

## 基于备件短缺数的舰载机修理级别分析

张 帅, 糜玉林, 孙 媛, 王利明  
(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘 要:** 修理级别分析(LORA)是舰载机保障性分析的重要内容,对舰载机全系统、全寿命保障具有重要的意义。现有的LORA分析模型对装备使命任务、作战使用和保障体系考虑不够全面,不能全面确定舰载机维修级别决策,影响装备的作战使用与保障体系决策。基于此,提出基于备件期望短缺数(EBO)的LORA分析模型。首先,分析了舰载机的维修保障模式;其次,结合舰载机保障实际建立了EBO的多级保障模型;再次,给出了基于EBO的优化分析模型;最后,结合实例对基于EBO的LORA问题进行了应用分析。

**关键词:** 备件短缺数; 修理级别分析; 舰载机

**中图分类号:** TH164      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0115-05

## Level of Repair Analysis for Shipboard Aircraft Based on Expected Backorders

ZHANG Shuai, MI Yu-lin, SUN Yuan, WANG Li-ming  
(Naval Aviation Engineering College, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Level of Repair Analysis (LORA) plays a significant role in Integrated Logistics Support Analysis of shipboard aircrafts, and is important for whole-system and whole-life management of the aircrafts. The current analysis model of LORA problem is insufficient for equipment mission and logistics support system. The analysis model is incomplete for LORA decision-making, and may affect the operational use and logistics support decision. To solve the problem, an analysis model of LORA is presented based on expected backorders (EBO) of spare parts. Firstly, the maintenance support mode of shipboard aircraft is analyzed. Then a multi-stage EBO model is established based on the actual situation of shipboard aircraft logistics support, and an optimization analysis model is presented based on EBO. Finally, analysis is made to the application of EBO based LORA according to an actual example.

**Key words:** backorders of spare parts; level of repair analysis; shipboard aircraft

### 0 引言

修理级别分析(LORA)是在装备研制、生产和使用阶段,对预计有故障的产品,进行非经济性或经济性分析以确定可行的修理或报废的维修级别的过程<sup>[1]</sup>。LORA决策影响系统设计、维修规划和综合后期保障资源的决策,对装备保障产生至关重要的影响<sup>[2-4]</sup>。

国内外对LORA问题进行了大量研究。文献[5-6]采用网络模型研究了修理级别费用、资源分配问题,并证明了LORA问题的多项式时间可解性;文献[7-9]建立了LORA问题的整数规划模型进行求解;文献

[10-13]利用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法对LORA规划数学模型进行了研究;文献[14-15]基于软件仿真对LORA经济性分析模型进行了研究;文献[16-18]利用逻辑决断法、层次分析法、价值工程法等方法进行了LORA建模优化分析。

以上研究主要是从故障部件维修活动本身的经济性和非经济性出发进行研究。装备保障正向体系化保障模式发展,要求保障体系与主战装备体系、保障体系内保障要素与保障要素间的整体融合优化。LORA是主装备、供应体系、维修体系等保障体系各要素相互作用、相互协调、动态优化的过程,其最终目标是以最佳的效费比完成使命任务。备件期望短缺数(EBO)是综合衡量装备保障效能的有效指标,基于EBO进行LORA建模优化,可以实现保障体系整体优化。

收稿日期:2014-07-14

修回日期:2014-09-01

作者简介:张 帅(1984—),男,江苏沛县人,博士生,研究方向为装备保障理论与应用。

# 1 建模分析

## 1.1 舰载机维修保障模式

LORA 能够确定出舰载机故障部件最佳效费比的维修级别。LORA 过程生成系统的维修规划,是综合后勤保障(ILS)所有工作的综合结果。海军舰载机实行舰员级、中继级和基地级三级维修保障模式。当舰载机以航母为基地时,舰员级和中继级处于航母上,将舰员级和中继级看作基层级,则舰载机是两级保障模式,如图 1 所示。

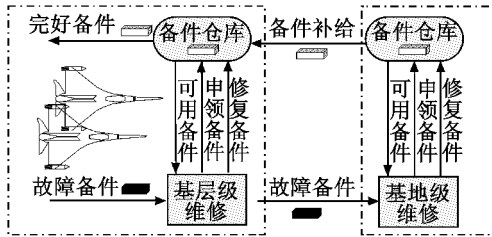


图 1 舰载机维修保障模式

Fig. 1 Logistics support model of carrier-based aircraft

基层级和基地级具有不同的维修能力,基层级站点具备一定的维修保障能力,主要维修保障本站点的舰载机;基地具备全面的维修保障能力,提供对若干个基层保障站点的保障支持,具有规模集约效应。舰载机故障部件根据故障程度和修理复杂程度的不同,送至基层级或基地级维修。将故障件在某级别站点的维修概率称为故障维修率,每一个修理级别方案对应着特定的本地维修率,不同维修方案级别通过故障件的本站维修率加以区别。

## 1.2 备件期望短缺数建模

### 1.2.1 备件短缺数

备件短缺数是持续某一时间内,备件需求未满足的数量<sup>[19]</sup>,它反映库存效能和维修效能,是综合性保障指标,利用备件短缺数还可以方便求得可用度。下面只考虑舰载机外场更换件(LRU)和内场更换件(SRU)。短缺数计算基于多级 Vari-Metric 模型。EBO 是短缺数的均值函数,由备件库存量  $s_{ij}$  和供应渠道件数  $X_{ij}$  求得

$$EBO_{ij}(s_{ij}) = (X_{ij} - s_{ij})p(X_{ij} \geq s_{ij} + 1) = \sum_{X_{ij}=s_{ij}+1}^{\infty} (X_{ij} - s_{ij})p(X_{ij}) \quad (1)$$

在舰载机所有备件故障次数相互独立且无串件拼修时,站点  $j$  机群可用度  $A_j$  表示为<sup>[19]</sup>

$$A_j = 100 \prod_h \{1 - EBO_{h0j}(s_{h0j}) / (N_j Z_{h0j})\}^{Z_{h0j}} \quad (2)$$

式中: $Z_{h0j}$ 为 LRU<sub>h</sub> 的单机安装数; $N_j$ 为舰载机在使用现场  $j$  的配置数量; $s_{h0j}$ 为使用现场  $j$  的 LRU<sub>h</sub> 库存水

平。对上式取对数,得到幂级展开式

$$\ln(A_j/100) = \sum_{h=1}^H Z_{h0j} \ln \{1 - EBO_{h0j}(s_{h0j}) / (N_j Z_{h0j})\} \approx - \sum_{h=1}^H EBO_{h0j}(s_{h0j}) / N_j \quad (3)$$

可用度对数是备件短缺函数的可分离加法函数,且是凸函数,可通过求取备件短缺数极小值得到可用度极大值。所有舰载机的可用度  $A$  就是所有基层可用飞机的百分比

$$A = \sum_{j=1}^J (A_j N_j) / \sum_{j=1}^J N_j \quad (4)$$

### 1.2.2 备件需求率

舰载机使用现场产生备件需求。设 LRU 的平均故障间隔时间为  $T_{MTBF}$ ,单机安装数  $Z_0$ ,舰载机数量  $N_j$ ,任务期内,每架机平均飞行时间为  $T_{FY}$ ,则 LRU 故障率为

$$m_{0j} = \frac{T_{FY} \cdot Z_0 \cdot N_j}{T_{MTBF}} \quad (5)$$

故障 LRU 在中继级维修有一定的维修概率  $r_{0j}$ ,假设 LRU 故障仅因下层级某 SRU 故障所致,所占比例为  $q_{ij}$ ,则此 SRU 备件需求率为

$$m_{ij} = m_{0j} r_{0j} q_{ij} \quad (6)$$

后方基地的 LRU 需求是各基层送修的超出其维修能力的故障 LRU 和  $m_{00}$ ,  $m_{00}$  的算式为

$$m_{00} = \sum_{j=1}^J m_{0j} (1 - r_{0j}) \quad (7)$$

后方基地 SRU 需求由两部分组成:一是基层级送修的故障 SRU;二是后方基地修理 LRU 产生的 SRU 需求。后方基地 SRU 需求率为

$$m_{i0} = \sum_{j=1}^J m_{ij} (1 - r_{ij}) + m_{00} q_{i0} \quad (8)$$

### 1.2.3 备件供应渠道

供应渠道备件件数是指某项备件在某地正在修理的件数,或者由上级保障机构正在补给到本地的备件件数。

因基地修理 LRU 产生的 SRU<sub>i</sub> 需求比例  $f_{i0}$  是

$$f_{i0} = m_{00} q_{i0} / m_{i0} \quad i > 0 \quad (9)$$

基地修理的 LRU 由两部分组成:一是不存在延误,基地送修的 LRU 件数;二是因基地无 SRU 而延误的送修 LRU 件数。基地供应渠道 LRU 均值和方差为

$$E(X_{00}) = m_{00} T_{00} + \sum_i f_{i0} EBO(s_{i0} | m_{i0} T_{i0}) \quad (10)$$

$$var(X_{00}) = m_{00} T_{00} + \sum_i f_{i0} (1 - f_{i0}) EBO(s_{i0} | m_{i0} T_{i0}) + \sum_i f_{i0}^2 VBO(s_{i0} | m_{i0} T_{i0}) \quad (11)$$

式中: $T_{ij}$ 为备件项  $i$  在站点  $j$  的维修时间; $s_{ij}$ 为备件项  $i$  在站点  $j$  的库存数量。

由基地补给到基层  $j$  的 SRU 占基地所需 SRU 比例为

$$f_{ij} = m_{ij}(1 - r_{ij})/m_{i0} \quad i > 0 \quad (12)$$

基层  $j$  的 SRU 供应渠道均值和方差为

$$E(X_{ij}) = m_{ij}[(1 - r_{ij})O_{ij} + r_{ij}T_{ij}] + f_{ij}EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) \quad i, j > 0 \quad (13)$$

$$var(X_{ij}) = m_{ij}[(1 - r_{ij})O_{ij} + r_{ij}T_{ij}] + f_{ij}(1 - f_{ij}) \cdot EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) + f_{ij}^2VBO(s_{i0}T_{i0}) \quad i, j > 0 \quad (14)$$

基层  $j$  所需基地补充的 LRU 占基地 LRU 需求的比例为

$$f_{0j} = m_{0j}(1 - r_{0j})/m_{00} \quad j > 0 \quad (15)$$

基层  $j$  供应渠道包括：供应渠道无短缺时 LRU 件数；基地 LRU 短缺造成补给延误的件数；基层  $j$  因 SRU 短缺而延误修理的 LRU 件数。基层  $j$  供应渠道件数均值和方差为

$$E(X_{0j}) = m_{0j}((1 - r_{0j})O_{0j} + r_{0j}T_{0j}) + f_{0j}EBO(s_{00} | E(X_{00}), var(X_{00})) + \sum_{i=1}^I EBO(s_{ij} | E(X_{ij}), var(X_{ij})) \quad j > 0 \quad (16)$$

$$var(X_{0j}) = m_{0j}((1 - r_{0j})O_{0j} + r_{0j}T_{0j}) + f_{0j}(1 - f_{0j}) \cdot EBO(s_{00} | E(X_{00}), var(X_{00})) + f_{0j}^2VBO(s_{00} | E(X_{00}), var(X_{00})) + \sum_{i=1}^I VBO(s_{ij} | E(X_{ij}), var(X_{ij})) \quad j > 0 \quad (17)$$

根据供应渠道差均比选择合适的概率分布描述，当差均比为 1 时，运用泊松分布描述备件供应渠道；差均比大于 1 时，利用负二项分布近似描述备件供应渠道；差均比小于 1 时，用二项分布描述备件供应渠道。

## 2 优化分析模型

### 2.1 优化思想

不同的修理级别方案对应着特定的故障件本站修理率，因此，可以用不同的本站修理率表示各个修理级别方案。各修理级别方案的优劣需要在使命任务牵引和保障体系实际保障效果中展现。EBO 是任务需求牵引下保障体系保障效果的综合体现，各修理级别方案的保障效果对应着不同的 EBO 值。因此，可以用 EBO 检验各修理级别方案的优劣。与陆基保障模式不同，舰载机在以航母为基地时，具有变化的送修时间，因而，各修理级别方案的比较还需要在不同的送修时间环境下进行。通过对各修理级别方案不同情境下的 EBO 比较，最终得出各修理级别方案的军事经济效益排序。

### 2.2 优化模型

基于 EBO 的 LORA 利用 Gross 提出的边际优化算

法<sup>[20]</sup>，它是一种渐近优化技术，用于合理利用有限资源获取最大收益<sup>[21]</sup>。以 EBO 最小为优化目标，以费用为约束，以备件配置策略为需要调整的控制变量，边际效益值为

$$\delta(hij) = \{EBO(S) - EBO(S + E_{hij})\} / C_{hi} \quad (18)$$

式中， $E_{hij}$  表示站点  $j$  的第  $hi$  项备件为 1、其余为 0 的单位策略矩阵，且与备件策略矩阵  $S$  同型。在确定迭代步骤中的  $\delta(hij)$  后，即将站点  $j$  的第  $hi$  项备件加 1，得到新的备件配置策略矩阵  $S = S + E_{hij}$ 。

对于单航母编队、单保障基地构成的系统，最优模型表述为

$$\min EBO(S) \quad \text{s. t.} \quad \sum_{k=1}^H \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J C_{hi} s_{hij} \leq C \quad (19)$$

式中： $C_{hi}$  为备件单价； $C$  为总的备件经费； $s_{hij}$  为备件在某站点的配置数量； $S = (s_{hij})_{HIJ}$  为备件配置策略矩阵； $EBO(S)$  为对应于备件配置策略的期望短缺数。

经过以上分析求解，可以得到各修理级别方案在某一定送修时间下的效费比；改变送修时间，分别计算在各个送修时间下的各修理级别方案效费比；综合对比分析各种应用情境下的军事经济效益值，确定最优的修理级别方案。

## 3 应用分析

基于前述方法和模型，针对航母编队舰载机进行应用分析。航母编队配备有舰载机联队，由一定数量的舰载机组成，平时舰载机联队以陆基航空站为基地执行训练等任务，航母编队任务期间以航母为基地执行训练、作战等任务。为简化分析，假设舰载机由单项 LRU 组成，LRU 包括 SRU<sub>1</sub> 和 SRU<sub>2</sub> 两类子备件项，舰载机联队任务期间每天执行相同的飞行计划，基本数据见表 1。备件项在基层站点和基地具有相同的故障隔离率，备件项在各站点维修时间确定，不因修理级别方案而变化。

表 1 备件基本数据

Table 1 Parameters of spare parts

备件项	基层站点		基地平		单价/万元	安装数
	需求率/(件·d <sup>-1</sup> )	平均维修时间/d	均维修时间/d	隔离率		
LRU	1	1	0.5		100	2
SRU <sub>1</sub>		3	2	0.5	50	1
SRU <sub>2</sub>		3	2	0.5	50	2

不同的修理级别方案代表着不同的费用投入，各方案如表 2 所示，基本费用为各个方案考虑了除备件费用之外的保障设施、保障设备、保障人员、资料等所需投入的寿命周期基础费用。

基于表 1 和表 2，建立多级备件库存模型，利用边

际优化方法分析各方案在平均送修时间为2 d,10 d和20 d时的综合保障效果,如图2~图4所示。

表2 修理级别方案  
Table 2 LOR plans

方 案	基本费 用/万元	备 件 项	基层站点		基地需 求率/ (件·d <sup>-1</sup> )
			需求率/ (件·d <sup>-1</sup> )	维修率 r	
1	200	LRU	1	0.2	0.8
		SRU <sub>1</sub>	0.1		
		SRU <sub>2</sub>	0.1		
2	500	LRU	1	0.5	0.375
		SRU <sub>1</sub>	0.25		
		SRU <sub>2</sub>	0.25		
3	900	LRU	1	0.8	0.18
		SRU <sub>1</sub>	0.4		
		SRU <sub>2</sub>	0.4		

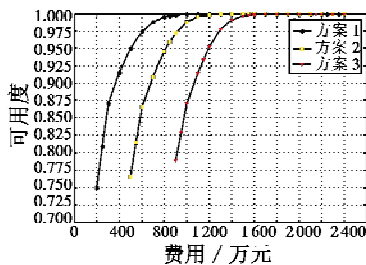


图2 平均送修时间2 d时可用性费用关系曲线  
Fig. 2 Optimal system availability vs cost when average repair time is two days

平均送修时间为2 d时,3种修理级别方案差距显著,方案1具有明显的军事经济效益。这种情况一般发生在陆基保障模式下,与现行的海军航空兵陆基保障模式相吻合,体现出集约化保障的优势;或者航母编队在近海活动,保障基地可以快速响应保障需求。

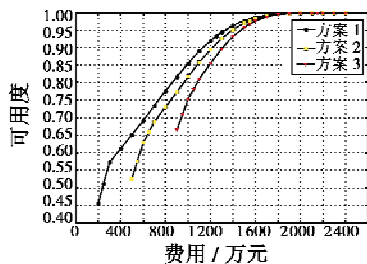


图3 平均送修时间10 d时可用性费用关系曲线  
Fig. 3 Optimal system availability vs cost when average repair time is ten days

平均送修时间为10 d时,3种修理级别方案效费比均有所降低。方案1依然保持了一定的优越性,但是优势相比平均送修时间为2 d时已经明显减弱。在要求系统保持较高可用性时,3种方案差别进一步缩小。

平均送修时间为20 d时,3种修理级别方案效费比进一步降低。此时,方案3最优,方案2次之,方案1

退化为最劣。说明随着平均送修时间的增加,方案1优势逐渐减弱,直至跌落为最劣方案。假若平均送修时间继续增加,则方案3的优越性愈加明显。

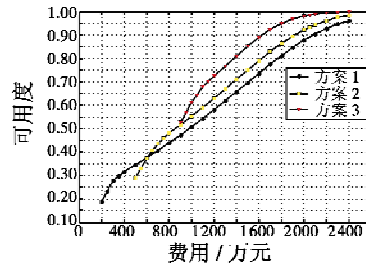


图4 平均送修时间20 d时可用性费用关系曲线  
Fig. 4 Optimal system availability vs. cost when average repair time is twenty days

综合分析,可以得出如下结论:1) 随着送修时间的增加,各修理级别方案效费比均降低;2) 送修时间较短时(如陆基保障模式),对本地维修能力要求可以适当降低,以发挥后方基地集约化保障优势;3) 送修时间较长时,基地保障效果降低,基层保障能力要求提高;4) 3种方案没有绝对的优劣,在不同的应用环境中具有不同的效益值。

本例中,在陆基保障模式下,选择方案1较合适;在舰载机以航母为基地,要求航母战斗群具备较强的持续独立作战能力时,选择方案3为宜。

### 4 结论

LORA对舰载机效能和持续作战能力有着重要的影响。LORA问题是一个综合保障问题,提高舰载机的保障能力,一方面要将LORA问题置于保障体系中才能得出科学合理的判断,并影响保障体系的科学构建;另一方面要基于任务需求,与舰载机的使命任务、作战运用、使用环境相结合,同时规范和指导舰载机的作战运用。

### 参考文献

[1] 中国人民解放军总装备部. GJB2961-1997 修理级别分析[S].北京:总装备部军标出版发行部,1997. (General Armament Department of PLA. GJB2961-97 level of repair analysis[S]. Beijing: Military Standardd Publication Dep of GAD,1997. )

[2] Department of Defense of USA. MIL-STD-1390D level of repair analysis(LORA)[S]. [S. l. ];DOD, 1993.

[3] 徐宗昌. 保障性工程[M]. 北京:兵器工业出版社,2005: 197-199. (XU Z C. Supportability engineering[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2005:197-199. )

[4] JAMES V J. Integrated logistics support handbook[M].

- 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.