

覆冰输电线路分裂导线舞动的建模与数值模拟

谢增¹, 刘吉轩¹, 刘超群^{1,2}, 陈花玲¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 中国电力科学研究院科技部, 100192, 北京)

摘要: 针对以往在覆冰分裂导线舞动的理论模型中缺少对分裂导线扭转刚度进行分析的问题, 提出了一种改进的舞动分析模型. 将分裂导线等效为单导线, 在现有的对单导线舞动建模研究的基础上, 采用假设模态法, 利用 Hamilton 变分原理建立了覆冰导线在垂直、水平和扭转方向的动力学模型. 考虑到分裂导线和单导线在扭转刚度上的不同, 引入了一种分裂导线扭转刚度的计算方法, 推导出分裂导线固有频率的计算公式, 并将它们应用到所建模型中, 使模型能够分析覆冰分裂导线的舞动, 用经典 Runge-Kutta 法对模型进行求解, 从而实现了覆冰分裂导线的数值模拟. 以中山口大跨越分裂导线舞动作为实例, 由所建立的模型得到的数值模拟结果与实际观测值基本一致, 从而验证了模型和数值模拟方法的准确性.

关键词: 分裂导线; 扭转刚度; 舞动; 数值模拟

中图分类号: TM75; O32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0069-06

Modelling and Simulation for Iced Bundle Conductor Galloping

XIE Zeng¹, LIU Jixuan¹, LIU Chaoqun^{1,2}, CHEN Hualing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Technology Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Considering torsional stiffness of bundle conductors, an improved model is proposed to comprehensively incarnate and predict iced bundle transmission line galloping. A bundle line is modeled as an equivalent single conductor for taking advantages of single conductor in the previous research. A dynamic model, which accommodates interactions of the vertical, horizontal and torsional movements, is set up with Hamilton variational principle and by assumed mode method. According to the difference of torsional stiffness between bundle and single conductors, a new algorithm for calculating the torsional stiffness of bundle transmission lines is presented, and then the natural frequency of bundle conductors is analyzed. Taking the torsional stiffness and natural frequency of bundle conductors into account, the model enables to describe galloping of bundle conductors. Numerical simulation is performed with Runge-Kutta method for the bundle conductors with large span in Zhongshankou and shows a coincident result with the real observation.

Keywords: bundle conductor; torsional stiffness; galloping; numerical simulation

输电线舞动是覆冰导线在风激励下产生的低频率(约为 0.1~3 Hz)和大振幅(约为导线直径的 5~300 倍)的振动, 它对输电线路的危害极大, 造成的后果包括输电线间短路、接地短路、电弧烧伤、断股、

断线、倒塔、金具损害等^[1]. 超、特高压输电线路一般采用多分裂导线, 统计数据表明, 分裂导线比单导线更易发生舞动^[2]. 因此, 建立分裂导线舞动的数学模型以及研究计算机仿真技术, 对解决输电线路舞动

问题有着重要的指导意义。

以往对输电线路舞动的仿真主要集中在单导线上,采用的舞动模型包括集中质量模型和连续体模型,最初的研究都是在集中质量模型上进行,包括只考虑垂直方向的振动模型,以及考虑垂直、水平、扭转方向及其之间的耦合振动模型^[3]. Yu 等人^[4-5]将导线看作连续系统,采用假设模态法建立了覆冰单导线在水平、垂直、扭转方向上的动力学模型,并求解风振响应,计算结果与实测值较吻合. Desai 等人^[6]建立了三自由度等参数单元模拟导线,用有限元法研究了舞动响应. 分裂导线是由各子导线通过间隔棒的约束构成的,多数情况下分裂导线总是整体舞动,各子导线近似同步运动,因此在分裂导线的建模仿真方面,主要是将分裂导线直接等效为单根导线^[2],或者对等效单导线附加间隔棒的约束^[7],利用已有的单导线动力学模型进行分析. 由于目前分裂导线扭转刚度的计算还存在着不足,因此现有的数学模型还不能很好地分析分裂导线的舞动.

实际分裂导线的舞动表现为低阶振动,可将导线系统离散为少数单元组成的多自由度系统,因此比有限元法更为简单的假设模态法也能很好地分析导线的舞动. 本文采用文献^[3]给出的假设模态法建立动力学模型,通过引入分裂导线扭转刚度,使得模型能够同时用于模拟单导线和分裂导线的舞动.

1 覆冰分裂导线舞动的动力学模型

建模的假设条件:①由于本文研究的是单跨分裂导线,因此不考虑邻跨的影响;②建立的舞动模型仅考虑导线在垂直、水平以及扭转方向的振动,不考虑导线在线路方向的运动,因此不计导线沿线路方向的惯性力和阻尼力,同时可忽略线路两端金具和相邻导线的影响,认为线路两端固结;③认为分裂导线舞动时各子导线是同步振动的.

1.1 数学模型的建立

采用假设模态法建立覆冰分裂导线舞动的数学模型^[3],根据假设条件③,可以用其中一根子导线建立分裂导线舞动时的位移关系,如图1所示. 以其中一根子导线建立分裂导线的固定坐标系 $OXYZ$,在子导线的轴心建立导线的动坐标系 $oxyz$,而子导线上任一点 (s, y, z) 在 t 时刻固定坐标系上的位移为

$$\left. \begin{aligned} u(s, y, z, t) &= Q(s, t) \\ v(s, y, z, t) &= V(s, t) - x\theta(s, t) \\ h(s, y, z, t) &= H(s, t) + y\theta(s, t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: s 为导线距原点的弧长; u, v, h 分别为子导线

截面上任一点在 X, Y, Z 上的位移; Q, V, H 分别为子导线轴心在 X, Y, Z 轴上的位移; θ 为导线绕轴心的扭转角.

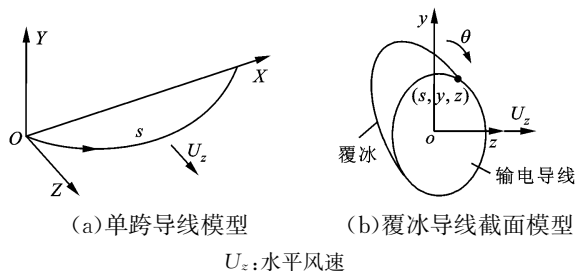


图1 输电线模型

根据假设条件②,不考虑导线在线路方向的位移,取 $Q(s, t)$ 为 0,对 $V(s, t)$ 、 $H(s, t)$ 和 $\theta(s, t)$ 运用假设模态法展开得

$$\left. \begin{aligned} V(s, t) &= \sum_{i=1}^n q_{vi}(t) f_{vi}(s) \\ H(s, t) &= \sum_{i=1}^n q_{hi}(t) f_{hi}(s) \\ \theta(s, t) &= \sum_{i=1}^n q_{\theta i}(t) f_{\theta i}(s) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $q_{vi}, q_{hi}, q_{\theta i}$ 和 $f_{vi}, f_{hi}, f_{\theta i}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为广义坐标和相对应的振型函数; i 表示振型阶数.

对于垂直方向(Y 轴)的第 i 阶振型函数 f_{vi} ,当 i 为奇数时,其对称阵振型函数^[3]为

$$f_{vi} = 1 - \tan\left(\frac{\gamma_i}{2}\right) \sin\left(\frac{\gamma_i s}{L}\right) - \cos\left(\frac{\gamma_i s}{L}\right) \quad (3)$$

γ_i 由下式确定

$$\left. \begin{aligned} \tan\left(\frac{\gamma_i}{2}\right) &= \frac{\gamma_i}{2} - \frac{4}{\lambda^2} \left(\frac{\gamma_i}{2}\right)^3 \\ \lambda^2 &= lAE / ((T_0 L)(Wl/T_0)^2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: L 为导线线长; A 为裸导线截面积; W 为导线单位长度的垂直载荷; E 为导线的综合弹性模量; T_0 为导线的初始水平张力; l 为档距.

当 i 为偶数时,反对称振型函数为

$$f_{vi} = \sin\left(\frac{i\pi s}{L}\right) \quad (5)$$

对于水平、扭转角方向(Z 轴、 θ)的第 i 阶振型函数为

$$f_{hi} = f_{\theta i} = \sin\left(\frac{i\pi s}{L}\right) \quad (6)$$

根据实际观测结果^[8]可知,导线舞动的振型一般为 1~2 阶,因此只取前 2 阶模态,则有

$$\left. \begin{aligned} V(s, t) &= \mathbf{q}_v^T \boldsymbol{\Phi}_v; \quad H(s, t) = \mathbf{q}_h^T \boldsymbol{\Phi}_h; \quad \theta(s, t) = \mathbf{q}_\theta^T \boldsymbol{\Phi}_\theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_v &= [q_{v1}(t), q_{v2}(t)]^T; & \mathbf{q}_h &= [q_{h1}(t), q_{h2}(t)]^T \\ \mathbf{q}_\theta &= [q_{\theta1}(t), q_{\theta2}(t)]^T; & \boldsymbol{\varphi}_v &= [f_{v1}, f_{v2}]^T \\ \boldsymbol{\varphi}_h &= [f_{h1}, f_{h2}]^T; & \boldsymbol{\varphi}_\theta &= [f_{\theta1}, f_{\theta2}]^T \end{aligned}$$

为建立分裂导线舞动的运动方程,从能量角度入手,采用 Hamilton 变分原理得到

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(V_k - V_e) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = 0 \quad (8)$$

式中: V_k 、 V_e 分别为分裂导线的总动能和总势能; W_{nc} 为非保守力所作的功; δ 为指定时间区间内所取得的一次变分. 由于忽略了导线线路方向的运动, 则覆冰分裂导线的总动能可表示为

$$V_k = \frac{n}{2} \int_0^L \left[\int_A \rho_1 (\dot{v}^2 + \dot{h}^2) dA + \int_{A_0} \rho_2 (\dot{v}^2 + \dot{h}^2) dA \right] ds \quad (9)$$

式中: n 为分裂导线的子导线数; A_2 为覆冰截面积; ρ_1 为裸导线密度; ρ_2 为覆冰密度.

将式(1)~式(7)代入式(9)得

$$V_k = \frac{n}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{q}}^T = [\dot{\mathbf{q}}_v \quad \dot{\mathbf{q}}_h \quad \dot{\mathbf{q}}_\theta]^T \quad (11)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵.对 V_k 进行一次变分得到

$$\delta V_k = -n\delta\mathbf{q}^T \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} \quad (12)$$

导线的振动为大位移小应变,总势能是由拉伸应变能、扭转应变能以及初应力应变能组成,即

$$V_e = \int_0^L \frac{n}{2} \left[AE \epsilon_s^2 + \frac{K_T \epsilon_\theta^2}{n} + 2B_T \epsilon_s \epsilon_\theta + 2M_0 \epsilon_\theta + 2T_0 \frac{\partial s}{\partial X} \epsilon_s \right] ds \quad (13)$$

式中:当 $n>1$ 时, K_T 表示分裂导线的等效单位长度的扭转刚度,当 $n=1$ 时, K_T 为单导线的单位长度的扭转刚度; B_T 为轴向-扭转耦合刚度; M_0 为初始偏心覆冰的偏心力矩; ϵ_s 为子导线在弧长方向的拉格朗日应变; ϵ_θ 为子导线的扭转应变. ϵ_s 、 ϵ_θ 的表达式^[3]为

$$\begin{aligned}\epsilon_s &= \frac{\partial Y}{\partial s} \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial Z}{\partial s} \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial V}{\partial s} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial s} \right)^2 \right]; \\ \epsilon_\theta &= \frac{\partial \theta}{\partial s}\end{aligned}\quad (14)$$

将式(1)~式(7)、式(14)代入式(13),并对总势能做一次变分,得到

$$\delta V_e = n\delta\mathbf{q}^T \mathbf{K}\mathbf{q} + n\delta\mathbf{q}^T \mathbf{F}_{T1} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{F}_T$ 为静力矩阵.

根据空气动力学的知识,当风吹到圆形截面上时,只产生与风向一致的阻力,而当风吹到因覆冰而

形成非圆截面的导线上时,既会产生阻力 F_D ,也会产生与阻力方向垂直的升力 F_L ,以及空气动力扭矩 m_T ,它们的大小由截面的攻角 α 确定. 在单位长度导线上的气动力为

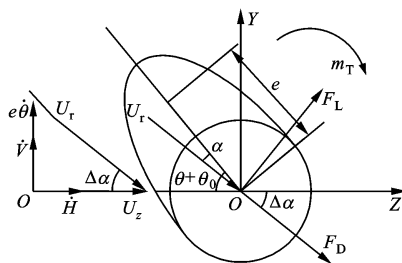
$$F_L = \frac{1}{2} \rho_a U_r^2 d_e C_L(\alpha) \quad (16)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_a U_r^2 d_e C_D(\alpha) \quad (17)$$

$$m_T = \frac{1}{2} \rho_a U_r^2 d_e^2 C_M(\alpha) \quad (18)$$

式中: ρ_a 为空气密度; d_e 为裸导线直径; U_r 为相对风速, $U_r \approx U_\infty$; C_L 、 C_D 、 C_M 分别为空气动力的升力系数、阻力系数和扭矩系数, 它们与 α 相关, 可通过风洞试验得到。

覆冰导线所受气动力如图 2 所示.



θ_0 :导线的初始凝冰角; e :覆冰的偏心距

图 2 覆冰导线截面的受力情况

图 2 中 $\Delta\alpha$ 的表达式为

$$\Delta\alpha = \arctan \frac{\dot{V} + e\dot{\theta}}{\dot{H} + U_x} \approx \frac{\dot{V} + e\dot{\theta}}{U_x} \quad (19)$$

$$\alpha = \theta + \theta_0 - \Delta\alpha \approx \theta + \theta_0 - \frac{\dot{V} + e\dot{\theta}}{U_\tau} \quad (20)$$

单位长度导线在垂直、水平方向上的空气动力载荷为

$$\left. \begin{aligned} F_Y &= F_L \cos \Delta \alpha - F_D \sin \Delta \alpha = \frac{1}{2} \rho_a U_r^2 d_c C_Y(\alpha) \\ F_Z &= F_L \sin \Delta \alpha - F_D \cos \Delta \alpha = \frac{1}{2} \rho_a U_r^2 d_c C_Z(\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: C_Y 、 C_Z 分别为垂直、水平方向上的空气动力系数.

取阻尼矩阵

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{c}_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{c}_{33} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{11} &= 2\xi_Y \omega_Y m_{11} \\ c_{22} &= 2\xi_Z \omega_Z m_{22} \\ c_{33} &= 2\xi_\theta \omega_\theta m_{33} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$\boldsymbol{\omega}_Y = \begin{bmatrix} \omega_{Y_1} & 0 \\ 0 & \omega_{Y_2} \end{bmatrix}; \boldsymbol{\omega}_Z = \begin{bmatrix} \omega_{Z_1} & 0 \\ 0 & \omega_{Z_2} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\omega}_\theta = \begin{bmatrix} \omega_{\theta_1} & 0 \\ 0 & \omega_{\theta_2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: ξ_Y, ξ_Z, ξ_θ 为对应垂直、水平、扭转角方向上的阻尼比; m_{11}, m_{22}, m_{33} 为 $\mathbf{M}$ 阵中相应的对角元素; $\omega_{Y_i}, \omega_{Z_i}, \omega_{\theta_i}$ 分别为对应垂直、水平、扭转角方向上不计阻尼、不计耦合的第 i 阶固有频率。

非保守力做功可表示为

$$W_{nc} = n \int_0^L (F_Y V + F_Z H + M_\theta \theta) ds - \frac{n}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} \quad (25)$$

将式(1)~式(7)代入式(25)并做一次变分,得到

$$\delta W_{nc} = n \delta \mathbf{q}^T \mathbf{F}_{T2} - n \delta \mathbf{q}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} \quad (26)$$

式中: $\mathbf{F}_{T2}$ 为空气动力矩阵。将式(12)、(15)及式(26)代入式(8),得到覆冰分裂导线的运动微分方程

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F}_{T2} - \mathbf{F}_{T1} \quad (27)$$

式(27)可展开为由 6 个方程组成的方程组,可选用 4 级 4 阶古典 Runge-Kutta 法进行求解。

1.2 分裂导线扭转刚度的计算

由式(13)可知,本文所建立的数学模型在分析分裂导线和单导线舞动上的主要区别在于扭转刚度的选取,单导线的扭转刚度是导线自身的固有特性,而分裂导线的扭转刚度是分裂导线绕分裂圆中心扭转时整体具有的刚度,其值远大于单导线扭转刚度。目前,分裂导线扭转刚度的计算公式^[1,9-10]与实测值相比尚有较大的误差,因此限制了对分裂导线舞动研究。本文引入一种新的理论公式来计算分裂导线的扭转刚度,能够更精确地计算分裂导线的扭转刚度^[11],即

$$K_e = \frac{2nK_s k}{l} \cos \beta + \frac{nTd^2 l}{4x(l-x)} U \quad (28)$$

式中: K_e 为分裂导线在沿线路方向(X 轴)距原点处的扭转刚度; d 为分裂圆直径; K_s 为单导线单位长度的扭转刚度; k 为次档距数目; β 为高差角; U 为权重项,对于 2 分裂导线, $U=1$, 对于 4 分裂导线 $U=\sin^2 \varphi$, 对于 3 分裂导线, $U=0.5+\sin^2 \varphi$, 其中 φ 为间隔棒的初始角且取锐角,如图 3 所示。导线扭转时的实际水平张力

$$T = [W^2 l^2 EA \cos^2 \beta + Wl \cos \beta (WlEA \cos \beta)^2 + 4EAT_0(24T_0^2 + W^2 l^2 \cos^2 \beta)]^{1/2} / (48T_0^2 + 2W^2 l^2 \cos^2 \beta) \quad (29)$$

根据式(28)可以得到

$$K_T = K_e \frac{x(l-x)}{l} = \frac{2nK_s kx(l-x)}{l^2} \cos \beta + \frac{nTd^2 U}{4} \quad (30)$$

1.3 导线垂直水平及扭转振动的固有频率

由于输电导线是一根细长的柔性体,横向弯曲刚度很小,因此可以忽略。同时,不考虑导线两端的高度差以及弧垂,这样在分析单根导线的垂直水平振动时,可将导线视为张紧弦^[12],从而得到在 Y, Z 轴方向振动的各阶固有频率

$$\omega_{Y_i} = \omega_{Z_i} \approx \frac{i\pi}{l} \left(\frac{T_0}{p} \right)^{1/2} \quad (31)$$

式中: p 为导线单位长度的质量。

在分析扭转振动时,忽略导线弧垂,将单导线看作圆截面等直杆^[12],由此建立的扭转自由振动微分方程为

$$\left. \begin{aligned} J \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial t^2} - K_s \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} dx &= 0 \\ \theta(0, t) &= 0, \quad \theta(l, t) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$J = p \frac{d^2}{8} dx \quad (33)$$

式中: J 为 dx 段导线绕 x 轴的转动惯量。根据式(32),可以求出单导线各阶扭转固有频率为

$$\omega_{\theta_i} \approx \frac{2(2)^{1/2} i\pi}{d_e l} \left(\frac{K_s}{p} \right)^{1/2} \quad (34)$$

当分裂导线做横向振动时,由于有间隔棒的约束,每根子导线可以认为是同步振动的,同时间隔棒的质量相对于导线质量可忽略不计,因此可将其等效为单导线的横向振动,其固有频率可用式(31)来计算。由于分裂导线的特殊结构,在分析分裂导线的扭转时,可将分裂导线等效为 1 个圆截面等直杆(见图 4),并假设在振动过程中截面保持不变。

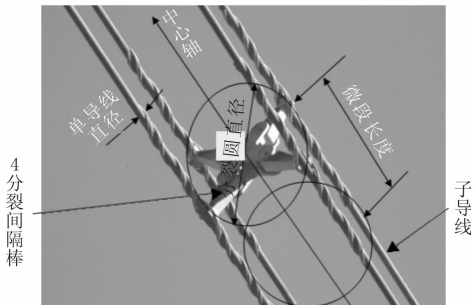


图 4 分裂导线等效为圆截面等直杆的示意图

对于 dx 段分裂导线,其绕 x 轴的转动惯量为

$$J = np \left(\frac{d^2}{4} + \frac{d_e^2}{8} \right) dx \tag{35}$$

将式(30)、式(35)代入式(32),并沿档距求积分,得到的全档分裂导线的扭转自由振动微分方程为

$$\left. \begin{aligned} &\int_0^l p \left(\frac{d^2}{4} + \frac{d_e^2}{8} \right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} dx - \\ &\int_0^l \left(\frac{Td^2U}{4} + \frac{2K_s kx(l-x)\cos\beta}{l^2} \right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx = 0 \\ &\theta(0,t) = 0, \theta(l,t) = 0 \end{aligned} \right\} \tag{36}$$

记第 i 阶的扭转主振动为

$$\theta_i(x,t) = f_{\theta_i}(x)q_{\theta_i}(t) \tag{37}$$

忽略导线弧垂,根据式(6),振型函数为

$$f_{\theta_i}(x) = \sin\left(\frac{i\pi}{l}x\right) \tag{38}$$

将式(37)、式(38)代入式(36)有

$$\begin{aligned} &\frac{2lp}{\pi} \left(\frac{d^2}{4} + \frac{d_e^2}{8} \right) \ddot{q}_{\theta_i} + \\ &\left\{ \frac{Td^2U\pi i^2}{2l} + \frac{2K_s k \cos\beta [4 + (i-1)\pi^2]}{l\pi} \right\} q_{\theta_i} = 0 \end{aligned} \tag{39}$$

由式(39)即可求出分裂导线的各阶扭转振动固有频率

$$\begin{aligned} &\omega_{\theta_i} = \\ &\left\{ \frac{Td^2U\pi i^2/2l + (2K_s k \cos\beta [4 + (i-1)\pi^2]/l\pi)}{2lp/\pi(d^2/4 + d_e^2/8)} \right\}^{1/2} \end{aligned} \tag{40}$$

2 算例验证与分析

1987 年 2 月,湖北中山口大跨越 3 分裂导线发生强烈舞动,当时风速为 4~18 m/s,风向垂直于线路走向,覆冰为 15 mm,垂向最大舞动峰峰值达到 10 m. 采用本文提供的数学模型分析这次舞动,线路的参数如下: $n = 3$; $l = 1\,055\text{ m}$; $k = 18$; $T_0 = 92\,612\text{ N}$; 间隔棒为等腰三角形, $d = 0.92\text{ m}$, $\varphi = 30^\circ$, $K_s = 400\text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$; $B_T = 0$; $d_e = 32.76\text{ mm}$; $W = 2.755 \times 9.8\text{ N/m}$; $E = 100\,940\text{ N/mm}^2$; $\xi_Y = \xi_Z = 0.05$; $\xi_\theta = 0.3$; $\theta_0 = 30^\circ$; $U_z = 10\text{ m/s}$; $\rho_a = 1.213\text{ kg/m}^3$; $\rho_2 = 900\text{ kg/m}^3$. 中山口大跨越空气动力试验曲线如图 5 所示. 采用关于 α 的拟合函数得到

$$\left. \begin{aligned} C_Y &= -0.0427 - 2.3498\alpha + 0.0139\alpha^2 + 0.2747\alpha^3 \\ C_Z &= 1.9358 - 0.3013\alpha - 0.5891\alpha^2 + 0.0442\alpha^3 \\ C_M &= 0.5\cos(2\alpha) - 0.5 \end{aligned} \right\} \tag{41}$$

本文方法的数值模拟结果如图 6 所示. 在振动

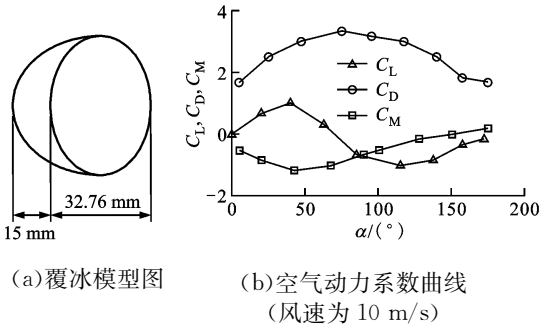


图 5 中山口舞动治理工程空气动力的试验数据^[1]曲线

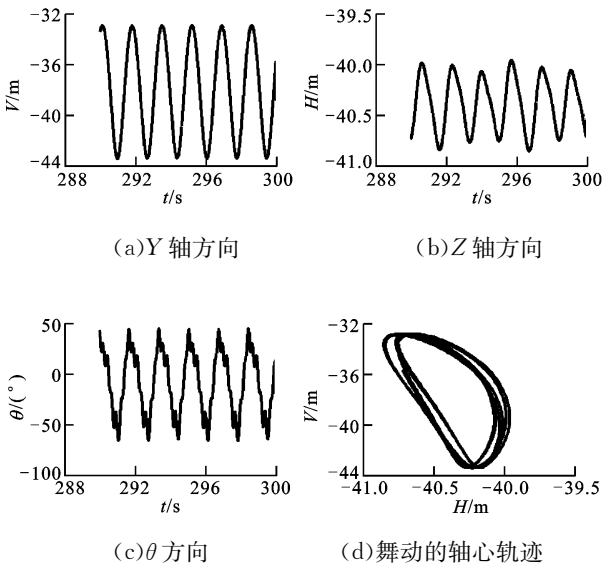


图 6 中山口大跨越档距中点处的舞动数值模拟结果

稳定后,导线档距中点处在垂直方向的舞动峰峰值约为 10.5 m,与实际观测值一致,表明本文方法的正确性. 另外,在水平方向的舞动峰峰值约为 0.9 m,扭转振动的峰峰值为 110° ,舞动的轨迹近似椭圆.

3 结 论

本文考虑了分裂导线与单导线在扭转刚度上的区别,引入了分裂导线扭转刚度计算的新方法,并采用假设模态法建立了分裂导线舞动的数学模型. 运用本文模型对中山口大跨越分裂导线发生的舞动实例进行了仿真,得到的舞动结果与观测值基本吻合,从而验证了模型和仿真方法的正确性. 本文的研究成果可为进一步分析分裂导线的舞动及防舞动技术研究提供了一种有效途径.

参考文献:

[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,2002:141-144.
[2] ZHANG Q, POPPLEWELL N, SHAH A H. Gallo-

- ping of bundle conductor[J]. Sound and Vibration, 2000, 234(1): 115-134.
- [3] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping; torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 708-720.
 - [4] YU P, POPPLEWELL N, SHAH A H, et al. Three-degree-of-freedom model for galloping: Part I Formulation [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(12): 2404-2425.
 - [5] YU P, POPPLEWELL N, SHAH A H, et al. Three-degree-of-freedom model for galloping: Part II Solutions [J]. ASME Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(12): 2426-2448.
 - [6] DESAI Y M, YU P, POPPLEWELL N, et al. Finite element modelling of transmission line galloping [J]. Computers & Structures, 1995, 57(3): 407-420.
 - [7] 刘小会, 严波, 张宏雁, 等. 分裂导线舞动非线性有限元分析方法 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 129-133.
LIU Xiaohui, YAN Bo, ZHANG Hongyan, et al. Non-linear finite element analysis for galloping of iced bundle conductors [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 129-133.
 - [8] EDWARDS A T, MADEYSKI A. Progress report on the investigation of galloping of transmission line conductors [J]. Transactions of the AIEE: Part III Power Apparatus and System, 1956: 75(3): 666-686.
 - [9] 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.
 - [10] WANG Jianwei, LILIEN J. A new theory for torsional stiffness of multi-span bundle overhead transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(14): 1405-1411.
 - [11] 谢增, 刘吉轩, 刘超群, 等. 架空输电线路分裂导线扭转刚度计算新方法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(2): 100-105, 140.
XIE Zeng, LIU Jixuan, LIU Chaoqun, et al. New calculating algorithm for torsional stiffness of bundle overhead transmission lines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(2): 100-105, 140.
 - [12] 倪振华. 振动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 338-340, 410-414.
- 100-105.
- 切向接触刚度测量方法的理论改进. 2012, 46(1): 66-69.
- 粗糙机械结合面的接触刚度研究. 2011, 45(6): 69-74.
- 二维桁架路径模型的自动生成算法. 2012, 46(5): 91-96.
- 带串联补偿的输电线路纵联阻抗性能分析. 2011, 45(6): 97-103.
- 故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理. 2010, 44(2): 92-97.
- 基于模型识别的平行线路零序方向元件. 2010, 44(2): 102-107.
- 两端带并联电抗器的输电线路纵联保护. 2009, 43(10): 99-103.
- 带可控串补和可调电抗器输电线路纵联保护新原理. 2008, 42(10): 1259-1263.
- 输电线路超高速保护中小波算法的研究. 2008, 42(2): 194-198.
- 计算输电线路绕击跳闸率的新模型. 2007, 41(2): 223-227.
- 空气环境中水滴和半空间弹性体撞击力学行为的数值模拟. 2011, 45(5): 102-107.
- 离心叶轮几何形变对气动性能的影响. 2009, 43(5): 46-50.
- 液固高速撞击时材料表面损伤的数值模拟. 2008, 42(11): 1435-1440.
- SST $k-\omega$ kp 两相湍流模型及其在湿蒸汽凝结流动数值模拟中的应用. 2007, 41(5): 526-529.
- 多支承轴承轴承受力与刚度的有限元迭代计算方法. 2010, 44(11): 41-45.
- 动梁式龙门机床的双驱同步控制系统建模. 2012, 46(4): 119-124.
- 一种船用超声液位传感器的优化设计模型. 2012, 46(4): 44-49.
- 伺服压力机加工工艺的 Bezier 模型及其优化研究. 2012, 46(4): 31-35.
- 液压激波作用下管道流固耦合的动力学建模. 2012, 46(3): 94-99.
- 采用分布参数模型的 CO_2 微通道蒸发器数值模拟. 2012, 46(1): 42-47.
- 加工系统的加工能力形式化建模方法. 2011, 45(11): 63-67.
- 利用极值蚁群优化的制粉出力建模变量选择算法. 2011, 45(10): 7-12.
- 含缺陷蒸汽发生器管道爆破压力预测的遗传-神经网络算法. 2011, 45(9): 84-89.
- 应用随机进程代数的网络系统可靠性预计方法. 2011, 45(6): 40-45.
- 应用水波弥散特性的舰船航迹三维可视化新方法. 2011, 45(8): 49-53.

[本刊相关文献链接]

架空输电线路分裂导线扭转刚度计算新方法. 2012, 46(2):

(编辑 管咏梅)