

风致疲劳对输电塔-线体系地震响应的影响

李嘉祥, 张玮虎

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为准确获得在役输电塔的地震响应, 本文基于Miner线性累积损伤理论, 结合风速-风向联合概率分布模型计算了输电塔杆件的风致疲劳损伤值; 在此基础上, 建立了考虑风致疲劳损伤的输电塔-线体系有限元模型, 并对其进行了地震响应分析, 研究了风致疲劳对铁塔位移、应力及加速度的影响规律. 结果表明: 与其他杆件相比, 输电塔主材的疲劳损伤较大, 且损伤峰值位于塔体变截面区域; 考虑风致疲劳效应会导致输电塔-线体系在地震荷载作用下的动力响应增大, 塔顶峰值位移增幅可达14.45%.

关 键 词: 塔-线体系; 风致疲劳; 地震荷载; 动力响应; 数值模拟

中图分类号: TU 311.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2026)05-0102-08

Influence of Wind-Induced Fatigue on Seismic Response of Transmission Tower-Line System

LI Jia-xiang, ZHANG Wei-hu

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Jia-xiang, E-mail: lijx@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To accurately obtain the seismic response of in-service transmission towers, the wind-induced fatigue damage value of transmission tower members was calculated based on Miner's linear cumulative damage theory and the joint probability distribution model of wind speed and direction. On this basis, a finite element model of the transmission tower-line system considering wind-induced fatigue damage was established, and a seismic response analysis was conducted to study the influence rules of wind-induced fatigue on tower displacement, stress, and acceleration. The results indicate that compared with other members, the fatigue damage of main members of the transmission tower is relatively large, and peak damage is located in the variable cross-section area of the tower body; considering the wind-induced fatigue effect leads to an increase in dynamic response of the transmission tower-line system under seismic load, and peak displacement increase at the tower top can reach 14.45%.

Key words: tower-line system; wind-induced fatigue; seismic load; dynamic response; numerical simulation

随着电力输送规模的持续扩大, 我国输电结构体系日趋复杂, 塔架高度不断增加, 导线跨距显著增大. 因此, 研究地震荷载下输电塔-线体系的力学响应, 对保证线路在地震作用下的安全运行、促进国民经济稳定发展具有重要意义^[1].

剧烈的地震作用会使输电塔杆件出现损伤, 甚至导致塔体发生倒塌^[2-3]. 陈艺征等^[4]通过对比分析单塔结构与塔线耦合系统的动力特性, 发现在地震荷载较小时, 耦联体系内输电塔的动力响

应显著高于单塔结构; 随着地震动强度增大, 导线系统的牵拉耗能效应逐步增强, 导致耦联体系输电塔的振动响应出现递减态势. 龚俊等^[5]通过振动台试验, 系统探究了输电导线动力耦合效应对结构的影响, 结果表明相较于单塔结构, 导线与铁塔构架间显著的动力相互作用会降低构架结构的地震动力响应. Tian等^[6]针对近场地震动激励下输电塔-线耦合体系的动力响应开展研究, 结果表明, 与远场地震动作用相比, 近场多维地震

收稿日期: 2025-04-25

作者简介: 李嘉祥(1985—), 男, 辽宁葫芦岛人, 东北大学副教授, 博士生导师.

通信作者: 李嘉祥, E-mail: lijx@mail.neu.edu.cn.

动输入会引发塔线体系更为显著的动力响应放大效应.田利等^[7]构建了考虑土-结构动力相互作用(soil-structure interaction, SSI)效应的输电塔数值模型,分析了其地震响应,结果表明若未考虑土-结构相互作用,将导致结构地震响应预测值偏小.熊铁华等^[8]针对大跨越钢管混凝土输电塔-线耦合体系开展了地震响应研究,结果表明塔-线耦合体系的动力行为显著受控于结构一阶振型.魏文晖等^[9]考虑地震摇摆分量的 3 种地震动输入模式,研究了输电塔-线耦合系统在摇摆地震动激励下的动态响应,分析表明摇摆地震动分量的引入显著增大了体系的地震响应幅值,并导致塔线系统动力失稳破坏程度明显加剧.Wang 等^[10]构建了土-结构动力耦合的输电塔-绝缘子-导线系统简化分析模型,该研究表明考虑 SSI 效应会使塔顶动力响应峰值增大,同时塔基频周期延长,且地基土体刚度越低,SSI 对结构动力特性的影响越显著.王文明等^[11]研究了地震-风多灾害耦合作用下输电塔-线体系的动力响应,结果表明风荷载会提高罕遇地震作用下体系结

构的峰值响应.

上述针对输电塔-线体系地震响应的研究均未考虑风致疲劳对其力学性能的影响,然而在输电塔-线体系服役期间,由于风荷载持续作用,其承载性能会随服役时间降低.因此,为了准确获得输电塔-线体系的地震响应,应在地震分析时考虑风致疲劳效应.

1 疲劳损伤分析

1.1 风速-风向联合概率模型建立

本研究选取浙江宁波气象观测站 2000—2024 年逐小时风速和风向数据作为数据样本,采用 Gumbel,Fréchet 与 Weibull 3 种分布模型对风速进行拟合^[12],并通过决定系数(R^2)进行模型效能评估. R^2 越接近于 1 代表拟合效果越好.相关分布函数见表 1,其中 a, b, c 分别表示位置参数、尺度参数和形状参数; x 表示风速数据.图 1 给出了风速概率密度分布的拟合效果.

表 1 3 种极值分布相关函数
Table 1 Three extreme value distribution correlation functions

分布模型	概率密度函数	累积概率密度函数
Gumbel	$f_1(x)=\frac{1}{b}\exp\left[-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right]\cdot\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)$	$F_1(x)=\exp\left[-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right]$
Fréchet	$f_2(x)=\frac{c}{b}\left(\frac{x-a}{b}\right)^{-(c+1)}\cdot\exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^{-c}\right]$	$F_2(x)=\exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^{-c}\right]$
Weibull	$f_3(x)=abx^{b-1}\exp(-ax^b)$	$F_3(x)=1-\exp(-ax^b)$

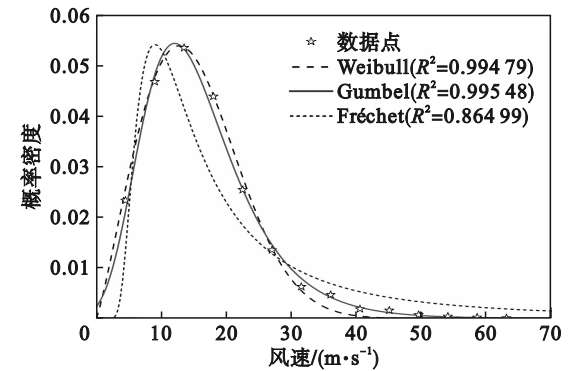


图 1 风速概率密度分布
Fig. 1 Probability density distribution of wind speed

依据我国气象部门的划分标准,将风向数据划分为 16 个风向区间,采用混合 von Mises 分布构建风向概率分布模型^[13],其数学表达如式(1)所示.图 2 给出了风向概率密度分布图,可以看出所选地区风向主要集中于 $0^\circ, 170^\circ$ 和 320° 附近,且 4 阶 von Mises 分布函数的 R^2 值最高,拟合

效果最佳,故确定其为风向分布函数 $f(\varphi)$.

$$f(\varphi)=\sum_{i=1}^{N_l}\omega_i\frac{\exp(k_i\cos(\varphi-\mu_i))}{2\pi I_0(k_i)}\tag{1}$$

式中: N_l 为 von Mises 分布函数的阶数,以往研究^[1,13]推荐 N_l 小于 6; ω_i 为权重参数; μ_i 为位置参数; k_i 为尺度参数; $I_0(k_i)$ 为 0 阶修正的 Bessel 函数; φ 为风向角; i 为风向区段的编号.

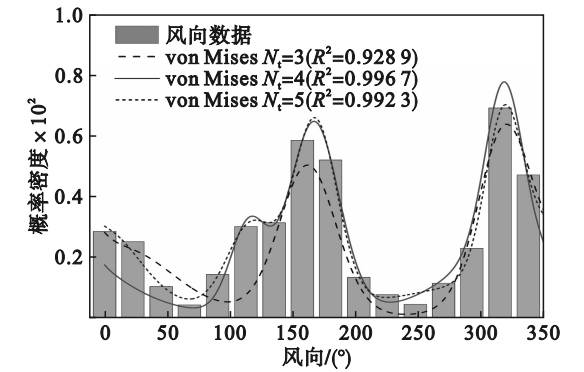


图 2 风向概率密度分布
Fig. 2 Probability density distribution of wind direction

基于上述构建的风速、风向单一概率分布,本文采用3种常用的二元 Copula 函数将两类单一分布转换为联合概率分布模型,相关表达式及参数关系如表2所示^[14-15].在 Copula 函数中,Kendall 秩相关系数 τ 反映变量之间的相关性,其数值越小,表明变量之间越独立,具体表示为

$$\tau=P_e-P_d=\frac{e-d}{e+d}.$$

(2)

式中: τ 为一致性数据对 P_e 与非一致性数据对 P_d 的概率之差; e 为一致性数据对的个数; d 为非一致性数据对个数.经计算,该地区风速与风向的 Kendall 秩相关系数为-0.094 6,表明二者整体呈现负相关,即风速随风向角度增大呈减小趋势.

表2 二元 Copula 函数

Table 2 Copula functions

常用二元 Coupla 函数	$C(u,v;\theta)$	τ	相关性
Clayton	$(u^{-\theta}+v^{-\theta}-1)^{-1/\theta}$	$\frac{\theta}{\theta+2}$	正相关性
Frank	$-\frac{1}{\theta}\ln\left[1+\frac{(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta v}-1)}{e^{-\theta}-1}\right]$	$1-\frac{4}{\theta}\left[-\frac{1}{\theta}\int_0^1\frac{t}{\exp(t)-1}dt-1\right]$	无相应限制
AMH	$\frac{uv}{1-\theta(1-u)(1-v)}$	$\left(1-\frac{2}{3\theta}\right)-\frac{2}{3}\left(1-\frac{1}{\theta}\right)^2\ln(1-\theta)$	弱相关性

注: $C(u,v;\theta)$ 为二元 Copula 函数; u 为风速概率密度分布函数; v 为风向概率密度分布函数; θ 为二元 Copula 函数参数,可由 τ 计算得到; t 为积分变量.

基于各类 Copula 函数的相关性特征, Frank Copula 函数对变量相关性无约束,恰好适配本研究中风速与风向的负相关关系,故选用其构建风速-风向联合概率模型.如图3所示,可以看出不同风向区间对应的风速分布存在明显差异.

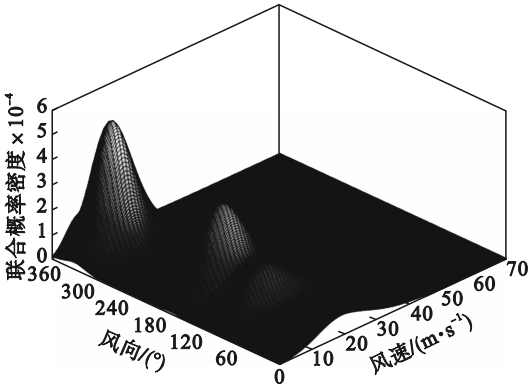


图3 风速-风向联合概率密度

Fig. 3 Joint probability density of wind speed and direction

1.2 风荷载模拟

本文以浙江宁波某 500 kV, 300 m 档距的输电线路为研究对象,构建一塔两线有限元模型.该输电线路的铁塔塔高为 99.9 m,呼高为 69.0 m,根开 18 m,具体尺寸如图4所示.塔身主材采用 Q420 钢,斜材与辅材分别选用 Q345 钢和 Q235 钢.在有限元模型中,输电塔杆件采用 BEAM188 单元,单个杆件划分为 3 个单元;输电导线采用 LINK10 单元,划分为 20 个单元.由于不考虑基础作用,对导线远端及输电塔底部均采取固定连

接,如图5所示.

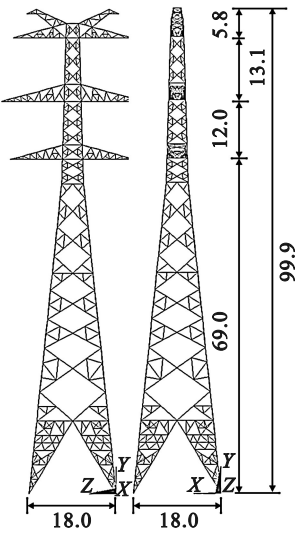


图4 输电塔尺寸(单位:m)

Fig. 4 Dimensions of transmission tower (unit:m)

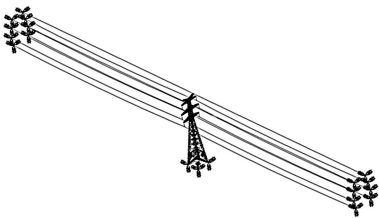


图5 塔-线体系有限元模型

Fig. 5 Finite element model of tower-line system

由于输电塔结构复杂,将输电塔划分为14个区域,每个区域简化为对应的风速模拟点,如图6所示.采用 Davenport 风谱生成脉动风速时程曲线,设定脉动风持续时间为 300 s,截止频率为

5 Hz,地面粗糙度为0.15.图7给出了基本风速为18 m/s时模拟点1处的脉动风速时程及其与目标谱的对比.输电塔-线体系所受风荷载与总风速时程的转换关系见式(3),塔体和导(地)线所受风荷载以集中荷载形式施加到对应节点上.

$$F_i(t) = \mu_s \cdot A_i \cdot \rho_a \cdot V_i^2(t)/2. \quad (3)$$

式中: $F_i(t)$ 为结构所受风荷载; μ_s 为结构的体型系数,输电塔塔身取2.53,横担取2.33,导(地)线取1.1; A_i 为迎风面积; ρ_a 为空气密度,取1.235 kg/m³; $V_i(t)$ 为总风速时程.

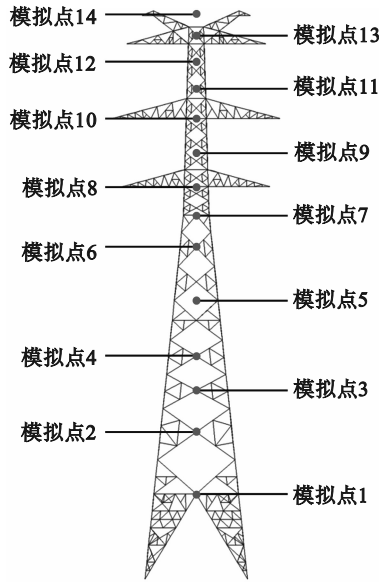


图6 风速模拟点

Fig. 6 Wind speed simulation points

1.3 风致疲劳计算

在进行风致疲劳计算时,首先需要对输电塔-线体系进行风振响应分析.根据图3可知,风速超过50 m/s时,无论处于何种风向区间,发生概率基本为0.基于此,风速范围选定为0~50 m/s,并将风速范围以5 m/s为间隔,划分为10个区间,取各个

区间的中值作为代表风速.考虑到输电塔-线体系的双向对称结构特性,故仅需计算0°,22.5°,45°,67.5°,90°共5个典型风向,其风向角如图8所示.因此,共计算了50个风速风向组合工况,得到塔体结构各个杆件的应力时程.然后,通过雨流计数法将每根杆件的应力时程转化为若干个应力循环,并统计出不同应力幅值和不同平均应力下的应力循环次数.图9给出了18.0 m/s风速和90°风向组合工况下编号2826杆件的应力循环分布.

在此基础上,通过Goodman修正公式和S-N曲线得到每根杆件在不同应力幅值下对应的循环次数^[16-17].随后,根据Miner线性累积损伤准则计算出各个风速风向工况下每根杆件的疲劳损伤.最后,基于风速-风向联合概率分布,可以得到服役T年的输电塔各杆件的疲劳损伤.S-N曲线和疲劳计算见式(4)~式(6).图10给出了输电塔所有杆件的年平均疲劳损伤值,可以看出主材的疲劳损伤程度普遍高于辅材,且69.0 m高度附近的主材疲劳损伤达到峰值,这是由于该位置处于塔身与塔头的连接处,属于输电塔变截面区域,应力集中效应显著.

$$S^3 N = 1.46 \times 10^{12}, \quad (4)$$

$$D_q = \sum \frac{n_m}{N_m}, \quad (5)$$

$$D = \frac{T_1 \cdot \sum (D_q \cdot P_q)}{t_1}. \quad (6)$$

式中: $S^3 N$ 为疲劳耐久性常数,表征应力与寿命之间的关系; n_m 为通过雨流法统计的应力循环次数; N_m 为根据S-N曲线确定的循环次数; D_q 为第q根杆件在某工况下的疲劳损伤; D 为杆件的年风致疲劳损伤值; T_1 为风的年均时长; P_q 为该工况发生的概率,通过风速风向联合概率分布获得; t_1 为该工况的模拟时间,本文取300 s.

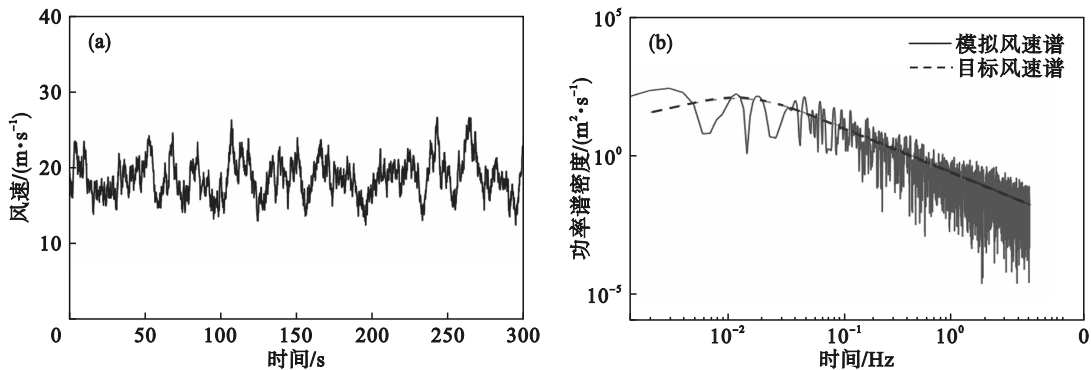


图7 点1脉动风速模拟

Fig. 7 Fluctuating wind speed simulation at point 1

(a)一脉动风速时程;(b)一功率谱对比.

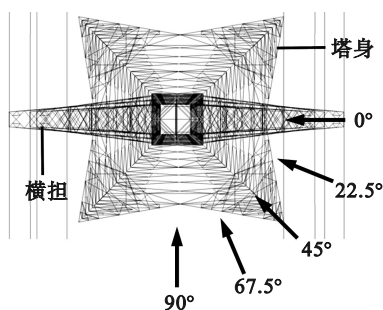


图8 风向角示意图

Fig. 8 Schematic diagram of wind direction angles

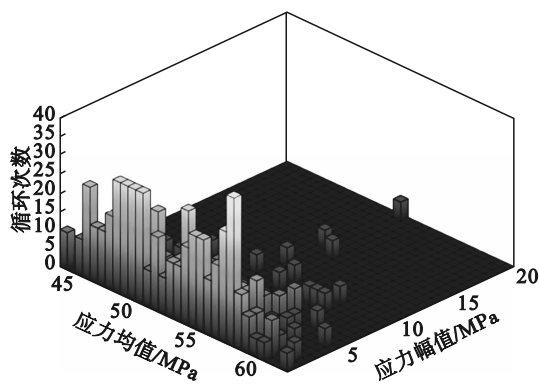


图9 编号2826杆件的应力循环

Fig. 9 Stress cycle of member 2826

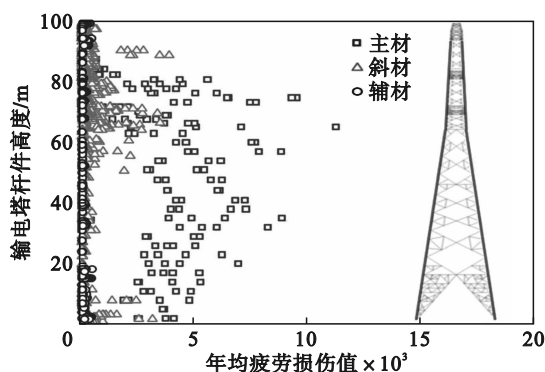


图10 杆件年均疲劳损伤

Fig. 10 Annual average fatigue damage of members

2 地震响应分析

2.1 考虑风致疲劳的有限元模型

为了研究风致疲劳对塔-线体系地震响应的影响,通过改变钢材的力学参数来模拟结构承载能力和刚度的退化^[16],具体表达如下:

$$f_y(T) = f_y[1 - D(T)], \quad (7)$$

$$E_s(T) = E_s[1 - \zeta D(T)]. \quad (8)$$

式中: $f_y(T)$ 和 $E_s(T)$ 为服役时间 T 后杆件的屈服强度和弹性模量; ζ 为材料系数,取值为 0.227; $D(T)$ 为服役 T 年时杆件的风致疲劳损伤值。

根据杆件年度疲劳损伤值,本文分别建立了服役时间为 0, 15, 30, 45 a 的输电塔-线体系有限元模型. 表 3 给出了考虑风致疲劳损伤模型的前 3 阶自振频率,可以看出随着服役时间的增加,各阶模态频率均呈降低趋势,这是由于考虑疲劳损伤后输电塔刚度下降所导致的。

表3 考虑风致疲劳的输电塔前3阶模态自振频率

Table 3 Natural frequencies of first three modal of transmission tower considering wind-induced fatigue

模态阶数	服役 0 a	服役 15 a	服役 30 a	服役 40 a
1	1.271 9	1.247 6	1.223 4	1.198 7
2	1.285 2	1.260 6	1.236 3	1.211 3
3	2.027 2	2.022 1	2.017 7	2.012 5

本文选取 3 条地震波用以研究风致疲劳对输电塔-线体系地震响应的影响,分别为 Tianjin 波、San Fernando 波及 Northridge 波. 为了考虑震级的影响,对 Tianjin 波的加速度峰值进行调幅,地震工况如表 4 所示。

表4 地震工况

Table 4 Seismic conditions

工况	地震事件	输入方向	峰值加速度	持续时间/s	时间间隔/s
I	Northridge	X,Y,Z	0.20 g	20.00	0.01
II	Tianjin	X,Y,Z	0.30 g	19.19	0.01
III	San Fernando	X,Y,Z	0.40 g	19.90	0.01
IV	Tianjin	X,Y,Z	0.45 g	19.19	0.01
V	Tianjin	X,Y,Z	0.60 g	19.19	0.01

2.2 位移响应

图 11 给出了塔体位移关键点,图 12 给出了工况 I 塔身关键点的最大位移值,与 0 a 相比,服役 45 a 塔体关键点 12 的位移增加了 11.32%. 可以看出考虑风致疲劳后塔体位移响应显著增大,这是由于风致疲劳会导致塔体刚度下降,从而造成位移增加,且这种影响与服役时间呈非线性关系。

此外,为研究震级对塔体地震响应的影响,图 13 给出了服役时间为 0 a 和 45 a 的输电塔-线体系在工况 II、IV 和 V 下的位移响应. 与 0 a 相比,服役 45 a 塔体关键点 12 的位移分别增加了 14.45%, 14.36% 和 14.39%。

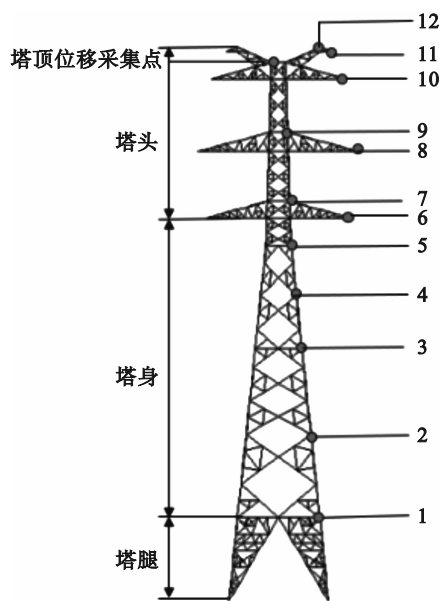


图11 位移关键点

Fig. 11 Key displacement points

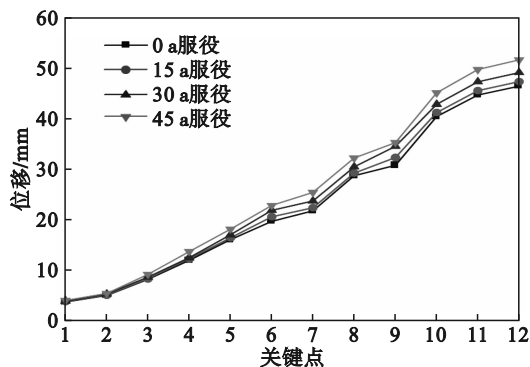


图12 工况I位移响应

Fig. 12 Displacement response under Case I

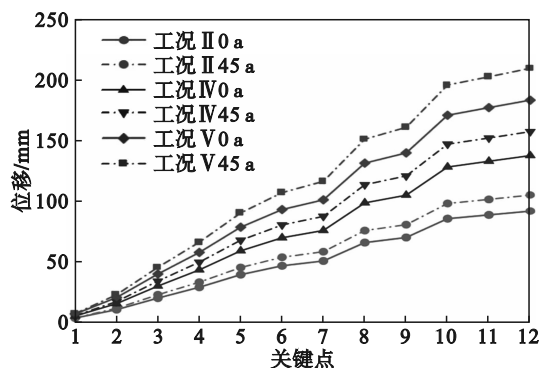


图13 不同震级下塔体的位移响应

Fig. 13 Displacement response of tower under different magnitudes

2.3 速度与加速度响应

图14给出了不同服役时间下塔顶峰值速度与峰值加速度的对比。与服役时间为0a相比,在工况I至工况III中,服役45a输电塔的塔顶速度分别增加了9.30%,21.31%,24.39%,加速度增幅分别为10.10%,7.40%,13.90%,这说明考虑风致

疲劳后塔顶速度和加速度显著增大,且对速度的影响更大。

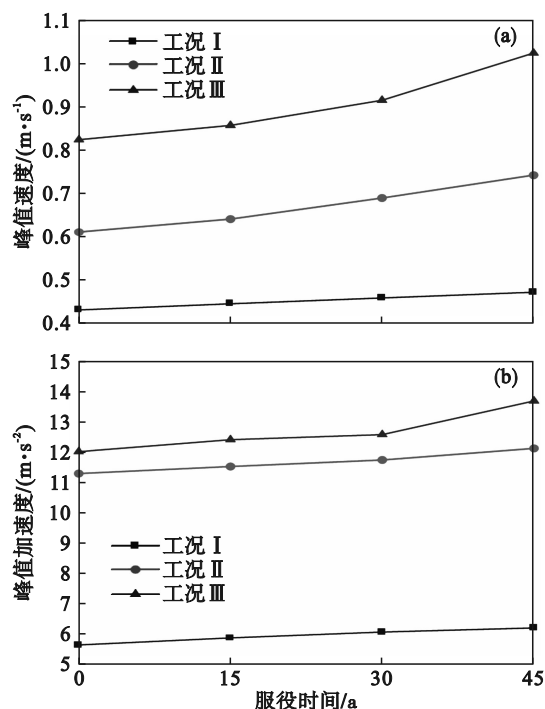


图14 塔顶峰值速度和峰值加速度响应

Fig. 14 Peak velocity and peak acceleration response at tower top

(a)—峰值速度; (b)—峰值加速度。

2.4 应力响应

图15给出了工况V中服役时间分别为0a和45a的输电塔在地震作用下极限应力出现位置。可以看出,0a服役时间和45a服役时间的输电塔最大应力单元出现位置一致,最大压应力均位于塔腿主材处。值得注意的是,0a服役时间的输电塔最大应力为66.4 MPa,最大压应力为30.7 MPa,而45a服役时间的输电塔最大应力为70.7 MPa,最大压应力为34.3 MPa,说明风致疲劳效应导致塔体的应力峰值增加。

为了研究考虑风致疲劳时输电塔杆件应力的具体变化情况,统计了塔体172个主材、沿塔身高度分布的216个斜材以及148个辅材的应力,如图16所示。经统计,由于风致疲劳的效应,共有156个主材单元、192个斜材单元以及132个辅材单元的应力增加,增大比例约为90.7%,88.89%以及89.2%。3种杆件类型中应力增幅较高的为塔腿处,且主材作为输电塔的主要承力构件,其增幅相较斜材和辅材更大。此外,从图中可以发现部分杆件单元在考虑风致疲劳效应后单元应力下降,这是由于考虑了风致疲劳损伤之后,杆件间相对刚度发生变化,导致应力重分布,从而造

成部分杆件单元应力下降.

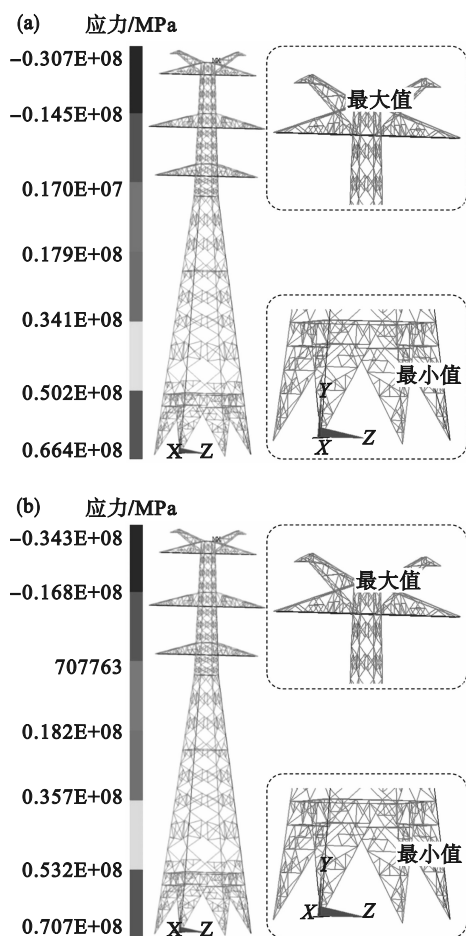


图 15 工况 V 输电塔的应力云图

Fig. 15 Stress contour of transmission tower under case V

(a)—服役 0 a; (b)—服役 45 a.

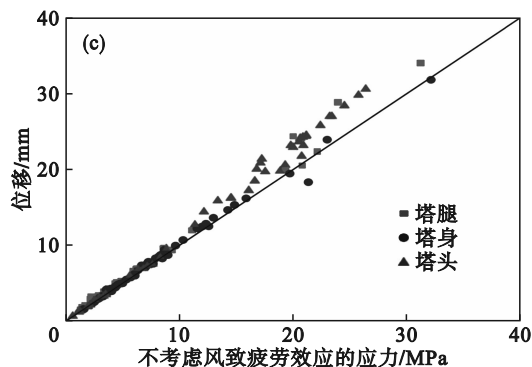
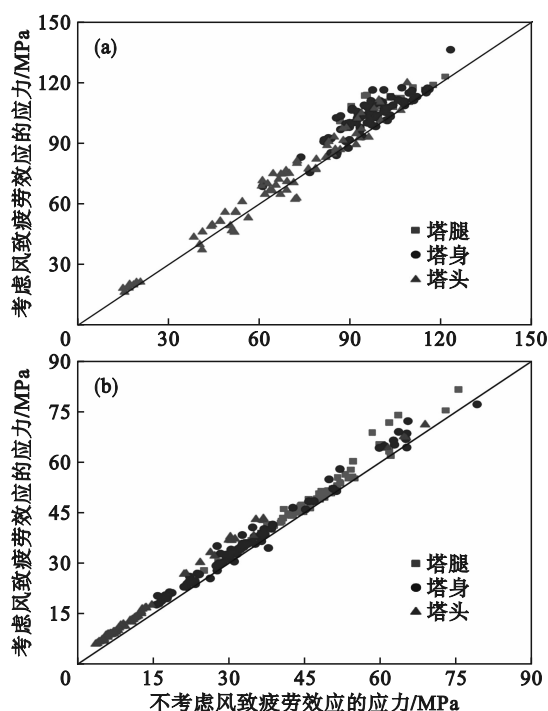


图 16 工况 V 中塔 1 杆件应力

Fig. 16 Member stress of tower 1 under case V

(a)—主材; (b)—斜材; (c)—辅材.

3 结 论

1) 风致疲劳效应对输电塔-线体系的地震响应具有显著影响,且随着服役时间的增加,疲劳损伤持续累积,影响逐渐增强.

2) 考虑风致疲劳损伤后,输电塔自振频率随着服役时间的增加而降低,但地震位移响应随服役时间的增加而增大,且增大的幅度与塔身关键点的位置以及地震峰值加速度有关.针对本案例,增幅为 11.32%~14.45%.

3) 输电塔主材的疲劳损伤普遍大于斜材和辅材,且损伤峰值位于塔体变截面区域.考虑风致疲劳效应后,输电塔最大应力出现位置未发生变化,但应力值增加.与斜材和辅材相比,塔腿处主材的应力增幅最大,在设计阶段应对其进行适当加固.

参考文献:

- [1] Li J X, Zuo Y S, Wang L P, et al. Fragility analysis of a transmission tower-line system subjected to wind and ice loads considering fatigue damage[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2025, 25 (7) : 2550074.
- [2] Zheng H D, Fan J, Long X H. Analysis of the seismic collapse of a high-rise power transmission tower structure [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 134: 180-193.
- [3] Fadel Miguel L F, Alminhana F, Beck A T. Performance based assessment of transmission lines to seismic events[J]. *Engineering Structures*, 2021, 249: 113298.
- [4] 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 Yi-zheng, Tang Yan, Shi Bi-yao, et al. Seismic response analysis and comparison of transmission tower and tower-line coupling system [J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(4): 101-110.)
- [5] 龚俊,支旭东,商文念,等.纵向地震下 1 000 kV 出线构架的输电导线耦合作用振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(3): 51-59.

- (Gong Jun, Zhi Xu-dong, Shang Wen-nian, et al. Shaking table test on 1 000 kV frame by considering coupling effect of transmission lines under longitudinal excitations [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(3): 51-59.)
- [6] Tian L, Yi S Y, Qu B. Orienting ground motion inputs to achieve maximum seismic displacement demands on electricity transmission towers in near-fault regions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144 (4) : 04018017.
- [7] 田利, 刘凯悦, 刘俊才, 等. 基于土弹簧的桩-土-输电塔抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(6): 1268-1276.
(Tian Li, Liu Kai-yue, Liu Jun-cai, et al. Seismic response of pile-soil-transmission tower based on soil springs [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44 (6) : 1268-1276.)
- [8] 熊铁华, 梁枢果, 邹良浩, 等. 大跨越钢管混凝土输电塔线体系的地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (12): 7-12.
(Xiong Tie-hua, Liang Shu-guo, Zou Liang-hao, et al. Seismic responses of a long-span concrete filled steel-tube transmission tower-line system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(12): 7-12.)
- [9] 魏文晖, 黄功伟, 徐辅中, 等. 输电塔线体系在摇摆地震动作用下的动力稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41 (4): 55-62, 109.
(Wei Wen-hui, Huang Gong-wei, Xu Fu-zhong, et al. Analysis of dynamic stability of a transmission tower-line system under tilt ground motion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(4): 55-62, 109.)
- [10] Wang L, Wang T, Li Z L, et al. Stochastic seismic dynamic response analysis for coupled transmission tower-insulator-line systems considering soil-structure interaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 181: 108662.
- [11] 王文明, 王冠惠, 盛寒柯, 等. 输电塔-线体系罕遇地震-风共同作用下的多灾害响应研究[J]. 世界地震工程, 2023, 39(3): 165-173.
(Wang Wen-ming, Wang Guan-hui, Sheng Han-ke, et al. Study on the multiple hazard responses of transmission tower-line system under rarely occurred earthquake and wind [J]. *World Earthquake Engineering*, 2023, 39 (3) : 165-173.)
- [12] Wang H, Tao T Y, Wu T, et al. Joint distribution of wind speed and direction in the context of field measurement [J]. *Wind and Structures*, 2015, 20(5): 701-718.
- [13] Jovasevic S, Correia J, Pavlovic M, et al. Alternative steel lattice structures for wind energy converters [J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2019, 12(1): 48-69.
- [14] Li C, Wu G Y, Li L X, et al. A comprehensive performance evaluation methodology for sea-crossing cable-stayed bridges under wind and wave loads [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114816.
- [15] Huang S J, Li Q S, Shu Z R, et al. Copula-based joint distribution analysis of wind speed and wind direction: wind energy development for Hong Kong [J]. *Wind Energy*, 2023, 26(9): 900-922.
- [16] Li C, Pan H Y, Tian L, et al. Lifetime multi-hazard fragility analysis of transmission towers under earthquake and wind considering wind-induced fatigue effect [J]. *Structural Safety*, 2022, 99: 102266.
- [17] Li J X, Yang T, Zhang C, et al. Typhoon fragility analysis of transmission tower-line system considering wind-induced fatigue [J]. *Engineering Structures*, 2025, 338: 120572.