

考虑多种影响因素的导线舞动三维有限元分析

杨新华 王丽新 王 乘 陈传尧

(华中科技大学力学系, 武汉 430074)

摘要 利用三维有限元方法,分析了风速、攻角、导线分裂、磁场力和防舞装置等各种因素对导线舞动的影响.结果表明:风速、攻角和导线分裂等对导线舞动的影响很大;磁场力的影响很小.为减轻和防止导线舞动,在导线距离杆塔 1/3 和 2/3 处施加加重,可以获得明显的防舞效果.

关键词 输电导线, 舞动, 三维有限元

引言

舞动是输电导线在冰、风等多因素耦合激励下形成的一种低频率、大幅度的振动现象.统计资料表明,舞动激励风速主要集中在 4~10 m/s 之间,舞动频率一般为 0.15~3 Hz, 振动幅度可达几米甚至几十米^[1~2].舞动发生时,全档架空线路作定向的波浪式振动,导线横截面中心在垂直于导线走向的平面上具有呈椭圆形的运动轨迹.由于振幅过大,舞动容易造成相间闪络、金具损坏、跳闸停电、伤断导线和拉倒杆塔等事故,对线路的安全运行构成严重威胁.因此,研究舞动现象的形成机理,控制、减轻,甚至消除舞动带来的危害,对于保证输电线路的安全可靠运行具有非常重要的意义.

有关导线舞动研究的文献最早见于上世纪 30 年代,此后随着输电线路的发展,超高压线路的兴建,舞动事故日益频繁,对舞动的研究开始受到人们的广泛关注.通常认为,影响舞动的主要因素有 3 个:覆冰、风和线路结构.围绕这 3 个因素,研究舞动形成机理,成为舞动问题研究的重要内容.几十年来,尽管已经形成了 Den Hartog 垂直舞动机理、Nigol 扭转舞动机理和日本的扭转反馈机理等导线舞动的机理学说^[2],但都具有明显的局限性,特别是分裂导线、间隔棒和防舞锤等出现以后,导线舞动情况更趋复杂,已有的机理学说难以给出合理的解释.随着有限元分析技术的日益发展和成熟,数值分析技术在舞动机理的研究中开始扮演越来越重要的角色. Desai 等首先提出了带 3 个平动和一个扭转自由度的三维有限元法模型^[3~5], Zhang 基于三自由度杂交模型分析了分裂导线的舞动^[6],何程等采用三维有限元模型计算了安装防

振锤的分裂导线的自由振动^[7]. 本文将以 Desai 等提出的三维有限元模型为基础,通过实例研究风速及其攻角、导线分裂、磁场力和防舞装置等对导线舞动的影响.

1 舞动分析的有限元方程

采用 Desai 等提出的数学模型^[3], 见图 1. 舞动的动力学方程可以表示为

$$M\ddot{d}(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) = F(t) \quad (1)$$

其中 M , K 和 C 分别是结构总体质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵,由单元质量矩阵 $M^{(e)}$ 、单元刚度矩阵 $K^{(e)}$ 和单元阻尼矩阵 $C^{(e)}$ 组集而成; $d(t)$ 和 $F(t)$ 分别是 t 时刻结构总体位移矩阵和载荷矩阵; $\ddot{d}(t)$ 和 $\dot{d}(t)$ 分别是 t 时刻结构总体加速度矩阵和速度矩阵.

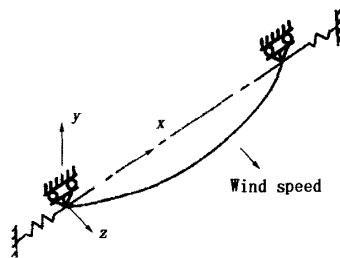


图1 导线舞动计算模型

Fig.1 Computational model of a galloping transmission line

在覆冰和稳态风载的作用下,有 $\ddot{d}(t) = \dot{d}(t) = 0$, 因此方程(1)变为

$$Kd(t) = F(t) \quad (2)$$

考虑到问题的几何非线性性质,可以采用动坐标迭代方法求解.求解完成后,得到导线的静态参考曲线.

2 舞动影响因素的考虑

2.1 风载荷

根据流体诱发振动理论,长为 L 的覆冰导线在速度为 U 的水平风力作用下,所受的空气动力载荷包括阻力 F_D 、升力 F_L 和扭矩 F_M ,可分别表示为^[5]

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{1}{2} \rho U^2 L D C_D, \\ F_L &= \frac{1}{2} \rho U^2 L D C_L, \\ F_M &= \frac{1}{2} \rho U^2 L D C_M \end{aligned} \quad (3)$$

其中 ρ 为气流密度; D 为导线直径; C_L, C_D, C_M 分别为升力、阻力和扭矩系数,与导线截面、覆冰形状和厚度、运动状态以及攻角有关. 要得到3个气动系数,必须首先确定攻角 α ,其计算公式是

$$\alpha = \alpha_0 - \Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2 \quad (4)$$

其中 α_0 是初始攻角, $\Delta\alpha_1 = \dot{Y}$ 是由导线垂直振动引起的攻角变化, $\Delta\alpha_2$ 是由导线扭振运动引起的攻角变化.

实际作用在导线上的水平力及垂直力为

$$\begin{aligned} F_h &= -F_L \sin\Delta\alpha_1 - F_D \cos\Delta\alpha_1, \\ F_v &= F_L \cos\Delta\alpha_1 - F_D \sin\Delta\alpha_1 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 相邻档距的影响

输电线路通常利用绝缘子挂接在塔架上,其两端位移不为零,必然受到相邻档距导线张力的影响. 采用弹簧单元模拟相邻档张力及绝缘子对导线的影响. 弹簧刚度可以表示为

$$\begin{aligned} K_x &= \frac{K_e K_i}{K_e + K_i} + K_r \\ K_e &= \frac{AE}{L_e} \cos^2 \theta, \\ K_i &= 12 \frac{T_0}{L} \left(\frac{T_0}{q_y L} \right)^2 \cos^2 \theta, \\ K_r &= \frac{T_0}{L} \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (6)$$

式中 AE 是导线的抗拉刚度, T_0 是导线的初张力, q_y 是单位长度导线上垂直载荷密度, L 是挂点间直线距离, L_e 是档间导线原长, θ 是两挂点连线与水平线之间的夹角.

2.3 磁场力

在静止状态下,输电线路相距很远,磁场力很小,可以不予考虑. 但是在发生舞动的时候,导线做大幅度的振动,此时线路间的相互距离变化频繁,磁场力也随之发生变化,而舞动形成过程本身就是

一个能量逐渐积累的过程,微小的磁场力对于舞动的形成是否产生影响是一个值得探讨的问题. 这一点在现有文献中没有涉及到.

考虑工频情况下电磁的准静态性质,线路的磁场仅由电流产生,应用安培定律可求出导线周围的磁场强度. 电流为 I 的单根输电线产生的磁场强度及其水平和垂直分量为

$$\begin{aligned} B &= \frac{u_0 I}{2\pi r} = \frac{u_0 I}{2\pi \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \\ B_x &= B \cos\alpha = B \cdot \frac{y_i - y}{r} = \frac{u_0 I (y_i - y)}{2\pi r^2} \\ B_y &= B \sin\alpha = B \cdot \frac{x - x_i}{r} = \frac{u_0 I (x - x_i)}{2\pi r^2} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 x_i, y_i 为导线横、纵坐标; x, y 为待求场空间 P 点的横、纵坐标; u_0 为空气磁导率; r 为 P 点到导线的距离.

计算出每根导线产生的磁场以后,应用叠加原理,就可以得到空间各点磁场矢量. 值得注意的是,三相交流电是时间的函数,相互之间存在 $2\pi/3$ 的相位差.

2.4 分裂导线

采用张紧弦法计算分裂导线的刚度. 图2为一分裂导线的截断模型,图中 θ_0 为子导线受冰载后产生的初始扭转角; θ_i 为外力矩 M 引起的扭转角; D 为导线分裂圆直径; T 为导线张力; F 为张力的切向分量. 导线右端固定,在距离右端 x 的左端施加力矩 M .

$$M = T \sin(\theta_0 + \theta_i) \frac{D}{2} N_c$$

$$\theta_i = \frac{D}{2x} \alpha$$

所以

$$M = T \sin(\theta_0 + \frac{D}{2x} \alpha) \frac{D}{2} N_c \quad (8)$$

扭转刚度

$$\begin{aligned} k &= k' + k'' = \frac{TD^2}{4} N_c \cos\theta_0 \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{l-x} \right) = \\ &= \frac{TD^2 l}{4x(l-x)} N_c \cos\theta_0 \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} k' &= \frac{dM}{d\alpha} = T \frac{D}{2} N_c \cos(\theta_0 + \frac{D}{2x} \alpha) \frac{D}{2x} \approx \\ &= \frac{TD^2}{4x} N_c \cos\theta_0 \\ k'' &= \frac{TD^2}{4(l-x)} N_c \cos\theta_0 \end{aligned}$$

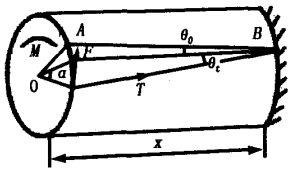


图2 分裂导线截断模型

Fig.2 Intercepted model of bundles

2.5 防舞装置的模拟

目前最常用的导线防舞装置是压重,即防舞锤.在静力计算中,压重可以简化为集中力加载,但在动力计算中,则必须作为集中质量添加到结构模型中.

3 算例与分析

本文通过一个实例分析,考察各种相关因素对舞动的影响.导线的基本材料及结构参数如表1,其中阻尼比根据文献[5]选取.采用Newmark方法求解动力方程,可以绘制导线舞动的动画过程.图3给出的是导线舞动过程两个瞬间在xoy平面上的投影,左边分别显示导线初始位置中点的y坐标和当前位置中点的y坐标,右边粗线表示导线初始位

置,细线表示当前位置.

3.1 风速对舞动的影响

图4给出了初始攻角 $\alpha_0 = 10^\circ$ 时不同风速下导线中点的运动轨迹.可以看出,随着风速增大,导线舞动的振幅不断增加,但当风速增大到一定程度,垂直振幅的增加开始变得不很明显.这是因为舞动是风能逐渐积累的一个过程,风力太大容易破坏导线运动的平衡,导线的运动形式将演变为在大风中的摆动.

3.2 初始攻角对舞动的影响

Den Hartog 机理认为,导线产生偏心覆冰时,如果导线上下振动产生的诱导攻角出现在升力曲线 $C_L-\alpha$ 负斜率区域,而且满足 $\partial C_L / \partial \alpha + C_D < 0$,舞动就会发生.图4(a)给出的是风速 4.1 m/s、初始攻角 10° 时导线中点运动轨迹,图5则给出的是风速 4.1 m/s、初始攻角分别为 0° 和 50° 时导线中点运动轨迹.比较发现,当初始攻角为 0° 时,导线舞动的振幅相对较大;当初始攻角为 10° 时,振幅有所减小,但舞动仍然非常明显;而当初始攻角达到 50° 时,导线舞动没有发生.根据Den Hartog舞动机理,这是因为 $C_L-\alpha$ 曲线斜率为正,不满足Den Hartog 舞动条件.

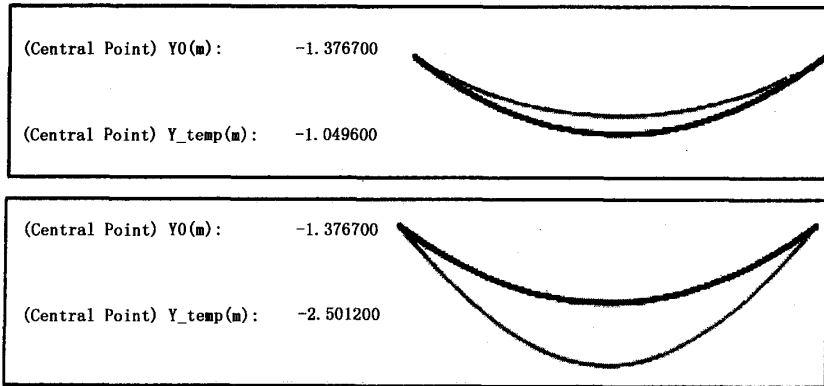


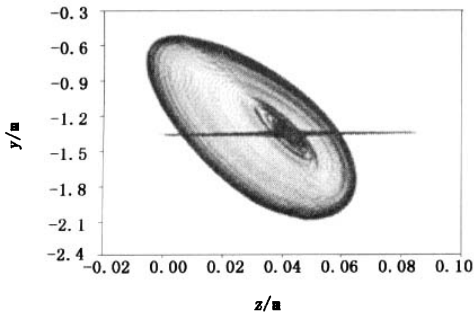
图3 导线舞动变形在 xoy 平面上的投影

Fig.3 Deformation contour projected in xoy plane

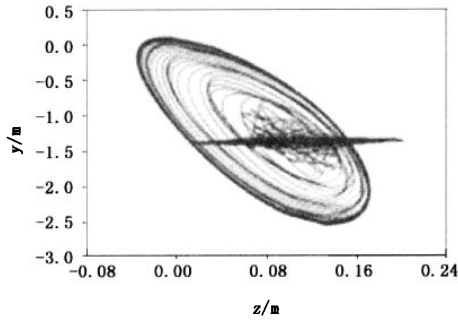
表1 舞动模拟导线的物理参数

Table 1 Physical parameters employed to simulate galloping

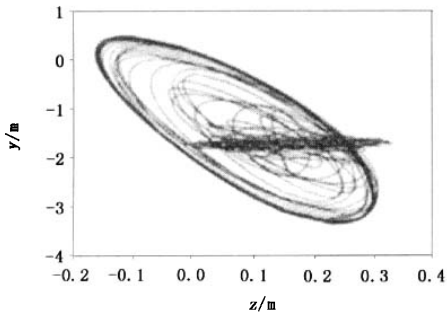
Parameters	Notation	Units	Values
Axial rigidity	AE	N	13.30×10^6
Diameter	D	m	18.8×10^{-3}
Initial tensile force	T_0	N	21.73×10^3
Distance between adjacent towers	L	m	125.9
Damping ratios in y and z-direction	ξ_y, ξ_z	/	0.08×10^{-2}
Damping ratio in θ direction	ξ_θ	/	3.79×10^{-2}
Mass per unit length of iced lines	ρ	kg/m	1.53



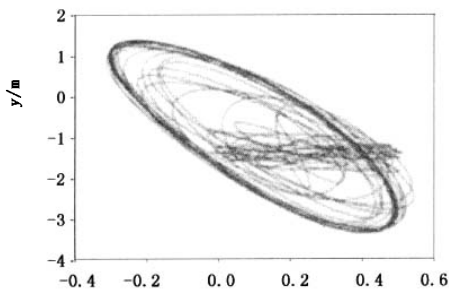
(a) 4.1 m/s



(b) 6.1 m/s



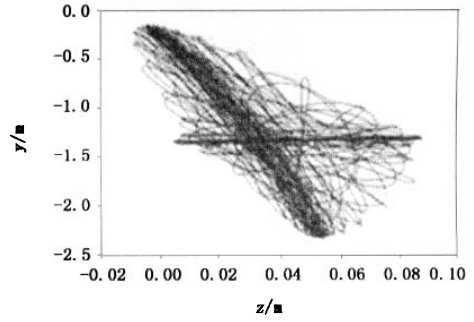
(c) 8.1 m/s



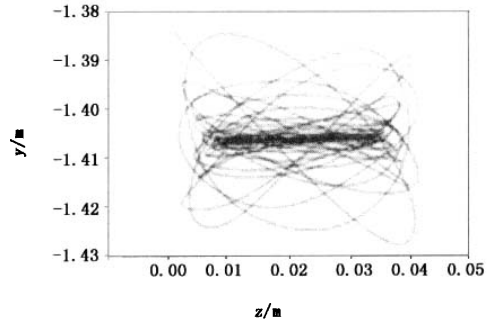
(d) 10.1 m/s

图 4 风速对舞动的影响

Fig.4 Effect of wind speed on galloping



(a) 0°



(b) 50°

图 5 初始攻角对舞动的影响

Fig.5 Effect of original attack angle on galloping

3.3 导线分裂对舞动的影响

为研究导线分裂对舞动的影响,分别计算风速为 4.1 m/s,初始攻角为 10° 的单根导线和三分裂(分裂圆半径为 0.1 m)导线的舞动情况.单根导线舞动的中点轨迹和 z 向时间历程曲线分别见图 4(a) 和图 6;三分裂导线舞动的中点轨迹和 z 向时间历程曲线分别见图 7 和图 8.对比可以看出,分裂导线的振幅明显大于单根导线,而且分裂导线比单根导线更容易发生舞动,并很快达到最大振幅.

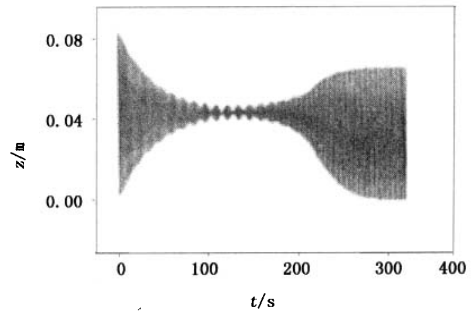


图 6 单根导线中点 z 向时间历程曲线

Fig.6 Time history curve of the mid-point of a single line in z direction

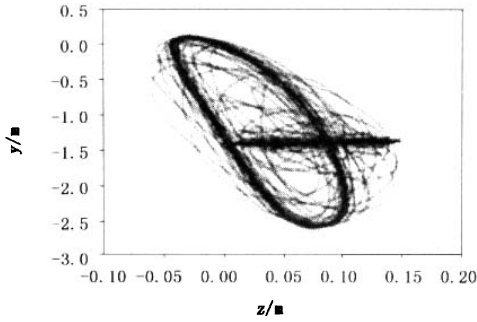


图7 分裂导线中点舞动轨迹
Fig.7 Galloping trace of the mid-point of a bundle

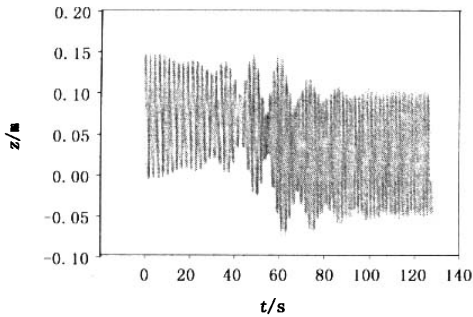


图8 分裂导线中点 z 向时间历程曲线
Fig.8 Time history curve of the mid-point of a bundle in z direction

3.4 磁场力对舞动的影响

为了考虑磁场力对舞动的影响,需要在外载荷向量中增加磁场力.计算结果表明,磁场力对导线舞动的影响不明显.由于磁场力很小,而且其方向与导线运动方向并不保持一致,不会导致能量积累.磁场力的大小与线路间距离的平方成反比,只有两条线路非常接近时,才可能对导线的运动产生影响,而此时相间闪络等破坏事故可能已经发生.

3.5 防舞装置模拟

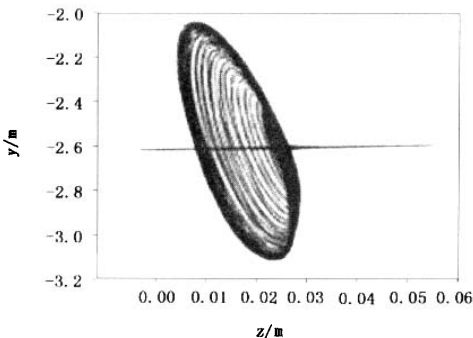


图9 压重下中点舞动轨迹
Fig.9 Galloping trace of the mid-point with weight hammers

为模拟防舞锤的防舞效果,在导线距离杆塔 1/3 和 2/3 处各挂 100 kg 的质量.图 9 和图 10 分别给出压重下导线中点的舞动轨迹和 y 向时间历程.可以看出,加挂重物后,导线悬垂变大,发生舞动需要的时间也延长,而且舞动振幅明显减小,最大振幅从安装防舞锤之前的 1.49 m 下降到 1.09 m,降低约 27%,因此压重防舞可以获得明显效果.

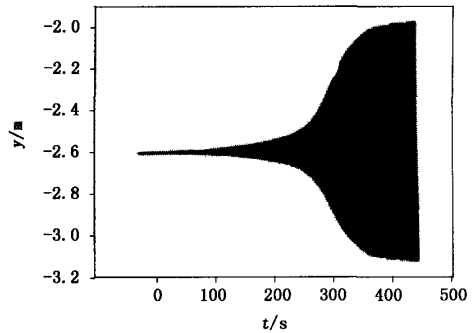


图10 压重下导线中点 y 向时间历程曲线
Fig.10 Time history curve of the mid-point with weight hammers in y direction

4 结论

本文利用有限元方法,研究了风速、攻角、导线分裂、磁场力和防舞装置等对导线舞动的影响,分析表明:1)风速对舞动的影响很大.风速越大,舞动振幅越大,但随着风速的增大,垂直振幅的增加开始逐渐变小;2)攻角是舞动的重要影响因素.初始攻角越小,振幅越大,当初始攻角达到 50°时,舞动已经演变为摆动;3)导线分裂对舞动也有重要影响.在相同环境条件下,分裂导线的振幅明显大于单根导线,而且更容易发生舞动;4)磁场力对导线舞动没有明显的影响;5)在导线距离杆塔 1/3 和 2/3 处施加压重,可以获得明显的防舞效果.

致谢

感谢河南省电力调度通信中心对本文工作的支持.

参 考 文 献

- 1 Wang J, Lilien JL. Overhead electrical transmission line galloping —— a full multi-span 3-DOF model, some application and design recommendations. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1998, 13(3): 909~915
- 2 张忠河,王藏柱. 舞动研究现状及其发展趋势. *电力情报*, 1998, (4): 6~8 (Zhang Zhonghe, Wang Zangzhu.

- Status quo and trends of gallop investigation. *Information on electric power*, 1998, (4): 6~8 (in Chinese))
- 3 Yu P, Desai YM, Shah AH, Popplewell N. Three degree-of-freedom model for galloping, Part I: formulation. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1993, 119 (12): 2404~2425
 - 4 Desai YM, Yu P, Popplewell N, Shah AH. Finite element modeling of transmission line galloping. *Computers & Structures*, 1995, 57(3): 407~420
 - 5 Desai YM, Yu P, Shah AH, Popplewell N. Perturbation-based finite analyses of transmission line galloping. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 191(4): 469~489
 - 6 Zhang Q, Popplewell N, Shah AH. Galloping of bundle conductor. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 234 (1): 115~134
 - 7 何程,赵高煜. 安装防舞锤的分裂导线自由振动的有限元计算. *工程力学*, 2003, 20(1): 101~105 (He Zeng, Zhao Gaoyu. A finite element for 3D free vibration analysis of bundled power lines with weight hammers. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(1): 101~105 (in Chinese))

3D FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TRANSMISSION LINE GALLOPING INVOLVING MULTI FACTORS

Yang Xinhua Wang Lixin Wang Cheng Chen Chuanyao

(Department of Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The effects of wind speed, attack angle, bundle, magnetic force and weight hammer on galloping were analyzed by utilizing the 3D finite element method. The results showed that the effects of wind speed, attack angle and bundle were great, but the effect of magnetic force was very small. The results also showed that to fix weight hammers at the 1/3 and 2/3 span of the line is effective for guarding against galloping.

Key words electrical transmission line, galloping, 3D finite element