

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.012

# 随机脉动风场作用下输电塔线体系的动力响应分析

鄢呈阳, 王立军, 张闻哲, 李威, 周旋

(西安交通大学(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049)

**摘要:**输电杆塔及塔线体系(简称塔线体系)是整个电力系统中输电环节的核心部分,沿海地区的强风对塔线体系有着重要影响。为研究在随机脉动风场作用下塔线体系的动力响应特性,文中以广东某地区的1W2C9型鼓型自立式输电杆塔为研究对象,建立输电杆塔的单塔及一塔两线的塔线耦联有限元模型,结合Davenport风速谱与四阶自回归法模拟具有空间相关性的单塔9节点及塔线体系49节点的脉动风场,研究在此脉动风场下的单塔及塔线体系的动力响应,并探究不同风向角对其动力响应的影响。研究结果表明:单塔及塔线体系的动力响应最大值大于其拟静力响应;由于塔线耦联效应的存在,输电线会增加塔线体系的稳定性,降低其动力响应;90°是输电杆塔单塔及塔线体系动力响应的最不利风向角。

**关键词:**输电杆塔;塔线耦联;脉动风场;Davenport风速谱;自回归法;动力响应

中图分类号:TM726

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)04-0116-11

## 0 引言

输电杆塔是电力工程的重要基础设施,塔线体系是整个电力系统输电过程的重要依托,其安全性与稳定性直接决定了区域的电力系统运行质量<sup>[1]</sup>。输电杆塔及塔线体系(下文简称塔线体系)一旦遭到破坏,会造成社会动荡以及产生巨大的经济损失<sup>[2-3]</sup>。

输电杆塔是高耸结构,在横向荷载的作用下容易产生振动与形变。目前风荷载作为输电塔线体系中最常见的横向作用因素,其随机性、危害性和频发性最为显著,极易对塔线体系造成破坏<sup>[4-7]</sup>。随着我国电力行业的快速发展,输电杆塔的高度与档距跨度都在增加,输电线、绝缘子串等物体对输电杆塔的动力响应影响越来越明显。

目前,国内外学者已经对塔线体系在狂风作用下的力学特性分析开展了许多研究。文献[8]将大风作用视为静态风,对输电塔-塔线耦合体系进行静力学的特性分析,得到了输电杆塔的位移响应及应力响应结果,但没有考虑脉动风的动力响应影响;文献[9]构建了三线两塔耦合系统的ANSYS有限元模型,并推导出其力学简化模型,利用Davenport风速谱对脉动风荷载进行模拟,将理论计算与ANSYS有限元仿真结果作对比,但其仅考虑了塔线体系的振型,没有深入研究塔线体系的风振响应;文献[10]探究了基于不同阻尼布局下塔线体系的动态响应,其主要注重于塔线体系中阻尼器的添加

位置;文献[11]搭建了输电杆塔模型,并考虑地理位置及地理特性等相关因素的特殊影响,利用风洞试验求解得到了塔身的脉动风荷载,探究刚度对其风振特性的改变,但没有对塔线耦联效应进行深入的研究;文献[12]利用ANSYS软件搭建耐张塔线耦联体系有限元模型,并基于Kaimal风速谱的特征模拟了整个脉动风场,研究杆塔塔身与输电线之间的耦联作用对输电杆塔风振特性的影响;文献[13]对Davenport风速谱及Kaimal风速谱进行了对比分析,并用线性滤波法分别模拟了基于2种风速谱的脉动风场,以通讯角钢塔为作用对象,计算风振响应,但通讯角钢塔构造与输电塔差异较大,其风振响应的分析方法需要调整;文献[14]基于ABAQUS构建了500 kV输电线路的塔线模型,利用Kaimal风速谱模拟脉动风场,研究塔线分离、塔线耦合动力、等效静力3种加载方式对杆塔力学性能的影响,结果表明等效静力荷载模型的计算效率最高,但其模拟的脉动风场空间相关性研究不够深入。

目前,我国的输电塔及线路的设计标准主要采用分开设计,并没有将两者共同考虑。国内外学者在研究输电杆塔风振响应时大多数只对输电杆塔单独仿真,将输电线的重力荷载及相应的风荷载以集中力的方式设置到塔身横担的挂线点处,没有考虑塔线耦联效应。即使对塔线体系进行整体的风振特性仿真,多数研究者也是将输电线所受的风荷载进行简化处理<sup>[15]</sup>,设定输电线各点风速与挂线点处相同,大大降低了仿真的准确性。

文中以广东某地区1W2C9型鼓型自立式输电杆塔为研究对象,利用ANSYS APDL建立了输电杆

收稿日期:2023-12-15;修回日期:2024-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377157)

塔的单塔模型及一塔两线的塔线耦联体系模型,结合 Davenport 风速谱与四阶自回归法模拟了具有空间相关性的单塔 9 节点及塔线体系 49 节点的脉动风场,分别研究了单塔模型及塔线体系模型在脉动风作用下的动力特性,并将结果与静力计算结果进行对比,同时研究了不同风向角对动力响应的影响。仿真分析的结果可以为输电杆塔的设计提供一定参考,同时能为输电杆塔的加固方案提供数据支撑。

## 1 输电杆塔单塔及塔线体系模型的建立

### 1.1 输电杆塔概况

文中选用的 1W2C9 型鼓型自立塔应用于广东地区,其设计工况为海拔 0~1 000 m、基本风速 35 m/s(离地面 10 m)、覆冰厚度 0 mm。该输电杆塔按功能划分为直线塔,按全方位长短腿设计,是双回路铁塔。输电杆塔塔高 26.3 m,呼高 18 m,水平档距为 403 m,底部根开为 4.68 m;塔身主体各部件大多数采用角钢,其弹性模量为  $2.1 \times 10^5$  MPa,密度为  $7\ 850\text{ kg/m}^3$ ,泊松比为 0.3,主要材料有 Q420、Q345 和 Q235;采用 1×JL/G1A-300/40 型导线,计算截面积为  $338.99\text{ mm}^2$ ,计算重量为  $1.131\ 0\text{ kg/m}$ ,计算拉断力为 92 360 N;采用 LBGJ-100-30AC 型地线,计算截面积为  $100.88\text{ mm}^2$ ,计算重量为  $0.573\ 9\text{ kg/m}$ ,计算拉断力为 80 800 N。

### 1.2 输电杆塔单塔及塔线体系模型的有限元建模

文中采用 ANSYS APDL 中的参数化建模方法,利用命令流的形式建模。参数化建模方法的核心在于点-线-单元的体系建模,具体步骤可以概括为:先确立输电杆塔、输电线、绝缘子的关键节点空间位置,再由点连接成线,并赋予线相应的单元,最后施加一定的约束。

输电杆塔采用空间钢架模型,将其塔身各杆件视为梁结构,利用 BEAM188 单元模拟塔身杆件结构,在建模过程中假定:(1) 单元为等截面直杆;(2) 输电杆塔与地面固定采用塔腿与地面刚接的方式,塔腿的 6 个自由度全约束;(3) 忽略螺栓连接的影响,各节点均简化为刚节点。

最终建立的输电杆塔单塔模型如图 1 所示。

塔线体系的有限元模型除了输电杆塔塔身外,还需要对输电线及绝缘子串进行建模。输电线是柔性构建,不承受弯矩及压力,只承受拉力,因此利用 ANSYS 软件的 LINK10 线单元来模拟输电线。由于初始时刻输电线在自身重力荷载作用下具有一定垂度,整体展现出悬链线结构的形状,因此需

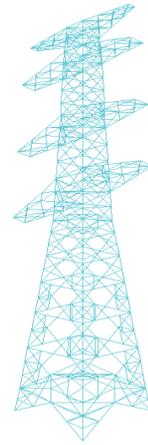


图 1 输电杆塔单塔模型

Fig.1 Model of transmission tower

要对其进行找形,以明确其初始的空间位置。

ANSYS 找形的具体步骤为:

(1) 依据悬链线方程,建立输电导线线的有限元模型;

(2) 使用 LINK10 单元模拟输电线,设置其材料属性及初始应变;

(3) 在输电线两端设置约束,并且在重力及初始应变作用下进行非线性静力求解,完成找形。

相较于整个塔线体系,绝缘子串的尺寸很小,其存在对于动力响应分析结果的影响很小,因此可采用刚性杆连接单元 LINK180 对其进行模拟。

塔线体系模型需要在输电杆塔底部的 4 个塔腿处设置固定约束,在输电线的两端设置固定约束,在绝缘子串与输电线连接处设置顺线路 Z 方向约束。

塔线体系模型如图 2 所示。

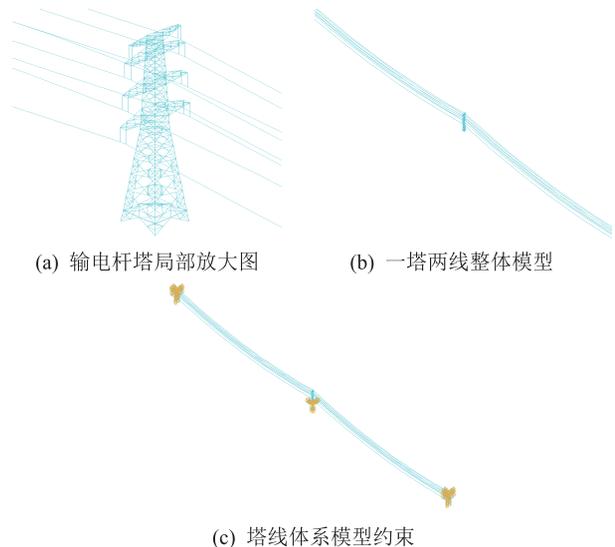


图 2 塔线体系模型

Fig.2 Model of tower line system

## 2 脉动风场的模拟

### 2.1 脉动风的定义

任意位置处的风速都是由平均风速与脉动风速组合而成。平均风可视为静态风,不随时间的变化而变化;脉动风为随机动态风,随时间的变化而变化,需要用统计方法来进行描述<sup>[16-17]</sup>。脉动风速可以用零均值的高斯平稳随机过程来表达,具有各态历经性,而功率谱密度函数是脉动风最重要的统计特征,其展示了不同频域上脉动风所具备的能量多少。此外,根据大风的实际观测可以得知:在一次阵风的作用过程中,受风部件的迎风面上各位置的风速与风向是不一致的,有时甚至差异巨大,因此研究输电杆塔上各节点的脉动风速需要考虑脉动风速的空间相关性。

### 2.2 脉动风的风速谱选择及模拟方法

目前脉动风速谱主要有以下5种:Davenport 风速谱、Kaimal 风速谱、Simiu 风速谱、Harris 风速谱、Karman 风速谱。前2种目前被广泛应用在输电杆塔领域的风振响应中。Davenport 风速谱与 Kaimal 风速谱的主要区别在于紊流尺度是否随高度变化而变化。Kaimal 风速谱能够考虑到风速受高度变化的影响,而 Davenport 风速谱是我国使用最广泛的风速谱。

#### 2.2.1 Davenport 风速谱

Davenport 风速谱的典型特征是水平脉动风速谱功率谱密度不随高度变化而变化<sup>[18]</sup>,其数学表达式为:

$$S_{v1}(f) = 4K\bar{v}_{10}^{-2} \frac{x_1^2}{f(1+x_1^2)^{4/3}} \quad (1)$$

式中:  $S_{v1}(f)$  为 Davenport 风速谱的功率谱密度;  $K$  为地貌粗糙度;  $\bar{v}_{10}$  为换算到距离地面高度 10 m 处的平均风速;  $f$  为脉动风的频率;  $x_1 = \frac{1}{\bar{v}_{10}} \frac{200f}{z}$ 。

#### 2.2.2 Kaimal 风速谱

Kaimal 风速谱的典型特征是其功率谱密度是随着高度的变化而变化的<sup>[19]</sup>,其表达式可简化为:

$$S_{v2}(f) = 200u_0^2 \frac{x_2}{f(1+50)^{5/3}} \quad (2)$$

式中:  $S_{v2}(f)$  为 Kaimal 风速谱的功率谱密度;  $u_0$  为摩擦速度;  $x_2 = \frac{fz}{\bar{v}(z)}$ ,  $z$  为高度,  $\bar{v}(z)$  为高度  $z$  处的平均风速。

#### 2.2.3 脉动风模拟方法

考虑到目前我国风荷载规范采用的是

Davenport 风速谱,因此文中也选择使用 Davenport 风速谱来模拟脉动风。输电杆塔所处地貌为 B 类粗糙度,  $K$  取值为 0.002 15; 根据输电杆塔的实际设计工况,  $\bar{v}_{10}$  取 35 m/s。由于 Davenport 风速谱并没有考虑空间高度对风速谱的影响,且实际脉动风也会受水平位置的影响,因此文中采用 Davenport 风速谱来模拟脉动风的实际风速时需要考虑脉动风速的空间相关性。

目前模拟脉动风的方法可以分为谐波叠加法<sup>[20]</sup>与线性滤波法<sup>[21]</sup>2类,文中采用线性滤波法中的典型方法——自回归法。自回归法可根据之前的数据来预测当前的数据,而这些数据是线性相关的。

自回归法模拟  $M$  个点的脉动风速向量  $\mathbf{u}$  的表达式为:

$$\mathbf{u}^*(t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k^* \mathbf{u}^*(t - \Delta t) + \mathbf{L}^* \mathbf{n}^*(t) \quad (3)$$

式中:符号“\*”表示共轭矩阵;  $p$  为自回归滤波器的阶数,可以采用 Hannan 定阶方法算出<sup>[22]</sup>,文中取 4,即四阶自回归法;  $\Psi_k^*$  为  $M \times M$  型的自回归参数矩阵的共轭矩阵,由式(4)确定;  $\Delta t$  为时间步长;  $\mathbf{L}^*$  为下三角矩阵的共轭矩阵,由式(6)确定;  $\mathbf{n}^*(t)$  为  $M$  行均值为 0、方差为 1 的正态分布随机数列向量。

$$\mathbf{R}_u^*(j\Delta t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k^* \mathbf{R}_u^*((j-k)\Delta t) (\Psi_k^{-1})^T \quad (4)$$

$j = 1, 2, \dots, p$

式中:  $\mathbf{R}_u^*(j\Delta t)$  为  $M \times M$  型的各点风速相关共轭矩阵,由功率谱密度矩阵积分得到。

$$\mathbf{R}_u^*(j\Delta t) = \int_0^\infty \mathbf{S}_u^*(f) \cos(2\pi j\Delta t) df \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{S}_u^*(f)$  为空间脉动风速功率谱密度共轭矩阵。

$$\mathbf{R}_N^* = \mathbf{R}_u^*(0) - \sum_{k=1}^p \Psi_k^* \mathbf{R}_u^*(k\Delta t) = \mathbf{L}^* (\mathbf{L}^*)^T \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{R}_N^*$  为下三角矩阵的 Cholesky 乘积形式;  $\mathbf{R}_u^*(0)$  为初始风速相关共轭矩阵。

只需要对  $\mathbf{R}_N^*$  进行 Cholesky 分解,就可以得到下三角矩阵  $\mathbf{L}$ 。

基于不同位置的相关性的考量,  $i, j$  两点间风速的互谱如下<sup>[23-25]</sup>:

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)r_{ij}(f)} \quad (7)$$

式中:  $S_{ii}(f)$  为  $i$  点的功率谱密度;  $S_{jj}(f)$  为  $j$  点的功率谱密度;  $r_{ij}(f)$  为  $i, j$  点的相关互谱关系式函数,如式(8)所示。

$$r_{ij}(f) = \frac{-2f\sqrt{C_x^2(X_i - X_j)^2 + C_y^2(Y_i - Y_j)^2 + C_z^2(Z_i - Z_j)^2}}{\bar{v}(z_i) + \bar{v}(z_j)} \quad (8)$$

式中: $X_i, Y_i, Z_i$ 分别为*i*点的*X, Y, Z*向位置; $X_j, Y_j, Z_j$ 分别为*j*点的*X, Y, Z*向位置; $C_x, C_y, C_z$ 分别为*X, Y, Z*向的空间关系式; $\bar{v}(z_i)$ 为*i*点所在高度 $z_i$ 处的平均风速; $\bar{v}(z_j)$ 为*j*点所在高度 $z_j$ 处的平均风速。

综上所述,文中采用四阶自回归法来模拟脉动风的风速时程,时间步长 $\Delta t = 0.1$  s,频率步长 $f_1 = 0.001$  Hz,时程总长 $T_{\max} = 100$  s,空间相干系数采用与频率无关的Shiotani相关系数,脉动风速功率谱为Davenport风速谱。输电杆塔实际工况的运行参数如下:基本风速 $\bar{v}_{10} = 35$  m/s,地貌粗糙度类别为B类,地貌粗糙度 $K = 0.002 15$ ,具体实现方法为采用MATLAB软件进行编程。

### 2.3 单塔及塔线体系下模拟生成的脉动风场

#### 2.3.1 单塔下模拟生成的脉动风场

文中采用的输电杆塔模型塔身高约27 m,为提高仿真结果的精度,文中将输电杆塔模型分为9段,每段距离为3 m,在每段最高处设定一个节点,将该节点的风速时程曲线作为该段所有节点的风速时程曲线。此方法可以有效提高安全阈值。节点1—节点9代表塔底至塔顶的各段,将9个节点的空间坐标代入MATLAB程序中,即可得到各节点的脉动风速随时间变化的曲线图像,再加上相应静态风,最终得出实际的风速时程曲线。在B类地貌中,平均风速随高度 $z$ 变化的公式为:

$$\bar{v}(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.16} \bar{v}_{15} \quad (9)$$

式中: $\bar{v}_{15}$ 为换算到距离地面高度15 m处的平均风速。

表1展示了9个节点所受的静态风。

表1 9个节点所受的静态风  
Table 1 Static wind at nine nodes

节点	静态风速/(m·s <sup>-1</sup> )	节点	静态风速/(m·s <sup>-1</sup> )
1	25.83	6	38.51
2	30.58	7	39.18
3	34.29	8	40.42
4	36.50	9	40.86
5	37.69		

考虑到空间相关性,利用四阶自回归法并以Davenport风速谱为脉动风风速谱生成了9个节点的脉动风速时程曲线。图3给出节点1、节点5、节

点9的风速时程曲线,分别代表了塔底、塔中、塔顶三处所受到的实际风。

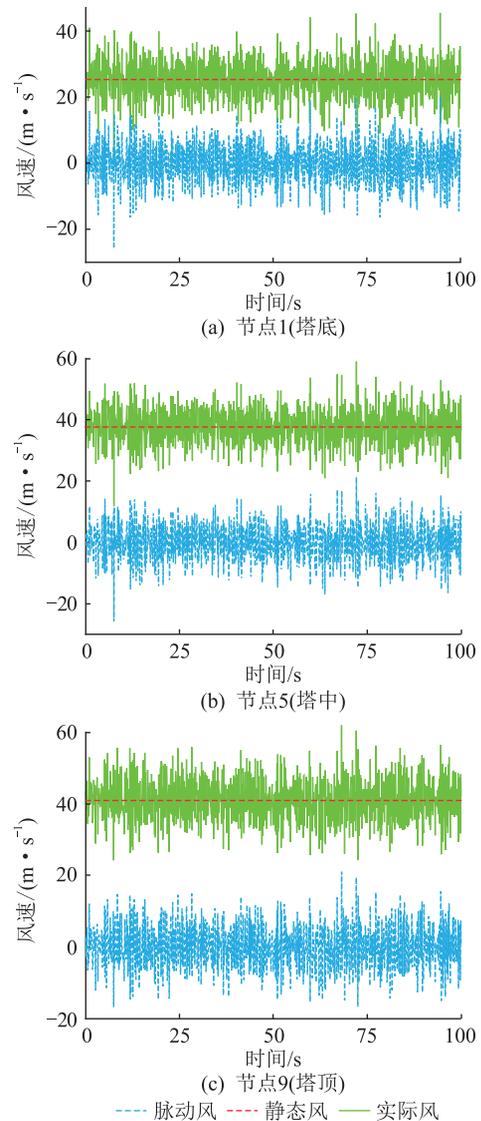


图3 输电杆塔节点的风速时程曲线

Fig.3 Wind speed time history curves of transmission tower nodes

对比图3的(a)、(b)、(c)可以看出,考虑空间高度相关性,以Davenport风速谱模拟的脉动风风速时程曲线与空间高度存在一定关联性,整体曲线随着空间位置改变也会发生变化。图4给出了塔顶节点处的风速功率谱密度,可以看出模拟出的Davenport风速谱与目标模拟谱基本一致,说明用以上方法模拟出的Davenport风速谱具有可行性和准确性。

#### 2.3.2 塔线体系下模拟生成的脉动风场

目前塔线体系的脉动风速模拟往往将输电线上各点的风速视为与挂线点相同,这种处理方法是比较粗糙的,尤其是在大跨越塔线体系中,同根导线不同位置的风速差异特别大<sup>[26-28]</sup>。因此文中将

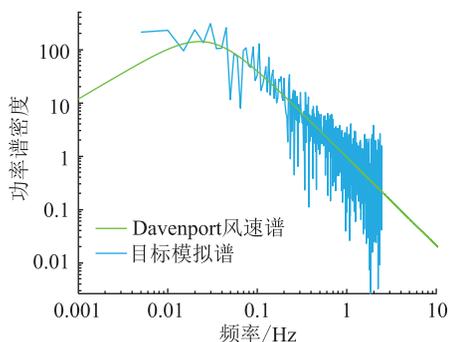


图4 输电杆塔塔顶节点处的风速功率谱密度  
Fig.4 Wind speed power spectral density at top node of transmission tower

模拟输电线上各点的脉动风速,且考虑各点之间的空间相关性。由于塔线体系模型中输电线长达400 m,精确模拟输电线各点所受的风速会使计算更繁琐。考虑计算精度与计算时间的平衡,文中决定以80 m为一段,将一根导线分为5段,将每段的代表节点所受的风速视为整段导线所受的风速。同时为了简化计算,仅考虑顺导线方向上位置的变化对导线各段风速时程的影响,忽略导线高度变化及垂直导线方向上的位置变化对风速时程的影响。最终使用四阶自回归法模拟出由49个节点构成的脉动风场,其中9个节点为塔身所受的风速节点,其余40个节点为双回路输电线上各段所受的风速节点。图5为塔底、塔中、塔顶节点以及输电线弧垂最低点的风速时程曲线,可以看出,不同位置节点的风速时程曲线略有不同,风速整体呈现出随高度增加而增加的趋势。

### 2.4 脉动风荷载的生成

根据最新的《架空输电线路荷载规范》(DL/T 5551—2018)可知,输电杆塔及输电线所受到的风荷载与风速线性相关。文中将单塔及塔线体系中各点的风速转化成对应的等效荷载,根据标准风压值,再结合脉动风压、构件体形系数、不同高度风振系数、迎风面构件投影面积等参数即可得到最终的脉动风荷载。由于输电杆塔及输电线的风荷载计算公式类似,此处仅给出输电杆塔的风荷载计算公式,如式(10)所示。

$$W_s = W_0 \mu_z \mu_s \beta_z B_2 A_s \quad (10)$$

式中:  $W_0$  为杆塔风荷载标准值;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $\mu_s$  为构件体型系数;  $\beta_z$  为高度  $z$  处的杆塔风振系数;  $B_2$  为杆塔构件覆冰风荷载增大系数,无冰情况下取1;  $A_s$  为迎风面构件的投影面积计算值。

以单塔塔顶节点的风速时程曲线为例,将其风速转化为塔顶部分的风荷载,得到的时程曲线如图6所示。

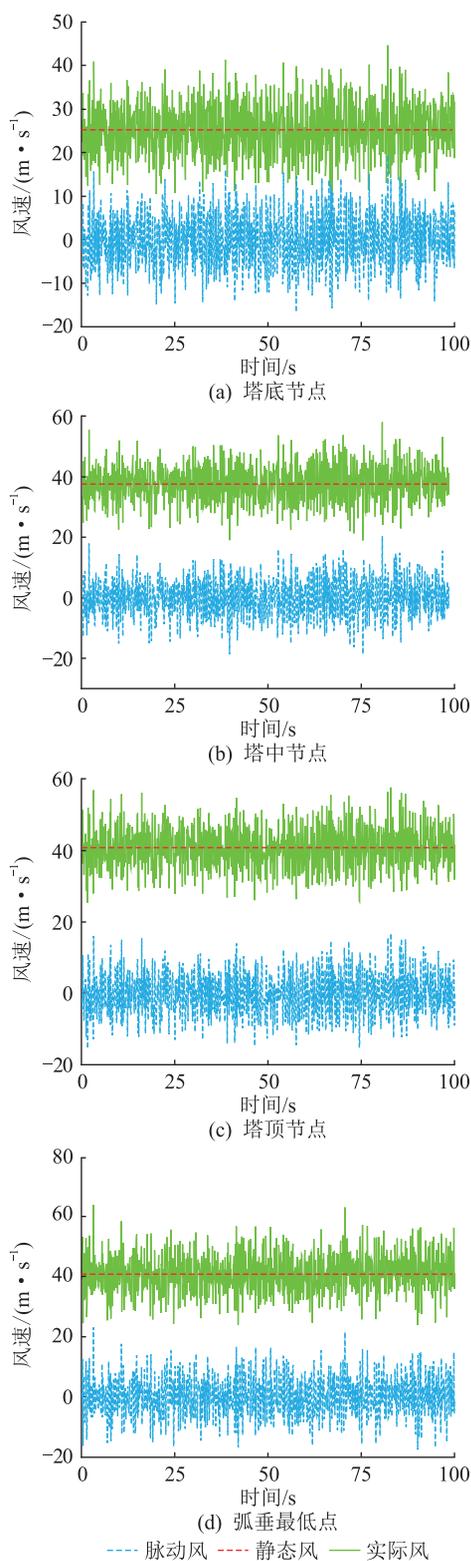


图5 塔线体系节点的风速时程曲线  
Fig.5 Wind speed time history curves of tower line system nodes

## 3 单塔及塔线体系在脉动风作用下的动力响应分析

### 3.1 单塔的动力响应分析

在 ANSYS APDL 中搭建输电杆塔模型,将计算

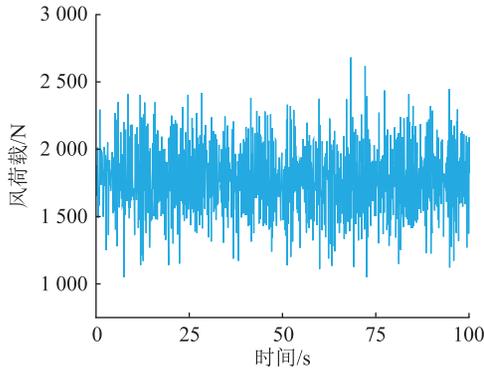


图6 塔顶部分的风荷载时程曲线

Fig.6 Time history curve of wind load on the top of the tower

得到的输电杆塔各段脉动风荷载平均施加到各段的所有节点上,同时将输电线的风荷载及重力荷载视为集中力,施加到对应横担处的挂线点上,利用 ANSYS 瞬态分析模块来进行仿真分析。打开瞬态效应开关、时间积分效应,设置时间积分步长为 0.1 s,风向角为  $90^\circ$ 。

为分析脉动风对输电杆塔的位移响应,文中给出输电杆塔塔顶节点、下横担处节点的位移时程曲线,如图 7、图 8 所示。

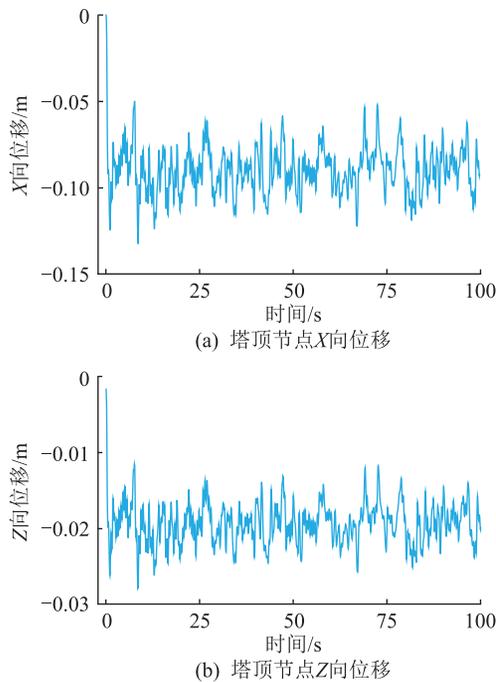


图7 塔顶节点位移时程曲线(单塔)

Fig.7 Time history curves of tower top node displacement (single tower)

由图 7、图 8 可知,无论是塔顶节点还是下横担处节点,其整体的位移时程曲线是相一致的,这与输电杆塔所受的脉动风速时程曲线有很大关系。在整个脉动风作用过程中,塔顶节点 X 向最大位移为 0.132 0 m,塔顶节点 Z 向最大位移为 0.028 0 m;

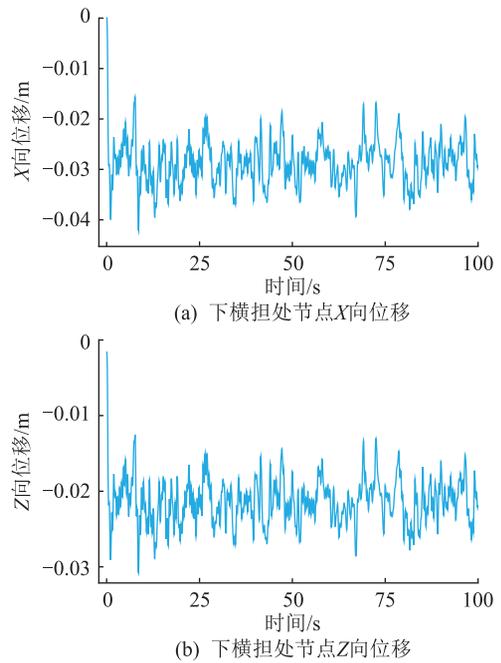


图8 下横担处节点位移时程曲线(单塔)

Fig.8 Time history curves of node displacement at the lower cross arm (single tower)

下横担处节点 X 向最大位移为 0.042 2 m,下横担处节点 Z 向最大位移为 0.030 8 m,这表明输电杆塔各位置的主要位移方向都发生在 X 向,X 向的位移远大于 Z 向位移。对比图 7、图 8 还可以发现,输电杆塔塔顶节点的位移远大于下横担处节点的位移,这符合理论上输电杆塔的最大位移发生在塔顶位置,输电杆塔的位移随着塔身位置高度的增加而增加的规律。

对比输电杆塔塔顶节点在设计风速下的静力与动力位移响应结果。拟静力计算是将风荷载视为一个恒定静风荷载来进行计算的,其塔顶节点位移值计算为 0.114 9 m;流固耦合静力计算法是使用流固耦合来模拟狂风对塔身的荷载,其塔顶节点位移值计算为 0.109 9 m。动力计算中塔顶节点位移最大值为 0.131 9 m,塔顶节点位移平均值为 0.089 7 m。可以看出,动力计算的位移最大值比拟静力计算值大 14.8%,动力计算的位移平均值比拟静力计算值小 21.9%。这表明动力计算所得的结果呈现一定波动性,最大值往往会比静力计算的结果大,而整体平均值会比静力计算结果小。

由静力计算及实际情况分析可知,输电杆塔最大应力往往出现在塔腿附近的主材和横担挂线点处的辅材。塔腿附近主材及顶横担挂线点处辅材的应力时程曲线分别如图 9 和图 10 所示。塔腿附近主材应力的最大值为 133.1 MPa,顶横担挂线点处辅材应力的最大值为 57.5 MPa,而规范拟静力计

算所得到的应力值分别为 122.0 MPa、31.7 MPa, 两者分别增加了 9.1%、81.4%, 可以看出输电杆塔在脉动风作用下的应力响应结果比静力作用的应力值更大。因此研究输电杆塔在强风作用下的响应, 不能简单地将其作为静态问题进行处理, 否则仿真计算得到的值可能会比实际情况的小。

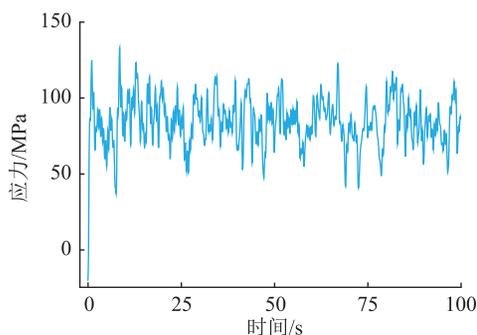


图9 塔腿附近主材应力时程曲线(单塔)

Fig.9 Main material stress time history curve near tower legs (single tower)

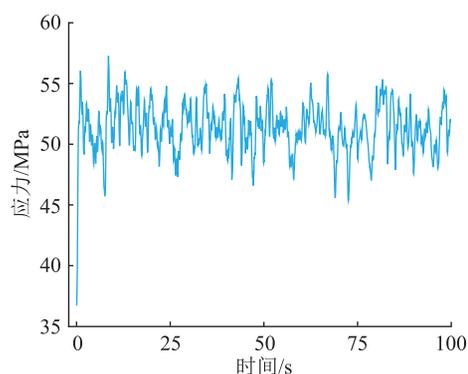


图10 顶横担挂线点处辅材应力时程曲线(单塔)

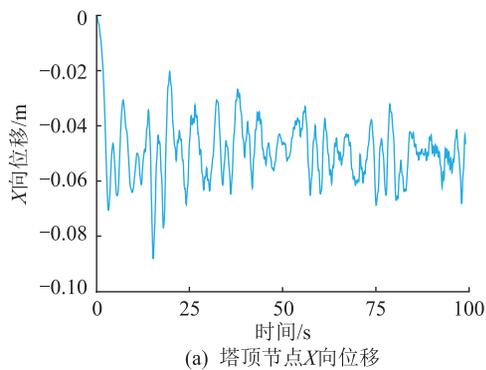
Fig.10 Stress time history curve of auxiliary materials at the hanging point of the top cross arm (single tower)

### 3.2 塔线体系的动力响应分析

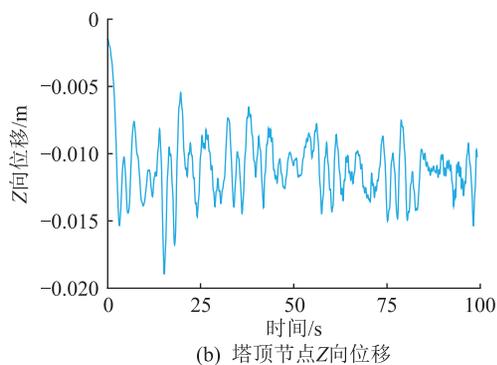
塔线体系施加风荷载的方式分为两部分, 第一部分是塔身风荷载的施加, 这与 3.1 节中单塔塔身风荷载的施加完全一致; 第二部分是输电线风荷载的施加, 将前文模拟出的 40 个输电线风速节点的风速转化成风荷载, 并将每个模拟风速节点的风荷载平均分给对应段内的所有节点。其余的瞬态响应分析设置与 3.1 节相同。

图 11—图 13 分别给出了塔线体系中输电杆塔塔顶节点、下横担处节点、输电线弧垂最低点的位移时程曲线。从图 11—图 13 可以看出, 这些节点的整体位移时程曲线规律是一致的, 这与其所受的脉动风速曲线有很大关系; 塔顶节点与下横担处节点的位移主要发生在 X 向, 且该方向上塔顶节点的位移大于下横担处节点, 表明输电杆塔塔身的位移

会随塔身位置高度的增加而增加; 输电线位移曲线变化的幅度比塔身大得多, 但变化的频率比塔身小, 这是由输电线自身物理特性决定的, 与理论情况相吻合。



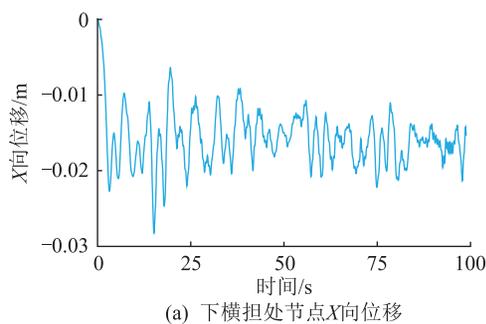
(a) 塔顶节点X向位移



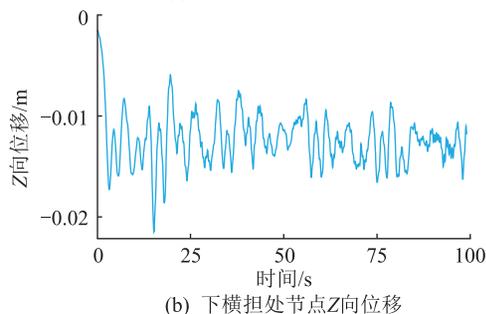
(b) 塔顶节点Z向位移

图11 塔顶节点位移时程曲线(塔线体系)

Fig.11 Time history curve of tower top node displacement (tower line system)



(a) 下横担处节点X向位移



(b) 下横担处节点Z向位移

图12 下横担处节点位移时程曲线(塔线体系)

Fig.12 Time history curves of node displacement at the lower cross arm (tower line system)

表 2 给出了塔顶节点与弧垂最低处的动力计算与拟静力计算的位移结果对比。

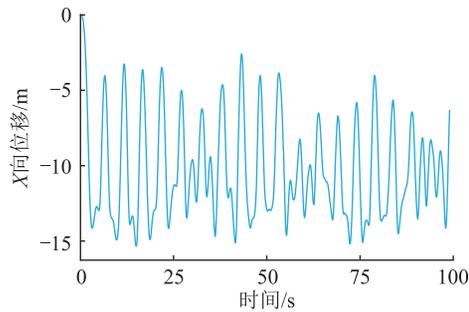


图 13 输电线弧垂最低点位移时程曲线(塔线体系)

Fig.13 Time history curve of the lowest point displacement of transmission line sag (tower line system)

表 2 塔线体系位移响应的动静计算对比

Table 2 Comparison of dynamic and static calculations for displacement response of tower line system

参数	塔顶节点位移	弧垂最低点位移
动力计算最大值	0.088 1	15.341 6
动力计算平均值	0.049 1	10.238 9
拟静力计算值	0.048 7	13.370 1

由表 2 可知,动力计算中塔顶节点位移的最大值为 0.088 1 m,比拟静力计算值大了 80.9%,塔顶节点位移的动力计算平均值为 0.049 1 m,比拟静力计算值仅大了 0.82%;动力计算中弧垂最低点位移的最大值为 15.341 6 m,比拟静力计算值大了 14.7%,弧垂最低点位移的动力计算平均值为 10.238 9 m,比拟静力计算值小了 23.4%。可以看出,动力计算的最大值均比拟静力计算值大,且动力计算对弧垂最低点位移响应的影响比塔顶节点位移响应的影响大。

图 14 与图 15 分别为塔线体系下塔腿附近主材应力及顶横担挂线点处辅材应力时程曲线。

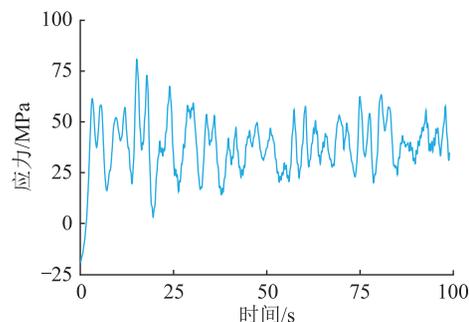


图 14 塔腿附近主材应力时程曲线(塔线体系)

Fig.14 Main material stress time history curve near tower legs (tower line system)

塔线体系下塔腿附近主材应力的最大值为 80.5 MPa,顶横担挂线点处辅材应力最大值为 59.1 MPa,而规范拟静力计算所得的应力值分别为 78.0 MPa、

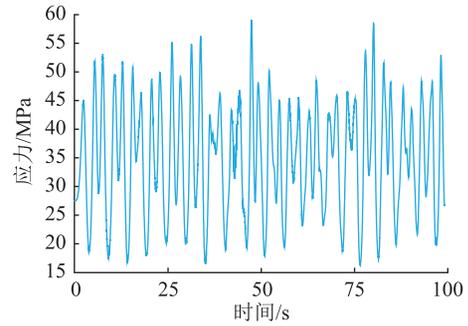


图 15 顶横担挂线点处辅材应力时程曲线(塔线体系)

Fig.15 Stress time history curve of auxiliary materials at the hanging point of the top cross arm (tower line system)

21.3 MPa,两者分别增加了 3.2%、177.5%。可以看出塔线体系在脉动风作用下的应力响应结果比静力作用的应力值更大,但塔线体系动静响应对比的差距比单塔动静响应对比差距要小。

表 3 给出了输电杆塔单塔与塔线体系在脉动风作用下的位移响应及应力响应的对比。从表中可以看出,塔线体系的应力响应结果比单塔的小,这表明塔线耦联效应对输电杆塔的动力响应具有一定影响,输电线的存在会影响输电杆塔的位移和应力响应,明显降低了输电杆塔自身的位移值和应力值,增加了整个塔线体系结构的稳定性。输电线的质量效应和非线性振动效应能使杆塔自身的振动特性减小,从而增加结构的稳定性。因此,在进行输电杆塔各工况的力学特性仿真时,不能简单地将输电线的风荷载和重力以集中力的形式施加在杆塔挂线点处,而是应该具体地将输电线的荷载施加在其相应节点上,以提高仿真的精度。塔线体系仿真结果的准确性比单塔的仿真结果更高。

表 3 单塔与塔线体系的位移和应力响应对比

Table 3 Comparison of displacement and stress responses of single tower and tower line system

参数	单塔	塔线体系
塔顶节点位移最大值/m	0.132 0	0.088 1
塔顶节点位移平均值/m	0.089 7	0.049 1
塔腿附近主材应力最大值/MPa	133.1	80.5

### 3.3 不同风向角作用下的单塔及塔线体系动力响应分析

为研究不同风向角对单塔及塔线体系动力响应的影响,文中分别对 90°、60°、45°、30°及 0°风向角作用下的风振响应进行仿真分析。图 16 为不同风向角作用下的单塔各节点 X 向位移随塔身位置高度的变化。图 17 为不同风向角作用下的塔线体系中塔身各节点 X 向位移随塔身位置高度的变化。

图 18 为 90°、60°及 30°风向角作用下单塔与塔线体系中塔身节点位移对比。

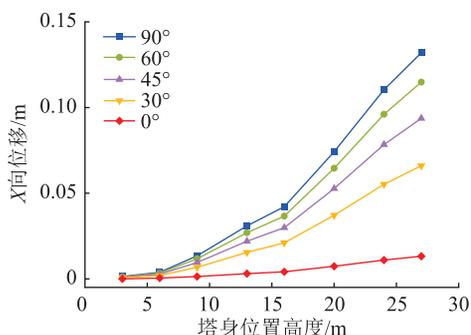


图 16 单塔各节点 X 向位移随塔身位置高度变化情况  
Fig.16 The X-direction displacement of each node in a single tower with the tower location height variation

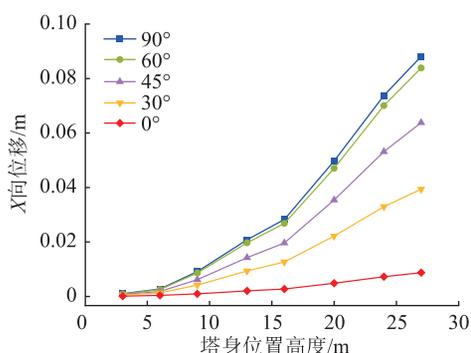


图 17 塔线体系中塔身各节点 X 向位移随塔身位置高度变化情况

Fig.17 The X-direction displacement of each node of the tower body in tower line system with the tower location height variation

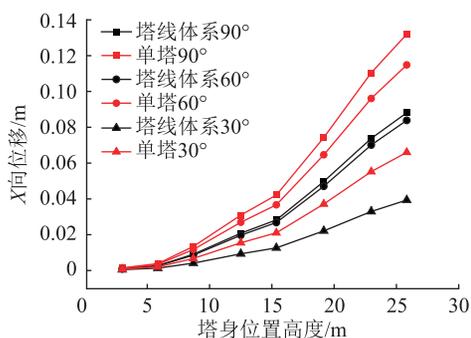


图 18 单塔与塔线体系中的塔身节点 X 向位移随塔身位置高度变化对比

Fig.18 Comparison of X-direction displacement of tower body nodes in a single tower and tower line system with tower location height variation

从图 16 和图 17 可以看出,在不同风向角作用下,塔身节点的 X 向位移都随着其高度的增大而增大;在 90°风向角的作用下,单塔及塔线体系的节点整体位移值是最大的,因此 90°风向角是输电杆塔及塔线体系风振特性的最不利风向角。从图 18 可

以看出,在考虑塔线耦联效应时,塔线体系在不同风向角作用下的风振位移响应都比单塔的小,进一步验证了输电线的存在会增加整体结构的稳定性,塔线耦联效应降低了其风振响应。

为进一步研究风向角对单塔及塔线体系风振响应的影响,以及单塔及塔线体系的风振响应区别,文中对比了不同风向角作用下单塔及塔线体系的位移响应及应力响应,对比其塔顶节点 X 向位移值及塔腿附近主材应力值,如表 4 所示。

表 4 不同风向角作用下的单塔及塔线体系的响应对比  
Table 4 Comparison of responses of single tower and tower line system under different wind direction angles

风向角/ (°)	塔顶节点 X 向位移最大值/m		塔腿附近主材应力最大值/MPa	
	单塔	塔线体系	单塔	塔线体系
90	0.132 0	0.088 1	133.0	80.6
60	0.114 8	0.083 9	113.1	75.7
45	0.093 7	0.063 8	88.6	55.4
30	0.066 0	0.039 4	56.5	28.7
0	0.013 2	0.008 7	46.2	16.3

从表 4 中可知,随着风向角增大,单塔及塔线体系的位移响应和应力响应都增大,在 90°风向角时达到顶峰,再次验证了 90°是单塔及塔线体系的最不利风向角,同时表明了塔线耦联效应能增加结构的稳定性,使其位移及应力响应减小。

#### 4 结论

文中通过 ANSYS APDL 建立了鼓型自立式的单塔及一塔两线的塔线耦联体系模型,基于 Davenport 风速谱,利用四阶自回归法生成了具有空间相关性的单塔 9 节点的脉动风场及塔线体系 49 节点的脉动风场,在此脉动风场的作用下对单塔及一塔两线的塔线耦联体系模型分别进行了动力响应分析,并将位移响应及应力响应结果与规范拟静力分析结果进行对比,同时对比了单塔与塔线体系动力响应结果,最后研究了不同风向角对单塔及塔线体系动力响应的影响。结论如下:

(1) 单塔及塔线体系的整体位移响应以 X 向为主,位移值随塔身位置高度增加而增加;单塔及塔线体系的动力响应最大值都比拟静力计算值大。

(2) 由于塔线耦联效应的存在,单塔的动力响应结果比塔线体系的结果大;输电线的存在会影响输电杆塔的位移和应力响应,明显降低了输电杆塔自身的位移值和应力值,增加了整个塔线体系结构的稳定性。

(3) 90°为最不利风向角,在此风向角下,单塔

及塔线体系的动力响应最大。

#### 参考文献:

- [1] 袁超. 地震动摇摆分量和输电塔线体系的多维地震响应研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2020.  
YUAN Chao. Research on tilt component and seismic response of transmission tower-line system under multi-component ground motion[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2020.
- [2] DIYALJEE V. Discussion of "experimental and numerical investigations of frost heave characteristics of a transmission tower foundation along the Lanzhou-Lintao power transmission line" [J]. International Journal of Geomechanics,2024,24(5).
- [3] ROMAN R R, MIGUEL L F F, ALMINHANA F. Model uncertainty applied to the failure analysis of transmission towers[J]. Engineering Failure Analysis,2024,158:108023.
- [4] TIAN L, YANG M, LIU J C, et al. Shake table test and seismic fragility analysis of transmission tower-line system considering duration effect[J]. Thin-Walled Structures,2024,197:111584.
- [5] LI Z, LIU D, SHAN H, et al. Analysis of the seismic response of a high voltage transmission tower-line system under multi-support excitation[J]. Journal of Progress in Civil Engineering, 2023,5(11):16-27.
- [6] 刘成峰,曾广众,许智贤,等. 强风下直线杆塔力学特性与加固方法研究[J]. 高压电器,2023,59(4):106-115.  
LIU Chengfeng, ZENG Guangzhong, XU Zhixian, et al. Research on mechanical characteristics and reinforcement method of linear tower under strong wind[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(4):106-115.
- [7] 周龙武,燕秀,黎诗义,等. 特高压线路脉动风风偏特性及抑制措施仿真[J]. 电瓷避雷器,2022(4):194-200,213.  
ZHOU Longwu, YAN Xiu, LI Shiyi, et al. Simulation of fluctuating wind deflection characteristics and suppression measures for UHV transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4):194-200,213.
- [8] 贺博,修娅萍,赵恒,等. 强台风下高压输电线路塔一线耦联体系的力学行为仿真分析一:静力响应分析[J]. 高压电器,2016,52(4):36-41.  
HE Bo, XIU Yaping, ZHAO Heng, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons part I :static response analysis[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(4):36-41.
- [9] 耿贞伟,苏文伟,于凤荣,等. 基于 Ansys 的高压输电塔风振特性分析[J]. 电测与仪表,2023,60(2):84-90.  
GENG Zhenwei, SU Wenwei, YU Fengrong, et al. Analysis of wind vibration response of high-voltage transmission tower based on Ansys[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(2):84-90.
- [10] XIE W P, XIA D Z, YANG W J. Study on wind vibration control effect of the tower and tower-line coupling system of the transmission tower [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,641/642:1251-1255.
- [11] ROH, JIEUN, LEE, et al. Stiffness and damping performance enhancement for reducing wind-induced responses of transmission tower[J]. Journal of the Wind Engineering Institute of Korea,2017,21(4):211-222.
- [12] 周丹羽,薛春林,唐现梓,等. 考虑脉动风荷载作用的大跨越输电塔线体系风致响应分析[J]. 电工技术,2022(13):48-52,57.  
ZHOU Danyu, XUE Chunlin, TANG Xianzi, et al. Wind induced response analysis of long span transmission tower line system considering fluctuating wind load [J]. Electric Engineering,2022(13):48-52,57.
- [13] 张少衡,葛卫春,陈允锐. Davenport 风速谱与 Kaimal 风速谱在通讯塔设计中的比较分析[J]. 特种结构,2012,29(4):77-80,5.  
ZHANG Shaoheng, GE Weichun, CHEN Yunrui. A comparative study between Davenport wind spectrum and Kaimal wind spectrum in the design of communication towers [J]. Special Structures,2012,29(4):77-80,5.
- [14] 伍川,张博,刘泽辉,等. 不同加载方式对输电铁塔风致响应的影响[J]. 科学技术与工程,2022,22(21):9238-9244.  
WU Chuan, ZHANG Bo, LIU Zehui, et al. Influence of different loading modes for wind-induced response of transmission towers[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(21):9238-9244.
- [15] 贺博,修娅萍,赵恒,等. 强台风下高压输电线路塔一线耦联体系的力学行为仿真分析二:动力响应分析[J]. 高压电器,2016,52(4):42-47.  
HE Bo, XIU Yaping, ZHAO Heng, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons part II :dynamic response analysis[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(4):42-47.
- [16] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海:同济大学出版社,1985.  
ZHANG Xiangting. Calculation of structural wind pressure and wind vibration[M]. Shanghai:Tongji University Press,1985.
- [17] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海:同济大学出版社,1990.  
ZHANG Xiangting. Handbook of wind load theory and wind resistance calculation for engineering structures[M]. Shanghai:Tongji University Press,1990.
- [18] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1961,87(372):194-211.
- [19] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1972,98(417):563-589.
- [20] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 2版. 北京:中国铁道出版社,1996.  
LI Guohao. Stability and vibration of bridge structures[M]. 2nd ed. Beijing:China Railway Publishing House,1996.
- [21] 王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报,1994,15(1):44-52.  
WANG Zhihong. Simulation of wind loading [J]. Journal of Building Structures,1994,15(1):44-52.

- [22] IANNUZZI A, SPINELLI P. Artificial wind generation and structural response [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(12): 2382-2398.
- [23] WU Y X, CHEN Y Y, GENG W J, et al. A frequency-dependent uniform discretization scheme for simulating fluctuating wind field based on a frequency-wavenumber spectrum [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2024, 244: 105628.
- [24] WU Y X, CHEN Y X, LAI Y, et al. An efficient method for simulating fluctuating wind speed fields in two-spatial dimensions based on a frequency-dependent acceptance-rejection scheme [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 204: 110781.
- [25] CHEON D J, KIM Y C, YOON S W. Fluctuating wind pressure characteristics of dome roofs with low rise-span ratio [J]. Buildings, 2023, 13(7): 1673.
- [26] QIU X W, LI X Z, ZHENG J, et al. Fluctuating wind pressure on vertical sound barrier during two high-speed trains passing each other [J]. International Journal of Rail Transportation, 2023, 11(1): 111-128.
- [27] XU D Y, ZHANG J, ZHANG L J, et al. Minimum safety liquid levels for cylindrical storage tanks to prevent buckling under fluctuating wind loads [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 81: 104948.
- [28] 朱云祥, 张若愚, 曹枚根, 等. 海岛大跨越输电塔体系风振响应及风振系数 [J]. 高压电器, 2022, 58(1): 111-121.
- ZHU Yunxiang, ZHANG Ruoyu, CAO Meigen, et al. Wind induced vibration response and coefficient of large crossing transmission tower line system between islands [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 111-121.

作者简介:



鄢呈阳

鄢呈阳(1999),男,硕士在读,研究方向为输电杆塔力学特性仿真分析、电力开关设备操动机构优化设计(E-mail: 2293843272@qq.com);

王立军(1975),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为开关电器电弧理论及其应用、电力设备数字化设计及智能运维、放电等离子体技术及其应用;

张闻哲(1998),男,硕士在读,研究方向为断路器机构优化设计、试验电源的设计优化。

## Dynamic response analysis of transmission tower line system under random fluctuating wind field

YAN Chengyang, WANG Lijun, ZHANG Wenzhe, LI Wei, ZHOU Xuan

(Xi'an Jiaotong University (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The transmission tower and tower line coupling system is an important carrier of the power system transmission process. Strong winds in coastal areas have a significant impact on the transmission tower and tower line system. To study the dynamic response characteristics of tower line system under the action of random fluctuating wind fields, the 1W2C9 drum-type self-supporting transmission tower in Guangdong is taken as the research object. Finite element models for the single tower and one tower two-line tower line coupling system are established. By combining the Davenport wind speed spectrum with the fourth order autoregressive method, the fluctuating wind fields with spatial correlation are simulated for a single tower with 9 nodes and tower line system with 49 nodes. The dynamic response of a single tower and tower line system under this fluctuating wind field is studied, and the influence of different wind direction angles on their dynamic response is explored. The results indicate that the maximum dynamic response of both the single tower and tower line system is greater than their pseudo-static response. The existence of transmission lines enhances the stability of the transmission tower line system, reducing its dynamic response. A wind direction angle of 90° proves to be the most unfavorable for the dynamic response of the single tower and tower line system.

**Keywords:** transmission tower; tower line coupling; fluctuating wind field; Davenport wind speed spectrum; autoregressive method; dynamic response

(编辑 陆海霞)