, 51(4):1074-1076.
- [5] Nigol O, Clarke G J, Havard D G. Torsional stability of bundle conductors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5):1666-1674.
- [6] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping part I: Den-Hartog mechanism[J]. IEEE Transactions on Power

- Apparatus and Systems, 1981, 100(2):699—707.
- [7] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping part II: torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2):708—720.
- [8] Chabart O, Lilien J L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76:967—976.
- [9] 李万平, 黄河, 何锴. 特大覆冰导线气动力特性测试[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(8):84—86 (LI Wanping, HUANG He, HE Zeng. Aerodynamic characteristics of heavily iced conductors[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2001, 29(8):84—86 (in Chinese))
- [10] 李万平, 杨新祥, 张立志. 覆冰导线群的静气动力特性[J]. 空气动力学学报, 1995, 13(4):427—433 (LI Wanping, YANG Xinxiang, ZHANG Lizhi. Static aerodynamic characteristics of iced bundle conductor[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1995, 13(4):427—434 (in Chinese))
- [11] 顾明, 马文勇, 全涌, 等. 两种典型覆冰导线气动力特性及稳定性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(10):1328—1332 (GU Ming, MA Wenyong, QUAN Yong, et al. Aerodynamic force characteristics and stabilities of two typical iced conductors[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(10):1328—1332 (in Chinese))
- [12] 马文勇, 顾明, 全涌, 等. 准椭圆形覆冰导线气动力特性试验研究[J]. 同济大学学报, 2010, 38(10):1409—1413 (MA Wenyong, GU ming, QUAN Yong, et al. Aerodynamic force characteristics and stabilities of two typical iced conductors [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(10):1409—1413 (in Chinese))
- [13] 王昕, 楼文娟, 沈国辉, 等. 覆冰导线气动力特性风洞试验研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5):573—579 (WANG Xin, LOU Wenjuan, SHEN Guohui, et al. A wind tunnel study on aerodynamic characteristics of iced conductor[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(5):573—579 (in Chinese))
- [14] 张宏雁, 严波, 周松, 等. 覆冰四分裂导线静态气动力特性试验[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(2):150—154 (ZHANG Hongyan, YAN Bo, ZHOU Song, et al. Static test on aerodynamic characteristics of iced quad bundled conductors[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(2):150—154 (in Chinese))
- [15] Hu J, Yan B, Zhou S, et al. Numerical simulation on galloping of iced quad bundle conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2):784—792.
- [16] 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):91—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):91—94 (in Chinese))
- [17] 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, 4(10):1106—1112 (XIE Qiang, SUN Qigang, GUAN Zheng. Wind tunnel test on global drag coefficients of multi-bundle conductors[J]. Power System Technology, 2013, 4(10):1106—1112 (in Chinese))
- [18] 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, 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, 19:149—156 (in Chinese))
- [19] 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, 10:6—11 (SUN Qigang, XIE Qiang. Wind tunnel test on shielding effect of serial 2-bundled conductors[J]. Electric Power Construction, 2013, 10:6—11 (in Chinese))
- [20] 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, 6:787—792 (LOU Wenjuan, LI Tianhao, LÜ Zhongbin, et al. Wind tunnel test on aerodynamic coefficients of multi-bundled sub-conductors[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 6:787—792 (in Chinese))
- [21] Zhou L, Yan B, Zhang L, et al. Study on galloping behavior of iced eight bundle conductor transmission lines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 362:85—110.
- [22] Wu C, Yan B, Huang G Z, et al. Wake-induced oscillation behavior of twin bundle conductor transmission lines [J]. Royal Society Open Science, 2018, 5(6):1—23.
- [23] 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):414—420 (LI Wanping. Dynamic

aerodynamic characteristics of bundle conductors[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2000, 18(4): 414—420 (in Chinese))

- [24] 杨秀萍, 张喆, 郝淑英. 覆冰四分裂导线动态气动特性分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(4): 621—626 (YANG Xiuping, ZHANG Zhe, HAO Shuying. Dynamic aerodynamic characteristics of iced quad bundle conductors[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(4): 621—626 (in Chinese))

Wind tunnel tests on dynamic aerodynamic coefficients of iced quad bundle conductors

CAI Meng-qi¹, ZHOU Lin-shu², YAN Bo³, LIU Xiao-hui⁴, HUANG Han-jie⁵

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2. Sichuan Electric Power Test & Research Inst, Chengdu 610016, China; 3. School of Aeronautics & Astronautics, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 5. China Aerodynamics Research and Development Center, Miangyang 621000, China)

Abstract: The dynamic aerodynamic characteristics of conductors are different from the static aerodynamic characteristics. In this work, we establish a test model of iced quad bundle conductors based on crescent-shaped ice, and measure the dynamic aerodynamic coefficients of the iced quad bundle conductors under torsional vibrations by using a dynamic test device in the wind tunnel. The curves of dynamic aerodynamic coefficients of crescent-shaped iced quad bundled conductors varying with wind attack angles under different wind velocities, torsional vibration frequencies and ice thicknesses are obtained. The results show that different parameters have certain effects on dynamic aerodynamic coefficients, and there are obvious differences between dynamic and static aerodynamic coefficients of the iced quad bundle conductors. The wind tunnel results provide necessary data for the investigations on the oscillation and prevention technique of the iced quad bundle conductors.

Keywords: quad bundle conductors; ice; dynamic aerodynamic coefficients; wind tunnel test