

## 覆冰架空导线舞动跳闸概率计算新方法

刘辉<sup>1</sup>, 马增泰<sup>2</sup>, 林济铿<sup>2</sup>, 田宏强<sup>1</sup>, 严波<sup>1</sup>, 左晨亮<sup>3</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092;  
3. 安徽继远软件公司, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 覆冰导线的舞动严重威胁着电力系统安全稳定运行, 如何准确地计算覆冰导线舞动导致的输电线路跳闸的概率成为备受关注的研究课题之一。提出了基于舞动运动方程、气象信息及故障信息相结合的覆冰导线舞动的跳闸概率计算新方法。首先由风速与冻雨量的历史样本获得风速与冻雨量的概率分布函数, 然后根据牛顿定律建立了覆冰导线的单自由度舞动模型; 进而, 采用里茨-伽辽金方法求解舞动模型, 获得了以风速和覆冰厚度为自变量的舞动幅值解析表达式; 基于已获得的风速与冻雨量的概率分布函数, 获得与二者为函数关系的覆冰厚度的概率分布函数, 进而获得舞动幅值的概率分布函数; 最后, 根据覆冰舞动跳闸的历史故障记录所获得的泊松分布求得覆冰导线舞动幅值越限及短路故障的联合概率, 结合贝叶斯公式获得舞动幅值越限条件下的覆冰导线舞动跳闸概率。算例证明了该方法的正确性及有效性。

**关键词:** 覆冰导线; 跳闸概率; 单自由度舞动模型; 风速; 冻雨量; 覆冰厚度

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202009114

### 0 引言

覆冰架空输电线路的舞动对电力系统的安全运行构成较大的威胁<sup>[1-4]</sup>。安徽、浙江、江苏等省份在多次遭受大风冻雨等极端天气时, 均出现覆冰导线舞动导致的大范围线路跳闸等恶性事件<sup>[5]</sup>。

目前关于覆冰导线舞动的研究主要集中在 2 方面: 舞动机理与模型的研究和基于线性化思想的舞动故障预警研究。

(1) 舞动机理与模型方面的研究有纵向的垂直舞动机理<sup>[6]</sup>、扭转舞动机理<sup>[7]</sup>等。覆冰导线舞动的模型主要包括单自由度、两自由度以及三自由度舞动模型<sup>[8]</sup>, 采用增量谐波法<sup>[9]</sup>、矩阵摄动法<sup>[10]</sup>、牛顿定理法<sup>[11]</sup>及一维或多维的有限单元法<sup>[12-13]</sup>等。文献<sup>[14]</sup>利用达朗贝尔原理建立了覆冰导线的单自由度与两自由度舞动模型。文献<sup>[12]</sup>提出了基于牛顿法的单自由度舞动模型及慢变参数法求解策略, 方法较为简单, 但只适用于较小幅值的舞动情况。文献<sup>[15]</sup>提出了基于哈密尔顿

原理的导线三自由度舞动模型及 Newmark 方法结合 Newton-Raphson 的求解策略, 三自由度舞动模型较为精细, 模拟舞动过程的精度高, 但也较为复杂且需要信息较多, 只能得到导线舞动形态的数值解。尽管不同模型均得到大家的研究及关注, 但是相对于三自由度模型而言, 单自由度模型简单且可方便地得到舞动幅值的解析解。再者, 由于分裂导线已普遍应用于高电压等级的输电线路, 而分裂导线的间隔棒在一定程度上能够限制导线的扭转, 使得不考虑导线扭转的单自由度舞动模型更加贴近工程实际。

(2) 基于线性化思想的舞动故障预警研究。其基本思想是先计算出导线舞动幅值, 然后与相间距离进行比较得到以舞动幅值为自变量的线性化的跳闸概率。文献<sup>[16]</sup>提出了一种基于支持向量器和机器学习分类器的架空线路舞动跳闸预警方法。通过挖掘历史上易发生舞动区域的气象数据, 构建了基于支持向量机 (SVM) 分类器的易舞动气象预报模型, 得到舞动跳闸概率。文献<sup>[17]</sup>采用拉力传感器信息及覆冰导线实时水平荷载估算出导线舞动幅值, 然后与相间电气距离比较, 得到舞动跳闸概率。文献<sup>[18]</sup>基于现场舞动点的温度和湿度对舞动幅值进行实时预测, 并进而得

收稿日期: 2020-09-27; 修回日期: 2021-05-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51177107); 国网安徽省电力有限公司科技项目 (52120018004Q)。

到跳闸概率。文献 [19] 基于拉力传感器与角度传感器得到覆冰导线张力与风攻角, 由此推出导线舞动的幅值, 并进而得到跳闸概率。不难看出, 气象预测信息结合导线覆冰运动方程获得导线在下一阶段的预测跳闸概率已经受到了研究者的重视, 但成果还比较有限, 有必要进行更为体系化研究, 从而获得更为准确的跳闸概率。

针对上述研究, 本文提出基于舞动运动方程、气象信息及故障信息相结合的导线舞动跳闸概率计算新方法。该方法以贝叶斯公式为核心, 将覆冰导线舞动的越限概率分布函数与覆冰舞动跳闸的历史故障记录所获得的泊松分布函数相结合, 获得舞动幅值越限条件下的覆冰导线舞动跳闸概率。基本过程为: 由风速与冻雨量的历史样本获得风速与冻雨量的概率分布函数, 然后根据牛顿定律建立覆冰导线单自由度舞动模型; 进而采用里茨-伽辽金方法求解舞动模型, 获得以风速和覆冰厚度为自变量的舞动幅值解析表达式; 在此基础上, 利用已获得的风速与冻雨量的概率分布函数, 获得与二者为函数关系的覆冰厚度的概率分布函数, 进而获得舞动幅值的概率分布函数; 最终, 利用贝叶斯公式获得舞动幅值越限条件下的覆冰导线舞动跳闸概率。

## 1 覆冰导线舞动幅值的概率模型

### 1.1 覆冰导线舞动的幅值表达式

根据牛顿定理, 输电线路覆冰导线舞动运动方程<sup>[1]</sup>可表示为

$$m\ddot{y} + 2m\xi\omega\dot{y} + ky = \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}v^2DC_L(\alpha) \quad (1)$$

式中:  $C_L(\alpha) = c_1\alpha - c_2\alpha^3$ ,  $c_1$ 、 $c_2$  为气动参数;  $\alpha = \dot{y}/v$ ;  $\omega$  为导线体系的固有频率,  $\omega = k/m$ ,  $k$  为导线体系刚度, N/m;  $m$  为单位长度覆冰导线的质量,  $m = \pi r^2\rho_L + \pi\rho_{\text{ice}}(r_H^2 + 2r_Hr)$ , kg/m;  $r$  为导线半径;  $\rho_L$ 、 $\rho_{\text{ice}}$  分别为导线密度和冰的密度;  $r_H$  为导线覆冰冰厚。  $\rho_{\text{air}}$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $D$  为覆冰导线直径, m;  $D = 2(r + r_H)$ ;  $v$  为导线舞动风速, m/s;  $\xi$  为阻尼比。

考虑到覆冰导线发生舞动时的小应变、大位移的强几何非线性特点, 本文采用里茨-伽辽金法求解式 (1)。设覆冰导线舞动垂直方向的位移

响应<sup>[20]</sup>为

$$y = c \cos(\omega t + \varphi) = a \cos \omega t + b \sin \omega t \quad (2)$$

式中:  $c$  与  $\varphi$  为随时间变化的舞动幅值与相位;  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。设舞动系统产生任意一个虚位移  $\delta y$ , 由虚位移原理得

$$\left\{ m\ddot{y} + 2m\xi\omega\dot{y} + ky - \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}v^2D \left[ c_1\frac{\dot{y}}{v} - c_2\left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^3 \right] \right\} \delta y = 0 \quad (3)$$

对式进行变分得

$$\delta y = \cos(\omega t)\delta a + \sin(\omega t)\delta b \quad (4)$$

为了确定系数  $a$  和  $b$ , 并根据  $\delta a$  与  $\delta b$  的任意性, 结合式 (4), 在一个周期内取平均值有

$$\begin{cases} \int_0^T \left\{ m\ddot{y} + 2m\xi\omega\dot{y} + ky - \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}v^2D \left[ c_1\frac{\dot{y}}{v} - c_2\left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^3 \right] \right\} \cos(\omega t) dt = 0 \\ \int_0^T \left\{ m\ddot{y} + 2m\xi\omega\dot{y} + ky - \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}v^2D \left[ c_1\frac{\dot{y}}{v} - c_2\left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^3 \right] \right\} \sin(\omega t) dt = 0 \end{cases} \quad (5)$$

将式 (2) 代入式 (5) 积分可得

$$\begin{cases} -3.14am\omega + 6.28bm\xi\omega + 3.14\frac{ka}{\omega} - 1.57bc_1Dv\rho_{\text{air}} + \frac{\rho_{\text{air}}vDc_2}{2}(2.35a^2b\omega + 2.35b^3\omega^2) = 0 \\ -3.14bm\omega + 6.28am\xi\omega + 3.14\frac{kb}{\omega} - 1.57ac_1Dv\rho_{\text{air}} + \frac{\rho_{\text{air}}vDc_2}{2}(2.35b^2a\omega + 2.35a^3\omega^2) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

将式 (6) 中上下两式相加并消去等式两边的  $(a+b)$  项, 利用辅助角公式把  $a$  与  $b$  用  $c$  代换, 可得

$$-3.14m\omega v + 6.28m\xi\omega v + 3.14\frac{kv}{\omega} - 1.57bc_1Dv^2\rho_{\text{air}} + 1.175\rho_{\text{air}}Dc_2\omega^2c^2 = 0 \quad (7)$$

将式 (7) 整理可得覆冰导线舞动幅值为

$$c = m \sqrt{\frac{1.24c_1v^2}{c_2k^2} + \frac{(k - 2\xi k - m)\pi v}{1.175\rho_{\text{air}}Dc_2k^2}} \quad (8)$$

图 1 中实线部分为 D 型覆冰导线, 对于不同冰厚及形状, 式 (1) 中的气动参数将随冰厚而变化。本文使用回归分析方法构建气动系数与冰厚  $r_H$  间的函数关系: 根据典型覆冰形状, 通过 Fluent 仿真软件对覆盖不同冰厚的导线进行气动

力模拟，获取相应的三次多项式气动系数曲线，然后对气动系数与冰厚  $r_H$  进行回归分析，得到气动系数  $c_1$  与  $c_2$  关于  $r_H$  的函数表达为

$$\begin{cases} c_1 = f_1(r_H) \\ c_2 = f_2(r_H) \end{cases} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (8) 可得覆冰导线舞动的幅值为

$$c = \left[ \pi r^2 \rho_L + \pi \rho_{\text{air}} (r_H^2 + 2r_H r) \right] \times \sqrt{\frac{1.24 f_1(r_H) v^2 + 2 \left[ k - 2\xi k - (r^2 \rho_L + \rho_{\text{ice}} r_H^2 + 2\rho_{\text{ice}} r_H r) \right] \pi v}{f_2(r_H) k^2 + 1.175 \rho_{\text{air}} (r + r_H) f_2(r_H) k^2}} \quad (10)$$

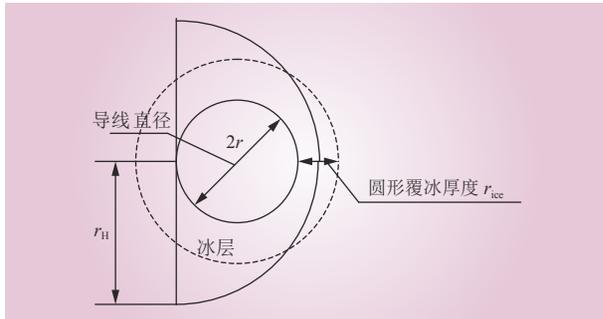


图 1 覆冰导线截面

Fig. 1 Cross-section of the D-type iced conductor

### 1.2 覆冰导线舞动幅值的概率分布函数

导线冻雨覆冰时，理想状态下导线上发生圆形覆冰时冰厚与风速、冻雨量以及冻雨密度之间的关系<sup>[21]</sup>为

$$r_{\text{ice}} = \frac{1}{\rho_{\text{ice}} \pi} \sqrt{(l \rho_w)^2 + t_l^{0.308} (0.2412 v'^{0.806})^2} \quad (11)$$

式中： $\rho_w$  为冻雨密度， $\text{kg/m}^3$ ； $t_l$  为平均降雨小时数， $\text{h}$ ； $l$  为导线覆冰过程的风速冻雨量， $\text{m}^3$ ； $v'$  为导线覆冰过程的风速， $\text{m/s}$ 。

将此圆形冰厚  $r_{\text{ice}}$  等效为 D 型覆冰冰厚  $r_H$ ，根据覆冰面积相等的关系， $r_H$  表示为

$$r_H = \sqrt{2} (r_{\text{ice}} + r) \quad (12)$$

假定冻雨量  $l$  与覆冰风速  $v'$  相互独立，根据极值理论 POT 模型<sup>[21]</sup>，使用最大似然方法估计模型参数，覆冰风速的概率密度函数可表示为

$$f(v') = \begin{cases} \frac{1}{\xi_{v'}} \frac{N_{u_{v'}}}{N_{v'}} \left[ 1 + \xi_{v'} \frac{v - u_{v'}}{\sigma_{v'}} \right]^{-1/\xi_{v'} - 1}, & \xi_{v'} \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma_{v'}} \frac{N_{u_{v'}}}{N_{v'}} e^{-(v - u_{v'})/\sigma_{v'}}, & \xi_{v'} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中： $N_{v'}$  为覆冰风速  $v'$  的样本个数； $u_{v'}$  为风速样

本中的阈值， $\text{m/s}$ ； $\sigma_{v'}$  与  $\xi_{v'}$  分别为导线覆冰风速超限样本的规模参数与形状参数。

同样地，可以分别得到冻雨量的概率密度函数  $f(l)$  为

$$f(l) = \begin{cases} \frac{1}{\xi_l} \frac{N_{u_l}}{N_l} \left[ 1 + \xi_l \frac{l - u_l}{\sigma_l} \right]^{-1/\xi_l - 1}, & \xi_l \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma_l} \frac{N_{u_l}}{N_l} e^{-(l - u_l)/\sigma_l}, & \xi_l = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中： $N_l$  为冻雨量  $l$  的样本个数； $u_l$  为冻雨量样本中的阈值， $\text{m/s}$ ； $\sigma_l$  与  $\xi_l$  分别为冻雨量超限样本的规模参数与形状参数。

舞动风速的概率密度函数  $f(v)$  为

$$f(v) = \begin{cases} \frac{1}{\xi_v} \frac{N_{u_v}}{N_v} \left[ 1 + \xi_v \frac{v - u_v}{\sigma_v} \right]^{-1/\xi_v - 1}, & \xi_v \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma_v} \frac{N_{u_v}}{N_v} e^{-(v - u_v)/\sigma_v}, & \xi_v = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $N_v$  为导线舞动过程风速的样本个数； $u_v$  为风速样本中的阈值， $\text{m/s}$ ； $\sigma_v$  与  $\xi_v$  分别为导线舞动风速超限样本的规模参数与形状参数。

结合式 (11) ~ (14) 可得冰厚  $r_H$  的概率分布函数为

$$\begin{cases} F(r_H) = \int_0^{l_{\text{max}}} \int_0^{\eta} f(v') f(l) dv' dl \\ \eta = \frac{\left[ 0.5 (r_H \rho_{\text{ice}} \pi - \sqrt{2} r)^2 - (l \rho_w)^2 \right]^{0.5}}{0.2412 l^{0.846} t_l^{0.154}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $l_{\text{max}}$  是冻雨量上限。

由式 (16) 对  $r_H$  求偏导，得覆冰厚度  $r_H$  的概率密度函数为

$$f(r_H) = \frac{\partial F(r_H)}{\partial r_H} \quad (17)$$

根据式 (10) 可知，舞动幅值  $c$  是关于覆冰厚度  $r_H$  与舞动风速  $v$  的函数。结合式 (10) (15) 及式 (17)，可得舞动幅值  $c$  的概率分布函数为

$$\begin{cases} F(c) = \int_{2r}^{r_{H\text{max}}} \int_0^{\tau} f(v) f(r_H) dv dr_H \\ \tau = -\frac{(k - 2\xi k - m) \pi}{2.91 \rho_{\text{air}} (r + r_H)} + \frac{c_2 k^2}{2.48 c_1} \\ \sqrt{\left[ \frac{2(k - 2\xi k - m) \pi}{1.175 \rho_{\text{air}} (r + r_H) c_2 k^2} \right]^2 + \frac{4.96 c_1 c^2}{c_2 k^2 m}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $r_{H\text{max}}$  是覆冰厚度上限。

## 2 输电线路覆冰舞动跳闸概率

设事件  $A$  为导线覆冰舞动跳闸，事件  $B$  为导线舞动幅值超过导线相间电气最小间距。根据 1.2 节所获得的舞动幅值的概率分布函数即式 (18) 可知， $P(B) = 1 - F(c_{\max})$ 。 $P(A|B)$  为导线舞动幅值超过导线相间电气最小间距后，发生相间短路跳闸的概率。根据贝叶斯公式有

$$P(A|B) = P(B|A)P(A)/P(B) \quad (19)$$

式中： $P(B|A)$  为 1。对于事件  $A$  的概率计算，可将单位时间内的导线覆冰舞动跳闸事件看作为离散事件，由于泊松分布适合于描述单位时间内随机事件发生的次数，可认为舞动跳闸事件概率分布符合泊松分布。因此，导线舞动跳闸事件  $A$  的概率<sup>[22]</sup> $P(A=j)$  表示为

$$P(A=j) = e^{-\lambda} \lambda^j / j! \quad (20)$$

式中： $j$  为随机事件  $A$  的发生次数； $\lambda$  为泊松参数，是单位时间内舞动跳闸事件的平均发生次数。

当某区域受冰冻天气影响时，统计该区域的输电线路数  $n$ ，及各线路档数  $w_1, w_2, \dots, w_n$ ，以及所有线路总档数为  $N_d$ 。单位时间内（一天） $N_d$  档线路发生舞动跳闸次数的分别为  $z_1, z_2, \dots, z_{N_d}$ 。根据式 (20)，冰冻气象区域单位时间内发生覆冰导线舞动跳闸的概率为

$$P(A > 0) = 1 - e^{-\lambda} \quad (21)$$

为了获得泊松参数  $\lambda$ ，使用极大似然估计法来估计式 (21) 中的泊松参数，其过程是先获得式 (21) 的似然函数，然后对该似然函数取对数之后对  $\lambda$  求偏导，令该偏导数为零，可获得泊松参数  $\lambda$  的估计值。式 (21) 的似然函数为

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^N P(z_i, \lambda) = e^{-N\lambda} \lambda^{\sum_{i=1}^N z_i} / \prod_{i=1}^N z_i! \quad (22)$$

将式 (22) 取对数后，并对泊松参数  $\lambda$  求偏导数，令该偏导数为零可得

$$\hat{\lambda} = \sum_{i=1}^N z_i / N \quad (23)$$

由式 (23) 可以得到单位时间内输电线路发生覆冰舞动跳闸的概率为

$$P(A) = P(A > 0) = 1 - e^{-\lambda} \quad (24)$$

将式 (24) 代入式 (19)，得到输电线路舞

动幅值超过导线相间电气最小间距后，发生短路跳闸的概率为

$$\left\{ \begin{aligned} P(A|B) &= \frac{1 - e^{-\gamma t}}{1 - \int_0^{r_{H\max}} \int_0^{\tau} f(v) f(r_H) dv dr_H} \\ \tau &= -\frac{(k - 2\xi k - m)\pi}{2.91\rho_{\text{air}}(r + r_H)} + \frac{f_2(r_H)k^2}{2.48f_1(r_H)} \\ &\sqrt{\left[ \frac{2(k - 2\xi k - m)\pi}{1.175\rho_{\text{air}}(r + r_H)f_2(r_H)k^2} \right]^2 + \frac{4.96f_1(r_H)c_{\max}^2}{f_2(r_H)k^2m}} \end{aligned} \right. \quad (25)$$

式中： $c_{\max}$  为导线不发生相间短路的最大舞动幅值， $m$ 。设导线静态相间距离为  $L_x$ ，相间最小间距为  $L_{x\min}$ ，两者都为已知量，单位都为  $m$ 。对于图 2 所示垂直排列的三相导线， $c_{\max}$  为

$$c_{\max} = L_x - L_{x\min} \quad (26)$$

对某待计算线路，其整体舞动跳闸概率由各档导线舞动跳闸概率逻辑串联而得到。

$$P_{Ls} = 1 - \prod_{i=1}^{w_s} [1 - P_i(A|B)] \quad (27)$$

式中： $i$  表示待计算线路第  $i$  档导线。

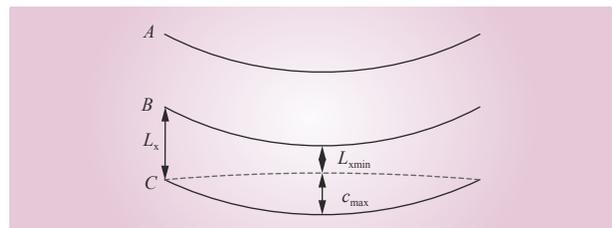


图 2 导线垂直排列示意  
Fig. 2 Schematic diagram of vertical arrangement of conductors

## 3 求解步骤

基于上述方法，本文所提出的覆冰输电线路的舞动跳闸概率计算方法流程如图 3 所示。其中覆冰风速、舞动风速与冻雨量的样本均值  $\bar{X}_n$  与样本峰度  $K_n$  为

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{X}_n &= \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_n)}{n} \\ K_n &= \frac{E(X_i - \bar{X}_n)^4}{(E(X_i - \bar{X}_n))^2} \\ E(X_i - \bar{X}_n) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n) \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right. \quad (28)$$

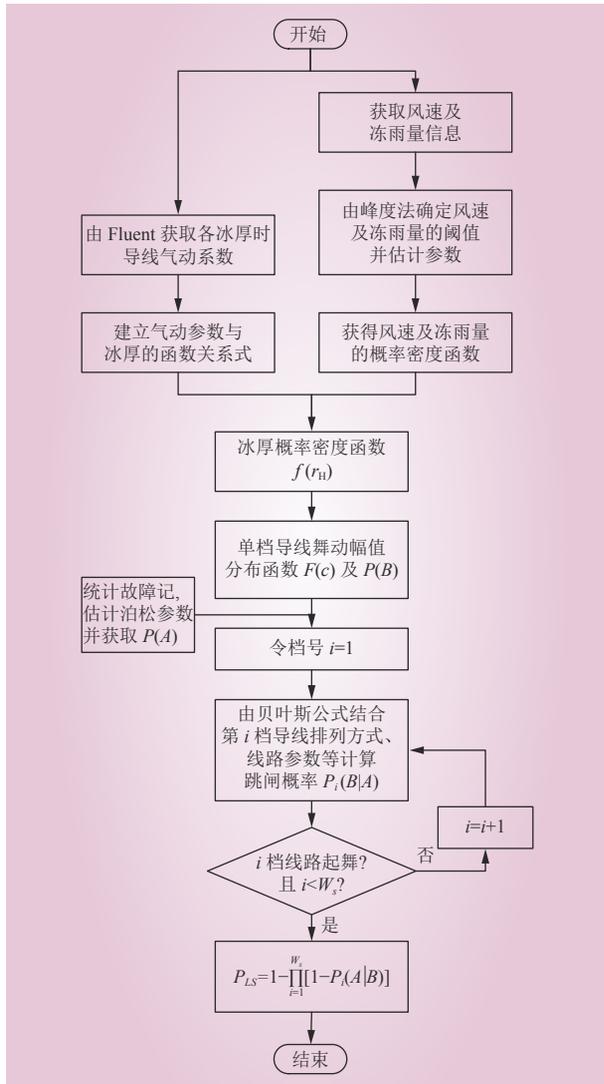


图 3 覆冰输电线路的舞动跳闸概率计算流程

Fig. 3 Calculation flowchart of galloping-caused tripping probability of iced transmission lines

式中： $X_i$  为覆冰风速、舞动风速或冻雨量的样本值。

当  $K_n \geq 3$  时，则选取使得  $|X_i - \bar{X}_n|$  值最大的  $X_i$ ，并将其从样本中除去并重新计算样本均值与峰度；当  $K_n < 3$  时转选取剩下的样本中最大的  $|X_i|$  为阈值。

需要指出的是，本文上述求解覆冰导线跳闸概率方法是以已有或预报的极端天气下风速与冻雨量样本以及历史故障记录为依据，并结合覆冰导线舞动方程而获得其最大的舞动距离幅值，而得到较为准确的舞动跳闸概率表达式（25）。文献 [17-19] 中依靠历史数据或传感器的实时监测获取线路舞动信息，因为传感器不能监测未来时段

的导线张力或加速度等，所以无法进行极端天气条件下未来一段时间内线路舞动跳闸概率的计算；而若仅以历史数据来预测未来时段的舞动信息，因没有考虑线路实际的状况而使得其准确性较差。

本文方法基于风速与冻雨量的预报信息及线路舞动方程来建立风速与冻雨量的概率密度函数，而这些信息既能通过已有的样本数据获取，也能通过未来时段的气象预报获取，并进而获得线路跳闸概率，相应克服了文献 [17-19] 方法不能进行极端天气下未来一段时间内线路舞动跳闸概率的准确计算，或计算准确差的缺点。

#### 4 算例分析

本文对 2019 年 2 月遭受冰冻天气影响的安徽宣城地区的 500 kV 线路覆冰舞动短路跳闸概率进行了计算。为了对风速与冻雨量进行广义帕累托分布拟合，收集了 2016-2019 年同时段发生冰冻灾害期间内 80 个冻雨量数据与 150 个风速数据。由峰度法获得覆冰风速、舞动风速与冻雨量的阈值  $u_v$ 、 $u_w$ 、 $u_l$  分别为 7.9、9.6、5.4。

使用 Fluent 软件对以  $r_{ice}$  为 2 mm 等距的 0~26 mm 冰厚的 D 型覆冰导线气动系数进行模拟。

图 4 中，设置右边界为速度入口边界条件，左边界为流出边界条件。完成网格划分后，将该网格文件导入 Fluent 模块中，采用适用于圆柱绕流的  $K-\omega$  湍流模型，并在导线垂直方向设置升力监测器以获取当前冰厚与风攻角的覆冰截面升力系数。通过旋转覆冰导线截面可改变风攻角，本文对导线不同冰厚时的风攻角范围均设定为  $(-60^\circ, +60^\circ)$ ，以  $10^\circ$  为增量。完成全部冰厚及风攻角的升力系数的计算后，先建立各冰厚条件

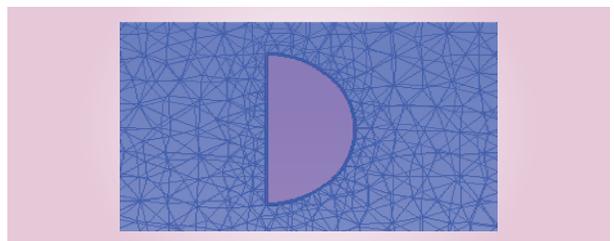


图 4 覆冰导线截面网格

Fig. 4 Cross-section gridding of iced conductor

下风攻角与升力系数的函数关系式，然后采用回归分析方法建立如式(9)所示的 $c_1$ 与 $c_2$ 的表达式。

统计2016–2018年同时段该地区500 kV总线路数和档数以及舞动跳闸事故记录，计算得到泊松分布参数 $\lambda=0.427$ ，然后由式(24)得到基于历史故障记录的输电线路覆冰舞动跳闸的概率 $P(A)=1-e^{-0.427}=0.0748$ 。

2019年2月10—11日，冻雨持续时间6 h，舞动跳闸事故发生。根据本文方法，结合气象、

线路走向等导线起舞判断因素<sup>[23-25]</sup>(如表1所示)，获取各档导线参数并由式(25)计算山沂线、官沂线、官涓线等线路的各档舞动幅值越限条件下短路跳闸概率如表2所示。

表 1 导线起舞判断因素

Table 1 Factors for judging conductor galloping

因素	气温/°C	相对湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风线夹角/(°)
起舞条件	<0	>70	>4	>45

表 2 单档导线舞动跳闸率

Table 2 The galloping-caused tripping rate of single-span conductor

山沂5366线		官沂5365线		官涓5387线		官桥5388线		永官5337线	
档号	$P(A B)$								
229-230	0.7724	209-210	0.4753	116-117	0.5563	112-113	0.8214	105-106	0.6793
230-231	0.7951	211-212	0.5637	117-118	0.6549	113-114	0.8443	106-107	0.6145
231-232	0.5794	213-214	0.7132	119-120	0.6532	114-115	0.7842	107-108	0.7369
232-233	0.7422	215-216	0.6566	120-121	0.7651	115-116	0.7736	108-109	0.5992
233-234	0.7424	216-217	0.6463	121-122	0.6725	116-117	0.8032	109-110	0.7264
234-235	0.6215	217-218	0.8351	122-123	0.5346	117-118	0.7976	110-111	0.6752
235-236	0.7863	218-219	0.7011	124-125	0.5726	118-119	0.8334	111-112	0.6935

对于不同线路，经式(25)计算得到各档线路 $P_i(A|B)$ 后，由式(27)计算得到整条线路舞动越限跳闸概率 $P_{LS}$ 。各条线路的舞动越限跳闸率与实际跳闸记录的对比如表3所示。

表 3 线路舞动跳闸率

Table 3 Galloping-caused tripping rate of transmission lines

线路名称	舞动跳闸概率	实际跳闸线路
山沂5366线	0.5015	229#-237#
官沂5365线	0.5201	209#-238#
官涓5387线	0.4976	116#-122#
官桥5388线	0.6125	112#-117#
永官5337线	0.6214	105#-107#
永山5337线	0.5525	49#-89#

由表3可知，实际跳闸的线路，基于本文方法所算得的其跳闸概率大多数超过0.5，只有官涓5387线小于0.5，但也非常接近0.5，表明本文算得的跳闸概率是比较符合实际情况的，相应也证明了本文方法的有效性。

## 5 结论

本文提出了基于舞动运动方程、气象信息及故障信息相结合的导线舞动跳闸概率计算新方法。该方法的特点包括：(1)根据牛顿定律建立了覆冰导线单自由度舞动模型，采用里茨-伽辽金方法求解舞动模型，获得了以风速与覆冰厚度为自变量的舞动幅值解析表达式。(2)由风速与冻雨量的历史样本获得风速与冻雨量的概率分布函数，基于已获得的风速与冻雨量的概率分布函数，获得与二者为函数关系的覆冰厚度的概率分布函数，并进而获得舞动幅值的概率分布函数。(3)根据覆冰舞动跳闸的历史故障记录所获得的泊松分布求得覆冰导线舞动幅值越限及短路故障的联合概率，并结合贝叶斯公式而获得舞动幅值越限条件下的覆冰导线舞动跳闸概率。

实际历史算例表明本文算得的跳闸概率与实际跳闸线路，是比较接近的。因此本文方法具有应用于实际的潜力。



## 参考文献：

- [1] 王勇, 苗虹, 莫思特, 等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(18): 178–187.  
WANG Yong, MIAO Hong, MO Site, *et al.* Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(18): 178–187.
- [2] 念路鹏, 阳林, 郝艳捧, 等. 均匀覆冰时重冰区 110 kV 直线塔关键构件的受力分析 [J]. *智慧电力*, 2020, 48(1): 15–22.  
NIAN Lupeng, YANG Lin, HAO Yanpeng, *et al.* Forces analysis on key components of 110 kV tangent tower with uniform icing in heavy icing area[J]. *Smart Power*, 2020, 48(1): 15–22.
- [3] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动 [M]. 北京: 电力工业出版社, 2002: 1–15.
- [4] 闵光云, 刘小会, 孙测世, 等. 架空输电线舞动方程建模及主共振分析 [J]. *中国电力*, 2021, 54(3): 125–131.  
MIN Guangyun, LIU Xiaohui, SUN Ceshi, *et al.* Galloping equation and primary resonance investigation of overhead transmission lines[J]. *Electric Power*, 2021, 54(3): 125–131.
- [5] 周坤涛, 郝淑英, 刘君, 等. 覆冰输电线结构及载荷对舞动的影响 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(1): 116–120.  
ZHOU Kuntao, HAO Shuying, LIU Jun, *et al.* Influence of conductor structure and loads on galloping of a transmission line[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(1): 116–120.
- [6] DENHARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. *Electrical Engineering*, 1932, 51(6): 413.
- [7] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping-part II torsional mechanism[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, PAS-100(2): 708–720.
- [8] YU P, SHAH A H, POPPLEWELL N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1992, 59(1): 140–145.
- [9] 莫海枢. 覆冰导线舞动分析的增量谐波平衡法应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
MO Haishu. Incremental harmonic balance method for galloping of iced conductor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [10] 姜雄. 覆冰输电线舞动特性矩阵摄动法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
JIANG Xiong. Application of matrix perturbation method on galloping characteristic analysis of iced bundle conductor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [11] 刘亚坤, 李林锐, 李世龙, 等. 架空输电线路的舞动幅值分析与试验研究 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(6): 825–830.  
LIU Yakun, LI Linrui, LI Shilong, *et al.* Analysis and experiment on galloping amplitude of transmission lines[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(6): 825–830.
- [12] 孙珍茂, 楼文娟. 覆冰输电导线舞动非线性有限元分析 [J]. *电网技术*, 2010, 34(12): 214–218.  
SUN Zhenmao, LOU Wenjuan. Nonlinear finite element analysis on galloping of ice-coated transmission line[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(12): 214–218.
- [13] DESAI Y M, YU P, POPPLEWELL N, *et al.* Finite element modelling of transmission line galloping[J]. *Computers & Structures*, 1995, 57(3): 407–420.
- [14] 张海峰. 输电线路舞动有限元分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
ZHANG Haifeng. Finite element analysis of transmission line galloping[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [15] 刘小会, 严波, 张宏雁, 等. 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 Xiaohui, YAN Bo, ZHANG Hongyan, *et al.* Nonlinear numerical simulation method for galloping of iced conductor[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, 30(4): 457–468.
- [16] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
WANG Jian. Research on meteorological disaster risk analysis and fault early warning methods for overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [17] 阳林, 郝艳捧, 李立涅. 一种架空输电线路舞动预警方法: CN102095449A[P]. 2011-06-15.  
YANG Lin, HAO Yanpeng, LI Lizheng. Method for alarming dancing of overhead transmission circuit: CN102095449A[P]. 2011-06-15.
- [18] 国网湖南省电力公司, 国网湖南省电力公司防灾减灾中心, 湖南省湘电试研技术有限公司, 等. 一种电网线路舞动发生预测方法和系统: CN201710640834.2[P]. 2017-12-05.
- [19] 安康, 林莘, 徐建源, 等. 一种架空输电线路舞动的监测方法: CN107044884A[P]. 2017-08-15.  
AN Kang, LIN Shen, XU Jianyuan, *et al.* Monitoring method for overhead transmission line galloping: CN107044884A[P]. 2017-08-15.
- [20] 周纪仰, 朱因远. 非线性振动 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 1–15.
- [21] 徐文军. 冰风暴灾害下输电线路故障概率预测及应急对策研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.  
XU Wenjun. Forecasting for failure probability and research on emergency strategy of transmission lines in ice storm[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011.



[22] 王乐, 杨帅, 朱时阳, 等. 基于泊松分布的输电线路跳闸概率预测方法 [J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3777-3783.  
WANG Le, YANG Shuai, ZHU Shiyang, *et al.* Prediction method of transmission line trip probability based on Poisson distribution[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3777-3783.

[23] 王津宇, 李哲, 刘善峰, 等. 基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警方法 [J]. 高压电器, 2019, 55(9): 194-199.  
WANG Jinyu, LI Zhe, LIU Shanfeng, *et al.* Early warning method of iced transmission line galloping based on risk coefficient[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 194-199.

[24] 孙求国, 聂一雄, 王星华. 输电线路舞动在线监测预警判据的研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(2): 52-56.  
SUN Qiuguo, NIE Yixiong, WANG Xinghua. Research on the warning criterions of transmission line galloping on-line monitoring system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(2): 52-56.

[25] 夏令志, 程洋, 严波, 等. 2018 年 1 月安徽电网输电线路覆冰舞动

故障规律分析 [J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2019, 24(1): 73-77.  
XIA Lingzhi, CHENG Yang, YAN Bo, *et al.* Analysis of faults of icing and galloping of transmission lines in Anhui power grid in January of 2018[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2019, 24(1): 73-77.

作者简介:

刘辉 (1978—), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度运行控制技术研究, E-mail: relayliu@163.com;

马增泰 (1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事极端天气下电网运行风险预警研究, E-mail: 809684752@qq.com;

林济铿 (1967—), 男, 博士, 教授, 从事智能电网、配网自动化、电力系统稳定性分析及控制等研究, E-mail: mejklin@126.com。

(责任编辑 张重实)

## A New Method for Calculation of Transmission Line Tripping Probability Caused by Galloping of Iced Overhead Conductor

LIU Hui<sup>1</sup>, MA Zengtai<sup>2</sup>, LIN Jikeng<sup>2</sup>, TIAN Hongqiang<sup>1</sup>, YAN Bo<sup>1</sup>, ZUO Chenliang<sup>3</sup>

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Anhui Jiyuan Software Company, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The galloping of iced conductors seriously threatens the safety and stability of power systems, so it has become a focus for research to accurately calculate the transmission line tripping probability caused by the galloping of iced conductors. A new tripping probability calculation method is proposed based on the galloping equation, meteorological information and fault information. Firstly, the probability distribution functions of wind speed and frozen rainfall are obtained using their respective historical samples; next, a single-degree-of-freedom galloping model of iced conductors is built according to the Newton law; and then, the Ritz-galerkin method is utilized to solve the galloping model to acquire the analytical expression of the galloping amplitude with the wind speed and icing thickness as independent variables; furthermore, the probability distribution function of icing thickness, which is the function of wind speed and frozen rainfall, is calculated using the probability distribution functions of wind speed and frozen rainfall, and then the probability distribution function of galloping amplitude is also calculated; finally, according to the Poisson distribution obtained by the historical fault records of galloping-caused tripping, the joint probability for the over-limit of galloping amplitude and the short-circuit fault is obtained, and the galloping-caused tripping probability of iced conductors is calculated using the Bayesian formula under the condition of over-limit of galloping amplitude. Case study has proved the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177107) and Science & Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (No.52120018004Q).

**Keywords:** iced conductor; tripping probability; single-degree-of-freedom galloping model; wind speed; frozen rainfall; icing thickness