

扭转覆冰对架空导线气动及舞动特性的影响分析

赵珊鹏^{1†}, 张亚辉², 张友鹏¹, 刘源涛¹, 田卓璇¹, 王思华¹, 李红¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 中车洛阳机车有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要:为揭示架空导线在扭转覆冰形态下的气动及舞动特性,首先,搭建扭转覆冰试验平台,获取不同覆冰量下导线的扭转覆冰形态.其次,基于 Fluent 软件的用户自定义函数(user-defined functions, UDF)求解导线的运动控制方程,并利用重叠网格技术动态更新导线位置,实现覆冰导线的三自由度双向流固耦合舞动的数值模拟,通过覆冰导线节段气弹实验验证该仿真方法的合理性.再次,基于准静态假设构建了覆冰导线全风攻角气动仿真模型,分析了不同覆冰量下扭转覆冰与典型覆冰导线的气动特性差异.最后,依据经典舞动机理对扭转覆冰导线的易舞风攻角进行计算,并对比分析了扭转覆冰与典型覆冰导线的舞动特性.结果表明,随着覆冰量的增加,扭转覆冰导线的气动特性变化显著.扭转覆冰导线的舞动同时包含 Den Hartog 和 Nigol 舞动机制,其舞动幅值与覆冰量不呈线性关系.相较于典型覆冰导线,扭转覆冰导线的舞动幅值显著减小,最大降幅达 68.4%.以扭转覆冰为研究对象更能准确地反映自然环境中覆冰导线的舞动特性.

关键词:扭转覆冰;架空导线;流固耦合;气动特性;舞动特性

中图分类号:TM403.3

文献标志码:A

Analysis of Impact of Twisted Ice Accretion on Aerodynamic and Galloping Characteristics of Overhead Conductors

ZHAO Shanpeng^{1†}, ZHANG Yahui², ZHANG Youpeng¹, LIU Yuantao¹,

TIAN Zhuoxuan¹, WANG Sihua¹, LI Hong¹

(1. School of Automatic and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. CRRC Luoyang Locomotive Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: To reveal the aerodynamic and galloping characteristics of overhead conductors under twisted ice accretion, this study first established a twisted ice accretion test platform to obtain the twisted ice accretion forms of conductors under different ice loads. Secondly, the motion control equations of the conductor were solved using user-defined functions (UDF) in the Fluent software, and the position of the conductor was dynamically updated using overset grid technology to achieve a three-degree-of-freedom two-way fluid structure interaction simulation of the

* 收稿日期:2024-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52467017), National Natural Science Foundation of China(52467017); 甘肃省科技计划资助项目(25JRRA174, 25JRRA1075, 23JRRA868), Natural Science Foundation of Gansu Province (25JRRA174, 25JRRA1075, 23JRRA868); 国铁集团系统性重大科技项目(P2024G001), Systematic Major Scientific and Technological Projects of China Railway(P2024G001)

作者简介:赵珊鹏(1983—),男,吉林敦化人,兰州交通大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: zsp@mail.lzjtu.cn

iced conductor's galloping. The rationality of this simulation method was verified through aeroelastic tests of iced conductor segments. Furthermore, based on a quasi-static assumption, a full-angle-of-attack aerodynamic simulation model for iced conductors was constructed to analyze the differences in aerodynamic characteristics between twisted ice accretion and typical iced conductors under different ice loads. Finally, the susceptibility of twisted iced conductors to galloping was calculated based on classic galloping mechanisms, and a comparative analysis of the galloping characteristics between twisted and typical iced conductors was conducted. The results indicate that the aerodynamic characteristics of twisted iced conductors change significantly with increasing ice load. The galloping of twisted iced conductors involves both Den Hartog and Nigol mechanisms, and the galloping amplitude does not show a linear relationship with the ice load. Compared with typical iced conductors, the galloping amplitude of twisted iced conductors is significantly reduced, with a maximum reduction of up to 68.4%. Therefore, focusing on twisted ice accretion can more accurately reflect the galloping characteristics of iced conductors in natural environments.

Key words: twisted ice accretion; overhead conductor; fluid structure interaction; aerodynamic characteristics; galloping characteristics

电力系统作为现代社会经济的中枢神经,对于维持经济的持续增长、推动工业的高速发展以及提升民众的生活质量发挥着不可或缺的作用^[1-2]。架空输电线路是电力输送的主要形式,长期架设在户外环境中容易受到覆冰、大风等极端气候的影响。当输电线路覆冰后,其截面形态发生变化,导致气动特性也随之改变,在风激励下,导线容易产生一种低频、大振幅的自激振动,即“舞动”^[3]。这一现象会导致线路相间短路,金具及导线损坏,甚至造成倒塔、断线等,进而引发大规模停电^[4]。为了预防导线舞动引发的故障和危害,必须准确掌握输电线路的舞动特性。因此,揭示真实覆冰形态下导线的舞动特性,以针对性开展输电线路舞动防治工作,对提升电力系统的稳定性具有重要的现实意义。

随着世界电力工业的迅猛发展,架空导线的覆冰舞动问题日益严重,众多国家投入大量资源进行深入研究。目前,学术界广泛认同垂直激发、扭转激发和偏心惯性耦合激发三大舞动机理。Den Hartog^[5-6]基于准稳态空气动力学理论提出了覆冰导线单自由度舞动的垂直激发机理。Nigol等^[7-8]通过风洞试验得出导线的扭转自振频率和垂直自振频率接近时,将激发导线的垂直大幅舞动,提出了扭转激发机理。Yu等^[9]根据覆冰导线在舞动时多种振动模式的相互作用,提出了偏心惯性耦合激发机理。大批学者通过理论计算、数值模拟和风洞试验等方法对导线舞动机理进行了进一步探索。温作鹏等^[10]针对具有

离散自振频率的三自由度系统,推导了特征值实部修正解,提出一种考虑导线舞动稳定性和惯性质量的防舞机理。向玲等^[11]通过风洞试验,测试了覆冰分裂导线气动参数,并分析了风攻角对导线舞动特性的影响。冯文斌等^[12]建立了覆冰导线的舞动模型及方程,利用有限元软件分析了覆冰导线的静态、动态气动系数以及连续档导线的舞动响应。Matsumiya等^[13]研究了分裂导线的垂直、水平和扭转舞动响应,发现覆冰导线舞动主要由特定风攻角区间的高负升力系数引起。耦合振动分析揭示了水平和扭转运动对垂直振动的影响,其中水平振幅的增加和相位差的变化可能导致垂直振幅显著增大。张志劲等^[14]运用计算流体力学技术,研究了6种典型冰形下导线的气动阻力系数,并探讨了冰形、扭转角度及覆冰类型对风荷载的作用规律,揭示了气动阻力系数随冰厚和风速变化的特性。楼文娟等^[15]设计了一种风洞内支架式三自由度导线节段的气弹模型,利用单目测试技术,记录了导线在均匀风场中的三维运动响应。将通过非线性方法计算得到的舞动响应与试验数据进行了比较,验证了模型的合理性。尽管国内外众多学者已经开展了大量研究工作,但现有的研究大多是基于典型覆冰形态,研究不同覆冰量下导线的气动和舞动特性。

自然环境中覆冰主要出现在导线迎风侧,覆冰造成的扭转力矩会使导线发生扭转覆冰现象,进而导致覆冰形态不断变化。近年来,随着理论研究、试

验方法与数值模拟技术的不断创新,众多学者对输电线路的覆冰模型有了更准确的发现.苑吉河等^[16]通过观察实际线路发现,在靠近杆塔区域导线覆冰形态倾向于翼型,而在远离杆塔区域则呈现椭圆形或圆筒状.蒋兴良等^[17]针对电力系统中导线覆冰扭转现象,提出了包含扭转因素的数学模型,并通过C语言编写仿真程序,实现了覆冰增长的动态数值模拟,发现覆冰扭转角度受到杆塔间距、档距、风速和水滴直径等因素影响.韩兴波等^[18]构建了包含覆冰增长与导线扭转相互作用的动态数值模型,证实了覆冰过程中扭转角度的分布特征及其对覆冰形态的影响,显示出导线端部与中心的覆冰形态存在显著差异.可见随着观测技术的进步以及仿真模拟精度的提升,众多学者发现架空导线的覆冰过程存在扭转覆冰现象,而覆冰形态的变化将影响导线的气动和舞动特性^[19-20],因此,以典型覆冰导线为研究对象所得结论可能出现较大误差.虽然相关学者们对扭转覆冰的形成和发展进行了深入的探索,但尚未进一步研究扭转覆冰增长过程对导线舞动的影响.因此,通过深入研究扭转覆冰增长过程中输电线路舞动规律,准确掌握输电线路的舞动特性,对于输电线路舞动防治和安全运行至关重要.

本文以扭转覆冰导线为研究对象,基于空气动力学理论,建立了覆冰导线舞动响应的分析模型,结合C语言编程和高精度Runge-Kutta法,通过用户自定义函数(UDF)求解导线的运动控制方程.并利用重叠网格技术实现了导线位置与网格的动态更新,从而模拟弹性支撑覆冰导线的三自由度双向流固耦合舞动.对比扭转覆冰与典型覆冰导线在气动特性和舞动响应上的差异,总结扭转覆冰影响下架空导线的舞动规律.本研究可为探明扭转覆冰形态下的架空导线舞动机制提供重要的理论支撑.

1 导线扭转覆冰试验

1.1 导线覆冰形态

自然覆冰环境下,导线表面容易形成多种覆冰形态.根据覆冰形成的气象条件和物理性质,覆冰可以分为雨淞、混合淞、雾淞和积雪等多种形式^[19].我国输电线路出现雨淞覆冰现象的地域分布广泛,而雨淞覆冰密度大、黏性强,对输电线危害较大.根据大量的气象观测资料以及试验结果可以得知,在气温很低、雨量较小、风速适中的气象条件下,导线会形成近似新月形覆冰;而在气温较低、雨量较大、风

速较快的时候,导线则会形成近似扇形覆冰.在覆冰较轻的情况下,导线覆冰形态大多为新月形或扇形,其特点是覆冰量较少,且仅在导线迎风表面积冰^[18].根据现场测量结果,新月形覆冰厚度一般不超过40 mm,扇形覆冰厚度大多在0~25 mm^[14].当迎风面覆冰积累到一定厚度后,覆冰逐渐附着整个导线表面,并根据气象条件的不同而逐渐发展成为D形、椭圆形覆冰,其特点是覆冰包裹整个导线截面,覆冰量通常较大^[16].输电线路在自然雨淞覆冰过程大致存在从新月形到扇形再到D形的冰形变化过程.图1展示了3种典型覆冰形态下的导线截面模型.新月形覆冰,覆冰集中在导线迎风侧;扇形覆冰,覆冰面积更大,分布更加均匀;D形覆冰,导线截面几乎被覆冰完全包裹.

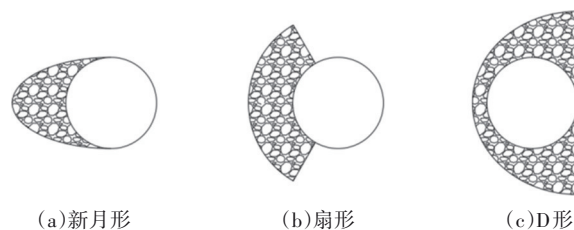


图1 典型覆冰导线截面模型

Fig.1 Cross-sectional model of typical iced conductors

现有研究多根据观测数据,将导线覆冰划分为对应的典型覆冰形态,并以此为基础研究不同覆冰量下导线的气动和舞动特性.然而覆冰造成的扭转力矩会使导线发生扭转覆冰现象,进而导致覆冰形态不断变化,覆冰形态的变化也将影响架空线路的气动和舞动特性.

过冷却水是指温度低于0℃但仍保持液态的水,其处于亚稳定状态,在风力作用下过冷却水与导线表面接触,会在冰核条件下释放潜热,凝结形成覆冰^[21].通常情况下,覆冰现象首先在导线迎风面出现,当覆冰厚度积累到一定程度时,重力作用会导致导线扭转,最终形成椭圆形或圆形覆冰^[22].导线覆冰过程示意图如图2所示.

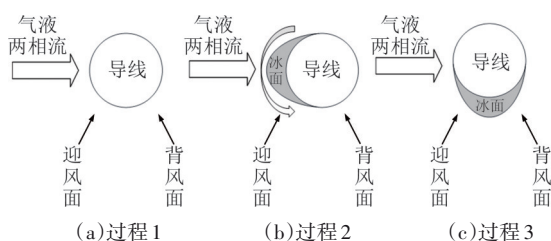


图2 导线覆冰过程示意图

Fig.2 Diagram of the icing process on conductors

1.2 覆冰试验平台

为得到合理的扭转覆冰导线截面形态,本文搭建了人工覆冰试验平台,如图3所示.该平台基于闭口回流式低速风洞设计,主要由稳定段、收缩段、试验段、扩压段、风机段和回路段组成,具备温度调节、风速控制和水雾喷淋功能,可在低温($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)高湿环境下模拟导线覆冰工况.

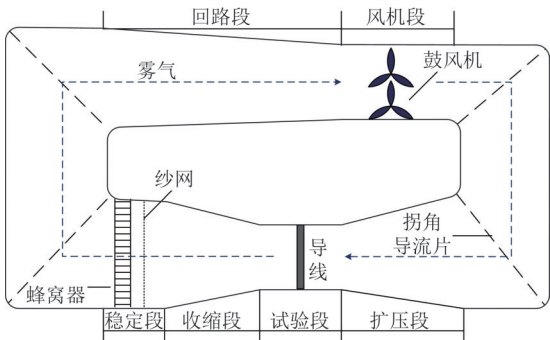


图3 人工覆冰试验平台示意图

Fig.3 Schematic diagram of artificial icing test platform

选择 LGJ-300/25 型单导线,人工覆冰试验的环境及导线参数均设置成与文献[18]相同的条件,定制扭转弹簧模拟架空导线跨中位置的抗扭刚度($106.3\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{rad}$),进行导线扭转覆冰模拟,人工覆冰试验参数如表1所示.

表1 人工覆冰试验参数

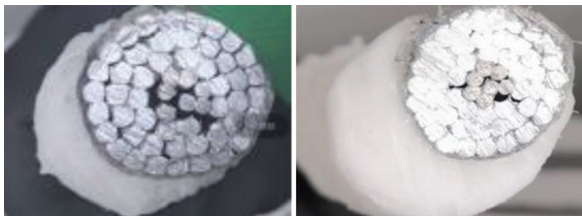
Tab.1 Parameters of artificial icing test

温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	液态水质量浓度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	等效扭转刚度/ $(\text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{rad}^{-1})$
-3	10	0.8	1.387

1.3 覆冰试验结果

随着水在导线表面的逐渐凝结,导线发生偏心扭转,人工覆冰试验过程中导线扭转覆冰初期及末期的形态如图4所示.

使用纸板描边法持续记录导线截面冰形,如图5



(a)覆冰初期 (b)覆冰末期

图4 人工覆冰试验中导线扭转覆冰形态

Fig.4 Torsional icing formation on conductor of artificial icing test

所示.将本文人工覆冰试验中不同时间的冰形、覆冰量,与文献[18]试验结果进行重合度对比,结果分别如图6和图7所示.两者扭转覆冰截面相似度超过90%,覆冰量曲线趋势基本一致,证明了本文人工覆冰试验结果的正确性.



图5 纸板描边法

Fig.5 Cardboard outlining method

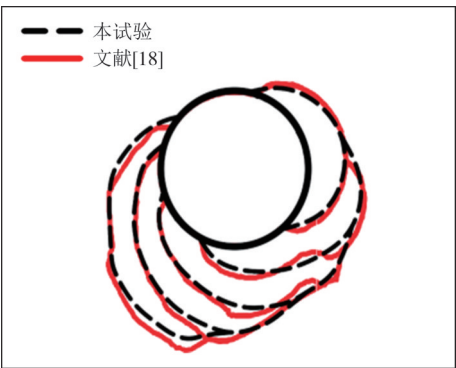


图6 覆冰导线形态对比

Fig.6 Comparison of iced conductor formations

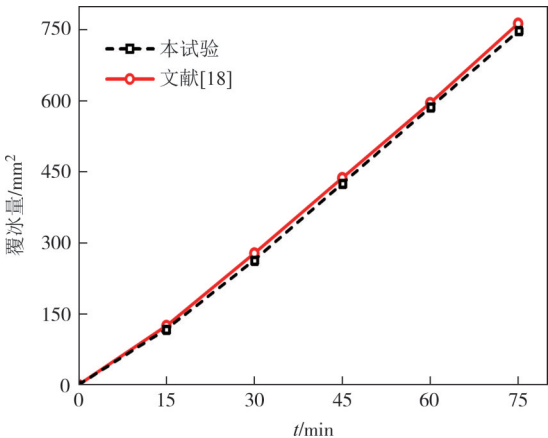


图7 覆冰试验与文献[18]结果对比

Fig.7 Comparison of icing test and literature[18] results

在人工覆冰试验中,不同的覆冰量对应导线不同的扭转覆冰形态,选取5种不同覆冰量(120 mm^2 、 260 mm^2 、 420 mm^2 、 590 mm^2 、 750 mm^2)下扭转覆冰导

线截面形态,如图 8 所示.随着覆冰量的增加,导线截面形态近似从新月形转变为扇形,进而转变为 D 形.

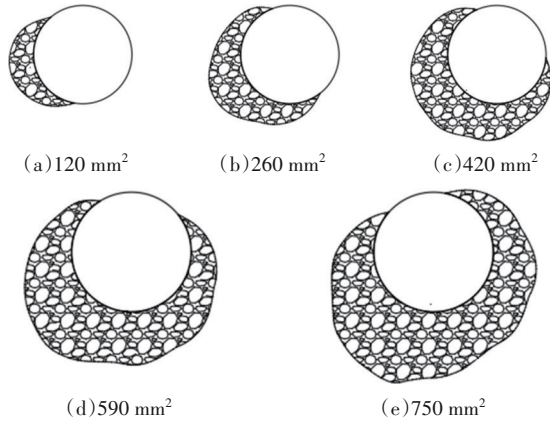


图 8 5 种不同覆冰量下扭转覆冰导线截面形态

Fig.8 Cross-sectional formation of torsional icing conductors under five different levels of icing accretion

2 覆冰导线流固耦合计算模型及气弹实验

2.1 覆冰导线运动方程与受力分析

对覆冰导线进行受力分析,结果如图 9 所示.当流体流过非圆截面的覆冰导线表面时,覆冰导线会受到顺流向的气动阻力 F_D 、垂直于流向的气动升力 F_L 和绕导线截面中心扭转方向的扭矩 F_M .

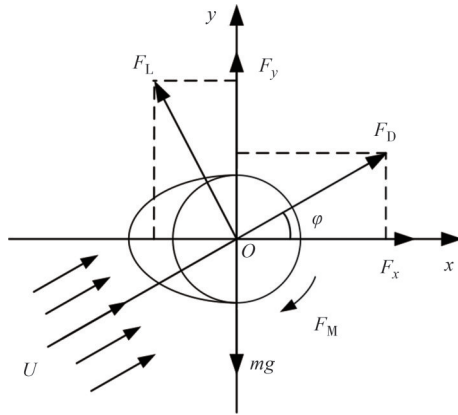


图 9 覆冰导线受力分析图

Fig.9 Force analysis diagram of iced conductor

覆冰导线气动力与气动系数的关系为:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f U^2 D \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_f U^2 D \quad (2)$$

$$F_M = \frac{1}{2} C_M \rho_f U^2 D^2 \quad (3)$$

式中: C_D 、 C_L 和 C_M 分别为单位长度覆冰导线所受到阻力系数、升力系数和扭矩系数; ρ_f 为空气密度; U 为流体的流速; D 为覆冰导线的等效直径.

垂向、水平、扭转三个方向单位长度的风荷载分别为:

$$F_x = F_D \cos \varphi - F_L \sin \varphi \quad (4)$$

$$F_y = F_D \sin \varphi + F_L \cos \varphi \quad (5)$$

$$F_\theta = F_M \quad (6)$$

式中: φ 为初始风攻角; F_x 为导线气动力在水平方向的分量; F_y 为导线气动力在垂直方向的分量; F_θ 为导线气动力绕导线截面中心的力矩.

导线覆冰状态下发生的舞动为流固耦合运动,分析水平-垂直-扭转三自由度下覆冰导线的流固耦合舞动响应.图 10 为三自由度覆冰导线振动系统示意图.根据牛顿第二定律,三自由度弹性支撑的导线运动控制方程为:

$$\ddot{x} + 2\zeta_{x0}\omega_{x0}\dot{x} + \omega_{x0}^2 x = F_x(t)/m \quad (7)$$

$$\ddot{y} + 2\zeta_{y0}\omega_{y0}\dot{y} + \omega_{y0}^2 y = F_y(t)/m \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} + 2\zeta_{\theta0}\omega_{\theta0}\dot{\theta} + \omega_{\theta0}^2 \theta = F_\theta(t)/I_p \quad (9)$$

式中: x 、 y 、 θ 分别为导线水平、垂直和扭转方向的位移和角度; m 为单位长度导线的质量; I_p 为导线的扭转惯量; $\omega_{x0} = \sqrt{k_{x0}/m}$ 、 $\omega_{y0} = \sqrt{k_{y0}/m}$ 、 $\omega_{\theta0} = \sqrt{k_{\theta0}/m}$ 分别为导线水平、垂直和扭转方向的角频率,是固有频率 f_{x0} 、 f_{y0} 、 $f_{\theta0}$ 的 2π 倍; 阻尼比 $\zeta_{x0} = c_{x0}/\sqrt{k_{x0}m}$ 、 $\zeta_{y0} = c_{y0}/\sqrt{k_{y0}m}$ 、 $\zeta_{\theta0} = c_{\theta0}/\sqrt{k_{\theta0}m}$, k_{x0} 、 k_{y0} 和 $k_{\theta0}$ 分别为水平、垂直和扭转方向结构刚度系数.

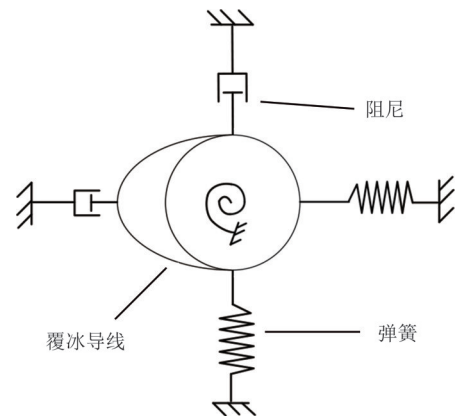


图 10 覆冰导线振动系统示意图

Fig.10 Schematic diagram of iced conductor vibration system

时间从 0 到 t_1 , 覆冰导线垂向总气动做功为:

$$E_T = \int_0^{t_1} (F_y \dot{y} - 2m\zeta_{y0}\omega_{y0}\dot{y}^2) dt \quad (10)$$

式中: $F_y \dot{y}$ 为垂向气动力所做的功; $2m\zeta_0\omega_0\dot{y}^2$ 为垂向结构阻尼导致的能量耗散.

当 $F_y \dot{y} > 0$ 时,垂向气动力 F_y 做正功,促进振动.当 $F_y \dot{y} < 0$ 时,垂向气动力 F_y 做负功,抑制振动.

2.2 流固耦合计算模型

建立覆冰导线舞动流场的计算模型,计算域高度为4 788 mm($200D$, D 为导线直径),宽度为7 182 mm($300D$),为便于观察导线尾流,导线悬挂处距风速出口的距离为4 788 mm($200D$),上下居中, D 为23.94 mm,计算域流场阻塞率小于5%.仿真模型计算域如图11所示.

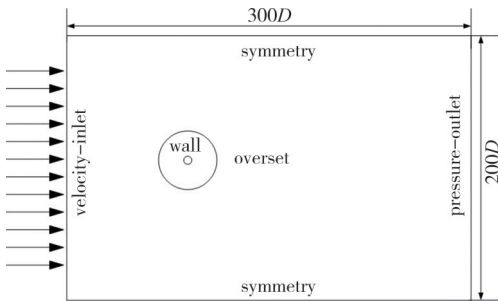


图 11 仿真模型计算域

Fig.11 Simulation model computational domain

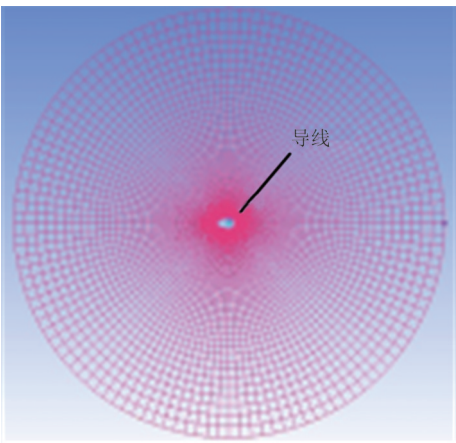
导线舞动过程中会出现明显的水平和垂直位移,故采用重叠网格技术动态更新导线和周围的计算网格的位置.该技术包含静态背景网格和动态组分网格,后者随导线运动而调整,避免了网格畸变.背景网格和组分网格均采用结构化形式,导线表面边界层网格满足 y^+ 值不超过1的条件,计算域网格如图12所示.结构化网格和重叠网格技术的应用,确保了在导线运动过程中网格的稳定性和准确性.

本文选用Fluent软件对覆冰导线进行CFD仿真,模型计算域入口边界设置为速度入口(velocity-inlet),出口边界设置为压力出口(pressure-outlet),相对压力设为0,上下边界均为对称边界(symmetry),导线表面为无滑移壁面(wall),采用SST $k-\omega$ 湍流模型.

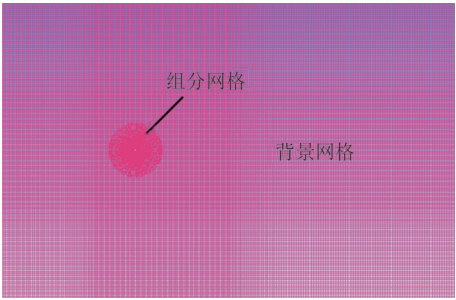
2.3 参数设置

本文架空导线模型参数如表2所示.导线水平与垂直方向的阻尼比设定为0.005,扭转方向的阻尼比设定为0.015.为保证计算精度,分析的时间步长设为0.005 s,计算时长依据覆冰导线振动稳定性调整.

根据预定义的边界条件,仿真计算出覆冰导线表面的压力和速度场分布,将得到的气动力数据整合到导线的动力学方程中,利用数值方法求解导线



(a)导线表面及其周围的组分网格



(b)计算域的重叠网格

图 12 模型计算域网格

Fig.12 Model computational domain grid

表 2 导线模型参数

Tab.2 Conductor model parameters

模型参数	数值	模型参数	数值
跨距 l/m	300	张力 T/N	19 998.0
导线单位质量 $m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	1.058	垂直阻尼比	0.005
弹性模量 E/GPa	65	水平阻尼比	0.005
导线直径 D/m	0.023 76	扭转阻尼比	0.015
截面积 S/mm^2	333.31	扭转刚度 $k/(\text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{rad}^{-1})$	104.22

在各个时间点的位移和速度变化.依据导线的实时位移和速度信息,更新流场的计算网格,以便后续时间步的迭代计算.

鉴于Fluent软件本身不直接支持结构运动响应的模拟,为了实现双向流固耦合仿真分析,借助C语言编写软件提供的用户自定义函数代码,利用Runge-Kutta数值积分方法计算导线结构的动力响应,并结合重叠网格技术调整计算域内的网格,从而实现覆冰导线的流固耦合分析.

2.4 覆冰导线节段气弹实验

为验证本文流固耦合仿真方法的正确性,在风洞装置中,根据导线实际参数设计覆冰导线节段气

弹模型,将 3D 打印的覆冰固定于导线表面,测量实验段中覆冰导线在不同风力作用下的振幅变化,气弹实验模型如图 13 所示.气弹实验系统包括导线节段模型、弹簧系统、风速测量系统及视频监测系统,气弹实验布局如图 14 所示.通过调整垂向、水平、扭转弹簧刚度,模拟覆冰导线三自由度动态特性.视频监测系统通过高速摄像机监测节段模型的位移.

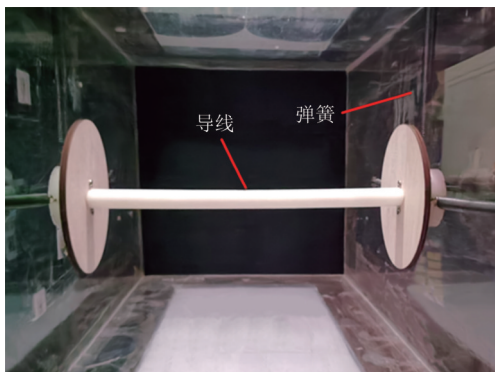


图 13 气弹实验模型

Fig.13 Aeroelastic test model

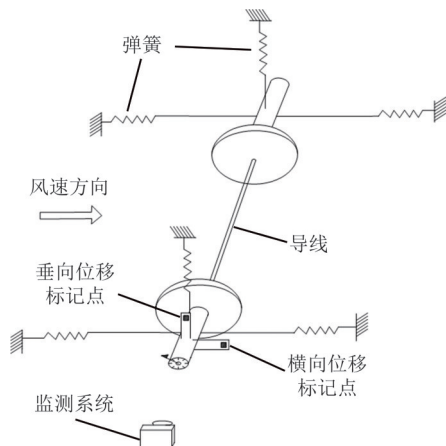


图 14 气弹实验布局

Fig.14 Aeroelastic test layout

在风洞试验中,通过调整风机频率来控制风洞实验段入口风速.利用高精度的风速测量仪,监测并记录实验段的风速数据,判别风速是否稳定于设定值,风速测量系统如图 15 所示.在确保风洞中的气流均匀且稳定后,测量不同风速下 10 mm 厚新月形覆冰导线垂向振幅,气弹实验与仿真结果对比如表 3 所示.鉴于实验设备的气密性等因素,实验与仿真结果误差在允许的误差范围内.据此可以认为风洞实验在一定程度上验证了本文所采用数值模拟方法的准确性,从而为本文的流体动力学仿真研究提供了试验基础.

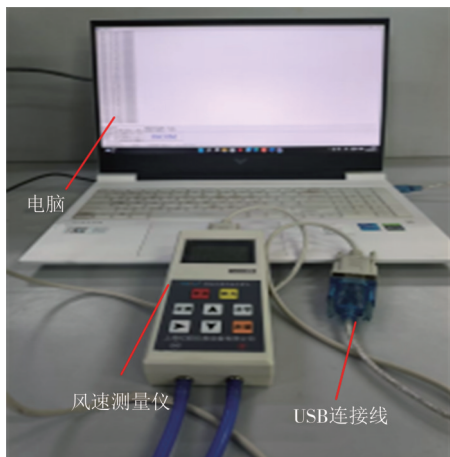


图 15 风速测量系统

Fig.15 Wind speed measurement system

表 3 气弹实验与仿真结果对比

Tab.3 Comparison of aeroelastic test and simulation results

入口风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	导线实验振幅/m	导线仿真振幅/m	误差/%
1.35	0.020	0.022	9.1
5.26	0.265	0.273	2.9
8.52	0.350	0.361	3.0
10.14	0.455	0.476	4.4
12.36	—	0.743	—
14.75	—	1.102	—

注:表中“—”表示舞动超出实验装置监测范围,无法准确监测.

3 扭转覆冰导线气动与舞动特性分析

3.1 气动特性分析

对于典型覆冰导线,新月形、扇形和 D 形覆冰导线的三分力系数差异较为显著,进而影响覆冰导线的气动特性.相同覆冰形态下,覆冰导线的气动特性曲线随覆冰厚度的变化,总体趋势基本一致,气动系数随覆冰厚度呈正相关^[23].

为研究扭转覆冰导线气动特性,分别建立 120 mm^2 、 420 mm^2 和 750 mm^2 覆冰量的扭转覆冰导线模型.由于扭转覆冰模型没有明显的对称性,因此将冰层最厚点与导线中心连线的方向定义为参考 0° 风攻角方向.设置间隔 5° 风攻角为一个工况,根据准静态假设,在 10 m/s 风速下,得到 $0\sim 360^\circ$ 全风攻角下扭转覆冰导线和新月形覆冰导线(覆冰量 120 mm^2)的气动系数,其随风攻角变化情况如图 16 所示.

从图 16(a)可以看出, 120 mm^2 覆冰量扭转覆冰导线在风攻角 75° 附近阻力系数出现最大值,约为 1.054;在 0° 附近出现最小值,约为 0.512. 420 mm^2 覆冰量导线在风攻角 180° 附近阻力系数出现最大值,约

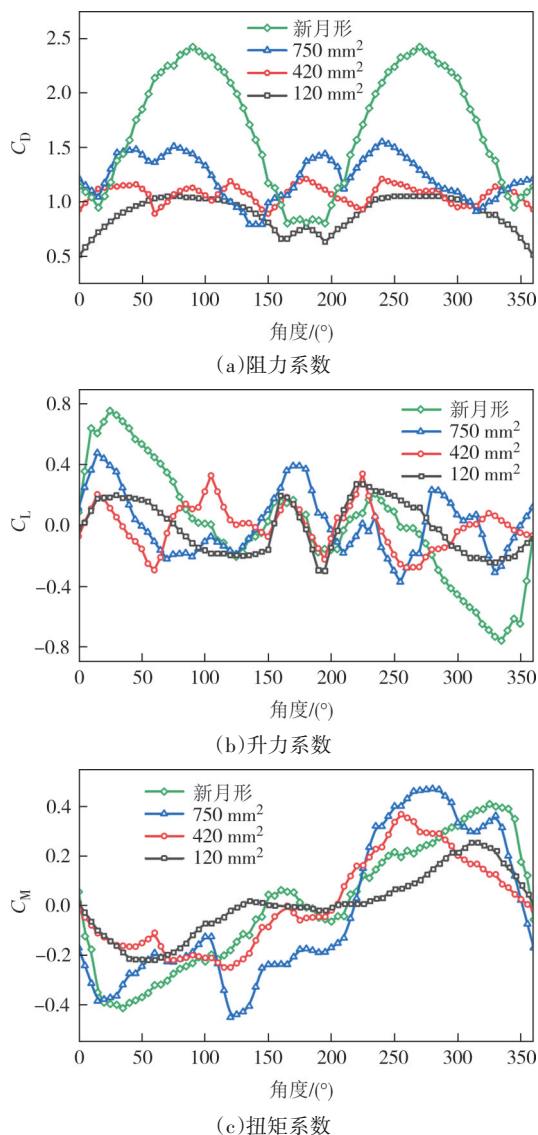


图 16 不同分攻角下扭转覆冰导线气动特性

Fig.16 Aerodynamic characteristics of torsional iced conductors under different wind attack angles

为 1.212; 在 150° 附近出现最小值, 约为 0.888. 750 mm^2 覆冰量导线在风攻角 240° 附近出现最大值, 约为 1.572; 在 135° 附近出现最小值, 约为 0.790. 导线阻力系数总体随着覆冰量的增加而明显增大, 曲线变化趋势差异较大. 扭转覆冰导线的整体阻力系数水平低于新月形导线, 表明扭转覆冰对导线阻力系数影响较大.

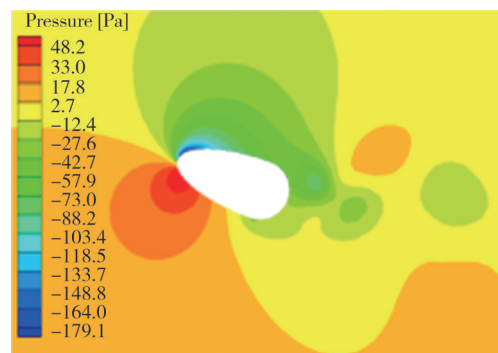
从图 16(b) 可以看出, 120 mm^2 扭转覆冰导线在 225° 附近升力系数出现最大值, 约为 0.3068; 在 195° 附近出现最小值, 约为 -0.323. 420 mm^2 覆冰量导线在 225° 附近出现最大值, 约为 0.378; 在 60° 附近出现最小值, 约为 -0.327. 750 mm^2 覆冰量导线在 15° 附近出现最大值, 约为 0.538; 在 255° 附近出现最小值, 约

为 -0.414. 导线升力系数总体随着覆冰量的增加而小幅增大, 但曲线变化趋势差异显著. 在风攻角小于 70° 时, 扭转覆冰升力系数低于新月形导线; 而在风攻角大于 280° 时, 扭转覆冰导线升力系数高于新月形导线. 表明扭转覆冰对导线升力系数变化规律影响显著.

从图 16(c) 可以看出, 120 mm^2 扭转覆冰导线在 315° 附近出现最大值, 约为 0.254; 在 60° 附近出现最小值, 约为 -0.218. 420 mm^2 扭转覆冰导线在 255° 附近出现最大值, 约为 0.369; 在 120° 附近出现最小值, 约为 -0.249. 750 mm^2 扭转覆冰导线在 280° 附近出现最大值, 约为 0.482; 在 120° 附近出现最小值, 约为 -0.451. 在风攻角低于 220° 时, 扭转覆冰导线扭矩系数总体随着覆冰量的增加而增大; 而在风攻角高于 220° 时, 则增呈相反趋势. 总体上扭转覆冰对导线扭矩系数影响相对较小.

综上所述, 随着覆冰量的增加, 扭转覆冰导线的阻力、升力系数差异较大, 扭矩系数差异相对较小. 这是由于扭转覆冰过程中导线的气动外形持续改变, 导致覆冰导线气动特性随覆冰量的变化出现差异, 相较于扭转覆冰导线模型, 新月形覆冰导线三分力系数曲线呈现出更明显的差异. 这表明仅以扭转覆冰形态分析覆冰量对覆冰导线气动特性的影响是更加合理的.

此外, 导线气动系数用于表征导线受力情况, 导线受到的升力是影响导线舞动的主要因素, 而低速流体计算中导线的受力主要是由导线周围的压力分布差异造成的^[24]. 为探究造成不同冰形导线气动系数差异的原因, 选择不同冰形下升力系数最大值所在角度, 分析其压力分布情况. 以 10 m/s 风速下 420 mm^2 覆冰量为例, 分析不同覆冰形态导线的压力分布, 结果如图 17 所示.



(a) 新月形

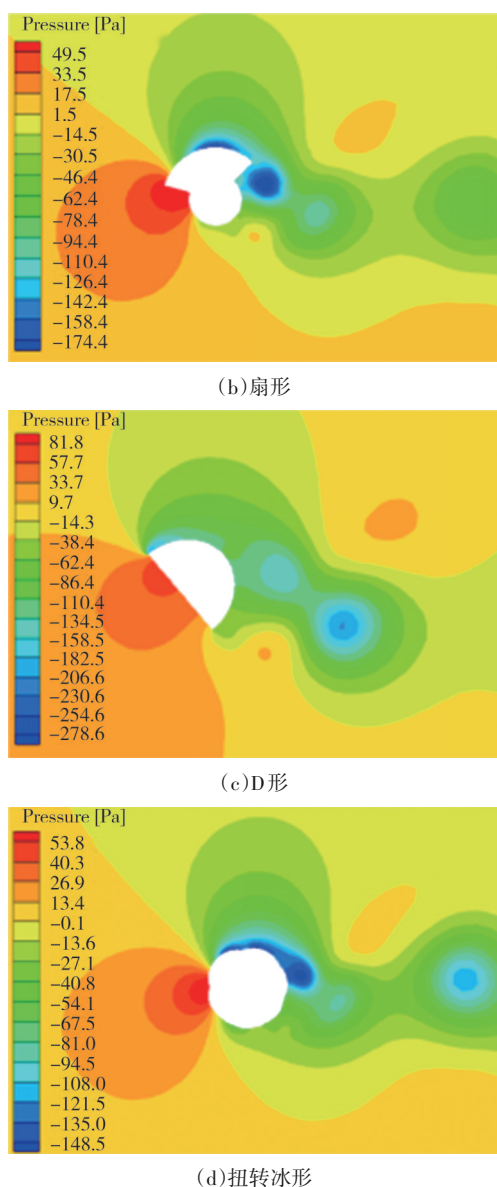


图 17 不同冰形导线的压力分布云图

Fig.17 Pressure distribution cloud diagram for conductors with different ice shapes

新月形和扇形覆冰导线在迎风侧产生较高的正压力,背风侧产生较低的负压力,D形和扭转冰形导线在迎风侧的正压力和背风侧的负压力更加显著. 总体来看,不同冰形导线的压力分布差异明显,显示出覆冰形态对压力分布和气动特性的显著影响. D形导线压差最大,可达 360.4 Pa,扭转冰形的压差最小,约为 202.3 Pa. 这与导线的气动系数差异基本一致. 此外,典型覆冰导线压力最大值和最小值的位置大致呈上下分布,而扭转覆冰导线呈左右分布,这导致了典型覆冰导线的压差在垂向有较大分量,因此所受的升力较大. 扭转覆冰导线的压差在垂向的分

量较小,进一步导致所受的升力较小,这会直接影响导线的舞动特性.

3.2 舞动风攻角分析

根据 Den Hartog 舞动机理, $\partial C_L / \partial \alpha + C_D < 0$ 是导线发生舞动的必要条件,而 C_D 总是大于 0,故导线发生舞动的风攻角对应的升力系数的斜率必定是负值. 根据 Nigol 扭转舞动机理,舞动易发生在扭矩系数的负斜率区. 为研究扭转覆冰舞动规律,根据覆冰导线气动系数曲线求解 Den Hartog 和 Nigol 系数曲线,结果如图 18 所示.

从图 18(a)可以看出,扭转覆冰导线在 120 mm^2

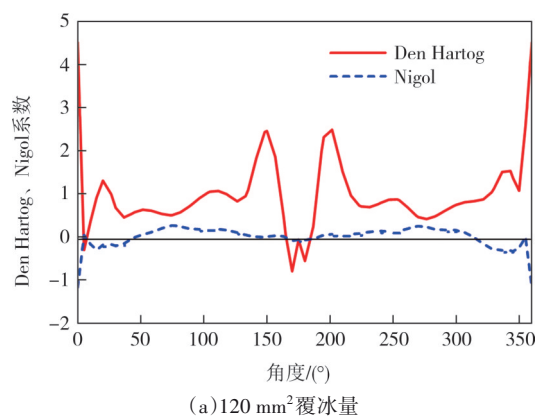
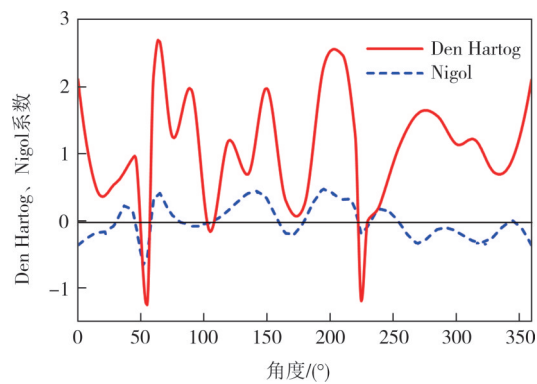
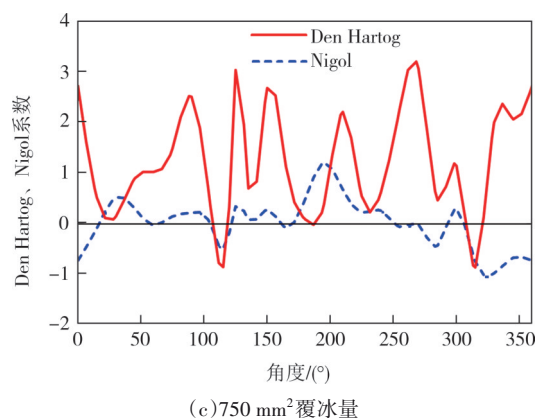
(a) 120 mm^2 覆冰量(b) 420 mm^2 覆冰量(c) 750 mm^2 覆冰量

图 18 Den Hartog 和 Nigol 系数曲线

Fig.18 Den Hartog coefficient and Nigol coefficient curve

覆冰量时,导线的 Den Hartog 系数在风攻角为 10° 附近和 $170^\circ \sim 190^\circ$ 范围内为负数; Nigol 系数在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 、 $170^\circ \sim 190^\circ$ 以及 $320^\circ \sim 360^\circ$ 范围内为负数,在全风攻角范围内较为对称.这是由于在覆冰量较少时,导线扭转角度较小,覆冰冰形与典型的新月形覆冰相似,且冰形具有较高的对称性,因此气动特性也有较好的对称性.

从图 18(b)可以看出,扭转覆冰导线在 420 mm^2 覆冰量时,Den Hartog 系数在风攻角为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 和 $220^\circ \sim 230^\circ$ 范围内为负数; Nigol 系数在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $50^\circ \sim 60^\circ$ 、 $160^\circ \sim 175^\circ$ 、 $220^\circ \sim 230^\circ$ 以及 $260^\circ \sim 360^\circ$ 范围内为负数,在全风攻角范围内整体上对称性较差.这说明随着覆冰量的增加,导线扭转角度增大,导线易发生舞动.随着覆冰量的增加,导线扭转角度增大,导线易发生舞动.随着覆冰量的增加,导线扭转角度增大,导线易发生舞动.

从图 18(c)可以看出,扭转覆冰导线在 750 mm^2 覆冰量时,Den Hartog 系数在风攻角为 $110^\circ \sim 120^\circ$ 和 $320^\circ \sim 330^\circ$ 范围内为负数, Nigol 系数在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 、 $110^\circ \sim 120^\circ$ 、 $165^\circ \sim 175^\circ$ 、 $260^\circ \sim 300^\circ$ 以及 $320^\circ \sim 360^\circ$ 范围内为负数,在全风攻角范围内无明显规律.随着覆冰量的进一步增加,扭转覆冰导线的冰形发生了较大变化,进而使得导线易发生舞动.随着覆冰量的进一步增加,扭转覆冰导线的冰形发生了较大变化,进而使得导线易发生舞动.

3.3 舞动特性分析

以 10 m/s 风速、 120° 风攻角、 750 mm^2 覆冰量为例,对扭转覆冰导线进行流固耦合舞动仿真,导线舞动响应如图 19 所示.导线在风力作用下逐渐达到舞动振幅稳定状态,同时垂向振动响应远大于横向振动.从舞动轨迹曲线可以看出,导线舞动稳定后的轨迹近似为纺锤形,与实际线路中观察到的舞动现象较为接近.因此,本文主要针对导线舞动的垂向振幅开展研究.

为分析扭转覆冰导线舞动特性,通过对扭转覆冰导线全风攻角进行舞动仿真,得到扭转覆冰导线垂向振幅,如图 20 所示.覆冰量为 120 mm^2 时,导线最大振幅发生在风攻角为 10° 和 170° 附近;覆冰量为 420 mm^2 时,导线最大振幅发生在风攻角为 225° 附近;覆冰量为 750 mm^2 时,导线最大振幅发生在风攻角为 120° 附近.其舞动风攻角均在前文所述 Den Hartog 系数和 Nigol 系数求解的易舞动风攻角范围内,表明扭转覆冰导线的舞动同时包含了 Den Hartog 舞动和 Nigol 舞动.

为展示扭转覆冰导线最易舞动的风攻角随覆冰

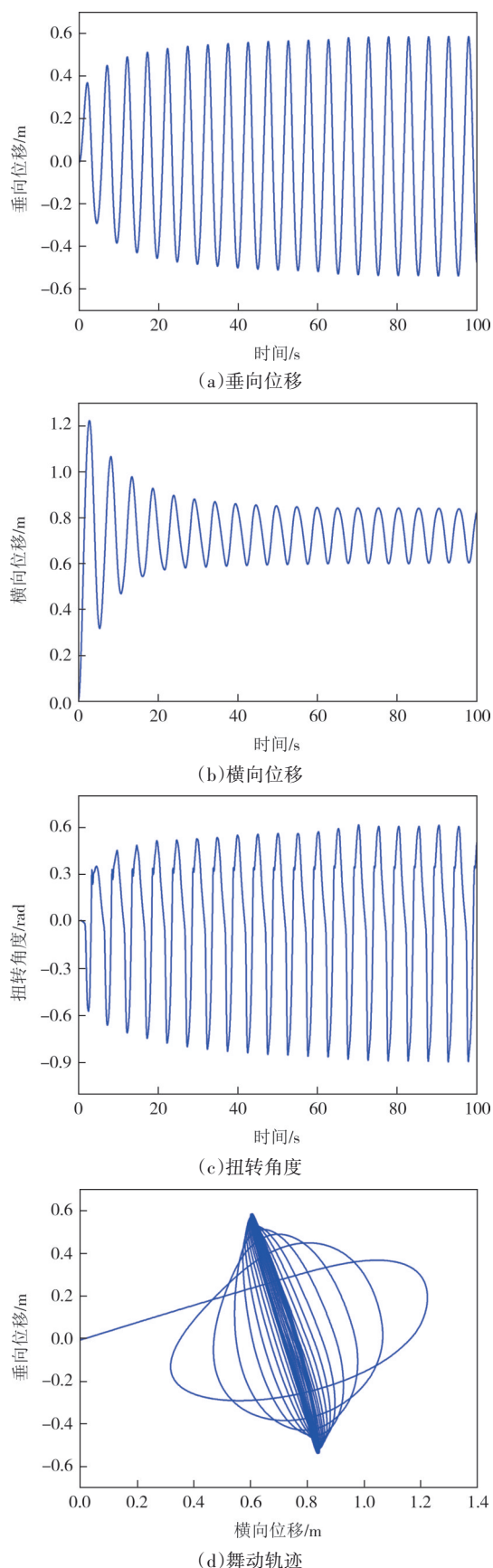


图 19 扭转覆冰导线流固耦合舞动仿真结果

Fig.19 Fluid structure interaction simulation results of galloping for torsional iced conductors

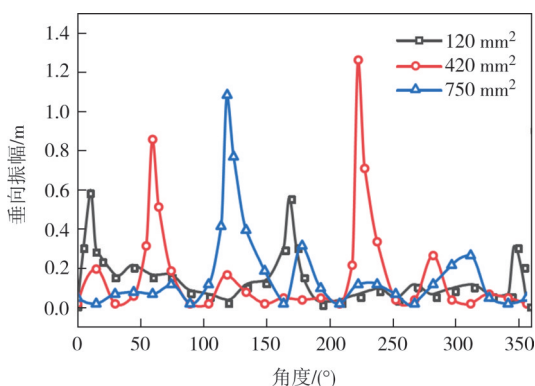


图 20 全风攻角下扭转覆冰导线垂向振幅

Fig.20 Vertical amplitude of torsional iced conductors under full wind attack angle

量的变化趋势,根据 120 mm^2 、 260 mm^2 、 420 mm^2 、 590 mm^2 和 750 mm^2 覆冰量的扭转覆冰导线最大振幅所在风攻角,拟合扭转覆冰导线最易舞动风攻角曲线,如图 21 所示.扭转覆冰导线最易舞动风攻角随覆冰量增大,而呈现先增大后减小的趋势.

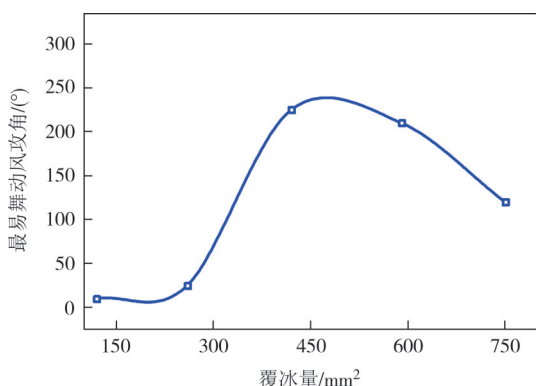


图 21 扭转覆冰导线最易舞动的风攻角曲线

Fig.21 Curve of wind attack angle most susceptible to galloping in torsional iced conductors

为研究不同覆冰形态导线的舞动规律,不同覆冰量下扭转覆冰导线与典型覆冰导线的最大垂向振幅变化曲线如图 22 所示.

典型覆冰导线的舞动幅值随覆冰量的增长呈上升趋势,且新月形覆冰导线舞动幅值变化最为显著.扭转覆冰导线的舞动幅值显著小于典型冰形,且与典型冰形导线舞动规律存在显著区别.在覆冰量较小(120 mm^2)时其扭转角度较小,容易形成与典型新月形覆冰相似的偏心覆冰.此时扭转覆冰导线的舞动幅值仅为 0.43 m ,为新月形覆冰导线的 75.4% .扭转覆冰导线舞动幅值随着覆冰量的增大而上升,当覆冰量增大到 420 mm^2 附近时,扭转覆冰导线舞动幅

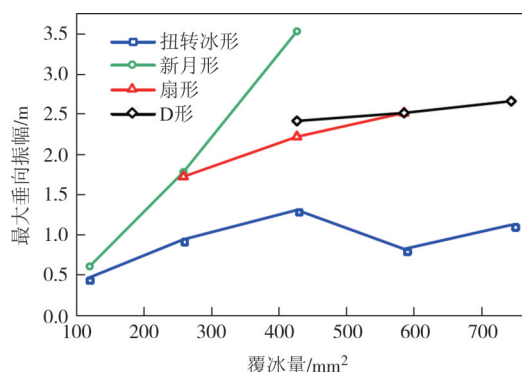


图 22 导线最大垂向振幅随覆冰量变化曲线

Fig.22 Curves of the maximum vertical amplitude of conductor with varying ice accretion

值达到最大值 1.28 m ,分别为扇形、D形和新月形覆冰导线舞动幅值的 58.1% 、 53.3% 和 36.2% ,在该覆冰量下扭转覆冰形态发生了较大变化.当覆冰量继续增大,导线舞动幅值逐渐减小,在覆冰量达到 590 mm^2 附近时,舞动幅值达到极小值 0.79 m ,约为扇形和 D 形覆冰导线舞动幅值的 31.6% ,表明此时扭转覆冰和典型覆冰导线舞动的差异继续增大,相较于典型覆冰导线,扭转覆冰导线舞动幅值最低减小了 68.4% .随着覆冰量进一步增加至 750 mm^2 ,舞动幅值又开始上升,增至 1.08 m ,为 D 形覆冰导线的 41.2% ,差异出现一定程度缩小,但依然显著.

综上所述,不同于典型覆冰形态,扭转覆冰导线的舞动幅值与覆冰量的增长不呈线性关系.扭转覆冰的舞动幅值与典型覆冰形态的相差较大,这将导致其舞动特性出现较大差异.在覆冰量较大时,扭转覆冰导线需达到更高的覆冰质量,才能产生与典型覆冰导线相当的舞动幅值.因此,在线路维护中关注舞动现象的同时,必须高度重视覆冰增量所带来的过载风险.在分析覆冰导线舞动时,应考虑扭转覆冰现象.基于扭转覆冰导线得出的舞动特性,对于输电线路的设计及运行维护方面更具参考价值.

4 结论

本文以扭转覆冰导线作为研究对象,利用三自由度流固耦合数值模拟方法,分析扭转覆冰导线与典型覆冰导线在气动和舞动特性方面的差异,得到如下结论:

1)不同覆冰量下,扭转覆冰导线的冰形变化明显.随着覆冰量的增加,扭转覆冰导线的阻力系数、

升力系数差异较大,扭矩系数差异相对较小。

2)扭转覆冰导线的舞动既包含了 Den Hartog 舞动又包含了 Nigol 舞动,且扭转覆冰导线最易舞动风攻角随覆冰量变化差异显著。

3)随着覆冰量的增加,覆冰形态的持续变化导致扭转覆冰与典型冰形导线的舞动特性差异显著,其舞动幅值与覆冰量的增长不呈线性关系。

4)扭转覆冰导线的舞动幅值显著小于典型覆冰导线,舞动幅值最低减小了 68.4%。采用典型覆冰得到的导线舞动计算结果会放大导线的舞动振幅,研究覆冰导线气动和舞动特性时应考虑扭转覆冰现象。

参考文献

- [1] 郭应龙. 输电线路舞动[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 6-13.
GUO Y L. Transmission line galloping [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 6-13. (in Chinese)
- [2] 解大, 李子怡, 田洲, 等. 构建灾害风险图谱提高电力系统安全调度能力[J/OL]. 上海交通大学学报. (2024-02-20) [2024-05-14]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.535>.
XIE D, LI Z Y, TIAN Z, et al. Constructing disaster risk mapping to improve power system security dispatching capability [J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University. (2024-02-20) [2024-05-14]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.535>. (in Chinese)
- [3] 赵珊鹏, 张海喜, 张友鹏, 等. 基于流固耦合的大风区接触网正馈线舞动机制分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(10): 130-140.
ZHAO S P, ZHANG H X, ZHANG Y P, et al. Analysis of catenary positive feeder galloping mechanism in strong wind section based on fluid-structure interaction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55 (10): 130-140. (in Chinese)
- [4] YANG J, ZHANG Y. A review of flow-induced vibration and galloping of transmission lines [J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 82: 44-66.
- [5] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1932, 51(4): 1074-1076.
- [6] DEN HARTOG J P. Mechanical vibration [M]. New York: Courier Corporation, 1985: 330-340.
- [7] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping-part 1: torsional mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 699-707.
- [8] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping-part 2: torsional mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 708-720.
- [9] YU P, SHAH A H, POPPLEWELL N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59(1): 140-145.
- [10] 温作鹏, 楼文娟, 姜雄. 惯性耦合的三自由度导线舞动稳定性和惯性质量防舞机理[J]. 振动工程学报, 2022, 35(4): 1029-1036.
WEN Z P, LOU W J, JIANG X. Galloping stability of a 3-DOF conductor model considering inertial coupling and anti-galloping mechanism of inertial mass[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(4): 1029-1036. (in Chinese)
- [11] 向玲, 张悦, 唐亮. 覆冰四分分裂导线的气动特性和舞动特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(4): 297-303.
XIANG L, ZHANG Y, TANG L. Analysis for aerodynamic characteristics and galloping behaviors of iced quad bundle conductor[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(4): 297-303. (in Chinese)
- [12] 冯文斌, 魏韬, 杨惠民, 等. 输电导线舞动特性分析及监测系统 I [J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 2188-2195.
FENG W B, GUO T, YANG H M, et al. Galloping characteristics analysis and monitoring system I of continuous crescent iced conductor[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38 (5): 2188-2195. (in Chinese)
- [13] MATSUMIYA H, YAGI T, MACDONALD J H G. Effects of aerodynamic coupling and non-linear behaviour on galloping of ice-accreted conductors [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 106: 103366.
- [14] 张志劲, 周天宇, 蒋兴良, 等. 典型覆冰形状下输电线路风荷载影响研究[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5247-5255.
ZHANG Z J, ZHOU T Y, JIANG X L, et al. Influence of wind loads on transmission lines under typical ice shapes [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5247-5255. (in Chinese)
- [15] 楼文娟, 余江, 姜雄, 等. 覆冰六分裂导线舞动风洞试验及起舞风速研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(2): 280-289.
LOU W J, YU J, JIANG X, et al. Wind tunnel test and critical wind speed study for galloping of 6-bundled iced conductors [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30 (2): 280-289. (in Chinese)
- [16] 苑吉河, 蒋兴良, 易辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 6-9.
YUAN J H, JIANG X L, YI H, et al. The present study on conductor icing of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9. (in Chinese)
- [17] 蒋兴良, 侯乐东, 韩兴波, 等. 输电线路导线覆冰扭转特性的数

- 值模拟[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1818-1826.
- JIANG X L, HOU L D, HAN X B, et al. Numerical simulation of torsion characteristics of transmission line conductor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (8): 1818-1826. (in Chinese)
- [18] 韩兴波, 吴海涛, 郭思华, 等. 输电线路单导线覆冰和扭转的相互影响机制分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4508-4516.
- HAN X B, WU H T, GUO S H, et al. Analysis of interaction mechanism between icing and torsion of single transmission lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4508-4516. (in Chinese)
- [19] 楼文娟, 白航. 多种覆冰形状导线风荷载增大系数研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 8-15.
- LOU W J, BAI H. Study on wind load increase coefficient of conductors with various ice coating shapes [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 8-15. (in Chinese)
- [20] 周超, 黄东, 孙志刚. 高压输电线雨淞覆冰过程与典型舞动特性研究进展[J]. 南方电网技术, 2022, 16(5): 134-144.
- ZHOU C, HUANG D, SUN Z G. Research progress of glaze icing process and typical galloping characteristics of high-voltage transmission lines [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(5): 134-144. (in Chinese)
- [21] 周鑫隆, 孟鸿儒, 肖衡林, 等. 不良气象微环境下桥塔横梁覆冰灾害过程模拟[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(16): 6980-6988.
- ZHOU X L, MENG H R, XIAO H L, et al. Simulation analysis of ice accretion process of tower crossbeam under adverse meteorological micro-environment conditions [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24 (16): 6980-6988. (in Chinese)
- [22] 罗聪. 输电线路覆冰预测及融冰决策研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- LUO C. Research on ice-coating prediction and ice-melting decision of transmission lines [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [23] 肖良成, 李新民, 江俊, 等. 典型覆冰导线气动绕流计算及动态特性分析[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2013, 43(4): 500-510.
- XIAO L C, LI X M, JIANG J, et al. Simulation and analysis on aerodynamic characteristics of iced-conductors in typical shapes [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2013, 43(4): 500-510. (in Chinese)
- [24] 赵珊鹏, 马爱彪, 张友鹏, 等. 大风区接触网正馈线新型绝缘防舞装置有效性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(10): 20-30.
- ZHAO S P, MA A B, ZHANG Y P, et al. Effectiveness study of new insulation and anti-galloping device for OCS positive feeder in the strong wind section [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(10): 20-30. (in Chinese)