

体系可靠度计算中改进的等价平面法

康海贵*¹, 张晶¹, 张小庆²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;
2. 郑州市人民政府重点项目建设管理办公室, 郑州 450007)

摘要:具有多个失效模式的结构体系可靠度计算是一个复杂的多维积分问题,很难直接得到结果,往往需要采用近似计算。在失效模式间的相关性较弱时一些近似计算方法可以得到较好的估计值,但是当各失效模式相关性较强时这些近似方法的误差较大。最初的等价平面法是用来计算并联体系失效概率的,但是需要进行迭代求解,而且其误差较大。本文推导了串联体系的等价平面法(EPM法)的解析公式,在此基础上提出了改进的等价平面法(IEPM法),该方法既可以计算串联体系也可以计算并联体系的失效概率,解决了体系可靠度在各失效模式相关性较强时近似计算误差较大的问题。经大量的算例验证,说明该方法在失效模式相关性较强时具有较高的计算精度。

关键词:体系可靠度;等价平面法;失效模式;串联体系;并联体系
中图分类号:O39 **文献标识码:**A

1 引言

当结构体系具有多个失效模式时,其体系失效概率计算可以归结为求一个多维正态联合分布的积分的问题。一般情况下对于具有 n 个失效模式的并联体系,其失效概率可以表示为如下形式^[1]:

$$P_f = P\left[\bigcap_{k=1}^n (X_k \leq \beta_k)\right] = \Phi_n(-\bar{\beta}; \hat{\rho}) = \int_{-\infty}^{-\beta_1} \int_{-\infty}^{-\beta_2} \dots \int_{-\infty}^{-\beta_n} \varphi_n(\bar{z}; \hat{\rho}) dz_1 dz_2 \dots dz_n \quad (1)$$

式中 $\bar{\beta} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}^T$ 为并联体系的各失效模式的可靠指标, $\hat{\rho} = (\rho_{i,j})_{n \times n}$ 为各失效模式间的线性相关系数矩阵, $\Phi_n(\cdot)$ 表示 n 维标准正态分布的累积分布函数, $\varphi_n(\cdot)$ 是 n 维标准正态分布的概率密度函数。

多维正态分布积分式(1)很难直接积分,当各失效模式间的相关系数相同且可靠指标相等时,多维正态积分可以转化成一维积分^2,文献[2]的方法常用作检验近似算法精度的标准。

$$\Phi_n(\bar{\beta}, \hat{\rho}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) \left[\Phi \left[\frac{-\beta_e - \sqrt{\rho}x}{\sqrt{1-\rho}} \right] \right]^n dx \quad (2)$$

大多数工程问题并不能转化成式(2)的形式用积分法计算,需要采用近似计算,目前结构体系可靠度的近似计算方法主要有 FOMN 法^[3], GFOMN 法^[4], PCM 法^[5,6] 及 IPCM 法^[7] 等。

FOMN 法误差较大, GFOMN 法采用积分法求解可靠指标,计算量较大。

PCM 法和 IPCM 计算量较小,但是当体系失效模式间的相关系数较大时,计算的体系失效概率的误差较大。

S. Gollwitzer 和 R. Rackwitz^[8] 提出的等价平面法也是一种近似计算方法,该方法计算串联体系失效概率的精度较高,但是计算并联体系失效概率时误差会很大,本文提出了修正公式,以提高等价平面法的计算精度。

2 等价平面法原理

等价平面法最早是由 S. Gollwitzer, R. Rackwitz^[8] 提出来的。其原理是:对于由 n 个线性失效模式所组成的并联体系,记体系失效概率为 P_f , 则有

$$P_f = P[Z_1^{(0)} \cap Z_2^{(0)} \cap \dots \cap Z_n^{(0)}] \quad (3)$$

式中 $Z_i^{(0)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为并联体系的第 i 个线性

收稿日期:2008-03-23;修改稿收到日期:2009-07-22.

作者简介:康海贵*(1945-),男,教授,博士生导师
(E-mail:hgkang@dlut.edu.cn);
张晶(1979-),女,博士生;
张小庆(1973-),男,博士.

失效模式。

记 $Z_i^{(i-1)}$ ($i = 2, 3, \dots, n$) 为事件 $(Z_{i-1}^{(i-2)} \cap Z_i^{(0)})$ 的线性等价失效模式, 则式(3)可进一步写为

$$\begin{aligned} P_f &\approx P[(Z_2^{(1)} \cap Z_3^{(0)}) \cap Z_4^{(0)} \cap \dots \cap Z_n^{(0)}] \\ &\approx P[Z_3^{(2)} \cap Z_4^{(0)} \cap \dots \cap Z_n^{(0)}] \\ &\quad \vdots \\ &\approx P[Z_n^{(n-1)}] \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)将多个失效模式转化为一个等价失效模式来计算体系可靠度, 从而大大简化了计算。

3 等价失效模式中系数向量的推导

等价平面法同样可以用于串联体系, 下面以串联体系为例, 推导等价平面法等价失效模式中的系数向量。

定义两个线性失效模式 $A^T Z + \beta_1 \leq 0$ 和 $B^T Z + \beta_2 \leq 0$, 并集所对应的等价线性失效模式为 $C^T Z + \beta \leq 0$, 即

$$(A^T Z \leq -\beta_1) \cup (B^T Z \leq -\beta_2) \sim (C^T Z \leq -\beta) \quad (5)$$

等价的原则为

$$P[(A^T Z \leq -\beta_1) \cup (B^T Z \leq -\beta_2)] = P[C^T Z \leq -\beta] \quad (6)$$

当随机变量 z_i 增加一微小增量 Δz_i 后, 等价关系仍然成立, 即

$$\begin{aligned} P[(A^T Z \leq -\beta_1 - a_i \Delta z_i) \cup (B^T Z \leq -\beta_2 - \\ b_i \Delta z_i)] = P[C^T Z \leq -\beta - c_i \Delta z_i] = \\ P[C^T Z \leq -(\beta + \Delta\beta)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 z_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 是失效模式中的正态随机变量(为叙述方便, 在以下推导过程中暂假定各随机变量均为互不相关的标准正态随机变量), n 是随机变量的个数; β_1, β_2 和 β 分别为这三个失效模式的可靠指标, A, B, C 分别为这三个线性失效模式中随机变量的系数向量, 即

$$\begin{aligned} A^T &= \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \text{ 且 } A^T A = 1 \\ B^T &= \{b_1, b_2, \dots, b_n\}, \text{ 且 } B^T B = 1 \\ C^T &= \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, \text{ 且 } C^T C = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

由式(7)得等价失效模式中随机变量 z_i 的系数为

$$c_i = \lim_{\Delta z_i \rightarrow 0} \frac{\Delta\beta}{\Delta z_i} = \frac{\partial\beta}{\partial z_i} \quad (9)$$

计算中 c_i 还须进行式(8)的正则化处理。在 c_i 的求解过程中, 传统的等价平面法是给定 Δz_i 一个

具体的微小值, 根据式(6)和式(7)求出 β , 然后由式(9)和式(8)求解等价失效模式中的系数向量。

根据可靠度的基本理论有

$$\begin{aligned} P[(A^T Z \leq -\beta_1) \cup (B^T Z \leq -\beta_2)] = \\ \Phi(-\beta_1) + \Phi(-\beta_2) - \Phi_2(-\beta_1, -\beta_2, \rho) = \\ \int_{-\infty}^{-\beta_1} \varphi(x) dx + \int_{-\infty}^{-\beta_2} \varphi(y) dy - \\ \int_{-\infty}^{-\beta_1} \int_{-\infty}^{-\beta_2} \varphi_2(x, y, \rho) dx dy \end{aligned} \quad (10)$$

$$P[C^T Z \leq -\beta] = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{-\beta} \varphi(x) dx \quad (11)$$

式中 $\Phi_2(-\beta_1, -\beta_2, \rho)$ 和 $\Phi(-\beta)$ 分别是二维标准正态分布的累积分布函数和一维标准正态分布的累积分布函数, ρ 是失效模式 $(A^T Z \leq -\beta_1)$ 和 $(B^T Z \leq -\beta_2)$ 之间的相关系数, $\varphi_2(x, y, \rho)$ 和 $\varphi(x)$ 分别是二维和一维标准正态分布的概率密度函数。

定义:

$$P_f = \Phi(-\beta_1) + \Phi(-\beta_2) - \Phi_2(-\beta_1, -\beta_2, \rho) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_f + \Delta P_f = \Phi(-\beta_1 - a_i \Delta z_i) + \Phi(-\beta_2 - b_i \Delta z_i) - \\ \Phi_2(-\beta_1 - a_i \Delta z_i, -\beta_2 - b_i \Delta z_i, \rho) \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(6,7)及式(10~13)可得

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (14)$$

$$\beta + \Delta\beta = -\Phi^{-1}(P_f + \Delta P_f) \quad (15)$$

式中 $\Phi^{-1}(-\beta)$ 表示一维标准正态分布累积分布函数的逆函数。由式(9)及式(14,15)得

$$\begin{aligned} c_i = \lim_{\Delta z_i \rightarrow 0} - \frac{\Phi^{-1}(P_f + \Delta P_f) - \Phi^{-1}(P_f)}{\Delta z_i} = \\ \frac{\partial\beta}{\partial P_f} \lim_{\Delta z_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_f}{\Delta z_i} \end{aligned} \quad (16)$$

由式(14)可得

$$\frac{\partial\beta}{\partial P_f} = -\sqrt{2\pi} e^{\frac{1}{2}\beta^2} \quad (17)$$

根据式(12,13)可得

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta z_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_f}{\Delta z_i} = \lim_{\Delta z_i \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{-\beta_1 - a_i \Delta z_i} \varphi(x) dx + \int_{-\infty}^{-\beta_2 - b_i \Delta z_i} \varphi(x) dy - \\ \int_{-\infty}^{-\beta_1 - a_i \Delta z_i} \int_{-\infty}^{-\beta_2 - b_i \Delta z_i} \varphi_2(x, y, \rho) dx dy / \Delta z_i - \\ \lim_{\Delta z_i \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{-\beta_1} \varphi(x) dx + \int_{-\infty}^{-\beta_2} \varphi(y) dy - \\ \int_{-\infty}^{-\beta_1} \int_{-\infty}^{-\beta_2} \varphi_2(x, y, \rho) dx dy / \Delta z_i = \end{aligned}$$

$$-\frac{a_i}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\beta_1^2}\Phi\left(\frac{\beta_2-\rho\beta_1}{\sqrt{1-\rho^2}}\right)-\frac{b_i}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\beta_2^2}\Phi\left(\frac{\beta_1-\rho\beta_2}{\sqrt{1-\rho^2}}\right) \quad (18)$$

由式(16)~式(18)得

$$c_i = a_i e^{\frac{1}{2}(\beta^2-\beta_1^2)}\Phi\left(\frac{\beta_2-\rho\beta_1}{\sqrt{1-\rho^2}}\right) + b_i e^{\frac{1}{2}(\beta^2-\beta_2^2)}\Phi\left(\frac{\beta_1-\rho\beta_2}{\sqrt{1-\rho^2}}\right) \quad (19)$$

定义:

$$r = e^{-\frac{1}{2}\beta^2}\Phi\left(\frac{\beta_2-\rho\beta_1}{\sqrt{1-\rho^2}}\right), s = e^{-\frac{1}{2}\beta^2}\Phi\left(\frac{\beta_1-\rho\beta_2}{\sqrt{1-\rho^2}}\right) \quad (20)$$

可以证明按下式求出的 c_i 满足关系式(8):

$$c_i = \frac{a_i r + b_i s}{\sqrt{r^2 + 2rs\rho + s^2}} \quad (21)$$

4 误差分析及修正公式

对于串联体系,失效模式 C 为失效模式 A 和 B 并集的等价失效模式,存在 $P(A \cup B) \approx P(C)$ 所以 $P(A \cup C) \approx P(B \cup C) \approx P(C)$ 。因为 $P(C) \leq P(A \cup C)$ 且 $P(C) \leq P(B \cup C)$,所以串联体系失效概率偏小。

对串联体系的等价失效模式的失效概率进行修正:定义 $Z_i^{(i-1)}$ 为失效模式 $Z_{i-1}^{(i-2)}$ 和 $Z_i^{(0)}$ 并集所对应的线性等价失效模式。

$$K = |P[Z_i^{(i-1)} \cup Z_{i-1}^{(i-2)}] - P[Z_i^{(i-1)} \cup Z_i^{(0)}]| \quad (22)$$

$$P'_i = P[Z_{i-1}^{(i-2)} \cup Z_i^{(0)}] = P[Z_i^{(i-1)}] \quad (23)$$

P_i 应由 P'_i 根据下述公式进行修正:

$$P_i = P'_i + K \times \sqrt{\frac{i}{2}} \times e^{(K \times \sqrt{i})} \quad (24)$$

5 算例验证

串联体系和并联体系之间存在式(25)的关系,所以 IEPM 方法也可以用来计算并联体系的失效概率。

$$P\left(\bigcap_{i=1}^m Z_i < 0\right) = 1 - P\left(\bigcup_{i=1}^m Z_i \geq 0\right) \quad (25)$$

以下算例中 EPM 方法和 IEPM 方法计算过程中用到的二维正态分布值均采用文献[9]提出的

近似方法计算。串联体系失效概率的计算结果与 IPCM 方法作比较,并联体系失效概率的计算结果与 PCM 方法做比较。以数值积分法^[2]的计算结果作为参考标准,采用文献[10]定义误差公式(26)。

$$e = \frac{P_f - \tilde{P}_f}{P_f} \times 100\% \quad (26)$$

对于实际工程,需要先从响应面法确定各失效模式的功能函数,然后再根据功能函数确定可靠指标及失效模式间的相关系数。由以下算例来说明如何确定失效模式间的相关系数。

算例 1 某一串联结构有 8 个主要失效模式,各失效模式所对应的功能函数为^[11]

$$g_1 = 1.4X_1 - 2X_2 + 7.2 \leq 0$$

$$g_2 = 2X_1 - 2X_2 + 8.0 \leq 0$$

$$g_3 = 2.6X_1 - 2X_2 + 9.3 \leq 0$$

$$g_4 = -1.5X_1 - 2X_2 + 10.0 \leq 0$$

$$g_5 = 4.0X_1 - 2X_2 + 14 \leq 0$$

$$g_6 = 0.7X_1 - 2X_2 + 6.8 \leq 0$$

$$g_7 = -0.5X_1 - 2X_2 + 8 \leq 0$$

$$g_8 = -2X_1 - 2X_2 + 11 \leq 0$$

其中随机变量 X_1 和 X_2 为互不相关的标准正态随机变量。

失效模式 1 和 2 之间的相关系数由下式计算:

$$\rho_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} a_i b_j \sigma_i \sigma_j}{\sigma_a \sigma_b} = 0.98478355881794$$

由近似数值分析方法所求得的结果为 3.364×10^{-3} 。PCM 方法的计算结果为 6.867×10^{-3} ,IPCM 方法无法计算。EPM 的方法计算结果为 3.274×10^{-3} ,IEPM 法计算结果为 3.375×10^{-3} 。

5.1 串联体系的失效概率

算例 2 可靠指标为 3.5,相关系数为 0.9,失效模式个数为 5~50 的串联体系。由图 1 可以看出,当可靠指标为 3.5,相关系数为 0.9 时,EPM 法最大误差为 10% 左右,IPCM 法的最大误差高达 60%,而 IEPM 法最大误差在 1% 左右。

算例 3 可靠指标为 0~5,相关系数为 0.9,失效模式个数为 20 的串联体系。

由图 2 可以看出,当相关系数为 0.9 时,EPM 方

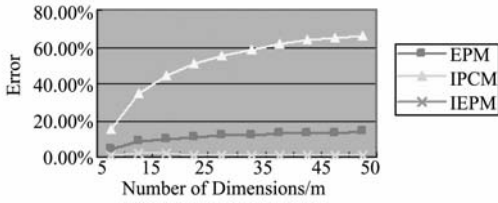


图 1 误差与维数关系图($\beta = 3.5, r = 0.9$)
Fig. 1 Error versus system dimension ($\beta = 3.5, r = 0.9$)

法的最大误差超过 10% 左右, IPCM 方法的最大误差超过了 50%, IEPM 方法的最大误差在 2% 左右。

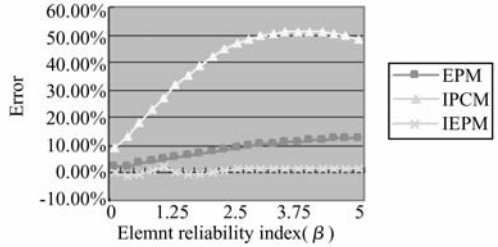


图 2 误差与元件可靠指标关系图($m = 20, r = 0.9$)
Fig. 2 Error versus element reliability index($m = 20, r = 0.9$)

算例 4 可靠指标为 3, 相关系数为 0.6 ~ 0.95, 失效模式个数为 20 的串联体系。

由图 3 可以看出, 当相关系数较大时, EPM 方法的最大误差在 10% 左右, IPCM 方法的最大误差接近 50%, IEPM 方法的最大误差为 1% 左右。

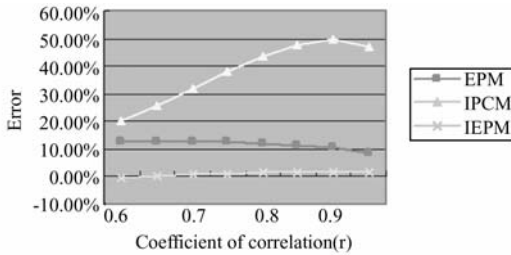


图 3 误差与相关系数关系图($m = 20, \beta = 3.0$)
Fig. 3 Error versus correlation coefficient ($m = 20, \beta = 3.0$)

算例 5 可靠指标为 4, 相关系数为 0.9, 失效模式个数为 3 ~ 50 的串联体系。

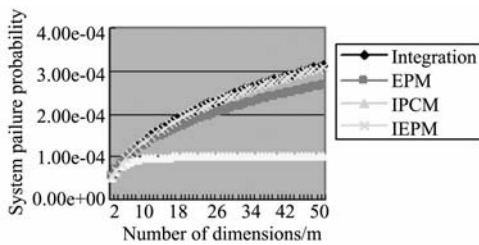


图 4 串联体系失效概率($\beta = 4.0, r = 0.9$)
Fig. 4 Probability of failure of series systems ($\beta = 4.0, r = 0.9$)

由图 4 和图 5 可以看出, 当 $\beta = 4.0, r = 0.9$ 时, EPM 方法的最大误差在 14% 左右, IPCM 法的

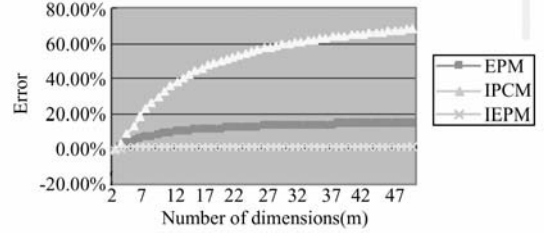


图 5 误差与维数关系图($\beta = 4.0, r = 0.9$)
Fig. 5 Error versus system dimension($\beta = 4.0, r = 0.9$)

最大误差在 60% 左右, IEPM 法的最大误差在 1% 左右。

5.2 并联体系的失效概率

算例 6 可靠指标为 3.5, 相关系数为 0.9, 失效模式个数为 5 ~ 50 的并联体系。

由图 6 可知, 当 $r = 0.9$ 时, EPM 和 PCM 法的最大误差均在 40% 左右, 而 IEPM 法最大误差在 5% 左右。

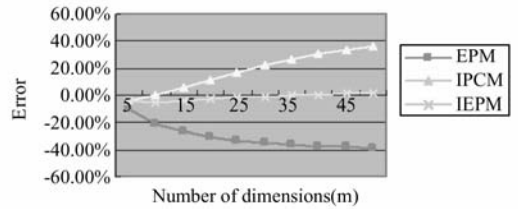


图 6 误差与维数关系图($\beta = 3.5, r = 0.9$)
Fig. 6 Error versus system dimension($\beta = 3.5, r = 0.9$)

算例 7 可靠指标为 0 ~ 5, 相关系数为 0.9, 失效模式个数为 20 的并联体系。

由图 7 可以看出, 当相关系数较大时, EPM 方法的最大误差在可靠指标为 5 时会超过 40%, PCM 方法的最大误差接近 40%, IEPM 方法的最大误差在 3% 左右。

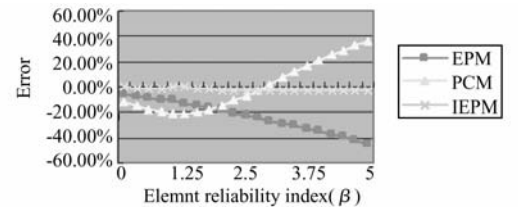
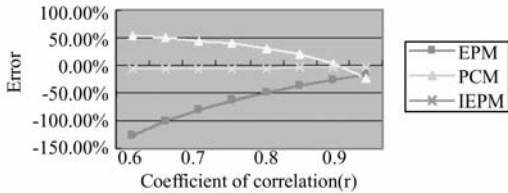


图 7 误差与元件可靠指标关系图($m = 20, r = 0.9$)
Fig. 7 Error versus element reliability index($\beta = 3.5, r = 0.9$)

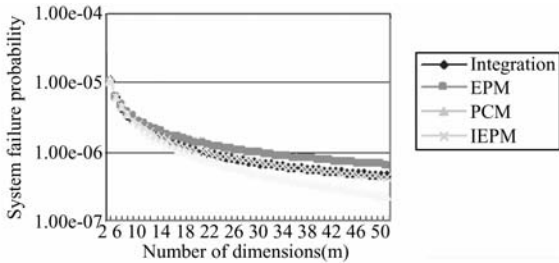
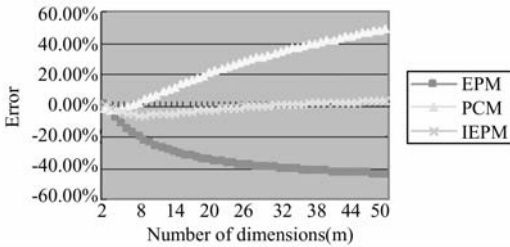
算例 8 可靠指标为 3, 相关系数为 0.6 ~ 0.95, 失效模式个数为 20 的并联体系。

由图 8 可以看出, 当相关系数较小时, EPM 方法的误差超过了 100%, PCM 方法的误差超过了 50%, IEPM 方法的误差在 10% 以内。

算例 9 可靠指标为 4, 相关系数为 0.9, 失效模式个数为 3 ~ 50 的并联体系。

图 8 误差与相关系数关系图($m = 20, \beta = 3.0$)Fig. 8 Error versus correlation coefficient($m = 20, \beta = 3.0$)

由图 9,10 可以看出,当 $\beta = 4, r = 0.9$ 时, EPM 方法的最大误差在 40% 左右, IPCM 法的最小误差在 40% 左右, IEPM 法的最小误差在 6% 左右。

图 9 并联体系失效概率($\beta = 4, r = 0.9$)Fig. 9 Probability of failure of parallel systems
($\beta = 4, r = 0.9$)图 10 误差与维数关系图($\beta = 4, r = 0.9$)Fig. 10 Error versus system dimension($\beta = 4, r = 0.9$)

6 结 论

EPM 方法对于串联体系的计算精度较高,但是计算并联体系时误差很大。IEPM 法通过对 EPM 法等价后的等价失效模式失效概率进行修正,使每一步等价后的等价失效模式的失效失效概率更接近真实值,进而使最终的等价失效模式的计算结果更接近实际值。经过算例验证可以得出以下结论:当失效模式间相关系数较大时,IEPM 方法计算的串联体系的失效概率误差一般在 2% 左右,非常接近数值积分的计算结果;IEPM 方法计算的并联体系的失效概率误差一般在 10% 左右,较大程度地提高了 EPM 方法的计算精度。

(1) 当失效模式间相关系数小于 0.6 时,建议采用 IPCM 方法计算串联体系的失效概率;用

PCM 方法计算并联体系的失效概率。

(2) 当失效模式间相关系数大于 0.6 时,建议采用 IEPM 方法计算串联体系或并联体系的失效概率。

参考文献 (References):

- [1] THOFT-CHRISTENSEN P, SORENSEN J. D. Reliability of structural systems with correlated elements[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 1982, **6**: 171-178.
- [2] JOHNSON N, KOTZ S. *Distributions in Statistics: Continuous Multivariate Distributions* [M]. New York, NY: John Wiley & Sons Inc., 1972.
- [3] HOHENBICHLER M, RACKWITZ R. First-order concepts in system reliability[J]. *Struct Saf*, 1983, **1**: 177-188.
- [4] TANG L K, MELCHERS R E. Improved approximation for multinormal integrals [J]. *Struct Saf*, 1987, **4**: 81-93.
- [5] PANDEY M D. An effective approximation to evaluate multinormal integrals [J]. *Struct Saf*, 1998, **20**: 51-67.
- [6] PANDEY M D, SARKAR A. Comparison of a simple approximation for multinormal integration with an importance sampling-based simulation method [J]. *Probabilist Eng Mech*, 2002, **17**: 215-8.
- [7] YUAN X X, PANDEY M D. Analysis of approximations for multinormal integration in system reliability computation [J]. *Struct Saf*, 2006, **28**: 361-377.
- [8] GOLLWITZER S, RACKWITZ R. Equivalent components in first-order system reliability [J]. *Reliability Eng*, 1983, **5**: 99-115.
- [9] 姚继涛, 赵国藩, 浦聿修. 二维标准正态联合概率的计算 [J]. *建筑结构学报*, 1996, **17**(4): 10-19. (YAO Ji-tao, ZHAO Guo-fan, PU Yu-xiu. Methods for computing two-dimension joint probability of standard normal random vectors [J]. *Journal of Building Structures*, 1996, **17**(4): 10-19. (in Chinese))
- [10] MORI Y, KATO T. Multinormal integrals by importance sampling for series system reliability [J]. *Struct Saf*, 2003, **25**: 363-78.
- [11] ZHAO Y G, Tetsuro Ono. Moment Methods for Structural Reliability [J]. *Structural Safety*, 2001, **23**: 47-75.

Improved equivalent plane method in system reliability computation

KANG Hai-gui^{*1}, ZHANG Jing¹, ZHANG Xiao-qing²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Management Office of Key Project Construction, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The reliability computation is a complicated problem for a structural system with multi-failure modes. It is difficult to get the computational results directly, and an approximate method is usually used. If the correlativity between failure modes is very weak, some approximate methods can be found to calculate the system reliability and the calculation accuracy can be quite good. But, if the correlativity between failure modes is quite high, the calculation errors by these methods are usually very big. The original equivalent plane method (EPM) is only used to calculate the parallel system reliability, by which the iteration method is required and the calculation errors are usually quite big. In this paper, an analysis formula of equivalent plane method for calculating the series system reliability is derived firstly, and then an improved equivalent plane method (IEPM) is put forward. The improved equivalent plane method can be used to calculate both series system and parallel system failure probabilities. By using this new method, the problem of calculation accuracy for the system reliability computation with high correlativity between failure modes is solved very well. A large number of calculation examples and comparison, show that this new method has quite high precision for the system reliability computation with high correlativity between failure modes.

Key words: system reliability; equivalent plane method; failure mode; parallel system; series system

(上接第 131 页)

Numerical analysis method of the eccentric compression bearing capacity for the concrete filled steel tubular latticed columns

JIANG Li-zhong, ZHOU Wang-bao^{*}, TANG Bin

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The Taylor's series were used as the piecewise interpolation function. Based on the equilibrium condition of several sections and the stress-strain relationship of the concrete-filled steel tube considering the confinement effect, the numerical method for calculating the elastic-plastic ultimate loads of the concrete-filled tubular laced columns were put forward, and the corresponding computing program was compiled. Compared with the existing methods, the effect of the shear was taken into account in this method, which was not only suitable for calculating the ultimate load of the eccentric compression members with equal eccentricity, but also the eccentric compression members with unequal eccentricity. The elastic-plastic ultimate loads of some domestic existing four-tube concrete-filled steel tubular laced columns with equal eccentricity are computed using the numerical method, and the computed results are compared with the existing code. The computed results indicated that the existing computational methods are conservative, the computational errors are great, and the computed results in this article agree well with the test results.

Key words: ultimate bearing capacity; numerical method; concrete-filled steel tube; latticed column; eccentric compression