

考虑相关失效的备件优化配置模型

周伟¹, 王东锋², 刘亚杰¹, 谭云涛², 刘晗²

(1. 国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南长沙 410073;

2. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028)

摘要: 相关失效普遍存在于各类系统, 以传统计算独立部件的备件配置量的方法来确定相关失效部件的备件配置量, 往往导致较大的误差。分析了故障源部件的备件保障水平与相关失效部件的故障率的关系, 给出了考虑相关失效情况下各类部件的备件期望短缺量与保障费用的计算方法, 并以保障费用为目标, 备件期望短缺量为约束提出备件优化配置模型, 给出了求解该模型的算法。最后通过案例分析, 验证了该模型的合理性与工程适用性。

关键词: 备件; 相关失效; 优化配置; 短缺量; 费用

中图分类号: TP 301

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.10.38

Allocation optimization model for spare parts concerned with dependent failures

ZHOU Wei¹, WANG Dong-feng², LIU Ya-jie¹, TAN Yun-tao², LIU Han²

(1. College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Special Engineering Design and Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: Dependent failures exist commonly in all kinds of systems. The traditional way of independent spare parts allocation is expected to cause great errors when it is applied to the spare parts allocation with dependent failures concerned. This paper analyzes the relation between the spare parts support level of fault source parts and the failure rate of the dependent parts. Computing methods for expected backorder and support cost of various parts are put forward. Furthermore, an optimal allocation model for spare parts including its solution is proposed with cost as its object and within constraints of expected backorder quantity. Eventually, the rationality and the project applicability of this model are proved through a case study.

Keywords: spare part; dependent failure; optimal allocation; backorder; cost

0 引言

相关失效是系统其他部件失效后, 部件受到影响而失效的现象^[1]。系统各部件通过物理连接或者各种介质(流体、电力、信号)传递相互关联、高度耦合, 相关失效是系统部件失效的普遍规律^[2-6]。忽略部件相关失效的特点, 简单地在各部件失效相互独立的假设条件下进行备件决策, 常常会导致较大的误差。如何保持系统稳定运行是一项重要的工作, 一旦系统部件失效造成停机, 将会面临巨大的损失, 所以维修保障部门持有大量备件, 使得系统在发生故障后能够尽快修复。因为认识到失效后影响人员操作安全或造成直接停机的关键部件的重要性, 所以将储备的重点放在关键部件。系统中有一类部件处于从属地位, 只是承担着一些辅助与保护性功能, 失效既不会直接引起操作安全

或者造成系统停机, 同时也不会影响系统的主要性能; 但是失效后, 如果因为缺少相应的备件不能及时进行更换, 可能会导致其他关键部件失效, 相关人员往往会忽略该类部件的备件储备。备件配置的目的不仅仅是确保系统关键部件失效造成系统停机后, 有相应的备件来尽快修复系统, 备件配置同时应该确保有足够的备件资源来预防关键部件的失效, 对于失效后会增大关键部件失效风险的部件应该及时进行更换, 避免相关失效的发生。关键部件往往价格昂贵, 购置成本、修复成本均比较高, 关键部件失效的发生本身就是一种损失。

当前国内外对备件优化配置开展了大量的研究, 取得了较大进展。一方面, 研究者们不再将备件优化局限于单个备件配置等级或者备件配置层级, 在多层级多等级备件优化配置方面产生了以 METRIC 模型为代表的一系列研

收稿日期: 2010-04-20; 修回日期: 2010-11-02。

基金项目: 国家自然科学基金(60904002, 70971132)资助课题

作者简介: 周伟(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为装备综合保障、可靠性工程。E-mail: zhouwei_nudt@163.com

究成果,并得到了较好的应用^[7-12];另一方面,部分研究者开始关注备件配置与维修策略等相关因素的协同优化^[13-15],但是这些研究都是基于部件失效相互独立的基本前提,并没有考虑相关失效对备件配置的影响。当前研究部件相关失效的文献主要关注相关失效部件的可靠性建模以及维修策略优化^[16-17],而没有考虑相关失效部件的备件配置问题。故本文从部件相关失效的角度出发,对相关失效部件的备件优化配置开展研究。

1 概念定义与问题分析

本文将失效后引起其他部件相关失效的部件称为故障源部件,而被故障源部件影响而失效的部件称为相关失效部件,两者之间的关系亦可以表述为后者失效相关于前者。本文的相关失效主要是指单相关,并不考虑任意一个发生故障后均会影响对方的双相关,同时也不考虑级联失效的情况。

相关失效的表现形式可以分为以下两种^[16]:

(1) 当一个部件失效时会以一定概率引起其他部件立即失效;

(2) 当一个部件失效后其他部件失效风险会增大。

对于由多个子系统组成的复杂系统来说,本文的部件亦可指代子系统。相关失效部件的失效风险主要由两部分组成,一部分为固有失效,主要由其固有属性以及一些偶然因素引起;另一部分主要是故障源部件失效而引起的第一类或者第二类相关失效。固有失效和第一类相关失效引起的失效风险是无法避免的,但是第二类相关失效引起的失效风险可以通过有效的备件保障而尽量降低,归结到备件配置来说是筹备合理的备件降低故障源部件处于失效状态的时间。

下文将从相关失效部件和故障源部件的备件需求特点出发研究备件优化配置技术。备件优化配置一般要权衡两方面的要求:一方面需要满足部件失效时对备件的需求,即确保其备件保障效能;另一方面需要在满足备件保障效能的前提下降低保障费用。下文的备件优化配置模型主要从这两方面展开研究。

2 备件优化配置模型

2.1 备件优化集

非故障源的独立失效部件可以单独进行备件决策,但是各部件通过相关失效关系相互关联时,需要对各部件的备件配置数量进行综合考虑,因为故障源部件的备件保障效果将直接影响相关失效部件的失效。如部件 s_1 与部件 s_2 失效相关于部件 s_3 ,进行备件决策时需要将 s_1, s_2, s_3 共同优化。如果部件 s_2 同时失效相关于部件 s_4 ,在进行优化时就必须考虑部件 s_4 。本文将所有通过相关失效直接和间接联系在一起,进行备件配置决策时需要综合考虑的部件称为一个备件优化集,用 S 表示。

从部件的维修特性出发可以将 S 中的部件分为不修复部件和可修复部件。不修复部件是指故障或者损坏后,不

能用经济可行的手段加以修复的部件^[18]。可修复部件是指故障或者损坏后,可以采用经济可行的技术手段进行修理,能恢复其原有功能的部件^[18]。不修复部件与可修复部件的需求规律不同,在进行备件配置时需要分别考虑。故将 S 中的可修复部件的集合用 S_R 表示,不修复部件的集合用 S_{NR} 表示,故障源部件的集合用 S_O 表示,相关失效部件集合用 S_D 表示。易知 $S_R \cup S_{NR} = S, S_O \cup S_D = S$ 。如果 $s_i \in S_D$,则令 $IO^{(1)}(s_i)$ 表示与部件 s_i 第一类相关失效关系的故障源部件的集合, $IO^{(2)}(s_i)$ 表示与部件 s_i 第二类相关失效关系的故障源部件的集合。如果 $s_i \in S_O$,则令 $ID(s_i)$ 表示失效相关于 s_i 的所有部件的集合。对于任意集合 $I_i, I_i \subseteq S$,定义 $|I_i|$ 表示集合 I_i 中元素的个数;定义运算 $\bigwedge I_i$ 表示获取 I_i 中部件的全部故障源部件集合; $\bigvee I_i$ 表示获取 I_i 中部件的全部相关失效部件集合。所以,对于 $s_i \in S_O$,其备件优化集通过对集合 $\{s_i\}$ 交替进行 \bigvee 运算和 \bigwedge 运算,直到运算返回的集合中的元素不再增加,用公式表示为

$$S = \underbrace{\bigwedge (\bigvee (\cdots (\bigwedge (\bigvee \{s_i\})) \cdots))}_{n} = \underbrace{\bigvee (\bigwedge (\bigvee (\cdots (\bigwedge (\bigvee \{s_i\})) \cdots))}_{n+1} \quad (1)$$

同理,对于 $s_i \in S_D$,其备件优化集为

$$S = \underbrace{\bigvee (\bigwedge (\cdots (\bigvee (\bigwedge \{s_i\})) \cdots))}_{n} = \underbrace{\bigwedge (\bigvee (\bigwedge (\cdots (\bigvee (\bigwedge \{s_i\})) \cdots))}_{n+1} \quad (2)$$

2.2 备件期望短缺量

当前国内外主要选用备件满足率或者备件期望短缺量作为备件保障效能参数。前者仅考虑某一时间点上备件需求是否被满足的问题,后者综合考虑了一段时间内备件需求变化的情况^[19]。本文将选用备件期望短缺量作为备件保障效能参数。对备件配置方案进行优化必须计算各种备件配置方案所对应的备件期望短缺量,从而可以从备件保障效能的层面判断各备件配置方案的优劣。

本文用 $X(X_1, X_2, \cdots, X_{|S|})$ 表示备件配置方案, X_i 表示部件 s_i 的备件配置量,用 $EBO_i(X)$ 表示部件 s_i 执行备件配置方案 $X(X_1, X_2, \cdots, X_{|S|})$ 的备件期望短缺量。本文对各部件的备件期望短缺量的计算,需要以明确各部件失效分布以及备件补充策略为基本前提,故下面约定各部件的需求服从泊松分布,不修复部件以一定的周期批量订货,可修复部件以 $(s-1, s)$ 策略送修。下面将给出备件优化集 S 中各部件执行备件配置方案 $X(X_1, X_2, \cdots, X_{|S|})$ 的备件期望短缺量的计算方法。

如果部件 $s_i \in S_O \cap S_R$,则 s_i 的备件期望短缺量为

$$EBO_i(X) = \sum_{x=X_i+1}^{\infty} (x - X_i) \frac{(nm\lambda_i D_i)^x}{x!} e^{-nm\lambda_i D_i} \quad (3)$$

式中, D_i 为 s_i 的平均修复周期; m 为设备数量; n_i 为 s_i 的机用数; λ_i 为 s_i 的失效。由于 s_i 不属于失效相关部件,其失效率为其固有失效。

如果部件 $s_i \in S_O \cap S_{NR}$,则 s_i 的备件库存在订货周期 ID_i 内将逐渐减少,备件短缺风险增加。考虑一个订货周

期 ID_i , 部件 i 在 ID_i 内 t 时刻的备件期望短缺量为

$$EBO_i^{(1)}(t, X) = \sum_{x=X_i+1}^{\infty} (x - X_i) \frac{(mn_i \lambda_i t)^x}{x!} e^{-mn_i \lambda_i t} \quad (4)$$

则 s_i 在订货周期 ID_i 内的备件期望短缺量为

$$EBO_i(X) = \int_0^{ID_i} \frac{EBO_i^{(1)}(t, X)}{ID_i} dt \quad (5)$$

故障源部件 s_i 处于失效状态的期望概率为

$$V_i(X) = \frac{EBO_i(X)}{mm_i} \quad (6)$$

如果部件 $s_i \in S_D$, 则 s_i 的期望失效概率为

$$\lambda_i = \lambda_i^{(0)} + \sum_{k=1}^{|S_0^{(1)}(s_i)|} \theta_{ki}^{(1)} n_k \lambda_k + \sum_{j=1}^{|S_0^{(2)}(s_i)|} \theta_{ji}^{(2)} n_j V_j(X) \quad (7)$$

式中, $\lambda_i^{(0)}$ 为部件 j 的固有失效率; $\theta_{ki}^{(1)}$ 为 s_k 失效对 s_i 的第一类相关失效系数; $\theta_{ji}^{(2)}$ 为 s_j 失效对 s_i 的第二类相关失效系数。

如果 $s_i \in S_D \cap S_R$, 则可以将 λ_i 代入式(3)计算出其备件期望短缺量 $EBO_i(X)$ 。

如果 $s_i \in S_D \cap S_{NR}$, 则可以将 λ_i 代入式(5)计算出其备件期望短缺量 $EBO_i(X)$ 。

2.3 保障费用

可修复部件的保障费用主要包括故障部件维修费用和备件库存费用; 不修复部件的保障费用主要包括备件购置费用和备件库存费用。

如果 $s_i \in S_R$, 则 s_i 库存的期望值为

$$I_i(X) = \sum_{x=0}^{X_i-1} (X_i - x) \frac{(mn_i \lambda_i D_i)^x}{x!} e^{-mn_i \lambda_i D_i} \quad (8)$$

故有 s_i 的单位时间期望保障费用为

$$C_i(X) = mn_i \lambda_i C_i^R + C_i^I I_i(X) \quad (9)$$

式中, C_i^R 为 s_i 的单次维修费用; C_i^I 为 s_i 单位时间库存费用。

如果 $s_i \in S_{NR}$, 则在订货期 ID_i 内 t 时刻期望备件库存为

$$I_i(t, X) = \sum_{x=0}^{X_i-1} (X_i - x) \frac{(mn_i \lambda_i t)^x}{x!} e^{-mn_i \lambda_i t} \quad (10)$$

故有 s_i 单位时间期望保障费用为

$$C_i(X) = mn_i \lambda_i C_i^P + \frac{C_i^I}{ID_i} \int_0^{ID_i} I_i(t, X) dt \quad (11)$$

式中, C_i^P 为 s_i 的单位采购费用。

故有备件优化集 S 的单位时间期望保障费用为

$$C(X) = \sum_{i=1}^{|S|} C_i(X) \quad (12)$$

2.4 优化模型与算法

上文已经给出确定备件配置方案 X 下各部件的备件期望短缺量与备件优化集保障费用的计算公式, 故备件优化配置模型可以表示为

$$\min C(X)$$

$$\text{s. t. } EBO_i(X) \leq E_i, i = 1, 2, \dots, |S| \quad (13)$$

式中, E_i 为部件 s_i 的期望短缺量约束。

下面将给出求解优化模型的算法。对于故障源部件的良好备件保障并不能降低其固有失效率和第一类部件相关失效所导致的失效风险。

当 $s_i \in S_D$ 时, 其故障率的最小值

$$\lambda_i^{\min} = \lambda_i^{(0)} + \sum_{k=1}^{|S_0^{(1)}(s_i)|} \theta_{ki}^{(1)} n_k \lambda_k$$

所以满足备件期望短缺量约束所需要的最少备件数为

$$X_i^{\min} = \min \{X_i \mid EBO_i^{(2)}(\lambda_i^{\min}, X) \leq E_i\} \quad (14)$$

式中, $EBO_i^{(2)}(\lambda_i^{\min}, X)$ 表示 s_i 的故障率取值为 λ_i^{\min} 时 s_i 的备件期望短缺量。

当 $s_i \in S_0$ 时, 其满足备件保障水平所需要的最少备件数为

$$X_i^{\min} = \min \{X_i \mid EBO_i(X) \leq E_i\} \quad (15)$$

定义函数

$$IEBO_j(X_i, X) = \begin{cases} 0, & EBO_j^{(3)}(X_i, X) \leq E_j \\ EBO_j^{(3)}(X_i, X) - E_j, & EBO_j^{(3)}(X_i, X) > E_j \text{ 且 } EBO_j^{(3)}(X_i + 1, X) \leq E_j \\ EBO_j^{(3)}(X_i, X) - EBO_j^{(3)}(X_i + 1, X), & EBO_j^{(3)}(X_i + 1, X) > E_j \end{cases} \quad (16)$$

式中, $EBO_j^{(3)}(X_i, X)$ 表示将当前的备件配置方案 s_i 的备件配置量取为 X_i 时 s_j 的备件期望短缺量; 函数 $IEBO_j(X_i, X)$ 用来表示 s_j 的备件配置量由 X_i 增加为 $X_i + 1$ 时 s_j 的期望短缺量的边际增量效益; s_j 在现有的备件配置方案 X 下已经满足期望短缺量约束, 则可以认为 s_j 的边际增量效益为 0。

本文选用边际分析法求解上文模型, 其基本思想是: 分别计算每一种部件的备件配置量追加一件情况下新的备件配置方案的费用增量, 当单位备件的费用增量为负时, 表示增加备件不但没有增加费用, 相反通过有效防止相关失效而减少了费用, 对费用增量取值最小的部件的备件配置量追加一件; 如果所有备件费用增量均为正, 则计算各部件的单位费用效益, 将单位费用效益最高的部件的备件配置量增加一件; 单位费用效益通过期望短缺量边际增量效益与费用的比值来体现。不断循环该过程, 直到满足备件期望短缺量约束且任意一种部件的备件配置量追加一件时, 费

用增量为正^[7]。记 $C_i(X_i, X)$ 表示将当前的备件配置方案 s_i 的备件配置量取为 X_i 时备件配置方案 X 的保障费用, 则求解模型的算法如下:

步骤 1 确定备件优化集 S

步骤 2 初始化备件配置方案

$$X(X_1, X_2, \dots, X_{|S|}) = (X_1^{\min}, X_2^{\min}, \dots, X_{|S|}^{\min})$$

步骤 3 do {For $i=1$ to $|S|$

$$\{ \Delta C_i = C_i(X_i + 1, X) - C_i(X_i, X);$$

$$\Delta EBO_i = 0;$$

$$\text{If}(s_i \in S_0)$$

$$\{ \text{For}(j=1 \text{ to } |ID(s_i)|)$$

$$\Delta EBO_j = \Delta EBO_j + IEBO_j(X_i, X); \}$$

$$\Delta EBO_i = \Delta EBO_i + IEBO_i(X_i, X);$$

$$ef_i = \Delta EBO_i / \Delta C_i;$$

}

```

If( $\Delta C_{min} \leq 0$ )
//  $\Delta C_{min} = \min(\Delta C_i), i=1, 2, \dots, |S|$ 
{ 返回  $\Delta C_{min}$  对应的部件编号  $l$ ;
 $X_l = X_l + 1$ ; }
Else
{ 返回  $ef_{max}$  对应的部件编号  $l$ ;
//  $ef_{max} = \max(ef_i), i=1, 2, \dots, |S|$ 
 $X_l = X_l + 1$ ; }
} while(( $\forall i=1, 2, \dots, |S|, EBO_i(X) \leq E_i$ )
! = true) ||  $\exists \Delta C_i \leq 0$ )

```

步骤 4 迭代结束, 备件配置方案 $X(X_1, X_2, \dots, X_{|S|})$ 即为所求的备件配置方案。

3 算例

某基地部署有 20 台设备, 其部件 S1、S2、S3 构成一个备件优化集, 关键部件 S1 失效相关于部件 S2、S3, 各部件参数如表 1 所示, 试确定合理的备件配置方案。

根据式(14)可以计算出 S1 的初始备件配置量为 4, 由于 S2、S3 均无备件期望短缺量约束, 故其初始备件配置量均为 0。记 X_1, X_2, X_3 分别表示 S1、S2、S3 的备件配置量, 则可以计算出最优的备件配置方案为 $X_1=4, X_2=2, X_3=2$, 其优化过程参数变化值如表 2 所示。执行备件配置方案 $X_1=4, X_2=2, X_3=2$ 时, S1 的备件期望短缺量为 0.009 件, 满足备件期望短缺量约束。

表 1 各部件基本参数

部件名称	部件类型	固有失效率/(次/h)	机用数/件	维修周期/h	单位库存费用/(元/h)	单次维修费用/元	第一类相关失效系数	第二类相关失效系数	备件期望短缺量约束/件
S1	可修复	0.000 04	4	360	1	500	0	0	0.2
S2	可修复	0.000 1	2	72	0.15	20	0	0.005	无
S3	可修复	0.000 1	1	72	0.18	20	0	0.006	无

表 2 备件配置方案优化部分参数值变化

循环次数	ΔC_1 /元	ef_1 /(件/元)	ΔC_2 /元	ef_2 /(件/元)	ΔC_3 /元	ef_3 /(件/元)	最优备件追加对象	$EBO_1(X)$ (本次循环结束)/件
1	0.325	2.075	-1.850	-0.682	-2.152	-0.672	S3	0.548
2	0.715	0.397	-1.091	-0.461	-0.073	-1.807	S2	0.045
3	0.967	0.021	0.028	0.722	0.035	0.674	S2	0.024
4	0.981	0.004	0.139	0.011	0.044	0.099	S3	0.009

如果不考虑部件相关失效, 仅依靠配置 S1 来确保满足备件期望短缺量约束, 即取 $X_2=0, X_3=0$, 此时 X_1 的取值不能低于 12 才能满足备件期望短缺量约束。图 1、图 2 分别给出了考虑相关失效与不考虑相关失效情况下 S1 的备件期望短缺量以及备件优化集保障费用与不同 X_1 取值的对应关系。

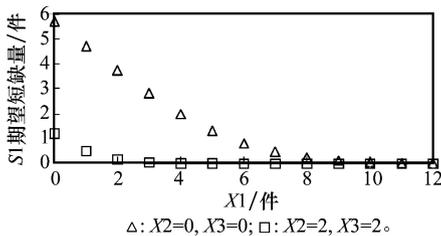


图 1 S1 备件期望短缺量与 X_1 取值对应关系

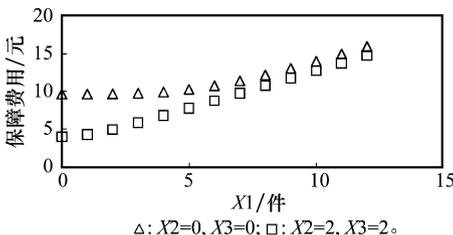


图 2 保障费用与 X_1 取值对应关系

S1 的固有失效率引起的不可避免的备件需求为 0.003 20 件/h。如果执行备件配置方案 $X_1=12, X_2=0, X_3=0$, 则 S1 的备件需求为 0.015 87 件/h; 如果执行备件配置方案 $X_1=4, X_2=2, X_3=2$, 则 S1 的备件需求为 0.003 45 件/h, 避免了相关失效引起的 S1 的备件需求 0.012 42 件/h, 基本上消除了相关失效的影响。执行备件配置方案 $X_1=4, X_2=2, X_3=2$ 需要的保障费用为 5.84 元/h, 而执行备件配置方案 $X_1=12, X_2=0, X_3=0$ 需要的保障费用为 15.99 元/h。考虑相关失效影响生成的备件配置方案节约了保障费用 10.15 元/h, 其通过对故障源部件 S2、S3 有效的备件保障, 抑制了相关失效的发生, 降低了 S1 的备件库存, 减少了 S1 的维修费用与库存费用。考虑相关失效的备件配置方案 $X_1=4, X_2=2, X_3=2$ 具有良好的备件保障效能与经济可行性。

4 结论

相关失效在各类系统中普遍存在, 对于存在部件相关失效的系统来说, 一个好的备件配置方案不仅要为系统部件失效后提供相应的更换备件, 同时还需要通过对故障源部件良好的备件保障而避免关键部件发生相关失效。良好的备件保障可能因为有效地避免相关失效而减少保障费用。本文提出了考虑部件相关失效的备件优化配置模型,

该模型可以较好地解决相关失效部件的备件优化配置问题,具有一定的理论与实用价值。

参考文献:

- [1] Hoyland A, Rausand M. *System reliability theory: models and statistical methods*[M]. New York: Wiley,1994.
- [2] 郭波,武小悦,张秀斌,等. 系统可靠性分析[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2004. (Guo B, Wu X Y, Zhang X B, et al. *Analysis of system reliability*[M]. Changsha: National University of Defense and Technology Press, 2004.)
- [3] Mosleh A. Dependent failure analysis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*,1991,34(3):243 - 248.
- [4] Humphreys P, Jenkins A M. Dependent failures developments[J]. *Reliability Engineering and System Safety*,1991,34(3):417 - 427.
- [5] 李翠玲. 系统相关失效概率模型及其不确定性分析[D]. 沈阳:东北大学,2005. (Li C L. System dependent failure probability model and uncertainty analysis[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.)
- [6] 谢里阳,李翠玲. 相关系统失效概率的次序统计量模型及共因失效原因分析[J]. *机械强度*,2005,27(1):66 - 77. (Xie L Y, Li C L. Order statistics model of dependent system failure probability and common cause failure analysis[J]. *Journal of Mechanical Strength*,2005,27(1):66 - 77.)
- [7] Sherbrooke C C. *Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques*[M]. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [8] Perlman Y, Mehrez A, Kaspi M. Setting expediting repair policy in a multi-echelon repairable item inventory system with limited repair capacity[J]. *Journal of the Operational Research Society*,2001,52(2):198 - 209.
- [9] Al-Rifai M H, Rossetti M D. An efficient heuristic optimization algorithm for a two-echelon (R, Q) inventory system[J]. *International Journal of Production Economics*,2007,109(1/2):195 - 213.
- [10] Wong H, van Houtum G J, Cattrysse D, et al. Multi-item spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints [J]. *European Journal of Operational Research*,2006,171(3):1071 - 1093.
- [11] Topan E, Bayindir Z P, Tan T. An exact solution procedure for multi-item two-echelon spare parts inventory control problem with batch ordering in the central warehouse[J]. *Operations Research Letters*,2010,38(5):454 - 461.
- [12] Caggiano K E, Jackson P L, Muckstadt J A, et al. Efficient computation of time-based customer service levels in a multi-item, multi-echelon supply chain: a practical approach for inventory optimization[J]. *European Journal of Operational Research*,2009,199(3):744 - 749.
- [13] de Smidt-Destombes K S, van der Heijden M C, van Harten A. On the availability of a k-out-of-N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy[J]. *Reliability Engineering and System Safety*,2004,83(3):287 - 300.
- [14] de Smidt-Destombes K S, van der Heijden M C, van Harten A. On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of-N system with wear-out[J]. *European Journal of Operational Research*,2006,174(1):182 - 200.
- [15] de Smidt-Destombes K S, van der Heijden M C, van Harten A. Joint optimisation of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for k-out-of-N systems[J]. *International Journal of Production Economics*,2009,118(1):260 - 268.
- [16] Sun Y, Ma L, Mathew J, et al. An analytical model for interactive failures[J]. *Reliability Engineering and System Safety*,2006,91(5):495 - 504.
- [17] Sun Y, Ma L, Mathew J. Failure analysis of engineering systems with preventive maintenance and failure interactions[J]. *Computers and Industrial Engineering*,2009,57(2):539 - 549.
- [18] 杨秉喜,李金国,张义芳,等. GJB4355(备件供应规划要求)实施指南[M]. 北京:总装备部技术基础管理中心,2006. (Yang B X, Li J G, Zhang Y F, et al. *GJB4355 (Implementation guidelines for spares supply planning requirements)*[M]. Beijing: Administration Center of General Armament Department for Technological Basis, 2006.)
- [19] 程海龙,康锐,韦艺,等. 备件满足率与备件短缺量对比分析[J]. *北京航空航天大学学报*,2008,24(5):580 - 583. (Cheng H L, Kang R, Wei Y, et al. Comparison analysis of fill rate and back-order [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2008,24(5):580 - 583.)