

DOI:10.11918/202112025

带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析

李正良^{1,2,3}, 王成¹, 王涛¹

(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)

摘要: 为评估带抗风夹直立锁缝屋面系统安全水平, 构建了一种高效的带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析方法。首先建立了带抗风夹直立锁缝屋面系统力学模型并获取相应失效准则; 随后基于等价极值事件、扩展型共轭无迹变换法和最大熵原理建立了多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析方法; 最后, 结合工程算例验证了本文方法的可行性。结果表明: 相比于 MCS 法, 本文方法计算的可靠指标最大相对误差为 0.63%, 而计算时间仅为 MCS 的 0.04%, 可准确高效地进行多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统可靠度分析; 带抗风夹直立锁缝屋面系统屋面板撕裂破坏概率最大, 支座破坏次之, 脱扣破坏概率为 0, 添加抗风夹后能有效防止直立锁缝屋面系统发生脱扣破坏; 单一失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统结构失效概率比多失效模式偏小, 为保证结构安全性, 建议考虑多失效模式反映其可靠指标。

关键词: 直立锁缝屋面系统; 抗风夹; 抗风揭可靠度; 扩展型共轭无迹变换法; 多失效模式

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)10-0075-09

Reliability analysis of wind-uplifted resistance of standing seam roof system with anti-wind clips

LI Zhengliang^{1,2,3}, WANG Cheng¹, WANG Tao¹

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

Abstract: For the assessment of the safety level of the standing seam roof system with anti-wind clips (SSRS-AWC), an efficient method was proposed to analyze the reliability of wind-uplifted resistance of SSRS-AWC. Firstly, the mechanical model of SSRS-AWC was established and the corresponding failure criterion was obtained. Then, on the basis of the equivalent extreme-value event, the extended conjugate unscented transformation (ECUT) method, and the principle of maximum entropy, the analysis method for wind-uplifted resistance reliability of SSRS-AWC under multiple failure modes was proposed. Finally, the feasibility of the analysis method was verified by an engineering example. Results show that compared with the Monte Carlo simulation (MCS) method, the maximum relative error of reliability index of proposed method was 0.63%, and the calculation time was only 0.04% of the MCS method, which can accurately and efficiently analyze the reliability of SSRS-AWC under multiple failure modes. The failure probability of SSRS-AWC in descending order was the roof panel tearing damage, the clip rupture, and the clip separation from seam with a probability of 0. It indicates that the addition of anti-wind clips can effectively avoid the clip separation from seam of SSRS-AWC. The failure probability of SSRS-AWC under single failure mode was smaller than that under multiple failure modes. For the sake of structural safety, it is recommended to consider reliability index under multiple failure modes.

Keywords: standing seam roof system; anti-wind clip; wind-uplifted resistance reliability; extended conjugate unscented transformation method; multiple failure modes

直立锁缝屋面系统是将相邻屋面板的卷边通过电动锁边机与支座立板进行咬合, 再将支座通过螺

栓连接到檩条的屋面系统^[1]。该屋面系统被广泛应用于机场航站楼、体育场馆、高铁站房等大跨建筑的屋面围护结构中, 但在强风作用下常发生屋面表层被掀起的事件, 其风揭损毁问题突出。

为此, 国内外学者围绕直立锁缝屋面系统的实验和数值模拟开展了大量研究。Farquhar 等^[2]与 Habte 等^[3]对直立锁缝屋面系统开展风洞试验研

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703901);
国家自然科学基金国际(地区)合作与交流(5161140123)

作者简介: 李正良(1963—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王涛, taowang@cqu.edu.cn

究,分析了该系统在真实风荷载作用下力学性能; Damatty 等^[4]引入等效弹簧系统模拟屋面板和支座立板锁缝处的相互作用,通过试验对比验证了该简化方法准确性;夏俞超等^[1]通过足尺试验和精细化有限元方法,对直立锁缝屋面系统风致破坏全过程进行了研究。为了提高屋面系统的抗风揭性能,近年来,研究者建议使用抗风夹加强锁边处咬合作用^[5]。通过试验和数值研究表明^[6],带抗风夹直立锁边屋面系统的抗风承载力明显提高。然而,现有研究^[6]主要针对带抗风夹直立锁边屋面系统,见图 1(a),而对于带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭性能却鲜有涉及,见图 1(b)。由于不同屋面板连接形式的抗风揭性能差别较大^[7],对带抗风夹直立锁缝屋面系统的抗风揭性能的研究仍需进一步开展。

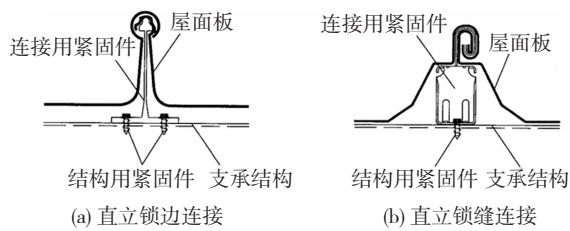


图 1 屋面连接形式

Fig. 1 Connection forms of roof

此外,由于材料、荷载等存在不可避免的随机性^[8-9],对带抗风夹直立锁缝屋面系统进行可靠度分析亦是抗风揭设计的重要环节之一。类似于传统直立锁缝屋面系统^[10],带抗风夹直立锁缝屋面系统亦可能存在多种失效模式,故而带抗风夹直立锁缝屋面可靠度属于多失效模式可靠度问题,也即体系可靠度问题。对于此类可靠度问题,虽然大致存在失效模式识别法^[11]、Monte Carlo 模拟法^[12]和等价描述法^[13-14]3 种思路,但失效模式识别法实现较为繁琐且存在相关信息和组合爆炸等问题^[15],而 Monte Carlo 模拟法需耗费的成本巨大难以应用于屋面系统的可靠度分析。相对而言,等价描述法基于等价极值事件原理,通过一个等价功能函数描述各个失效模式,将结构体系可靠度转化为简单可靠度问题求解,有效解决了组合爆炸和相关失效问题,是一个执行简单且实用的思路^[13-14]。屋面系统对应的失效模式经等价描述后,其功能函数形式变得较为复杂,由于基于验算点的方法处理函数形式复杂的功能函数会存在多验算点问题而使其计算精度不理想^[16],采用验算点无关的可靠度方法不失为一种可行的思路^[17]。特别地,文献^[18-20]基于共轭无迹变换方法,通过引入正态和非正态变换提出了扩展型共轭无迹变换法,该方法不依赖验算点且兼顾计算效率和精度,能够精确地进行随机系统不确

定性传播分析和结构构件及体系可靠度评估。然而,无论是等价极值事件原理还是扩展型共轭无迹变换法,当前主要应用于简单数值算例和框架结构^[13-14,18-21]。由于带抗风夹的直立锁缝屋面系统结构复杂且具有较高的几何非线性,因此,此类方法在多失效模式下屋面系统抗风揭可靠度分析的适用性尚待进一步研究与探讨。

因此,本文以某特高压换流站阀厅带抗风夹直立锁缝屋面系统为研究对象,首先基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立该屋面系统精细化非线性力学模型,分析及推导其可能存在的失效模式和对应的功能函数;进而引入等价极值事件和扩展型共轭无迹变换法建立了多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析框架;最后结合工程算例进行抗风揭可靠度分析,以期多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统可靠度计算提供依据。

1 带抗风夹直立锁缝屋面系统的力学模型及失效准则

1.1 带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭受力机理

带抗风夹直立锁缝屋面系统由屋面板、直立支座、檩条和抗风夹共同组成,见图 2。风荷载在迎风面前缘产生流动分离,将在屋面板表面形成负压;此时,相邻屋面板通过和支座立板咬合以抵抗风荷载,然后支座通过自攻螺钉将反力传给檩条;而抗风夹作用在屋面板卷边和支座立板咬合处,在屋面板大耳边产生变形的过程中,抗风夹通过约束大耳边的径向位移来提高锁缝处的咬合作用,从而保证直立锁缝屋面系统的抗风揭性能。

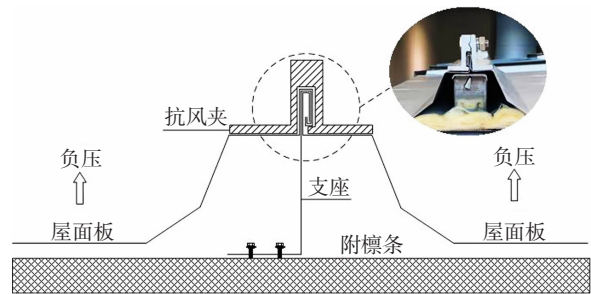


图 2 带抗风夹直立锁缝屋面系统示意

Fig. 2 Schematic of SSRS-AWC

1.2 带抗风夹直立锁缝屋面系统有限元模型建立

本文以某特高压换流站高端阀厅为对象,采用 ANSYS/LS-DYNA 建立带抗风夹直立锁缝屋面系统有限元模型。该阀厅屋面形式为双坡屋面,坡度为 7°,其左半部分尺寸见图 3。为了节约计算时间,利用结构的对称性建立局部模型,纵向选取中间四跨,每跨跨度为 1 200 mm,横向沿屋面板中部断开,分

别沿横向和纵向设置对称边界条件。屋面板采用 YX75-473 外层彩色镀铝锌压型钢板, 支座采用

360°咬口锁边支座, 檩条为 Z180 × 2.5 mm 冷弯镀锌附檩条, 抗风夹选取矮立边双片夹具。

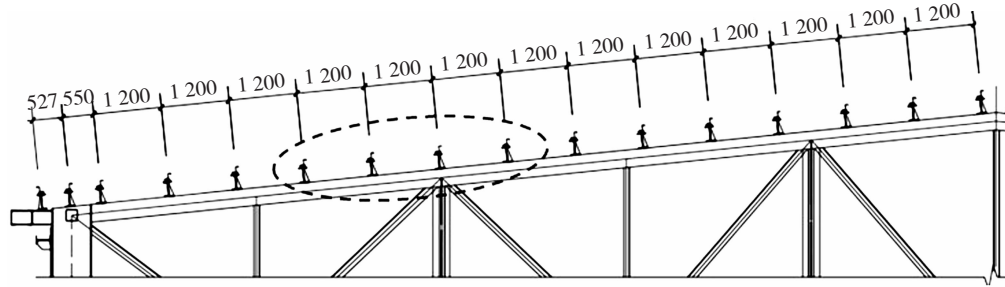


图 3 阀厅檩条布置 (mm)

Fig. 3 Purlin arrangement of valve hall (mm)

采用 SHELL163 单元模拟屋面板、支座和檩条, 以 SOLID164 单元模拟抗风夹, 两类单元均适用于大变形分析。屋面板材料选用 Q355 钢材, 本构关系采用双线性随动强化模型。通过映射方法划分网格, 对屋面板和支座锁缝处进行局部加密, 同时为了兼顾网格质量, 屋面板和支座锁缝处圆弧边采用直角边简化, 最终单元最小尺寸为 2 mm, 最大尺寸为 15 mm, 单元总数为 35 232, 有限元模型见图 4。

载^[6-7], 本文亦沿用该加载方式对屋面板施加竖直向上的均布力。此外, 文中有限元模型尺寸、约束以及边界条件等均按实际结构考虑, 最终破坏模式、抗风承载力等符合工程实际, 可用于后续分析。

1.3 带抗风夹直立锁缝屋面系统失效准则

根据带抗风夹的直立锁缝屋面系统的组成和变形规律, 其可能存在的失效模式为^[22]: 屋面板和支座锁缝分离 (脱扣破坏)、屋面板撕裂破坏、支座破坏和抗风夹破坏。

1.3.1 脱扣破坏

在风荷载作用下, 由于抗风夹约束了大耳边的径向位移, 观察到大耳边径向变形不易开展, 见图 5(a), 但随着变形的加大, 小耳边将逐渐脱离支座的束缚, 沿着约束路径逐渐脱开, 见图 5(b), 此时屋面板和支座发生脱扣破坏。根据小耳边前后变形的状态, 得出变形简图见图 5(c)。

根据图 5(c), 小耳边在抗风夹弯折处初始为 A 点, 破坏后 A 点变形到 A', 位置恰好与抗风夹右边缘点重合, 用 L 表示 A 点到抗风夹右侧边缘点距离, 当 AA' 等于 L 时, 屋面板和支座将发生脱扣破坏。

设 A 和 A' 点坐标分别为 (x_A, y_A, z_A) 和 $(x_{A'}, y_{A'}, z_{A'})$, 则有

$$\overrightarrow{AA'} = (x_{A'} - x_A, y_{A'} - y_A, z_{A'} - z_A) = (\Delta x_A, \Delta y_A, \Delta z_A) \quad (1)$$

式中 $\Delta x_A, \Delta y_A, \Delta z_A$ 分别表示 A 点和 A' 在 x、y、z 方向的位移增量。

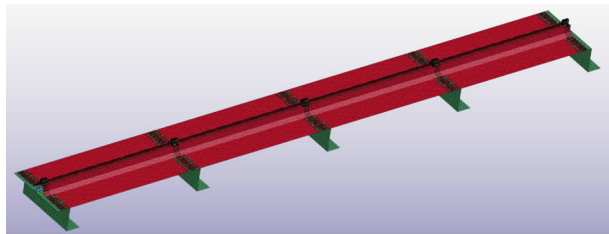
根据式(1)并结合带抗风夹直立锁缝屋面系统脱扣破坏准则有

$$|AA'| = \sqrt{\Delta x_A^2 + \Delta y_A^2 + \Delta z_A^2} \geq L \quad (2)$$

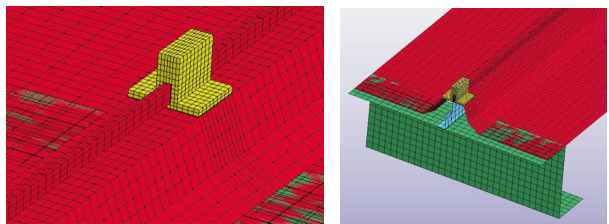
脱扣破坏的功能函数可相应给出

$$G_1(\Theta) = L - \sqrt{\Delta x_A^2 + \Delta y_A^2 + \Delta z_A^2} \quad (3)$$

式中 Θ 为随机向量。



(a) 有限元整体模型



(b) 抗风夹

(c) 屋盖侧视图

图 4 带抗风夹直立锁缝屋面系统有限元模型

Fig. 4 Finite element model of SSRS-AWC

支座和檩条采用螺栓连接, 工程中不易产生破坏, 因此将支座和檩条节点进行耦合; 抗风夹左右夹具顶部通常由螺栓连接, 通过约束抗风夹侧向位移以模拟螺栓对两侧的顶紧作用; 带抗风夹直立锁缝屋面系统在变形过程中, 屋面板和支座立板锁缝处、屋面板和抗风夹以及相邻屋面板的大耳边和小耳边之间均存在复杂的接触关系, 采用自动通用接触 (CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL) 模拟各组件之间的接触效应, 该接触形式可有效考虑各个部件的接触关系以及部件的自接触, 适用于复杂大变形问题^[1]; 由于屋面局部模型尺寸较小, 研究者通常将该范围内的风荷载等效为均匀布置进行加

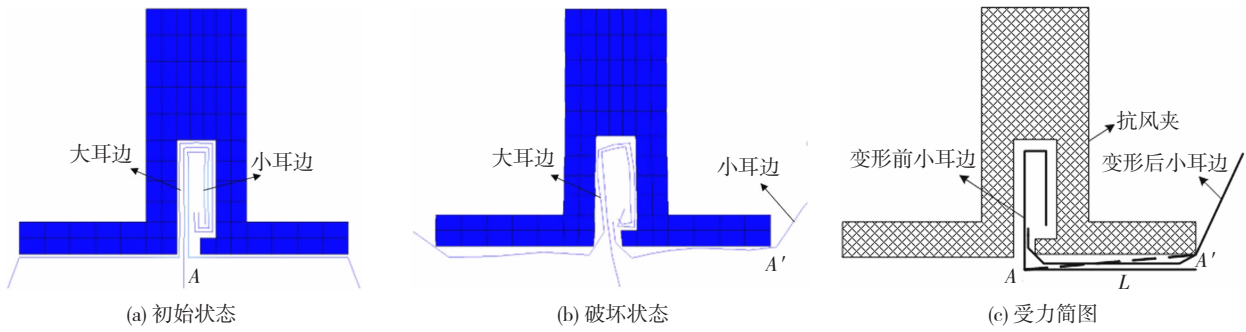


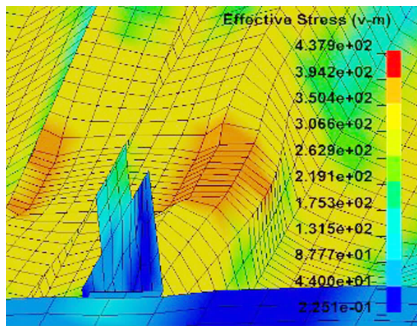
图 5 脱扣破坏示意

Fig. 5 Schematic of clip separation from seam

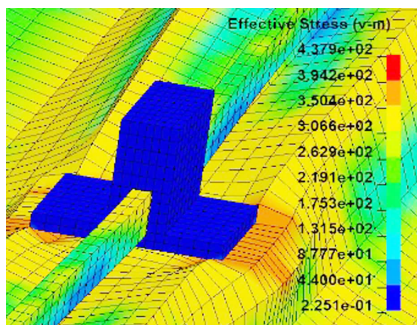
1.3.2 屋面板撕裂破坏

在屋面板锁缝处,屋面板在风荷载作用下产生竖向变形,当变形过大时,抗风夹和屋面板将产生相互挤压,从而造成抗风夹附近的屋面板应力较大,当应力超过其极限强度,屋面板将发生撕裂破坏^[22],应力云图见图 6。设屋面板最大应力为 $\sigma_{\max,板}$,板,极限强度为 $f_{u,板}$,则屋面板撕裂破坏功能函数为

$$G_2(\theta) = f_{u,板} - \sigma_{\max,板} \quad (4)$$



(a) 锁缝底部



(b) 锁缝顶部

图 6 屋面板锁缝处应力云图 (MPa)

Fig. 6 Stress cloud diagram of roof panel at seam (MPa)

1.3.3 支座断裂破坏

在风荷载作用下,支座卷边处应力较大,当应力超过其极限强度时,支座可能发生断裂破坏,其应力云图见图 7(a),对应的功能函数为

$$G_3(\theta) = f_{u,支} - \sigma_{\max,支} \quad (5)$$

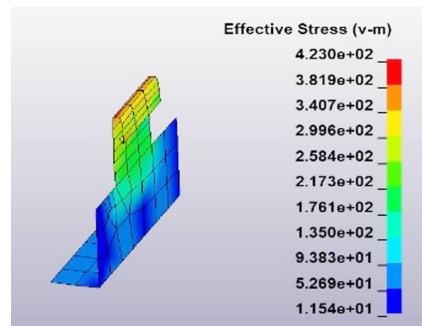
式中 $f_{u,支}$ 为支座极限强度, $\sigma_{\max,支}$ 为支座最大应力。

1.3.4 抗风夹失效破坏

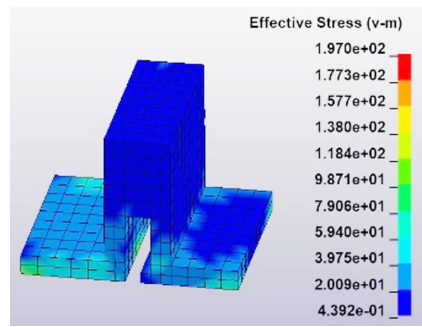
屋面板向上变形的过程中,抗风夹两端和凹槽

处与屋面板由于存在相互挤压,应力较大点主要在抗风夹尾端及其凹槽处,观察到该区域的应力始终保持在材料可承受范围内,因此不考虑抗风夹的失效破坏,抗风夹应力云图见图 7(b)。

综上所述,本文带抗风夹直立锁缝屋面系统可靠度分析主要考虑屋面板和支座锁缝脱扣破坏、屋面板撕裂破坏以及支座破坏 3 种失效模式。



(a) 支座云图



(b) 抗风夹云图

图 7 支座和抗风夹应力云图 (MPa)

Fig. 7 Stress cloud diagram of support and anti-wind clip (MPa)

2 多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统可靠度分析

2.1 等价功能函数的建立

对于带抗风夹直立锁缝屋面系统的 3 种失效模式,只要存在 1 种模式发生失效,则整个结构系统发生破坏。因此,此 3 种失效模式对应的是串联体系可靠度问题。对于此类问题,基于等价极值事件^[13-14],可建立等价功能函数为

$$Z = G_{\min}(\Theta) = \min\{G_1(\Theta), G_2(\Theta), G_3(\Theta)\} \quad (6)$$

获取等价功能函数 Z 后,可结合扩展型共轭无迹变化法和最大熵原理分别进行带抗风夹直立锁缝屋面系统统计矩估计和体系可靠度分析。

2.2 基于扩展型共轭无迹变换法的等价功能函数统计矩估计

由于带抗风夹直立锁缝屋面系统结构复杂且非线性较高,本文采用精度较高的 8 阶扩展型共轭无迹变换法^[18-20]进行等价功能函数统计矩估计。通过变量变换,等效功能函数 $Z = G_{\min}(\Theta)$ 可改写为

$$Z = G_{\min}(\Theta) = G_{\min}(R^{-1}(U)) \triangleq h(U) \quad (7)$$

式中: R^{-1} 为等概率变换(对于独立变量)或 Nataf 变换(对于相关变量)^[23], $U = \{U_1, \dots, U_N\}$ 表示相互独立的标准正态向量, $h(\cdot)$ 为变换后的功能函数。

相应地,等价功能函数 Z 的 k 阶原点矩 $M_{Z,k}$ 可表示为

$$M_{Z,k} = \int_{\Omega_U} h^k(u) \prod_{i=1}^N \phi(u_i) du \approx \sum_{i=0}^{N_p-1} \alpha_i [h(u_{1,i}, u_{2,i}, \dots, u_{N,i})]^k \quad (8)$$

表 1 积分节点 u_i 和权系数 α_i

Tab. 1 Integral nodes u_i and weights α_i

变量 i	积分节点 u_i	权系数 α_i
$i=0$	$u_0=0$	$\alpha_0=w_0$
$1 \leq i \leq 2N$	$u_i=r_1\sigma_i$	$\alpha_i=w_1$
$1 \leq i \leq 2^N$	$u_{i+2N}=r_2c_i^N$	$\alpha_{i+2N}=w_2$
$1 \leq i \leq 2N(N-1)$	$u_{i+2N+2N}=r_3c_i^2$	$\alpha_{i+2N+2N}=w_3$
$1 \leq i \leq 2^N$	$u_{i+2N+2N+2N(N-1)}=r_4c_i^N$	$\alpha_{i+2N+2N+2N(N-1)}=w_4$
$1 \leq i \leq N_1$	$u_{i+2N+2N+2N(N-1)+2N}=r_5c_i^3$	$\alpha_{i+2N+2N+2N(N-1)+2N}=w_5$
$1 \leq i \leq N_2^N$	$u_{i+2N+2N+2N(N-1)+2N+N_1}=r_6s_i^N$	$\alpha_{i+2N+2N+2N(N-1)+2N+N_1}=w_6$

2.3 基于最大熵原理的带抗风夹直立锁缝屋面系统可靠度分析

获取等价功能函数 Z 的统计矩之后,可通过最大熵原理进行结构体系可靠性评估^[24]。以等价功能函数 Z 熵的最大值为目标函数,前 4 阶原点矩 $M_{Z,k}(k=0,1,\dots,4)$ 为约束条件,建立优化模型为

$$\begin{aligned} \max H &= \int_{-\infty}^{\infty} f_Z(z) \ln f_Z(z) dz \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} z^k f_Z(z) dz = M_{Z,k} \\ \int_{-\infty}^{\infty} f_Z(z) dz = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

通过 Lagrange 乘子法可将上式的约束优化问题转换为无约束优化问题,进而可通过牛顿法求解。最终,等价功能函数 Z 的概率密度函数可表示为

式中: $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布的概率密度函数, N 为随机变量数目, N_p 表示样本点数量, u_i 和 α_i 是共轭无迹变换法求积节点向量和权系数,取值见表 1,表中 $N_1 = 4N(N-1)(N-2)/3$, σ_i , c_i^N 和 s_i^N 分别表示主轴、共轭轴和缩放共轭轴,具体解释参考文献^[18]。

表 1 中 r_i 和 w_i 分别表示尺度变量和权系数,目前常用的计算方法是通过 Isserlis 定理^[21]建立矩约束方程并求解得到,该方程可表示为

$$\begin{cases} E[\prod_{j=1}^N U_j^{\kappa_j}] = \sum_{i=1}^N w_i \prod_{j=1}^N u_{j,i}^{\kappa_j} \\ \sum_{i=0}^n w_i = 1, r_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N u_{j,i}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: n 为除零点外求积节点的数量, $u_{j,i}^{\kappa_j}$ 为求积节点的坐标, κ_j 为非负的整数且 $1 \leq \kappa_1 + \kappa_2 + \dots + \kappa_n \leq 9$,通过求解式(9),可获得尺度变量 r_i 和权系数 w_i 。

需要说明的是,由于本文重点关注直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析的应用研究,限于文章篇幅,对于扩展型共轭无迹变换法的详细推导及介绍可参考文献^[20]。

$$f_z(z) = \exp(\lambda_0 - \sum_{k=1}^4 \lambda_k z^k) \quad (11)$$

式中 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_4$ 为 Lagrange 系数。

对此,带抗风夹直立锁缝屋面系统的失效概率 P_f 与可靠指标 β 为

$$\begin{cases} P_f = P(Z \leq 0) = \int_{-\infty}^0 \exp(\lambda_0 - \sum_{k=1}^4 \lambda_k z^k) dz \\ \beta = -\Phi^{-1}(P_f) \end{cases} \quad (12)$$

2.4 实现步骤

结合带抗风夹直立锁缝屋面系统非线性力学模型、等价极值事件原理、扩展型共轭无迹变换法以及最大熵原理,可计算带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭失效概率 p_f 和可靠指标 β ,具体流程见图 8,计算步骤如下:

步骤 1:建立带抗风夹的直立锁缝屋面系统非线性力学模型,结合有限元计算结果、已有屋面研究以及灾害调查总结带抗风夹的直立锁缝屋面系统常见失效模式并给出对应的功能函数 $G_i(\Theta)$ 。

步骤 2:根据等价极值事件原理和各失效模式功能函数 $G_i(\Theta)$,即式(3)~(6)建立带抗风夹直立锁缝屋面系统等价功能函数 Z 。

步骤 3:确定带抗风夹直立锁缝屋面系统随机变量参数及其分布类型,基于共轭无迹变换法,即式(9)和表 1 获取样本点,形成样本点集合 X 。

步骤 4:调用有限元模型,计算各个样本点对应的带抗风夹直立锁缝屋面系统等价功能函数值,得到响应集合 Y 。

步骤 5:根据扩展型共轭无迹变换法和响应集合 Y ,即式(8)计算等价功能函数 Z 前 4 阶原点矩 $M_{Z,k}$ 。

步骤 6:基于最大熵原理和前 4 阶原点矩 $M_{Z,k}$,即式(10)~(12)计算带抗风夹直立锁缝屋面系统的失效概率 P_f 和可靠指标 β 。

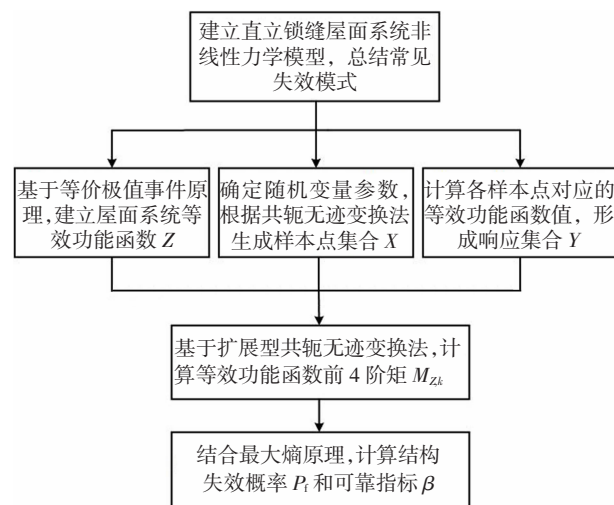


图 8 带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析流程
Fig. 8 Process of anti-wind reliability analysis of SSRS-AWC

3 算例分析

为验证本文方法可行性,以某特高压换流站阀厅带抗风夹直立锁缝屋面系统为例进行可靠度分析。该阀厅建筑高度为 32.6 m,地貌类型为 A 类,基本风压为 0.9 kN/m^2 (100 a 一遇),示意见图 9。

3.1 随机变量选取

结构自身参数的随机性以及荷载作用的随机性是影响工程结构的抗风性能的主要因素^[25]。对于本文带抗风夹直立锁缝屋面系统而言,结构的随机性主要体现在弹性模量、屈服强度、极限强度和摩擦系数,其均值和变异系数按文献[26-28]选取;荷

载随机性方面,根据文献[29-30],风荷载服从极值 I 型分布,变量参数包括均值 μ_w 和变异系数 α_w ,其中均值 $\mu_w = 0.999 \times w_k$,变异系数 α_w 取 0.193。式中 w_k 表示风荷载标准值,可通过 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》围护结构的风荷载计算得到。



图 9 阀厅示意

Fig. 9 Schematic of valve hall

$$w_k = \beta_{gz} \mu_{s1} \mu_z \omega_0 \quad (13)$$

式中: β_{gz} 为 z 高度处的阵风系数, μ_{s1} 为局部体型系数, μ_z 为风压高度变化系数, ω_0 为基本风压,所有系数均按该规范相应取值。

根据式(13)以及文献[27-30],得到带抗风夹直立锁缝屋面系统随机变量参数及分布类型见表 2。

表 2 随机变量参数及其分布类型

Tab. 2 Random variable parameters and their distribution types

统计参数	弹性模量 E/MPa	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	摩擦 系数 μ	风荷载 W/kPa
均值	2.0×10^5	355	450	0.30	4.67
变异系数	0.050	0.050	0.050	0.050	0.193
分布类型	Normal	Normal	Normal	Normal	Gumbel

3.2 带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度计算

根据工程实际参数,结合式(3)~(6),得到带抗风夹直立锁缝屋面系统等价功能函数为

$$Z = G_{\min}(\Theta) = \min \begin{cases} 20 - \sqrt{\Delta x_A^2 + \Delta y_A^2 + \Delta z_A^2} \\ f_{u,板} - \sigma_{\max,板} \\ f_{u,支} - \sigma_{\max,支} \end{cases} \quad (14)$$

式中位移和应力参数可通过调用 ANSYS/LS-DYNA 进行有限元计算得出。

通过矩约束方程(式(9)),结合本文五维系统求解方程,得到尺度变量 r_i 和权系数 w_i 见表 3。

根据表 1、3,生成 355 个样本点,结合式(8),计算出多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统等价功能函数 Z 统计矩和可靠指标分别见表 4、5。

表 3 五维系统下 r_i 和 w_i 参数值

Tab.3 Parameter values of r_i and w_i in five dimensional system

尺度变量 r_i	取值	权系数 w_i	取值
r_1	2.314 370 817	w_1	0.010 529 034
r_2	0.839 094 277	w_2	0.015 144 019
r_3	1.830 752 125	w_3	0.005 282 899
r_4	1.397 039 743	w_4	0.001 067 129
r_5	2.000 000 000	w_5	0.000 651 042
r_6	1.113 478 633	w_6	0.000 137 760

此外,为验证本文方法的精度和效率,采用 Monte Carlo 法^[12]结果作为标准解进行校核。该方法主要通过若干次随机模拟获得随机事件的统计特征,其抽样次数按 $50/p_i \sim 100/p_i$ 确定^[31]。由于带抗风夹的直立锁缝屋面系统风揭破坏为小概率事件,

表 4 等价功能函数前四阶统计矩结果

Tab.4 Results of first four-order moments of equivalent limit state function

计算方法	均值		标准差		偏度		峰度	
	取值	相对误差/%	取值	相对误差/%	取值	相对误差/%	取值	相对误差/%
MCS 法	89.14		32.41		0.011 87		3.006	
本文方法	89.14	0	32.41	0	0.011 66	1.76	2.993	0.44

表 5 多失效可靠度计算结果

Tab.5 Calculation results of multiple failure reliability

计算方法	失效概率		可靠指标		分析次数
	取值	相对误差/%	取值	相对误差/%	
MCS 法	1.81×10^{-3}		2.895		10^6
本文方法	1.90×10^{-3}	4.97	2.910	0.54	355

结合各失效模式的功能函数 $G_i(\Theta)$ ($i = 1, 2, 3$) 得到单失效模式下的可靠度计算结果见表 6(表中 INF 表示无穷大)。由表 6 可知,本文方法计算的单一失效模式下的可靠指标相比 MCS 法的最大相对误差仅为 0.63%,进一步验证了本文方法的准确性。此外,对比表 6 中各失效模式的可靠指标,其

失效概率 p_f 预估为 10^{-4} 量级^[26],因此本文选取 10^6 个样本点保证计算精度,相关计算结果亦列于表 4、5。

3.3 结果分析

由表 4 可知,本文方法对多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统估计的前 4 阶矩具有较高的精度,与 MCS 法相比,本文方法能精确的估计其均值和标准差,而偏度和峰度相对误差也仅为 1.76% 和 0.44%。就可靠指标的精度与效率而言,由表 5 可知,本文方法计算得出的可靠指标为 2.901,相比 MCS 法计算的 2.895,相对误差为 0.54%;计算效率方面,MCS 法需要 10^6 次计算,而本文方法有限元计算次数为 355 次,仅为 MCS 的 0.04%,计算效率得到了极大的提高。因此,本文方法极大地兼顾了精度和计算效率,能准确且高效地应用于多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析。

表 6 单失效可靠度计算结果

Tab.6 Calculation results of single failure reliability

计算方法	脱扣破坏				撕裂破坏				支座破坏			
	失效概率	相对误差/%	可靠指标	相对误差/%	失效概率	相对误差/%	可靠指标	相对误差/%	失效概率	相对误差/%	可靠指标	相对误差/%
MCS 法	0		INF		7.06×10^{-4}		3.192		7.53×10^{-5}		3.790	
本文方法	0	0	INF	0	6.58×10^{-4}	6.80	3.213	0.63	7.11×10^{-5}	5.58	3.804	0.38

对比表 5、6,3 种单失效模式中带抗风夹直立锁缝屋面系统的失效概率分别为 0、 6.58×10^{-4} 和 7.11×10^{-5} ,相比考虑多失效模式计算的失效概率 1.90×10^{-3} 偏低,即单失效模式低估了结构的失效概率。为了保证结构的安全性,建议考虑多重失效模

中屋面板撕裂破坏的可靠指标最小,即相比其他失效模式,屋面板发生撕裂破坏的概率最大。这主要是由于屋面板在风荷载作用下将和抗风夹产生相互挤压,导致抗风夹附近的屋面板处更易破坏;而脱扣破坏的可靠指标为无穷大,说明添加抗风夹后能有效防止直立锁缝屋面系统发生脱扣破坏。

式评估带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭安全水平。

需要说明的是,虽然本节算例得出带抗风夹的直立锁缝屋面系统脱扣破坏的失效概率为 0,但该结果仅适用于本节工程实例。对于不同工程的带抗风夹的直立锁缝屋面体系,仍有发生脱扣破坏的可

性能,需根据其工程实际参数,进而结合本文方法进行具体分析。

4 结 论

本文发展了多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析方法,并结合工程算例进行了可靠度分析,得出主要结论:

1) 通过带抗风夹直立锁缝屋面系统非线性全过程研究,得出该系统主要存在屋面板撕裂破坏、支座断裂破坏和脱扣破坏 3 种失效模式并推导了对应的功能函数。

2) 对比 3 种单失效模式下的可靠度计算结果,按失效概率从大到小依次为:屋面板撕裂破坏、支座破坏和脱扣破坏。屋面板由于变形过程中和抗风夹存在相互挤压,发生撕裂破坏的概率最大,而脱扣破坏失效概率为 0,说明添加抗风夹后能有效防止直立锁缝屋面系统发生脱扣破坏。

3) 对比单失效和多失效的可靠度计算结果,单失效模式计算得出的失效概率相比多失效模式结果偏小,即单失效模式低估了结构的失效概率。出于结构的安全性考虑,建议采用多失效模式来反映带抗风夹直立锁缝屋面系统的可靠指标。

4) 本文所引入的扩展型共轭无迹变换法,不依赖验算点且兼顾计算效率和精度,可准确且高效地进行多失效模式下带抗风夹直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析。

参 考 文 献

- [1] 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
XIA Yuchao, CHEN Shuifu. Wind-induced damage processes of standing seam metal roof systems[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4):136. DOI: 10.11918/202008089
- [2] 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. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:4(650)
- [3] HABTE F, MOONEGHI M A, CHOWDHURY A G, et al. Full-scale testing to evaluate the performance of standing seam metal roofs under simulated wind loading[J]. Engineering Structures, 2015,105(15):231. DOI:10.1016/j.engstruct.2015.10.006
- [4] DAMATY A A E, RAHMAN M, RAGHEB O. Component testing and finite element modeling of standing seam roofs [J]. Thin-Walled Structures,2003,41(11):1053. DOI: 10.1016/S0263-8231(03)00048-X
- [5] 许秋华,万恬,刘凯. 直立锁缝金属屋面加强抗风揭能力的优化设计[J]. 工程力学,2020,37(7):25
XU Qiuhua, WAN Tian, LIU Kai. Optimal design of strengthening wind exposure resistance of vertical whipstitch metal roofing board[J]. Mechanics Engineering, 2020,37(7):25. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.02.ST13
- [6] 孙琰,武涛,武岳. 带抗风夹的直立锁边屋面系统抗风性能的参数研究[J]. 工程力学,2020,37(2):185
SUN Ying, WU Tao, WU Yue. Parameter study on wind resistant performance of standing seam roof system with anti-wind clip[J]. Engineering Mechanics,2020,37(2):185. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2019.05.0136
- [7] 宣颖,谢壮宁. 大跨度金属屋面风荷载特性和抗风承载力研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):42
XUAN Ying, XIE Zhuangning. Research progress on wind loads and wind resistance bearing capacity of large span metal roof structures[J]. Journal of Building Structures, 2019,40(3):42. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.03.004
- [8] 吕大刚,宋鹏彦,王光远. 考虑模型不确定性的结构可靠度分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(10):1
LÜ Dagang, SONG Pengyan, WANG Guangyuan. Reliability analysis methods of structures considering modeling uncertainty[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(10):1. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2011.10.001
- [9] 吕大刚,宋鹏彦,王光远. 考虑统计不确定性的结构可靠度分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(8):11
LÜ Dagang, SONG Pengyan, WANG Guangyuan. Reliability analysis methods of structures considering statistical uncertainty[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(8):11. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2011.08.003
- [10] 孙成疆. 直立锁缝金属屋面系统在模拟极端暴风工况下抗风揭能力测试和分析[J]. 建筑结构, 2011,41(增刊1):1438
SUN Chengjiang. Simulated wind uplift pressure analysis and tests of the standing seam metal roof system [J]. Building Structure, 2011, 41(S1):1438. DOI:10.19701/j.jzjg.2011.s1.342
- [11] THOFT-CHRISTENSEN P, MUROTSU Y. Application of structural systems reliability theory [M]. Berlin: Springer, 1986
- [12] SHINOZUKA M. Monte Carlo solution of structural dynamics [J]. Computers & Structures, 1972,2(5):855. DOI:10.1016/0045-7949(72)90043-0
- [13] LI J, CHEN J, FAN W. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability [J]. Structural Safety, 2007, 29(2):112. DOI:10.1016/j.strusafe.2006.03.002
- [14] 范文亮,李杰. 考虑多重失效机制的结构体系可靠度分析[J]. 土木工程学报,2011,44(11):9
FAN Wenliang, LI Jie. Structural system reliability under multiple failure mechanisms[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11):9. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2011.11.015
- [15] 李杰. 工程结构整体可靠性分析研究进展[J]. 土木工程学报, 2018, 51(8):1
LI Jie. Advances in global reliability analysis of engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(8):1. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2018.08.001.
- [16] KIUREGHIAN A D, DAKESSIAN T. Multiple design points in first and second-order reliability [J]. Structural Safety, 1998, 20(1):37. DOI:10.1016/S0167-4730(97)00026-X
- [17] 吕大刚,宋鹏彦,于晓辉,等. 基于矩法的结构非线性整体抗震可靠性分析[J]. 建筑结构学报,2010,31(增刊2):119
LÜ Dagang, SONG Pengyan, YU Xiaohui, et al. Nonlinear global

- seismic reliability analysis of structures based on moment methods [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(S2):119. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2010. s2. 002
- [18] 王涛,李正良,范文亮. 基于扩展型共轭无迹变换的随机不确定性传播分析方法[J]. *工程力学*, 2021, 38(8):16
WANG Tao, LI Zhengliang, FAN Wenliang. An uncertainty propagation analysis method for stochastic system based on extended conjugate unscented transform [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(8):16. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000 - 4750. 2020. 08. 0569
- [19] 王涛,李正良,范文亮. 基于改进统计矩点估计法和最大熵原理的结构整体可靠度分析[J]. *工程力学*, 2022, 39(3):193
WANG Tao, LI Zhengliang, FAN Wenliang. Global reliability analysis of structures based on improved statistical moments point estimation method and maximum entropy principle[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3):193. DOI:10. 6052/j. issn. 1000 - 4750. 2021. 01. 0092
- [20] WANG T, LI Z L, FAN W L, et al. Structural reliability assessment based on enhanced conjugate unscented transformation and improved maximum entropy method [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(12):04021213. DOI:10. 1061/(ASCE)ST. 1943 - 541X. 0003194.
- [21] MICHALOWICZ J V, NICHOLS J M, BUCHOLTZ F, et al. A general Isserlis theorem for mixed-Gaussian random variables [J]. *Statistics & Probability Letters*, 2011, 81(8):1233. DOI:10. 1016/j. spl. 2011. 03. 022
- [22] 刘威. 带抗风夹的直立锁边金属屋面系统抗风性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018
LIU Wei. Wind resistant performance of standing seam metal roof system with anti-wind clip [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018
- [23] DER KIUREGHIAN A, LIU P L. Structural reliability under incomplete probability information [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1986, 112(1):85. DOI:10. 1061/(ASCE)0733 - 9399(1986)112:1(85)
- [24] LI G, ZHANG K. A combined reliability analysis approach with dimension reduction method and maximum entropy method [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 43(1):121. DOI:10. 1007/s00158 - 010 - 0546 - 2
- [25] 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(增刊1):268
LEI Xu, FU Xing, XIAO Kai, et al. Failure analysis of a transmission tower subjected to wind load using uncertainty method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(S1):268. DOI:10. 13334/j. 0258 - 8013. pcsee. 180665
- [26] 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*. [2022-02-28]. <http://dx. doi. org/10. 6052/j. issn. 1000 - 4750. 2021. 06. 0430>
LI Zhengliang, WANG Cheng, WANG Tao, et al. Reliability analysis of wind-resistance of standing seam roof system based on active learning kriging model [J/OL]. *Engineering Mechanics*. [2022-02-28]. <http://dx. doi. org/10. 6052/j. issn. 1000 - 4750. 2021. 06. 0430>
- [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 Hongbo. Wind disaster vulnerability study of the standing seam metal roof system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019
- [28] SUN Y, WU T, CAO Z G. Wind vulnerability analysis of standing seam roof system with consideration of multistage performance levels [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 165:107942. DOI:10. 1016/j. tws. 2021. 107942
- [29] 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):39
DAI Guoxin, XIA Zhengzhong. Applicability analysis of building steel structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(3):39. DOI:10. 3321/j. issn:1000 - 6869. 2000. 03. 006
- [30] 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 Jihua, LIN Zhongmin, LI Mingshun, et al. Probabilistic limit state design of building structures [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1990
- [31] ANG H S, TANG W H. Probability concepts in engineering[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007

(编辑 赵丽莹)