

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.006

# 不均匀覆冰输电导线舞动精细化分析

浦玉学<sup>1</sup>, 古妍<sup>1</sup>, 郑哲<sup>2</sup>, 施成琰<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 固力发电气有限公司, 安徽 合肥 230011)

**摘要:**针对不均匀覆冰输电导线力学特性以及舞动分析难题,文章以单档距不均匀覆冰输电导线为研究对象,建立输电线路不均匀覆冰物理模型,推导不均匀覆冰导线初始形状函数和空气动力系数修正公式,基于 ANSYS 给出不均匀覆冰精细化分析流程,并对 4 种典型不均匀覆冰工况下的导线进行力学特性分析、初始找形以及舞动分析仿真实验。结果表明:相较于等效均匀覆冰模型,采用该文提出的不均匀覆冰输电线路舞动精细化分析方法,导线初始位形准确度可提高近 10%,舞动分析精度最大提高 25%。

**关键词:**不均匀覆冰导线;精细化分析;输电导线;舞动分析

**中图分类号:** TM751; O323

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-5060(2025)06-0750-08

## Refined galloping analysis of non-uniformly iced transmission lines

PU Yuxue<sup>1</sup>, GU Yan<sup>1</sup>, ZHENG Zhe<sup>2</sup>, SHI Chengyan<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Gulifa Electric Co., Ltd., Hefei 230011, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of mechanical properties and galloping analysis of non-uniformly iced transmission lines, this paper takes the single-span non-uniformly iced transmission lines as the research object, establishes the physical model of non-uniformly iced transmission lines, and derives the initial shape function and aerodynamic coefficient correction formula of non-uniformly iced transmission lines. Based on ANSYS, the refined analysis process of non-uniformly iced transmission lines is given, and the dynamic characteristics analysis, initial form-finding and galloping analysis simulation tests of transmission lines under four typical non-uniform icing conditions were carried out. The results show that compared with the equivalent uniform icing model, the accuracy of the initial shape of transmission lines can be improved by nearly 10% and the accuracy of galloping analysis can be improved by up to 25% by using the refined galloping analysis method of transmission lines with non-uniform icing proposed in this paper.

**Key words:** non-uniformly iced transmission lines; refined analysis; transmission lines; galloping analysis

随着我国经济快速发展,工业生产和居民生活对电能的需求量日益增长,大跨度、长距离输电工程愈发普遍。在极端条件下,覆冰输电导线在风荷载作用下极易发生低频、大振幅的自激舞动现象,这种舞动现象是输电线路破坏的重要因素,也是当今电力科学领域研究的难点、热点问题<sup>[1]</sup>。

导线覆冰规律的研究方法主要包括解析分析法和有限元分析法。解析分析法主要是基于理论

分析和计算模拟,但存在模型简化、计算复杂度高和理论推导难度大等缺点。相较于解析分析法,有限元分析法具有精度高、适用范围广、灵活性强等优点,有限元法可以采用高阶元素和细分网格,从而提高求解精度。文献[2]基于有限元仿真分析方法,开展了不同覆冰状态输电塔-线体系力学特性研究,揭示了不同覆冰状态对输电塔-线体系力学特性的影响;文献[3]采用 Newmark- $\beta$  法结

收稿日期:2023-06-08;修回日期:2023-11-10

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME129);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2022JSKF0049)

作者简介:浦玉学(1987—),男,安徽蚌埠人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

合 Newton-Raphson 迭代求解覆冰导线舞动运动方程,并提出了有效的求解算法;文献[4]基于有限元程序 ANSYS 建立输电塔-线耦合模型,并进行隐式分析,对 5 大跨越工程进行输电塔-线体系的风振计算,并对风振的控制进行研究,最后提出了合理的控制方案;文献[5]针对输电线路覆冰导线的舞动问题,在 MATLAB 仿真软件中对等效覆冰模型进行了非线性数值求解和数值模拟分析,模拟结果与实测结果相符,为输电线路覆冰导线舞动机理的研究提供了参考。

虽然目前已有大量文献围绕覆冰导线机理、分析方法进行了研究,且取得了丰富的成果,但针对不均匀覆冰状态下的输电线路力学特性以及舞动分析的研究相对较少。目前大多不均匀覆冰导线舞动研究均采用等效均匀覆冰模型进行分析,如常用的称重法<sup>[6]</sup>是通过拉力传感器监测覆冰前、后导线拉力,推导输电线路等值覆冰厚度大小。等效模型分析方法可以极大简化分析过程,降低计算量,在一定程度上可以满足工程精度的要求;但在进行覆冰导线舞动分析时,档距内不均匀覆冰情况对导线的初始形状具有重要影响。通常最大垂度位置易受覆冰不均匀状况影响,而采用等效均匀覆冰模型时,最大垂度只受高差影响,对于等高差线路,最大垂度位于正中位置,明显与实际不符。

进一步研究发现,覆冰会使导线的表面积和粗糙度增加,相应的气动力也会增加,不均匀覆冰情况会导致导线空气动力系数存在显著差异,而确定覆冰导线气动荷载系数是进行舞动研究的前提。目前国内外研究主要是通过试验测试或流体软件仿真计算的方法测得不同覆冰形状导线气动系数。文献[7]通过风洞试验对新月形覆冰导线气动特性进行测试,获得随风攻角的变化升力、阻力以及扭转荷载曲线,为覆冰导线的舞动研究提供必要的参数;文献[8]基于流体动力学仿真软件 Fluent 进行二次开发,计算了新月形覆冰导线在横向振动下的气动系数,并将静态模拟结果与试验结果进行比较。以上研究均是对特定冰型、特定冰厚的覆冰导线进行气动系数测试分析。

由于试验条件、成本等问题,对于任意厚度覆冰导线气动系数的测试无法做到全覆盖,而丰富覆冰导线在不同覆冰形状和不同覆冰厚度下的气动特性数据对于导线舞动精细化分析是非常必要的。因此,本文以单档距不均匀覆冰输电导线为研究对象,建立输电线路不均匀覆冰物理模型,推导不均匀覆冰导线初始形状函数,并基于实测数

据提出气动系数随覆冰厚度变化的修正公式,可以实现任意厚度覆冰导线气动系数的获取;基于 ANSYS 构建不均匀覆冰导线精细化分析计算流程;最后进行仿真实验,对不均匀覆冰导线动力学特性、初始构型以及舞动情况进行分析,为输电线路的精细化分析提供技术支持。

## 1 不均匀覆冰导线舞动方程

首先建立单档距等高差覆冰导线舞动方程。忽略导线长度方向的平动,舞动方向为垂直方向、水平方向和扭转方向。横向风荷载作用于  $yOz$  平面,引起的水平位移为  $y(x,t)$ 、垂直风向的位移为  $z(x,t)$ 、扭转位移为  $\theta(x,t)$ ,即位移向量为  $\mathbf{S}=(y,z,\theta)$ 。

基于拉格朗日原理建立包括垂直、水平和扭转的三自由度的舞动运动方程<sup>[9]</sup>,即

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{S}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{S}} + \mathbf{K}(t)\mathbf{S} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\mathbf{K}(t)$ 为刚度矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为导线上的风荷载向量。

覆冰导线模型如图 1a 所示,依照流体力学理论,单位长度的新月型覆冰导线在流体作用下所受到的外载荷如图 1b 所示。

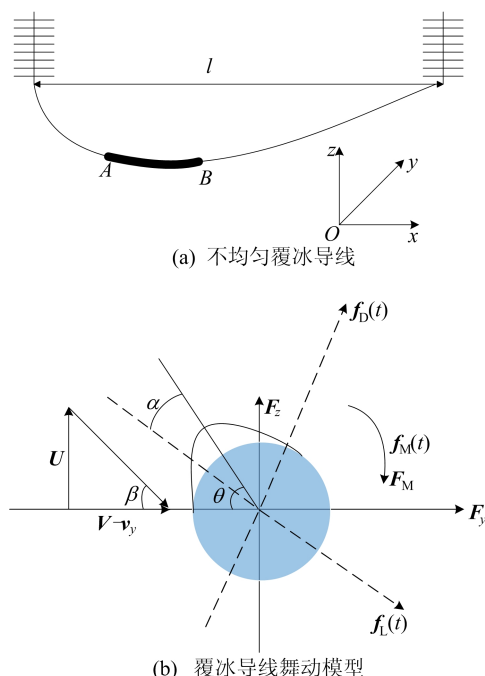


图 1 不均匀覆冰物理模型

图 1a 中: $l$ 为档距;铰支端作为连接,导线上覆冰不均匀。

图 1b 中: $f_D(t)$ 为覆冰导线舞动时实际所受气动升力; $f_L(t)$ 为气动阻力; $f_M(t)$ 为气动扭矩;

$F_z$  为转化到垂直方向的气动升力;  $F_y$  为转化到水平方向的气动阻力;  $F_M$  为轴向气动扭矩;  $V$  为风速;  $U = v_z + 0.5D\dot{\theta}$ ,  $D$  为导线直径;  $\beta$  为不考虑扭转的风攻角;  $\alpha$  为考虑扭转角度的覆冰导线风攻角。  $\alpha$  的计算公式为:

$$\alpha = \theta - \arctan \beta = \theta - \arctan \frac{v_z + 0.5D\dot{\theta}}{V - v_y} \quad (2)$$

对于导线舞动分析,首先要确定风荷载。根据贝努利方程,导线在  $t$  时刻的风荷载  $f(t)$  的表达式为:

$$\begin{aligned} f_D(t) &= \frac{1}{2}\rho DV^2 C_D(\alpha), \\ f_L(t) &= \frac{1}{2}\rho DV^2 C_L(\alpha), \\ f_M(t) &= \frac{1}{2}\rho DV^2 C_M(\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $\rho$  为空气密度;  $C_D(t)$ 、 $C_L(t)$ 、 $C_M(t)$  分别为升力系数、阻力系数和扭转系数。

根据导线升力系数、阻力系数和扭转系数可以得到单位长度导线在水平方向、垂直方向的气动力系数表达式,即

$$\begin{bmatrix} C_y(x,t) \\ C_z(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_L(x,t) \\ C_D(x,t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

进而得到水平方向、垂直方向以及扭转方向的气动荷载为:

$$\mathbf{F}(x,t) = \begin{bmatrix} F_y \\ F_z \\ F_M \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\rho DV^2 \begin{bmatrix} C_y(x,t) \\ C_z(x,t) \\ C_M(x,t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于覆冰导线在风荷载作用下发生的扭转运动时刻改变着风攻角的大小,引起导线不均匀覆冰形状改变,进而引起气动荷载系数变化。

### 1.1 不均匀覆冰导线初始垂度计算

输电线路导线是一种典型的悬索结构。悬索结构在张拉前处于松弛状态,在外荷载作用下可以产生较大位移,因此若不对悬索结构进行找形,则无法准确分析计算其加载后的结果。通过找形,可以赋予悬索结构在初始状态下的应力和位移,确定悬索结构的初始位置,从而为覆冰导线舞动分析计算提供精确的初始条件。

#### 1.1.1 无覆冰情况

建立等高差输电线路的初始模型,如图 2 所示。

基于导线连续性解析法,通过截取结构中的微元部分建立力的平衡和变形方程式,对微元积分得出结构的总体曲线方程,经分析得到任意位置处垂度函数<sup>[10]</sup>为:

$$f(x) = \frac{2\sigma_0}{\gamma_0} \sinh \frac{\gamma_0 x}{2\sigma_0} \sinh \frac{\gamma_0(l-x_c)}{2\sigma_0} \quad (6)$$

其中:  $l$  为档距;  $\sigma_0$  为导线水平应力;  $\gamma$  为输电线自重比载,  $\gamma_0 = P_0/A = m_0 g/A$ ,  $m_0$  为导线的单位长度质量。

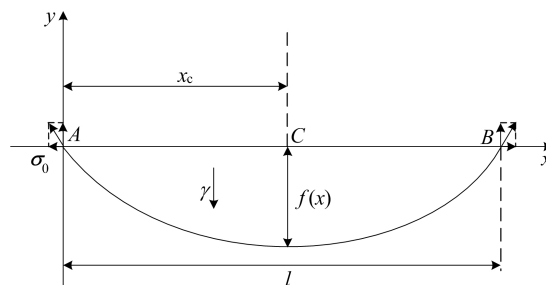


图 2 等高差输电线路初始模型

#### 1.1.2 不均匀覆冰情况

在覆冰后,导线上的比载并非只有导线自重,还会有覆冰的重量。在覆冰前,导线自重单位荷载为  $P_0$ 。一般情况下,为了便于通过解析法得到线路参数,根据覆冰总重量相等原则,将不均匀覆冰情况转化为均匀覆冰(等效处理)来求解,则覆冰后导线的单位荷载为:

$$P_{ice} = 0.028b(b+D) \quad (7)$$

其中,  $b$  为等效覆冰厚度。

等高差输电线路等效处理后的导线最大弧垂位于线路档距中央位置,而实际上不均匀覆冰使得档距内导线比载不再为常数,等效处理得到的垂度曲线与实际覆冰模型的垂度曲线差距较大。因此,研究不均匀覆冰模型的垂度函数十分必要。

因为覆冰厚度不再为等效恒值,实际为随导线长度方向变化的函数,所以将不均匀覆冰单位荷载修正为随覆冰厚度变化的分布函数,即

$$P_{ice}(x) = 0.028b(x)[b(x)+D] \quad (8)$$

其中,  $b(x)$  为覆冰厚度函数。

不均匀覆冰状态下导线比载计算公式为:

$$\gamma(x) = \frac{P_0 + P_{ice}(x)}{A_{eq}(x)} \quad (9)$$

不均匀覆冰后导线水平应力发生变化,水平应力表达式<sup>[11]</sup>为:

$$\sigma_1 = \sigma_0 - \frac{E\gamma_0^2 l^2}{24\sigma_0^2} + \frac{E\gamma(x)^2 l^2}{24\sigma_1^2} - aE(t_1 - t_0) \quad (10)$$

其中:  $E$ 、 $a$  分别为导线综合弹性系数和温度膨胀系数;  $t_0$ 、 $t_1$  分别为覆冰前、后导线温度。

经上述分析可得覆冰后任意处垂度函数为:

$$f(x) = \frac{2\sigma_1}{\gamma(x)} \sinh \frac{\gamma(x)x}{2\sigma_1} \sinh \frac{\gamma(x)(l-x)}{2\sigma_1} \quad (11)$$

### 1.2 不均匀覆冰导线气动系数

根据上文所述,不均匀覆冰形状尤其是厚度的差异对导线气动系数的影响较大,因此本节重点分析不均匀覆冰情况下气动系数的计算。

在文献[12]中,针对 10、15、21 mm 3 种冰厚的覆冰导线进行实验,所得实验数据如图 3 所示。由于实际不均匀覆冰的冰厚情况非常复杂,将所有不同冰厚的气动系数进行实验测定是不现实的。因此,本文基于数据拟合的方法对连续覆冰厚度的气动系数进行修正计算,具体步骤如下。

1) 采用多项式逼近法对由实验或流体力学软件模拟得到的气动系数值进行拟合,得到升力系数  $C_D'(\alpha)$ 、阻力系数  $C_L'(\alpha)$  和扭矩系数  $C_M'(\alpha)$  连续函数曲线,从而准确地拟合气动系数曲线的局部波动。以阻力系数为例,为了方便得出气动系数,通过 10 次多项式拟合出 3 组实测的阻力系数曲线。

2) 根据有限组实测气动系数数据,利用指数函数逼近气动系数随覆冰厚度的变化规律,得到的修正公式为:

$$f_n(h) = a e^{k(h-h_0)} \quad (12)$$

其中: $n=D, L, M$ ;  $a, k$  为常值系数,由 3 组实测系数数据逼近得到。

3) 考虑到气动系数随冰厚变化的差异性,通过覆冰厚度规律函数、实测的气动系数和下式计算得到不同覆冰厚度下的气动系数函数,即

$$\begin{cases} C_{Di} = C_{Di_0} \{ [f_{Di}(x) - f_{Dj}(x)] f_D(h) + 1 \}, \\ C_{Li} = C_{Li_0} \{ [f_{Li}(x) - f_{Lj}(x)] f_L(h) + 1 \}, \\ C_{Mi} = C_{Mi_0} \{ [f_{Mi}(x) - f_{Mj}(x)] f_M(h) + 1 \} \end{cases} \quad (13)$$

其中: $h$  为覆冰厚度; $h_0$  为实测数据对应的覆冰厚度; $i$  为实测数据组编号; $j$  为计算数据组编号。

利用上述修正公式作出 10、15、21 mm 3 种冰厚的覆冰导线气动力系数拟合曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,10、15、21 mm 3 种冰厚的覆冰导线气动系数拟合误差分别为 0.479%、0.739%、0.556%,可见采用修正公式可以对未测的冰厚气动系数进行近似计算,估计值计算精度满足要求。

利用修正公式对冰厚为 11~14 mm、16~20 mm 之间的覆冰导线气动系数进行拟合计算,拟合曲线如图 4 所示。这一结果为精细化分析打

下了一定的基础。

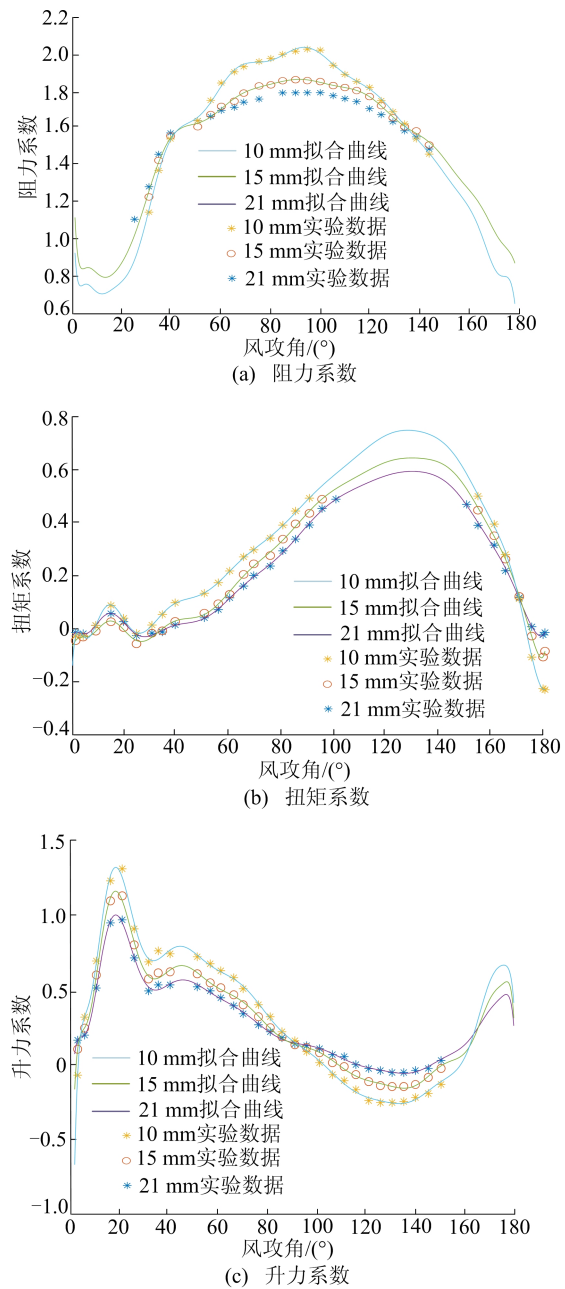
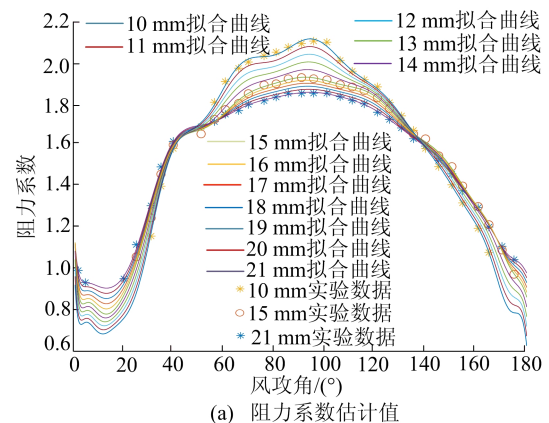


图 3 文献[12]实测气动系数及其本文拟合曲线



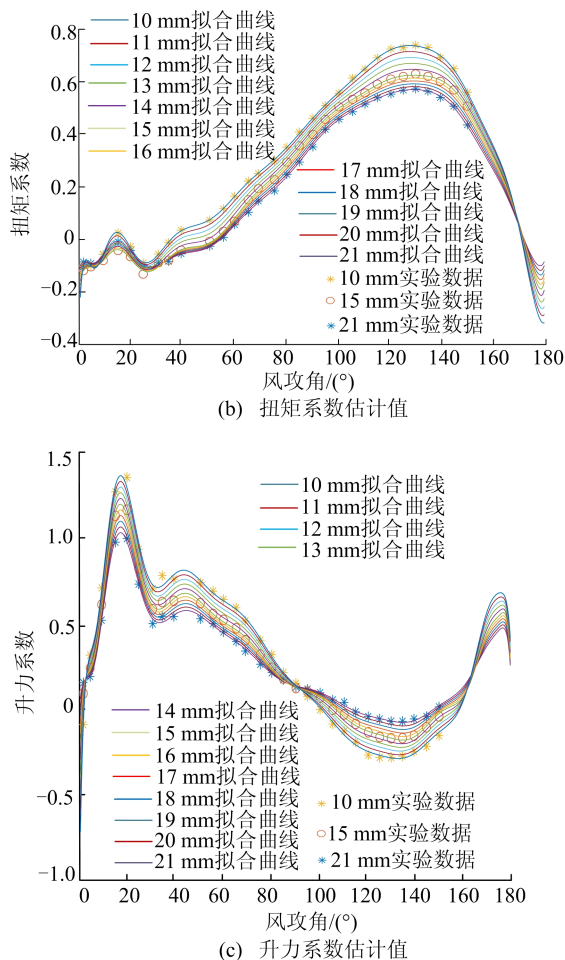


图 4 不同覆冰厚度导线气动系数的拟合曲线

## 2 不均匀覆冰导线舞动分析

### 2.1 输电线路有限元建模

以某 220 kV 高压转角输电塔为例,建立两塔-线体系有限元模型。输电塔高为 40 m,档距为 400 m,抗风设计条件为 10 m 高处的风速是 28 m/s。

输电塔为角钢塔,角钢材料型号有 2 种,即主材构件采用 Q345 型钢,斜材构件采用 Q235B 型钢。具体杆塔材料的物理力学性能<sup>[13]</sup>见表 1 所列。

表 1 输电塔材料的物理力学性能

钢种	厚度/ mm	抗拉、压、弯 曲强度/MPa	弹性模量/ (10 <sup>3</sup> MPa)	泊松 比	密度/ (10 <sup>3</sup> kg/m)
Q235B	<16	215~205	2.06	0.3	7.8
	16~40				
Q345	<16	310~295	2.06	0.3	7.8
	16~40				

线路中导线型号为 4XLGJ-400/50,导线在自重下的初始张力为 45.6 kN。导线的物理几何参数见表 2 所列。

表 2 导线的物理几何参数

型号	弹性模量/ MPa	截面积/ mm <sup>2</sup>	线质量/ (kg/m)	直径/ mm
4XLGJ-400/50	70 000	451.55	1.511	27.63

1) 耐张塔建模<sup>[14]</sup>。作为典型的框架结构,输电塔采用螺栓连接各杆件。模型划分为 2 850 个空间梁单元和 378 个桁架单元。根据杆件的截面形状,可以选择不同的有限单元类型进行模拟。本文采用 beam189 单元模拟主材与主材之间的连接,采用 Link8 单元模拟辅材与主材之间的连接。

2) 导线建模<sup>[15]</sup>。对于导线的建模,需要考虑导线的材料、截面形状、档距、张力等因素<sup>[14]</sup>。采用 beam188 单元模拟导线,并对  $y$  向扭转和  $z$  向扭转的自由度进行限制,以达到模拟真实导线的目的。

在建立完所有构件后,需要根据输入的定位和旋转参数,将所有部件进行组装,以得到输电塔-线体系整体结构模型。

### 2.2 建模计算流程

采用 ANSYS 对不均匀覆冰输电线路进行舞动仿真分析,在迭代计算过程<sup>[16]</sup>中,需要在上一步进入后处理,得到导线速度等结果,并计算得到下一步的气动力,因此需采用多次重启技术进行舞动分析。

具体计算步骤如下:

1) 利用式(11)计算不均匀覆冰后垂度函数,得到导线初始构型;

2) 根据上一循环中式(2)计算得到风攻角,并利用式(13)确定导线  $t_0$  时刻的初始气动力系数;

3) 由式(3)计算各节点局部气动力,并通过式(5)计算得到水平、垂直以及扭转 3 个方向的气动荷载;

4) 对输电塔-线体系施加荷载  $F(s, t_0)$  并进行瞬态分析计算,计算完成后进入后处理模块,提取导线速度  $v_z, v_y, \dot{\theta}$ ;

5) 按照式(2)计算导线  $t_0 + \Delta t$  时刻的风攻角  $\alpha(t)$ ;

6) 返回步骤 2),反复循环直至计算结果稳定或达到总的计算时间。

### 3 不均匀覆冰导线仿真实验分析

为明确不均匀覆冰对单档距线路舞动特性的影响,首先对覆冰导线进行初始构型分析和动力学分析;其次在有限元软件中设置单档距为 400 m、等高差、型号为 4XLGJ-400/50 的导线,并根据初应力和初始张力设置自重不覆冰 W 工况和等效覆冰 O 工况;为了更清晰地对比,在导线上每间隔 80 m 添加不同厚度的新月型覆冰,得到 A、B、C、D 工况。各工况不均匀覆冰厚度数据见表 3 所列。

表 3 各工况不均匀覆冰厚度 单位:mm

工况	导线长度/m				
	0~<80	80~<160	160~<240	240~<320	320~400
O	10	10	10	10	10
A	8	10	12	14	16
B	7	10	16	10	7
C	16	10	8	10	16
D	8	13	8	13	8

#### 3.1 初始构型分析

在使用有限元软件进行模态分析前,需要对导线初始时刻进行找形。利用本文修正的不均匀覆冰找形公式对 O、A、B、C、D 这 5 个工况进行初始找形,每个工况选取导线上 10 个典型节点得出不均匀覆冰厚度的初始形状,统计结果见表 4 所列。

表 4 中,误差是 A、B、C、D 4 个工况的平均值与 O 工况数值的误差百分比。从表 4 可以看出,最大误差为 9.3%,最小误差为 0.5%。

表 4 不均匀覆冰厚度初始形状结果统计 单位:mm

节点	工况					误差/%
	O	A	B	C	D	
1	4.690	4.820	4.660	4.780	4.670	0.9
2	2.690	2.790	2.590	2.810	2.670	0.9
3	1.250	1.370	1.210	1.330	1.220	2.6
4	0.350	0.450	0.250	0.500	0.330	9.3
5	0.040	0.038	0.037	0.035	0.031	1.9
7	0.970	1.010	0.810	1.150	0.970	1.5
8	2.280	2.190	2.130	2.470	2.280	0.5
9	4.140	3.970	3.980	4.320	4.140	0.9
10	6.560	6.560	6.560	6.560	6.560	0

将 z 轴坐标值放大 100 倍可得不均匀覆冰厚度工况的初始找形结果,如图 5 所示。

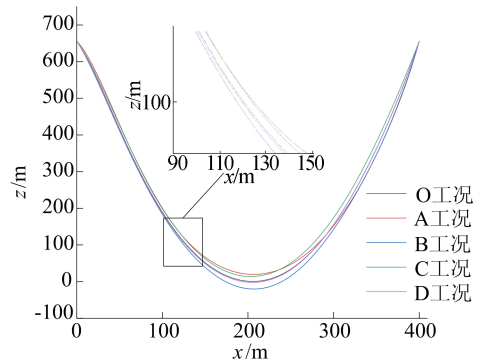


图 5 不均匀覆冰厚度工况初始找形结果

#### 3.2 动力学特性分析

对 5 种工况下的导线进行固有频率分析,结果见表 5 所列。

从表 5 可以看出,不均匀覆冰各种工况下的前 3 阶固有频率有明显差异。这说明采用覆冰等效厚度计算会引起不同程度的误差,进而影响导线的舞动形态。

表 5 不同覆冰工况固有频率 单位:Hz

工况	一阶频率	二阶频率	三阶频率
O	0.212 17	0.298 95	0.423 99
A	0.212 02	0.298 56	0.424 05
B	0.200 93	0.286 47	0.430 21
C	0.223 90	0.310 66	0.426 66
D	0.208 49	0.295 89	0.409 98

#### 3.3 舞动分析

在风攻角和风速等气象条件相同的情况下,对比等效均匀覆冰模型(即 O 工况)与不均匀覆冰 A 工况的舞动计算结果,以验证本文精细化算法的有效性。

##### 3.3.1 算例 1

设置初始风攻角为 110°,横向风速为 17 m/s,等效覆冰 O 工况和不均匀覆冰 A 工况舞动分析结果如图 6 所示。

由图 6 可知 2 种工况均发生舞动。取跨中节点时程曲线对比发现:O 工况跨中节点竖直方向位移幅度达到 4.0 m,而 A 工况跨中节点竖直方向位移幅度为 3.0 m 左右;O 工况跨中节点运动轨迹接近规则的椭圆形状(图 6c),而 A 工况运动轨迹不规则(图 6d),与等效均匀覆冰模型的舞动轨迹有明显差异。

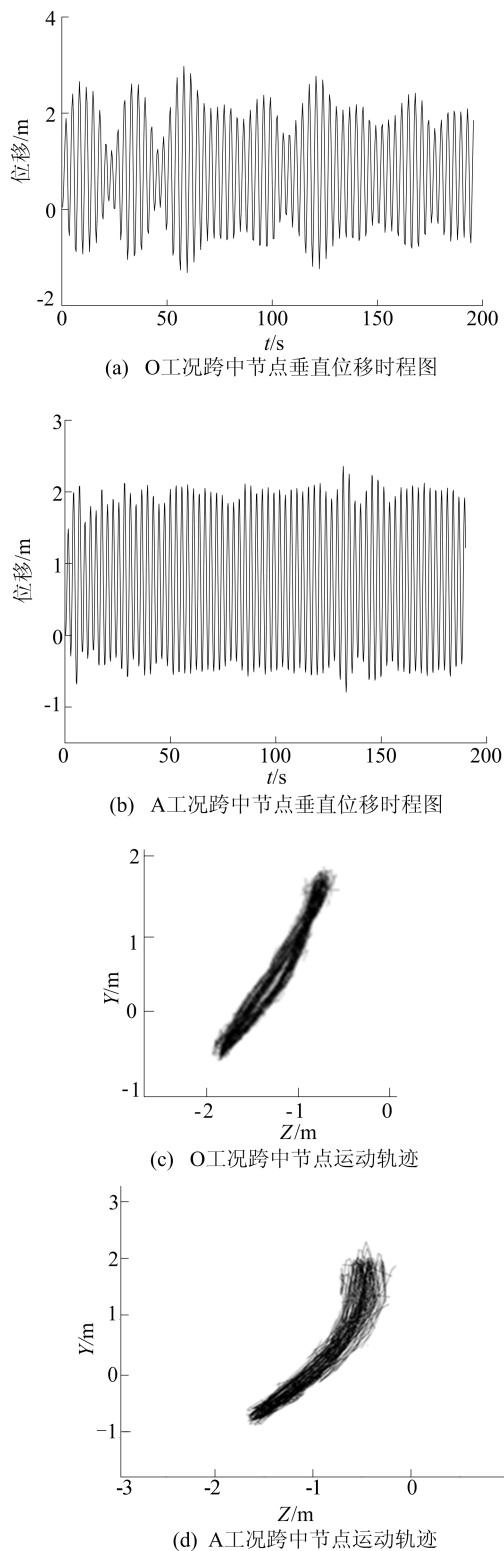


图 6 算例 1 O 工况、A 工况跨中节点时程图和轨迹图

3.3.2 算例 2

设置初始风攻角为  $110^\circ$ 、横向风速为  $12 \text{ m/s}$ ，O 工况和 A 工况舞动分析结果如图 7 所示。

由图 7 可知，A 工况几乎没有发生舞动现象，而 O 工况出现较大幅度的舞动。取跨中节点时程曲线对比发现：O 工况跨中节点垂直方向位移

幅度为  $2.6 \text{ m}$  左右；O 工况跨中节点运动轨迹比较规则(图 7c)，而 A 工况垂直方向位移很快衰减(图 7d)，并未发生舞动现象。

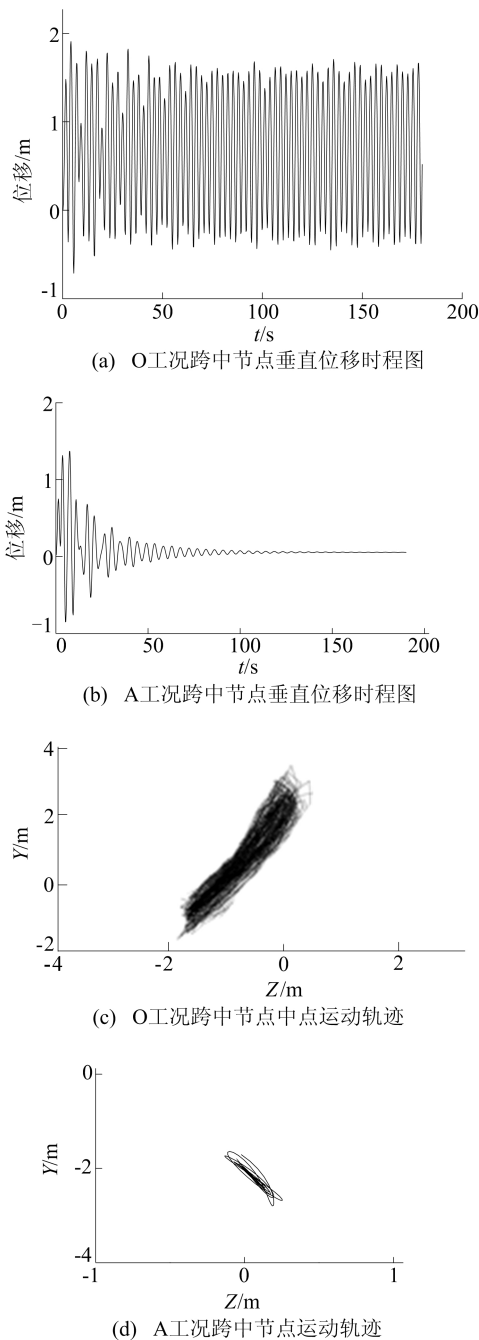


图 7 算例 2 O 工况、A 工况跨中节点时程图和轨迹图

分析结果表明，采用等效均匀覆冰模型进行不均匀覆冰导线舞动分析时，在某些气象条件下会引起很大误差。

4 结 论

本文以单档距不均匀覆冰输电导线为研究对  
(下转第 790 页)

- 进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 383-394.
- [3] NASROLLAHZADEH A, MOKHTARE S, KHOMEIRI M, et al. Antifungal preservation of food by Lactic Acid Bacteria[J]. Foods, 2022, 11(3): 395-413.
- [4] YU H S, JANG H J, LEE N K, et al. Evaluation of the probiotic characteristics and prophylactic potential of *Weissella cibaria* strains isolated from kimchi[J]. LWT-Food Science Technology, 2019, 112: 108229.
- [5] 刘长蕾, 文字萍, 李冠洋, 等. 魏斯氏菌的研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 227-233.
- [6] MADHU K, RAKSHAK K, DHARAM S, et al. Physiological and genomic characterization of an exopolysaccharide-producing *Weissella cibaria* CH2 from cheese of the western himalayas[J]. Food Bioscience, 2020, 35: 100570.
- [7] YU H S, LEE N K, PAIK H D, et al. Antagonistic and antioxidant effect of probiotic *Weissella cibaria* JW15 [J]. Food Sci Biotechnol, 2019, 28(3): 851-855.
- [8] KANG M S, PARK G Y. *In vitro* inactivation of respiratory viruses and rotavirus by the oral probiotic strain *Weissella cibaria* CMS1 [J]. Probiotics Antimicrob Proteins, 2022, 14(4): 760-766.
- [9] KANG M S, YEU J E, HONG S P. Safety evaluation of oral care probiotics *Weissella cibaria* CMU and CMS1 by phenotypic and genotypic analysis [J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(11): 2693.
- [10] LEE K W, SHIM J M, PARK S K, et al. Isolation of Lactic Acid Bacteria with probiotic potentials from kimchi, traditional Korean fermented vegetable[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 130-137.
- [11] YAO D, WANG X Y, MA L X, et al. Impact of *Weissella cibaria* BYLA. 2 and its supernatants on *Penicillium chrysogenum* metabolism[J]. Front Microbiol, 2022, 13: 983613.
- [12] MAO Y, ZHANG X J, XU Z H. Identification of antibacterial substances of *Lactobacillus plantarum* DY-6 for bacteriostatic action[J]. Food Science Nutrition, 2020, 8(6): 2854-2863.
- [13] JAYAKUMAR V, RAMESH S A, VISWANATHAN R. Biocontrol of *Colletotrichum falcatum* with volatile metabolites produced by endophytic bacteria and profiling VOCs by headspace SPME coupled with GC-MS[J]. Sugar Tech, 2020, 23(1): 94-107.

(责任编辑 闫杏丽)

## (上接第 756 页)

象, 推导不均匀覆冰导线初始形状函数和空气动力系数修正公式, 并基于 ANSYS 给出不均匀覆冰精细化分析流程。对不同的典型不均匀覆冰工况下的导线进行动力学特性分析、初始找形和舞动分析, 结论如下:

1) 采用等效均匀覆冰模型进行不均匀覆冰导线舞动分析时, 在某些气象条件下会引起较大误差。以算例 1 为例, 在相同的气象条件下, 最大位移幅值的误差约为 25%。

2) 采用本文提出的不均匀覆冰输电线路舞动精细化分析方法, 可以有效提高导线初始位形准确度和舞动分析精度。

## [参 考 文 献]

- [1] 王金锁, 刘美瑶, 岳华刚, 等. 不同覆冰形式的导线脱冰动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 193-199.
- [2] 张镇东. 输电导线覆冰及融冰过程数值模拟研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [3] 刘辉, 马增泰, 林济镗. 覆冰导线舞动方程的建立及求解策略[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 67-75.
- [4] 闵光云. 覆冰输电导线舞动特征分析及其影响因素研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [5] 蔡萌琦, 徐倩, 周林抒, 等. 扇形覆冰特高压八分裂导线舞动特性分析[J]. 力学与实践, 2018, 40(6): 630-638.
- [6] 王俊傑, 魏发生, 黄增浩, 等. 耐张塔输电线路等值覆冰厚度计算模型在不均匀覆冰下有效性分析[J]. 广东电力, 2021, 34(9): 98-104.
- [7] 王东东. 500 kV 输电线路覆冰特性分析与预测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [8] 张喆, 杨秀萍, 郝淑英. 覆冰导线动态气动力特性模拟与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(7): 209-214.
- [9] 张会然. 覆冰导线多模态耦合的非线性舞动分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
- [10] 董飞龙. 架空输电线路覆冰密度测量系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [11] 谢云云, 金颖, 黄琳雁, 等. 适用于有高差线路的覆冰输电导线 ANSYS 找形方法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 9-13, 50.
- [12] 崔福将. 覆冰分裂导线的多模态振动响应及耦合作用机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [13] 路国闯, 李新梅, 商利, 等. 不同覆冰状态下导线风致振动响应仿真[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4677-4685.
- [14] 杨国林, 蒋兴良, 廖乙, 等. 输电线路单导线自由扭转覆冰动态仿真研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4079-4089.
- [15] 刘贝贝. 基于数值模拟方法的覆冰四分裂导线舞动特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [16] 丁晨辉. 覆冰输电导线的风致舞动分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.

(责任编辑 胡亚敏)