第 24 卷第 2 期
2026 年 2 月

动 力 学 与 控 制 学 报
JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL

Vol. 24 No. 2
Feb. 2026

文章编号:1672-6553-2026-24(2)-074-010

DOI:10.6052/1672-6553-2025-088

风雨载荷作用下电网输电塔线体系响应特性分析

巩翔宇　马季　宋文峰†　关振松　胡亚琦　潘志军

(国网河南省电力公司周口供电公司,周口　466000)

摘要　风雨载荷对输电塔线体系的安全性有着重要影响.本文对某 110 kV 输电线路中塔线耦联体系在风雨载荷作用下的动力特性进行分析.首先,在 Ansys 软件中建立某 110 kV 输电塔线体系有限元模型,并进行模态分析.再结合 Davenport 风速谱与雨载荷相关理论,在 Matlab 中生成与加载节点对应的风雨耦合载荷.研究在此耦合载荷下的塔线体系的动力响应,并探究在不同风向角和有无雨载荷的情况下其动力响应的结果.结果显示:导地线在整体上增加了塔线体系刚度,但由于其自身在横线方向具有较强"舞动效应",导致其在横线方向和顺线方向耦联效应有所不同;90°风向角为塔线体系最不利风向角,此时塔线体系动力响应达到最大值;在降雨量为 20 mm/h 的情况下,计及雨载荷将增加塔线体系动力响应范围约为 5%～10%,雨载荷对单塔的作用几乎可以忽略不计,其主要是通过加剧导地线的"舞动效应",进而增加塔线体系的动力响应.

关键词　输电杆塔,　塔线耦联,　风雨载荷,　模态分析,　动力响应,　有限元

中图分类号:TM726　　**文献标志码**:A

Analysis of Response Characteristics of Power Grid Transmission Tower-Line System Under Wind and Rain Loads

Gong Xiangyu　Ma Ji　Song Wenfeng†　Guan Zhensong　Hu Yaqi　Pan Zhijun

(State Grid Zhoukou Power Supply Company, Zhoukou　466000, China)

Abstract　Wind and rain loads exert a significant influence on the safety of the transmission tower-line system. In this paper, the dynamic characteristics of the tower-line coupling system in a 110 kV transmission line under wind and rain loads are analyzed. Firstly, the finite element model of a 110 kV transmission tower-line system is established in Ansys software, and the modal analysis is carried out. Combined with the theory of Davenport wind speed spectrum and rain load, the wind-rain coupling load corresponding to the loading node is generated in Matlab. The dynamic response of the tower-line system under this coupling load is studied, and the results of its dynamic response under different wind direction angles and with or without rain load are explored. The results show that the grounding wire increases the stiffness of the tower-line system as a whole, but because of its strong 'galloping effect' in the horizontal direction, the coupling effect in the horizontal direction and the along-line direction is different. The wind direction angle of 90 ° is the most unfavorable wind direction angle of the tower-line system, and the dynamic response of the tower-line system reaches the maximum value. In the case of rainfall of 20 mm/h, the dynamic response range of the tower-line system will be increased by about 5 % ～10 % considering the rain load. The effect of rain load on a single tower is almost negligible, which mainly increases the dynamic

2025-09-28 收到第 1 稿,2025-11-05 收到修改稿.

† 通信作者 E-mail:465118173@qq.com

response of the tower-line system by aggravating the 'galloping effect' of the ground wire.

Key words transmission tower, tower-line coupling, rain and wind loads, modal analysis, dynamic response, finite element

引言

输电铁塔作为电力输送网络的核心支撑结构,其安全性与稳定性直接关系到能源传输的可靠性和区域经济的可持续发展.在复杂自然环境中,输电铁塔长期暴露于风、雨、冰雪等多种动态载荷的耦合作用之下,其中风雨耦合载荷的时变性和随机性对结构力学性能的影响尤为显著[1-5].近年来,极端气象事件的频发使得输电铁塔因风雨激励引发的动力失稳、疲劳损伤甚至倒塌事故屡有发生,暴露出传统静态设计方法在应对动态环境载荷时的局限性.因此,深入研究风雨耦合作用下输电铁塔的动力学响应机理,揭示其非线性动力学特征,对提升输电线路抗灾能力、优化结构设计准则具有重要意义[6,7].

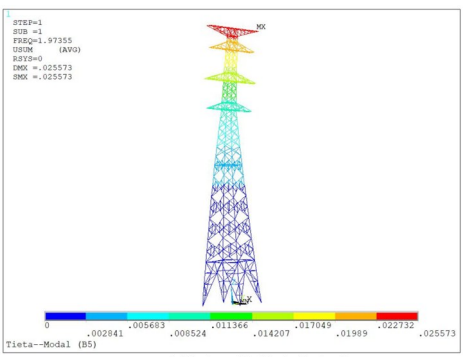
目前,国内外学者对塔线体系在风雨载荷作用下的动力学特性开展了许多研究.文献[8]建立了"三线两塔"塔线体系模型,并简化了其动力学模型.但其仅考虑了塔线体系的振型,没有深入研究塔线体系的风振响应;文献[9]建立了单塔及一塔两线的塔线耦联有限元模型,并探究不同风向角对其动力响应的影响,但没有考虑雨载荷对塔线体系的影响.文献[10]基于现象学非线性滞回模型,探究了风速、雨量和塔线体系损坏的关系,并提出了风速和雨量的组合系数供工程设计.文献[11]基于欧拉多相流方法研究了输电塔表面的风雨荷载分布特性,验证了该方法所得雨荷载与公式方法所得结果吻合较好.文献[12]对 110 kV 线路不同的输电塔型分别建立有限元模型,基于结构可靠性理论,推导倒塔、断线概率表达式,并提出一种同时考虑台风暴雨灾害下倒塔与断线事故的评估方法.以上研究多聚焦于单一风载荷或简化降雨模型下的结构分析,缺少对风雨载荷耦合作用下的塔线体系动力响应分析,忽略了雨载荷作用机理的研究.此外,以上研究在建模时,其输电塔主材和斜材的截面类型与材料属性未能逐一与实际工程对应,模型精度欠缺,且对塔线体系载荷加载节点划分精细程度不足.同时,风雨载荷数值计算不严谨,部分文献在计算风雨载荷时未充分考虑塔材受力面积的影响,导致计算结果与实际偏差较大.

针对上述研究背景,本文依据某 110 kV 输变电工程图纸,在 Ansys 有限元软件中分别建立单塔、导地线及塔线体系模型,建模时,逐一定义主材和斜材的截面类型与材料属性,模态分析结果显示:该单塔模型基频的准确性与理论值误差可以控制在 5%以内.根据单塔横隔面与导地线分布情况,划分各载荷加载节点,并计算各加载节点对应的塔材实际受力面积(载荷作用方向的投影面积),再基于 Davenport 风速谱与雨滴碰撞力归一化曲线,在 Matlab 软件中计算各加载点的风雨载荷时程数据,对风雨载荷作用下的模型进行动力响应计算,分析了该塔线体系不同风向角和有无雨载荷的情况下其动力响应的结果,为工程设计提供相应的参考.

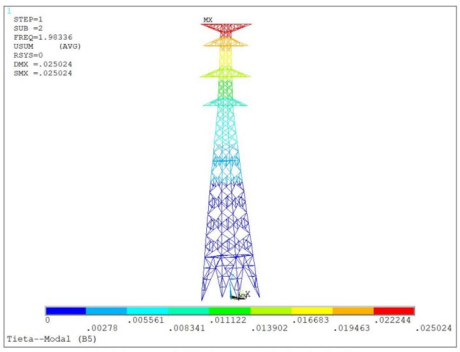
1　输电线路塔线体系模型的建立

1.1　单塔有限元模型建立与准确性验证

本文以区域内某 110 kV 输电塔线塔为研究对象,该塔呼高 27 m,整体高度 38.3 m,底部宽度 6 m×6 m,角钢截面类型为 L125×8～L40×4,角钢钢材类型为 Q345 和 Q235.依据工程图,采用 BEAM188 单元建立单塔模型.建模时,逐一定义单塔各主材和斜材的截面类型,并对该单塔进行模态分析,得到结构模态振型如图 1 所示.



(a) 一阶模态(横线方向弯曲)



(b) 二阶模态（顺线方向弯曲）

图 1 110 kV 单塔模态分析

Fig. 1 Modal analysis of 110 kV single tower

根据我国电力部门所做的输电塔实测研究，得到的输电塔单塔的结构自振周期近似计算公式为[13]：

$$f_1=\frac{\sqrt{B+b}}{0.034H} \tag{1}$$

其中：H 为全塔高度，b 为塔头宽度，B 为根开宽度. 数值如表 1 所示.

表 1 单塔基频误差分析

Table 1 Fundamental frequency error analysis of single tower

类别	B	b	H	f_1	仿真结果	误差
数值	6	1	38.3	2.03	1.9736	−2.9%

对比可知，本文所建立的单塔模型基频误差控制在 5%以内，具有可信度. 由模态分析结果可知，对于双回路直线跨越塔单塔模型，其基频为 1.9736 Hz 左右，第 1、2 阶振型分别为横线方向弯曲和顺线方向弯曲，第 3 阶振型为塔腿附近的扭转[14].

1.2 导地线建模

输电线一般是由多股金属线构成的绞合线，并且输电线路的档距远大于输电线路截面尺寸，因此输电线的悬挂空间曲线形状几乎不受其刚度的影响. 本文基于悬链线理论，采用有限元法对导地线进行结构找形. 找形时假设：(1)导地线属于完全弹性体，弹性模量保持不变；(2)导地线为理想柔线，不承受弯矩和压力，只能承受拉力，单向受拉. (3)导地线上的荷载沿线长均匀分布[15]. 导地线物理特性如表 2 所示.

根据表中参数，采用 LINK180 单元建立导地线模型，找形时以导地线弧垂点的应力值作为迭代对象，当弧垂最低点应力值满足设计要求时，再复核此时弧垂点偏移距离是否满足误差. 通过上述方法得到导地线最终找形结果，如图 2 所示.

表 2 导地线物理特性

Table 2 Physical characteristics of ground wire

类型	导线	地线
直径/mm	22.5	13
截面积/mm^2	338.99	100.88
拉断力/N	92 220	121 660
弹性模量/GPa	73	147.2
单位长度重量/(kg/km)	922.2	674.1

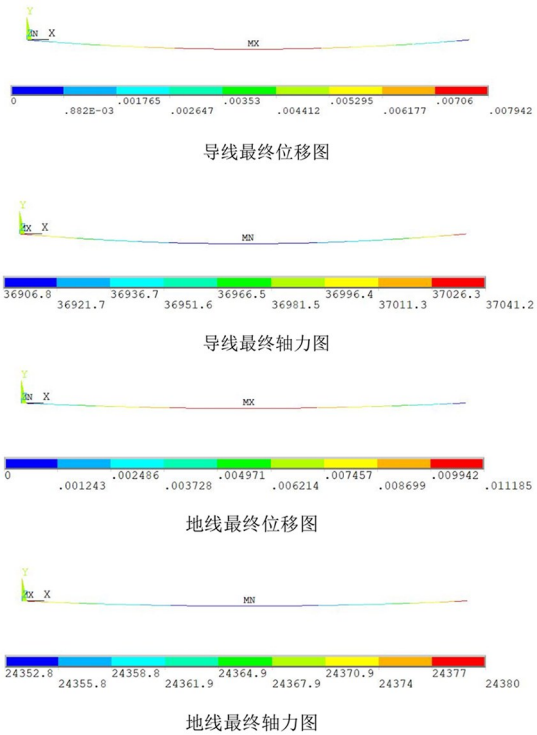


图 2 导地线找形最终结果

Fig. 2 The final result of wire and ground wire form-finding

将导地线有限元找形结果与基于悬链线理论计算得到的理论值进行比较得到表 3.

表 3 导地线弧垂点数值分析

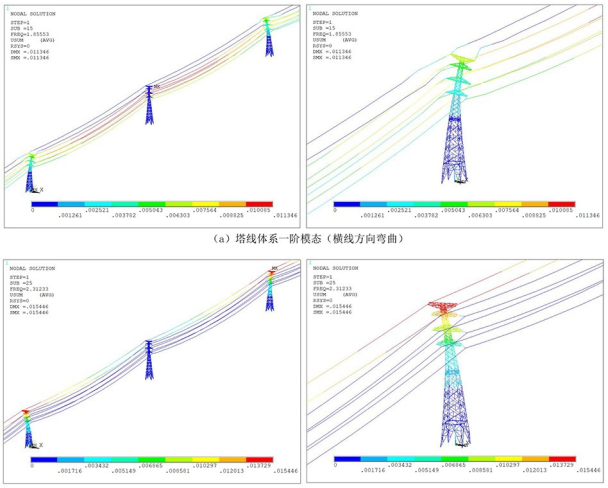
Table 3 Numerical analysis of ground wire sag point

类别	导线弧垂点应力值/(N/m)	地线弧垂点应力值/(N/m)	导线弧垂点高度偏移值/m	地线弧垂点高度偏移值/m
理论值	54 408 684	241 197 462	7.66	4.24
模拟值	54 400 000	241 000 000	7.48	4.14
差值	0.0160%	0.0819%	2.36%	2.58%

通过弧垂点应力值误差分析与弧垂高度偏移误差分析可知，当前找形得到的导地线模型弧垂最低点应力值已满足要求[16].

1.3　塔线体系建立与分析

将上述单塔模型与导地线模型通过绝缘子完成连接,得到如图 3 所示的塔线体系模型并对该塔线体系进行模态分析.结果显示,输电塔线体系的振型比较密集,导、地线的振型又多样复杂,参考前文中单塔的模态分析结果得到塔线体系前两阶振型情况,如图 3 所示.



(a) 塔线体系一阶模态(横线方向弯曲)

(b) 塔线体系二阶模态(顺线方向弯曲)

图 3　塔线体系模态分析

Fig. 3　Modal analysis of tower-line system

单塔模型与塔线体系模型的模态分析结果如表 4 所示.由表 4 可知,导、地线的作用使塔线体系在横线方向的振型频率下降了 6%,在顺线方向的振型频率增加了 14.2%.这是因为塔线体系较单塔在质量与刚度上均有变化.因此塔线体系的振型频率发生改变,表中结果说明:塔线体系在横线方向上,导、地线质量作用的影响要大于刚度作用的影响,稳定性下降,而在顺线方向上刚度作用大于质量作用的影响,稳定性上升.综合来看,塔线体系较单塔的模态分析结果没有发生较大的变化.

表 4　导地线弧垂点数值分析(Hz)

Table 4　Natural frequency of transmission tower in different models(Hz)

单塔	塔线体系	频率变化(体系较单塔)	振型描述
1.973 35	1.855 53	−6.0%	一阶横线方向弯曲
1.983 36	2.312 33	+14.2%	二阶顺线方向弯曲

2　风雨载荷的计算与施加

2.1　风载荷

空间内任意处的风速由平均风和脉动风组成,平均风可以视为静态风,风速不随时间变化.脉动风为随机动态风,风速随时间不断变化,常用零均值的高斯平稳随机过程来表达.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.本文采用目前使用最广泛的 Davenport 风速谱模拟,可用式(2)表达[17,18]:

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

式中:$S_{v1}(f)$为 Davenport 风速谱的功率谱密度;K 为地貌粗糙度;$\bar{v}_{10}^{2}$ 为换算到距离地面高度处的平均风速;f 为脉动风的频率;$x_1=1200f/\bar{v}_{10}^{2}$.

本文脉动风生成基本参数基本风速 $v_0=27$ m/s,地面粗糙度 B 类,由模态分析结果知:塔线体系基频模态频率基本在 10 Hz 以内,因此脉动风的截止频率取 10 Hz.

根据塔线结构特点,对其划分载荷加载点.单塔按横隔分布情况划分 15 个加载节点,每段导地线平均划分 20 个加载节点[19],具体情况如图 4 所示.

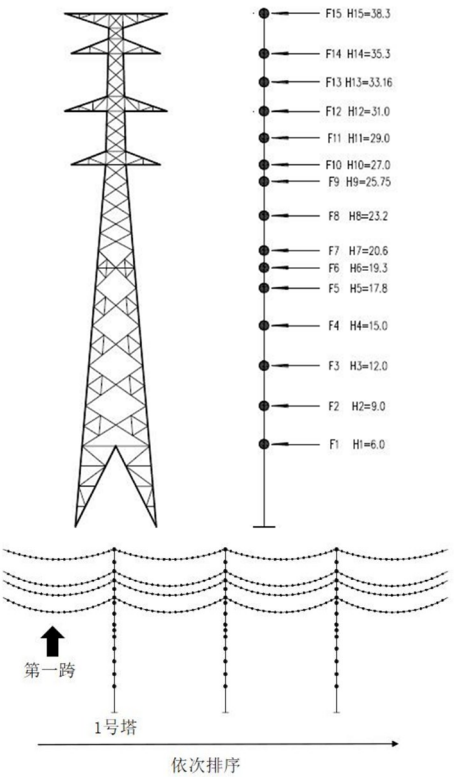


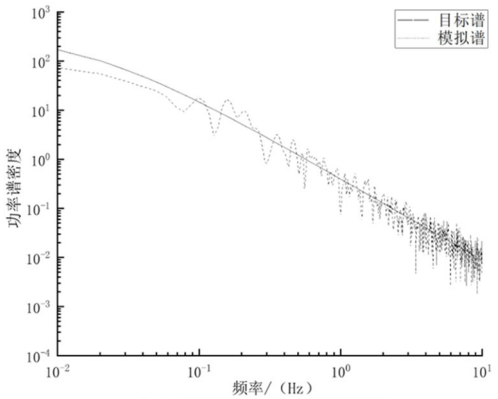
图 4　加载点划分示意图

Fig. 4　Loading point division diagram

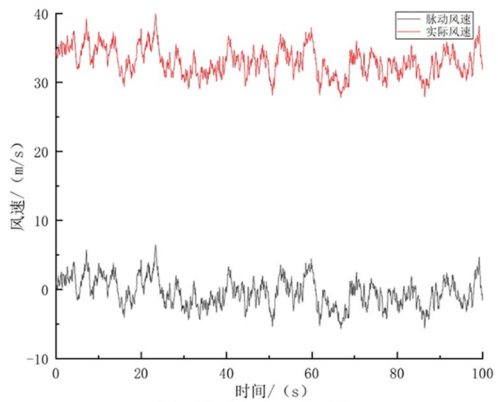
图 5 给出其中塔顶处对应的脉动风速与功率谱情况.

根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规程 DL/T 5486−2020》,将各加载点处的瞬时风速转化为对应的加载力,根据规程计算加载力时需要确

定各加载点的受力面积(载荷作用方向的投影面积).本文规定加载点的投影面积等于输电塔杆件的投影长度与杆件宽度之积,逐一计算各加载点对应杆件的投影面积后再根据规程计算各加载点的风力值,图 6 给出了塔顶加载点处与导线弧垂处的受力时程图.



(a) 塔顶脉动风功率谱密度



(b) 塔顶脉动风速时程

图 5 塔顶脉动风速及功率谱密度

Fig. 5 Fluctuating wind speed and power spectral density at the top of tower

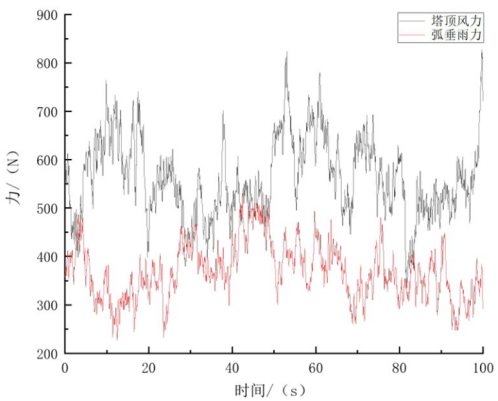


图 6 塔顶加载点受力时程图

Fig. 6 Time-history diagram of loading point on tower top

2.2 雨载荷

已有研究表明,风驱动下的雨载荷对输电塔线体系产生的冲击力不可忽略.目前,工程上多使用雨滴的等效直径来描述雨滴大小,通常认为雨滴的分布函数与雨滴的等效直径有关.本文采用 M-P 雨滴谱,利用雨压强模型计算雨荷载在塔线体系上的分布情况.当直径为 D 的雨滴下落时,水平方向的雨压强 P_{rh} 与垂直方向的雨压强 P_{rv} 为[20]:

$$\begin{cases} P_{rh}=102\rho_r S_r n_r V_{rh}^3 D^3 \\ P_{rv}=102\rho_r S_r n_r V_{rv}^3 D^3 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} V_{rh}=\gamma V_w \\ V_{rv}=9.4[1-\exp(-0.557D^{1.15})] \end{cases} \tag{4}$$

$$\gamma=\begin{cases} C\left(\dfrac{D}{3}\right)^{0.8}\dfrac{\alpha}{0.12}+1 & H\leqslant 150\ \text{m} \\ 1 & H>150\ \text{m} \end{cases} \tag{5}$$

$$\Delta t=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt[3]{N_r V_{rh}}} \tag{6}$$

$$N_r=\int_0^7 n_r \mathrm{d}D \tag{7}$$

$$n_r=8000\exp(-\Lambda D) \tag{8}$$

式中:ρ_r 为雨滴密度,V_{rh} 和 V_{rv} 分别为雨载荷接触塔线体系瞬时速度的水平分量与垂直分量,γ 为速度比,$C=0.2372H-0.5008^{-0.0167}$,$S_r$ 为雨滴碰撞力归一化曲线从 0 到 Δt 积分,N_r 为单位体积内雨滴总数;n_r 为雨滴谱,指单位体积中雨滴的数量随雨滴大小的分布,Λ 为斜率因子,$\Lambda=4.1I^{-0.21}$,I 为降雨强度,V_w 为瞬时风速.

将雨压分别在单塔与导地线的投影面积上积分,即得到雨载荷的冲击力.对于单塔,设 A_t 为单塔迎风面的投影面积,降雨时塔的前后面均受到雨载荷的冲击,因此雨载荷冲击面积为 $2A_t$,则单塔受雨载荷冲击力可以用下式表示[21]:

$$F_{r2}=2\int_0^7 P_r A_t \mathrm{d}D \tag{9}$$

式中:P_r 为雨压强.对式(9)积分可得到地线雨载荷冲击力 $\vec{F}_{r1}$、水平载荷冲击力 $\vec{F}_{rh}$ 和竖直载荷冲击力 $\vec{F}_{rv}$.

$$\begin{cases} \vec{F}_{r1}=\vec{F}_{rh}+\vec{F}_{rv} \\ \vec{F}_{rh}=\int_0^7 P_{rh}\pi \mathrm{d}L_H \mathrm{d}D \\ \vec{F}_{rv}=\int_0^7 P_{rv}\pi \mathrm{d}L_H \mathrm{d}D \end{cases} \tag{10}$$

由雨力的计算公式可知,瞬时风速对水平方向的雨压成正比关系,即风只对水平方向的雨力具有驱动作用.本文计算时降雨强度取 20 mm/h,式中

雨滴碰撞力归一化曲线如图 7 所示.综上,以 90°风向角为例,图 8 给出了塔顶处及导线弧垂处横线方向的雨力时程图.

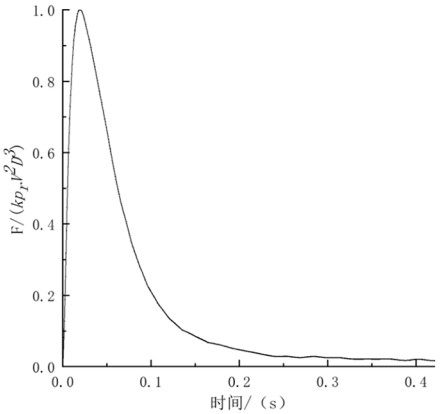


图 7　雨滴碰撞力归一化曲线

Fig. 7　Raindrop collision force normalized curve

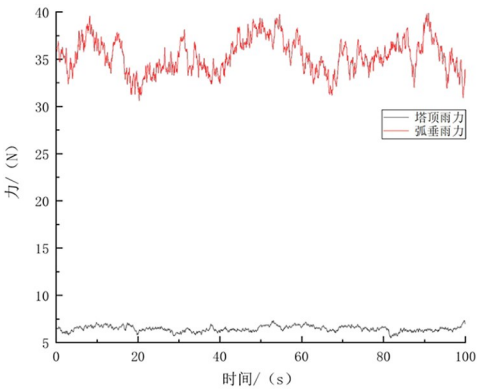


图 8　雨力时程图

Fig. 8　Rain force time history diagram

对比图 6、图 8 可知,雨载荷作用在单塔上的雨力最大值仅有 6.7 N,与作用在相同部位的风力值相比,该雨力对单塔产生的影响可以忽略不计.对比相同导线弧垂处的风力值和雨力值可知,弧垂处的雨力值均方根约为风力值均方根的 11.32 %.查看第二跨导地线后台计算数据发现,导地线各加载点均雨力值均方根均约为风力值的 10%.考虑单跨导地线有 160 个加载节点,因此雨力对塔线体系的作用不容忽视.

3　塔线体系动力学特性分析

3.1　不同风向角下动力响应分析

为研究不同风向角对塔线体系动力响应的影响,本文分别对 90°、60°、45°及 0°风向角作用下的塔线体系风雨载荷响应进行仿真分析.定义风速与导地线形成的角为风向角,如图 9 所示[22].

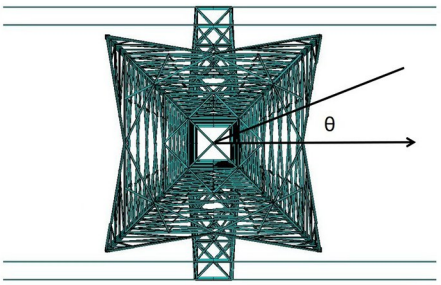
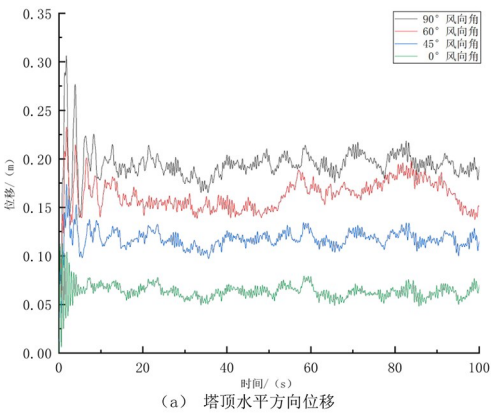


图 9　风向角示意图

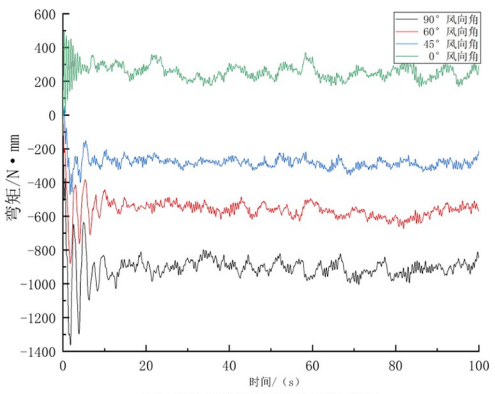
Fig. 9　Wind direction diagram

将上述模型在 Ansys 瞬时动力学模块中进行求解,图 10 给出了塔线体系在不同风向角度下的结构响应.考虑到实际工程中,塔线体系常出现倒塔、断线、导地线舞动幅度大等事故,本文重点关注导地线、塔腿处的内力情况及塔顶、导地线的水平方向的位移情况[23].

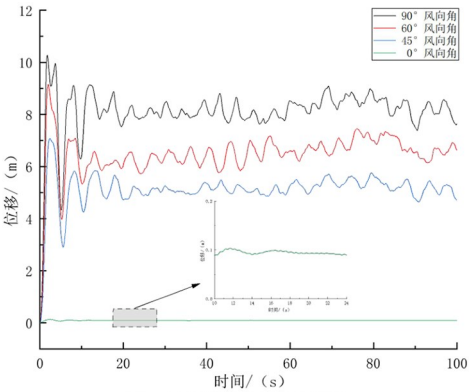
由图 10 可知,塔线体系在初始的一段时间内,结构响应变化幅值较大,在 10 s 后响应情况基本趋于稳定,这是因为仿真时设置的初始边界条件对初期的计算结果产生了动力影响[24],因此本文仅对结构响应稳定后的结果进行分析.对比各图可知,在风速、降雨强度等影响因素相同的情况下,90°风向角作用下的风雨载荷对塔线体系的影响是最大的.当风向角度为 90°时,载荷作用在导地线上



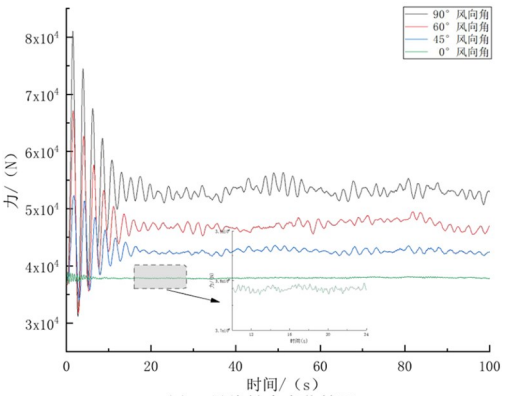
(a)　塔顶水平方向位移



(b)　塔腿主材附近对地基的弯矩



(c) 导线弧垂水平方向位移



(d) 导线轴力变化情况

图 10 塔线体系动力响应

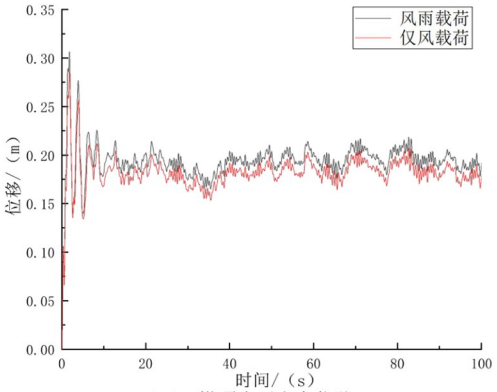
Fig. 10 Dynamic response of tower-line system

的投影面积最大，作用在单塔上的投影面积最小，此时塔顶水平方向最大位移为 0.225 m，塔腿到地基处弯矩最大值的绝对值为 1138 N·m，导线弧垂水平方向位移最大值为 9.115 m，导线轴力最大值为 55 982 N. 当风向角为 0°时，载荷作用在导地线上的投影面积几乎为零，作用在单塔上的投影面积达到最大. 此时，塔顶、导线弧垂的位移值及导线轴力值对比其他风向角的响应值均为最低，但塔腿主材附近处弯矩值的绝对值介于 45°风向角和 60°风向角之间. 这说明，在塔线耦联体系中，导地线可以加强单塔在顺线方向上的刚度，提高单塔的稳定性. 但在横线方向上，导地线的舞动会加剧单塔的动力响应，这与前文进行的模态分析结果相吻合.

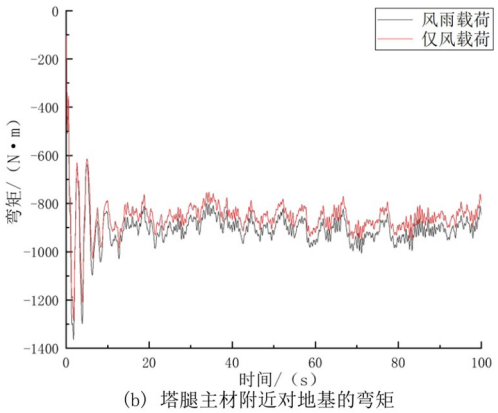
3.2 雨载荷对体系的影响

在前文计算雨载荷时，已初步分析了雨载荷对塔线体系造成的影响主要是通过作用在导地线上的雨力形成的. 图 11 给出了 90°风向角下有无雨载荷时，各关键节点的动力响应情况.

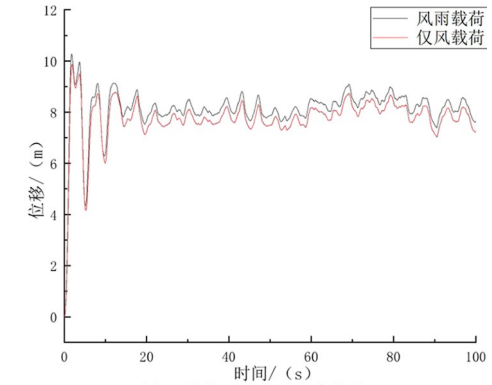
由图 11 可知，在风雨载荷作用下的塔线体系整体动力响应幅值较仅有风载荷时均有所增加. 取响应稳定后的数据，对比该时程范围内数据的变化情况，结果如表 5 所示.



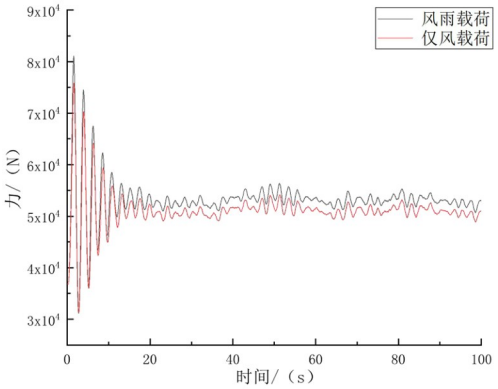
(a) 塔顶水平方向位移



(b) 塔腿主材附近对地基的弯矩



(c) 导线弧垂水平方向位移



(d) 导线轴力变化情况

图 11 塔线体系动力响应

Fig. 11 Dynamic response of tower-line system

表 5　塔线体系动力响应情况比较

Table 5　Comparison of dynamic response of tower-line system

类别	均方根（风雨载荷）	均方根（仅风载荷）	差值
塔顶位移	0.194 13	0.182 24	6.5%
塔腿弯矩	906.19	856.21	5.8%
弧垂位移	8.22	7.46	9.2%
导线轴力	53156	50121	6.1%

结合图 11 和表 5,当基本风速为 27 m/s,降雨强度为 20 mm/h 时,风雨载荷作用的下塔线体系动力响应较仅存在风载荷时的动力响应提高了约 5%～10%.其中,雨载荷对导线弧垂位移的影响最大,均方根差值提高了 9.2%,对单塔动力响应及导线轴力影响较小,均方根差值提高了 6%左右.由此可见,雨载荷对输电塔线体系导地线舞动存在不可忽视的影响[25].

4　结论

本文利用有限元软件,建立了 110 kV 双回直线塔线体系耦合模型,基于 Davenport 风速谱与雨滴碰撞力归一化曲线,在 Matlab 软件中生成对应加载点位的风雨载荷时程数据.并对静力作用下的模型进行模态分析和对风雨载荷作用下的模型进行动力响应计算,结论如下:

(1)结合模态分析和动力响应分析可知,塔线体系较单塔结构具有更高的稳定性,这是因为导地线的连接作用增加了体系的刚度,对比横线方向与顺线方向的计算结果发现,导地线在横线方向增加体系刚度的同时,其舞动效应也会传递至单塔,加剧单塔的动力响应.即导地线对体系的耦联作用在塔线体系不同方向上具有各异性.

(2)对比不同风向角下塔线体系的动力响应可知,90°风向角为最不利风向角,在此角度下,塔线体系各关注位置的动力响应均达到最大值;0°风向角下塔腿主材附近处的弯矩值绝对值不是最低,而是介于 45°风向角和 60°风向角之间,这是因为 0°风向角时,尽管导地线受力的投影面积几乎为 0,单塔受力的投影面积却达到最大.

(3)在基本速度 27 m/s,降雨量 20 mm/h 的条件下,雨载荷会使塔线体系各关注位置动力响应提升约 5%～10%.雨载荷对单塔的作用的雨力几乎可以忽略,雨载荷主要是通过加剧导地线舞动效应进而加剧整个塔线体系的动力响应.

参考文献

[1]　付兴,李宏男,李钢,等.输电塔线体系风雨荷载计算理论及耦合失效评估研究进展[J].建筑结构学报,2023,44(3):198－212.
FU X, LI H N, LI G, et al. Advances in calculation theory of wind and rain loads and failure estimation for transmission tower-line systems [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(3): 198－212. (in Chinese)

[2]　王胜辉,高凯,马康,等.基于非线性结构分析的架空输电线路风致位移响应研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2024,51(4):94－102.
WANG S H, GAO K, MA K, et al. Research on wind-induced displacement response of overhead transmission lines based on nonlinear structural analysis [J]. Journal of North China Electric Power University, 2024, 51(4): 94－102. (in Chinese)

[3]　陈进贵,刘希彬,程双宝.水平风的垂直风切变对风力机荷载影响的数值模拟研究[J].动力学与控制学报,2025,23(4):90－96.
CHEN J G, LIU X B, CHENG S B. Numerical simulation study on the influence of vertical wind veering of horizontal wind on wind turbine loads [J]. Journal of Dynamics and Control, 2025, 23(4): 90－96. (in Chinese)

[4]　曹枚根,程义凯,杨德栋,等.输电塔悬挂拉索阻尼器振动控制设计方法及减振效果[J].振动与冲击,2025,44(3):35－44.
CAO M G, CHENG Y K, YANG D D, et al. Vibration control design method and vibration reduction effect of suspension cable dampers for transmission tower [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(3): 35－44. (in Chinese)

[5]　谢献忠,龙昊,李丹,等.塔线体系脱冰瞬态响应分析与相似验证[J].动力学与控制学报,2016,14(6):542－547.
XIE X Z, LONG H, LI D, et al. Transient response analysis and similarity validation of tower-line system induced by ice-shedding [J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14(6): 542－547. (in Chinese)

[6]　王丽欢,任亚宁,郜帆,等.输电角钢塔塔段模型加固试验研究[J].自然灾害学报,2024,33(6):

130－142.
WANG L H，REN Y N，GAO F，et al. Experimental study on reinforcement of tower section models for transmission angle steel towers [J]. Journal of Natural Disasters，2024，33(6)：130－142.（in Chinese）

[7] 靳庆通，田利，刘俊才，等. 强风下输电塔破坏分析与加固研究[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2024，54(5)：1133－1142.
JIN Q T，TIAN L，LIU J C，et al. Failure analysis and strengthening study of transmission tower under strong wind [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2024，54(5)：1133－1142.（in Chinese）

[8] 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 Z W，SU W W，YU F R，et al. Analysis of wind vibration response of high-voltage transmission tower based on Ansys [J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2023，60(2)：84－90.（in Chinese）

[9] 鄢呈旸，王立军，张闻哲，等. 随机脉动风场作用下输电塔线体系的动力响应分析[J]. 电力工程技术，2024，43(4)：116－126.
YAN C Y，WANG L J，ZHANG W Z，et al. Dynamic response analysis of transmission tower line system under random fluctuating wind field [J]. Electric Power Engineering Technology，2024，43(4)：116－126.（in Chinese）

[10] 张华恺，菅明健，张都清，等. 强对流天气下输电塔－线体系倒塌破坏与风雨组合系数研究[J]. 自然灾害学报，2024，33(3)：111－121.
ZHANG H K，JIAN M J，ZHANG D Q，et al. Study on the collapse of a transmission tower-line system under severe convective weather and the combined coefficients of wind and rain [J]. Journal of Natural Disasters，2024，33(3)：111－121.（in Chinese）

[11] 荣卫涛，王振国，姜文东，等. 输电塔风雨荷载特性的 CFD 数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报，2024，44(5)：1115－1125.
RONG W T，WANG Z G，JIANG W D，et al. CFD numerical simulation of wind and rain load characteristics on transmission towers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2024，44(5)：1115－1125.（in Chinese）

[12] 王增平，相禹维，王彤. 台风暴雨灾害下的 110 kV 线路倒塔与断线事故评估方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(3)：59－66.
WANG Z P，XIANG Y W，WANG T. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster [J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(3)：59－66.（in Chinese）

[13] 国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规程：DL/T 5486—2020[S]. 北京：中国电力出版社，2020.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for design of steel supporting structures of overhead transmission line：DL/T 5486—2020 [S]. Beijing：China Electric Power Press，2020.（in Chinese）

[14] 李正良，王邦杰，王涛. 耐张型悬索支撑输电结构风振非线性有限元分析[J]. 振动与冲击，2024，43(2)：71－78，290.
LI Z L，WANG B J，WANG T. Nonlinear finite element analysis on the wind-induced vibration of a tension suspension-braced transmission structure [J]. Journal of Vibration and Shock，2024，43(2)：71－78，290.（in Chinese）

[15] 陈艺征，唐艳，石碧耀，等. 输电塔及塔线耦联体系地震响应分析与对比[J]. 高压电器，2025，61(4)：101－110.
CHEN Y Z，TANG Y，SHI B Y，et al. Seismic response analysis and comparison of transmission tower and tower-line coupling system [J]. High Voltage Apparatus，2025，61(4)：101－110.（in Chinese）

[16] 陈家鑫. 输电塔线体系耦联动力效应分析模型及方法研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2020.
CHEN J X. Analysis model and method of coupling dynamic effect of transmission tower line system [D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2020.（in Chinese）

[17] 马进骁，李永贵，肖翅翔，等. 水平轴风力机轮毂风荷载特性试验研究[J]. 动力学与控制学报，2020，18(5)：63－71.
MA J X，LI Y G，XIAO C X，et al. Experimental research on wind load characteristics of hub of horizontal axis wind turbine [J]. Journal of Dynamics and Control，2020，18(5)：63－71.（in Chinese）

[18] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quar-

terly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(372): 194－211.

[19] 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 X T. Handbook of wind load theory and wind resistance calculaion for engineeringS tructures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990. (in Chinese)

[20] FU X, LI H N, LI G, et al. Fragility analysis of a transmission tower under combined wind and rain loads [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 199: 104098.

[21] 付兴. 风雨致输电塔线体系动力反应及倒塌分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
FU X. Dynamic response and collapse analyses of transmission tower- line system subjected to wind and rain loads [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

[22] KWON K, CHOI Y, CHOI Y, et al. Extended limit-collapsed surfaces using fragility analysis of high voltage transmission towers located in coastal areas under wind load [J]. Advances in Structural Engineering, 2024, 27(12): 2116－2132.

[23] 唐浩, 李方慧, 赵杰, 等. 1000kV 特高压变电构架风荷载及风致响应[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(9): 3756－3765.
TANG H, LI F H, ZHAO J, et al. Wind load and wind-induced response of 1000 kV ultra high voltage substation frame [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(9): 3756－3765. (in Chinese)

[24] RONG K J, TIAN L, LUO J Y, et al. Study on wind-induced fatigue performance of large-span transmission tower-line system considering the combined distribution probability of wind direction and speed [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 156: 107785.

[25] 付兴, 林友新, 李宏男. 风雨共同作用下高压输电塔的风洞试验及反应分析[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 72－78.
FU X, LIN Y X, LI H N. Wind tunnel test and response analysis of high-voltage transmission tower subjected to combined loads of wind and rain [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 72－78. (in Chinese)