

多重故障并发下单部件系统视情维修建模与优化

葛恩顺, 李庆民*, 彭英武, 王慎

海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033

摘要: 实际装备使用工程中, 系统性能随工作时间延长而缓慢劣化并最终导致劣化故障发生而需进行更换, 这一过程往往伴随着各种随机冲击, 系统因故障的突然发生而失效, 即多重故障并发。从维修工程的实际问题出发, 考虑劣化故障与冲击故障并发以及多重故障之间存在相关性的情况, 建立了序贯检测条件下基于多级控制限的单部件系统视情维修模型, 给出了在预定维修策略下系统维修费用率的数学表达式, 并以长期运行费用率最低为约束条件对系统维修阈值进行优化。通过实例与基于定期检测的维修策略进行对比, 验证了模型的合理性和有效性。

关键词: 多重故障并发; 多级控制限; 维修; 长期运行费用率; 优化

中图分类号: V215.7; N945.17

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2013)03-0580-08

视情维修是 20 世纪 70 年代发展起来的一种预防性维修工作, 实践证明它能够延长服役装备的工作寿命而不会增大故障风险, 这是因为视情维修依据系统状态选择适当的时机实施维修活动, 避免了传统预防性维修工作中维修不足或过剩的问题, 同时节省了大量的人力、物力和财力。一般情况下, 装备的工作性能会随时间推移而不断劣化, 若不采取预防性维修, 最终会因劣化故障发生而失效。视情维修就是通过对系统劣化过程进行检测, 发现其潜在故障时立即采取预防性维修活动, 以避免劣化故障的发生。

目前, 国内外学者对于视情维修展开了广泛而深入的研究, 并取得了丰富的成果。按照劣化过程描述的不同, 可将其分为离散描述和连续描述两大类。离散描述利用数值将系统状态空间离散化, 通常应用马尔可夫过程进行维修策略的求解, 如文献[1]和文献[2]基于马尔可夫链建立完

全维修条件下的视情维修模型; 文献[3]和文献[4]利用马尔可夫理论描述劣化过程, 研究最大维修和最小维修下的视情维修模型; 文献[5]和文献[6]建立不完全维修条件下的劣化系统马尔可夫链模型。连续描述利用 Levy 过程等一类随机连续的独立增量过程描述, 并基于控制限原则^[7-8]制定视情维修策略, 模型分析求解相对复杂, 但与实际情况更为接近, 如文献[9]~文献[12]利用 Gamma 过程建立连续或定期检测下的视情维修模型; 文献[13]基于 Gamma 过程研究序贯检测下的劣化系统视情维修策略。综合来看, 以上文献多以单一劣化故障(渐发性故障、到寿失效)为假设, 然而实际中装备由于外部或内部的因素受到致命的冲击而引发随机故障(突发性故障和偶然故障), 无论此时劣化故障是否发生, 系统都会因故障而停机。对此, 文献[14]和文献[15]利用泊松过程对冲击故障进行建模, 并给出冲击故障

收稿日期: 2012-04-17; 退修日期: 2012-07-26; 录用日期: 2012-09-10; 网络出版时间: 2012-09-13 11:24

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120913.1124.006.html

基金项目: 国防预研项目(51304010206, 51327020105)

* 通讯作者. Tel.: 027-83442947 E-mail: licheng0001@hotmail.com

引用格式: Ge E S, Li Q M, Peng Y W, et al. Condition-based maintenance modeling and optimization for single-unit system with multiple competing processes. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 580-587. 葛恩顺, 李庆民, 彭英武, 等. 多重故障并发下单部件系统视情维修建模与优化. 航空学报, 2013, 34(3): 580-587.

下的最优维修策略;文献[16]在维修建模中考虑多个劣化过程和冲击故障并发的情况。不足的是,这些文献忽略了冲击故障与劣化故障的联系,与现实情况不尽相符。这是因为当系统劣化程度不断加深时,发生冲击故障的概率往往会随之提高。因此,在视情维修建模中需要考虑多重故障并发以及故障间的相关性,以反映系统动态特征。

另外,现有检测策略主要包括连续检测、定期检测和序贯检测。其中连续检测对检测条件和技术要求较高,应用范围狭窄;定期检测便于操作,应用最为普遍,但其不一定是最优方案^[17]。这是因为当装备较新时可靠性较高,可以延长检测间隔,而随着装备不断老化,就需要逐步缩短检测间隔,以避免发生故障,这种根据系统当前状态确定下一次检测时刻的方式即为序贯检测。该策略能够减少因检测造成的停机时间,显著降低检测成本,提高装备维修的经济性。然而目前的相关文献为便于分析,在视情维修模型中大多假设定期检测和连续检测条件,对于序贯检测的研究还有待深入。

本文针对装备维修实际,考虑多重故障并发和故障相关的情况,分别利用独立增量过程和非时齐泊松过程对系统劣化过程和冲击故障进行描述,建立单部件系统在序贯检测条件下的视情维修模型,并且以长期运行费用率最低为目标对维修阈值进行优化。

1 系统模型

1.1 模型假设

1) 对于单部件系统,其性能随工作时间的延长而逐渐劣化,直到最终发生故障失效进行更换(耗损型系统),并且这一过程中伴随着冲击故障的发生,需要进行故障后更换。

2) 设平稳独立增量过程 X_t 表示在时刻 t 的系统状态特征参数($X_t = 0$ 表示系统处于全新工作状态),以反映系统该时刻的劣化程度,如图 1 所示,将预防性维修阈值和故障阈值分别记为 ξ 和 L ,相应的维修策略为

a) 当 $X_t < \xi$ 时,系统正常工作,确定下一次检测的时刻。

b) 当 $\xi \leq X_t < L$ 时,系统发生潜在故障,进行预防性更换。

c) 当 $X_t \geq L$ 时,系统发生劣化故障,需进行故障后更换。

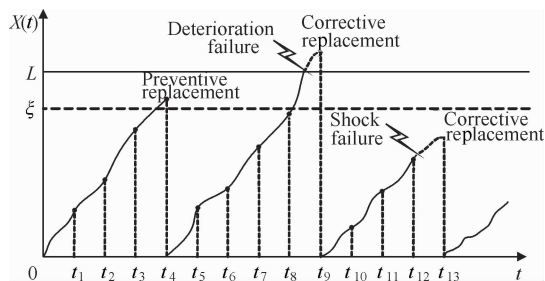


图 1 系统劣化过程

Fig. 1 System deterioration process

3) 在离散的时间点 $t_k = k\Delta t$ ($k \in 1, 2, \dots, N$) 中选择时机对系统状态进行检测,其中 Δt 为单位时间, k 为序号。

4) 由于外部环境或内部因素影响,系统在劣化过程中会因随机事件而引发冲击故障,即便此时劣化程度 X_t 还未超过 L ,也会引起系统失效而停机,须进行故障后更换。设冲击故障与劣化故障之间不独立,以反映系统冲击故障发生随劣化程度加深而变化的特征。

5) 检测是非破坏性的,能够完全反映系统劣化程度,且检测时间忽略,系统发生劣化故障和冲击故障时不用检测,可以立即发现。

6) 维修方式包括预防性更换和故障后更换,二者均将系统恢复至全新,维修时间忽略。

7) 对于系统检测费用 C_i 、预防性更换费用 C_p 和故障后更换费用 C_c ,满足 $C_i < C_p < C_c$ 。

8) 优化目标为系统长期运行费用率最低。

1.2 模型描述

按照模型假设,根据检测出系统的劣化状态信息来决定采取何种维修策略,对于不同的系统劣化程度,定义不同的检测周期,如系统劣化程度较轻时,可以采取较长的检测间隔。这种非定期的检测方式,即序贯检测,其检测间隔是根据系统状态来动态调整的。另一方面,在劣化过程中,系统会因冲击故障的发生而停机,需要采取故障后更换使得系统恢复如新,并且当系统劣化程度较高时,冲击故障发生概率会增大。因此需要在系统劣化过程中考虑冲击故障并发且相关的情况,

通过对维修阈值进行优化,以实现系统长期运行费用率最低的目标。

2 模型建立

2.1 劣化过程与冲击故障描述

劣化过程描述:将时刻 t_k 的系统劣化程度记为 $X_k = X_{t_k}$, 设相邻时刻系统劣化程度 $X_k - X_{k-1}$ 服从相同的分布 f , 那么 n 个单位时间内系统劣化增量的分布为 $f^{(n)}$, 即 f 的 n 重卷积。Gamma 分布适合表述系统劣化出现的腐蚀、疲劳和裂纹增长等现象, 这里设 f 为 Gamma 分布。

冲击故障描述:假设冲击故障到达时间服从非时齐泊松过程 $\{N(t), t \geq 0\}$, 其参数 $\lambda(t)$ 取决于系统劣化程度 X_k , 可表示为^[18]

$$\lambda(t) = 1_{\{X_k \leq M_S\}} \lambda_1 + 1_{\{X_k > M_S\}} \lambda_2 \quad t_k \leq t < t_{k+1} \quad (1)$$

式中: $1_{\{\cdot\}}$ 表示当括号内条件满足时, 该表达式值为 1, 否则为 0; λ_1 和 λ_2 为冲击故障发生率, 并且满足 $\lambda_1 \leq \lambda_2$; M_S 为某一劣化程度。

2.2 维修策略

一般情况下, 系统在劣化程度较低时可靠性较高, 发生故障的概率较低, 可以适当延长检测时间间隔; 当系统劣化程度较高、易发生劣化故障时, 则需要缩短检测间隔以便掌握系统劣化状态, 采取相关维修措施。设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ 表示系统的 N 个维修阈值, 且满足 $0 < \xi_1 < \dots < \xi_N < L$, 其中 $\xi_N = L$, 制定维修策略如下^[13]:

1) 当 $\xi_l \leq X_k < \xi_{l+1}$ ($0 \leq l < N$ 且 $\xi_0 = 0$) 时, 下次检测的时间是 $N-l$ 个单位时间 Δt 之后。

2) 当 $\xi_N \leq X_k < L$ 时, 进行预防性更换, 下次检测的时间是 N 个单位时间 Δt 之后。

当在时刻 t_k 和 t_{k+1} 之间发生劣化故障或冲击故障时, 系统在 t_{k+1} 时刻进行故障后更换, 下次检测的时间是 N 个单位时间 Δt 之后。

2.3 长期运行费用率

根据模型假设条件, 系统长期运行费用率可以表示为

$$E(C(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)) = \frac{1}{\Delta t} (C_i P_i + C_p P_p + C_c P_c) \quad (2)$$

式中: P_i 、 P_p 和 P_c 分别为在单位时间 Δt 内对系统进行检测、预防性更换和故障后更换的概率。

3 模型的分析与求解

3.1 模型分析

为了计算系统长期运行费用率, 首先需要计算 P_i 、 P_p 和 P_c 。设函数 g 为系统状态概率密度函数, 按照是否进行检测和是否发生冲击故障, 由全概率公式, 其可表达为

$$g(x) = g_1(x) + g_2(x) + g_3(x) + g_4(x) \quad (3)$$

式中: $g_1(x)$ 表示系统当前状态为 x 时未发生冲击故障、进行检测的概率密度; $g_2(x)$ 表示系统当前状态为 x 时未发生冲击故障、未进行检测的概率密度; $g_3(x)$ 表示系统当前状态为 x 时进行检测, 但此时冲击故障已发生而导致停机的概率密度; $g_4(x)$ 表示系统当前状态为 x 时未进行检测, 但此时冲击故障已发生而导致停机的概率密度。

由于预防性更换通常发生在检测之后, 设预防性更换的费用包含检测的费用, 那么单位时间 Δt 内发生的检测概率 P_i 、预防性更换概率 P_p 和故障后更换概率 P_c 分别为

$$P_i = \int_0^{\xi_N} g_1(x) dx \quad (4)$$

$$P_p = \int_{\xi_N}^L g_1(x) dx \quad (5)$$

$$P_c = \int_L^{+\infty} g(x) dx + \int_0^L (g_3(x) + g_4(x)) dx \quad (6)$$

3.2 模型求解

根据题设, 冲击故障被描述为参数为 $\lambda(t)$ 的非时齐泊松过程 $\{N(t), t \geq 0\}$, 那么从时刻 t_r 到 t_{r+k} 之间发生的事件个数为一个泊松随机变量, 记为 $N(r+k) - N(r)$, 其均值为 $\int_r^{r+k} \lambda(t) dt$ 。根据式(1), 可得:

$$\int_r^{r+k} \lambda(t) dt = k_1 \lambda_1 + k_2 \lambda_2 \quad (7)$$

式中: k_1 满足 $X_{r+k_1-1} \leq M_S < X_{r+k_1}$, $M_S < L$, $k = k_1 + k_2$ 。该均值与系统状态有关, 而与时间

起点 r 无关。将 k 个单位时间 Δt 内发生的冲击故障次数记为 Y_k , 其等于 0 的概率为

$$P(Y_k = 0) = \exp(- (k_1\lambda_1 + k_2\lambda_2)) = \bar{F}_1(k_1)\bar{F}_2(k_2) \quad (8)$$

式中: $\bar{F}_b(k_b) = \bar{F}_b(k_b\Delta t) = \exp(-k_b\Delta t\lambda_b)$, 并且有 $F_b(k_b) = F_b(k_b\Delta t) = 1 - \bar{F}_b(k_b\Delta t)$, $b = 1, 2$ 。

首先求解 $g_1(x)$ 和 $g_2(x)$ 。按照既定的维修策略, 当检测发现系统状态 $y \in [\xi_l, \xi_{l+1})$ ($0 \leq l \leq N-1$, $y=0$ 表示系统全新状态) 时, 确定下一次检测的时间为 $N-l$ 个单位时间 Δt 之后, 且检测前不发生冲击故障, 那么有 $Y_{N-l} = 0$ 。根据维修策略, 在经历第 $1, 2, \dots, N-l-1$ 个单位时间 Δt 后, 均不发生检测, 也无冲击故障发生, 即 $Y_1 = 0, Y_2 = 0, \dots, Y_{N-l-1} = 0$ 。设 M_S 在第 S 和 $S+1$ 个维修阈值之间, 即 $\xi_S < M_S \leq \xi_{S+1}$, 其中 $0 \leq S \leq N$ (若 $S = N$, 则 $\xi_N < M_S \leq L$), 那么 $g_1(x)$ 和 $g_2(x)$ 可分为以下两种情况^[13]:

1) 当 $0 < x \leq M_S$ 时, $g_1(x)$ 和 $g_2(x)$ 分别为

$$g_1(x) = P_0 \bar{F}_1(N) f^{(N)}(x) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-1)} \bar{F}_1(N-l) \cdot \int_{\xi_l}^{\min(\xi_{l+1}, x)} g_1(y) f^{(N-l)}(x-y) dy \quad (9)$$

$$g_2(x) = P_0 \sum_{i=1}^{N-1} \bar{F}_1(i) f^{(i)}(x) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-2)} \sum_{i=1}^{N-l-1} \bar{F}_1(i) \cdot \int_{\xi_l}^{\min(\xi_{l+1}, x)} g_1(y) f^{(i)}(x-y) dy \quad (10)$$

2) 当 $x > M_S$ 时, $g_1(x)$ 和 $g_2(x)$ 分别为

$$g_1(x) = \sum_{j=1}^N \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(N-j) P_0 A_w(j, N) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-1)} \sum_{j=1}^{N-l} \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(N-l-j) B_w(j, l, N) + \sum_{l=S}^{N-1} \bar{F}_2(N-l) C_w(l, N) \quad (11)$$

$$g_2(x) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^i \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(i-j) P_0 A_w(j, i) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-2)} \sum_{j=1}^{N-l-1} \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(i-j) B_w(j, l, i+l) + \sum_{l=S}^{N-2} \sum_{i=1}^{N-l-1} \bar{F}_2(i) C_w(l, i+l) \quad (12)$$

式中: $w = 1_{\{M_S < x < L\}} \cdot 1 + 1_{\{x \geq L\}} \cdot 2$ 。

$$P_0 = \int_{\xi_N}^{\infty} g_1(x) dx + \int_L^{\infty} g_2(x) dx +$$

$$\int_0^{\infty} (g_3(x) + g_4(x)) dx \quad (13)$$

$$A_1(m, n) = \int_{u=0}^{M_S} f^{(m-1)}(u) \int_{v=M_S}^x f(v-u) \cdot f^{(n-m)}(x-v) dv du \quad (14)$$

$$A_2(m, n) = \int_{u=0}^{M_S} f^{(m-1)}(u) \int_{v=M_S}^L f(v-u) \cdot \int_{z=M_S}^L f^{(n-m-1)}(z-v) f(x-z) dz dv du \quad (15)$$

$$B_1(m, l, n) = \int_{y=\xi_l}^{\min(\xi_{l+1}, M_S)} g_1(y) \int_{u=y}^{M_S} f^{(m-1)}(u-y) \cdot \int_{v=M_S}^x f(v-u) f^{(n-l-m)}(x-v) dv dud y \quad (16)$$

$$B_2(m, l, n) = \int_{y=\xi_l}^{\min(\xi_{l+1}, M_S)} g_1(y) \int_{u=y}^{M_S} f^{(m-1)}(u-y) \cdot \int_{v=M_S}^L f(v-u) \int_{z=v}^L f^{(n-l-m-1)}(z-v) \cdot f(x-z) dz dv dud y \quad (17)$$

$$C_1(l, n) = \int_{\max(\xi_l, M_S)}^{\min(\xi_{l+1}, x)} g_1(y) f^{(n-l)}(x-y) dy \quad (18)$$

$$C_2(l, n) = \int_{\max(\xi_l, M_S)}^{\xi_{l+1}} g_1(y) \int_{z=y}^L f^{(n-l-1)}(z-y) \cdot f(x-z) dz dy \quad (19)$$

为使表达式简洁, 定义如下规则: ①若 $i < j$,

$\int_j^i f(u) du = 0$, $\sum_j^i W = 0$; ②当 $i \leq 0$ 时, 仍满足 $\int f^{(i)}(y) f(x-y) dy = f^{(i+1)}(x) = \int f(y) f^{(i)}(x-y) dy$ 。

然后求解 $g_3(x)$ 和 $g_4(x)$ 。根据假设, 冲击故障一旦发生就会采取故障后更换, 意味着冲击故障只能发生在该段时间的最后一个 Δt 内。按照既定维修策略, 在经过第 $N-l$ 个单位时间 Δt 后进行检测时发生冲击故障, 即 $Y_{N-l-1} = 0$ 且 $Y_{N-l} > 0$ 。根据维修策略, 在经过第 $1, 2, \dots, N-l-1$ 个 Δt 时不发生检测, 但发生冲击故障需要进行故障后更换, 即 $Y_{i-1} = 0$ 且 $Y_i > 0$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N-l-1$ 。根据以上分析, 可得:

1) 当 $0 < x \leq M_S$ 时, $g_3(x)$ 和 $g_4(x)$ 为

$$g_3(x) = \bar{F}_1(N-1) F_1(1) P_0 f^{(N)}(x) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-1)} \bar{F}_1(N-l-1) \cdot F_1(1) \int_{\xi_l}^{\min(\xi_{l+1}, x)} g_1(y) f^{(N-l)}(x-y) dy \quad (20)$$

$$g_4(x) = P_0 \sum_{i=1}^{N-1} \bar{F}_1(i-1) F_1(1) f^{(i)}(x) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-2)} \sum_{i=1}^{N-l-1} \bar{F}_1(i-1) \cdot F_1(1) \int_{\xi_1}^{\min(\xi_{i+1}, x)} g_1(y) f^{(i)}(x-y) dy \quad (21)$$

2) 当 $x > M_S$ 时, $g_3(x)$ 和 $g_4(x)$ 为

$$g_3(x) = \sum_{j=1}^{N-1} \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(N-j-1) F_2(1) \cdot P_0 A_w(j, N) + \bar{F}_1(N-1) F_1(1) P_0 A_w(N, N) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-1)} \sum_{j=1}^{N-l-1} \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(N-l-j-1) \cdot F_2(1) B_w(j, l, N) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-1)} \bar{F}_1(N-l-1) F_1(1) B_w(N-l, l, N) + \sum_{l=S}^{N-1} \bar{F}_2(N-l-1) F_2(1) C_w(l, N) \quad (22)$$

$$g_4(x) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{i-1} \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(i-j-1) \cdot F_2(1) P_0 A_w(j, i) + \sum_{i=1}^{N-1} \bar{F}_1(i-1) F_1(1) P_0 A_w(i, i) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-2)} \sum_{i=1}^{N-l-1} \sum_{j=1}^{i-1} \bar{F}_1(j) \bar{F}_2(i-j-1) \cdot F_2(1) B_w(j, l, i) + \sum_{l=0}^{\min(S, N-2)} \sum_{i=1}^{N-l-1} \bar{F}_1(i-1) F_1(1) B_w(i, l, i) + \sum_{l=S}^{N-2} \sum_{i=1}^{N-l-1} \bar{F}_2(i-1) F_2(1) C_w(l, i+l) \quad (23)$$

4 算例分析

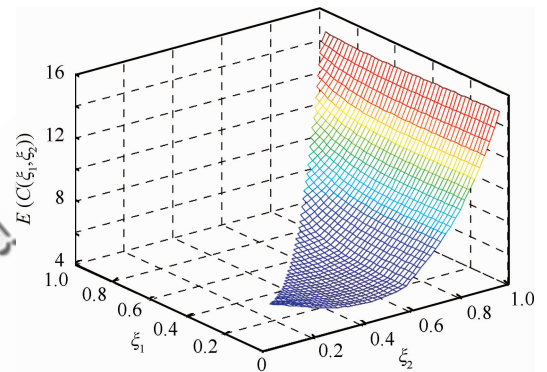
为了使建立的视情维修策略计算分析符合 2.1 节中的模型要求,且不失问题的一般性,选择 Gamma 分布的特例——指数分布进行计算分析。按照上述分析和模型假设,设相邻时刻系统劣化增量 $X_k - X_{k-1}$ 服从相同的分布

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha x} \quad (24)$$

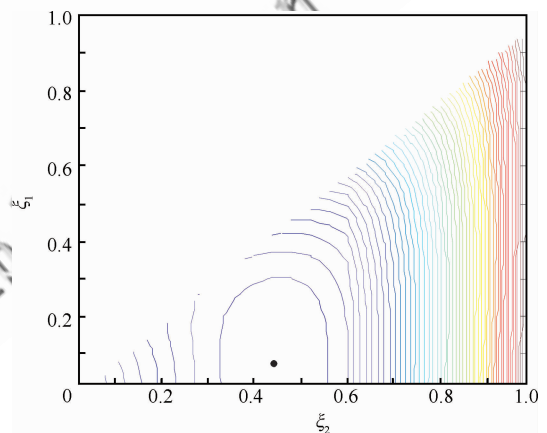
式中: $\frac{1}{\alpha}$ 为系统劣化平均速度, α 越大表示系统劣化速度越慢。

设定维修阈值数目为 2, 即 $N = 2$, 并设系统状态参数为: $\alpha = 6, L = 1, M_S = 0.6$; 维修费用参数为: $C_i = 1$ 元, $C_p = 10$ 元, $C_c = 100$ 元; 发生冲击故

障的故障率参数为: $\lambda_1 = 0.01, \lambda_2 = 0.1$; 设单位时间 $\Delta t = 1$ h。将分布 f 及以上参数代入式(9)~式(23), 通过解微分方程组得到 $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 、 $g_3(x)$ 和 $g_4(x)$, 再代入式(2), 即可得到维修费用率 $E(C(\xi_1, \xi_2))$ 。通过计算求解, 维修费用率随维修阈值变化的曲面图和等高线图如图 2 所示。



(a) Mesh of expected maintenance cost rate



(b) Iso-level of expected maintenance cost rate

图 2 维修费用率随维修阈值变化的关系

Fig. 2 Relationship of maintenance cost rate vs maintenance thresholds

下面分别以劣化参数 α 和检测费用 C_i 为变量, 在其余参数不变的条件下作进一步分析。图 3 说明了劣化参数和检测费用对维修策略的影响。如图 3(a) 所示, 最优维修阈值随着劣化参数增大而增大, 这表示劣化参数 α 增大时, 系统性能劣化速度 $\frac{1}{\alpha}$ 减慢, 允许较大的预防性维修阈值 ξ_1 和 ξ_2 以降低检测频率(检测间隔为 $2\Delta t$)。如图 3(b)

所示,当检测费用较低时(如 $C_i = 1$ 元),最优检测阈值 ξ_2 较大, ξ_1 较小,即采用较高的检测频率(检测间隔为 Δt),这是因为此时检测费较低,可以利用较为频繁的检测降低劣化故障发生的概率;当 $C_i = C_p/2$ 时, $\xi_1 \approx \xi_2$,此时须采用较低的检测频率来降低检测费用(检测间隔为 $2\Delta t$);当 $C_i = C_p$ 时, $\xi_1 \approx 0$ 、 $\xi_2 \approx 0$,此时检测费用过高,无需检测直接更换。从图 3 中还可以看出,与冲击故障发生率相对较低的情况($\lambda_1 = 0.001, \lambda_2 = 0.01$)相比,题设条件($\lambda_1 = 0.01, \lambda_2 = 0.1$)的 ξ_1 相对较小,这是由于在冲击故障发生概率增加的情况下,需要较高频率的检测来降低劣化故障的发生概率。

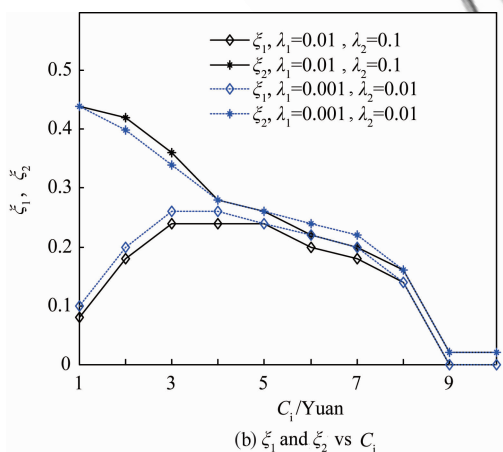
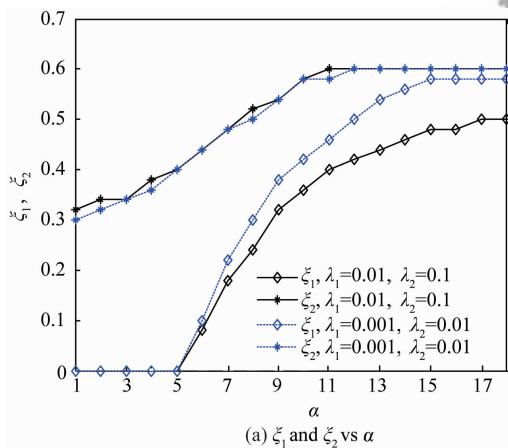


图 3 劣化参数和检测费用对维修策略的影响

Fig. 3 Effect of deterioration parameter and inspection cost on maintenance policies

最后分析在序贯检测维修策略下,系统特征(劣化参数、冲击故障发生率)和维修成本(检测费用)对于最优维修费用率的影响,并与定期检测的最优维修费用率结果进行对比。设定期检测的检测周期为 $B\Delta t$,通过以下方式得到定期检测的维修费用率计算结果^[13]:设 $N = B$,即 ξ_B 为预防性维修阈值,并且满足 $\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_B$,按照 2.2 节的维修策略计算并优化 B ,即为定期检测下最优维修费用率。

如图 4 所示,与定期检测相比,序贯检测能够有效减少维修费用率,在 $8 < \alpha < 13$ 时最为显著,这是因为当平均劣化率 α 过小或过大即系统劣化较快或较慢时,需要分别采用尽量较高或较低检测频率,这样就与采用较短和较长检测时间间隔的定期检测趋于一致,并且最优维修费用率会因冲击故障发生率的高低不同而发生增减。

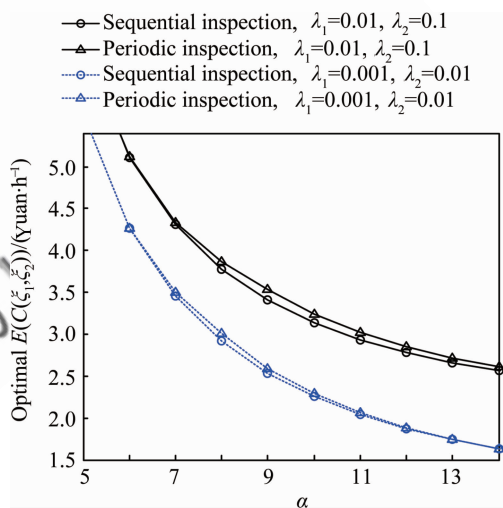


图 4 不同检测策略下最优维修费用率随劣化参数的变化关系

Fig. 4 Relationship of optimal maintenance cost rate vs deterioration parameter under different inspection policies

如图 5 所示,当 $3 \text{ 元} < C_i < 8 \text{ 元}$ 时,序贯检测与定期检测的差别较为明显,这是因为在检测费用较低时,可以采用较高的检测频率;当检测费用较高时,无需检测直接更换,均与定期检测下的最优费用率趋于一致。两种检测策略下的最优维修费用率在冲击故障发生率较高时也随之增加。

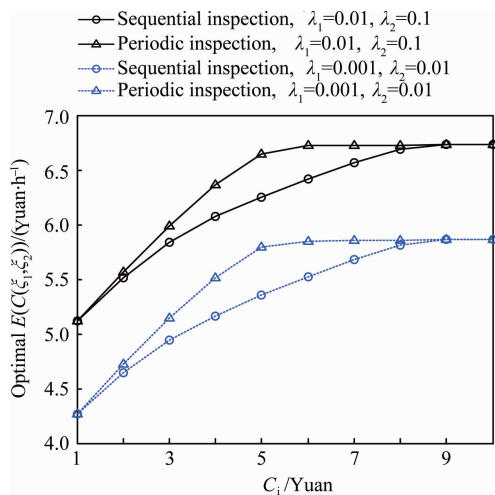


图5 不同检测策略下最优维修费用率随检测费用的变化关系

Fig. 5 Relationship of optimal maintenance cost rate vs inspection cost under different inspection policies

5 结论

1) 考虑劣化故障和冲击故障并发且相关的情况,建立单部件系统在序贯检测策略下的视情维修模型,给出了系统长期运行费用率的计算表达式。算例表明:在给定模型参数条件下,通过对维修阈值优化,能够使得系统长期运行费用率降至最低水平,即有效地降低装备维修保障费用。

2) 最优维修阈值表达了系统预防性维修与修复性维修的综合权衡结果,其会随着系统劣化参数和检测费用参数变化而变化,并且其变化趋势会因冲击故障发生率不同而发生改变,在冲击故障发生率较大的情况下,最优维修阈值相对减小,以缩短检测时间间隔。

3) 最优长期运行费用率会随着系统劣化参数增大而降低、随着检测费用增加而提高,同时其还会随着冲击故障发生率提高而增大。与定期检测下的最优维修费用率进行对比,序贯检测下的维修费用率低于定期检测,证明了本文视情维修模型的有效性。

参 考 文 献

[1] Amari S V, McLaughlin L. Optimal design of a condition based maintenance model. Proceedings of the 50th Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS),

2004; 528-533.

- [2] Kallen M J, Noortwijk J M. Optimal periodic inspection of a deterioration process with sequential condition states. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(4): 249-255.
- [3] Chen D, Trivedi K S. Optimization for condition-based maintenance with semi-Markov decision process. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90(1): 25-29.
- [4] Moustafa M S, Maksoud E Y, Sadek S. Optimal major and minimal maintenance policies for deteriorating systems. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 83(3): 363-368.
- [5] Cheng Z J, Gao D H, Huang Z, et al. Optimal analysis of the condition-based maintenance model under the imperfect repair. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(7): 1106-1108. (in Chinese)
程志君, 高大化, 黄卓, 等. 不完全维修条件下的视情维修优化模型. 系统工程与电子技术, 2006, 28(7): 1106-1108.
- [6] Chiang J H, Yuan J. Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71(2): 165-172.
- [7] Wang H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European Journal of Operational Research, 2002, 139(3): 469-489.
- [8] Noortwijk J M. A survey of the application of Gamma processes in maintenance. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(1): 2-21.
- [9] Liao H, Elsayed E A, Chan L Y. Maintenance of continuously monitored degrading systems. European Journal of Operational Research, 2006, 175(2): 821-835.
- [10] Grall A, Dieulle L, Berenguer C, et al. Asymptotic failure rate of a continuously monitored system. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(2): 126-130.
- [11] Kallen M J, van Noortwijk J M. Optimal maintenance decisions under imperfect inspection. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90(3): 177-185.
- [12] Ge E S, Li Q M, Zhang G Y, et al. Optimization of condition-based maintenance for deteriorating system under imperfect maintenance. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 316-324. (in Chinese)
葛恩顺, 李庆民, 张光宇, 等. 考虑不完全维修的劣化系统最优视情维修策略. 航空学报, 2013, 34(2): 316-324.
- [13] Grall A, Berenguer C, Dieulle L. A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76(2): 167-180.
- [14] Chan G K, Asgarpour S. Optimum maintenance policy with Markov process. Electric Power Systems Research, 2006, 76(6-7): 452-456.

- [15] Chen D, Trivedi K S. Closed-form analytical results for condition-based maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, 76(1): 43-51.
- [16] Li W, Pham H. An inspection-maintenance model for systems with multiple competing processes. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, 54(2): 318-327.
- [17] Feng J. Sequential inspection method for long-storage products under reliability requirement. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2009, 23(6): 166-170. (in Chinese)
冯静. 长贮产品基于贮存可靠度的序贯检测方法. *模糊系统与数学*, 2009, 23(6): 166-170.
- [18] Huynh K T, Barros A, Berenguer C, et al. A periodic inspection and replacement policy for systems subject to

competing failure modes due to degradation and traumatic events. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(4): 497-508.

作者简介:

葛恩顺 男, 博士研究生。主要研究方向: 装备视情维修决策。

Tel: 027-83442753-7402

E-mail: geenshun@yahoo.com.cn

李庆民 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 武器系统仿真、装备综合保障等。

Tel: 027-83442947

E-mail: licheng0001@hotmail.com

Condition-based Maintenance Modeling and Optimization for Single-unit System with Multiple Competing Processes

GE Enshun, LI Qingmin^{*}, PENG Yingwu, WANG Shen

Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: In most practical situations of equipment work, the system does not only degrade with use and age, but is also subject to traumatic events or shocks which lead to a sudden failure; that is, system failure is due to both deterioration and shock events. Focusing on the actual problem of maintenance engineering, a new condition-based maintenance model is established based on the sequential inspection policy and multi-level control-limit rule for a single-unit system which is subject to both the deterioration process and shock process. The competing and dependent failures due to deterioration and shock are considered. A mathematical model for the deteriorating system cost is derived under a pre-selected maintenance policy, and the long-run cost rate can be minimized by a joint optimization of the maintenance structure thresholds. Through a numerical example, the proposed model is compared with the maintenance model using periodically inspection policy, and the validity and superiority of the model are proved.

Key words: multiple competing processes; multi-level control-limit; maintenance; long-run cost rate; optimization

Received: 2012-04-17; **Revised:** 2012-07-26; **Accepted:** 2012-09-10; **Published online:** 2012-09-13 11:24

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120913.1124.006.html

Foundation items: National Defence Pre-research Foundation of China (51304010206, 51327020105)

*** Corresponding author.** Tel.: 027-83442947 E-mail: licheng0001@hotmail.com