

# 风震联合作用下大跨度悬索桥的易损性分析

李芳<sup>1</sup>,李明鑫<sup>1,2</sup>,李永乐<sup>2</sup>,张明金<sup>2</sup>,呼春<sup>1</sup>,刘悦<sup>1</sup>,刘赛<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590;

2. 西南交通大学 桥梁工程系,四川 成都 610031)

**摘要:**大跨度桥梁在全寿命周期内会受到多种自然或人为灾害的影响。相较单一灾害,大跨度桥梁在多灾害作用下的致灾机理更为复杂。为了探讨大跨度悬索桥在风震联合作用下的多灾害易损性问题,建立有限元模型,分别对单一荷载及风震联合作用下的结构动力响应进行数值模拟,以地震动峰值地面加速度(PGA)和风速作为地震动和风荷载的强度指标,选取桥梁结构的桥塔塔底截面曲率为损伤指标,建立不同灾害作用下桥梁结构的概率需求模型,绘制单灾害易损性曲线和多灾害易损性曲面,进而评估不同灾害强度组合工况下的结构损伤概率,对单一灾害作用和风震联合作用的桥梁结构易损性分析结果进行对比。研究表明:单一荷载作用下大跨度悬索桥的动力响应随荷载强度增加而增大,其中风致响应具有方向敏感性且存在风速阈值,超越后结构破坏概率呈非线性增加。风震联合作用下桥梁各损伤状态的破坏概率随PGA与风速呈非线性增长,且显著大于单一灾害作用的直接叠加。

**关键词:**大跨度悬索桥;风震联合作用;损伤指标;易损性分析

中图分类号:TU997

文献标志码:A

## Vulnerability analysis of long-span suspension bridges under wind-seismic combined effects

LI Fang<sup>1</sup>, LI Mingxin<sup>1,2</sup>, LI Yongle<sup>2</sup>, ZHANG Mingjin<sup>2</sup>, HU Chun<sup>1</sup>, LIU Yue<sup>1</sup>, LIU Sai<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Long-span bridges are subject to various natural or man-made disasters in their whole life cycle. Compared with a single disaster, the disaster-causing mechanism of long-span bridges under multiple disasters is more complicated. To investigate the multi-disaster vulnerability of long-span suspension bridges under wind-seismic combined effects, a finite element model was established to numerically simulate the structural dynamic response under the single load and wind-seismic combined effects. The peak ground acceleration (PGA) and wind speed were used as the strength indexes of ground motion and wind load, and the curvature of the bottom section of the bridge tower was selected as the damage index. The probability demand model of bridge structure under different disasters was established, and the single disaster vulnerability curve and multi-disaster vulnerability surface were drawn to evaluate the structural damage probability under different disaster intensity combinations. The vulnerability analysis results of bridge structures under the action of a single disaster and wind-seismic combined effects were compared. The results show that the dynamic response of long-span suspension bridges under single load increases with the increase of load intensity. The wind-induced response is direction-sensitive and has a wind speed threshold, and the failure probability of the structure increases nonlinearly after exceeding that threshold. The failure probability of each damage state of the bridge under wind-seismic combined effects

收稿日期:2025-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52208266);山东省自然科学基金项目(ZR2025QC526)

作者简介:李芳(2001—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事桥梁结构抗震、抗风方面的研究。

李明鑫(1991—),男,山东潍坊人,讲师,博士,主要从事桥梁结构防灾减灾方面的研究,本文通信作者。

E-mail:lmx91@sdust.edu.cn

increases nonlinearly with PGA and wind speed, and is significantly greater than the direct superposition of single disasters.

**Key words:** long-span suspension bridge; wind-seismic combined effects; damage index; vulnerability analysis

近年来,随着大跨度桥梁向超大跨径方向快速发展,其结构特性呈现出明显的刚度降低、阻尼减小和柔性增强等特征,导致结构对地震、风荷载等动力作用的敏感性显著提升<sup>[1-2]</sup>。在此背景下,大跨度桥梁的结构损伤问题与抗震抗风设计方法已成为工程界的研究重点。特别值得注意的是,由于风荷载与地震作用存在复杂的相互作用机制,开展风震联合作用下桥梁结构易损性分析,对于确保大跨度桥梁的运营安全具有重要的工程意义<sup>[3-4]</sup>。

国内外学者在地震作用下桥梁结构的动力响应与易损性分析方面取得重要进展。陈士通等<sup>[5]</sup>基于纵桥向和横桥向开展构件双向易损性分析,绘制了考虑超高墩、支座对桥梁系统贡献率的桥梁易损性曲面,揭示了地震动入射角度对桥梁系统地震易损性的影响;Li等<sup>[6]</sup>采用易损性方法分析了高墩五跨斜拉桥的纵向抗震性能,结果表明,伸缩缝、桥面和拉索为易损构件,阻尼器的布置位置对桥梁的减震效果具有关键作用。风作用下的易损性研究已形成较为完善的理论体系,为抗风设计提供了重要理论基础。Wang等<sup>[7]</sup>提出融合结构健康监测(structural health monitoring, SHM)数据与整车模型的混合方法,基于强风与随机交通荷载下桥梁的动力响应结果验证了该方法的可靠性,结果表明竖向振动主要受桥梁振动影响,而横向与扭转振动由风荷载与桥梁振动共同主导。郭健等<sup>[8]</sup>建立了风荷载作用下的斜拉桥数值模型,基于小波分析研究了斜拉索损伤对桥面加速度测试信号的敏感性,构建了一种斜拉索多尺度损伤指标和损伤位置的识别方法。综上所述,当前结构抗灾研究主要集中于单一地震或风荷载作用下的响应分析,然而实测数据与理论分析均证实,风震联合作用存在明显的动力相互作用机制<sup>[9]</sup>,尽管已有学者开始关注多灾害联合作用对桥梁结构的影响,但针对大跨度桥梁在风震联合作用下的易损性研究仍存在不足。

鉴于此,本研究以广州某大跨度悬索桥为工程背景,基于 ANSYS 软件平台建立包含主缆、吊杆、桥塔和加劲梁等关键构件的精细化三维有限元模型,通过非线性时程分析方法开展单一荷载和风震联合作用下的结构动力响应研究,重点分析桥塔塔顶的横向位移响应的动力特性,确定桥梁结构的损伤指标,建立单一灾害和风震联合作用的概率需求模型,绘制不同损伤状态下的易损性曲面,研究风震联合作用下大跨度悬索桥的损伤概率变化规律,为桥梁的抗风抗震设计提供参考。

## 1 悬索桥有限元建模与动力特性分析

### 1.1 有限元模型建立

广东省某大跨度悬索桥,采用双塔单跨悬索桥结构体系,总长 2 040 m,主跨布置为(360+1 200+480) m 非对称形式,矢跨比 1:9.5。主体结构由宽幅钢箱梁与门式桥塔协同构成:主梁采用整体式钢箱梁设计,全宽 49.7 m、梁高 4.0 m,顶板有效宽度 40.6 m,底板宽 31.3 m,设置双向 8 车道及包含导流板、风嘴的抗风稳定系统,全桥由 94 榀(含 88 个标准段)组成,标准段长度 12.8 m;桥塔为双塔柱双横梁门式钢架,总高 193.1 m,塔柱采用 C50 混凝土结构,横梁采用预应力混凝土技术;主缆系统配置两根中心距 42.1 m 的平行缆索,中跨垂跨比 1:9.5,沿纵向以 12.8 m 等间距布置 184 根 1 770 MPa 级镀锌铝合金钢丝吊索,主要材料特性如表 1 所示。

表 1 主要材料特性

Table 1 Main material properties

结构构件	材料	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
加劲梁	Q345	$2.06 \times 10^{11}$	0.3	7 850
主缆	高强钢丝	$2.00 \times 10^{11}$	0.3	8 005
吊杆	高强钢丝	$2.00 \times 10^{11}$	0.3	8 005
桥塔	C50	$3.45 \times 10^{10}$	0.2	2 500

采用 ANSYS 建立三维悬索桥有限元模型,其中:加劲梁和主塔采用 BEAM4 梁单元模拟,主缆和吊杆选用 LINK10 索单元;二期恒载以 MASS21 质量单元等效模拟。边界条件设置如下:主缆与桥塔顶通过节点耦合实现刚性连接,主缆锚固端和桥塔基础采用固结约束,加劲梁与桥塔接触区设置协调约束。悬索桥有限元模型见图 1。



图 1 悬索桥有限元模型

Fig. 1 Suspension bridge finite element model

### 1.2 模态分析

在 ANSYS 中进行大跨悬索桥动力特性分析时,需计入恒载初始应力对结构刚度的贡献。具体分析流程为:先开展恒载(含主缆、加劲梁及桥面系自重)静力分析,更新几何刚度矩阵以考虑重力刚度效应;随后采用分块兰索斯法<sup>[10]</sup>进行模态分析,基于模态分析结果可见结构的主要整体振型集中于低频段。高阶模态的有效质量占比较低且贡献分散,故暂未考虑。为全面分析动力响应规律,将 0.1 Hz 作为频率分析的起始点,提取前 10 阶模态参数。分析结果显示结构基频对应正对称竖弯振型,二阶频率表现为反对称竖弯,高阶振型依次呈现扭转、横弯及其耦合特征,前 10 阶自振频率和振型图详见表 2。模型动力特性验证结果表明,本研究所建立有限元模型的关键整体振型频率,与同类型悬索桥的模拟数据<sup>[11]</sup>相比,相对误差小于 6%,满足后续非线性动力时程分析对模型精度的要求<sup>[12]</sup>。

表 2 悬索桥前 10 阶自振频率和振型图

Table 2 The first 10 natural frequencies and mode shapes of the suspension bridge

阶次	频率/Hz	振型图	阶次	频率/Hz	振型图
1	0.114		6	0.285	
2	0.120		7	0.287	
3	0.175		8	0.321	
4	0.180		9	0.322	
5	0.244		10	0.391	

## 2 荷载的选取与施加

以该大跨度悬索桥为研究对象,桥址区场地类别为 IV 类,其抗震设防烈度为 7 度,场地特征周期  $T_g$  为 0.35 s,建模过程中不考虑桩土相互作用。基于场地匹配性原则,从太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)数据库中选出 8 条地震动记录,如表 3 所示。采用增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法,以  $0.2g$  为增幅步长( $g$  为重力加速度),将 8 条地震动的峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)从 0 逐步调幅至  $1.0g$ ,生成 40 条调幅地震动加速度时程曲线,地震动施加于桥梁基础。

表 3 地震动信息

Table 3 Ground motion information

编号	地震名称	年份	台站信息	震级	震中距/km	场地类别
1	Northwest Calif-01	1940	El Centro Array #9	6.95	6.09	Ⅲ类
2	Borrego	1942	El Centro Array #9	6.50	56.88	Ⅲ类
3	Kern County	1952	LA-HollywoodStor FF	7.36	114.62	Ⅱ类
4	Kern County	1952	Pasadena-CIT Athenaeum	7.36	122.65	Ⅱ类
5	Kern County	1952	Santa Barbara Courthouse	7.36	81.30	Ⅱ类
6	Kern County	1952	Taft Lincoln School	7.36	38.42	Ⅱ类
7	San Fernando	1971	Anza Post Office	6.61	173.16	Ⅱ类
8	San Fernando	1971	San Onofre-So Cal Edison	6.61	124.79	Ⅱ类

风荷载模拟方面,基于 10 m 高度处参考风速(10、20、30、40 m/s),分别施加于主梁和桥塔两个位置。每种风速下共生成 16 条风速时程曲线,其中主梁与桥塔位置处各 32 条,共计 64 条风速时程曲线。本研究桥梁结构的风荷载模拟中,主缆和吊杆的截面尺寸相对较小,其受到的风荷载对整体结构动力响应的贡献有限,暂不考虑主缆和吊杆的风荷载效应<sup>[13]</sup>。桥梁在风荷载作用下,单位长度上所受的阻力、升力及升力矩可表示为三分力系数的函数,相关计算式<sup>[14]</sup>为:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_i^2 C_D H, \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V_i^2 C_L B, \quad (2)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho V_i^2 C_M B^2. \quad (3)$$

式中: $F_D$ 、 $F_L$ 、 $F_M$  分别为风荷载引起的结构的阻力、升力、升力矩; $C_D$ 、 $C_L$ 、 $C_M$  分别为与风攻角有关的阻力系数、升力系数、升力矩系数; $B$ 、 $H$  分别是主梁的宽度和高度; $V_i$  为高度  $i$  处风荷载的风速;空气密度  $\rho$  取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ 。阻力系数、升力系数、升力矩系数参照文献[15]模拟数据取值,如表 4 所示,风攻角最大值参考该文献取  $9^\circ$ 。风震联合作用荷载施加示意图如图 2 所示。

表 4 主梁标准断面静力三分力系数

Table 4 Static three-component force coefficient of the standard section of the main beam

风攻角/ $^\circ$	$C_D$	$C_L$	$C_M$
0	0.970	-0.187	-0.010
3	1.038	0.071	0.026
6	1.219	0.263	0.062
9	1.577	0.469	0.102

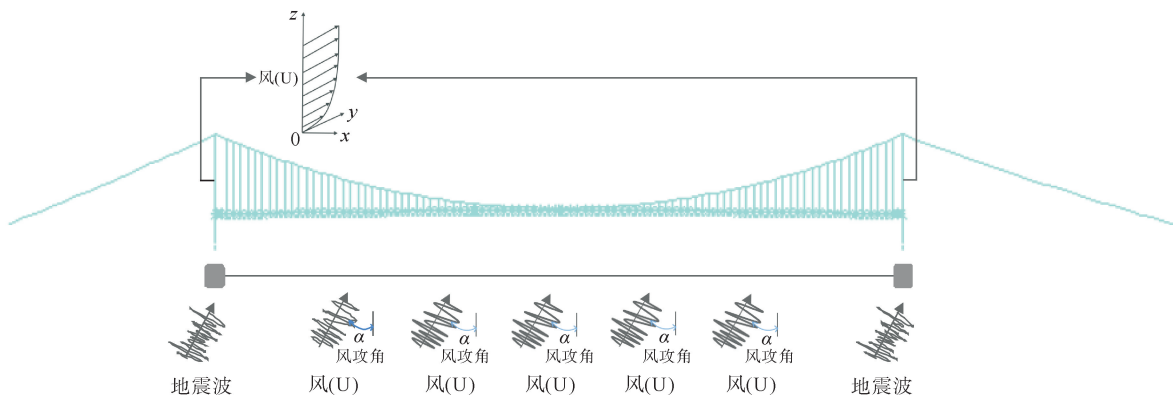


图 2 风震联合作用的荷载施加示意图

Fig. 2 Schematic diagram of load application under wind-seismic combined effects

### 3 桥梁结构动力响应分析

在地震单独作用工况中,设定 PGA 以  $0.2g$  为增幅,从  $0.2g$  逐步增加至  $1.0g$ ,共划分 5 个分析工况。在风荷载单独作用工况中,为考察风速对悬索桥动力响应的影响,依据常规与极端风速进行设计,风攻角统一取  $0^\circ$ ,并以  $10\text{ m/s}$  为增量,将风速从  $10\text{ m/s}$  逐步提高至  $40\text{ m/s}$ ,共设置 4 种工况。为研究风攻角的影响,基于桥址区 100 年重现期的风速设计要求,选取 4 个风攻角( $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $6^\circ$  和  $9^\circ$ )进行分析,该部分共对应 4 种工况。因此,风荷载单独作用工况总计为 7 种。对于风震联合作用工况,按上述 PGA、风速及风攻角的设置方式进行系统组合,共形成 35 种分析工况。

#### 3.1 单一荷载作用下桥梁结构动力响应分析

根据单一荷载作用下桥梁结构的动力响应分析结果,探究不同 PGA、风速和风攻角对桥梁塔顶横向位移响应的影响。对悬索桥进行动力响应分析,桥塔塔顶的横向位移时程曲线及峰值变化如图 3 和图 4 所示。结果表明,桥塔塔顶横向位移与 PGA 和风速均呈现显著正相关关系,PGA 每增加  $0.2g$  位移增幅在  $10\%$  左右;风速每增加  $10\text{ m/s}$  位移增幅更为显著,达  $13\%$ ,两者均呈近似线性的增长趋势。当 PGA 小于  $0.8g$  或风速小于  $30\text{ m/s}$  时,桥塔塔顶横向位移最大值小于  $0.16\text{ m}$ ;当 PGA 达  $1.0g$ ,桥塔塔顶横向位移最大值可达  $0.172\text{ m}$ ,风速  $40\text{ m/s}$  时最大位移值达  $0.166\text{ m}$ 。桥塔塔顶横向位移随风攻角的变化与 PGA 和风速的影响不同,风攻角增大时位移响应曲线呈现递减趋势,当风攻角从  $0^\circ$  增至  $3^\circ$  时,位移响应值最大值降幅可达  $40\%$ 。地震单独作用与风荷载单独作用下的桥塔塔顶横向位移时程曲线存在明显差异,地震作用下的位移波动频率显著高于风荷载作用下的位移波动频率。

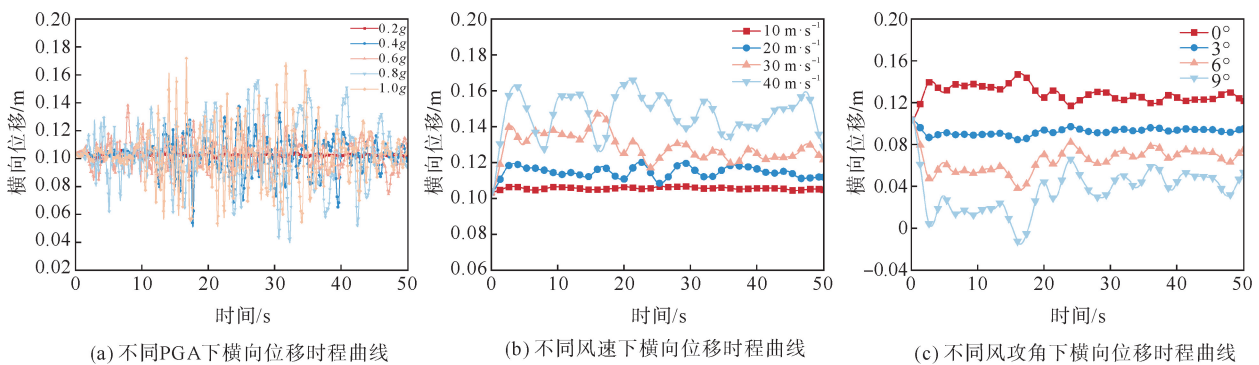


图 3 不同工况下塔顶横向位移时程曲线

Fig. 3 Time history curves of lateral displacement of tower top tower under different conditions

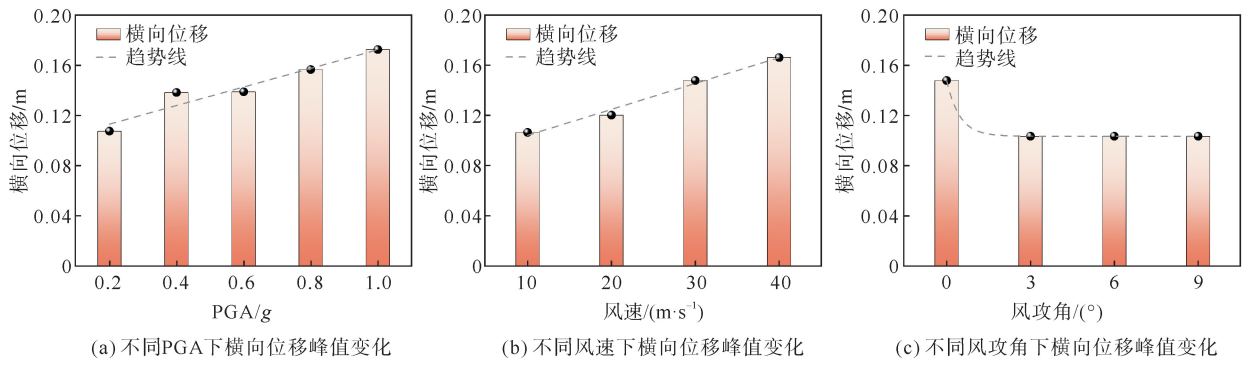


图 4 不同工况下塔顶横向位移峰值变化图

Fig. 4 Variation of peak lateral displacement of tower top under different conditions

### 3.2 风震联合作用下桥梁结构动力响应分析

考虑风震联合作用,探究不同 PGA (0.2g~1.0g)与风速(10~40 m/s)对桥梁塔顶横向位移响应的影响,对悬索桥进行动力响应分析,其桥塔塔顶横向位移时程曲线及最大值云图如图 5 所示。结果表明:位移幅值及其波动范围均随外界荷载强度增大而增大,其中当风速由 10 m/s 增至 40 m/s 时,塔顶横向位移极值约增大 1.5 倍,PGA 从 0.2g 增至 1.0g 时位移幅值增幅约 1.2 倍;风震联合作用下的位移响应值并非单一荷载作用下响应值的线性叠加,其中当 PGA 为 0.2g 时,风速每增加 10 m/s 引起的位移增量较单一风荷载工况下约提高 4%~19%;桥塔塔顶横向位移最大值( $U_{max}$ )变化云图表明,风荷载对塔顶横向位移的影响显著高于地震作用的影响。

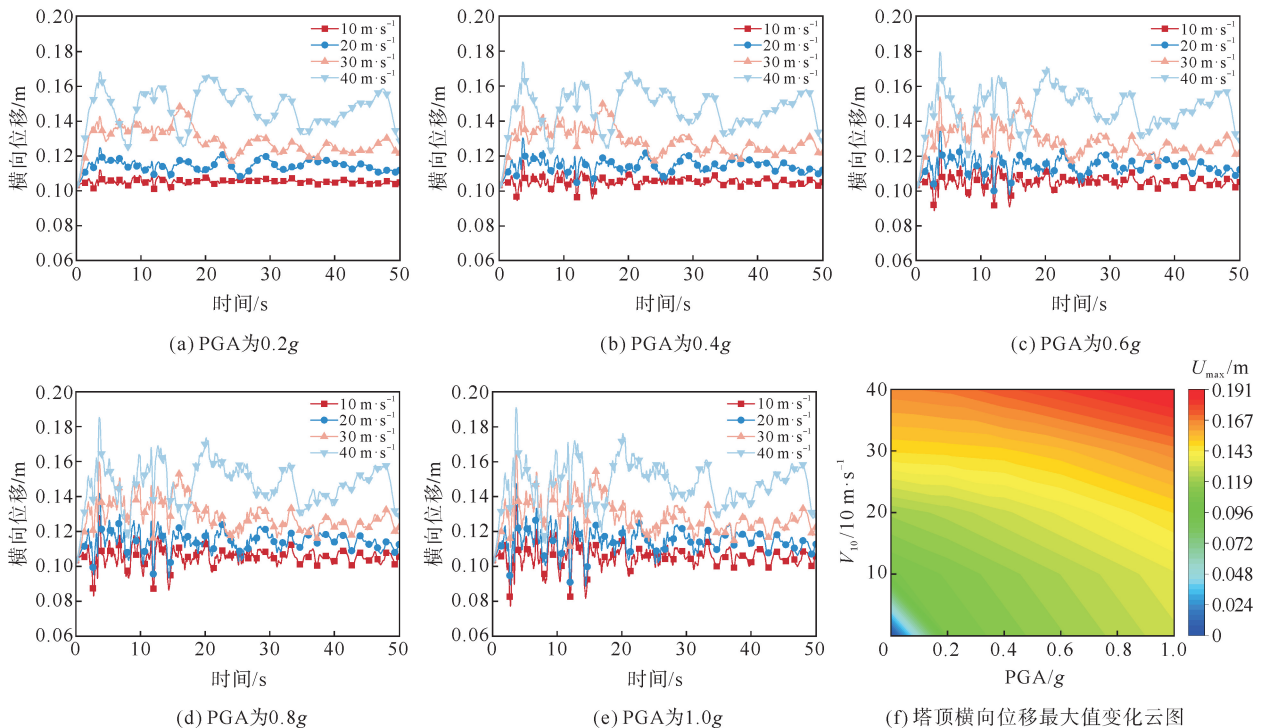


图 5 桥塔塔顶横向位移时程曲线及最大值随 PGA 和风速变化云图

Fig. 5 Lateral displacement time history at bridge tower top and maximum cloud map with PGA and wind speed

考虑风震联合作用,探究不同 PGA (0.2g~1.0g)与风攻角( $0^{\circ}\sim 9^{\circ}$ )对桥梁塔顶横向位移响应的影响,对悬索桥进行动力响应分析,其桥塔塔顶横向位移时程曲线及最大值云图如图 6 所示。结果表明:桥塔塔顶横向位移随风攻角的增大而减小,风攻角从  $0^{\circ}$  增至  $9^{\circ}$  时,塔顶横向位移均值约减小 40%;在固定风

攻角条件下,位移波动幅值随 PGA 增大呈非线性增长,PGA 从 0.2g 增至 1.0g 时,位移极值差约扩大 1.1 倍;当 PGA 为 0.2g 时,风攻角每增加 3°可使位移响应降低 20%~30%,风攻角保持不变、PGA 每增加 0.2g 位移增大 3%~6%,风攻角的改变对桥梁结构的位移响应产生显著影响。

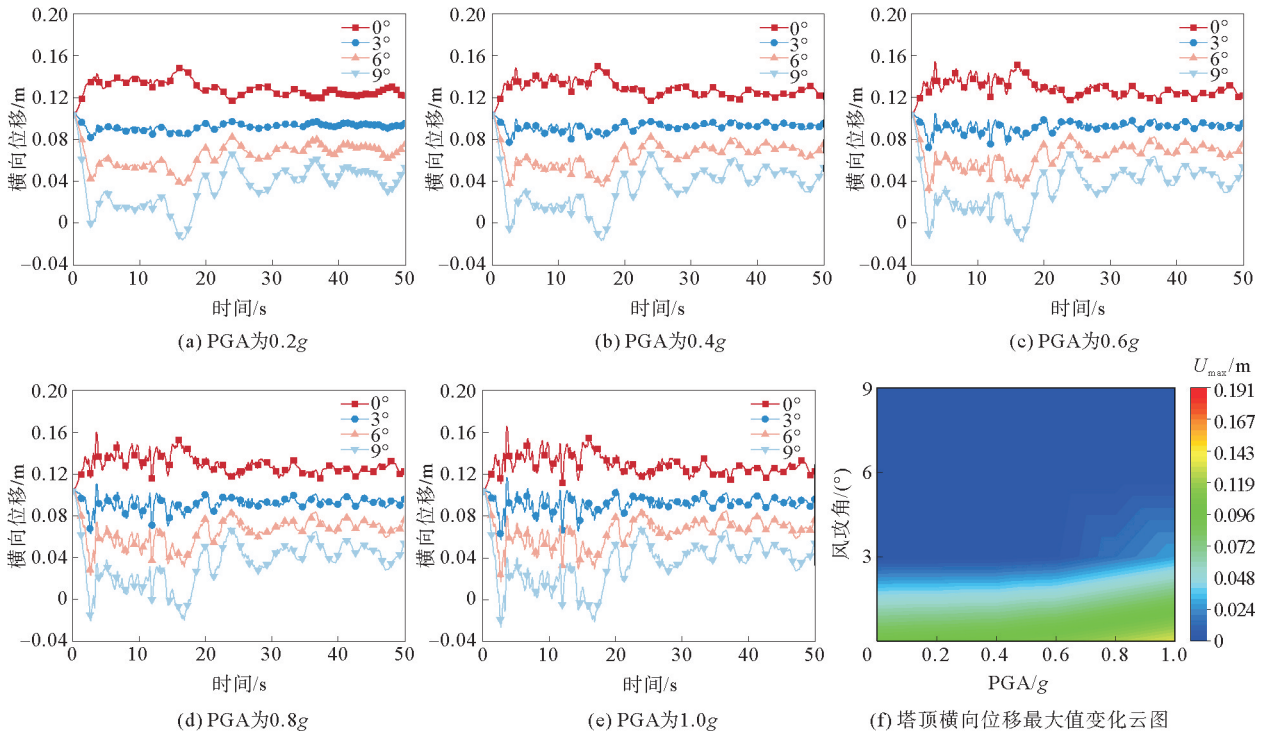


图 6 桥塔塔顶横向位移时程曲线及最大值随 PGA 和风攻角变化云图

Fig. 6 Lateral displacement time history at bridge tower top and maximum cloud map with PGA and wind attack angle

## 4 桥梁结构易损性分析

### 4.1 损伤指标的选取

桥塔作为压弯复合受力构件,其损伤演化受轴压比与双向弯矩作用影响,截面曲率的物理意义为中性轴处曲率半径的倒数,能够通过截面应变分布的非线性特征,反映混凝土受压区极限压应变、受拉钢筋屈服应变等关键损伤参数。鉴于桥塔破坏将导致严重后果,本研究选取桥塔塔底截面曲率<sup>[16]</sup>作为损伤指标。采用 XTRACT 软件进行桥塔塔底截面建模,其中混凝土采用 Mander 本构模型,钢筋采用双直线型模型,根据截面应力分布求解轴力-弯矩-曲率( $P-M-\Phi$ )全程响应。截面的弯矩-曲率关系示意曲线如图 7 所示,其中  $M_{cr}$  和  $\Phi_{cr}$  为混凝土开裂时刻对应的弯矩和曲率,  $M'_y$  和  $\Phi'_y$  为纵筋首次屈服的弯矩和曲率,  $M_y$  和  $\Phi_y$  为截面等效屈服的弯矩和曲率,  $M_u$  和  $\Phi_u$  为混凝土达到极限压应变时的弯矩和曲率。

根据 XTRACT 软件的截面弯矩-曲率分析结果,可以将桥塔塔底划分为轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏 4 种不同损伤状态,桥塔塔底 4 种损伤状态的截面曲率  $\Phi$  取值范围划分结果见表 5。

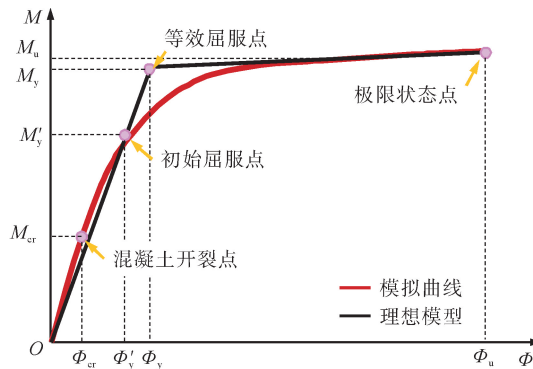


图 7 弯矩-曲率示意图

Fig. 7 Bending moment-curvature schematic diagram

表 5 桥梁构件的损伤指标  
Table 5 Damage index of bridge components

损伤等级	损伤指标	曲率数值/ $m^{-1}$	构件状态
轻微损伤	$\Phi_{cr} < \Phi < \Phi'_y$	$\Phi_{cr} = 3.19 \times 10^{-5}$	混凝土开裂
中等损伤	$\Phi'_y < \Phi < \Phi_y$	$\Phi'_y = 3.88 \times 10^{-5}$	外侧纵筋发生屈服
严重损伤	$\Phi_y < \Phi < \Phi_u$	$\Phi_y = 5.28 \times 10^{-5}$	保护层混凝土压碎
完全破坏	$\Phi > \Phi_u$	$\Phi_u = 1.63 \times 10^{-4}$	约束混凝土产生裂缝

#### 4.2 单灾害作用下桥梁结构易损性分析

根据不同地震作用和风荷载作用下桥塔塔底的最大曲率进行概率需求模型的求解,地震动强度指标选用峰值加速度  $a_{pga}$ ,风荷载强度指标采用 10 m 高度处的平均风速  $V_{10}$ 。地震概率需求模型和风荷载概率需求模型<sup>[17]</sup>如式(4)和式(5):

$$\ln S_{D1} = a_1 + b_1 \ln I_{m1} + c_1 \ln I_{m1}^2, \quad (4)$$

$$\ln S_{D2} = a_2 + b_2 \ln I_{m2} + c_2 \ln I_{m2}^2. \quad (5)$$

式中: $S_{D1}$ 和 $S_{D2}$ 分别为地震动和风荷载下的结构性能需求指标; $I_{m1}$ 和 $I_{m2}$ 分别是地震动和风荷载强度指标; $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 和 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 为回归系数。在直角坐标系中,以 $\ln a_{pga}$ 和 $\ln V_{10}$ 作为自变量 X 轴,以对数曲率  $\ln \Phi$  作为因变量 Y 轴,利用 Origin 数据分析软件对数据进行回归分析。由图 8 和图 9 可见,曲率散点均匀分布在拟合方程的曲线两侧,拟合效果良好。其中地震需求参数和风荷载需求参数如表 6 所示,决定系数  $R^2$  均超过 0.7,均方根误差(root mean square error, RMSE)数值较小,判定该模型有效<sup>[18]</sup>。

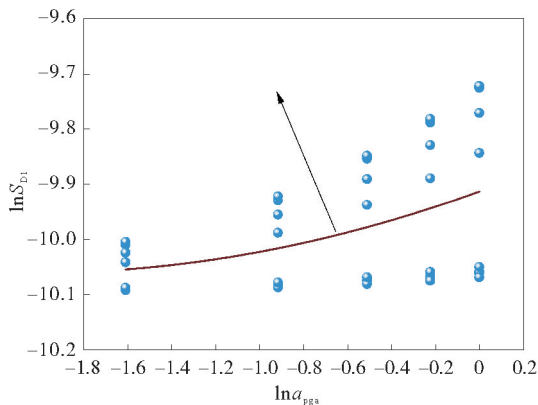


图 8 地震概率需求模型

Fig. 8 Seismic probabilistic demand model

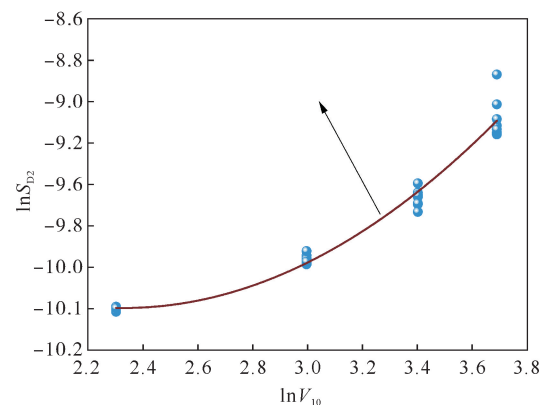


图 9 风荷载概率需求模型

Fig. 9 Wind load probabilistic demand model

表 6 概率需求模型回归方程与拟合优度

Table 6 Regression equation and goodness-of-fit for probabilistic demand models

概率需求模型	回归方程	$R^2$	调整后 $R^2$	RMSE
地震概率需求模型	$\ln S_{D1} = 0.03579 \times \ln^2 a_{pga} + 0.14558 \times \ln a_{pga} - 9.91378$	0.99982	0.99964	0.0034
风荷载概率需求模型	$\ln S_{D2} = 0.48947 \times \ln^2 V_{10} - 2.28058 \times \ln V_{10} - 7.34165$	0.99732	0.99196	0.0089

桥梁结构的最大塔底曲率达到或者超过桥梁极限曲率的条件概率可定义为易损性曲线。假设地震动参数和风荷载参数的对数与截面曲率的对数服从正态分布函数,超越概率  $P_f$  的计算公式<sup>[19]</sup>如式(6)所示:

$$P_f = P(D \geq C | I_m) = \Phi \left[ \frac{\ln S_D - \ln S_C}{\sqrt{\beta_{D|I_m}^2 + \beta^2}} \right]. \quad (6)$$

式中,  $P_f$  为计算超越概率的函数;  $S_D$  为结构性能需求指标;  $S_C$  为极限损伤状态的划分指标, 即表 5 所求曲率数值;  $I_m$  为灾害强度参数;  $\Phi$  为标准正态分布函数;  $\beta_{D|I_m}$  为结构的防灾性能需求对数正态分布的标准差;  $\beta$  为防灾能力对数标准差。

图 10 与图 11 分别为地震单独作用及风荷载单独作用下桥梁结构的易损性曲线, 分析表明: 单一荷载作用下, 桥梁结构的 4 种损伤状态的概率均随 PGA 或风速的增加而增大; 地震单独作用下 PGA 从 0 增加至  $0.4g$  时, 桥梁结构轻微损伤、中等损伤和严重损伤的概率增加幅度明显, 当 PGA 从  $0.4g$  增加至  $1.0g$  时, 桥梁结构这 3 种损伤状态的损伤概率增速随着 PGA 的增加逐渐减缓; 当 PGA 值为  $1.0g$  时, 4 种损伤状态的概率分别为  $81.0\%$ 、 $68.7\%$ 、 $44.8\%$ 、 $0.9\%$ , 桥梁结构完全破坏概率趋近于 0; 风荷载单独作用下桥梁结构轻微损伤、中等损伤与严重损伤概率随风速持续上升且增幅明显; 当风荷载作用下风速小于  $20\text{ m/s}$  时, 完全破坏概率基本为 0, 而风速大于  $20\text{ m/s}$  时, 该概率开始逐渐增加。对比地震作用下各个损伤状况的损伤概率, 强风荷载作用下桥梁的损伤概率更高, 对结构损伤的影响更大。

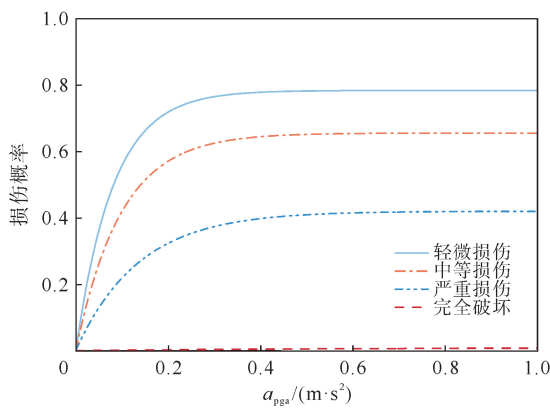


图 10 地震作用下桥梁结构的易损性曲线  
Fig. 10 Vulnerability curve of bridge structure under the seismic action

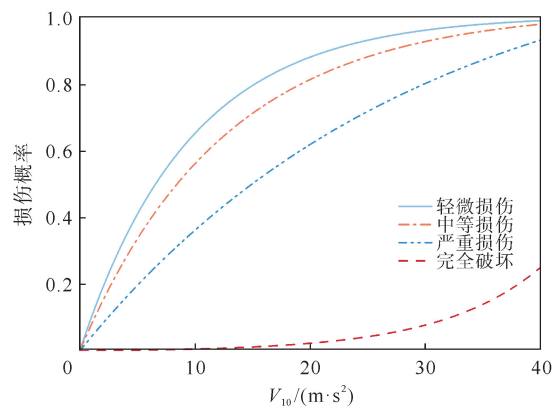


图 11 风荷载作用下桥梁结构的易损性曲线  
Fig. 11 Vulnerability curve of bridge structure under the wind load

### 4.3 多灾害作用下桥梁结构易损性分析

风震联合作用可能会加剧大跨度悬索桥关键构件的损伤, 提升其在多灾害作用下的破坏风险。鉴于此, 本研究开展风震联合作用下的悬索桥易损性分析, 地震与风荷载强度指标延续前述定义, 分别采用  $a_{pga}$  及  $V_{10}$ , 基于传统单灾害易损性的对数线性模型, 为提高拟合程度, 采用泰勒级数进行展开获得二阶多项式形式, 关于地震动和风荷载强度参数的函数关系<sup>[20]</sup>可表示为:

$$\ln S_{DL} = A + B \ln I_{m1} + C \ln I_{m2} + D (\ln I_{m1})^2 + E (\ln I_{m2})^2 + F \ln I_{m1} \ln I_{m2} \quad (7)$$

式中:  $S_{DL}$  为地震和风荷载联合作用下的结构性能需求指标;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$  为回归系数, 通过多元非线性回归分析确定。

如图 12 所示, 风震联合作用下塔底曲率响应散点均匀分布于拟合曲面邻近区域, 拟合良好。

地震动参数、风荷载参数与损伤指标之间的关系方程如表 7 所示, 其中  $R^2$  大于 0.7, RMSE 数值较小, 模型有效。

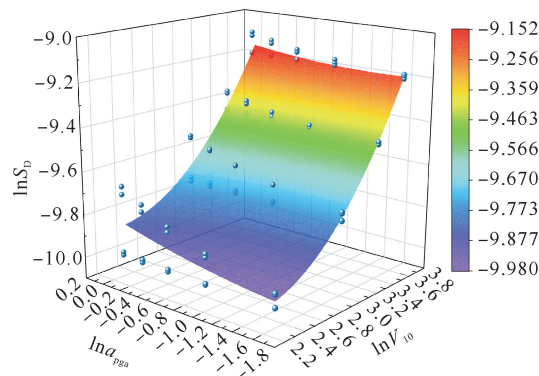


图 12 风震概率需求模型

Fig. 12 Wind-seismic probabilistic demand model

表 7 风震概率需求模型回归方程与拟合优度

Table 7 Regression equation and goodness-of-fit for wind-seismic probabilistic demand model

概率需求模型	回归方程	$R^2$	调整后 $R^2$	RMSE
风震概率需求模型	$\ln S_D = -8.3121 - 1.39318 \times \ln V_{10} + 0.22012 \times \ln a_{\text{PGA}} +$ $0.31604 \times \ln^2 V_{10} + 0.02775 \times \ln^2 a_{\text{PGA}} - 0.03986 \times \ln V_{10} \ln a_{\text{PGA}}$	0.9946	0.99268	0.0041

在风震联合作用下,结构超越特定极限状态的条件概率表达式见式(8)。

$$P_f = P(D \geq C | I_m) = \Phi \left[ \frac{\ln S_{DL} - \ln S_{CL}}{\sqrt{\beta_{D|I_{m1}, I_{m2}}^2 + \beta^2}} \right] \quad (8)$$

式中:  $P_f$  为计算超越概率的函数;  $S_{CL}$  为极限损伤状态的划分指标;  $I_m$  为灾害强度参数;  $\beta_{D|I_{m1}, I_{m2}}$  为结构的防灾性能需求对数正态分布的标准差;  $\beta$  为防灾能力对数标准差。

在多灾害易损性分析中,基于多灾害概率需求模型,通过式(8)计算出桥梁结构在 4 种损伤状态下的超越概率  $P_f$ 。以  $a_{\text{PGA}}$  和  $V_{10}$  的对数构成二维参数平面,以  $P_f$  为第三维坐标,绘制形成不同损伤状态对应的多灾害易损性曲面,如图 13 所示。

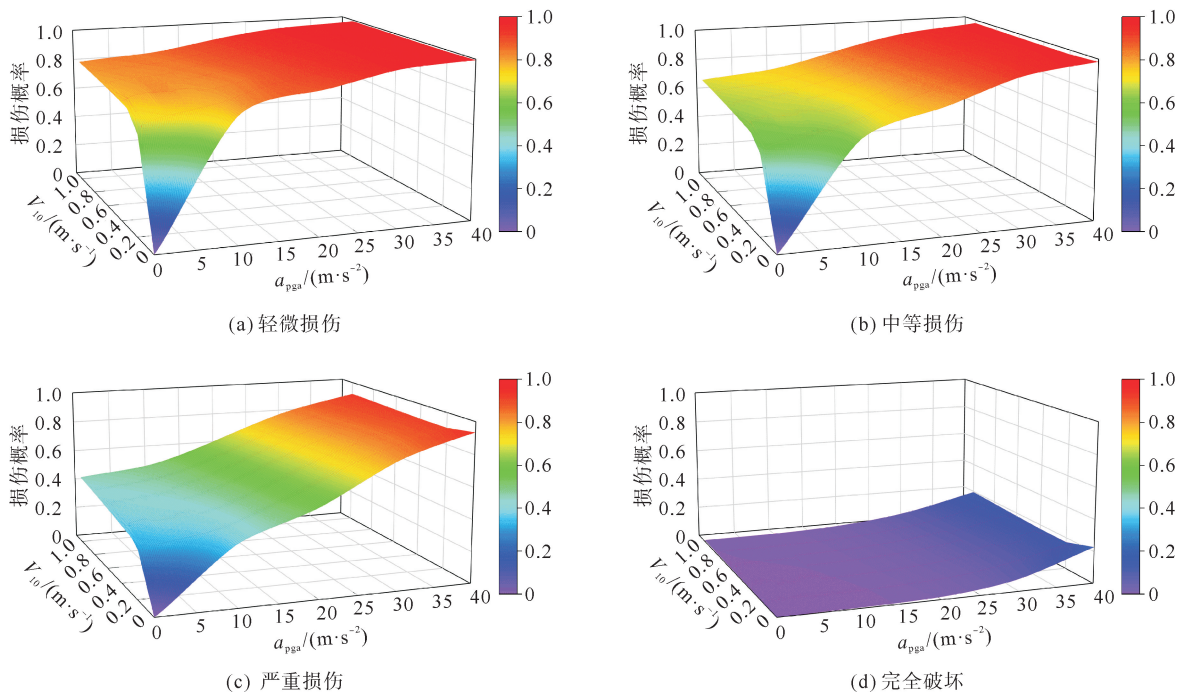


图 13 多灾害作用下易损性曲面

Fig. 13 Vulnerability surface under multiple disasters

基于多灾害概率需求模型构建的风震联合作用下悬索桥易损性曲面分析表明:桥梁结构各损伤状态概率随灾害强度参数的增大均呈现单调递增规律,这一基本特征与单一灾害作用工况保持一致。相较于单一灾害作用工况,风震联合作用使不同损伤状态下(轻微损伤、中等损伤、严重损伤、完全破坏)桥梁结构的损伤概率大幅度提升。以风速为 40 m/s,PGA 为 1.0g 的风震联合作用工况为例,各损伤状态概率分别为:轻微损伤 99.2%、中等损伤 97.8%、严重损伤 91.9%、完全破坏 19.5%,对比分析显示该风震联合作用工况下的损伤概率较单一地震作用平均提高 21.8%,表明风震联合作用下桥梁结构损伤破坏的风险显著提升。

## 5 结论

以广东省某大跨度悬索桥为例,研究了单一灾害(地震或风荷载)作用下的损伤概率及风震联合作用下的动力响应与易损性特性。通过非线性动力时程分析,基于桥塔塔底截面曲率与损伤指标,构建地震、风荷载及风震联合概率需求模型,据此计算出不同损伤状态概率,绘制单灾害易损性曲线与多灾害易损性曲面。主要得出以下结论:

1) 大跨度悬索桥在地震与风荷载单灾害作用下的响应总体随荷载强度增加而增强,但在纯风荷载作用下塔顶位移对风攻角表现出方向敏感性;结构在低强度区几乎无完全破坏风险,而当风速 $\geq 20$  m/s时破坏概率显著增大,呈现阈值效应和非线性脆弱性特征。因此,风震联合作用下的危害不是单灾害的简单叠加,应重点关注高PGA与临界风速以上工况,并在设计与运营中综合考虑风攻角敏感性与风震联合作用的影响。

2) 风震联合作用下桥塔塔顶横向位移响应规律表明,位移响应值随PGA与风速同时增大而增大;当PGA与风攻角同时增大时,位移响应值却呈现减小趋势,风攻角增大引起的位移减少超过PGA增大引起的位移增长,在本研究所考虑的工况条件下,风荷载对桥梁结构动力响应的显著大于地震作用的影响,起主导作用。

3) 风震联合作用会显著增加桥梁结构的破坏损伤风险,各损伤状态下桥梁结构的损伤概率随PGA与风速单调递增且高于单一灾害作用下的损伤概率。因此,风震联合作用造成桥梁结构损伤概率的提升应当引起重视,在设计阶段应考虑风震联合作用的最不利工况,优化主梁与桥塔的刚度配置,并提高关键构件的抗疲劳与延性设计指标。

本研究针对大跨度悬索桥在风震联合作用下的易损性问题进行了基于规范荷载的初步分析,建立的多灾害易损性模型可为同类桥梁关键构件的性能强化设计等提供参考。未来研究将进一步结合桥址区域实测数据,构建基于Copula函数的联合概率模型以量化风震共同发生的可能性,并系统考虑多向地震动、负风攻角及桩土相互作用等复杂因素,以实现从危险性分析到易损性分析的全概率风险评估,从而为大跨度悬索桥的抗风抗震设计提供更加科学的参考。

## 参考文献:

- [1] XIE Y S, XU Z D, WANG H. Occupant comfort evaluation of high-rise building under wind loads using LES[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2023, 39(2): 127-132.
- [2] 向活跃, 陈虹宇, 田祥富, 等. 考虑车-桥耦合系统激励随机性影响的大跨度悬索桥竖向涡振限值研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(5): 1363-1372.  
XIANG Huoyue, CHEN Hongyu, TIAN Xiangfu, et al. Study on allowable magnitude of vertical vortex-induced vibration for long-span suspension bridges considering excitation randomness effects of coupled vehicle-bridge system[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2025, 55(5): 1363-1372.
- [3] JING F, ZHANG L, SINGH R, et al. Quasi-coseismic variations and geosphere coupling associated with the strong 2023 Turkey earthquakes[J/OL]. Science of The Total Environment, 2024, 907. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.167963.
- [4] 张明金, 颜庭辕, 吴联活, 等. 中央稳定板对流线型箱梁颤振“等效风攻角”影响研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(5): 1373-1379.  
ZHANG Mingjin, YAN Tingyuan, WU Lianhuo, et al. Influence of central stabilization plates on the flutter “equivalent wind attack angle” of streamlined box girders[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2025, 55(5): 1373-1379.
- [5] 陈士通, 范鑫, 甘平平, 等. 考虑入射角影响的H型超高墩连续刚构桥地震易损性研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(5): 230-242.  
CHEN Shitong, FAN Xin, GAN Pingping, et al. Seismic vulnerability of H-type ultra-high pier continuous rigid frame bridge considering effects of incident angle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(5): 230-242.
- [6] LI L F, HU S C, WANG L H. Seismic fragility assessment of a multi-span cable-stayed bridge with tall piers[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(9): 3727-3745.

- [7] WANG H, MAO J X, SPENCER B. A monitoring-based approach for evaluating dynamic responses of riding vehicle on long-span bridge under strong winds[J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 35-47.
- [8] 郭健, 徐洪东, 江定宇, 等. 基于小波分析的跨海大桥斜拉索风致损伤识别[J]. *浙江工业大学学报*, 2017, 45(6): 671-676.  
GUO Jian, XU Hongdong, JIANG Dingyu, et al. Wind-induced damage identification for stayed cables of cross-sea bridges based on wavelet analysis[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2017, 45(6): 671-676.
- [9] ISHIHARA T, IIDA Y, WANG LL. Numerical study of combined seismic and aerodynamic loads on wind turbine support structures by coupled and uncoupled approaches[J/OL]. *Structures*, 2024, 60. DOI:10.1016/j.istruc.2024.105886.
- [10] 孙黄胜, 刘华, 时凌云. 考虑行波效应的某大跨桥梁地震响应分析[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(3): 51-58.  
SUN Huangsheng, LIU Hua, SHI Lingyun. Seismic response analysis of a large-span bridge considering traveling wave effect[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2018, 37(3): 51-58.
- [11] 刘江浩. 强风作用下大跨度客货混运铁路悬索桥列车走行性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.  
LIU Jianghao. Study on train running performance of long-span passenger and freight mixed railway suspension bridge under strong wind loads[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [12] 刘万里. 高速铁路大跨悬索桥上伸缩调节器优化布置与动态响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
LIU Wanli. Research on dynamic response characteristics and structural optimization design of rail expansion joint on suspension bridges in high-speed railways[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [13] 丁德豪, 许健, 朱玉, 等. 带地锚索的新型回转缆式悬索桥风致抖振竖向变形响应研究[J]. *振动与冲击*, 2025, 44(16): 228-238.  
DING Dehao, XU Jian, ZHU Yu, et al. Study on deformation response under wind-induced buffeting of a novel main-cable-looped suspension bridge with ground-anchored hangers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(16): 228-238.
- [14] 刘杨, 李宏男, 李超, 等. 风与地震耦合作用下钢管混凝土框架-防屈曲支撑结构体系易损性研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(2): 56-65.  
LIU Yang, LI Hongnan, LI Chao, et al. The study on the vulnerability of the concrete filled steel tubular frame with buckling-restrained braces structure under the coupling of wind and earthquake[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(2): 56-65.
- [15] 刘忠敏. 考虑脉动风非平稳特性的大跨度悬索桥抖振响应时域分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.  
LIU Zhongmin. Time-domain analysis on buffeting response of long-span suspension bridge considering unsteady characteristics of fluctuating[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [16] 吴文朋, 李立峰, 王连华, 等. 基于IDA的高墩大跨桥梁地震易损性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(3): 117-123.  
WU Wenpeng, LI Lifeng, WANG Lianhua, et al. Evaluation of seismic vulnerability of high-pier long-span bridge using incremental dynamic analysis[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2012, 32(3): 117-123.
- [17] 周长东, 陈静, 曾绪朗, 等. 钢筋混凝土圆形空心高墩地震易损性分析[J]. *铁道工程学报*, 2014, 31(11): 65-71.  
ZHOU Changdong, CHEN Jing, ZENG Xulang, et al. Evaluation of seismic vulnerability of reinforced concrete circular hollow high-piers[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2014, 31(11): 65-71.
- [18] 王帅, 宋帅. 桥梁构件易损性曲面的地震动强度参数向量优选[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(4): 194-203.  
WANG Shuai, SONG Shuai. Optimization of ground motion intensity measure vectors for vulnerability surface of bridge components[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(4): 194-203.
- [19] 王志远, 赵人达, 吴鑫睿, 等. 大跨度钢管混凝土土性骨架拱桥地震易损性分析[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(16): 72-81.  
WANG Zhiyuan, ZHAO Renda, WU Xinrui, et al. Seismic vulnerability analysis of long-span CFST stiff-skeleton concrete arch bridges[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(16): 72-81.
- [20] 周颖, 单慧伟, 邢丽丽, 等. 地震和风耦合作用下上海中心大厦结构易损性研究[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(2): 1-11.  
ZHOU Ying, SHAN Huiwei, XING Lili, et al. Study on vulnerability of Shanghai Tower under combined actions of wind and earthquake[J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(2): 1-11.