

基于遗传模拟退火算法的结构可靠性分析

龙 兵^{1,2}, 安伟光³, 姜兴渭²

(1. 电子科技大学 自动化学院, 四川 成都 610054; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了克服一次二矩法在迭代求可靠性指标时可能不收敛或收敛于局部验算点的缺点以及现有遗传算法局部搜索效率不高的问题, 提出了采用混合模拟退火与遗传算法计算结构可靠性的新方法. 先采用遗传算法开始随机搜索, 通过选择、交叉、变异等遗传操作产生新的个体, 再对这些个体分别进行模拟退火, 以其结果作为下一代群体中的个体. 结合有限元计算, 给出了船舶三维空间梁板结构的功能函数, 并采用遗传模拟退火算法求结构可靠性指标. 算例分析表明该方法计算精度高, 为求解结构可靠性指标提供了一种新的思路.

关键词: 结构可靠性; 遗传算法; 模拟退火; 有限元法; 空间梁板结构;

中图分类号: O213.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7043(2005)06-0753-05

Structural reliability analysis based on genetic simulated annealing algorithm

LONG Bing^{1,2}, AN Wei-guang³, JIANG Xing-wei²

(1. School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To overcome the disadvantage of non-convergence or convergence to a local optimal point obtained by the first-order reliability method (FOSM) and the low efficiency problem related to the current genetic algorithm, a new method to compute the structural reliability index is proposed that combines the genetic algorithm and the simulated annealing algorithm. First the genetic algorithm was used to produce a new population by selection, crossover, and mutation. Then the individual of the population was simulated annealing respectively and the resultant new individuals were passed to the next generation. Formulas related to the function of a spatial girder element and panel element for a ship structure were given combining the finite element method (FEM), and the reliability index was obtained by a genetic simulated annealing algorithm. The example shows that this new method of structural reliability analysis is more precise than traditional methods.

Keywords: structural reliability; genetic algorithm; simulated annealing algorithm; finite element method (FEM); ship structure

因为船舶和飞行器运行环境的特殊性, 一旦结构失效则会造成大量的人员和财产损失^[1], 所以对其整体结构进行可靠性分析非常必要. 大部分的船舶和空间飞行器的结构可以认为是空间梁元与加筋板格元组成. 笔者曾采用随机有限元与改进的一次二矩法

对空间梁板结构进行了可靠性分析^[2-6], 取得了一定的成果. 但在计算中也发现一次二矩法(FOSM)仍存在一些问题^[7], 如: 因为功能函数非显式, 求功能函数的一阶偏导数比较复杂; 初始点选择不好可能导致迭代不收敛, 而且收敛也不能保证是最优的值; FOSM 将功能函数在计算点处线性化, 当功能函数为强非线性时, 计算精度可能受到影响.

作为一种现代全局优化算法, 遗传算法因不受目标函数是否连续、线性、可微等条件的限制, 已在

收稿日期: 2004-8-31.

基金项目: 国防科技工业委员会基础研究基金资助项目(Z192001A001);

国家 863 基金资助项目(2002AA721063).

作者简介: 龙 兵(1974-), 男, 博士研究生;

安伟光(1943-), 男, 教授, 博士生导师;

姜兴渭(1936-), 男, 教授, 博士生导师.

结构可靠性中得到初步的应用^[7-9]。但遗传算法也有一些不足,如容易产生早熟现象、局部寻优能力较差等,且效率不太高^[10-12]。结合空间梁板结构的有限元计算,提出采用混合模拟退火算法与遗传算法的结构可靠性计算方法,算例表明该方法是非常有效的。

1 可靠性指标 的计算

1.1 可靠性指标 的优化计算模型

哈-林二矩法(H-L法)的可靠性指标 定义为标准正态空间中从坐标原点到失效面的最短距离,故 的求解转化为如下的最优化问题^[7-9]:

$$\min f(X) = \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$\text{s.t. } Z(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (2)$$

式中: x_i 是相互独立的标准正态随机变量。对相关的随机变量,先将其转化为独立变量,再利用三参数尾估计法将不服从正态分布的随机变量转化为正态随机变量,最后再转为标准正态随机变量。另约束条件中 $Z(X)$ 为功能函数,后面将给出空间梁元和板元的功能函数表达式。

1.2 遗传模拟退火算法求

1.2.1 遗传模拟退火算法的流程图

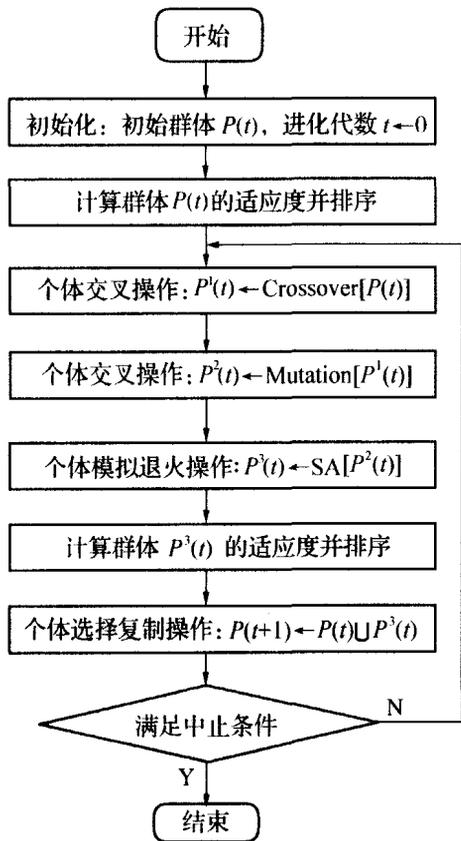


图 1 遗传模拟退火算法流程图

Fig. 1 Flow chart of genetic-simulated annealing algorithm

遗传算法的局部搜索能力较差,但把握搜索过程总体的能力较强,而模拟退火算法具有较强的局部搜索能力,但对整个搜索空间的状况了解不多,从而使模拟退火算法的运行效率不高^[10-12]。结合这 2 种算法的优点,采用遗传算法为主体流程,把模拟退火机制融入其中,用以进一步调整优化群体。如图 1 所示。

1.2.2 遗传算法设计

为了加快遗传算法的收敛速度,避免早熟以及提高计算精度,采用如下措施^[7-9]:

1) 对随机变量采用实数编码,其优点是可方便表示大范围的数,同时也降低了遗传算法的复杂性,提高了计算效率。实数编码是问题的解向量组成的个体,如某个体 S_i 可以表示为

$$S_i = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}). \quad (3)$$

2) 适应度函数定义为 $F(X) = C_{\max} -$, 其中 C_{\max} 是一个较大的常数,可取为当代最大目标函数值的 1.05 倍。

3) 交叉与变异操作。交叉算子采用单点交叉,先对群体中的个体进行随机配对,再随机选择一个交叉点 K ,对 K 点后的分量进行交叉。若生成 $N - K$ 个 $(0, 1)$ 之间的随机数为 $a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_n$, 设 2 个父代个体分别为

$$S_1 = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}),$$

$$S_2 = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_n^{(2)}),$$

则 2 个后代定义为

$$S_{C1} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_k^{(1)}, a_{k+1}x_k^{(1)} + (1 - a_{k+1})x_{k+1}^{(2)}, \dots, a_nx_n^{(1)} + (1 - a_n)x_n^{(2)}),$$

$$S_{C2} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_k^{(2)}, a_{k+1}x_k^{(2)} + (1 - a_{k+1})x_{k+1}^{(1)}, \dots, a_nx_n^{(2)} + (1 - a_n)x_n^{(1)}). \quad (4)$$

变异算子采用正态变异算子,即用符合均值为 μ 、方差为 的正态分布的一个随机数来替换原有的基因值^[10]。

对于交叉概率 P_c 和变异概率 P_m ,若取值过大会破坏已有较好的模式,取值过小,产生新个体的速度可能太慢,故根据进化代数自适应调整,其公式为^[8]

$$P_c = 0.9 - 0.3t / N_T, P_m = 0.2 - 0.19t / N_T. \quad (5)$$

式中: t 为当前进化代数, N_T 为总进化代数。

4) 选择复制操作。采用比例选择算子,但为了对优秀个体的保护,将父代种群中适应度最大的 10% 优良个体直接传递到子代群体中。

5) 中止准则:当连续 10 代最大适应度 $F(X)$ 未发生变化或者已达到最大进化代数 $t_{\max} = 150$ 。

1.2.3 模拟退火算法设计

模拟退火算法(simulated annealing)是基于金属退火的机理而建立的一种全局最优化方法,它的构成要素有^[10-13]:

1) 搜索空间:也称为状态空间,它由可行解 S_i 的集合组成;

2) 能量函数:能量函数也就是需要进行优化计算的目标函数,这里 $E(X) =$;

3) 状态转移规则:它指从一个状态 X 向另一个状态 X' 的转移概率 PT , 设 T 为温度,采用 Metropolis 准则确定 PT ^[13]:

$$PT(X \rightarrow X') = 1, \text{当 } E(X) \geq E(X');$$

$$PT(X \rightarrow X') = \exp\left(\frac{E(X) - E(X')}{T}\right) >$$

$$\text{Rand}/0, 1],$$

当 $E(X) > E(X')$. (6)

4) 冷却进度表:指从某一高温状态向低温状态冷却时的降温管理表,根据该算法的特点以及计算经验,构造如下的温度冷却进度表:初始温度 $T_0 = 100$; 衰减函数 $T_{k+1} = 0.95 T_k$; 循环参数 $st_{\max} = 10$.

5) 停止准则:循环参数 $st > 10$ 或最终温度 $T_f < 0.01$.

通常初始温度 T_0 较高,衰减函数较小,则迭代次数较多,精度高,反之则计算效率高、精度较低. 因该模拟退火算法嵌套在遗传算法中,精度要求不太高,故循环控制参数 st_{\max} 取的比较小. 关于遗传算法与模拟退火算法的详细计算步骤,参见文献[10-11].

2 空间梁板结构的功能函数

2.1 空间梁元的功能函数

如图 2 所示,梁左端标示的是 6 个节点位移,梁右端标示的是对应的节点内力. 当梁左截面 (i 截面) 对 z 轴失效时,采用线性近似失效准则,此时的极限状态方程为^[5-6]

$$Z_{2q-1} = \frac{1}{y} w_{zq} - \left[\frac{w_{zq}}{A^q} sg(N_{2q-1}) N_{2q-1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{w_{zq}}{A_y^q} sg(V_{y,2q-1}) V_{y,2q-1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{w_{zq}}{A_z^q} sg(V_{z,2q-1}) V_{z,2q-1} + \frac{w_{zq}}{w_{xq}} sg(M_{x,2q-1}) M_{x,2q-1} + \frac{w_{zq}}{w_{yq}} sg(M_{y,2q-1}) M_{y,2q-1} + sg(M_{z,2q-1}) M_{z,2q-1} = 0 \right]. \quad (7)$$

式中:各参数的含义在文献[5-6]中有详细的说明.

式(7)是局部坐标系下梁元的功能函数,而有限元求出的结点位移都是整体坐标系下的值,需要进行坐标转换. 另外因为节点位移与节点力与整个系统的刚阵与外荷载有关,故梁元的功能函数包含所有的随机变量. 当梁右截面 (j 截面) 失效或对 y 轴失效时,可推导出类似的公式,详见文献[6].

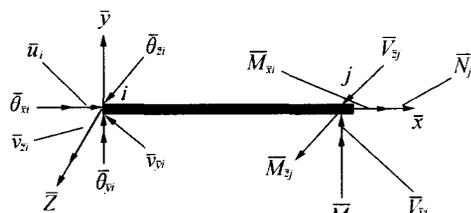


图 2 空间梁元节点位移和内力图

Fig. 2 Nodal displacement and strength of the girder

2.2 板元的功能函数

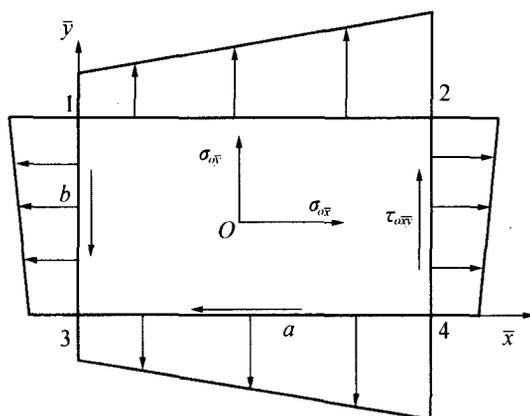


图 3 板元应力图

Fig. 3 Stress of the panel element

如图 3 所示,定义板元的极限状态为板元中心处内力达到其抗力,即极限状态方程^[5]为

$$Z_B = a - \left(\frac{2}{\sigma_x} + \frac{2}{\sigma_y} - \frac{2}{\sigma_x \sigma_y} + 3 \frac{2}{\sigma_x \sigma_y} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

式中: a 为容许应力, σ_x 、 σ_y 、 σ_{xy} 为局部坐标系下板元中心处的 x 、 y 方向的正应力与剪应力,由文献[4,6]可得其表达式为

$$\sigma_x = (-b\mu_1 - \mu\alpha\nu_1 + b\mu_2 - \mu\alpha\nu_2 + b\mu_3 + \mu\alpha\nu_3 - b\mu_4 + \mu\alpha\nu_4),$$

$$\sigma_y = (-\mu b\mu_1 - \alpha\nu_1 + \mu b\mu_2 - \alpha\nu_2 + \mu b\mu_3 + \alpha\nu_3 - \mu b\mu_4 + \alpha\nu_4),$$

$$\tau_{xy} = (-a\mu_1 - b\nu_1 - a\mu_2 + b\nu_2 + a\mu_3 + b\nu_3 + a\mu_4 - b\nu_4). \quad (9)$$

式中: $\mu = \frac{E}{2ab(1-\mu)}$, $\alpha = \frac{1-\mu}{2}$. a 、 b 分别是板元的长度与宽度; μ_i 、 ν_i 分别是局部坐标系下节点 i

处 x 与 y 方向的节点位移,由有限元求得.与梁元类似,板元的功能函数也包含所有的随机变量.

3 计算实例

采用文献[5]中盒子结构作为算例,如图 4 所示.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 kN/cm^2 .梁元有 10 个,其截面为圆形,截面积均为 6.32 cm^2 ,板元有 15 个,厚度均为 0.498 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.图 4 中,13~16 节点组成的平面被固定,圆圈中的数字表示梁元编号,方框中的数字表示板元编号,长度单位为 cm .

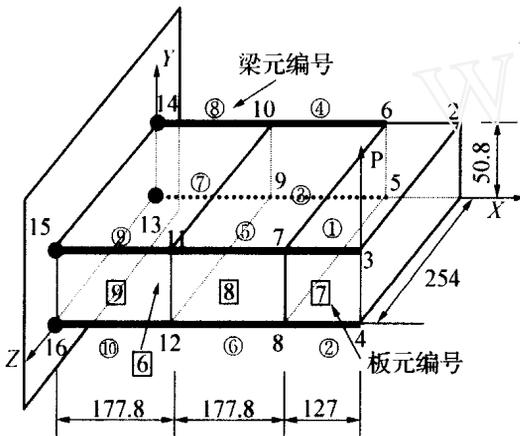


图 4 盒子结构示意图

Fig. 4 The structure of a box

采用遗传模拟退火算法对图 4 中的每个板元与梁元进行可靠性指标计算,取种群规模 $M = 50$,其他参数如前所示.对 9 号梁元求得最优可靠性指标为 $\beta_1 = 4.562$,而由迭代算法求得可靠性指标 $\beta_2 = 4.981^{[6]}$,显然采用该算法得到可靠性指标更精确.系统失效模式的判别准则为:系统整体刚阵奇异或节点位移大于 5 cm .采用分支限界法^[1]寻求系统主要失效模式如表 1 所示.从表中数据可见,它比原来的方法求得可靠性指标要精确一些^[5].采用 PNET 法^[1]求得系统失效概率 $P_{fs} = 0.91 \times 10^{-3}$.

表 1 盒子结构主要失效模式
Table 1 Main fault models of the box

失效模式	失效路径	可靠性指标	失效概率
1	9 - 8 - 7	3.214	6.522×10^{-4}
2	9 - 8 - 6	3.680	1.166×10^{-4}
3	9 - 7	3.705	1.057×10^{-4}
4	9 - 6	4.058	2.275×10^{-5}

4 结束语

克服了传统一次二矩迭代法求可靠性指标不易获得功能函数的偏导数且迭代不稳定的缺点.同时,采用模拟退火算法对遗传算法进行改进,提高了遗传算法的局部搜索能力,改善了遗传算法的效率.结合空间梁板的有限元计算,给出了空间梁元与板元的功能函数表达式.通过算例表明,该方法是有用的,为求解船舶与飞行器空间梁板结构的可靠性指标提供了一种新的思路.

参考文献:

[1] 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.
AN Weiguang. Structure system reliability analysis and optimal design based on reliability[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997.

[2] 安伟光, 梁波. 基于随机有限元法的结构系统可靠性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(2): 78 - 85.
AN Weiguang, LIANG Bo. Reliability analysis of structural systems by using stochastic finite element method[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1999, 20(2): 78 - 85.

[3] 安伟光, 朱卫兵, 严心池. 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.
AN Weiguang, ZHU Weibing, YAN Xinchu. Application of stochastic finite element method to analysis of uncertainties[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(1): 132 - 135.

[4] 严心池, 安伟光, 陈卫东, 等. 大型舰船结构的可靠性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(2): 147 - 152.
YAN Xinchu, AN Weiguang, CHEN Weidong, et al. Reliability analysis for large ship structure[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(2): 147 - 152.

[5] 龙兵, 安伟光, 蔡荫林. 基于随机有限元船舶空间结构系统可靠性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(3): 8 - 11.
LONG Bing, AN Weiguang, CAI Yinling. Reliability analysis for ship spatial structure based on SFEM[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(3): 8 - 11.

[6] 龙兵. 船舶结构可靠性分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
LONG Bing. Reliability analysis for ship structure system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2002.

[7] 赵衍刚, 汪近仁. 一个以遗传算法为基础的结构可靠性分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(3): 47 - 58.
ZHAO Yangang, JIANG Jinren. A structural reliability

analysis method based on genetic algorithm[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(3): 47 - 58.

[8] 张庆雅,汪亮,孙东. 遗传算法在固体发动机结构可靠性计算中的应用[J]. 固体火箭技术, 2002, 25(2): 13 - 17.
ZHANG Qingya, WANG Liang, SUN Dong. The application of an improved genetic algorithm in computing structural reliability of SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 25(2): 13 - 17.

[9] 黄燕,李慧强. 悬臂支护结构可靠性分析的遗传算法[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(7): 106 - 1108.
HUANG Yan, LI Huiqiang. Genetic algorithm for the reliability analysis of cantilever retaining structure[J]. Journal of Huazhong Univ of Sci & Tech, 2001, 29(7): 106 - 1108.

[10] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic algorithm and its application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997.

[11] 刑文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
XING Wenxun, XIE Jinxing. Modern optimization algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.

[12] 张晖,吴斌,余张国. 引入模拟退火机制的新型遗传算法[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(1): 39 - 42.
ZHANG Hui, WU Bin, YU Zhangguo. Research of new genetic algorithms involving mechanism of simulated annealing[J]. Journal of UEST of China, 2003, 32(1): 39 - 42.

[13] 吴剑国,吴亚舸,刘从军. 基于模拟退火算法的潜艇结构系统可靠性计算[J]. 海洋工程, 2003, 21(3): 24 - 28.
WU Jianguo, WU Yage, LIU Congjun. Reliability analysis of submarine structures based on simulated method[J]. The Ocean Engineering, 2003, 21(3): 24 - 28.

(上接第 748 页)

5 结束语

平台式惯导系统在状态切换过程中由于陀螺控制信息突变而产生超调现象,降低了导航系统精度. 采用自动补偿技术能保证陀螺仪控制信息在切换时刻保持不变,从而使得导航系统参数的超调得到抑制. 计算机仿真和工程试验的结果表明该补偿技术具有重要的工程实际应用价值.

参考文献:

[1] 吴俊伟,曾启明,聂莉娟. 惯性导航系统的误差估计[J]. 中国惯性技术学报, 2002, 12(6): 1 - 5.

WU Junwei, ZENG Qiming, NIE Lijuan. Estimation of INS's errors[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 12(6): 1 - 5.

[2] 黄德鸣,程禄. 惯性导航系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 1999.
HUANG Deming, CHENG Lu. Inertial navigation system [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1999.

[3] 张志涌. 精通 Matlab6. 5 版[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.
ZHANG Zhiyong. Mastering Matlab6. 5[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.