

# 任意结构下可修复备件的配置方案优化

罗 祎, 阮旻智, 李庆民

(海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**合理规划可修复备件配置方案是提高装备维修供应效能的关键,为此,在可修复备件多级库存控制基本理论(multi-echelon theory for recoverable item control, METRIC)的基础上,结合维修参数,建立了任意保障模式下任意结构系统的备件配置优化通用模型。以装备可用度、备件满足率以及保障延误时间为指标,保障费用为约束,采用边际优化算法对模型进行优化计算。通过算例分析了影响备件配置方案的保障性因素,利用多级多层次备件优化工具模型结果进行了验证,证明了该模型的正确性。

**关键词:**可修复备件;任意结构;配置优化

**中图分类号:** E 911; TJ 761.1

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.09.20

## Configuration project optimization for repairable spare parts under discretional structures

LUO Yi, RUAN Min-zhi, LI Qing-min

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Reasonably programming the configuration project for repairable spare parts is critical for improving maintenance supply effectiveness. Based on the multi-echelon theory for recoverable item control (METRIC), considering relative important repair parameters, the universal model of spare parts configuration optimization under the discretional structure equipment and discretional support mode is built. Taking the equipment availability, spare parts fill rate and support delay time as the targets, while the cost is considered as the constraint, the marginal algorithm is used to the model calculation. According to a given example, the support factors of impacting the spare parts' configuration project are analyzed. The calculation result is verified through VMETRIC simulation software, which proves the model's correctness.

**Keywords:** repairable spare part; discretional structure; configuration optimization

## 0 引言

备件是实施装备维修的物质基础,备件资源的筹措不仅影响着装备寿命费用,还直接影响装备的战备完好性及其作战能力。在装备的组成结构中,绝大多数部件都是故障后可修复的,这些器材的价格往往相对较高,属于贵重件,所占器材总经费的比例高,因此合理规划该类器材的配置方案是提高装备维修供应效能的关键。多级维修供应是目前各军兵种最常见的保障模式,对于可修贵重备件,该模式是一种较为科学备件管理模式。通常情况下,装备使用现场(基层级)的维修保障能力远不能满足装备任务需求,必须通过其他各级保障机构(包括中继级维修车间、基地仓库、修理厂、外部供应商等)协同完成对装备的故障维修和

备件的供应。在这种典型且较为复杂的多级保障模式下,需要合理规划各级库存的备件配置方案,以提高装备可用度及保障系统服务的水平,并减少经费投资。

多级维修供应管理是提高装备保障效率的有效途径。目前,大多数关于可修复备件库存分配理论研究都是基于文献[1]提出的 VARI-METRIC 模型<sup>[1]</sup>所展开的。例如,文献[2-3]利用可修复备件多级库存控制基本理论(multi-echelon theory for recoverable item control, METRIC)分别建立了航空及舰艇装备备件维修供应的两级库存分配模型;文献[4]研究了需求率低、价格高的武器贵重备件优化方法,建立了备件分配的三级库存模型;文献[5-7]研究了有限维修资源和维修能力约束下的备件库存分配优化及装备可用度评估方法。近年来,该领域研究热点主要针对横

收稿日期:2011-09-12; 修回日期:2012-06-28。

基金项目:总装仿真预研项目(513040302)资助课题

作者简介:罗祎(1974-),男,讲师,博士,主要研究方向为装备综合保障建模与仿真。E-mail: luominx@sina.com

向交叉供应<sup>[8-12]</sup>条件下、备件需求分布不规则<sup>[13]</sup>情况下、具有冗余备份<sup>[14]</sup>系统的备件多级库存分配问题展开研究。

大多数文献都是在特定的两级或三级保障模式下，针对简单结构层次(单层级、两层级)的系统进行研究，建立的模型缺乏通用性和扩展性，此外，模型的求解是将备件需求率作为已知参数处理，缺乏对其进行定量描述的依据。本文则根据装备可靠性维修性设计指标、维修性参数以及使用条件对备件需求率进行预测，研究并建立任意保障模式、任意系统结构的备件库存配置优化的通用模型，采用合理的方法对模型结果进行验证，在 METRIC 的基础上，对其进行补充和完善。

### 1 问题描述及定义

#### 1.1 对保障过程的描述

装备一般配置在使用现场(基层级)，在保障周期内，若使用现场的装备发生故障，其原因是所属的第一层级现场可更换单元(line replaceable unit, LRU)故障导致，采用换件维修的方式，拆卸故障单元 LRU 并对其进行维修，LRU 的维修、送修、申领补给过程如图 1 所示。根据装备故障树结构可知，对故障单元 LRU 进行维修时，其故障原因是由于其所属的车间可更换单元(shop replaceable unit, SRU)导致，如果有 SRU 备件，就将其安装到 LRU 上，此时就完成了 LRU 的修理，如果没有 SRU 备件，就会因等待 SRU 维修而造成 LRU 修理时间的延误。故障单元 SRU 在使用现场也存在一定的修复概率，其送修、申请及补给过程与 LRU 相同。在整个保障体系中，除顶层站点外，其他各个级别的站点对 LRU 及其 SRU 的维修、更换、送修、申领和补给的过程和方式相同。

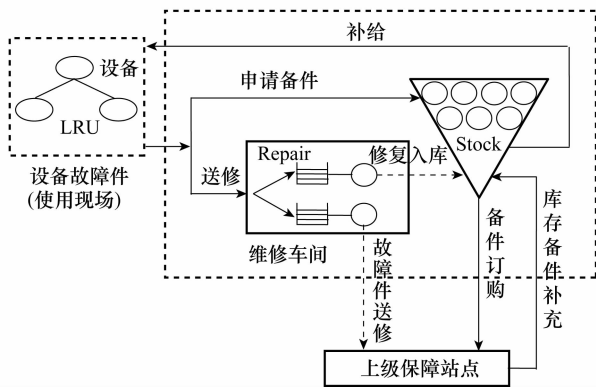


图 1 多级保障系统的故障件维修供应过程

#### 1.2 对模型的基本假设

在建立备件库存分配模型时，在如下的假设下进行：

(1) 单位时间内，备件需求率服从泊松分布，不同故障单元的在修数量相互独立；

(2) 每个保障站点的库存控制采用连续检测的(S-1, S)库存策略，即缺少一件就向上级申请一件；

(3) 按照严格逐级向上的机制完成故障件的送修、申请和补给，不考虑处于同一级别保障站点之间的横向供应；

(4) 故障件维修及备件补给过程中，不考虑保障站点之间的补给优先权以及故障单元之间的维修优先权，即采用先到先供应、先到先维修的维修供应策略；

(5) 故障件的维修时间相互独立，维修后，产品修复如新；

(6) 不同故障单元发生短缺所造成对装备可用度的影响程度相同，即所有装备组件的重要度相同；

(7) 各站点的维修渠道无限，故障件不会因为维修渠道被占满而造成排队等待维修的现象。

### 2 备件维修供应的多级库存建模

#### 2.1 模型参数定义及符号说明

(1) 基本参数

$m$ :保障站点编号,  $m=1, 2, \dots, M$ ,  $M$  表示体系中的站点总数；

$n$ :保障体系级别编号,  $n=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  表示整个体系中保障级别数,  $n=1$  表示最高级别保障站点,  $n=N$  表示装备现场；

$Echelon(n)$ :处于第  $n$  个级别的站点集合；

$Unit(m)$ :站点  $m$  所负责保障的所有单位集合；

$SUP(m)$ :直接对站点  $m$  进行供应保障的单位；

$j$ :装备项目编号,  $j=1, 2, \dots, J$ ,  $J$  表示装备组成中的项目总数；

$i$ :装备结构层级编号,  $i=0, 1, \dots, I$ ,  $i=0$  表示装备系统,  $i=1$  表示第一层级 LRU 项目,  $i=I$  表示处于结构中最底层项目；

$Inden(i)$ :在装备结构中处于第  $i$  层级的项目集合；

$Sub(j)$ :项目组件  $j$  所属的所有分组件集合；

$Aub(j)$ :项目组件  $j$  的母体集合，即母体  $Aub$  包含组件  $j$ ，并以  $j$  作为其组成结构中的分组件；

$Z_j$ :项目组件  $j$  在其上一级母体项目中的单机安装数量。

(2) 装备维修信息参数

$MTBF_j$ :项目组件  $j$  的平均故障间隔时间；

$\lambda_{mj}$ :项目组件  $j$  在站点  $m$  的年需求率；

$T_{mj}$ :项目组件  $j$  在站点  $m$  平均维修时间；

$RIP_j$ :项目组件  $j$  的原位维修率(组件  $j$  发生故障后，不需要拆卸，能够直接在装备上进行修复的概率,  $0 \leq RIP_j \leq 1$ )；

$DC_j$ :组件  $j$  占空比(组件  $j$  运转时间与装备系统运转

时间的比例,  $0 < DC_j \leq 1$ );

$RtOK_j$ : 组件  $j$  的虚检概率(当系统发生故障后,其故障原因不是由组件  $j$  故障所致,而在故障检测过程中,错误地将组件  $j$  进行故障隔离的概率,  $0 \leq RtOK_j \leq 1$ );

$NRTS_{mj}$ : 故障单元  $j$  不能在站点  $m$  维修的比例,则站点  $m$  对故障单元  $j$  的维修概率为  $1 - NRTS_{mj}$ ;

$q_{mj}$ : 故障隔离概率(故障单元  $j$  在站点  $m$  进行维修时,其故障发生的原因是由于其所属的分组件  $k$  故障所致,  $k \in Sub(j)$ );

(3) 其他参数

$N_m$ : 装备系统在使用站点  $m$  的配置数量;

$HW_m$ : 装备系统在使用站点  $m$  的每周平均工作时间(小时);

$s_{mj}$ : 备件项目  $j$  在站点  $m$  的库存量;

$X_{mj}$ : 项目  $j$  在站点  $m$  的供应渠道数量,供应渠道由 3 部分构成,故障件  $j$  在站点  $m$  的在修数量、正在对站点  $m$  进行供应和补给的备件  $j$  的数量、故障件  $j$  在站点  $m$  因等待其分组件  $k$  ( $k \in Sub(j)$ ) 维修而造成修理延误的数量;

$O_{mj}$ : 站点  $m$  向其上一级保障机构申请备件  $j$  的延误时间;

$BO_{mj}$ : 备件  $j$  在站点  $m$  的短缺数,其短缺数的数学期望为  $EBO_{mj}$ , 方差为  $VBO_{mj}$ ;

$EFR_{mj}$ : 站点  $m$  的第  $j$  项备件的期望满足率;

$C_j$ : 备件  $j$  的单价;

模型中的决策变量为备件项目  $j$  在站点  $m$  的库存量  $s_{mj}$ 。

### 2.2 对各站点备件需求量的预测

组件  $j$  在站点  $m$  的需求率  $\lambda_{mj}$  由两部分构成<sup>[15]</sup>:

(1) 站点  $m$  所保障的所有单位  $l$  ( $l \in Unit(m)$ ) 对故障件  $j$  不能维修的数量之和,这些不能维修的故障件  $j$  需要送到站点  $m$  进行维修;

(2) 站点  $m$  修理组件  $j$  的母体  $l$  ( $l \in Aub(j)$ ) 时,其母体发生故障的原因是由于组件  $j$  故障所致,因而发生了对组件  $j$  的需求。

根据基层使用现场的装备配置量  $N_m$ 、每周平均工作时间  $HW_m$ 、装备组件的单机安装数量  $Z_j$ 、平均故障间隔时间  $MTBF_j$ 、原位维修率  $RIP_j$ 、占空比  $DC_j$ 、虚检概率  $RtOK_j$  等已知参数,可以推导出使用现场对组件  $j$  的平均年维修更换率  $\lambda_{mj}$  及其故障隔离率  $q_{mj}$ , 表示为

$$\lambda_{mj} = \frac{365 \cdot DC_j (1 - RIP_j) \cdot HW_m \cdot Z_j \cdot N_m}{7 \cdot MTBF_j (1 - RtOK_j)}, \quad m \in Echelon(N); j \in Inden(1) \quad (1)$$

$$q_{mj} = \frac{DC_k \cdot Z_k \cdot MTBF_j (1 - RtOK_j) (1 - RIP_k)}{MTBF_k (1 - RtOK_k) (1 - RIP_j)} \quad (2)$$

### 2.3 各站点备件供应渠道均值与方差的确定

通过模型参数定义可知备件供应渠道由 3 部分构成:

(1) 故障件  $j$  在站点  $m$  的在修数量

当不考虑站点的维修渠道有限的情况下,故障件不会因为维修渠道被占满而造成排队等待维修的现象,则任一时刻,站点  $m$  对故障件  $j$  的平均在修数量为

$$E[X_{mj}^1] = \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) T_{mj} \quad (3)$$

(2) 正在对站点  $m$  进行供应和补给的备件  $j$  的数量计算公式为

$$E[X_{mj}^2] = \lambda_{mj} \cdot NRTS_{mj} O_{mj} + f_{mj} \cdot EBO_{SUP(m),j} \quad (4)$$

其中

$$f_{mj} = \frac{\lambda_{mj} \cdot NRTS_{mj}}{\lambda_{SUP(m),j}} \quad (5)$$

(3) 故障件  $j$  在站点  $m$  维修时,因等待其分组件  $k$  ( $k \in Sub(j)$ ) 维修而造成修理延误的数量

该部分为所有分组件  $k$  ( $k \in Sub(j)$ ) 的短缺数  $EBO_{nk}$  之和。在站点  $m$  所产生的对组件  $k$  的所有需求  $\lambda_{mk}$  中,只有一部分比例  $h_{mj}$  用在维修故障件  $j$  上,  $h_{mj}$  的计算式为

$$h_{mj} = \frac{\lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) q_{mj}}{\lambda_{mk}} \quad (6)$$

因此可以得出:在站点  $m$  所发生对组件  $k$  的所有短缺中,只有一部分比例  $h_{mj}$  会对故障件  $j$  的修理造成延误,则故障件  $j$  在站点  $m$  维修时,因等待其分组件  $k$  ( $k \in Sub(j)$ ) 维修而造成修理延误的数量为

$$E[X_{mj}^3] = \sum_{k \in Sub(j)} h_{mj} \cdot EBO_{nk} \quad (7)$$

根据上述分析,可以得出第  $j$  项备件在站点  $m$  的供应渠道数量的均值为

$$E[X_{mj}] = \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) T_{mj} + \lambda_{mj} \cdot NRTS_{mj} \cdot O_{mj} + f_{mj} \cdot EBO_{SUP(m),j} + \sum_{k \in Sub(j)} h_{mj} \cdot EBO_{nk} \quad (8)$$

根据备件供应渠道数量均值的分析可知:站点  $m$  向上级站点  $n$  ( $n \in SUP(m)$ ) 申领备件  $j$  时,当上级  $n$  出现备件短缺时可能会造成对站点  $m$  补给延误,该短缺总数中,造成对站点  $m$  补给延误的短缺数概率服从二项分布<sup>[16]</sup>;另外,当故障件  $j$  的分组件  $k$  ( $k \in Sub(j)$ ) 发生短缺时,其短缺总数会以一定的概率  $h_{mj}$  而造成对故障件  $j$  的修理延误,同理,造成故障件  $j$  修理延误的短缺数概率也服从二项分布。因此,可以得出站点  $m$  对第  $j$  项备件的供应渠道数量方差为

$$\begin{aligned} \text{Var}[X_{mj}] = & \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) T_{mj} + \lambda_{mj} \cdot NRTS_{mj} O_{mj} + \\ & f_{mj} \cdot (1 - f_{mj}) \cdot EBO_{SUP(m),j} + f_{mj}^2 \cdot VBO_{SUP(m),j} + \\ & \sum_{k \in Sub(j)} h_{mj}^2 \cdot VBO_{nk} + \sum_{k \in Sub(j)} h_{mj} (1 - h_{mj}) \cdot EBO_{nk} \quad (9) \end{aligned}$$

所有站点的备件供应渠道均值和方差根据式(8)和式(9)递推计算得出,递推计算从第一级站点  $m$  ( $m \in Eche-$

lon(1)),在装备结构中处于最低层级备件  $j(j \in Inden(N))$  开始。其中,期望短缺数  $EBO_{mj}$  及短缺数方差  $VBO_{mj}$  计算式分别为

$$EBO_{mj} = \sum_{X_{mj}=s_{mj}+1}^{\infty} (X_{mj} - s_{mj}) \cdot p(X_{mj}) \quad (10)$$

$$VBO_{mj} = E[BO_{mj}^2] - [EBO_{mj}]^2 \quad (11)$$

$$E[BO_{mj}^2] = \sum_{X_{mj}=s_{mj}+1}^{\infty} (X_{mj} - s_{mj})^2 \cdot p(X_{mj}) \quad (12)$$

式中,  $p(X_{mj})$  为备件供应渠道数量的稳态概率分布。

由于假设条件中设备件的年需求量服从均值为  $\lambda_{mj}$  的泊松分布,根据帕尔姆定理<sup>[16]</sup>:备件供应渠道数也服从均值为  $E[X_{mj}]$  的泊松分布。根据泊松分布性质可知,其均值与方差相等,即  $E[X_{mj}] = \text{Var}[X_{mj}]$ ,则  $p(X_{mj})$  的计算式为

$$p(X_{mj}) = \frac{(E[X_{mj}])^{X_{mj}} \cdot e^{-E[X_{mj}]}}{X_{mj}!} \quad (13)$$

当备件供应渠道差均比  $\text{Var}[X_{mj}]/E[X_{mj}] > 1$  时,可用负二项分布对供应渠道的状态概率  $p(X_{mj})$  作出近似计算<sup>[17]</sup>。

$$p(X_{mj}) = \binom{a + X_{mj} - 1}{X_{mj}} b^{X_{mj}} (1 - b)^a \quad (14)$$

负二项分布均值  $E[X_{mj}] = ab/(1 - b)$ ,方差  $\text{Var}[X_{mj}] = ab/(1 - b)^2$ 。其中  $a$  和  $b$  分别为

$$\begin{cases} a = \frac{(E[X_{mj}])^2}{\text{Var}[X_{mj}] - E[X_{mj}]} \\ b = \frac{\text{Var}[X_{mj}] - E[X_{mj}]}{\text{Var}[X_{mj}]} \end{cases} \quad (15)$$

对于因耗损现象而发生故障的部件,其供应渠道备件数量的差均比小于 1,此时,可根据二项分布概率对  $p(X_{mj})$  作近似估计,因此,当  $\text{Var}[X_{mj}]/E[X_{mj}] < 1$  时<sup>[19]</sup>,有

$$p(X_{mj}) = \binom{n}{X_{mj}} p^{X_{mj}} (1 - p)^{n - X_{mj}} \quad (16)$$

二项分布均值  $E[X_{mj}] = np$ ,方差  $\text{Var}[X_{mj}] = np(1 - p)$ 。其中  $n, p$  分别为

$$\begin{cases} n = \frac{(E[X_{mj}])^2}{E[X_{mj}] - \text{Var}[X_{mj}]} \\ p = \frac{E[X_{mj}] - \text{Var}[X_{mj}]}{E[X_{mj}]} \end{cases} \quad (17)$$

### 3 优化模型及其算法

#### 3.1 选取评估指标

衡量备件供应保障的各种效能指标中,最常用的有装备可用度、备件满足率、保障延误时间。其中:可用度是指任意时刻,系统处于可工作或可使用状态的程度,使用现场站点  $m$  的装备可用度为

$$A_m = \prod_{j \in Inden(1)} \left\{ 1 - \frac{EBO_{mj}}{(N_m Z_j)} \right\}^{Z_j} \quad (18)$$

对于整个多级维修供应保障体系而言,其所保障的所

有装备可用度为

$$A = \frac{1}{\text{Sum}(Echelon(N))} \sum_{m \in Echelon(N)} N_m A_m \quad (19)$$

式中,  $m \in Echelon(N)$  表示装备使用站点;  $\text{Sum}(Echelon(N))$  表示使用站点的数量。

备件满足率,又称备件保障概率,是指在规定的时间内能够满足供应需求所占的百分比,可以根据备件库存量  $s_{mj}$  和供应渠道数量  $X_{mj}$  的稳态概率来计算<sup>[20]</sup>,则使用现场站点  $m(m \in Echelon(N))$  的第  $j$  项备件满足率为

$$EFR_{mj} = p(X_{mj} \leq s_{mj} - 1) = \sum_{X_{mj}=0}^{s_{mj}-1} p(X_{mj}) \quad (20)$$

整个保障体系的平均备件满足率为

$$EFR = \frac{\sum_{m \in Echelon(N)} \sum_{j \in Inden(1)} EFR_{mj}}{\text{Sum}(Echelon(N)) \cdot \text{Sum}(Inden(1))} \quad (21)$$

式中,  $\text{Sum}(Echelon(N))$  表示装备使用站点的数量之和;  $\text{Sum}(Inden(1))$  表示装备所属的第一层组件  $LRU_j$  数量。

保障延误时间是指平均等待备件的时间,可以根据备件短缺数除以备件需求率得到,则整个保障体系的平均保障延误时间为

$$Td = \frac{365 \times 24 \times \sum_{m \in Echelon(N)} \sum_{j \in Inden(1)} EBO_{mj}}{\sum_{m \in Echelon(N)} \sum_{j \in Inden(1)} \lambda_{mj}} \quad (22)$$

#### 3.2 优化模型

备件库存量优化模型可描述为在保证所规定的装备可用度  $A_0$ 、备件满足率  $EFR_0$  或保障延误时间  $Td_0$  等指标的前提下,使整个保障体系的备件费用最低。所建优化模型如下:

$$\begin{cases} \min \sum_j \sum_m C_j s_{mj} \\ \text{s. t. } A \geq A_0 \text{ 或 } EFR \geq EFR_0 \text{ 或 } Td \leq Td_0 \end{cases} \quad (23)$$

系统可用度  $A$ ,通过式(19)等号两端取对数可得

$$\ln A_m = \sum_{j \in Inden(1)} Z_j \ln [1 - EBO_{mj} / (N_m Z_j)] \approx - \frac{1}{N_m} \sum_{j \in Inden(1)} EBO_{mj} \quad (24)$$

式(24)最后一项近似表达式的依据是幂级数  $\ln(1 - a)$  的展开式可以写为  $-a - 0.5a^2 \dots$ ,由于  $a$  很小,可以省略  $a^2$  及  $a^2$  的更高次幂各项。通过可用度与备件短缺数的关系,可将系统可用度指标转化为备件短缺数之和来近似处理。

#### 3.3 优化算法

算法迭代开始时,初始化备件库存量  $s_{mj} = 0$ ,在每一次迭代过程中,确定最优站点  $m^*$  以及最优备件项目  $j^*$ ,其确定方法为

$$\delta(m, j) = \left\{ \sum_{m \in Echelon(N)} \sum_{j \in Inden(1)} EBO_{mj}(\bar{s}) - \sum_{m \in Echelon(N)} \sum_{j \in Inden(1)} EBO_{mj}(\bar{s} + ones(m, j)) \right\} / C_j$$

其中,  $\bar{s}$  表示库存量矩阵;  $ones(m, j)$  表示站点  $m$  的第  $j$  项备件为 1, 其他全为 0 的矩阵。

将最优站点  $m^*$  所对应的备件项目  $j^*$  加 1, 迭代结束时的库存量矩阵  $\bar{s}$  将作为下一次迭代的初始值, 依次循环, 直到满足所设定的可用度指标为止<sup>[17]</sup>。

文献[17]通过分析得出:该方法在求解单个站点、组成结构上具有单层级的备件库存模型时,能够得到全局最优解,但求解多等级多层级库存模型时,不能保证所得到的结果是全局最优的。原因是算法在迭代过程中所对应的费效曲线上可能会产生凹点,要保证解是最优的,必须使费效曲线上的所有点都是凸点<sup>[21]</sup>,需要在算法迭代过程中去掉费效曲线上的所有凹点,这样一来,当站点较多,装备组成较复杂时,会牺牲大量的程序运算时间为代价。通过大量的实验表明:该方法不失为一种较好的优化方案,所得到的准最优结果与全局最优解之间的误差很小,可以忽略不计,并且算法在迭代过程中,费效曲线上出现凹点的可能性很小。

### 4 实验验证

#### 4.1 案例及仿真分析

假设一个在三级维修供应保障体系中,由一个基地级站点( $H_0$ )、两个中继级站点( $R_1, R_2$ )和 3 个基层级现场站点( $J_1, J_2, J_3$ )组成,对配置在基层单位的某型号装备的备件库存量进行优化,该型装备在各基层级单位的配备数量  $N_m$  分别为[18, 12, 15]。保障组织结构如图 2 所示。

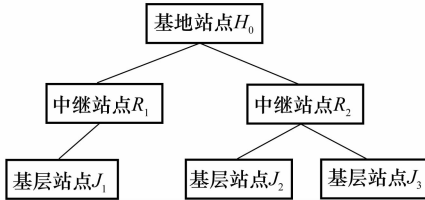


图 2 保障体系的组织结构

装备备件清单及其相关参数如表 1 所示,其中:下标符号  $j$  表示基层级站点。

表 1 备件清单及参数

备件	故障率	安装数	原位维修率	占空比	虚检概率	单价
	$MTBF_j$	$Z_j$	$RIP_j$	$DC_j$	$RtOK_j$	$C_j$
LRU <sub>1</sub>	320	2	08	0.8	0.1	53 400
LRU <sub>2</sub>	470	2	0.2	0.5	0.1	78 800
LRU <sub>3</sub>	990	3	0.2	0.7	0.1	92 300
SRU <sub>11</sub>	1 200	2	0.4	0.1	0.2	6 700
SRU <sub>12</sub>	1 500	2	0.1	0.7	0.2	8 800
SRU <sub>21</sub>	2 000	2	0.5	0.9	0.2	11 200
SRU <sub>22</sub>	1 000	2	0.1	0.7	0.2	9 700
SRU <sub>31</sub>	1 800	2	0.1	0.9	0.2	12 300
SRU <sub>32</sub>	2 200	2	0.1	0.7	0.2	21 800

在一年的保障周期内,假设保障系统的所有装备可用度  $A$  不低于 0.95,由本文模型和算法得到备件的最优方案如表 2 所示,并有如下结论:

- (1) 保障体系中的顶层站点(基地级),配备少量的 LRU 就可以满足任务需求,而内场更换单元 SRU 在基地站点的配备数量相对较多;
- (2) 中继级保障站点,其 LRU 的库存量相比基地站点要多,而 SRU 的分配量比基地站点少;
- (3) 基层现场站点需要配备较多的 LRU,相对于中继级和基地站点而言,其 LRU 库存量最多,SRU 在基层级的库存量最少,除配备少量价格低、需求率较高的 SRU 外,其他 SRU 在基层站点的配置量为 0;
- (4) 各保障站点的备件库存量主要由其配置的装备数量和保障组织结构确定,此外,还与各站点对备件的维修概率、修复时间以及补给延误等因素相关。

表 2 最优备件库存分配方案

站点	LRU <sub>1</sub>	LRU <sub>2</sub>	LRU <sub>3</sub>	SRU <sub>11</sub>	SRU <sub>12</sub>	SRU <sub>21</sub>	SRU <sub>22</sub>	SRU <sub>31</sub>	SRU <sub>32</sub>
$H_0$	1	1	1	5	4	3	5	5	2
$R_1$	1	0	1	2	2	1	3	2	2
$R_2$	3	2	3	3	2	2	4	3	2
$J_1$	4	2	2	1	1	1	1	1	0
$J_2$	4	2	2	1	1	1	1	1	0
$J_3$	4	2	2	1	1	1	1	1	0

此时,3 个基层站点的装备在保障周期内的可用度分别为: $A_{j1}=0.953 9, A_{j2}=0.961 1, A_{j3}=0.955 7$ ,整个保障体系的装备可用度  $A=0.956 39$ ,备件满足率  $EFR=0.686 4$ ,保障延误时间  $Td=28.74$  h,保障费用  $C=348.18$  万元。

#### 4.2 结果验证

本文采用国外较成熟的软件平台 VMETRIC 对模型结果进行检验,VMETRIC 是美国 TFD 公司开发的多等级多层级的备件优化工具及面向任务的综合保障仿真评估工具,曾多次用于美国各军兵种的装备采办、保障性分析、维修保障方案决策,并多次用于实战,取得了明显的效果。软件经过多次实际应用和长期的数据积累,其核心模型和算法不断改进,其性能和可信度不断地提高,可以用作验证本文模型结果的检验标准。

利用该软件计算所得到的整个保障系统的最优费效曲线如图 3 所示,本文模型所得到的最优费效曲线如图 4 所示。可以看出:本文模型所得到的系统最优费效变化曲线与 VMETRIC 软件计算所得到的曲线几乎完全一致,证明了本文所建模型的正确性以及优化算法的合理性。

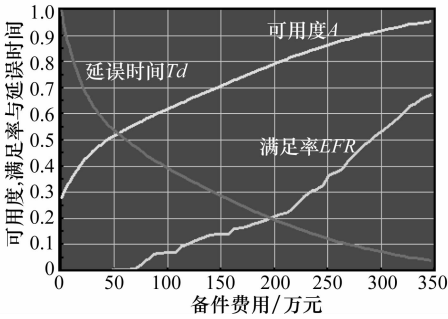


图 3 VMETRIC 软件得到的最优费效曲线

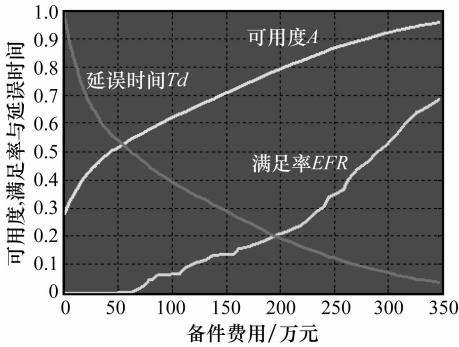


图 4 本文方法的最优费效曲线

表 3 给出了本文模型以及 VMETRIC 软件所得到的最终结果,并比较了两个实验数据结果之间的偏差和贴近度。

表 3 本文结果与 VMETRIC 结果比较

效能指标	本文结果	VMETRIC 结果	结果偏差 $\epsilon$	贴近度 $\xi$
可用性 $A$	0.956 4	0.956 38	0.01%	0.999 9
满足率 $EFR$	0.686 37	0.686 61	0.35%	0.999 7
保障延误时间 $Td$	28.743 h	29.08 h	1.16%	0.988 4

其中,结果偏差  $\epsilon$  和贴近度  $\xi$  分别定义为

$$\begin{cases} \epsilon = \frac{|Result_{本文} - Result_{VMETRIC}|}{Result_{VMETRIC}} \\ \xi = 1 - \epsilon \end{cases} \quad (25)$$

通过实验分析可知:模型求解涉及大量已知参数,如备件原位维修率、虚检概率、站点的维修概率以及备件平均修复时间等参数在实际中是未知的,但在模型中却作为已知参数。如果不能准确地对这些参数进行估计,就会对结果造成偏差,即使再先进的库存模型也不能带来多大益处,因此,需要在各个保障单位建立完善的装备保障性分析记录数据库。

### 5 结论

本文在可修备件库存控制基本理论的基础上,建立了多级库存分配的通用模型,综合考虑了“原位维修率”、“占

空比”、“虚检概率”等重要维修指标,将模型进一步扩展,使其具有更强的通用性,并通过国外先进的 VMETRIC 仿真平台对模型结果进行检验。结果表明,本文模型得到的 3 条相关系统最优费效变化曲线与 VMETRIC 软件计算所得到的曲线高度一致,证明了本文模型的正确性。相比仅靠经验决策而言,该模型算法计算得到的备件方案能够在达到装备保障效能指标的情况下,节省保障经费,可做为制定可修复备件库存方案的依据。

### 参考文献:

[1] Sherbrooke C C. VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture multi-echelon availability models [J]. *Operations Research*, 1986, 34(2): 311 - 319.

[2] Yoon K B, Sohn S Y. Finding the optimal CSP inventory level for multi-echelon system in Air Force using random effects regression model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(3): 1076 - 1085.

[3] Rustenburg W D, Van Houtum G J, Zijm W H M. Spare parts management at complex technology-based organizations: An agenda for research[J]. *International Journal of Production Economics*, 2001, 71 (1): 177 - 193.

[4] 孙江生, 李苏剑, 吕艳梅, 等. 武器贵重备件三级库存模型仿真研究[J]. *兵工学报*, 2008, 29(7): 854 - 858. (Sun J S, Li S J, Lü Y M, et al. Simulation and research on the three-echelon storage model of the valuable spare parts in weapon equipment [J]. *Acta Armanentarii*, 2008, 29(7): 854 - 858.)

[5] Ettl M, Feigin G E, Lin G Y, et al. A supply network model with base-stock control and service requirements[J]. *Operations Research*, 2000, 48(2): 216 - 232.

[6] Sleptchenko A, van der Heijden M C, van Harten A. Effects of finite repair capacity in multi-echelon, multi-indenture service part supply systems[J]. *International Journal of Production Economics*, 2002, 79 (3): 209 - 230.

[7] Jung B R, Sun B G, Kim J S, et al. Modeling lateral transshipments in multi-echelon repairable-item inventory systems with finite repair channels [J]. *Computers & Operations Research*, 2003, 30(9): 1401 - 1417.

[8] Burton J, Banerjee A. Cost parametric analysis of lateral transshipment policies in two-echelon supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 94 (1): 169 - 178.

[9] Wong H, van Oudheusden D, Cattrysse D. Cost allocation in spare parts inventory pooling[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(4): 370 - 386.

[10] Olsson F. Optimal policies for inventory systems with lateral transshipments[J]. *International Journal of Production Economics*, 2009, 118(1): 175 - 184.

- [11] Olsson F. An inventory model with unidirectional lateral transshipments[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 200(3): 725–732.
- [12] Paterson C, Kiesmuller G, Teunter R, et al. Inventory models with lateral transshipments; a review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 210(2): 125–136.
- [13] Nees G, Panagiotidou S, Tagaras G. Inventory management of multiple items with irregular demand; a case study[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(2): 313–324.
- [14] De Smidt-Destombes K S, van Elst N P, Isabel B A, et al. A spare parts model with cold-standby redundancy on system level[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(7): 985–991.
- [15] 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*, 2011, 33(4): 658–665. (Ruan M Z, Li Q M, Peng Y W, et al. Evaluation of equipment system availability for multi-echelon maintenance supply with cannibalization[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 33(4): 658–665.)
- [16] Sherbrooke C C. *Optimal inventory modeling of system: multi-echelon techniques*[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2004.
- [17] 毛德军, 李庆民, 阮旻智, 等. 编队防空系统任务可用度评估与保障方案优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(7): 1394–1402. (Mao D J, Li Q M, Ruan M Z, et al. System availability evaluation and support project optimization for anti-aircraft system of ship formation[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2011, 31(7): 1394–1402.)
- [18] Sherbrooke C C. *Estimation of the variance-to-mean ratio for AFLC recoverable items*[M]. Maryland: Sherbrooke & Associates, 1984.
- [19] 王乃超, 康锐, 程海龙. 基于马尔科夫过程的备件库存动态特性分析[J]. *兵工学报*, 2009, 30(7): 984–988. (Wang N C, Kang R, Cheng H L. Study on the dynamic characteristics of spare inventory based on Markov process[J]. *Acta Armanentarii*, 2009, 30(7): 984–988.)
- [20] 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, 33(8): 1799–1803. (Ruan M Z, Li Q M, Peng Y W, et al. Model of spare part fill rate for systems of various structures and optimization method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1799–1803.)
- [21] 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 N C, Kang R. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with fill rate as objective[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1043–1047.)