

输电塔-覆冰导线耦合体系非线性动力响应分析

荣志娟 张陵

(西安交通大学强度与振动教育部重点实验室,西安 710049)

摘要 为了全面准确的了解输电线路塔线耦合体系的动力特性以及覆冰导线的非线性舞动响应,建立了“三塔两线”的空间有限元模型. 选用风工程界广泛应用的 Davenport 脉动风速谱, 叠加相应位置的平均风速, 模拟风速时程. 运用现有的新月形覆冰计算模型, 采用时程分析法分别对单塔、无覆冰塔线体系以及不同攻角下的输电塔-覆冰导线体系进行了风荷载作用下的动力响应分析, 同时对输电塔、导线位移, 钢材应力进行了对比分析. 研究表明: 覆冰对于塔线耦联体系有一定的影响, 研究输电塔-覆冰导线耦合体系中的非线性舞动尤为重要.

关键词 输电塔-覆冰导线, 舞动, 脉动风模拟, 非线性动力分析

引言

高压输电塔线体系具有高柔、大跨等特点, 具有很强的几何非线性特征. 导线覆冰舞动是指覆冰形状为不对称的偏心结构时, 导线在风力作用下产生的一种低频宽幅非线性振荡现象; 由于舞动的幅度大, 持续时间长, 易酿成严重危害, 轻则相间闪络、损坏地线和导线、金具及部件, 重则线路跳闸停电、断线倒塔等严重事故, 从而造成重大经济损失.

舞动的观测与研究源于 20 世纪 30 年代, 许多学者提出了各种舞动机理, 如 Den Hartog 的垂直舞动机理、O. Nigol 的扭转舞动机理、P. Yu 的偏心惯性耦合失稳机理、阵风诱发机理等. 虽然舞动机理方面迄今为止国际上还未得到一致的定论, 但以上四种假说得到了较多的认可. 此外, Sig Byun 等提出了两自由度模型, 建立了包括垂向和扭转运动的导线舞动数学模型, 通过描述函数法求解给出了变风速下最大舞动振幅和频率的估计^[1]. P. Yu 等提出了三自由度模型, 用三节点等参单元建立导线模型, 采用摄动法, 考虑了绝缘子串和远导线跨以及导线悬挂点处的等效刚度, 分析了覆冰导线的舞动规律^[2]. 国内郭应龙等人讨论了三分裂输电导线舞动的有限元计算, 从空气动力学非线性及非线性舞动的几何性质出发, 应用有限元法推出了导线舞动的有限元基本方程^[3].

本文以新疆某输电塔-线体系为研究对象, 运用现有的新月形覆冰计算模型; 选用 Davenport 脉动风速谱, 模拟风速时程; 采用时程分析法分别对单塔、无覆冰塔线体系以及不同攻角下的输电塔-覆冰导线体系进行了风荷载作用下的动力响应分析.

1 覆冰导线的舞动机理

导线舞动是一种低频大幅度的自激振动, 以横向与扭转振动为主, 在覆冰和风激励下, 横向振动与扭转振动相互联系、相互耦合, 是具有垂直、水平及扭转振动的三自由度系统, 其垂直(向)、水平(向)方向的横向振动及扭转振动的运动方程如下^[4]:

$$m\ddot{y} + [2m\zeta_y\omega_y + \frac{1}{2}\rho U^2 D(\frac{\partial C_L}{\partial \theta} + C_D)]\dot{y} + k_y y = -m_r \cos\theta_0 \ddot{\theta} + \frac{1}{2}\rho U^2 D \frac{\partial C_y}{\partial \theta} \theta - \frac{1}{2}\rho U^2 D C_y \frac{1}{U} \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

$$m\ddot{x} + (2m\zeta_x\omega_x + \frac{1}{2}\rho U^2 D C_D \frac{1}{U})\dot{x} + k_x x = -m_r \sin\theta_0 \ddot{\theta} + \frac{1}{2}\rho U^2 D \frac{\partial C_D}{\partial \theta} \theta \quad (2)$$

$$I\ddot{\theta} + (2I\zeta_t\omega_t + \frac{1}{2}\rho U^2 D^2 \frac{\partial C_M R}{\partial \theta U})\dot{\theta} +$$

$$\begin{aligned} & (k_i - \frac{1}{2}\rho U^2 D^2 \frac{\partial C_M}{\partial \theta} - m_i r g \sin \theta_0) \theta = \\ & - m_i r \cos \theta_0 \dot{y} - m_i r \sin \theta_0 \dot{x} - \\ & \frac{1}{2}\rho U^2 D^2 C_M \frac{1}{U} x \end{aligned} \quad (3)$$

式中, U —风速, D —迎风尺寸, 此处为导线直径, ρ —流体(此处为空气)的密度, θ —攻角, C_L, C_D, C_M —分别为升力、阻力系数和扭转系数, m_i —单位长度导线上的覆冰质量, θ_0 —初始凝冰角, r —导线半径, R —特征半径, 与空气动力试验模型有关, 这里可取为导线半径 r 。

$$C_y = \frac{\partial C_L}{\partial \theta} + C_D \quad (4)$$

2 荷载计算

2.1 风速的模拟

2.1.1 平均风

根据空气动力学研究结果, 近地风风速与风压的基本关系为^[5]:

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{\gamma v^2}{g} \quad (5)$$

式中, ω —单位面积上风力的大小/ $N \cdot m^{-2}$, γ —空气容重, 在标准大气压下, $\gamma = 0.012 \text{ kN/m}^3$, g —重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; v —风速/ $m \cdot s^{-1}$ 。

2.1.2 脉动风

Davenport 根据频率域相关性系数(即相干函数)的定义, 此系数是圆频率 ω 及两点间距离等的某些函数关系, 用下式表示, 即^[6]:

$$\rho_{xy}(\omega) = \exp\left(\frac{-C_z \Delta z \frac{\omega}{2\pi}}{\bar{v}_{10}}\right) \quad (6)$$

互功率谱密度函数为:

$$\begin{aligned} S_{xy}(\omega) &= \rho_{xy}(\omega) \cdot S_v(\omega) = \\ & \exp\left(\frac{-C_z \Delta z \frac{\omega}{2\pi}}{\bar{v}_{10}}\right) \cdot S_v(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

利用脉动风压谱, 以及随机过程样本公式就可以模拟 Z 高度处的脉动风压时程曲线。

2.2 覆冰荷载

2.2.1 导线的覆冰荷载

本文选用的是 Chaine 和 Skeates 模型^[7], 该模型正在被加拿大气象中心使用。

对于水平面而言, 假设温度接近或低于零度,

L_H (cm) 代表整个冻雨降水过程中所观测到的当量水厚度, 并假设它被全部冻结为冰, 则:

$$L_H = Pt \quad (8)$$

式中, P —降水率/ $cm \cdot h^{-1}$, t —降水时间/ h

假设在与风向垂直的 1 m^2 平板表面上形成的雨淞层的质量增长率与降雨率有关, 垂直方向的覆冰厚度 L_v :

$$L_v = 0.195 V P^{0.88} t \quad (9)$$

式中, V —平均风速/ $m \cdot s^{-1}$

当覆冰在导线上产生时, 借用当量径向厚度的概念, 即假设覆冰在导线上均匀分布, 则导线雨淞覆冰的当量径向厚度 (cm) 为:

$$\Delta R = \left[\frac{3.23 K R_0}{(L_H^2 + L_v^2)^{1/2}} + R_0^2 \right]^{1/2} - R_0 \quad (10)$$

式中, K —取决于导线直径的修正系数, R_0 —导线半径/cm

2.2.2 输电塔及绝缘子的覆冰荷载

《高耸结构设计规范》中规定: 非圆截面的构件每单位面积上的覆冰荷载 q 可按下式计算^[8]:

$$q = 0.6 b \alpha \gamma \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

式中, b —基本覆冰厚度/ mm , α —覆冰厚度的高度递增系数, γ —覆冰的密度/ $kN \cdot m^{-3}$

3 数值计算

3.1 有限元模型建立

3.1.1 输电塔模型

输电塔模型选用 550kV 玛纳斯—乌鲁木齐北送电线路, 塔高 60m。各杆件均采用可自定义形状

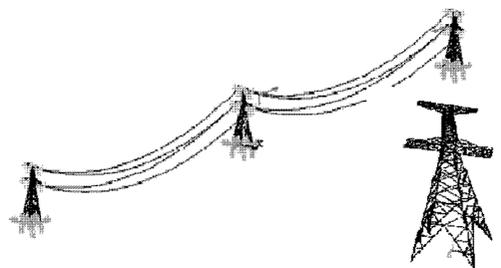


图1 输电塔-线体系有限元模型

Fig.1 Transmission tower - line system finite element model

的 BEAM188 梁单元进行模拟, 输电塔构件均为角钢, 分为斜材和主材, 主材采用弹性模量与泊松比分别为 206E + 11Pa 和 0.3, 塔体质量密度为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。绝缘子长 2m, 采用刚性单元 MPC184 进行模拟。约束输电塔底部四个节点的所有自由度,

不考虑地基与输电塔结构间的相互作用,应用 ANSYS 有限元软件进行建模,如图 1 所示。

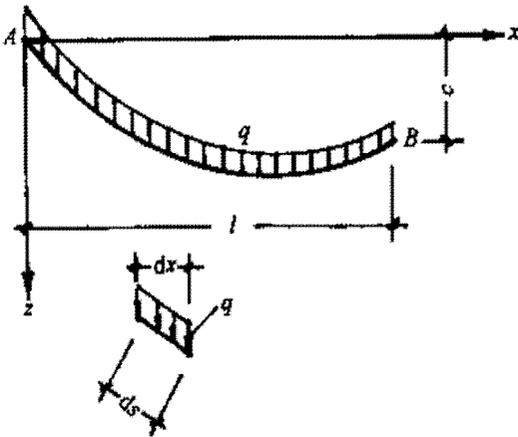


图 2 荷载沿索长均布时单索的计算简图

Fig. 2 Calculation diagram of one cable with uniform load distributed along the cable

3.1.2 导线找形

输电导线因刚度小,跨度和矢跨比大,而其呈现出较高的几何非线性,通常将输电线处理成单索结构. 在进行非线性动力响应分析之前,首先要对导线进行初始找形,即寻找初始时刻导线的位形. 满足图 2 所示边界条件的导线初始坐标方程为^[9]:

$$z = \frac{H}{q} [\cosh\alpha - \cosh(\frac{2\beta x}{l} - \alpha)] \quad (12)$$

式中, $\alpha = \sinh^{-1} \left[\frac{\beta(c/l)}{\sinh\beta} \right] + \beta, \beta = \frac{ql}{2H}$

当导线两端端点坐标和外荷载确定,水平张力或导线上任一点坐标(跨中)确定,导线的曲线方程即可确定,即导线的初始形状即可确定. 本文中选用 LINK10 模拟导(地)线,进行索的找形.

3.2 施加荷载

3.2.1 对输电塔施加风荷载

对于高耸结构的输电塔而言,其结点众多,不可能对模型中每个结点处的风速时程均进行仿真. 本文中,选取风荷载加载点的位置为:选择每个塔段的顶点作为代表点(如图 3 所示),以模拟不同高度的风荷载. 本文中取标准高度为 10m,计算出各施加点处的平均风速. 采用 Davenport 脉动风速谱,生成目标风场的脉动风速时程,如图 4 所示,并验证了模拟方法的有效性和可靠性,如图 5. 将得到的风速时程叠加相应位置处的平均风速,即可得到各个代表点处的风速时程,图 6 分别表示了 1 点、2 点的风速时程图。

式中, μ 为结构体型系数,取 2.2; A_s 为构件承受风压面积,对于塔身上每个荷载施加点取其上下各一半的塔身受压面积。

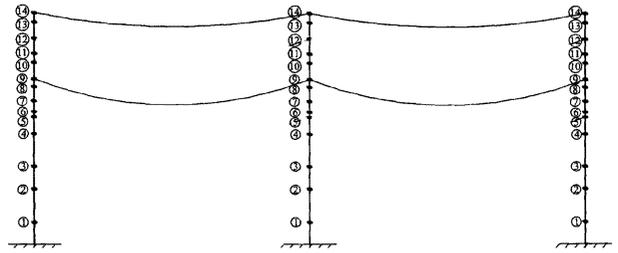


图 3 三塔两线模型的风速加载点位置

Fig. 3 Wind loading point location of three-tower and two-line model

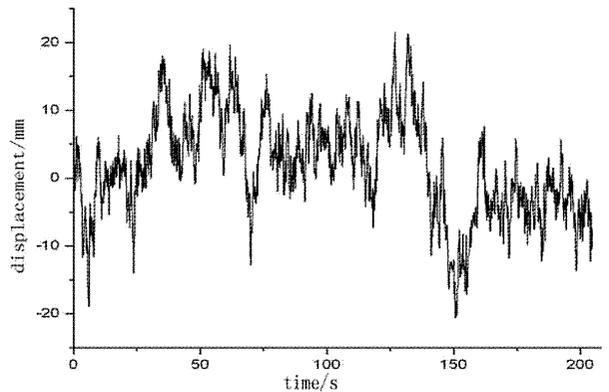


图 4 模拟风速时程

Fig. 4 The simulated wind time history

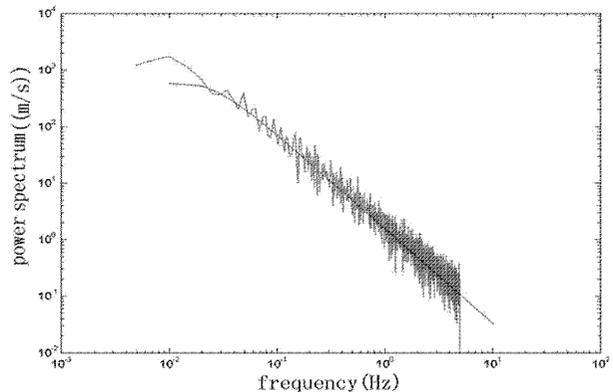


图 5 模拟风速谱与目标风速谱比较

Fig. 5 Power spectral comparison between simulated and theoretical wind samples

3.2.2 对导线施加风荷载

单位长度的覆冰导线在水平风作用下,所受的空气荷载包括阻力 F_D 、升力 F_L 和扭矩 F_M , 表示为:

$$F_D = K_D V_r^2 C_D \quad (13)$$

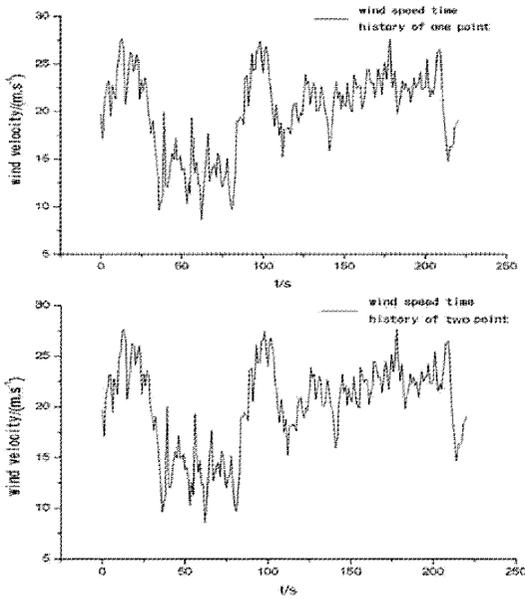


图 6 1 点与 2 点的仿真风速时程
Fig. 6 The simulated wind time history of Point1 and Point2

$$F_M = K_M V_r^2 C_M \quad (14)$$

$$K_D = \frac{1}{2} n \rho d, K_M = \frac{1}{2} N \rho d^2 \quad (15)$$

式中, n —导线分裂数, ρ —空气密度, d —导线直径, V_r —相对风速, C_D 、 C_L 、 C_M 分别为升力、阻力和扭转系数, 与导线的截面、覆冰形状和厚度、运动状态以及攻角有关; 导线上的风速时程处处均与悬挂点处风速时程相同, 忽略导线各点的高度差异对风速时程的影响。攻角可表示为:

$$\varphi = \theta_0 + \theta - \alpha \quad (16)$$

式中, θ_0 —导线的初始攻角。

在各种各样的覆冰形态中, 新月形冰型是覆冰导线的一种有代表性的截面形状, 其气动力系数 (阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 、扭转系数 C_M) 采用文献 [10] 中的风洞试验数据, 具体数据如图 7 所示。

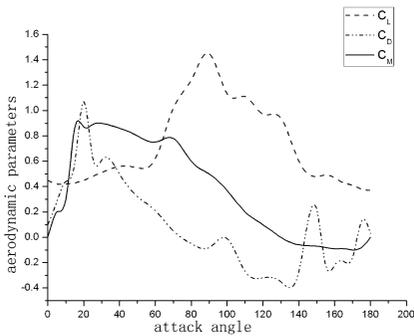


图 7 新月型覆冰导线的气动力系数
Fig. 7 The Aerodynamic parameters of crescent icing line

3.3 动力响应分析

根据上述荷载施加方法, 对输电塔及输电导线施加 X 方向 (顺风方向) 的脉动风荷载, 分别对单塔、无覆冰塔线体系及 0° 、 25° 、 60° 以及 90° 攻角下的新月形覆冰导线-输电塔进行了 6 种工况的非线性动力分析。在 3 个输电塔中, 由于中间塔的响应最能反映塔线耦合对输电塔风振响应的影响, 而且输电导线的中点也是整个输电线最危险的部位, 因此, 特选取中间塔最高处四点 (编号 $ta1$ 、 $ta2$ 、 $ta3$ 、 $ta4$) 及导线中点 (编号 $xian5$ 、 $xian6$), 将导线中点计算结果分别与无覆冰时位移响应进行对比, 增长幅值结果如下:

表 1 陀螺效应对一阶临界转速的影响

Table 1 The result of comparison

/%	non-ice	0°	25°	60°	90°	
xian1	X	—	12.22	4.59	9.62	12.86
	Y	—	120.17	130.83	170.59	30.31
xian2	X	—	57.79	2.08	10.34	10.38
	Y	—	319.35	363.08	363.09	29.48

对比无覆冰塔线体系中间塔最高点与覆冰塔线体系中间塔最高点位移响应, 结果如下:

表 2 对比结果

Table 2 The result of comparison

/%	non-ice	0°	25°	60°	90°
ta1	—	151.95	174.74	223.69	604.41
ta2	—	152.77	175.63	224.68	606.64
ta3	—	157.90	172.25	227.62	589.76
ta4	—	145.35	176.59	220.59	607.95

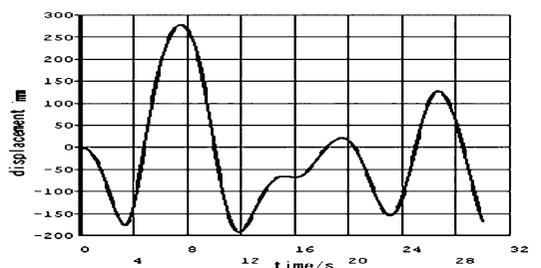


图 8 无覆冰导线中点 xian1 横风向位移响应
Fig. 8 The time history of vertical displacement of the middle point xian1 of non-icing line

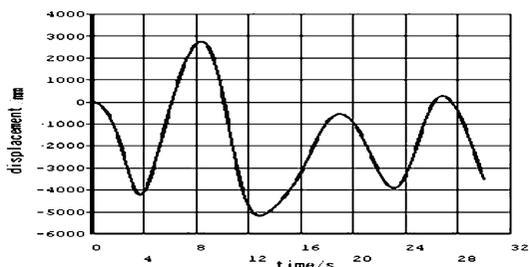


图9 攻角导线中点 xian1 横风向位移时程

Fig.9 The time history of vertical displacement of the middle point xian1 of angle icing line

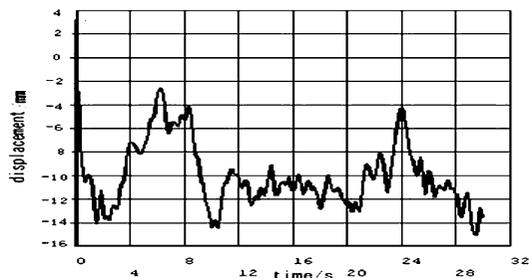


图10 无覆冰中间塔 ta1 点顺风向位移响应

Fig.10 The time history of horizontal displacement of the point ta1 of the non-icing middle tower

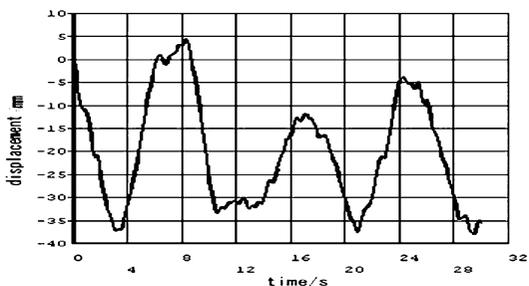


图11 有覆冰中间塔 ta2 点顺风向位移时程

Fig.11 The time history of horizontal displacement of the point ta2 of the icing middle tower

4 结论

本文通过对输电塔-覆冰导线的非线性动力响应分析得到如下结论:

(1)覆冰导线中点的顺风向位移与横风向位移相对于无覆冰状态都有不同程度的增大,覆冰导线由于覆冰的影响,在风的激励下,横风向位移即导线的垂直运动增大较为显著,这与理论相吻合,即:由舞动机理可知,舞动的轨迹总是椭圆形,椭圆的长轴偏 y 向(横风向),x 方向(顺风向)的振幅要小的多。

(2)有覆冰塔线耦联体系中间塔最高点处的顺风向位移与无覆冰相比较,有明显的增大,但振动频率有所减小,趋于平滑,覆冰导线张力的作用

导致与之耦联的输电塔发生不同程度的变化,耦联效应不容忽视。

(3)不同的攻角下,气动力系数有所不同,根据试验数据表明新月型覆冰攻角为最大迎风截面,为最小迎风截面。对比发现,攻角时,导线的垂直位移达到相对最大值,此时,垂直运动占主导地位,易发生舞动,这与实验结果相吻合。

参 考 文 献

- 1 Sig Byun G, Egbert R I. Two-degree-of-freedom analysis of power line galloping by describing function methods. *Electric Power Systems Research*, 1991, 21 (3): 187 ~ 193
- 2 Yu P, Popplewell N, Shah A H. Instability trends of inertially coupled galloping: Part I: Initiation. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 183 (4): 663 ~ 678
- 3 杨新华,王丽新. 考虑多种影响因素的导线舞动三维有限元分析. *动力学与控制学报*, 2004, 4 (3): 9 ~ 12 (Yang X H, Wang L X. 3D finite element analysis of transmission line galloping involving multi factors. *Journal of Dynamics and Control*, 2004, 4(3): 9 ~ 12 (in Chinese))
- 4 郭应龙,李国兴,龙传永. 输电线路舞动. 北京: 中国电力出版社, 2002. (Guo Y L, Li G X, Long C Y. The transmission line galloping. Beijing: China Electric Power Press, 2002 (in Chinese))
- 5 Yasui H, Marukawa H, Momomura Y, et al. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83 (1-3): 431 ~ 441
- 6 张相庭. 结构风压和风振计算. 上海: 同济大学出版社, 1985 (Zhang X T. The wind press and wind vibration calculation of structure. Shanghai: Tongji University Press, 1985 (in Chinese))
- 7 Chaîne P M, Skeates P. Ice Accretion Handbook (Freezing precipitation). Canada: Industrial Meteorology-study, 1974
- 8 高耸结构设计规范. GBJ 135 ~ 90; 北京, 1990 (Code for design of tall-slender structures. GBJ 135 ~ 90; Beijing, 1990 (in Chinese))
- 9 沈世钊,徐崇宝,赵臣. 悬索结构设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006 (Shen S Z, Xu Z B, Zhao C. Suspension cable structure design. Beijing: China Architecture and Building Press. 2006 (in Chinese))
- 10 黄河,刘建军,李万平. 覆冰导线气动力特性的数值模拟. *工程力学*, 2003 (增刊): 201 ~ 204 (Huang H, Liu J J, Li W P. Numerical simulations of aerodynamic characteris-

tics of iced conductors. *Engineering Mechanics*, 2003

(Supplement):201~204(in Chinese))

NON-LINEAR ANALYSIS ON DYNAMIC RESPONSE COUPLED TRANSMISSION TOWER-ICED LINE SYSTEM

Rong Zhijuan Zhang Ling

(*State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract In order to understand the dynamic properties of transmission tower-line coupling system and the non-linear wave-induced response of iced conductor cross-section, a three-tower and two-line finite element analysis model was built, in which the Davenport spectrum was chosen as target spectrum to simulate stochastic fluctuating wind, then the wind was created by adding harmonic wave and stochastic wind above. By using the existing crescent icing calculation model, single tower, tower-line without icing and icing tower-line with different attack angle were investigated based on time-history analysis method, the displacement of tower and line, and the stress of steel were analyzed simultaneously. The results indicate that icing has some effect on the displacement and stress of the transmission tower-line system, and the nonlinear-galloping of transmission tower-line coupling system is important.

Key words transmission tower-iced line system, galloping, stochastic fluctuating wind simulation, non-linear dynamic analysis