

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.049

引用格式: 刘源涛, 赵珊鹏, 田铭兴. 新月形覆冰单导线气动耦合特性分析[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(10): 45-55.



新月形覆冰单导线气动耦合特性分析

刘源涛, 赵珊鹏, 田铭兴

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为进一步明确气动耦合特性对新月形覆冰单导线舞动幅值的影响, 基于空气动力学理论, 建立了新月形覆冰单导线风致振动响应模型。采用流固耦合方法对新月形覆冰单导线的位移时程进行了计算, 分析了气动耦合特性对新月形覆冰单导线舞动幅值的影响。研究结果表明: 频率比和自由度对新月形覆冰单导线气动升阻力系数的影响较小, 说明新月形覆冰单导线在流场中受到的气动力不随自由度和频率比的不同而发生变化。在不同自由度系统中, 新月形覆冰单导线在攻角为 20° 时发生大幅舞动。垂直单自由度系统中, 新月形覆冰单导线舞动幅值受频率比影响较大, 频率比越大, 舞动幅值越小。垂直-水平两自由度系统中, 垂直频率等于水平频率时, 新月形覆冰单导线发生耦合振动, 此时新月形覆冰单导线垂直方向的舞动幅值大于其他频率下的垂直方向舞动幅值。新月形覆冰单导线在流场中发生舞动时, 其水平方向运动会促进垂直方向振动, 且新月形覆冰单导线在流场中的运动轨迹呈长条状。研究成果进一步明确了气动耦合特性对新月形覆冰单导线舞动的影响, 在工程上可为新月形覆冰单导线的舞动和防舞研究提供一定理论参考。

关键词: 新月形覆冰导线; 气动耦合; 舞动幅值; 流固耦合

中图分类号: TM752

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)10-045-11

Analysis of aerodynamic coupling characteristics of crescent-shaped iced single conductor

LIU Yuantao, ZHAO Shanpeng, TIAN Mingxing

(School of Automatic & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: To clarify the impact of aerodynamic coupling characteristics on the galloping amplitude of crescent-shaped iced single conductor, an analysis model of wind-induced vibration response of the conductor is established based on aerodynamic theory. The fluid-structure coupling method is used to calculate the displacement time history of the conductor, and the influence of aerodynamic coupling characteristics on its galloping amplitude is analyzed. The results show that the frequency ratio and the degree of freedom have little influence on the aerodynamic lift-drag coefficient of the conductor, which shows that the aerodynamic force on the conductor in the flow field does not change with the different degrees of freedom and frequency ratio. In different degrees of freedom systems, the conductor gallops greatly at the angle of attack of 20°. In the vertical

收稿日期: 2023-06-08 网络出版日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51867013)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51867013).

作者简介: 刘源涛(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事输电线路舞动及防治技术, (E-mail) lyt19834524759@163.com。

通信作者: 赵珊鹏, 男, 副教授, 硕士生导师, (E-mail) zsp@mail.lzjtu.cn。

single-degree-of-freedom system, the galloping amplitude of the conductor is greatly influenced by the frequency ratio, and the larger the frequency ratio, the smaller the galloping amplitude. In the vertical-horizontal two-degree-of-freedom system, when the vertical frequency is equal to the horizontal frequency, the conductor is coupled to vibrate, and its galloping amplitude in the vertical direction is greater than that in other frequencies. When the conductor gallops in the flow field, its horizontal movement promotes vertical vibration, and its motion trajectory in the flow field is elongated. The research results clarify the influence of aerodynamic coupling characteristics on the galloping of crescent-shaped iced single conductor, which can provide some theoretical reference for the study of galloping and dancing prevention of the conductor in engineering.

Keywords: crescent-shaped iced conductors; aerodynamic coupling; galloping amplitude; fluid-structure coupling

架空输电导线覆冰后,输电导线的截面形状会发生变化,根据气象条件和导线位置不同,可能形成新月形、D形或扇形等非圆形截面。非圆形截面的覆冰导线在风荷载作用下产生的升力、阻力和扭矩容易诱发导线发生舞动^[1]。覆冰导线舞动的特点是低频率、大振幅,舞动的频率范围约为0.1~3.0 Hz,舞动幅值可达数米至10 m以上,通常为导线直径的100倍以上^[2]。舞动幅度较大时,易造成线路跳闸、金具磨损、停电、绝缘子串破碎、塔架损坏等事故^[3-4]。在全球气候变化导致极端天气事件频发的背景下,导线覆冰对远距离输电的安全运行提出了严峻的挑战^[5-6]。

针对覆冰导线的舞动现象,相关学者对其舞动机理进行了深入研究,并提出了许多相应的抗舞动措施。在覆冰导线舞动机理的研究中,横向舞动机理^[7]、扭转舞动机理^[8-9]和偏心惯性耦合机理^[10]已得到学术界的普遍认可。Luongo等^[11]采用梁单元建立了覆冰单导线舞动模型,分析了导线覆冰后的舞动响应。基于试验结果,Keutgen等^[12]采用数值模拟方法分析了覆冰导线的舞动现象,以验证数值方法的合理性。Chabart等^[13]通过风洞试验获得了覆冰导线的气动系数,并利用风洞试验模拟了覆冰导线的舞动现象。刘小会^[14]采用非线性数值模拟方法分析了覆冰单导线和四分裂导线的舞动响应,并根据试验结果验证了舞动数值模拟方法的适用性。严波等^[15]使用有限元软件中的梁单元模块模拟了覆冰分裂导线的舞动。楼文娟等^[16]以不同形式的覆冰导线为研究对象,在风洞实验室中模拟了导线发生舞动的过程,验证了基于准稳态假设舞动分析方法的可靠性。以上研究大多基于准稳态假设模型进行分析,未充分考虑覆冰导线在流场中运动时与流场之间的相互耦合作用。覆冰导线受到来流风的激励会发生不同性质的振动,同时导线的振动又会反作用于流场形成复杂的流固耦合振动,因此,采用流固耦合方法分析覆冰导线的舞动问题是十分必要的。

对于覆冰导线舞动的研究,除了分析线性振动外,还应关注非线性振动。已有研究表明,不同自由度非线性舞动之间的耦合效应对覆冰导线舞动具有重要影响。Jones^[17]分析了垂直-水平两自由度系统模型,发现水平方向振幅可以达到和垂直方向相当的振幅,水平方向运动与垂直方向运动发生耦合振动时,会促进覆冰导线舞动。为了更加全面分析覆冰导线的舞动,有学者提出同时考虑垂直、水平和扭转振动的耦合作用。Yu等^[18-19]建立了三自由度覆冰导线模型,并分析了相邻档距振动对输电导线舞动的影响。刘军^[20]采用数值模拟方法,通过调节来流速度以改变雷诺数,研究了不同雷诺数下输电线路的舞动特性。曹宗恒^[21]采用数值模拟方法,分析新月形覆冰拉索的流固耦合振动。耿力等^[22]运用ANSYS和MATLAB软件,分析了输电线路塔线体系的流固耦合振动。曲宝旭^[23]采用流固耦合方法分析了覆冰导线的舞动现象。综上可知,覆冰导线在流场作用下会发生非线性的振动,且覆冰导线各运动方向之间会发生耦合振动,在特定频率关系下可能出现共振现象。因此,在进行覆冰导线舞动问题分析时,有必要考虑非线性振动特性来讨论不同自由度运动之间的气动耦合效应。

为克服准稳态假设模型的局限性,更准确地捕捉覆冰导线与流场间的动态相互作用,采用流固耦合方法对新月形覆冰单导线的气动耦合特性进行了研究。通过对Fluent软件进行二次开发,编写UDF用户自定义函数实现流固界面数据交换,并与结构动力学求解器耦合,对覆冰导线的运动控制方程进行求解,得出覆冰

导线在流场中运动时的实时位移,结合嵌套网格技术,对流场域网格进行更新,实现流固耦合计算。对分析了不同频率比下覆冰单导线气动系数随攻角的变化规律,以及新月形覆冰单导线垂直与水平方向的气动耦合作用。

1 控制方程

对于不可压缩流体,连续方程实质上是用微元体的质量守恒定理得出。质量守恒定理可表述为:在封闭区域内单位时间内流入微元体的质量等于流出的质量。动量守恒方程也是任何流动系统都必须满足的基本定律。该定律可表述为:微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上各种力之和。假设流体连续的充满整个流场,从中任取出一微元作为控制体,其在流场中的受力示意图如图 1 所示。

其中: xyz 为三维直角坐标系; ρ 为流体密度; v_x, v_y, v_z 分别为 x, y, z 方向的速度。

对于不可压缩黏性流体,密度 ρ 为常数,在二维直角坐标系下,其运动规律可用 N-S 方程^[24-25]来描述。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为与来流平行的水平方向坐标; y 为与来流垂直的竖直方向坐标; u, v 分别为流体在 x 和 y 方向的速度, m/s ; μ 为动力黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为流体压强, N/m^2 。

近年来, $k-\omega$ 模型^[26]逐渐被关注,主要包括标准 $k-\omega$ 模型和剪切应力输运(shear stress transport, SST) $k-\omega$ 模型。SST $k-\omega$ 模型为包含 2 个方程的旋涡黏性模型,它结合了 $k-\omega$ 和 $k-\varepsilon$ 模型^[27]的优点,在边界层核心区域采用 $k-\omega$ 模型思想,在湍流充分发展区域采用 $k-\varepsilon$ 模型思想,使得 SST $k-\omega$ 模型处在不受壁面影响的区域。文中湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,其输运方程为^[27]

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k - Y_k, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega. \end{cases} \quad (3)$$

式中: G_k 为湍动能 k 产生项; G_ω 为湍流耗散率 ω 产生项; Γ_k 和 Γ_ω 分别为湍动能 k 和湍流耗散率 ω 的有效扩散系数; Y_k 和 Y_ω 分别为湍动能 k 和湍流耗散率 ω 基于湍流的耗散项; D_ω 为交叉扩散系数。

通过计算流场,得到覆冰导线表面的压力分布,进而得到作用在覆冰导线上的升力 \mathbf{F}_L 和阻力 \mathbf{F}_D 。覆冰导线表面所受到的气动载荷分别表示为^[28-29]

$$\begin{cases} \mathbf{F}_D = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U^2 D C_D, \\ \mathbf{F}_L = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U^2 D C_L. \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_D, C_L 分别为导线单位长度上所受到的阻力系数和升力系数; D 为导线直径; ρ_{air} 为空气密度; U 为来流风速。

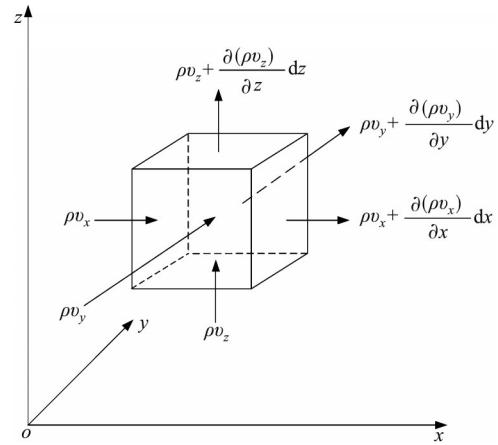


图 1 控制体在流场中受力示意图

Fig. 1 Force of the control model in the flow field

覆冰导线振动的计算模型可以简化为质量-刚度-阻尼系统。将 K 和 c 分别定义为系统的弹簧刚度和阻尼。结合式(4),可以得到覆冰导线的运动控制方程,对该方程求解,可得到导线运动的位移、速度、加速度等信息。其两自由度模型的振动方程可以表示为^[30]

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + 2m\zeta_{x0}\omega_{x0}\dot{x}_1 + m\omega_{x0}^2 x_1 = \frac{\rho_{\text{air}}U^2 DC_D}{2}, \\ m\ddot{y}_1 + 2m\zeta_{y0}\omega_{y0}\dot{y}_1 + m\omega_{y0}^2 y_1 = \frac{\rho_{\text{air}}U^2 DC_L}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_1, y_1 分别为水平与垂直方向的位移; m 为覆冰导线单位长度的质量; $\omega_{x0} = \sqrt{K_{x0}/m}$ 、 $\omega_{y0} = \sqrt{K_{y0}/m}$ 分别为覆冰导线每个方向的角频率,是固有频率 f_{x0}, f_{y0} 的 2π 倍; ζ_{x0}, ζ_{y0} 分别为各方向的阻尼比, $\zeta_{x0} = c_{x0}/\sqrt{K_{x0}m}$ 、 $\zeta_{y0} = c_{y0}/\sqrt{K_{y0}m}$; c_{x0}, c_{y0} 分别为水平与垂直方向的结构阻尼; K_{x0}, K_{y0} 分别为水平和垂直方向的结构刚度。

2 计算模型及参数设置

2.1 计算模型及网格划分

文中以二维矩形流场作为整个流场的计算区域。流体计算域中上游流入区的长度为 3 m,下游尾流区的长度为 4 m,以确保导线尾流的充分发展;上下边界为 2 m,以满足动网格的要求。在 Fluent 中计算时,二维模型的展向长度默认为 1 m。文中的雷诺数处于高雷诺数的亚临界范围,湍流模型为 SST $k-\omega$ 湍流模型。边界条件设置如下:流体从左向右流动,左侧入口边界设置为速度入口;右侧设置为压力出口,上下边界为对称界面;覆冰导线的表面定义为无滑移壁面。

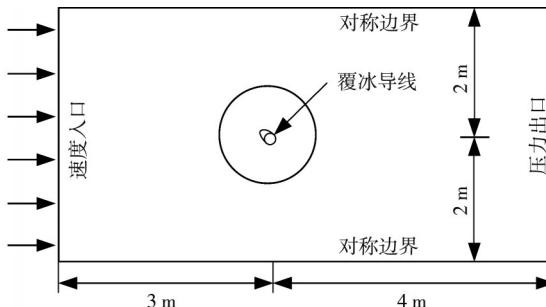


图 2 计算模型

Fig. 2 Computational model

分别对垂直单自由度系统和垂直-水平两自由度系统覆冰导线的气动及舞动特性进行对比分析。垂直单自由度系统是指覆冰导线在流场作用下发生垂直方向运动,垂直-水平两自由度系统是指除释放覆冰导线垂直方向运动外,还需释放其水平方向运动。其振动模型如图 3 所示。

风攻角 α 一般定义为空气来流与模型的相对夹角,在空气动力学中,一般将来流攻角的 0° 或 180° 方向设为与模型截面的对称轴平行的方向,模型顺时针转动时为正迎角,逆时针转动时为负迎角。单导线模型的 0°

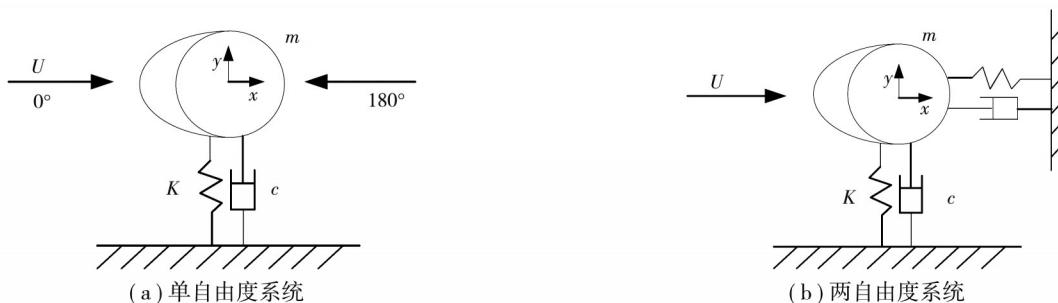


图 3 振动模型

Fig. 3 Vibration model

和 180° 方向的风攻角定义见图 3(a)。

图 4 为覆冰导线受力分析图, 其中 F_y , F_z 分别是垂直、水平方向上的气动分力, 通过对覆冰导线进行受力分析得到这些力, 如图 4 所示。

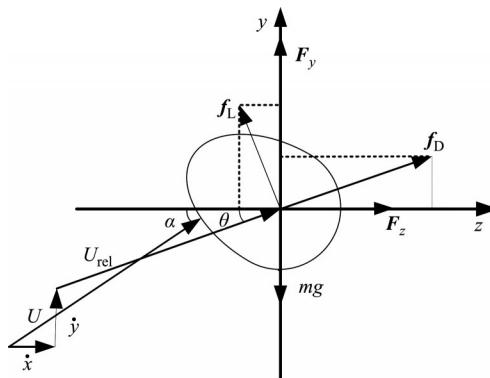


图 4 模型受力分析

Fig. 4 Model stress analysis

图 4 中覆冰导线在均匀来流 U 作用下产生 x 和 y 方向的振动, 振动速度为 \dot{x} 和 \dot{y} , θ 为相对风攻角, U_{rel} 为来流风与导线之间的相对风速, f_L , f_D 分别为覆冰导线在相对风速作用下的升力和阻力。

流场随导线边界条件的变化而变化, 利用嵌套网格技术实现导线边界在流场中的运动。流场域网格由背景网格与嵌套网格 2 部分组成, 均采用结构化网格, 需满足导线表面首层网格高度 $y^+ < 1$, 以保证网格的质量。采用嵌套网格技术的优点是无需担心网格在计算过程中出现负体积而导致求解失败。嵌套网格求解过程为: 首先划分导线周围的网格和整体流域的背景网格, 利用求解器识别嵌套网格的边界, 将组件网格与背景网格的重叠部分进行“挖洞”, 然后插值嵌套区域的边界元素, 将背景区域的边界元素的变量信息插值到嵌套区域的边界元素中。最后对流场进行计算, 实现流固耦合过程。整体流场域的计算网格如图 5(c) 所示。

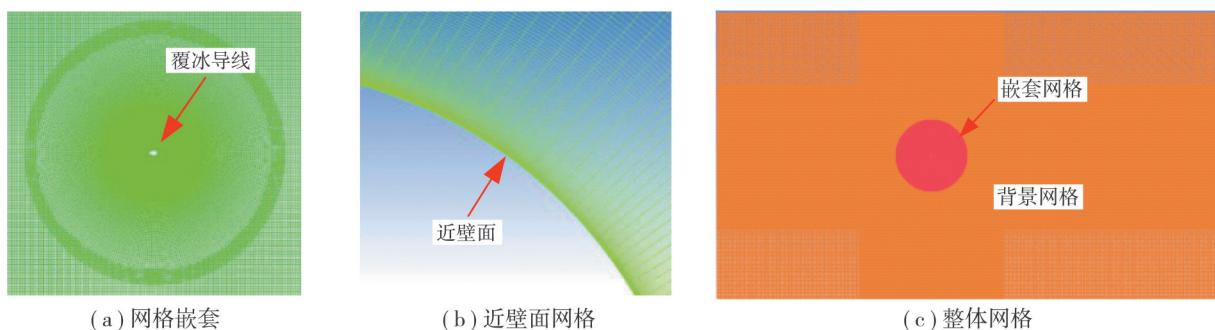


图 5 计算域网格划分

Fig. 5 Computational domain meshing

2.2 计算参数和工况

数值模拟中, 空气密度 $\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$, 导线直径 $D = 23.43 \text{ mm}$, 覆冰导线单位长度质量 $m = 1002 \text{ kg/m}$, 风速 $U = 15 \text{ m/s}$, 固有频率 $f_n = 0.42 \text{ Hz}$ 。时间步长按式(6)计算^[31]取 0.005 s。研究中使用的参数值如表 1 所示。

$$t = D / (U(10 \sim 100)) \quad (6)$$

文中采用的 Fluent 软件并不能直接求解导线结构的舞动响应, 为了实现覆冰导线的流固耦合计算, 需要针对覆冰导线的控制方程编写相应的程序来求解覆冰导线的舞动响应。根据流体动力学控制方程, 采用龙格库塔法^[32]求解覆冰导线的结构动力响应。利用动网格和滑动网格技术计算域网格的动态更新, 最终求解覆冰导体的流固耦合。覆冰导线结构动力学求解流程如图 6 所示。

表1 覆冰导线模型参数

Table 1 Parameters of iced conductor model

参数	单位	数值
导线张力 T	N	18 920
档距 L	m	325
弧垂 S	m	7.55
弹性模量 E	N/mm ²	62 762
计算截面 A	mm ²	324.33
扭转刚度 G_i	N·m/rad	104
单位长度质量 m	kg/m	1.002
水平阻尼比 ζ_{x0}		0.005
垂直阻尼比 ζ_{y0}		0.005
扭转阻尼比 $\zeta_{\theta0}$		0.005

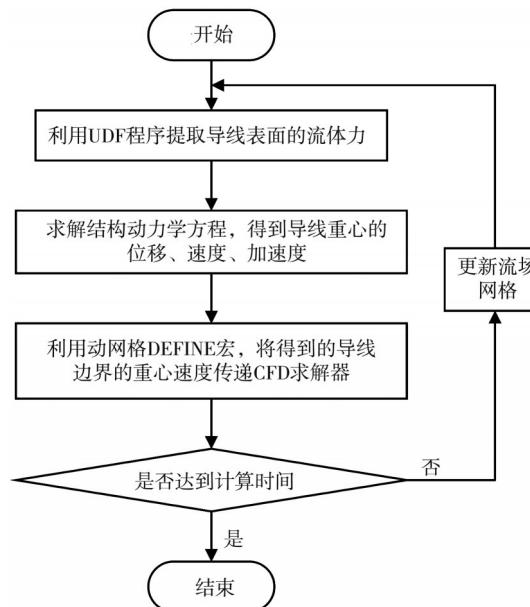


图6 结构动力学求解流程图

Fig. 6 Solution process of structural dynamics

3 数值结果与分析

覆冰导线在流场作用下会发生舞动,舞动现象的特征是大振幅、低频率,在流场作用下覆冰导线不同运动方向之间会发生耦合振动,使覆冰导线的舞动加剧。为了更好地理解垂直和水平方向的耦合作用,对新月形覆冰导线垂直单自由度系统和垂直-水平两自由度系统的气动及舞动特性进行了对比分析。

3.1 单自由度系统

为进一步明确频率比对新月形覆冰单导线舞动幅值的影响,对垂直单自由度系统的覆冰单导线的气动及舞动特性进行对比分析。图7为新月形覆冰单导线垂直单自由度系统的气动系数,不同频率比下,覆冰单导线的气动系数相差不大。由图7(a)可以发现,不同频率比下,覆冰单导线的气动阻力系数均随攻角呈先增大后减小的变化趋势,当风攻角为80°时,新月形覆冰单导线阻力系数达到最大值。由图7(b)可以发现,新月形覆冰单导线的气动升力系数随风攻角呈马鞍状变化,风攻角为20°时新月形覆冰单导线气动升力系数达到最大值,风攻角为120°时新月形覆冰单导线气动升力系数最小。由图7(a)可看出,当新月形覆冰单导线风攻

角为 20° 时, 新月形覆冰单导线频率比越小, 其气动系数越小, 这主要是因为新月形覆冰单导线在发生舞动时, 新月形覆冰单导线垂直方向相对风速造成的。当来流风速 U 不变时, 新月形覆冰单导线频率比越小, 导线的振幅越大, 其相对风速就越大。根据阻力系数表达式可以发现, 在其他参数不变条件下, 风速越大, 其阻力系数越小。因此, 频率比较小时, 新月形覆冰单导线的气动阻力系数越小。由图 7(b) 可以发现, 不同频率比新月形覆冰单导线的气动升力系数几乎相等, 当 $f_y=0.8f_n$ 时, 在个别攻角下的气动力系数大于其他频率比下覆冰导线的气动升力系数, 这可能是由于新月形覆冰单导线气流分离点不同而造成的差异。

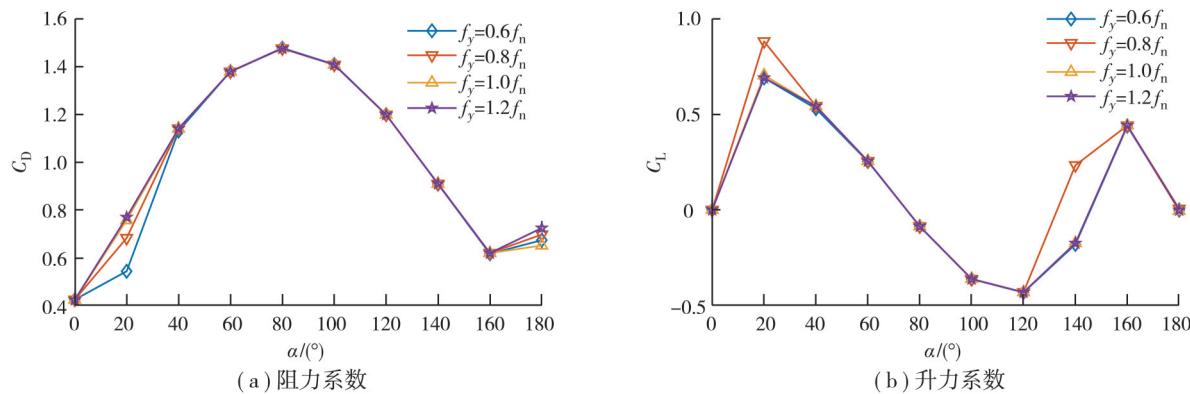


图 7 单自由度系统气动特性
Fig. 7 Aerodynamic characteristics of single-degree-of-freedom systems

图 8 所示为不同频率比下新月形覆冰单导线垂直振幅, 可以发现, 不同频率比下, 其垂直振幅存在一定差异, 频率比越小其振幅越大, 随频率比增大, 其振幅逐渐减小。主因是频率比较小时, 新月形覆冰单导线的刚度较小, 导线容易发生大幅舞动, 随频率比增大, 导线结构刚度增大, 产生同样大小的位移需要更大的气动力, 因此, 随结构刚度增大, 其振幅逐渐减小。当新月形覆冰单导线攻角为 20° 时, 不同频率比下的新月形覆冰单导线均发生了大幅舞动, 随攻角增大, 舞动幅值逐渐减小; 当频率比较小时, 其舞动幅值大于其他频率比下的舞动幅值。当新月形覆冰单导线攻角为 180° 时, 随频率比增大, 舞动幅值逐渐增大, 这主要由新月形覆冰单导线的尾流作用引起。

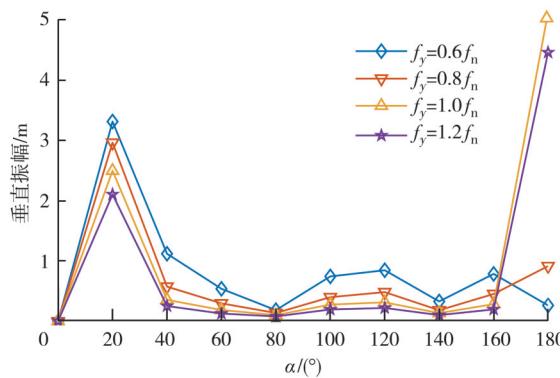


图 8 单自由度系统垂直振幅
Fig. 8 Vertical amplitude of single-degree-of-freedom systems

3.2 两自由度系统

新月形覆冰单导线在发生舞动过程中, 其垂直与水平方向易发生耦合振动, 为进一步明确这种耦合振动对新月形覆冰单导线舞动的影响, 分析了不同频率比下新月形覆冰单导线垂直-水平两自由度系统的舞动特性。图 9 所示为新月形覆冰单导线两自由度系统气动力系数, 可以发现, 不同频率比下气动力系数相同, 气动阻力系数在攻角为 80° 时达到最大值; 气动升力系数在攻角为 20° 时达到最大值, 在 120° 攻角时达到最小

值。说明新月形覆冰单导线在流场中运动时,不同方向之间的耦合振动对新月形覆冰单导线气动特性的影响较小,不同频率比下,新月形覆冰单导线在流场中受到的气动力相同。

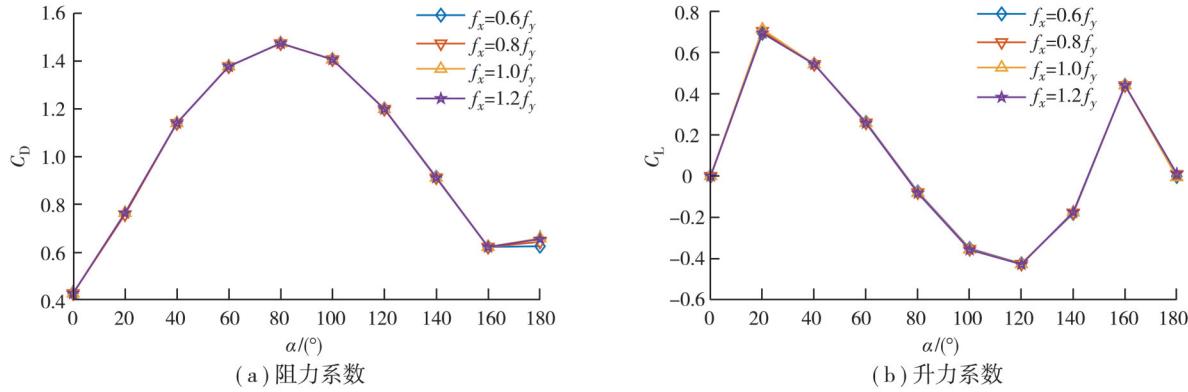


图9 两自由度系统气动特性

Fig. 9 Aerodynamic characteristics of two-degree-of-freedom systems

图10所示为不同频率比下新月形覆冰单导线水平与垂直方向的振动幅值,可以发现,不同频率比下新月形覆冰单导线垂直与水平方向振幅存在一定差异。由图10(a)可知,当水平方向振动频率小于垂直方向振动频率时,新月形覆冰单导线水平方向振幅较大,随着水平方向振动频率增大,其水平方向振幅逐渐减小,且频率比越小,水平方向发生较大振幅的攻角范围越大。图10(b)所示为不同频率比下新月形覆冰单导线垂直方向振幅,可以发现,不同频率比下,其垂直方向振幅相差不大;当风攻角为20°时,新月形覆冰单导线在不同频率比下均产生了较大的振幅,当频率比为1时垂直方向振幅大于其他频率比下的振幅,说明此时其垂直方向振动与水平方向振动发生了耦合振动,因而增大了其垂直方向的振动幅值。这也说明,在进行输电线路设计时,应尽可能避免不同方向振动频率接近,防止新月形覆冰单导线发生耦合振动。

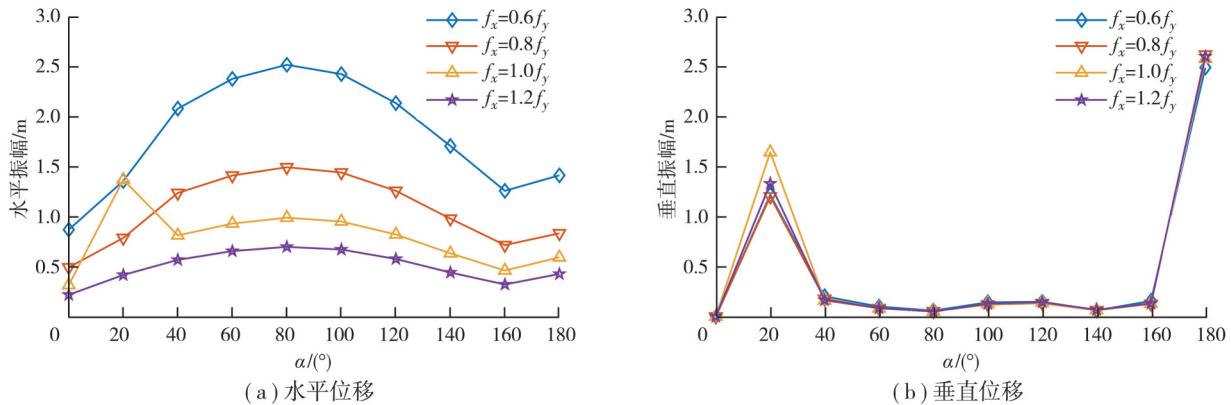


图10 两自由度系统舞动特性

Fig. 10 Galloping characteristics of two-degree-of-freedom systems

3.3 频率比 $f_x=1.0f_y$ 时舞动特性

图11为新月形覆冰单导线频率比为1时位移时程图,从图中可以发现,新月形覆冰单导线垂直方向与水平方向均发生了大幅舞动,水平方向最大振幅可达1.0 m,峰值位移为1.4 m;垂直方向最大振幅可达2.0 m,峰值位移为3.5 m。结合单自由度系统振动频率 $f_y=1.0f_n$ 时垂直振幅可以发现,单自由度系统中新月形覆冰单导线振幅为2.5 m,较两自由度系统垂直方向振动幅值小,说明水平方向振动对垂直方向振动存在一定影响。这也说明新月形覆冰单导线在两自由度系统中水平方向振动与垂直方向振动会发生耦合振动,水平方向振动会促进垂直方向的振动,因而在实际工程中尽可能避免气动耦合发生。图11(c)所示为新月形覆冰单导线舞动轨迹,可以发现新月形覆冰单导线在流场中的运动轨迹呈长条状。

图12所示为新月形覆冰单导线水平与垂直方向频谱分析图,可知,垂直与水平方向振动频率均为

0.42 Hz, 与新月形覆冰单导线频率比一致。由频谱系数图可以发现, 垂直方向频谱系数大于水平方向频谱系数, 说明新月形覆冰单导线垂直方向发生振动时具有的能量大于水平方向, 垂直方向更容易发生大幅舞动。

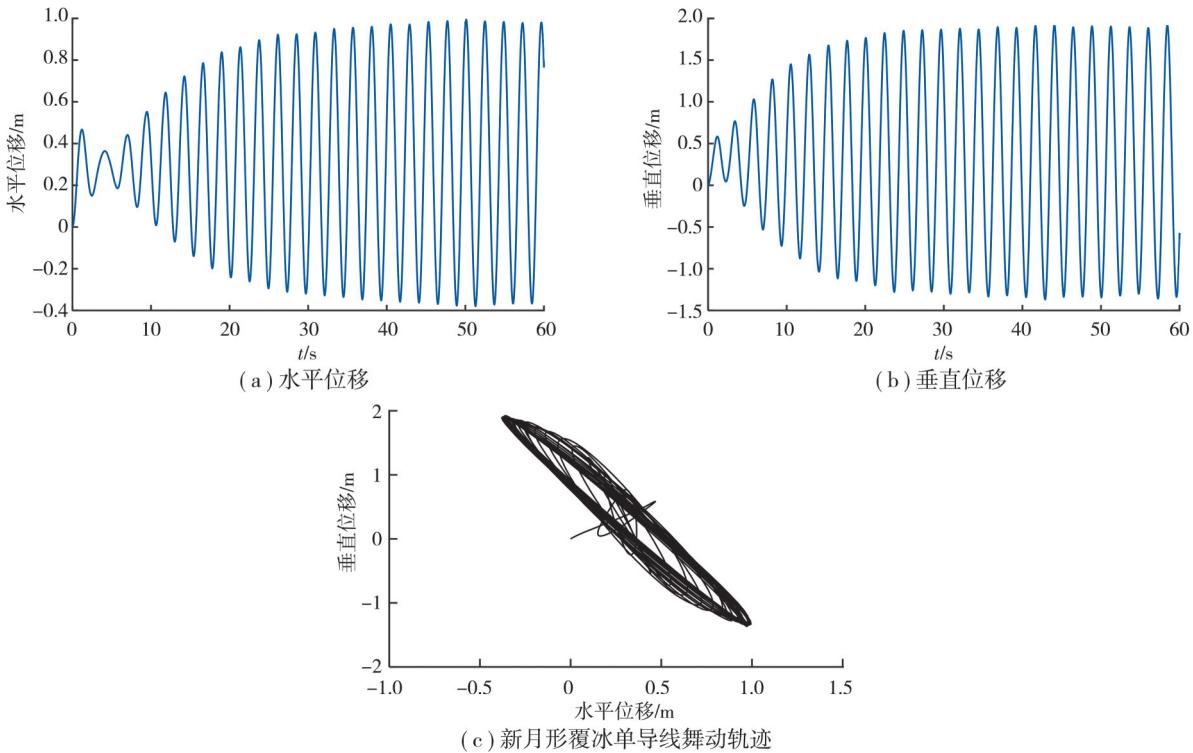


图 11 $f_y=1.0f_x$ 时新月形覆冰单导线舞动特性

Fig. 11 Galloping characteristics of iced conductors when $f_y=1.0f_x$

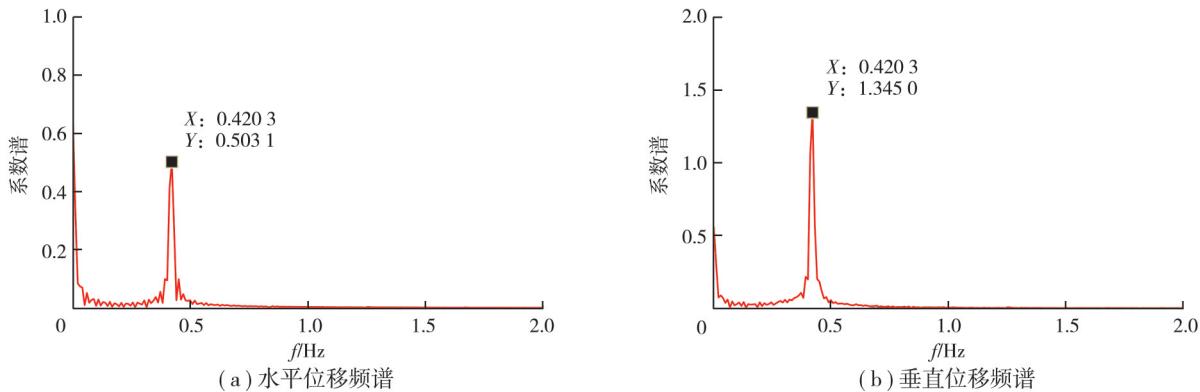


图 12 $f_y=1.0f_x$ 时新月形覆冰单导线位移频谱

Fig. 12 $f_y=1.0f_x$ displacement spectrum of iced conductors

4 结束语

建立了新月形覆冰单导线流固耦合的非线性动力学模型, 利用空气动力学理论分析了新月形覆冰单导线气动耦合特性, 对比了不同自由度下新月形覆冰单导线气动力及舞动幅值随攻角的变化规律。主要的研究结论如下:

1) 频率比对新月形覆冰单导线气动特性的影响较小, 对比不同自由度和频率比新月形覆冰单导线在不同攻角下的气动力系数发现, 不同自由度和频率比新月形覆冰单导线气动系数几乎不变, 频率比对新月形覆

冰单导线气动特性的影响较小。

2)在不同自由度系统中,新月形覆冰单导线在攻角为20°时发生了大幅舞动。垂直单自由度系统中,舞动幅值随频率比增大逐渐减小;垂直-水平两自由度系统中,频率比为1时新月形覆冰单导线垂直方向舞动幅值大于其它频率下垂直方向舞动幅值,说明此时新月形覆冰单导线发生了耦合振动。

3)在垂直-水平两自由度系统,频率比 $f_x=1.0f_y$ 时,新月形覆冰单导线垂直方向舞动幅值大于垂直单自由度系统中的舞动幅值,说明水平方向振动对垂直方向振动存在一定促进作用;且新月形覆冰单导线在流场作用下其运动轨迹呈长条状。

参考文献

- [1] 王黎明,王琼,陆佳政,等.500 kV覆冰四分裂导线舞动特性[J].高电压技术,2019,45(7):2284-2291.
Wang L M, Wang Q, Lu J Z, et al. Galloping characteristics of 500 kV iced quad bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2284-2291. (in Chinese)
- [2] 郭应龙,李国兴,尤传永.输电线路舞动[M].北京:中国电力出版社,2003.
Guo Y L, Li G X, You C Y. Transmission line galloping[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 王黎明,高亚云,卢明,等.特高压输电线路新型防舞技术计算[J].高电压技术,2017,43(8):2541-2550.
Wang L M, Gao Y Y, Lu M, et al. Calculation on a new anti-galloping technique for UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2541-2550. (in Chinese)
- [4] 尹晖,张晓鸣,李小祥,等.基于视频监测的输电线路舞动信息提取与频谱分析[J].高电压技术,2017,43(9):2889-2895.
Yin H, Zhang X M, Li X X, et al. Galloping information extraction and spectral analysis for transmission lines based on video monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2889-2895. (in Chinese)
- [5] 赵泉,黄琼,王毅.复杂拓扑电力线故障信道建模方法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2022,34(02):349-355.
Zhao Q, Huang Q, Wang Y. Modeling method for fault channel of power line with complex topology[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2022, 34(02): 349-355. (in Chinese)
- [6] 刘宇,蔡萌琦,王清远,等.覆冰八分裂导线舞动过程中的次档距振动研究[J].科学技术与工程,2022,22(12):4843-4848.
Liu Y, Cai M Q, Wang Q Y, et al. Investigation on the sub-span oscillation in the process of galloping of iced eight-bundle conductors[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4843-4848. (in Chinese)
- [7] Den Hartog J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1932, 51(4): 1074-1076.
- [8] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping part I-den hartog mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(2): 699-707.
- [9] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping-part II torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(2): 708-720.
- [10] Yu P, Shah A H, Popplewell N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59(1): 140-145.
- [11] Luongo A, Zulli D, Piccardo G. A linear curved-beam model for the analysis of galloping in suspended cables[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2007, 2(4): 675-694.
- [12] Keutgen R, Lilien J L. Benchmark cases for galloping with results obtained from wind tunnel facilities validation of a finite element model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 367-374.
- [13] Chabart O, Lilien J L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/75/76: 967-976.
- [14] 刘小会.覆冰导线舞动非线性数值模拟方法及风洞模型试验[D].重庆:重庆大学,2011.
Liu X H. Nonlinear numerical simulation method and wind tunnel test for galloping of iced conductors[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [15] 严波,胡景,周松,等.覆冰四分裂导线舞动数值模拟及参数分析[J].振动工程学报,2010,23(3):310-316.
Yan B, Hu J, Zhou S, et al. Numerical simulation and parameter analysis of galloping for iced quadbundled conductor[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(3): 310-316. (in Chinese)
- [16] 楼文娟,王昕,许福友.覆冰导线气弹模型舞动风洞试验研究[J].土木工程学报,2011,44(11):18-23.
Lou W J, Wang X, Xu F Y. A wind tunnel study on galloping of an aeroelastic iced conductor model[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 18-23. (in Chinese)

- [17] Jones K F. Coupled vertical and horizontal galloping[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(1): 92-107.
- [18] Yu P, Desai Y M, Shah A H, et al. Three-degree-of-freedom model for galloping. part I: formulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(12): 2404-2425.
- [19] Yu P, Desai Y M, Popplewell N, et al. Three-degree-of-freedom model for galloping. part II: solutions[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(12): 2426-2448.
- [20] 刘军. 高雷诺数下输电导线流固耦合数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Liu J. Numerical simulation of transmission lines fluid-structure interaction at high Reynolds number[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [21] 曹宗恒. 基于重叠网格法的斜拉索流固耦合振动分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
Cao Z H. The analysis on fluid-structure coupled vibration of stay cable based on overset mesh method[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)
- [22] 耿力, 张伟政, 季国剑, 等. 覆冰输电导线流固耦合风致振动多软件协同数值解耦计算方法研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(1): 178-182, 262.
Geng L, Zhang W Z, Ji G J, et al. Decoupling numerical method for fluid-structure coupling wind-induced vibration of ice-covered transmission wire with multiple softwares[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(1): 178-182, 262. (in Chinese)
- [23] 曲宝旭. 基于CFD重叠网格方法的输电导线流固耦合研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2019.
Qu B X. Study on fluid-structure interaction of transmission line based on CFD overset grid method[D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology(Shenzhen), 2019. (in Chinese)
- [24] 梁瑜, 陈俊, 杨蕴华, 等. 输电导线流致振动响应及受力分析[J]. 电工技术, 2022(11): 63.
Liang Y, Chen J, Yang Y H, et al. Fluid-induced vibration response and force analysis of high-voltage transmission lines[J]. Electric Engineering, 2022(11): 63. (in Chinese)
- [25] 王贵春, 曹宗恒. 基于重叠网格法的斜拉索涡激振动分析[J]. 郑州大学学报(理学版), 2021, 53(3): 119.
Wang G C, Cao Z H. Analysis on vortex induced vibration of stay cable based on overset mesh[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 119. (in Chinese)
- [26] 王家斌, 高广军, 张琰, 等. 轨道车辆冰雪风洞收缩段曲线对试验段流场特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(12): 4901-4916.
Wang J B, Gao G J, Zhang Y, et al. Effect of contraction section curves on flow characteristics inside test section of ice and snow wind tunnel for railway vehicles[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(12): 4901-4916. (in Chinese)
- [27] 雷娟棉, 谭朝明. 基于Transition SST模型的高雷诺数圆柱绕流数值研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(2): 207-217.
Lei J M, Tan Z M. Numerical simulation for flow around circular cylinder at high Reynolds number based on transition SST model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(2): 207-217. (in Chinese)
- [28] 李旭亮, 霍冰, 刘习军. 匀减速风场下覆冰导线舞动的数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(2): 700-707.
Li X L, Huo B, Liu X J. Numerical simulation on galloping of iced conductor under uniformly decelerating wind field[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(2): 700-707. (in Chinese)
- [29] 张友鹏, 岳永文, 赵珊鹏, 等. 计及绞线表面粗糙度的大风区接触网正馈线舞动响应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1885-1894.
Zhang Y P, Yue Y W, Zhao S P, et al. Research on galloping response of catenary positive feeder in gale area considering surface roughness of stranded wire[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(7): 1885-1894. (in Chinese)
- [30] 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.
- [31] 陈东阳, 肖清, 顾超杰, 等. 柱体结构涡激振动数值计算[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19): 7-12, 47.
Chen D Y, Xiao Q, Gu C J, et al. Numerical calculation of vortex-induced vibration of a cylinder structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(19): 7-12, 47. (in Chinese)
- [32] 户永清, 陈正文. 一种二阶常微分方程的数值解法[J]. 四川文理学院学报, 2023, 33(05): 39-44.
Hu Y Q, Chen Z W. A numerical method for solving second order ordinary differential equations[J]. Sichuan University of Arts and Science Journal, 2020, 39(19): 7-12+47. (in Chinese)