

特高压长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性分析

李正良¹, 聂元晨¹, 王涛^{2,3†}, 吴凤波⁴

- (1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150096;
3. 哈尔滨工业大学 重庆研究院, 重庆 401151;
4. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘 要: ± 800 kV 特高压长悬臂输电塔横担结构属于高位水平长悬挑结构, 对竖向地震作用比较敏感, 亟须开展横担结构的竖向地震易损性分析研究. 鉴于此, 提出一个考虑多重性能水准的特高压长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性分析框架. 首先, 以某特高压长悬臂输电塔为研究对象建立有限元模型, 分析了结构的竖向动力特性; 其次, 根据横担结构根部主材的应力比建立横担结构轻微、中度和严重破坏时的多重性能水准; 最后, 基于概率地震需求模型对横担结构开展竖向地震易损性分析. 分析结果表明: 长悬臂输电塔在竖向地震作用下受高阶振型影响显著, 对结构竖向响应贡献显著的前三阶竖向模态依次为第 16、26 和 29 阶模态; 在竖向地震作用下, 横担根部主材是横担结构的主要受力杆件; 与考虑横担结构根部拉弯主材强度破坏相比, 在给定竖向地震动强度下, 考虑压弯主材失稳破坏的横担结构失效概率明显较大.

关键词: 特高压长悬臂输电塔; 横担结构; 竖向地震动; 多重性能水准; 竖向地震易损性
中图分类号: TM753 **文献标志码:** A

Fragility Analysis on Vertical Earthquake of UHV Long Cantilever Transmission Tower Cross-arm Structure

LI Zhengliang¹, NIE Yuanchen¹, WANG Tao^{2,3†}, WU Fengbo⁴

- (1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150096, China;
3. Chongqing Research Institute, Harbin Institute of Technology, Chongqing 401151, China;
4. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The ± 800 kV ultra high voltage (UHV) long cantilever transmission tower cross-arm structure belongs to a high-level horizontal long cantilever structure sensitive to the vertical seismic effect. It is urgent to conduct vertical seismic fragility analysis research on cross-arm structures. To address this, a framework for vertical seismic fragility analysis, considering multiple performance levels, was proposed for the UHV long cantilever

* 收稿日期: 2023-12-25

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2024NSCQ-MSX1134), Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2024NSCQ-MSX1134); 重庆市博士后研究特别资助项目(2022CQBSHBT3009), Special Supported by Chongqing Postdoctoral Research Project (2022CQBSHBT3009)

作者简介: 李正良(1963—), 男, 江苏江阴人, 重庆大学教授

† 通信联系人, E-mail: taowang@alu.cqu.edu.cn

transmission tower cross-arm structure. Firstly, a finite element model was established with the UHV long cantilever transmission tower as the research object, and the vertical dynamic characteristics of the structure were analyzed. Secondly, based on the stress ratio of the main component at the end of the cross-arm structure, multiple performance levels for slight, moderate, and severe damage to the cross-arm structure were established. Finally, a vertical seismic fragility analysis based on a probabilistic seismic demand model was carried out for the cross-arm structure. The analysis results show that the long cantilever transmission tower is significantly affected by higher-order vibration modes under vertical earthquake, and the first three vertical modes that contribute significantly to the vertical response of the structure are the 16th, 26th, and 29th modes, respectively. Under vertical seismic action, the end main component is the main load-bearing member of the cross-arm structure. Compared with considering the strength failure of the main component in tension bending at the end of the cross-arm structure, the failure probability of the cross-arm structure considering the instability failure of the main material in compression bending is significantly higher under the given vertical seismic intensity.

Key words: UHV long cantilever transmission tower; cross-arm structure; vertical earthquake; multiple performance levels; vertical seismic fragility

随着我国电力事业不断发展,特高压直流输电线路因具有远距离、低能耗和大容量等优势而受到广泛关注^[1]。 ± 800 kV 特高压直流线路承担的电压等级高、电气间隙大,导致输电塔横担结构较长且需要承担较大的荷载。长悬臂输电塔横担结构形式特殊,属于高位水平长悬挑结构,对竖向地震作用敏感^[2]。在竖向地震作用下,长悬臂输电塔横担结构的破坏可能会因导地线的连接作用而造成相邻输电塔乃至整个输电线路的多米诺骨牌效应式破坏,进而产生巨大的社会经济损失^[3]。因此,开展长悬臂输电塔横担结构的竖向地震易损性分析对于评估特高压直流线路的抗震安全性具有重大意义。

目前,国内外学者对特高压长悬臂输电塔已经开展了一定的研究。Tu等^[4]通过对长悬臂输电塔开展风荷载不同加载方式的风振模拟分析,研究发现分布风荷载引起的杆件应力显著大于集中风荷载引起的杆件应力,且对横担结构两端杆件的影响最为明显;楼文娟等^[5]通过对长悬臂输电塔开展风洞试验,发现横担结构端部测点的加速度响应明显大于塔身相同高度处的响应,且塔头出现了比较明显的扭转现象;沈国辉等^[6]针对长悬臂输电塔的风致扭转效应,提出了顺线路方向扭转响应和扭转等效风荷载的理论计算方法,并通过风洞试验验证了理论计算方法的准确性。

上述研究内容关注的是长悬臂输电塔的风致响应研究,而对其地震易损性方面的研究却鲜有涉及。在以往输电塔地震易损性的研究中,学者们主要关

注的是输电塔整体结构的倒塌易损性分析^[7]和考虑不同性能水准下的易损性分析^[8],而很少考虑输电塔局部重要杆件或部件的易损性。事实上,长悬臂输电塔在运行期间会遭受到不同强度等级的竖向地震作用,使得其横担结构产生不同程度的损伤和破坏。然而,国内外对于长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性的研究还暂处于空白,因此,亟须开展对考虑多重性能水准的长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性分析的研究。

鉴于此,本文以某 ± 800 kV 特高压长悬臂输电塔为研究对象建立了有限元模型,分析了结构竖向动力特性;依据规范生成竖向地震反应谱,从美国太平洋工程地震研究中心(PEER)数据库^[9]选取了20条竖向地震动,以特高压长悬臂输电塔横担结构根部主材的应力比建立了横担结构的多重性能水准;继而结合概率地震需求模型,提出了一个考虑多重性能水准的特高压长悬臂输电塔横担结构的竖向地震易损性分析框架。本文研究可以为特高压长悬臂输电塔横担结构的抗震性能评估提供参考。

1 特高压长悬臂输电塔有限元模型及竖向动力特性

本文以某 ± 800 kV 特高压直流输电线路工程中的长悬臂输电塔为研究对象,抗震设防烈度为8度,场地类别为Ⅱ类。长悬臂输电塔总高度81.5 m,呼高72.0 m,根开17.6 m,横担总长度51.0 m,单侧横担长

23.2 m, 结构的主材和斜材采用 Q345 钢材, 辅材采用 Q235 钢材, 均为等边 L 形角钢。

图 1 为基于 ANSYS 有限元分析软件建立的长悬臂输电塔有限元模型。钢材的弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 密度为 7850 kg/m^3 , 泊松比为 0.3, 结构的阻尼比设置为 2%。长悬臂输电塔的主材和斜材采用梁单元 BEAM188 进行模拟, 辅材采用杆单元

LINK180 进行模拟。钢材本构关系采用双线性随动强化模型 (BKIN), 塔腿底部完全固结。为提高有限元计算效率, 本文参考文献 [10] 所进行的研究, 将导线、绝缘子荷载简化成对应悬挂点处的等效静力荷载。本文最终建立的长悬臂输电塔有限元模型共计 646 个节点和 1 648 个单元, 其包含 1 438 个梁单元和 210 个杆单元。

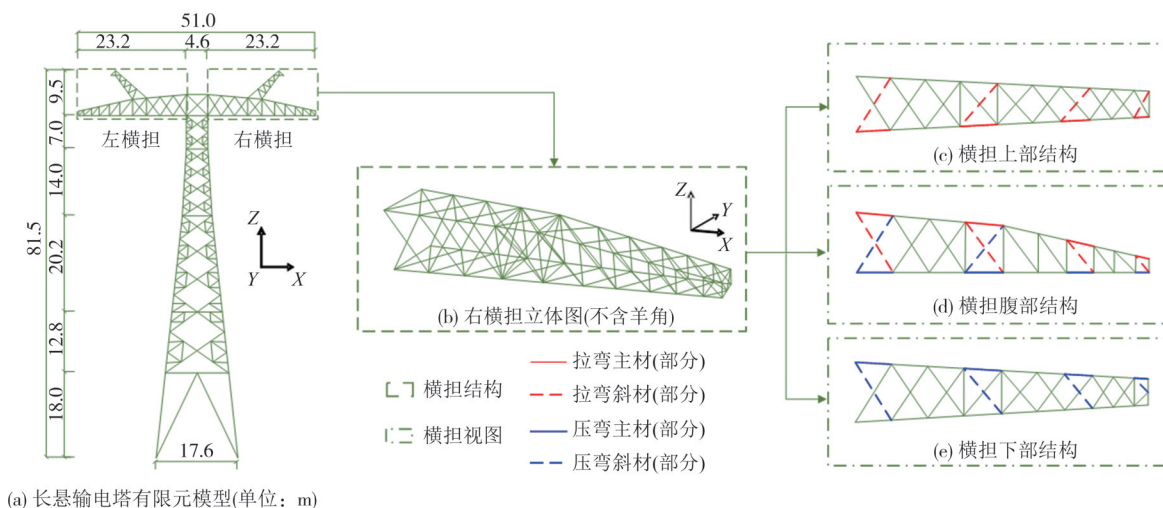


图 1 长悬臂输电塔有限元模型及横担细部结构

Fig.1 Finite element model of long cantilever transmission tower and details of cross-arm structure

采用 Block Lanczos 法^[11]对所建立的有限元模型进行模态分析, 提取了其前 100 阶模态及相应的竖向有效质量参与系数, 如图 2 所示。

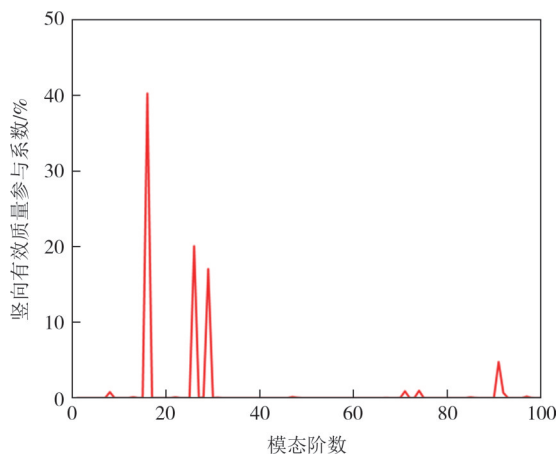


图 2 长悬臂输电塔竖向有效质量参与系数

Fig.2 Vertical effective mass participation coefficient of long cantilever transmission tower

分析图 2 可知, 对长悬臂输电塔结构竖向响应贡献显著的前三阶模态依次为第 16、26 和 29 阶模态, 其对应的竖向有效质量参与系数依次为 40.2%、20.1% 和 17.0%, 表明结构在竖向地震作用下受高阶振型影响显著。因此, 为了提高有限元分析结果的准

确性, 依据文献 [12] 的研究, 选取第 1 和 16 阶自振频率作为控制频率, 建立 Rayleigh 阻尼矩阵。此外, 图 3 给出了上述三阶模态所对应的长悬臂输电塔竖向振型, 可见横担结构在第一阶竖向振型 (16 阶) 下变形最为明显。

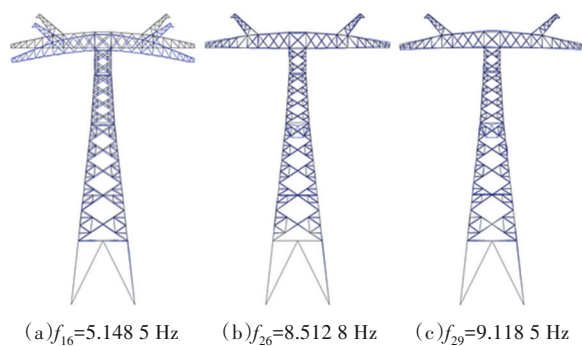


图 3 长悬臂输电塔竖向振型

Fig.3 Vertical vibration mode of long cantilever transmission tower

2 考虑多重性能水准的横担结构竖向地震易损性分析框架

2.1 竖向地震动选取及地震动强度参数的确定

竖向地震动的选取对结构的动力响应分析起着

决定性作用,由于地震动强度、频谱等特性的影响,不同竖向地震动所产生的地震响应会有很大差别.对于长悬臂输电塔横担结构的竖向地震易损性分析,选取 20 条地震动记录输入结构进行时程分析便可达到很高的精度^[13].

基于《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016 版)生成的竖向地震反应谱,从美国太平洋工程地震研究中心数据库中选取了 20 条实际竖向地震动记录,以考虑竖向地震动的不确定性^[14].

所选取的竖向地震动均值反应谱与规范反应谱的对比如图 4 所示.可见,所选 20 条竖向地震加速度的均值反应谱与规范反应谱可以很好地吻合.本文所选地震动震级分布区间为 6.0~8.0,震中距分布区间为 10~250 km,剪切波速分布区间主要在 150~400 m/s.具体信息见表 1.

目前结构地震易损性分析时使用的地震动强度参数 IM 较多^[15-17],其常用 IM 主要有峰值型参数如地面峰值加速度 PGA、速度 PGV、位移 PGD,以及周期型参数如 1 阶或多阶阵型的谱加速度 $S_a(T)$ 、速度 $S_v(T)$ 、位移 $S_d(T)$.文献[18]指出,对于短周期结构而言,地震动强度参数 PGA、 $S_a(T)$ 、 $S_v(T)$ 和 $S_d(T)$ 表现出更好的有效性.此外考虑到大多数地震历史资料以 PGA 为评判指标,现有抗震规范采用 PGA 为分

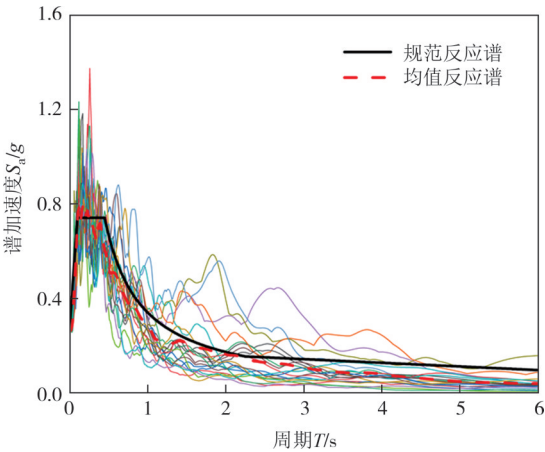


图 4 所选竖向地震动加速度反应谱
Fig.4 Acceleration response spectrum of selected vertical earthquakes

析参数,且 PGA 能够直接反映地震荷载的特性,因此本文最终选择 PGA 作为地震动强度参数.

2.2 横担结构多重性能水准的建立

现行输电塔结构设计一般采用塔顶位移或主斜材应力比作为标准要求^[19].目前关于输电塔多重性能水准的建立主要关注的是输电塔这一整体结构,但并未建立长悬臂输电塔横担结构的多重性能水准.横担结构主要受力杆件的破坏会导致整个横担结构丧失承载力,因此,本文根据长悬臂输电塔横担

表 1 竖向地震动基本信息

Tab.1 Basic information of vertical earthquakes

序号	地震动名称	发生年份	台站	震级	震中距/km	剪切波速/(m·s ⁻¹)
1	Taiwan SMART1(45)	1986	SMART1 C00	7.30	56.01	309.41
2	Landers	1992	Fort Irwin	7.28	62.98	367.43
3	Big Bear-01	1992	Joshua Tree	6.46	40.99	379.32
4	Northridge-01	1994	Huntington Beach-Lake St	6.69	74.70	315.52
5	Northridge-01	1994	Playa Del Rey-Saran	6.69	24.42	345.72
6	Hector Mine	1999	Big Bear Lake-Fire Station	7.13	61.85	406.70
7	Hector Mine	1999	Pomona-4th & Locust FF	7.13	143.36	384.44
8	Hector Mine	1999	San Bernardino-Mont. Mem Pk	7.13	104.95	358.92
9	Chi-Chi_Taiwan-03	1999	TCU040	6.20	68.23	362.03
10	Chi-Chi_Taiwan-04	1999	CHY070	6.20	88.91	265.45
11	Chi-Chi_Taiwan-05	1999	TAP041	6.20	147.34	363.56
12	Chi-Chi_Taiwan-05	1999	TCU098	6.20	95.44	346.56
13	Taiwan SMART1(45)	1986	SMART1 I09	7.30	55.99	309.41
14	Denali_Alaska	2002	Fairbanks-Univ of Alaska	7.90	139.11	428.08
15	Bam_Iran	2003	Mahan	6.60	147.3	302.64
16	Chuetsu-oki_Japan	2007	NIGH04	6.80	96.15	392.08
17	Chuetsu-oki_Japan	2007	YMT005	6.80	171.83	192.29
18	El Mayor-Cucapah_Mexico	2010	Ocotillo Wells-Veh. Rec. Area	7.20	67.71	361.22
19	Tottori_Japan	2000	EHM004	6.61	125.63	285.34
20	Tottori_Japan	2000	HYGH10	6.61	128.51	223.87

结构的特点,考虑《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》(DL/T 5486—2020)^[20]对不同受力杆件破坏形式的规定,建立了一类适用于长悬臂输电塔横担结构的多重性能水准.其中,式(1)考虑横担杆件拉弯强度破坏,式(2)考虑横担杆件压弯失稳破坏.

$$\frac{N}{\eta A_n} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \frac{f_y}{\gamma_R} \quad (1)$$

$$\frac{N}{\varphi m_N A} + \frac{M}{W \left(1 - 0.8 \frac{N}{N_{EX}} \right)} \leq \frac{f_y}{\gamma_R} \quad (2)$$

式中: M_x 和 M_y 分别为绕 x 轴和 y 轴的弯矩; W_x 和 W_y 分别为绕 x 轴和 y 轴的截面模量; A 和 A_n 分别为构件毛截面和净截面面积; f_y 为钢材的屈服强度; γ_R 为钢材的抗力分项系数; η 为杆件强度折减系数; φ 为杆件稳定系数; m_N 为稳定强度折减系数; N 为轴心拉力或压力; N_{EX} 为轴压系数,按式(3)计算:

$$N_{EX} = \frac{\pi^2 EA}{1.1 \lambda_x^2} \quad (3)$$

式中: λ_x 为杆件绕 x 轴的长细比.以上参数取值详见规范^[20].

本文基于横担结构主要受力杆件强度破坏和失稳破坏的角度,选择横担主要受力杆件的应力比 ξ 作为横担结构的损伤指标.应力比定义为 $\xi = f/f_R$,其中 f 表示设计应力, f_R 表示许用应力.根据损伤指标应力比便可定性划分长悬臂输电塔横担结构的破坏状态及抗震性能水准,如图5所示.以图5中参数 ξ_{1min} 和 ξ_{1max} 为例, ξ_{1min} 和 ξ_{1max} 分别表示长悬臂输电塔横担结构第一种损伤破坏状态(基本完好状态)下的应力比上下界限值,其分别对应0和 LS_1 .同理可知其他参数的含义,此处不再赘述.

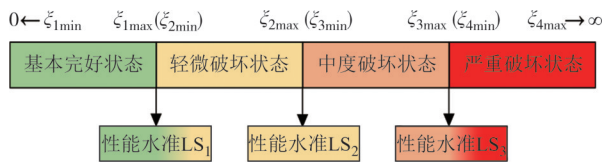


图5 长悬臂输电塔横担结构破坏状态与性能水准关系

Fig.5 Relationship between damage state and performance level of long cantilever transmission tower cross-arm structure

为了定量划分长悬臂输电塔横担结构的抗震性能水准,本文借鉴文献[21-22]的研究成果,选取应力比 $\xi=1.15$ 作为长悬臂输电塔横担结构的严重破坏状态的阈值,并以严重破坏状态阈值的75%和50%分别作为横担结构的中度破坏状态和轻微破坏状态的阈值,具体信息如表2所示.

表2 长悬臂输电塔横担结构的多重性能水准值

Tab.2 Multiple performance level values for long cantilever transmission tower cross-arm structure

性能状态	破坏状态阈值
轻微破坏状态	$LS_1=50\% \times 1.15=0.575$
中度破坏状态	$LS_2=75\% \times 1.15=0.8625$
严重破坏状态	$LS_3=100\% \times 1.15=1.15$

2.3 横担结构概率地震需求分析及易损性曲线的建立

为建立长悬臂输电塔横担结构的竖向地震易损性曲线,需要对横担结构进行概率地震需求分析.长悬臂输电塔横担结构的概率地震需求分析模型反映了地震动强度参数IM与横担结构地震需求参数 D 的概率关系.Cornell等^[23]提出可以假设 D 与IM服从幂指数分布,即有:

$$D = aIM^b \quad (4)$$

对式(4)两边取对数可得:

$$\ln D = \ln a + b \ln IM \quad (5)$$

式中: a 和 b 是回归分析得到的参数,IM代表PGA, D 代表 ξ ,通过线性回归分析,拟合 $\ln D$ 与 $\ln \xi$ 的线性回归曲线,可得到分析样本的对数标准差 β_D :

$$\beta_D = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [\ln \xi_i - (\ln a + b \ln \text{PGA})]^2} \quad (6)$$

式中: n 是样本总数; ξ_i 是第 i 个样本所对应的横担结构主要受力杆件应力比最大值.

在地震易损性分析中,一般假设结构的地震需求 D 与结构的抗震能力 C 服从对数正态分布,可知长悬臂输电塔横担结构的竖向地震易损性函数为:

$$P_i = P(C \leq D | IM) = \Phi \left(\frac{\ln a + b \ln \text{PGA} - \ln LS_i}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_D^2}} \right) \quad (7)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 是标准正态分布函数; LS_i ($i=1,2,3$)是长悬臂输电塔横担结构的第 i 个性能状态值; β_c 是结构抗震能力的对数标准差,FEMA-P695建议取值0.25^[24].

2.4 横担结构竖向地震易损性分析流程

竖向地震易损性分析是一种从概率的角度来评估结构抗震性能的方法,即在给定的不同竖向地震动强度下,结构达到或超过不同性能状态的条件概率.根据上述建立的长悬臂输电塔横担结构的概率地震需求模型以及易损性函数,即可开展对横担结构的竖向地震易损性分析,其分析框架如图6所示,具体分析过程如下:

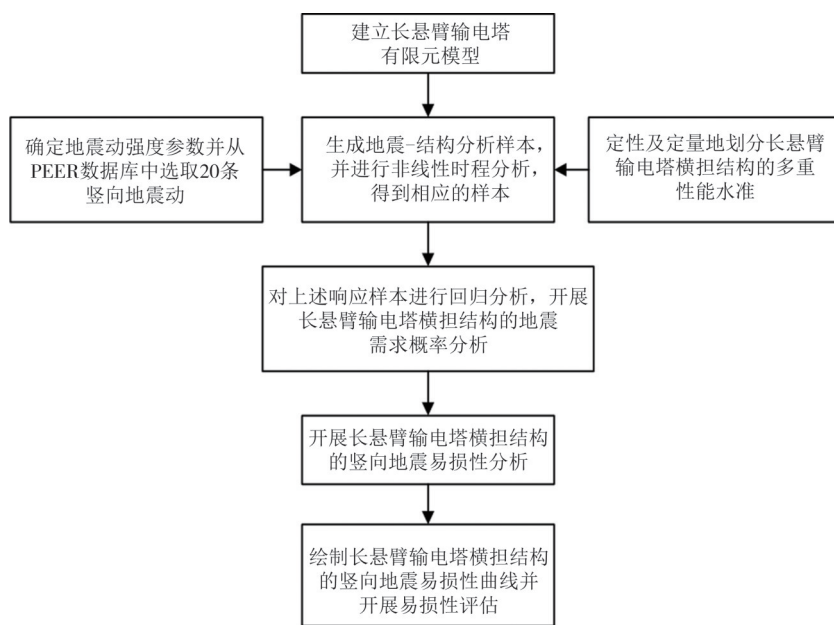


图6 长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性分析图

Fig.6 Vertical seismic fragility analysis diagram of long cantilever transmission tower cross-arm structure

步骤1 利用ANSYS有限元分析软件,建立长悬臂输电塔有限元模型。

步骤2 根据竖向地震规范反应谱,从PEER数据库中挑选出合适的20条竖向地震动,以反映结构所在场地的地震特性以及所选地震动的随机性,并确定合适的震动强度参数。

步骤3 以长悬臂输电塔横担结构主要受力杆件的应力比定性及定量地划分横担结构的多重性能水准。

步骤4 以地面峰值加速度PGA为竖向地震动强度参数IM,对所选择的20条竖向地震动以0.2g为步长进行调幅处理:0.2g,0.4g,⋯,2.0g,累计生成200个竖向地震-结构样本.对上述200个竖向地震-结构样本进行非线性时程分析,得到在不同竖向地震动强度下 $n(n=200)$ 个应力比的最大值 $\xi_i(i=1,2,\cdots,n)$ 。

步骤5 根据式(5)对上述求得的 n 个应力比的最大值 ξ 进行线性回归分析,得到相应的概率地震需求模型。

步骤6 将回归分析结果与表2所示的横担结构的多重性能水准值相结合,由式(7)计算不同地震动强度下结构动力响应达到或超过某一性能状态值的概率。

步骤7 绘制长悬臂输电塔横担结构的竖向地震易损性曲线,并基于易损性曲线对横担结构开展竖

向地震易损性评估。

3 结果分析

3.1 横担结构内力响应分析

本节选取2条竖向地震动[Taiwan SMART1(45)和 Landers]及其3个不同地震动强度(0.2g、0.4g和0.6g)作为输入,开展了输电塔横担结构的内力响应分析,各个杆件应力最大值结果如图7所示.值得注意的是,为区分横担拉压杆件受力情况,图7以压应力值冠以负号表示受压杆件.分析图7可发现,横担结构在上述6种竖向地震工况下的应力分布基本一致:1)横担根部主材是横担结构中应力最大的杆件;2)斜材应力从横担根部到横担端部先增大后减小,但其最大应力明显小于根部主材应力;3)横担羊角部位所有杆件应力相对较小.因此,经上述分析可认为横担根部主材是横担结构最先破坏的杆件位置。

事实上,从横担结构本身设计出发,横担根部与输电塔塔身相连,横担结构所受荷载最终通过根部杆件传递到输电塔上,而根部主材是根部杆件中的主要受力杆件,若横担根部主材破坏,则直接引起横担结构的破坏.基于上述分析并结合图7横担结构杆件应力分布,本文最终选择横担根部主材作为主要受力杆件,以其应力比来量化分析整个横担结构的易损概率。

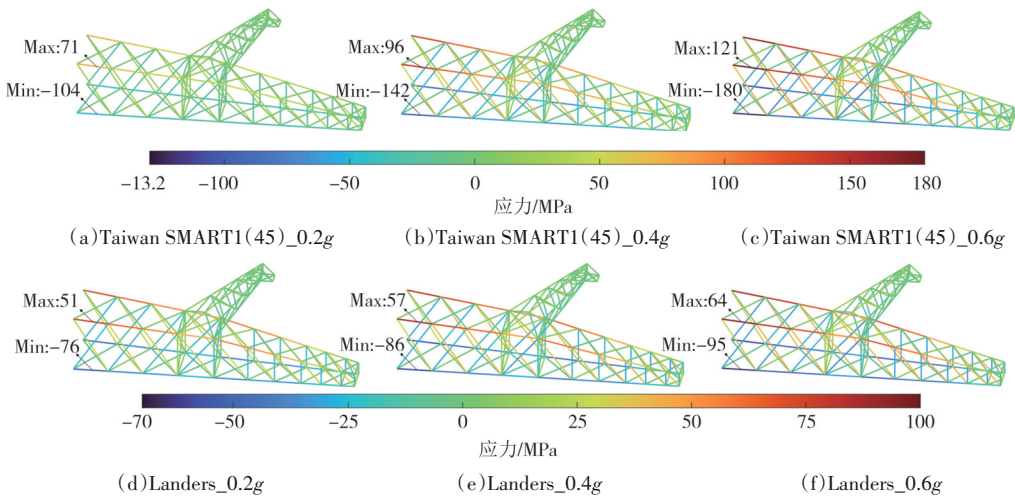


图7 横担结构应力分布

Fig.7 Stress distribution for cross-arm structure

对200个竖向地震-结构样本进行非线性时程分析,以横担结构根部主材的应力比最大值的对数值 $\ln \xi$ 作为纵坐标,地面峰值加速度的对数值 $\ln \text{PGA}$ 作为横坐标,即可分别获得长悬臂输电塔横担结构在根部拉弯主材强度破坏和根部压弯主材失稳破坏情况下的性能样本点,如图8所示.图8中正方形样本点表示在特定竖向地震动强度 $\ln \text{PGA}$ 作用下样本结果 $\ln \xi$ 的平均值,三条虚线(LS_1 、 LS_2 和 LS_3)分别表示横担结构的三个性能水准阈值,取值见表2.

分析图8可知,考虑拉弯主材强度破坏和压弯主材失稳破坏情况下的横担结构损伤情况有明显差异.对于考虑拉弯主材强度破坏的情况而言,样本点主要聚集在虚线 LS_1 以下以及 $\text{LS}_1 \sim \text{LS}_2$ 之间,说明横担结构处于基本完好状态和轻微破坏状态的性能水平概率较大.当PGA小于0.8g时,横担结构处于基本完好状态以及轻微破坏状态;当PGA达到2.0g时, $\ln \xi$ 的平均值位于虚线 LS_3 上方,表明横担结构容易发生严重破坏.然而对于考虑压弯主材失稳破坏的情况而言,样本点主要聚集在虚线 LS_3 以上,说明横担结构处于严重破坏状态的性能水平概率较大,而且PGA仅达到1.0g时, $\ln \xi$ 的平均值就已经超过横担结构严重破坏的阈值 LS_3 .对比分析可知,考虑压弯主材失稳破坏情况的横担结构更容易发生损伤.

3.2 横担结构竖向地震易损性分析

基于3.1节中长悬臂输电塔横担结构的分析结果,利用式(5)对图8的样本点开展线性回归分析,分析结果见表3.

利用式(7)并结合表2所给出的三个性能状态值,即可分别得到长悬臂输电塔横担结构在不同性能水准状态下所对应的竖向地震易损性函数.

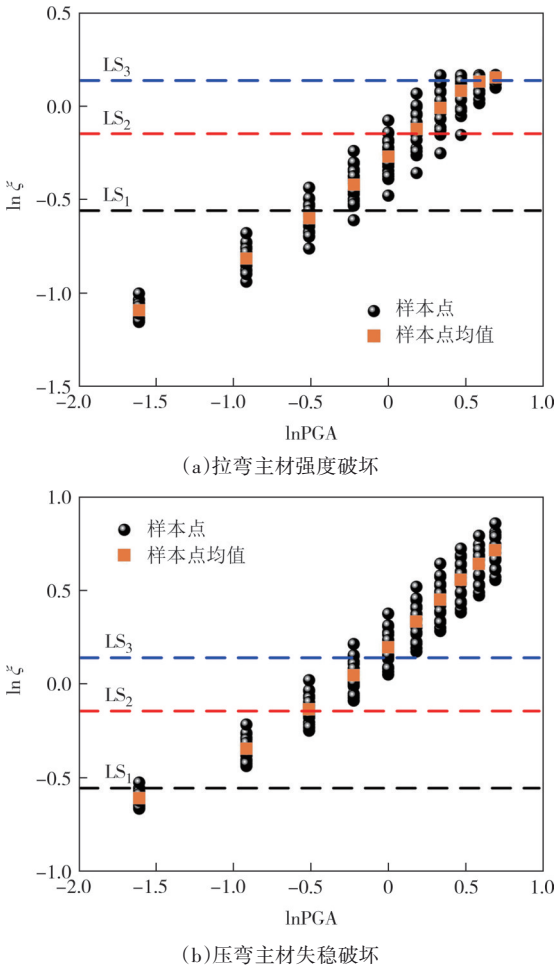


图8 横担结构性能样本点

Fig.8 Performance sample points for cross-arm structure

表3 概率地震需求模型参数

Tab.3 Probability seismic demand mode parameters

破坏形式	b	$\ln a$	β_D
拉弯主材强度破坏	0.580 7	-0.239 1	0.090 4
压弯主材失稳破坏	0.596 5	0.243 9	0.097 8

基于横担结构拉弯主材强度破坏:

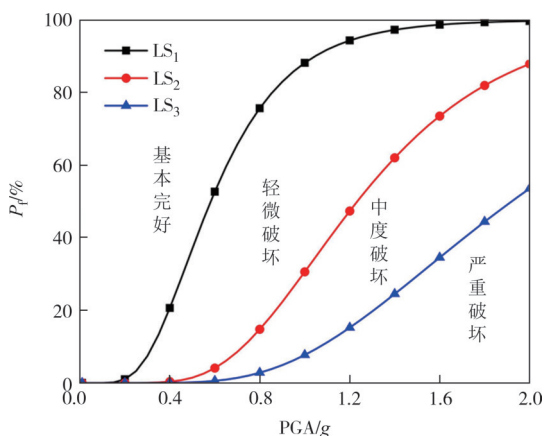
$$P_f = \begin{cases} \Phi\left(\frac{-0.2391 + 0.5807 \times \ln \text{PGA} + 0.5534}{0.2658}\right), \text{LS}_1; \\ \Phi\left(\frac{-0.2391 + 0.5807 \times \ln \text{PGA} + 0.1497}{0.2658}\right), \text{LS}_2; \\ \Phi\left(\frac{-0.2391 + 0.5807 \times \ln \text{PGA} - 0.1398}{0.2658}\right), \text{LS}_3 \end{cases} \quad (8)$$

基于横担结构压弯主材失稳破坏:

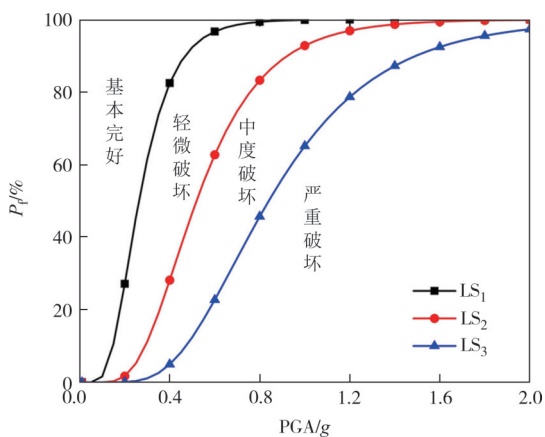
$$P_f = \begin{cases} \Phi\left(\frac{0.2439 + 0.5965 \times \ln \text{PGA} + 0.5534}{0.2684}\right), \text{LS}_1; \\ \Phi\left(\frac{0.2439 + 0.5965 \times \ln \text{PGA} + 0.1497}{0.2684}\right), \text{LS}_2; \\ \Phi\left(\frac{0.2439 + 0.5965 \times \ln \text{PGA} - 0.1398}{0.2684}\right), \text{LS}_3 \end{cases} \quad (9)$$

分别将各PGA值代入式(8)和式(9)中,即可得到长悬臂输电塔横担结构各性能状态在相应竖向地震动强度下发生的概率,进而绘制竖向地震易损性曲线,如图9所示。

分析图9可知,长悬臂输电塔横担结构各性能状



(a)拉弯主材强度破坏



(b)压弯主材失稳破坏

图9 竖向地震易损性曲线

Fig.9 Vertical seismic fragility curves

态的竖向地震易损性曲线的斜率不同,且随着PGA的增大,横担结构的失效概率逐渐增加,各性能的竖向地震易损性曲线向右偏移,性能状态逐渐由基本完好状态向严重破坏状态过渡。当PGA为1.0g时,图9(a)中横担结构在LS₁、LS₂和LS₃各性能状态下的失效概率分别为88.15%、30.59%和7.70%,图9(b)中相应的失效概率分别为99.85%、92.78%和65.10%。由此说明,与考虑拉弯主材强度破坏情况相比,在给定竖向地震动强度下,考虑压弯主材失稳破坏的横担结构失效概率明显较大。

4 结论

本文以某±800 kV特高压长悬臂输电塔为研究对象,基于ANSYS有限元软件建立了有限元模型并分析了其竖向动力特性;判定了长悬臂输电塔横担结构的主要受力杆件,并以其应力比划分了横担结构的多重性能水准,继而结合概率地震需求模型,提出了一个考虑多重性能水准的特高压长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性分析框架。主要研究结论如下:

1) 长悬臂输电塔结构在竖向地震作用下受高阶振型影响显著,对结构响应贡献显著的前三阶竖向模态依次为第16、26和29阶模态,其对应的竖向有效质量参与系数依次为40.2%、20.1%和17.0%,且横担结构在第一阶竖向振型下变形最为显著。

2) 在竖向地震作用下,长悬臂输电塔横担结构的根部主材承受最大应力,是整个横担结构最先破坏的杆件。

3) 基于横担结构根部拉弯主材强度破坏和压弯主材失稳破坏得出的长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性曲线有显著差异,结果表明考虑压弯主材失稳破坏的横担结构失效概率明显较大。

本文虽提出了特高压长悬臂输电塔横担结构竖向地震易损性分析框架,但暂未考虑塔-线的非线性耦合振动对横担结构的影响。为使横担结构在地震作用下的响应更接近工程实际,在未来的工作中,可在现有研究基础上进一步考虑塔-线的非线性耦合振动对横担结构响应的影响。

参考文献

- [1] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.

- TANG G F, PANG H, HE Z Y. R & D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760–1771. (in Chinese)
- [2] 冯丽娟, 肖从真, 徐自国, 等. 悬挑结构竖向地震作用分析及设计要点[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 65–70.
- FENG L J, XIAO C Z, XU Z G, et al. Vertical earthquake analysis and key design points for cantilevered structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 65–70. (in Chinese)
- [3] 王磊, 李正良, 王涛. 考虑SSI效应的输电塔-线耦合系统抗震可靠度分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(11): 192–203.
- WANG L, LI Z L, WANG T. Seismic reliability analysis of transmission tower-line coupling system considering SSI effect [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(11): 192–203. (in Chinese)
- [4] TU Z B, YAO J F, XU H W, et al. Influence of refined wind load parameters and wind-loading mode on wind-induced responses of a long cross-arm angle-steel transmission tower [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(6): 2250074.
- [5] 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.
- 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. (in Chinese)
- [6] 沈国辉, 李保珩, 郭勇, 等. 输电塔扭转响应和扭转等效风荷载的计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(3): 579–589.
- SHEN G H, LI B H, GUO Y, et al. Calculation methods of torsion response and torsion equivalent static wind loading of transmission tower [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(3): 579–589. (in Chinese)
- [7] TIAN L, YANG M, LIU S Y, et al. Collapse failure analysis and fragility analysis of a transmission tower-line system subjected to the multidimensional ground motion of different input directions [J]. Structures, 2023, 48: 1018–1028.
- [8] FADEL MIGUEL L F, ALMINHANA F, BECK A T. Performance based assessment of transmission lines to seismic events [J]. Engineering Structures, 2021, 249: 113298.
- [9] Pacific earthquake engineering research center. Ground motion database [DB/OL]. (2020-01-30) [2023-12-25]. <https://ngawestz.berkeley.edu>.
- [10] PARK H S, CHOI B H, KIM J J, et al. Seismic performance evaluation of high voltage transmission towers in South Korea [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(6): 2499–2505.
- [11] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG X M. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: People's Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 楼梦麟, 张静. 大跨度拱桥地震反应分析中阻尼模型的讨论[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 22–26.
- LOU M L, ZHANG J. Discussion on damping models for seismic response analysis of long-span bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 22–26. (in Chinese)
- [13] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [D]. Palo Alto: Stanford University, 1999: 16–19.
- [14] VAMVATSIKOS D, FRAGIADAKIS M. Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 39(2): 141–163.
- [15] 张耀庭, 杜晓菊, 杨力. RC 框架结构基于构件损伤的抗震性能评估研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 9–21.
- ZHANG Y T, DU X J, YANG L. Research on seismic performance assessment based on component damage for RC frame structure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(5): 9–21. (in Chinese)
- [16] 李立峰, 李辉辉, 徐开铎, 等. 考虑随机变量相关性的桥梁地震易损性分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(7): 118–127.
- LI L F, LI H H, XU K D, et al. Bridge seismic fragility analysis considering random variable correlations [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(7): 118–127. (in Chinese)
- [17] 古泉, 俞至权, 邱志坚. 考虑碎石桩加固的液化场地桥梁地震风险分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 178–185.
- GU Q, YU Z Q, QIU Z J. Seismic risk assessment of an liquefaction ground bridge system using stone column for reinforcement [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 178–185. (in Chinese)
- [18] 李雪红, 李晔暄, 吴迪, 等. 地震动强度指标与结构地震响应的相关性研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 184–189.
- LI X H, LI Y X, WU D, et al. Correlation between ground motion intensity and structural seismic response [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(23): 184–189. (in Chinese)
- [19] 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): 8305–8317.
- 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): 8305–8317. (in Chinese)
- [20] 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.
- Code for design of steel supporting structures of overhead transmission line: DL/T 5486—2020 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2020. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 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.
- 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. (in Chinese)
- [23] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526–533.
- [24] Quantification of building seismic performance factors: FEMA-P695 [S]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2009: 275–279.