

连续档覆冰四分裂导线舞动特征 数值模拟研究*

赵莉, 严波, 蔡萌琦, 伍川

(重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

(本刊编委严波来稿)

摘要: 利用 ABAQUS 软件建立覆冰四分裂导线线路的有限元模型,模拟不同线路在不同风速下的舞动过程.基于线路动力特性和舞动数值模拟结果,分析不同档距和档数连续档线路在不同风速下的舞动模式、频率特性和振动幅值,并与孤立档线路的舞动特征进行比较.结果表明,连续档线路两边档的舞动模式和频率特性可能与中间各档不同,连续档线路的舞动特征与孤立档差别明显,在进行舞动防治技术研究时应考虑这些差异.

关键词: 覆冰四分裂导线; 连续档线路; 舞动特性; 数值模拟

中图分类号: TM752+.5;O322 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.05.003

引 言

覆冰导线的舞动对输电线路的安全运行危害极大,对输电线路舞动及其防治技术的研究是电力工程中重点关注的问题之一^[1].特别是近年我国电网中舞动事故的发生次数呈增长趋势,对这一问题的研究更加迫切.

关于输电线路舞动的研究已有不少成果,涉及舞动诱发机理^[2-5]、舞动过程数值模拟^[6-13]、覆冰导线气动特性风洞试验^[14-16]和试验线路模拟试验^[17-18]等.然而,舞动防治技术的研究进展缓慢,尚未找到一种有效的舞动防治技术.究其原因,是目前对于覆冰导线舞动诱发机理和舞动特征还缺乏深刻的认识.通过风洞试验测量典型覆冰导线的气动系数,进而对不同结构参数的线路在不同参数条件下的舞动进行数值模拟,分析导线的舞动特征,可为舞动防治技术的研究提供必要的基础.近年来,本文作者课题组对覆冰四分裂导线的舞动问题进行了系列的研究,但研究对象以孤立档线路为主.关于连续档线路舞动特征的研究报道非常有限.

对于多档连续档线路,相邻档导线之间通过悬垂串连接,导线舞动过程中会发生明显的相互影响,因而其舞动特征可能有别于孤立档导线.目前,大多数的舞动防治技术和方法都依赖于导线发生舞动时的振动模式和频率^[19-21],因此,研究连续档覆冰导线的舞动特征具有非常重要的意义.

* 收稿日期: 2014-02-17; 修订日期: 2014-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51277186)

作者简介: 赵莉(1983—),女,重庆人,博士生(E-mail: zhaolicqu@163.com);

严波(1965—),男,重庆人,教授,博士(通讯作者. E-mail: boyan@cqu.edu.cn).

本课题组利用风洞试验测量了新月形覆冰四分裂导线的空气动力系数在典型风速下随风攻角的变化曲线^[16],并利用 ABAQUS 有限元软件的用户自定义单元实现了覆冰导线上空气动力载荷的施加,对孤立档导线的舞动进行了数值模拟研究^[16].以这些工作为基础,本文对多档连续档覆冰四分裂导线的舞动进行模拟研究,分析其舞动特征,并比较与孤立档导线的不同.研究结果为输电线路舞动防治技术的研发提供重要的依据.

1 典型线路有限元模型及其动力特性

1.1 有限元模型

以 3 档和 5 档连续档覆冰四分裂线路为对象.两线路的档距分别为 200 m 和 300 m,且各档的档距相等.导线型号为 4×LGJ-400/50,子导线的直径为 27.6 mm,相邻子导线的间距为 450 mm.子间隔棒的型号为 FJZ-450,每个质量为 7.5 kg,悬垂绝缘子串的长度为 5 m.假设导线覆冰为 12 mm 新月形覆冰,初始凝冰角为 45°.表 1 中列出了覆冰导线的轴向刚度 EA ,扭转刚度 GI ,单位长度质量 μ 和单位长度转动惯量 J .此外,档距 200 m 导线的水平张力 H 为 38.8 kN,档距 300 m 时为 34.2 kN.

有限元模型中,覆冰导线用具有扭转自由度的索单元离散.在 ABAQUS 有限元软件中,这种索单元可以通过释放空间梁单元的弯曲自由度得到,具体实现方法参见文献[10].单元收敛性检查表明,导线单元长度取 0.5 m 时能满足精度要求.子间隔棒简化为正方形框,用空间梁单元模拟.悬垂绝缘子串也用梁单元模拟.

表 1 覆冰导线的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the iced conductor

EA/N	$GI/(N \cdot m^2/rad)$	$\mu/(kg/m)$	$J/(kg \cdot m)$
3.16×10^7	1 056	1.732	2.68×10^{-4}

模型中导线的两端设置为固定约束.悬垂绝缘子串上端悬挂在杆塔上,这里忽略杆塔的影响,约束悬垂绝缘子串上端的 3 个平动自由度,释放 3 个转动自由度,下端与导线连接.图 1 所示为建立的 5 档覆冰四分裂导线的有限元模型.为了便于比较分析,模拟分析了档距分别为 200 m 和 300 m 孤立档线路的舞动特征.

覆冰导线的阻尼采用 Rayleigh 阻尼模型,阻尼比取 0.5%^[1].

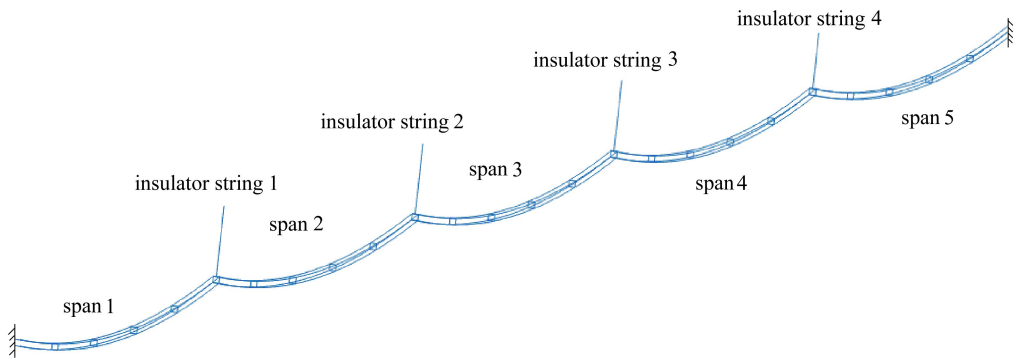


图 1 5 档覆冰四分裂导线有限元模型

Fig.1 Finite element model of the 5-span iced quad bundle conductor line

1.2 动力特性分析

为了分析覆冰导线的舞动特征,首先计算各线路的动力特性,获得面内、面外和扭转方向的低阶模态及其对应的频率.根据数值模拟结果,这些线路的舞动均为垂直舞动,限于篇幅,仅

给出档距 300 m 线路的面内低阶模态及其对应的固有频率,如图 2 所示.从图中可见,与孤立档线路相比,连续档线路的固有频率较低,且出现了频率重根的现象.另外,3 档和 5 档连续档线路的低阶固有频率非常接近.

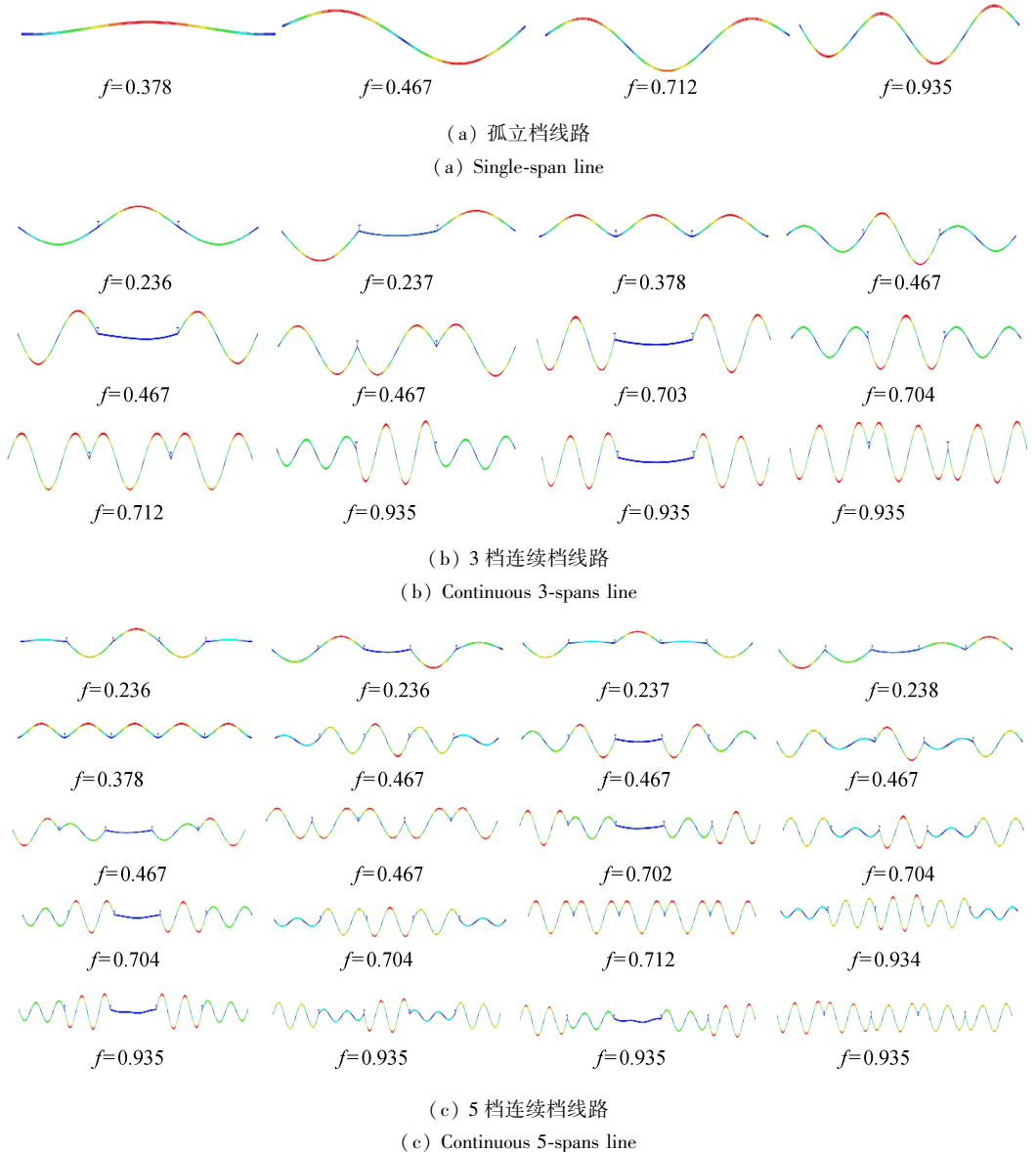


图 2 档距 300 m 线路面内低阶模态(固有频率 f/Hz)

Fig.2 In-plane vibration modes of lines with span length of 300 m(natural frequency f/Hz)

2 舞动过程数值模拟

本文课题组利用 ABAQUS 有限元软件实现了覆冰导线舞动过程的数值模拟方法^[10].覆冰导线可视为具有扭转自由度的索单元.在 ABAQUS 有限元软件中没有这种单元,但可以利用空间梁单元,通过释放节点的弯曲自由度,保留扭转自由度,同时设置其材料性质为不可压缩来模拟.

作用于单位长度非圆形截面覆冰导线上的阻力 F_D 、升力 F_L 和扭矩 M 可由下式确定:

$$F_D = C_D(\alpha)\rho U^2 d/2, F_L = C_L(\alpha)\rho U^2 d/2, M = C_M(\alpha)\rho U^2 d^2/2, \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度, U 为风速, d 为导线的直径. $C_D(\alpha)$, $C_L(\alpha)$, $C_M(\alpha)$ 分别为覆冰导线的阻力系数、升力系数和扭矩系数, 其与风攻角 α 有关. 覆冰导线运动过程中风攻角的变化可由下式确定:

$$\alpha \approx \theta - \left(\frac{R\dot{\theta} + \dot{V}}{U} \right), \quad (2)$$

式中 θ , R , $\dot{\theta}$ 和 \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. 本文数值模拟中的覆冰导线的阻力系数、升力系数和扭矩系数取自风洞试验测得的新月形覆冰四分分裂导线各子导线气动系数随风攻角的变化曲线^[16].

覆冰导线所受空气动力载荷与瞬时的攻角有关, 即与其瞬时的运动状态有关. 气动载荷的施加可通过 ABAQUS 的用户单元子程序 UEL 实现. 为此, 在 UEL 中定义一个质量和刚度为零的单元, 该单元与模拟覆冰导线的索单元共节点. 在调用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, 由式(2)即可计算得到当前时刻的风攻角, 再利用式(1)确定作用在各个结点上的气动载荷.

在 ABAQUS 中采用 Hilbert-Hughes-Taylor 隐式积分方法, 在 $t + \Delta t$ 时刻的动力平衡方程可写成

$$-M\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + (1 + \nu)\mathbf{G}_{t+\Delta t} - \nu\mathbf{G}_t = 0, \quad (3)$$

式中, M 为质量矩阵, $\mathbf{G}_{t+\Delta t}$ 和 \mathbf{G}_t 分别为在 $t + \Delta t$ 时刻和 t 时刻的内状态变量向量, $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的加速度向量, ν 为数值阻尼. 在当前时间增量步末, 即 $t + \Delta t$ 时刻的残值向量可定义为

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

在用户自定义程序中定义如下两个矩阵:

$$\mathbf{A}_{\text{AMATRX}} = M(d\ddot{\mathbf{u}}/d\mathbf{u}) + (1 + \nu)\mathbf{C}(d\dot{\mathbf{u}}/d\mathbf{u}) + (1 + \nu)\mathbf{K}, \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{\text{RHS}} = -M\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + (1 + \nu)\mathbf{G}_{t+\Delta t} - \nu\mathbf{G}_t, \quad (6)$$

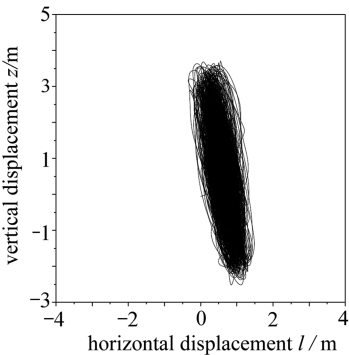
其中, \mathbf{C} , \mathbf{K} 和 \mathbf{R}_{RHS} 分别为阻尼矩阵、刚度矩阵和载荷残值向量. 在此定义无质量和刚度的单元, 其质量、阻尼和刚度矩阵都为 $\mathbf{0}$, 气动载荷施加在该单元的两个节点上. 因此, 式(5)和(6)可写成

$$\mathbf{A}_{\text{AMATRX}} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{\text{RHS}} = (1 + \nu)[F_y \quad F_z \quad M_o]_{t+\Delta t}^T - \nu[F_y \quad F_z \quad M_o]_t^T, \quad (8)$$

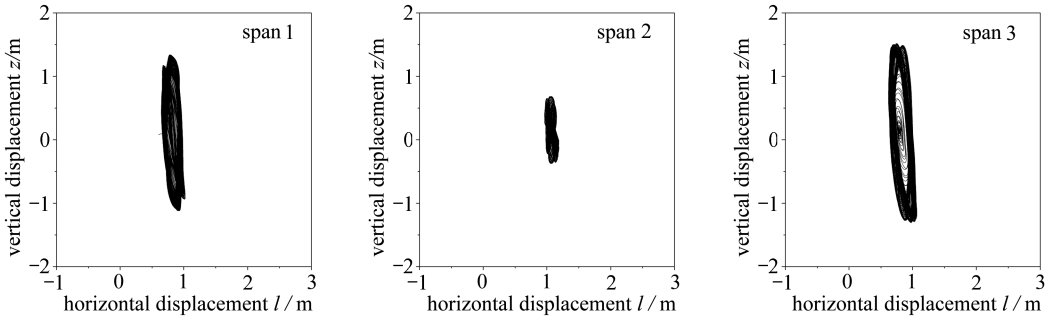
其中 F_y , F_z , M_o 为作用于该单元节点上的 y 向、 z 向 载荷和扭矩. 数值模型中每一个自定义单元与一个与之平行的索单元共节点, 施加在自定义单元节点上的载荷则施加在了索单元的节点上.

采用前述方法对各线路的舞动进行数值模拟. 图 3 所示为风速 10 m/s 时, 档距 300 m 线路各档子导线 1 中点的舞动轨迹. 从图中可见, 无论是孤立档线路还是连续档线路, 导线的舞动均为垂直舞动, 中点的运动轨迹均接近于椭圆. 孤立档中点的振动幅值远大于连续档各档中点的幅值, 这是由于连续档线路的舞动模式发生了变化, 其中点的振幅不再是最大值. 此外, 由于各档的子间隔棒为非等间距排列, 连续档线路各档的舞动轨迹和幅值并不关于线路中点对称.



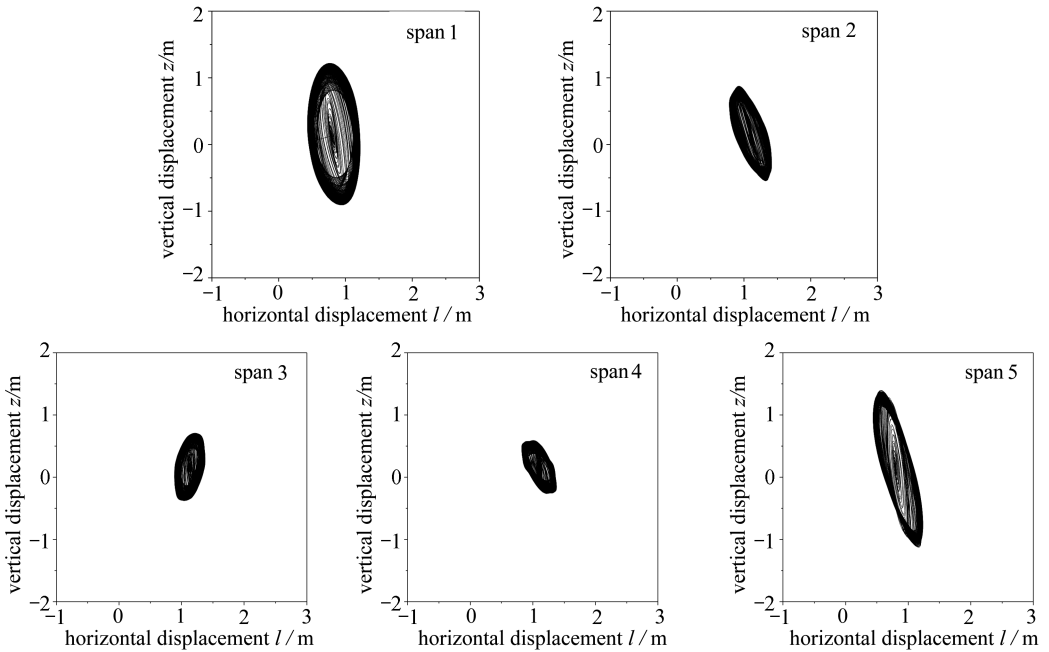
(a) 孤立档线路

(a) Single-span line



(b) 3 档连续档线路

(b) Continuous 3-spans line



(c) 5 档连续档线路

(c) Continuous 5-spans line

图3 档距 300 m 线路各档子导线 1 中点的舞动轨迹 (风速:10 m/s)

Fig.3 Galloping traces at mid-points of the line spans with length of 300 m (wind speed: 10 m/s)

3 舞动特征分析

3.1 舞动模式和频率特性

舞动过程中导线的运动模式和频率特性是研究舞动防治技术的重要参数.现通过导线典型点的位移响应频谱,结合线路的模态和固有频率,分析舞动的振动模式和频率特性.由于线路的舞动为垂直舞动,其舞动模式主要取决于面内运动模式,故在此仅分析面内垂直振动特性.

首先分析档距 300 m 线路在风速 10 m/s 下的舞动模式和频率特性.档距 300 m 孤立档线路在风速 10 m/s 下档中点处垂直位移的频谱如图 4 所示.结合图 2(a) 和图 4 中结果可见,此时孤立档的面内振动频率出现了两个峰值,分别接近于单半波固有频率 0.378 Hz 和 3 半波固有频率 0.712 Hz.观察导线舞动过程中的运动形态发现,线路的舞动模式主要表现为 3 半波和单半波形式.

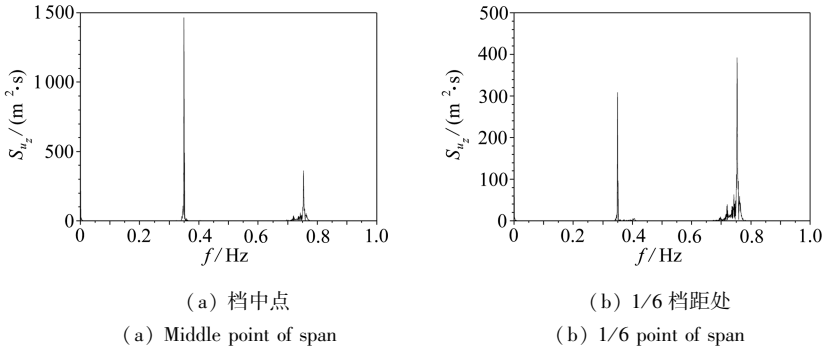


图4 档距300 m孤立档线路导线1典型点垂直位移的频谱(风速:10 m/s)

Fig.4 Frequency spectra of vertical displacements at typical points in the single-span line with a span length of 300 m(wind speed: 10 m/s)

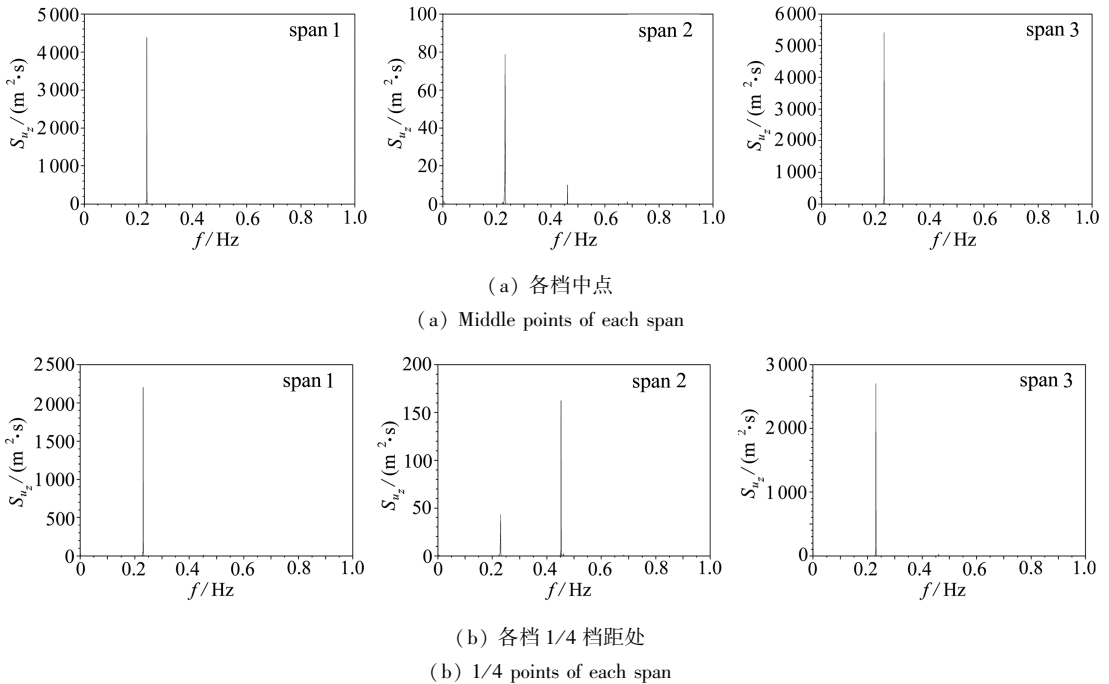


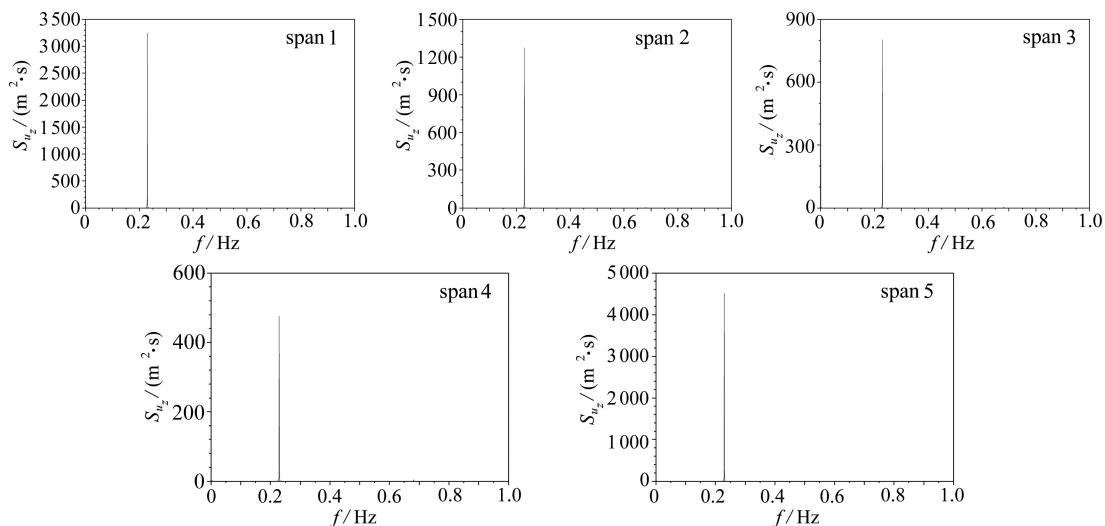
图5 档距300 m的3档线路导线1典型点垂直位移的频谱(风速:10 m/s)

Fig.5 Frequency spectra of vertical displacements at typical points in the 3-span line with span length of 300 m(wind speed: 10 m/s)

图5所示为档距300 m的3档线路在风速10 m/s时各档中点和1/4档距处垂直位移的频谱。结合图2(b)和图5的结果可见,第1档和第3档的面内振动频率仅在单半波的固有频率0.236 Hz附近出现了峰值,即振动模式为单半波。中间档的面内振动频率出现了两个峰值,接近于固有频率0.236 Hz和0.467 Hz。它们对应的模态如图2(b)中所示,分别为单半波和双半波。观察导线舞动过程中的运动形态可见,3档连续档线路中间档的舞动模式主要表现为双半波,并有较明显的单半波;两个边档主要为单半波,其舞动模式与孤立档相比,发生了明显的变化。

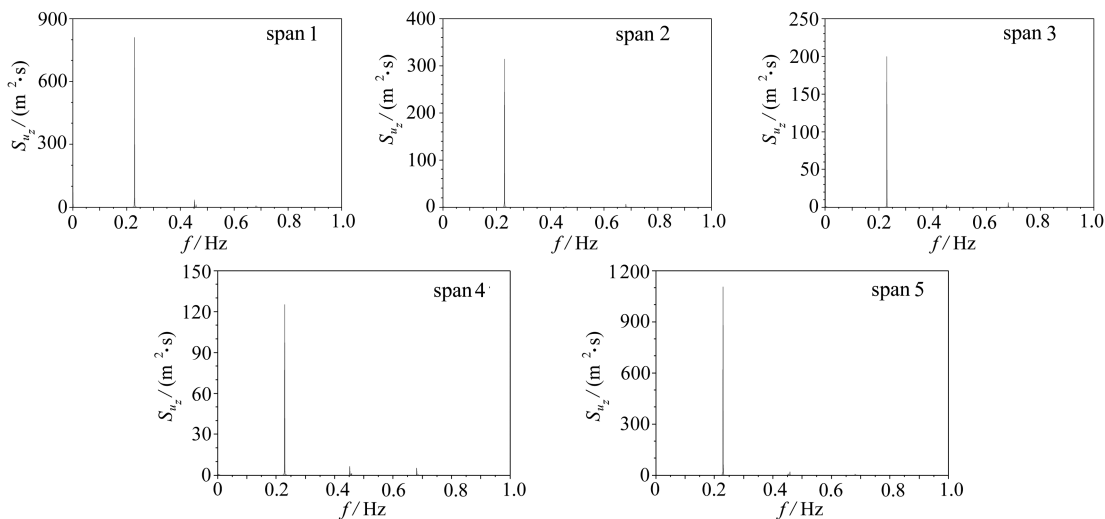
图6所示为档距300 m的5档线路在风速10 m/s时各档中点和1/6档距处垂直位移的频谱。结合图2(c)和图6的结果可见,各档的面内振动频率在单半波固有频率0.236 Hz附近出现了峰值,同时还出现了很少的双半波和3半波模态成分。观察导线的运动形态发现,其各档的舞动模式均主要表现为单半波。可见5档连续档线路的舞动模式与3档线路相比,也发生

了变化。



(a) 各档中点

(a) Middle points of each span



(b) 各档 1/6 档距处

(b) 1/6 points of each span

图 6 档距 300 m 的 5 档线路导线 1 典型点垂直位移的频谱 (风速: 10 m/s)

Fig.6 Frequency spectra of vertical displacements at typical points in the 5-span line with span length of 300 m (wind speed: 10 m/s)

图 7 所示为档距 300 m 的 3 档线路在风速 12 m/s 下各档中点和 1/6 档距处垂直位移的频谱.结合图 2(c)和图 7 可见,各档垂直位移的频谱出现了多个峰值,在接近于面内垂直振动固有频率 0.236 Hz(0.237 Hz)、0.378 Hz、0.467 Hz、0.703 Hz(0.704 Hz、0.712 Hz)和 0.935 Hz 附近出现了峰值,表明导线舞动过程中导线的运动由多阶模态组成,且不同时刻导线的运动模式也有变化.观察舞动过程中导线的运动形态发现,此时各档的舞动模式均主要表现为 4 个半波和单半波形态,同时伴有其它模态分量。

值得注意的是,除了上述频率峰值以外,两个边档的中点在 1.35 Hz 附近出现了峰值,各

档的 1/6 档距在 1.50 Hz 附近出现了峰值,这些峰值点对应于分裂导线的次档距振动.如果采用将分裂导线等效为单导线的方法,则不能模拟出导线的次档距振动.

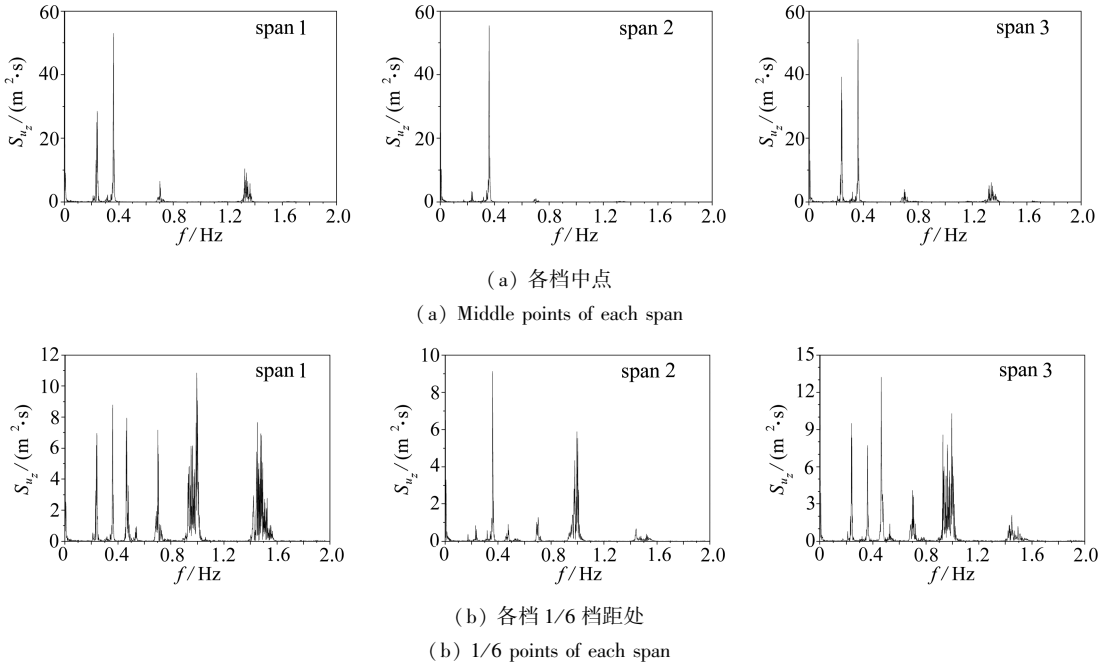


图 7 档距 300 m 的 3 档线路导线 1 典型点垂直位移的频谱 (风速: 12 m/s)

Fig.7 Frequency spectra of vertical displacements at typical points in the 3-span line with span length of 300 m (wind speed: 12 m/s)

3.2 不同参数线路舞动模式的比较

对不同档数和不同档距覆冰线路在不同风速下的舞动过程进行了模拟,通过导线的运动轨迹、面内垂直位移频谱以及导线的运动形态分析,得到它们的舞动模式,如表 2 中所列.表中数值表示各档舞动形态的主要半波数,括号内的数值表示出现较多的半波数.值得注意的是,多数情况下,导线舞动过程中可能包含多种形态,研究舞动防治技术时需要同时考虑这些形态.

表 2 不同档距线路在不同风速下的舞动模式

Table 2 Galloping modes of lines with different span numbers & lengths at different wind speeds

span length S/m	wind speed $v/(m/s)$	number of half-waves within each span		
		single span	3 continuous spans	5 continuous spans
200	10	1	1-1-1	1-1-1-1-1
	12	1	2(1)-1-2(1)	1-1-1-1-1
	18	1	2(1)-1-2(1)	1(2)-1-1-1-1(2)
300	10	3(1)	1-2(1)-1	1-1-1-1-1
	12	1(3)	4(1)-4(1)-4(1)	4(3,2,1)-1(4)-1(4)-1(4)-4(3,2,1)
	18	1(2)	1(3)-1-1(3)	1(2)-1-1-1-1(2)

对于档距 200 m 的孤立档线路,在 3 种风速下导线的舞动能达到稳定状态,仅出现单半波的振动形态.对于 300 m 档距的孤立档,风速 10 m/s 时振动形态主要表现为 3 半波,同时出现较明显的单半波;随着风速的增大,舞动形态以单半波为主,同时伴有 3 半波或双半波.随着风速的增大,舞动波数呈减少的趋势.

对于档距 200 m 的 3 档和 5 档连续档线路,在风速 10 m/s 时,各档的舞动模式均为单半波.随着风速的增大,3 档线路的两个边档主要表现为双半波,同时有单半波形态;而中间档仍

主要为单半波形态,各种风速下 5 档线路的各档均以单半波形态为主,在风速达到 18 m/s 时,两个边档出现了双半波.对于 200 m 档距的连续档而言,低风速下各档的舞动模式主要为单半波,随着风速的增大,两个边档会出现较高阶的半波数,风速对 3 档线路舞动形态的影响大于 5 档线路.

对于 300 m 档距的 3 档和 5 档连续档线路,舞动模式比 200 m 档距线路更复杂.在风速 10 m/s 和 18 m/s 情况下,中间档的舞动仍然主要表现为单半波,随着风速的增加,两个边档的舞动形态波数有所增加.在风速 12 m/s 时,3 档和 5 档线路均出现 4 个半波的形态.5 档线路两个边档还出现了 1,2,3 个半波的形态.表明大档距连续档线路随风速的变化规律不明显.

3.3 不同参数线路舞动幅值的比较

表 3 所列为各线路的最大垂直幅值的均方根值.根据前面对线路舞动模式的分析,确定各档出现最大舞动幅值的位置.由于单半波、双半波、3 半波、4 半波时分别在 1/2 档距、1/4 档距、1/6 档距和 1/8 档距处的振幅最大,综合各档的舞动形态,确定各档相应的最大幅值.

从表中结果可见,孤立档线路的最大振动幅值随风速的增大而增大.连续档线路两个边档的振动幅值大于中间档,且它们的振动幅值也随风速的增大而增大.中间档由于出现多个半波其振动幅值随风速的变化规律不明显.总的来讲,3 档连续档线路的振动幅值大于 5 档连续档线路.相同档距和风速下,连续档线路的舞动幅值明显小于孤立档,且随风速的变化远小于后者.

表 3 覆冰四分分裂导线子导线 1 的垂直幅值均方根值

Table 3 Mean square roots of vertical displacement amplitudes of sub-conductor 1 in the iced quad bundle conductor lines

span length S/m	wind speed $v/(m/s)$	mean square root of vertical displacement amplitude a/m								
		single span	3 continuous spans			5 continuous spans				
			1 span	2 span	3 span	1 span	2 span	3 span	4 span	5 span
200	10	4.12	1.24	0.85	1.29	1.21	0.92	0.74	0.84	1.01
	12	5.67	1.40	0.82	1.45	1.36	0.60	0.41	0.57	1.41
	18	7.29	1.72	1.05	1.52	1.42	0.80	0.63	0.66	1.42
300	10	3.15	2.40	0.75	2.50	1.93	1.23	0.93	0.76	2.25
	12	5.66	2.72	1.14	2.61	2.21	0.91	0.80	0.84	2.27
	18	11.29	3.04	2.54	3.22	2.70	1.72	1.12	1.63	2.82

4 结 论

本文利用 ABAQUS 软件模拟不同档数和档距线路在不同风速下的舞动过程,基于线路的模态分析和动力响应结果研究了线路的舞动模式、频率特性和振动幅值,得到如下结论:

- 1) 连续档线路的固有频率较孤立档线路的低,其舞动频率与孤立档存在明显差别.
- 2) 档距较小的孤立档线路,在 3 种风速下均仅出现单半波舞动形态.档距较大的孤立档,在较低风速下的振动形态可能出现较高阶的半波数,舞动波数随风速的增大呈减少趋势.
- 3) 随着风速的增大,连续档线路两个边档的舞动半波数增加,中间档的波数变化很小;随着档数的增加,各档之间的舞动模式的差别减小,大档距时情况更复杂;连续档线路的舞动模式与孤立档差别明显.
- 4) 连续档线路两个边档的振动幅值大于中间各档,且随风速的增大而增大,中间档由于出现多个半波其振动幅值随风速的变化规律不明显;总的来讲,连续档的档数越多,各档的振动幅值越小;连续档线路的舞动幅值明显小于孤立档.
- 5) 风速较大时,连续档线路舞动过程中可能伴有较明显的次档距振动.

参考文献(References):

- [1] Chan J, Havard D, Rawlins C, Diana G, Cloutier L, Lilien J-L, Hardy C, Wang J, Goel A. *Wind-Induced Conductor Motion*[M]. 2nd ed. EPRI transmission line reference book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, USA: EPRI, 2009.
- [2] Hartog J P Den. Transmission line vibration due to sleet[J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1932, **51**(4): 1074-1086.
- [3] Nigol O, Clarke G J. Conductor galloping and control based on torsional mechanism[C]// *IEEE Power Engng Soc Meeting*. paper no C74016-2. New York, 1974.
- [4] Yu P, Desai Y M, Popplewell N, Shah A H. 3-degree-of-freedom model for galloping-2[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, **119**(12): 2426-2428.
- [5] Jones K F. Coupled vertical and horizontal galloping[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, **118**(1): 92-107.
- [6] Desai Y M, Yu P, Popplewell N, Shah A H. Finite element modeling of transmission line galloping[J]. *Computers & Structures*, 1995, **57**(3): 407-420.
- [7] Luongo A, Zulli D, Piccardo G. Analytical and numerical approaches to nonlinear galloping of internally resonant suspended cables[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, **315**(3): 375-393.
- [8] 王丽新, 杨文兵, 杨新华, 袁俊杰. 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, YUAN Jun-jie. 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.(in Chinese))
- [9] 刘小会, 严波, 张宏雁, 周松. 覆冰导线舞动非线性数值模拟方法[J]. 应用数学和力学, 2009, **30**(4): 457-468.(LIU Xiao-hui, YAN Bo, ZHANG Hong-yan, ZHOU Song. Nonlinear numerical simulation method for galloping of iced conductor[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, **30**(4): 457-468.(in Chinese))
- [10] HU Jing, YAN Bo, ZHOU Song, ZHANG Hong-yan. Numerical investigation on galloping of iced quad bundle conductors [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, **27**(2): 784-792.
- [11] 严波, 李文蕴, 周松, 张宏雁. 覆冰四分裂导线舞动数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2010, **29**(9): 102-107.(YAN Bo, LI Wen-yun, ZHOU Song, ZHANG Hong-yan. Numerical simulation on galloping of iced quad-bundled conductor[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, **29**(9): 102-107.(in Chinese))
- [12] 李黎, 陈元坤, 夏正春, 曹化锦. 覆冰导线舞动的非线性数值仿真研究[J]. 振动与冲击, 2011, **30**(8): 107-111.(LI Li, CHEN Yuan-kun, XIA Zheng-chun, CAO Hua-jin. Nonlinear numerical simulation study of iced conductor galloping [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, **30**(8): 107-111.(in Chinese))
- [13] 严波, 刘小会, 赵莉, 周林抒. 存在内共振的覆冰四分裂导线的非线性舞动[J]. 应用数学和力学, 2014, **35**(1): 39-49.(YAN Bo, LIU Xiao-hui, ZHAO Li, ZHOU Lin-shu. Nonlinear galloping of iced quad-bundle conductors with internal resonances[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(1): 39-49.(in Chinese))
- [14] Chabart O, Lilien J L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, **74/76**: 967-976.
- [15] 李万平, 杨新祥, 张立志. 覆冰导线群的静气动力特性[J]. 空气动力学学报, 1995, **13**(4): 427-433.(LI Wan-ping, YANG Xing-xiang, ZHANG Li-zhi. Static aerodynamic characteristics

- of the galloping of bundled iced power transmission lines[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1995, **13**(4): 427-433.(in Chinese))
- [16] 张宏雁, 严波, 周松, 胡景, 刘小会. 覆冰四分裂导线静态气动力特性试验研究[J]. 空气动力学报[J]. 2011, **29**(2): 23-27.(ZHANG Hong-yan, YAN Bo, ZHOU Song, HU Jing, LIU Xiao-hui. Static test on aerodynamic characteristics of iced quad bundled conductors [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, **29**(2): 23-27.(in Chinese))
- [17] Guring C B, Yamaguchu H, Yukino T. Identification of large amplitude wind-induced vibration of ice-accreted transmission lines based on field observed data[J]. *Engineering Structures*, 2002, **24**(2): 179-188.
- [18] Dyke P V, Laneville A. Galloping of a single conductor covered with a *D*-section on a high-voltage overhead test lines[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, **96**(6/7): 1141-1151.
- [19] 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.(GUO Ying-long, LI Guo-xing, YOU Chuan-yong. *Galloping of Transmission Lines*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.(in Chinese))
- [20] 赵高煜, 何程. 安装失谐摆的大跨越分裂导线自由振动计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, **23**(2): 63-66.(ZHAO Gao-yu, HE Zeng. Free vibration analysis of long span bundled multi-conductor of the transmission line in detuning pendulums connected to spacers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, **23**(2): 63-66.(in Chinese))
- [21] 胡景, 严波, 祖正华, 周松, 张宏雁. 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 Zheng-hua, ZHOU Song, ZHANG Hong-yan. A new anti-galloping device and investigation on its mechanism[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, **28**(9): 200-206.(in Chinese))

Numerical Investigation on Galloping Characteristics of Continuous Multi-Span Iced Quad Bundle Conductor Lines

ZHAO Li, YAN Bo, CAI Meng-qi, WU Chuan
(College of Aerospace Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400044, P.R.China)

(Contributed by YAN Bo, M. AMM Editorial Board)

Abstract: Finite element models of iced quad bundle conductor lines were set up and galloping processes of these lines were numerically simulated by means of ABAQUS software. Based on the analysis of the dynamic characteristics of the conductor lines and the galloping responses, the galloping vibration modes, frequencies and amplitudes of the continuous multi-span lines with different span lengths and span numbers were investigated and compared with those of the single-span dead-end lines. It is shown that the galloping modes and frequencies of the two end-spans of the multi-span lines are different from those of the intermediate spans, and the galloping characteristics of the multi-span lines are different from those of the single-span lines, which have to be taken into account in the development of anti-galloping technology.

Key words: iced quad bundle conductor; multi-span lines; galloping characteristics; numerical simulation

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(51277186)