

8-13-2020

Modal Analysis of Iced Conductor Galloping for Continuous Spans

Xiaohui Liu

1. *Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;;*

Lufei Zhang

1. *Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;;*

Yan Bo

2. *Chongqing University, Chongqing 400044, China;*

Xiaoyan Zhang

1. *Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modal Analysis of Iced Conductor Galloping for Continuous Spans

Abstract

Abstract: The parameter analysis was presented for continuous spans vibration induced by single-span conductor galloping. The fine finite element model of continuous spans and insulator strings was set up by ABAQUS software, the aerodynamic load was defined by UEL. So the dynamic response of continuous spans induced by single-span conductor galloping were numerically simulated in ABAQUS. *The numerical simulation results show that the structure parameters have obvious effect on the vibration amplitude of the displacements and tension, low order modes have great influence on the vibration amplitude of the displacements, high order modes have great influence on the vibration amplitude of the tension. The galloping damage can be reduced in transmission line design using the conclusions of parameter analysis. The conclusion is a useful reference for anti-galloping of continuous spans.*

Keywords

galloping, finite element, continuous spans, transmission line conductor

Recommended Citation

Liu Xiaohui, Zhang Lufei, Yan Bo, Zhang Xiaoyan. Modal Analysis of Iced Conductor Galloping for Continuous Spans[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2647-2654.

连续档覆冰导线舞动模态分析

刘小会¹, 张路飞¹, 严波², 张晓艳¹

(1.重庆交通大学, 重庆 400074; 2.重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 对单档舞动引起的连续档输电线大幅振动进行了参数分析。利用 ABAQUS 软件建立考虑绝缘子串连续档覆冰输电线的精细有限元模型, 通过用户自定义单元子程序 UEL 定义空气动力载荷单元, 实现单档舞动引起整个连续档大幅振动的数值模拟。数值模拟结果表明档距、张力等结构参数对连续档输电线位移及应力振幅有较大的影响, 低阶模态对位移振动幅值影响较大, 而高阶模态对应力振动幅值影响明显。通过参数分析可找到线路结构参数对位移及应力振动幅值的影响规律, 应用于线路设计降低舞动的破坏。所得结果对连续档覆冰导线防舞技术的研究具有一定参考价值。

关键词: 舞动; 有限元; 连续档; 输电导线

中图分类号: TM753; TM039

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 11-2647-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201611001

Modal Analysis of Iced Conductor Galloping for Continuous Spans

Liu Xiaohui¹, Zhang Lufei¹, Yan Bo², Zhang Xiaoyan¹

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The parameter analysis was presented for continuous spans vibration induced by single-span conductor galloping. The fine finite element model of continuous spans and insulator strings was set up by ABAQUS software, the aerodynamic load was defined by UEL. So the dynamic response of continuous spans induced by single-span conductor galloping were numerically simulated in ABAQUS. The numerical simulation results show that the structure parameters have obvious effect on the vibration amplitude of the displacements and tension, low order modes have great influence on the vibration amplitude of the displacements, high order modes have great influence on the vibration amplitude of the tension. The galloping damage can be reduced in transmission line design using the conclusions of parameter analysis. The conclusion is a useful reference for anti-galloping of continuous spans.

Keywords: galloping; finite element; continuous spans; transmission line conductor

引言

高压输电线路舞动易导致杆塔、导线、金具及其它部件损害, 是输电线路安全运行中急需解决的

关键问题。近年随着极端气候的频繁发生, 舞动问题也备受学者关注。目前国内外对输电线舞动的研究主要集中在舞动发生的机理, 以及结构参数和气动参数对舞动的影响。在理论方面对单档输电线的气动稳定性进行定性的判断^[1], 或采用非线性振动的近似解析方法分析简单线路舞动的振动模式, 如内共振, 混沌等现象^[2-6]。但是理论研究局限于公式的复杂性, 主要以单档输电线为主。有限元方法可以相对容易实现复杂线路的舞动分析^[7-10], 研



收稿日期: 2015-02-12 修回日期: 2015-05-18;
基金项目: 国家自然科学基金(51308570, 51277186, 11302271); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400302); 博士点联合基金(20125522120003);
作者简介: 刘小会(1981-), 男, 内蒙古包头, 博士, 副教授, 研究方向为高压输电线舞动。

<http://www.china-simulation.com>

• 2647 •

究表明连续档导线舞动和孤立档导线舞动区别明显,但是现在还没有学者研究舞动时连续档导线之间的相互影响。现有的防舞措施主要采取失谐摆等防舞器抑制舞动^[11-13],但无论是什么样的防舞器,其设计均与输电线路的自振频率和模态密切相关。目前对孤立档导线频率及模态研究较多,对连续档导线的频率和模态研究较少。另外,连续档输电线路中各档导线之间相互影响^[14],可能增大或减少线路的位移及应力振动幅值,因此研究连续档覆冰导线舞动对于舞动防治具有重要的理论意义。

为了研究各档导线之间的相互影响,本文通过非线性有限元方法详细研究了只有一档导线满足舞动条件时四档覆冰导线的动态响应,主要针对线路结构参数对位移及应力振动幅值的影响进行了研究。理论分析了连续档导线振动模态及频率,并根据有限元结果分析单档舞动可能激励的连续档导线的模态和对应的频率。为易舞区高压输电线路抗舞设计及舞动防治提供一定的理论指导。

1 舞动模拟实施方法

1.1 有限元模型

高压输电线路的杆塔分为耐张塔和直线杆塔,直线杆塔只承受竖向荷载和风造成的水平荷载,而耐张塔除此之外还要承受纵向荷载和角度荷载。两个耐张塔之间就是一个耐张段,耐张段的长度与地形、地貌等因素有关,耐张塔之间为直线杆塔。考虑到耐张段的长度和实际线路设计有关,所以选择某耐张段覆冰输电线路如图 1 所示,研究该线路的舞动特点。线路两端为耐张塔,对于忽略抗弯刚度的柔性导线而言两端可采用固定端约束。绝缘子串由 15 片型号为 XP-7 的绝缘子组成,长为 2.25 m,其中每片绝缘子质量 4.5 kg。绝缘子串中每个绝缘子之间可以相互转动,采用杆单元模拟绝缘子串。导线在舞动过程中绝缘子串绕悬挂点转动,如忽略杆塔变形对舞动的影响,绝缘子串上端采用固定约束。考虑到覆冰导线是柔性结构,忽略其抗弯刚度,采用索单元模拟。覆冰导线的物理参数如表 1 所

示。连续档导线中各档高差为零,档距均相同,采用公式(1)在 CAE 模型中画出导线构形

$$y = \frac{mgl^2}{2H} \left(\frac{x}{l} - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right) \quad (1)$$

式中: m 为单位长度导线的质量; H 为导线最低点的水平张力; l 为档距。

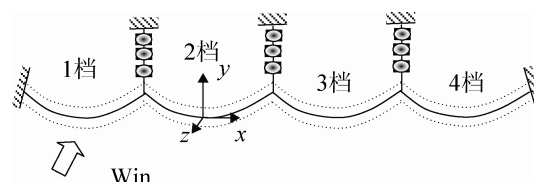


图 1 四档覆冰导线有限元模型

表 1 覆冰导线物理参数

参数	符号	单位	数值
轴向刚度	AE	10^6 N	31.6
索直径	d	10^{-3} m	27.6
y 向阻尼比	β	10^{-2}	0.1
单位长度质量	μ	kg m^{-1}	1.73

1.2 导线气动载荷

导线覆冰后改变了原有的圆形截面,在风载荷作用下导线受到升力、阻力以及扭矩的作用。本研究仅基于邓哈托垂直舞动机理,运动的非圆截面导线受到的气动载荷和导线此时的运动状态有关,如图 2 所示。导线的初始攻角为 θ_0 ,如果导线有 y 方向上的速度 \dot{v} ,导致相对风速的方向发生了变化则攻角 α 可由下式确定

$$\alpha = \theta_0 - \Delta\theta_1; \quad \Delta\theta_1 = \dot{v}/U \quad (2)$$

式中 θ_0 为初始攻角, U 为水平风速度, \dot{v} 为导线竖向(y 方向)的速度。

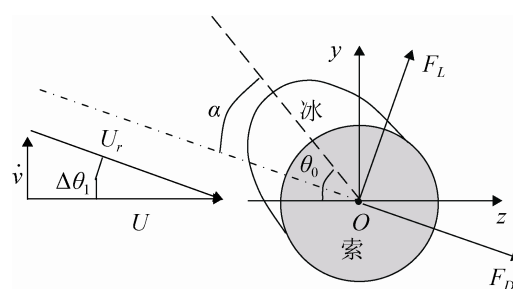


图 2 导线运动过程中攻角的确定

升力 F_L 和阻力 F_D 可以由静态空气动力系数及攻角确定

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U^2 d C_L(\alpha); F_D = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U^2 d C_D(\alpha) \quad (3)$$

式中: ρ_{air} 和 d 分别是空气的密度和无覆冰导线的直径; C_L 、 C_D 为覆冰导线的静态空气动力系数, 是攻角 α 的函数。作用在导线上的水平和垂直载荷可以通过升力和阻力表示

$$\begin{cases} F_y = F_L \cos \Delta \theta_1 - F_D \sin \Delta \theta_1 \\ F_z = F_D \cos \Delta \theta_1 + F_L \sin \Delta \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

基于静平衡状态, 根据式(3)和(4)可以得到水平和垂直载荷的近似表达形式

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U^2 d C_y(\alpha); F_z = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} U^2 d C_z(\alpha) \quad (5)$$

C_y 、 C_z 为根据静态空气动力系数拟合获得的空气动力系数, 通常用攻角的三次多项式近似

$$C_i = a_{i1} \alpha + a_{i2} \alpha^2 + a_{i3} \alpha^3 \quad (6)$$

式中 i 取 y 或 z , 具体数值见表 2^[15]。

表 2 试验获得空气动力系数

a_{y1}	a_{y2}	a_{y3}	a_{z1}	a_{z2}	a_{z3}
-0.299	0.436	0.277	-0.329	-0.924	0.193

考虑到覆冰导线的空气动力载荷和导线的运动速度及位移关系, 而在 ABAQUS 软件中不能直接施加这类载荷, 可以通过用户自定义单元 UEL 程序实现此功能。定义一个新的单元, 在该单元上施加空气动力载荷如图 3 所示。覆冰导线采用 ABAQUS 中的索单元模拟, 为了将覆冰导线的位移及速度参数传递到用户自定义单元中, 定义与覆冰导线共节点的气动载荷单元。

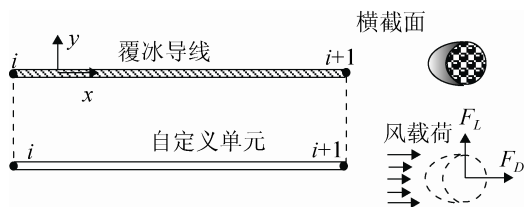


图 3 ABAQUS 中空气动力载荷的实施

Abaqus/Standard 模块隐式积分采用 Hilber-Hughes-Taylor 方法, 其余量方程为

$$\mathbf{R} = (1 + \beta) \mathbf{F}_{t+\Delta t}^e - \beta \mathbf{F}_t^e \quad (7)$$

式中: $\mathbf{F}_{t+\Delta t}^e$, \mathbf{F}_t^e 分别为 $t+\Delta t$ 时刻和 t 时刻施加在自定义单元上的气动载荷向量。由于共节点所以在调用该用户单元程序时可以获得该时刻覆冰导线的位移和速度, 根据空气动力系数计算此时导线受到的气动载荷, 通过内部残差向量 \mathbf{R} 施加到单元上。

2 连续档导线动力特性分析

连续档导线模态及频率的计算较为复杂, 目前为止还没有文献有详细的研究, 本文对如图 1 所示的等档输电线路模态和频率进行分析。在有限元软件中建立图 1 所示的有限元模型, 导线的参数见表 1, 导线的模态如图 4 所示。通过有限元分析可获得如图 4(a)所示的 3 种模态 Ψ_{11} , Ψ_{21} , Ψ_{31} , 该 4 档输电线的模态为四个单档导线的模态组合而成, 其中每档导线的振型函数近似为

$$\tilde{w}(x) = a \sin(\tilde{\omega} x / l) \quad (8)$$

式中: l 为档距; $\tilde{\omega} = \omega l \sqrt{m/H}$; m 为单位长度质量; H 为导线张力的水平分量; ω 为导线自振圆频率; a 为振动幅值。当改变导线张力时, 这三种模态对应的频率如图 5 所示。图 5 中纵坐标为 n , 是对频率进行无量纲变换

$$n = 2 f l \sqrt{m/H} \quad (9)$$

图 5 中横坐标中的 λ 可通过下面公式计算

$$\lambda^2 \approx \frac{EA}{H} \left(\frac{ql}{H} \right)^2 \quad (10)$$

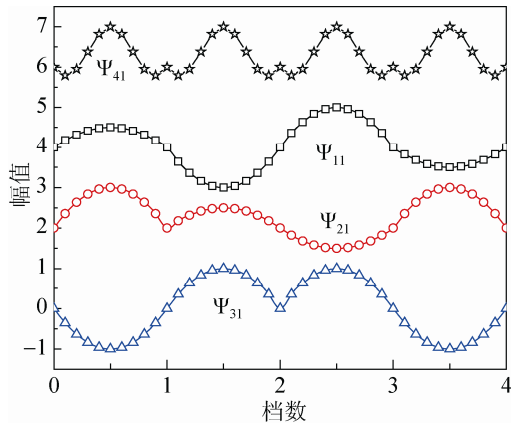
式中: q 为单位长度导线的重量; EA 为导线的抗拉刚度。参数 λ^2 是由 Irvine 给出, 该参数集中反映了导线的垂度效应。 λ 的值越大, 导线的垂度越大。从图 5 可以看出, 张力较大时这三种模态对应的 n 值为 1, 当张力逐渐变小时, n 值比 1 偏大。这三类模态对应的 n 值和 1 较为接近的原因是由于对应的单档的模态为公式(8)所示的正弦函数, 如果使该正弦函数满足位移边界条件则

$$\tilde{w}(l) = a \sin(\tilde{\omega} l) = 0 \quad (11)$$

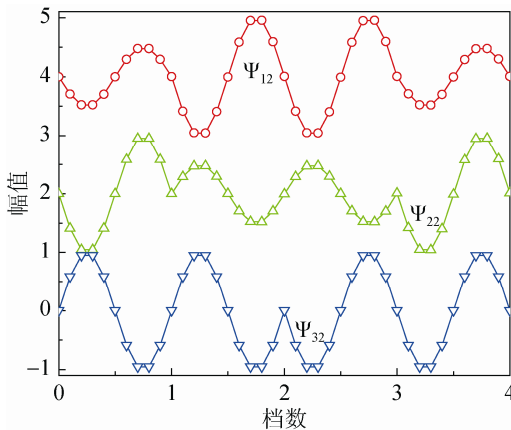
可以获得导线的自振频率为

$$\bar{\omega} = k\pi = \omega l \sqrt{m/H} = 2\pi f l \sqrt{m/H}, \quad k=1,2,3\dots(12)$$

当 $\bar{\omega}$ 为 π 时对应于图 4(a) 三种模态, 对比式(12)和式(9)可说明该三种模态对应的频率无量纲化后接近 1 的原因。考虑到这三种模态对应的频率无量纲化接近 1, 所以本文定义该三类模态为低阶模态。



(a) 四档低阶模态



(b) 四档高阶模态

图 4 四档导线模态分析

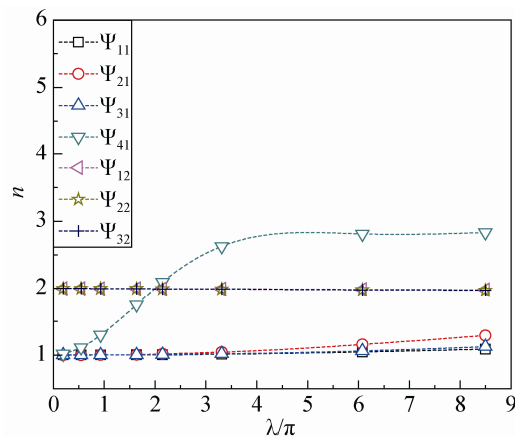


图 5 四档导线自振频率分析

当导线有如图 4(b) 所示的 Ψ_{12} 、 Ψ_{22} 、 Ψ_{32} 形式的模态时, 对应的单档导线的模态函数也可以采用公式(9)描述, $\bar{\omega}$ 为 2π , 依据公式(12)可知, 此时 k 值为 2。改变连续档导线张力时, 获得 3 种形式模态的频率并按照公式(9)无量纲化后获得的曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出这 3 种形式模态对应的频率无量纲化后的值和 2 非常接近, 本文定义该 3 类模态为高阶模态。对于图(4)a 中所示的 Ψ_{41} 模态, 减小张力时该模态对应频率的无量纲值逐渐增大, 如图 5 所示。考虑到 Ψ_{41} 模态对应的单档模态函数近似为

$$\tilde{w}(x) = a(1 - \tan(\frac{\bar{\omega}}{2})) \sin(\bar{\omega}x/l) - \cos(\bar{\omega}x/l) \quad (13)$$

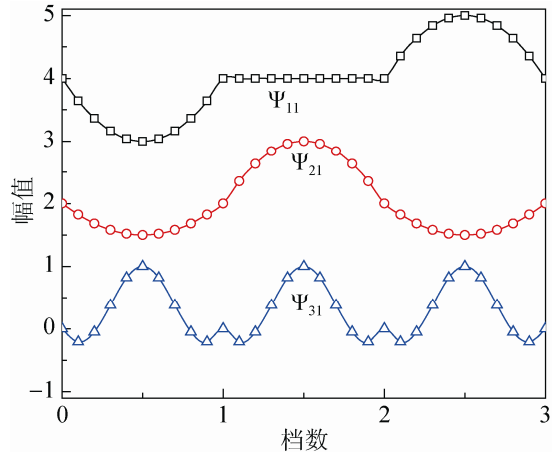
进而获得连续档导线振动频率的计算公式

$$\tan(\frac{\bar{\omega}}{2}) = \frac{\bar{\omega}}{2} (1 - \frac{\bar{\omega}^2}{\lambda^2}) \quad (14)$$

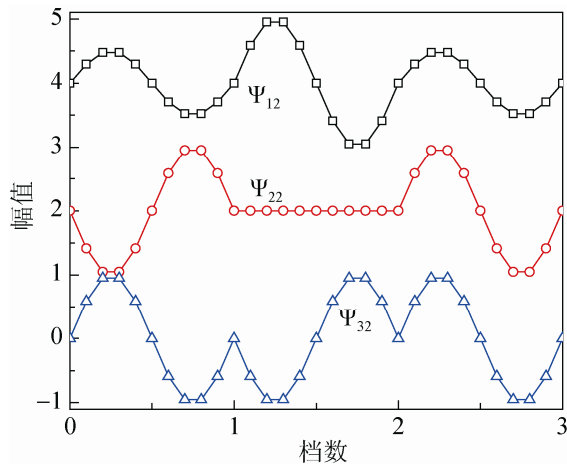
满足公式(14) ω 进行无量纲变化后, 获得和图 5 中 Ψ_{41} 相近的曲线。从图 5 可以看到当几何参数 $\lambda=2\pi$ 时, $n=2$ 。如果考虑非线性振动, 则 Ψ_{41} 容易与 Ψ_{12} 、 Ψ_{22} 、 Ψ_{32} 形式的模态产生共振。考虑到 Ψ_{11} 、 Ψ_{21} 、 Ψ_{31} 、 Ψ_{41} 形式模态对应的频率无量纲参数最小值均为 1, 本文定义这 4 种模态为低阶模态。 Ψ_{12} 、 Ψ_{22} 、 Ψ_{32} 形式的模态对应的频率无量纲参数均接近 2, 本文定义这 3 种模态为高阶模态, 对于 $n>2$ 对应的模态也认为是高阶模态。

为了使上文分析更具有一般性, 下面对等档距的三档导线进行分析。对于如图 6 所示的 Ψ_{11} 、 Ψ_{21} 形式的模态, 其模态函数可以用式(8)表示, 改变导线档距和张力时通过有限元方法获得这两种形式模态对应的频率, 对频率采用式(9)进行无量纲变换, 随 λ 变化曲线如图 7 所示, 在小弧垂时基本为 1, 当弧垂增加时频率无量纲参数 n 相应的增大。图 6(b) 中的 Ψ_{12} 、 Ψ_{22} 、 Ψ_{32} 形式的模态函数也可以近似采用公式(8)描述, 但是对于单档导线而言有两个半波, 即 $k=2$ 。通过有限元方法获得的该形式模态对应的频率如图 7 所示, 从图中可以看出频率无量纲参数 n 和 2 非常接近。而对于 Ψ_{31} 形式的模

态其模态函数需要采用公式(13)描述, 频率计算采用公式(14)。对比图 7 和图 5 可以看出, 三档导线和四档导线频率随几何参数变化关系基本相同。



(a) 三档低阶模态



(b) 三档高阶模态

图 6 三档导线模态分析

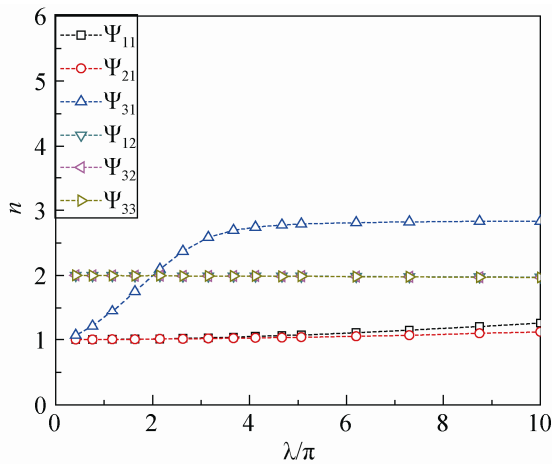
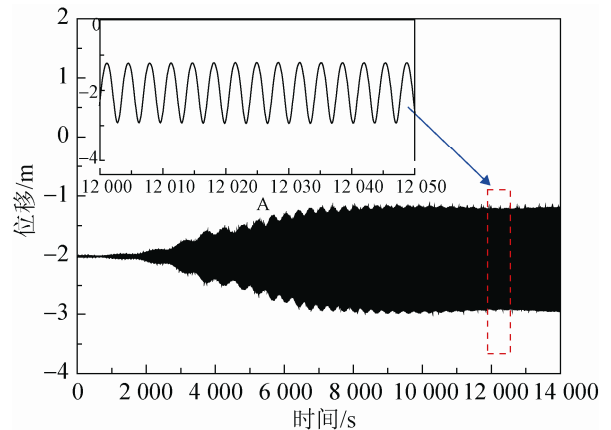


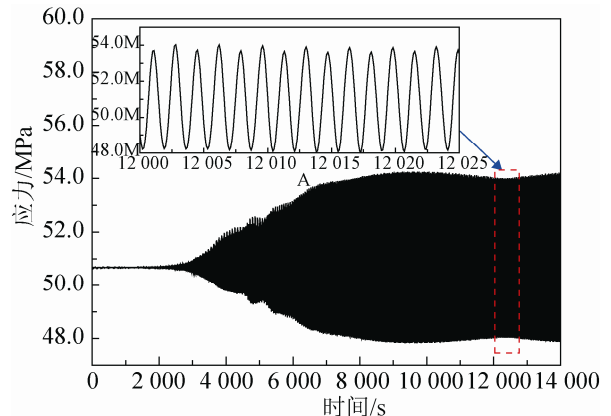
图 7 三档导线自振频率分析

3 连续档覆冰导线舞动分析

建立图 1 所示的有限元模型, 四档导线的档距均为 200 m。仅耐张档 1 满足舞动条件时, 在耐张档 1 上施加 3 m/s 的风载荷, 通过有限元方法模拟连续档的振动。导线最低点张力为 22.8 kN 时, 耐张档 1 中点的位移及应力随时间变化曲线如图 8 所示。



(a) 舞动档中点位移时程曲线

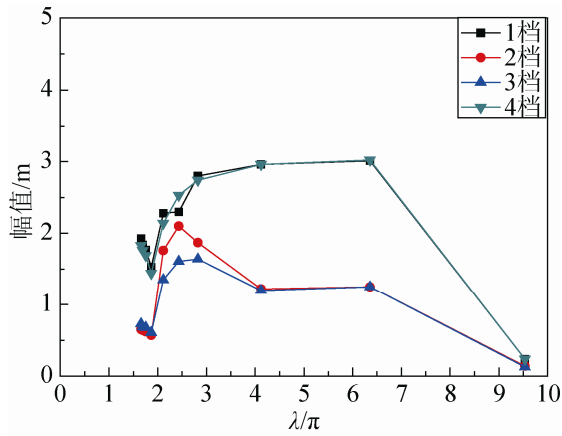


(b) 舞动档中点应力随时间变化曲线

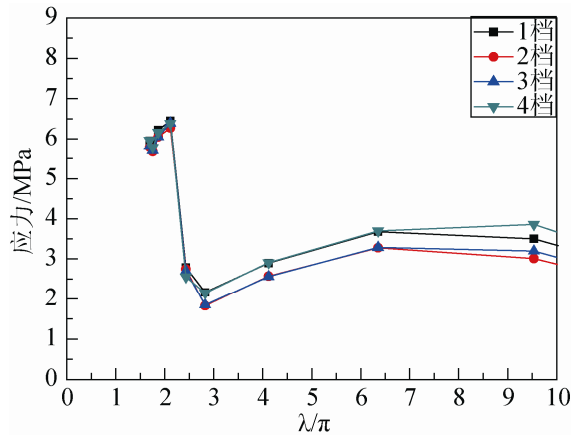
图 8 舞动档特征点应力及位移变化曲线

对于档距均为 200 m 的四档导线, 仅在耐张档 1 施加风载荷。当改变导线水平张力时各档中点位移振动幅值如图 9(a)所示, 中点应力振动幅值如图 9(b)所示。图 9 中横坐标是参数 $\lambda\pi$, 可以通过公式(10)计算。从图 9(a)可以看出, 尽管舞动档和耐张档 4 距离较远, 但是耐张档 1 和 4 的振动幅值较大, 根据前面图 4(a)的分析可以看出产生这样的位移需包含 Ψ_{21} 形式的模态。从图 9(a)可以看出不同

档导线之间位移有明显的差别,但是不同档导线的张力相差不大。



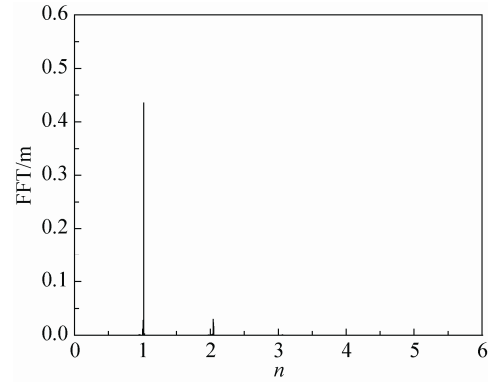
(a) 各档中点位移振动幅值



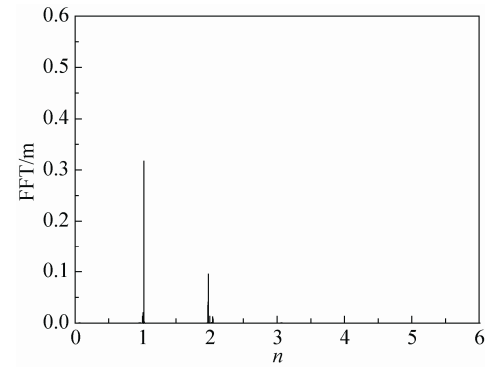
(b) 各档中点应力振动幅值

图 9 连续档导线特征点位移及应力振动幅值

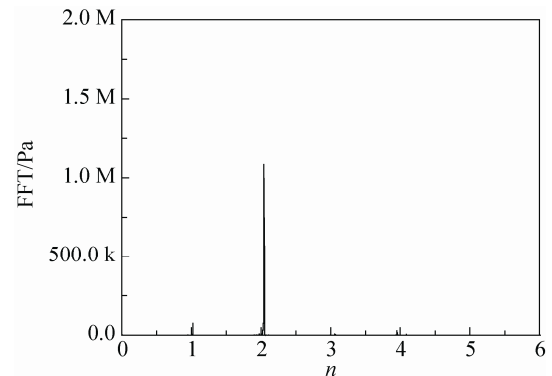
对 $H=22.8$ kN 的 200 m 档连续档导线特征点的位移时程曲线进行傅里叶变换如图 10 所示。图 10 中振动位移的傅里叶变换表明 n 为 1 对应的模式对位移贡献较大,当 n 为 1 时对应的模式为 Ψ_{11} 、 Ψ_{21} 、 Ψ_{31} , 如图 4(a)所示。应力的傅里叶变换表明 n 为 2 的模式对导线的张力变化影响较为明显 Ψ_{12} 、 Ψ_{22} 、 Ψ_{32} , 如图 4(b)所示。从图 10 中可以看出舞动激发的低阶模式 Ψ_{11} 、 Ψ_{21} 、 Ψ_{31} 和高阶模式 Ψ_{12} 、 Ψ_{22} 、 Ψ_{32} 的频率成倍数关系,依据非线性动力学理论,当低阶模式和高阶模式的频率成倍数关系时,很容易由低阶模式激励起高阶模式,造成导线张力大幅改变。



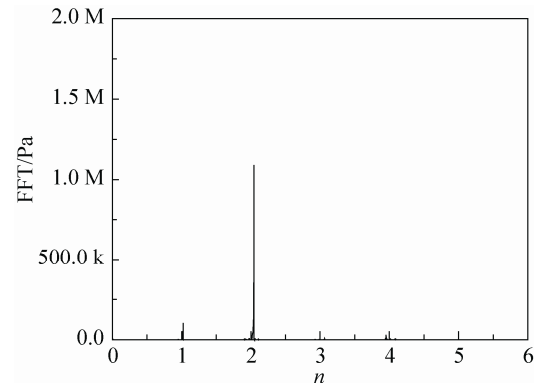
(a) 中点(位移)



(b) 四分之一点(位移)



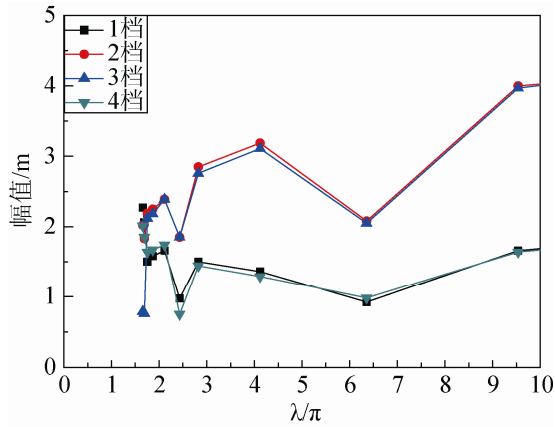
(c) 中点(应力)



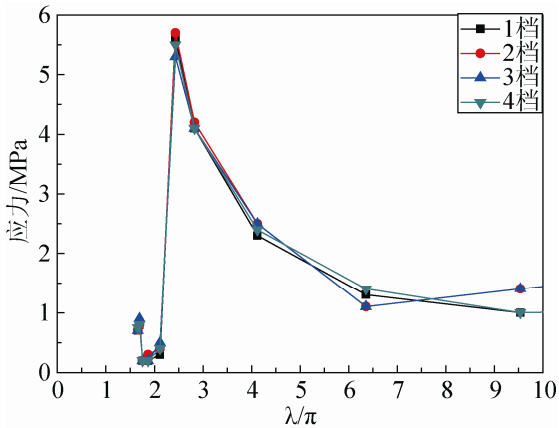
(d) 四分之一点(应力)

图 10 连续档特征点时程曲线频率分析(耐张档 1)

为了研究连续档导线之间的影响, 仅允许跨越档 2 舞动, 改变连续档导线的张力则各档的位移及应力变化趋势如图 11 所示。图 11(a)表明舞动过程中跨越档 2 和跨越档 3 舞动幅值较大, 说明振动包含 Ψ_{11} 形式的模态。图 11(b)说明连续档导线舞动时各档导线的张力基本相同。



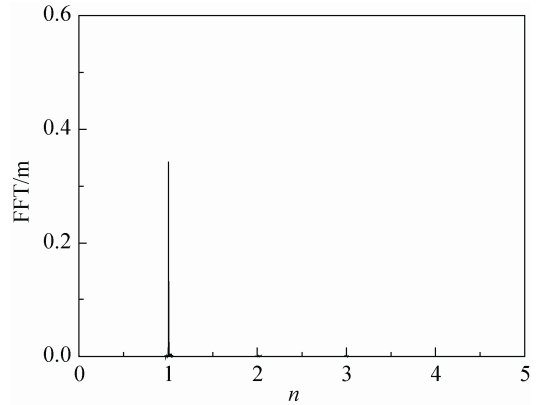
(a) 各档中点位移振动幅值



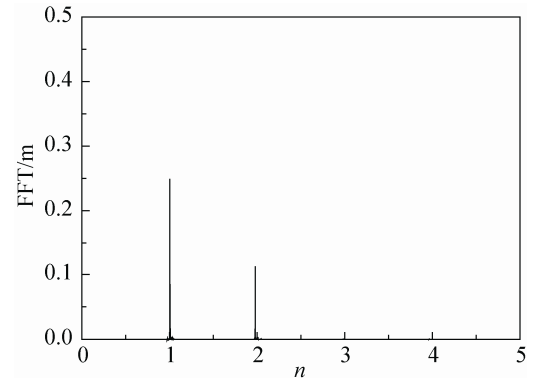
(b) 各档中点应力振动幅值

图 11 连续档导线特征点位移及应力振动幅值 (跨越档 2 舞动)

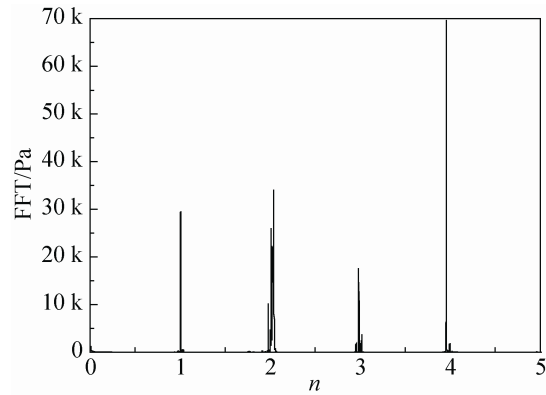
对 $H=22.8$ kN 的 200 m 档连续档导线特征点的位移时程曲线进行傅里叶变换如图 12 所示。图 12 中振动位移的傅里叶变换表明 n 为 1 的低阶模态 Ψ_{11} 、 Ψ_{21} 、 Ψ_{31} 对连续档导线的振动幅值有较为明显的影响, 应力的傅里叶变换表明, n 为 4 的高阶模态对导线的张力变化影响较为明显。频率分析表明, 由于连续档导线满足倍频关系的模态较多, 所以更容易造成舞动过程中的多模态叠加。



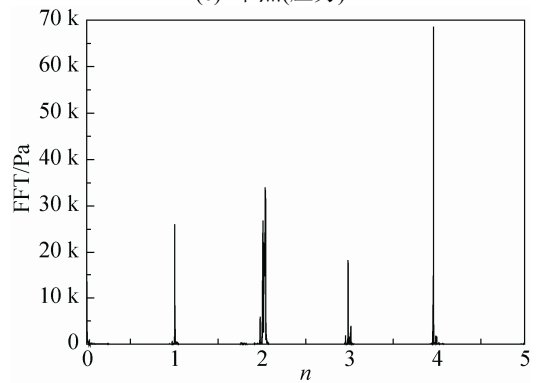
(a) 中点(位移)



(b) 1/4 点(位移)



(c) 中点(应力)



(d) 1/4 点(应力)

图 12 200 m 档特征点时程曲线频率分析(跨越档 2)

4 结论

本文采用 ABAQUS 软件建立了四档输电线舞动的精确有限元模型,研究了只有一档输电线满足舞动条件时整个连续档输电线振动的非线性动力响应。计算结果表明,只有一档导线满足舞动条件时,也可引起整个连续档导线大幅振动。通过改变线路参数对连续档输电线舞动进行了参数分析,分析结果表明: 1) 舞动引起连续档导线振动时各档的应力振动幅值基本相同; 2) 连续档导线满足倍频关系的模态较多,所以由舞动产生的连续档导线振动是由多个模态叠加; 3) $n=1$ 对应的低阶模态对位移振动幅值贡献较大, $n>1$ 时对应的高阶模态对张力振动幅值贡献较大。

参考文献:

- [1] 王少华. 覆冰荷载下的架空输电线气动稳定性分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(3): 73-76. (Wang Shaohua. Aerodynamic stability analysis of ice-covered overhead transmission lines [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(3): 73-76.)
- [2] 王跃方, 赵光曦. 三自由度偏心索风致振动稳定性分析 [J]. 工程力学, 2012, 29(8): 14-21. (Wang Yuefang, Zhao Guangxi. Stability analysis for wind-induced vibration of 3-degree-of-freedom eccentric cables [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 14-21.)
- [3] 李欣业, 张华彪, 侯书军, 等. 覆冰输电导线舞动的仿真分析 [J]. 振动工程学报, 2010, 23(1): 76-85. (Li Xinye, Zhang Huabiao, Hou Shujun, et al. Theoretical and numerical analysis of galloping of iced power transmission lines [J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(1): 76-85.)
- [4] 郝淑英, 冯海茂, 范孜, 等. 覆冰输电线非线性瞬态固有频率研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(9): 283-288. (Hao Shuying, Feng Haimao, Fan Zi, et al. Investigation of nonlinear transient natural frequency of iced transmission line [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 283-288.)
- [5] A Luongo, D Zulli, G Piccardo. On the effect of twist angle on nonlinear galloping of suspended cables [J]. Computer and Structures (S0045-7949), 2009, 87(15-16): 1003-1014.
- [6] 侯磊, 陈予恕. 输电线路导线舞动中的混沌运动研究 [J]. 振动工程学报, 2014, 27(1): 76-82. (Hou Lei, Chen Yushu. Study on chaos in galloping of the transmission line [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(1): 76-82.)
- [7] 王昕, 楼文娟. 覆冰导线舞动数值解及影响因素分析 [J]. 工程力学, 2010, 27(增 1): 290-310. (Wang Xin, Lou Wenjuan. Numerical approach to the gallop iced conductor [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(SI): 290-310.)
- [8] 李黎, 曹化锦, 罗先国. 输电塔-线体系的舞动及风振控制 [J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1253-1260. (Li Li, Cao Huajin, Luo Xianguo. Galloping and wind-induced vibration control on transmission tower-line system [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1253-1260.)
- [9] 晏致涛, 黄静文, 李正良. 基于结点 6 自由度的分裂导线有限元模型 [J]. 工程力学, 2012, 29(8): 325-331. (Yan Zhitao, Huang Jingwen, Li Zhengliang. Finite element model of bundle lines based on 6-dof node [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 325-331.)
- [10] 赵莉, 严波, 蔡萌琦, 等. 输电塔线体系中覆冰导线舞动数值模拟研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 114-120. (Zhao Li, Yan Bo, Cai Mengqi, et al. Numerical simulation for galloping of iced conductors in a transmission tower-line system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18): 114-120.)
- [11] 胡德山, 苑舜, 陶文秋. 阻尼失谐摆防舞器的研究 [J]. 东北电力技术, 2009, 29(3): 13-16. (Hu Deshan, Yuan Shun, Tao Wenqiu. Study on anti-galloping device for damping detuning pendulums [J]. Northeast Electric Power Technology, 2009, 29(3): 13-16.)
- [12] 胡景, 严波, 祖正华, 等. 一种新型防舞器及其机理研究 [J]. 工程力学, 2011, 28(9): 200-206. (Hu Jing, Yan Bo, Zu Zhenghua, et al. A new anti-galloping device and investigation on its mechanism [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 200-206.)
- [13] 楼文娟, 孙珍茂, 许福友, 等. 输电导线扰流防舞器气动力特性风洞试验研究 [J]. 浙江大学学报, 2011, 45(1): 93-98. (Lou Wenjuan, Sun Zhenmao, Xu Fuyou, et al. Experiment study on aerodynamic characteristics of air flow spoiler [J]. Journal of Zhejiang University, 2011, 45(1): 93-98.)
- [14] 蔡廷湘. 输电线舞动新机理研究 [J]. 中国电力, 1998, 31(10): 52-65. (Cai Tingxiang. A new mechanism of transmission line galloping [J]. Electric Power, 1998, 31(10): 52-65.)
- [15] Desai Y M, Yu P, Popplewell N. Finite-element modeling of transmission-line galloping [J]. Computers & Structures (S0045-7949), 1995, 57(3): 407-420.