

覆冰四分裂导线舞动数值模拟方法

卢军燕¹, 秦力², 李亚南²

1. 河南理工大学万方科技学院, 郑州 451400

2. 东北电力大学建筑工程学院, 吉林 132012

摘要 覆冰四分裂导线舞动问题严重威胁超高压线路的安全运行, 研究舞动理论可有效推动防舞技术的发展。采用具有3个平动自由度和1个扭转自由度的两节点索单元模拟分裂导线各子导线, 利用空间梁单元模拟间隔棒, 建立可考虑子导线尾流效应的舞动分析有限元模型。采用对加速度中心差分、速度向后差分的时间积分法对舞动进行非线性数值求解, 利用Matlab编制相应的计算程序, 运用该方法对典型算例的舞动进行数值模拟。通过数值模拟分析比较了考虑子导线尾流影响和不考虑子导线尾流影响情况下导线的舞动。结果表明: 该方法可有效模拟覆冰四分裂导线的舞动特性, 编写的求解程序具有较高的计算精度和效率, 可为舞动防治技术的研究提供参考。

关键词 四分裂导线; 舞动; 尾流效应; 数值模拟

中图分类号 TM726.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.15.005

Numerical Simulation of Galloping of Iced Quad-Bundled Conductor

LU Junyan¹, QIN Li², LI Yanan²

1. Wanfang College of Science & Technology, Henan Polytechnic University, Zhengzhou 451400, China

2. School of Civil Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China

Abstract The galloping of a quad-bundled conductor seriously threatens the safe operation of the issue of EHV lines, and a theoretical study of galloping can effectively help the development of anti-dance techniques. A two-node cable element with three translational and one torsional degrees of freedom at each node is utilized to imitate the bundled conductor, and a two-node space beam elements are used to simulate the spacers, thus to establish the galloping finite element analysis model with considerations of the sub-conductor wake interference. The finite element equation is solved by the time integration method and the calculation program is compiled in Matlab. The central difference method is used to deal with the acceleration and the velocity is handled by the backward difference method. Typical examples of the galloping are simulated. With numerical simulations, the dancing in consideration of the effect of the sub-conductor wake is compared with that without. It is shown that this method can effectively simulate the galloping of ice quad-bundled conductors, the algorithms enjoy high accuracy and efficiency, and can be used in the design to prevent the dancing.

Keywords quad-bundled conductor; galloping; wake interference; numerical simulation

输电导线覆冰以后, 在自然风的作用下做低频大幅振动产生舞动。舞动极易造成导线及金具的疲劳破坏, 甚至会发生线路跳闸停电、断线倒塔等严重事故, 从而造成重大经济损失。运行经验表明, 超高压线路舞动事故发生的频率和强度都在明显增加。500 kV 超高压输电线路一般采用四分裂导线, 分裂导线发生舞动时, 常常会导致铁塔损坏, 对整个输

电体系造成更严重破坏。导线的舞动问题涉及固体力学、空气动力学、电气工程学和气象学等多个学科, 是一个极其复杂的问题^[1]。目前国际上普遍接受的有 Den Hartog^[2]提出的垂直舞动理论、Nigol 等^[3]提出的横向振动与扭转振动耦合理论、Yu 等^[4]提出的三自由度偏心惯性耦合失稳机理。现场观测数据表明, 分裂导线较单导线更易发生舞动, 但是这方面的研

收稿日期: 2013-08-05; 修回日期: 2014-02-25

作者简介: 卢军燕, 讲师, 研究方向为土木工程建设, 电子邮箱: 450316648@qq.com

引用格式: 卢军燕, 秦力, 李亚南. 覆冰四分裂导线舞动数值模拟方法[J]. 科技导报, 2014, 32(15): 43-48.

究十分有限。李万平等^[5,6]对三分裂导线进行了静态和动态的特性测试,并研究了特大厚度覆冰双分裂导线的空气动力特性。张宏雁等^[7]对覆冰四分裂导线进行了风洞试验,得到了各子导线上的空气动力系数。试验数据表明,分裂导线子导线间存在尾流效应,各子导线上的气动特性差异较大。在舞动的数值模拟方面,Desai等^[8]采用三节点等参单元的有限元方法模拟导线舞动,求解过程中采用适用于线性方程的振型叠加法。何铨等^[9]采用振型叠加法的思想建立了分裂导线舞动的数学模型,对三分裂导线的覆冰舞动进行了系统的研究。基于振型叠加法的数值分析中,对系统方程进行了线性化处理,对于舞动的非线性问题,该方法存在较大误差。胡景等^[10]利用Abaqus有限元软件,通过释放梁单元自由度的方法模拟了覆冰导线舞动,考虑了覆冰导线尾流效应的影响。然而,这些研究分裂导线舞动的方法仍存在诸多不足。

基于上述原因,本文采用考虑扭转自由度的两节点索单元模拟覆冰子导线,利用空间梁单元模拟间隔棒,推导索单元和梁单元的参数矩阵,给出整体坐标系下梁索单元共节点连接的转换矩阵,考虑各子导线气动载荷的不同,建立覆冰四分裂导线的舞动分析模型。对有限元方程进行数值求解,选用典型算例对该方法及求解程序进行验证,分析考虑导线尾流效应与不考虑尾流效应时导线的舞动情况。

1 覆冰四分裂导线舞动有限元方法

导线的覆冰舞动是典型的几何非线性问题,其伸长变形一般认为在线弹性小变形范围。更新拉格朗日格式的有限元方程为

$$m\ddot{q}_{t+\Delta t} + C\dot{q}_{t+\Delta t} + K_t^{t+\Delta t}q_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} - Q_t \quad (1)$$

式中, m 为质量矩阵, $\ddot{q}_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻节点的加速度, C 为 t 时刻结构的阻尼矩阵, $\dot{q}_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻节点的速度, $K_t^{t+\Delta t}$ 为 t 至 $t+\Delta t$ 时刻结构的刚度矩阵, $q_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的节点位移增量向量, $F_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的载荷向量, Q_t 为 t 时刻的内部节点载荷向量。

1.1 两节点索单元

由于覆冰舞动分析时需要考虑导线的扭转自由度,在构建两节点索单元时考虑了导线的3个平动自由度 u, v, w 及一个扭转自由度 θ 。以 t 时刻为基准进行分析,从 t 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻的位移为 u_i , 扭转角为 θ , 单元节点位移向量 q_e 的定义式为

$$q_e = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_i \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad \theta_2]^T \quad (2)$$

式中,右下标为单元中局部节点的编号。从 t 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻单元上任意一点的位移和转角可以表示为

$$[u \quad v \quad w \quad \theta]^T = Nq_e \quad (3)$$

形状函数矩阵 N 为

$$N = [N_1 I_4 \quad N_2 I_4]$$

其中,形函数 $N_1 = S/L, N_2 = (1-S)/L, I_4$ 为 4×4 阶的单位矩阵, S 为自然坐标,沿索单元的轴向, L 是单元的长度。

单元质量矩阵采用一致质量矩阵,其表达式为

$$m_e = \int_V \rho_v N^T N dV = \int_0^L \rho N^T N ds \quad (4)$$

式中, ρ_v 为导线体密度, ρ 为导线线密度。

在变形前单元中取微段 ds , 变形后微段长度设为 ds' , 单元应变采用拉格朗日应变

$$\varepsilon_s = (ds' - ds)/ds \quad (5)$$

单元扭转应变为

$$\varepsilon_\theta = d\theta/ds \quad (6)$$

对于单元应力选用Kirchhoff应力表达式为

$$S = D\varepsilon + S_0 \quad (7)$$

式中, $D = \begin{bmatrix} A_E & 0 \\ 0 & G_J \end{bmatrix}$, $\varepsilon = [\varepsilon_s \quad \varepsilon_\theta]^T$, S_0 为单元初始应力, A_E 为拉伸刚度, G_J 为扭转刚度。

将式(7)和节点载荷代入虚功方程得

$$\int_V (\delta\varepsilon)^T S ds = (\delta q_e)^T \int_V B^T S ds = (\delta q_e)^T R_e \quad (8)$$

可得单元的割线刚度矩阵为

$$K_e = A \int_{L_e} B^T D B ds \quad (9)$$

为了便于求解舞动方程,需要求出单元的切线刚度矩阵:

$$K_{e,T} = A \int_{L_e} B^T D B ds + A \int_{L_e} \frac{dN^T}{ds} \frac{dN}{ds} S ds \quad (10)$$

气动力载荷表达式为

$$[F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_\theta]^T = \frac{1}{2} \rho_{air} u^2 d [0 \quad C_L(\alpha) \quad C_D(\alpha) \quad dC_\theta(\alpha)]^T \quad (11)$$

式中, ρ_{air} 为空气密度, d 为裸导线的直径, u 为水平风速。

C_i 为空气动力系数,通常将由风洞试验得到的气动力系数拟合为攻角 α 的3次多项近似式

$$C_i = a_{i0} + a_{i1}\alpha + a_{i2}\alpha^2 + a_{i3}\alpha^3 \quad (12)$$

由此可以计算单元节点外载荷向量

$$F_e = \int_0^{L_e} N^T [0 \quad F_y \quad F_z \quad M_\theta]^T ds \quad (13)$$

内部节点荷载向量

$$Q = \int_0^{L_e} B^T \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ M \end{bmatrix} ds \quad (14)$$

式中, T, M 分别为导线 t 时刻的轴向拉力和扭矩。

1.2 空间梁单元

两节点空间梁单元的每个节点6个自由度,变形过程中,假设梁单元体积不发生变化。梁单元节点位移及节点载荷向量表达式为

$$q = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi} \quad u_j \quad v_j \quad w_j \quad \theta_{xj} \quad \theta_{yj} \quad \theta_{zj}]^T \quad (15)$$

$$F = [N_{xi} \quad N_{yi} \quad N_{zi} \quad M_{xi} \quad M_{yi} \quad M_{zi} \quad N_{xj} \quad N_{yj} \quad N_{zj} \quad M_{xj} \quad M_{yj} \quad M_{zj}]^T \quad (16)$$

中性轴上任一点的位移向量为

$$u = [u \quad v \quad w \quad \theta_x]^T \quad (17)$$

将中性轴位移用梁端位移表示,有

$$u = N \cdot q \quad (18)$$

其中 N 为插值函数,

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_3 & 0 & 0 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & 0 & 0 & N_6 \\ 0 & 0 & N_3 & 0 & -N_4 & 0 & 0 & 0 & N_5 & 0 & -N_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $N_1 = 1 - \lambda$, $N_2 = \lambda$, $N_3 = 1 - 3\lambda^2 + 2\lambda^3$, $N_4 = \lambda l(1 - \lambda)^2$, $N_5 = 3\lambda^2 - 2\lambda^3$, $N_6 = \lambda^2 l(\lambda - 1)$, $\lambda = \frac{x}{l}$ 。

不考虑材料非线性,结构的弹性矩阵可取为

$$B_L = \begin{bmatrix} N_{1,x} & -yN_{3,xx} & -zN_{3,xx} & 0 & zN_{4,xx} & -yN_{4,xx}N_{2,x} & -yN_{5,xx} & -zN_{5,xx} & 0 & zN_{6,xx} & -yN_{6,xx} \\ 0 & 0 & 0 & -zN_{1,x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -zN_{2,x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & yN_{1,x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & yN_{2,x} & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

B_N 为 Green 应变的非线性部分与单元结点位移之间的转换矩阵,其表达式为

$$B_N = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}N_{v1}\Delta qN_{v1} + \frac{1}{2}N_{w1}\Delta qN_{w1} + \frac{1}{2}N_{u1}\Delta qN_{u1} \\ N_{w2}\Delta qN_{w1} + N_{u2}\Delta qN_{u1} \\ N_{v3}\Delta qN_{v1} + N_{u3}\Delta qN_{u1} \end{bmatrix} \quad (25)$$

为编程方便将刚度矩阵写为显式,仅保留轴力 P 对 $[K_\sigma]$ 的贡献。且认为单元轴力不变。

可得弹性刚度矩阵:

$$[K_0] = \int_V B_L^T \cdot D \cdot B_L dV \quad (26)$$

初应力刚度矩阵:

$$[K_\sigma] = \int_V (N_{u1}^T \sigma_x N_{u1} + N_{v1}^T \sigma_x N_{v1} + N_{w1}^T \sigma_x N_{w1} + N_{u1}^T \tau_{xy} N_{u2} + N_{u2}^T \tau_{xy} N_{u1}) dV + \int_V (N_{w2}^T \tau_{xy} N_{w1} + N_{u1}^T \tau_{xy} N_{w2} + N_{u1}^T \tau_{xz} N_{u3} + N_{u3}^T \tau_{xz} N_{u1} + N_{v3}^T \tau_{xz} N_{v1}) dV + \int_V (N_{v1}^T \tau_{xz} N_{v3}) dV \quad (27)$$

可得梁单元的单元刚度矩阵

$$K = [K_0] + [K_\sigma] \quad (28)$$

1.3 索单元与梁单元的连接处理

梁单元与索单元的连接,如图1所示。由于索单元节点处为4个自由度,而梁单元节点为6个自由度。取节点1为研究对象,在梁、索单元连接的公共节点处,将索单元自由度扩展为6个自由度。可理解为将索单元绕其轴向的扭转自由度分解为整体坐标系下绕坐标轴的3个扭转自由度,与梁单元的3个扭转自由度相对应,从而实现单元的连接。

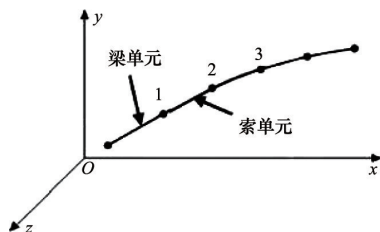


图1 梁单元和索单元的连接

Fig. 1 Connection between beam element and cable element

$$D = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (20)$$

应力-应变关系忽略二次项后可写为

$$\Delta \sigma = D \cdot (e + \eta) \approx D \cdot e \quad (21)$$

整理后可得到位移-应变关系式

$$e = B_L \cdot \Delta q \quad (22)$$

$$\eta = B_N \cdot \Delta q \quad (23)$$

B_L 为 Green 应变的线性部分与单元结点位移之间的转换矩阵,其表达式为

考虑到索单元和梁单元的构造过程中均是在局部坐标下进行的,因此在对结构进行整体分析时,必须将各种参数矩阵转化统一到同一个整体坐标系中。坐标转换矩阵表达式为

$$T = \begin{bmatrix} I_0 & & \\ & t & \\ & & I_1 \end{bmatrix}, \quad t = [\cos \alpha \quad \cos \beta \quad \cos \gamma] \quad (29)$$

式中, α 、 β 、 γ 为节点处的切向和3个坐标轴的夹角, I_0 和 I_1 为单位矩阵。

在统一坐标系下求得索单元的刚度矩阵

$$[K]_c = T^T [K] T \quad (30)$$

索单元质量矩阵

$$[m]_c = T^T [m] T \quad (31)$$

索单元气动载荷向量转换为

$$[F]_c = T^T [F] T \quad (32)$$

1.4 阻尼矩阵及边界条件

结构阻尼的确定比较困难,对于导线可以采用 Raleigh 阻尼^[11]。

$$C = \alpha m + \beta K \quad (33)$$

$$c_{ij} = \alpha_i m_{ij} + \beta_j k_{ij}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{2\omega_i \omega_j (\omega_i \xi_j - \omega_j \xi_i)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (34)$$

$$\beta_{ij} = \frac{2(\omega_i \xi_i - \omega_j \xi_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2}$$

式中, c_{ij} 为结构阻尼矩阵对应位置的元素, m_{ij} 为质量矩阵对应位置的元素, k_{ij} 为刚度矩阵中对应位置的元素, ξ_i 、 ξ_j 分别为对应于频率 ω_i 、 ω_j 的阻尼比。

邻档输电导线和绝缘子串均采用线性弹簧模拟,邻跨导线等效弹簧刚度为 K_{c1} ^[12],绝缘子串在 x 和 z 方向的等效弹簧刚度为 K_x 和 K_z ^[13]。

$$\frac{1}{K_{c1}} = \frac{L_0}{AE} + \frac{P_y^2 L_1^2}{12T^3} \quad (35)$$

$$\begin{cases} K_x = \frac{1}{L_2} \left(P_y L_0 + \frac{m_i}{2} \right) \\ K_z = \frac{2T}{L_0} + K_x \end{cases} \quad (36)$$

式中, L_0 为无张力时导线原长, E 为导线的弹性模量, P_y 为单位长度导线受到的垂直方向上的载荷, L_1 为档距, T 为静止状态下张力的水平分量, L_2 为绝缘子串的长度, m_i 为绝缘子串的质量。

2 动力平衡方程求解

2.1 递推公式推导

对加速度采用中心差分, 对速度采用向后差分

$$\ddot{q}_i = \frac{1}{(\Delta t)^2} (q_{i+\Delta t} - 2q_i + q_{i-\Delta t}) \quad (37)$$

$$\dot{q}_i = \frac{1}{2\Delta t} (3q_i - 4q_{i-\Delta t} + q_{i-2\Delta t}) \quad (38)$$

将式(38)代入式(1)得

$$m \frac{1}{(\Delta t)^2} (q_{i+\Delta t} - 2q_i + q_{i-\Delta t}) + C\dot{q}_i + Kq_i = F_i - Q_i \quad (39)$$

整理式(39)可得采用差分法求解方程的递推式

$$m \frac{1}{(\Delta t)^2} q_{i+\Delta t} = F_i - Q_i - Kq_i - m \frac{1}{(\Delta t)^2} (2q_i - q_{i-\Delta t}) - C\dot{q}_i \quad (40)$$

F_i 是 q_i 和 \dot{q}_i 的函数, 式(39)中 q_i 已知, \dot{q}_i 可以通过式(38)求得。 q_i 和 \dot{q}_i 为已知后, 可以通过函数关系求得 F_i 。此时递推公式右部都是已知量, 递推可以进行下去。

在递推求解起步时, 初始节点速度 \dot{q}_0 为已知, 可由 $q_{-\Delta t} = \Delta t \dot{q}_0 - \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{q}_0$, 求出 $q_{-\Delta t}$ 后即可通过式(40)递推求解。

2.2 计算程序

利用 Matlab 编制计算程序, 流程如图 2 所示。时间间隔 $\Delta t = 0.005$ s, 模拟时间为 2000 s。

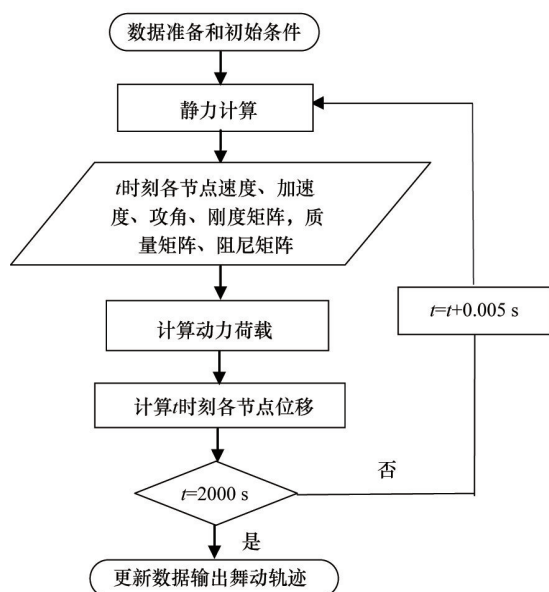


图 2 舞动计算流程

Fig. 2 The flow chart of galloping calculation

3 数值算例

3.1 验证算例

选取文献[10]中的数值算例, 算例选取档距为 100 m 的四分裂导线, 两端固定, 导线型号为 4XLGJ-400/50, 直径为 27.6 mm, 许用应力为 105.9 MPa。采用索单元模拟各子导线, 梁单元模拟间隔棒。四分裂导线简化模型如图 3 所示。

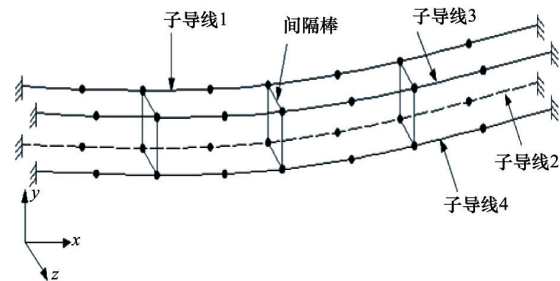
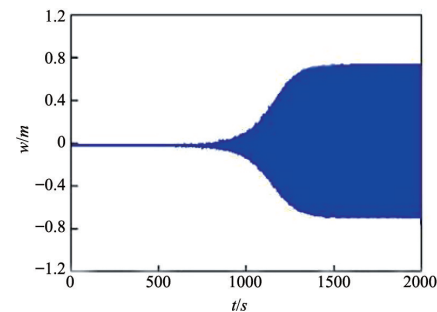


图 3 四分裂导线简化模型

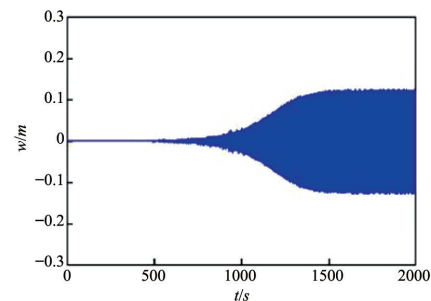
Fig. 3 Model of quad-bundled conductor

将每根导线离散为 50 个具有扭转自由度的索单元, 间隔棒采用 4 个梁单元模拟。不考虑子导线尾流影响。4 根子导线均采用文献[10]风洞试验中子导线 1 的空气动力系数。轴向刚度, 31.6×10^6 N; 扭转刚度, $1056 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$; 水平拉力, 45×10^3 N; 单位长度质量, 1.732 kg/m ; 单位长度转动惯量, $14.82 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

图 4 给出了由本文方法计算得到的子导线 1 中点位移时程, 可以看出与覆冰单导线舞动类似, 分裂导线舞动时竖向振幅远大于水平振幅。



(a) 竖向位移



(b) 水平位移

图 4 子导线 1 中点位移时程 (本文方法计算)

Fig. 4 Galloping track at mid-span 1 (with the method of this paper)

图5给出的一个周期内4根子导线的舞动轨迹,间隔棒的存在约束了各子导线的运动状态,4根子导线运动轨迹比较同步,各子导线振动幅度相差不大。与文献[10]对比子导线1中点处的竖向位移、水平位移数值相差不大,舞动位移时程较为一致。本文的分析方法及计算程序是合理可靠的,可以用来分析分裂导线的舞动。

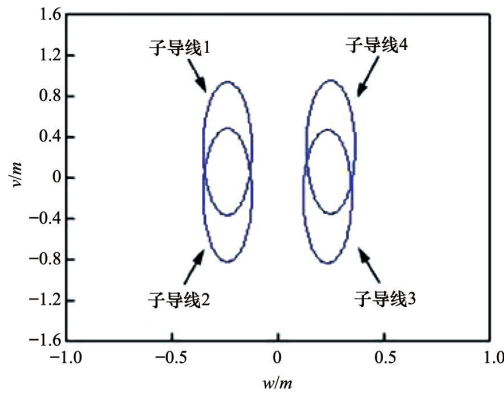


图5 各子导线中点某一周期的舞动轨迹
Fig. 5 Galloping track of mid-spacers

3.2 考虑子导线尾流影响的舞动数值模拟

选取单档四分裂覆冰导线档距为450 m。分裂导线两端施加固定约束。各子导线上的初始张力大小都是25 kN,分裂导线子导线布置方式为四方形,四方形边长为0.45 m。间

隔棒的质量为4.8 kg,档距内共布置8个均匀分布的间隔棒。风向与导线走向垂直,风速为14 m/s。覆冰导线为新月型,覆冰厚度为12 mm。覆冰导线的空气动力系数选用文献[10]中实验数据:弹性模量, 7×10^{10} N/m²;扭转刚度, 101 N·m²;裸导线直径, 27.6 mm;裸导线截面面积, 451.55 mm²; y方向质量矩, 0.459×10^{-3} kg·m²/m; y方向阻尼比, 5×10^{-4} ;单位长度质量, 1.732 kg/m;单位长度转动惯量, 2.68×10^{-4} kg·m²。

3.3 不考虑子导线尾流影响的舞动数值模拟

为真实反映子导线尾流对舞动的影响,在分析考虑子导线尾流影响的数值算例后还需要分析不考虑子导线尾流影响的情况。因此针对上面的模型改变施加在各子导线上的空气动力荷载,得到了不考虑尾流影响的情况。选取文献[10]中子导线1上的气动力参数,将其拟合出的气动力荷载施加到4根子导线上进行舞动模拟。

对比图6和图7可以看出,考虑子导线尾流影响时,导线舞动的振幅较大。图6中子导线1中点竖向振幅为10.93 m,水平振幅为6.96 m;而图7中导线1中点竖向振幅为10.02 m,水平振幅为6.02 m。由此可以得到,分裂导线覆冰以后,由于各子导线间距相对较小,在风的作用下会产生相互影响,考虑在受到该影响时,计算所得的导线舞动振动幅值均比较大,且起舞时间较短,表明真实情况下分裂导线更易发生舞动,且舞动幅值更大,舞动更强烈。由于分裂导线档距一般较大,因此分裂导线舞动产生的破坏更为严重。

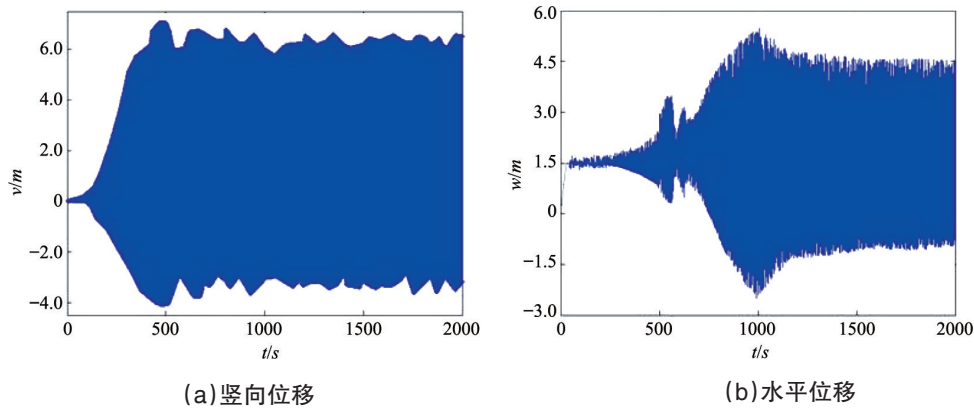


图6 子导线1中点位移时程(考虑子导线尾流影响)

Fig. 6 Galloping track at mid-span 1 (with the impact of the sub-stream end of the wire considered)

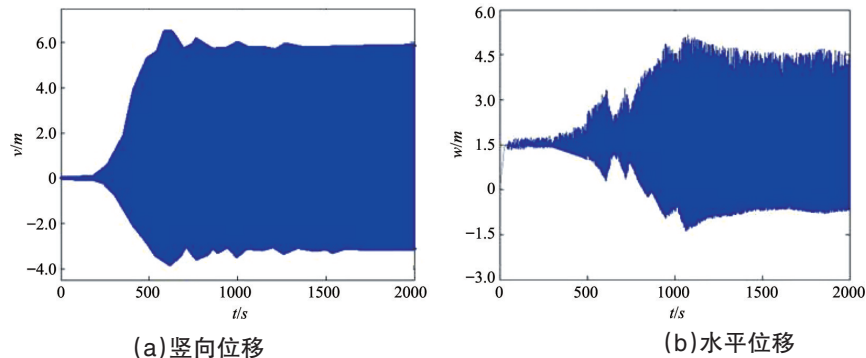


图7 子导线1中点位移时程(不考虑子导线尾流影响)

Fig. 7 Galloping track at mid-span 1 (without considering the impact of the sub-stream end of the wire)

4 结论

针对四分裂导线的结构特征,分别构建了具有扭转自由度的两节点索单元和空间梁单元。基于有限元理论,运用索单元离散分裂导线各子导线,利用梁单元离散间隔棒,建立了可以考虑尾流效应的覆冰四分裂导线舞动的有限元动力方程,通过数值算例验证了方法和求解程序的正确性。对典型算例的模拟分析,所得结果可以很好地反映分裂导线的舞动特性。通过数值模拟分析了考虑子导线尾流影响和不考虑子导线尾流影响情况下导线的舞动。分析结果表明,考虑子导线尾流的影响在各子导线上施加不同气动力载荷时,得到的舞动振动幅值更大。该方法可为四分裂导线的舞动防治技术提供理论参考。

参考文献(References)

- [1] 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 Yinglong, Li Guoxing, Long Chuanyong. Transmission line galloping [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [2] Den Hartog J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. AIEE Transaction, 1932, 51(6): 1074-1086.
- [3] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping-part II torsional mechanics [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(2): 708-719.
- [4] Yu P, Desai Y M, Shah A. Three-degree-of-freedom model for galloping. Part I: Formulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(12): 2404-2425.
- [5] 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): 427-434.
Li Wanping, Yang Xinxiang, Zhang Lizhi. Dynamic static aerodynamic characteristics of the galloping of bundled ice power transmission lines [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1995, 13(4): 427-434.
- [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] 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.
- [8] Desai Y M, Yu P, Popplewell N. Finite element modeling of transmission line galloping[J]. Computers & Structures, 1995, 57(3): 407-420.
- [9] 何程, 赵高煜, 李上明. 大跨越分裂导线的静力求解[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 34-37.
He Zeng, Zhao Gaoyu, Li Shangming. Static analysis and computation of long-span multi-conductor transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 34-37.
- [10] 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 Bo, Hu Jing, Zhou Song, et al. Numerical simulation and parameter analysis of galloping for iced quad-bundled conductor[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(3): 310-316.
- [11] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Liu Jingbo, Du Xiuli. Structural dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [12] Veletsos A S, Dargre G R. Dynamic stiffness of parabolic cables[J]. Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1983, 11(3): 367-401.
- [13] Mathur R K, Shah A H, Trainor P G S. Dynamics of a guyed transmission tower system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, PWRD-2(3): 908-916.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国科协、财政部启动2014年基层科普行动计划

为贯彻党的十八大精神,继续深入推进《全民科学素质行动计划纲要(2006—2010—2020年)》在基层的实施,充分调动全社会深入基层、贴近实际、贴近生活、贴近群众开展科普工作的积极性和创造性,中国科协、财政部于2014年4月18日共同下发了《关于组织实施2014年“基层科普行动计划”的通知》,正式启动实施2014年“基层科普行动计划”。

2014年,中央财政继续投入“基层科普行动计划”专项资金4亿元,在全国奖补962个农村专业技术协会,386个农村科普示范基地,558名农村科普带头人,5个少数民族科普工作队,500个科普示范社区。

2014年“基层科普行动计划”继续由各级科协和财政部门共同完成。通过该计划的实施,进一步把科技要素引入农村和城镇社区,促进基层科普活动的广泛开展,提高基层科普服务能力,提高基层群众的科学文化素质,助力社会主义新农村建设及新型城镇化建设,推进创新驱动发展和生态文明建设,为全面建成小康社会做出贡献。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15572080.html>。