

特高压输电线路新型防舞器建模分析

任西春, 朱宽军, 刘超群

(中国电力科学研究院, 北京市 宣武区 100055)

Modeling and Analysis of New Anti-galloping Devices on UHV Transmission Lines

REN Xichun, ZHU Kuanjun, LIU Chaoqun

(China Electric Power Research Institute, Xuanwu District, Beijing 100055, China)

ABSTRACT: The necessity of research on prevention of ultra high voltage (UHV) transmission line galloping was discussed because wind induced galloping of iced conductors on the transmission line can cause great damage and become serious threat to the safe operation of lines. Based on D'Alembert's principle an equation of motion of iced conductor with a kind of new anti-galloping devices was established, which takes the angle of attack into account comprehensively. In the model the spacer dampers and anti-galloping devices are both considered concentrated loads, and the more fully stability conditions of iced conductor movement are obtained. Combined with the specific situation of lines, the parameters of a new kind of anti-galloping device were designed. The research results provide technical support and theoretical guidance for anti-galloping of UHV transmission lines in China.

KEY WORDS: transmission line; galloping; stability; new anti-galloping device; ultra high voltage (UHV)

摘要: 覆冰导线在风力作用下产生的舞动会对输电线路造成很大的破坏, 严重威胁着输电线路的安全运行, 开展特高压输电线路舞动的防治研究非常必要。通过达朗伯原理, 建立安装新型防舞装置后覆冰导线的运动方程, 比较全面地考虑了功角的作用, 并把间隔棒和防舞装置作为线路的集中载荷, 得到比较完全的覆冰导线运动的稳定性条件。结合线路具体情况, 依据稳定性条件设计出符合要求的新型防舞器参数。该研究成果为中国特高压输电线路的舞动防治提供了技术支撑和理论指导。

关键词: 输电线路; 舞动; 稳定性; 新型防舞装置; 特高压

0 引言

半个世纪以来, 输电线路的舞动分析有了很大进展, 尤其近几十年来, 输电线路的舞动模型取得巨大成就。P. Yu 等首先提出了带 3 个平动和 1 个扭转自由度的 3 维有限元模型, Q. Zhang 建立的三自由度模型分析了分裂导线的舞动, 杨新华等建立了

基于多种影响因素导线舞动的 3 维有限元模型, 陈晓明等给出了多档距的单导线的 3 维舞动模型^[1-6]。

尽管前人在这一领域已做了大量工作, 但仍有一些问题没有彻底解决, 比如, 新型防舞器的问题以及考虑更详尽的 3 维模型的建立、稳定性机制的应用等。由于输电线路包括特高压输电线路在微地形、微气象条件下发生的舞动是不可避免的^[7-13], 为防止或最大程度地减小特高压输电线路可能发生的舞动, 增强特高压输电线路的可靠性, 就需要一种防舞效果良好的防舞装置, 而这种防舞装置模型的建立直接影响着计算的合理性和有效性, 因此, 探求合理有效的防舞装置模型具有较大的适用价值。

本文在研制新型防舞装置的基础上, 建立它的数学模型, 得出特高压输电线路的稳定性条件, 可为中国 1000kV 特高压输电线路工程建设提供有力的技术支撑。这种舞动模型的建立不仅实现简单、计算方便, 而且得到的稳定性条件是包括邓哈托和尼戈尔在内的导线运动稳定性条件。

1 新型防舞装置

舞动的发生必须具备 3 个条件, 即线路走向、风的激励和线路结构参数, 而线路的“不均匀覆冰”是线路舞动的必要条件, 因此若能有效改变线路覆冰的不均匀程度, 使得覆冰趋于均匀, 或使得不均匀覆冰变得无规则, 则可有效防舞。基于这样的思想, 中国电力科学研究院开发出了具有防舞功能的线夹回转式防舞间隔棒^[14-15]。

基于稳定性机制开发出的双摆防舞器在超高压输电线路具有良好的防舞效果, 由于双摆防舞器是以间隔棒为载体进行安装的, 若将该间隔棒采用线夹回转式间隔棒, 就自然形成了线夹回转式间

隔棒与双摆防舞器的有机结合，即“线夹回转式间隔棒双摆防舞器”，如图 1 所示。该防舞器不仅满足稳定性机制的要求，同时可减轻风的激励，它是将动力稳定性舞动机制与改变导线不均匀覆冰、减轻风的激励的防舞理念相结合的产物，因此防舞效果将更显著。

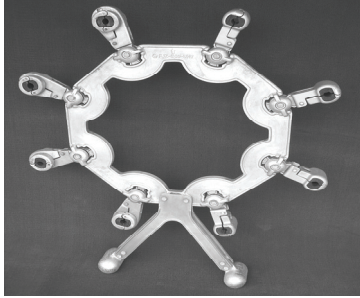


图 1 线夹回转式间隔棒双摆防舞器

Fig. 1 Spacer damper with rotational clamps for octagon bundle conductor

2 输电线路的气动激励

水平风吹过覆冰导线时会引起气动力作用^[16-17]，气动力与风速、风向和导线覆冰情况有关，其受力模型如图 2 所示。假设相对风速 v_r 与导线水平轴的夹角为 α_1 ，水平风速为 v ，气动力包含以下 3 个分量——沿风速方向的气动阻力 D 、与风速方向垂直的升力 L 和扭转力矩 M 。

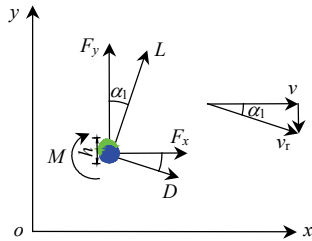


图 2 覆冰导线力学模型

Fig. 2 Mechanical model of iced conductor

空气动力 L 、 D 和 M 与攻角 $\alpha = \theta_0 + \theta - h/v\dot{\theta} - \alpha_1$ 有关。其中： θ_0 是覆冰导线的初始扭转角， θ 是导线绕其截面中心的转角， h 是覆冰截面的特征高度。升力 L 、阻力 D 和扭转力矩 M 可以用 3 次多项式表示为

$$L = \rho d v^2 (C_{L0} + C_{L1}\alpha + C_{L2}\alpha^2 + C_{L3}\alpha^3) / 2 \quad (1)$$

$$D = \rho d v^2 (C_{D0} + C_{D1}\alpha + C_{D2}\alpha^2 + C_{D3}\alpha^3) / 2 \quad (2)$$

$$M = \rho d^2 v^2 (C_{M0} + C_{M1}\alpha + C_{M2}\alpha^2 + C_{M3}\alpha^3) / 2 \quad (3)$$

式中： ρ 为空气密度； d 为裸导线直径； C_{Li} 、 C_{Di} 、 $C_{Mi}(i=0,1,2,3)$ 为常数，可由最小二乘法对覆冰导线模型的气动力特性数据作曲线拟合来确定。

由此可得忽略常数项的升力和阻力在 y 、 x 和 M

方向上的分量 F_y 、 F_x 和 F_M 的线性方程：

$$F_y = L \cos \alpha_1 - D \sin \alpha_1 = L - D\alpha_1 = -\frac{\rho d v}{2} (C_{L1} + C_{D0}) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\rho d v^2}{2} C_{L1} \theta - \frac{\rho d v}{2} C_{L1} h \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

$$F_x = L \sin \alpha_1 + D \cos \alpha_1 = L\alpha_1 + D = \frac{\rho d v}{2} (C_{L0} - C_{D1}) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\rho d v^2}{2} C_{D1} \theta - \frac{\rho d v}{2} C_{D1} h \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho d^2 v^2 C_{M1} \theta - \frac{1}{2} \rho d^2 v h \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho d^2 v C_{M1} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (6)$$

3 受气动激励作用的分裂导线的控制方程

由于只研究覆冰导线在风的激励下的稳定性条件，而不涉及到导线已发生舞动后的行为，因此通常可以采用线性微振动中的假设：1) 只考虑导线作垂直、水平、扭转的小运动；2) 张力在档内不变，气动力在档内不变；3) 覆冰形状及厚度在档内不变；4) 导线两端为固定支点。

现截取一长为 ds 的分裂导线微元，假设间隔棒固定线夹所握持的子导线所受空气动力是均匀一致的，间隔棒回转式线夹所握持的子导线所受空气动力相等，图 3 为坐标系统示意图。

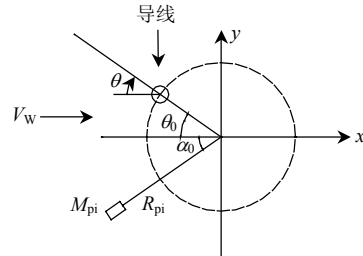


图 3 坐标示意图

Fig. 3 Coordinate diagram

根据达朗伯原理，考虑到导线及附加质量的重力，风作用于导线上的升力、阻力、张力、阻尼力和惯性力建立 x 与 y 方向的平衡方程 $\Sigma F_x=0$ 、 $\Sigma F_y=0$ ；考虑空气动力矩、重力矩、惯性力矩和阻尼力矩建立绕子导线分裂圆中心的力矩平衡方程 $\Sigma M_\theta=0$ 。

分裂导线的舞动动力学微分方程为

$$\begin{cases} [N_c(M_c + M_i) + M_s(s) + M_p(s)] \partial^2 y / \partial t^2 + C_y \frac{\partial y}{\partial t} - T \frac{\partial^2 y}{\partial s^2} = F_v(s) \\ [N_c(M_c + M_i) + M_s(s) + M_p(s)] \partial^2 x / \partial t^2 + C_x \frac{\partial x}{\partial t} - T \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} = F_h(s) \\ I(s) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + C_\theta \frac{\partial \theta}{\partial t} - GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s^2} = M_t(s) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned}
 F_V &= -N_c M_i r_i \cos(\theta + \theta_0) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - M_p(s) r_p \cos(\theta + \alpha_0) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{N_c}{2} \left[-\frac{\rho dv}{2} (C_{L1} + C_{D0}) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\rho dv^2}{2} C_{L1} \theta - \frac{\rho dv}{2} C_{L1} h \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] + \frac{N_c}{2} k \left[-\frac{\rho dv}{2} (C_{L1} + C_{D0}) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\rho dv^2}{2} C_{L1} \theta - \frac{\rho dv}{2} C_{L1} h \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \\
 F_h &= -N_c M_i r_i \sin(\theta + \theta_0) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + M_p(s) r_p \sin(\theta + \alpha_0) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{N_c}{2} \left[\frac{\rho dv}{2} (C_{L0} - C_{D1}) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\rho dv^2}{2} C_{D1} \theta - \frac{\rho dv}{2} C_{D1} h \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] + \frac{N_c}{2} k \left[\frac{\rho dv}{2} (C_{L0} - C_{D1}) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\rho dv^2}{2} C_{D1} \theta - \frac{\rho dv}{2} C_{D1} h \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \\
 M_i &= -N_c M_i r_i \cos(\theta + \theta_0) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - N_c M_i r_i \sin(\theta + \theta_0) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - M_p(s) r_p \cos(\theta + \alpha_0) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - M_p(s) r_p \sin(\theta + \alpha_0) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - N_c M_i r_i g \cos(\theta + \theta_0) - M_p(s) r_p g \cos(\theta + \alpha_0) + \frac{N_c}{2} \left(\frac{1}{2} \rho d^2 v^2 C_{M1} \theta - \frac{1}{2} \rho d^2 v h \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho d^2 v C_{M1} \frac{\partial y}{\partial t} \right) + \frac{N_c}{2} k \left(\frac{1}{2} \rho d^2 v^2 C_{M1} \theta - \frac{1}{2} \rho d^2 v h \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho d^2 v C_{M1} \frac{\partial y}{\partial t} \right)
 \end{aligned} \quad (8)$$

由于 θ 角比较小,式(7)可简化为

$$\begin{aligned}
 [N_c (M_c + M_i) + M_s(s) + M_p(s)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C_y \frac{\partial y}{\partial t} - T \frac{\partial^2 y}{\partial s^2} &= -N_c M_i r_i \cos \theta_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - M_p(s) r_p \cos \alpha_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \frac{\rho dv}{4} N_c (C_{L1} + C_{D0})(1+k) \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\rho dv}{4} N_c C_{L1} (1+k) h \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\rho dv^2}{4} N_c C_{L1} (1+k) \theta \\
 [N_c (M_c + M_i) + M_s(s) + M_p(s)] \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + C_x \frac{\partial x}{\partial t} - T \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} &= -N_c M_i r_i \sin \theta_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + M_p(s) r_p \sin \alpha_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\rho dv}{4} N_c (C_{L0} - C_{D1})(1+k) \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\rho dv}{4} N_c C_{D1} h (1+k) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\rho dv^2}{4} N_c C_{D1} (1+k) \theta
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 [N_c (M_c + M_i) + M_s(s) + M_p(s)] \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + C_x \frac{\partial x}{\partial t} - T \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} &= -N_c M_i r_i \sin \theta_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + M_p(s) r_p \sin \alpha_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\rho dv}{4} N_c (C_{L0} - C_{D1})(1+k) \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\rho dv}{4} N_c C_{D1} h (1+k) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\rho dv^2}{4} N_c C_{D1} (1+k) \theta
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 I(s) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + C_\theta \frac{\partial \theta}{\partial t} - GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s^2} &= -N_c M_i r_i \cos \theta_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - N_c M_i r_i \sin \theta_0 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - M_p(s) r_p \cos \alpha_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - M_p(s) r_p \sin \alpha_0 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \frac{1}{4} \rho d^2 v N_c C_{M1} (1+k) \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{1}{4} \rho d^2 v h N_c (1+k) \frac{\partial \theta}{\partial t} + [N_c M_i r_i g \sin \theta_0 + M_p(s) r_p g \sin \alpha_0] \theta + \frac{1}{4} \rho d^2 v^2 N_c C_{M1} (1+k) \theta
 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: N_c 为子导线分裂数; M_c 、 M_i 、 $M_s(s)$ 和 $M_p(s)$ 分别为导线单位长度质量、单位长度覆冰质量、单个间隔棒本体质量以及单个防舞器质量; C_y 、 C_x 和 C_z 分别为导线的垂直向、水平向和扭转向阻尼系数; T 为导线张力; $I(s)$ 为有防舞器、间隔棒等附加质量及覆冰的导线的惯性矩; r 、 r_p 分别为分裂导线半径以及防舞器摆长; J 为惯性矩; θ 为导线的扭转向位移; θ_0 为初始扭转角; α_0 为防舞器锤头的方位角; k 为活动回转式夹头端空气动力折算系数。

对于实际输电线路,间隔棒和附加质量(防舞器)是集中在导线的某些点上,因此可用狄拉克函数表示为

$$M_s(s) = \sum M_s \delta(L - L_s), \quad s = 1, 2, \dots, n_s \quad (12)$$

$$M_p(s) = \sum M_p \delta(L - L_p), \quad p = 1, 2, \dots, n_p \quad (13)$$

式中: L 为档距; s 、 p 分别为间隔棒和防舞器在档距上的位置。

一般认为导线舞动为驻波,舞动时其舞动波形可出现多个半波,据实际观测统计,主要以1、2、3个半波的舞动为主,另一方面,导线舞动的波形超过3个半波时舞动的振幅也相应减小,不足以对导线构成威胁,因此,在分析导线舞动时,以1、2、3个半波的振型分析为主^[18-20]。

为了求解偏微分方程组(7),用伽辽金法将位移展成试函数的级数形式:

$$y(s, t) = \sum_{k=1}^3 \phi_k(s) y_k(t) \quad (14)$$

$$x(s, t) = \sum_{k=1}^3 \varphi_k(s) x_k(t) \quad (15)$$

$$\theta(s, t) = \sum_{k=1}^3 \psi_k(s) \theta_k(t) \quad (16)$$

式中: $\varphi_k(s)$ 、 $\phi_k(s)$ 和 $\psi_k(s)$ 为第 k 阶主振型; $y_k(t)$ 、 $x_k(t)$ 和 $\theta_k(t)$ 为第 k 个模态函数。

将试函数代入式(9)~(11)中,整理得

$$\begin{aligned}
 & [N_c(M_c+M_i)+M_s(s)+M_p(s)]\sum_{k=1}^3\frac{d^2y_k}{dt^2}\phi_k+ \\
 & C_y\sum_{k=1}^3\frac{dy_k}{dt}\phi_k+T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2\sum_{k=1}^3y_k\phi_k=-[N_cM_i r_i\cos\theta_0+ \\
 & M_p(s)r_p\cos\alpha_0]\sum_{k=1}^3\frac{d^2\theta_k}{dt^2}\psi_k-\frac{\rho dv}{4}N_c(C_{L1}+C_{D0})\cdot \\
 & (1+k)\sum_{k=1}^3\frac{dy_k}{dt}\phi_k-\frac{\rho dv}{4}N_cC_{L1}(1+k)h\sum_{k=1}^3\frac{d\theta_k}{dt}\psi_k+ \\
 & \frac{\rho dv^2}{4}N_cC_{L1}(1+k)\sum_{k=1}^3\theta_k\psi_k \tag{17}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & [N_c(M_c+M_i)+M_s(s)+M_p(s)]\sum_{k=1}^3\frac{d^2x_k}{dt^2}\phi_k+ \\
 & C_x\sum_{k=1}^3\frac{dx_k}{dt}\phi_k+T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2\sum_{k=1}^3x_k\phi_k=-[N_cM_i r_i\sin\theta_0- \\
 & M_p(s)r_p\sin\alpha_0]\sum_{k=1}^3\frac{d^2\theta_k}{dt^2}\psi_k+\frac{\rho dv}{4}N_c(C_{L0}-C_{D1})\cdot \\
 & (1+k)\sum_{k=1}^3\frac{dy_k}{dt}\phi_k-\frac{\rho dv}{4}N_cC_{D1}h(1+k)\sum_{k=1}^3\frac{d\theta_k}{dt}\psi_k+ \\
 & \frac{\rho dv^2}{4}N_cC_{D1}h(1+k)\sum_{k=1}^3\theta_k\psi_k \tag{18}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & I(s)\sum_{k=1}^3\frac{d^2\theta_k}{dt^2}\psi_k+C_\theta\sum_{k=1}^3\frac{d\theta_k}{dt}\psi_k-M_1\sum_{k=1}^3\theta_k\psi_k+ \\
 & GJ\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2\sum_{k=1}^3\theta_k\psi_k=-[N_cM_i r_i\cos\theta_0+ \\
 & M_p(s)r_p\cos\alpha_0]\sum_{k=1}^3\frac{d^2y_k}{dt^2}\phi_k-[N_cM_i r_i\sin\theta_0+ \\
 & M_p(s)r_p\sin\alpha_0]\sum_{k=1}^3\frac{d^2x_k}{dt^2}\phi_k-\frac{1}{4}\rho d^2vN_cC_{M1}(1+k)\cdot \\
 & \sum_{k=1}^3\frac{dy_k}{dt}\phi_k-\frac{1}{4}\rho d^2vhN_c(1+k)\sum_{k=1}^3\frac{d\theta_k}{dt}\psi_k+ \\
 & [N_cM_i r_i g\sin\theta_0+M_p(s)r_p g\sin\alpha_0]\sum_{k=1}^3\theta_k\psi_k+ \\
 & \frac{1}{4}\rho d^2v^2N_cC_{M1}(1+k)\sum_{k=1}^3\theta_k\psi_k \tag{19}
 \end{aligned}$$

以 $\phi_m(s)$ 乘以方程(17)两边, $\varphi_m(s)$ 乘以方程(18)两边, $\psi_m(s)$ 乘以方程(19)两边, 并在档距(0, L)上积分, 得如下矩阵方程:

$$\mathbf{M}d^2\mathbf{u}/dt^2 + \mathbf{C}d\mathbf{u}/dt + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{20}$$

$$\text{式中: } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} A^y & \mathbf{0} & C^y \\ \mathbf{0} & B^x & C^x \\ A^\theta & B^\theta & C^\theta \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} D^y & \mathbf{0} & F^\theta \\ D^x & E^x & F^x \\ D^\theta & \mathbf{0} & F^\theta \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} G^y & \mathbf{0} & I^y \\ \mathbf{0} & H^x & I^x \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I^\theta \end{bmatrix}; \mathbf{u} = \begin{bmatrix} y \\ x \\ \theta \end{bmatrix}. \text{其中, } \mathbf{y}=[y_1, y_2, y_3]^T,$$

$\mathbf{x}=[x_1, x_2, x_3]^T, \theta=[\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$, 而分块矩阵都是 3×3 , 其元素分别为

$$a_{km}^{(y)} = \int_0^L [N_c(M_c+M_i)+M_s(s)+M_p(s)]\varphi_k(s)\varphi_m(s)ds$$

$$c_{km}^{(y)} = \int_0^L [N_cM_i r_i\cos\theta_0+M_p(s)r_p\cos\alpha_0]\psi_k(s)\psi_m(s)ds$$

$$b_{km}^{(x)} = \int_0^L [N_c(M_c+M_i)+M_s(s)+M_p(s)]\phi_k(s)\phi_m(s)ds$$

$$c_{km}^{(x)} = \int_0^L [N_cM_i r_i\sin\theta_0-M_p(s)r_p\sin\alpha_0]\psi_k(s)\psi_m(s)ds$$

$$a_{km}^{(\theta)} = \int_0^L [N_cM_i r_i\cos\theta_0+M_p(s)r_p\cos\alpha_0]\varphi_k(s)\varphi_m(s)]ds$$

$$b_{km}^{(\theta)} = \int_0^L [N_cM_i r_i\sin\theta_0+M_p(s)r_p\sin\alpha_0]\phi_k(s)\phi_m(s)]ds$$

$$c_{km}^{(\theta)} = \int_0^L \left[\frac{1}{2}J_cN_c+J_pN_pN_q+J_sN_sN_c+N_c r_b^2(M_c+M_i)+ \right.$$

$$\left. N_pN_q r_p^2M_p(s)+N_sM_s(s)\sum_{i=1}^{N_c} r_{si}^2\right]\psi_k(s)\psi_m(s)ds$$

$$d_{km}^{(y)} = \int_0^L \left[C_y + \frac{\rho dv}{4}N_c(C_{L1}+C_{D0})(1+k) \right]\varphi_k(s)\varphi_m(s)ds$$

$$f_{km}^{(y)} = \int_0^L \frac{\rho dv}{4}N_cC_{L1}(1+k)h\psi_k(s)\varphi_m(s)ds$$

$$d_{km}^{(x)} = \int_0^L \frac{\rho dv}{4}N_c(C_{L0}-C_{D1})(1+k)\varphi_k(s)\varphi_m(s)ds$$

$$e_{km}^{(x)} = \int_0^L [C_x\phi_k(s)\phi_m(s)]ds$$

$$f_{km}^{(x)} = \int_0^L \frac{\rho dv}{4}N_cC_{D1}h(1+k)\psi_k(s)\psi_m(s)ds$$

$$d_{km}^{(\theta)} = \int_0^L \frac{1}{4}\rho d^2vN_cC_{M1}(1+k)\varphi_k(s)\varphi_m(s)ds$$

$$f_{km}^{(\theta)} = \int_0^L \left[C_\theta + \frac{1}{4}\rho d^2vhN_c(1+k) \right]\psi_k(s)\psi_m(s)ds$$

$$g_{km}^{(y)} = \int_0^L \left[T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2\phi_k(s)\phi_m(s) \right]ds$$

$$i_{km}^{(y)} = -\int_0^L [N_cC_{L1}(1+k)\psi_k(s)\psi_m(s)]ds$$

$$h_{km}^{(x)} = \int_0^L \left[T\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2\varphi_k(s)\varphi_m(s) \right]ds$$

$$i_{km}^{(x)} = -\int_0^L N_cC_{D1}h(1+k)\psi_k(s)\psi_m(s)ds$$

$$i_{km}^{(\theta)} = \int_0^L \left[GJ\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 - N_cM_i r_i g\sin\theta_0 - M_p(s)r_p g \cdot \right.$$

$$\left. \sin\alpha_0 - \frac{1}{4}\rho d^2v^2N_cC_{M1}(1+k) \right]\psi_k(s)\psi_m(s)ds$$

式中: J_c, J_p, J_s 为子导线、防舞器夹头和间隔棒的转动惯量; N_c, N_p, N, N_s, N_q 分别为子导线分裂数、单个防舞器摆锤数、间隔棒数量以及防舞器数量。

这就将覆冰导线这样一个连续体离散化, 式中覆冰质量 M_i 可按哈瓦德推荐的公式 $M_i=0.5\pi\rho_{ice}\delta r_i$

计算, 而 r_c 可按式(21)计算:

$$r_c = 0.5\delta + 0.25\pi r_c \quad (21)$$

式中: ρ_{ice} 为冰的密度; δ 为覆冰最大厚度; r_c 为子导线半径。

4 导线运动稳定性判定

通过对式(20)中各要素的分析计算, 可得控制微分方程的特征多项式^[21-22]:

$$f(\lambda) = |M\lambda^2 + C\lambda + K| \quad (22)$$

根据劳斯-霍尔维茨稳定性判据, 即如果同时

满足下列条件: $\Delta_1 = a_1 > 0$, $\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} > 0$,

$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} > 0$, \dots , 则系统判为稳定, 否则,

若上述条件有 1 个不满足, 则认为导线系统有可能发生舞动。防舞设计的目的是通过采取防舞措施来改变系统特性, 使得系统由原来可能的不稳定状态转化为稳定状态。

5 算例

特高压交流试验示范工程输电线路未过易舞区, 本文根据假定条件进行了防舞设计计算, 因此如果实际线路的技术条件有所不同, 在应用此防舞设计方法时应该按照实际技术条件进行调整, 线路的技术条件如表 1 所示。

表 1 线路的技术条件

Tab. 1 Technical conditions of line

参量	数值
导线型号	LGJ—500/45
分裂数	8
导线直径/mm	30.00
子导线间距/mm	400
导线单位长度质量/(kg/m)	1.688
导线综合计算拉断力/kN	128.1
导线平均运行张力/kN	32.025
最大风速/(m/s)	20
平均覆冰厚度/mm	6

根据表 1 的技术条件, 应用稳定性防舞设计方法, 通过分析计算来确定双摆防舞器的理论摆长、理论摆角等设计参数, 结合实际使用的间隔棒确定防舞器的实际臂长、实际摆角, 初步定型防舞器, 具体参数如表 2 所示。

表 2 防舞器技术参数表

Tab. 2 Technical parameters of anti-galloping device

防舞器型号	摆长/mm	单个锤头质量/kg	摆角/(°)	适用导线
SHB0601-300	822	7.5	35.5	LGJ—500/45

6 结论

本文介绍了为特高压输电线路研制开发的一种新型防舞装置, 并用达朗伯原理建立包括防舞装置、间隔棒等集中荷载在内的输电线路力学控制方程, 并考虑了影响攻角的多个因素, 使得用劳斯-霍尔维茨判据判断系统的稳定性时与线路实际情况更为相似, 并给出了具体算例, 为已经建成的特高压输电线路的舞动治理提供了有利的技术支撑。

参考文献

- [1] 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, ASCE, 1993, 119(12): 2404-2425.
- [2] Desai Y M, Yu P, Popplewell N, et al. Finite element modeling of transmission line galloping[J]. Computers & Structures, 1995, 57(3): 407-420.
- [3] Desai Y M, Yu P, Shah A H, et al. Perturbation-based finite analyses of transmission line galloping[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 191(4): 469-489.
- [4] Zhang Q, Popplewell N, Shah A H. Galloping of bundle conductor [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 115-134.
- [5] 杨新华, 王丽新, 王乘, 等. 考虑多种影响因素的导线舞动三维有限元分析[J]. 振动学与控制学报, 2004, 2(4): 84-89. Yang Xinhua, Wang Lixin, Wang Cheng, et al. 3D finite element analysis of transmission line galloping involving multi factors [J]. Journal of Dynamics and Control, 2004, 2(4): 84-89(in Chinese).
- [6] 陈晓明, 邓洪洲, 王肇民. 大跨越输电线路舞动稳定性研究[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 56-60. Chen Xiaoming, Deng Hongzhou, Wang Zhaomin. Conductor galloping stability analysis of long-span transmission system [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 56-60(in Chinese).
- [7] 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: 162-170. Guo Yinglong, Li Guoxing, You Chuanyong. Transmission line galloping[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 162-170(in Chinese).
- [8] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 347-350. Liu Zhenya. UHV power grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005: 347-350(in Chinese).
- [9] 朱宽军, 刘胜春, 刘超群, 等. 1 000 kV 特高压线路防振防舞研究[R]. 北京: 国网北京电力建设研究院, 2006. Zhu Kuanjun, Liu Shengchun, Liu Chaoqun, et al. Anti-galloping and anti-vibration study of 1 000 kV transmission line[R]. Beijing: Beijing Electric Power Construction Research Institute of State Grid, 2006(in Chinese).
- [10] 蒋兴良, 周仿荣, 王少华, 等. 输电导线覆冰舞动机制及防治措施[J]. 电力建设, 2008, 29(9): 14-18. Jiang Xingliang, Zhou Fangrong, Wang Shaohua, et al. Mechanism of icing-caused conductor galloping and its prevention[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(9): 14-18(in Chinese).
- [11] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 11-14.

- Wang Shaohua, Jiang Xingliang, Sun Caixin. Study status of conductor galloping on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 11-14(in Chinese).
- [12] 樊社新, 何国金, 廖小平, 等. 结冰导线舞动机制分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 131-133.
Fan Shixin, He Guojin, Liao Xiaoping, et al. Analysis of galloping mechanism of iced conductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 131-133(in Chinese).
- [13] 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, 2008, 28(34): 12-20.
Zhu Kuanjun, Liu Bin, Liu Chaoqun, et al. Research on anti-galloping for UHV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 12-20(in Chinese).
- [14] 朱宽军, 刘超群, 任西春. 架空输电线路间隔棒回转线夹: 中国, 200520122172.2[P]. 2006-12-20.
Zhu Kuanjun, Liu Chaoqun, Ren Xichun. Spacer damper with rotational clamps for overhead transmission line: China, 200520122172.2[P]. 2006-12-20(in Chinese).
- [15] 朱宽军, 刘超群, 任西春, 等. 特高压输电线路防舞动研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 61-65.
Zhu Kuanjun, Liu Chaoqun, Ren Xichun, et al. Research on anti-galloping of UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 61-65(in Chinese).
- [16] Yu P, Shah A H, Popplewell N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1992(59): 140-145.
- [17] 范钦珊, 官飞, 赵坤民, 等. 覆冰导线舞动的机制分析及动态模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1995, 35(2): 34-40.
Fan Qinshan, Guan Fei, Zhao Kunmin, et al. The mechanism analysis and dynamic simulation of iced conductor galloping[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1995, 35(2): 34-40(in Chinese).
- [18] Wang J W, Lilien J L. A new theory for torsional stiffness of multi-span bundle overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1405-1411.
- [19] Cartmell M P, Ziegler S W. Multiple scales analysis of the dynamics of weakly nonlinear mechanical systems[J]. ASME Applied Mechanics Review, 2003, 56(5): 455-492.
- [20] Srinil N, Rega G. Three-dimensional nonlinear coupling and dynamics tension in the large amplitude free vibrations of arbitrary sagged cables[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 269(3): 823-852.
- [21] 王照林. 运动稳定性及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 30-35.
Wang Zhaolin. Stability of motion and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 30-35(in Chinese).
- [22] 刘延柱, 陈文良, 陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 89-94.
Liu Yanzhu, Chen Wenliang, Chen Liqun. Vibration mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998: 89-94(in Chinese).



任西春

收稿日期: 2010-08-02。

作者简介:

任西春(1976), 女, 硕士, 工程师, 主要从事线路防舞、安全性评估及全寿命方面的研究工作, rxc@epri.sgcc.com.cn;

朱宽军(1969), 男, 高级工程师, 主要从事线路防舞方面的研究工作, zhukuanjun@epri.sgcc.com.cn;

刘超群(1978), 男, 高级工程师, 主要从事科研管理方面的工作, liuchaoqun@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 谷子)