

文章编号:1000-582X(2010)03-076-06

覆冰导线舞动数值仿真分析

胡景¹, 严波¹, 张宏雁², 周松³

(1. 重庆大学资源及环境科学学院工程力学系, 重庆 400044; 2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610071;
3. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610016)

摘要:利用 ABAQUS 有限元分析软件, 通过欧拉梁单元的自由度释放和设置材料为不可压缩, 模拟得到具有扭转自由度的覆冰导线的索单元, 进一步利用用户自定义单元模拟覆冰导线所受的阻力、升力和扭矩空气动力载荷, 分析了覆冰导线的舞动现象, 并通过覆冰单导线与覆冰双分裂导线舞动模拟算例验证了方法的正确性。模拟研究了覆冰初始攻角、线路档距和导线初始张力等因素对覆冰导线舞动的影响规律。所得结果对覆冰导线舞动和防舞技术的研究具有一定的参考价值。

关键词:覆冰导线; 舞动; ABAQUS; 索单元

中图分类号:TM753; TM039

文献标志码:A

Numerical simulation on galloping of iced conductors

HU Jing¹, YAN Bo¹, ZHANG Hong-yan², ZHOU Song³

(1. Department of Engineering Mechanics, College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Sichuan Electric Power Test & Research Institute, Chengdu 610071, Sichuan, P. R. China;

3. Sichuan Electric Power Industry Commission & Test Institute, Chengdu 610016, Sichuan, P. R. China)

Abstract: To investigate galloping of iced conductors, with the release of the bending degree-of-freedom of Euler beam element and setting the material to be 'No Compression' in ABAQUS software, a cable element with torsion degree-of-freedom is obtained. And then the aerodynamic loads including drag, lift and torque on the iced conductor are simulated by means of the user-defined element. The galloping of iced single conductor and iced twin bundle conductor are numerically analyzed to demonstrate the efficiency of the proposed method. The effects of initial attack angle, span length and initial tension in conductor on the behavior of galloping are investigated by numerical simulation.

Key words: iced conductor; galloping; ABAQUS; cable element

输电导线覆冰以后在一定条件下会引发舞动^[1]。舞动可能对高压输电线路造成极大的破坏, 造成导线及金具的疲劳破坏、磨损和导线断股, 有时甚至造成跳闸及杆塔倾斜或倒塌等恶性事故, 严重

威胁架空输电的安全运行。自 20 世纪 30 年代发现架空输电线舞动现象以来, 人们便开始对输电线舞动进行研究。目前国际上普遍接受的有 Den Hartog 垂直舞动理论和 O Nigol 扭转舞动理论^[1],

收稿日期:2009-10-15

基金项目:国家电网公司科技项目(2007-1-77);重庆市自然科学基金项目(CSTC 2006BB6149)

作者简介:胡景(1983-),男,博士研究生,主要从事工程力学的研究。

严波(联系人),重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65102561;(E-mail)boyan@cqu.edu.cn。

此外还有惯性耦合机理^[2]和稳定性机理等^[3]。据统计,覆冰分裂导线比单导线更易发生舞动^[4],但这方面的研究还十分缺乏。在舞动的数值模拟研究方面,Yu等人提出了三自由度模型分析覆冰单导线的舞动^[5]。Desai等人则采用三结点等参索单元建立模拟导线舞动的运动方程,并采用振型叠加法对方程进行求解^[6]。国内何程等人则对大跨越分裂导线的静力平衡进行探讨,推导了多档导线的静态构形和张力的解析计算公式^[7]。王丽新等则采用梁单元对覆冰导线的舞动进行了非线性数值模拟^[8]。Hu等用一种三自由度模型模拟分析了扰流防舞器对舞动的抑制作用^[9]。最近,刘小会等采用三结点索单元,考虑导线运动过程中的几何非线性以及覆冰产生的偏心惯性作用,得到基于更新 Lagrange 格式的有限元方程,模拟了覆冰单导线的舞动^[10],并发现了一种可能的新的舞动模式。Zhang等建立了一个混合模型研究分裂导线的舞动^[11]。严波等在文献^[11]工作的基础上,基于振型叠加法,利用罚函数法引入子导线上间隔棒连接点的运动约束条件,采用 Newmark 法进行时间积分,Newton-Raphson 迭代求解非线性方程,实现对双分裂导线舞动的数值模拟,模拟中考虑了尾流效应^[12]。白海峰等利用此方法对四分裂导线的驰振进行了进一步的研究^[13]。在对覆冰分裂导线舞动的模拟研究中,大多数将分裂导线等效为一根导线进行分析,可能和实际存在差异。特别是在考虑由于迎风侧子导线的尾流对背风侧子导线的影响时,将分裂子导线分别考虑是十分必要的。

笔者利用 ABAQUS 有限元软件,通过欧拉梁单元结点自由度释放和设置材料为不可压缩,可得到能模拟覆冰导线的索单元。利用用户单元程序定义一种单元实现空气动力载荷的施加。这种方法可以方便地实现任意多分裂导线舞动的模拟。

1 覆冰导线舞动有限元模拟

覆冰导线舞动模拟的关键是采用合适的单元和气动载荷的处理,下面详细讨论利用 ABAQUS 有限元软件实现这一过程的方法。

1.1 具有扭转自由度的索单元

导线覆冰后通常会形成非圆截面形状,常见的有新月型、扇型和 D 型等。在风荷载作用下具有非

圆截面形状的覆冰导线会受到升力 F_L 、阻力 F_D 和扭矩 M_0 的作用,如图 1 所示。导线为索结构,具有较强的抗拉能力,一般忽略其抗压和抗弯刚度。由于在风荷载作用下其上有扭矩作用,故在采用有限元方法模拟时,应采用具有扭转自由度的索单元进行离散。

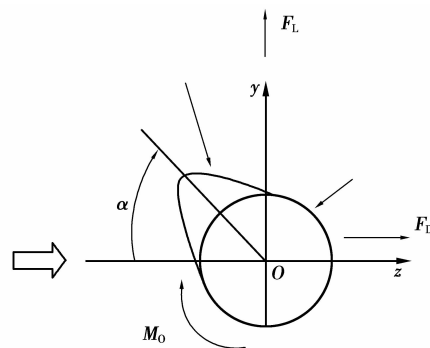


图1 新月型覆冰导线截面及其空气动力载荷

在现有的有限元通用软件中一般均无此类单元,但可以利用空间梁单元通过释放其结点的弯曲自由度获得。如采用 ABAQUS 有限元软件时,在释放梁单元结点弯曲自由度后,再将其材料性质设置为不可压缩即可获得模拟覆冰导线的具有扭转自由度的索单元。

1.2 气动载荷单元

在风荷载作用下覆冰导线所受的空气动力是随攻角 α 变化的,参见图 1。在导线的运动过程中,攻角在不断的变化,因而空气动力随导线的运动状态而变化。覆冰导线所受的空气动力可表达为

$$[F_y F_z M_0]^T = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U_z d [C_y(\alpha) C_z(\alpha) d C_\theta(\alpha)]^T, \quad (1)$$

式中 ρ_{air} 、 U_z 、 d 分别为空气密度、风速和裸导线直径; C_i ($i=y, z, \theta$) 为由风洞试验测得的与攻角有关的空气动力系数。空气动力系数随攻角的变化可利用试验数据进行多项式拟合得到

$$C_i(\alpha) = a_{i1} + a_{i2}\alpha + a_{i3}\alpha^2 + a_{i4}\alpha^3, \quad (2)$$

式中 a_{i1} 、 a_{i2} 、 a_{i3} 、 a_{i4} 为常数。覆冰导线运动过程中攻角的变化可由下式确定^[6]:

$$\alpha \approx \theta - \left(\frac{R\dot{\theta} + \dot{V}}{U_z} \right), \quad (3)$$

式中 θ 、 R 、 $\dot{\theta}$ 、 \dot{V} 分别为覆冰导线的扭转角,特征半径,扭转角速度和垂直方向的速度。

可见,覆冰导线在运动过程中任意时刻所受的气

动载荷与其当前运动状态有关,气动载荷的计算可通过 ABAQUS 的用户单元子程序 UEL 自定义实现。为此,在 UEL 中定义一个无质量无刚度的单元,该单元与模拟覆冰导线的索单元共结点,从而在调用该用户单元时可以获得每一时刻结点的位移、转角、速度和角速度等,由此利用式(3)可计算当前的攻角,进一步由式(2)、(1)确定作用在各个结点上的气动载荷。这里称定义的用户单元为气动载荷单元。

Abaqus/Standard 模块隐式积分采用 Hilber-Hughes-Taylor 方法,其动态平衡方程与余量方程分别由下两式给出^[14]

$$-\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + (1+\nu)\mathbf{G}_{t+\Delta t} - \nu\mathbf{G}_t = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + (1+\nu)\mathbf{G}_{t+\Delta t} - \nu\mathbf{G}_t, \quad (5)$$

式中 \mathbf{M} 为质量矩阵; $\mathbf{G}_{t+\Delta t}$ 为当前时刻的内部状态变量(内力与外部载荷的矢量和); \mathbf{G}_t 为上一时刻的内部状态变量; $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ 是当前时刻的加速度; ν 为数值阻尼; \mathbf{F} 为余量。在 ABAQUS 的用户单元程序中,需给出如下矩阵

$$\mathbf{A}_{\text{matrx}} = \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{u}}/\dot{\mathbf{u}}) + (1+\nu)\mathbf{C}(\dot{\mathbf{u}}/\dot{\mathbf{u}}) + (1+\nu)\mathbf{K}, \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_{\text{rhs}} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + (1+\nu)\mathbf{G}_{t+\Delta t} - \nu\mathbf{G}_t. \quad (7)$$

其中, \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为阻尼矩阵和刚度矩阵。数组 \mathbf{R}_{rhs} 为载荷余量向量。如前所述,在此定义的气动载荷单元,其刚度矩阵,阻尼矩阵和质量矩阵均为零,故式(6)、(7)成为

$$\mathbf{A}_{\text{matrx}} = 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{\text{rhs}} = (1+\nu)[F_y \ F_z \ M_0]_{t+\Delta t}^T - \nu[F_y \ F_z \ M_0]_t^T. \quad (9)$$

由于自定义气动载荷单元与离散覆冰导线的索单元共结点,通过这种方式即可将气动载荷施加到索单元上。

2 数值算例

为了验证前述方法的正确性,分别对文献[6]和[11]中的两个算例进行计算,并将结果进行比较。文献[6]和[11]给出的覆冰导线物理参数如表 1 中所列,其轴向刚度、扭转刚度和转动惯量等均由试验测得。

为了简化起见,在利用 ABAQUS 模拟舞动时,将覆冰导线截面等效为圆截面。在等效时应保证两者的扭转刚度、转动惯量、轴向刚度、单位长度质量相等,即

$$E'\pi d'^2/4 = EA, \quad (10)$$

$$G'\pi d'^4/32 = GI, \quad (11)$$

$$\rho'\pi d'^2/4 = \mu, \quad (12)$$

$$\rho'\pi d'^4/32 = J, \quad (13)$$

式中 E' 、 G' 、 ρ' 、 d' 分别为等效圆截面的弹性模量、剪切模量、密度和直径。通过表 1 数据联立式(10)–(13)便可解出这 4 个等效参数,如表 2 中所示。

表 1 覆冰导线的物理参数

| 参数 | 符号 | 单位 | 算例 1 ^[6] | 算例 2 ^[11] |
|----------|-------|---|---------------------|----------------------|
| 轴向刚度 | K_a | 10^6 N | 13.30 | 20.23 |
| 扭转刚度 | K_t | $\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-1}$ | 101.00 | 101.00 |
| 水平拉力 | H | 10^3 N | 21.73 | 30.00 |
| 裸线直径 | d | 10^{-3} m | 18.80 | 28.60 |
| 单位长度质量 | μ | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ | 1.53 | 2.38 |
| 单位长度转动惯量 | J | $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}$ | 57.02 | 3.33 |

表 2 覆冰导线等效物理参数

| 算例 | d'/mm | $\rho'/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | E'/MPa | G'/MPa |
|----|----------------|---|-----------------|-----------------|
| 1 | 172.60 | 65.39 | 568.50 | 1.16 |
| 2 | 33.46 | 2 706.36 | 23 020.00 | 821.20 |

2.1 算例 1

考虑一单档、单导线模型,其档距为 125.88 m,重力作用下的弧垂为 1.38 m。覆冰冰型为 D 型,初始攻角为 10° ,风速为 4.1 m/s。空气动力系数随攻角变化曲线如图 2 所示,导线物理参数如表 2 中所列。有限元模型导线两端固定约束,采用 200 个索单元离散,在导线各结点上施加气动载荷。

采用 ABAQUS 模拟得到的导线中点的舞动轨迹和位移的时间历程如图 3、4 中所示。从图中可以看出,开始时导线在平衡位置附近小幅摆动,随着时间的推移,振幅不断增加,直至形成一个近似的椭圆轨迹,这种舞动模式即为邓哈托垂直舞动。在稳定状态下,文献[6]采用模态分解法计算得到的垂直方向的振幅为 1.58 m,水平方向为 0.04 m,结果分别为 1.57、0.05 m。两者的相对误差分别为 0.63% 和 20%。

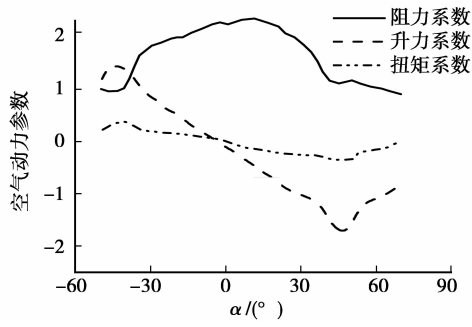
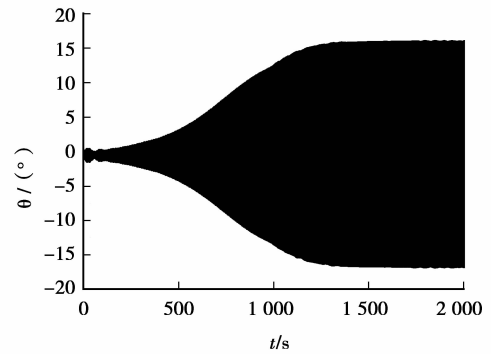
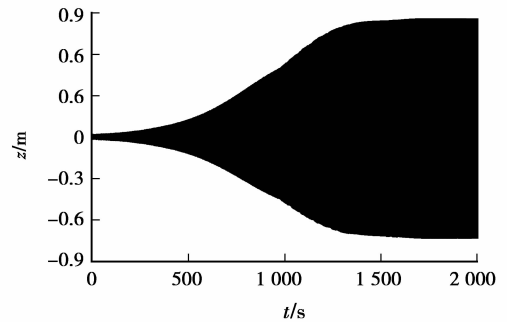


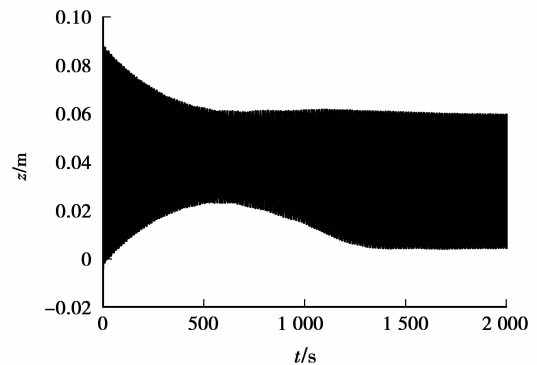
图2 覆冰导线空气动力系数随攻角变化曲线^[6]



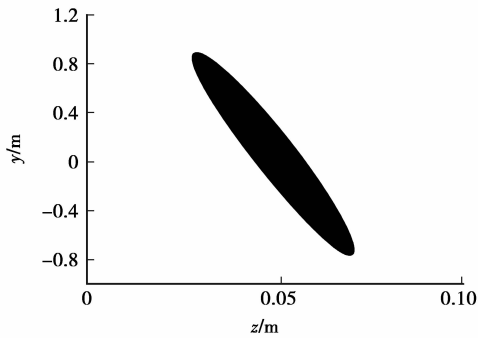
(a)扭转角



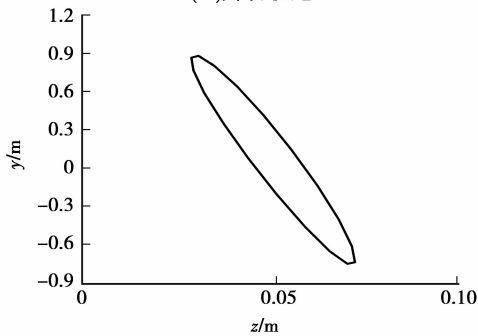
(b)y方向位移



(c)z方向位移



(a)舞动轨迹



(b)稳定后舞动轨迹

图3 导线中点的舞动轨迹

图4 导线中点位移时间历程

2.2 算例2

现模拟如图5所示的一水平双分裂导线的舞动。其档距为125.88 m,弧垂为1.54 m,沿导线方向均匀布置3根间隔棒,每个间隔棒的质量为1.2 kg,子导线之间的间距为0.4 m。覆冰初始攻角为40°,风速为4.0 m/s。空气动力系数取自文献[11],导线物理参数见表2。有限元模型两端固定约束,采用200个索单元离散。

利用ABAQUS模拟得到的导线中点的舞动轨迹如图6所示。文献[11]采用三自由度混合模型是将分裂导线等效成一根单线计算,计算所得到的垂直方向振幅为0.334 m,水平方向为0.022 m,结果中子导线1的垂直方向振幅与水平方向振幅分别为0.311、0.021 m,子导线2分别为0.353、0.020 m。

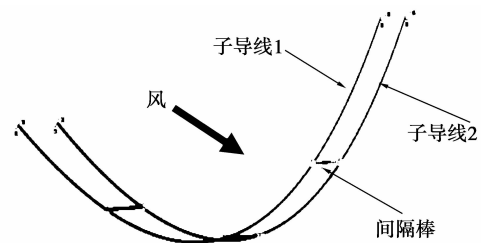


图5 水平覆冰双分裂导线模型

由图6可见,每根子导线舞动轨迹的形状均为椭圆状,但垂直方向的振幅存在差异,造成这种差异的原因是子导线自身的扭转和两根子导线整体转动共同所致。

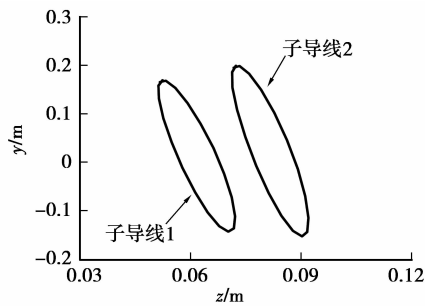


图 6 双分裂导线中点的舞动轨迹

3 覆冰导线舞动参数分析

影响导线舞动的因素较为复杂,主要包括 3 个方面:覆冰冰型、风速及其方向、线路结构参数。其中线路结构参数又包括导线的类型、导线分裂数、张力和档距等。现利用算例 1 的导线物理参数,就初始攻角、导线初始张力和档距对导线舞动的影响规律进行模拟分析。

3.1 初始攻角的影响

采用和算例 1 相同的模型,仅改变覆冰初始攻角,模拟其舞动过程。4 个不同初始攻角下导线舞动稳定后中点的运动轨迹如图 7 所示,相应的幅值和扭转角幅度见表 3 中所示。

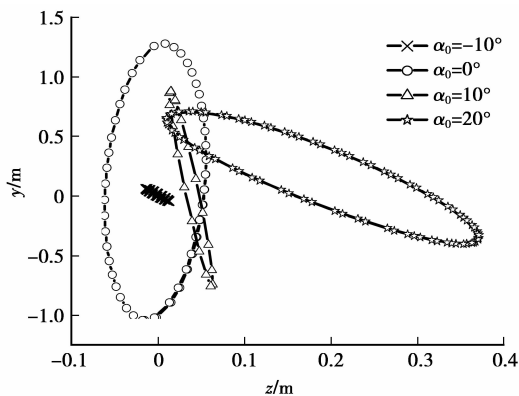


图 7 初始攻角对导线舞动的影响

表 3 不同初始攻角下导线的舞动幅值

| 初始攻角 / (°) | y 向幅值 /m | z 向幅值 /m | 扭转角幅度 / (°) |
|------------|----------|----------|-------------|
| -10 | 0.11 | 0.03 | 37.3 |
| 0 | 2.28 | 0.12 | 72.8 |
| 10 | 1.57 | 0.05 | 33.0 |
| 20 | 1.27 | 0.87 | 68.8 |

由邓哈托舞动机理可知,在升力曲线的负斜率区域内,如果满足 $\partial C_L / \partial \alpha + C_D < 0$ 舞动就会发生。

而初始攻角 -10° 至 20° 范围都处于升力曲线的负斜率区域,计算结果表明导线都发生了舞动。但由于初始攻角的不同,舞动的振幅也有较大的差别。

3.2 档距的影响

日本在对其国内的舞动状况进行了全面的观测与归纳之后,指出档距大的线路发生舞动的事例较多,即档距越大越易于发生舞动^[1]。现保持输电导线模型的初始攻角与初始张力不变,计算不同档距下导线的舞动轨迹。初始攻角取 10° 。计算得到的导线中点最大舞动幅值随档距的变化如图 8 所示。可见,档距越大,舞动幅值越大。此外,图 9 给出了档距分别为 129 m 和 300 m 时导线中点位移时间历程,从图中可见,档距越大,达到稳定舞动状态所需时间越短,因而越容易出现舞动,这与报道的实际观察^[1]结果一致。

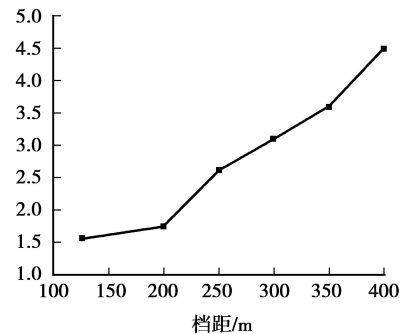
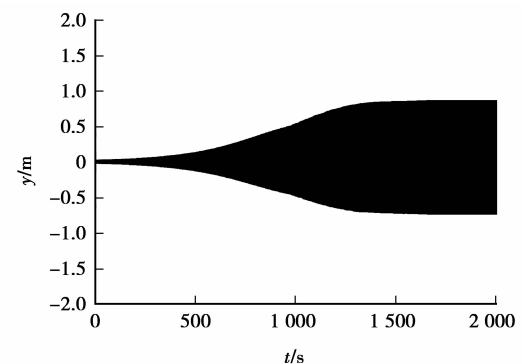
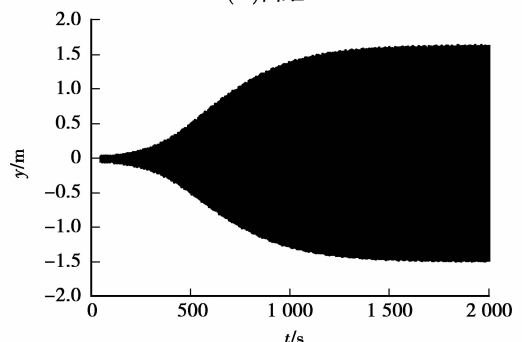


图 8 导线舞动垂直振动幅值随档距的变化



(a) 档距 129 m



(b) 档距 300 m

图 9 不同档距导线舞动垂直位移时间历程

3.3 初始张力的影响

导线模型仍然同算例1,初始攻角为 10° 。图10给出了导线中点舞动垂直振幅随初始张力的变化规律。通过导线的模态分析可知,随着导线初始张力的增大,其 y 向固有频率会增大。根据邓哈托舞动理论,导线 y 向固有频率增大时其 y 向的振幅即垂直振幅将会减小。图10所示结果正好印证了这个规律。

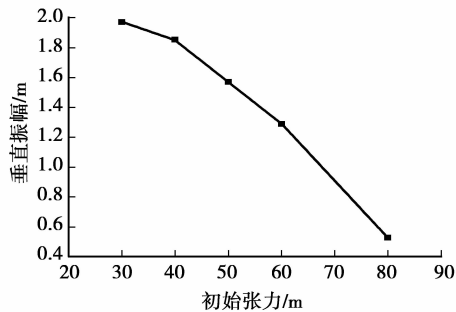


图10 导线舞动垂直振动幅值随张力的变化

4 结 论

笔者探讨了利用 ABAQUS 有限元软件模拟覆冰导线舞动的方法,通过算例验证了其正确性。模拟研究了初始攻角、档距和导线的初始张力对舞动的影响规律。结果表明,覆冰初始攻角对导线舞动的幅值影响较大;随着档距的增加,舞动幅值增大,且档距越大越易发生舞动;导线初始张力越大,舞动幅值越小。值得一提的是,在 ABAQUS 中成功实现覆冰导线舞动模拟,可以方便地用于任意多分裂导线,为利用 ABAQUS 强大的功能研究覆冰导线防舞技术提供了有效的手段。

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.
- [2] JONES K F. Coupled vertical and horizontal galloping [J]. Journal of Engineering Mechanical, ASCE, 1992, 18(1):92-107.
- [3] 尤传永. 导线舞动稳定性及其在输电线路上的应用[J]. 电力设备,2004,5(6):13-17;
YOU CHUAN-YONG. Stability mechanism of conductor galloping and its application on transmission line[J]. Electrical Equipment, 2004,5(6):13-17;
- [4] 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 SHAO-HUA, JIANG XING-LIANG, SUN CAI-XIN. Study status of conductor galloping on transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2005,

31(10):11-14.

- [5] YU P, DESAI Y M D, SHAH A H, et al. Three-degree-of-freedom model for galloping, part I: Formulation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(12):2404-2425.
- [6] DESAI Y M, YU P, POPPLEWELL N, et al. Finite element modeling of transmission line galloping [J]. Computers & Structures 1995,57(3):407-420.
- [7] 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 GAO-YU, LI SHANG-MING. Static analysis and computation of long span multi-conductor transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(11):34-37.
- [8] 王丽新,杨文兵,杨新华,等. 输电线路舞动的有限元分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2004,21(1):76-80.
WANG LI-XIN, YANG WEN-BING, YANG XIN-HUA, et al. Finite element analysis for galloping process of transmission lines [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2004,21(1):76-80.
- [9] HU J, SONG Z, MA J G, et al. Model for comprehensive simulation of overhead high voltage power transmission line galloping and protection[C]// 2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Oct15-18, 2006, Kansas, USA. [S. l.]: IEEE, 2006:190-193.
- [10] LIU X H, YAN B, ZHANG H, et al. Nonlinear numerical simulation method for galloping of iced conductor [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2009,30(4):489-501.
- [11] ZHANG Q, POPPLEWELL N, SHAH A H. Galloping of Bundle Conductor [J]. Sound and Vibration, 2000, 234(1):115-134.
- [12] 白海峰,李宏男. 分裂式覆冰导线横风驰振响应研究[J]. 振动工程学报,2008,21(3):298-303.
BAI HAI-FENG, LI HONG-NAN, Crosswind-induced galloping of iced-bundle conductors [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(3):298-303.
- [13] 严波,李文蕴,张宏雁,等. 一种模拟覆冰双分裂导线舞动的数值方法 [J]. 重庆大学学报,2009,32(7):787-792.
YAN BO, LI WEN-YUN, ZHANG HONG-YAN, et al. A numerical method for galloping of twin bundle conductor[J]. Journal of ChongQing University, 2009, 32(7):787-792.
- [14] ABAQUS. ABAQUS/CAE user's manual, version 6.4[M]. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 2003.

(编辑 王维朗)