

采用改进等价极值法的钢网架动力可靠性分析*

刘国光¹, 杨跃敏^{1,2}, 李盈辉¹, 裴磊洋¹, 陈杭滨³

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院 天津, 300300)

(2. 方远建设集团股份有限公司 台州, 318000)

(3. 杭州铁木辛柯建筑设计事务所有限公司 杭州, 310000)

摘要 为比较动力作用下航站楼钢网架结构可靠性的空间分布差异,基于等价极值原理中的极值(P),推导并改进了以逼近极值(ΔP)为特征变量的结构失效概率计算方程。结合某机场航站楼钢网架优化案例,数值模拟分析了指廊钢屋盖在不同有效峰值加速度(effective peak acceleration, 简称EPA)作用下的结构可靠性变化规律,总结了改进等价极值法在预测结构失效时的优越性。结果表明:利用改进等价极值法得到的结构失效概率上下界曲线能准确表征不同EPA作用下结构失效的“三阶段”变化趋势,且计算阈值区间随EPA增加而收敛,并在EPA大于0.22 g时趋于0;在结构设计优化指标满足规范要求时,改进等价极值法既能有效预测其可靠性变化趋势又具有较高预测精度;指廊结构区段内的支座节点失效概率与整体失效概率接近,EPA小于0.295 g时误差不超过4%,可通过监测代表节点实现结构整体可靠度监测。

关键词 空间结构;改进等价极值;失效概率分析;有效峰值加速度;失效阈值区间
中图分类号 TU311.2

引言

近年来,空间杆系结构在机场航站楼、体育馆、音乐厅等大型钢屋盖结构中得到广泛应用,其可靠性可通过在特定时间或特殊工况下保持结构设计功能不变的能力来定性评估。随着行业对结构全寿命周期安全性能重视程度的不断提高,杆系结构可靠性的量化评价逐渐引起研究人员的重视。

空间杆系结构失效属于多维随机变量的高冗余度结构破坏问题。传统蒙特卡罗法在失效概率精度估计方面具有极大优势,但在计算复杂结构失效问题中存在耗时较长的问题^[1]。为同时提高结构失效概率预测效率和准确性,研究人员利用泰勒公式将高阶结构功能函数降维处理以计算结构失效概率的上下界值,提出了改进蒙特卡罗法^[2-4]。为更好地将复杂可靠度计算问题转化为失效模式下的等效概率计算问题,Li等^[5]通过广义概率密度演化方程进行了结构振动可靠性分析和杆系结构失效预测。此外,多阶耦合计算模型可通过一次二阶矩法求解构件的可靠性指标,进而计算结构失效概率,适合空间杆系结构可靠性评估问题^[6]。通过混合模型得到一系列经典失效概率的加权之和,并基于计算不确定性的期望和方差可量化计算结构的可靠性^[7]。但是

由于对复杂结构存在认识不确定性,基本随机变量的概率描述不能被精确定义^[8]。当结构中存在随机性且考虑不精确概率时,结构失效概率由于认知不确定性的存在不是惟一值。因此,可通过概率盒模型中概率区间的上下界来描述认知不确定性的上下边界^[9]。

空间杆系结构属于复杂超静定结构,其安全性能的主观不确定性难以量化,造成了理论求解的复杂性和计算结果的不确定性。因此,通过构件随机受力变化的客观不确定性评价其可靠性就成为判定空间杆系结构安全性能的重要手段^[1,10]。通过调整杆系结构参数,例如改变构件曲率、设置长度缺陷、考虑微动疲劳和微动磨损等,都可估算出结构局部失效或连续倒塌的概率^[2,11-12]。空间杆系结构失效的主要诱因之一是外部动力作用,常见分析方法包括振型分解反应谱法、高斯回归法等^[13-14]。文献^[15-16]利用振动模态分析和有限元分析的方法模拟空间杆系结构对于地震作用的响应。考虑结构抗震能力的不确定性和外荷载作用的随机性,采用动态分析方法(如增量动力法)确定地震作用下结构的响应及破坏程度^[17-18],目前常采用峰值地面加速度(peak ground acceleration, 简称PGA)和EPA得到

* 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1600102);中央高校基本科研业务费专项资助项目(3122023PY03)
收稿日期:2022-04-06;修回日期:2022-07-00

的结构反应谱用以表征地震强度^[19-20]。相比PGA, 基于地震加速度反应谱的EPA对结构稳定分析更有意义, 是研究地震作用的重要手段^[21]。

当前, 在杆系可靠性评估中虽取得了一定成果, 但仍没有一个被广泛应用的杆系失效评估方法。为进一步研究空间杆系结构的可靠性动态量化计算方法, 笔者改进了等价极值广义函数的核心算法, 采用应力能量法和加速度功率谱法确定了与结构可靠性相关的重要随机参数值, 提出了一种适用于杆系结构失效概率量化计算的方法, 并总结了杆件群失效概率与EPA的关系。

1 改进等价极值法

1.1 等价极值事件

在结构强度理论中, 假设构件工作应力为 s , 许用应力为 c_y , 当考虑单一随机事件影响时, 杆系结构失效可通过极限状态函数 $Z^{[6]}$ 来定义, 即

$$Z = c_y - s \quad (1)$$

当用等价极值法考虑多个随机事件影响时, 结构系统失效概率可通过多个不等式联立计算^[5]。在广义等价极值事件中, 假设 X_{ij} 为随机变量, 令 W_{ext} 为

$$W_{\text{ext}} = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \min_{1 \leq j \leq m} (X_{ij}) \right\} \quad (2)$$

可得

$$P \left\{ \bigcup_{i=1}^n \left(\bigcap_{j=1}^m (X_{ij} > a) \right) \right\} = P \{ W_{\text{ext}} > a \} \quad (3)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

由式(3)可得, 一组随机事件的概率计算可表示为多个随机事件的组合, 因而 W_{ext} 是结构失效概率对应的多个随机事件的等价极值变量。在等价极值随机变量概率密度函数存在的前提下, 利用等价极值原理将多个原始随机事件转换为随机事件组合, 形成结构响应参数广义极值分布。然而, 在计算中会出现组合爆炸现象, 如何通过数理降维实现快速组合运算是解决其工程应用的关键问题^[22]。

1.2 改进等价极值理论推导

在机械工程和结构工程领域中, 通常寻找结构最薄弱点来定义结构失效概率。任意杆件失效都可能产生结构局部破坏, 例如在二阶混合结构系统中采用简易串联算法时, 可认为当存在 $P_{fx} = P_r\{(X > a)\}$ 或 $P_{fy} = P_r\{(Y > a)\}$ 时, 定义为结构失效, 即

$$P_f = \max(P_{fx}, P_{fy}) \quad (4)$$

其中: P_f 为整体失效概率; P_{fx} 为子系统 X 的失效概率; P_{fy} 为子系统 Y 的失效概率。

在等价极值事件中, 根据文献[5], 式(3)可表示为

$$P_f = \max \{ P_r(X > a), P_r(Y > a) \} = P_r \{ \max(X, Y) > a \} \quad (5)$$

将式(5)展开后, 通过数理转换改进得到关于子系统 X 的失效概率为

$$\begin{aligned} P_{fx} &= \int_{(X>a) \cup (Y>a)} p_{XY}(x, y) dx dy = \\ & \iint_{x < y, y > a} p_{XY}(x, y) dx dy + \\ & \iint_{y < x, x > a} p_{XY}(x, y) dx dy = \\ & \left\{ \int_a^\infty \left[\int_{-\infty}^\infty p_{XY}(x, y) dx \right] dy + \right. \\ & \left. \int_a^\infty \left[\int_a^y p_{XY}(x, y) dx \right] dy \right\} + \\ & \left\{ \int_{-\infty}^a \left[\int_a^\infty p_{XY}(x, y) dx \right] dy + \right. \\ & \left. \int_a^\infty \left[\int_y^\infty p_{XY}(x, y) dx \right] dy \right\} = \\ & \int_a^\infty \left[\int_{-\infty}^\infty p_{XY}(x, y) dy \right] dx + \\ & \int_{-\infty}^a \left[\int_a^\infty p_{XY}(x, y) dy \right] dx = \\ & P + \Delta P_x \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $p_{XY}(x, y)$ 为关于子系统 X 和 Y 的概率密度函数; ΔP_x 为关于子系统 X 的失效概率逼近极值。

$$\begin{aligned} \Delta P_x &= \int_{-\infty}^a \left[\int_a^\infty p_{XY}(x, y) dy \right] dx = \\ & \iint_X p_{XY}(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

同理, 关于子系统 Y 的结构失效概率为

$$P_{fy} = P + \Delta P_y \quad (8)$$

其中: ΔP_y 为关于子系统 Y 的失效概率逼近极值。

$$\begin{aligned} \Delta P_y &= \int_{-\infty}^a \left[\int_a^\infty p_{XY}(x, y) dx \right] dy = \\ & \iint_Y p_{XY}(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (9)$$

X 和 Y 分区图如图1所示。

考虑到 $\iint p_{XY}(x, y) dx dy \geq 0$, 且 $\Delta P_x \geq 0$, $\Delta P_y \geq 0$, 因而有

$$P_f \geq \max(P_{fx}, P_{fy}) \quad (10)$$

通过改进等价极值理论的组合降维形式, 推导了以传统等价极值 P 为基础、不同子系统的逼近极

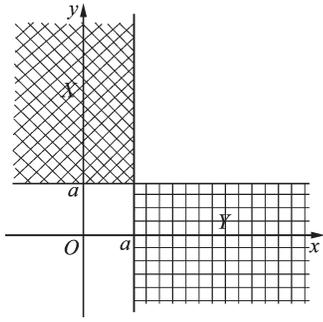


图1 X和Y分区图

Fig.1 Partition of X and Y

值 ΔP_i 为广义参数的结构失效概率密度函数。上述推导过程中不要求各子系统相互独立,所得公式具有较强的适用性。

1.3 改进等价极值法的量化表达

基于空间杆系结构受力特点以及结构整体失效和局部失效间的正态关系,推导2阶及3阶失效概率密度方程,并通过改进蒙特卡罗法解决了组合爆炸问题,利用间接积分将高阶方程转化为定积分形式^[23],即

$$P_{ij} = \int_{-\infty}^{-\beta_i} \Phi \left(\frac{-\beta_i - \rho_{ij}v}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \varphi(v) dv \quad (11)$$

$$P_{ijr} = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \prod_{i,j,r} \Phi \left(\frac{-\beta_i - \lambda_i t}{\sqrt{1 - \lambda_i^2}} \right) dt \quad (12)$$

其中 ρ_{ij} 为第 i 个与第 j 个正态分布的相关系数; $\varphi(\bullet)$ 为关于 β 和 λ 的1阶失效概率密度函数。

可以推导出杆件群的多阶耦合失效概率上下界不等式,分别为

$$P_f \leq P_1 + P_2 - P_{12} + \sum_{i=3}^n \left\{ P_i - \max_{\substack{r \in (2,3,\dots,j-1) \\ j < r}} [P_{ir} + P_{ij} - P_{irj}] \right\} \quad (13)$$

$$P_f \geq P_1 + P_2 - P_{12} + \sum_{i=3}^n \max \left\{ P_i - \sum_{j=1}^{i-1} P_{ij} + \max_{\substack{r \in (2,3,\dots,i-1) \\ j \neq i}} \sum_{j=1}^{i-1} P_{irj}; 0 \right\} \quad (14)$$

不等式中 $P_1 + P_2 - P_{12}$ 为等价极值概率密度函数中的极值 P ,其中 $\sum_{i=3}^n \{\bullet\}$ 分别为改进等价极值算

法中上界逼近极值 ΔP_U 和下界逼近极值 ΔP_L ,于是式(13)和式(14)可转化为

$$P_f \leq P + \Delta P_U \quad (15)$$

$$P_f \geq P + \Delta P_L \quad (16)$$

由上述推导提出了以 P 为基数、 ΔP_U 和 ΔP_L 为

精度优化变量、杆件可靠性指数 β 和杆件群重要性系数 λ 为性能参数的量化结构失效概率的改进等价极值法,参数选取参见文献[23]。通过多阶耦合失效不等式量化广义概率密度函数,有效解决了考虑多阶情况的结构失效收敛性问题。

2 数值模拟分析

2.1 某机场航站楼钢屋盖设计参数

某机场指廊结构如图2所示。指廊屋盖整体网架形式为正交正放四角锥网架。网架的节点形式为焊接球,屋盖采用成品球铰支座与柱顶连接,网架节点采用焊接球空心节点,屋面最大高度为26 m,指廊跨度最大为15 m。屋盖网架杆件最大规格为 $\Phi 550 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,最小规格为 $\Phi 89 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,主要材质为Q345B;加肋焊接空心球直径为300~800 mm,壁厚为14~60 mm,主要材质为Q345B;弹性模量 $E=206 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。

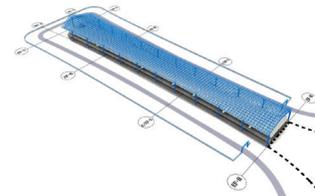


图2 某机场指廊结构

Fig.2 Corridor structure of an airport

2.2 指廊中部区段结构可靠性数值计算

图3为网架结构示意图。根据结构对称性划分正交正放抽空四角锥网架,并对6个代表节点进行具体标号。由于所选取的钢网架为双向对称结构,因此选择1/4区域进行研究,所选取的6个代表节点分布于所选1/4网架的特征部位(4个角、中心以及中心与整个钢网架中心所连直线的中点)。采用设计地震分组为3,地震设防烈度为7(0.1g),场地类别为III,考虑多遇地震影响,特征周期 $T_g=0.55 \text{ s}$,阻尼比 $\zeta=0.02$,利用通用有限元分析软件MIDAS/Gen建模进行有限元分析。

2.3 计算工况

由于地震作用具有较强的随机性,不同地震时程曲线对结构动力作用影响差别较大,此处只对场地特征周期接近的6度小震(0.122g,0.148g)、7度中震(0.161g,0.219g)和8度大震(0.267g,0.295g)等6种工况进行时程分析,研究在周期相近的情况

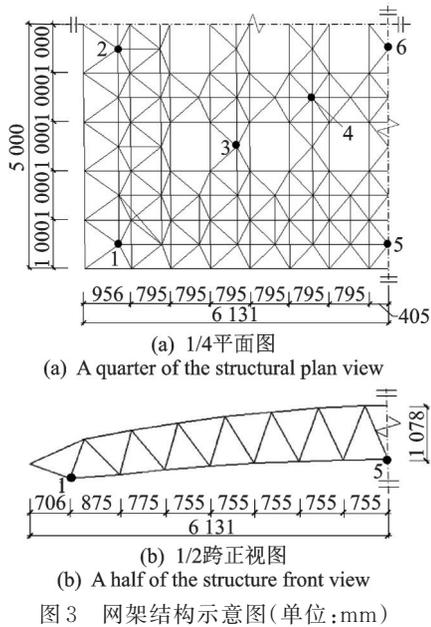


图3 网架结构示意图(单位:mm)

下不同EPA强度对结构的影响。在地震波作用下,获得有效地震波段内所有杆件节点的最大应力及最大加速度值,利用改进等价极值法计算该处节点的失效概率,进而通过非线性拟合得到网架整体失效概率云图。同时,计算网架结构代表节点在不同EPA激励作用下结构失效概率变化,并利用阈值分析总结代表节点与整体失效概率云图的差异特征。

2.4 杆系结构失效概率对比分析

通过改进等价极值法可计算所有节点在6组不同EPA作用下的2阶和3阶失效以及耦合失效概率值。以8度(EPA=0.295g)地震荷载作用为例,计算结构失效概率。改进等价极值变量分布如图4所示。

在网架全节点失效计算过程中,失效极值 P 的分布可以确定结构整体最薄弱部位,支座杆件群作为最大失效概率分布群, P 最大值达到了60.30%,而抽空部分网架杆件群对杆件 P 的影响较小。在支座节点杆件群失效概率预测中, P 已经表现出较高的预测精度,而 ΔP_U 和 ΔP_L 均接近于0。在结构其他节点杆件群中, ΔP_U 和 ΔP_L 对失效概率预测精度明显提升,尤其对支座节点附近的抽空杆件群失效概率精度影响较大, ΔP_U 最大达到8.2%。结果表明,传统等价极值计算中的 P 在识别结构最薄弱区域具有较高的准确性,而笔者提出的改进等价极值中的逼近极值 ΔP_U 和 ΔP_L 在综合考虑2阶及3阶等耦合失效概率因素后,能明显提升结构失效概率预测精

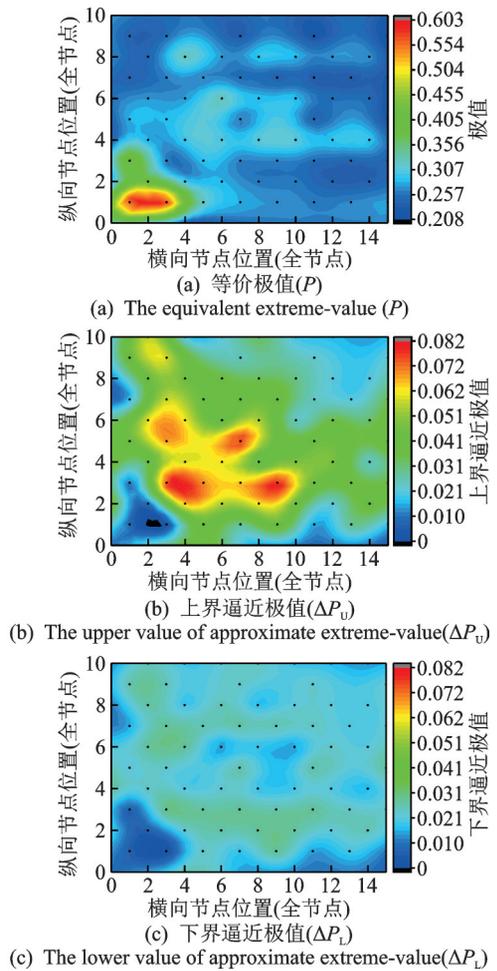


图4 改进等价极值变量分布

Fig.4 The distribution of the improved equivalent extreme-value variables

度,尤其在强震作用下表现出较高敏感性。

2.5 代表节点可靠性分析

为更好地在实际工程中实现对结构整体或杆件群失效的快速预测,采用典型节点杆件群来预测结构失效变化过程。分别选取了支座节点1、纵跨节点2、抽空节点3、支撑节点4、横跨节点5和中心节点6等代表节点,计算网架节点在不同EPA荷载作用下的失效概率极值分布,以及采用改进等价极值法计算得到的 ΔP_U 和 ΔP_L 变化情况。结构代表节点杆件群失效概率如图5所示。

由图5(a)可以看出:在结构处于6度范围(EPA<0.16g)地震作用时,结构失效阈值区间基本保持平行,失效极值 P 增长速度较快;在7度范围(0.16g≤EPA≤0.22g)地震作用时,结构失效概率接近线性变化;在地震超过7度(EPA>0.22g)时,结构失效概率接近指数增长。上述增长规律体现了当EPA增大时结构安全能力的非线性变化特征,而逼近极值 ΔP_i 预测结果中阈值区间逐步收敛,确切

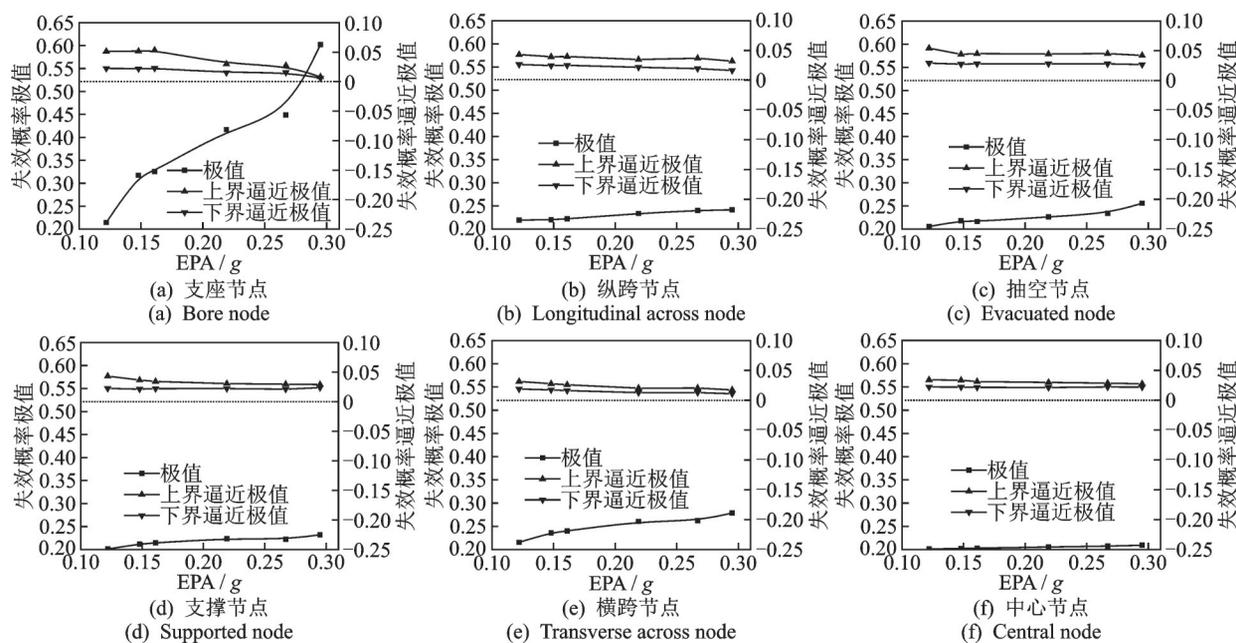


图 5 结构代表节点杆件群失效概率

Fig.5 Failure probability of the typical nodes member group of the structure

的失效概率界值使杆系结构失效概率预测精度显著提高。结构失效呈现出“三阶段”增长过程,在小震作用下干扰结构失效概率的其他因素影响了预测准确度;但当大震影响占主导地位时,改进等价极值法的预测结果逐渐收敛,具有较高准确性。

数据表明,除了支撑节点的下界百分比在EPA由0.122 g增大至0.295 g的过程中存在5.4%的增大外,其余结果的失效概率范围缩小到原范围的7.0%~93.6%,程度随极值变化幅度的增大而增大。这表明改进等价极值法可有效量化预测结构失效概率,对原极值理论有修正效果,在等价极值P的基础上优化失效概率区间,该失效概率区间可以表征结构失效变化情况。将整体全节点失效概率计算中的最大值与支座节点杆件群失效概率做进一步对比分析,网架在不同EPA下的多阶耦合失效概率如图6所示。

由图6可知,结构整体失效概率与代表节点杆

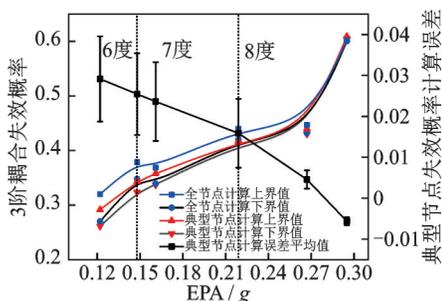


图 6 网架在不同EPA下的多阶耦合失效概率

Fig.6 Multi-order coupling failure probability of grid under different EPA values

件群失效概率变化具有同步性,均具有“三阶段”变化特征。在不同EPA作用下,相比于全节点计算方法,采用代表节点计算误差均小于4%,且随着EPA的增大,计算误差逐渐减小,当EPA=0.278 g时,误差降为0。在结构受到强震作用时,代表节点计算失效概率值较整体失效概率值稍大,计算结果偏安全,因而结构整体失效概率评价可通过计算关键薄弱节点失效概率来实现。

2.6 指廊端部结构区段可靠性分析

通过荷载位移数值模拟分析,可以得到该机场航站楼指廊钢屋盖网架在不同地震作用下的结构响应。航站楼指廊网架数值模拟分析如图7所示。其中,图7(a)为指廊结构在8度(EPA=0.295 g)时,结构最大竖向位移分布情况。

由图7(a)可知,指廊结构端部悬挑区域无支座支撑,在8度地震(EPA=0.295 g)的最大竖向位移达到161 mm。该区域节点杆件群在地震作用下易出现局部失稳破坏,对其进行局部失效概率预测具有工程意义。

将航站楼指廊薄弱区域杆件群划分为6个子系统,分别计算6个子系统在EPA从0.122 g增长到0.295 g过程中的杆件可靠性指数β和重要性系数λ,并将得到的性能参数代入多阶耦合失效概率不等式。航站楼指廊悬挑部位失效概率如图8所示。

由图8可以看出,悬挑钢结构薄弱杆件群失效概率随着EPA的增加出现线性波动,符合“三阶段”

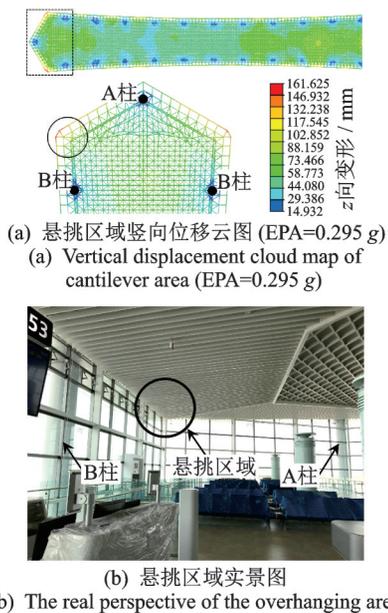


图7 航站楼指廊网架数值模拟分析

Fig.7 Numerical simulation analysis of the terminal corridor truss

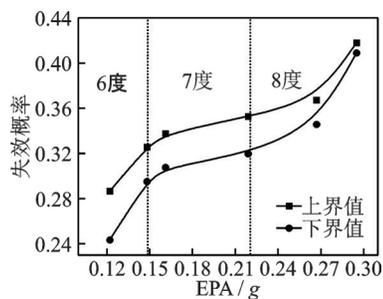


Fig.8 Failure probability of overhanging part in terminal corridor

增长规律。在8度地震作用下,杆件群局部结构失效概率再次出现激增,失效阈值 ΔP 明显收敛,并在EPA为0.295 g时,失效概率区间达到了[0.408, 0.418],进一步说明悬挑区域杆件群具有较高的损伤敏感性。

通过上述分析可知:在指廊中部区段结构采用正交正放抽空四角锥网架时,支座节点杆件群失效概率为[0.603, 0.685];在指廊端部杆件群采用不抽空结构形式时,其失效概率为[0.408, 0.418]。这表明利用改进等价极值法可量化计算航站楼指廊不同区段的失效概率,可为结构可靠性优化设计提供科学参考依据。

3 结论

1) 所提出的改进等价极值法适用于求解空间杆系结构失效概率问题。在考虑强震作用时,评价

结果波动阈值接近于0,相较于利用等价极值 P 来评价结构失效概率,计算精度有较大提高,尤其对结构薄弱部位失效概率预测具有明显优化作用。

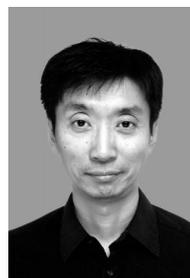
2) 代表节点计算失效概率与整体失效概率具有同步性,可利用代表节点失效概率表征结构整体失效概率,其误差不超过4%。尤其是在强震作用下,误差小于1%,此时利用代表节点失效概率表征结构整体失效概率时偏安全。

3) 网架结构失效概率变化曲线具有明显的“三阶段”变化特征,且随着EPA增加,利用改进等价极值法计算得到的失效概率阈值区间明显收敛,体现了改进等价极值法具有识别地震作用下结构动力响应非线性变化特征的能力。

参 考 文 献

- [1] 贾少敏,王子琦,陈华霆,等. 多点激励下减震桥梁结构抗震可靠度分析的哈密顿蒙特卡罗子集模拟法[J]. 振动工程学报, 2021, 34(2): 357-363.
JIA Shaomin, WANG Ziqi, CHEN Huating, et al. Hamiltonian Monte Carlo based subset simulation for reliability analysis of energy-dissipation bridge structures with viscous dampers under multi-support seismic excitations [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 357-363. (in Chinese)
- [2] GORDINI M, HABIBI M R, TAVANA M H, et al. Reliability analysis of space structures using Monte-Carlo simulation method [J]. Structures, 2018, 14: 209-219.
- [3] ALBAN A, DARJI H A, IMAMURA A, et al. Efficient Monte Carlo methods for estimating failure probabilities[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 165: 376-394.
- [4] 孟广伟,魏彤辉,周立明,等. 基于泰勒展开法的结构混合可靠性分析[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1404-1410.
MENG Guangwei, WEI Tonghui, ZHOU Liming, et al. Hybrid reliability analysis of structures based on Taylor expansion method [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7): 1404-1410. (in Chinese)
- [5] LI J, CHEN J B, FAN W L. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability[J]. Structural Safety, 2007, 29(2): 112-131.
- [6] 王竹君,夏晋,金伟良. 一种改进的工程结构全寿命设计理论指标体系[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 40-48.
WANG Zhujun, XIA Jin, JIN Weiliang. Modified life-cycle design index system of engineering structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 40-48. (in Chinese)
- [7] WANG P D, ZHANG J G, ZHAI H, et al. A new

- structural reliability index based on uncertainty theory [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1451-1458.
- [8] 杨旭锋. 含认知不确定性参数的高效高精度可靠性分析方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [9] 刘海波. 针对概率盒模型的高效不确定性传播数值分析方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [10] GUO J, DU X P. Sensitivity analysis with mixture of epistemic and aleatory uncertainties[J]. AIAA Journal, 2007, 45(9): 2337-2349.
- [11] OGNJANOVIC M, MILOS M, KOLAREVIC N. Testing and prediction of structural failures caused by fretting[J]. Materials Today: Proceedings, 2016, 3(4): 1103-1107.
- [12] ZHENG Z Y, LI Z X, CHEN Z W. Adaptive multiscale analyses on structural failure considering localized damage evolution on vulnerable joints[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(2): 304-316.
- [13] 张文福, 杭昭明, 李洋, 等. 劲性索结构竖向地震位移解析解及其特性分析[J]. 空间结构, 2020, 26(1): 49-58.
ZHANG Wenfu, HANG Zhaoming, LI Yang, et al. Analytical solution and characteristics analysis of vertical seismic displacement of truss cable structures [J]. Spatial Structures, 2020, 26(1): 49-58.(in Chinese)
- [14] GONZÁLEZ-ARÉVALO N E, VELÁZQUEZ J C, DÍAZ-CRUZ M, et al. Influence of aging steel on pipeline burst pressure prediction and its impact on failure probability estimation [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 104950.
- [15] 周臻, 孟少平, 吴京. 大跨弦支穹顶结构的振动模态与地震响应分析[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(4): 609-613.
ZHOU Zhen, MENG Shaoping, WU Jing. Vibration model and seismic response for the long-span suspend-dome structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(4): 609-613.(in Chinese)
- [16] 曾滨, 周臻, 朱冬平, 等. 罕遇地震下自定心支撑张弦桁架振动响应分析[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(6): 1195-1200.
ZENG Bin, ZHOU Zhen, ZHU Dongping, et al. Study on seismic response of cable-supported truss with self-centering energy dissipation brace [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6): 1195-1200.(in Chinese)
- [17] 江学良, 张继琪, 杨慧, 等. 多因素作用下含连拱隧道边坡地震动力响应特性研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(6): 1291-1301.
JIANG Xueliang, ZHANG Jiqi, YANG Hui, et al. Seismic dynamic response characteristics of slope with double-arch tunnel under multiple factors [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1291-1301. (in Chinese)
- [18] 张朕磊. 某超限塔楼基于IDA的地震易损性分析[J]. 结构工程师, 2018, 34(3): 16-23.
ZHANG Zhenlei. Seismic fragility analysis of an office building based on IDA [J]. Structural Engineers, 2018, 34(3): 16-23.(in Chinese)
- [19] 胡宗波, 薛建阳. 地震作用下型钢混凝土异形柱框架动力特性及频谱反应分析[J]. 振动工程学报, 2021, 34(3): 528-538.
HU Zongbo, XUE Jianyang. Dynamic characteristics and spectrum response of SRC special-shaped column frame under seismic effect [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(3): 528-538.(in Chinese)
- [20] YAO X L, QI S W, LIU C L, et al. An empirical attenuation model of the peak ground acceleration (PGA) in the near field of a strong earthquake [J]. Natural Hazards, 2021, 105(1): 691-715.
- [21] 曹胜涛, 王亚勇, 李志山, 等. 地震动有效峰值加速度的统计分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(21): 73-76.
CAO Shengtao, WANG Yayong, LI Zhishan, et al. Statistical analysis of seismic effective peak acceleration [J]. Building Structure, 2019, 49(21): 73-76.(in Chinese)
- [22] 王瑶, 孙秦. 一种解决混联系统组合爆炸问题的贝叶斯网络[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(2): 520-530.
WANG Yao, SUN Qin. A Bayesian network for solving the combinational explosion problem of compound system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(2): 520-530.(in Chinese)
- [23] 刘国光, 杨跃敏, 武志玮. 基于耦合概率法的空间杆系结构失效概率分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3244-3251.
LIU Guoguang, YANG Yuemin, WU Zhiwei. Failure probability analysis on spatial truss structure by coupling probability method [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(8): 3244-3251.(in Chinese)



第一作者简介:刘国光,男,1980年10月生,博士、副教授。主要研究方向为机场工程、结构工程和防灾减灾及防护工程。曾发表《杆系结构鲁棒性应变能敏感度分析及试验》(《振动、测试与诊断》2016年第36卷第3期)等论文。
E-mail: ggliu@cauc.edu.cn