

3-25-2020

Model of Initial Spare Parts Configuration and Ordering Policy Optimization Based on Inventory State

Songshi Shao

1. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

Minzhi Ruan

1. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

Zhihua Zhang

1. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Model of Initial Spare Parts Configuration and Ordering Policy Optimization Based on Inventory State

Abstract

Abstract: Rational planning of spare parts configuration project is an effective approach to improve the equipment availability and reduce the life cycle cost (LCC). First of all, the spare parts demand rate forecast model is constructed. According to the systemic analysis method, the spare parts support effectiveness evaluation targets system is built, and then, the initial spare parts configuration optimization method is researched. Aim to the consumption for partial repairable spare parts, the expected backorders function of the approximate Laplace demand distribution is given. Combining the $(s-1, s)$ and (R, Q) inventory policy, the ordering model is established under the batch ordering policy based on inventory state. In a given example, the spares optimization under the constraint targets of support effectiveness is calculated, and its result is consistent with the practice regulation. The model's correctness, method's validity and the optimization project's rationality are proved.

Keywords

inventory state, initial configuration, ordering optimization, support effectiveness evaluation, spares

Recommended Citation

Shao Songshi, Ruan Minzhi, Zhang Zhihua. Model of Initial Spare Parts Configuration and Ordering Policy Optimization Based on Inventory State[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 509-517.

基于库存状态的备件初始配置及采购优化模型

邵松世*, 阮旻智, 张志华

(海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 合理规划备件配置方案是提高装备可用度和降低全寿命费用的有效途径。建立备件需求率预测模型, 采用系统分析法构建备件保障效能评估指标体系, 研究初始备件配置优化方法。针对不完全修复件的报废消耗问题, 给出了近似拉普拉斯需求分布下的备件短缺函数, 将 $(s-1, s)$ 和 (R, Q) 库存策略相结合, 基于库存状态批量采购模式建立了不完全修复件的订购模型。通过案例应用, 给出了保障效能约束下的优化结果, 优化结果符合实际规律, 验证了模型的正确性、方法的有效性以及方案的合理性。

关键词: 库存状态; 初始配置; 采购优化; 保障效能评估; 备件

中图分类号: V215.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 03-0509-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0266

Model of Initial Spare Parts Configuration and Ordering Policy Optimization Based on Inventory State

Shao Songshi*, Ruan Minzhi, Zhang Zhihua

(1. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Rational planning of spare parts configuration project is an effective approach to improve the equipment availability and reduce the life cycle cost (LCC). First of all, the spare parts demand rate forecast model is constructed. According to the systemic analysis method, the spare parts support effectiveness evaluation targets system is built, and then, the initial spare parts configuration optimization method is researched. Aim to the consumption for partial repairable spare parts, the expected backorders function of the approximate Laplace demand distribution is given. Combining the $(s-1, s)$ and (R, Q) inventory policy, the ordering model is established under the batch ordering policy based on inventory state. In a given example, the spares optimization under the constraint targets of support effectiveness is calculated, and its result is consistent with the practice regulation. The model's correctness, method's validity and the optimization project's rationality are proved.

Keywords: inventory state; initial configuration; ordering optimization; support effectiveness evaluation; spares

引言

备件是装备计划修理和临抢修的保障物资, 是



收稿日期: 2018-05-17 修回日期: 2018-09-02;
基金项目: 国防预研基金(51304302, 51304303);
作者简介: 邵松世(通讯作者 1979-), 男, 山东即墨, 博士生, 讲师, 研究方向为武器系统与运用工程; 阮旻智(1983-), 男, 湖北武汉, 博士生, 讲师, 研究方向为武器系统与运用工程。

实施装备技术保障的物质基础^[1], 不仅直接影响装备的战备完好性, 还对装备全寿命费用有重要影响。对于集成度高、技术密集的新研装备, 其组成结构复杂、所涉及的备品备件类型和数量规模大, 备件储备布局结构多样化。当前, 军方主要依靠“过度采购和储备”来满足备件保障需求, 一方面, 不需要的备件大量积压, 在存储过程中损坏、失效,

造成大量浪费;另一方面,需要的备件却严重短缺,影响了保障效能。

自 20 世纪 60 年代以来,国内外针对备件优化问题开展了大量的研究,在理论上已取得了相当的进展,在各军兵种的装备采办及保障性分析中得到了广泛应用。在利用建模的方法优化备件配置方案之前,需要确定合理的库存策略^[2]。目前,针对故障率高、消耗量低、价格昂贵的可修备件,一般采用 $(s-1, s)$ 库存策略,是 METRIC 模型的基本假设前提,在该策略下, Cesaro 等^[3]研究了多级保障模式航空备件配置优化问题;阮旻智等^[4]在基于装备体系保障度下,研究并建立了可修复备件的 3 级库存优化模型,给出了有限维修渠道约束下的多级维修供应系统库存控制策略。对于故障率低、消耗高的不可修备件,一般采用 (R, Q) 库存策略,即根据备件库存状态来确定订货点 R ,以及经济订货量 Q 。Gumus 等^[5]研究了随机需求和模糊供应链环境下,消耗件的多级库存管理体系框架;Darwish 等^[6]研究了一个中心仓库和若干销售点构成的两级库存系统的经济订货策略;Tiacci 等^[7]研究了横向交叉转运模式下消耗件的最优库存策略;毛德军等^[8]研究了以可用度为中心的装备消耗件最优配置方法。

对于可修件,假设在每次故障后,都可在维修条件较强的顶层修理站点内进行修复,并且故障修复如新,没有考虑备件的使用寿命和报废消耗等问题。此外,按照计划采购方式对备件进行补充,会使备件方案的鲁棒性较差^[8],不能适应故障消耗的随机性。本文针对装备不完全修复情况,考虑到修复后性能下降以及报废消耗等因素,将 $(s-1, s)$ 库存策略和 (R, Q) 库存策略有机结合,在基于备件库存状态下,研究并建立初始备件配置及后续备件采购优化模型。

1 备件保障过程描述

备件按照在系统中的结构层次,划分为现场可更换单元(Line replaceable unit, LRU)和车间可更换单元(Shop replaceable unit, SRU)。使用现场(基

层级)的装备发生故障,采用换件的方式对装备进行修复。故障单元 LRU 的检测、送修、订购补充过程如图 1 所示:优先使用现场库存的 LRU 备件,有库存则用该备件替换故障件;若现场库存中没有 LRU 备件,记一次 LRU 短缺。受维修条件限制,故障单元 LRU 在基层级只有一定的修复概率;对于基层级不能维修的,将其送往中继级,同时向中继级仓库领取该 LRU 备件。同理,中继级对故障单元 LRU 也具有一定的修复能力,其备件的维修供应流程与基层级相似。

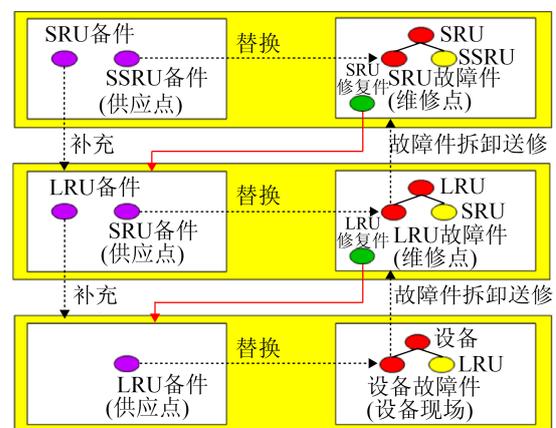


图 1 备件维修供应过程

Fig. 1 Process of spares maintenance and supply

由装备故障树结构可知,LRU 故障是由其所属的 SRU 故障产生,更换故障 SRU,完成 LRU 的修理,若缺少 SRU 备件,则发生 SRU 短缺而造成 LRU 维修时间的延误。故障单元 SRU 在各级保障站点具有一定的修复概率,当完成 LRU 的送修和补给,一次备件短缺就得以解决。

作为保障体系内部的顶层站点,基地级一般具有很强的修复能力,能够承担任何故障设备的修理工作。但在实际中,绝大多数可修复件都具有一定的使用寿命,并且其性能也会随着故障维修次数的增加而下降,因此,故障单元在基地级存在一定的报废率。随着备件的报废消耗,基地级需要根据当前的备件库存状态,向外部供货方进行采购。由于某些专用件、进口件和临时生产加工件的供货周期长,同时考虑到订货费和运输费,因此,向外部需采用批量订购策略。

2 备件需求率预测

2.1 备件需求率影响因素分析

在装备的使用现场, 采用换件维修方式, 此时, 备件需求率等同于备件维修更换率, 是备件配置规划优化的重要输入条件。影响备件需求率主要因素为: 装备可靠性水平、装备任务强度、维修条件、维修能力、系统组成结构、装备部署情况以及保障组织结构。表 1 给出了备件需求率的影响因素及其对应的模型参数。

表 1 备件需求率的影响因素及其对应的模型参数
Tab. 1 Influencing factors for spare parts' demand rate and its corresponding model parameters

| 影响因素 | 对应的模型参数 |
|---------|---|
| 装备可靠性水平 | 平均故障间隔时间 $MTBF_j$ |
| 维修保障条件 | 故障件的原位维修率 RIP_j |
| | 故障件重测完好率 $RtOK_j$ 故障件修复概率 $1-NRTS_{mj}$ |
| 装备任务强度 | 装备的每周平均工作时间 HW_m 装备部件的占空比 DC_j |
| 系统组成结构 | 备件在系统中的结构层级 $Inden(i)$ 部件的单机安装数/实力数 Z_j |
| 装备部署情况 | 装备在使用站点的配置数量 N_m |
| 保障组织结构 | 保障体系内的保障等级 N |
| | 保障体系内的站点数量 M 保障结构关系 $Unit(m)$ 、 $Echelon(n)$ |

2.2 备件需求率计算模型

设 $m=1, 2, \dots, M$ 为保障站点编号, $j=1, 2, \dots, J$ 为备件项目编号。由装备维修供应流程, 备件 j 在站点 m 的备件需求率 λ_{mj} 包括: 一是站点 m 所保障的下一级别站点 $l(l \in Unit(m))$ 无法对故障件 j 进行修复的项数之和; 二是站点 m 对故障件 j 的母体 $l(l \in Aub(j))$ 进行维修时, 对备件 j 的需求次数。备件需求率的计算式为^[9]:

$$\lambda_{mj} = \sum_{l \in Unit(m)} \lambda_{lj} \cdot NRTS_{lj} + \sum_{l \in Aub(j)} \lambda_{ml} (1 - NRTS_{ml}) q_{mlj} \quad (1)$$

式中: $NRTS_{mj}$ 为站点 m 无法对故障件 j 进行修复的比例; q_{mlk} 为故障隔离率。

装备使用现场的 LRU 年均需求率 λ_{mj} 可根据装备配置量、系统结构以及维修条件确定^[10]:

$$\lambda_{mj} = \frac{365 \cdot DC_j (1 - RIP_j) \cdot HW_m \cdot Z_j \cdot N_m}{7 \cdot MTBF_j (1 - RtOK_j)} \quad (2)$$

$m \in Echelon(N), j \in Inden(1)$

式中: DC_j 为占空比; RIP_j 为原位维修率; HW_m 为装备平均周工作时间(小时); Z_j 为单机安装数; N_m 为装备配置量; $MTBF_j$ 为部件 j 的平均故障间隔时间; $RtOK_j$ 为重测完好率; q_{mjk} 为故障隔离率; $Echelon(N)$ 表示装备使用现场; $Inden(1)$ 表示装备中第一层级组件 LRU。

3 初始备件配置模型

初始备件指在装备形成战斗力的初始保障时间内, 装备使用与维修所需的备件。根据备件供应规划要求, 采购装备时, 军方需要与承制方协商确定备件的种类和数量, 由承制方在装备列装时同步交付部队, 即初始备件配置问题。

3.1 初始备件方案保障效能评估指标

保障效能评估指标, 是衡量备件方案优劣程度的标准。效能指标主要包括装备可用度、备件短缺数、备件满足率、供应延误时间等。备件短缺数表示某一时刻备件发生缺货的数量, 记为 $B(X/s)$, X 表示待收备件数, s 表示备件库存量, 则:

$$B(X|s) = \begin{cases} (X-s), & X > s \\ 0, & X \leq s \end{cases} \quad (3)$$

期望短缺数表示任一时刻备件发生缺货的平均数量, 也称备件期望后订货数, 记为 EBO :

$$EBO = p(X=s+1) + \dots + k \cdot p(X=s+k) = \sum_{X=s+1}^{\infty} (X-s)p(X=x) \quad (4)$$

令站点 m 的第 j 项备件期望短缺数为 EBO_{mj} , 短缺数方差为 VBO_{mj} , 则:

$$EBO_{mj} = \sum_{X_{mj}=s_{mj}+1}^{\infty} (X_{mj} - s_{mj}) \cdot p(X_{mj}) \quad (5)$$

式中: s_{mj} 为站点 m 的备件库存量; $P(X_{mj})$ 为待收备件量的概率分布。当备件的维修供应周转量差均

比, 即 $Var[X_{mj}]/E[X_{mj}]=1$ 时, $p(X_{mj})$ 用泊松概率计算; 当差均比大于 1 时, 用负二项分布计算。当差均比小于 1 时, 用二项分布计算。

装备使用可用度是与装备能工作时间、不能工作时间相关的一种可用性参数。针对不同的角度, 可分为使用可用度(A_o)、供应可用度(A_s)和装备固有可用度(A_i)。对于单装设备, 表示在观测时间内装备可工作时间所占的比例; 对于集群装备, 表示处于完好状态的装备数量占总数量的比例。

$$A_o = MTBF/(MTBF + MTTR + MLDT) \times 100\% \quad (6)$$

$$A_s = MTBF/(MTBF + MLDT) \times 100\% \quad (7)$$

$$A_i = MTBF/(MTBF + MTTR) \times 100\% \quad (8)$$

式中: $MTBF$ 为平均故障间隔时间; $MTTR$ 为平均维修间隔时间; $MLDT$ 为平均保障延误时间。使用可用度 A_o 具有可分离性, 可进一步分解为 A_m 和 A_i 的表达形式, 即:

$$A_o = \frac{A_s A_i}{A_s + A_i - A_s A_i} \times 100\% \quad (9)$$

在换件维修策略下, 装备供应可用度取决于更换单元 LRU 短缺量的大小, 对于串联结构系统, 任何一个 LRU 出现短缺都会造成系统停机, 则使用现场站点 m 的装备供应可用度为:

$$A_s(m) = \prod_{j \in \text{Inden}(1)} \{1 - EBO_{mj} / (N_m Z_j)\}^{Z_j} \quad (10)$$

备件满足率指在规定的时间内, 需要备件时不缺备件的概率, 该指标是与备件库存相关的效能参数, 则单项备件的满足率可表示为:

$$EFR_{mj} = p(X_{mj} \leq s_{mj} - 1) = \sum_{X_{mj}=0}^{s_{mj}-1} p(X_{mj}) \quad (11)$$

系统级的备件满足率 EFR_m 为:

$$EFR_m = \sum_{j \in \text{Inden}(1)} \lambda_{mj} EFR_{mj} / \sum_{j \in \text{Inden}(1)} \lambda_{mj} \quad (12)$$

备件供应延误时间, 指因未获得备件而造成装备维修延误的时间。单项备件供应延误时间度量方法为: 在规定的时间内备件期望短缺数与平均需求率之比。系统级的保障延误时间 Td_m 可由各项备件的供应延误时间加权得出, 即:

$$Td_m = \sum_{j \in \text{Inden}(1)} EBO_{mj} / \sum_{j \in \text{Inden}(1)} \lambda_{mj} \quad (13)$$

3.2 备件维修供应周转量确定

备件维修供应周转量, 主要由 3 部分构成: 一是备件的补给周转量; 二是备件的维修周转量, 三是备件的维修延误数量。根据文献[10]的结论, 可以得到备件维修供应周转量的均值为:

$$E[X_{mj}] = \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) T_{mj} + \lambda_{mj} NRTS_{mj} O_{mj} + f_{mj} EBO_{SUP(m),j} + \sum_{k \in \text{Sub}(j)} h_{mjk} \cdot EBO_{mk} \quad (14)$$

式中: T_{mj} 为故障件 j 的平均修复时间; O_{mj} 为备件的补给运送时间; f_{mj} 为影响站点 m 的备件短缺数比例; h_{mjk} 为维修故障件 j 而产生对分组件 k 的需求比例; $SUP(m)$ 表示站点 m 的上级保障站点; $Sub(j)$ 表示 j 的分组件集合。EBO 表示备件期望短缺数; 根据式(14), 可以得到备件的维修供应周转量方差为:

$$Var[X_{mj}] = \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) T_{mj} + \lambda_{mj} NRTS_{mj} O_{mj} + f_{mj} (1 - f_{mj}) EBO_{SUP(m),j} + f_{mj}^2 VBO_{SUP(m),j} + \sum_{k \in \text{Sub}(j)} h_{mjk}^2 VBO_{mk} + \sum_{k \in \text{Sub}(j)} h_{mjk} (1 - h_{mjk}) EBO_{mk} \quad (15)$$

3.3 初始备件的配置优化方法

初始备件配置方案的优化原则为: 在保证所规定的系统效能指标前提下, 使整个保障体系内的备件采购费用最低, 即:

$$\begin{cases} \min \sum_j \sum_m C_j s_{mj} \\ \text{s.t. } A \geq A_0 \quad EFR \geq EFR_0 \quad Td \leq Td_0 \end{cases} \quad (16)$$

可采用边际优化算法对模型进行优化, 该方法是一种渐进的优化技术, 通过对边际单元的效费进行权衡, 达到对资源的合理利用^[11], 并在一定的约束条件下进行循环迭代, 直到满足目标值为止, 在每一轮的迭代过程中, 要根据优化目标来确定当前最需要调整的控制变量。算法的基本步骤为:

step 1: 初始化备件配置量, 令 $s_{mj}=0$;

step 2: 对系统效能进行评估, 计算装备的初

始可用度 A_0 、备件满足率 EFR_0 、保障延误时间 Td_0 ;

step 3: 进入算法循环迭代, 在每一轮迭代中, 计算保障体系内每个库存站点中的每项备件的边际效益值 $\delta_{mj}(s_{mj})$, 其计算方法为:

$$\delta_{mj}(s_{mj}) = \frac{P_{mj}(s_{mj} + 1) - P_{mj}(s_{mj})}{C_j} \quad (17)$$

step 4: 比较每项 $\delta_{mj}(s_{mj})$ 值的大小, 以确定当前最需要调整的站点和备件项目, 将最大边际效应值 $\max(\delta_{mj})$ 对应的站点 m^* 和备件项目 j^* 的配置量加 1, 其它保持不变;

step 5: 判断当前的系统效能是否满足规定的指标, 如果满足, 则迭代结束, 得到备件最优配置方案; 否则, 进入 step 3 继续迭代, 直至满足指标。

4 不完全修复件的采购方案

4.1 近似拉普拉斯需求分布下的备件短缺函数

需要给出供货周期(订购延误期间)内的备件需求概率分布, 一般按正态分布来处理, 由于订购点 R 是关于订购量 Q 的非线性函数, 计算时需不断迭代才能确定 R 和 Q 的最优估计值^[12], 计算过程十分繁琐。对于消耗率较低的修复件, 将间隔期需求用拉普拉斯分布代替, 如图 2 所示。

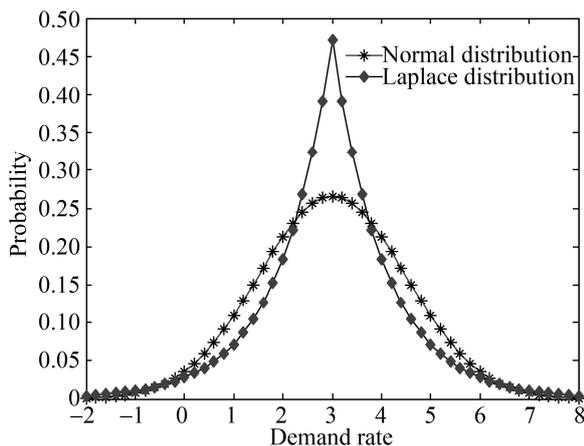


图 2 备件正态需求分布与拉普拉斯需求分布
Fig. 2 Normal distribution and Laplace distribution for spare part demand rate

既保证结果精度, 又可以使 Q 与 R 相互独立, 使计算过程变得简单。不完全修复件在订购延误时

间的拉普拉斯消耗概率分布为:

$$p(x_{0j}) = (\sqrt{2}/2\sigma_{0j}) e^{-\frac{\sqrt{2}|x_{0j} - E[D_{0j}]|}{\sigma_{0j}}} \quad (18)$$

式中: x_{0j} 为备件消耗量; σ_{0j} 为间隔期需求标准差; $E[D_{0j}]$ 为间隔期需求均值; 下标 0 为保障系统中的顶层站点。

令故障件 j 在顶层站点的报废率为 d_{0j} , 备件供货周期为 TD_j (从订单的下发到接收备件的时间间隔, 亦称订购延误时间)。假设供货方的备件量充足, 则采购间隔期内的备件需求均值为:

$$E[D_{0j}] = \lambda_{0j} \cdot d_{0j} \cdot TD_j \quad (19)$$

式中: λ_{0j} 为顶层保障站点的备件年平均需求率。

设备件库存安全系数为 k_{0j} , 则订购点 R_{0j} 为:

$$R_{0j} = k_{0j}\sigma_{0j} + E[D_{0j}] \quad (20)$$

式中: 标准差 σ_{0j} 以及间隔期需求均值 $E[D_{0j}]$ 为已知参数, 只要确定 k_{0j} , 就可以得到最优订购点 R_{0j} 。备件消耗与补充周期, 备件库存状态位于 R_{0j} 和 $R_{0j} + Q_{0j}$ 之间, 备件短缺数的概率分布可表示为:

$$p(BO_{0j} = y) = \frac{1}{Q_{0j}} \int_{R_{0j}}^{R_{0j} + Q_{0j}} \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_{0j}} \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}(L+y-E[D_{0j}])}{\sigma_{0j}}} dL \quad (21)$$

备件期望短缺数为:

$$EBO_{0j} = \int_0^\infty y \cdot p(BO_{0j} = y) dy = \frac{\sigma_{0j}^2}{4Q_{0j}} e^{-\sqrt{2}k_{0j}(1 - e^{-\sqrt{2}Q_{0j}/\sigma_{0j}})} \quad (22)$$

4.2 最优订购方案的求解方法

在满足备件短缺数的指标约束下, 确定最优订购点 R^* 和订购量 Q^* 使备件的年库存管理费用和订购费用最低, 所建立的订购优化模型为:

$$\begin{aligned} & \min \frac{\Omega_{0j}\lambda_{0j}d_{0j}}{Q_{0j}} + \\ & c'_{0j}[(Q_{0j} + 1)/2 + R_{0j} - E[D_{0j}] + EBO_{0j}] \\ & \text{s.t. } EBO_{0j} \leq B_{0j}, Q_{0j} \geq 1, R_{0j} \geq -1 \end{aligned} \quad (23)$$

式中: Ω_{0j} 为备件订购费用; c'_{0j} 为备件年库存管

理费用； B_{0j} 为备件短缺数指标。将约束指标代入式中，建立 Lagrange 函数，分别对 R_{0j} 和 Q_{0j} 求偏导，令其等于 0，可得：

$$Q_{0j}^* = \frac{\sigma_{0j}}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{2\Omega_{0j}\lambda_{0j}d_{0j}}{c'_{0j}} + \frac{\sigma_{0j}}{2}} \quad (24)$$

$$R_{0j}^* = -\frac{\sigma_{0j}}{\sqrt{2}} \ln \frac{4Q_{0j}B_{0j}}{\sigma_{0j}^2(1-e^{-\sqrt{2}Q_{0j}/\sigma_{0j}})} + E[D_{0j}] \quad (25)$$

在最优初始配置方案 s^* 下，备件期望短缺数记为 $EBO_{0j}(s^*)$ 。通过分析可知，在备件的需求总数中，一部分需求通过故障修复而得到满足；因报废消耗而产生的需求通过向外部进行采购而得到满足。因此，备件期望短缺数指标 B_{0j} 需要进行分配，分配方法为：

$$B_{0j} = EBO_{0j}(s^*) \frac{E[D_{0j}]}{E[D_{0j}] + \lambda_{0j}(1-d_{0j})T_{0j}} \quad (26)$$

式中： T_{0j} 为故障件的平均修复时间。根据库存平衡方程，还需考虑故障件的平均在修数量，以及正在对所属的下一级保障站点进行补给中的备件数量，则：

$$R_{0j}^* = -\frac{\sigma_{0j}}{\sqrt{2}} \ln \frac{4Q_{0j}B_{0j}}{\sigma_{0j}^2(1-e^{-\sqrt{2}Q_{0j}/\sigma_{0j}})} + E[D_{0j}] + \lambda_{0j}(1-d_{0j})T_{0j} - \sum_{l \in Unit(0)} \lambda_{lj} \cdot NRTS_{lj} \cdot O_{lj} \quad (27)$$

5 案例应用

以某型武器控制设备为例，该设备部署在 4 个不同的站点，编号分别为 1, 2, 3, 4。备件可配置在现场站点仓库，用于现场故障修理，同时也可配置在基地仓库中，作为周转备件库存，当现场仓库中的备件不能满足装备故障维修需求或出现备件短缺时，由基地实施备件供应。随着备件的使用与消耗，基地急需根据当前的备件库存状态，向外部供货方进行采购，以保证系统的备件库存平衡。

(1) 需要确定装备备件清单，如表 2 所示，主要包括装备结构码、备件项目、可靠性指标 (MTBF)、单机安装数、占空比、报废率以及备件

单价，备件清单中将系统结构分解至最小可更换单元。该设备共有备件 100 多项，由于篇幅有限，本文只列出了该系统中的部分备件。其中：中心控制系统是一项大型整机组件，因此可将该部件作为逻辑组件(不作为备件)处理；此外，配电箱是一项全寿命件，即在装备的整个服役过程中都不会发生故障，因此，该配电箱也可看作逻辑组件。

表 2 装备备件清单

Tab. 2 Spare parts bill of equipment

| 备件名称 | 属性 | MTBF | 单机数 | 占空比 | 报废率 | 单价 |
|----------|-----|-------|-----|-----|------|---------|
| 中心控制系统 | —— | —— | 1 | 1 | —— | —— |
| 解算机 | LRU | 900 | 1 | 1 | 0.1 | 56 000 |
| 显控机 | LRU | 910 | 1 | 1 | 0.1 | 48 000 |
| 总线板 | LRU | 100 | 1 | 1 | 0.1 | 10 800 |
| 接口板 | LRU | 1 000 | 1 | 0.5 | 0.1 | 5 400 |
| 电位器 | LRU | 1 200 | 1 | 0.5 | 1 | 1 452 |
| 环形电感 | SRU | 1 200 | 2 | 1 | 1 | 180 |
| 变压器 | LRU | 1 700 | 1 | 1 | 1 | 568 |
| 变换插件 | LRU | 238 | 1 | 1 | 0.1 | 17 499 |
| 模块 | SRU | 900 | 2 | 0.9 | 1 | 1 850 |
| 101 仪器 | LRU | 2 000 | 2 | 0.5 | 0.03 | 100 000 |
| 75-II 仪器 | LRU | 200 | 1 | 1 | 0.03 | 2 000 |
| MS 仪器 | LRU | 200 | 1 | 1 | 0.03 | 20 000 |
| ZC-63 | LRU | 170 | 4 | 0.8 | 1 | 5 000 |
| 配电箱 | LRU | —— | 1 | 1 | —— | 10 000 |

(2) 确定故障件在现场级和基地级的修复概率：对于故障后不可修备件，其维修概率为 0。对于可修备件，由于受检测设备、维修设备、工装、维修人员技能以及技术资料的限制，现场级维修能力有限，一般只限于对装备定期保养、故障检测、并对装备中一些关键的独立更换单元 LRU 进拆卸和更换，因此设现场级对 LRU 的修复概率为 0.5，对 SRU 的维修概率为 0。基地级一般具备较强的维修能力，因此，在不考虑故障件报废消耗的情况下，基地修理所能够对所有的故障件进行修复，则故障修复率为 1。

(3) 确定故障件的维修周转时间: 现场级对故障件的平均维修周转时间为 0.5 d, 基地级修理所为 4 d。

(4) 确定备件补给延误时间和供货周期: 现场级向基地级领取备件的往返运输时间为 1 d; 基地级向外部供货方采购备件的延误时间(供货周期)为 10 d。

(5) 确定备件库存管理费用和订购费用: 在保障体系内部, 备件的运送费用可忽略不计; 在保障体系外部, 基地向外部供货方的固定订货费为 100 元, 备件库存管理费率为 0.05 (年库存管理费用占备件单价的比例)。

规定装备可用度指标不小于 0.95, 即 $A \geq 0.95$, 计算得到初始备件方案的最优费效曲线如图 3 所示。

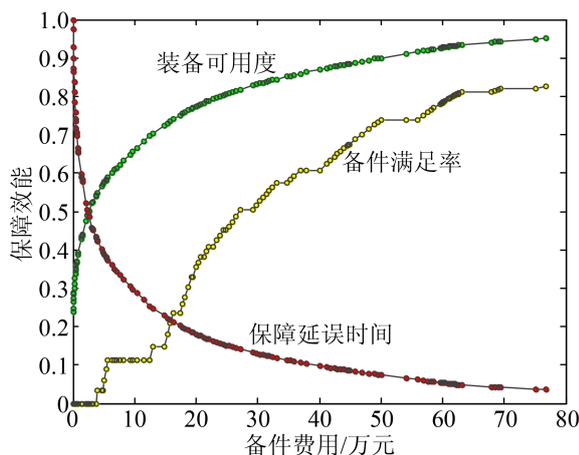


图 3 可用度约束下初始备件方案最优费效曲线
Fig. 3 Optimal curve of effectiveness vs. cost for initial spare parts project under availability constraint

满足装备可用度指标条件下, 得到初始备件配置与后续备件采购方案如表 3 所示。在该方案中, 装备期望可用度 A 为 0.951, 备件满足率 EFR 为 0.826, 保障延误时间 Td 为 5.05 h, 备件总投资 $C=767\ 950$ 元。

表 3 中, 备件订购点为-1 的情况表示: 当该项备件发生一件短缺时, 就向外部订货。

表 3 可用度约束下最优备件方案

Tab. 3 Optimal spare parts project under availability constraint

| 备件 | 站点 1 | 站点 2 | 站点 3 | 站点 4 | 基地 | 订购点 | 订购量 |
|----------|------|------|------|------|----|-----|-----|
| 解算机 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 显控机 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 总线板 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 接口板 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 电位器 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| 环形电感 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 7 |
| 变压器 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 7 |
| 变换插件 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 模块 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| 101 仪器 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 |
| 75-II 仪器 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| MS 仪器 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| ZC-63 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 配电箱 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 |

通过对该型号装备的初始备件配置以及后续备件采购的优化结果分析, 可以得到如下规律:

(1) 对于现场级而言, 只需配备一些故障率较高、价格低的现场可独立更换单元 LRU;

(2) 由于现场级不能对车间更换单元 SRU 进行独立拆卸和更换, 因此, 随舰备件中不包括 SRU;

(3) 对于基地级而言, 修理故障件 LRU 时可能会消耗其所属的 SRU, 因此, 对于价格高、故障率较低的 SRU, 只需配置少量即可, 并且向外部供货方的一次性采购量规模较小; 而对于价格低、故障率高的 SRU, 需配置若干件, 并且向外部供货方的采购量规模大;

(4) 对于价格高、故障率低的 LRU, 需将其配置在基地级库存中;

(5) 而对于某些故障率极低、价格昂贵的大型整机备件, 现场级和基地级均保持零库存, 通常情况下, 该类备件在装备的全寿命阶段中不会被消耗。

优化计算后, 保障系统中的备件总量为 132 件, 其中, 站点 1 配置数量为 19, 占 13.5%; 站点 2 配置数量为 21, 占 14.9%; 站点 3 配置数量为 24,

占 17%；站点 4 配置数量为 21，占 14.9%；基地仓库库存配置数量为 56，占 39.7%。

综合对结果的定性分析与讨论可知：模型优化计算结果与实际规律较吻合，从而在定性的层面上验证了模型的正确性、优化方法的合理性以及方案的可行性。

利用保障效能和保障费用 2 种约束指标，计算得到 2 种不同的备件配置优化方案，其保障效能评估结果对比如图 4 所示。其中，保障延误时间和保障费用经过了归一化处理。

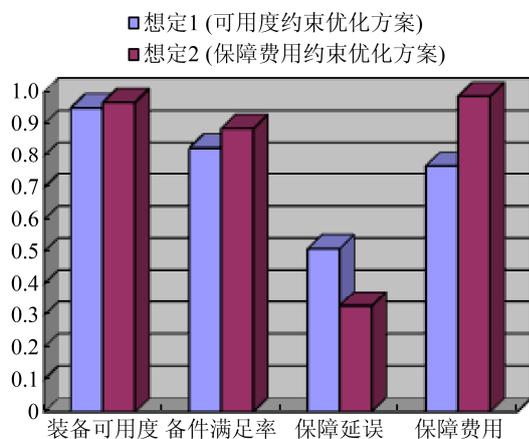


图 4 2 种情况下备件方案保障效能的比较

Fig. 4 Comparison of spares project effectiveness under two scenarios

本例中仅仅考虑了备件供应的影响因素，因此，可用度计算结果仅表示供应可用度。若要得到使用可用度，还必须考虑装备换件维修时间。设装备平均修复时间 $MTTR=6$ h (包括故障检测、故障件拆卸、备件更换等)， $MTBF=250$ h。可以计算得到：

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{250}{250 + 6} = 97.7\%$$

装备使用可用度为：

$$A_o = A_s A_i / (A_s + A_i - A_s A_i) = (0.951 \times 0.977) / (0.951 + 0.977 - 0.951 \times 0.977) = 93\%$$

图 5 给出了 A_o 与 A_i 之间的变化曲线，可以看出，即使在保障系统中配置无限多的备件资源，也无法使装备使用可用度达到 100%，当 $A_s=1$ 时，使用可用度的极限值 $A_o=A_i=0.977$ 。

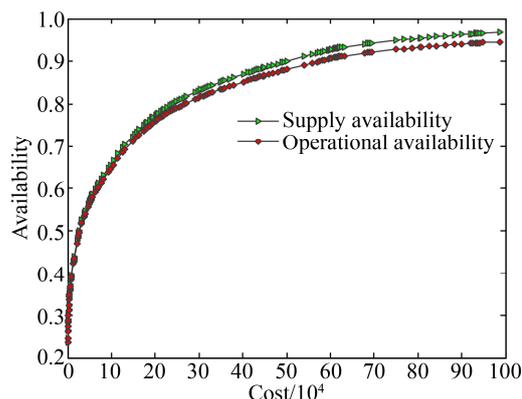


图 5 使用可用度 A_o 与供应可用度 A_s 变化曲线
Fig. 5 Relationship between A_s and A_o

6 结论

本文在基于备件库存状态下，根据系统分析法，对不完全修复备件的初始配置以及后续备件的订购方案优化等问题进行了研究。研究结论能够为装备论证阶段保障资源的确定提供理论依据；为装备研制阶段保障资源优化分析提供技术手段；为装备使用阶段同步配套保障资源优化配置提供决策支持。

装备的初始保障数据主要通过装备论证设计部门和研制生产部门提供，这些数据主要来源于可靠性试验过程中累积的经验信息，装备列装后，受工作环境、任务强度、保障模式等因素的影响，实际保障信息会存在一定的差异。因此，需要制定完善的维修保障信息标准，建立装备保障数据库，采用合理的方法对原始数据进行分析处理，以便对其进行动态更新和维护。从而随着保障数据信息的不断完善，使保障资源的配置方案逐步趋于准确。

参考文献：

- [1] 阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 任意结构系统的备件满足率模型及优化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 32(8): 1799-1803.
Ruan Minzhi, Li Qingmin, Peng Yingwu, et al. Model of spare part fill rate for systems of various structures and optimization method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 32(8): 1799-1803.
- [2] Paterson C, Kiesmüller G, Teunter R, et al. Inventory models with lateral transshipments: a review[J].

- European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2011, 210: 125-136.
- [3] Cesaro A, Pacciarelli D. Performance assessment for single echelon airport spare part management[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2011(61): 150-160.
- [4] 阮旻智, 彭英武, 李庆民, 等. 基于体系保障度的装备备件三级库存方案优化[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(7): 1623-1630.
- Ruan Minzhi, Peng Yingwu, Li Qingmin, et al. Optimization of three-echelon inventory project for equipment spare parts based on system support deree[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(7): 1623-1630.
- [5] Gumus A T, Guneri A F. A multi-echelon inventory management framework for stochastic and fuzzy supply chains[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2009, 36(3): 5565-5575.
- [6] Darwish M A, Odah O M. Vendor managed inventory model for single-vendor multi-retailer supply chains[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2010, 204(3): 473-484.
- [7] Tiacci L, Saetta S. Reducing the mean supply delay of spare parts using lateral transshipments policies[J]. International Journal of Production Economics (S0925-5273), 2011, 133: 182-191.
- [8] 毛德军, 李庆民, 张志华. 以装备可用度为中心的保障方案优化方法[J]. 兵工学报, 2011, 32(5): 636-640.
- Mao Dejun, Li Qingmin, Zhang Zhihua. An Optimizing Method for Availability-Centric Equipment Support Plan[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(5): 636-640.
- [9] 罗伟, 阮旻智, 袁志勇. 多级维修供应下可修复备件库存建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2623-2630.
- Luo Yi, Ruan Minzhi, Yuan Zhiyong. Modeling and optimization of repairable spare parts under the multi-echelon maintenance supply[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(10): 2623-2630.
- [10] 阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 串件拼修对策下多级维修供应的装备系统可用度评估[J]. 航空学报, 2012, 33(4): 658-665.
- Ruan Minzhi, Li Qingmin, Peng Yingwu, et al. Evaluation of Equipment System Availability for Multi-echelon[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(4): 658-665.
- [11] 阮旻智, 李庆民, 李承, 等. 改进的分层边际算法优化备件的初始配置方案[J]. 兵工学报, 2012, 33(10): 105-111.
- Ruan Minzhi, Li Qingmin, Li Cheng, et al. Improved-Layered-Marginal Algorithm to Optimize Initial Spare Part Configuration Project[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(10): 105-111.
- [12] 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 (S0925-5273), 2007, 109(2): 195-213.