

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.252

引用格式:施芷榆, 张树林, 孟宪乔, 等. 特高压大跨越输电塔线风灾易损性准静态分析[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(10): 34-44.



特高压大跨越输电塔线风灾易损性准静态分析

施芷榆¹, 张树林², 孟宪乔², 郑治祥², 李正良¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 合肥 230601)

摘要:特高压大跨越输电线路杆塔高度、档距都较大, 易受风荷载影响, 其风灾易损性分析是评估结构抗风可靠性的重要方法。以安徽某特高压大跨越输电塔为背景, 基于随机风振响应分析工程理论与中国现行架空输电线路荷载规范获得该大跨越输电塔在风荷载作用下的结构效应分布, 考虑结构材料参数的不确定性, 得到其抗风承载能力性能概率分布, 进一步以塔顶位移、修正的节间位移角为指标确定性能水准量化模型, 并计算得到输电塔风灾易损性曲线, 研究结果表明: 通过首次超越概率理论可以得到准静态输电塔线体系的风致效应分布; 基于塔顶位移较基于修正的节间位移角建立的特高压大跨越输电塔线体系多重性能水准更保守; 随着结构破坏程度的加重, 结构的不确定性对结构承载力的影响越明显; 风灾易损性分析表明该特高压大跨越塔在设计风荷载下具有较好的抗风可靠性, 但其风致破坏表现出一定的脆性。

关键词:特高压输电体系; 大跨越; 风灾易损性; 性能水准; 结构可靠性

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)10-034-11

Quasi-static analysis of wind-induced fragility for ultra-high voltage long-span transmission tower lines

SHI Zhiyu¹, ZHANG Shulin², MENG Xianqiao², ZHENG Zhixiang², LI Zhengliang¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Energy Construction Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, P. R. China)

Abstract: Ultra-high voltage (UHV) long-span (LS) transmission lines, characterized by large tower heights and long spans, are highly susceptible to wind loads. Wind fragility analysis is an essential method to assess their reliability under wind-induced actions. Using an UHV-LS transmission tower in Anhui Province as a case study, this research applies random wind vibration response theory and China's current overhead transmission line loading specifications to determine the structural response distribution under wind loads. The analysis incorporates uncertainties in structural material properties to establish the probabilistic distribution of wind load-carrying capacity. Performance levels are quantitatively evaluated using tower-top displacement and corrected inter-segment displacement angles as indicators, leading to the development of wind fragility curves. The results

收稿日期: 2024-11-15 网络出版日期: 2025-04-03

基金项目: 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司科技项目。

Supported by Technology Project of China Energy Construction Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd.

作者简介: 施芷榆(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构风工程研究, (E-mail) shiziy0422@163.com。

通信作者: 李正良, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) lizhengl@hotmail.com。

indicate that the quasi-static wind effect distribution of the transmission tower-line system can be obtained using probability-based methods for the first time. The fragility assessment shows that performance levels based on tower-top displacement are more conservative than those based on modified inter-segment displacement angles. Additionally, as structural damage intensifies, the influence of material uncertainty on load-bearing capacity becomes more pronounced. Overall, wind fragility analysis shows that UHV towers exhibit good wind reliability under design wind loads, although their wind-induced failure shows brittle characteristics.

Keywords: UHV transmission lines; long-span; wind fragility; performance levels; structural reliability

中国电力事业发展迅速,输电塔线体系是电力输送过程中的重要载体,但长期在自然环境中工作,易受强风灾害的影响,研究输电塔线的抗风性能,开展其在风灾下的易损性研究十分必要。

结构易损性分析的前提是结构的确定性分析。输电塔线体系的风振响应分析通常需要先模拟脉动风速时程,再将风速转换为动力风荷载作用时程进行结构动力响应分析,此类模拟计算工作量较大。现多国建筑荷载规范选用等效静风荷载法,将动力风荷载简化为等效静力风荷载进行结构响应分析^[1],如中国规范^[2-3]采用惯性力法,采用风振系数考虑动力特性对风荷载的增大效应,但未考虑风荷载的概率分布。欧进萍等^[4]在此基础上提出同时考虑随机平均风压和脉动风压随机动力效应的等效随机静风荷载模型并给出了相应的概率分布;王松涛等^[5]将其应用于输电塔可靠度分析方面,均假设荷载效应与荷载分布一致,但未给出准静态方法计算时的风荷载效应分布。何浩林等^[6]提出确定风速下准静态方法计算的输电塔风荷载效应分布,该研究以 IEC 等国外现行规范为基础,忽略了输电塔脉动风共振分量及绝缘子串风荷载。对于特高压大跨越输电塔线体系而言,动力响应分析复杂耗时,而当前研究缺乏相应的准静态分析方法。

结构易损性分析需建立合理的性能指标和性能量化模型。对于普通输电塔线结构通常选取杆塔节间位移角、塔顶位移角(塔顶位移与塔高比值)、塔顶最大水平位移或塔身构件主要屈服为性能指标,认为其超过一定限值时结构失效^[7-10]。与普通特高压输电线路相比特高压大跨越输电塔更高更柔,在同一风场中结构的响应更大,结构抗风的要求更高。俞登科等^[11]以特高压输电塔为对象,从塔身应力、塔顶点位移、局部变形等方面划分特高压输电塔结构的基本完好、轻微破坏、中等破坏和严重破坏及倒塌 4 个抗风性能水准。李正良等^[12]以特高压双柱悬索拉线塔为例,选取塔顶位移为指标建立性能水准量化模型,将倒塌破坏下顶点位移的 50%、75% 和 100% 分别作为轻微、中等和倒塌破坏的阈值。王飞等^[13]则选取修正的杆塔节间位移角为损伤指标,将 1/500、1/250 和 1/125 作为发生轻微、中等和严重及倒塌的阈值。由于现行规范对杆塔损伤程度未做出界定,选择合理的破坏准则至关重要。另一方面,确定性分析会高估输电塔结构的抗风承载能力,且材料特性的不确定性比截面尺寸的不确定性对结构易损性的影响更大^[14],故在易损性分析中,有必要考虑材料特性的不确定性进行分析。

笔者以池州特高压长江大跨越塔线体系为背景,基于现行杆塔设计规范《架空输电线路荷载规范》(DL/T 5551—2018)和风工程理论得到输电塔在风荷载作用下的结构效应分布;根据不同的损伤判定标准建立适用于特高压大跨越输电塔的性能水准模型;基于所划分的性能水准模型,考虑结构不确定性,通过有限元非线性分析得到结构承载力概率分布;采用极限状态函数,提出一种高效的特高压大跨越输电塔线风灾易损性评估方法,并评估了性能水准模型的合理性。

1 输电塔风致响应分布

结构的风灾易损性表示在某一确定风速下,结构超越某种性能极限状态的可能性,可用于预测结构在不同风速作用下发生不同程度损伤的概率。不同性能水平极限状态的功能函数可定义为

$$Z_{ij} = R_i - S_j, \quad (1)$$

式中: Z_{ij} 表示在某一风速下结构某一功能的安全裕度;当 $Z_{ij} < 0$ 时表示结构处于失效状态; R_i 表示不同性能极限状态下的结构抗力; S_j 表示不同风速下的结构响应。进行结构风灾易损性分析之前,需先确定不同风速

下的结构响应与不同性能极限状态下的结构抗力。

输电塔的风致响应主要由杆塔自身风荷载和导线、绝缘子串传递到塔身挂点的风荷载共同引起,在分析输电塔风致振动时又可将结构的总响应视为平均风响应与脉动风响应的叠加,对于质量、面积均较小的绝缘子串,仅考虑其平均风响应。脉动风响应包括背景响应和共振响应两部分,因大跨越输电塔的质量远大于导线,故此处仅考虑输电塔的共振风响应。

1.1 平均风致响应

依照中国现行电力设计规范^[2],输电塔、线和绝缘子等部分的平均风荷载表达式 $\bar{W}_a(z_i)$ 为

$$\bar{W}_a(z_i) = \bar{w}(z_i) \cdot \mu_{sa}(z_i) \cdot A_a(z_i), \quad (2)$$

$$\bar{w}(z_i) = 0.5\rho \bar{V}^2(z_i), \quad (3)$$

式中:下标 a 可为 T、L、I,分别指杆塔、输电导线与绝缘子串; $\bar{W}_a(z_i)$ 为输电塔线体系中各部分所对应的平均风荷载; (z_i) 表示各部分的空间位置,空间位置如图 1 所示; $\bar{w}(z_i)$ 为高度 z_i 处的平均风压; ρ 为空气密度; $\bar{V}(z_i)$ 为高度 z_i 处的平均风速,与 10 m 处的基本风速 \bar{V}_{10} 存在指数关系, $\bar{V}(z_i) = \bar{V}_{10}(z_i/10)^\alpha$, α 为地面粗糙度指数,对 A、B、C 和 D 这 4 种地形分别取 0.12、0.15、0.22 和 0.30; $\mu_{sa}(z_i)$ 为各部分对应的构件体型系数;各部分的挡风面积 $A_a(z_i)$ 以式(4)计算。

$$\begin{cases} A_T(z_i) = \text{塔身迎风面投影面积}, \\ A_L(z_i) = d \cdot (L_1 + L_2) \cdot \sin \theta, \\ A_I(z_i) = n \lambda_1 A_1, \end{cases} \quad (4)$$

式中: d 为导线的外径,对于分裂导线取所有子导线外径的总和; L_1, L_2 为导线左、右档距; θ 为风向角; n 为垂直风向绝缘子联数; λ_1 为顺风向绝缘子串风荷载屏蔽折减系数; A_1 为单联绝缘子串承受风压面积计算值。

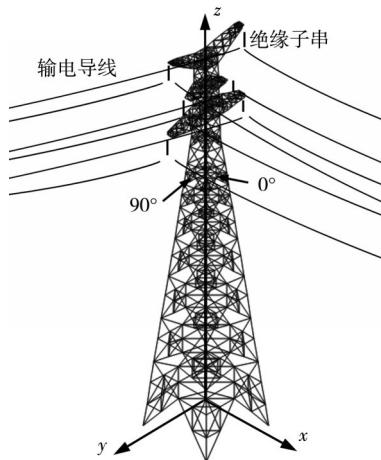


图 1 输电塔空间位置示意图

Fig.1 Diagram of spatial positioning of transmission towers

通过影响函数,得到平均风下的输电塔响应^[15]为

$$\bar{r}_a = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \bar{W}_a(z_i) \cdot i_{Tl,x} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^m \bar{W}_a(z_i) \cdot i_{Tl,y} \right]^2}, \quad (5)$$

式中: $i_{Tl,x,y}$ 为高度 z_i 处作用单位荷载时结构的 x 或 y 方向的响应。对于输电塔这类竖向悬臂结构,通常只考虑第 1 阶振型的影响,且最为关心塔顶位移、基底剪力和弯矩 3 个响应情况,对于不同的响应情况 $i_{Tl,x,y}$ 取值为

$$i_{Tl,x,y} = \begin{cases} \frac{\varphi_{1,x,y}(z_i) \varphi_{1,x,y}(H)}{K_{1,x,y}^*} & x \text{ 或 } y \text{ 方向第 1 阶塔顶位移}, \\ 1 & \text{基底剪力}, \\ z_i & \text{基底弯矩}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: H 为输电塔塔高; $\varphi_{1-x,y}(z_i)$ 和 $\varphi_{1-x,y}(H)$ 为荷载作用部分处和输电塔塔顶的第 1 阶振型坐标; $K_{1-x,y}^*$ 为第 1 阶广义刚度。

1.2 脉动风致响应

1.2.1 风致背景响应

对于杆塔可仅考虑脉动风的竖向相关性, 即只考虑 z 方向的相关性, 背景风荷载 $\tilde{W}_{\text{TB}}(z_i; t)$ 、背景风响应 \tilde{r}_{TB} 的表达式为

$$\tilde{W}_{\text{TB}}(z_i; t) = \rho \bar{V}(z_i) v(z_i, t) \cdot \mu_{\text{sT}}(z_i) \cdot A_{\text{T}}(z_i), \quad (7)$$

$$\tilde{r}_{\text{TB}} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \tilde{W}_{\text{TB}}(z_i; t) \cdot i_{\text{T}_{i,x}} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^m \tilde{W}_{\text{TB}}(z_i; t) \cdot i_{\text{T}_{i,y}} \right]^2}, \quad (8)$$

式中: $v(z_i, t)$ 为高度 z_i 处的脉动风速。

基于随机过程理论^[16-17]得背景风作用于输电杆塔上的脉动响应分量功率谱为

$$S_{\tilde{r}_{\text{TB}}}(f) = \rho^2 \cdot S_{v_{j,y_k}}(f) \cdot \bar{V}_{10}^2 \cdot (C_x^2 + C_y^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

$$C_x = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m i_{\text{T}_{j,x}} \cdot i_{\text{T}_{k,x}} \cdot I_{z_j} \cdot I_{z_k} \cdot \mu_{\text{sT}}(z_j) \cdot A_{\text{T}}(z_j) \cdot \mu_{\text{sT}}(z_k) \cdot A_{\text{T}}(z_k) \cdot \text{coh}(z_j, z_k; f), \quad (10)$$

$$C_y = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m i_{\text{T}_{j,y}} \cdot i_{\text{T}_{k,y}} \cdot I_{z_j} \cdot I_{z_k} \cdot \mu_{\text{sT}}(z_j) \cdot A_{\text{T}}(z_j) \cdot \mu_{\text{sT}}(z_k) \cdot A_{\text{T}}(z_k) \cdot \text{coh}(z_j, z_k; f), \quad (11)$$

式中: f 为脉动风频率, Hz; I_{z_i} 为计算高度处的湍流度, $I_{z_i} = I_{10}(z_i/10)^{-a}$, I_{10} 对应 A、B、C 和 D 类地貌分别为 0.12、0.14、0.23 和 0.39; 对于输电杆塔这类高耸结构, 通常只考虑竖向相关, 高度 z_j 与 z_k 位置处的脉动风竖向相干函数 $\text{coh}(z_j, z_k; f)$ 及脉动风功率谱 $S_{v_{j,y_k}}(f)$ 表达式^[2]为

$$\text{coh}(z_j, z_k; f) = \exp\left(-\frac{|z_j - z_k|}{60}\right), \quad (12)$$

$$S_{v_{j,y_k}}(f) = \sigma_v^2 S_v(f), \quad (13)$$

$$S_{\tilde{r}_{\text{LB},i}}(f) = \rho^2 \cdot \bar{V}_{10}^2 \cdot \sigma_v^2 \cdot S_v(f) \cdot \varepsilon_c^2 \cdot d^2 \cdot (i_{\text{T}_{i,x}}^2 + i_{\text{T}_{i,y}}^2) \cdot I_{z_i}^2 \cdot \int_{-L_1}^{L_2} \int_{-L_1}^{L_2} [i_c(x_1) \cdot i_c(x_2) \cdot \text{coh}(x_1, x_2; f)] dx_1 dx_2, \quad (14)$$

式中: $S_v(f)$ 为归一化的 Davenport 风速谱, $\sigma_v^2 = 4k_{10}\bar{V}_{10}^2$, k_{10} ^[18] 为表面阻力系数, 对应 A、B、C 和 D 类地貌分别取 0.001 29、0.002 15、0.004 64 和 0.012 91; x_1, x_2 为导线纵向坐标; ε_c 为规范^[2]考虑结构敏感性和塔线叠加相关性引入的风荷载脉动折减系数, 由电压等级确定; 坐标 x_1 与 x_2 位置处的风速相干函数 $\text{coh}(x_1, x_2; f) = \exp(-|x_1 - x_2|/50)$; $i_c(x)$ 为导线挂点反力影响函数, 表达式为

$$i_c(x) = \begin{cases} \frac{L_1 + x}{L_1}, & -L_1 \leq x \leq 0, \\ \frac{L_2 + x}{L_2}, & 0 \leq x \leq L_2. \end{cases} \quad (15)$$

对于导线需考虑脉动风水平相干性、挂点影响函数等, 背景风作用于导线传递至杆塔引起的杆塔脉动响应分量功率谱 $S_{\tilde{r}_{\text{LB}}}(f)$ 表达式为

$$S_{\tilde{r}_{\text{LB}}}(f) = \sum_{i=1}^m S_{\tilde{r}_{\text{LB},i}}(f). \quad (16)$$

脉动风作用于输电塔线体系各部分引起的背景响应方差 σ_{ab}^2 为

$$\sigma_{ab}^2 = \int_0^\infty S_{\tilde{r}_{\text{LB}}}(f) df. \quad (17)$$

1.2.2 风致共振响应

共振响应在结构自振频率附近发生, 而风致响应谱在此位置具有与结构传递函数类似的尖峰, 将自振频率附近的响应谱值按白噪声假定进行简化, 仅考虑杆塔一阶共振响应的方差为^[15]

$$\sigma_{\text{TRE}} = \frac{A_{\text{G1}}}{8} \left(\frac{S_{F_1}(f_1)}{\pi^3 n_1^3 \zeta_1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (18)$$

$$A_{\text{G1}} = (2\pi f_1)^2 \sqrt{\left[\sum_{j=1}^m m(z_j) \varphi_{1,x}(z_j) i_{\text{Ti},x} \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^m m(z_j) \varphi_{1,y}(z_j) i_{\text{Ti},y} \right]^2}, \quad (19)$$

$$S_{F_1}(f_1) = \rho^2 \bar{V}_{10}^2 \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m I_{z_j} I_{z_k} S_{v_j v_k}(z_j, z_k; f_1), \quad (20)$$

式中: A_{G1} 为第 1 阶振型对应的惯性力在结构各高度处的响应总和; $S_{F_1}(f_1)$ 为结构 1 阶频率对应的风压谱值; n_1 为结构的第 1 阶固有频率; ζ_1 为第 1 阶模态的阻尼比。

根据白噪声的性质, 共振响应的功率谱密度在所有频率上均为一常数, 且其频率不含负数, 为单边频谱, 根据第 1 阶共振响应的根方差来推导其功率谱 $S_{\tilde{r}_{\text{TRE}}}$ 为

$$S_{\tilde{r}_{\text{TRE}}} = \frac{\sigma_{\text{TRE}}^2}{2}. \quad (21)$$

1.2.3 输电塔总响应

输电杆塔、导线与绝缘子串结构尺寸和形状相差较大, 且输电导线风致响应计算时已引入考虑塔线叠加相关性的脉动折减系数, 可认为三者之间相互独立。输电塔线体系各部分的背景风响应与共振风响应按 SRSS 方法合成为脉动风总响应。综上所述, 输电塔线体系所受风荷载对输电杆塔的响应均值 \bar{r} 和方差 σ_r^2 表达式为

$$\bar{r} = \bar{r}_{\text{T}} + \bar{r}_{\text{L}} + \bar{r}_{\text{I}}, \quad (22)$$

$$\sigma_r^2 = \int_0^{\infty} S_r(f) df = \sigma_{\text{TB}}^2 + \sigma_{\text{LB}}^2 + \sigma_{\text{TRE}}^2, \quad (23)$$

$$S_r(f) = S_{\tilde{r}_{\text{TB}}}(f) + S_{\tilde{r}_{\text{LB}}}(f) + S_{\tilde{r}_{\text{TRE}}}. \quad (24)$$

通过选择不同的影响函数, 按上述准静态方法可得风荷载引起的输电杆塔任何一种响应。Zhou 等^[19]研究表明采用中国规范方法计算等效风荷载得到的塔顶位移响应最为精准, 而基底剪力等效应需要进行校正, 故选取塔顶位移作为评估输电杆塔风灾易损性的指标。

1.3 风致响应极值的概率分布

假设塔线体系的风致响应为平稳高斯随机过程, 依据首次超越概率理论^[20], 对于一个确定的基本风速, 其塔顶位移极值的概率分布表达式为

$$F_s(\hat{r}) = \exp \left\{ -v_0 t \exp \left[-\frac{(\hat{r} - \bar{r})^2}{2\sigma_r^2} \right] \right\}, \quad (25)$$

$$v_0 = \left[\frac{\int_0^{\infty} f^2 S_r(f) df}{\int_0^{\infty} S_r(f) df} \right]^{1/2}, \quad (26)$$

式中: v_0 为平均穿越率; \hat{r} 为极值响应; t 为脉动风响应的统计时长, 按中国规范 10 min 为时距确定基本风速, 取 $t=600$ s。

以安徽池州长江大跨越输电线路为例进行研究, 该大跨越为 ± 800 kV 直流与 500 kV 交流双回路共塔, 档距分布为 603、2 354、543 m。以 603 m 和 2 354 m 两档导线中的跨越塔为研究对象, 该跨越塔全高 345 m, 从上至下分为 26 个荷载分区。 ± 800 kV 导线采用 $6 \times \text{JLHA1/G6A-500/280}$ 特强钢芯高强铝合金绞线, 其悬垂串由 2 串独立的 4×550 kN 绝缘子串组成, 采用 U550BP-240T 绝缘子; 500 kV 导线采用 $4 \times \text{JLHA1/G6A-500/280}$ 特强钢芯高强铝合金绞线, 其悬垂串由 2 串独立的 4×420 kN 绝缘子串组成, 采用 U420BP-205T 绝缘子。

采用有限元软件 ANSYS 进行结构的静力非线性响应分析, 塔身构件采用 Beam188 单元模拟, 塔身材料为 Q235B、Q355B、Q420C 钢, 考虑钢材的非线性, 采用 Mises 准则的经典双线性随动强化(bilinear kinematic, BKIN)模型。

依照 DL/T 5551—2018 规范^[2], 选取最可能发生危险情况的 0°、45°、60°、90° 这 4 个风向角进行风致响应分析。将输电塔线体系各部分荷载以集中力的方式加载到输电杆塔的塔身上, 基于式(2)~(25), 获得设计风速 V_{10} 为 33 m/s 时不同风向角下的输电塔风荷载效应概率分布图, 如图 2 所示。在同一基本风速下, 不同的风向角引起的塔顶位移效应不同, 风向角为 0° 时效应最小, 风向角为 45° 时效应最大。因此, 以最不利风向角 45° 为例对塔线体系进行破坏过程分析。

2 特高压大跨越输电塔线体系结构抗力分布

2.1 结构不确定性

杆件材料的属性对结构自身抗风能力有重要影响, 考虑塔身材料参数的不确定性, 包括钢材弹性模量 E 、屈服强度 f_y 。材料属性的统计特性参考文献^[3, 21]设置, 如表 1 所示。采用拉丁超立方抽样法, 对各个材料参数进行随机抽取及组合, 得 30 个结构随机样本。

表 1 结构随机变量的统计参数

Table 1 Statistical parameters for structural random variables

结构随机参数	变量	分布形式	统计参数	
			均值	变异参数 cov/%
Q235B	屈服强度	f_y /MPa	对数正态分布	263.7
Q355B	屈服强度	f_y /MPa	对数正态分布	398.3
Q420C	屈服强度	f_y /MPa	对数正态分布	471.3
弹性模量	E /GPa	正态分布	206.0	3

2.2 结构抗风性能水准划分

输电塔线体系的工程需求参数及其极限状态的定义与传统建筑不同, 输电塔在风荷载作用下的破坏以失稳破坏为主^[22], 仅考虑强度指标无法很好地进行整体损伤评估。为合理描述整体结构的损伤情况, 分别以输电塔的塔顶位移^[12]、修正的节间位移角^[13]为指标进行破坏全过程分析。选取塔顶位移作为工程需求参数, 参考文献^[11, 13]提出特高压输电塔线抗风性能水准的定性描述如表 2 所示。

表 2 特高压输电塔抗风性能水准的定性描述

Table 2 Qualitative description of the wind resistance level of UHV transmission towers

类别	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏及倒塌
损伤现象	构件无损伤, 个别输电塔柱材出现塑性变形或挠曲, 输电塔处于平衡状态。不需修理或简单修理即可继续使用, 功能基本无影响。	部分输电塔柱材出现塑性变形或挠曲, 输电塔处于平衡状态。功能基本无影响。	大部分输电塔柱材出现较大塑性变形或挠曲, 从于弹性阶段。不需修理或简单修理即可继续使用, 功能基本无影响。	功能受干扰, 经过一般修复可恢复使用。而失去继续承载能力。
塔顶位移限制/m	$u < LS_1$	$LS_1 \leq u < LS_2$	$LS_2 \leq u < LS_3$	$u \geq LS_3$

注: 表中 LS_i ($i=1, 2, 3$) 为各阶段性能水准量化指标限值。

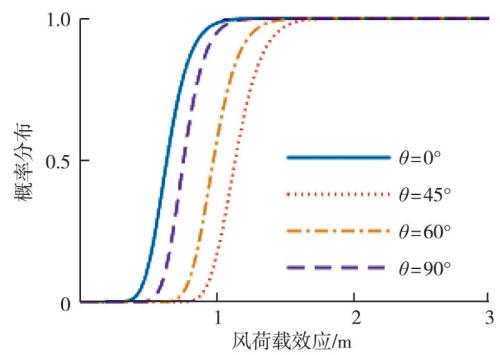


图 2 设计风速下塔顶位移概率分布图

Fig.2 Probability distribution of tower top displacement at design wind speed

对30个结构样本进行性能水准分析,下面以某一样本的性能水准为例,讨论适用于特高压大跨越输电塔的性能水准划分标准。该样本对应的材料抽样结果为屈服强度 $f_{yQ235B}=262.192$ MPa, $f_{yQ335B}=381.717$ MPa, $f_{yQ420C}=455.022$ MPa, 弹性模量 $E_{Q235B}=199.759$ GPa, $E_{Q335B}=204.667$ GPa, $E_{Q420C}=200.540$ GPa。

2.2.1 塔顶位移

该样本的塔顶位移随风速的变化曲线如图3所示,不同基本风速下的输电塔位移图如图4所示。当基本风速达到60 m/s后,塔顶位移急剧增大,出现屈服点,假设位移超过该点后输电塔结构整体会发生严重破坏及倒塌^[12]。该屈服点所对应的塔顶位移为3.792 m,可以设为判定严重破坏及倒塌(LS_3)的阈值,分别以严重破坏及倒塌状态下塔顶位移的50%和75%作为输电塔线体系发生轻微破坏(LS_1)和中等破坏(LS_2)的阈值,由此划分该样本的性能水准如表3所示。

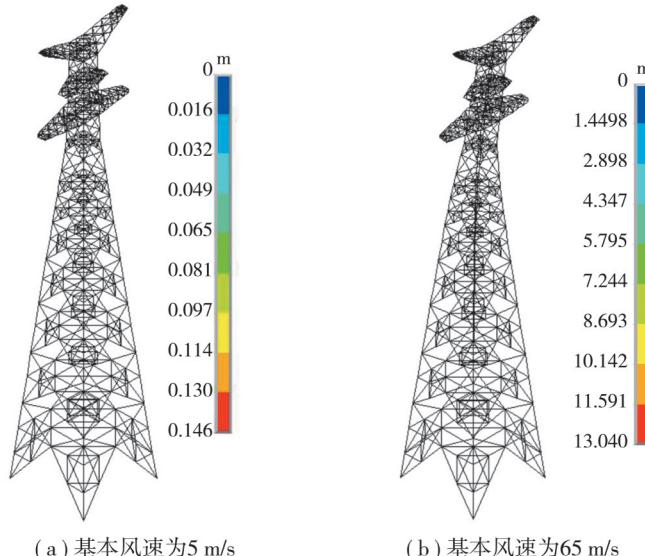


图4 输电塔位移图

Fig.4 Displacement diagram of transmission tower

表3 某一特高压输电塔样本以塔尖位移 u 为控制参数的性能水准划分

Table 3 The performance level classification of a sample UHV transmission tower with top displacement u as the control parameter

损伤指标	类别			
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏及倒塌
塔尖位移/m	$u < 50\%$ 屈服点位移	$50\% \leq u < 75\%$ 屈服点位移	$75\% \leq u <$ 屈服点位移	$u \geq$ 屈服点位移
	$u < 1.896$	$1.896 \leq u < 2.844$	$2.844 \leq u < 3.792$	$u \geq 3.792$
ISDR/rad	$ISDR < 1/500$	$1/500 \leq ISDR < 1/250$	$1/250 \leq ISDR < 1/125$	$ISDR \geq 1/125$
	$u < 2.126$	$2.126 \leq u < 3.915$	$3.915 \leq u < 5.061$	$u \geq 5.061$

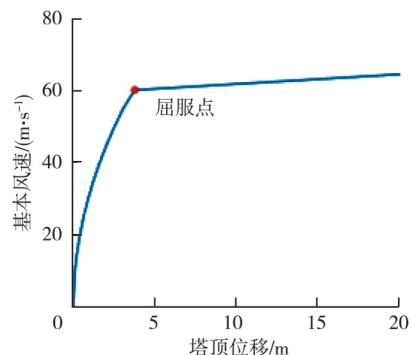


图3 45°风向角下的确定性输电塔线体系 Pushover 曲线

Fig.3 The pushover curve of the deterministic transmission tower line system at a wind angle of 45°

2.2.2 修正的节间位移角

节间位移角可以反映输电塔结构的薄弱部位, 常用于划分建筑损伤情况。考虑到输电塔结构每个节间底部刚性较小, 且输电塔结构高宽比大, 节间底部会发生显著的扭转变形, 采用扣除扭转变形的节间位移角作为损伤指标^[23]

$$ISDR = \max \left(\frac{u_i - u_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} - \theta_{i-1} \right), \quad (27)$$

式中: i 为节间编号; $ISDR$ 为第 i 个节间修正的节间位移角; u_i 和 u_{i-1} 分别为第 i 个节间顶部和底部的水平位移, h_i 和 h_{i-1} 分别为第 i 个节间顶部和底部的高度, θ_i 为第 i 个节间底部的旋转角。该样本输电塔修正的节间位移在不同风速下的分布情况如图 5 所示。

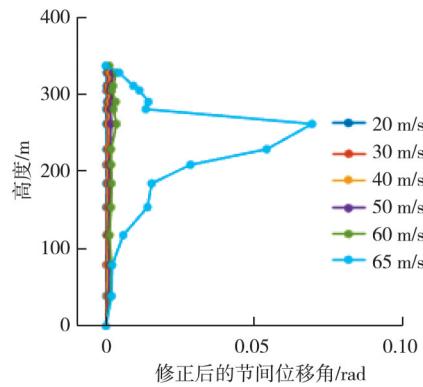


图 5 不同基本风速下的输电塔各修正的节间位移角

Fig.5 Corrected story drift of transmission towers at different basic wind speeds

由图 5 可见, 随着基本风速的增大, 易发生损坏部位的修正的节间位移角有明显增大。基本风速为 65 m/s 时, 位于输电塔 261 m 处的修正的节间位移角发生突增, 261 m 是输电杆塔变截面处, 同时也是最早出现主材屈服现象的节段, 在输电塔整体结构中破坏最为严重, 可见修正的节间位移角能较好地反映输电塔的损伤破坏位置和程度。

以修正的节间位移角为损伤指标, 将 1/500、1/250 和 1/125 作为发生轻微破坏 (LS_1)、中等破坏 (LS_2) 和严重破坏及倒塌 (LS_3) 的阈值^[13], 由此划分该样本的性能水准如表 3 所示。

2.3 结构抗力的概率分布

基于上述划分的性能水准模型以及材料不确定样本的承载力曲线, 可获得不同性能水准下四类破坏模式各自的样本均值和样本标准差, 如表 4 所示。

表 4 特高压输电塔结构抗力的统计特征

Table 4 Statistical characteristics of UHV transmission tower structural resistance

损伤指标	破坏阈值 LS_i					
	LS_1		LS_2		LS_3	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
塔尖位移	2.027	0.162	3.034	0.242	3.805	0.323
ISDR	2.117	0.025	3.607	0.268	4.618	0.481

由表 4 可知, 由 ISDR 划分的破坏阈值比由塔尖位移所划分的略高, 而二者的标准差随着破坏等级的增加而增加, 可认为材料的不确定性对结构抗力有一定影响, 且破坏等级越高时体现得越明显。

假设结构的抗风能力服从对数正态分布^[24], 可得在已知分布下结构抗力的概率分布为

$$f_r(r) = \frac{1}{r\sigma_{\ln}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \mu_{\ln})^2}{2\sigma_{\ln}^2}\right], \quad (28)$$

式中: μ_{\ln} 、 σ_{\ln} 分别为对应破坏阈值的对数均值、对数标准差, 由表 4 中的样本均值、样本标准差换算得到。且对各样本结果进行对数正态拟合分布, 拟合优度 R^2 均接近于 1, 效果较好, 该假设合理。列举某一结构抗力的样本拟合如图 6 所示, 拟合曲线与样本分布贴合。

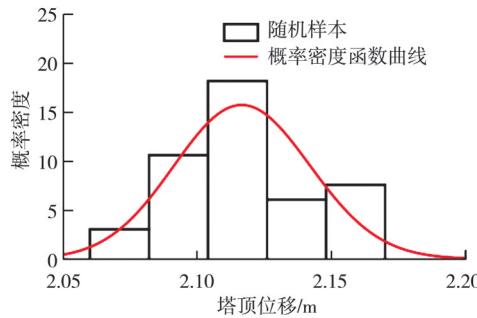


图 6 某结构抗力样本拟合图

Fig.6 Sample fitting plot of structural resistance

3 结构风灾易损性分析

对于式(1), 假设结构响应、抗力彼此独立, 则在确定的基本风速下结构达到某种损伤状态的条件概率为

$$P_f = P(R < S) = \int_0^{+\infty} \int_r^{+\infty} f_s(s) f_R(r) ds dr = \int_0^{+\infty} [1 - F_s(r)] f_R(r) dr. \quad (29)$$

式中: R 、 r 为结构抗力; S 、 s 为结构响应; 大写表示随机变量, 小写表示代入具体数值。结合式(26)(29)(30), 可得到该输电塔易损性曲线, 如图 7 所示。

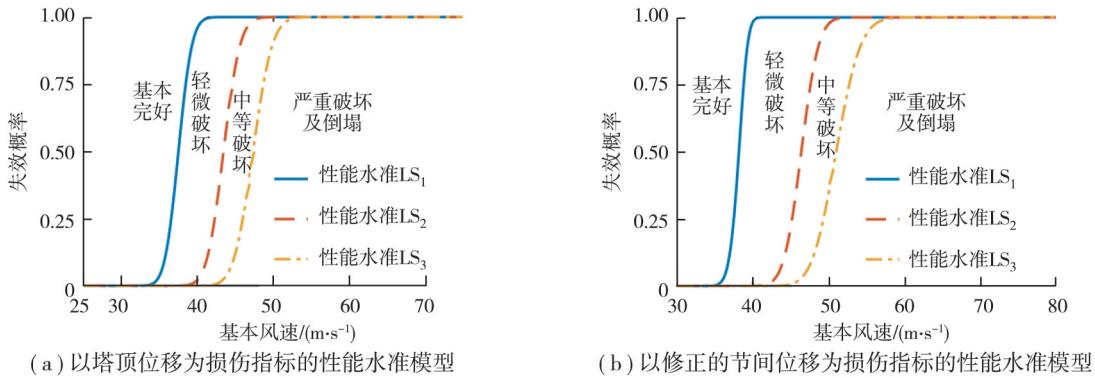


图 7 不同破坏状态下输电塔线的易损性曲线

Fig.7 Fragility curves of transmission towers under different failure states

对比 2 个不同性能水准模型所划分的易损性曲线, 二者划分轻微破坏时较接近, 在评估中等破坏、严重破坏及倒塌时, 以塔顶位移为损伤指标的性能水准模型均比以修正的节间位移角为损伤指标的性能水准模型保守。以修正的节间位移角划分的破坏水准相对较高, 是因为修正的节间位移角具有较大的变化范围, 能够更好地反映结构的柔性和变形情况; 而塔顶位移受到整个结构的约束, 变化范围较小。

由易损性曲线可知, 在 2 个不同的性能水准模型中, 在设计风速 33 m/s 作用下, 输电塔线体系发生破坏的可能性均趋近于 0, 认为该输电塔线体系具有较好的抗风性能。随着风速增加, 各易损性曲线都急剧增长, 表明该输电塔的破坏具有一定的脆性特征。

4 结 论

以安徽池州特高压大跨越输电线路为研究对象, 基于随机风振响应分析理论和现行架空输电线路荷载规范获得该大跨越输电塔在风荷载作用下的结构效应分布; 考虑结构材料参数的不确定性, 得到其抗风承载能力性能概率分布; 分别基于塔顶位移、修正的节间位移角为指标的性能水准量化模型, 计算得到最不利风向角下的输电塔风灾易损性曲线, 主要结论如下:

- 1) 结合随机振动风致响应分析理论和国内现行架空输电线路荷载规范推导获得准静态的输电塔整体风致效应概率分布, 避免了繁琐的动力分析, 有效地提高了计算效率;
- 2) 考虑结构材料参数的不确定性, 得到结构抗力的概率分布, 表明随着结构破坏程度的加重, 结构的不确定性对结构承载力的影响越明显;
- 3) 基于结构抗力分析结果, 塔顶位移、修正的节间位移角均可作为损伤指标划分性能水准模型, 二者在评估轻微破坏时较接近, 而在评估中等破坏、严重破坏及倒塌时, 前者比后者更为保守;
- 4) 大跨越塔结构抗风易损性分析发现, 在设计风速 33 m/s 时, 输电塔线体系发生破坏的可能性趋近于 0, 随着风速增加, 易损性曲线急剧增长。

参考文献

- [1] Tamura Y, Chen B, Wu Y, et al. Classification of equivalent static wind loads: comparisons and applications[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 251: 110403.
- [2] 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, 2019.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Load code for the design of overhead transmission line: DL/T 5551—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB50068-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of building structures: GB50068—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [4] 欧进萍, 段宇博. 结构抗风可靠度分析与设计的等效随机静风荷载[J]. 建筑结构, 1995, 25(7), 27-33, 42.
Ou J P, Duan Y B. Wind resistance reliability analysis and design of structures equivalent random static wind loads[J]. Building Structure, 1995, 25(7), 27-33, 42. (in Chinese)
- [5] 王松涛, 高斐略, 李正良, 等. 现行输电塔设计规范可靠度水准的评估与分析[J]. 广东电力, 2015, 28(7): 100-108.
Wang S T, Gao F L, Li Z L, et al. Evaluation and analysis on reliability level of current design specification for power transmission tower[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(7): 100-108. (in Chinese)
- [6] 何浩林, 汪大海, 黄增浩, 等. 输电直线杆塔风灾易损性的准静态分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3732-3742.
He H L, Wang D H, Huang Z H, et al. Wind hazard fragility analysis of transmission free-standing towers using quasi-static method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3732-3742. (in Chinese)
- [7] Pan H Y, Li C, Tian L. Seismic fragility analysis of transmission towers considering effects of soil-structure interaction and depth-varying ground motion inputs[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(11): 4311-4337.
- [8] 宋鹏彦, 赵仰康, 杨保卫. 基于整体易损性的猫头型输电塔抗倒塌能力分析[J]. 计算力学学报, 2023, 40(5): 710-717.
Song P Y, Zhao Y K, Yang B W. Anti-collapse capacity assessment of owl type transmission towers based on global seismic fragility analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(5): 710-717. (in Chinese)
- [9] Liang Y, Zhao C X, Wei Y Y, et al. Fragility analysis of an ultra high voltage transmission tower in saline soil subjected to wind loads[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023: 1-18.
- [10] Macedo F C, Alminhana F, Fadel Miguel L F, et al. Performance-based reliability assessment of transmission lines under tornado actions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 252: 110475.

- [11] 俞登科, 李正良, 韩枫, 等. 基于性能目标的特高压输电塔抗风可靠度分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(6): 657-662.
Yu D K, Li Z L, Han F, et al. Reliability analysis on ultra-high voltage transmission tower under wind based on performance[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(6): 657-662. (in Chinese)
- [12] 李正良, 张智航, 王涛. 考虑多重性能水准的特高压双柱悬索拉线塔风灾易损性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8304-8315, S32.
Li Z L, Zhang Z H, Wang T. Wind fragility analysis of UHV double column suspended guyed tower considering multiple performance levels[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8304-8315, S32. (in Chinese)
- [13] 王飞. 特高压输电线路杆塔结构抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020.
Wang F. Study on seismic performance of UHV transmission line tower structure[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2020. (in Chinese)
- [14] Fu X, Wang J, Li H N, et al. Full-scale test and its numerical simulation of a transmission tower under extreme wind loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 190: 119-133.
- [15] 林拥军, 林池琰, 刘先明, 等. 基于风致响应的高层建筑等效静力荷载研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(1): 137-144, 188.
Lin Y J, Lin C T, Liu X M, et al. Research on equivalent static load of high-rise buildings based on wind-induced responses[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(1): 137-144, 188. (in Chinese)
- [16] Nigam N C. Structural optimization in random vibration environment[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1972, 10(4): 551-553.
- [17] Nigam N C. Phase properties of a class of random processes[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 10(5): 711-717.
- [18] 李创第, 杨雪峰, 李宇翔, 等. 带支撑广义 Maxwell 黏弹性阻尼耗能结构风振响应分析[J]. 计算力学学报, 2024, 41(3): 428-436.
Li C D, Yang X F, Li Y X, et al. Wind vibration response analysis of a generalized Maxwell viscoelastic damped energy dissipation structures with supports[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 428-436. (in Chinese)
- [19] Zhou Y, Gu M, Xiang H F. A long wind static equivalent wind loads and responses of tall buildings. Part II: effects of mode shapes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 79(1/2): 151-158.
- [20] Hu J, Wang J H. First passage dynamic reliability analysis of non-stationary and non-Gaussian buffeting random dynamic responses of long-span suspension bridge[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(20): 2350199.
- [21] JCSS-2001 Probabilistic model code-Part 3-Resistance models[S]. Denmark: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [22] Zhu C, Yang Q S, Wang D H, et al. Fragility analysis of transmission towers subjected to downburst winds[J]. Applied Sciences, 2023, 13(16): 9167.
- [23] 陈保健, 杜轲, 王飞. 钢管混凝土输电塔地震易损性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(2): 381-388, 425.
Chen B J, Du K, Wang F. Study on seismic vulnerability of concrete-filled steel tube transmission towers[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2): 381-388, 425. (in Chinese)
- [24] Fu X, Li H N, Tian L, et al. Fragility analysis of transmission line subjected to wind loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(4): 04019044.

(编辑 郑洁)