

## 基于马尔可夫决策理论的无人机视情维修策略

谷泽阳, 李小民

(军械工程学院, 石家庄 050003)

**摘要:** 视情维修可以根据设备工作状态安排预防性维修措施, 是解决退化失效问题、保证设备可用度的有效途径。以无人机核心部件为研究对象, 将部件在运行中发生的缓慢劣化过程, 划分为若干个性能劣化状态。利用连续时间马尔可夫链理论建立状态维修及更换策略模型。以设备的稳态最大可用度为决策指标, 同时考虑相邻两个阶段的平均劣化时间、平均检测时间、平均预防性维修时间以及更换部件时间等因素的影响。根据马氏过程平稳状态下的统计平衡原理, 采用递归求解的算法对模型进行求解, 最终确定系统最优检测频率、视情维修阈值和更换策略。实验结果表明, 该模型能有效描述设备的劣化过程, 实现设备维修优化。

**关键词:** 视情维修; 无人机; 马尔可夫理论; 检测更换策略

**中图分类号:** TP399      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0111-04

## On-Condition Maintenance and Replacement Policy for UAVs Based on Theory of Markov Process

GU Ze-yang, LI Xiao-min

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Condition-based maintenance can arrange preventive maintenance according to the operating condition of the equipment, which is an effective way to solve the degradation failure and ensure the availability of equipments. In this paper, we focus on the core components of the UAVs and develop the condition-based maintenance model as well as replacement policy with the method of continuous-time Markov chain by dividing the deterioration into different states happened in the operational process. In the model, the maximal steady state availability of the system is used as the indicator to arrange maintenance, while the impact of the such factors as average time of the deterioration between two adjacent stages, the average detection time, the average time of preventive maintenance and the time for part replacing and etc, is also taken into account. Ultimately, the optimal frequency of testing system and the threshold of condition-based maintenance as well as the replacement policy are determined by using a recursive algorithm to solve the model according to the principle of statistical equilibrium in the steady state of Markov process. The result shows that the presented the model can describe the degradation process effectively, and can be used to optimize the maintenance policies.

**Key words:** condition-based maintenance; UAV; theory of Markov process; check replacement policy

### 0 引言

无人机(UAV)是我军近年来重点发展的高技术武器装备。随着军队对无人机作战要求的提高, 现代

无人机系统日趋复杂, 在保障飞行安全、降低维护成本、提高无人机可靠性方面对状态监测和维护方式提出了新的挑战。为了提高无人机的安全性、可靠性、使用效率和减少维护成本, 引入视情维修策略非常必要。无人机健康状态转移是一个随机过程, 而马尔可夫过程描述了一种系统的变化情况与以前系统所处的状态无关的随机过程, 是对无人机状态变化建模的有力工具<sup>[1]</sup>。因此, 本文拟采用马尔可夫决策理论建立无人机维修优化模型, 并采用递归法对模型进行求解, 以无

收稿日期: 2014-06-30

修回日期: 2014-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61179018, 61102165); 航空科学基金(20135184008)

作者简介: 谷泽阳(1989—), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 研究方向为无人机健康评估和维修决策方法。

人机的最大可用度为决策指标,确定维修活动的最佳维修阈值、平均检测时间以及最优更换策略。

### 1 基于马尔可夫理论的系统模型描述

#### 1.1 模型假设

设备由正常状态逐步运行至故障状态的过程是一个渐变的过程,设备的性能由好到坏缓慢劣化,将正常状态与故障状态之间的状态称为劣化状态。设备在每时每刻所处的劣化状态可以根据设备的监测信息进行判断。

为方便对系统状态转移进行建模,做以下假设。

1) 假设随工作时间的逐步增加,设备性能逐渐劣化,在不进行预防性维修的情况下,最终进入故障状态,此时采取故障后更换的维修措施。

2) 定期对设备进行检测,确定设备所处的状态,平均检测间隔为  $1/\lambda_{in}$ ;假设检测时系统停机,平均检测时间为  $1/\mu_{in}$ ,二者均服从指数分布。在设备故障前,根据状态进行预防性维修,延长设备寿命。此时设备的状态应处在一定的劣化阶段,假设为第  $n+1$  个劣化状态,即对于系统状态  $i$  的检测后的维修决策为

$$\begin{cases} 0 \leq i \leq n & \text{继续工作} \\ n+1 \leq i \leq k & \text{进行预防性维修} \end{cases}$$

3) 系统随工作时间的延长性能逐渐劣化,该过程可划分为  $k$  个性能劣化阶段,相邻劣化状态转移率服从参数为  $\lambda$  的指数分布。

4) 假设系统经过预防性维修后,设备的劣化速度加快。设系统进行第  $j$  次预防性维修的平均时间为  $1/\beta^{j-1}\mu_m, \beta < 1$ ;维修后相邻劣化状态转移的平均时间为  $1/\alpha^j\lambda, \alpha > 1$ ,二者均服从指数分布。

5) 假设预防性维修为不完全维修,进行预防性维修后设备以概率  $p$  恢复如新,以概率  $q = 1 - p$  恢复至前一个劣化状态<sup>[2]</sup>。

6) 设备会在两种情况下进行更换维修:一是系统经历过  $S$  次预防性维修后,第  $S+1$  次进行预防性更换,平均预防性更换时间为  $1/\mu_r$ ;二是在系统进入故障状态以后,进行故障后更换,平均故障后更换时间为  $1/\mu_f$ 。二者均服从指数分布,且满足:  $1/\beta^{j-1}\mu_m \leq 1/\mu_r \leq 1/\mu_f$ 。

#### 1.2 模型描述

根据 1.1 节中进行的几种模型假设,系统的状态空间定义如下:1) 工作状态,  $D(i, j, 1)$  表示第  $j$  次预防性维修后系统在第  $i$  个性能劣化阶段正常工作;2) 检测状态,  $I(i, j, 2)$  表示第  $j$  次预防性维修后系统在第  $i$  个性能劣化阶段进行检测;3) 维修状态,  $M(i, j, 3)$  表示对系统进行第  $j$  次预防性维修,此时处于第  $i$  个性能劣化阶段,  $i$  的取值范围为  $n+1 \leq i \leq k$ ;4) 状态 R 表示

系统已经进行了  $S$  次预防性维修,此时进行预防性更换;5) 状态 F 表示系统发生故障,进行故障后更换<sup>[3]</sup>。

设备不断经历正常工作、检测、维修等过程,定义设备从上一次正常工作开始到下一次正常工作开始之间的时间为一个运行周期,则系统在一个周期内的所有状态及其转移概率构成马尔可夫链,如图 1 所示。

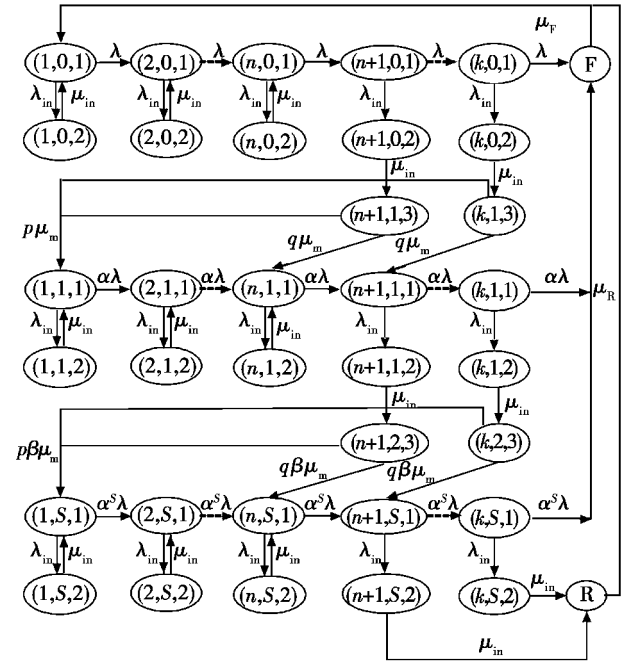


图 1 设备状态转移示意图

Fig. 1 Equipment state transition diagram

系统在正常工作时进行周期性检测,当检测出设备所处的劣化状态超过维修阈值  $n$  时进行预防性维修;设备经历过维修后,其工作状态转移的时间会呈现减少的趋势,而维修时间则会呈现增加趋势,其系数分别为  $1/\alpha (\alpha > 1)$  和  $1/\beta (\beta < 1)$ ;当系统经历过  $S$  次预防性维修后,下一次则进行预防性更换;当系统发生故障,则立即更换。预防性更换和故障后更换均使系统恢复至全新状态。

### 2 模型分析与求解

一般针对马尔可夫过程,可列出相应的转移矩阵  $Q$ ,然后求解,但由于该模型状态较多,直接求解十分困难,因此可利用马氏链的某些特性来求解<sup>[4-6]</sup>。分析上述马氏链,可以假定  $t \rightarrow \infty$  时过程趋于平稳分布,根据统计平衡的原则,即在稳态条件下,设备的状态进入某一个状态的速率等于离开此状态的速率。

设  $P(i, j, m) (1 \leq i \leq k; 0 \leq j \leq S; 1 \leq m \leq 3)$  是各个对应状态的概率,状态 F (预防性更换) 和状态 R (故障后更换) 的概率分别表示为  $P_F$  和  $P_R$ ,根据相关性质,以状态  $D(1, 0, 1)$  为例

$$\lambda P(1,0,1) = \mu_R P_R + \mu_F P_F \quad (1)$$

为便于计算,设  $A(i,j,m) = P(i,j,m)/P(1,0,1)$ , 其中,  $A_F = P_F/P(1,0,1)$ ,  $A_R = P_R/P(1,0,1)$ 。根据1.2节中构建的系统状态转移示意图,可得如下计算。

1) 首先,根据定义有  $A(1,0,1) = 1$ 。

2) 对于状态  $D(i,j,1)$  有

$$A(i,0,1) = A(i-1,0,1) \quad 2 \leq i \leq n \quad (2)$$

$$A(i,0,1) = \lambda / (\lambda + \lambda_m) A(i-1,0,1) \quad n+1 \leq i \leq k \quad (3)$$

$$A(1,j,1) = \frac{p\beta^{j-1}\mu_m}{\lambda\alpha^j} \sum_{i=n+1}^k A(i,j,3) \quad 1 \leq j \leq S \quad (4)$$

$$A(i,j,1) =$$

$$\begin{cases} A(i-1,j,1) & 2 \leq i \leq n-1 \\ \frac{q\beta^{j-1}\mu_m}{\lambda\alpha^j} A(n+1,j,3) + A(n-1,j,1) & i=n \\ \frac{q\beta^{j-1}\mu_m}{\lambda\alpha^j + \lambda_m} A(i,j,3) + \frac{\lambda\alpha^j}{\lambda\alpha^j + \lambda_m} \cdot \\ \quad A(i-1,j,1) & n+1 \leq i \leq k-1 \\ \frac{\lambda\alpha^j}{\lambda\alpha^j + \lambda_m} A(i-1,j,1) & i=k \end{cases} \quad (5)$$

3) 对于状态  $I(i,j,2)$  有

$$A(i,j,2) = (\lambda_m/\mu_m) A(i,j,1) \quad 1 \leq i \leq k, 0 \leq j \leq S \quad (6)$$

4) 对于状态  $M(i,j,3)$  有

$$A(i,j,3) = \frac{\mu_m}{p\beta^{j-1}u_m + q\beta^{j-1}u_m} A(i,j,2) = \frac{\mu_m}{\beta^{j-1}u_m} A(i,j,2) \quad (7)$$

5) 对于状态 F 和状态 R 有

$$A_F = (1/u_F) \sum_{j=0}^S \alpha^j \lambda A(k,j,1) \quad (8)$$

$$A_R = (\mu_m/\mu_m) \sum_{i=n+1}^k A(i,S,2) \quad (9)$$

稳态条件下各个状态的概率和为1,因此可得

$$P(1,0,1) = \left[ \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^S A(i,j,1) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^S A(i,j,2) + \sum_{i=n+1}^k \sum_{j=1}^S A(i,j,3) + A_F + A_R \right]^{-1} \quad (10)$$

根据以下思路对此模型进行求解:1) 由定义得  $A(1,0,1) = 1$ ;2) 由式(2)、(3)求得  $A(i,0,1)$ ;3) 由式(6)求得  $A(i,0,2)$ ;4) 由式(7)求得  $A(i,1,3)$ ;5)  $A(i,1,3)$  已知,可以由式(4)得  $A(1,1,1)$ ;6) 回归步骤2),依此求得  $A(i,1,1)$ ,  $A(i,1,2)$  和  $A(i,2,3)$ ,由  $A(i,2,3)$  求得  $A(1,2,1)$ ,依次循环,可求得  $A(i,j,1)$ ,  $A(i,j,2)$  和  $A(i,j,3)$ ;7) 根据式(8)、(9),求得  $A_F, A_R$ ;8) 根据式(10),求得  $P(1,0,1)$ ;9) 根据定义,  $P(i,j,m) = A(i,j,m)/P(1,0,1)$ ,求得  $P(i,j,m), P_R$  和  $P_F$ 。

### 3 系统维修决策性能指标

武器装备的可用度是装备保障的重要参数之一,综合反映了武器装备的可靠性、维修性和保障性,是对装备工作状态的综合描述<sup>[7]</sup>。本文以系统稳态可用度作为系统维修决策的性能指标,根据模型假设,当系统处于状态  $D(i,j,1)$  时为可用状态,则系统稳态可用度  $A_S$  为处于  $D(i,j,1)$  的概率之和,即

$$A_S = \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^S P(i,j,1) \quad (11)$$

### 4 实例分析

检测和视情维修过于频繁不仅会增大运行费用,对系统的性能也会造成不良的影响,因而如何在保证系统稳态可用度最大化的原则下,确定最优检测频率和视情维修阈值是一件很有意义的工作<sup>[8-9]</sup>。本文以某设备的状态劣化模型为例,对已建模型进行求解验证。

本文以无人机某典型部件为例,进行实例分析。已知该部件在不进行维修的情况下,自全新状态运行至故障状态之间,可划分为7个性能劣化阶段,之后进入故障状态,进行故障后更换。在不进行预防维修的情况下,相邻两个劣化阶段的平均劣化时间为30 h,每次对设备进行检测所需的平均检测时间为0.5 h,预防性维修平均花费时间为2 h,预防性更换所需平均时间为20 h,故障后更换所需的平均更换时间为40 h。在设备的全寿命运行期间进行周期性检测,平均检测间隔时间由操作人员根据设备使用情况及设备使用频率而设定<sup>[10]</sup>。

对设备进行检测,当发现设备状态超过维修阈值  $n$ ,进行预防性维修,每次维修后设备从当时所处的劣化阶段以  $p$  的概率修复如新,以  $q$  的概率恢复至前一劣化阶段。在实际应用中,设备经过多次维修后,劣化速度会加快,即状态转移所需时间变短,维修所需的时间会相应延长,因此在此处设相应的缩短或延长系数分别为  $1/1.05$  和  $1/0.95$ 。对设备进行  $S$  次预防性维修后进行预防性更换,可得本文所建模型中的相应参数:  $k=7, \lambda=0.33, \mu_m=2, \mu_m=0.5, \mu_R=0.5, \mu_F=0.025, p=0.9, q=0.1, \alpha=1.05, \beta=0.95$ 。

对模型进行仿真解析,得到以下结果。

以设备的可用度为维修决策的性能指标,取适当的检测间隔和维修阈值,可得系统的可用度与更换策略之间的关系,如图2所示。由图可知,取一定的维修阈值和检测间隔时,系统的可用度随更换策略的不同而改变。图2为维修阈值  $n=4$ 、检测间隔为15 h时的系统可用度与更换策略之间的关系,系统的最优更换策略为  $S=8$ ,系统的最大可用度  $A_S=0.9324$ 。

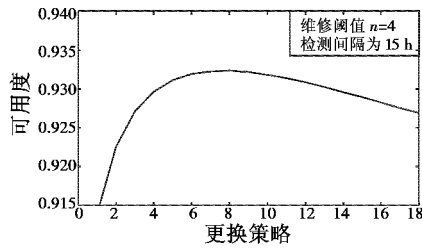


图 2 设备的可用度与更换策略的关系

Fig. 2 The availability vs replacement policy

图 3 所示为取固定的检测间隔,系统的可用度与更换策略之间的关系。曲线 1~5 分别表示维修阈值为 2,3,4,5,6 时,系统可用度与更换策略之间的关系。由图可以看出维修阈值  $n$  为 4 时,系统可以获得最大的稳态可用度。

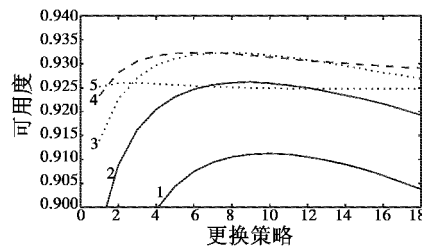


图 3 不同维修阈值情况下设备可用度与更换策略之间的关系

Fig. 3 Availability vs replacement policy for different maintenance thresholds

不同的检测间隔对设备的可用度也有很大影响。取系统维修阈值  $n$  为 4,设备的劣化状态划分为 7 个劣化状态,即  $k=7$ ,此时设备的可用度与检测间隔的关系见图 4。图中 5 条曲线分别对应取检测间隔为 15 h, 20 h, 25 h, 30 h 和 35 h,可以看出,取不同检测间隔时间,设备的最大可用度与更换策略的关系基本保持在很小的范围内,最大可用度在 0.93~0.935 之间,最优更换策略均为  $S=8$ 。因此,可以根据实际工作中所需的平均检修时间,选择合适的维修检测间隔。

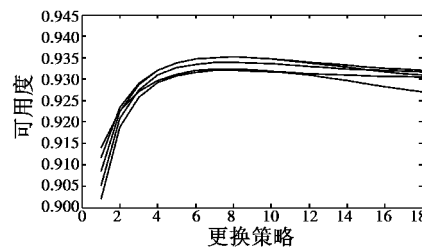


图 4 不同检测间隔下设备可用度与更换策略之间的关系

Fig. 4 Availability vs replacement policy for different inspection intervals

## 5 总结

本文从维修实际出发,提出一种基于马尔可夫决策

理论的设备维修决策策略,该策略以设备最大可用度为决策标准,同时考虑了设备检修间隔和设备更换策略两个因素的影响,利用离散时间马尔可夫链理论对系统劣化进行建模,给出了该策略下维修系统模型的递归求解的步骤,并对本文建立的马尔可夫维修策略模型求解进行了仿真。应用实例表明:实际中关于设备劣化的状态转移概率矩阵的准确估计较为困难,采用考虑劣化速度以及检测维修时间的方式比较直观易实现;本文建立的模型、所得结论以及建立的实验仿真平台有助于解决实际维修中的现实问题,为其他部件的状态维修决策及更换策略提供了有力的理论依据。

## 参考文献

- [1] 王凌. 维修决策模型和方法的理论与应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2006. (WANG L. Models and methods for maintenance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [2] 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[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(2):1106-1108. (CHENG Z J, GAO D H, HUANG Z, et al. Optimal analysis of the condition-based maintenance model under the imperfect repair[J]. Systems Engineering and Electronic, 2006, 28(2):1106-1108.)
- [3] 周书仲,段礼祥,宋志刚,等. 基于马尔可夫过程的压缩机维修决策方法研究[J]. 科学技术与工程,2012,19(12):4625-4629. (ZHOU S Z, DUANG L X, SONG Z G, et al. Maintenance strategy optimization of compressor based on Markov process[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 19(12):4625-4629.)
- [4] 李常有,徐敏强,郭耸,等. 具有混合数据的维修策略决策方法[J]. 机械工程学报,2008,44(10):32-37. (LI C Y, XU M Q, GUO S, et al. Approach for maintenance strategy decision making with mixed data[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10):32-37.)
- [5] BYON E, DING Y. Season-dependent condition-based maintenance for a wind turbine using a partially observed Markov decision process[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4):1823-1834.
- [6] 侯振挺,郭先平. 马尔可夫决策过程[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1998. (HOU Z T, GUO X P. Markov maintenance decision theory[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1998.)
- [7] 张秀斌. 视情维修决策模型及应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2003. (ZHANG X B. Research on decision model and application of condition based maintenance[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.)

(下转第 119 页)

- 3rd ed. Irvine; McGRAW-Hill Sole Logistics Press, 2006.
- [5] BRISKIN L, DEMMY W S. An overview of the network repair level analysis model [military systems] [C]// Aerospace and Electronics Conference, 1988; 1414-1420.
- [6] GUTINA G, RAFIEYA A, YEO A, et al. Level of repair analysis and minimum cost homomorphisms of graphs [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2006, 154(6): 881-889.
- [7] BARROS L. The optimization of repair decision using life-cycle cost parameters [J]. *IMA*, 1998, 9(4): 403-413.
- [8] BARROS L, RILEY M. A combinatorial approach to level of repair analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 129(2): 242-251.
- [9] BASTEN R J, SCHUTTEN J M J, HEIJDEN V D M C. An efficient model formulation for level of repair analysis [J]. *Annals of Operations Research*, 2009, 172(1): 119-142.
- [10] SARANGA H, KUMAR U D. Optimization of aircraft maintenance support infrastructure using genetic algorithms-level of repair analysis [J]. *Annals of Operations Research*, 2006, 143(1): 91-106.
- [11] 吴昊, 左洪福, 孙伟. 一种新的民用飞机修理级别优化模型 [J]. *航空学报*, 2009, 30(2): 247-253. (WU H, ZUO H F, SUN W. A new level of repair analysis optimization model for civil aircraft maintenance [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(2): 247-253.)
- [12] 阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 多指标约束下舰载装备维修级别建模与优化 [J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(5): 955-960. (RUAN M Z, LI Q M, PENG Y W, et al. Modeling and optimization for repair level of shipborne equipment under multi-constraints [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 955-960.)
- [13] 郭霖翰, 卞洁辉, 王乃超, 等. 基于 PSO 的方案阶段修理级别优化方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(1): 97-101. (GUO L H, BIAN J H, WANG N C, et al. Optimal approach for level of repair analysis in concept phase based on PSO algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(1): 97-101.)
- [14] 薛陶, 冯蕴雯, 薛小锋, 等. 一种飞机修理级别经济性分析模型 [J]. *航空学报*, 2013, 34(1): 97-103. (XUE T, FENG Y W, XUE X F, et al. An aircraft economic evaluation model for level of repair analysis [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(1): 97-103.)
- [15] 何春雨, 金家善, 孙丰瑞. 基于 LINGO 软件的舰船装备修理级别优化分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(1): 78-82. (HE C Y, JIN J S, SUN F R. Optimization model of ship's equipment LORA based on LINGO [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2011, 45(1): 78-82.)
- [16] 刘奇颖, 滕克难, 曹凌. 无线电高度表修理级别确定方法研究 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2005, 20(1): 191-193. (LIU Q Y, TENG K N, CAO L. Research on logic decision principle applied in the LORA of radio altimeter [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2005, 20(1): 191-193.)
- [17] 吴昊, 左洪福. 基于改进层次分析法的民用飞机修理级别非经济性分析 [J]. *飞机设计*, 2008, 28(6): 46-49. (WU H, ZUO H F. Level of repair analysis non-economic evaluation for aircraft maintenance based on improved AHP [J]. *Aircraft Design*, 2008, 28(6): 46-49.)
- [18] 刘栋, 何宝民, 费川, 等. 军用航空装备维修级别的选定与评估 [J]. *航空维修与工程*, 2011(1): 73-75. (LIU D, HE B M, FEI C, et al. Research on the selection and evaluation of military aircraft maintenance system [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2011(1): 73-75.)
- [19] SHERBROOKE C C. *Optimal inventory modeling of systems multi-echelon techniques* [M]. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [20] GROSS O. *A class of discrete-type minimization problems* [R]. Santa Monica: Rand Corporation, 1956.
- [21] SHERBROOKE C C. Vari-Metric; improved approach approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models [J]. *Operations Research*, 1986, 34(2): 311-319.

(上接第 114 页)

- [8] CHAN J K, SHAW L. Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance [J]. *IEEE Transaction on Reliability*, 1994, 42(4): 566-570.
- [9] 程志君. 多部件系统视情维修决策技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. (CHENG Z J. Research on condition-based maintenance decision of multi-unit system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)
- [10] NEVES M L, SANTIAGO L P, MAIA C A. A condition based maintenance policy and input parameters estimation for deteriorating systems under periodic inspection [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 61(3): 503-511.