

引用格式: 杨子烨, 王梦薇, 匡春霖, 等. 强风作用下 110 kV 换向分支杆风振响应和薄弱位置分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 48-57. YANG Ziye, WANG Mengwei, KUANG Chunlin, et al. Wind-induced vibration response and weak locations of 110 kV diverging branch rods under strong wind [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 48-57. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-328.

强风作用下 110 kV 换向分支杆 风振响应和薄弱位置分析

杨子烨^{1,✉}, 王梦薇¹, 匡春霖², 施伟国¹, 何畅²

(1. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200233;

2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

摘要: [目的] 换向分支杆横担相互垂直布置, 截面尺寸随高度线性变化, 结构建模难度大, 相应的结构分析还未开展。[方法] 为了分析强风作用下换向分支杆的风振响应和薄弱位置, 建立壳单元有限元模型得到其真实模态, 并对非结构构件进行简化, 提出简化的梁单元有限元模型, 对比模态和频率验证其有效性。通过不同风向角下的动力响应分析, 研究 90°、60°、45°、0° 风向角下换向分支杆的应力响应和位移响应, 得到不同风向角下的薄弱位置。[结果] 研究表明换向分支杆的模态以弯曲变形为主, 扭转的影响可以忽略; 90° 风向角下塔顶最大风振位移超过相关规定限值, 塔身根部应力最大; 45° 风向角下塔顶位移最小, 但塔身根部应力仅次于 90° 风向角。90° 风向角下为最不利工况。[结论] 换向分支杆的设计控制参数为塔顶位移, 此外, 塔身根部应力较大较危险。在设计风速 29 m/s 不同风向角下, 换向分支杆的稳定性满足要求, 但是塔顶位移超过限值, 已建设的应进行加固, 计划建设的可以考虑减小档距或增大截面以避免位移超限。

关键词: 换向分支杆; 风振响应; 风向角; 薄弱位置; 有限元模型

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-328

文章编号: 2095-8676(2025)02-0048-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-328

中图分类号: TK8; TU347



论文二维码

Wind-Induced Vibration Response and Weak Locations of 110 kV Diverging Branch Rods Under Strong Wind

YANG Ziye^{1,✉}, WANG Mengwei¹, KUANG Chunlin², SHI Weiguo¹, HE Chang²

(1. Economic & Technological Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200233, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: [Objective] The cross arms of the diverging branch rods are arranged perpendicularly, with cross-sectional dimensions varying linearly with height. Due to the complexity of structural modeling, corresponding structural analysis has not yet been conducted. [Method] To analyze the wind-induced vibration response and weak locations of diverging branch rods under strong wind conditions, a shell element finite element model was established to obtain its true mode shapes and a simplified beam element finite element model was proposed. Non-structural components were also addressed. The validity of the simplified model is verified by comparing mode shapes and frequencies. Dynamic response analysis under wind attack angles of 90°, 60°, 45°, and 0° were conducted to study the wind-induced vibration response and identify weak locations at various angles. [Result] The study shows that the mode shapes of diverging branch rods are primarily characterized by bending deformation, with negligible influence from torsion. Under a 90° wind reaction angle, the maximum wind-induced displacement at the top of the tower exceeds the relevant specified limits, and the stress at the base of

收稿日期: 2024-09-25 修回日期: 2024-11-20

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目“上海典型换向分支钢管杆结构风振响应及实用设计方法研究”(52090R240001)

the tower is the highest. Under a 45° wind reaction angle, the displacement at the top of the tower is the smallest, but the stress at the base is second only to that under a 90° wind reaction angle. The 90° wind reaction angle represents the most adverse condition. [Conclusion] The design control parameter for diverging branch rods is the displacement at the top of the tower. Additionally, the stress at the base of the tower is significant and poses a risk. Under different wind attack angles at a design wind speed of 29 m/s, the stability of the diverging branch rods meets the requirements, but the displacement at the top of the tower exceeds the limits. Existing diverging branch rods should be reinforced, while planned constructions can consider reducing span length or increasing cross-sectional area to avoid displacement exceeding limits.

Key words: diverging branch rods; wind-induced vibration response; wind reaction angle; weak location; finite element model

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

上海地区输电线路走廊稀缺, 因此输电导线换向、支接多采用换向分支钢管杆结构。换向分支杆高度高, 横担相互垂直布置导致风荷载作用下结构受力复杂。此外横担和主杆均采用沿长度方向截面变化的正多边形钢管, 结构建模难度较大。针对强风作用下换向分支杆的结构响应分析还未开展。

电力系统在自然灾害下的损失严重^[1-4]。而输电线路分布广泛, 强风作用下输电塔倒塔事故频繁发生。目前针对输电线路的研究大多聚焦于钢管塔和角钢塔, 如输电塔抗风能力的实用评估^[5-7], 强风下的倒塌分析^[8-10]以及风致结构响应分析^[11-14]。相应的输电塔建模大部分采用梁单元有限元模型, 例如杨风利等^[15]建立了 500 kV 大跨越钢管塔模型并提出了风振系数的计算方法; 张丽娟^[16]等利用 1 MV 钢管塔梁单元模型进行倒塌破坏模拟, 并用真型倒塌破坏试验验证了模型的有效性; 邓洪洲^[17]等人对钢管塔建立多尺度有限元模型, 整塔采用梁单元, 塔脚采用壳单元, 分析了塔脚节点的承载力。而对于沿长度方向截面变化的正多边形钢管组成的换向分支杆相应的建模方法和风振响应分析较少, 有必要获得可用于进行风振响应计算的有限元模型, 并在此基础上对其风振响应和薄弱位置进行分析, 为换向分支杆工程设计和应用提供参考。

文章以上海地区某 110 kV 典型换向分支钢管杆塔结构为研究对象, 通过建立壳单元有限元模型得到其真实的模态, 并提出简化的梁单元有限元模型, 对比模态和频率验证其有效性。通过不同风向角下的动力特性和响应分析, 研究不同风向角下换向分支杆的风振响应, 得到不同风向角下的薄弱位

置以及设计控制因素, 为上海地区输电线路结构的工程设计提供参考。

1 典型换向分支杆

1.1 设计信息

本文中的典型换向分支杆取自上海某 110 kV 输电线路, 主要设计参数如下:

- (1) 电压等级: 110 kV;
- (2) 该输电塔总高: 54.3 m; 呼高: 30 m; 根开: 2.1 m;
- (3) 回路数: 三回路;
- (4) 导地线型号:

地线: JLB20A-100-FJ, 自重 0.6767 kg/m, 直径 15.20 mm, 截面积 121.1 mm², 弹性模量 153 900 MPa, 破断张力 135 200 N, 年平均运行张力比为 0.16;

导线: JL3/G1A-240/30, 自重 0.9215 kg/m, 直径 21.60 mm, 截面积 276.00 mm², 弹性系数 70 500 MPa, 破断张力 75 190 N, 年平均运行张力比为 0.167, 为 2 分裂导线。

该典型换向分支杆塔体采用正十六边形方管, 基础处方管边对边距离为 2 100 mm, 顶部方管边对边的距离为 500 mm。杆塔总高 54.3m, 如图 1 所示。

塔体各分段截面和材料性质以及详细的横担截面参数信息和材料信息如表 1 所示。7 组横担包括 1 组地线横担和 6 组导线横担, 其中地线横担为 45° 方向, ②④⑥ 3 组导线横担为 0° 方向, ③⑤⑦ 3 组导线横担为 90° 方向。

1.2 线路信息

该换向分支杆的转向设计及导地线布置如图 2 所示, 设计档距分别为前档距 180 m 和

后档距 90 m, 线路转角为 90°, 最大设计风速为 29 m/s。

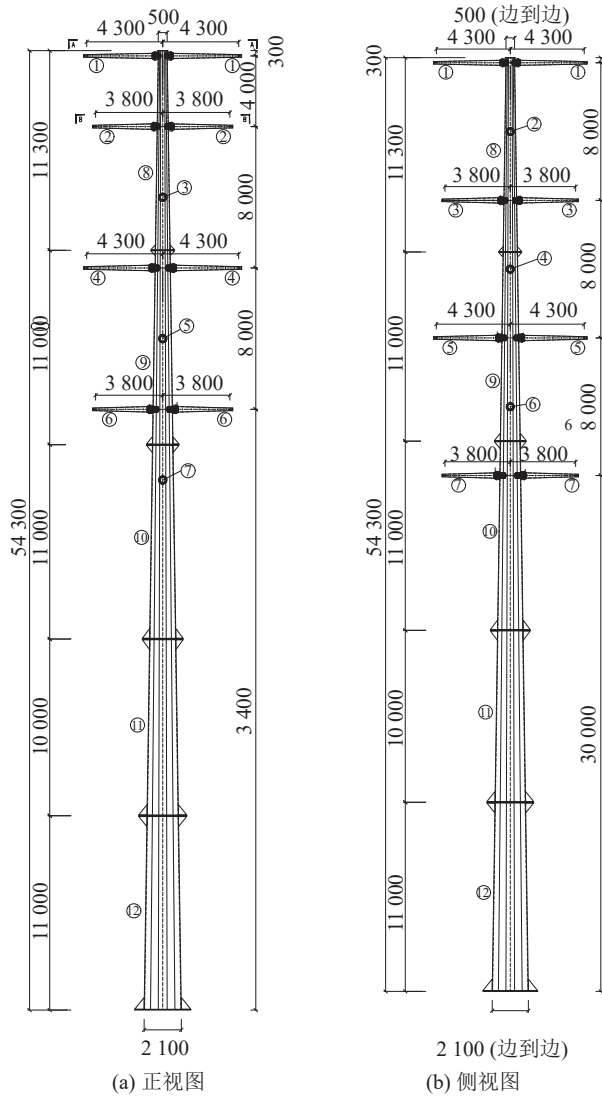


图 1 典型换向分支杆设计信息

Fig. 1 Design information of typical diverging branch rod

表 1 换向分支杆结构参数

Tab. 1 Structural parameters of the diverging branch rod

编号	长度/mm	上截面 宽度/mm	下截面 宽度/mm	材料 厚度/mm	材料 强度/MPa
①	5667	150	300	8	355
②	3337	150	320	8	355
③	3278	150	320	8	355
④	3719	150	320	8	355
⑤	3660	150	320	8	355
⑥	3101	150	320	8	355
⑦	3042	150	320	8	355
⑧	11300	500	833	10	420
⑨	11000	833	1157	18	420
⑩	11000	1157	1481	22	420
⑪	10000	1481	1775	22	420
⑫	11000	1775	2100	22	420



图 2 换向分支杆线路信息示意图

Fig. 2 Information of the line with diverging branch rod

2 换向分支杆有限元模型

2.1 壳单元有限元模型

本文有限元分析采用 ABAQUS 软件, 换向分支杆模型的材料本构关系采用理想弹塑性模型, 在满足足够计算精度的要求下提高计算效率。所研究输电塔为钢管塔, 构件由钢管构成, 杆件长度方向尺寸远大于其他 2 个方向尺寸, 可以选用壳单元计算沿构件长度方向的应力变化, 因此选用 shell188 壳单元考虑沿长度方向截面尺寸的改变。单元质量恒定且连续。构件根据长度的不同划分为多个单元。每个单元两端节点有 3 个方向平动和 3 个方向转动自由度, 应力梯度计算方法为二次插值方法。输电塔杆塔的壳单元有限元模型如图 3 所示。

塔身结构的边界条件为通过嵌固方式(Encastre)约束塔腿节点, 符合实际工程中输电塔结构与混凝土基础共同浇筑以及与高强螺栓的连接方式。此外, 建模的过程中由于换向分支杆塔身不同塔段之间以

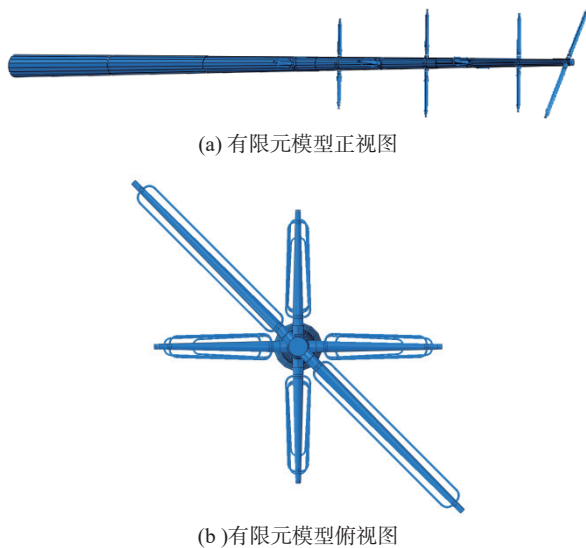


图 3 换向分支杆壳单元有限元模型

Fig. 3 Finite element model of diverging branch rod

及塔身和横担之间均采用法兰连接, 可以视为固结, 因此在节点处理上模型中的节点均设置为固结。杆塔总质量为 62 765.8 kg, 分割有限元单元总数为 37 229, 节点总数为 37 977。

2.2 模态分析

模态分析是研究结构的动态特性、振动分析和动态优化的常用方法。文中对换向分支杆进行模态分析, 如表 2 所示, 该典型换向分支杆的模态主要以弯曲模态为主, 由于导线横担的对称布置以及地线横担布置在 45° 方向, 结构的前四阶模态以对称轴方向的一阶和二阶弯曲为主, 其中一阶弯曲的频率在 0.80 ~ 0.81 Hz 附近, 更容易发生一阶弯曲。

表 2 有限元模型及简化模型模态信息

Tab. 2 Mode information of finite element model and simplified model

阶数	模态	有限元模型 频率/Hz	简化模型 频率/Hz	误差/%
1	45° 方向弯曲	0.80797	0.80522	0.34
2	-45° 方向弯曲	0.81052	0.80568	0.60
3	45° 方向二阶弯曲	2.6124	2.6219	0.37
4	-45° 方向二阶弯曲	2.6751	2.6520	0.87

2.3 简化梁单元有限元模型

换向分支杆壳单元模型在网格划分后单元数目较多, 进行动力分析时存在着计算时间长、计算效率低的问题。而梁单元模型早已被证明可以用于输电

线路的建模, 但针对换向分支杆的特点需要解决两个问题: (1) 附加钢管以及法兰的重量; (2) 如何采用梁单元模拟变截面的正多边形钢管。

首先考虑到同一横担的附加钢管基本在同一高度处, 而风振系数则主要随高度进行变化。本研究将附加钢管的重量简化到横担上, 杆身法兰及法兰加劲板等附属连接装备采用与附加钢管同样的方法进行简化, 通过改变横担的材料密度, 将附加钢管的质量平均分配, 使结构动力特性保持一致。然后针对变截面钢管采用多段模拟的形式进行处理, 如 54.3 m 的塔身部位按 1 m 分段, 共分成 55 段, 每段的截面取其平均高度处对应的钢管截面, 而横担则按 0.5 m 分段, 截面的取法与塔身钢管一致。选用 B31 梁单元进行建模, 简化梁单元有限元模型如图 4 所示。

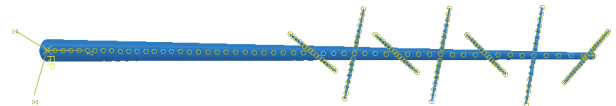


图 4 换向分支杆简化梁单元有限元模型

Fig. 4 Finite element model of diverging branch rod with beam elements

2.4 简化模型验证

对简化梁单元进行模态分析, 与壳单元模态分析的频率对比结果如表 2 所示, 一阶和三阶模态形状的云图对比如图 5 所示。简化模型前四阶模态的最大误差为 0.87%, 可以忽略。而结构的一阶振型与壳单元模型一致, 均为 45° 方向的半波弯曲。而三阶振型均为 45° 方向的 S 形的二阶弯曲。从振动模态和振动频率的角度, 可以看出简化梁单元模型可准确反映换向分支杆的动力特性, 可以用于后续的动力响应分析。

3 风振响应分析

3.1 动力风场模拟

考虑到上海地区强风大多为台风导致, 而相关研究认为用对数律描述平均风剖面规律与台风实际观测结果更加吻合^[18-19], 因此本文采用对数律描述输电塔中各节点的风速时程曲线, 其表达式为:

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{\kappa} u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中:

κ —— Von Karman 常数, 一般取为 0.4;

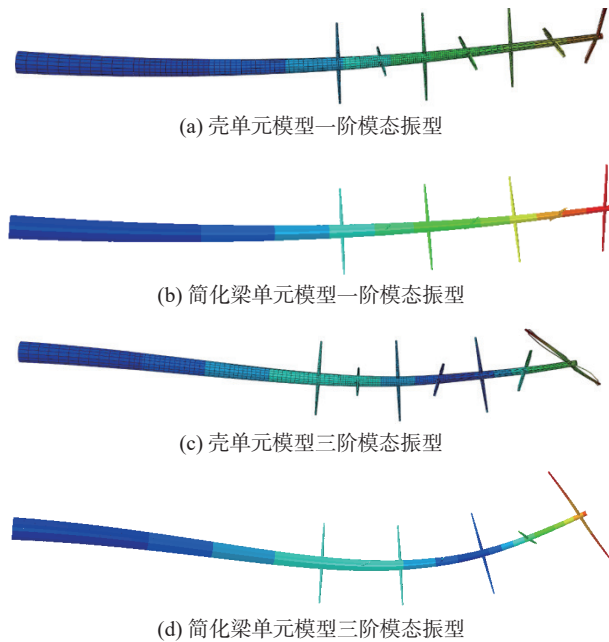


图 5 简化模型一阶和三阶模态振型对比

Fig. 5 Comparison of the first and third-order mode shape of the simplified model

z_0 ——地面粗糙长度(m), 根据不同地貌取不同值, 但一般大于地面障碍物高度 1/10, 其物理含义为风速等于 0 的高度;

u_* ——剪切波速(m/s), 反映地面障碍物对气流的摩阻效应, 其值可根据标准高度 z_r 及该处的平均风速 \bar{U}_r 计算。

脉动风是由气流中的湍流产生的, 所以在计算分析所关注的时间段内可以认为脉动风是基于平均风的平稳各态历经随机过程, 其均值为 0。本文选用 Kaimal 谱作为后续随机风场模拟的基础风谱。因为换向分支杆的高度为 54.3 m, 需要考虑高度对风场能量分布的影响, 而 Kaimal 谱的自变量中考虑了高度, 其表达式如下所示

$$\frac{nS_u(z, n)}{u_*^2} = \frac{200f_z}{(1 + 50f_z)^{5/3}} \quad (2)$$

$$f_z(n) = nz/W(z) \quad (3)$$

式中:

n ——涡旋的自然频率(Hz);

$W(z)$ —— z 高度处的平均风速(m/s)。

在随机傅里叶谱^[20]的基础上, 模拟换向分支杆的随机风场, 场地类别为 B 类, 地面粗糙长度为 0.05 m。换向分支杆分为 12 个塔段或组件, 每个塔

段或组件计算中点位置处的脉动风速。导、地线则以挂点处计算脉动风速。取采样频率为 10 Hz, 即 $dt=0.1$ s, 总时长为 120 s。以 29 m/s 基本风速为例, 得到的导、地线挂线点风速时程如图 6 所示。对应的功率谱如图 7 所示。

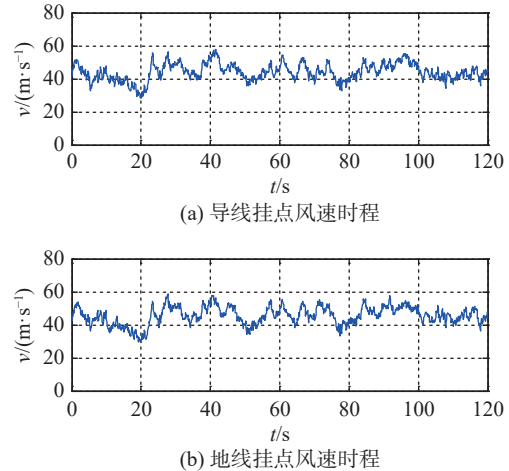


图 6 导、地线风速时程图

Fig. 6 Wind speed time history diagram for conductor and ground lines

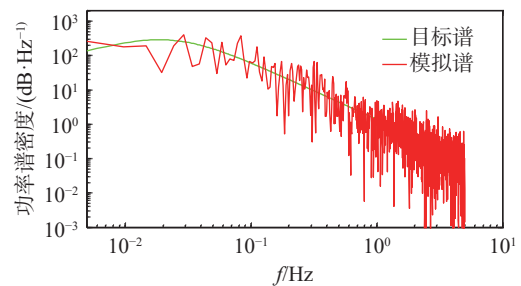


图 7 换向分支杆顶功率谱

Fig. 7 Power spectral density at the top of the diverging branch rod

在得到风速时程后按规范^[21]规定将风荷载施加到换向分支杆节点上。风荷载激励均采用集中力施加的方式。每段的动力风荷载通过第 3.1 节动力风场模拟中的理论计算后以集中力的形式施加到塔段的中间节点上。因为模型采用简化梁单元, 每个塔段被简化为不同截面的梁单元的直线, 对塔段中部位的梁单元进行打断, 将风荷载施加到这个位置, 如图 8 所示。其次, 针对导线和绝缘子串荷载, 其施加方式与塔身风荷载类似, 将导线和绝缘子串荷载通过动力风场模拟获得后以集中力的形式施加到挂线点处, 风荷载施加方向为垂直横担方向, 重力荷载

的施加方向为竖直向下。针对不同风攻角下风荷载的分配原则, 本文参考《架空输电线路荷载规范》(GB5154—2018)^[21] 中表 4.2.10(角度风吹时风荷载分配表)进行分配。

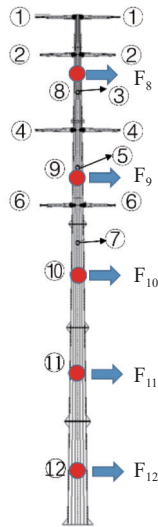


图 8 塔身风荷载施加位置

Fig. 8 Applied location of wind load in the tower

3.2 90°风向角下风振响应分析

在风荷载作用下, 输电塔的位移响应可以通过功率谱分析, 识别出其主要振动频率及对应的能量峰值。90°风向角下的响应功率谱如图 9 所示。在输电塔的位移功率谱中, 第一个高幅值频率为 0.81 Hz, 对应的幅值为 0.48, 说明在该频率下, 结构的振动响应最为显著。这一现象可以解释为输电塔在风荷载作用下, 主要的振动模式集中在一阶和二阶振型, 这与结构的固有频率相匹配。第二个高幅值频率的频

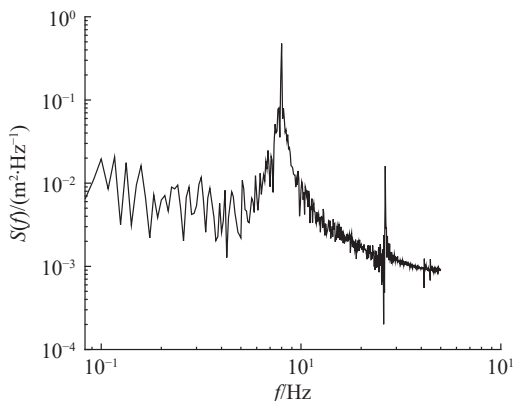


图 9 塔身顶点顺风向位移功率谱

Fig. 9 Power spectral density at the top of the diverging branch rod along the wind direction

率为 2.64 Hz, 对应的幅值为 0.016。这表明在该频率下, 结构的振动响应相对较小, 对应为三阶和四阶振型。尽管三阶和四阶振型的存在对整体结构的动态响应有一定影响, 但其能量贡献相对较小。

塔身顶点顺风向位移响应如图 10 所示, 可以看出塔顶节点的位移随风荷载脉动, 其均值为 0.405 m, 最大位移响应为 1.184 m。横担端点的位移响应和塔顶节点基本相同, 这说明 90°风向角下地线横担并没有明显的扭转响应, 且风荷载作用下横担的变形也较小, 位移响应主要由顺风向弯曲控制, 这与功率谱中第一峰值的位置对应弯曲变形一致。

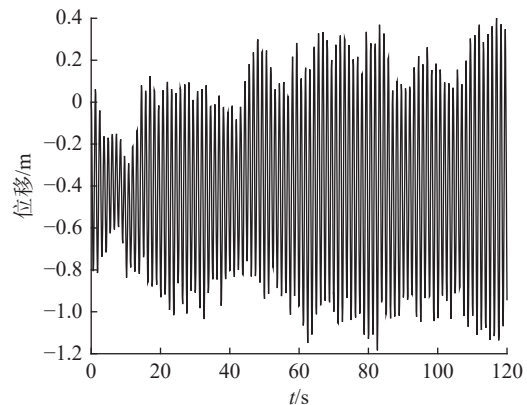


图 10 90°风向角下塔身顶点顺风向位移响应

Fig. 10 Power spectral density at the top of the diverging branch rod perpendicular to the wind direction

选取 90°风向角下塔顶位移最大时刻, 其 Mises 应力分布情况如图 11 所示, 从图中可以看出 90°风向角下, 应力响应最大的位置在塔身底部, 其最大应力为 116.00 MPa。

3.3 60°、45°和 0°风向角下风振响应分析

60°、45°和 0°风向角下塔身顶点的位移响应如图 12 所示, 可以看出不同风向角下振动响应均相似, 响应趋势与风向角无关。最大位移随着风向角靠近 45°逐渐减小, 而 60°对应的最大位移则明显大于 0°。不同风向角下的结构 Mises 应力图如图 13 所示, 可以看出 45°风向角下的应力响应最大, 60°风向角次之, 0°风向角最小。

4 换向分支杆薄弱位置分析

通过对换向分支杆风振响应的研究, 可以全面了解换向分支杆在不同风向角下的动力响应特征, 确定结构的薄弱位置, 并提出相应的设计优化和加

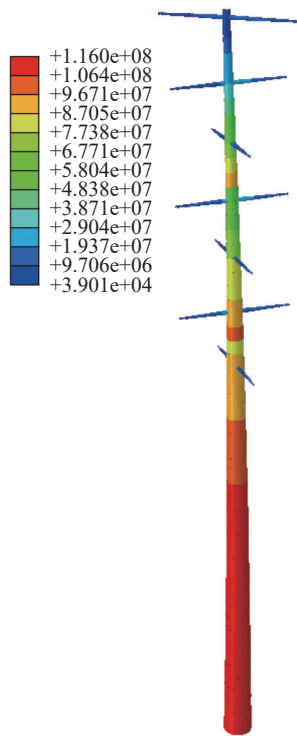


图 11 90°风向角下换向分支杆 Mises 应力图

Fig. 11 Mises stress of the diverging branch rod under the wind perpendicular to the wind direction

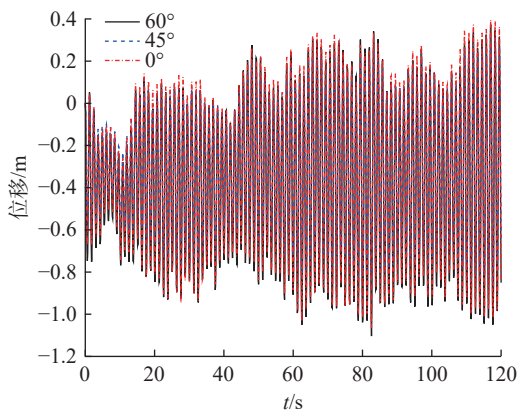


图 12 3 种风向角下塔身顶点位移响应对比

Fig. 12 The displacements at the top of rod under three different wind directions

固建议。这对于提升输电塔的抗风能力, 确保其在强风作用下的安全稳定运行具有重要意义。

如图 14 所示, 在不同风向下, 输电塔的最大风振位移表现出显著差异: 在 90°风向下塔顶最大位移最大, 为 1.164 m, 60°风向下次之为 1.079 m, 0°风向下为 1.047 m, 45°风向下最小为 0.868 m。这表明从最大塔顶位移看, 90°风攻角为塔顶位移最危险的角

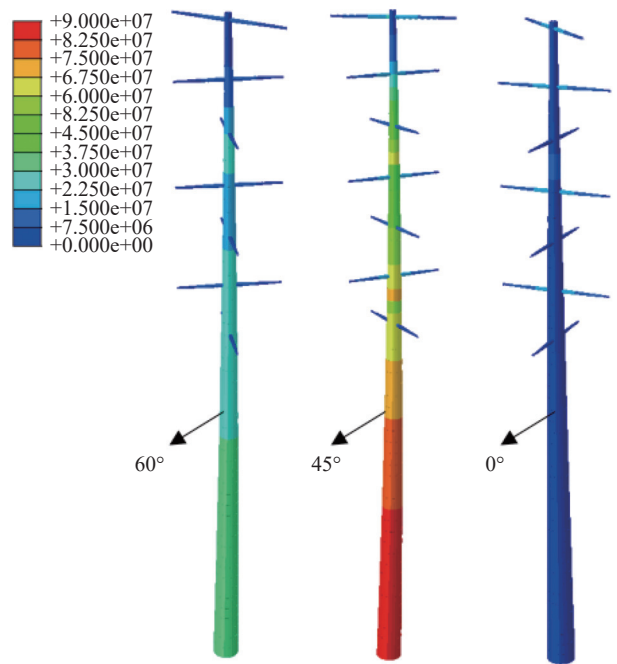


图 13 3 种风向角下换向分支杆 Mises 应力对比图

Fig. 13 The Mises stresses of the rod under three different wind directions

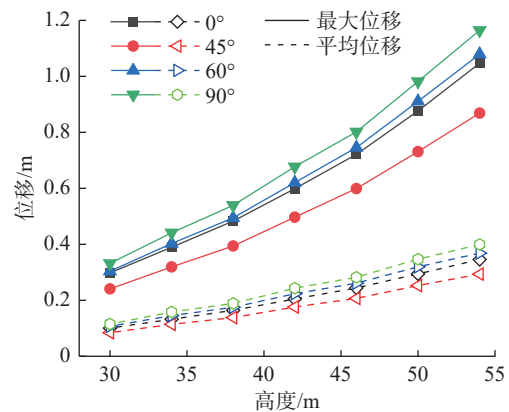


图 14 不同风向角下顶部位移响应对比

Fig. 14 Comparison of displacements at the top of the rods at different wind angles

度。随着风攻角减小到 45°, 塔顶位移逐渐减小; 而风攻角从 45°减小到 0°, 塔顶位移则逐渐增大。此现象反映了导线的风荷载作用引起了塔顶位移的变化, 由于两侧档距的差距, 90°风攻角下的位移响应明显大于 0°风攻角下的位移响应, 而斜向风即 45°风攻角下导线的荷载相比最低, 因此塔顶位移最小。

对于平均风振位移的影响, 在不同风向下, 输电塔的平均风振位移表现出一定差异。90°风攻角下平均位移为 0.399 m, 而随着风向角度的减小, 塔顶

平均位移减小到 0.368 m(60°风攻角)及 0.293 m(45°风攻角), 而风攻角从 45°减小到 0°, 位移增大到 0.346 m。从平均位移的角度看, 其变化趋势和塔顶最大位移相似, 说明风场中平均风和脉动风的作用效果在不同风攻角下基本相同。结构的平均位移与导线的荷载直接相关, 因此 90°风攻角为塔顶位移最危险的风攻角。

通过对比不同风向下的最大风振位移和平均风振位移, 分析不同风向下的风振特性, 可以看出 90°横向风影响最大。这是由于横向风直接作用于塔的侧面和档距较大的导地线, 产生较大的风压, 导致更大的振动。倾斜风如 60°和 45°次之, 60°风向下的振动位移次高, 表明倾斜风(接近横向)对塔的影响也较大。45°风向下的振动位移最低, 是因为该风向下导地线的风荷载最小。0°风攻角下的影响仅大于 45°, 这是因为 0°风攻角作用下导地线的档距远远低于 90°时的档距, 因此风振响应较小。

不同风向角下换向分支杆的应力和位移如表 3 所示, 可以看出 0°风向角对应顺风方向, 风力直接作用在塔的正侧面。虽然最大应力较低, 但最大塔顶位移较大, 说明在正面风力作用下, 整体位移较明显。应力较低则是因为风的方向和不平衡张力作用方向相反, 作用力进行部分抵消, 降低了根部应力。45°风向角对应斜风方向, 风力同时作用在塔的侧面和正面。最大应力显著增大, 发生在塔身根部, 表明斜风对塔身的应力集中效应明显。60°风向角对应较大的斜风方向, 最大应力较 45°有所减少, 但仍较高, 发生在塔身根部。此风向角下最大塔顶位移有所增加, 表明此角度下塔顶振动显著。90°风向角对应横风方向, 最大应力最高, 发生在塔身根部, 表明横风对塔身的应力影响最为显著, 此时最大塔顶位移也最大, 表明横风引起的整体振动最剧烈。

对比不同风向角下的最大应力和对应部位可以

表 3 不同风向角下换向分支杆薄弱位置分析

Tab. 3 Analysis of weak position of diverging branch rod at different wind angles

风向角	最大应力/ MPa	最大应力 对应部位	最大塔顶 位移/m	平均塔顶 位移/m
0°	22.41	地线横担根部	1.064	0.351
45°	86.69	塔身根部	0.890	0.300
60°	54.32	塔身根部	1.104	0.376
90°	116.00	塔身根部	1.184	0.405

发现, 在 0°风向角下最大应力为 22.41 MPa, 出现在地线横担根部。而在 45°、60°和 90°风向角下最大应力分别为 86.69 MPa、54.32 MPa 和 116.00 MPa, 出现在塔身根部。这说明从应力的角度看, 塔身根部相较于其他部位更危险。对于塔身根部的应力, 由于工程设计允许的最大应力 110.00 MPa, 90°风攻角下其实际应力已经超过了设计允许应力, 而其他风攻角下均未超过工程设计中该段允许最大应力。因此, 90°风攻角为结构应力响应最大的角度。

通过对比不同风向角下的最大和平均塔顶位移, 可以得出以下结论: 随着风向逐渐从垂线路方向(0°和 90°)过渡到斜向风方向, 塔顶的最大位移和平均风振位移均会减小。由于 90°方向对应的线路档距(180 m)大于 0°方向对应的线路档距(90 m), 所以最大位移较高。根据《高耸结构设计规定》, 对于以风荷载为主的荷载标准组合作用下, 其水平位移角限值为 1/50, 而该典型换向分支杆的总高为 54.3 m, 对应的水平位移值为 1.086 m, 本文 90°风向角下换向分支杆顶部位移超过限值, 塔顶位移应为其设计中的控制因素。在实际工程应用中, 针对已建设的换向分支杆可以考虑采用一定的加固措施来减小最大塔顶位移; 而针对计划建设的换向分支杆, 可以考虑减小档距或增大截面来避免最大位移超限。另外, 从分析中可得, 90°大风工况为最危险工况, 而 45°和 90°风向角下应力响应均较大, 因此绘制 2 种风向角下主材应力随高度变化的趋势如图 15 所示。

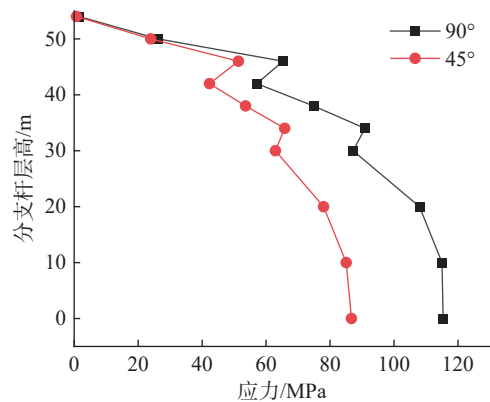


图 15 不同风向角下主材应力随高度变化

Fig. 15 The stress of main bars with height at different wind angles

在 90°风向角下, 输电塔的应力分布随高度变化呈现出一定的规律性: 塔身根部(0 ~ 30 m): 应力最高, 0 m 高度处最大应力为 115.35 MPa, 10 m 高度处

为 115.00 MPa, 20 m 高度处为 107.99 MPa。而在横担对应处出现了一定的主材应力增大现象, 此现象是由于横担上的风荷载导致横担根部的弯矩较大, 因此主材的应力得到了一定的增大。在 45°风向角下, 输电塔的应力分布也表现出类似的规律性, 但整体应力水平低于 90°风向角。

分析不同风向角下的应力分布, 可知塔身根部是最薄弱环节, 不论是 90°还是 45°风向角, 塔身根部 (0~20 m) 都是应力最高的部位, 特别是在 90°风向角下, 最大应力达 115.35 MPa。由于塔身根部支撑整个结构, 受力集中且复杂, 易发生破坏, 应当在设计中关注强度指标。此外, 对于与风向垂直的横担部位, 风荷载将引起法兰连接处的较大弯矩, 易造成主材应力增大, 且由于风荷载为反复荷载, 设计中需关注此处法兰连接的疲劳问题。

5 结论

本文通过建立典型换向分支杆有限元模型并进行不同风向角下的风振响应分析, 得到以下结论:

1) 基于梁单元提出的换向分支杆简化有限元模型与壳单元模型具有相同的振动特征和近似的振动频率, 证明了简化梁单元模型反映换向分支杆动力性能的有效性。

2) 换向分支杆在风荷载作用下, 主要的振动模式集中在一阶和二阶弯曲振型。换向分支杆结构的平均位移与导线的荷载直接相关, 90°风向角为结构基于塔顶位移考虑的最不利工况。

3) 90°风向角下, 换向分支杆最大应力发生在塔身根部, 表明横风对塔身的应力影响最为显著。此工况下最大塔顶位移达到最大且超过限值, 因此换向分支杆的设计控制参数为塔顶位移。

4) 在设计风速 29 m/s 不同风向角下, 换向分支杆的稳定性满足要求, 但是塔顶位移超过限值, 已建设的应进行加固, 计划建设的可考虑减小档距或增大截面以避免位移超限。

参考文献:

[1] 王建, 熊张恣, 南东亮, 等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 16-26. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231041.
WANG J, XIONG Z M, NAN D L, et al. Short-time risk assessment of a power grid in weather disasters considering the coupled faults of primary and secondary equipment [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(9): 16-26. DOI: 10.

19783/j.cnki.pspc.231041.
[2] ZHU W, XIE Q, LIU X, et al. Towards 500 kV power transformers damaged in the 2022 Luding earthquake: field investigation, failure analysis and seismic retrofitting [J]. *Natural hazards*, 2024, 120(7): 6275-6305. DOI: 10.1007/s11069-024-06476-6.
[3] 朱旺, 毛宝俊, 谢强. 1100 kV 特高压变压器套管震后力学性能快速评估方法 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(12): 4904-4914. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211322.
ZHU W, MAO B J, XIE Q. Fast evaluation method on post-earthquake mechanical performance of 1100 kV UHV transformer bushing [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(12): 4904-4914. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211322.
[4] 陈彬, 廖锦霖. 极端天气下多灾害地区配电网防灾能力提升技术综述及展望 [J]. *电力建设*, 2025, 46(1): 107-121. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.01.010.
CHEN B, LIAO J L. Technology for improving distribution network disaster-prevention capabilities for intercurrent natural disasters areas under extreme weather: review and prospect [J]. *Electric power construction*, 2025, 46(1): 107-121. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.01.010.
[5] 张佳毅, 占鹭林, 曹枚根, 等. 220 kV 双回路典型角钢输电塔动力特性及抗风性能评估 [J]. *钢结构 (中英文)*, 2023, 38(1): 29-36. DOI: 10.13206/j.gjgS22072002.
ZHANG J Y, ZHAN L L, CAO M G, et al. Evaluation of dynamic characteristics and wind resistance of 220 kV dual-loop typical angle steel transmission tower [J]. *Steel construction (Chinese & English)*, 2023, 38(1): 29-36. DOI: 10.13206/j.gjgS22072002.
[6] 袁杨, 朱辉良, 郭琳. 输电塔抗风能力的实用评估方法 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(增刊 1): 80-82, 9. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.017.
YUAN Y, ZHU H L, GUO L A. A practical algorithm for anti-wind capacity of transmission line towers [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(Suppl.1): 80-82, 9. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.017.
[7] 李宏男, 张文圣, 付兴. 基于大数据深度学习的输电塔结构抗风易损性评估 [J]. *土木工程学报*, 2022, 55(9): 54-64. DOI: 10.15951/j.tmgxb.21080847.
LI H N, ZHANG W S, FU X. Fragility assessment of a transmission tower subjected to wind load based on big data and deep learning [J]. *China civil engineering journal*, 2022, 55(9): 54-64. DOI: 10.15951/j.tmgxb.21080847.
[8] MA L Y, KHAZAALI M, BOCCHINI P. Component-based fragility analysis of transmission towers subjected to hurricane wind load [J]. *Engineering structures*, 2021, 242: 112586. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112586.
[9] 刘慕广, 黄琳玲, 谢壮宁. 雷暴风和良态风下输电塔气弹模型风洞试验 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(2): 594-602. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201706.
LIU M G, HUANG L L, XIE Z N. Wind tunnel testing of aeroelastic transmission tower under thunderstorm wind and boundary layer wind [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(2): 594-602. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201706.
[10] 毕文哲, 田利. 下击暴流作用下输电塔-线体系倒塌破坏研

- 究 [J]. *工程力学*, 2022, 39(增刊 1): 78-83. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S012.
- BI W Z, TIAN L. Study on the collapse failure of transmission tower-line system under downburst [J]. *Engineering mechanics*, 2022, 39(Suppl.1): 78-83. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S012.
- [11] 杨子焯, 朱超杰, 施伟国, 等. ± 1100 kV 特高压输电塔线体系风振响应分析 [J]. *山东电力技术*, 2024, 51(1): 11-23. DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.01.002.
- YANG Z Y, ZHU C J, SHI W G, et al. Wind induced vibration response analysis of ± 1100 kV ultra-high voltage (UHV) transmission tower line system [J]. *Shandong electric power*, 2024, 51(1): 11-23. DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.01.002.
- [12] 楼文娟, 蒋莹, 金晓华, 等. 台风风场下角钢塔风振特性风洞试验研究 [J]. *振动工程学报*, 2013, 26(2): 207-213. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2013.02.018.
- LOU W J, JIANG Y, JIN X H, et al. Wind tunnel test research on wind-induced vibration characteristics of angle steel tower in typhoon field [J]. *Journal of vibration engineering*, 2013, 26(2): 207-213. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2013.02.018.
- [13] 宋雪祺, 邓洪洲, 杨子焯, 等. 基于谱分析法考虑高阶振型大跨越输电塔风振响应分析 [J]. *结构工程师*, 2020, 36(4): 90-97. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.04.013.
- SONG X Q, DENG H F, YANG Z Y, et al. Analysis on wind-induced responses of long-span transmission tower based on spectral analysis method considering higher vibration modes [J]. *Structural engineers*, 2020, 36(4): 90-97. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.04.013.
- [14] 杨振宇, 谢强, 何清清, 等. 特高压多回路钢管塔体型系数风洞试验研究 [J]. *工业建筑*, 2019, 49(4): 1-7, 14. DOI: 10.13204/j.gyjz201904001.
- YANG Z Y, XIE Q, HE Q Q, et al. Wind tunnel tests on shape coefficient of a multi-circuit UHV steel tubular transmission tower [J]. *Industrial construction*, 2019, 49(4): 1-7, 14. DOI: 10.13204/j.gyjz201904001.
- [15] 杨风利, 陈兵, 许志勇, 等. 500 kV 长江大跨越输电塔风振系数研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(7): 2542-2555. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210839.
- YANG F L, CHEN B, XU Z Y, et al. Study on wind-induced vibration coefficients of the transmission tower in 500 kV long span line crossing the Yangtze River [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(7): 2542-2555. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210839.
- [16] 张丽娟, 刘正伟, 潘海洋, 等. 1000 kV 特高压钢管塔倒塌破坏试验与数值模拟 [J]. *钢结构 (中英文)*, 2019, 34(6): 19-24. DOI: 10.13206/j.gjg201906004.
- ZHANG L J, LIU Z W, PAN H Y, et al. Research on collapse failure test and numerical simulation of 1000-kilovolt ultra-high-voltage transmission tower [J]. *Steel construction*, 2019, 34(6): 19-24. DOI: 10.13206/j.gjg201906004.
- [17] 邓洪洲, 朱雯瑞, 黄斌, 等. 输电钢管塔典型塔脚节点承载力研究 [J]. *工程力学*, 2017, 34(9): 175-183. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.05.0375.
- DENG H Z, ZHU W R, HUANG B, et al. Study on the capacity of typical tower leg joint of transmission steel tubular tower [J]. *Engineering mechanics*, 2017, 34(9): 175-183. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.05.0375.
- [18] VICKERY P J, WADHERA D, POWELL M D, et al. A hurricane boundary layer and wind field model for use in engineering applications [J]. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2009, 48(2): 381-405. DOI: 10.1175/2008JAMC1841.1.
- [19] POWELL M D, VICKERY P J, REINHOLD T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones [J]. *Nature*, 2003, 422(6929): 279-283. DOI: 10.1038/nature01481.
- [20] 李杰, 张琳琳. 实测风场的随机 Fourier 谱研究 [J]. *振动工程学报*, 2007, 20(1): 66-72. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2007.01.013.
- LI J, ZHANG L L. Research on the random Fourier spectrum of observational wind [J]. *Journal of vibration engineering*, 2007, 20(1): 66-72. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2007.01.013.
- [21] 国家能源局. 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.
- National Energy Administration. Code for overhead transmission line loading: DL/T 5551—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.

作者简介:



杨子焯

杨子焯(第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 工程师, 土木工程博士, 主要从事输电线路设计及评审 (e-mail) 313049431@qq.com。

王梦薇

1988-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电网基建工程评审 (e-mail) mengwei_wang29@163.com。

匡春霖

2000-, 男, 硕士, 主要从事输电塔结构抗风研究 (e-mail) 1547467076@qq.com。

施伟国

1971-, 男, 高级工程师, 主要从事电力系统设计研究与管理工 (e-mail) zeus.olympus.2000@foxmail.com。



何畅

何畅

1992-, 男, 副教授、博导, 结构工程博士, 主要从事电力系统防灾减灾研究 (e-mail) hechang@csu.edu.cn。

(编辑 叶筠英)