

# 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估

李正良<sup>1,2,3</sup>, 王成<sup>1</sup>, 王涛<sup>1†</sup>, 方智远<sup>4</sup>

1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
2. 风工程及风资源利用重庆市重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;
3. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;
4. 河南科技大学 土木工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**为减少直立锁缝屋面系统在下击暴流作用下的风揭损毁事故,提出了下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估方法.采用大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法来分析下击暴流作用下屋面风荷载特征,以不同的风向角为工况,得到屋面的极值风荷载大小及其分布位置.选取屋面最不利位置建立局部仿真模型并推导了相应的失效准则和极限状态函数.基于拉丁超立方抽样的 Monte Carlo 法(LHS-MCS)对下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统进行可靠度评估.结合常态风可靠指标以及相关规范对分析结果进行了评价.研究结果表明:下击暴流相比常态风更易造成直立锁缝屋面系统风揭破坏,同时下击暴流作用下可靠指标仅满足规范要求的第三级安全水准,建议对重要建筑物进行直立锁缝屋面系统设计时考虑下击暴流的影响.

**关键词:**直立锁缝屋面系统;下击暴流;风效应;可靠度分析;最不利位置

**中图分类号:**TU31 **文献标志码:**A

## Reliability Evaluation on Wind-uplifted Resistance of Standing Seam Roof System under Downburst

LI Zhengliang<sup>1,2,3</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1†</sup>, FANG Zhiyuan<sup>4</sup>

1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Wind Engineering and Wind Resources Utilization(Chongqing University), Chongqing 400045, China;
3. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education(Chongqing University), Chongqing 400045, China;
4. School of Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In order to reduce the wind-uplifted damage of standing seam roof system (SSRS) under downburst, a method is proposed to evaluate the reliability of the SSRS under downburst in this article. Firstly, the large eddy simulation (LES) method is used to analyze the roof wind load characteristics under downburst, and the maximum wind load and corresponding distribution position of SSRS are obtained through different wind direction angle conditions. Secondly, the most unfavorable position of SSRS is selected to establish a local simulation model. The corresponding

\* 收稿日期:2021-09-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0703901), National Key R&D Program Project(2017YFC0703901);国家自然科学基金资助项目(51611140123), National Natural Science Foundation of China(51611140123)

作者简介:李正良(1963—),男,江苏江阴人,重庆大学教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: taowang@cqu.edu.cn

failure criterion and limit state function are derived; Thirdly, the Monte Carlo method based on Latin Hypercube Sampling (LHS-MCS) is used to evaluate the reliability of the SSRS under downburst. Finally, the analysis results are evaluated in combination with conventional wind reliability indicators and related specifications. The research results show that downbursts are more likely to cause wind-uplifted damage to the SSRS than conventional winds. At the same time, the reliability index under downbursts only meets the third-level safety level required by the specification. It is recommended to consider the impact of the downburst when designing the SSRS for important buildings.

**Key words:** standing seam roof system; downburst; wind effects; reliability analysis; the most unfavorable position

直立锁缝屋面系统是将相邻屋面板的卷边借助专用设备与支座立板进行咬合,然后连接到支承结构的屋面系统.凭借其自重轻、易加工、耐腐蚀、防水性能优异等特点,而被广泛应用于大跨建筑的屋面围护结构中.然而作为风敏感结构,直立锁缝屋面系统在极端风情况下的风揭损毁问题较为突出<sup>[1]</sup>.尽管已有针对该屋面系统的抗风揭试验研究和数值模拟<sup>[2-6]</sup>,但对其抗风揭可靠度的研究却较少.此外,屋面的抗风设计主要基于普通的大气边界层风<sup>[7]</sup>,而非台风地区的极值风速多由雷暴天气中产生的下击暴流引起<sup>[8-10]</sup>,进而造成直立锁缝屋面系统风揭破坏.为了避免风揭破坏的发生,建立一套适用于下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统可靠度评估方法以用于指导结构设计具有重要的工程实用意义.

进行下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估,需首先确定屋面的风荷载大小和分布.对此,学者们围绕下击暴流屋面风荷载特性开展了一系列试验以及数值模拟研究.Zhang等<sup>[11-12]</sup>通过风洞试验分别研究了下击暴流作用下低矮建筑以及高层建筑的表面压力分布特征;Jesson等<sup>[13]</sup>利用物理试验分析了下击暴流对建筑物表面的瞬时风压分布的影响.由于风洞试验费用昂贵且大多进行缩尺试验,目前多数采用数值模拟来替代风洞试验开展下击暴流的研究.Sengupta等<sup>[14]</sup>采用不同湍流模型来模拟下击暴流风场,通过和试验对比得出了适用于下击暴流数值模拟的最佳湍流模型;汪之松等<sup>[15]</sup>基于大涡模拟方法分析了低矮建筑屋面的风荷载特性及建筑物表面风压分布规律;周昶毅等<sup>[16]</sup>对低矮建筑标准模型进行了大涡模拟研究,模拟得到的平均风压和脉动风压同风洞试验、场地实测数据吻合较好.从以上研究可知,下击暴流作用下建筑物的风荷载特性可通过风洞试验和大涡模拟得到,并且相关

研究成果较为丰富,本文亦可通过大涡模拟来确定直立锁缝屋面系统风荷载特性.

获得屋面风荷载的大小和分布后,结合相应的可靠度分析方法即可进行下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估.基于拉丁超立方抽样<sup>[17]</sup>的 Monte Carlo 法(LHS-MCS)可兼顾计算精度与效率,能以较小的样本量反映总体的变异规律,且在各类工程结构可靠度问题中应用较为成熟<sup>[18-20]</sup>,将该方法应用于抗风揭可靠度评估不失为一种可行的思路.而采用LHS-MCS法进行下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估时,关键在于获得该屋面系统的随机响应,其通常包括极值分布法<sup>[21-22]</sup>和最不利位置分析法两种思路.对于前者,首先通过大涡模拟得到直立锁缝屋面系统的风荷载分布和大小,随后建立整个直立锁缝屋面系统的仿真模型,将大涡模拟得到的风荷载施加到直立锁缝屋面系统对应的区域以计算不同区域的响应值;然后,通过极值分布法<sup>[21-22]</sup>计算极值响应的大小.对于后者,可从最不利位置角度分析,通过大涡模拟得出整个直立锁缝屋面系统范围内极值风荷载大小以及分布位置,选取该屋面结构中风压最大且最易破坏的位置建立局部模型并将极值风荷载加载到局部模型上,通过对最不利位置进行响应分析来表征整个直立锁缝屋面系统的结构响应.上述两种思路均可获得满足要求的下击暴流作用下直立锁缝屋面系统随机响应以用于后续的可靠度评估,但极值分布法需对整个直立锁缝屋面系统进行仿真分析,而直立锁缝屋面系统整体尺寸过大,加上锁缝处细部尺寸又精确到毫米级,若建立整个屋面的仿真模型对计算机要求过高且计算成本颇为昂贵;相对而言,最不利位置分析法从局部模型出发,通过合理的力学模型简化,可兼顾计算效率,是更为可行的途径.

为此,本文以典型工程为例,通过LES方法分析该屋面在下击暴流作用下的风荷载特性,随后选取屋面最不利位置建立局部仿真模型并推导相应的极限状态函数,最后结合LHS-MCS法提出了下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估方法,以期下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统可靠度计算提供依据.

### 1 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统风荷载大涡模拟

#### 1.1 数值模拟概况

本文以西北片区某特高压换流站阀厅为对象,建筑尺寸为60 m×36 m×24 m,地貌类型为B类,屋面形式为双坡屋面,坡度*i*=0.1,如图1所示.采用流体软件FLUENT对该建筑进行下击暴流风荷载大涡模拟,模型几何缩尺比为1:500,出流直径 $D_{jet}$ =0.6 m,出流高度 $H_{jet}$ =1.2 m.边界条件方面,射流喷口采用速度入口边界,出流速度 $v_{jet}$ =75 m/s,湍流强度为1%;出流面采用压力出口边界,湍流强度为1%;地面以及建筑物表面采用无滑移壁面,计算域和边界条件如图2所示.

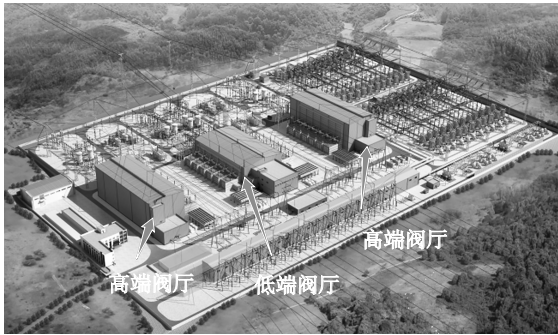


图1 换流站阀厅示意图

Fig.1 Schematic diagram of converter station valve hall

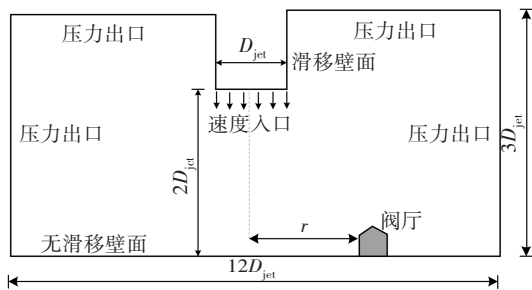


图2 风场计算域剖面图

Fig.2 Profile of wind field calculation domain

流场模型采用结构化六面体网格,风暴中心及建筑物周围采用O形网格加密;近壁面区域采用增强壁面处理方式;采用SIMPLEC算法进行压力与速度场耦合,采用二阶精度对速度压力耦合方程进行求解;LES模拟共设置3种工况,分别考虑0°、45°和90°风向角对阀厅屋面风压的影响.

LES模拟过程参照文献[15],数值模拟结果的准确性,包括网格无关性验证、平均风压验证以及流场特性验证,在文献[15]中已予以证明. LES模拟得到的 $r=1.0D_{jet}$ 径向位置处的竖向风剖面同已有研究对比示意图如图3所示,其中 $z_{max}$ 表示最大水平风速对应的竖向高度, $u_{max}$ 表示径向水平风速最大值.由图3可知,LES模拟结果具有下击暴流风场竖向风剖面的主要特征,并与实测和试验数据吻合较好,可有效模拟下击暴流风场. LES模拟得到的平均风压系数同试验[7]对比示意图如图4所示,数值模拟得到的平均风压系数和试验基本吻合,能较好地模拟阀厅表面风压特性.

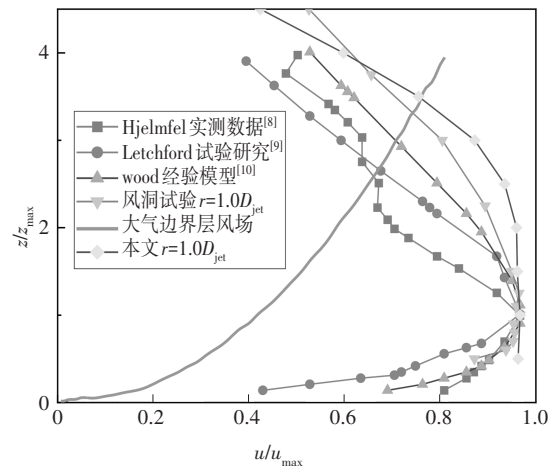


图3 竖向风剖面对比

Fig.3 Comparison of vertical wind profiles

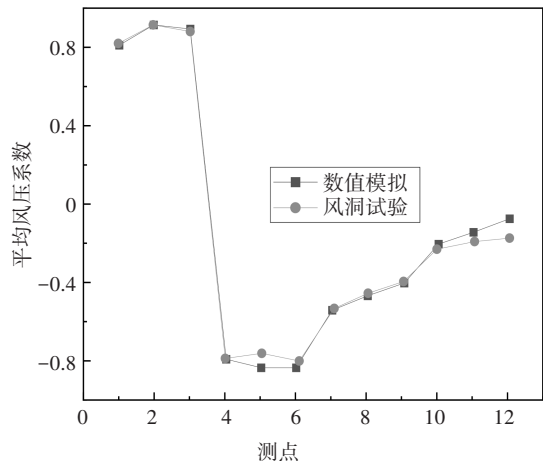


图4 平均风压系数对比

Fig.4 Comparison of mean wind pressure coefficients



### 1.2 数值模拟结果

对不同风向角进行LES模拟得出,当风向角为45°时,迎风屋面角部发生气流分离并产生锥形涡,使得在该区域出现最大负压,对应的极值风压系数为-1.33,阀厅表面极值风压系数分布如图5所示.

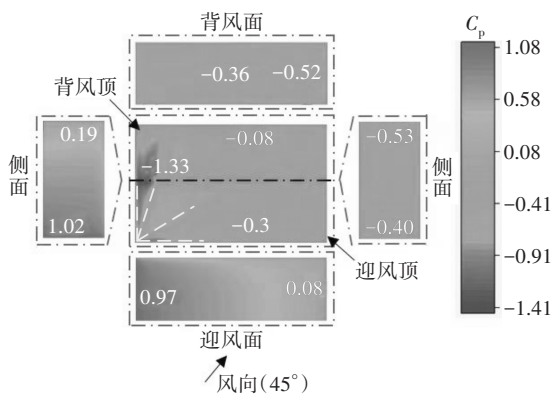


图5 45°风向角下的极值风压系数分布

Fig.5 Distribution of extreme wind pressure coefficients under 45° wind direction

根据风压系数  $C_{pi}$  定义,得到建筑物某一点的风压  $p_i$  为:

$$p_i = C_{pi} \times 0.5\rho v^2 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为空气密度,取值为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $v$ 为下击暴流喷口射流速度,根据文献[8]取下击暴流最大风速  $v=75 \text{ m/s}$ ;结合式(1)计算得出,本文最不利风向角作用下的极值风荷载为  $p_{\max}=-1.33 \times 0.5 \times 1.225 \text{ kg/m}^3 \times 75^2 (\text{m/s})^2 = -4.582 \text{ kPa}$ .

## 2 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估

### 2.1 随机参数的确定

下击暴流作用下直立锁缝屋面系统的抗风性能受多种随机变量的影响,主要分为结构的随机性和风荷载的随机性.本文结构随机变量和风荷载随机变量根据文献[23]选取,确保模拟在合理波动范围内.对于结构的随机性,本文主要考虑弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ 、屈服强度  $f_y$  和摩擦因数  $\mu$  共4个结构参数为随机参数.根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)<sup>[24]</sup>中第6.1.4条规定,材料强度的概率分布宜采用正态分布或对数正态分布;第6.1.5条规定材料强度的标准值可取其概率分布的0.05分位值确定,材料弹性模量、泊松比等物理性能的标准值可取其概率分布的0.5分位值确定.因此,弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ 、屈服强度  $f_y$  可相应给出<sup>[25-26]</sup>;直立锁

缝屋面系统由于采用人工锁缝,人为因素可能影响锁缝处的松紧程度,因此引入屋面和支座立板间的摩擦因数  $\mu$  作为随机变量来考虑人为因素的影响,其参数及其概率分布参考文献[27].

对于下击暴流风荷载的随机性,由于下击暴流实测数据较少,其风荷载分布类型暂未有定论.本文旨在建立下击暴流下的直立锁缝屋面系统可靠度评估框架,暂将下击暴流对应的极值风荷载按极值I型分布考虑<sup>[28-29]</sup>,其风荷载均值  $\mu_w=0.999 \times p_i=0.999 \times 4.582 \text{ kPa}=4.577 \text{ kPa}$ ,变异系数  $\alpha$ 取0.193.最终,下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统的随机变量及其概率分布见表1.

表1 随机变量及其概率分布

Tab.1 Random variables and corresponding probability distribution

变量	物理意义	均值	变异系数	分布类型
$E$	弹性模量	$2.06 \times 10^5$	0.03	对数正态分布
$\nu$	泊松比	0.3	0.03	对数正态分布
$f_y$	屈服强度	387.1	0.07	对数正态分布
$\mu$	摩擦因数	0.3	0.05	正态分布
$w$	下击暴流风荷载	4.577	0.193	极值I型分布

注:表中弹性模量和屈服强度单位为MPa,风荷载单位为kPa.

### 2.2 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统失效模式及功能函数推导

#### 2.2.1 仿真模型的建立

直立锁缝屋面系统构造及受力机理如图6所示,下击暴流作用下屋面迎风角部区域负压最大,对应图6(c)阀厅中椭圆加密区域;该屋面形式采用360°直立锁缝屋面系统,主要由屋面板、直立支座、附檩条和主檩条相互连接形成受力体系[图6(a)];屋面在下击暴流作用下形成负压,相邻屋面板通过两侧卷边和支座立板进行咬合以抵抗屋面负压,支座通过附檩条相连传递屋面板传来的反力[见图6(b)].

为了兼顾计算效率,通过最不利位置分析法来评估整个屋面系统的可靠度水平.采用通用有限元软件ANSYS/LS-DYNA对图6(a)中椭圆区域建立局部仿真模型,对该局部模型进行可靠度分析来评估整个屋面的可靠度指标.局部模型纵向共四跨,跨度为1200mm;屋面板横向沿中部切开,并设置对称边界条件;屋面板、支座和檩条采用SHELL163单元模拟,采用映射方法划分网格,仿真模型如图7所示;材料选用Q355钢材,本构关系为双线性随动强化模

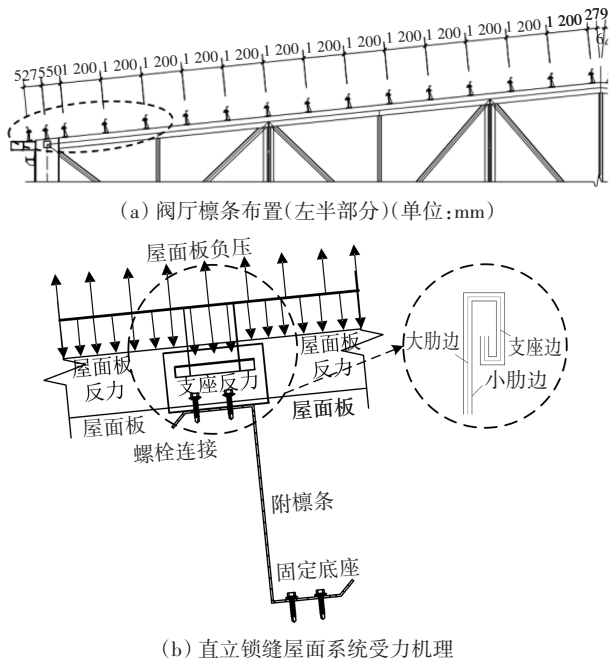


图6 阀厅直立锁缝屋面系统构造及受力机理  
Fig.6 Structure and force mechanism of standing seam roof system of valve hall

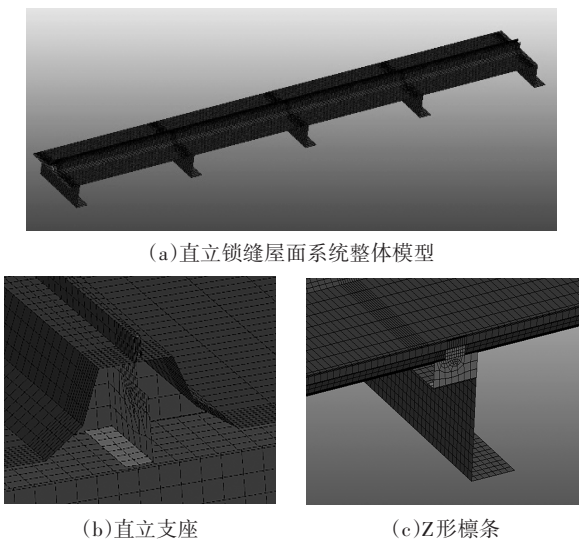


图7 直立锁缝屋面系统局部仿真模型  
Fig.7 Local simulation model of standing seam roof system

型;边界条件方面,如图8所示,支座和檩条通过节点耦合方式连接,锁缝处采用自动通用接触(Automatic general contact)来自动识别部件间的接触效应<sup>[2]</sup>;采用逐级加载的方式,对屋面板施加竖直向上的均布力,直至结构失效.

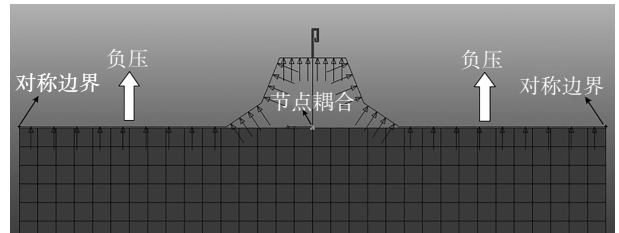


图8 仿真模型荷载及边界条件  
Fig.8 Load and boundary conditions of simulation model

2.2.2 失效模式及功能函数推导

仿真模拟结果表明,在下击暴流风荷载作用下,直立锁缝屋面系统将发生脱扣破坏,并且其承载力及其破坏形式与已有研究以及工程实际相符<sup>[2]</sup>,可用于后续分析.屋面在下击暴流风荷载作用下的变形状态如图9所示,下击暴流作用在结构上,大肋边首先产生横向位移[图9(b)],位移增大到一定值时,大肋边脱离锁缝顶部,由底部咬合承力[图9(c)],随着下击暴流风荷载的继续增大,最终大肋边被吹起并逐渐与支座脱离[图9(d)].当大肋边完全脱开时表示直立锁缝屋面系统发生了风揭破坏,因此可通过大肋边初始和破坏时的相对位移来量化直立锁缝屋面系统的破坏过程.对比大肋边初始和破坏状态,得出大肋边简化模型如图10所示.

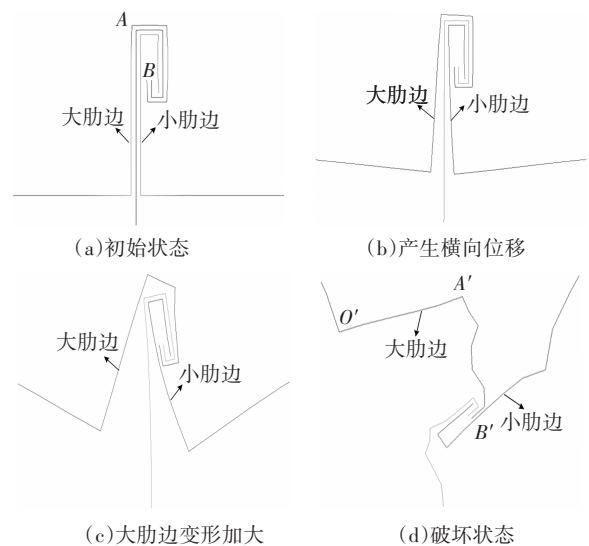


图9 锁缝处变形情况  
Fig.9 Deformation at the seam

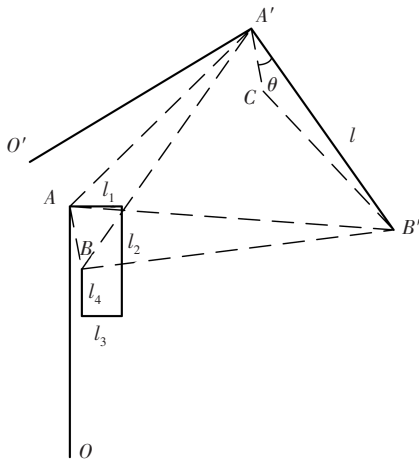


图10 脱扣破坏简化模型

Fig.10 Simplified model of trip failure

如图10所示,  $\overline{OAB}$  和  $\overline{O'A'B'}$  分别为大肋边初始状态和破坏状态, 根据向量运算法则有:

$$\overline{AA'} - \overline{BB'} = \overline{AB} - \overline{A'B'} \quad (2)$$

过  $A'$  做  $C$  点, 使得  $\overline{AB} = \overline{A'C}$ , 可得到:

$$|\overline{AA'} - \overline{BB'}| = |\overline{AB} - \overline{A'B'}| = |\overline{A'C} - \overline{A'B'}| \quad (3)$$

对式(3)展开得到:

$$\begin{aligned} |\overline{A'C} - \overline{A'B'}| &= \sqrt{|\overline{A'C}|^2 + |\overline{A'B'}|^2 - 2|\overline{A'C}||\overline{A'B'}|\cos\theta} \\ &\geq \sqrt{|\overline{A'C}|^2 + |\overline{A'B'}|^2 - 2|\overline{A'C}||\overline{A'B'}|} \\ &= \sqrt{(|\overline{A'C}| - |\overline{A'B'}|)^2} = \sqrt{(|\overline{AB}| - |\overline{A'B'}|)^2} \\ &= |\overline{A'B'}| - |\overline{AB}| = \Delta d \end{aligned} \quad (4)$$

式中: 当  $\overline{A'C}$  和  $\overline{A'B'}$  在同一方向上, 即  $\theta=0^\circ$  时,  $|\overline{A'C} - \overline{A'B'}|$  取得最小值;  $\Delta d$  表示  $|\overline{A'B'}|$  和  $|\overline{AB}|$  两边长之差, 工程中经电动锁缝机锁缝后,  $AB$  边接近于竖直, 则  $|\overline{AB}| \approx l_2 - l_4$ ;  $\overline{A'B'}$  等于外卷边完全舒展开的长度, 即  $|\overline{A'B'}| = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ .

结合式(3)和式(4)得:

$$|\overline{AA'} - \overline{BB'}| \geq \Delta d = l_1 + l_3 + 2l_4 \quad (5)$$

式中:  $\overline{AA'}$  和  $\overline{BB'}$  分别表示  $A$  点和  $B$  点的起始和终点的相对位移向量, 计算如下:

$$\begin{aligned} |\overline{AA'} - \overline{BB'}| &= \\ &\sqrt{\sum_{i=x,y,z} (\overline{\Delta u}_i^A(E, \nu, f_y, \mu, w) - \overline{\Delta u}_i^B(E, \nu, f_y, \mu, w))^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $E, \nu, f_y, \mu, w$  分别对应表1中随机变量;  $\overline{\Delta u}_i^A$

分别表示  $A, B$  两点在  $x, y, z$  方向的位移向量, 可通过仿真模型计算得出.

综合式(5)和式(6), 直立锁缝屋面系统脱扣破坏的极限状态函数为:

$$G(E, \nu, f_y, \mu, w) = l_1 + l_3 + 2l_4 - \sqrt{\sum_{i=x,y,z} (\overline{\Delta u}_i^A(E, \nu, f_y, \mu, w) - \overline{\Delta u}_i^B(E, \nu, f_y, \mu, w))^2} \quad (7)$$

### 2.3 基于LHS-MCS的下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析

拉丁超立方抽样(LHS)相比 Monte Carlo 法所需样本更少且抽样效率更高<sup>[17]</sup>. 将随机变量随机分成  $N$  个互不重叠的等概率区间, 采用随机生成的标准正态的样本矩阵  $Z_{N \times n}$  来表示样本点的排序, 然后用一个整数矩阵  $R_{N \times n}$  来记录所有标准正态样本点的排序信息, 可得到任意区间中 LHS 样本点的累积分布函数值  $F_\xi(\xi_{ij})$  为:

$$F_\xi(\xi_{ij}) \approx \frac{R_{ij} - \text{Rand}(0, 1)}{N} \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, n$

式中:  $\text{Rand}(0, 1)$  表示  $[0, 1]$  区间内任一均匀分布的随机数;  $R_{ij}$  表示第  $j$  变量第  $i$  次抽样取值在该变量所有  $N$  个样本点中的排序.

设  $\Theta = \{E, \nu, f_y, \mu, w\}$ , 根据等概率变换方法可得到独立标准正态空间中的 LHS 样本点  $\Theta_{ij}$ :

$$\Theta_{ij} = \Phi^{-1}(F_\xi(\xi_{ij})) \quad (9)$$

式中:  $\Phi^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布累积分布的逆函数, 至此可获得  $N$  组 LHS 样本点集合  $\Theta_{N \times n}$ .

通过 LHS 技术获取样本点后, 结合 Monte Carlo 法<sup>[30]</sup>可求解结构的失效概率  $P_f$  和可靠指标  $\beta$ , 其表达式如下:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I[G(\Theta_k) \leq 0] \quad (10)$$

式中:  $I[G(\Theta_k)] = \begin{cases} 1, & G(\Theta_k) \leq 0 \\ 0, & G(\Theta_k) > 0 \end{cases}$  为失效域的指示函数;

$\Theta_k$  为第  $k$  次模拟的样本点;  $G(\Theta_k)$  为第  $k$  次样本点对应的下击暴流作用下直立锁缝屋面系统仿真模型计算的随机响应值.

### 3 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估基本步骤

结合 LES 模拟、直立锁缝屋面系统失效准则以及 LHS-MCS 法可实现下击暴流作用下直立锁缝屋



面系统抗风揭可靠度评估,其具体流程如图 11 所示,计算步骤如下:

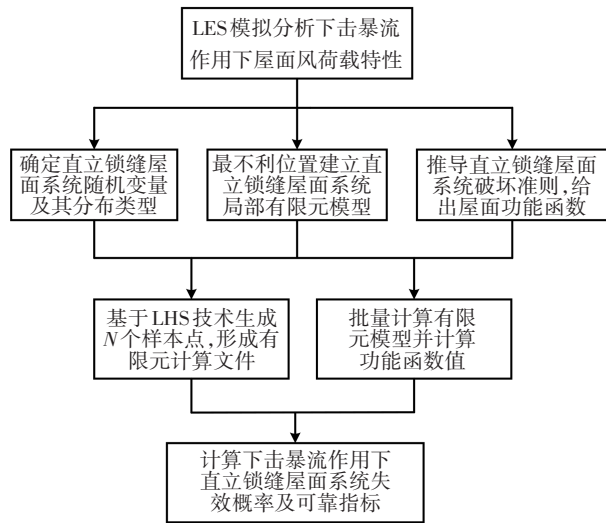


图 11 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统可靠度分析流程  
Fig.11 The reliability analysis process of the standing seam roof system under downburst

步骤 1:采用 LES 模拟,分析下击暴流作用下直立锁缝屋面系统风荷载特性,以不同风向角为工况,确定屋面极值风荷载大小及其分布位置。

步骤 2:确定下击暴流作用下直立锁缝屋面系统随机变量及其分布类型,其中包括结构的随机性和下击暴流风荷载的随机性。

步骤 3:结合工程中屋面常见破坏类型,选取下击暴流作用下直立锁缝屋面系统风荷载最大且最易破坏的位置建立局部有限元模型。

步骤 4:根据局部有限元模型结果,推导下击暴流作用下直立锁缝屋面系统失效准则,并给出下击暴流作用下该屋面系统的极限状态函数  $G(\Theta)$ 。

步骤 5:基于 LHS 技术,结合式(8)和式(9),在下击暴流作用下直立锁缝屋面系统随机变量设计空间中生成  $N$  个初始样本点,形成随机变量集合  $\Theta$ ,编制相应程序实现随机变量的替换,形成  $N$  个仿真计算文件(K 文件)。

步骤 6:调用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 批量计算 K 文件,读取所需随机响应信息;根据随机响应信息,结合式(7)计算下击暴流作用下直立锁缝屋面系统的极限状态函数值  $G(\Theta)$ 。

步骤 7:通过式(10),结合 Monte Carlo 随机模拟法计算下击暴流作用下直立锁缝屋面系统失效概率  $P_f$  及可靠指标  $\beta$ 。

值得指出的是,本文方法主要误差包括 LES 大涡模拟误差、屋面仿真误差以及可靠度方法误差三

个方面,其中 LES 大涡模拟和屋面仿真模型分别根据文献[15]和文献[2]验证了模型的正确性,其误差均在可接受范围内;本文所采用可靠度方法得到了颇为广泛的应用且研究表明其具有颇高的计算精度<sup>[18-20]</sup>,该方法在直立锁缝屋面系统的适用性将在后续算例作进一步验证。

另外,本文提出的可靠度评估方法除了适用于直立锁缝屋面系统以外,亦可拓展到其他类型的屋面体系.对于其他类型的屋面,只需要给出该屋面类型的失效模式和对应的极限状态函数,随后结合本文方法即可进行屋面可靠度评估。

### 4 结果分析

首先对阀厅直立锁缝屋面系统进行下击暴流作用下风荷载大涡模拟,获得该系统下击暴流极值风荷载为 4.582 kPa;随后按表 1 确定结构随机变量以及下击暴流风荷载随机变量,采用式(7)确定直立锁缝屋面系统极限状态函数,其中  $l_1+l_3+2l_4$  按仿真模型实际尺寸选取为 8 mm;进而,结合式(8)~式(9)抽取 1 000 个下击暴流作用下直立锁缝屋面系统样本点,最后通过式(10)计算下击暴流作用下直立锁缝屋面系统的失效概率  $P_f$  和可靠指标  $\beta$ ,计算结果如表 2 所示.同时,采用  $10^5$  个样本点的 Monte Carlo 法结果作为标准解,其抽样次数按  $50/P_f \sim 100/P_f$  确定<sup>[31]</sup>,相关计算结果亦列于表 2 中。

表 2 下击暴流作用下可靠度计算结果

Tab.2 Reliability calculation results under downburst				
计算方法	计算次数	失效概率 $P_f$	可靠指标 $\beta$	相对误差
MCS 法	$10^5$	$8.2 \times 10^{-4}$	3.148 7	—
LHS-MCS 法	$10^3$	$1.0 \times 10^{-3}$	3.090 2	1.86%

由表 2 可知,通过 LHS-MCS 法计算的下击暴流作用下直立锁缝屋面系统可靠指标  $\beta=3.090 2$ ,相比 MCS 计算的可靠指标  $\beta=3.148 7$ ,可靠指标误差仅为 MCS 法的 1.86%,计算次数仅为 MCS 法的 1%,说明本文所采用的可靠度方法,即 LHS-MCS 法能较为准确且高效地进行下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估.此外,我国《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)<sup>[24]</sup>第 3.2.6 条规定:结构构件持久设计状况承载能力极限状态设计的可靠指标  $\beta$  不应小于表 3 规定,本文可参照该规范评估直立锁缝屋面系统的安全水平.其中脱扣破坏属于

延性破坏, 阀厅作为换流站中的重要建筑物, 安全等级属于一级, 按表3要求可靠指标 $\beta$ 不应小于3.7. 而本文计算得出下击暴流作用下直立锁缝屋面系统可靠指标 $\beta=3.0902$ , 仅达到了规范要求的第三级安全水准, 远远小于规范要求的一级水准, 说明直立锁缝屋面系统遭遇下击暴流时有偏于不安全的可能性. 因此, 对于下击暴流多发地区的重要建筑物而言, 本文建议进行直立锁缝屋面系统设计时考虑下击暴流的影响.

表3 结构构件承载能力极限状态的可靠指标<sup>[24]</sup>

Tab.3 Reliability index of the ultimate state of load-bearing capacity of structural members<sup>[24]</sup>

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

为了更直观地说明下击暴流对直立锁缝屋面系统的影响, 亦计算常态风作用下的直立锁缝屋面系统可靠指标作为对比. 其中, 常态风的结构随机参数见表2, 而风荷载随机参数计算如下: 该阀厅所在片区基本风压范围为0.35~0.75 kN/m<sup>2</sup><sup>[32]</sup>, 本文取该片区最大基本风压0.75 kN/m<sup>2</sup>进行对比研究; 进而, 可计算对应的风荷载标准值为<sup>[32]</sup>:  $w_k = \beta_{gz} \mu_{s1} \mu_z w_0 = 1.61 \times 2.0 \times 1.30 \times 0.75 \text{ kN/m}^2 = 3.14 \text{ kPa}$ ; 常态风对应的风荷载随机参数按极值I型分布考虑<sup>[28-29]</sup>, 其中均值 $\mu_w = 0.999 \times w_k = 0.999 \times 3.14 \text{ kPa} = 3.137 \text{ kPa}$ , 变异系数 $\alpha = 0.193$ . 获得常态风的风荷载随机参数后, 分析模型以及评估方法均同下击暴流作用下直立锁缝屋面系统可靠度分析一致, 因此可计算常态风作用下的直立锁缝屋面系统的失效概率 $P_f$ 和可靠指标 $\beta$ 并与下击暴流形成对比, 其计算结果如表4所示.

表4 常态风可靠度计算结果

Tab.4 Reliability calculation results under conventional wind

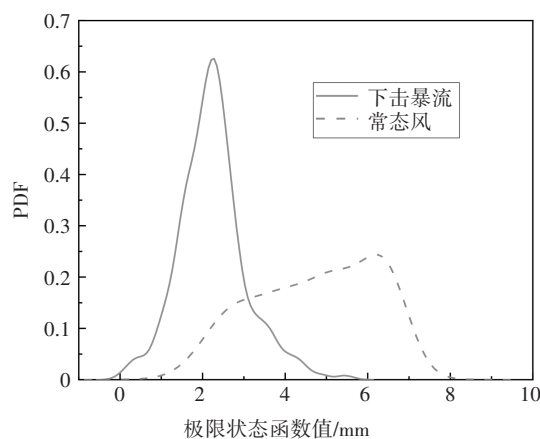
风荷载	计算次数 $N$	失效概率 $P_f$	可靠指标 $\beta$
常态风	1000	0	INF

注: INF表示无穷大.

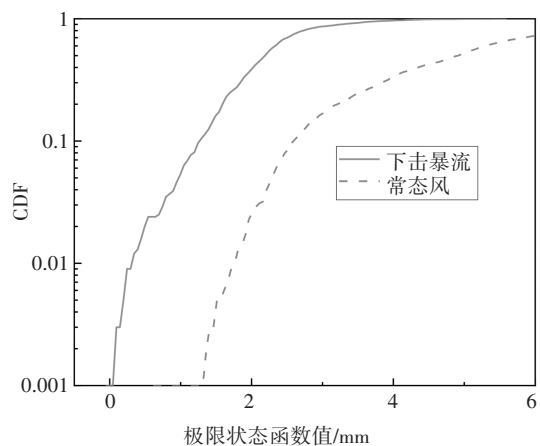
由表4可知, 常态风作用下直立锁缝屋面系统失效概率 $P_f$ 为0, 可靠指标 $\beta$ 为无穷大, 说明直立锁缝屋面系统在常态风作用下具有良好的抗风性能;

对比表3和表4可知, 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统失效概率 $P_f$ 为 $1 \times 10^{-3}$ , 可靠指标 $\beta$ 为3.0902, 低于常态风作用下的可靠指标, 表明下击暴流相比常态风更易造成结构破坏.

常态风和下击暴流作用下的概率密度函数和累积分布函数如图12所示. 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统概率密度函数曲线存在一定的失效域, 而常态风极限状态函数值均大于0, 处于安全范围内. 通过累积分布函数可知, 下击暴流的影响近似可看做常态风累积分布曲线整体沿坐标轴负向偏移, 同时下击暴流作用下极限状态函数小于0的概率为 $1 \times 10^{-3}$ . 图13给出了常态风和下击暴流作用下直立锁缝屋面系统样本点及极限状态函数响应值的对应关系, 常态风极限状态函数值主要分布在2.0~6.5 mm范围内, 而下击暴流主要分布在0~2.5 mm内, 其响应大小相对常态风整体偏低, 说明相对常态风而言, 下击暴流对直立锁缝屋面系统的破坏更大, 应予以重视.



(a) 概率密度函数



(b) 累积分布函数

图12 概率密度函数和累积分布函数

Fig.12 Probability density function and cumulative distribution function



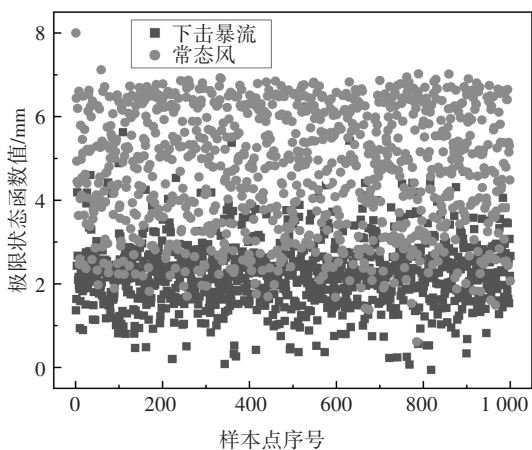


图13 常态风和下击暴流样本点及响应值

Fig.13 Sample points and response values of conventional wind and downburst

## 5 结论

本文提出了下击暴流作用下的直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估方法,并以典型工程为例进行了可靠度评估,得出主要结论如下:

1) 以不同风向角为工况,通过LES模拟得到,当风向角为 $45^\circ$ 时,屋面迎风角部负压最大,并计算了该区域的极值风荷载。

2) 选取屋面最不利位置建立直立锁缝屋面系统局部有限元模型,根据有限元结果给出了脱扣破坏失效准则及对应的极限状态函数。

3) 下击暴流作用下直立锁缝屋面系统可靠指标低于对应的常态风可靠指标,说明下击暴流相比常态风更易造成直立锁缝屋面系统风揭破坏。

4) 按照《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)<sup>[24]</sup>要求,下击暴流作用下直立锁缝屋面系统可靠指标仅达到了规范要求的三级安全水准,建议进行重要建筑物的直立锁缝屋面系统设计时考虑下击暴流的影响。

需要指出的是,虽然本文发展了下击暴流作用下直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度评估方法,但仍有进一步的工作需要开展与完善,如综合考虑直立锁缝屋面系统的多种失效模式、细化随机参数以及增加CFD数值模拟计算工况或通过风洞试验获取更符合真实情况的极值风荷载分布形式,进而结合本文方法对下击暴流作用下直立锁缝屋面系统开展更为精细化的可靠度评估等。

## 参考文献

- [1] KASPERSKI M. Design wind loads for low-rise buildings: a critical review of wind load specifications for industrial buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 61(2/3):169-179.
- [2] 夏俞超,陈水福. 直立锁缝屋面系统风致破坏全过程研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4):136-141.  
XIA Y C, CHEN S F. Wind-induced damage processes of standing seam metal roof systems[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4):136-141. (In Chinese)
- [3] HABTE F, ASGHARI MOONEGHI M, GAN CHOWDHURY A, et al. Full-scale testing to evaluate the performance of standing seam metal roofs under simulated wind loading[J]. Engineering Structures, 2015, 105:231-248.
- [4] EL DAMATY A A, RAHMAN M, RAGHEB O. Component testing and finite element modeling of standing seam roofs[J]. Thin-Walled Structures, 2003, 41(11):1053-1072.
- [5] FARQUHAR S, KOPP G A, SURRY D. Wind tunnel and uniform pressure tests of a standing seam metal roof model[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(4):650-659.
- [6] AZZI Z, HABTE F, VUTUKURU K S, et al. Effects of roof geometric details on aerodynamic performance of standing seam metal roofs[J]. Engineering Structures, 2020, 225:111303.
- [7] 汪之松,陈圆圆,方智远,等. 下击暴流作用下低矮建筑风荷载特性试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(9):120-126.  
WANG Z S, CHEN Y Y, FANG Z Y, et al. Experimental study on wind load characteristics of low-rise buildings under downburst[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 47(9):120-126. (In Chinese)
- [8] LETCHFORD C W, MANS C, CHAY M T. Thunderstorms—their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel)[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12/13/14/15):1415-1433.
- [9] 刘志文,李书琼,刘勇,等. 大跨度斜拉桥下击暴流风致振动响应实测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(11):1-11.  
LIU Z W, LI S Q, LIU Y, et al. Numerical simulation on steady wind field characteristics of downburst based on atmosphere boundary layer wind tunnel[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(11):1-11. (In Chinese)
- [10] 钟永力,晏致涛,游溢,等. 平面壁面射流风场作用下建筑物表面风压数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(1):47-54.  
ZHONG Y L, YAN Z T, YOU Y, et al. Numerical simulation of wind pressure on building surface under plane wall jet wind field[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(1):47-54. (In Chinese)
- [11] ZHANG Y, HU H, SARKAR P P. Comparison of microburst-wind loads on low-rise structures of various geometric shapes[J].

- Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 133:181-190.
- [12] ZHANG Y, SARKAR P, HU H. An experimental study on wind loads acting on a high-rise building model induced by microburst-like winds [J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 50: 547-564.
- [13] JESSON M, STERLING M, LETCHFORD C, *et al.* Aerodynamic forces on generic buildings subject to transient, downburst-type winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 137:58-68.
- [14] SENGUPTA A, SARKAR P P. Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(3):345-365.
- [15] 汪之松, 邓骏, 方智远, 等. 下击暴流作用下低矮建筑风荷载大涡模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(3):512-520.  
WANG Z S, DENG J, FANG Z Y, *et al.* Large eddy simulation of wind load on low-rise buildings subjected to downburst [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(3): 512-520. (In Chinese)
- [16] 周暄毅, 祖公博, 顾明. TTU标准模型表面风压大涡模拟及风洞试验的对比研究[J]. 工程力学, 2016, 33(2):104-110.  
ZHOU X Y, ZU G B, GU M. Large eddy simulation and wind tunnel test on TTU building model [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2):104-110. (In Chinese)
- [17] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 2000, 42(1): 55-61.
- [18] 蒋水华, 李典庆, 周创兵. 基于拉丁超立方抽样的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2):70-76.  
JIANG S H, LI D Q, ZHOU C B. Non-intrusive stochastic finite element method for slope reliability analysis based on Latin hypercube sampling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):70-76. (In Chinese)
- [19] 陈泽帆, 林楷奇, 陆新征, 等. RC框架梁柱子结构抗连续倒塌性能不确定性分析[J]. 工程力学, 2021, 38(6):72-80.  
CHEN Z F, LIN K Q, LU X Z, *et al.* Uncertainty analysis on progressive collapse resistance of RC beam-column substructures [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6):72-80. (In Chinese)
- [20] 陈志强, 郑史雄, 周强, 等. 桥梁结构非线性地震响应极值分布的估算方法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4):772-779.  
CHEN Z Q, ZHENG S X, ZHOU Q, *et al.* Extreme value distribution estimation method for nonlinear seismic response of bridge structures [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4):772-779. (In Chinese)
- [21] CHEN J B, LI J. The extreme value distribution and dynamic reliability analysis of nonlinear structures with uncertain parameters [J]. Structural Safety, 2007, 29(2):77-93.
- [22] LI J, CHEN J B. Stochastic dynamics of structures [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [23] 李正良, 王成, 王涛, 等. 基于主动学习Kriging模型的直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析[J/OL]. 工程力学: 1-9(2022-02-28). <http://www.engineeringmechanics.cn/cn/search>.  
LI Z L, WANG C, WANG T, *et al.* Reliability analysis of wind-resistance of standing seam roof system based on active learning kriging model [J/OL]. Engineering Mechanics: 1-9 (2022-02-28). <http://www.engineeringmechanics.cn/cn/search>. (In Chinese)
- [24] 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
Unifide standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (In Chinese)
- [25] Probabilistic model code—part 3—resistance models: JCSS—2001 [S]. Denmark: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [26] 雷旭, 付兴, 肖凯, 等. 强风作用下输电塔结构不确定性倒塌分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1):266-274.  
LEI X, FU X, XIAO K, *et al.* Failure analysis of a transmission tower subjected to wind load using uncertainty method [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1):266-274. (In Chinese)
- [27] 吕虹波. 直立锁边金属屋面系统风灾易损性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
LÜ H B. Wind disaster vulnerability study of the standing seam metal roof system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (In Chinese)
- [28] 戴国欣, 夏正中. 建筑钢结构适用性分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3):36-40.  
DAI G X, XIA Z Z. Serviceability analysis of steel structural elements of buildings [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(3):36-40. (In Chinese)
- [29] 李继华, 林忠民, 李明顺, 等. 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.  
LI J H, LIN Z M, LI M S, *et al.* Probabilistic limit state design of building structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990. (In Chinese)
- [30] SHINOZUKA M. Monte Carlo solution of structural dynamics [J]. Computers & Structures, 1972, 2(5/6):855-874.
- [31] ANG H S, TANG W H. Probability Concepts in Engineering [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [32] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (In Chinese)