文章编号: 1000_0887(2000) 03_0277_08

检修事件的概率分析与结构的维修可靠性*

郭书祥[1]，　吕震宙[2]

(1. 空军工程大学 力学教研室, 西安 710038; 2. 西北工业大学, 西安 710072)

(王彪推荐)

摘要:　定期检修结构的可靠性分析, 需要定量处理大量复杂的随机事件• 综合考虑各种随机因素, 较全面地分析了检修过程中影响可靠性的诸多复杂随机事件及其发生概率• 系统地建立了检修结构的动态可靠性分析模型, 整个模型程序化程度高, 易于实施•

关　键　词:　疲劳裂纹扩展;　检修事件;　概率分析;　维修可靠性
中图分类号:　O346.1; O213.2　　文献标识码:　A

引　　言

疲劳断裂是动载作用下金属结构和机械系统的一种最主要的破坏形式• 对许多结构或构件, 在投入使用时就存在微裂纹或焊缝、夹杂、缺口、空洞等固有缺限• 在交变动载作用下, 这些裂纹或裂纹源逐渐扩展, 导致结构的强度逐渐衰减, 可靠性降低[1]• 对诸如飞机、舰船这样的大型复杂结构, 构件多, 连接复杂• 可能产生或带有裂纹的危险部位多, 且对疲劳敏感• 这类结构投入使用后, 为保证其总体可靠性不低于其最小容许限度, 通常需要进行定期检查, 并修理检出的损伤• 因此, 评估结构在较长使用期内的可靠性, 必须考虑检查维修的影响• 同时, 维修结构的可靠性预估也是进行维修决策的依据• 对损伤结构的有关分析表明[2], 对结构进行周期检修, 可有效阻止损伤的扩展, 使结构的可靠性得到一定程度的恢复• 本文考虑各种随机因素, 较全面地分析了检修过程中可能的随机事件, 给出了其概率的确定方法, 建立了维修结构的动态可靠性分析模型•

1　疲劳裂纹扩展和可靠性

1. 随机疲劳裂纹扩展

根据文[3], 到 t 时刻的裂纹尺寸 $a(t)$ 的概率密度函数可表为

$$f(a(t)) = \frac{f(a_0)}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\varphi(t)}\,D^m(a)}\exp\left\{-\frac{[\varphi(a(t))-\varphi(t)]^2}{2\sigma^2_{\varphi(t)}}\right\}, \tag{1}$$

其中

$$D(a) = \beta(a)\sqrt{\pi a(t)}, \tag{2}$$

*　收稿日期:　1997_08_11;　修订日期:　1999_10_25
基金项目:　国家自然科学基金资助项目(58575040, 59775032)
作者简介:　郭书祥(1964~), 男, 硕士, 讲师.

$$\varphi(a(t)) = \int_{a_0}^{a} \frac{\mathrm{d}x}{D^m(x)}. \tag{3}$$

$\bar{\varphi}(t)$、$\sigma_{\varphi(t)}$ 分别为 t 时刻 $\varphi(a(t))$ 的均值和标准差. $f(a_0)$ 为初始裂纹尺寸 a_0 的概率密度函数.

2. 构件的动态可靠性

对动态问题,通常可建立极限状态函数

$$G = Q(t) - S(t). \tag{4}$$

若将结构的破坏事件定义为作用应力 $S(t)$ 的包络线过程首次超过强度界限 $Q(t)$,且假设超限交叉过程为马尔可夫过程. 则在 $Q(t)$ 取确定样本 $q(t)$(即确定的强度水平)的条件下,包线过程的上超限率可表为

$$\nu^+(t/q) = \sqrt{2\pi}\delta\nu_0 r(t)\exp\left\{-\frac{r^2(t)}{2}\right\}, \tag{5}$$

其中

$$r(t) = \frac{q(t) - \bar{S}(t)}{\sigma_{\varphi(\tau)}}, \tag{6}$$

这里, $\bar{S}(s)$ 和 $\sigma_{S(t)}$ 分别为 $S(t)$ 的均值和标准差. δ 为应力随机过程的谱带宽参数.

从而,时域 $[0, T]$ 内不发生超限失效的概率可表为[3]

$$R(t) = R(0)\exp\left\{-\frac{\int_0^t \nu^+(\tau)\mathrm{d}\tau}{R(0)}\right\}, \tag{7}$$

其中, $\nu^+(t)$ 为 t 时刻的平均上超限率. 可表为

$$\nu^+(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \nu^+(t/q) f_Q(q)\,\mathrm{d}q, \tag{8}$$

$R(0)$ 为起始时刻处于安全状态的概率, 由下式表达

$$R(0) = \int_{-\infty}^{\infty}\left[1 - \exp\left\{-\frac{(q_0 - \bar{S})^2}{\sigma_S^2}\right\}\right] f_Q(q_0)\,\mathrm{d}q_0, \tag{9}$$

$f_Q(\cdot)$ 为强度 $Q(t)$ 的概率密度函数.

2.1 无裂纹构件的可靠性

当构件上无裂纹,或不考虑强度衰减时,强度界限为与时间无关的随机变量. 记为 Q_e,一般可用威布尔分布、正态分布或对数正态分布描述. 在作用应力为平稳随机过程时, r, ν^+ 等与时间无关. (7) 式可写作

$$R(t) = R(0)\exp\left\{-\frac{\nu^+ t}{R(0)}\right\} \tag{10}$$

其中 ν^+、$R(0)$ 可分别由(8)、(9) 式计算. 在 Q_e 为正态分布时,可得解析表达

$$R(0) = 1 - \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_{Q_e}^2 + \sigma_S^2}}\exp\left\{-\frac{(\bar{Q}_e - \bar{S})^2}{2(\sigma_{Q_e}^2 + \sigma_S^2)}\right\}, \tag{11}$$

$$\nu^+ = \frac{\sqrt{2\pi}\delta\nu_0\sigma_S^2(\bar{Q}_e - \bar{S})}{(\sigma_{Q_e}^2 + \sigma_S^2)^{3/2}}\exp\left\{-\frac{(\bar{Q}_e - \bar{S})^2}{2(\sigma_{Q_e}^2 + \sigma_S^2)}\right\}. \tag{12}$$

2.2 含裂纹构件的可靠性

对含裂纹构件,在疲劳载荷作用下,随着裂纹的扩展,剩余强度逐渐减小,为一非平稳随机过程. 此时,(4) 式中的 $Q(t)$ 为剩余强度. 记为 $Q_r(t)$. $S(t)$ 表示名义正应力或剪应力(对

单一型裂纹), 或为按复合型断裂准则确定的等效应力(对复合型裂纹), 对脆性断裂问题, t 时刻(裂纹尺寸为 $a(t)$ 时) 结构的剩余强度可表为

$$Q_r(t) = \frac{K_{\mathrm{I}C}}{D(a)}, \tag{13}$$

其中, $K_{\mathrm{I}C}$ 表示断裂韧性, 为随机变量• 对航空用高强度材料, $K_{\mathrm{I}C}$ 通常可用正态分布描述• 从而, 在 a 取确定样本的条件下, 平均上超限率可表为

$$\begin{aligned}\nu^+(t/a) &= \int_0^\infty \nu^+(t/q) f_Q(q(a))\mathrm{d}q(a) = \\ &\frac{\sqrt{2\pi}\,\delta\nu_0 D^2(a)(\bar{K}_{\mathrm{I}C} - D(a)S)}{(\sigma^2_{K_{\mathrm{I}C}} + D^2(a)\sigma^2_S)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(\bar{K}_{\mathrm{I}C} - D(a)S)^2}{\sigma^2_{K_{\mathrm{I}C}} + D^2(a)\sigma^2_S}\right\}\bullet\end{aligned} \tag{14}$$

其中, $\bar{K}_{\mathrm{I}C}$ 和 $\sigma_{K_{\mathrm{I}C}}$ 分别为 $K_{\mathrm{I}C}$ 的均值和标准差•

从而, 考虑 $a(t)$ 分散性时的平均上超限率为

$$\nu^+(t) = \int_0^\infty \nu^+(t/a) f(a(t))\mathrm{d}a(t)\bullet \tag{15}$$

当 $Q_r(t)$ 可用正态分布描述时, 可直接得到 $\nu^+(t)$ 的解析表达

$$\nu^+(t) = \frac{\sqrt{2\pi}\,\delta\nu_0\sigma^2_S(\bar{Q}_r(t) - \bar{S}(t))}{(\sigma^2_{Q_r(t)} + \sigma^2_{S(t)})^{3/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(\bar{Q}_r(t) - \bar{S}(t))^2}{\sigma^2_{Q_r(t)} + \sigma^2_{S(t)}}\right\}\bullet \tag{16}$$

2 检修结构的可靠性

结构在较长使用期内的可靠性与结构的检修过程密切相关• 检查的目的在于检测结构上存在的疲劳损伤(可用当量裂纹表征), 并进行修理• 有些构件在投入使用时就可能存在裂纹, 无裂纹构件在使用过程中也可能产生裂纹, 裂纹的形成时间与多种随机因素有关• 其随机性一般可用威布尔分布、对数正态分布或逆正态分布等描述• 记其概率分布函数为 $F_{TCI}(t)$• 相应的概率密度函数记为 $f_{TCI}(t)$•

可靠性分析和维修决策都与裂纹的检测能力(可由裂纹检出概率表征)有关• 设在一次检查时尺寸为 a 的裂纹的检出概率为 $P(a)$• 由于裂纹扩展过程的随机性, 时刻 t 时构件上的裂纹尺寸 $a(t)$ 为随机变量• 故 t 时刻存在裂纹的检出概率可表为

$$P_D(t) = \int_0^\infty P(a) f(a(t))\mathrm{d}a(t), \tag{17}$$

相应的漏检概率记为 $\bar{P}_D(t)$, $(\bar{P}_D(t) = 1 - P_D(t))$,

假设所研究构件仅含一个危险部位• 检出裂纹后, 立即完全修理• 修理后构件的强度恢复到其初始疲劳质量(具有当量初始裂纹尺寸)• 若检出构件失效或需要替换(满足条件 $a(t) \geqslant a_{cr}$), 则用同类新完整构件替换, 其强度恢复到原始强度水平(无裂纹)• 记 T_0(或 t_0) 为投入使用或分析开始时间, $T_i(i = 1, 2, \dots)$ 表示第 i 次检修时间•

1. 首检前的可靠性

构件的失效可能在裂纹形成前发生, 也可能发生在裂纹形成后, 故首检前 t 时刻($0 < t \leqslant T_1$) 构件不失效事件由以下两个独立事件组成

$E_{11} = $ t 时刻前无裂纹产生且构件不失效

$E_{12} = $ t 时刻前某瞬时产生裂纹且不失效

从而, 构件在 $[T_0, T_1]$ 内不失效的概率为

$$R_1(t)=P(E_{11})+P(E_{12})=[1-F_{TCI}(t-t_0)]R_b(t-t_0)+\int_{t_0}^{t}f_{TCI}(\tau-t_0)R_b(\tau-t_0)R_a(t-\tau)\,d\tau, \tag{18}$$

式中, $R_a(\cdot)$ 表示裂纹形成后(或带裂纹) 构件的可靠度• 由(7) 、(15) 式计算• $R_b(\cdot)$ 表示裂纹产生前(无裂纹) 构件的可靠度• 可由(10) 式计算•

2. 检修事件及其概率

T_1 时进行第一次检查后, 可能不进行修理(记为事件 E_{21}), 也可能修理(记为 E_{22}) 或替换(记为 E_{23})• 这些事件的发生概率分别为

$$P(E_{21})=\int_{T_0}^{T_1}f_{TCI}(\tau-t_0)P_D(T_1-\tau)\,d\tau+[1-F_{TCI}(T_1-T_0)], \tag{19}$$

$$P(E_{22})=\int_{T_0}^{T_1}f_{TCI}(\tau-t_0)P_D(T_1-\tau)P(a(T_1-\tau)<a_{cr})\,d\tau, \tag{20}$$

$$P(E_{23})=\int_{T_0}^{T_1}f_{TCI}(\tau-t_0)P_D(T_1-\tau)P(a(T_1-\tau)\geqslant a_{cr})\,d\tau• \tag{21}$$

T_1 时构件不修理, 且 $t(T_1<t\leqslant T_2)$ 时刻构件不失效(记为事件 E_{24}) 的概率为

$$P(E_{24})=[1-F_{TCI}(t-t_0)]R_b(t-t_0)+\int_{T_1}^{t}f_{TCI}(\tau-t_0)R_b(\tau-t_0)R_a(t-\tau)\,d\tau+\int_{T_0}^{T_1}f_{TCI}(\tau-t_0)P_0(t-\tau)R_b(\tau-t_0)R_a(t-\tau)\,d\tau• \tag{22}$$

在 T_1 时修理或替换的条件下, 构件不失效(分别记为 E_{25} 和 E_{26}) 的概率分别为

$$P(E_{25})=R_a(t-T_1), \tag{23}$$

$$P(E_{26})=[1-F_{TCI}(t-T_1)]R_b(t-T_1)+\int_{T_1}^{t}f_{TCI}(\tau-T_1)R_b(\tau-T_1)R_a(t-\tau)\,d\tau• \tag{24}$$

因此, 构件在 $[T_1, T_2]$ 内不失效的概率为

$$R_2(t)=P(E_{24})+P(E_{22})P(E_{25})+P(E_{23})P(E_{26})• \tag{25}$$

一般地, 对构件进行第 i 次($i\geqslant 2$) 检查后, 有三种可能的处理(随机事件): T_i 时不修理, T_i 时修理、T_i 时替换• 因此, 在第 i 次检修后时刻 $t(T_i<t\leqslant T_{I+1})$, 构件不失效的概率可表为

$$\begin{aligned}R_{i+1}(t)=\;&P(\text{不失效}/T_i\text{ 时修理})P(T_i\text{ 时修理})+\\&P(\text{不失效}/T_i\text{ 时不修理})P(T_i\text{ 时修理})+\\&P(\text{不失效}/T_i\text{ 时替换})P(T_i\text{ 时替换}),\end{aligned} \tag{26}$$

式中, $P(\cdot/\cdot)$ 表示条件概率, $P(\cdot)$ 表示事件发生的概率• 显然, 各随机事件的概率分析是确定可靠度的关键• 以下先进行分析•

T_i 时修理后, 构件的强度恢复到其初始疲劳质量• 因而, 在 T_i 时修理的条件下, t 时刻不失效(该事件记为 E_{i1}) 的概率为

$$P(E_{i1})=R_a(t-T_i)• \tag{27}$$

T_i 时修理表明第 i 次检查时检出裂纹, 但不用替换• 此事件由下列三个独立事件组成

E_{i2} = 裂纹产生于时段$[T_{i-1}, T_i]$ 间某瞬时, T_i 时检出, 且不满足替换条件•

$E_{i3}=$ 裂纹产生于时段$[T_{k-1}, T_k](k=1,2,\cdots,i-1)$间某瞬时, 且在$T_k$到$T_{i-1}$的顺序检查中均未检出, T_i时检出, 不满足替换条件·

$E_{i4}=$ 裂纹产生于时段$[T_{k-1}, T_k](k=1,2,\cdots,i-1)$间某瞬时, 在$T_k$到$T_{i-1}$的顺序检查中至少检出一次, T_i时检出, 不满足替换条件·

此三个事件发生的概率分别为

$$P(E_{i2})=\int_{T_{i-1}}^{T_i} f_{TCI}(\tau-t_0)P_D(T_i-\tau)P(a(T_i-\tau)<a_{cr})\mathrm{d}\tau, \tag{28}$$

$$P(E_{i3})=\sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau-t_0)\prod_{m=k}^{i-1}P_D(T_m-\tau)\times P_D(T_i-\tau)P(a(T_i-\tau)<a_{cr})\mathrm{d}\tau\right\}, \tag{29}$$

$$P(E_{i4})=\sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau-t_0)\left\{\sum_{m=k}^{i-1}[P_D(T_m-\tau)\prod_{n=m+1}^{i-1}P_D(T_n-T_m)\times P_D(T_i-T_m)]P(a(T_i-T_m)<a_{cr}\right\}\mathrm{d}\tau\right\} \tag{30}$$

T_i时不修理, 表明T_i时不存在裂纹, 或存在裂纹但未检出· 故T_i时不修理且到$t(T_i<t\leqslant T_{i+1})$时刻构件不失效这一事件由以下四个独立事件组成

$E_{i5}=$ t时刻前无裂纹产生且不失效,

$E_{i6}=$ 裂纹产生于时段$[T_i, t]$间某瞬时且不失效,

$E_{i7}=$ 裂纹产生于时段$[T_{k-1}, T_k](k=1,2,\cdots,i)$间某瞬时, 在$T_k$到$T_i$的顺序检查中均未检出, 且不失效,

$E_{i8}=$ 裂纹产生于时段$[T_{k-1}, T_k](k=1,2,\cdots,i)$间某瞬时, 在$T_k$到$T_{i-1}$的顺序检查中至少检出一次, T_i时未检出, 且不失效·

这些事件发生的概率分别为

$$P(E_{i5})=[1-F_{TCI}(t-t_0)]R_b(t-t_0), \tag{31}$$

$$P(E_{i6})=\int_{T_i}^{t} f_{TCI}(\tau\cdot t_0)R_b(\tau-t_0)R_a(t-\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{32}$$

$$P(E_{i7})=\sum_{k=1}^{i}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau-t_0)R_b(\tau-t_0)R_a(t-\tau)\prod_{m=k}^{i}P_D(T_m-\tau)\mathrm{d}\tau\right\}\cdot \tag{33}$$

$$P(E_{i8})=\sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau-t_0)\sum_{m=k}^{i-1}[P_D(T_m-\tau)\prod_{n=m+1}^{i=1}P_D(T_n-T_m)\times P_D(T_i-T_m)R_b(\tau-t_0)R_a(T_m-\tau)R_a(t-T_m)]\mathrm{d}\tau\right\}\cdot \tag{34}$$

若T_i时用同类新完整构件替换原损伤件, 则构件恢复到原始强度水平(无裂纹)· 相当于此构件从T_i时开始使用· 故在T_i时替换的条件下构件不失效这一事件由下两个独立事件组成

$E_{i9}=$ 时段$[T_i, t]$间无裂纹产生且不失效,

$E_{i10}=$ 时段$[T_i, t]$间某瞬时产生裂纹且不失效· 其发生的概率分别为

$$P(E_{i9})=[1-F_{TCI}(t-T_i)]R_b(t-T_i), \tag{35}$$

$$P(E_{i10}) = \int_{T_i}^{t} f_{TCI}(\tau - T_i) R_b(\tau - T_i) R_a(t - \tau) d\tau \cdot \tag{36}$$

T_i 时替换表明T_i 时的检出裂纹满足替换条件$a(T_i) \geqslant a_{cr}$, 因此, T_i 时替换这一事件由下两个独立事件组成

E_{i11} = 裂纹产生于时段$[T_{k-1}, T_k]$ $(k = 1, 2, \cdots, i = 1)$ 间某瞬时• 在T_k 到T_{i-1} 的顺序检查中均未检出• T_i 检出时满足替换条件

E_{i12} = 裂纹产生于时段$[T_{k-1}, T_k]$ $(k = 1, 2, \cdots, i - 1)$ 间某瞬时, 在T_k 到T_{i-1} 的顺序检查中至少检出一次, T_i 检出时满足替换条件

其发生概率分别为

$$P(E_{i11}) = \sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau - t_0)\prod_{m=k}^{i-1} P_D(T_m - \tau) \times P_D(T_i - \tau) P[a(T_i - \tau) \geqslant a_{cr}] d\tau\right\}, \tag{37}$$

$$P(E_{i12}) = \sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau - t_0)\prod_{m=k}^{i-1}\left\{P_D(T_m - \tau)\prod_{n=m+1}^{i-1} P_D(T_n - T_m) \times P_D(T_i - T_m) P(a(T_i - T_m) \geqslant a_{cr})\right\} d\tau\right\}, \tag{38}$$

这里, $P(a(T_i - T_m) \geqslant a_{cr})$ 表示裂纹从T_m 开始扩展到T_i 时其尺寸大于等于a_{cr} 的概率• 可根据其概率分布函数由静态干涉模型得到• 若假设维修后构件的材料参数不变, 且忽略应力重分布, 则(1) 式表达的裂纹尺寸的概率密度函数在维修后仅需考虑其参数 $\varphi(t)$、$\sigma_{\varphi(t)}$、$D(a)$ 等的修正• 因而, (17) 式表达的裂纹检出概率可直接由裂纹扩展的始未时间确定, 易于实施•

3. 维修结构的可靠性

由(26) 式和以上的概率分析可得, 第 i 次维修后构件的可靠性可表为

$$\begin{aligned}
R_{i+1}(t) = {} & P(E_{i1})[P(E_{i2}) + P(E_{i3}) + P(E_{i4})] + [P(E_{i5}) + P(E_{i6}) + \\
& P(E_{i7}) + P(E_{i8})] + [P(E_{i9}) + P(E_{i10})][P(E_{i11}) + P_{i12})] = \\
& R_a(t - T_i)\left[\int_{T_{i-1}}^{T_i} f_{TCI}(\tau - t_0) P_D(T_i - \tau) P(a(T_i - \tau) < a_{cr}) d\tau + \right. \\
& \sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau - t_0)\left\{\prod_{m=k}^{i-1} P_D(T_m - \tau) P_D(T_i - \tau) P(a(T_i - \tau) < a_{cr}) + \right.\right. \\
& \sum_{m=k}^{i-1} P_D(T_m - \tau)\prod_{n=m+1}^{i-1} P_D(T_n - T_m) P_D(T_i - T_m) P(a(T_i - \tau) < \\
& \left.\left.\left. a_{cr})\right\} d\tau\right\}\right] + [1 - F_{TCI}(t - t_0)] R_b(t - t_0) + \\
& \int_{T_i}^{t} f_{TCI}(\tau - t_0) R_b(\tau - t_0) R_a(t - \tau) d\tau + \\
& \sum_{k=1}^{i}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau - t_0) R_b(\tau - t_0) \cdot R_a(t - \tau)\prod_{m=k}^{i} P_D(T_m - \tau) d\tau\right\} + \\
& \sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau - t_0)\left\{\sum_{m=k}^{i-1}[P_D(T_m - \tau)\right.\right.
\end{aligned}$$

$$\prod_{n=m+1}^{i-1} P_D(T_n - T_m) P_D(T_i - T_m) R_b(\tau - t_0) R_a(T_m - \tau)$$

$$\left.\left.\left. R_a(t - T_m)\right]\right\} \mathrm{d}\tau\right\} + \left\{[1 - F_{TCI}(t - T_i)] R_b(t - T_i) + \right.$$

$$\left.\int_{T_i}^{t} f_{TCI}(\tau - T_i) R_b(\tau - T_i) R_a(t - \tau) d\tau\right\} \times$$

$$\sum_{k=1}^{i-1}\left\{\int_{T_{k-1}}^{T_k} f_{TCI}(\tau - t_0)\left[\prod_{m=k}^{i-1} P_D(T_m - \tau) P_D(T_i - \tau) P(a(T_i - \tau) \geqslant a_{cr}) + \right.\right.$$

$$\left.\left.\sum_{m=k}^{i-1} P_D(T_m - \tau) \prod_{n=m+1}^{i-1} P_D(T_n - T_m) P_D(T_i - T_m) P_D(a(T_i - T_m) \geqslant a_{cr})\right] \mathrm{d}\tau\right\}. \tag{39}$$

由构件的可靠性,按结构系统的可靠性分析方法可确定结构的总体可靠性. 假设所有危险部位近似独立,则第 i 次维修后结构的总体可靠度可表为

$$R_{s,i+1}(t) = \prod_{j=1}^{N} R_{i+1,j}(t), \tag{40}$$

其中,N 为危险部位或所研构件的个数. $R_{i+1,j}(t)$ 为第 i 次维修后第 j 个构件的可靠度.

3 结 束 语

动载作用下结构的动态可靠性分析是工程中的重要问题. 结构使用过程中的检查、维修是防止损伤扩展,保持结构可靠性不低于最小容许限度的必要措施. 考虑维修时,影响结构可靠性的随机因素很多. 进行可靠性分析时需要综合处理大量复杂的随机事件. 本文利用事件树分析的方法,从理论上全面分析了检修过程中的诸多随机事件及其发生概率. 依据动态超限模型,系统地建立了维修结构的动态可靠性分析模型. 为维修结构的可靠性评估和进行维修决策提供了依据. 该模型可同时考虑极限载荷下的破坏和疲劳破坏.

[参 考 文 献]

[1] 殷学纲,郭书祥. 含初始裂纹结构的动态可靠性分析[J]. 工程力学,1995,**12**(2):72~79.

[2] 郭书祥,冯立富. 维修结构的动态可靠性预估[J]. 机械强度,1999,**21**(4):45~48.

[3] 郭书祥. 疲劳裂纹扩展的随机模型和动态可靠性[J]. 机械强度,1998,**20**(2):120~125.

[4] Soares C G, Garbator Y. Faxigue reliabiltiy of the shio hull girder accounting for inspection and repair [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, **51**(3):341~351.

[5] Deodetis G, Asada H et al. Reliability of aircraft structures under non_periodic inspection: A Bayesian approach[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, **53**(5):789~805.

[6] Mori Y, Ellingwood B R. Maintaining Reliability of concrete structures I: Role of inspection/repair [J]. Journal of Structural Mechanics, 1994, **120**(3):824~845.

Probability of Random Events of Inspection and Repair and Maintaining Reliability of Structures

Guo Shuxiang, L Zhenzhou
(1. Air Force University of Engineering, Xi'an 710038, P R China;
2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P R China)

Abstract: Reliability analysis of the inspected and repaired structure requires dealing with a large number of complex random events. Considering many kinds of random factors, a probability of these random events existing possibly in the inspection and repair process and reliabiity analysis methodologies are proposed. A systematic dynamic reliability model is given for structures in service under the scheduled inspection and repair.

Key words: Fatigue crack growth; Random events of inspection and repair; maintaining reliability