

# 基于损伤标尺的电子设备预测维修决策优化

徐玉国<sup>1,2</sup>, 邱静<sup>1,\*</sup>, 刘冠军<sup>1</sup>, 吕克洪<sup>1</sup>

1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院 装备综合保障技术重点实验室, 湖南 长沙 410073
2. 装甲兵工程学院 技术保障工程系, 北京 100072

**摘要:** 基于故障预测信息进行维修决策是预测性维修等新型维修模式的主要特征之一, 可以有效提高装备使用可用度、降低寿命周期费用。面向单部件电子系统, 针对故障预测中的损伤标尺方法, 在完美换件维修的假设下, 以单位时间成本、平均使用可用度与平均效费比为指标, 提出了一种预测维修决策优化模型。对于与外场可更换单元(LRU)寿命独立的损伤标尺, 选择预测距离与 Weibull 分布的形状参数为决策变量, 对于与 LRU 寿命相关的损伤标尺, 选择累积损伤因子与随机标准差为决策变量, 应用 Monte Carlo 方法仿真研究了各个决策变量对维修效能指标的影响。结果表明: 应用与 LRU 寿命独立损伤标尺的预测维修策略的效果优于事后维修策略, 但劣于年龄换件策略, 揭示了该方法的本质特性; 应用与 LRU 寿命相关损伤标尺的预测维修策略的效果在一定条件下优于年龄换件策略。最后分析了维修决策的优选方法。

**关键词:** 状态监控; 故障预测与健康管埋; 损伤标尺; 维修优化; 更新过程; Monte Carlo 方法

**中图分类号:** V215.7; TH163.5 **文献标识码:** A

随着装备维修、设备状态监控及故障诊断与预测技术的发展, 设备维修优化经历了事后维修、定期维修、状态基维修和预测性维修等不同的阶段。基于故障预测信息进行维修决策是预测性维修等新型维修模式的主要特征之一, 可有效提高装备使用可用度、降低寿命周期费用<sup>[1-2]</sup>。现存的维修优化模型大多应用设备的总体静态可靠性特征来决策维修时机, 由于这些特征不受实际退化过程影响, 不能区分设备总体中设备个体之间的不同退化特征, 不适合预测性维修决策优化的需要, 导致维修优化决策的精确度较低<sup>[1]</sup>。

Dekker<sup>[3]</sup>对传统方式下的维修优化问题进行了归纳整理, 分析了维修的目标和策略。Nakagawa<sup>[4]</sup>对事后维修、年龄换件、定期换件、批量换件、预防性维修、非完美预防性维修以及检测等

策略进行了深入的分析和讨论。Wang<sup>[5]</sup>对劣化系统的维修与换件策略进行了详细的分类, 并对单部件与多部件系统的维修策略进行了比较。吕德峰等<sup>[6]</sup>以系统可用度为约束, 维修费用率为目标, 基于功能检测建立了维修优化模型。杨懿等<sup>[7]</sup>研究了单部件离散时间可修系统的可用度模型。Jardine 等<sup>[8]</sup>从故障诊断、故障预测的角度对基于状态的维修策略进行了分析。故障预测与健康管埋 (Prognostics and Health Management, PHM) 技术主要用来监控、预测系统完成其功能的状态, 包括确定部件的剩余使用寿命、预测故障的发生时间等, 这些预测信息与维修换件模型相结合, 以单位时间成本最小、平均使用可用度最大等为目标, 来确定最优的预测性维修策略<sup>[9-10]</sup>。针对机械系统, Elwany 等<sup>[11-12]</sup>以轴承为研究对

收稿日期: 2011-11-29; 退修日期: 2011-12-09; 录用日期: 2011-12-16; 网络出版时间: 2011-12-23 12:26

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111223.1226.005.html

基金项目: 国家自然科学基金(51175502)

\* 通讯作者. Tel.: 0731-84573305 E-mail: qiuqing@nudt.edu.cn

**引用格式:** Xu Y G, Qiu J, Liu G J, et al. Optimal predictive maintenance decision of electronics based on canaries. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11): 2093-2105. 徐玉国, 邱静, 刘冠军, 等. 基于损伤标尺的电子设备预测维修决策优化. 航空学报, 2012, 33(11): 2093-2105.

象,应用退化模型框架对轴承的剩余使用寿命进行预测,并与年龄换件模型相结合优化维修决策。崔建国等<sup>[13]</sup>基于遗传算法和自回归滑动平均(ARMA)模型对航空发电机的寿命进行了预测。Huynh 等<sup>[14]</sup>将裂纹增长退化模型与粒子滤波方法相结合进行故障预测,并应用 Monte Carlo 方法仿真分析了两种预测维修模型。针对电子系统, Sandborn 等<sup>[15-17]</sup>在外场可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU)的寿命分布为三角分布、指数分布和 Weibull 分布的情况下,考虑了寿命消耗监控与故障征兆两种方法,应用随机模型分析了 PHM 对直升机航电系统寿命周期成本的影响,优化了安全边界和预测距离。但是文献<sup>[15]~[17]</sup>也存在不足:①仅从经济角度进行了分析;②欠缺深入的理论分析。Wang 和 Pecht<sup>[18]</sup>针对电子系统 LRU 级故障预测中的损伤标尺方法,建立了有系统级预防性维修与无系统级预防性维修的损伤标尺驱动的维修模型,应用更新回报理论与离散事件仿真的方法,从经济角度对维修模型做了深入的理论分析,但也存在不足之处:①仅从单位时间成本的角度分析了所提维修策略的特性,没有考虑系统的停机时间,实际上对于设备系统特别是军事装备系统,使用可用度是十分重要的指标或者约束;②没有揭示出应用与 LRU 寿命独立损伤标尺的维修策略与事后维修策略、年龄换件策略之间的本质关系;③应用正态分布刻画 LRU 与损伤标尺的寿命特性,与实际情况不吻合。

目前,电子部件或系统广泛应用于飞机、舰船、雷达和战车等装备中,使得这些装备智能化与自动化程度获得了提高,同时这些核心电子部件或系统的可靠性与健康监测水平对于提高装备的战备能力、降低寿命周期成本也至关重要,如何监控上述电子系统的状态、预测其剩余使用寿命并制定合理有效的维修策略成为一个重要的问题。为此,本文针对单部件电子系统故障预测中的损伤标尺方法,在完美换件维修假设下,充分考虑系统的维修成本与停机时间特性,应用更新回报理论,以单位时间成本、平均使用可用度与平均效费比为指标,在 LRU 与损伤标尺的故障特性服从 Weibull 分布的情况下,分别研究了与 LRU 寿命独立的损伤标尺和与 LRU 寿命相关的损伤标尺的特征,通过 Monte Carlo 方法仿真分析了两类

损伤标尺的准确度与精确度对维修效果的影响,并与事后维修策略、年龄换件策略进行对比,确定了最优的维修决策。

## 1 基于损伤标尺的电子系统故障预测

在电子系统 PHM 中存在 3 种不同的故障预测方法:①损伤标尺的方法;②基于故障预兆监测和推理的方法;③基于监测环境和使用条件应力与损伤物理失效(Physics of Failure, PoF)模型的方法<sup>[19-20]</sup>。

所谓损伤标尺(也称之为 Canary<sup>[19]</sup>、预警装置<sup>[20]</sup>、Precursor<sup>[21]</sup>或者 Prognostic Cell<sup>[22]</sup>等),是针对一种或多种故障机理,以被监控产品相同的工艺过程制造出来的,预期寿命比被监控对象短的产品。比如美国 Ridgetop 公司针对静电损伤、经时击穿、电迁移、热载流子和辐射损伤等失效机理研制了多种损伤标尺。基于对被监控对象特定失效机理的认识,损伤标尺可以做到定量设计,并可以在器件内和电路板级实现故障预测。损伤标尺失效报警时间与被监控系统故障时间之间的距离通常称为“预测距离”,或指示系统的剩余使用寿命<sup>[19, 21]</sup>。基于损伤标尺的电子系统故障预测模型如图 1 所示。

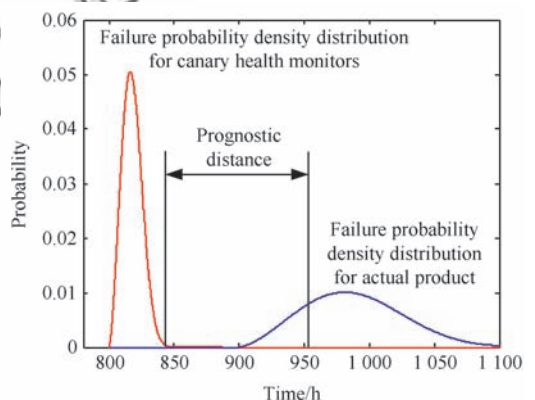


图 1 使用损伤标尺进行故障预警

Fig. 1 Advance warning of failure using canary

由损伤标尺的特点可以知道,基于损伤标尺对电子系统(或部件)进行状态监控与故障预测的输出结果为二值模式<sup>[18]</sup>,即:①报警;②不报警。系统的运行状态与结果有 3 种可能:①损伤标尺早于被监控系统故障发出正确的报警;②损伤标尺晚于被监控系统故障发出报警而导致故障漏检;③损伤标尺与被监控系统均正常工作而不发出报警信

号。那么对应的维修时机分别为损伤标尺故障报警时间与被监控系统的故障时间,与之相对应的维修策略为预防性换件维修与修复性换件维修。

## 2 维修策略分析

### 2.1 系统假设与记号

为便于分析,对损伤标尺与被监控系统做如下假设:

- 1) 被监控系统为单部件非可修系统。
- 2) 损伤标尺依附于被监控系统并处于相同的工况下,损伤标尺不影响被监控系统的健康状态。
- 3) 被监控电子系统(或部件)寿命  $Z$  的概率密度函数为  $f_z(z)$ , 损伤标尺寿命  $X$  的概率密度函数为  $f_x(x)$ , 两者的联合概率密度函数为  $f(x, z)$ 。
- 4) 假设损伤标尺的制造、安装与运行成本是一个常数  $C_m$ 。
- 5) 当被监控系统发生故障时,可以被立即观测到。
- 6) 一旦被监控系统发生故障或损伤标尺发出预警,立即对其进行换件维修,并假设修复如新。
- 7) 系统修复性换件的时间为  $T_c$ , 系统预防性换件的时间为  $T_p$ , 通常  $T_p < T_c$ , 两者都远小于被监控系统的寿命。
- 8) 系统修复性换件的成本为  $C_c$ , 系统预防性换件的成本为  $C_p$ , 通常  $C_c > C_p \gg C_m$ 。
- 9) 当有换件维修需求时,维修备件充足。

### 2.2 维修策略性能评估的理论模型

下面针对应用损伤标尺进行故障预警的电子设备维修系统,分别以单位时间成本、平均使用可用度和平均效费比为评价指标,应用更新回报理论进行分析<sup>[18]</sup>。

1) 一个更新周期  $L$  内总的换件维修成本  
一个更新周期中进行修复性换件维修的成本为

$$(C_c + C_m)P(0 < X < \infty, 0 < Z < X) = (C_c + C_m) \int_0^{\infty} \int_0^x f(x, z) dz dx \quad (1)$$

一个更新周期中进行预防性换件维修的成本为

$$(C_p + C_m)P(0 < X < \infty, X < Z < \infty) = (C_p + C_m) \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} f(x, z) dz dx \quad (2)$$

将式(1)和式(2)相加,可以得到一个更新周期内总的换件维修成本为

$$E(C(L)) = (C_c + C_m) \int_0^{\infty} \int_0^x f(x, z) dz dx + (C_p + C_m) \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} f(x, z) dz dx \quad (3)$$

2) 一个更新周期的期望长度为

$$E(L) = \int_0^{\infty} \int_0^x (z + T_c) f(x, z) dz dx + \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} (x + T_p) f(x, z) dz dx \quad (4)$$

一个更新周期内,系统正常运行时间  $T_u^l$  的期望为

$$E(T_u^l) = \int_0^{\infty} \int_0^x z f(x, z) dz dx + \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} x f(x, z) dz dx \quad (5)$$

一个更新周期内,系统不可用时间  $T_d^l$  的期望为

$$E(T_d^l) = \int_0^{\infty} \int_0^x T_c f(x, z) dz dx + \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} T_p f(x, z) dz dx \quad (6)$$

3) 维修效用指标

根据更新回报理论以及式(3)与式(4),可以得到系统长期运行下的单位时间成本为

$$E(C) = \frac{E(C(L))}{E(L)} \quad (7)$$

根据系统使用可用度的定义,可以得到系统平均使用可用度为

$$E(A_o) = \frac{E(T_u^l)}{E(L)} \quad (8)$$

同时,根据式(7)和式(8),可以得到系统长期运行的平均效费比为

$$E(B) = \frac{E(A_o)}{E(C)} = \frac{E(T_u^l)}{E(C(L))} \quad (9)$$

### 2.3 损伤标尺与被监控系统寿命的相关性及其对维修决策的影响

在应用损伤标尺对电子系统(或部件)进行状态监控与故障预警时,始终假设电子系统(或部件)的寿命特征  $f_z(z)$  保持不变,也就是其分布参数保持不变。问题的关键在于如何确定随机变量  $X$  和  $Z$  的联合概率密度函数  $f(x, z)$ 。如果损伤标尺与电子系统(或部件)采用不同的材料,或者不同的工艺制造,那么认为损伤标尺与被监控系统(或部件)的寿命相互独立,其联合概率密度函数可以表示为  $f(x, z) = f_x(x)f_z(z)$ 。如果损



伤标尺的寿命与被监控系统的寿命相互独立,那么,假设损伤标尺的寿命与被监控系统的寿命服从某种分布,即  $X \sim f_X(x)$ 、 $Z \sim f_Z(z)$ ,并定义预测距离  $\xi = E(X) - E(Z)$  来刻画损伤标尺的准确度,并用  $X$  的标准差  $\sigma_p$  来刻画损伤标尺的精确度,其中,  $E(X)$  和  $E(Z)$  分别为损伤标尺与被监控系统的期望寿命。

针对应用与被监控系统寿命独立的损伤标尺驱动的维修决策而言,从统计的角度来看,当损伤标尺的期望寿命  $E(X)$  小于被监控系统的期望寿命  $E(Z)$ ,也即  $\xi < 0$  时,损伤标尺能够早于被监控系统发生故障,起到提前报警的作用,但是由于损伤标尺寿命与被监控系统寿命的随机性本质,仍然会有少量修复性换件维修情况发生。当损伤标尺寿命的精确度增加时,会相应地减少修复性换件维修的概率,而增加预防性换件维修的概率,以改善系统运行的效用。这种情况的极限就是  $E(X) < E(Z)$  且  $\sigma_p \rightarrow 0$ ,此时损伤标尺的寿命分布就变成一个  $\delta$  函数,该维修策略等效于年龄换件策略,其中  $E(X)$  等效于换件周期。同样,当  $E(X) \gg E(Z)$  且  $\sigma_p \rightarrow 0$  时,该维修策略等效于事后维修策略。

如果损伤标尺与被监控系统(或部件)采用相同的材料,由相同的工艺制造,则认为损伤标尺的寿命与被监控系统(或部件)的寿命相关,两者之间有相近的特征,损伤标尺能够更准确地跟踪电子系统(或部件)的运行状态,这种情况下,两者的联合概率密度函数<sup>[18]</sup>可以表示为  $f(x, z) = f_{X|Z}(x|z)f_Z(z)$ ,  $f_{X|Z}(x|z)$  由损伤标尺与电子系统(或部件)的内在故障特性所决定。实际的损伤标尺特征比较复杂,鉴于本文是从统计的角度研究损伤标尺的特性对预测维修策略的影响,故在不影响损伤标尺本质属性的前提下,定义损伤标尺的累积损伤因子  $\lambda$  为<sup>[22]</sup>

$$\lambda = \frac{E(X)}{E(Z)} \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  可以根据实际换件维修策略的需要事先进行校准。同时,应用独立于  $Z$  的 0 均值正态随机变量  $\epsilon$ ,即  $\epsilon \sim N(0, \sigma_p^2)$  来刻画损伤标尺的精确度,这由损伤标尺的制造工艺水平决定。那么,损伤标尺与被监控系统寿命之间的相关性可以表示为  $f_{X|Z}(x|z) = f_{X|Z}(x|z; \lambda, \epsilon)$ 。

针对应用与被监控系统相关的损伤标尺驱动的预测维修决策,根据式(10),当  $\lambda < 1$  时,损伤

标尺的期望寿命  $E(X)$  小于被监控系统的期望寿命  $E(Z)$ ,故损伤标尺能够在实际故障发生之前发出报警,该值越小说明损伤标尺报警提前的时间越长,但是部件有效剩余寿命的浪费也越大。预测标准差  $\sigma_p$  用于描述预测结果的噪声,该值越小,说明损伤标尺的报警越精确。在  $\sigma_p$  确定的情况下,存在一个  $\lambda < 1$ ,使得维修效果可以实现最优;当  $\lambda \rightarrow 1$  且  $\sigma_p \rightarrow 0$  时,损伤标尺能够精确跟踪被监控系统的状态且早于被监控系统失效而发出报警信号,可以实现系统的预测维修。

### 3 预测维修策略优化设计

应用 Monte Carlo 方法仿真计算系统长期运行的单位时间成本、平均使用可用度与平均效费比<sup>[14]</sup>。

对于足够长时间范围内,系统单位时间的期望换件维修成本为

$$E(C) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{C(k)}{k} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N C^{(i)}}{\sum_{i=1}^N L^{(i)}} \quad (11)$$

式中:  $C(k)$  为时间  $k$  内的系统累积换件维修成本;  $N$  为仿真次数(即换件维修的次数);  $L^{(i)}$  为第  $i$  个更新换件周期的长度;  $C^{(i)}$  为第  $i$  个更新换件周期的成本。

同理,对于足够长时间范围内,系统的平均使用可用度为

$$E(A_o) = \lim_{k \rightarrow \infty} A_o(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N T_u^{(i)}}{\sum_{i=1}^N L^{(i)}} \quad (12)$$

式中:  $A_o(k)$  为时间  $k$  内的系统平均可用度;  $T_u^{(i)}$  为第  $i$  个更新换件周期的系统运行时间。

同样,系统平均效费比为

$$E(B) = \frac{E(A_o)}{E(C)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N C^{(i)}}{\sum_{i=1}^N T_u^{(i)}} \quad (13)$$

采用 Monte Carlo 方法仿真,对应用损伤标尺的预测维修策略进行优化分析。具体维修优化流程如下:

1) 初始化系统参数:仿真次数  $N$ (即换件次数)、修复性换件维修成本  $C_c$ 、预防性换件维修成本  $C_p$ 、损伤标尺的安装与运行成本  $C_m$ 、修复性

换件维修时间  $T_c$  和预防性换件维修时间  $T_p$ 。

2) 如果损伤标尺与被监控系统的寿命相互独立,那么根据被监控系统的寿命  $Z$  与损伤标尺的寿命  $X$  的特征分别生成系统运行中各自的寿命样本  $t_X^f(i)$  与  $t_Z^f(i)$ ;如果损伤标尺与被监控系统的寿命相关,那么首先生成被监控电子系统的寿命样本  $t_Z^f(i)$ ,然后根据损伤标尺与被监控系统的寿命依赖关系,生成损伤标尺的寿命样本  $t_X^f(i)$ 。

3) 进行维修决策,如果  $t_X^f(i) \leq t_Z^f(i)$ ,那么对系统进行预防性换件维修,单个更新周期为  $t_X^f(i)$ ,对应的换件维修成本为  $C_p + C_m$ ,需要的换件维修时间为  $T_p$ ,记录预防性换件维修的次数  $n_p(i) = 1$ ;如果  $t_X^f(i) > t_Z^f(i)$ ,那么对系统进行修复性换件维修,单个更新周期为  $t_Z^f(i)$ ,对应的换件维修成本为  $C_c + C_m$ ,需要的换件维修时间为  $T_c$ ,记录修复性换件维修的次数  $n_c(i) = 1$ 。

4) 对被监控系统运行的总时间  $T$ 、系统总可用时间  $T_u$ 、系统总停机时间  $T_d$  和系统运行的总成本  $C(T)$  进行累积计算,即

$$T_u = \sum_{i=1}^N \min(t_X^f(i), t_Z^f(i)) \quad (14)$$

$$T_d = T_p \sum_{i=1}^N n_p(i) + T_c \sum_{i=1}^N n_c(i) \quad (15)$$

$$T = T_u + T_d =$$

$$\sum_{i=1}^N \min(t_X^f(i), t_Z^f(i)) + T_p \sum_{i=1}^N n_p(i) + T_c \sum_{i=1}^N n_c(i) \quad (16)$$

$$C(T) = (C_p + C_m) \sum_{i=1}^N n_p(i) + (C_c + C_m) \sum_{i=1}^N n_c(i) \quad (17)$$

5) 计算系统长期运行的单位时间成本  $E(C)$ 、平均使用可用度  $E(A_o)$  与平均效费比  $E(B)$ ,即

$$E(C) = \frac{C(T)}{T} \quad (18)$$

$$E(A_o) = \frac{T_u}{T} \quad (19)$$

$$E(B) = \frac{E(A_o)}{E(C)} = \frac{T_u}{C(T)} \quad (20)$$

6) 根据流程 5) 中的维修效用计算方式,调节损伤标尺的参数生成上述 3 个维修效用指标的序列,并从中求解最优的指标及其对应的损伤标尺参数,即

$$(\xi_c^*, \sigma_c^*) = \arg \min_{\xi, \sigma_p} E(C)$$

$$(\lambda_c^*, \sigma_c^*) = \arg \min_{\lambda, \sigma_p} E(C) \quad (21)$$

$$(\xi_{A_o}^*, \sigma_{A_o}^*) = \arg \max_{\xi, \sigma_p} E(A_o)$$

$$(\lambda_{A_o}^*, \sigma_{A_o}^*) = \arg \max_{\lambda, \sigma_p} E(A_o) \quad (22)$$

$$(\xi_B^*, \sigma_B^*) = \arg \max_{\xi, \sigma_p} E(B)$$

$$(\lambda_B^*, \sigma_B^*) = \arg \max_{\lambda, \sigma_p} E(B) \quad (23)$$

7) 根据实际的损伤标尺与最优损伤标尺之间的参数(准确度与精确度)关系,做出最佳的预测维修决策。

综上,预测维修决策优化过程如图 2 所示。

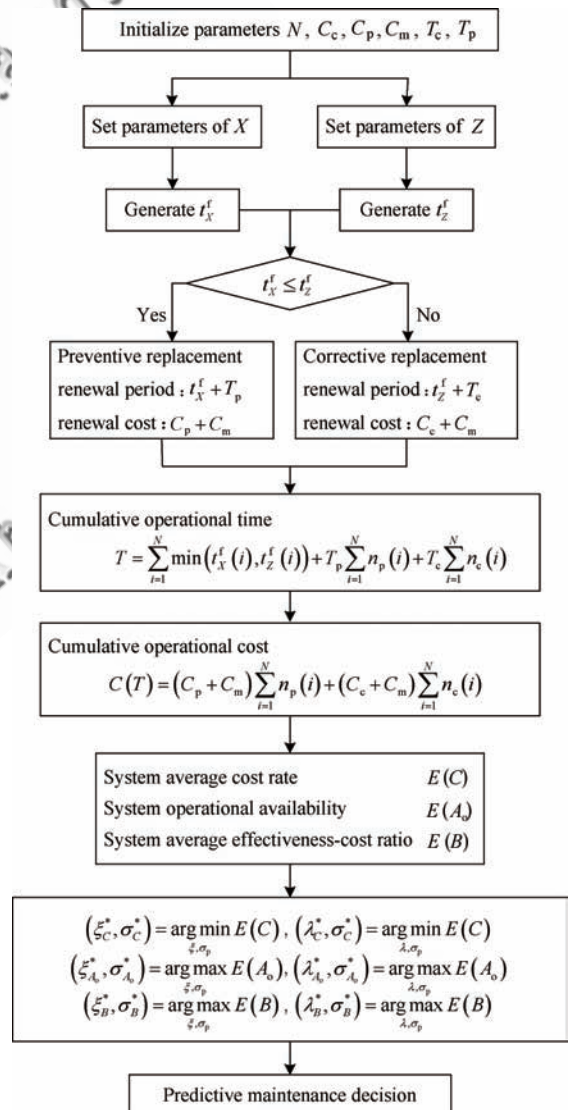


图 2 预测维修决策优化过程

Fig. 2 Decision process of predictive maintenance optimization

## 4 仿真分析与案例

假设某被监控电子系统的寿命  $Z$  服从三参数 Weibull 分布, 其中位置参数  $\gamma_Z = 800$  h, 尺度参数  $\eta_Z = 300$  h, 形状参数  $\beta_Z = 2.5$ 。同时假设系统故障预测与换件维修的相关参数为  $C_m = 50$  元,  $C_c = 10^4$  元,  $C_p = 10^3$  元,  $T_p = 10$  h,  $T_c = 50$  h。仿真次数  $N = 10^6$ 。

### 4.1 损伤标尺与被监控系统的寿命相互独立

假设损伤标尺的寿命  $X$  也服从三参数 Weibull 分布, 位置参数、尺度参数、形状参数分别是  $\gamma_X$ ,  $\eta_X$  与  $\beta_X$ 。当尺度参数不变时, 形状参数对 Weibull 分布的均值影响很小, 而对方差影响较大, 故设置尺度参数  $\eta_X = \eta_Z = 300$  h, 定义预测距离  $\xi = \gamma_X - \gamma_Z$  来刻画损伤标尺的准确度, 并用 Weibull 分布的形状参数  $\beta_X$  来刻画损伤标尺的精确度。

当  $\xi \in (-400, 100)$  h,  $\beta_X \in (1, 3, 5, 0)$  (相当于损伤标尺寿命的标准差  $\sigma_p \in (76, 184)$  h) 时, 在系统长期运行的情况下,  $\xi$  和  $\beta_X$  对系统单位时间成本  $E(C)$ 、平均使用可用度  $E(A_0)$  与平均效费比  $E(B)$  的影响如图 3 所示。

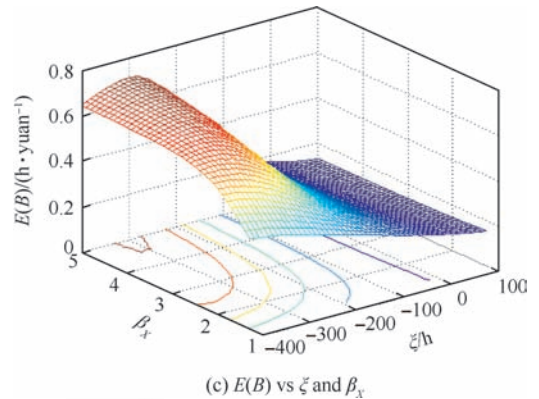
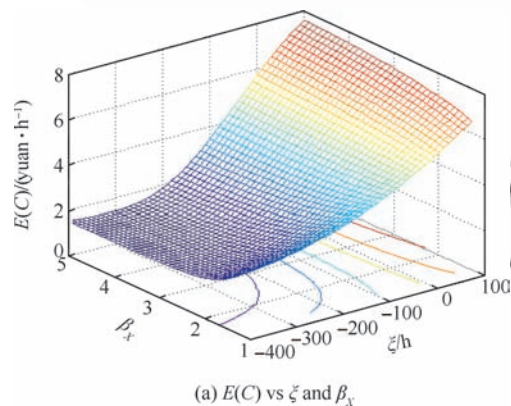


图 3 损伤标尺的准确度与精确度对维修效果的影响  
Fig. 3 Effect of accuracy and precision of canaries on maintenance efficiency

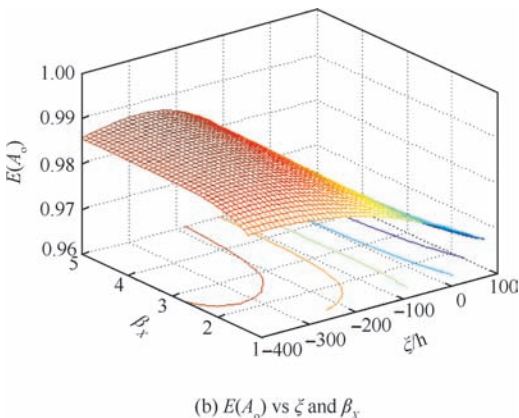
同时, 基于相同的被监控系统寿命数据, 分别应用事后维修策略、年龄换件策略进行维修策略分析, 可得系统长期运行条件下, 事后维修策略的单位时间成本为 8.959 9 元/h, 平均使用可用度为 0.955 2, 平均效费比为 0.106 6 h/元。同样, 年龄换件策略的单位时间成本最佳值为 1.217 6 元/h, 平均使用可用度最佳值为 0.988 0, 平均效费比最佳值为 0.811 3 h/元。而基于损伤标尺的维修策略的单位时间成本区间为 (1.388 1, 7.539 3) 元/h, 平均使用可用度区间为 (0.961 6, 0.987 2), 平均效费比区间为 (0.127 5, 0.711 1) h/元。将 3 种维修策略下的上述 3 个效用指标进行对比分析, 结果表明应用基于寿命独立损伤标尺的预测维修策略, 其维修效果明显优于事后维修策略, 但是劣于年龄换件策略, 这也从仿真的角度验证了 2.3 节的理论分析, 从而揭示了该情况下的维修策略与事后维修策略、年龄换件策略之间的本质关系, 也是文献[18]没有分析之处。

#### 4.1.1 预测距离对维修效果的影响分析

当预测距离  $\xi \in (-400, 100)$  h, 且形状参数  $\beta_X$  分别为 1.5, 2.0, 3.0 和 4.0 (对应的标准差为 184, 139, 97, 76 h) 时, 长期运行条件下, 系统单位时间成本的变化规律如图 4(a) 所示 (图中 CRP 表示事后维修策略, ARP 表示年龄换件策略)。由图可知, 当损伤标尺寿命的精确度固定时, 损伤标尺存在一个最佳的预测距离  $\xi_{C, \beta_X}^*$  (对应一个最佳损伤标尺寿命分布的位置参数  $\gamma_{C, \beta_X}^*$ ), 使得系统运行的单位时间成本最小。如果损伤标尺的预



(a)  $E(C)$  vs  $\xi$  and  $\beta_X$



(b)  $E(A_0)$  vs  $\xi$  and  $\beta_X$



测距离小于  $\xi_{C,\beta_X}^*$ , 那么损伤标尺报警过早, 会出现过多的预防性换件维修, 浪费了被监控系统的剩余使用寿命; 如果损伤标尺的预测距离大于  $\xi_{C,\beta_X}^*$ , 那么损伤标尺报警过晚, 会出现过多的修复性换件维修, 这两种情况均会导致维修费用不是最小。

当预测距离  $\xi \in (-400, 100)$  h, 且形状参数  $\beta_X$  分别为 1.5, 2.0, 3.0 和 4.0 时, 系统长期运行的使用可用度与效费比的变化规律分别如图 4 (b) 和图 4 (c) 所示。同样, 当损伤标尺寿命的精确度固定时, 损伤标尺分别存在一个最佳的预测距离  $\xi_{A_0,\beta_X}^*$  与  $\xi_{C,\beta_X}^*$ , 使得系统运行的使用可用度与费效比最大。

综上所述, 当损伤标尺寿命的精确度固定时, 针对不同的系统维修优化目标, 比如单位时间成本、平均使用可用度与平均效费比, 分别存在一个最优的损伤标尺预测距离  $\xi_{C,\beta_X}^*$ 、 $\xi_{A_0,\beta_X}^*$  和  $\xi_{E,\beta_X}^*$ , 此时可实现最优的预测维修。以最小化系统运行的单位时间成本为例, 根据实际损伤标尺的预测距离  $\xi$  与  $\xi_{C,\beta_X}^*$  之间的相互关系, 可以得到如下的维修策略:

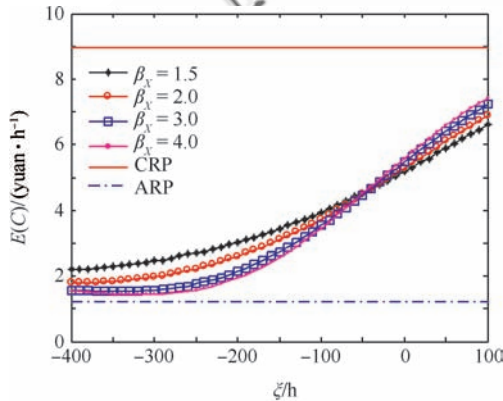
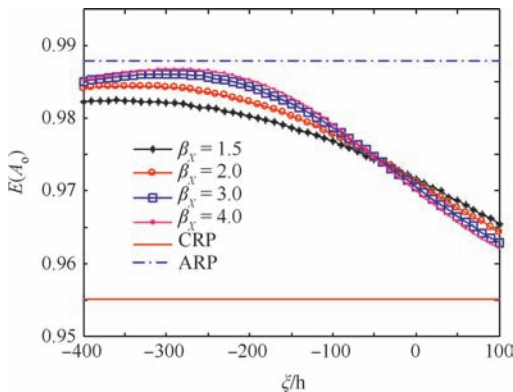
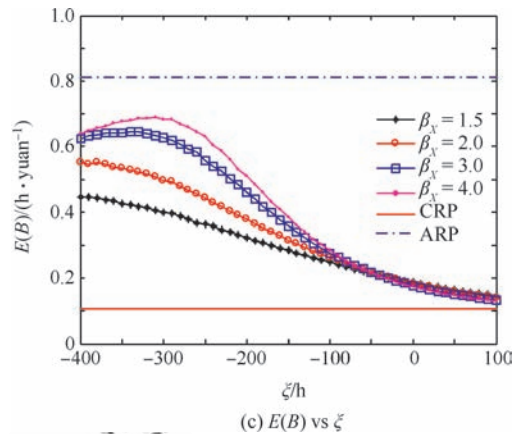
(a)  $E(C)$  vs  $\xi$ (b)  $E(A_0)$  vs  $\xi$ 

图 4 预测距离对维修效果的影响

Fig. 4 Effect of prognostic distance on maintenance efficiency

1) 如果  $\xi \geq \xi_{C,\beta_X}^*$ , 说明实际损伤标尺的寿命较长, 当其发生报警信号时, 被监控系统的剩余使用寿命已经不多, 那么最优的维修策略就是立即进行换件维修。

2) 如果  $\xi < \xi_{C,\beta_X}^*$ , 说明实际损伤标尺的寿命较短, 当其发出故障报警信号时, 被监控系统尚余较多的剩余使用寿命, 立即进行更换是不经济的, 那么最优的维修策略就是延时换件, 其最佳延迟时间  $\tau_d = \xi_{C,\beta_X}^* - \xi$ 。

同理, 当以使用可用度或效费比为系统维修优化指标时, 也能够得到类似的结论。

#### 4.1.2 形状参数对维修效果的影响分析

当损伤标尺寿命分布的形状参数  $\beta_X \in [1.3, 5.0]$ , 其标准差  $\sigma_p \in [76, 184]$  h, 而预测距离  $\xi$  分别为  $-300, -200, -100, -50$  h 时, 系统长期运行的单位时间成本、使用可用度与效费比的变化规律如图 5 所示。由图可知, 当损伤标尺的预测距离不变时, 随着损伤标尺寿命标准差的增加, 系统单位时间成本逐渐增大, 系统平均使用可用度逐渐减小, 系统平均效费比逐渐降低。这说明随着故障预测精确度的降低, 损伤标尺对整个系统运行的贡献也逐渐降低。这同时也说明, 如果损伤标尺的期望寿命确定且小于被监控电子系统的期望寿命时, 为了提高应用损伤标尺进行预测维修优化过程的效用(包括降低单位时间成本、提高使用可用度与系统效费比), 通过改进制造工艺增进损伤标尺寿命的精确度是最佳的策略选择。

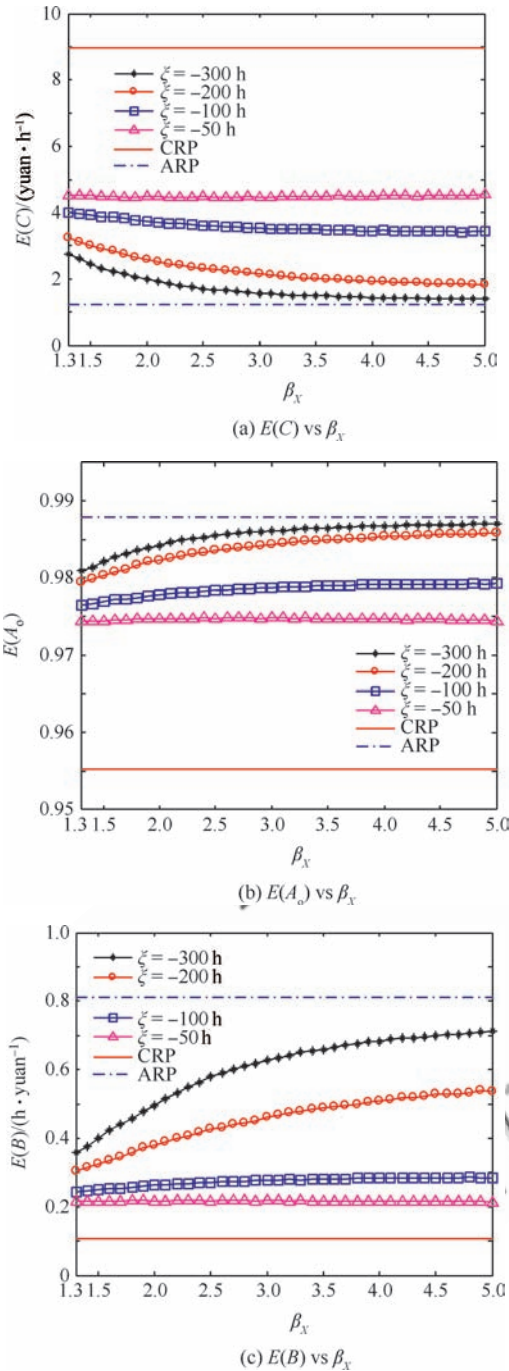


图5 形状参数对维修效果的影响

Fig. 5 Effect of shape parameter on maintenance efficiency

### 4.2 损伤标尺与被监控系统的寿命相关

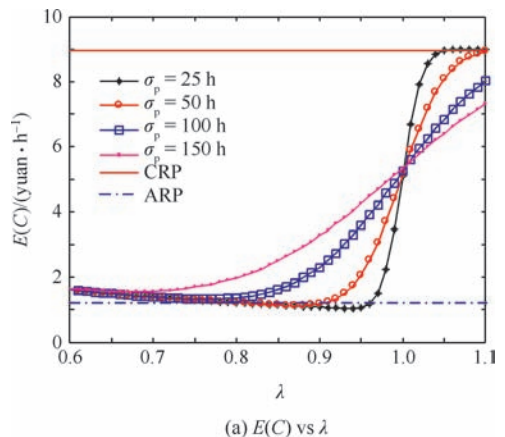
#### 4.2.1 累积损伤因子对维修效果的影响分析

在  $\lambda \in (0.6, 1.1)$ ,  $\sigma_p \in (0, 200)$  h 的条件下,应用 Monte Carlo 方法仿真分析  $\lambda$  和  $\sigma_p$  对系

统长期运行条件下的单位时间成本  $E(C)$ 、平均使用可用度  $E(A_0)$  以及平均效费比  $E(B)$  的影响。

当累积损伤因子  $\lambda \in (0.6, 1.1)$ , 且标准差  $\sigma_p$  分别为 25, 50, 100, 150 h 时,系统单位时间成本的变化规律如图 6(a)所示。由图可知,当损伤标尺寿命的标准差固定时,损伤标尺存在一个最佳的累积损伤因子  $\lambda_{C, \sigma_p}^*$ ,使得系统运行的单位时间成本最小。如果损伤标尺的累积损伤因子小于  $\lambda_{C, \sigma_p}^*$ ,由于损伤标尺报警过早,会出现较多的预防性换件维修,浪费了被监控系统的剩余使用寿命,如果累积损伤因子过小,那么维修效果等效于年龄换件策略;如果损伤标尺的累积损伤因子大于  $\lambda_{C, \sigma_p}^*$ ,由于损伤标尺报警过晚,会出现较多的修复性换件维修,如果累积损伤因子过大,那么系统维修效果等效于事后维修策略。由图可知,当累积损伤因子  $\lambda = 0.95$  且标准差  $\sigma_p = 25$  h 时,系统单位时间成本最小,且优于年龄换件策略。

同样,当损伤标尺的累积损伤因子  $\lambda \in (0.6, 1.1)$ , 且标准差  $\sigma_p$  分别为 25, 50, 100, 150 h 时,系统长期运行的平均使用可用度与平均效费比的变化规律分别如图 6(b)和图 6(c)所示。当损伤标尺寿命的标准差固定时,损伤标尺存在两个最佳的累积损伤因子  $\lambda_{A_0, \sigma_p}^*$  与  $\lambda_{B, \sigma_p}^*$ ,使得系统运行的使用可用度与效费比最大。比如,当标准差  $\sigma_p = 25$  h 或  $\sigma_p = 50$  h 时,均存在最优的累积损伤因子  $\lambda = 0.95$  或  $\lambda = 0.90$ ,使系统平均使用可用度较大,且优于年龄换件策略。同样,当标准差  $\sigma_p = 25$  h 或  $\sigma_p = 50$  h 时,均存在最优的累积损伤因子  $\lambda = 0.94$  或  $\lambda = 0.89$ ,使系统平均效费比较大,且优于年龄换件策略。



(a)  $E(C)$  vs  $\lambda$



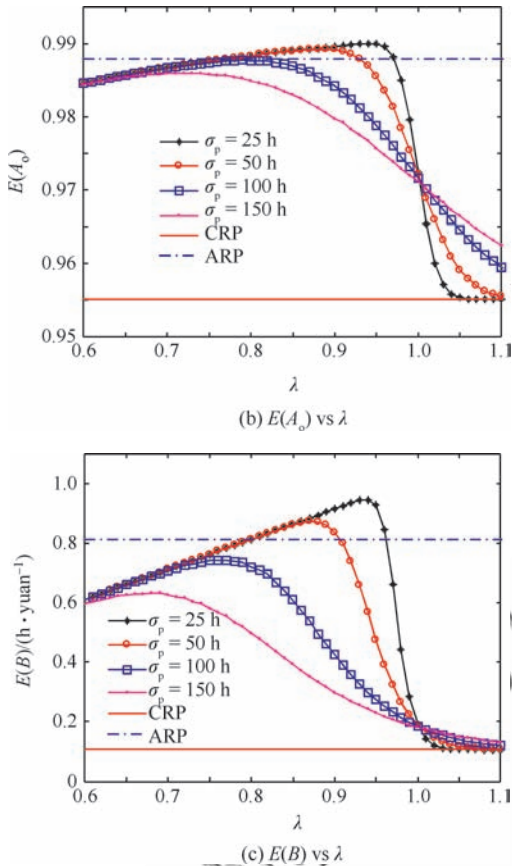


图6 累积损伤因子对维修效果的影响

Fig. 6 Effect of acceleration factor on maintenance efficiency

综上所述,当损伤标尺寿命的标准差确定时,针对不同的系统维修优化目标(比如单位时间成本、平均使用可用度与平均效费比)分别存在一个最优的损伤标尺累积损伤因子(即 $\lambda_{C,\sigma_p}^*$ ,  $\lambda_{A_0,\sigma_p}^*$ 和 $\lambda_{B,\sigma_p}^*$ ),此时可实现最优的预测维修效果。以最小化系统运行的单位时间成本为例,根据实际损伤标尺的累积损伤因子 $\lambda$ 与 $\lambda_{C,\sigma_p}^*$ 之间的相互关系,可以得到如下的维修策略:

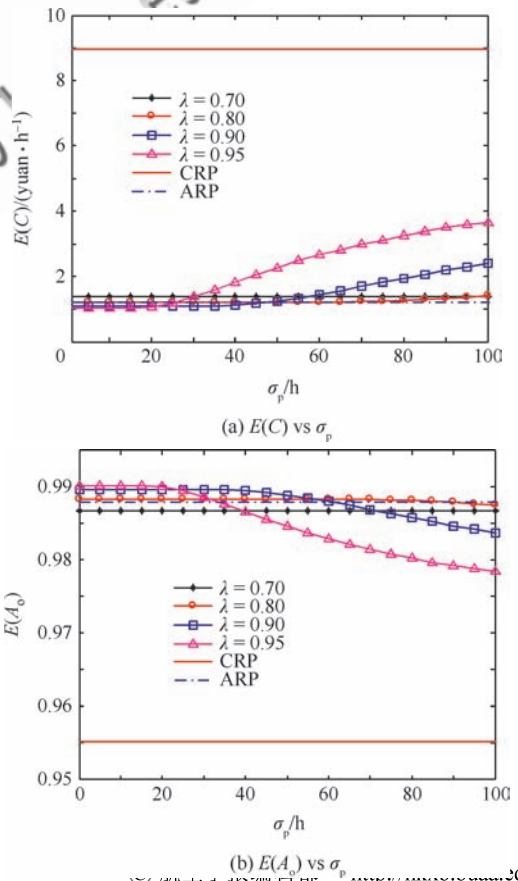
1) 如果 $\lambda \geq \lambda_{C,\sigma_p}^*$ ,那么最优的换件维修策略是当损伤标尺发出预警信号时立即进行维修。

2) 如果 $\lambda < \lambda_{C,\sigma_p}^*$ ,说明损伤标尺的寿命较短,当其发生报警信号时,部件尚余较多的剩余使用寿命,那么最优的换件维修策略是延时换件,其最佳延迟时间 $\tau_d = (\lambda_{C,\sigma_p}^* - \lambda)E(Z)$ 。

同理,当以平均使用可用度或平均效费比为系统维修优化目标时,也能够得到类似的结论。而且,在合适的累积损伤因子 $\lambda$ 与预测标准差 $\sigma_p$ 的条件下,系统维修效果优于年龄换件策略。

#### 4.2.2 随机标准差对维修效果的影响分析

当损伤标尺寿命的标准差 $\sigma_p \in [0,100]$  h,而累积损伤因子 $\lambda$ 分别等于0.70、0.80、0.90和0.95时,系统长期运行的单位时间成本、平均使用可用度与平均效费比的变化规律如图7所示。由图可知,当损伤标尺跟踪被监控系统健康状态的准确度(累积损伤因子)不变时,随着损伤标尺寿命标准差的增加,系统运行的单位时间成本逐渐增大,使用可用度逐渐减小,效费比逐渐降低。这说明随着故障预测精确度的降低,损伤标尺对整个系统运行维护的贡献也逐渐降低。需要指出的是,当累积损伤因子 $\lambda = 0.95$ 且 $\sigma_p \in (0,25)$  h,或者 $\lambda = 0.90$ 且 $\sigma_p \in (0,50)$  h时,系统单位时间成本均要小于年龄换件策略的成本;当 $\lambda = 0.80$ 且 $\sigma_p \in (0,70)$  h时,系统运行的单位时间成本近似于年龄换件策略的成本。而当 $\lambda = 0.70$ 且 $\sigma_p \in (0,100)$  h时,系统单位时间成本要大于年龄换件策略的成本但是要远小于事后维修策略的成本。对于平均使用可用度与平均效费比两个指标,也有类似的结论,只不过累积损伤因子与标准差的取值有所不同。



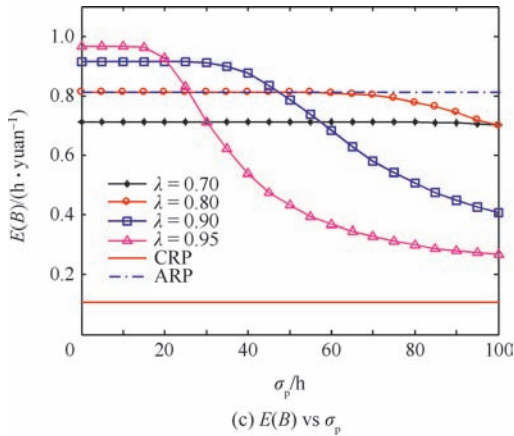


图7 预测标准差对维修效果的影响

Fig. 7 Effect of prognostic standard deviation on maintenance efficiency

#### 4.2.3 维修策略的优化选择

鉴于与部件寿命相关的损伤标尺能够更加准确地跟踪被监控部件(或系统)的健康状态,且在某些条件下,由其驱动的预测维修策略的效果优于年龄换件策略,这为损伤标尺的优化设计与选择(即维修策略的优化与选择)提供了可能。下面分别应用式(24)~式(26)分析相对于年龄换件策略而言,事后维修策略效用提升的百分比。

$$\zeta_C = \frac{|C^{\text{CRP}} - C^{\text{ARP}}|}{C^{\text{ARP}}} \times 100\% \quad (24)$$

$$\zeta_{A_0} = \frac{(A_0^{\text{CRP}} - A_0^{\text{ARP}})}{A_0^{\text{ARP}}} \times 100\% \quad (25)$$

$$\zeta_B = \frac{(B^{\text{CRP}} - B^{\text{ARP}})}{B^{\text{ARP}}} \times 100\% \quad (26)$$

式中: $\zeta_C$ 表示单位时间成本减少的百分比, $\zeta_{A_0}$ 表示平均使用可用度增加的百分比, $\zeta_B$ 表示平均效费比增加的百分比。

与式(24)~式(26)相对应的预测维修效果的高线图如图8所示。由图8可知,在最外层等高线内部的区域,其维修效果均比年龄换件策略的效果要好;即应用该区域内的参数进行损伤标尺的标定与设计,可以使预测维修策略的成本更低、使用可用度与效费比更高,图中的数据表示预测维修策略效用提升的百分比。对于单位时间成本、平均使用可用度与平均效费比指标而言,在损伤标尺的准确度(累积损伤因子)或精确度(标准差)确定的情况下,可以分别选择最优(也即效能提升最大)的精确度(标准差)或准确度(累积损

伤因子)度量。比如,如果损伤标尺的精确度为30 h,那么以单位时间成本最小为优化标准,损伤标尺的累积损伤因子的最优选择就是0.9,相对于年龄换件策略而言,单位时间维修成本可以降低9.93%。如果损伤标尺的精确度为100 h,那么不管选择何种损伤标尺,都不能获得比年龄换件更好的效果。同理,对于平均使用可用度与平均效费比指标,也能得到类似的结论。

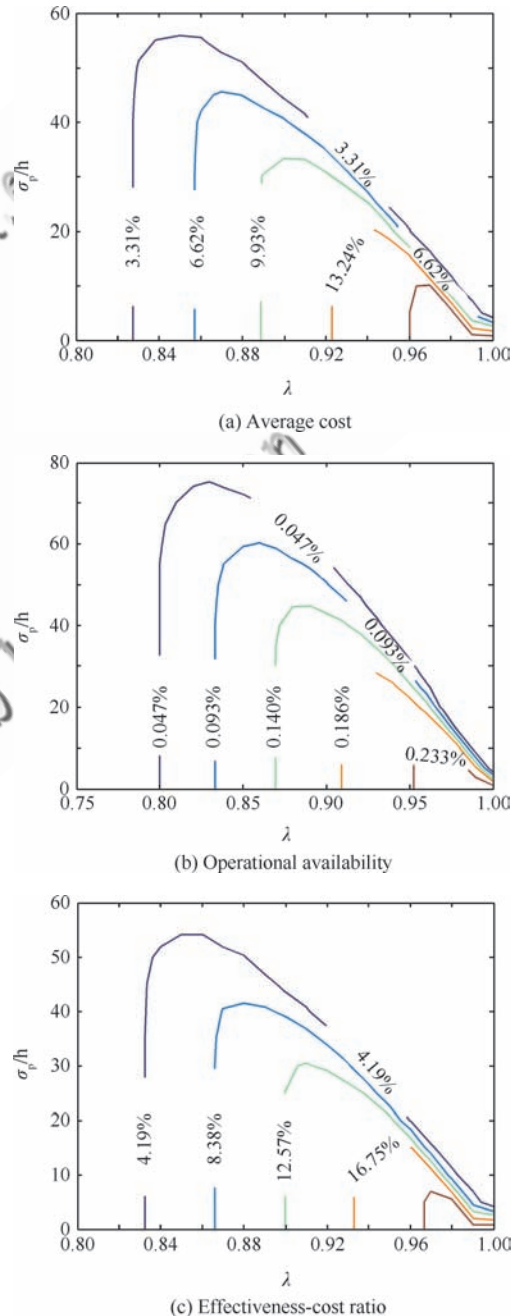


图8 预测维修效果的改善

Fig. 8 Improvement of predictive maintenance efficiency

## 5 结 论

1) 在航空、航天和雷达等高新装备中存在众多的电子部件或系统,损伤标尺技术可以有效监测芯片级或板级电子部件或系统的健康状态并预警,本文以单部件电子系统为研究对象,以单位时间成本、平均使用可用度和平均均效费比为指标,从理论上对预测换件维修策略以及损伤标尺特性(准确度和精确度)对预测维修效果的影响进行了详细分析,并设计了维修决策优化的流程。

2) 针对与被监控系统寿命独立的损伤标尺,以被监控系统与损伤标尺的寿命服从三参数 Weibull 分布为例,研究了换件维修的效果,揭示了该维修策略与事后维修策略、年龄换件策略的本质关系;应用 Monte Carlo 方法仿真分析了损伤标尺的预测距离与形状参数对维修效果的影响,确定了最优的维修决策选择。

3) 针对与被监控系统寿命相关的损伤标尺,以被监控系统的寿命服从三参数 Weibull 分布为例,应用 Monte Carlo 方法仿真分析了损伤标尺的累积损伤因子与随机标准差对维修效果的影响,与年龄换件维修策略进行了对比,为维修策略的优化选择提供了依据。

4) 将基于损伤标尺的预测维修优化技术应用于武器装备中的关键电子系统,可以有效降低单位时间成本并提高平均使用可用度,改善装备使用中的经济可承受性与战备完好性。

## 致 谢

感谢北京科技大学东凌经济管理学院王文彬教授、美国马里兰大学 Michael Pecht 教授与 Jie Gu 博士以及国防科学技术大学钱彦岭副教授与程志君老师对一些疑难问题的解答与指导。

## 参 考 文 献

- [1] Elwany A H, Gebraeel N Z. Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers), 2008, 40(7): 629-639.
- [2] Wang H, Pham H. Reliability and optimal maintenance. London: Springer-Verlag London Limited, 2006.
- [3] Dekker R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. Reliability Engineering and

System Safety, 1996, 51(3): 229-240.

- [4] Nakagawa T. Maintenance theory of reliability. London: Springer-Verlag London Limited, 2005.
- [5] Wang H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European Journal of Operational Research, 2002, 139(3): 469-489.
- [6] Lu D F, Zuo H F, Cai J. Study on optimal maintenance of standby systems based on function inspection. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 660-665. (in Chinese)  
吕德峰, 左洪福, 蔡景. 基于功能检测的备用系统维修优化研究. 航空学报, 2009, 30(4): 660-665.
- [7] Yang Y, Wang L C, Zou Y. Availability model of one-unit discrete time system with preventive maintenance. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(1): 68-72. (in Chinese)  
杨懿, 王立超, 邹云. 考虑预防性维修的离散时间单部件系统的可用度模型. 航空学报, 2009, 30(1): 68-72.
- [8] Jardine A K, Lin D, Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(7): 1483-1510.
- [9] Pecht M G. Prognostics and health management of electronics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [10] Pecht M, Jaai R. A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems. Microelectronics Reliability, 2010, 50(3): 317-323.
- [11] Kaiser K A, Gebraeel N Z. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans, 2009, 39(4): 840-849.
- [12] Wu S J, Gebraeel N, Lawley M A, et al. A neural network integrated decision support system for condition-based optimal predictive maintenance policy. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans, 2007, 37(2): 226-236.
- [13] Cui J G, Zhao Y L, Dong S L, et al. Life prognostics for aero-generator based on genetic algorithm and ARMA model. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1506-1511. (in Chinese)  
崔建国, 赵云龙, 董世良, 等. 基于遗传算法和 ARMA 模型的航空发电机寿命预测. 航空学报, 2011, 32(8): 1506-1511.
- [14] Huynh K T, Barros A, Berenguer C. Assessment of prognostic in maintenance decision-making for a deteriorating system under indirect condition monitoring. ESREL 2010, 2010: 1-8.
- [15] Sandborn P A, Wilkinson C. A maintenance planning and business case development model for the application of prognostics and health management (PHM) to electronic



- systems. *Microelectronics Reliability*, 2007, 47 (12): 1889-1901.
- [16] Scanff E, Feldman K L, Ghelam S, et al. Life cycle cost impact of using prognostic health management (PHM) for helicopter avionics. *Microelectronics Reliability*, 2007, 47 (12): 1857-1864.
- [17] Feldman K, Jazouli T, Sandborn P A. A methodology for determining the return on investment associated with prognostics and health management. *IEEE Transactions on Reliability*, 2009, 58(2): 305-316.
- [18] Wang W, Pecht M. Economic analysis of canary-based prognostics and health management. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(7): 3077-3089.
- [19] Vichare N M, Pecht M G. Prognostics and health management of electronics. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2006, 29(1): 222-229.
- [20] Pecht M G, Kapur K C. *Reliability engineering*. Kang R, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)  
Pecht M G, Kapur K C. 可靠性工程基础. 康锐, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [21] Zeng S K, Pecht M G, Wu J. Status and perspectives of prognostics and health management technologies. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26 (5): 626-632. (in Chinese)
- 曾声奎, Pecht M G, 吴际. 故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展. *航空学报*, 2005, 26(5): 626-632.
- [22] Mishra S, Pecht M G, Goodman D L. In-situ sensors for product reliability monitoring. *The International Society for Optical Engineering*, 2002: 10-19.

#### 作者简介:

**徐玉国** 男, 博士研究生。主要研究方向: 预测维修决策与优化、维修保障网络建模与分析。

Tel: 0731-84573398

E-mail: mountren@126.com

**邱静** 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 测试性、装备维修保障、故障诊断与预测。

Tel: 0731-84573305

E-mail: qiuqing@nudit.edu.cn

**刘冠军** 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 测试性、装备维修保障、故障诊断与预测。

E-mail: gjliu342@qq.com

**吕克洪** 男, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 测试性、故障预测与降虚警。

E-mail: fhrlkh@163.com

# Optimal Predictive Maintenance Decision of Electronics Based on Canaries

XU Yuguo<sup>1,2</sup>, QIU Jing<sup>1,\*</sup>, LIU Guanjun<sup>1</sup>, LU Kehong<sup>1</sup>

1. *Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

2. *Department of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China*

**Abstract:** Predictive maintenance based on prognostic information is an emerging maintenance mode which can decrease life cycle cost and increase operational availability effectively. This paper focuses on the prognostic approach based on canaries which can be divided into two categories: line replaceable unit (LRU)-independent canaries and LRU-dependent canaries. Under the perfect replacement assumption, a predictive maintenance decision model is proposed based on the renewal reward theorem, which can evaluate the benefit of the use of canary devices from the long-run average cost rate, average operational availability and average effectiveness-cost ratio. For LRU-independent canaries, the prognostic distance and shape parameter of Weibull distribution are chosen to optimize the maintenance decision, while for LRU-dependent canaries, the accumulated damage factor and stochastic standard deviation are chosen as decision variables. Finally, this model is demonstrated with a numerical implementation example using Monte Carlo simulation. The results show that the predictive maintenance policy with LRU-independent canaries is better than the corrective maintenance policy but worse than the age replacement policy, which exhibits an essential characteristic of the method. Furthermore, the predictive maintenance policy with LRU-dependent canaries is better than the age replacement policy in some conditions and the optimal parameters of canaries for maintenance decisions are chosen.

**Key words:** condition monitoring; prognostics and health management; canaries; maintenance optimization; renewal process; Monte Carlo methods

**Received:** 2011-11-29; **Revised:** 2011-12-09; **Accepted:** 2011-12-16; **Published online:** 2011-12-23 12:26

**URL:** www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111223.1226.005.html

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (51175502)

\* **Corresponding author.** Tel.: 0731-84573305 E-mail: qiuqing@nudt.edu.cn