

文章编号:1000-6893(2009)12-2316-06

考虑模糊失效准则的结构疲劳寿命可靠性

李锋^{1,2}, 孟广伟^{1,2}, 沙丽荣²

(1. 吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室, 吉林 长春 130025)

(2. 吉林大学 机械学院, 吉林 长春 130025)

Reliability Analysis of Structure Fatigue Life Under Fuzzy Failure Criteria

Li Feng^{1,2}, Meng Guangwei^{1,2}, Sha Lirong²

(1. State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130025, China)

(2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

摘要: 针对常规设计中对功能函数失效状态规定与常识不符这种情况,提出了考虑模糊失效准则的结构疲劳寿命可靠性,将结构寿命视为随机变量,而设计寿命视为模糊变量,研究了设计寿命服从线性 L-R 分布时的结构疲劳寿命可靠度,给出了随机载荷下结构疲劳寿命概率密度函数的确定方法,并提出了随机变量与模糊变量相组合时的一种新的可靠度数值计算方法,该方法先利用 Gauss-Legendre 积分将模糊可靠度求解的二次积分转换成一次积分,列出与 Legendre 多项式零点相对应的阈值,然后在给定的阈值下,将设计寿命转化成普通的截集区间,在截集区间内假定结构疲劳寿命概率密度函数服从均匀分布,利用 Monte Carlo 模拟得到对应于该阈值的结构疲劳寿命可靠度值。数值结果表明,常规设计下结构的疲劳寿命可靠度偏于危险。

关键词: 模糊失效准则; 疲劳; 可靠性; Gauss-Legendre 积分; Monte Carlo 模拟

中图分类号: V215.5; TB114.3 **文献标识码:** A

Abstract: In view of the fact that the failure state of the performance function in the traditional design is often inconsistent with common sense, a reliability model of fatigue life which takes into consideration the fuzzy failure criteria is presented. The fatigue life and the fatigue design life are treated respectively as a random variable and a fuzzy random variable, and reliability is analyzed when the fatigue design life obeys linear L-R distribution. The probability density function of fatigue life under random load is deduced. A new numerical algorithm for fuzzy reliability analysis with random variables and fuzzy variables is developed. The double integration to calculate fuzzy reliability is first reduced to univariate integration by use of Gauss-Legendre integration. Thresholds corresponding to Gauss-Legendre abscissas are listed, and the fatigue design life is truncated to the subset under the given threshold. Then the probability density function of fatigue life is supposed to be of uniform distribution in the truncated subset. The reliability of structure fatigue life corresponding to the threshold can be obtained using Monte Carlo simulation. Numerical results show that the fuzzy reliability analysis of fatigue life tends to provide more safety than traditional analysis does.

Key words: fuzzy failure criterion; fatigue; reliability; Gauss-Legendre integration; Monte Carlo simulation

在常规的结构疲劳寿命可靠性分析中,常以式(1)作为功能函数^[1-6]

$$g = T - T_D \quad (1)$$

式中: T 为结构的疲劳寿命,其为一随机变量; T_D 为设计寿命,通常为一固定值。

当 $g > 0$, 即 $T > T_D$ 时,结构处于安全状态; 当 $g \leq 0$ 即 $T \leq T_D$ 时,结构处于失效状态。

但是在实际设计中,设计者对结构的失效准

则并不是像常规的结构疲劳寿命可靠性分析中那样严格,当结构疲劳寿命 T 比设计寿命 T_D 小,但如果 $|T - T_D| < \epsilon_T$ (ϵ_T 为可接受差值)时,认为结构的疲劳寿命 T 是可以接受的,并不认为结构失效。因此这需要从模糊的角度出发,考虑结构的模糊失效准则。

本文将疲劳寿命 T 看做随机变量,而设计寿命 T_D 视为一模糊变量,记为 \tilde{T}_D ,研究了模糊失效准则下的结构疲劳寿命可靠性,给出了随机载荷下结构疲劳寿命概率密度函数的确定方法,并提出了随机变量与模糊变量相组合时的一种新的可靠度数值计算方法,研究了设计寿命 T_D 服从线性

收稿日期:2008-10-22; 修订日期:2008-12-18

基金项目:教育部博士点基金(20060183063),吉林省科技厅基金(20060538)

通讯作者:孟广伟 E-mail: mgw@jlu.edu.cn

L-R 分布时的结构疲劳寿命可靠度,并与常规设计下结构的疲劳寿命可靠性相比较。

1 模糊失效准则

当考虑结构的模糊失效准则时,设计寿命 \tilde{T}_D 为模糊变量,结构疲劳寿命 T 为随机变量,则结构失效这一事件可以表示为 $T \leq \tilde{T}_D$,该事件是模糊事件,记为 \tilde{A} 。

设状态变量为 $z = T - \tilde{T}_D$,利用模糊事件的概率公式,可以得到结构的模糊可靠度为^[7]

$$R = 1 - R_f = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} u_{\tilde{A}}(z) f(z) dz \quad (2)$$

式中: $u_{\tilde{A}}(z)$ 为状态变量 z 对模糊失效事件 \tilde{A} 的隶属函数; $f(z)$ 为状态变量 z 的概率密度函数; R_f 为模糊失效概率。

图 1 给出了结构模糊失效的示意图。当考虑模糊失效准则时,结构的失效过程是一个渐进的过程,在安全状态和失效状态之间有一个模糊状态,模糊状态区间的隶属函数也可以是曲线的形式。

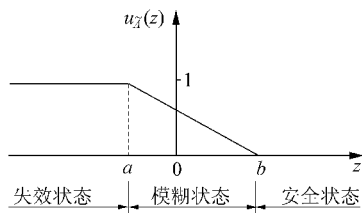


图 1 结构模糊失效准则

Fig. 1 Fuzzy failure criterion of structure

当不考虑失效准则的模糊性时,失效是一个突然过程,如图 2 所示,有

$$u_{\tilde{A}}(z) = \begin{cases} 1 & z \leq 0 \\ 0 & z > 0 \end{cases} \quad (3)$$

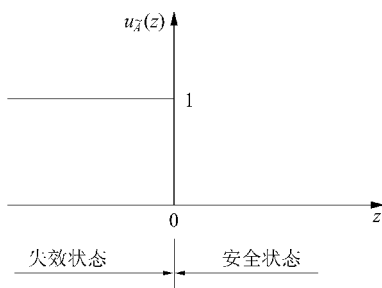


图 2 结构确定性失效准则

Fig. 2 Definite failure criterion of structure

2 结构疲劳寿命模糊可靠性

式(2)给出了结构疲劳寿命模糊可靠度计算

的解析式,但由于模糊失效事件 \tilde{A} 的隶属函数 $u_{\tilde{A}}(z)$ 通常难以确定,因此式(2)往往不太适用。但当对模糊变量 \tilde{T}_D 给定阈值 λ 时,可以得到 \tilde{T}_D 的截集区间 $\tilde{T}_D(\lambda) = [\underline{T}_D(\lambda), \bar{T}_D(\lambda)]$,则结构模糊失效事件转化为相应的普通事件 $T \leq \tilde{T}_D(\lambda)$,这样就可以用常规可靠性设计理论求得阈值为 λ 时,结构疲劳寿命可靠度 $R(\lambda)$ 。再对 $R(\lambda)$ 在区间 $[0, 1]$ 上积分就可以得到结构疲劳寿命的可靠度 R 为^[8]

$$R = P(T > \tilde{T}_D) = \int_0^1 R(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

图 3 为结构疲劳寿命的模糊干涉模型图。图中: $u(T_D)$ 为设计寿命 \tilde{T}_D 的隶属度函数; $f(T)$ 为结构寿命 T 的概率密度函数。

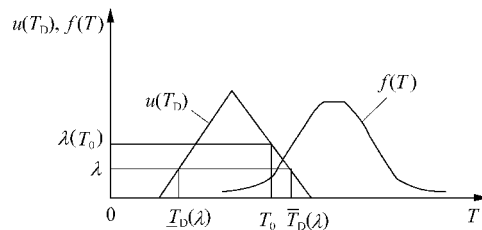


图 3 结构疲劳寿命模糊干涉模型

Fig. 3 Fuzzy interference model for fatigue life of structure

当给定阈值 λ 时,设计寿命仅在截集区间 $[\underline{T}_D(\lambda), \bar{T}_D(\lambda)]$ 内取值。当疲劳寿命 T 取固定值 T_0 时:如果 $T_0 < \underline{T}_D(\lambda)$ 时,结构失效,有 $R(\lambda) = 0$;当疲劳寿命 $T_0 > \bar{T}_D(\lambda)$ 时,结构可靠,有 $R(\lambda) = 1$;当疲劳寿命 T_0 位于截集区间 $[\underline{T}_D(\lambda), \bar{T}_D(\lambda)]$ 内时,可靠度 $R(\lambda)$ 取决于截集区间概率密度函数的分布形式 $f_{T_D(\omega)}(T)$ 。文献[9]研究了强度和应力都为模糊变量,截集区间概率密度函数分别取均匀分布^[8]、线性分布^[10]和截尾正态分布^[9]时的结构模糊可靠度。通过比较发现,当 $f_{T_D(\omega)}(T)$ 取均匀分布时,结构的可靠度相对比较保守。因此本文也将截集区间概率密度函数 $f_{T_D(\omega)}(T)$ 取为均匀分布,当疲劳寿命 T_0 位于截集区间 $[\underline{T}_D(\lambda_i), \bar{T}_D(\lambda_i)]$ 内时,有

$$R(\lambda) = \int_{\underline{T}_D(\lambda)}^{\bar{T}_D(\lambda)} f_{T_D(\omega)}(T) dT = \int_{\underline{T}_D(\lambda)}^{\bar{T}_D(\lambda)} \frac{1}{\bar{T}_D(\lambda) - \underline{T}_D(\lambda)} dT = \frac{\bar{T}_D(\lambda) - T_0}{\bar{T}_D(\lambda) - \underline{T}_D(\lambda)} \quad (5)$$

当结构疲劳寿命 T 为随机变量时,有

$$R(\lambda) = \int_{\underline{T}_D(\lambda)}^{\bar{T}_D(\lambda)} \frac{T - \underline{T}_D(\lambda)}{\bar{T}_D(\lambda) - \underline{T}_D(\lambda)} f(T) dT +$$

$$\int_{T_D(\lambda)}^{+\infty} f(T) dT \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)可得结构疲劳寿命的可靠度为

$$R = \int_0^1 \left(\int_{T_D(\lambda)}^{+\infty} \frac{T - T_D(\lambda)}{\bar{T}_D(\lambda) - T_D(\lambda)} f(T) dT + \int_{T_D(\lambda)}^{+\infty} f(T) dT \right) d\lambda \quad (7)$$

3 模糊可靠度计算的数值解法

式(7)列出了考虑模糊失效准则的结构寿命可靠度解析表达式,但该式需要积分两次,求解非常繁琐,因此本文利用数字模拟求解结构可靠度。

令 $\kappa = 2\lambda - 1$, 则式(4)转化为

$$R = P(T > \tilde{T}_D) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 R'(\kappa) d\kappa \quad (8)$$

式中: $R'(\kappa)$ 由函数 $R(\lambda)$ 转化而来。

由 Gauss-Legendre 积分^[11], 式(8)可转化为

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n A_i R'(\kappa_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n A_i R(\lambda_i) \quad (9)$$

式中: $\kappa_i (i=0, 1, \dots, n)$ 为 Legendre 多项式的零点; A_i 为与 $R(\kappa_i)$ 相对应的权重; λ_i 为与 κ_i 相对应的阈值。

表1列出了7节点($n=6$) Gauss-Legendre 积分零点 κ_i 和权重 A_i 以及与零点相对应的阈值 λ_i 。

表1 7节点 Gauss-Legendre 积分的 κ_i, λ_i 和 A_i 值
Table 1 Values of κ_i, λ_i and A_i for 7-point Gauss-Legendre integration

| i | κ_i | λ_i | A_i |
|-----|---------------|---------------|--------------|
| 0 | -0.949 107 91 | 0.025 446 045 | 0.129 484 97 |
| 1 | -0.741 531 19 | 0.129 234 405 | 0.279 705 39 |
| 2 | -0.405 845 15 | 0.297 077 425 | 0.381 830 05 |
| 3 | 0 | 0.500 000 000 | 0.417 959 18 |
| 4 | 0.405 845 15 | 0.702 922 575 | 0.381 830 05 |
| 5 | 0.741 531 19 | 0.870 765 595 | 0.279 705 39 |
| 6 | 0.949 107 91 | 0.974 553 955 | 0.129 484 97 |

由式(9)可知,求解结构疲劳寿命可靠度 R 的关键是求解与阈值 λ_i 相对应的可靠度 $R(\lambda_i)$, $R(\lambda_i)$ 可以通过 Monte Carlo 模拟获得。根据疲劳寿命概率密度函数 $f(T)$ 生成随机数 $T_j (j=1, 2, \dots, N_m)$, N_m 为阈值为 λ_i 时模拟的总次数。当阈值为 λ_i 时,结构疲劳寿命 T_j 的可靠度 $P(\lambda_i, T_j)$ 为

$$P(\lambda_i, T_j) =$$

$$\begin{cases} 0 & T_j \leq \underline{T}_D(\lambda_i) \\ \frac{T_j - \underline{T}_D(\lambda_i)}{\bar{T}_D(\lambda_i) - \underline{T}_D(\lambda_i)} & \underline{T}_D(\lambda_i) < T_j < \bar{T}_D(\lambda_i) \\ 1 & T_j \geq \bar{T}_D(\lambda_i) \end{cases} \quad (10)$$

可靠度 $R(\lambda_i)$ 为

$$R(\lambda_i) = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} P(\lambda_i, T_j) \quad (11)$$

综上所述,考虑模糊失效准则的结构寿命可靠度数值计算步骤如下:

(1) 确定疲劳寿命概率密度函数 $f(T)$;

(2) 根据 Gauss-Legendre 积分零点 κ_i 确定相对应的阈值 λ_i 以及截集区间 $[\underline{T}_D(\lambda_i), \bar{T}_D(\lambda_i)]$;

(3) 确定初值 N_m , 根据疲劳寿命概率密度函数 $f(T)$ 利用 Monte Carlo 模拟产生一系列随机数 T_j , 根据式(10)和式(11)求解当阈值为 λ_i 时的可靠度 $R(\lambda_i)$;

(4) 令 $N_m = N_m + 1$; 重复第(3)步,直到当前前后两次求解的可靠度 $R(\lambda_i)$ 之差小于 ϵ (ϵ 为许可误差),并将最后一次计算所得的可靠度 $R(\lambda_i)$ 值作为准确值;

(5) 根据式(9)求解结构寿命可靠度 R 。

4 确定结构疲劳寿命概率密度函数

由于结构的疲劳寿命概率密度函数 $f(T)$ 服从对数正态分布,因此确定疲劳寿命概率密度函数 $f(T)$, 关键是求出概率密度函数 $f(T)$ 的均值 $u_{\ln T}$ 和标准差 $\sigma_{\ln T}$ 。

对于高周疲劳,结构处于低应力状态,可以利用 N - S 法,结构在 j 级应力水平作用下的破坏循环数 N_j 为^[12]

$$N_j = C \left(\frac{S_b}{S_b - S_{m,j}} S_{a,j} \right)^{-m} \quad (12)$$

式中: C 和 m 为材料参数; S_b 为强度极限; $S_{a,j}$ 和 $S_{m,j}$ 分别为 j 级应力水平作用下的应力幅值和应力均值,且

$$S_{a,j} = \frac{S_{\max,j} - S_{\min,j}}{2} \quad (13)$$

$$S_{m,j} = \frac{S_{\max,j} + S_{\min,j}}{2} \quad (14)$$

式中: $S_{\max,j}$ 和 $S_{\min,j}$ 为第 j 级应力水平的最大应力和最小应力。

将材料参数、结构尺寸和载荷等视为随机变

量并记为 $\mathbf{X}=[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$, 其中 n 为随机变量的总数量。若不考虑 Miner 准则^[13] 的随机性, 则在随机载荷作用下, 结构的疲劳寿命 T 为

$$T = \frac{1}{D} = \frac{1}{\sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j}} \quad (15)$$

式中: n_j 为第 j 级应力水平作用循环数; N_j 为第 j 级应力水平单独作用下的破坏循环数, 其为随机变量 \mathbf{X} 的函数; k 为总的应力水平级数; D 为疲劳损伤量, 有

$$D = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j} \quad (16)$$

将式(15)在随机变量均值 $\bar{\mathbf{X}}=[\bar{x}_1 \ \bar{x}_2 \ \dots \ \bar{x}_n]$ 处进行 Taylor 展开, 并忽略二阶以上的量, 有

$$T = \frac{1}{\sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j(\bar{\mathbf{X}})}} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_{\bar{x}_i} (x_i - \bar{x}_i) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_k} \Big|_{\bar{x}_i, \bar{x}_k} (x_i - \bar{x}_i)(x_k - \bar{x}_k) \quad (17)$$

如果随机变量 x_i 和 x_k 之间相互独立且服从正态分布, 由式(17)可以得到结构疲劳寿命 T 的均值 u_T 为

$$u_T = \frac{1}{\sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j}} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \Big|_{\bar{x}_i} \sigma_{x_i}^2 \quad (18)$$

式中: σ_{x_i} 为随机变量 x_i 的标准差。

对于结构疲劳寿命 T 的标准差 σ_T , 取式(17)的前两项, 有

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right)^2 \Big|_{\bar{x}_i} \sigma_{x_i}^2} \quad (19)$$

式(18)和式(19)中的结构寿命 T 对随机变量 x_i 的偏导分别为

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial T}{\partial D} \cdot \frac{\partial D}{\partial N_j} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x_i} = \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^k \left(\frac{n_j}{N_j^2} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x_i} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = \frac{2}{D^3} \left[\sum_{j=1}^k \left(\frac{n_j}{N_j^2} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x_i} \right) \right]^2 + \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^k \left[\frac{n_j}{N_j^2} \cdot \frac{\partial^2 N_j}{\partial x_i^2} - \frac{2n_j}{N_j^3} \left(\frac{\partial N_j}{\partial x_i} \right)^2 \right] \quad (21)$$

式(20)和式(21)所求的均值 u_T 和标准差 σ_T 为结构寿命 T 的正态均值和方差, 由于结构寿命 T 服从对数正态分布, 其对数均值 $u_{\ln T}$ 和对数标准差 $\sigma_{\ln T}$ 为^[14]

$$u_{\ln T} = \ln u_T - \frac{1}{2} \sigma_{\ln T}^2 \quad (22)$$

$$\sigma_{\ln T}^2 = \ln \left[\left(\frac{\sigma_T}{u_T} \right)^2 + 1 \right] \quad (23)$$

5 算例

如图 4 所示的变截面拉杆, $r=4$ mm, 其载荷历程如图 5 所示, 载荷的变异系数为 0.05, 所用材料为 16Mn^[15], 弹性模量 $E=2.01 \times 10^5$ MPa, 强度极限 $S_b=585$ MPa, 疲劳参数 $m=10.51$, 其他随机变量的二阶统计量为 $\Phi_1 \sim N(48, 0.48)$ mm, $\Phi_2 \sim N(40, 0.4)$ mm, $C \sim N(8.48 \times 10^{31}, 0.848 \times 10^{31})$ 。

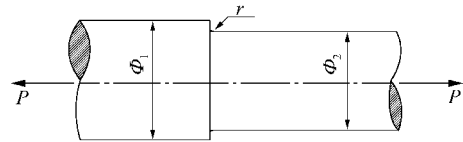


图 4 变截面拉杆

Fig. 4 Variable cross-section rod

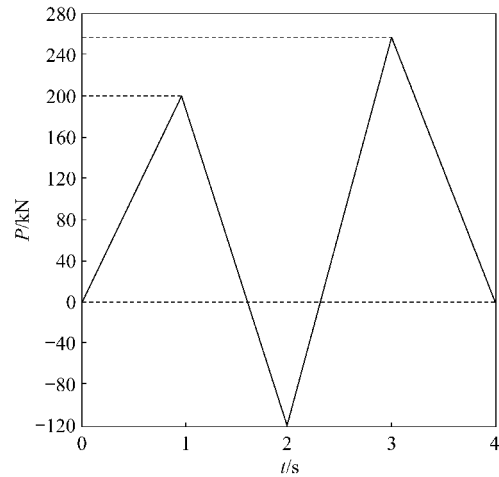


图 5 载荷历程

Fig. 5 Load history

求得结构在当前载荷谱下的正态疲劳寿命均值为 5.878×10^6 , 正态标准差值为 3.365×10^6 。由式(22)和式(23)可得结构的对数正态疲劳寿命均值为 15.445, 对数正态标准差值为 0.532, 则结构的疲劳寿命概率密度函数 $f(T)$ 为

$$f(T) = \frac{1}{0.532 \sqrt{2\pi T}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln T - 15.445}{0.532} \right)^2 \right] dT \quad (24)$$

如果按照常规可靠性设计, 取设计寿命 $T_D=1.5 \times 10^6$, 由一次二阶矩法得结构的常规可靠度为 0.989 3, 如果考虑结构的模糊失效准则, 取结

构的设计寿命 T_D 隶属度函数为线性 L-R 分布 $(a, b, c) = (1.35 \times 10^6, 1.5 \times 10^6, 1.65 \times 10^6)$, 在本文中取线性 L-R 分布为对称分布, 记 (u, δ) 。其中: $u = b, \delta = (b - a) / b = (c - b) / b$, 则上述设计寿命 T_D 分布为 $(u, \delta) = (1.5 \times 10^6, 0.1)$ 。

表 2 列出了对应于 λ_i 时设计寿命 T_D 的截集区间 $[\underline{T}_D(\lambda_i), \bar{T}_D(\lambda_i)]$, 并列出了可靠度 $R(\lambda_i)$ 值, 将表 1 中的 A_i 值和表 2 中的 $R(\lambda_i)$ 值代入式 (9) 中, 得到结构疲劳寿命可靠度为 0.988 5, 比常规可靠度 0.989 3 小, 说明常规可靠度偏于危险。

表 2 结构寿命的截集区间 $[\underline{T}_D(\lambda_i), \bar{T}_D(\lambda_i)]$
Table 2 Interval $[\underline{T}_D(\lambda_i), \bar{T}_D(\lambda_i)]$ for structure life

| λ_i | $[\underline{T}_D(\lambda_i), \bar{T}_D(\lambda_i)]$ | $R(\lambda_i)$ |
|---------------|------------------------------------------------------|----------------|
| 0.025 446 045 | [135 382, 164 618] | 0.988 2 |
| 0.129 234 405 | [136 938, 163 061] | 0.988 3 |
| 0.297 077 425 | [139 456, 160 544] | 0.988 4 |
| 0.500 000 000 | [142 500, 157 500] | 0.988 5 |
| 0.702 922 575 | [145 544, 154 456] | 0.988 6 |
| 0.870 765 595 | [148 061, 151 938] | 0.988 7 |
| 0.974 553 955 | [149 618, 150 382] | 0.988 9 |

图 6 列出当设计寿命 $T_D = 1.5 \times 10^6$ 时, 不同 δ 值的设计寿命 T_D 服从线性 L-R 分布时结构的疲劳寿命模糊可靠度。

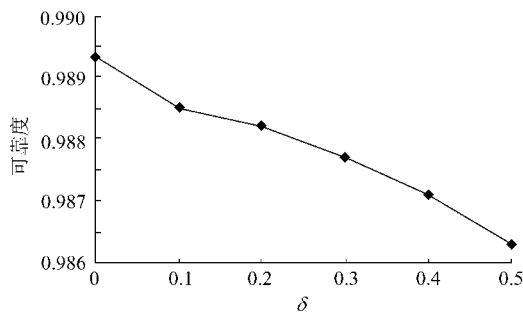


图 6 不同 δ 值时的结构疲劳寿命模糊可靠度
Fig. 6 Reliability of structure fatigue life for different δ values

从图 6 中可以看出, 当 $\delta = 0$ 时, 结构的模糊失效准则退化成普通失效问题, 即只要结构疲劳寿命 $T < T_D$ 时就认为结构失效; 当 $\delta = 0.1 \sim 0.5$ 时, 随着 δ 值的增大, 结构疲劳寿命模糊可靠度 R 逐渐减小, 减小幅度总体上呈现增大趋势。

6 结论

(1) 与常规结构疲劳寿命可靠性相比, 本文所提出的考虑模糊失效准则的结构疲劳可靠性分析与实际情况更接近, 而且也更加安全可靠。

(2) 本文所提出的关于随机变量与模糊变量相组合时的可靠度数值计算方法将 Gauss-Legendre 积分和 Monte Carlo 模拟相结合, 有效地减少了计算量, 该方法精度高、速度快。

(3) 将疲劳设计寿命 T_D 设为对称线性 L-R 分布时, 随着 δ 值的增大, 结构疲劳寿命模糊可靠度 R 逐渐减小。

参 考 文 献

- [1] Szerszen M M, Nowak A S, Laman J A. Fatigue reliability of steel bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 52(1): 83-92.
- [2] Shi P, Mahadevan S. Corrosion fatigue and multiple site damage reliability analysis[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(6): 457-469.
- [3] Park Y H, Tang J. An efficient methodology for fatigue reliability analysis for mechanical components[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, 128(3): 293-297.
- [4] Rahman S, Wei D. A univariate approximation at most probable point for higher-order reliability analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(9): 2820-2839.
- [5] 薛红军, 吕国志. 随机因素对疲劳裂纹扩展分散性影响的探讨[J]. 机械强度, 2001, 23(1): 35-37.
Xue Hongjun, Lu Guozhi. Influence of the randomness on scatter of the fatigue crack growth[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(1): 35-37. (in Chinese)
- [6] 李应波, 姚卫星. 基于 SFEM 的结构元件疲劳可靠性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4): 461-464.
Li Yingbo, Yao Weixing. Fatigue reliability analysis on structural elements based on SFEM[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(4): 461-464. (in Chinese)
- [7] Zadeh L A. Probability measures of fuzzy events[J]. Journal of Mathematical Analyses and Applications, 1968, 23(2): 421-427.
- [8] 董玉革. 随机变量和模糊变量组合时的模糊可靠性设计[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 25-29.
Dong Yuge. Fuzzy reliability design with random variable and fuzzy variable[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(6): 25-29. (in Chinese)
- [9] 吕震宙, 孙颀, 徐友良. 机械结构系统模糊可靠性分析的数字计算方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 19-23.
Lu Zhenzhou, Sun Jie, Xu Youliang. Numerical algorithm for fuzzy reliability analysis of mechanical structure system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 19-23. (in Chinese)
- [10] Jiang Q M, Chen C H. A numerical algorithm of fuzzy reliability[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 80(3): 299-307.
- [11] 徐涛. 数值计算方法[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1998.

- Xu Tao. Numerical methods[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [12] 李锋. 不确定参数下结构疲劳断裂可靠性若干问题的研究[D]. 长春: 吉林大学机械学院, 2008. (in Chinese)
- Li Feng. Research on several problems of structure reliability of fatigue and fracture under uncertain parameters [D]. Changchun: College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [13] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): A159-A164.
- [14] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- Ou Jinping, Wang Guangyuan. Random vibration of structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)
- [15] 赵少汴, 王忠保. 疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社,

1992.

Zhao Shaobian, Wang Zhongbao. Fatigue design [M]. Beijing: China Machine Press, 1992. (in Chinese)

作者简介:

李锋(1977—) 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 疲劳断裂与可靠性。

Tel: 0431-85095834

E-mail: fengli@jlu.edu.cn

孟广伟(1959—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 疲劳与断裂, 计算固体力学。

Tel: 0431-85095834

E-mail: mgw@jlu.edu.cn

(编辑: 李铁柏, 徐晓)

中国航空学会举办纪念冯如首飞百年系列学术活动

2009 年是中国近代航空先驱者冯如驾驶自己设计制造的飞机首飞成功 100 周年。中国航空学会为纪念冯如先生, 弘扬其开拓创新精神, 鼓励航空业界人士和国人为中华民族伟大复兴贡献力量, 举办了“纪念中国航空先驱冯如首飞百年”学术论坛系列活动。活动由一个主论坛和 10 个专题分论坛组成。

2009 年 11 月 17 日至 18 日在江门市举行主题为“纪念中国航空先驱冯如首飞百年, 展望中国航空未来发展”主论坛。200 余位航空业界专家出席。中国航空学会吴松秘书长主持开幕式, 副理事长张彦仲致开幕词, 江门市李崑副市长致欢迎词, 美国美华航太工程师协会田长焯会长等嘉宾应邀出席并致辞。论坛由冯培德院士主持, 应邀作大会报告的有: 张彦仲院士“百年梦圆大飞机”, 崔尔杰院士“学习冯如精神, 促进航空航天技术融合和创新发展”, 田长焯会长以波音飞机公司的第一位总工程师王助为例介绍中国航空专家对世界航空发展的贡献。出席论坛的还有中国航空学会常务理事吕刚、武维新、李晓红等。17 日晚, 江门王南建市长设宴招待出席会议的学会领导、院士。南方日报、江门电视台等地方媒体采访了冯培德院士、崔尔杰院士、田长焯主席、吴松秘书长, 并对论坛进行了报道。

10 个专题分论坛分别涉及航空航天安全技术、航空材料与制造、空气动力学、燃烧与传热传质、复合材料、飞行控制、航空试验测试技术、环控人机工效、航空安全救生、信号和信息处理等专业技术领域。有 4 个专题分论坛与主论坛同时在江门举行, 其他 6 个专题分论坛已于 2009 年 5 月至 10 月期间分别在西安、沈阳、武夷山、襄樊、北京、福州等地举行。

主论坛及各专题分论坛的学术报告和交流论文达 410 多篇。大部分论文的全文及部分论文的摘要制成文集光盘供会员和航空科技人员参考。

中国航空学会