

# 半潜式海洋平台整体结构的三维 可靠性分析<sup>①</sup>

余建星 胡云昌 李 晨 寇 雄 郭振邦 王业宏  
(天津大学)

## 提 要

本文将半潜式海洋平台模型化为空间刚架结构系统,导出三维刚架梁元在塑性阶段的修正刚度矩阵和等效节点力,并有效地改进了分枝限界法,开发出通用于平面和立体结构系统的可靠性分析程序,对平台整体结构进行可靠性估算。通过算例,验证了方法和程序的可靠性和通用性。

**关键词:**海洋平台,结构系统,三维可靠性分析

## (一) 前 言

半潜式平台具有造价高、结构复杂、受多种荷载作用等特点,从设计角度应做到经济性与可靠性最大限度的统一。由于设计经验较少,要达到上述要求,必须进行可靠性分析。而该平台的力学模型是空间刚架结构系统,如果运用目前已有的平面刚架可靠性分析方法来近似,显然会有较大的误差,因此有必要探讨大型刚架结构系统的三维可靠性分析方法。关于半潜式平台的失效,目前多采用下述三种模式处理:

- (1) 某些构件的断面达到屈服极限,使结构系统塑性失效。
- (2) 某构件疲劳失效。
- (3) 某构件压屈失稳。

疲劳失效概率计算笔者在文献[1]已作了探讨。本文研究半潜式平台整体结构在塑性失效条件下的三维可靠性分析,主要解决以下问题:

(1) 日本的室津义定等学者在三维刚架结构系统的可靠性分析方面做了许多工作,但对结构系统中某梁元断面达到塑性屈服极限时的修正刚度矩阵和等效节点力向量的具体表达式,笔者还未见公开发表的资料,如不导出上述内容,对刚架结构系统进行三维可靠性分析是不可能的。

(2) 半潜式平台整体结构是大型刚架结构系统,失效路径相当多,由于计算时间过

\* 国家自然科学基金资助项目

① 收稿日期:1993-09-21

修改稿收稿日期:1994-03-28

长<sup>[2][3]</sup>,难于实际应用,所以本文提出了在保证一定精度条件下,快速地选择失效路径的措施。

## (二) 荷载分析与计算模型

### 1. 荷载分析

本文在对半潜式平台进行可靠性分析时,荷载包括重力、浮力、风力、海流力、系泊力、波浪力及由波浪引起的附加浮力和惯性力。

风力、流力按中国船级社《海上移动式平台入级与建造规范》确定。关于波浪力,本文所取平台截面特征尺度与波浪之比小于 0.2,由《规范》按 Morison 公式计算,其中流体质点的运动按 Stokes 五阶准确度计算。

将平台锚泊系统看作是由若干非线性弹簧支持的刚体平面运动体系,通过系泊合力与外力的平衡关系求解锚泊力。平台的惯性力是通过非定常外力及其力矩之间的平衡方程求得的。

计算时各力均取其工况下的最大组合,并根据静力等效原则转化为相应的节点集中荷载。

### 2. 计算模型

半潜式平台是由圆柱形浮体(下浮体、立柱)和连接构件(撑杆、甲板桁材)组成的浮动海洋工程结构。为了在结构分析中确定弹性变形引起的内力,把它模型化为空间刚架。从工程应用角度来看,这种模型所得到的内力计算精度是满意的。根据半潜式平台的特点,各梁元端部都作了加强措施,应视为不产生弹性变形的刚域。这样,平台整体就理想化为带刚域的空间刚架结构。

## (三) 整体结构的三维可靠性分析方法

### 1. 基本假设

材料均匀且各向同性,已形成塑性铰的截面服从塑性变形理论,其余截面则表现为完全弹性;结构失效是由于形成一定的塑性铰组合(每一种组合称为一种失效形式),而形成机构。结构中各梁元均不会产生失稳。

### 2. 修正刚度矩阵和等效节点力的导出

由前述假定可知,弯矩在同一梁元上呈线性变化,即最大弯矩出现在两个端点之一或两个端点上。产生塑性铰的基本条件是屈服条件  $F_k = 0$ , ( $k = i, j$ ), 可用梁元节点力的线性函数来近似表达:

$$F_k = R_k - \{C_k\}^T \cdot \{X_i\} = 0 \quad (k = i, j) \quad (1)$$

式中  $R_k$  —— 梁元端面  $k$  的抗弯强度;

$\{C_k\}$  —— 由梁元几何尺度决定的常数;

$\{X_i\}$  —— 节点力向量。

对于立体刚架梁元,当考虑弯矩、轴力、扭矩及剪力的联合效应时,

$$R_k = \sigma_{yk} \cdot AZ_{ypk} \quad (k = i, j)$$

$$\{C_i\}^T = (a \cdot AZ_{ypi}/A_{pi} \cdot \text{sign}(F_{xi}), \quad b_y \cdot \sqrt{3} AZ_{ypi}/AF_{ypi} \cdot \text{sign}(F_{yi}), \\ b_z \cdot \sqrt{3} AZ_{ypi}/AF_{zpi} \cdot \text{sign}(F_{zi}), \quad c_x \cdot AZ_{ypi}/AZ_{xpi} \cdot \text{sign}(M_{xi}), \\ \text{sign}(M_{yi}), \quad c_z \cdot AZ_{ypi}/AZ_{zpi} \cdot \text{sign}(M_{zi}), 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$\{C_j\}^T = (0, 0, 0, 0, 0, 0, a \cdot AZ_{jpi}/A_{pi} \cdot \text{sign}(F_{xi}), \quad b_y \cdot \sqrt{3} AZ_{jpi}/AF_{ypi} \cdot \text{sign}(F_{yi}), \\ b_z \cdot \sqrt{3} AZ_{jpi}/AF_{zpi} \cdot \text{sign}(F_{zi}), \quad c_x \cdot AZ_{jpi}/AZ_{xpi} \cdot \text{sign}(M_{xi}), \\ \text{sign}(M_{yi}), \quad c_z \cdot AZ_{jpi}/AZ_{zpi} \cdot \text{sign}(M_{zi}))$$

式中  $\sigma_{yk}$  —— 梁元的屈服强度;

$AZ_{xpk}$  —— 绕  $x$  轴的塑性扭转模数;

$A_{pk}$  —— 梁元的截面积;

$AF_{ypk}, AF_{zpk}$  ——  $y$  轴,  $z$  轴的有效抗剪面积;

$AZ_{ypk}, AZ_{zpk}$  —— 对  $y, z$  轴的塑性剖面模数;

$a, b_y, b_z, c_x, c_z$  —— 分别为轴向力,  $y$  轴、 $z$  轴方向的剪力, 扭矩及绕  $z$  轴的弯矩效应系数。

当梁元处于弹性阶段时,有:

$$\{X_i\} = [K_i] \cdot \{\delta_i\} \quad (2)$$

式中  $[K_i]$  为梁元的刚度矩阵。当梁元端面应力达到屈服极限时, (2) 式不再满足。设  $\{\delta_i\}$  可分为弹性位移  $\{\delta_i^e\}$  和塑性位移  $\{\delta_i^p\}$ , 即

$$\{\delta_i\} = \{\delta_i^e\} + \{\delta_i^p\} = \{\delta_i^e\} + \{\delta_i^p\} + \{\delta_i^p\} \quad (3)$$

由塑性变形理论, 可得:

$$\left. \begin{aligned} \{\delta_i^p\} &= \lambda_i \frac{\partial F_i}{\partial X_i} = -\lambda_i \cdot \{C_i\} \\ \{\delta_j^p\} &= \lambda_j \frac{\partial F_j}{\partial X_j} = -\lambda_j \cdot \{C_j\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $\lambda_i, \lambda_j$  为表示塑性变形大小的因子。因此,

$$\{X_i\} = [K_i] \{\delta_i^e\} = [K_i] \cdot [\{\delta_i\} - \{\delta_i^p\}] \quad (5)$$

将(3)、(4)式代入(5)式可得:

$$\{X_i\} = [K_i] \{\delta_i\} + \lambda_i [K_i] \{C_i\} + \lambda_j [K_i] \{C_j\} \quad (6)$$

再将(6)式代入(1)式得:

$$\left. \begin{aligned} R_i - \{C_i\}^T \cdot [[K_i] \cdot \{\delta_i\} + \lambda_i [K_i] \cdot \{C_i\} + \lambda_j [K_i] \cdot \{C_j\}] &= 0 \\ R_j - \{C_j\}^T \cdot [[K_i] \cdot \{\delta_i\} + \lambda_j [K_i] \cdot \{C_j\} + \lambda_i [K_i] \cdot \{C_i\}] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由(7)式、(6)式联立方程可得:

$$\{X_i\} = [K_i^{(p)}]\{\delta_i\} + \{X_i'^{(p)}\} \quad (8)$$

式中  $[K_i^{(p)}]$  ——梁元的修正刚度矩阵;

$\{X_i'^{(p)}\}$  ——梁元的等效节点力向量。

笔者参照文献[4]中有关平面问题的基本方法,推导出了空间刚架结构系统梁元  $[K_i^{(p)}]$  和  $\{X_i'^{(p)}\}$  的具体表达式。由于篇幅所限,本文只给出了两端面失效时梁元的修正刚度矩阵  $[K_i^{(p)}]$  和等效节点力向量,详见文献[4]。其修正刚度矩阵为  $12 \times 12$  矩阵,等效节点力为  $12 \times 1$  矩阵,其中的 1, 3, 5, 7, 9, 11 等奇数行和列分别与  $(F_{xi}, F_{zi}, M_{xi}, F_{xj}, F_{zj}, M_{yj})$  有关,上述力和力矩对应于平面问题。

### 3. 梁元刚性端的处理

半潜式海洋平台的各主要构件端部都作了加强,相当于梁元左右两端分别具有长度为  $S_1$  和  $S_2$  的刚域,实际计算中梁元的长度应取扣除  $S_1$ 、 $S_2$  的部分作为计算段。可用如下式所示的转换矩阵来计入刚域的影响:

$$[\tau_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & S_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -S_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则:

$$\begin{aligned} \{K_i^{(p)}\}_r &= [\tau_i]^T [K_i^{(p)}] [\tau_i] \\ \{X_i'^{(p)}\}_r &= [\tau_i]^T \{X_i'^{(p)}\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $\{\delta_i\} = [\tau_i]\{\delta_i\}_r$ ,  $\{X_i\}_r = [K_i^{(p)}]_r\{\delta_i\}_r + \{X_i'^{(p)}\}_r$

### 4. 安全裕度的自动生成及失效衡准

本文考虑有  $n$  个单元,  $l$  个节点,每个节点有 6 个自由度,对各梁元从左端到右端的顺序进行编号,第  $i$  个梁元刚域内侧端面的失效衡准由下式确定:

$$Z_i = R_i - \{C_i\}^T \{X_i\} \leq 0 \quad (10)$$

设  $r_1, r_2, \dots, r_{p-1}$  梁元端面已失效,则没有失效的残存梁元端面  $i$  (第  $t$  个杆元)的安全裕度为<sup>[2]</sup>

$$Z_i^{(p)}(r_1, r_2, \dots, r_{p-1}) = R_i + \{C_i\}^T ([b_i^{(p)}]_r \sum_{k=1}^n [T_k]^T [\tau_k]^T \{X_k'^{(p)}\} - \{X_i'^{(p)}\}_r)$$

$$-\{C_i\}'[b_i^{(p)}]_r\{L\} = R_i + \sum_{k=1}^{p-1} a_{irk} R_{rk} \sum_{j=1}^{6i} - b_{rj} L_j \quad (11)$$

式中

$$[b_i^{(p)}]_r = [K^{(p)}]_{i,r} [T_i] [K^{(p)}]_{i,r}^{-1}$$

$$[T_k] = \begin{bmatrix} [T_e] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [T_e] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [T_e] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [T_e] \end{bmatrix}$$

$$[T_e] = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ -m_x & l_x & 0 \\ \frac{-m_x}{\sqrt{l_x^2 + m_x^2}} & \frac{l_x}{\sqrt{l_x^2 + m_x^2}} & 0 \\ -n_x l_x & m_x n_x & \sqrt{l_x^2 + m_x^2} \\ \frac{-n_x l_x}{\sqrt{l_x^2 + m_x^2}} & \frac{m_x n_x}{\sqrt{l_x^2 + m_x^2}} & \sqrt{l_x^2 + m_x^2} \end{bmatrix}$$

$$l_x = \cos(\bar{X}, \bar{X}'), \quad m_x = \cos(\bar{Y}, \bar{Y}'), \quad n_x = \cos(\bar{Z}, \bar{Z}')$$

$\{L\}$  为节点外载荷向量,  $a_{irk}$ ,  $b_{ij}$  均为矩阵相乘后所得系数。

#### (四) 整体结构失效概率的计算方法

本文采用分枝限界法寻找系统的主要失效形式和用 Ditlevsen 法求整体结构的失效概率(详见文献[2]、[5])。由于空间刚架系统的单元数目庞大,即使采用分枝限界法,也还存在计算时间过长、存储容量过大等问题,为此作者在原有工作的基础上,提出如下改进措施:

(1) 先给定一个临界失效概率值  $p_{fq}$  作为限界处理的初始值  $p_{fM}$ ,大量实践证明<sup>[6,7]</sup>,这是一个效率较高又能保证精度的有效措施。具体做法是:根据精度要求,设定一个初始临界失效概率,本文设  $p_{fq} = 10^{-16}$ 。如果  $p_{fq}$  取值过大,会造成被舍弃的路径过多,使其对系统失效概率的贡献量  $\sum_{j=1}^{n-m} G_j$  值过大,给计算精度带来不利影响。为此,本文设计了一个“收紧”  $p_{fq}$  值的措施:每一步分枝时,计算已舍弃路径产生概率的贡献量  $\sum_{j=1}^{n-m} G_j$ ,并将它与临界失效概率值  $p_{fq}$  作比较,当  $\sum_{j=1}^{n-m} G_j \geq 10^{-r_2} \cdot p_{fM}$  时,就认为不能再按原分枝限界法要求继续放大  $p_{fM}$  值,这时将现有的临界失效概率值  $p_{fq}$  乘以  $10^{-r_3}$ ,即收紧  $p_{fq}$ 。

(2) 限制失效路径阶段数:在文献[2]、[5]中详细介绍了分枝限界法的基本步骤,结构系统的失效是由下述刚度矩阵之比来判定:

$$\{|[K^{(q)}]|/|[K^{(0)}]|\} \leq \epsilon \quad (12)$$

式中,上标  $(q)$  和  $(0)$  分别代表第  $q$  次失效阶段和梁元处于完全弹性阶段。(12)式中小常数  $\epsilon$  的选取有一定的经验性,当  $\epsilon$  越小,失效阶段  $r_1, r_2, \dots, r_q$  的数目就越大,即分枝路径越长。

大量实验表明,当失效路径阶段值  $r_q$  达到足够大时,其路径产生概率值就趋于一定值。根据集合和概率的基本概念有:

$$p_f(A_1) \geq p_f(A_1 \cap A_2) \geq \dots \geq p_f(A_1 \cap A_2 \cap A_3 \dots \cap A_{r_q})$$

为此,可用下式取代(12)式

$$\frac{p_f(Z_{r_{p+1}}(r_1, r_2, \dots, r_p) \leq 0) - p_f(Z_{r_p}(r_1, r_2, \dots, r_{p-1}) \leq 0)}{p_f(Z_{r_p}(r_1, r_2, \dots, r_{p-1}) \leq 0)} \leq \epsilon_3 \quad (13)$$

式中的  $\epsilon$  可根据精度要求来确定,本文取  $\epsilon_3$  为  $10^{-3}$ 。

以上提出的限制分枝路径阶段数,实际上是用一条非完整的路径代替完整的失效路径。许多算例表明:在保证同一精度要求的条件下,采用这一改进措施,可明显减少计算时间。这种处理方法的结果偏安全,工程上是允许的。

## (五) 算 例

本文以如图 1 所示的半潜式海洋平台为例,计算整体结构的失效概率。

该平台具有 38 个节点,66 个杆单元,节点坐标值列于表 1,各杆元的几何尺度及特征量列于表 2。

各杆元端面的抗力及各节点所受的荷载均取为正态分布,变异系数均取 0.1。

表 1 节点坐标

节点号	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	节点号	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
1	-31.000	25.000	13.000	20	31.000	-25.000	13.000
2	-7.000	25.000	13.000	21	-31.000	25.000	-11.000
3	0.000	25.000	13.000	22	0.000	25.000	-11.000
4	7.000	25.000	13.000	23	31.000	25.000	-11.000
5	31.000	25.000	13.000	24	-31.000	-25.000	-11.000
6	-31.000	7.000	13.000	25	0.000	-25.000	-11.000
7	-7.000	7.000	13.000	26	31.000	-25.000	-11.000
8	7.000	7.000	13.000	27	-15.500	0.000	-11.000
9	31.000	7.000	13.000	28	15.500	0.000	-11.000
10	-31.000	0.000	13.000	29	-43.500	25.000	-17.000
11	31.000	0.000	13.000	30	-31.000	25.000	-17.000
12	-31.000	-7.000	13.000	31	0.000	25.000	-17.000
13	-7.000	-7.000	13.000	32	31.000	25.000	-17.000
14	7.000	-7.000	13.000	33	43.500	25.000	-17.000
15	31.000	-7.000	13.000	34	-43.500	-25.000	-17.000
16	-31.000	-25.000	13.000	35	-31.000	-25.000	-17.000
17	-7.000	-25.000	13.000	36	0.000	-25.000	-17.000
18	0.000	-25.000	13.000	37	31.000	-25.000	-17.000
19	7.000	-25.000	13.000	38	43.500	-25.000	-17.000

考虑以下各种工况:

(1) 满载半潜, 风暴横浪, 波峰居中。平台吃水 20m, 风暴横浪, 波峰位于平台中心线上, 波长等于立柱横向间距的 2 倍, 即 100m, 波高 15m, 波浪入射方向上, 即  $y$  的风速为 51.6m/s, 潮流速度 3kn。

(2) 满载半潜, 风暴横浪, 波谷居中。该工况与工况 1 相似, 仅波谷位于平台中心线上, 其他条件相同。

(3) 满载半潜, 风暴斜浪, 波峰居中。平台吃水 20m, 斜浪, 沿对角线方向入射, 与  $x$  轴夹角为  $38.8^\circ$ , 波长等于端柱对角线长 79.6m, 波高 15m, 对角线的端立柱处于同一波峰, 而另一条对角线上的端立柱处于不同的波谷。波浪入射方向上的风速为 51.6m/s, 潮流速度 3kn。

(4) 满载半潜, 风暴斜浪, 波谷居中。本工况只改变工况 3 的波浪位置, 对角线上的端立柱处于同一波谷, 而另一条对角线上的端立柱处于不同的波峰。

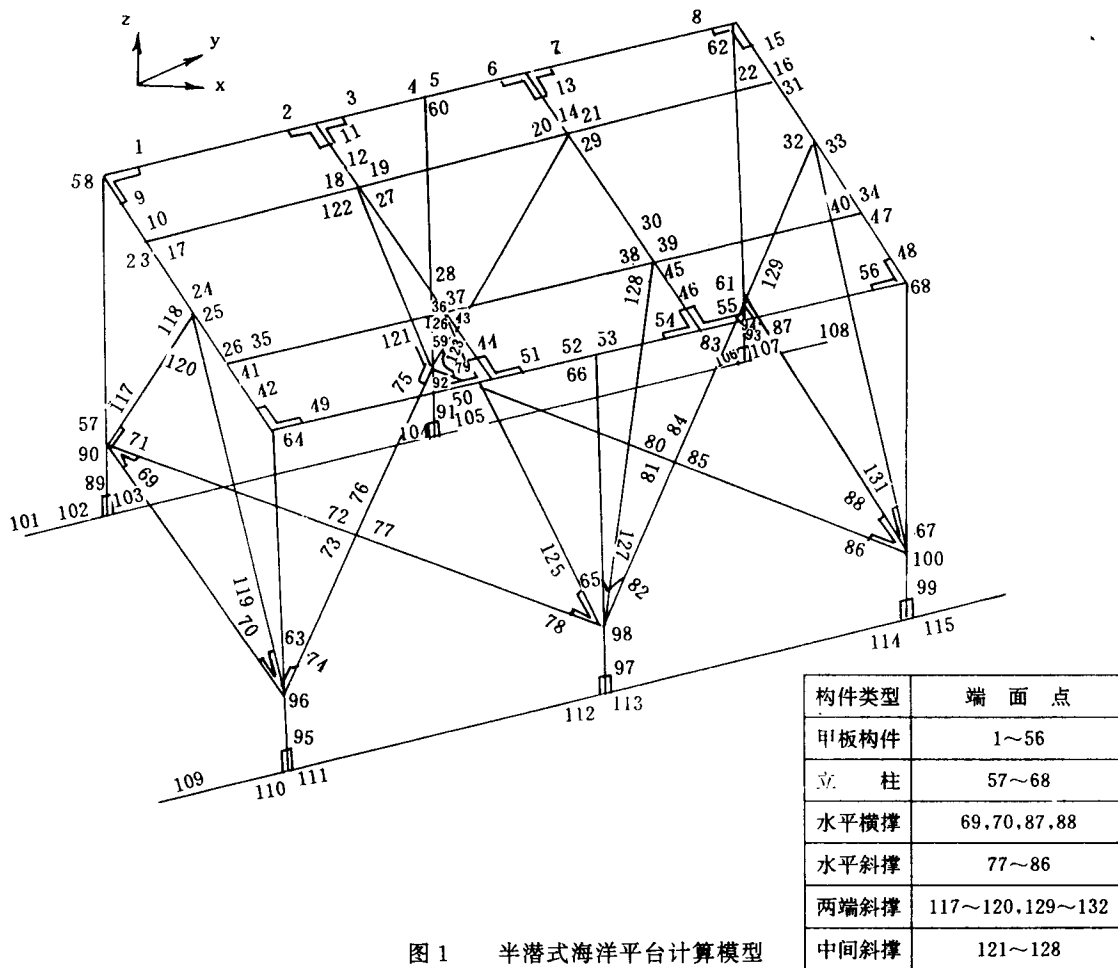


图 1 半潜式海洋平台计算模型

表 2 杆几何尺度及特征量

杆单元类别	杆单元号	截面积 $\text{m}^2$	扭转模量 $\text{m}^3$	对 $y$ 轴 惯性矩 $\text{m}^4$	对 $z$ 轴 惯性矩 $\text{m}^4$	塑性 扭转模数 $\text{m}^3$	绕 $y$ 轴 塑性剖面 模数 $\text{m}^3$	绕 $z$ 轴 塑性剖面 模数 $\text{m}^3$	刚性端 长度 $\text{m}$
甲板构件	1—4 25—28	0.3989	1.0286	2.0364	4.9774	0.8170	0.8706	0.9572	3.20
	5—8 12, 13 16, 17 21—24	0.3698	0.8582	1.2295	7.4913	0.6520	0.5977	0.9640	3.20 0.00 0.00 3.20
	9, 11 18, 20	0.3341	0.6159	1.6836	2.2324	0.5160	0.7010	0.6378	0.00
	10, 19	0.7033	12.6691	1.8421	2.3176	1.2572	1.1051	0.8838	0.00
	14, 15	0.7750	13.0572	1.2453	7.5765	1.4768	0.9958	1.2099	0.00
	29—34	0.5162	11.3380	5.1466	5.1466	1.1348	1.1437	1.1437	3.00
	45—50	0.7953	16.1757	7.8544	7.8544	1.8342	1.7445	1.7445	3.20
撑杆	35, 44	0.1490	0.0974	0.0727	0.0727	0.0609	0.0727	0.0727	4.50
	36—43	0.1612	0.1307	0.0785	0.0785	0.0840	0.0785	0.0785	4.50
	59, 60 65, 66	0.1022	0.00487	0.0279	0.0279	0.0417	0.0372	0.0372	6.24
	61—64	0.1204	0.0674	0.0327	0.0327	0.0517	0.0436	0.0436	6.36
	下浮体	51—58	1.1039	2.5731	7.3633	25.3980	1.8577	2.5468	3.6282 0.00

杨氏模量  $E = 210\text{kPa}$ , 剪切模量  $G = 81\text{MPa}$ , 屈服极限均值  $\sigma_s = 245\text{MPa}$

在上述四种工况下,半潜式平台整体结构的失效概率和较大的失效路径(由于(13)式控制,故表中列出的失效路径不一定是完全失效路径)在表 3~表 6 中列出。由上述可知,失效阶段数为 4,就满足精度要求。本文还计算不控制失效阶段,即用(12)式代替(13)式,其结果与采用改进措施后的系统失效概率完全一致,只是计算时间减少 34%,因此改进是可靠而有效的,它将促进可靠性理论的实用化进程。

## (六) 结 论

分析算例可得到如下结论:

1. 平台在斜浪状态下,整体结构的失效概率最大。
2. 在半潜式平台中,撑杆是最重要构件,在设计及检测中应引起重视。
3. 舍弃失效路径的贡献量比整体结构的失效概率很小,表明本文前述“收紧” $p_{JM}$ 的措施是有效的。本文中  $r_2, r_3$  均取为 3。



表3 工况1的整体结构可靠性分析结果

部分产生概率较大的路径	产生概率
[69, 82, 83, 70, 84]	$0.7076 \times 10^{-7}$
[74, 70, 76, 82, 88]	$0.2014 \times 10^{-8}$
[74, 78, 82, 69, 84]	$0.3418 \times 10^{-8}$
[74, 83, 88, 125]	$0.4063 \times 10^{-9}$
[75, 78, 73, 16]	$0.2931 \times 10^{-9}$
[78, 82, 87, 131]	$0.1563 \times 10^{-8}$
[79, 78, 83]	$0.1864 \times 10^{-10}$
[82, 75, 78]	$0.1610 \times 10^{-9}$
[82, 81, 78, 88]	$0.6212 \times 10^{-9}$
[83, 87, 130]	$0.3854 \times 10^{-9}$
[87, 82, 69]	$0.8126 \times 10^{-8}$
[87, 82, 88, 30]	$0.4267 \times 10^{-8}$
[88, 82, 86, 32]	$0.9764 \times 10^{-10}$
[125, 82, 19]	$0.9842 \times 10^{-12}$
[132, 88, 78]	$0.4968 \times 10^{-13}$
整体结构失效概率的下限值	$0.9210 \times 10^{-7}$
整体结构失效概率的上限值	$0.9214 \times 10^{-7}$
舍弃失效路径的贡献量	$0.7006 \times 10^{-10}$

表4 工况2的整体结构可靠性分析结果

部分产生概率较大的路径	产生概率
[69, 83, 87, 24, 76]	$0.1761 \times 10^{-7}$
[69, 70, 76, 92, 91]	$0.7659 \times 10^{-9}$
[70, 71, 78, 24, 83]	$0.9175 \times 10^{-9}$
[71, 75, 87, 130, 92]	$0.1529 \times 10^{-8}$
[78, 87, 70, 85]	$0.5828 \times 10^{-9}$
[79, 69, 83, 70]	$0.2936 \times 10^{-8}$
[80, 84, 98, 76]	$0.2159 \times 10^{-9}$
[92, 87, 78, 25]	$0.4831 \times 10^{-9}$
[83, 82, 125, 27]	$0.1035 \times 10^{-7}$
[83, 84, 69, 72]	$0.1752 \times 10^{-9}$
[87, 88, 82, 29]	$0.3081 \times 10^{-9}$
[88, 83, 74]	$0.8134 \times 10^{-10}$
[125, 78, 70]	$0.4377 \times 10^{-10}$
[127, 79, 83]	$0.9654 \times 10^{-13}$
[131, 87, 80]	$0.9981 \times 10^{-14}$
整体结构失效概率的下限值	$0.4181 \times 10^{-7}$
整体结构失效概率的上限值	$0.4183 \times 10^{-7}$
舍弃失效路径的贡献量	$0.7860 \times 10^{-11}$

表5 工况3的整体结构可靠性分析结果

部分产生概率较大的路径	产生概率
[69, 70, 74, 120, 78]	$0.2987 \times 10^{-7}$
[69, 87, 84, 74, 82]	$0.7769 \times 10^{-9}$
[73, 69, 119, 70, 74]	$0.8001 \times 10^{-8}$
[74, 77, 78, 131]	$0.6135 \times 10^{-8}$
[74, 127, 128]	$0.9655 \times 10^{-12}$
[82, 76, 69, 120, 84]	$0.8591 \times 10^{-8}$
[83, 87, 130, 131, 92]	$0.6407 \times 10^{-8}$
[118, 74, 83]	$0.9993 \times 10^{-9}$
[119, 74, 70, 82, 90]	$0.5726 \times 10^{-7}$
[119, 74, 82, 87, 68]	$0.4356 \times 10^{-8}$
[120, 119, 131, 74]	$0.1514 \times 10^{-8}$
[129, 87, 83, 74]	$0.5007 \times 10^{-8}$
[130, 84, 74, 69, 86]	$0.1108 \times 10^{-8}$
[130, 87, 84, 74, 68]	$0.9672 \times 10^{-8}$
[132, 87, 82]	$0.4675 \times 10^{-9}$
整体结构失效概率的下限值	$0.7415 \times 10^{-6}$
整体结构失效概率的上限值	$0.7417 \times 10^{-6}$
舍弃失效路径的贡献量	$0.8754 \times 10^{-10}$

表6 工况4的整体结构可靠性分析结果

部分产生概率较大的路径	产生概率
[69, 70, 75, 83]	$0.67754 \times 10^{-8}$
[75, 82, 69]	$0.8743 \times 10^{-12}$
[79, 126, 128, 74, 82]	$0.2969 \times 10^{-7}$
[82, 87, 79, 130, 83]	$0.1476 \times 10^{-7}$
[82, 119, 87, 94, 132, 69]	$0.9695 \times 10^{-8}$
[83, 87, 75, 125]	$0.2920 \times 10^{-8}$
[83, 130, 87, 75, 124]	$0.3461 \times 10^{-7}$
[118, 69, 75, 82, 119]	$0.7708 \times 10^{-11}$
[119, 120, 83, 87, 126]	$0.4008 \times 10^{-6}$
[120, 69, 74, 82]	$0.5887 \times 10^{-9}$
[130, 82, 75]	$0.8999 \times 10^{-12}$
[130, 87, 82, 75]	$0.1707 \times 10^{-9}$
[119, 120, 83, 87, 126]	$0.7536 \times 10^{-7}$
[121, 82, 119, 87, 94]	$0.4368 \times 10^{-8}$
[132, 82, 126, 128]	$0.4524 \times 10^{-8}$
整体结构失效概率的下限值	$0.5491 \times 10^{-6}$
整体结构失效概率的上限值	$0.5494 \times 10^{-6}$
舍弃失效路径的贡献量	$0.3976 \times 10^{-11}$

### 参 考 文 献

- 1 余建星等。半潜式海洋平台结构的疲劳失效概率计算。海洋工程,1994(2)。
- 2 胡云昌等。平面刚架结构系统的可靠性分析。中国造船,1991(4)。
- 3 余建星等。船体横框架的最优可靠性设计。中国造船,1993(4)。
- 4 余建星。船舶及海洋结构物的可靠性研究。[博士论文],上海交通大学,1994。
- 5 胡云昌等。结构系统的可靠性分析及应用。天津大学出版社,1992。
- 6 余建星。船体横框架的可靠性分析。[硕士论文],天津大学,1990。
- 7 刘闯。渤海导管架式平台的可靠性分析。[硕士论文],天津大学,1992。

## THREE-DIMENSIONAL RELIABILITY RESEARCH OF OVER-ALL STRUCTURE FOR SEMI-SUBMERSIBLE OFFSHORE PLATFORMS

YU Jianxing HU Yunchang KOU Xiong LI Chen,  
GUO Zhenbang WANG Yehong  
(Tingjin University)

### Abstract

In this paper, the reduced stiffness matrixes and the equivalent nodal forces of a three-dimensional frame at the plastic stage are deduced and a general programme to analyze the reliability of two- and three-dimensional structures is developed using a three-dimensional frame structural system to model or to idealize the semi-submersible platform. The branch-and-bound method is also improved significantly. Structural system reliability analyses are carried out through a calculated example, which verify the reliability and the generality of the proposed method and the programme.

**Key Words:** Offshore platform, Structural system, Three-dimensional reliability analysis