

基于非泊松分布的不可修备件优化配置模型

徐廷学¹,董琪²,杨继坤²,王浩伟²

1. 海军航空工程学院兵器科学与技术系,烟台 264001
2. 海军航空工程学院研究生管理大队,烟台 264001

摘要 针对已有备件配置模型的局限性,研究需求服从非泊松分布的不可修备件优化配置模型。通过分析两级库存系统不可修备件的保障特点,将需求服从泊松分布的假设放宽,建立需求服从非泊松分布的不可修备件满足率通用模型,在此基础上构建以备件配置费用最小为优化目标,以系统备件配置满足率为约束条件的两级库存系统不可修备件配置优化模型,并通过遗传算法给出最优配置方案。结合案例的优化及验证结果显示,该优化配置模型适用于正态分布等需求服从非泊松过程的备件配置问题,其配置方案在保证系统备件配置总费用最低的前提下,使备件满足率达到95.02%,与Opus 10软件的计算结果一致,表明优化配置模型的可行性和可靠性。

关键词 不可修备件;优化配置;非泊松分布;遗传算法

中图分类号 TB114.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.017

Optimal configuration model of non-repairable spare parts based on non-Poisson distribution

XU Tingxue¹, DONG Qi², YANG Jikun², WANG Haowei²

1. Department of Ordnance Science and Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China
2. Graduate Students' Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China

Abstract This paper studies the optimal configuration model of non-repairable spare parts whose demand obeys non-Poisson distribution to overcome the limitation of existing models. The characteristics of non-repairable spare parts in two-echelon inventory system were analyzed, and the assumption of the demand obeying Poisson distribution was relaxed, so that a universal model for the satisfaction rate of non-repairable spare parts whose demand obeys non-Poisson distribution was established. On the basis of that, an optimal configuration model for non-repairable spare parts in the two-echelon inventory system was established by setting minimum configuration cost as the optimization target and satisfaction rate as the constraint. The optimization scheme was solved by Genetic Algorithm. The optimization and verification results show that the satisfaction rate of the system reached 95.02% with minimum total cost, which is in accordance with results calculated by Opus 10, demonstrating the feasibility and reliability of the model.

Keywords non-repairable spare parts; optimal configuration; non-Poisson distribution; Genetic Algorithm

作为装备供应保障的重要领域之一,备件配置与备件库存优化随着装备训练不断向实战靠拢,以及战备完好性、可用性要求的不断提高,越来越受到重视。合理的备件库存配

置可提高备件供应保障的效率,同时降低配置总费用。备件按维修性可分为可修备件和不可修备件,不可修备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备件,反之

收稿日期:2014-05-07;修回日期:2014-09-23

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011FQ002)

作者简介:徐廷学,教授,研究方向为装备综合保障理论与技术,电子信箱:xtx-yt@163.com;董琪,博士研究生,研究方向为装备综合保障理论与技术,电子信箱:lance0627@163.com

引用格式:徐廷学,董琪,杨继坤,等.基于非泊松分布的不可修备件优化配置模型[J].科技导报,2015,33(1):95-99.

则为可修备件^[1]。目前,对库存配置与优化的研究主要是针对可修备件开展的,特别是针对关键件或昂贵件^[2-5],而对不可修件的研究相对较少,因为根据帕累托“80/20”法则,贵重件在仓库管理总费用中占有较大比重,贵重件的配置效果直接影响备件管理总费用^[4]。但就部队装备实际而言,装备的战备完好性、可用性与费用相比,应优先考虑前者^[5-8]。不可修备件的供应保障费用虽然在备件管理总费用中所占比例不大,但这类备件的库存短缺对装备正常使用的影响不可忽视,况且这类备件的种类规模较大^[9,10]。因此,研究不可修备件的配置建模具有重要意义。不可修备件配置建模中通常假设需求服从泊松过程,而不可修备件种类繁多,需求特点各异,因此这一假设存在一定的局限性。针对这一问题,本研究结合不可修备件的保障特点,研究一种需求服从非泊松分布的不可修备件优化配置模型。

1 问题描述与基本假设

1.1 问题描述

某型装备备件的保障体系为两级保障模式,即系统中共有 N 个基层级仓库和 1 个基地级仓库,提供 N 种不可修备件的供应保障。备件 j 的单位配置费用为 C_j , 装备备件保障期为 T , 定义 $SOH_{ij}(t)$ 为 t 时刻备件 j 在仓库 i 的库存量, $D_{ij}(t)$ 为 t 时刻备件 j 在仓库 i 的需求, $IN_{ij}(t)$ 为 t 时刻仓库 i 得到备件 j 补充的数量, L_{ij} 为仓库 i 关于备件 j 的采购提前期。当库存系统采用周期盘点方式,且库存控制策略为 (t_0, S) 时,库存系统的运作流程可描述为:当装备发生故障时,其所属基层级仓库发放相应的备件,由维修部门将故障件进行替换,原故障件报废;但如果其所属基层级仓库没有相应备件的库存,就发生 1 次备件短缺,待下一库存检查周期该基层级仓库从基地级仓库申领到备件后,基层级仓库的都会达到原有库存水平,并按照装备故障时间的先后顺序优先满足先发生故障装备的备件需求。库存系统运作过程中, SOH_{ij} 、 IN_{ij} 和 D_{ij} 的关系为

$$SOH_{ij}(t+1) = SOH_{ij}(t) + IN_{ij}(t - L_{ij}) - D_{ij}(t) \quad (1)$$

通过对不可修备件在两级库存系统中供应运作流程分析可知,高库存带来高满足率,但对备件保障效能,高库存并非产生高效费比^[11,12]。因此,本文将通过将两级库存系统不可修备件满足率作为约束条件,以备件配置费用最小为优化目标进行研究,确定不可修备件库存配置优化方案及策略。

1.2 基本假设

为简化和说明问题,结合部队装备备件保障实际,进行如下假设:

1) 装备系统有基地级站点和基层级站点两级供应保障机构,基地级站点编号为 0,基层级站点编号为 i ($i = 1, 2, \dots, N$);

2) 装备更换只包括现场可更换单元(LRU),其备件项目编号为 j ($j = 1, 2, \dots, J$),且均为不可修备件;

3) 基层级仓库以周期盘点周期订货为主,库存控制策略为 (t_0, S) ;

4) 各分仓库之间不存在横向备件调拨;

5) 周期需求分布为 D_i , ($i = 1, 2, \dots$),且各周期需求分布为独立同分布,均值为 μ ;

6) 各仓库的备件订购考虑订购提前期;

7) 各基层级仓库保障的武器系统工作强度相同;

8) 各基层级仓库备件申领时间忽略;

9) 不考虑管理、运输等因素造成的时间延误。

2 备件满足率模型构建

备件满足率是影响装备可用度和任务完成率的一项重要指标^[13],可将系统备件满足率定义为库存能够立刻满足需求的备件占总库存的比例均值^[14]。

在 (t_0, S) 库存控制策略下,定义 alb 为 a 整除 b (a 和 b 均为正整数),于是令保障期内 $tl_{t_0} = 0$ 表示 1 个检查周期,则 $0, t_0, 2t_0, \dots$ 为检查周期。若在 t 时刻,库存得到补充,但需求没有产生,此时库存水平为

$$S_{iN}(t) = SOH(t) + IN(t - L) \quad (2)$$

在此后到下次检查周期前,库存将不会再得到补充,库存量随着需求产生而不断下降,如果这段时间内,需求量大于可用库存量,则造成库存短缺,此时库存量为 0。根据上述分析,结合备件满足率定义,构建 (t_0, S) 库存控制策略下的备件满足率模型为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[\frac{\sum_{t=1}^T \min\{S_{iN}^+(t), D(t)\}}{\sum_{t=1}^T D(t)} \right] \quad (3)$$

式中, $S_{iN}^+(t) = \max\{S_{iN}, 0\}$ 。

2.1 一般需求分布下的备件满足率模型

针对两级库存系统下多种备件库存优化的特点,在模型(3)的基础上,建立仓库 i 关于备件 j 的满足率模型为

$$P_{ij} = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[\frac{\sum_{t=1}^T \min\{S_{iN_{ij}}^+(t), D_{ij}(t)\}}{\sum_{t=1}^T D_{ij}(t)} \right] \quad (4)$$

利用式(4)对备件满足率计算需要大量的统计数据,在实际操作过程难度较大,因此,需对该式进行变形。

首先,由更新过程理论可得

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[\frac{\sum_{t=1}^T \min\{S_{iN_{ij}}^+(t), D_{ij}(t)\}}{\sum_{t=1}^T D_{ij}(t)} \right] \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[\frac{\sum_{t=1}^T \min\{S_{iN_{ij}}^+(t), D_{ij}(t)\} / T}{\sum_{t=1}^T D_{ij}(t) / T} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{t_0 \mu_{ij}} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E \left[\sum_{j=1}^T \min \{ S_{IN_j}^+(t), D_{ij}(t) \} \right]}{T/t_0} \\
 &= \frac{1}{t_0 \mu_{ij}} \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \sum_{k=0}^{t_0-1} \left[\sum_{t \in \{(t-L)R=k\}} \min \{ S_{IN_j}^+(t), D_{ij}(t) \} \right] / (T/t_0) \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中, μ 为需求均值, 且当 $t \geq L_{ij}$ 时, 有 $(t-L_{ij})|t_0 = 0, 1, 2, \dots, t_0$ 。

其次, 由 (t_0, S) 库存控制策略可知, 库存补充量由周期内需求和库存水平决定, 即

$$S_{IN_j}(t) = S_{ij} - \sum_{k=1}^{L_{ij} + \lceil (t-L_{ij})R \rceil} D_{ij}(t-k) \quad (6)$$

于是, 综合式(5)和式(6)得

$$\begin{aligned}
 P_{ij} &= \frac{1}{t_0 \mu_{ij}} \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \sum_{k=1}^{t_0-1} \left[\sum_{t \in \{(t-L)R=k\}} \min \{ S_{IN_j}^+(t), D_{ij}(t) \} \right] / (T/t_0) \right\} \\
 &= \frac{1}{t_0 \mu_{ij}} E \left[\sum_{k=1}^{t_0-1} \min \left\{ \left(S_{ij} - \sum_{m=1}^{L_{ij}+k} D_{ij}(m) \right)^+, D_{ij}(L_{ij}+k+1) \right\} \right] \\
 &= \frac{1}{t_0 \mu_{ij}} \sum_{k=0}^{t_0-1} \left\{ \mu_{ij} - E \left[\left[D_{ij}(L_{ij}+k+1) - \left(S_{ij} - \sum_{m=1}^{L_{ij}+k} D_{ij}(m) \right)^+ \right] \right] \right\} \\
 &= 1 - \frac{1}{t_0 \mu_{ij}} \sum_{k=0}^{t_0-1} \left\{ E \left[\left[D_{ij}(L_{ij}+k+1) - \left(S_{ij} - \sum_{m=1}^{L_{ij}+k} D_{ij}(m) \right)^+ \right] \right] \right\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

最后, 令 $K(S) = \mu_{ij} [1 - P_{ij}(S)]$, 则有

$$\begin{aligned}
 K(S_{ij}) &= \frac{1}{t_0} \sum_{k=0}^{t_0-1} \left\{ \int_0^{S_{ij}} (a+b-S_{ij}) dF^{(L_{ij}+k)}(b) dF(a) + \int_{S_{ij}}^{\infty} a dF^{(L_{ij}+k)}(b) dF(a) \right\} \\
 &= \frac{1}{t_0} \sum_{k=0}^{t_0-1} \left\{ \mu_{ij} \left[1 - F^{(L_{ij}+k)}(S_{ij}) \right] + \int_0^{S_{ij}} (a+b-S_{ij}) dF^{(L_{ij}+k)}(b) dF(a) \right\} \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中, $F^{(L_{ij}+k)}(\cdot)$ 为需求分布 $\sum_{j=1}^{L_{ij}+k} D_j$ 的分布函数。

又根据 Leibnitz 公式^[15]得

$$K(S_{ij}) = \frac{1}{t_0} \left[F^{(L_{ij}+k)}(S_{ij}) - F^{L_{ij}}(S_{ij}) \right] \quad (9)$$

由于 $P_{ij}(0) = 0$, $K(0) = \mu_{ij} [1 - P_{ij}(0)]$, 因此得到一般需求分布下仓库 i 关于备件 j 的备件满足率模型, 即

$$\begin{aligned}
 P_{ij}(S_{ij}) &= 1 - \left[K(0) + \int_0^{S_{ij}} K'(a) da \right] / \mu_{ij} \\
 &= \frac{1}{\mu_{ij} t_0} \int_0^{S_{ij}} \left[F^{L_{ij}}(b) - F^{(L_{ij}+t_0)}(b) \right] db \quad (10)
 \end{aligned}$$

由式(10)可知, 备件满足率模型由库存水平 S_{ij} 、需求分布 $F(\cdot)$ 、库存检查周期 t_0 和提前期 L_{ij} 共同决定。

2.2 正态分布下的备件满足率模型

若需求分布服从独立、同分布的正态分布, 且标准正态分布的分布函数和密度函数分别用 $\Phi(\cdot)$ 和 $\phi(\cdot)$ 表示, 并令 $b(a, r) = (a - r\mu) / (\sigma\sqrt{r})$, 则有 $F^r(a) = \Phi[b(a, r)]$, 其中 $r \in I^+$ 。于是, 由式(10)可得

$$\begin{aligned}
 P_{ij}(S_{ij}) &= \frac{1}{\mu_{ij} t_0} \int_0^{S_{ij}} \left\{ \Phi[b(a, L_{ij})] - \Phi[b(a, L_{ij} + t_0)] \right\} db \\
 &= \frac{1}{\mu_{ij} t_0} \left[\sigma \sqrt{L_{ij}} \int_{b(0, L_{ij})}^{b(S_{ij}, L_{ij})} \Phi(x) dx - \sigma \sqrt{L_{ij} + t_0} \int_{b(0, L_{ij} + t_0)}^{b(S_{ij}, L_{ij} + t_0)} \Phi(x) dx \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

由于^[16]

$$\begin{aligned}
 \int_{b(0, L_{ij})}^{b(S_{ij}, L_{ij})} \Phi(x) dx &= \Phi(b(S_{ij}, L_{ij})) - \Phi(b(0, L_{ij})) \\
 &+ b(S_{ij}, L_{ij}) \Phi(b(S_{ij}, L_{ij})) - b(0, L_{ij}) \Phi(b(0, L_{ij}))
 \end{aligned}$$

基于正态分布需求的备件满足率表达式为

$$\begin{aligned}
 P_{ij}(S_{ij}) &= \frac{1}{\mu_{ij} t_0} \left\{ \sigma \sqrt{L_{ij}} \left[\Phi[b(S_{ij}, L_{ij})] - \Phi[b(0, L_{ij})] \right] \right. \\
 &- \sigma \sqrt{L_{ij} + t_0} \left[\Phi[b(S_{ij}, L_{ij} + t_0)] - \Phi[b(0, L_{ij} + t_0)] \right] \\
 &+ (S_{ij} - \mu_{ij} L_{ij}) \left\{ \Phi[b(S_{ij}, L_{ij})] - \Phi[b(S_{ij}, L_{ij} + t_0)] \right\} \\
 &+ \mu_{ij} t_0 \Phi[b(S_{ij}, L_{ij} + t_0)] + \mu_{ij} L_{ij} \Phi[b(0, L_{ij})] \\
 &\left. - (L_{ij} + t_0) \mu_{ij} \Phi[b(0, L_{ij} + t_0)] \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

2.3 系统备件满足率模型

根据有关文献结论^[14], 结合研究对象具体情况, 得到系统备件满足率公式为

$$P = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^N \frac{\mu_{ij}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^N \mu_{ij}} P_{ij}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^N \mu_{ij}} \quad (13)$$

式中, P 为两级库存系统备件满足率; P_{ij} 为仓库 i 关于备件 j 的备件满足率; μ_{ij} 为仓库 i 关于备件 j 的备件需求分布均值 ($i = 0, 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, J$)。

3 备件优化配置模型及求解

3.1 优化配置模型构建

根据式(13)建立库存系统备件满足率计算模型, 进而构建基于备件满足率的两级库存系统备件优化配置模型为

$$\min C = \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J S_{ij} C_{ij} \quad (14)$$

$$\text{st} \begin{cases} P \geq P_0 \\ P_{ij}(S_{ij}) \geq P_{0j} \\ t_0 > L_{ij} > 0 \\ L_{ij} + t_0 = n_j \quad (n_j > 0) \end{cases} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, J) \quad (15)$$

式中, C 为库存系统备件配置费用; S_{ij} 为仓库 i 中备件 j 的库存配置数量; $P_{ij}(S_{ij})$ 为仓库 i 中备件 j 的备件满足率; P_0 为备件 j 规定的备件满足率下限; P_{0j} 为系统备件满足率下限; L_{ij} 为仓库 i 中备件 j 的订购提前期; t_0 为库存检查周期; $L_{ij} + t_0 = n_j$ 表示备件 j 保障周期为常数 n_j ($n_j > 0$)。

3.2 优化配置模型求解

基于泊松过程的备件优化模型求解方法常采用边际优化算法、启发式算法等。边际优化算法需要分析模型的凹凸性以确定模型函数存在最优解。由于基于泊松过程的备件优化模型表达式相对简单, 而基于非泊松过程的备件优化模型表达式相对复杂, 难以通过解析的方法求得最优解, 加之不可修备件的种类规模巨大, 增加了解析计算的难度和时

间。相比之下,遗传算法以生物进化为原型,具有很好的收敛性,且计算时间少,鲁棒性高,特别适合于求解离散问题。因此,采用遗传算法对优化模型进行求解,步骤如下:

1) 编码。由于求解的目标函数中有 $(N+1)J$ 个变量参数,因此算法采用多参数级联编码。其中,各参数都以二进制进行编码^[7]。另外,利用搜索空间限定法结合模型约束条件,确定各参数的取值范围,以限制搜索空间,使得搜索空间中表示个体的点与解空间中的可行解形成一一对应关系。

2) 构造适应度函数。把优化模型的目标函数作为适应度函数,因目标函数是求最小值,将适应度函数构造为

$$f = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^J S_{ij} C_{ij}} \quad (16)$$

3) 选择算子。群体中所有个体按一定概率 p_m 选出下一步需要交换的个体,其概率通过每个个体与所有个体的相对适应度计算,并利用轮盘赌方法确定个体被选中的次数。

4) 交叉算子。将被选中的个体随机配对,采用随机数方法确定交叉点,由设定的交叉概率 p_c ,在其交叉点处相互交换 2 个个体的部分染色体,产生 2 个新的个体。

5) 变异算子。由设定的概率,利用随机数抽样选择个体变异位置来替换原基因值,产生新的个体以及新的种群。

6) 设置终止条件。将进化代数设为终止条件,根据终止条件约束算法的迭代时间和迭代次数。

设计的遗传算法求解流程如图 1 所示。

4 实例分析

某两级库存系统由 1 个基地级仓库(B_0)对应保障 3 个基

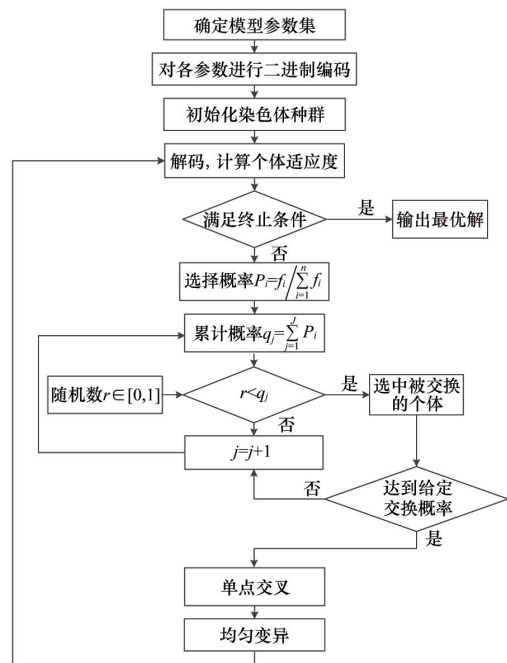


图 1 遗传算法求解流程

Fig. 1 Flow chart of Genetic Algorithm

层级仓库(B_1, B_2, B_3),待配置的备件为 3 种类型的不可修备件(LRU_1, LRU_2, LRU_3),这 3 类备件产生的需求均服从独立、同分布的正态分布(μ 为均值, σ 为标准差),各仓库的备件保障周期 $T=180$ d,备件相关参数如表 1 所示。应用所建模型对库存系统各仓库的备件库存进行优化配置,库存系统的备件满足率指标要求不低于 95%,即 $P \geq 0.95$ 。

表 1 备件相关参数

Table 1 Parameters of spare parts

备件类型	需求分布参数 (μ, σ)				订购提前期 L/d	库存检查 周期 t_0/d	配置费用 $C/元$	备件满足 率约束 P_0
	B_1	B_2	B_3	B_0				
LRU_1	(1300,22)	(1600,16)	(2400,36)	(5300,45)	4	180	50	0.90
LRU_2	(1800,50)	(2600,62)	(2520,50)	(6920,94)	9	180	150	0.95
LRU_3	(3350,60)	(1930,40)	(2850,20)	(8130,75)	9	180	200	0.95

结合表 1 实例数据,利用 Matlab 软件设计遗传算法程序,对优化配置模型进行求解,得到两级库存系统的优化配置方案如表 2 所示。在该方案下,整个库存系统的备件配置满足率达到 95.02%,备件配置费用为 582.52 万元,且各级仓库的 3 种类型备件配置的满足率均达到指标要求。

两级库存系统备件配置费用与备件满足率关系如图 2 所示。可以看出,随着配置费用的增加,系统备件满足率逐渐增加,但增幅逐渐减小,各仓库的备件满足率变化规律与系统备件满足率类似。因此,单纯地增加各仓库配置费用,虽然可以提高备件满足率,但不能有效地实现最优效费比,只有对各仓库备件进行合理配置,才能使系统备件保障实现最优效费比。

将表 2 所列优化配置方案数据代入 Opus 10 软件进行验算,结果显示,按照该优化配置方案可使系统备件满足率达到 95% 以上,与优化配置模型计算结果一致,证明了优化配置模型的可行性和可靠性(图 2)。

表 2 优化配置方案

Table 2 Optimal configuration scheme of spare parts

仓库代号	LRU_1	LRU_2	LRU_3	配置费用/万元
B_1	1261	1801	3350	100.320
B_2	1552	2601	1931	85.395
B_3	2328	2520	2850	106.700
B_0	5141	6920	8130	292.105
总计	—	—	—	582.520

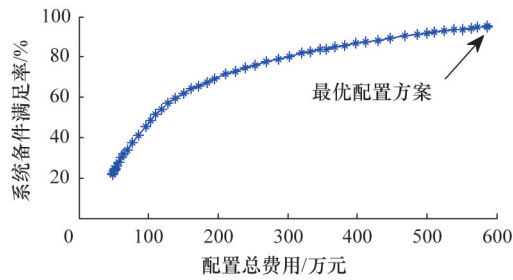


图2 系统备件满足率与配置费用的关系

Fig. 2 Relationship between the satisfaction rate of spare parts and configuration cost in the inventory system

通过调整其他参数对优化配置模型进行多次仿真,结果显示,对于给定的库存水平,降低 L_{ij} 并保持 t_0 不变,可提高系统备件的满足率,且 L_{ij} 降低可使库存系统得到更快的补充,从而可降低备件短缺的概率。同理,如果在 $L_{ij} + t_0$ 固定不变的情况下,降低 L_{ij} 也可提高系统备件满足率。

5 结论

以装备备件供应保障中不可修备件的配置优化为研究目标,以1个基地级仓库和多个基层级仓库组成的联合库存系统为研究对象,选取备件满足率为系统备件保障效能参数,建立了多级多种备件在需求服从任意分布下的备件满足率通用模型,在此基础上给出了系统备件满足率模型,并以此为约束条件,以库存系统配置费用为目标函数,构建了备件配置优化模型。通过设计遗传算法程序并结合案例对优化配置模型进行求解,得到两级库存系统不可修备件的优化配置方案。案例分析与验证表明,本研究模型用于解决正态分布等服从非泊松需求分布的备件配置优化问题是可行且可靠的。后续课题将在本优化模型的基础上,研究多种需求分布融合的库存优化配置。

参考文献 (References)

[1] 周伟,郭波,张涛. 两级供应关系装备常用备件初始配置模型[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 89-93.
Zhou Wei, Guo Bo, Zhang Tao. Initial configuration model for common equipment parts based on two-class supply relationship[J]. System Engineering and Electronics, 2011, 33(1): 89-93.

[2] 周伟,刘亚杰,郭波,等. 基于两级供应关系的武器装备贵重件初始配置模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1056-1061.
Zhou Wei, Liu Yajie, Guo Bo, et al. Initial configuration model about the valuable parts of weapon system based on two-class supply relationship[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(6): 1056-1061.

[3] 付兴方,李继军,李宗植. 基于两级供应关系的可修复航材存储策略模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(4): 111-115.
Fu Xingfang, Li Jijun, Li Zongzhi. A stock strategy model for restorable air material based on two-level providing condition[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(4): 111-115.

[4] 任敏,陈全庆,沈震. 备件供应学[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2013.
Ren Min, Chen Quanqing, Shen Zhen. The theory of spare parts supplies[M]. Changsha: National Defense Industry Press, 2013.

[5] 王乃超,康锐. 基于备件保障概率的多级库存优化模型[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1043-1047.
Wang Naichao, Kang Rui. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with fill rate as objective[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1043-1047.

[6] 陶小创,郭霖瀚,肖波平,等. 基于备件保障概率分配的备件需求量预测模型[J]. 兵工学报, 2012, 33(8): 975-979.
Tao Xiaochuang, Guo Linhan, Xiao Boping, et al. Demand prediction model for spare parts based on fill rate allocation[J]. Acta Armamentar, 2012, 33(8): 975-979.

[7] Lee L H, Chew E P, Teng S, et al. Multi-objective simulation-based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 112(2): 885-894.

[8] 程海龙,康锐,龙军,等. 基于边际效应的备件保障概率库存优化模型[J]. 兵工自动化, 2008, 27(11): 37-40.
Cheng Hailong, Kang Rui, Long Jun, et al. Optimization model on support probability of spare part inventory based on margin utility[J]. Ordnance Industry Automation, 2008, 27(11): 37-40.

[9] 丁定浩. 可修备件保障概率的适用模型[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(2): 1-4.
Ding Dinghao. The support probability model for repairable spare parts [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31 (2): 1-4.

[10] Wong H, Cattrysse D, Oudheusden D V. Stocking decision for repairable spares pooling in a multi-hub system[J]. International Journal of Production Economics, 2005 (93): 309-317.

[11] 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, 34(5): 580-583.
Cheng Hailong, Kang Rui, Wei Yi, et al. Comparison analysis of fill rate and backorder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 580-583.

[12] Christopher M A. Inventory optimization techniques, system vs item level inventory analysis[M]. Waltham: Raytheon Company, 2004.

[13] Sherbrooke C C. Optimal inventory modeling of systems: Multi-echelon techniques[M]. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.

[14] 赵建忠,李海军,叶文,等. 改进系统备件满足率约束下的备件优化配置建模[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1187-1192.
Zhao Jianzhong, Li Haijun, Ye Wen, et al. Optimization configuration modeling of spare parts under constraint of improved system spare part fill rate[J]. Acta Armamentar, 2013, 34(9): 1187-1192.

[15] Sobel M. J. Fill rate of single-stage and multi-stage supply systems [J]. Manufacturing & Service Operations Management 2004, 6(1): 41-52.

[16] Zhang Jiang, Zhang Jun. Fill rate of single-stage general periodic review inventory systems[J]. Operations Research Letters, 2007, 35(3): 503-509.

[17] 常文兵,李宗辉. 基于遗传算法的航空备件费用优化研究[J]. 飞机设计, 2007, 27(1): 65-68.
Chang Wenbing, Li Zonghui. Research on genetic algorithm based aircraft spare parts cost optimization[J]. Aircraft Design, 2007, 27(1): 65-68.

(责任编辑 韩晓明)