

覆冰输电导线起舞概率研究*

王泽宇¹, 王 涛^{2,3}, 李正良¹, 吕大刚^{3,4}, 谭忆秋^{2,3}

(1. 重庆大学土木工程学院 重庆, 400045) (2. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院 哈尔滨, 150090)

(3. 哈尔滨工业大学重庆研究院 重庆, 401151) (4. 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨, 150090)

摘要 针对覆冰输电导线舞动问题, 基于概率密度演化法, 提出了一种覆冰输电导线起舞概率分析方法。首先, 建立了基于临界风速的覆冰输电导线起舞功能函数, 结合具有 3 个平动自由度与 1 个扭转自由度的三结点索单元的有限元模型与李雅普诺夫稳定性定理, 求解了覆冰输电导线起舞临界风速; 其次, 基于概率密度演化法, 发展了一种覆冰输电导线起舞概率评估框架, 并进行覆冰输电导线起舞概率的计算与分析; 最后, 获得了某单跨覆冰导线算例的起舞概率并进行了参数分析。分析结果表明: 本研究方法可准确计算该单跨输电导线的起舞概率, 在计算效率上相比拉丁超立方抽样-蒙特卡洛模拟法 (Latin hypercube sampling-Monte Carlo simulation, 简称 LHS-MCS) 具有显著优势; 档距、初始水平张力与初始风攻角对该单跨输电导线的起舞概率影响较大。

关键词 输电线路; 索单元; 舞动; 李雅普诺夫稳定性定理; 概率密度演化法

中图分类号 TM752

引言

输电线路受自身结构以及所在地气象条件等因素的影响, 在覆冰后会发一种低频自激振动, 该现象称为舞动^[1]。输电线路发生舞动具有破坏作用, 如金具、绝缘子损坏会使导线之间相互接触, 严重时会导致断线、倒塔等灾害, 从而导致电力供应中断^[2]。

对于覆冰输电导线舞动机理的研究, 文献[3]提出垂直运动舞动理论。Nigol 等^[4-5]提出了扭转舞动理论。Yu 等^[6-7]考虑了导线失稳过程中的偏心耦合作用。一些学者研究了同时考虑竖向和扭转运动^[8-9]以及同时考虑竖向和侧向运动^[10]的 2 自由度模型。Desai 等^[11]通过有限元理论, 提出了采用三结点等参索单元建立结点 3 自由度模型的舞动分析方法。晏致涛等^[12]提出了基于三结点 6 自由度空间曲梁模型分析覆冰输电导线舞动问题的方法。楼文娟等^[13-14]基于风洞试验测定了不同攻角下输电导线的起舞风速, 提出了舞动稳定性判别条件。

由于覆冰输电导线结构自身及外部环境的随机性, 导致输电导线的响应也具有随机性, 所以针对输电导线舞动问题采用概率评估方法更为合理。Wang 等^[15]基于概率密度演化法, 研究了同时考虑舞动导致的力学失效模式与电气功能失效模式的多相导线舞动整体可靠性。目前, 针对覆冰输电舞动

问题中的导线起舞概率评估的相关研究鲜有涉及。

笔者在具有 3 个平动自由度与 1 个扭转自由度的三结点覆冰输电导线有限元模型的基础上, 通过考虑覆冰输电导线自身结构与所处风场的不确定性, 提出了一种覆冰输电导线起舞概率分析方法, 并通过概率密度演化法评估了一跨覆冰单输电导线的起舞概率。

1 覆冰输电导线有限元模型

输电导线为柔性结构, 在重力及覆冰作用下形状近似为抛物线。笔者采用 3 个平动自由度与 1 个扭转自由度的三结点索单元^[11]模拟覆冰单导线。覆冰输电导线有限元模型如图 1 所示。其中: X 、 V 与 L 分别为导线切线方向、竖向与侧向坐标轴; S 为导线形心线方向的局部坐标轴。

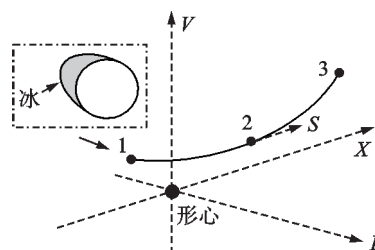


图 1 覆冰输电导线有限元模型

Fig.1 Finite element model of ice-covered transmission line

* 国家自然科学基金资助项目(52508584); 重庆市自然科学基金面上资助项目(CSTB2024NSCQ-MSX1134)

收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-11-30

根据更新的 Lagrange 方程,覆冰导线舞动方程为

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F_{\text{air}} \quad (1)$$

其中: q 、 $\dot{q}$ 与 $\ddot{q}$ 分别为导线系统位移、速度与加速度向量; M 、 C 、 K 和 F_{air} 分别为系统质量、阻尼、刚度矩阵与舞动气动力向量。

覆冰偏心作用下的导线单元质量矩阵 M_e 为

$$M_e = \int_0^{l_e} N^T \mu N dS \quad (2)$$

$$\mu = \rho \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 & -S_L \\ 0 & 0 & A & S_V \\ 0 & -S_L & S_V & J \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: ρ 为导线密度; S_V 为 V 轴方向的静矩; S_L 为 L 轴方向的静矩; l_e 为单元的长度; A 为裸导线横截面积; J 为极惯性矩;下标 e 表示单元; N 为形函数矩阵^[11]。

导线单元刚度矩阵 K_e 为

$$K_e = (K_e^{\text{lin}} + K_e^{\text{non}} + K_e^{\text{ice}}) \quad (4)$$

其中: K_e^{lin} 为单元线性刚度矩阵。

K_e^{lin} 的表达式为

$$K_e^{\text{lin}} = \int_0^{l_e} B^T \begin{bmatrix} EA & 0 \\ 0 & A_0 J \end{bmatrix} B dS \quad (5)$$

其中: E 为弹性模量; A_0 为剪切模量; $B = \{B_1 \ B_2 \ B_3\}$ 。

$$B_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial S} \frac{\partial N_k}{\partial S} & \frac{\partial v_1}{\partial S} \frac{\partial N_k}{\partial S} & \frac{\partial l_1}{\partial S} \frac{\partial N_k}{\partial S} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_k}{\partial S} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: (x_1, v_1, l_1) 为单元上任意一点切线方向(X)、竖向(V)和侧向(L)的坐标值; N_k 为形函数矩阵组成部分^[11]; $k=1, 2, 3$ 。

K_e^{non} 为覆冰导线单元非线性刚度矩阵,即

$$K_e^{\text{non}} = \int_0^{l_e} O^T T O dS \quad (7)$$

其中: O 为矩阵,由插值函数、应变增量推导得到^[11]; T 为轴向力。

K_e^{ice} 为单元覆冰刚度矩阵,表达式为

$$K_e^{\text{ice}} = -g\rho \int_0^{l_e} N^T \text{diag}(0 \ 0 \ 0 \ S_V) N dS \quad (8)$$

其中: g 为重力加速度; diag 表示对角矩阵。

第 w 阶振型对应的广义阻尼矩阵 C_w 表示为

$$C_w = 2\xi_w \omega_w M_w \quad (9)$$

其中: ξ_w 为第 w 阶振型对应的阻尼比; ω_w 为第 w 阶振型的自振频率; M_w 为第 w 阶振型对应的广义质量矩阵。

覆冰导线单元舞动气动力向量 $F_{e,\text{air}}$ 为

$$F_{e,\text{air}} = [F_e^1 \ F_e^2 \ F_e^3]^T \quad (10)$$

$$F_e^j = [0 \ F_{\text{lif}}^j(\alpha) \ F_{\text{dra}}^j(\alpha) \ M_{\text{mom}}^j(\alpha)] \quad (11)$$

其中: F_{lif}^j 、 F_{dra}^j 和 M_{mom}^j 分别为导线单元上第 j 结点的升力、阻力和扭矩; α 为风攻角。

2 覆冰导线起舞功能函数的建立

2.1 覆冰导线起舞功能函数

覆冰输电导线起舞临界风速等于导线所在高度处极值风速,即为发生舞动的极限状态。起舞功能函数 Z 表示为

$$Z = \eta_1 V_{\text{cr}}(X_1, X_2, \dots, X_l) - \eta_2 V_b \quad (12)$$

其中: η_1 为风速修正系数; $V_{\text{cr}}(X_1, X_2, \dots, X_l)$ 为起舞临界风速; $(X_1, X_2, \dots, X_l)$ 表示影响 V_{cr} 的随机变量; η_2 为考虑风速脉动及水平相关性影响的阵风因子; V_b 为覆冰输电导线所处高度的10 min平均年最大风速; $\eta_1 V_{\text{cr}}$ 为结构抗力; $\eta_2 V_b$ 为荷载作用效应。

2.2 舞动临界风速模型

输电线路舞动研究通常是在基于静态风荷载下的初始平衡位置处开展。笔者基于Newton-Raphson迭代法,得到了给定风速下的导线初始平衡位置^[16],并对覆冰导线结构特性矩阵进行更新。舞动作为典型的气动失稳现象,可根据李雅普诺夫稳定性定理判断稳定性。根据更新初始平衡位置后的舞动有限元模型可推导出

$$\begin{cases} M\ddot{q} + C_1\dot{q} + K_1q = 0 \\ C_1 = C + C_u \\ K_1 = K + K_u \end{cases} \quad (13)$$

其中: C_u 和 K_u 分别为气动阻尼矩阵与气动刚度矩阵,由舞动气动力向量 F_{air} 在初始位置经过一阶泰勒展开后整理得到。

此时特征方程为

$$|M\lambda^2 + C_1\lambda + K_1| = 0 \quad (14)$$

其中: λ 为特征值。

为了兼顾计算精度与计算效率,笔者采用实模态方法对式(14)进行振型分解^[16]。取前 s 阶振型,对质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵进行正交化处理,得到

$$\begin{cases} M^* = \Phi^T M \Phi \\ C_1^* = \Phi^T C_1 \Phi \\ K_1^* = \Phi^T K_1 \Phi \end{cases} \quad (15)$$

其中: Φ 为导线在给定风速下初始平衡位置处的前 s 阶振型对应的振型矩阵; M^* 、 C_1^* 与 K_1^* 分别为前 s 阶振型对应的广义质量矩阵、阻尼矩阵与刚度矩阵。

线性化方程特征多项式为

$$G(\lambda) = \det(\mathbf{M}^* \lambda^2 + \mathbf{C}_1^* \lambda + \mathbf{K}_1^*) \quad (16)$$

阻尼矩阵 $\mathbf{C}_0$ 与刚度矩阵 $\mathbf{K}_0$ 均受风速的影响, 可通过式(16)求解各风速对应的所有特征值。当风速达到 V_{cr} 时, 特征值实部从不存在正值变为出现正值, 以此判断输电导线开始失稳并舞动, 此时的风速 V_{cr} 为起舞临界风速。

2.3 输电导线极值风速模型

我国大多数气象站资料统计分析表明, 极值 I 型分布^[17]为 10 min 平均年最大风速 V_b 的最优分布。该分布的均值 μ_{V_b} 和标准差 σ_{V_b} 分别为

$$\mu_{V_b} = \gamma a + b \quad (17)$$

$$\sigma_{V_b} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} a \quad (18)$$

其中: a 、 b 分别为尺度参数和位置参数; γ 为欧拉常量, 值为 0.577 2。

覆冰导线所处高度重现期为 n_1 年的基准风速, V_d 的计算式为

$$V_d = V_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^\beta \quad (19)$$

其中: V_{10} 为 10 m 高度处的 n_1 年重现期基本风速, 可参考文献[18]中全国基本风速分布图选取; H 为导线所处高度; β 为地表粗糙度系数。

以 100 年重现期为例, 10 min 平均年最大风速 V_b 小于或等于 V_d 的保证率为 99%, 可推导出

$$V_d = 4.6a + b \quad (20)$$

由上述可知, 如果给定 10 min 平均年最大风速 V_b 的变异系数, 则极值 I 型分布的参数 a 、 b 、 μ_{V_b} 和 σ_{V_b} 可通过式(17)~(20)来求解。

3 基于概率密度演化法的覆冰输电导线起舞概率评估

3.1 覆冰输电导线的广义概率密度演化方程

通过对覆冰输电导线舞动机理进行分析, 在计算临界风速 V_{cr} 的有限元过程中, 考虑结构材料与几何参数的不确定性, 选取弹性模量 E 和裸导线面积 A 作为影响临界风速的随机变量。根据式(13)中所示的随机变量, 记 5 维随机向量 $\boldsymbol{\Theta} = (\eta_1, \eta_2, V_b, E, A)$ 。舞动有限元模型中的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵与舞动气动力向量都是 $\boldsymbol{\Theta}$ 的函数, 则式(1)可表示为

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\Theta}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\Theta}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}(\boldsymbol{\Theta}) \mathbf{q} = \mathbf{F}_{\text{air}}(\boldsymbol{\Theta}) \quad (21)$$

功能函数 Z 不随时间变化, 可构造包含虚拟时间参数 τ 的虚拟随机过程, 即

$$G = H_1(\boldsymbol{\Theta}, \tau) = \mathbf{Z} \cdot \tau \quad (22)$$

得到广义概率密度方程为

$$\frac{\partial P_{G\boldsymbol{\Theta}}(g^*, \boldsymbol{\theta}, \tau)}{\partial \tau} + \dot{H}_1(\boldsymbol{\theta}, \tau) \frac{\partial P_{G\boldsymbol{\Theta}}(g^*, \boldsymbol{\theta}, \tau)}{\partial g} = 0 \quad (23)$$

其中: $P_{G\boldsymbol{\Theta}}(g^*, \boldsymbol{\theta}, \tau)$ 为 $(G, \boldsymbol{\Theta})$ 的联合概率密度函数。

边界条件与初始条件分别为

$$P_{G\boldsymbol{\Theta}}(g^*, \boldsymbol{\theta}, \tau) \big|_{g \rightarrow \pm \infty} = 0 \quad (24)$$

$$P_{G\boldsymbol{\Theta}}(g^*, \boldsymbol{\theta}, \tau) \big|_{\tau=\tau_0} = \delta(g^* - g_0^*) P_{\boldsymbol{\Theta}}(\boldsymbol{\theta}) \quad (25)$$

其中: g_0^* 为 g^* 的确定性初始值; δ 为狄拉克函数; $P_{\boldsymbol{\Theta}}(\boldsymbol{\theta})$ 为联合概率密度函数; τ_0 为初始时刻。

3.2 覆冰输电导线起舞概率评估实现流程

覆冰输电导线起舞概率评估求解流程如图 2 所示, 具体分析步骤如下。

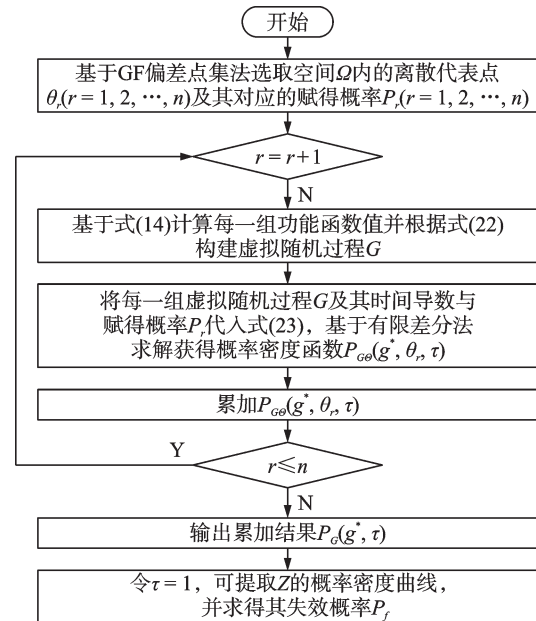


图2 覆冰输电导线起舞概率评估求解流程

Fig.2 Calculation process of ice-covered transmission line galloping probability evaluation

1) 根据式(12), 建立覆冰输电导线起舞功能函数 Z 并确定其随机变量参数及分布类型。

2) 采用 GF 偏差点集法^[19]进行离散点的选取, 广义(generalized F, 简称 GF)偏差定义为

$$D_{GF}(K_n) = \max_{1 \leq i \leq 5} \{D_{F,i}(K_n)\} \quad (26)$$

其中: K_n 为由 5 维单位超立方体中的 n 个点构成的点集; $D_{F,i}(K_n)$ 为第 i 个随机变量的边缘偏差。

在随机向量 $\boldsymbol{\Theta}$ 的分布空间 Ω 中根据 GF 偏差点集法选取 n 个离散点, 记为 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, 同时确定每个代表点的赋得概率, 记为 $(P_1, P_2, \dots, P_n)$, 其表达式为

$$P_r=\int_{U_r}P_{\theta}(\theta_r)d\theta$$

(27)

其中: U_r 为代表性体积, $r=1,2,\cdots,n$ 。

3) 将每一组离散点 $\theta_r=(C_{w,r},G_{s,r},U_{b,r},E_r,A_r)$ 代入步骤 1 构建的起舞功能函数 Z ,并根据式 (22) 得到虚拟随机过程 G 。

4) 将步骤 3 中确定的虚拟随机过程及其相应的时间导数与赋得概率代入概率密度演化方程,并采用具有总差变不增格式的有限差分法^[15]求解,获得概率密度函数 $P_{G\theta}(g^*,\theta_r,\tau)$ 为

$$P_G(g^*,\tau)=\sum_{r=1}^n P_{G\theta}(g^*,\theta_r,\tau)$$

(28)

5) 将求得的 $P_{G\theta}(g^*,\theta_r,\tau)$ 通过式 (28) 累加,即可得到 $P_G(g^*,\tau)$ 的数值解。令 $\tau=1$,到功能函数 Z 的概率密度曲线,并进一步求得其失效概率 P_f 。

4 算例分析

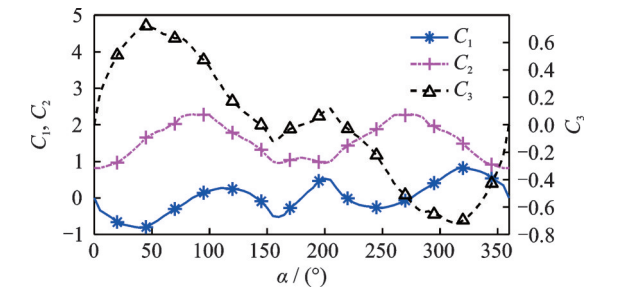
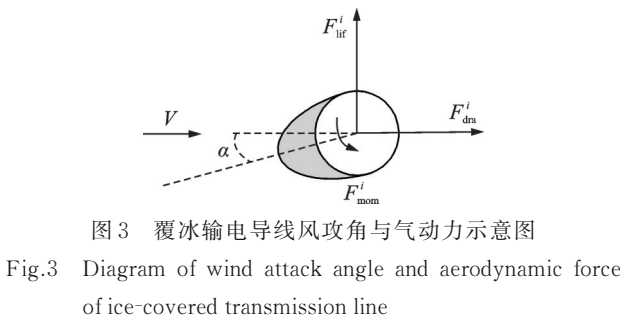
笔者考察一跨覆冰单导线,其所在高度为 30 m,档距 X_L 为 250 m,两端支座高差为 0,初始水平张力为 99.1 kN,地面粗糙度为 B 类。导线参数如表 1 所示。

表 1 导线参数

Tab.1 Example parameter table

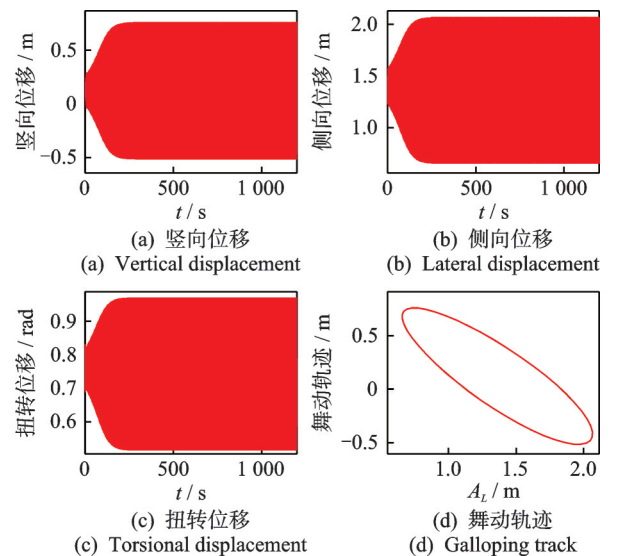
参数	物理意义/单位	数据
d	裸导线直径/mm	27.6
$G_{\phi}J$	抗扭刚度/($N\cdot m^2\cdot rad^{-1}$)	159
d_{ice}	覆冰厚度/mm	12
m	单位长度质量/($kg\cdot m^{-1}$)	1.51
m_{ice}	单位长度冰重/($kg\cdot m^{-1}$)	0.18
ξ_v	竖向阻尼比	0.45×10^{-2}
ξ_{θ}	扭转向阻尼比	1.42×10^{-2}
I_m	质量惯性矩/($kg\cdot m$)	4.13×10^{-4}
e_v	竖向偏心/mm	0
e_L	侧向偏心/mm	1.75

图 3 为覆冰输电导线风攻角与气动力示意图。覆冰风攻角 α 与气动力以图 3 所示方向为正,其中 V 为风速。三分力系数(升力系数 C_1 ,阻力系数 C_2 ,扭转系数 C_3)曲线如图 4 所示^[16]。



4.1 临界风速验证

真实环境中输电导线的偏心覆冰一般形成于线路的迎风侧。笔者以 60° 初始风攻角为例,计算覆冰单导线位移响应。风速为 23 m/s 时输电导线跨中舞动时程如图 5 所示。



类似上述过程,计算该算例在初始风攻角为 60° 、风速为 22 m/s 时的舞动位移时程。当风速为 22 m/s 与 23 m/s 时,输电导线跨中位置的竖向、扭转向位移时程对比如图 6 所示。当风速下降到 22 m/s 时,输电导线舞动位移幅值不随时间发散,证明其并未发生舞动。通过有限元动力时程分析方法求得的输电导线起舞风速位于 22~23 m/s。

根据李雅普诺夫稳定性定理,该跨覆冰输电导线在 60° 初始风攻角、风速为 22.9 m/s 时,通过式 (13)~(16) 计算得到的全部特征值中首次出现正特征值,说明 22.9 m/s 为该跨输电导线在 60° 初始风攻角工况的起舞临界风速。其与通过有限元动力时

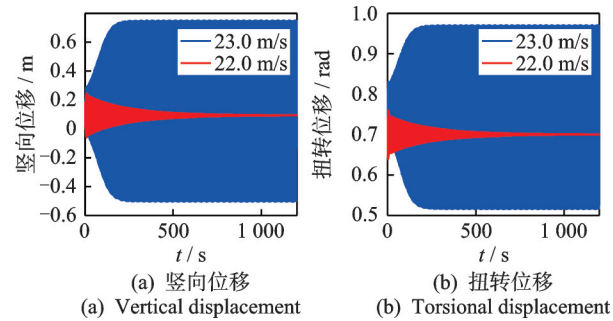


图 6 输电导线跨中位置的竖向、扭转向位移时程对比
Fig.6 Time-history comparison diagram of vertical and torsional displacement at mid-span of transmission line

程分析方法确定的临界风速区间相近,同时也与文献[16]在相同工况下给出的起舞临界风速接近。这说明了笔者通过建立有限元模型并结合李雅普诺夫稳定性定理计算起舞临界风速方法的准确性。

4.2 起舞概率评估

根据文献[18]取 V_d 为 24 m/s,通过式(21)计算 V_b 的均值为 17.39 m/s,变异系数取 0.2^[17]。阵风因子 G_s 假定服从正态分布,其均值参照文献[18]取值为 1.31,变异系数为 0.1。弹性模量 E 和裸导线横截面积 A 的分布类型分别为正态分布与对数正态分布,均值系数取 1,变异系数取 0.05。随机变量的分布类型及参数详见表 2。

表 2 随机变量分布类型及参数			
Tab.2 Random variable distribution types and parameters			
参数	分布规律	均值	变异系数
η_1	正态分布	1	0.05
η_2	正态分布	1.31	0.10
$V_b/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	极值 I 型分布	17.39	0.20
E/GPa	正态分布	69	0.05
A/mm^2	对数正态分布	453.62	0.05

以初始风攻角 60°的工况为例进行该跨覆冰输电导线的起舞概率评估。在 5 维空间 Ω 中基于 GF 偏差点集法选取 400 个样本点,构造虚拟随机过程 G ,求解得到 60°初始风攻角概率密度函数(probability density function, 简称 PDF)演化曲面如图 7 所示。

在图 7 中,提取 $\tau=1$ 时刻的曲线即为笔者所求 60°初始风攻角工况下功能函数 Z 的概率密度曲线,其 PDF 曲线与累积分布函数(cumulative distribution function,简称 CDF)曲线如图 8 所示。

根据式(12),当 $Z<0$ 时,覆冰输电导线达到失稳临界状态并发生舞动。根据图 8 计算初始风攻角为 60°时,该跨覆冰输电导线起舞概率为 0.305 8。

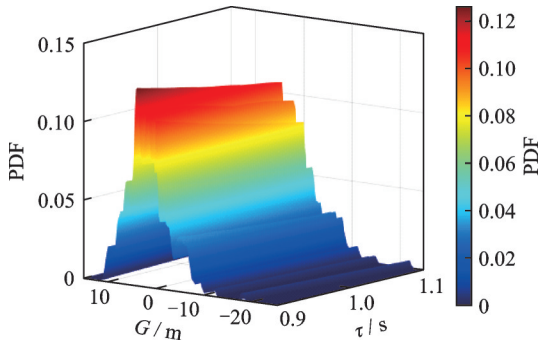


图 7 60°初始风攻角 PDF 演化曲面
Fig.7 PDF evolution surface of 60° initial wind attack angle

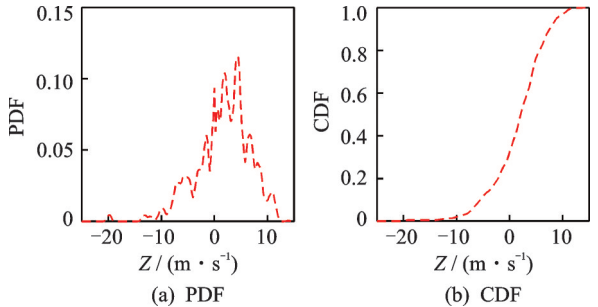


图 8 PDF 曲线与 CDF 曲线
Fig.8 The curves of PDF and CDF

为验证笔者所用概率密度演化法评估覆冰输电导线起舞概率的有效性,采用 LHS-MCS 法验证 60°初始风攻角的覆冰导线起舞概率。LHS-MCS 法的模拟次数为 2 000^[20],以 LHS-MCS 法的结果为基准,计算本研究方法的起舞概率误差。表 3 为不同方法对应的起舞概率。采用概率密度演化法进行该跨覆冰输电导线起舞概率评估时,起舞概率相比 LHS-MCS 法的误差为 4.7%。计算效率方面,LHS-MCS 法调用有限元过程的次数为 2 000,而本研究方法为 400 次,计算效率仅为 LHS-MCS 法的 25%。可见,本研究方法能较为高效地用于覆冰导线起舞概率评估。

表 3 不同方法对应的起舞概率			
Tab.3 The probability of galloping corresponding to different methods			
方法	次数	起舞概率	
		数值	误差/%
本研究方法	400	0.305 8	4.7
LHS-MCS	2 000	0.320 9	—

4.3 参数分析

4.3.1 档距对起舞概率的影响

改变输电线路档距会使导线受风面积发生变化,从而对输电线路的舞动情况产生影响。这里研

究该单跨覆冰导线在档距 X_L 为 250~650 m, 初始风攻角为 60° 时的起舞概率, 不考虑档距变化而导致的张力变化。不同档距对应的 PDF 曲线如图 9 所示。

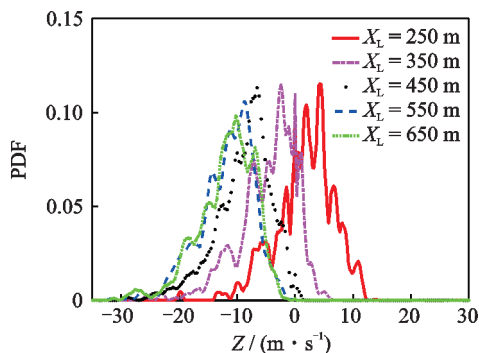


图 9 不同档距对应的 PDF 曲线

Fig.9 PDF curves corresponding to different span lengths

不同档距对应的起舞概率如表 4 所示。随着档距的增加, PDF 曲线有明显的左移趋势, 起舞概率不断增加。由于同时考虑了结构与风场的不确定性, 故 PDF 曲线并非类似正态分布或对数正态分布, 而是呈现为非规则性。

表 4 不同档距对应的起舞概率

Tab.4 The probability of galloping corresponding to different span lengths

档距/m	起舞概率	档距/m	起舞概率
250	0.305 8	550	0.999 7
350	0.822 7	650	0.999 8
450	0.990 6		

4.3.2 初始水平张力对起舞概率的影响

取初始水平张力分别为 19.1 kN~99.1 kN, 初始风攻角为 60° , 档距不变, 得到不同初始水平张力对应的起舞概率如表 5 所示。不同初始水平张力对应的 PDF 曲线如图 10 所示。

根据图 10 所示, 当初始风攻角为 60° 时, PDF 曲线随着初始水平张力的减小而不断左移, 对应表 5 中导线起舞概率逐渐增加。当初始水平张力大于 39.1 kN 时, 起舞概率随着初始水平张力的下降而显著增加; 当初始水平张力低于 39.1 kN 后, 起舞概率变化不明显。

表 5 不同初始水平张力对应的起舞概率

Tab.5 The probability of galloping corresponding to different initial horizontal tension

初始水平张力/kN	起舞概率	初始水平张力/kN	起舞概率
99.1	0.305 8	39.1	0.972 3
79.1	0.625 6	19.1	0.979 8
59.1	0.899 1		

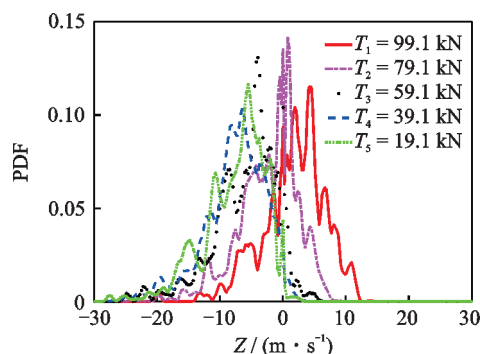


图 10 不同初始水平张力对应的 PDF 曲线

Fig.10 PDF curves corresponding to different initial horizontal tension

4.3.3 初始风攻角对起舞概率的影响

输电导线上的覆冰会随着冰风气候条件的变化而发生偏转, 其覆冰风攻角存在一定的变化范围。选取初始风攻角为 $0^\circ \sim 70^\circ$ 进行覆冰输电导线起舞概率评估。不同初始风攻角对应的起舞概率如表 6 所示。该跨覆冰输电导线在初始风攻角 $0^\circ \sim 70^\circ$ 范围内, $0^\circ \sim 20^\circ$ 对应的起舞概率较高, 表明输电导线在此攻角下易达到起舞临界风速; 当初始风攻角为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 时, 输电导线起舞概率较低, 说明该跨覆冰导线起舞临界风速较高, 发生舞动可能性最低。

表 6 不同初始风攻角对应的起舞概率

Tab.6 The galloping probability corresponding to different initial wind attack angles

初始风攻角/ $^\circ$	起舞概率	初始风攻角/ $^\circ$	起舞概率
0	0.979 3	40	0.591 3
10	0.759 6	50	0.484 6
20	0.760 1	60	0.305 8
30	0.694 6	70	0.357 8

5 结 论

1) 结合三结点索单元的覆冰导线有限元模型和李雅普诺夫稳定性定理, 给出了起舞临界风速求解方法, 并建立了覆冰输电导线起舞功能函数。

2) 笔者提出的覆冰输电导线起舞概率评估方法具有较高的精度, 相比 LHS-MCS 法, 起舞概率相对误差为 4.7%, 计算效率仅为 LHS-MCS 法的 25%。

3) 根据覆冰输电导线起舞概率评估结果可知, 该跨覆冰单导线起舞概率受档距、初始水平张力和初始风攻角的影响较大。

参 考 文 献

- [1] YAN Z T, SAVORY E, LI Z L, et al. Galloping of iced quad-conductors bundles based on curved beam

- theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(6): 1657-1670.
- [2] 蒋兴良, 张志劲, 胡琴, 等. 再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 463-469. JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, HU Qin, et al. Thinkings on the restrike of ice and snow disaster to the power grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 463-469. (in Chinese)
- [3] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1932, 51(4): 1074-1076.
- [4] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping, part I: den hartog mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 699-707.
- [5] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping, part II: torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 708-720.
- [6] YU P, DESAI Y M, 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.
- [7] YU P, DESAI Y M, POPPLEWELL N, et al. Three-degree-of-freedom model for galloping, part II: solutions[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(12): 2426-2448.
- [8] SIG-BYUN G, EGBERT R I. Two-degree-of-freedom analysis of power line galloping by describing function methods[J]. Electric Power Systems Research, 1991, 21(3): 187-193.
- [9] YU P, SHAH A H, POPPLEWELL N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1992, 59(1): 140-145.
- [10] JONES K F. Coupled vertical and horizontal galloping[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(1): 92-107.
- [11] DESAI Y M, YU P, POPPLEWELL N, et al. Finite element modelling of transmission line galloping[J]. Computers & Structures, 1995, 57(3): 407-420.
- [12] 晏致涛, 李正良, 杨振华. 基于结点 6 自由度的输电线路舞动有限元分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 112-117. YAN Zhitao, LI Zhengliang, YANG Zhenhua. Finite element modeling of transmission line galloping based on 6-DOFs nodes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 112-117. (in Chinese)
- [13] 楼文娟, 余江, 姜雄, 等. 覆冰导线三自由度耦合舞动稳定性判定及气动阻尼研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 55-64. LOU Wenjuan, YU Jiang, JIANG Xiong, et al. Stability evaluation and aerodynamic damping study on three-degree-of-freedom coupled galloping of iced conductors[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2): 55-64. (in Chinese)
- [14] 楼文娟, 王礼祺, 陈卓夫. 雾凇覆冰和雨凇覆冰导线气动力特性试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4): 684-689. LOU Wenjuan, WANG Liqi, CHEN Zhuofu. Experimental study on aerodynamic characteristics of rime icing and glaze icing conductors[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 684-689. (in Chinese)
- [15] WANG T, WANG Z Y, LU D G, et al. Galloping-induced global reliability assessment for ice-covered three-phase bundled conductors considering both mechanical and electrical functional failure modes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 262: 111240.
- [16] YAN Z T, LI Z L, SAVORY E, et al. Galloping of a single iced conductor based on curved-beam theory[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 77-87.
- [17] 周峥, 葛耀君, 杜柏松. 桥梁颤振概率性评价的随机有限元法[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 98-104, 114. ZHOU Zheng, GE Yaojun, DU Baisong. Probabilistic assessment of bridge flutter based on stochastic finite element method[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 98-104, 114. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国交通部. JTG/T D60-01—2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [19] 陈建兵, 张圣涵. 非均布随机参数结构非线性响应的概率密度演化[J]. 力学学报, 2014, 46(1): 136-144. CHEN Jianbing, ZHANG Shenghan. Probability density evolution analysis of nonlinear response of structures with non-uniform random parameters[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(1): 136-144. (in Chinese)
- [20] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 79-98.



第一作者简介:王泽宇,男,1998年5月生,硕士。主要研究方向为输电结构与工程可靠度。曾发表《覆冰多分裂输电导线舞动的动态张力随机分析与可靠度评估》(《振动工程学报》2025年第38卷第3期)等论文。

E-mail: 1418084298@qq.com

通信作者简介:王涛,男,1993年10月生,博士、助理研究员。主要研究方向为结构振动与安全风险评估。

E-mail: taowang@alu.cqu.edu.cn