

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0031-07

# 工程结构体系可靠度分析的最新研究进展

刘 娇<sup>1</sup>, 刘敬敏<sup>1</sup>, 余 波<sup>1</sup>, 杨绿峰<sup>1,2</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西, 南宁 530004;

2. 广西壮族自治区住房和城乡建设厅, 广西, 南宁 530028)

**摘 要:** 主要失效模式的识别是结构体系可靠度分析的难点和关键。该文首先综述了主要失效模式识别的国内外研究现状及存在的缺陷; 然后针对传统失效模式识别方法主要依靠工程经验确定约界阈值、难以兼顾计算效率和计算精度的问题, 介绍了一种结构体系可靠度分析的自适应动态约界法; 同时, 针对传统失效模式识别方法的路径依赖性所带来的计算量大、识别效率不高等缺陷, 介绍了一种结构体系可靠度分析的无路径依赖性方法; 最后通过算例分析, 验证了这两种方法的有效性和适用性。

**关键词:** 结构工程; 体系可靠度; 综述; 主要失效模式; 动态约界阈值; 无路径依赖性

中国分类号: TU311.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.S056

## RECENT RESEARCH PROGRESS ON STRUCTURAL SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS

LIU Jiao<sup>1</sup>, LIU Jing-min<sup>1</sup>, YU Bo<sup>1</sup>, YANG Lu-feng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education,

School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Department of Housing and Urban-Rural Development, Guangxi Autonomous Zhuang Region, Nanning, Guangxi 530028, China)

**Abstract:** Identification of dominant failure modes is one of the most critical problems for structural system reliability analysis. In this paper, the recent research progress and existing disadvantages for traditional methods for identification of dominant failure modes is reviewed first. To overcome the disadvantages of traditional approaches for identification of dominant failure modes in which the computational efficiency and accuracy cannot always be guaranteed due to the fact that the bounding thresholds are determined by engineering experience, an adaptive dynamic bounding method for structural system analysis is proposed. Meanwhile, to overcome the disadvantages of the traditional methods of high computational cost and low efficiency due to the behavior of failure path dependency, a failure path-independent method is presented for structural system reliability analysis. The efficiency and applicability of the proposed methods are verified through two numerical examples.

**Key words:** engineering structure; system reliability; review; dominant failure mode; dynamic bounding threshold; failure-path independent

对于大型复杂的工程结构体系, 由于传力路径 失效树分析方法往往会出现“组合爆炸”问题, 从  
比较复杂, 导致潜在的失效模式众多, 利用传统的 而难以高效、准确地分析结构的体系可靠度。因此,

收稿日期: 2016-04-09; 修改日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478125); 广西自然科学基金重大项目(2012GXNSFEA053002); 广西高校科学技术研究项目(2013YB009); 广西优秀博士学位论文培育项目(YCBZ2012009)

通讯作者: 杨绿峰(1966—), 男, 河南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构可靠度和混凝土结构耐久性方面的研究(E-mail: lfyang@gxu.edu.cn).

作者简介: 刘 娇(1985—), 女, 河北人, 博士生, 主要从事失效模式识别与体系可靠度分析研究(E-mail: gxuliujiao@mail.gxu.cn);

刘敬敏(1986—), 女, 陕西人, 博士生, 主要从事结构体系可靠度的高效方法研究(E-mail: liujingminmony@163.com);

余 波(1982—), 男, 四川人, 副教授, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性、结构随机分析等方面研究(E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn).

如何从众多的潜在失效模式中识别出主要失效模式，成为结构体系可靠度分析的关键和难点。

根据判别依据和搜寻方式的不同，主要失效模式的识别方法大体可以分为确定性方法和随机性方法两大类。其中，确定性方法不考虑各种随机因素的影响，利用随机变量的均值开展结构分析，根据元件的受力严重程度来搜寻候选失效元件。文献[1]提出采用承力比来衡量元件的受力程度，并认为元件的承力比变化比越大，则该元件就越有可能失效，但忽略了加载过程中元件有效承载力的变化，所以识别精度有限。针对该问题，文献[2]通过考虑荷载效应累积来修正元件的有效强度和有效承力比，进而根据有效承力比来确定候选失效元件，识别精度有所提高。需要说明的是，上述两种方法选用承力比或有效承力比作为候选失效元件的判别指标，无法通过试验测量和验证。鉴于此，文献[3]提出根据载荷增量最小原则来选取候选失效元件，从而能够通过试验测量，但是没有考虑系统临界强度的累积，随着结构的失效演化，识别效率将大幅降低。文献[4]对此进行了改进，但是仍然只能考虑同一阶段具有相同前序失效元件的相关元件之间的相互关系，计算精度难以保证。需要说明的是，确定性方法虽然具有相对明确的物理意义，但是在失效演化分析过程中忽略了各种随机因素的影响，与体系可靠度分析的本质不符。针对该问题，文献[5]和文献[6]首先利用随机变量的均值计算出元件的承力比，并根据确定性方法找到承载最严重的失效模式，然后对候选范围内的最严重失效元件的强度增加若干倍标准差(如  $3\sigma$  或者  $\sigma$ )，其余失效元件的强度减小若干倍标准差(如  $3\sigma$  或者  $\sigma$ )，进而通过重新选取候选失效元件来寻找其余的主要失效模式。该方法能够在一定程度上考虑元件强度的随机性，但是属于经验方法，计算精度难以保证。

主要失效模式的第二类识别方法为随机性方法。根据判别依据的不同，可以分为分枝-限界法和  $\beta$  约界法。其中，分枝-限界法<sup>[7]</sup>利用元件的失效概率作为判别依据，以考虑随机变量的随机性。该方法根据元件失效概率的最大值，找到结构的最易失效模式，并认为其失效概率近似等于结构体系的失效概率，进而将其作为约界参数来寻找其他失效模式。分析结果表明，由于该方法的约界参数取值偏大，容易遗漏部分主要失效模式，并且其元件失效

概率的计算过程中需要利用界限法，计算精度有限；为此，文献[8]对约界参数进行了改进，并且在元件失效概率的计算过程中采用了微分等价递归算法，计算效率和精度均有所提高，但是其约界参数的取值仍然主要依靠工程经验，适用性有限。文献[9]认为每次只选取一个失效元件进行内力重分布分析比较费时，所以假定失效概率较大的一组失效元同时失效来寻找主要失效模式，但是其分组参数每次都要对比不同取值才能确定，对于大型复杂结构分析的工作量较大。文献[10]针对桁架结构的主要失效模式识别，认为分枝-限界法会识别出一些失效概率较小的失效模式，而这些失效模式包含的失效元并不是必备的候选失效元，所以首先在结构中划分失效模式必备候选失效元的范围，然后再根据筛选准则确定候选失效元，但是对于大型复杂结构而言，难以确定必备候选失效元的范围。文献[11]提出利用每一级候选失效元与前序失效元组成的串联体系的失效概率作为基准，并结合控制参数  $\delta$  选取下一级候选失效元，但是第一级的候选失效元不易选取，且控制参数  $\delta$  需要根据工程经验确定。

主要失效模式识别的  $\beta$  约界法<sup>[12-13]</sup>利用元件的可靠指标作为判别依据，以考虑随机变量的随机性。该方法的识别过程与分枝-限界法类似，但是不需要先找到结构的最易失效模式，只需通过逐级定义约界阈值来剔除可靠指标较大的元件。然而， $\beta$  约界法的计算精度和效率很大程度上取决于所选定的约界阈值的合理性。目前， $\beta$  约界法主要通过主观经验选取约界阈值，由于忽略了结构失效演化对每一级约界阈值的影响，往往会遗漏部分主要失效模式。鉴于此，文献[14]基于每一级元件的最小可靠指标来计算约界阈值，在一定程度上减少了约界阈值选取的主观性，但是仍然无法全面考虑结构失效演化过程中元件失效概率的分布情况，导致计算精度有限。文献[15]利用临界失效概率来定义约界阈值，但是临界失效概率的求解需要在每一分枝点计算最易失效路径及对应失效元的失效概率，计算比较繁琐。因此，如何考虑结构失效演化过程中元件失效概率分布情况的影响，选取合理的约界阈值，成为提高  $\beta$  约界法的计算精度和效率的关键。鉴于此，杨绿峰等<sup>[16]</sup>在失效演化历程的每一级，通过引入失效概率均匀度和基准可靠指标来确定动态约界阈值，实现了自适应的动态分枝和约界，有效兼顾了  $\beta$  约界法的精度和效率。

需要说明的是,上述主要失效模式的识别方法本质上是类似的,首先在失效历程的每一阶段,采用不同的判别准则来识别候选失效元件,为避免“组合爆炸”,采用不同的策略来进行逐级分枝和限界,进而通过失效路径分析来确定结构体系的主要失效模式,所以本质上均属于路径依赖性方法。由于大型复杂结构在失效演化过程中的候选失效元件众多,路径依赖性会导致失效模式分析的计算量大、识别效率不高。因此,如何避免路径依赖性成为提高失效模式识别效率的突破点之一。鉴于此,杨绿峰等<sup>[17-18]</sup>将塑性极限分析的弹性模量缩减法(EMRM)引入结构失效模式分析中,有效避免了失效模式识别的路径依赖性,进而提出了结构体系可靠度分析的无路径依赖性方法<sup>[19-20]</sup>。

下面分别介绍结构体系可靠度分析的自适应动态约界法和无路径依赖性方法。

## 1 体系可靠度分析的自适应动态约界法

$\beta$  约界法利用可靠指标作为控制参数,在失效历程的不同级进行分枝和约界操作,为了能够提前删去次要失效模式, $\beta$  约界法在结构失效历程的第  $k$  级,将可靠指标满足以下条件的元件  $e$  作为第  $k$  级候选失效元:

$$\beta_k^e \in [\beta_k^{\min}, \beta_k^{\min} + \Delta\beta_k] \quad (1)$$

其中: $\beta_k^e$  为元件  $e$  的可靠指标; $\Delta\beta_k$  为第  $k$  级的约界阈值; $\beta_k^{\min}$  为该级全部元件可靠指标的最小值。

由上述分支约界策略可知,约界阈值  $\Delta\beta_k$  越大,符合式(1)定义的约界条件的候选失效元数量就越多,因而由各级失效元组合而成的主要失效路径就越多,此时体系可靠度的计算效率也将随之降低。反之,当约界阈值  $\Delta\beta_k$  减小,符合约界条件的候选失效元数量就减少。但  $\Delta\beta_k$  过小时有可能遗漏重要失效元,导致结构失效树中缺失部分主要失效路径,从而难以正确计算结构体系可靠度。

目前,国内外文献主要通过主观经验来选取约界阈值<sup>[12-13]</sup>,难以兼顾计算效率和计算精度。鉴于此,文献[12]建议将约界阈值选取为  $\Delta\beta^{(1)} = 3.0$  和  $\Delta\beta^{(k)} = 1.0 (k \geq 2)$ ,文献[14]将约界阈值定义为  $\Delta\beta^{(k)} = (1.29 + 0.86 \times \beta_{\min}^{(k)}) - \beta_{\min}^{(k)}$ ,在一定程度上克服了传统方法的缺陷,但是上述两种方法都没有充分考虑元件失效概率的分布状况随结构失效演

化的改变。鉴于此,文献[16]综合考虑各阶段全部元件失效概率的平均水平和失效概率的分布状况,在失效历程的第  $k (k \geq 1)$  级,根据第  $k$  级全部元件失效概率的最大值  $P_{f_k}^{\max}$ 、最小值  $P_{f_k}^{\min}$  和平均值  $\bar{P}_{f_k}$  等特征参数来定义该阶段的失效概率均匀度:

$$d_k = \frac{\bar{P}_{f_k} + P_{f_k}^{\min}}{\bar{P}_{f_k} + P_{f_k}^{\max}} \quad (2)$$

进而利用  $d_k$  定义第  $k$  级的基准失效概率:

$$P_{f_k}^0 = P_{f_k}^{\min} + (P_{f_k}^{\max} - P_{f_k}^{\min}) \cdot d_k \quad (3)$$

相应地,可以确定失效历程第  $k$  级的基准可靠指标:

$$\beta_k^0 = \Phi^{-1}(1 - P_{f_k}^0) \quad (4)$$

式中,  $\Phi^{-1}(\cdot)$  表示标准正态累积分布函数的逆函数。

结合式(1)和式(4),可将约界阈值  $\Delta\beta_k$  定义为:

$$\Delta\beta_k = \beta_k^0 - \beta_k^{\min} \quad (5)$$

进而根据式(1)可以确定失效历程第  $k$  级的候选失效元。由于  $P_{f_k}^{\max}$ 、 $P_{f_k}^{\min}$ 、 $d_k$ 、 $P_{f_k}^0$ 、 $\beta_k^0$  和  $\Delta\beta_k$  均随着失效演化的发展而变化,所以利用上述控制参数定义的自适应动态约界阈值,充分考虑了失效演化中元件失效概率分布状况对约界阈值的影响,从而可以避免传统方法根据主观经验确定约界阈值存在的局限性。

## 2 体系可靠度分析的无路径依赖性方法

### 2.1 潜在失效元件的自适应识别准则

为了快速准确地识别随机结构的潜在失效元件,文献[19]首先根据随机变量均值定义单元承载比(EBR):

$$r_k^e = \frac{\bar{S}_k^e}{\bar{R}^e} \quad (5)$$

式中: $r_k^e$  为单元承载比,上标  $e$  为单元编号,下标  $k$  为迭代步; $\bar{R}^e$  表示单元抗力均值; $\bar{S}_k^e$  表示单元  $e$  的截面内力在随机向量均值  $\{\bar{x}\}$  处的值。

根据 EBR,可以定义随机结构中高承载单元动态判别的阈值参数——基准承载比(REBR):

$$r_k^0 = r_k^{\max} - d_k \times (r_k^{\max} - r_k^{\min}) \quad (6)$$

式中: $r_k^{\max}$  和  $r_k^{\min}$  分别为结构中所有 EBR 的最大值和最小值; $d_k$  为承载比均匀度,定义为:

$$d_k = \frac{\bar{r}_k + r_k^{\min}}{\bar{r}_k + r_k^{\max}} \quad (7)$$

其中,  $\bar{r}_k$  为随机结构中所有 EBR 的平均值。

由式(7)可知, 承载比均匀度反映了 EBR 在失效演化过程中的分布情况, 能够提高识别高承载单元的准确度, 进而通过有策略地缩减这些高承载单元的弹性模量, 可以有效模拟结构体系中高承载单元的塑性损伤和失效演化过程。

高承载单元弹性模量的缩减程度可以根据变形能守恒原理来确定, 如图 1 所示。单元  $e$  在发生塑性变形之前, 弹性模量为  $E_k^e$ , 图中三角形  $ODA$  的面积表示单元  $e$  的弹性应变能, 点  $D$  代表与单元内力  $F_k^e = r_k^e C_s$  相对应的弹性变形  $\chi_k^e$ , 这里的  $C_s$  表示构件的截面强度。当该单元进入弹塑性状态后, 会产生部分塑性应变能, 对应于矩形  $BCFG$  的面积, 同时仍保留一部分弹性应变能, 对应于三角形  $OFG$  的面积。点  $F$  和点  $C$  分别代表单元截面发生屈服时的变形  $\chi_k^0$  和总变形  $\chi_k$ 。此时为了能够继续采用弹性本构方程, 可以将直线  $OB$  的斜率作为单元发生刚度软化后的弹性模量  $E_{k+1}^e$ 。因此, 结合变形能守恒原理以及胡克定律, 可以得到单元弹性模量在调整前后的值  $E_k^e$  和  $E_{k+1}^e$  之间的关系<sup>[17]</sup>:

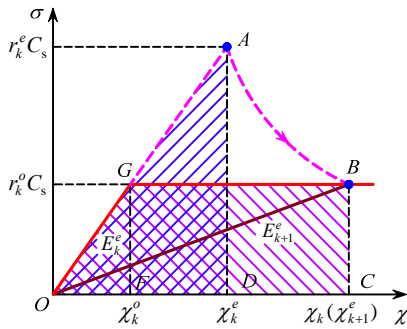


图 1 变形能守恒原理

Fig.1 Deformation energy conservation principle

$$E_{k+1}^e = \begin{cases} E_k^e \frac{2(r_k^0)^2}{(r_k^e)^2 + (r_k^0)^2}, & r_k^e > r_k^0 \\ E_k^e, & r_k^e \leq r_k^0 \end{cases} \quad (8)$$

利用调整后的弹性模量重新计算承载比均匀度, 并再次识别高承载单元, 并缩减其弹性模量。重复上述迭代过程, 当承载比均匀度满足以下收敛判别准则时, 可以认为该随机结构达到承载力极限状态:

$$\frac{|d_{k+1} - d_k|}{d_k} \leq \varepsilon, \quad k \geq 1 \quad (9)$$

式中,  $\varepsilon$  为预设的控制误差限, 通常取 0.001~

0.0001。

以上基于结构随机响应量, 通过有策略地缩减高承载单元弹性模量均值来模拟结构失效演化过程的方法称为随机弹性模量缩减法(SEMRM)。

## 2.2 主要失效模式识别的无路径依赖性方法

通过有策略地调整高承载力单元的弹性模量, 可以有效模拟结构的塑性损伤和失效演化, 其中弹性模量缩减幅度最大的一批高承载单元, 最有可能成为构成主要失效模式的潜在失效元。为了便于开展失效模式分析和失效概率计算, 可以将极限状态下的单元弹性模量缩减幅度由大到小依次排序:

$$\gamma_M^1 > \gamma_M^2 > \dots > \gamma_M^n, \quad \gamma_M^i = E_1^i / E_M^i \quad (10)$$

式中:  $\gamma_M^i$  表示单元  $i$  在迭代末步(第  $M$  步)的弹性模量缩减幅度;  $E_1^i$  和  $E_M^i$  分别表示单元  $i$  在迭代首步与迭代末步的弹性模量;  $n$  为结构失效时的失效元数量。按照式(10)对各单元的弹性模量缩减幅度进行排序, 从中选出  $M_1$  个削减幅度较大的单元, 这些单元就是结构体系的潜在失效元件, 对应的极限状态方程为:

$$R^e - S_m^e = 0, \quad e = 1, 2, \dots, M_1 \quad (11)$$

式中,  $R^e$  和  $S_m^e$  分别表示单元  $e$  的抗力和内力。进而利用一次二阶矩法(FOSM)可以计算该单元的可靠指标。通常  $M_1$  个高承载单元中只要有部分发生失效, 就会形成主要失效模式。

由上述分析可知, 通过有策略地调整高承载单元的弹性模量, 可以有效模拟结构的塑性损伤和失效演化, 进而根据塑性极限状态时高承载单元的弹性模量缩减幅度来识别潜在失效元和主要失效模式, 可以有效避免传统失效模式分析发存在的路径依赖性, 属于一种无路径依赖性方法。

## 3 算例分析

### 3.1 自适应动态约界法的验证

门式刚架结构的计算简图及潜在塑性铰(黑色圆点)位置如图 2 所示。各随机变量的统计特征值见表 1。假设各随机变量均服从正态分布, 柱单元的控制截面 1、2、7 和 8 的极限抗弯承载力完全相关, 梁单元的控制截面 3、4、5 和 6 的极限抗弯承载力完全相关, 柱单元和梁单元的控制截面的极限抗弯承载力之间统计无关。要求分别利用文献[12]、文献[14]和文献[16]的约界阈值来确定该刚架结构的主要失效模式和体系可靠度, 并验证文献[16]的自

适应动态约界法的计算精度。

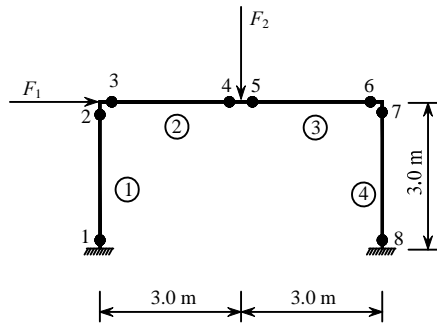


图 2 门式刚架的计算简图

Fig.2 Sketch of portal frame

表 1 随机变量的统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of random variables

随机变量	均值	变异系数	截面惯性矩	截面积
$R_b$	140 kN · m	0.10	$0.486 \times 10^{-4} \text{ m}^4$	$0.315 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
$R_c$	150 kN · m	0.18	$0.596 \times 10^{-4} \text{ m}^4$	$0.425 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
$F_1$	75 kN	0.15	—	—
$F_2$	90 kN	0.15	—	—

弹性模量均为  $E=2.1 \times 10^2 \text{ GPa}$

通过分析发现，控制截面 4 和 5 所承受的弯矩大小始终相同，并且二者的极限抗弯承载力也完全相关，因此这两个截面的失效情况完全相同，可用同一个截面来代替。由表 2 可知，与自适应动态约界法所确定的约界阈值相比，文献[12]将约界阈值选取为  $\Delta\beta^{(1)} = 3.0$  和  $\Delta\beta^{(k)} = 1.0(k \geq 2)$ ，由于没有考虑结构在不同失效阶段和失效路径上元件失效概率的分布状况，导致其约界阈值在第 2 级偏小，进而遗漏了 2 条失效概率最大的主要失效模式；文献[14]由于只考虑了  $\beta_{\min}^{(k)}$  的影响，所以不能准确反映元件失效概率的分布状况，因此也遗漏了 2 条失效概率最大的主要失效模式。由于文献[12]和文献[14]方法遗漏了失效概率最大的两条失效路径，导致计算得到的结构体系失效概率偏低。

表 2 失效历程前两级的约界阈值

Table 2 Bounding thresholds in first two levels

方法	文献[12]方法	文献[14]方法	文献[16]方法
第 1 级	3.0	2.871	3.549
第 2 级	1.0	1.027 1.031 0.994 2.054 2.097 1.990 1.182	

根据表 3 中所列出的主要失效模式，可以分别利用 Ditlevsen 二阶界限法和条件概率法计算该刚架的体系可靠指标。为了验证计算结果的正确性，这里采用蒙特卡洛法(简记为 MCS)结合弹塑性增量加载法(简记为 PPHM)计算该刚架结构的体系可靠度。该方法简记为 MCS-PPHM。不同方法的计算结

果见表 4。

表 3 主要失效模式及其失效概率

Table 3 Dominant failure modes and failure probabilities

序号	主要失效模式			失效概率
	文献[12]方法	文献[14]方法	文献[16]方法	
1	*	*	8-1-7-4	$5.267 \times 10^{-4}$
2	*	*	8-1-7-2	$4.596 \times 10^{-4}$
3	1-8-7-2	*	*	$1.553 \times 10^{-4}$
4	6-4-8-3	6-4-8-3	6-4-8-3	$1.529 \times 10^{-4}$
5	6-4-8-2	6-4-8-2	*	$1.285 \times 10^{-4}$
6	4-6-8-3	*	4-6-8-3	$1.280 \times 10^{-4}$
7	4-6-8-2	*	*	$1.137 \times 10^{-4}$
8	1-8-7-4	*	*	$9.999 \times 10^{-5}$
9	*	*	7-4-8-2	$6.201 \times 10^{-5}$
10	*	*	8-4-7-1	$5.248 \times 10^{-5}$
11	8-7-4-1	8-7-4-1	8-7-4-1	$4.932 \times 10^{-5}$
12	7-8-4-1	7-8-4-1	7-8-4-1	$4.925 \times 10^{-5}$
13	4-7-8-3	*	*	$4.612 \times 10^{-5}$
14	4-8-7-1	*	4-8-7-1	$4.556 \times 10^{-5}$
15	4-7-8-2	*	4-7-8-2	$4.519 \times 10^{-5}$
16	*	*	7-1-4-8	$4.248 \times 10^{-5}$
17	4-8-7-2	*	*	$3.497 \times 10^{-5}$
18	4-8-7-3	*	*	$3.274 \times 10^{-5}$
19	6-8-4-1	6-8-4-1	6-8-4-1	$2.319 \times 10^{-5}$
20	8-6-4-1	8-6-4-1	8-6-4-1	$2.317 \times 10^{-5}$
21	1-8-7-3	*	*	$1.987 \times 10^{-5}$
22	*	*	8-4-6-1	$1.955 \times 10^{-5}$
23	4-7-1-2	*	4-7-1-2	$1.689 \times 10^{-5}$
24	6-4-3	*	*	$1.357 \times 10^{-5}$
25	4-6-3	*	*	$1.357 \times 10^{-5}$
26	8-6-4-3	8-6-4-3	8-6-4-3	$1.026 \times 10^{-5}$

注：表中“\*”表示遗漏该失效模式。

表 4 体系可靠指标的计算结果比较

Table 4 Comparison of results of system reliability index

计算方法	Ditlevsen 二阶界限法	条件概率法
文献[12]方法	[3.255, 3.424]	3.321
文献[14]方法	[3.414, 3.610]	3.479
文献[16]方法	[3.074, 3.276]	3.104
MCS-PPHM	3.104	

由表 4 可知，由于文献[12]和文献[14]方法漏选了失效概率比较大的多条主要失效模式，因此所得到的体系可靠指标偏大，计算精度较差。自适应动态约界法的计算结果与 MCS-PPHM 的非常吻合，说明该方法具有较高的计算精度。

### 3.2 无路径依赖性方法的验证

如图 3 所示，某单层双跨刚架承受集中荷载作用，其中带圈数字表示单元编号，单元  $e$  的两端控制截面编号分别是  $2e-1$  和  $2e$ ，具体编号见单元两端的数字，其中实心圆表示刚架的潜在塑性铰位

置,即潜在失效元。已知跨度  $L=4\text{ m}$ 、层高  $H=3\text{ m}$ ;梁和柱的弹性模量为  $E=2.1\times 10^2\text{ GPa}$ ,截面宽度和高度均为  $b=0.25\text{ m}$  和  $h=0.5\text{ m}$ ;梁和柱的屈服应力分别为  $\sigma_{yb}$  和  $\sigma_{yc}$ ;竖向外荷载为  $F_1$ 、 $F_2$ ,水平外荷载为  $F_3$ 。各随机变量的统计特征值见表 5。柱的屈服应力完全相关,梁的屈服应力完全相关;梁和柱屈服应力完全相关;外荷载相互独立。利用文献[19]的无路径依赖性方法来计算结构的体系可靠度,并与抽样统计方法(MCS-PPHM)进行对比验证。

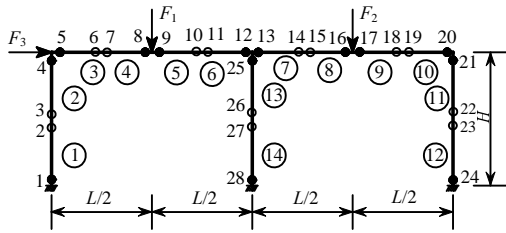


图 3 单层双跨刚架的几何尺寸和荷载条件

Fig.3 Geometry and load conditions of two-story, one-bay planar frame

表 5 随机变量的概率特征

Table 5 Probabilistic characteristics of random variables

变量	均值	变异系数	分布类型	相关系数
$\sigma_b$	$2.1\times 10^{-1}\text{ GPa}$	0.10	正态	1.0
$\sigma_c$	$3.0\times 10^{-1}\text{ GPa}$	0.10	正态	
$F_1$	$2.0\times 10^3\text{ kN}$	0.10	正态	0.0
$F_2$	$3.5\times 10^3\text{ kN}$	0.10	正态	
$F_3$	$5.5\times 10^3\text{ kN}$	0.10	正态	

迭代末步时各单元的弹性模量缩减幅度按从大到小排序见表 6。由表 6 可知,排在前 9 位的单元是弹性模量缩减幅度最大的三批,据此识别出单元⑩、⑥、⑧/⑨、③、①、⑭、⑫、④和⑤为主要失效

表 6 迭代末步时各单元的弹性模量缩减幅度

Table 6 Sort order of elastic modulus reduction rate in last iteration

序号	弹性模量缩减幅度	单元编号	高承载控制截面	承载比
1	$3.802\times 10^5$	单元⑩	20	0.696
2	$2.188\times 10^5$	单元⑥	12	0.694
3	$1.583\times 10^5$	单元⑧/⑨	16/17	0.696
4	$1.086\times 10^5$	单元③	5	0.700
5	$7.484\times 10^4$	单元①	1	0.696
6	$6.972\times 10^4$	单元⑭	28	0.696
7	$6.699\times 10^4$	单元⑫	24	0.696
8	$1.460\times 10^4$	单元④	7	0.656
9	$1.907\times 10^3$	单元⑤	9	0.612
10	$1.145\times 10^1$	单元⑪	21	0.487
11	8.337	单元②	4	0.490
12	4.630	单元③	25	0.455
13	1.000	单元⑦	14	0.326

单元,相应的高承载控制截面分别为 20、12、16/17、5、1、28、24、7 和 9,其中对应于刚架的潜在失效元位置的是元件 20、12、16/17、5、1、28、24 和 9,由此组成 4 个失效模式:1-5-12-16/17-20-24-28、1-9-12-16/17-20-24-28、5-9-12 和 1-5-9-16/17-20-24-28。

上述 4 个失效模式的失效概率见表 7。由表 7 可知,第 1 条和第 2 条失效模式的失效概率较大,而第 3 条、第 4 条的失效概率较小,因此可以将第 3 条、第 4 条剔除,保留第 1 条、第 2 条主要失效模式。

表 7 各失效模式的失效概率

Table 7 Failure probability of failure modes

序号	失效模式	失效概率
1	1-5-12-16/17-20-24-28	$3.656\times 10^{-3}$
2	1-8/9-12-16/17-20-24-28	$1.912\times 10^{-3}$
3	5-8/9-12	$1.462\times 10^{-11}$
4	1-5-8/9-16/17-20-24-28	$1.312\times 10^{-6}$

根据以上两条主要失效模式,进一步结合条件概率法计算结构体系可靠指标。其中,无路径依赖性方法和 MCS-PPHM 的计算结果分别是 2.658 和 2.662,二者的相对误差是-0.143%,说明无路径依赖性方法的计算精度较高。

## 4 结论

本文首先综述了主要失效模式识别的国内外研究现状及存在的缺陷,然后介绍了结构体系可靠度分析的自适应动态约界法和无路径依赖性方法。根据分析结果,可以得出以下结论:

(1) 结构体系可靠度分析的自适应动态约界法在失效演化历程的每一级,通过引入失效概率均匀度和基准可靠指标来确定动态约界阈值,实现了失效演化的自适应动态分枝和约界,不仅可以避免遗漏主要失效模式,而且可以兼顾计算效率和计算精度。

(2) 结构体系可靠度分析的无路径依赖性方法通过有策略地调整高承载单元的弹性模量来模拟结构的塑性损伤和失效演化,进而根据塑性极限状态时高承载单元的弹性模量缩减幅度来识别潜在失效元和主要失效模式,有效避免了传统失效模式分析发存在的路径依赖性,属于一种无路径依赖性方法,计算效率和计算精度均较高。

### 参考文献:

[1] Moses F. System reliability developments in structural

- engineering [J]. *Structural Safety*, 1983, 1(1): 3–13.
- [2] Feng Y S. Enumerating significant failure modes of a structural system by using criterion methods [J]. *Computers and Structures*, 1988, 30(5): 1153–1157.
- [3] 冯元生, 董聪. 枚举结构主要失效模式的一种方法[J]. *航空学报*, 1991, 12(9): 537–541.  
Feng Yuansheng, Dong Cong. A method for identifying significant failure modes of a structural system [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1991, 12(9): 537–541. (in Chinese)
- [4] 董聪, 冯元生. 枚举结构系统主要失效模式的一种新方法[J]. *西北工业大学学报*, 1991, 9(3): 284–289.  
Dong Cong, Feng Yuansheng. A new method for enumerating significant failure modes of a structural system [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 1991, 9(3): 284–289. (in Chinese)
- [5] 谢凯麟, 石少卿, 程华, 等. 识别结构主要失效模式的一种改进方法[J]. *后勤工程学院学报*, 2003, 19(4): 59–61.  
Xie Kailin, Shi Shaoqing, Cheng Hua, et al. A new method to identify significant failure modes of structural [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2003, 19(4): 59–61. (in Chinese)
- [6] 姚凯, 杜文龙. 应用  $\sigma$  准则法识别结构系统的主要失效模式[J]. *重庆建筑*, 2011, 10(1): 45–47.  
Yao Kai, Du Wenlong. A modified method to identify significant failure modes of structure [J]. *Chongqing Architecture*, 2011, 10(1): 45–47. (in Chinese)
- [7] Murotsu Y, Okada H, Taguchi K, et al. Automatic generation of stochastically dominant failure modes of frame structures [J]. *Structural Safety*, 1984, 2(1): 17–25.
- [8] 董聪. 现代结构系统可靠性理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 173–179.  
Dong Cong. Theory and applications of modern structural system reliability [M]. Beijing: Science Press, 2001: 173–179. (in Chinese)
- [9] 蔡迎建, 孙焕纯. 结构失效模式的快速识别方法[J]. *大连理工大学学报*, 1999, 39(4): 489–493.  
Cai Yingjian, Sun Huanchun. Fast identification for failure modes of structural system [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1999, 39(4): 489–493. (in Chinese)
- [10] 陈卫东, 李建操, 于艳春, 等. 高效识别桁架结构主要失效模式的一种新方法[J]. *力学学报*, 2013, 45(2): 236–244.  
Chen Weidong, Li Jiancao, Yu Yanchun, et al. A new method of identifying main failure mode about truss structure [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(2): 236–244. (in Chinese)
- [11] 吉国明, 宋笔锋. 枚举结构主要失效模式的改进分枝限界法[J]. *机械强度*, 2002, 24(3): 397–399.  
Ji Guoming, Song Bifeng. Developed branching and bounding method for enumerating structural system dominant failure modes [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(3): 397–399. (in Chinese)
- [12] Thoft-Christensen P. Consequence modified  $\beta$ -unzipping of plastic structures [J]. *Structural Safety*, 1990, 7(2/3/4): 191–198.
- [13] Daghighi M, Makouie S H. Application of  $\beta$ -unzipping method in offshore system reliability analysis under changing load pattern [C]. Cancun: 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2003: 1–7.
- [14] 董聪. 结构系统可靠性理论: 进展与回顾[J]. *工程力学*, 2001, 18(4): 79–88.  
Dong Cong. Reliability theory of structural system: Advance and review [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(4): 79–88. (in Chinese)
- [15] Chen K S, Zhang S K, Huang W. Artificial intelligence  $\beta$ -unzipping method in structural system reliability analysis [J]. *Computers and Structures*, 1996, 60(4): 619–626.
- [16] 杨绿峰, 刘娇, 余波. 结构体系可靠度分析的自适应动态约界法[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(4): 38–46.  
Yang Lufeng, Liu Jiao, Yu Bo. Adaptive dynamic bounding method for structural system reliability analysis [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(4): 38–46. (in Chinese)
- [17] Yang L F, Yu B, Qiao Y P. Elastic modulus reduction method for limit load evaluation of frame structures [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2009, 22(2): 109–115.
- [18] Yu B, Yang L F. Elastic modulus reduction method for limit analysis of thin plate and shell structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2010, 48(4): 291–298.
- [19] 杨绿峰, 吴文龙, 余波. 一种不依赖失效路径的结构体系可靠度分析方法[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44(11): 1220–1231.  
Yang Lufeng, Wu Wenlong, Yu Bo. A failure-path-independent method for structural system reliability analysis [J]. *Scientia: Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(11): 1220–1231. (in Chinese)
- [20] Yang L F, Yu B, Ju J W. System reliability analysis of spatial variance frames based on random field and stochastic elastic modulus reduction method [J]. *Acta Mechanica*, 2012, 223(1): 109–124.