

# 基于随机有限元船舶空间结构系统可靠性分析

龙 兵, 安伟光, 蔡荫林

(哈尔滨工程大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要** 船舶结构工作环境恶劣, 影响其结构安全的因素很多, 所以对船舶结构进行结构可靠性分析是非常必要的. 为此采用空间梁元与加筋板格元来模拟船舶的三维空间结构, 考虑材料的强度、梁元件截面积、板元件厚度和外载荷均为随机变量, 采用随机有限元法分析了随机变量对船舶结构节点位移的影响. 并用改进的一次二阶矩法、分枝限界法、PNET 法对该结构系统进行结构可靠性分析. 最后给出数值算例, 其结果说明了该方法的有效性.

**关 键 词** 船舶结构 空间梁板结构 随机有限元法 结构可靠性 改进的一次二阶矩法

**中图分类号** O213.2 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7043(2002)03-0008-04

## Reliability Analysis for Ship Spatial Structure Based on SFEM

LONG Bing, AN Wei-guang, CAI Yin-ling

(College of Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract** Spatial girder element and SP panel element are used to model the three-dimensional spatial ship structure with consideration s accorded material intensity, girder section area, panel thickness and loads as stochastic variables, and stochastic finite element is adopted to analyze the influence of stochastic variables on the nodal displacement. Adopted first-order second-moment method, advanced branch-and-bound method and PNET method are used to do reliability analysis for the structure system. The numerical samples show that this method is effective.

**Key words** ship structure; spatial girder-panel structure; stochastic finite element method (SFEM); structural reliability; adapted first-order second-moment method

目前, 人们已普遍认识到许多工程结构系统具有不确定的因素. 特别对船舶与海洋平台等结构, 影响结构设计的随机因素很多, 例如作用在船舶上的波浪、潮水和风荷载都是不确定的. 结构中用的材料物理性能数据可能与提供的有所差异; 计算中引进的一些假设, 也会使计算模式与实际情况有所偏离等等<sup>[1]</sup>. 因此, 对船舶三维空间结构进行随机分析并评价其可靠性就显得非常有必要. 但由于船舶结构体系庞大, 随机变量多, 基于随机有限元的可靠度分析在船舶结构中应用缓慢. 本文针对船舶的实际结构, 采用杂交梁元和加

筋板格元来模拟船舶三维空间结构体系. 并针对某军舰的 #126-132 舱段和简化模型的盒子结构, 建立了空间梁板结构的有限元模型, 并得出了该结构的节点位移. 以船舶结构中的材料强度、梁元截面积、板元厚度和外载荷为随机变量, 用 Taylor 展开随机有限元, 分析了随机变量对船舶结构节点位移的影响. 然后, 根据结构系统可靠性理论, 采用改进的一次二阶矩法<sup>[2]</sup>与分枝限界法<sup>[2]</sup>, PNET 法<sup>[2]</sup>对空间梁板体系结构作了可靠性分析.

## 1 有限元模型

由文献[3]可知,根据大量的理论分析和实验研究,舰船船体是空间薄壁结构,且在各方向有加强件(横梁、纵桁等),所以采用等剪应力矩形平面应力板元(CSSR 元)和均匀加强筋矩形元(USR 元)组合而成的加筋板格元(SP 元)以及空间梁元加上带板组成的杂交梁元来模拟效果最好.对于空间梁元、等剪应力板元(CSSR 元)、均匀加强筋矩形元(USR 元),其局部坐标系下刚度矩阵和坐标变换矩阵参见文献[3].一般船舶结构体系庞大,故采用存储效率高一维数组带变宽方法存储总体刚度,采用对称分解法求解刚度方程<sup>[4]</sup>

## 2 基于随机有限元的结构可靠性分析

### 2.1 加筋板格元的 $\partial Z / \partial X_n$

定义板元的极限状态为板元中心处内力达到其抗力,即有极限状态方程

$$Z = \sigma_a t - \sigma_{eo} t = 0,$$

$$\text{或} \quad Z = \sigma_a - \sigma_{eo} = 0. \quad (1)$$

式中:  $\sigma_a$  为容许应力,  $t$  为板厚,  $\sigma_{eo}$  为板元中心处的等效应力,即

$$\sigma_{eo} = (\sigma_{xm}^2 + \sigma_{yo}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{yo} + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{xm}$ 、 $\sigma_{yo}$ 、 $\tau_{xy}$  为板元中心处的  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  方向的正应力与剪应力.

由式(1),可见功能函数  $Z$  是随机变量  $\sigma_a$  及  $\sigma_{eo}$  的函数,显然有  $\partial Z / \partial \sigma_a$ . 而  $\sigma_{eo}$  是节点位移的函数.故有

$$\frac{\partial Z}{\partial X_i} = - \sum_{j=1}^8 \frac{\partial \sigma_{eo}}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial X_i}, i = 1, N. \quad (3)$$

上式中的  $X_i$  为梁元面积、板厚和外载荷等随机变量,  $\partial \sigma_{eo} / \partial d_j$  为等效应力对板元节点位移的导数,根据不同位置的板元可推导出相应的表达式,  $\partial d_j / \partial X_i$  为节点位移对随机变量的导数,可由文献[5]介绍的随机有限元分析求得.

### 2.2 空间梁元对其 $\bar{z}$ 轴失效时 $\partial Z / \partial x_n$

当左截面失效时,采用线性近似失效准则<sup>[6]</sup>,此时的极限状态方程为

$$Z_{2q-1} = R_q - \{C_{2q-1}\}^T \{F\} = 0, \quad (4)$$

式中:  $R_q$  为等直梁  $q$  的抗力,系数列阵  $\{C_{2q-1}\}$  见文献[7],代入上式,有

$$Z_{2q-1} = \sigma_y w_{zq} - \left( \frac{w_{zq}}{A_q} \text{sg}(\bar{N}_{2q-1}) \bar{N}_{2q-1} + \right.$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{w_{zq}}{A_y^q} \text{sg}(\bar{V}_{y,2q-1}) \bar{V}_{y,2q-1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{w_{zq}}{A_z^q} \cdot \\ & \text{sg}(\bar{V}_{z,2q-1}) \bar{V}_{z,2q-1} + \\ & \frac{w_{zq}}{w_{xq}} \text{sg}(\bar{M}_{x,2q-1}) \bar{M}_{x,2q-1} + \\ & \frac{w_{zq}}{w_{yq}} \text{sg}(\bar{M}_{y,2q-1}) \bar{M}_{y,2q-1} + \\ & \left. \text{sg}(\bar{M}_{z,2q-1}) \bar{M}_{z,2q-1} \right) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_y$  为元件的屈服应力,  $\text{sg}(\cdot)$  表示的符号,  $A_q$  为等直梁  $q$  的截面积,  $A_{yq}$  和  $A_{zq}$  为元件  $q$  沿  $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  方向的抗剪面积,  $w_{xq}$  为元件  $q$  绕  $\bar{x}$  轴的塑性扭转系数,  $w_{zq}$ 、 $w_{yq}$  为  $q$  元件对应于弯矩,  $M_{z}$ 、 $M_{y}$  的塑性剖面模数. 根据不同位置的梁元,可得极限方程及其对随机变量的导数,由于表达式较繁,故省略.

梁右截面失效时,可推导出类似的公式. 等剪应力矩形板元失效后,其减缩后刚度认为是零,由文献[3]可推导得其反向节点力. 空间梁元端面失效后其缩减刚度与反向节点力参见文献[7]. 失效模式间的相关系数与分枝限界法参见文献[2].

## 3 数值算例

(1) 对船体最简单的空间梁板结构模拟如图 1 所示的盒子结构,荷载均值为  $P = 44.45 \text{ kN}$ , 元件的弹性模量为  $6.889 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2$ , 剪切模量为  $2.3 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2$ , 容许应力为  $66.89 \text{ kN/cm}^2$ . 梁元有 10 个,其截面为圆形,截面积均为  $6.323 \text{ cm}^2$ ,板元有 15 个,厚度均为  $0.4978 \text{ cm}$ . 元件抗力的变异系数为 0.1,其他随机变量的变异系数均为 0.2,假定所有的随机变量都服从正态分布.

利用随机有限元法,计算了节点位移对随机变量梁元截面积、板元厚度与外载荷的导数. 图 2 比较了板元在均值点和验算点展开求可靠性指标值的差异. 图 3 显示了随机变量在均值处对 9 号板元节点位移的影响. 采用分枝限界法搜寻系统主要失效模式,得到主要失效模式如表 1 所示(失效路径全为板的编号). 系统失效模式判别准则,本文采用 ①整体刚度奇异或 ②节点位移大于  $50 \text{ cm}$ . 采用 PNET 法求系统失效概率为  $P_f = 4.40 \times 10^{-4}$ ,系统可靠性指标为  $\beta_s = 3.32379$ .

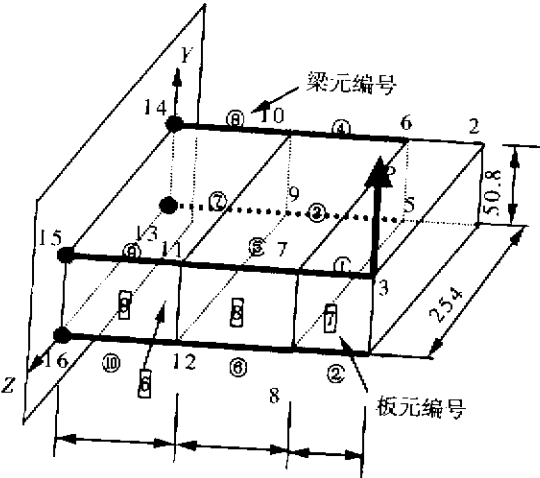


图 1 盒子结构示意图

Fig.1 The structure of a box

表 1 盒子结构主要失效模式

Table 1 Main fault models of the box

| 失效模式号 | 失效路径  | 可靠性指标   | 失效概率                   |
|-------|-------|---------|------------------------|
| 1     | 9-8-7 | 3.446 6 | $2.838 \times 10^{-4}$ |
| 2     | 9-8-7 | 3.794 9 | $7.384 \times 10^{-5}$ |
| 3     | 9-7   | 3.823 3 | $6.582 \times 10^{-5}$ |
| 4     | 9-6   | 4.203 0 | $1.316 \times 10^{-5}$ |
| 5     | 7     | 4.330 5 | $7.437 \times 10^{-6}$ |

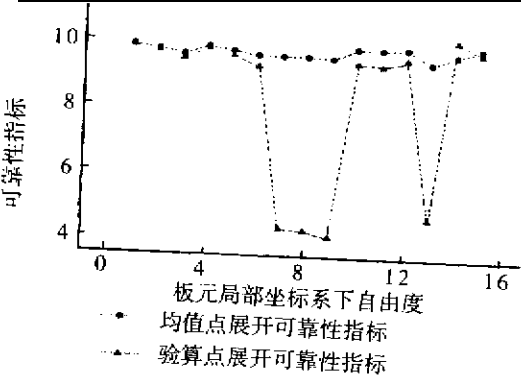


图 2 盒子结构板元可靠性指标比较  
(分别采用一次二阶矩法和改进  
的一次二阶矩法)

Fig.2 Comparison of reliability index of the box (using FOSM and AFOSM)

(2)图 4 是某军舰 #126~#132 肋位间舱段结构示意图,该有限元模型共有 143 个节点,其中在 #132 肋位上的 104~143 节点被固定约束.共有 115 个梁元,按截面类型分为 34 类;有 142 个板

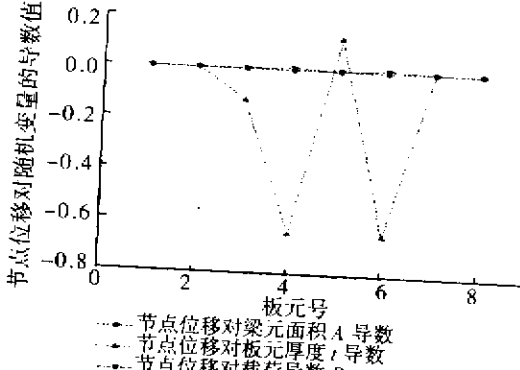


图 3 9 号板元节点位移对梁元面积  $A_i$  和板厚  $t_i$  以及载荷  $P_i$  的导数

Fig.3 Derivative of the nodal displacement to  $A_i$ 、 $T_i$ 、 $P_i$  of No.9 panel element

元,板按厚度分为 9 类;外载荷有 4 类,重量  $W_0$ 、浮力  $Q_0$ 、剪力  $V_0$ 、弯矩  $M_0$ ,如图 5 所示.元件抗力的变异系数为 0.1,其他随机变量的变异系数

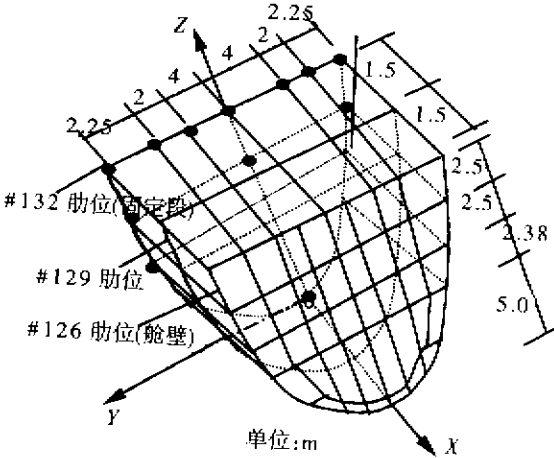


图 4 某舰 #126~#132 舱段结构示意图

Fig.4 The structure of a cabinet of a warship from #126 to #132

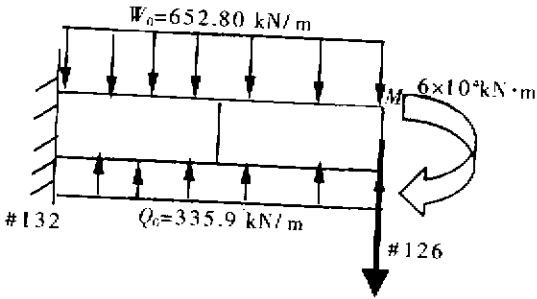


图 5 #126~#132 舱段承受载荷示意图

Fig.5 Load model of the cabinet from #126 to #132

均为 0.2,假定所有的随机变量都服从正态分布.

图 6 给出了未约束节点 1-103 的竖向位移,由于荷载和结构都是对称的,所以节点位移也是对称的.并且在有开口的附近,节点位移都比较大.图 7 给出了梁元面积、板元厚度和外载荷等随机变量在均值处对第一自由度(即节点 1 沿 X 方向)的位移的影响,可以看出,板厚对该节点位移影响最大.

运用可靠性基本理论,求出系统的失效概率近似为  $p_{fs}=5.138\ 24\times 10^{-6}$ .

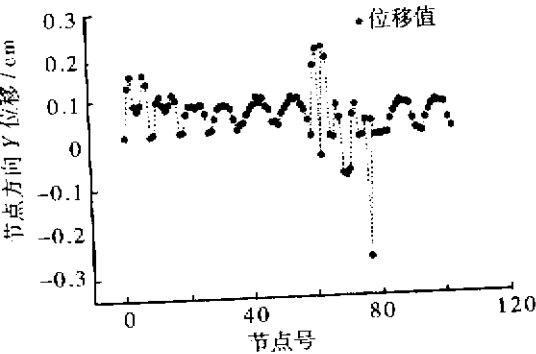


图 6 #126 与 #129 肋位上的节点 Y 方向的线位移

Fig.6 The nodal displacement along Y axis of #126 and #129

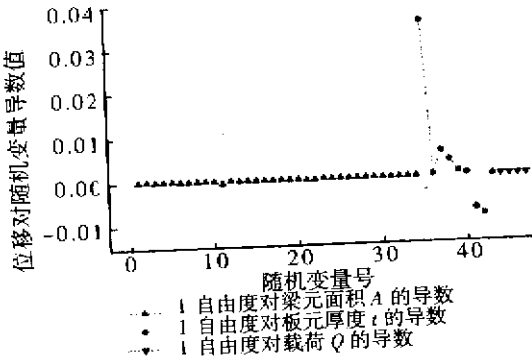


图 7 #126-#132 结构第一自由度的位移对随机变量梁元面积  $A_i$  和板元厚度  $t_i$  以及载荷  $Q_i$  的导数

Fig.7 Derivative of the nodal displacement to  $A_i, t_i, P_i$  of No.1 free degree of the structure #126-#132

筋板格元来模拟船舶的三维空间结构,计算模型是合理的,计算精度比较高.这对于当前我国采用船舶规范设计,是一个有益的补充,因为规范设计一般只作局部构件验算,如强力甲板的强度与稳定等.通过船舶结构的随机有限元分析,可以了解材料强度、每类梁元的面积、每类板的厚度以及外载荷(如重力、浮力、波浪弯矩等)的随机性对结构中每个具体构件节点位移的影响.在船舶结构可靠性分析中,可以发现,对于有大开口周围的构件可靠性一般都比较低,这对于船舶的可靠性分析,具有参考价值.本文的核心内容为:

(1)采用杂交梁元和均匀加筋的板格元来模拟船舶的三维空间结构,利用改进的一次二阶矩法和随机有限元法,推导出求结构可靠性指标的方法并进行系统可靠性分析.(2)独立开发了一套计算空间梁板(板可含加强筋)体系结构的有限元、随机有限元、结构可靠性分析的程序.该程序梁节点考虑了 6 个自由度,板元节点考虑 3 个线位移.该程序经适当改动,可用于弹性板、空间桁架、空间梁系、杆板结构等分析.

参考文献:

[1]邵文蛟. 不完整结构的可靠性分析[M]. 北京:国防工业出版社,1997.  
[2]安伟光. 结构系统可靠性和基于可靠性的优化设计[M]. 北京:国防工业出版社,1997.  
[3]休斯 O F 著. 船舶结构设计[M]. 张祥孝译. 广州:华南理工大学出版社,1988.  
[4]王勖成,邵 敏. 有限元法基本原理和数值方法[M]. 第二版. 北京:清华大学出版社,1997.  
[5]安伟光. 随机有限元法在不确定性分析中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报,2002,23(1):132-135.  
[6]THOFT-CHRISTENSEN P, MUROTSU Y. Application of structural systems reliability theory[M]. Berlin: Springer-Verlag,1986.  
[7]胡云昌,郭振邦. 结构系统可靠性分析原理及应用[M]. 天津:天津大学出版社,1992.

[责任编辑 李玲珠]

4 结 论

通过对盒子结构和 #126-#132 舱段结构的有限元分析,可以看出,采用杂交梁元和均匀加