

# 强风作用下带横隔面输电塔动力响应及破坏机理研究

李钰睿, 谢强, 李悦

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 增设横隔面对输电塔结构进行抗风加固的一种简单有效方式, 但增设横隔面后输电塔的动力稳定性变化和破坏机理差异尚未明晰。以某220 kV同塔双回线路ZY2输电塔为研究对象, 通过建立输电塔线耦联体系有限元模型, 对比了增设横隔面前后的单塔及塔线体系的模态差异, 验证了在靠近塔腿节间的交叉斜材处增设横隔面对于输电塔局部振型的抑制作用。采用随机风场模拟, 计算不同风速下不同塔段处斜材增设横隔面前后轴力响应变化, 结合动力不稳定区域理论计算斜材动力稳定性参数, 将其与动力不稳定区域绘制在同一参数平面内并根据某一风速下斜材是否进入动力不稳定区域, 来判断不同塔段处斜材增设横隔面前后的失稳风速。结果表明, 合理增设横隔面最高可杆塔破坏风速提高3 m/s。

**关键词:** 横隔面; 塔线耦联体系; 动力不稳定区域; 失稳风速

**中图分类号:** TM 752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)01-0001-09

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20240101

## Research on Dynamic Response and Failure Mechanism of Transmission Tower with Diaphragm under Strong Wind

LI Yurui, XIE Qiang, LI Yue

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Adding diaphragm is a simple and effective way to strengthen transmission tower structure. However, the change of dynamic stability and the difference of failure mechanism of transmission tower after adding diaphragms are still not clear. Taking the ZY2 transmission tower in a 220 kV common tower double circuit transmission line for example, the finite element model of tower-line coupling system is established to compare the modal differences between tower and tower-line system before and after adding diaphragms. The results show that adding diaphragms at the intersection diagonal near tower leg joints could suppress the local vibration mode of transmission tower. Then, random dynamic wind field is applied to calculate the axial stress response before and after adding diaphragms at different tower sections under different wind speeds. So that the dynamic stability parameters of diagonal braces are calculated based on the theory of dynamic unstable region, which are drawn in the same parameter plane with the dynamic unstable region. According to whether the diagonal brace parameters enter the dynamic unstable region at a certain wind speed, the wind speeds at instability before and after adding diaphragms at different tower sections can be determined, which shows that adding a diaphragm can increase the wind speeds at instability by up to 3 m/s.

**Key words:** diaphragm; transmission tower-line system; dynamic unstable region; wind speed at instability

## 0 引言

输电杆塔作为架空线路的支撑点, 是电力系统

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278523)

中的纽带环节。但输电塔属于高耸建筑物, 对倾斜变形十分敏感。据统计资料显示, 输电塔在风作用下经常发生动态侧倾失稳破坏<sup>[1]</sup>, 风致输电塔倒塔事故层出不穷。1961年, 卡拉(Carla)飓风给美国的输电线路造成了极大破坏, 导致休斯顿的电力公司

损失超过 150 万美元<sup>[2]</sup>。1991 年在日本登陆的 19 号台风,对高压输电塔和其他电力设施造成重大破坏。2002 年,21 号台风造成了日本茨城县 10 基高压输电塔连续倒塔的严重事故<sup>[3]</sup>。2009 年 7 月 24 日,河北省南部电网的重要主干通道 500 kV 辛彭线路,在邢台市南和县境内由于特大暴风雨发生倒塔事故,一次性串倒 8 基铁塔<sup>[4]</sup>。2015 年 10 月 4 日,强台风“彩虹”重创湛江电网,多基铁塔倒塌<sup>[5]</sup>。2018 年 7 月 11 日台风玛莉亚登陆福建,造成 1 基输电塔倒塌并引发电力中断<sup>[6]</sup>。由此可见,输电线路防御重大自然灾害,特别是风灾的形势依然非常严峻。

国内外学者对于输电塔风致响应的研究已经取得了一定成果。在国外,早在 1997 年,文献[7]就对山区的输电塔在风的作用下引起的振动特征以及风本身的特征进行了研究,结果表明具有导体的塔的振动特性会受到导体行为的强烈影响。到了 21 世纪,国内的众多学者也通过有限元建模、风洞试验等多种方式针对输电塔风致破坏问题开展了多项研究。2006 年,文献[8]通过对华东电网 500 kV 任上 5237 线爬线风塌事故进行调查与分析,得出输电塔抗风设计规范中横隔面数量不足的结论,且导线与输电塔之间的风电耦合效应不容忽视。2008 年,文献[9]在前人研究的基础上通过数学建模建立了三塔两线、五塔四线输电塔线路耦合体系的空间模型,利用达文波特频谱对目标站点进行了风场模拟,最终得出由于耦联作用的影响导致塔线系统的总响应幅度远大于单塔的反应幅度的结论。2013 年,文献[10]在同济大学 TJ-3 风洞试验室进行了输电塔-八分裂导线五塔四线耦联体系完全气弹模型风洞试验,研究结果表明:塔线体系风致振动呈现强非线性耦合作用,导线及绝缘子的振动对输电塔具有重要影响。2015 年,文献[11]在同济大学 TJ-3 风洞试验室建立了一塔两线的全气动弹性模型模拟输电塔线系统,通过边界层风洞试验研究了有线和无线塔的气动弹性模型在不同风速下的位移和加速度。该试验再次验证了输电塔线耦联效应对输电塔风致振动的影响。

横隔面是设置于塔身中部的自身几何不变且具有较大面内刚度的水平隔面,其作用在于保持结构整体稳定以及传递和分配剪力、扭矩。作为辅助受力构件,其合理布置在输电塔结构整体稳定中发挥着重要的作用。2002 年国际大电网会议(CIGRE)<sup>[12]</sup>发

布了一个关于输电塔结构中横隔面设置要求的报告,详细地讨论了有关横隔面的设计以及横隔面在输电塔结构中发挥的作用,各国规范及企业和行业规范中关于横隔面设计的规定,以及工程实际中横隔面及其附近部位发生的灾害情况,并且提出了一些对于横隔面设置的建议。文献[13-15]通过有限元或试验分析发现,合理增设横隔面可以抑制交叉斜材局部振型、面外变形和对输电塔整体受力的不利影响,增设横隔面是对输电塔结构进行加固的一种简单有效的方法。但横隔面在动力风场下对于输电塔的加固机理尚未明晰。

因此,下面从塔线耦联体系有限元模型动力响应角度分析,探讨附加横隔面对输电塔抗风性能的影响,并基于动力不稳定区域理论<sup>[16-17]</sup>,探究输电塔破坏机理,得到增设横隔面对杆件破坏的影响。

## 1 ZY2 输电塔有限元建模与模态分析

### 1.1 单塔有限元建模

研究对象选用某 220 kV 同塔双回输电线路型号为 ZY2 的输电塔,其结构如图 1 所示。输电塔总高 45.5 m,呼高 30 m,塔腿跟开 6.4 m,单塔一共分为 7 个塔段。塔体主材主要为 Q345 角钢,交叉斜材和辅助材主要采用 Q235 角钢。导线型号为 LGJX-300/40,地线型号为 OPGW-24B1。该输电塔前档距 259 m,后档距 356 m。

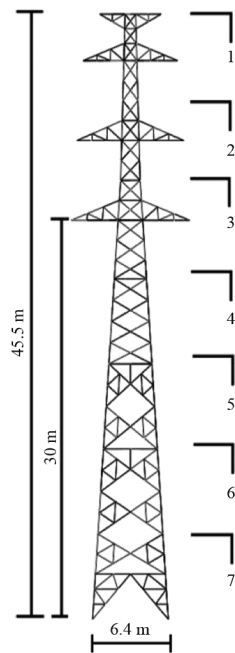


图 1 ZY2 输电塔结构

在 Abaqus 中采用 L 型截面梁单元模拟输电塔角钢构件,该单元可高效模拟杆件的弯曲、扭转和轴向力<sup>[18]</sup>。单元材料参数采用理想弹塑性模型。塔脚处边界条件设置为固接,由此建立输电塔单塔有限元模型。

### 1.2 塔线耦联体系有限元建模

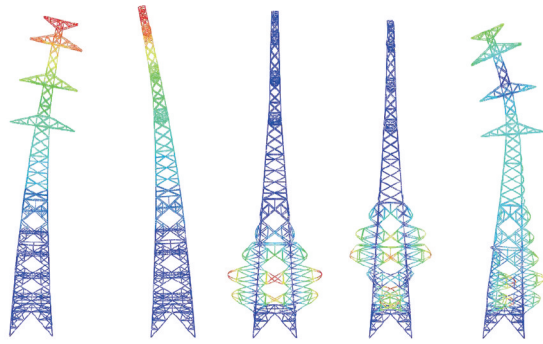
在 Abaqus 软件中建立“一塔两线”耦联体系有限元模型,输电塔模型与单塔完全相同。

输电线作为一种典型的悬索结构,在荷载作用下具有位移大、应变小的几何非线性特点。线路信息中提供的导、地线弧垂是导、地线在自重作用下已产生较大位移后的结果。因此,在建立输电线模型之前需要先计算导、地线的初始弧垂<sup>[19]</sup>。根据导、地线的初始弧垂和两个端点的位置确定其初始构型,即找形;进而确定每一个索单元的初始节点坐标,以便于建立导、地线的有限元模型。悬索计算主要有两种方法:悬链线理论和抛物线理论<sup>[20]</sup>。一般认为悬链线理论是悬索计算的精确理论方法;而抛物线理论是悬索计算的近似理论方法,当索的垂跨比小于 1/8 时,可以得到较为精确的结果。根据 ZY2 所在线路实际情况,在建模时采用抛物线理论来确定输电线的初始构型。计算可得,前、后导线初始弧垂分别为 3.83 m、4.41 m,前、后地线初始弧垂分别为 2.84 m、5.78 m。在 Abaqus 软件中建模时,在顺线路方向上每隔 1 m 用 T3D2 桁架单元来模拟输电线,此类单元不能受弯,只能承受轴向荷载。单元之间用铰接方式连接。边缘处边界条件设置为铰接。

绝缘子是一种可以把导线和输电塔连接起来的悬挂构件,通常由玻璃或陶瓷制成,起绝缘作用。绝缘子刚度很大,两端均为铰接,可以近似认为绝缘子只承受轴力作用,故同样用 T3D2 单元模拟。每个绝缘子为一个单元,下端与导线连接,上端用 MPC-Pin 与输电塔相连,由此建立塔线耦联体系有限元模型。

### 1.3 ZY2 原塔模态分析

在 Abaqus 软件中对 ZY2 单塔和塔线耦联模型进行自振模态分析,从单塔模型提取前 20 阶模态,塔线耦联体系模型提取前 1000 阶模态进行计算。单塔模型前 5 阶振型与塔线耦联体系关于输电塔的前 5 阶振型分别如图 2、图 3 所示,频率如表 1、表 2 所示。



(a) 1阶振型 (b) 2阶振型 (c) 3阶振型 (d) 4阶振型 (e) 5阶振型

图 2 ZY2 单塔前 5 阶振型

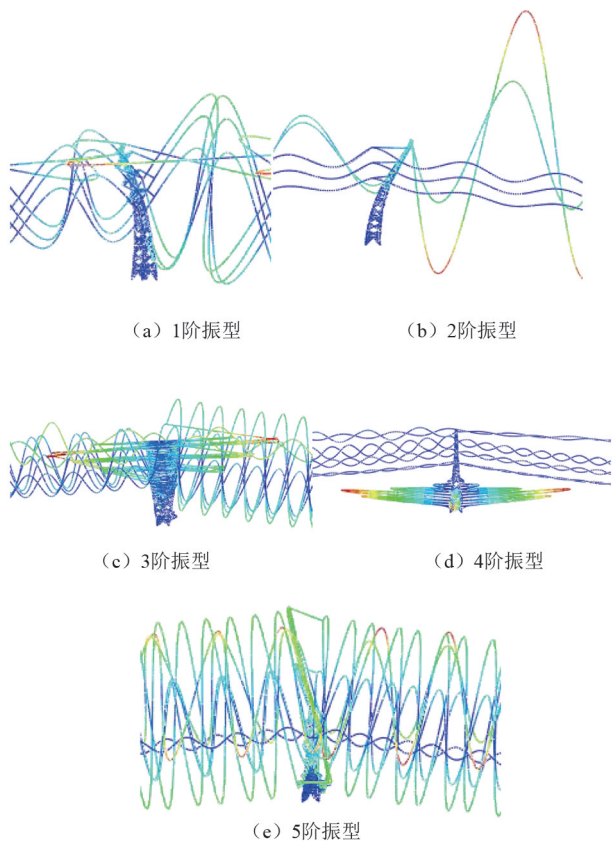


图 3 ZY2 塔线耦联体系前 5 阶振型

表 1 ZY2 单塔前 5 阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
1	2.043 0	垂直线路方向整体弯曲
2	2.052 4	顺线路方向整体弯曲
3	4.612 6	塔段 7、塔段 6 斜材局部振动
4	6.054 4	塔段 7、塔段 6、塔段 5 斜材局部振动
5	6.144 0	垂直线路方向整体弯曲与塔段 7、塔段 6、塔段 5、塔段 4 斜材局部振动

可以看出 ZY2 单塔的前两阶振型与塔线耦联体系中关于塔的前两阶振型均为垂直线路方向整体弯曲振型和顺线路方向整体弯曲振型。单塔模型从第三阶振型开始出现局部振型,而塔线耦联模型第



表 2 ZY2 塔线耦联体系前 5 阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
333	1.757 1	垂直线路方向整体弯曲
454	2.371 4	顺线路方向整体弯曲
789	4.162 4	整体扭转
874	4.611 3	塔段 7、塔段 6、塔段 5 斜材局部振动
963	5.070 4	垂直线路方向整体弯曲塔身斜材局部振动

三阶振型为整体扭转振型。说明线的耦联作用会增大扭转效应对输电塔振动响应的影响。两种模型在 4.61 Hz 的频率附近均出现了严重的局部振型,振动位置均位于塔段 7、塔段 6、塔段 5 交叉斜材处。鉴于此,可以对这 3 个塔段的交叉斜材增设横隔面。

#### 1.4 横隔面增设方案

根据 ZY2 输电塔单塔与塔线耦联体系有限元模型振型分析结果,为约束局部振型,故在塔段 7、塔段 6、塔段 5 交叉斜材处增设横隔面。横隔面角钢型号均采用 L90×8 截面 Q235 钢,增设横隔面布置方式与形状如图 4、图 5 所示。

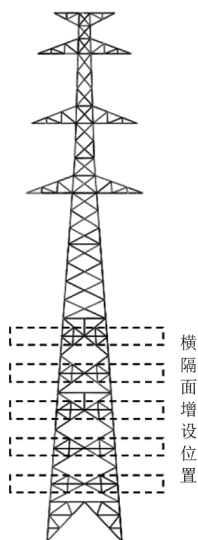


图 4 横隔面增设位置

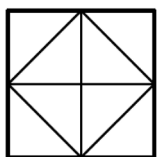
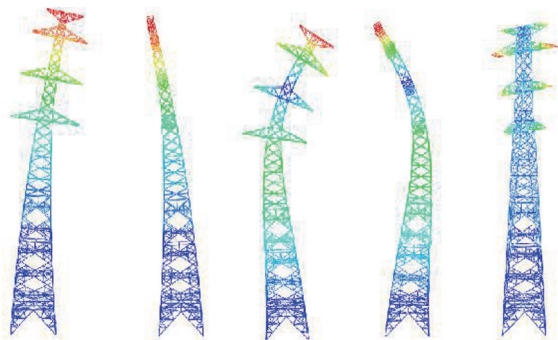


图 5 横隔面形状

#### 1.5 增设横隔面后 ZY2 输电塔模态分析

在 Abaqus 软件中建立增设横隔面后的 ZY2 单塔和“一塔两线”耦联体系有限元模型,分别提取前 20 阶和前 1000 阶模态进行计算,建模方法同第 1.1 节、第 1.2 节所述。增设横隔面后的单塔模型前 5

阶振型与塔线耦联体系关于输电塔的前 5 阶振型如图 6、图 7 所示,频率如表 3、表 4 所示。



(a) 1阶振型 (b) 2阶振型 (c) 3阶振型 (d) 4阶振型 (e) 5阶振型

图 6 增设横隔面后 ZY2 单塔前 5 阶振型

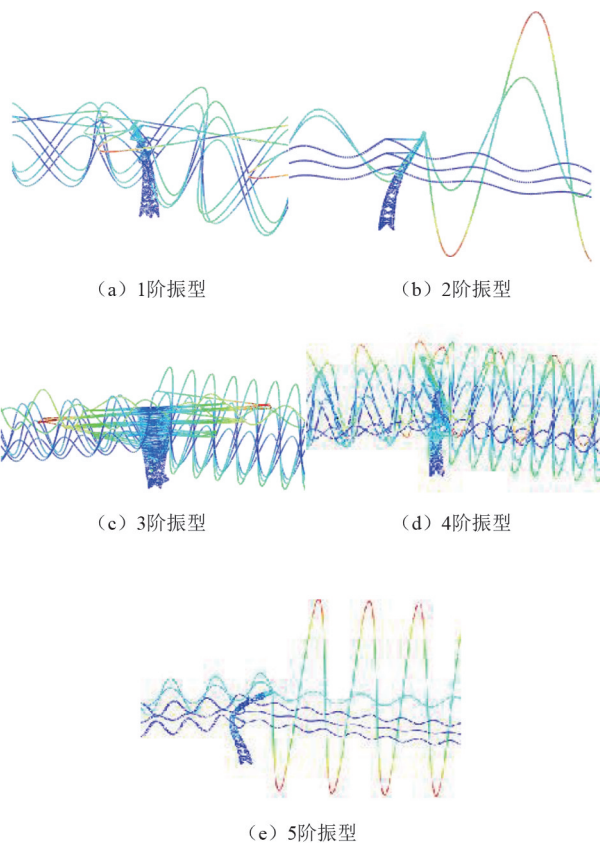


图 7 增设横隔面后 ZY2 塔线耦联前 5 阶振型

表 3 增设横隔面后 ZY2 单塔前 5 阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
1	2.036 6	垂直线路方向整体弯曲
2	2.045 7	顺线路方向整体弯曲
3	6.005 0	垂直线路方向整体弯曲与塔段 4 斜材小幅振动
4	6.146 3	顺线路方向整体弯曲与塔段 4 斜材小幅振动
5	6.997 5	整体扭转

表4 增设横隔面后ZY2塔线耦联有限元模型前5阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
333	1.756 4	垂直线路方向整体弯曲
454	2.366 5	顺线路方向整体弯曲
789	4.158 8	整体扭转
918	4.675 7	垂直线路方向整体弯曲塔身斜材 小幅局部振动
950	4.997 1	垂直线路方向整体弯曲塔身斜材 小幅局部振动

可以看出增设横隔面后,两种模型的局部振型均基本消失,说明横隔面布置合理,可以有效抑制输电塔的局部振型。

综上,合理增设横隔面可以有效抑制输电塔局部振型。且增设横隔面前后塔线耦联体系的振型模态与单塔振型模态在整体振型频率上会有所不同,因此线的耦联作用不可忽视。后续计算将基于塔线耦联体系模型开展。

## 2 输电塔杆件动力不稳定区域<sup>[21]</sup>

### 2.1 杆件动力微分方程及其特征方程

在轴向动力作用下,考虑纵向惯性力影响,可以将杆件微分方程式写为

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + [P_0 + P_t \Phi(t)] \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $E$ 为杨氏弹性模量; $I$ 为杆件惯性矩; $v$ 为杆件横向位移; $x$ 为杆件轴向位置坐标; $P_0$ 为杆件轴向荷载静力分量; $P_t \Phi(t)$ 为动力分量, $P_t$ 为 $t$ 时刻的动力分量幅值, $\Phi(t)$ 为 $t$ 时刻周期函数; $m$ 为杆件单位长度质量。

引入第 $k$ 阶固有振动频率及临界力公式:

$$\omega_k = \frac{k^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2)$$

$$P_{*k} = \frac{k^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (3)$$

式中: $\omega_k$ 为第 $k$ 阶固有振动频率; $l$ 为杆件长度; $P_{*k}$ 为第 $k$ 阶临界力。

使用伽辽金变分法,可分离杆件横向动力位移中的位置和时间变量,代入式(1)可得

$$\frac{d^2 f_k(t)}{dt^2} + \omega_k^2 \left(1 - \frac{P_0 + P_t \Phi(t)}{P_{*k}}\right) f_k(t) = 0 \quad (4)$$

式中, $f_k(t)$ 为杆件横向位移随时间变化的分量。

引入在纵向力静力分量 $P_0$ 作用下的第 $k$ 阶杆件固有振动频率:

$$\Omega_k = \omega_k \sqrt{1 - \frac{P_0}{P_{*k}}} \quad (5)$$

同时引入第 $k$ 阶激发系数:

$$\mu_k = \frac{P_t}{2(P_{*k} - P_0)} \quad (6)$$

即可得到马奇耶-希拉方程<sup>[20]</sup>的标准形式:

$$f_k''(t) + \Omega_k^2 [1 - 2\mu_k \Phi(t)] f_k(t) = 0 \quad (7)$$

式中: $f_k''(t)$ 为杆件横向位移随时间变化的分量的二阶导数; $\Omega_k$ 为第 $k$ 阶固有振动频率; $\mu_k$ 为第 $k$ 阶激发系数。

其特征方程式为

$$\rho^2 - 2A\rho + 1 = 0 \quad (8)$$

式中: $\rho$ 为特征根; $A$ 为特征系数。

### 2.2 主要动力不稳定区域边界

式(7)的特解满足条件为

$$f_k^*(t+T) = \rho_k f_k^*(t) \quad (9)$$

式中: $f_k^*(t)$ 为式(7)的特解; $T$ 为解的周期; $\rho_k$ 为第 $k$ 个特征根。

这类函数可统一表示为

$$f_k^*(t) = \chi_k(t) e^{\frac{t}{T} \ln \rho_k} \quad (10)$$

式中, $\chi_k(t)$ 为某一周期为 $T$ 的周期函数。

考虑特征根的复数形式,则可将式(10)改写为

$$f_k^*(t) = \chi_k(t) e^{\frac{it}{T} \arg \rho_k} e^{\frac{t}{T} \ln |\rho_k|} \quad (11)$$

分析式(11)的性质可以看出,当特征根 $\rho_k$ 的模大于1时,杆件动力微分方程的解随时间无限递增;反之,当特征根 $\rho_k$ 的模小于1时,杆件动力微分方程的解随时间衰减;当特征根 $\rho_k$ 的模等于1时,杆件动力微分方程的解为周期(或近似周期)函数,也就是说它的解总是有限的。

考虑特征方程式(11)的韦达定理,可知 $\rho_k$ 的模大小取决于 $A$ 。当 $|A| > 1$ 时,其中一个根的模必大于1,杆件动力微分方程的解随时间无限递增;反之当 $|A| < 1$ 时,特征方程式有共轭复数根,若要满足韦达定理则两个根的模均等于1,杆件动力微分方程的解总是有限的;当 $|A| = 1$ 时,对应的是有限解和无限解的边界,也就是动力不稳定区域边界。

在动力不稳定区域边界上,特征方程式(8)的根为1或-1,对应杆件动力微分方程的解是周期为 $T$ 或 $2T$ 的周期函数。当杆件动力微分方程的解的

周期为  $2T$  时,将其按照傅里叶级数形式展开,可得

$$f(t) = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} a_k \sin \frac{k\theta t}{2} + b_k \cos \frac{k\theta t}{2} \quad (12)$$

式中:  $a_k$ 、 $b_k$  为级数展开的系数;  $\theta$  为函数的频率。

将式(12)代入式(7)中,取  $\Phi(t) = \cos \theta t$ , 令  $\sin \frac{k\theta t}{2}$  和  $\cos \frac{k\theta t}{2}$  的同类项系数相等,可得临界频率方程式为

$$\begin{vmatrix} 1 \pm \mu - \frac{\theta^2}{4\Omega^2} & -\mu & 0 & \dots \\ -\mu & 1 - \frac{9\theta^2}{4\Omega^2} & -\mu & \dots \\ 0 & -\mu & 1 - \frac{25\theta^2}{4\Omega^2} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} = 0 \quad (13)$$

同理也可求得周期为  $T$  的解的临界频率方程式。由于行列式为无限阶,取前三阶计算,可以发现,确定主要动力不稳定区域边界可仅考虑式(13)的第一阶对角线元素为 0,精确度足够,即

$$1 \pm \mu - \frac{\theta^2}{4\Omega^2} = 0 \quad (14)$$

由此可得输电塔斜材主要动力不稳定区域边界为

$$\theta = 2\Omega\sqrt{1 \pm \mu} \quad (15)$$

### 3 输电塔杆件动力稳定性分析

#### 3.1 风场模拟与加载

根据文献[22]提出的随机傅里叶谱模型,模拟不同风速下塔线体系的风场,该模型考虑了风场沿水平方向和竖直方向的相关性,与实际风场比较接近。ZY2 输电线路所处的场地类别为 B 类,取地面粗糙长度为 0.05 m,模拟风速时的采样频率为 10 Hz,总时长为 120 s。以 30 m/s 风速为例,得到的 10 m 高度处风速时程如图 8 所示。

根据规范<sup>[23]</sup>将风速时程转换为风荷载时程。设置 60 s 风荷载线性增长时长,在增设横隔面前后的 Abaqus 塔线耦联模型中设置动力-隐式分析步进行响应分析,设置时间长度为 120,增量步长为 0.02。将输电塔分为 7 个塔段,每个塔段施加一集中动力风荷载。输电线每隔 2 m 设置一动力风荷载加载点。

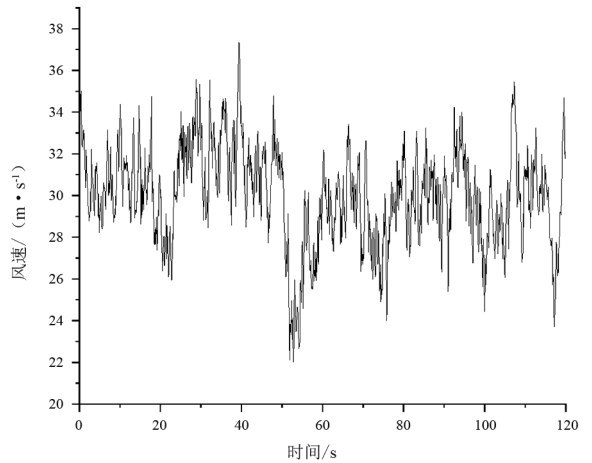


图 8 10 m 高度处 30 m/s 风速时程

#### 3.2 斜材轴力响应分析

以 30 m/s 为基本风速,1 m/s 为增量,按照第 3.1 节所述方法逐级计算风速时程及风荷载时程,并将其加载至增设横隔面前后的塔线耦联体系模型中进行计算。

由于设置了 60 s 的风荷载线性增长时长,故在进行响应时程分析时仅提取后 60 s 数据,对增设横隔面前后的塔段 5、塔段 6、塔段 7 斜材轴力最大处应力时程进行分析。以 30 m/s 风速为例,结果如图 9、图 10 所示。

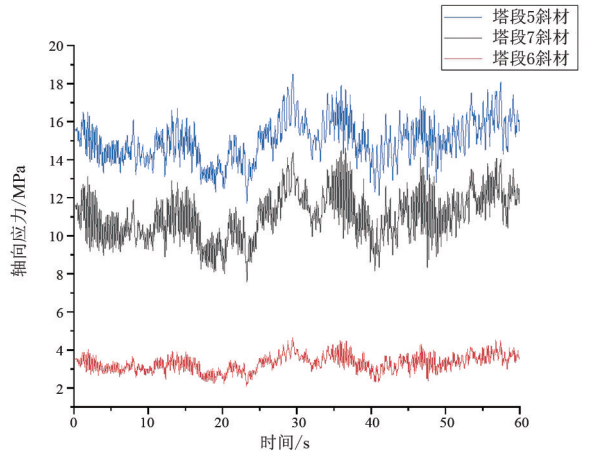


图 9 30 m/s 风速下各塔段斜材轴力时程

可以看出:无论是否增设横隔面,最靠近塔腿处的塔段 7 斜材轴力响应最大,塔段 5 次之,塔段 6 最小,且塔段 6 斜材轴向应力响应均值仅为塔段 5 的 30% 左右;另外增设横隔面前后斜材轴力响应变化不明显,其他风速下仍可得到近似的结果。由此说明,无法直接通过斜材的轴力响应时程变化分析其加固效率,需要结合前面提到的动力不稳定区域理论进行分析。塔段 6 处斜材动力响应明显小于另

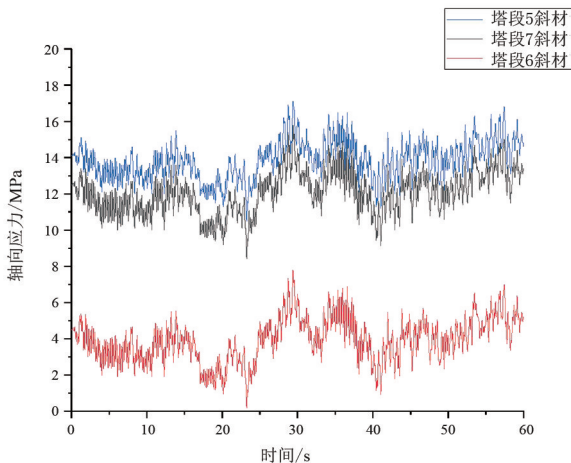


图 10 30 m/s 风速下各塔段增设横隔面后斜材轴力时程

外两个塔段斜材,故在后续分析斜材是否进入动力不稳定区域时,仅针对塔段 5 和塔段 7 处交叉斜材进行分析。

### 3.3 斜材动力稳定性分析

为判断斜材是否进入动力不稳定区域,需要确定的参数包括激发频率  $\theta$ 、固有振动频率  $\Omega$  和激发系数  $\mu$ 。

根据塔段 5 和塔段 7 增设横隔面前后斜材轴力时程图,绘制其功率谱密度图,得到风振能量在频域内的分布情况<sup>[24]</sup>,从而确定该两塔段斜材激发频率  $\theta$  的取值。仍以 30 m/s 风速为例,塔段 7 斜材增设横隔面前后轴向应力功率谱如图 11、图 12 所示。在塔段 7 斜材局部振型出现的频率范围内,取功率谱幅值对应的频率作为该风速下斜材动力不稳定的激发频率  $\theta$ <sup>[25]</sup>。增设横隔面前后,塔段 7 处斜材的动力不稳定激发系数  $\theta$  分别为 4.96 Hz 与 4.84 Hz。用类似方法可以得到不同风速下两塔段斜材动力不稳定激发频率  $\theta$ ,见表 5。同一风速下不同塔段处的激发频率  $\theta$  相同。

根据第 2.1 节的推导,可求得一阶固有振动频率  $\Omega$  和激发系数  $\mu$  为

$$\Omega = \omega \sqrt{1 - \frac{P_0}{P_*}} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{P_t}{2(P_* - P_0)} \quad (17)$$

式中: $P_*$  为欧拉临界应力; $P_0$  取各塔段斜材轴力时程的均方根; $P_t$  根据风速时程幅值与均方根的关系,统一取为  $0.2P_0$ <sup>[26]</sup>。由此可求得以 30 m/s 为基本风速、1 m/s 为增量,不同风速下塔段 5 和塔段 7

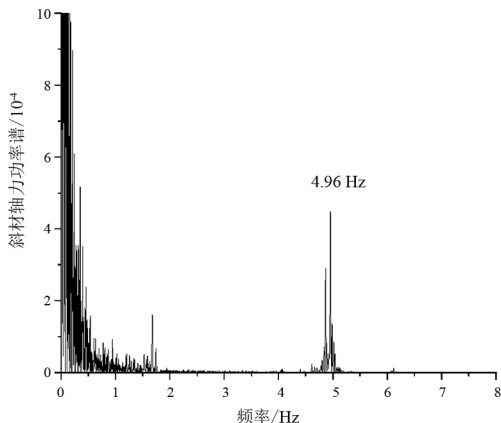


图 11 30 m/s 风速下塔段 7 斜材轴力功率谱密度

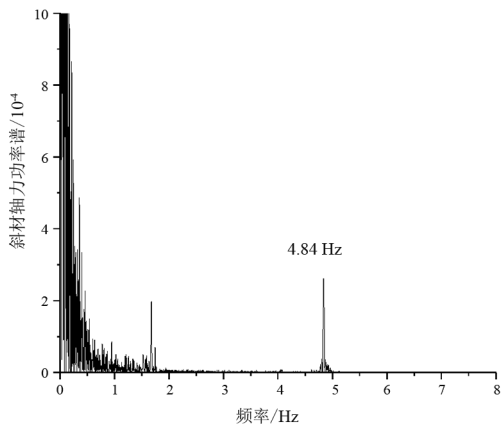


图 12 30 m/s 风速下塔段 7 增设横隔面后斜材轴力功率谱密度

增设横隔面前后的斜材动力稳定性参数,见表 5。

将各个风速下塔段 5 和塔段 7 增设横隔面前后斜材动力稳定性参数与动力不稳定区域绘制在同一个参数平面内<sup>[27]</sup>,如图 13、图 14 所示。即可结合动力不稳定区域理论,判断不同塔段斜材增设横隔面前后的动力失稳破坏风速,结果见表 6,从而验证不同区域增设横隔面提高杆件动力稳定性的有效性。

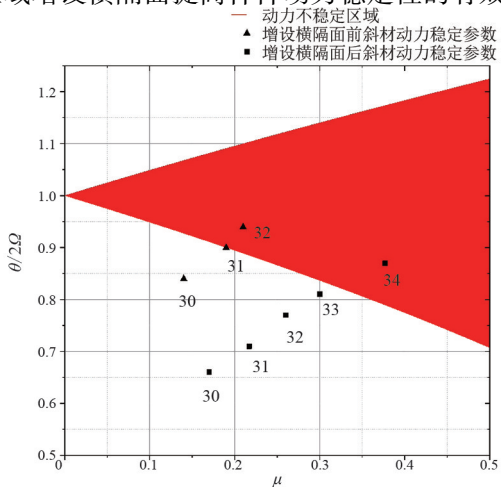


图 13 塔段 7 斜材动力稳定参数



表 5 增设横隔面前后斜材动力稳定性参数

位置	杆塔类型	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\omega/\text{Hz}$	$P_n/N$	$P_0/N$	$P_l/N$	$\Omega/\text{Hz}$	$\mu$	$\theta/\text{Hz}$		
塔段 7 斜材	ZY2 原塔	30	4.61	18 946 332	11 151 555	2 230 311	2.95	0.140	4.96		
		31	4.61	18 946 332	12 341 808	2 468 361	2.72	0.190	4.92		
		32	4.61	18 946 332	12 903 668	2 580 733	2.60	0.210	4.89		
	增设横隔面后的 ZY2 输电塔	30	6.01	18 946 332	11 890 701	2 378 140	3.66	0.170	4.84		
		31	6.01	18 946 332	12 862 643	2 572 529	3.40	0.217	4.85		
		32	6.01	18 946 332	13 622 026	2 724 405	3.18	0.260	4.89		
		33	6.01	18 946 332	14 184 968	2 836 994	3.01	0.300	4.87		
		34	6.01	18 946 332	14 918 637	2 983 727	2.77	0.380	4.84		
		塔段 5 斜材	ZY2 原塔	30	4.61	26 860 117	13 712 879	2 742 576	3.23	0.100	4.96
				31	4.61	26 860 117	15 242 183	3 048 437	3.03	0.130	4.92
32	4.61			26 860 117	15 853 766	3 170 753	2.95	0.143	4.89		
33	4.61			26 860 117	16 796 636	3 359 327	2.82	0.170	4.95		
34	4.61			26 860 117	17 593 936	3 518 787	2.71	0.190	4.87		
增设横隔面后的 ZY2 输电塔	30		6.01	26 860 117	13 858 404	2 771 680	4.18	0.110	4.84		
	31		6.01	26 860 117	15 523 304	3 104 660	3.90	0.140	4.85		
	32		6.01	26 860 117	16 240 594	3 248 118	3.77	0.150	4.89		
	33		6.01	26 860 117	17 230 555	3 446 111	3.60	0.180	4.87		
	34		6.01	26 860 117	18 196 864	3 639 372	3.41	0.210	4.84		
35	6.01	26 860 117	18 513 286	3 702 657	3.35	0.220	4.87				
36	6.01	26 860 117	19 887 635	3 977 527	3.06	0.290	4.84				
37	6.01	26 860 117	20 529 840	4 105 968	2.92	0.320	4.86				

表 6 斜材失稳风速

塔段	失稳风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		提高效率/%
	增设横隔面前	增设横隔面后	
7	31	34	20.3
5	35	37	11.8

## 4 结 论

上面通过建立 220 kV 同塔双回路输电线路某输电塔的塔线耦联体系有限元模型,分析得到以下结论:

1) 在靠近塔腿节间的交叉斜材处增设横隔面可以有效抑制输电塔局部振型;

2) 塔线耦联体系模型与单塔模型的输电塔整体振型频率有较大差别,说明塔线耦联作用的影响不可忽视;

3) 结合动力不稳定区域理论可以发现,增设横隔面可以显著延缓斜材进入动力不稳定区域,最高可将其失稳破坏风速提高 3 m/s,从而提高输电塔的动力稳定性;

4) 靠近塔腿处的塔段斜材动力稳定性提高效率最高。

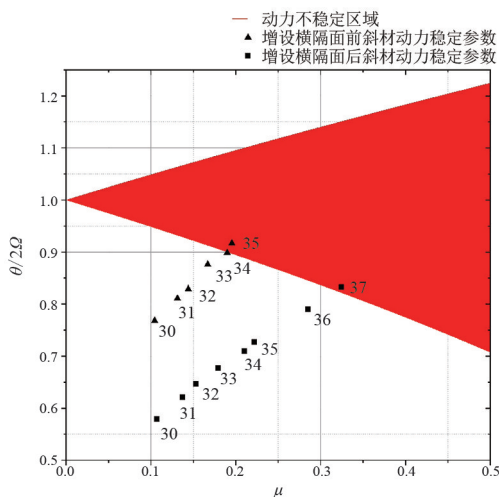


图 14 塔段 5 斜材动力稳定参数



## 参考文献

- [1] 侯景鹏,孙自堂,吴兴宏,等.输电塔抗风稳定分析[J].水电能源科学,2011,29(3):169-171.
- [2] HUFF M, CARROLL H B. Hurricane Carla at Galveston, 1961 [J]. Southwestern Historical Quarterly, 1962, 65(3):293-309.
- [3] 谢强,李杰.电力系统自然灾害的现状与对策[J].自然灾害学报,2006,15(4):126-131.
- [4] 河北省电力勘测设计研究院. 7.24 辛-彭 500 kV 线路倒塔故障原因初步分析报告[R]. 石家庄:河北省电力勘测设计研究院,2009: 2-11
- [5] 钟岱辉,李荣帅,王文明.输电塔-线体系灾变机理研究综述[J].四川建筑科学研究,2020,46(3):37-45.
- [6] 陈李那.提高沿海台风区 500 kV 输电线路抗风能力措施[J].能源与环境,2020(4):113-116.
- [7] MOMOMURA Y, MARUKAWA H, OKAMURA T, et al. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 72:241-252.
- [8] 谢强,张勇,李杰.华东电网 500 kV 任上 5237 线爬线风致倒塔事故调查分析[J].电网技术,2006,30(10):59-63.
- [9] 柳国环,李宏男.高压输电塔-线体系风致动力响应分析与优化控制[J].中国电机工程学报,2008,28(19):131-137.
- [10] 谢强,李继国,严承涌,等.1000 kV 特高压输电塔线体系风荷载传递机制风洞试验研究[J].中国电机工程学报,2013,33(1):109-116.
- [11] LIANG S G, ZOU L H, WANG D H, et al. Investigation on wind tunnel tests of a full aeroelastic model of electrical transmission tower-line system [J]. Engineering Structures, 2015, 85:63-72.
- [12] CIGRE working group 22.08. Diaphragms for lattice steel supports [C]. Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques a Haute Tension (CIGRE), Paris: 2002.
- [13] 谢强,阎启,李杰.横隔面在高压输电塔抗风设计中的作用分析[J].高电压技术,2006,32(4):1-4.
- [14] 谢强,孙力,林韩,等.500 kV 输电杆塔结构抗风极限承载力试验研究[J].高电压技术,2012,38(3):712-719.
- [15] 楼文娟,姜雄,夏亮,等.长横担输电塔风致薄弱部位及加强措施[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(10):1798-1804.
- [16] SHASTRY B P, RAO G V. Dynamic stability of bars considering shear deformation and rotatory inertia [J]. Computers and Structures, 1984, 19(5-6):823-827.
- [17] SHASTRY B P, RAO G V. Dynamic stability of short cantilever columns subjected to distributed axial loads [J]. Computers and Structures, 1986, 22(6):1063-1064.
- [18] CAI Yunzhu, XIE Qiang, XUE Songtao, et al. Fragility modelling framework for transmission line towers under winds [J]. Engineering Structures, 2019, 191: 686-697.
- [19] 唐磊,张盈哲,谢强.高压输电塔线耦联体系抗风动力静力计算对比分析[C]//2013年中国电机工程学会年会论文集.成都:中国电机工程学会学术委员会,2013:1567-1573.
- [20] 张松海,施心陵,李鹏,等.基于动态拉力与倾角的输电线路覆冰过程辨识与建模[J].电力系统保护与控制,2016,44(9):57-61.
- [21] 符·华·鲍洛金著,林砚田译.弹性体系的动力稳定性[M].北京:高等教育出版社,1960.
- [22] 阎启.基于物理机制的随机风场模型研究[D].上海:同济大学,2011.
- [23] 能源行业电网设计标准化技术委员会.架空输电线路荷载规范:DL/T 5551—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [24] XIE Qiang, CAI Yunzhu, XUE Songtao. Wind-induced vibration of UHV transmission tower line system: wind tunnel test on aero-elastic model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 219-229.
- [25] 李悦,谢强,张骥,等.随机风场作用下输电塔线体系的杆件动力稳定性评估[J].高电压技术,2023,49(3):1234-1243.
- [26] 张骥.输电塔-线体系耦联振动特性与失稳破坏机理研究[D].上海:同济大学,2020.
- [27] 李悦.强风作用下输电塔-线耦联体系连续性倒塌机理分析[D].上海:同济大学,2023.

## 作者简介:

李钰睿(1999),女,硕士研究生,研究方向为输电线路抗风;

谢强(1971),男,博士,教授,研究方向为电力设备防灾减灾;

李悦(1993),女,博士,工程师,从事结构分析工作。

(收稿日期:2023-06-27)