

DOI:10.13196/j.cims.2015.03.024

面向两级可修复备件库存系统的动态管理模型

王 慎^{1,2}, 李庆民³⁺, 王文斌⁴, 李 华¹, 刘任洋¹

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 海军 91115 部队, 浙江 舟山 316000;
3. 海军工程大学 科研部, 湖北 武汉 430033; 4. 海军 92857 部队, 北京 100161)

摘 要:在企业管理中,当使用现场备件需求率发生变化时,传统可修件库存策略往往造成备件资源配置不合理。为解决该问题,针对两级可修复备件库存系统,放宽备件分配与送修动态管理模型(Distribution and Repair in Variable Environments, DRIVE)中“完全串件系统”假设,建立了基于计划期末设备“停机数不大于允许值概率”及“期望可用度”指标的库存分配模型,并将横向库存调整和库存预分配作为预防库存滞留的资产均衡手段。为描述系统瞬时行为、评估不同库存策略,建立了便于扩展的双线程 Monte Carlo 仿真模型。在使用现场需求动态变化的条件下,对所建库存模型与传统模型进行了仿真实验。结果分析表明,保障效能相比传统模型有了明显提高,从而验证了模型的有效性。

关键词:备件;库存;动态管理;综合保障

中图分类号:V215.7 **文献标识码:**A

Dynamic management model oriented to two-echelon repairable-item spare parts inventory system

WANG Shen^{1,2}, LI Qing-min³⁺, WANG Wen-bin⁴, LI Hua¹, LIU Ren-yang¹

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. 91115 Troops of Navy, Zhoushan 316000, China; 3. Department of Scientific Research, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 4. 92857 Troops of Navy, Beijing 100161, China)

Abstract: To solve the problem that the unreasonable allocation of spare parts would be incurred by traditional repairable-item inventory policy when demands at operational sites changed dynamically in the enterprise management, the assumption of Complete Cannibalization in Distribution and Repair in Variable Environments (DRIVE) model was relaxed for two-echelon repairable-item inventory system. The two inventory distribution models were established respectively on the basis of end-of-horizon expected availability and probability of having tolerant number or fewer devices down. Lateral inventory transshipment and pre-distribution were presented as balance methods for asset position in prevention from inventory retention. To describe the transient behavior of item-repair/inventory system and evaluated the different inventory policies, extendable Monte-Carlo simulation model was established in dual-thread framework. In context of uncertain demands from dynamics of mission at operational sites, the simulation experiment was used to compare the proposed model with traditional model, and the result showed that the support effectiveness was improved remarkably, and the validity of proposed model was also verified.

Key words: spare parts; inventory; dynamic management; integrated logistics support

0 引言

可修复备件是指故障发生后能够通过维修而使

其功能恢复故障前状态的备件项目的统称。随着设备自动化、集成化要求的不断提高,可修复备件资源呈现出故障率高、消耗量低和价格昂贵等特点。据

收稿日期:2013-12-26;修订日期:2014-03-17。Received 26 Dec. 2013; accepted 17 Mar. 2014.

基金项目:国防预研基金资助项目(51304010206, 51327020105)。Foundation items: Project supported by the National Defence Pre-research Foundation, China (No. 51304010206, 51327020105).

有关资料显示^[1],在多层次复杂设备所属的所有部件中,20%的可修贵重器件占据了备件总经费的80%;在三种主要停机时间因素中,等待备件所造成的停机时间已经超过修复性维修和预防性维修的停机总时间,成为制约设备有效作业率提高的瓶颈。信息化条件下资产可视化技术的发展,使得获取设备使用现场的资产状态成为可能,利用这些信息构建以“合理配置、精确供应”为核心的备件保障体系,最大限度地提高设备的有效作业率,是当前综合保障工程的重要目标之一。

自 Sherbrooke 在 1968 年提出可修复备件控制多级技术(Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control, METRIC)理论以来,国内外针对可修件库存配置问题展开了大量研究,取得了一系列成果^[2-4]。但 METRIC 模型体系是在各使用现场需求率不变的假设下,对站点库存水平进行配置,从保障系统长期运行的角度保证效费比最优。在日常运作时,传统的可修件库存管理采用基于固定库存水平的(S-1, S)库存策略:设备使用现场(如生产企业)向后方送修一件的同时申请一件,后方修理厂按先到先服务(First Come, First Serve, FCFS)原则依次满足各使用现场的备件需求。当设备使用现场因任务变动或设备增减导致需求率发生较大变化时,上述策略容易造成库存堆积或设备可用度降低。这就需要模型在保障系统日常运作时,依据系统状态信息反馈,动态调整各站点的可修件库存水平。

针对备件库存适应性管理问题,国内外学者已进行了一定的理论研究。WONG 等考虑同级服务中心间的横向可修件供应关系,建立了多级两层可修件供应链分析模型^[5],ZHANG 等提出了基于完全共享库存策略的备件多点库存单向转运模型^[6]。上述文献将横向库存调整作为解决备件短缺的一种应急运输手段。SELCUK^[7]针对单项备件展开研究,建立了基于待维修件数的库存水平调整模型。CHEN 等^[8]针对有限计划期内需求率与回收率相关的情况,提出连续时变需求的可维修备件库存模型。ZHENG 等^[9]提出将备件库存在的各级故障设备之间进行分配的设备维修策略。ISAACSON 等^[10]于 1993 年提出可修复备件多级库存动态分析模型(Dynamic Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control, Dyna-METRIC 6),用于对不同保障策略进行评估。PYKE^[11]第一次综合考虑设备多层次结构、串件拼修、横向保障等因素,使

用 Dyna-METRIC 模型,对一个简单的库存动态管理模型进行了定性分析,结果表明,保障效能相比(S-1, S)策略有所提升。

目前,国外已投入实际应用的模型主要是 ABELL 等提出的备件分配与送修动态管理模型(Distribution and Repair in Virable Environments, DRIVE)^[3],它已由美国运通公司开发为商业软件,以解决串件拼修对策下两级备件保障系统的库存日常管理和故障件送修问题。MILLER 等^[12]曾进行过六个月的 DRIVE 模型现场试验,结果表明,在同样的备件配置方案下,采用 DRIVE 模型后可用设备数增加了 10%以上。WANG 等^[13]结合 DRIVE 模型理论,将日常保障系统运作分解为库存分配、故障件送修两部分,建立相应的优先级排序模型,在不降低 DRIVE 模型保障效能的同时,简化了求解难度。以上文献均假设设备各层级部件完全串件,以“停机数不大于允许值的概率”为目标函数。而一般设备中串件部件和非串件部件是混合在一起的,非串件部件又比较适合用期望可用度作为衡量保障效能的指标。为解决上述问题,将 DRIVE 模型扩展至一般设备,本文首先针对串件部件和非串件部件任意混合的三层级设备分解结构,分别建立了基于计划期末期望可用度(End-of-Horizon Availability, EHA)和设备停机数不大于允许值概率(End-of-Horizon Probability of having tolerant number or fewer devices down, EHP)指标的后备库存分配模型,将横向库存调整和库存预分配作为均衡备件资源分布、预防需求下降导致库存滞留的资产重分配手段。其次,根据 Dyna-METRIC 仿真框架,设计了一个便于扩展的 Monte Carlo 仿真模型,能够对多种库存管理策略进行分析。最后,将不同可用度目标下的备件初始配置方案输入仿真模型,在各使用现场需求不断变化的条件下,对(S-1, S), EHA 和 EHP 三种模型的保障效能进行了实验分析。

1 问题描述与假设

1.1 问题描述

典型三层级设备分解结构如图 1 所示,其中设备(equipment)由串件及非串件的现场可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU)组成,配置在使用现场(Operational Site, OP)。设备发生故障时,现场维修部门拆卸、更换故障 LRU,并将不能维修的故障件送修至后方修理厂(depot)。使用现场备件申

请不采用(S-1,S)策略,即送修一件就向后方申请一件,而是在每个“分配决策周期”开始向后方修理厂报告一次当前的资产状态(asset position)。修理非串件 LRU 造成的设备故障时,若现场没有可用库存,则发生一次 LRU 短缺(空缺),直接计入使用现场资产状态。对串件 LRU 造成的设备故障,若没有库存,则从其他故障设备上拆卸可用部件;只有当现场没有库存且其他故障设备上无完好部件时,才发生一次 LRU 短缺(空缺),并计入使用现场资产状态。

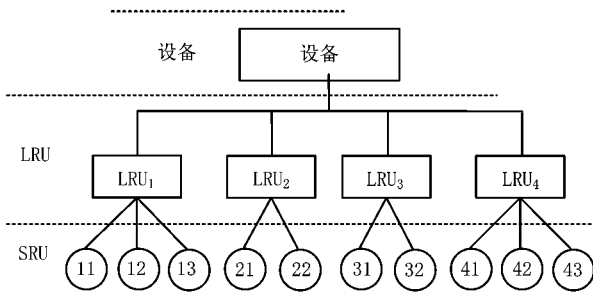


图1 设备系统分解结构

LRU 由串件及非串件车间可更换单元(Shop Replaceable Unit, SRU)组成,故障是其所属 SRU 的故障导致的,在使用现场有一定的修复概率。其现场 SRU 换件修理过程与设备中的 LRU 换件修理过程类似,并称现场因 SRU 短缺而导致修理延误的故障 LRU 为待维修件(AWaiting Parts, AWP),计入使用现场资产状态。

后方修理厂在库存分配时,不采用由使用现场需求驱动的 FCFS 原则,而是按计划主动发送备件:每个“分配决策周期”开始,后方修理厂根据“分配计划期”末预计达到的保障性指标收益,对使用现场的优先级进行排序。当决策周期内有可用库存时,后方修理厂就按照优先级排序表,主动将备件发送到各使用现场。整个保障系统运行过程如图 2 所示。

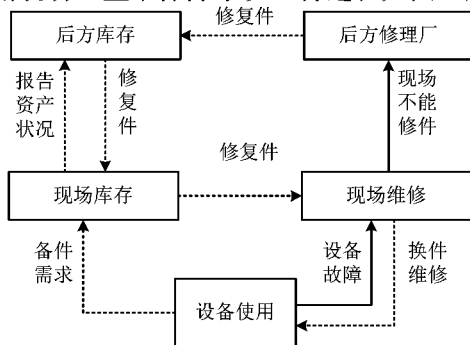


图2 两级备件维修供应系统保障过程

1.2 模型概念

本文模型涉及到如下重要概念:

(1)后方修理厂分配决策周期 T_F 决策周期是指由管理人员确定的模型运行时间间隔。该参数越小,模型对备件资源分布的调整就越合理,但实际工作中必须考虑数据统计滞后造成的影响,为此,本文将数据滞后设为 1 天, T_F 设定为 1 星期^[13]。

(2)使用现场分配计划期 H_{FPI} 分配计划期是指从决策制定到发生作用的时间间隔,随决策作用目标的不同而不同。例如,后方修理厂运行分配模型后,只有库存发送到设备使用现场,才会对设备保障性指标产生影响,使用现场 l 的分配计划期即为“后方修理厂运行分配模型”到“现场收到备件”的时间间隔。

1.3 模型假设

本文建立可修件库存动态管理模型时,在如下假设前提下进行:

(1)分配模型求解时,假设分配计划期内发生的运输任务均在计划期结束前完成^[13]。该假设造成的误差可在下个分配周期内得到弥补。

(2)一段时间内的部件故障数服从负二项分布,且不同部件间的故障数、短缺数相互独立^[12];故障 LRU 最多只含一个串件 SRU 短缺(空缺)^[3]。

(3)模型运行时要求根据使用现场的资产状态进行决策,因此,假设后方修理厂能够掌握决策周期开始时各使用现场的停机设备数、备件库存数和待维修件数。

2 保障效能指标

在完全串件系统中,由于部件空缺能够在设备间进行集中合并,可以很方便地将使用现场的 LRU 备件短缺数与设备停机数联系起来,因此,DRIVE 模型在库存分配时根据“计划期末设备停机数不大于允许值的概率(EHP)”指标,确定不同使用现场的分配优先级排序值^[3]。但对于非串件部件,因不能根据备件短缺数直接计算故障设备数,通常以“计划期末期望可用度(EHA)”作为衡量保障效能的指标。为了能够对一般系统条件下的使用现场分配优先级进行排序,本章首先推导 EHP 和 EHA 的计算公式。

设 D_l 为使用现场 l 分配计划期末的设备停机数, N_l 为使用现场 l 的设备配置数,由可用度定义可知,使用现场 l 计划期末的期望可用度

$$A_{o,l} = 1 - \frac{E(D_l)}{N_l} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} E(D_l) &= \sum_{D=0}^{\infty} [D \cdot P(D_l = D)] \\ &= P(D_l = 1) + 2P(D_l = 2) + 3P(D_l = 3) + \dots \\ &= P(D_l = 1) + P(D_l = 2) + P(D_l = 3) + \dots \\ &\quad + P(D_l = 2) + P(D_l = 3) + \dots \\ &\quad + P(D_l = 3) + \dots; \end{aligned} \quad (2)$$

即

$$E(D_l) = \sum_{D=0}^{\infty} P(D_l > D) = \sum_{D=0}^{\infty} [1 - P(D_l \leq D)] \quad (3)$$

式(3)为无穷级数(2)按行加和的结果。由于 D_l 不能大于使用现场 l 的设备配置数 N_l , 式(3)可转化为

$$\begin{aligned} E(D_l) &= \sum_{D=0}^{N_l} [1 - P(D_l \leq D)] \\ &= N_l - \sum_{D=0}^{N_l} P(D_l \leq D). \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1), 有

$$A_{o,l} = \frac{1}{N_l} \sum_{D=0}^{N_l} P(D_l \leq D). \quad (5)$$

则求解 $A_{o,l}$ 转化为求解 D_l 的累积概率分布函数 $P(D_l \leq D)$ 。

设 D_{ncl} 为计划期末包含非串件 LRU 空缺的故障设备数, D_d 为计划期末包含串件 LRU 空缺的故障设备数。则:

(1) 当 $D_d \leq D_{ncl}$ 时, 串件 LRU 空缺能够完全集中到包含非串件 LRU 空缺的故障设备上, 有 $D_l = D_{ncl}$ 。

(2) 当 $D_d > D_{ncl}$ 时, 串件 LRU 空缺可以集中到 D_{ncl} 个包含非串件 LRU 空缺的故障设备上, 余下 $D_d - D_{ncl}$ 个故障设备仅包含串件 LRU 空缺, 有 $D_l = D_{ncl} + D_d - D_{ncl}$ 。

因此 $D_l = \max(D_{ncl}, D_d)$, 其累积概率分布函数为

$$P(D_l \leq D) = P(D_{ncl} \leq D)P(D_d \leq D). \quad (6)$$

设 $Sub(sys)$ 为设备所属 LRU 的种类集合, $Sub_c(sys)$ 为串件 LRU 的种类集合, $Sub_n(sys)$ 为非串件 LRU 的种类集合, $Sub(sys) = Sub_c(sys) \cup Sub_n(sys)$ 。下面分别对累积分布函数 $P(D_{ncl} \leq D)$

和 $P(D_d \leq D)$ 进行推导。

2.1 计划期末包含非串件 LRU 空缺的故障设备数

由于非串件拼修策略下 LRU 空缺不能转移, 计划期末包含非串件 LRU 空缺的故障设备数 D_{ncl} 服从二项分布 $B(N_l, P_{ncl})$, 其中: N_l 为使用现场 l 的设备配置总数, P_{ncl} 为任一设备上存在非串件 LRU 空缺的概率。一般情况下使用现场 l 中的设备配置数较大、分配计划期较短, 从而 P_{ncl} 较小, 因此, D_{ncl} 近似服从 $\mu_{ncl} = N_l \times P_{ncl}$ 的泊松分布, 其累积概率分布为

$$P(D_{ncl} \leq d) = \exp(-\mu_{ncl}) \cdot \sum_{k=0}^d \frac{(\mu_{ncl})^k}{k!} \quad (7)$$

根据 1.3 节的假设(2), 不同部件间的短缺数相互独立, 可得

$$P_{ncl} = 1 - \prod_{j \in Sub_n(sys)} \left(1 - \frac{EBO_{jl}}{N_l Q_j}\right)^{Q_j} \quad (8)$$

式(8)中 Q_j 为 LRU _{j} 的装机数, EBO_{jl} 为计划期末 LRU _{j} 的期望短缺数。根据幂级数展开可知, 当 $x \ll 1$ 时, $\ln(1-x) \approx -x$ 。而当可用度在 70% 以上时有相应的 $(EBO_{jl}/N_l Q_j) \ll 1^{[3]}$, 作如下近似

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{EBO_{jl}}{N_l Q_j}\right)^{Q_j} &= \exp\left[Q_j \cdot \ln\left(1 - \frac{EBO_{jl}}{N_l Q_j}\right)\right] \\ &\approx \exp\left[-\frac{EBO_{jl}}{N_l}\right]. \end{aligned} \quad (9)$$

从而 P_{ncl} 可近似为

$$P_{ncl} \approx 1 - \exp\left[-\left(\sum_{j \in Sub_n(sys)} EBO_{jl}\right)/N_l\right]. \quad (10)$$

计划期末 LRU _{j} 的短缺数

$$\begin{aligned} BO_{jl} &= \\ &\begin{cases} X_{jl} + Z_{jl} + BO_{jl}^0 - s_{jl}, & X_{jl} + Z_{jl} > s_{jl} - BO_{jl}^0; \\ 0, & X_{jl} + Z_{jl} \leq s_{jl} - BO_{jl}^0. \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中 BO_{jl}^0 为使用现场 l 分配计划期初 LRU _{j} 的短缺数, s_{jl} 为计划期内的累积可用库存, Z_{jl} 为计划期内新增 SRU 空缺造成的 LRU _{j} 待维修件数, X_{jl} 为计划期内预计发送到后方的 LRU _{j} 故障件数, 则 BO_{jl} 的均值为

$$EBO_{jl} = \sum_{x=1}^{\infty} x \cdot P(X_{jl} + Z_{jl} = s_{jl} - BO_{jl}^0 + x). \quad (12)$$

随机变量之和 $X_{jl} + Z_{jl}$ 的累积概率分布 $P(X_{jl} + Z_{jl} \leq y)$ 可改写为如下卷积形式:

$$P(X_{jl} + Z_{jl} \leq y) = \sum_{\tau=0}^y P(X_{jl} = \tau) \cdot$$

$$P(Z_{jl} \leq y - \tau). \quad (13)$$

在假设(2)下, X_{jl} 服从负二项分布。根据使用现场 l 分配计划期均值 \bar{H}_{FPl} 、设备每天工作时间 $DW_l(t)$ 、平均故障间隔 $MTBF_j$ 、占空比 DC_j , 则 LRU _{j} 计划期内的平均故障数

$$\lambda_{jl} = [DC_j \cdot H_{FPl} \cdot Q_j \cdot N_l \cdot \int_{H_{FPl}} DW_l(t) dt] / MTBF_j. \quad (14)$$

由后方修理厂分配决策周期 T_F 、使用现场 l 向后方申请备件的时间 OST_l , 可得

$$\bar{H}_{FPl} = 0.5T_F + OST_l. \quad (15)$$

设 $NRTS_{jl}$ 为 LRU _{j} 在使用现场 l 不能维修的概率, 则 X_{jl} 的均值为

$$E(X_{jl}) = \lambda_{jl} \cdot NRTS_{jl}. \quad (16)$$

X_{jl} 差均比由下式计算^[3]

$$VTMR = 1 + 0.14 \cdot (EX_{jl})^{0.5}. \quad (17)$$

则有

$$P(X_{jl} = \tau) = \binom{a + \tau - 1}{\tau} b^\tau (1 - b)^a. \quad (18)$$

其中参数 a, b 用下式计算:

$$\begin{cases} a = E(X_{jl}) / (VTMR - 1); \\ b = (VTMR - 1) / VTMR. \end{cases} \quad (19)$$

设 D_{jl} 为计划期末包含 SRU 空缺的 LRU _{j} 待维修件数、 D_{jl}^0 为计划期初 LRU _{j} 待维修件数, 则

$$Z_{jl} = D_{jl} - D_{jl}^0. \quad (20)$$

概率分布 $P(Z_{jl} \leq z)$ 可改写为

$$P(Z_{jl} \leq z) = P(D_{jl} \leq z + D_{jl}^0). \quad (21)$$

至此, 若 D_{jl} 的累积概率分布 $P(D_{jl} \leq d)$ 已知, 则联立式(7)~式(21)可求得 $P(D_{ncl} \leq D)$ 。

2.2 计划期末包含串件 LRU 空缺的故障设备数

因串件 LRU 空缺可以集中在已故障设备上, 则当 $BO_{jl} \leq D \times Q_j$ 且 $j \in Sub_c(sys)$ 时, 有设备停机数 $D_a \leq D$, 可知

$$P(D_a \leq D) = \prod_{j \in Sub_c(sys)} P(BO_{jl} \leq D \cdot Q_j). \quad (22)$$

将式(11)代入 $P(BO_{jl} \leq D \times Q_j)$, 有

$$P(BO_{jl} \leq D \cdot Q_j) = P(X_{jl} + Z_{jl} \leq D \cdot Q_j + s_{jl} - BO_{jl}^0). \quad (23)$$

类似式(13), 式(23)可改写为卷积形式

$$P(X_{jl} + Z_{jl} \leq D \cdot Q_j + s_{jl} - BO_{jl}^0) = \sum_{\tau=0}^{y_l Q_j + s_{jl} - BO_{jl}^0} P(X_{jl} = \tau) P(Z_{jl} \leq y_l Q_j + s_{jl} - BO_{jl}^0 - \tau). \quad (24)$$

式中 X_{jl} 的概率分布律 $P(X_{jl} = \tau)$ 、 Z_{jl} 的累积概率分布 $P(Z_{jl} \leq z)$ 与 2.1 节的计算方法相同。同样, 若 D_{jl} 的累积概率分布 $P(D_{jl} \leq d)$ 已知, 则可求得 $P(D_{cl} \leq D)$ 。

2.3 计划期末包含 SRU 空缺的 LRU 待维修件数

由 2.1 节~2.2 节的分析可知, 只需求出计划期末 LRU 待维修件数 D_{jl} 的累积概率分布 $P(D_{jl} \leq d)$, 就可以求得 D_{cl} 和 D_{ncl} 的累积概率分布。设 D_{jcl}/D_{jncl} 分别为计划期末包含串件/非串件 SRU 空缺的 LRU _{j} 待维修件数。类似式(6), 可得 D_{jl} 累积分布函数为

$$P(D_{jl} \leq d) = P(D_{jncl} \leq d) \cdot P(D_{jcl} \leq d). \quad (25)$$

根据假设(2), 故障 LRU 最多只含有一个非串件 SRU 空缺, 则有

$$D_{jncl} = \sum_{k \in Sub_{nc}(j)} BO_{kl}. \quad (26)$$

根据文献[3]可知, 对单站点而言, 当 SRU 故障相互独立时, 多个 SRU 短缺加和形成的随机变量, 可用差均比判断其分布类型: 差均比等于 1 时为泊松分布, 大于 1 时为负二项分布。由式(26)可知 D_{jncl} 均值/方差为 $Sub_{nc}(j)$ 内 BO_{kl} 均值/方差之和, 分布类型根据差均比进行选择。设 X_{kl} 为计划期内站点 l 发送到后方的 SRU _{k} 故障件数, BO_{kl}^0 为计划期初的 SRU _{k} 短缺数, s_{kl} 为计划期内 SRU _{k} 的累积可用库存, 则

$$BO_{kl} = \begin{cases} X_{kl} + BO_{kl}^0 - s_{kl}, & X_{kl} > s_{kl} - BO_{kl}^0; \\ 0, & X_{kl} \leq s_{kl} - BO_{kl}^0. \end{cases} \quad (27)$$

式中: BO_{kl}^0 表示计划期初 SRU _{k} 的短缺数, s_{kl} 为累积可用库存。 X_{kl} 为发送到修理厂的 SRU _{k} 计划期内的故障件数, 服从负二项分布。则 BO_{kl} 的均值、二阶原点矩、方差分别为

$$\begin{aligned} EBO_{kl} &= \sum_{x=1}^{\infty} x \cdot P(X_{kl} = s_{jl} - BO_{kl}^0 + x); \quad (28) \\ E(BO_{kl})^2 &= \sum_{x=1}^{\infty} x^2 \cdot P(X_{kl} = s_{jl} - BO_{kl}^0 + x); \quad (29) \end{aligned}$$

$$VBO_{kl} = E(BO_{kl})^2 - (EBO_{kl})^2. \quad (30)$$

根据 LRU _{j} 故障间隔时间 $MTBF_j$ 、计划期内故障均值 λ_{jl} 、在使用现场不能维修的概率 $NRTS_{jl}$ 、SRU _{k} 故障间隔时间 $MTBF_k$ 、占空比 DC_k 、装机数 Q_k , 可得 X_{kl} 的均值为

$$E(X_{kl}) = \lambda_{jl} \cdot DC_k \cdot Q_k \cdot MTBF_k.$$

$$(1 - NRTS_{jl}) / MTBF_j. \quad (31)$$

则 X_{kl} 的分布律为

$$P(X_{kl} = \tau) = \binom{a + \tau - 1}{\tau} b^\tau (1 - b)^a. \quad (32)$$

式中参数 a, b 根据式(17)和式(19)计算。

类似串件 LRU 空缺与设备停机数的关系,可得计划期末包含串件 SRU 空缺的待维修件数 D_{jcl} 分布满足

$$P(D_{jcl} \leq d) = \prod_{k \in Sub_c(j)} P(BO_{kl} \leq d \cdot Q_k). \quad (33)$$

由式(27)中的随机变量间关系,可得

$$P(D_{jcl} \leq d) = \prod_{k \in Sub_c(j)} P(X_{kl} \leq d \cdot Q_k + s_{kl} - BO_{kl}^0). \quad (34)$$

式(34)等式右边 X_{kl} 的累积概率分布函数可由式(32)加和得到。至此,联立式(7)~式(34),即可求得使用现场 l 计划期末设备停机数 D_l 的分布 $P(D_l \leq D)$ 。将一组 $\{P(D_l \leq D), D = 0, \dots, N_l\}$ 代入式(5),可得使用现场 l 的计划期末期望可用度 $A_{o,l}$ 。

2.4 最小 SRU 备件包

当使用现场 LRU 待维修件数 $D_{jl} > 0$ 时,只需补齐相应的 SRU 空缺就能减少现场 LRU 的短缺数,进而减少故障设备数。因此,当后方修理厂向使用现场发送备件时,若 $D_{jl} > 0$,则优先发送最小 SRU 备件包。设 LRU_j 包含 n 种 SRU 分组件,使用现场 l 待维修件所需的最小 SRU 备件包 (Min SRU Package, MSP) 为 MSP_{jl} 、最小非串件 SRU 备件包为 MSP_{jncl} 、最小串件 SRU 备件包为 MSP_{jcl} 。

规定串件 SRU 空缺向包含非串件 SRU 空缺的故障 LRU 集中时,根据一定顺序进行覆盖,如优先集中至空缺分组件 MTBF 最小的故障 LRU 上,则可按以下步骤确定 MSP_{jl} 中的 SRU 备件种类和数量:

步骤 1 设分组件 SRU_k 单机安装数为 Q_k ,使用式(35)计算包含当前短缺(空缺) BO_{kl} 的待修件数量 $D_{kicl}, k = 1, \dots, n$ 。式中运算符 \square 为取整函数

$$D_{kicl} = \left\lceil \frac{BO_{kl} + Q_k - 1}{Q_k} \right\rceil. \quad (35)$$

步骤 2 用式(36)计算包含所有串件 SRU 空缺的待修件数量 D_{jcl} ,

$$D_{jcl} = \max_{k=1, \dots, n} (D_{kicl}). \quad (36)$$

步骤 3 逐个比较 D_{jcl} 与 $\{D_{kicl}\}$ 中的元素,若存在 k^* 使得 $D_{k^*icl} = D_{jcl}$,则 MSP_{jl} 包含 SRU_{k^*} 的空缺,其数量为 $BO_{k^*l} - Q_{k^*} (D_{jcl} - 1)$ 。记录 MSP_{jl} 中的所有 SRU 种类和数量。

步骤 4 在集合 $\{BO_{kl} > 0 \cap k \in Sub_n(j)\}$ 中选出 MTBF 最大的 SRU_k ,由于故障 LRU 最多只含一个非串件 SRU 空缺, MSP_{jncl} 包含该组件且数量为 1。

步骤 5 当 $D_{jcl} > D_{jncl}$ 时, $MSP_{jl} = MSP_{jcl}$; 当 $D_{jcl} < D_{jncl}$ 时, $MSP_{jl} = MSP_{jncl}$; 当 $D_{jcl} = D_{jncl}$ 时, $MSP_{jl} = MSP_{jncl} + MSP_{jcl}$ 。

3 库存分配模型

如何确定决策周期内使用现场的优先级排序,是后方修理厂库存分配决策的关键。现场实验表明^[12],以保障性指标为目标函数,依据使用现场的 LRU 库存增加边际效益 V_{jl} 得到的排序方案,能够有效提高保障效能。为此,对计划期末“停机数不大于允许值 $D_{max,l}$ 概率 (EHP)”及“期望可用度 (EHA)”指标的边际效益公式进行推导。

根据假设 1,计算边际效益时,使用现场 LRU 库存 s_{jl} 为上一周期正在运输途中的备件数、本周期初库存与本周期内计划发送的备件数之和。由第 2 章中的推导可知, $P(D_l \leq D)$ 为库存序列 $\{s_{jl}\}$ 的函数,用 $P(D_l \leq D | \{s_{jl}\})$ 表示。若使用现场保障性指标为 EHP,则保障系统指标为各使用现场指标之积,取对数后得:

$$\ln A = \sum_{l \in OP} \ln [P(D_l \leq D_{max,l} | \{s_{jl}\})]. \quad (37)$$

则边际效益

$$V_{jl} = \Delta \ln A = \ln [P(D_l \leq D_{max,l} | s_{jl} + 1) - \ln [P(D_l \leq D_{max,l} | s_{jl})]] = \begin{cases} \ln [P(D_{ncl} \leq D_{max,l} | s_{jl} + 1)] - \ln [P(D_{ncl} \leq D_{max,l} | s_{jl})], & j \in Sub_n(sys); \\ \ln [P(BO_{jl} \leq D_{max,l} \cdot Q_j | s_{jl} + 1)] - \ln [P(BO_{jl} \leq D_{max,l} \cdot Q_j | s_{jl})], & j \in Sub_c(sys). \end{cases} \quad (38)$$

若使用现场保障性指标为 EHA,则保障系统指标可表示为:

$$A = \frac{\sum_{l \in OP} N_l \cdot A_{o,l}}{\sum_{l \in OP} N_l}. \quad (39)$$

边际效益 V_{jl} 可近似用“可用设备数增量”

表示^[3],

$$V_{jl} \approx \Delta A_{o,l} \cdot N_l = N_l \cdot \sum_{D=0}^{N_l} [P(D_l \leq D | s_{jl} + 1) - P(D_l \leq D | s_{jl})]. \quad (40)$$

用边际分析法迭代时,希望尽量利用上一步的运算结果,为此,对等号右边中括号内的部分进行如下变换:

$$P(D_l \leq D | s_{jl} + 1) - P(D_l \leq D | s_{jl}) = \exp[\ln P(D_l \leq D | s_{jl} + 1)] - \exp[\ln P(D_l \leq D | s_{jl})]. \quad (41)$$

$$V_{jl} \approx \begin{cases} N_l \sum_{D=0}^{N_l} P(D_l \leq D | s_{jl}) \cdot \{\ln[P(D_{nl} \leq D | s_{jl} + 1)] - \ln[P(D_{nl} \leq D | s_{jl})]\}, & j \in \text{Sub}_n(\text{sys}); \\ N_l \sum_{D=0}^{N_l} P(D_l \leq D | s_{jl}) \cdot \{\ln[P(BO_{jl} \leq D \cdot Q_j | s_{jl} + 1)] - \ln[P(BO_{jl} \leq D \cdot Q_j | s_{jl})]\}, & j \in \text{Sub}_c(\text{sys}). \end{cases} \quad (44)$$

利用边际效益确定后方修理厂库存分配时,使用现场优先级排序表的步骤如下:

步骤 1 使用 2.1 节的方法计算当前累积库存下各使用现场计划期末的保障性指标,已达到目标值的使用现场不再参与优先级排序。

步骤 2 根据边际效益 V_{jl} 公式,计算各使用现场各 LRU 增加一件时的边际效益,找出最大值 V_{\max} 。

步骤 3 设 V_{\max} 对应的站点和备件项目标识分别为 l_0 和 j_0 ,在分配排序表中增加一条记录,并将站点 l_0 中备件项目 j_0 的累积库存增加一件。若站点 l_0 待维修件数 $D_{j_0 l_0} > 0$,则还要根据 2.4 节的方法计算 LRU _{j_0} 待维修件所需最小的 SRU 备件包,补齐并更新 $\{BO_{kl_0} | k \in \text{Sub}(j_0)\}$ 。

步骤 4 重复上述步骤,直至所有使用现场的保障性指标均达到目标值,得到不区分备件种类的分配排序表。

以可用度为目标函数,生成的分配排序如表 1 所示。表中:“LRU TYPE”、“OP ID”表示备件项目和接收备件的站点;字段“Readiness”表示使用现场 l 中的 LRU _{j} 累积库存增加一件后的保障性指标。“Requisition”表示使用现场对 LRU _{j} 产品树的需求:设 LRU₁ 含有三个 SRU 分组件,字段“Requisition”第一行记录为 110,表示 SRU₁、SRU₂ 各一件;第三行记录为 1,表示一件 LRU₁ 完整件。

将表 1 中字段“LRU TYPE”相同的记录按顺序提取出来,就得到各类 LRU 产品的分配排序表

由于 $\Delta \exp[\ln f(x)]$ 有微分近似:

$$\begin{aligned} \Delta \exp[\ln f(x)] &\approx \frac{d}{dx} [\exp[\ln f(x)]] \cdot \Delta x \\ &= \exp[\ln f(x)] \cdot [\ln f(x)]' \cdot \Delta x \approx \\ &f(x) \cdot \Delta[\ln f(x)]. \end{aligned} \quad (42)$$

则有

$$\begin{aligned} &\exp[\ln P(D_l \leq D | s_{jl} + 1)] - \\ &\exp[\ln P(D_l \leq D | s_{jl})] \\ &\approx P(D_l \leq D | s_{jl}) \cdot \{\ln[P(D_l \leq \\ &D | s_{jl} + 1)] - \ln[P(D_l \leq D | s_{jl})]\}. \end{aligned} \quad (43)$$

将式(6)、式(41)、式(43)依次代入式(40),有

(如表 2)。表 2 中:字段“Priority”表示分配 LRU _{j} 库存时的使用现场优先级排序;“CUM”表示到当前记录为止累计发送的备件个数。

表 1 库存分配排序表

Priority	LRU TYPE	OP ID	Requisition	Readiness
1	1	3	110	0.686 3
2	2	3	1	0.728 7
3	1	4	1	0.760 6

表 2 LRU1 库存分配排序表

Priority	LRU TYPE	OP ID	Readiness	Requisition	CUM
1	1	3	0.686 3	110	1
2	1	4	0.760 6	1	2

库存分配过程如下:每个分配周期开始生成各备件的分配优先级排序表,周期内连续检查后方修理厂的库存,若某时刻后方修理厂中的 LRU _{j} 库存 $S_j > 0$ 且分配优先级排序表中的记录数 $R_{\text{total},j} > 0$,就将库存发送给 LRU _{j} 分配优先级排序表中前 $\min\{S_j, R_{\text{total},j}\}$ 条记录对应的使用现场,并删除相应记录。对于使用现场相同的记录,累计件数后批量发送。

4 横向调整模型

后方修理厂运行分配模型时,根据现场资产状态的反馈进行优先级排序,能够在一定程度上调节备件资源分布。但当某些使用现场因任务变动出现需求率严重下降时,其多余库存仍将滞留该站点。

这就需要在运行分配模型前先进行库存横向调整,以均衡各站点的资产水平。使用横向调整后,使用现场 l 中的 LRU_j 计划期内累积可用库存 s_{jl} 要加上“其他站点发给本站点的备件数”,减去“本站点发给其他站点的备件数”。

设使用现场 l 的保障性指标目标值为上限 $\rho_{U,l}$,最低保障性要求为下限 $\rho_{L,l}$,使用现场计划期末保障性指标高于上限 $\rho_{U,l}$ 的站点组成集合 OP_U ,指标值低于下限 $\rho_{L,l}$ 的站点组成集合 OP_L 。若 OP_U, OP_L 均不为空集,则进行库存横向调整。

(1)生成备件调出排序表

具体步骤如下:

步骤 1 根据边际效益 V_{jl} 表达式,计算 OP_U 中各使用现场的各 LRU 减少一件时的边际效益,并找出最小值 V_{\min} 。

步骤 2 设 V_{\min} 对应的站点和备件项目标识分别为 l_0 和 j_0 ,在备件横向调出排序表中增加一条记录,并将站点 l_0 中备件项目 j_0 的累积库存减少一件。

步骤 3 计算站点 l_0 在当前累积库存下的保障性指标,若低于上限 $\rho_{U,l}$,则移出 OP_U 。

步骤 4 重复步骤 1~步骤 3,直至 OP_U 为空集。所得备件调出排序表如表 3 所示。

表 3 备件横向调出排序表

Priority	LRU TYPE	OP ID	Readiness
1	3	1	0.988 2
2	1	2	0.983 5
3	3	2	0.980 1

(2)生成备件横向调入排序表(如表 4)

具体步骤如下:

步骤 1 根据边际效益 V_{jl} 表达式,计算 OP_L 中各使用现场的各 LRU 增加一件时的边际效益,并找出最大值 V_{\max} 。

步骤 2 设 V_{\max} 对应的站点和备件项目标识分别为 l_0 和 j_0 ,在备件横向调入排序表中增加一条记录,并将站点 l_0 中备件项目 j_0 的累积库存增加一件。

步骤 3 计算站点 l_0 在当前累积库存下的保障性指标,若高于下限 $\rho_{L,l}$,则移出 OP_L 。

步骤 4 重复步骤 1~步骤 3,直至 OP_L 为空集。所得备件调入排序表如表 4 所示。

每个分配周期内仅进行一次库存横向调整,其过程如下:分配周期开始,在库存分配模型运行前,

根据各使用现场资产状况生成备件调入、调出排序表。从调入排序表中的第一条记录 R_1^{in} 开始,在调出排序表中,按优先级排序查看是否有记录满足其备件需求,若存在记录 $R_{*}^{\text{out}} \cdot (\text{LRUTYPE}) = R_1^{\text{in}} \cdot (\text{LRUTYPE})$,则 $R_{*}^{\text{out}} \cdot (\text{OPID})/R_1^{\text{in}} \cdot (\text{OPID})$ 中相应备件项目的计划期内累积可用库存减少/增加一件且安排一次运输任务,并删除记录 R_1^{in} 和 R_{*}^{out} 。若调出排序表没有一条记录能够满足 R_1^{in} 的需求,则执行调入排序表中的下一条记录。

表 4 备件横向调入排序表

Priority	LRU TYPE	OP ID	Readiness
1	1	3	0.686 3
2	2	3	0.728 7
3	1	4	0.760 6

5 预分配模型

由于库存横向调整只在使用现场间进行,调整后有些使用现场保障性指标仍可能低于下限 $\rho_{L,l}$ 。因此,在按边际效益进行库存分配前,还要纠正站点间资产分布不平衡的状况,对资产状况过低的站点优先分配。若库存横向调整执行后集合 OP_L 仍不为空集,则按如下步骤生成库存预分配排序表:

步骤 1 若当前 OP_L 不为空集,则选出保障性指标最低的站点 l_0 。

步骤 2 根据边际效益 V_{jl} 表达式,计算使用现场 l_0 各 LRU 增加一件时的边际效益,并找出最大值 V_{\max} 。

步骤 3 设 V_{\max} 对应的备件标识为 j_0 ,按第 3 章中步骤 3 的方法,在预分配排序表中增加一条关于 l_0 和 j_0 的记录。

步骤 4 计算站点 l_0 在当前累积库存下的期望可用度,若高于下限 $\rho_{L,l}$,则移出 OP_L 。重复步骤 1~步骤 4,直至 OP_L 为空集

设使用现场 OP_3, OP_4 的可用度下限为 0.75,根据上述步骤生成的库存预分配排序表如表 5 所示。分配周期内先执行预分配排序表,再执行分配排序表。

表 5 库存预分配排序表

Priority	LRU TYPE	OP ID	Requisition	Readiness
1	1	3	110	0.686 3
2	2	3	1	0.728 7

6 仿真模型

根据备件库存动态分析模型(Dyna-METRIC)的原理,设计一个便于扩展的双线程 Monte Carlo 仿真模型,能够对多种库存管理策略进行分析,仿真处理流程如图 3 所示。仿真开始时,根据需要选择

要实验的库存管理模型,并初始化保障参数。仿真进行时,OP 线程完成随机故障抽取、故障件运输、备件接收等进程,驱动模型运转。Depot 线程在决策周期初运行库存分配模型,进行横向库存调整;在决策周期内,根据使用现场排序安排备件发送,并接收现场发来的故障件。

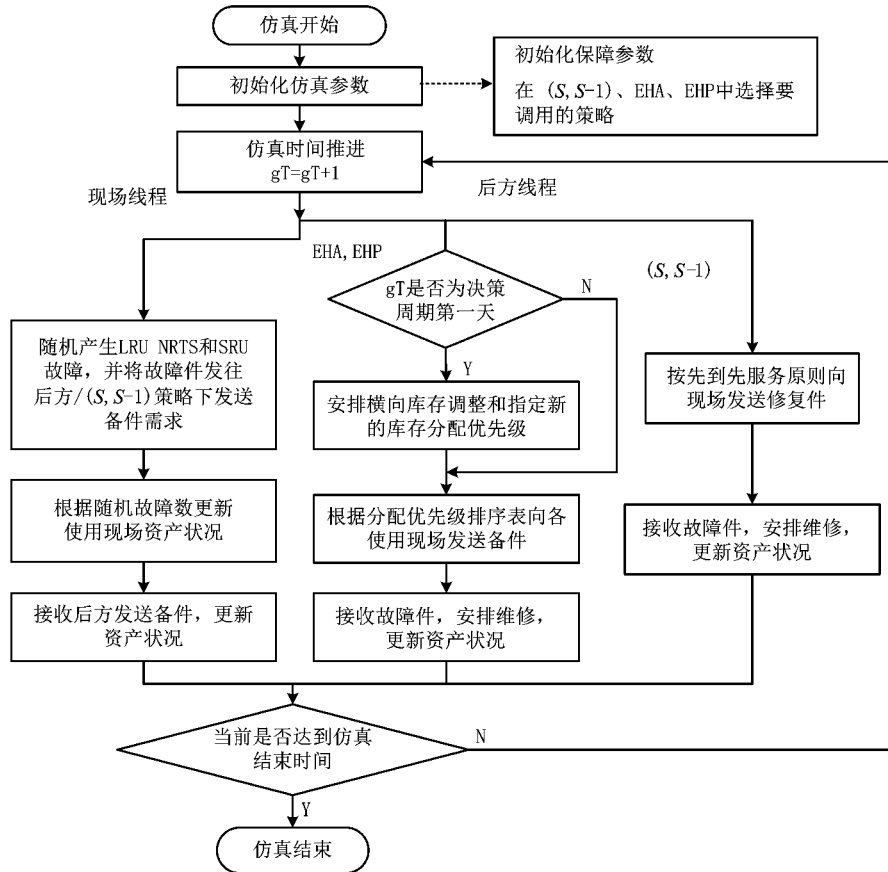


图3 两级备件维修供应系统仿真模型处理流程

7 仿真实验

设备备件保障系统由后方修理厂、设备使用现场 OP_1, OP_2 和 OP_3 组成,设备在各使用现场的配备数量分别为[20,15,18]。使用现场有高、中、低三种强度任务模式,单个设备每周平均开机时间分别为 60 h,40 h,20 h。 OP_1, OP_2 和 OP_3 每执行 4 周就变换一次任务模式,执行顺序分别为“高中低”、“中高低”、“低高中”,任务剖面如图 4 所示。

设备系统结构如图 1 所示,部件保障信息参数如表 6 所示,其中:Cannibalization 为枚举类型,1 表示该部件可串件,0 表示不可串件。

使用备件优化配置软件 VMTERIC,生成期望可用度为 0.814 8,0.860 7,0.914 6 时的备件配置

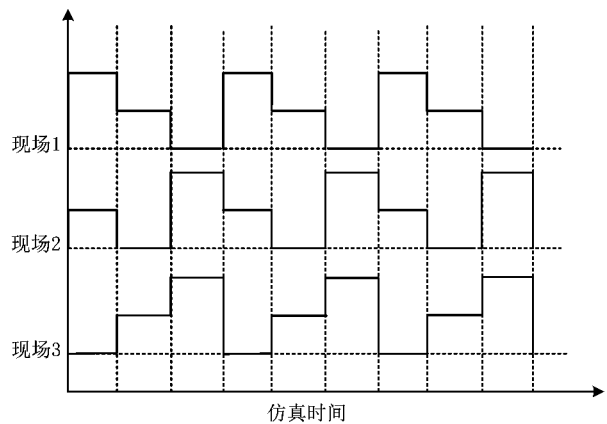


图4 使用现场任务剖面

方案(如表 7),其中“0/1/2”为不同配置方案下的库存水平。

把上述备件配置方案输入 $(S-1, S)$ 、EHA、EHP库存策略下的仿真模型中,运行1 000 d后整个保障系统的可用度随时间变化的曲线如图5所示。仿真模型的长期运行结果均值为期望可用度近似值,则不同库存管理策略下的期望可用度对比如

表6 备件保障信息参数

部件	MTBF _j	Z _j	DC _j	T _j	NRTS _{j,OP}	Price _j	Cannibalization
LRU ₁	445	1	0.8	11	0.57	120 700	0
LRU ₂	565	2	0.8	10	0.63	76 800	1
LRU ₃	495	1	0.8	12	0.67	55 400	0
LRU ₄	375	3	0.8	10	0.55	93 300	1
SRU ₁₁	2 500	2	0.7	5	1	15 700	1
SRU ₁₂	1 700	1	0.7	7	1	40 800	0
SRU ₁₃	2 200	1	0.7	7	1	18 300	0
SRU ₂₁	2 100	2	0.7	8	1	10 200	1
SRU ₂₂	2 500	1	0.7	4	1	9 600	0
SRU ₃₁	1 900	2	0.7	5	1	7 700	1
SRU ₃₂	2 300	1	0.7	3	1	8 900	0
SRU ₄₁	1 400	2	0.7	7	1	13 300	1
SRU ₄₂	3 200	2	0.7	6	1	22 800	1
SRU ₄₃	2 700	1	0.7	7	1	19 800	0

表8所示。

表7 不同可用度目标下备件库存水平

站点	LRU ₁	LRU ₂	LRU ₃	LRU ₄	SRU ₁₁	SRU ₁₂	SRU ₁₃
Depot	0/1/2	2/3/4	2/3/3	3/4/5	1/1/1	1/1/1	1/1/1
OP ₁	1/1/1	1/2/3	1/2/2	3/4/5	0/0/1	0/0/1	0/0/0
OP ₂	0/0/1	1/1/2	1/1/2	2/3/4	0/0/0	0/0/0	0/0/0
OP ₃	0/1/1	1/2/2	1/1/2	3/3/5	0/0/0	0/0/0	0/0/0

站点	SRU ₂₁	SRU ₂₂	SRU ₃₁	SRU ₃₂	SRU ₄₁	SRU ₄₂	SRU ₄₃
Depot	2/2/2	2/2/2	2/2/2	1/1/1	5/6/6	1/1/1	2/2/2
OP ₁	0/0/1	1/1/1	1/1/1	0/0/0	1/1/2	0/0/1	0/0/1
OP ₂	0/0/1	0/1/1	0/0/0	0/0/0	1/1/1	0/0/0	0/0/0
OP ₃	0/0/0	0/0/1	0/0/1	0/0/0	1/1/1	0/0/0	0/0/0

表8 不同库存管理策略下期望可用度

备件方案 $(S-1, S)$	EHP	改善率	EHA	改善率	
方案1	0.795 5	0.842 4	5.9%	0.848 0	6.6%
方案2	0.840 7	0.871 8	3.7%	0.875 2	4.1%
方案3	0.891 5	0.916 5	2.8%	0.920 0	3.2%

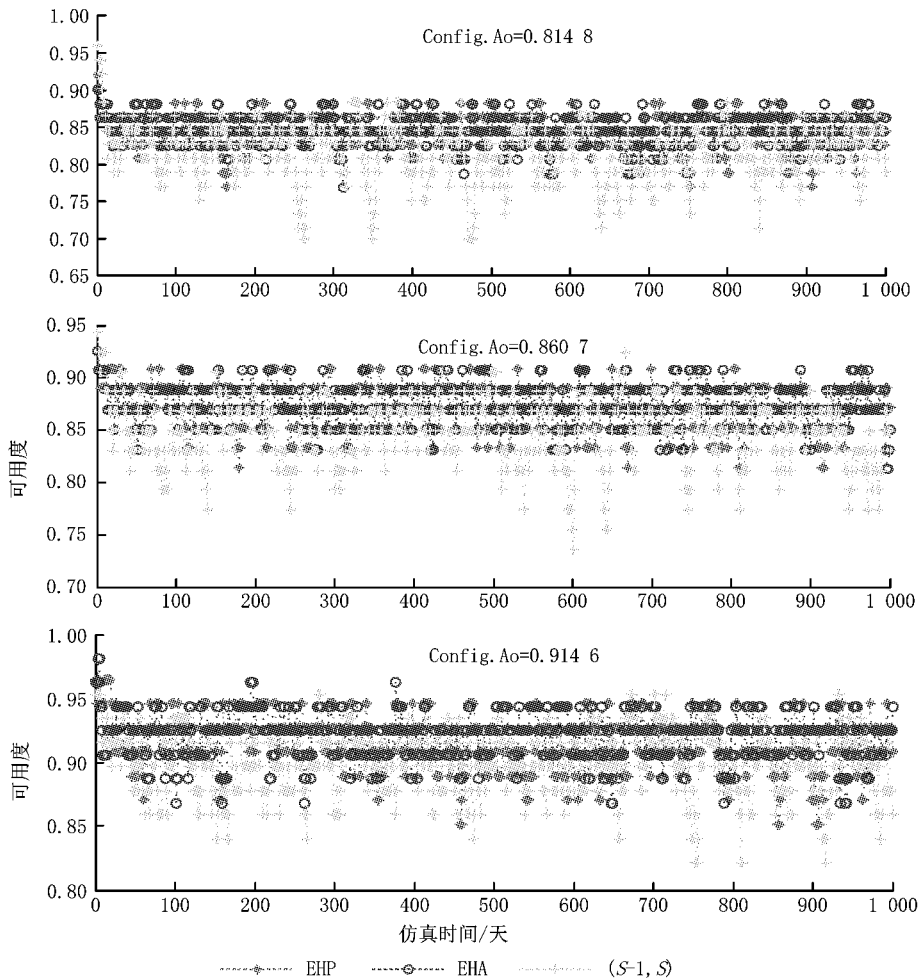


图5 不同库存配置下仿真结果

由表 8 可见,对比各备件方案的目标可用度, $(S-1, S)$ 模型的保障效能有所降低,这是因为 VMETRIC 软件在站点需求率不变的假设下对站点库存水平进行配置。而仿真模型中使用现场需求动态变化:在高强度任务下,库存水平不能满足可用度目标;在低强度任务下,库存水平超过需求,又不能用于改善其他站点的资产状况。与 $(S-1, S)$ 模型相比,本文所建模型的保障效能有所改善,且当库存配置较低时改善效果更加显著。这是因为横向库存调整均衡了各站点的资产水平,库存分配模型又根据保障性指标进行了资源分配调整,具有较强的库存重分配作用,在低资产状况和站点需求率变动时更能体现模型的优越性。

为进一步比较本文所建 EHP、EHA 模型的效果,对两类模型 1 000 d 仿真时间内使用现场的 OP_1 全部 LRU 短缺数之和进行统计,它随时间变化的曲线如图 6 所示,运行结果均值对比如表 9 所示。可以

看出,EHA 模型与 EHP 模型相比具有较低的平均短缺数。这是因为在计算边际效益时,EHP 模型仅考虑了 $P(D_l \leq D_{\max,l})$ 的影响,若某类备件短缺不导致 $D_l > D_{\max,l}$ 发生,则模型不会对该类备件进行分配排序。而 EHA 模型将导致停机数小于 $D_{\max,l}$ 的备件短缺也综合考虑在内,增加了分配排序表中的记录数,当后方库存可用时,就会发送备件、降低使用现场的短缺数。对于非串件部件,短缺数较低意味着故障设备数较少,可用度增大;对于串件部件,短缺数较低还意味着串件拼修次数较少,使用现场的维修工作量和拆装部件带来的报废风险较小。

表 9 不同库存管理策略下使用现场 1 的 EBO

备件方案	EHP	EHA
方案 1	8.561	7.710
方案 2	7.411	6.038
方案 3	5.054	3.772

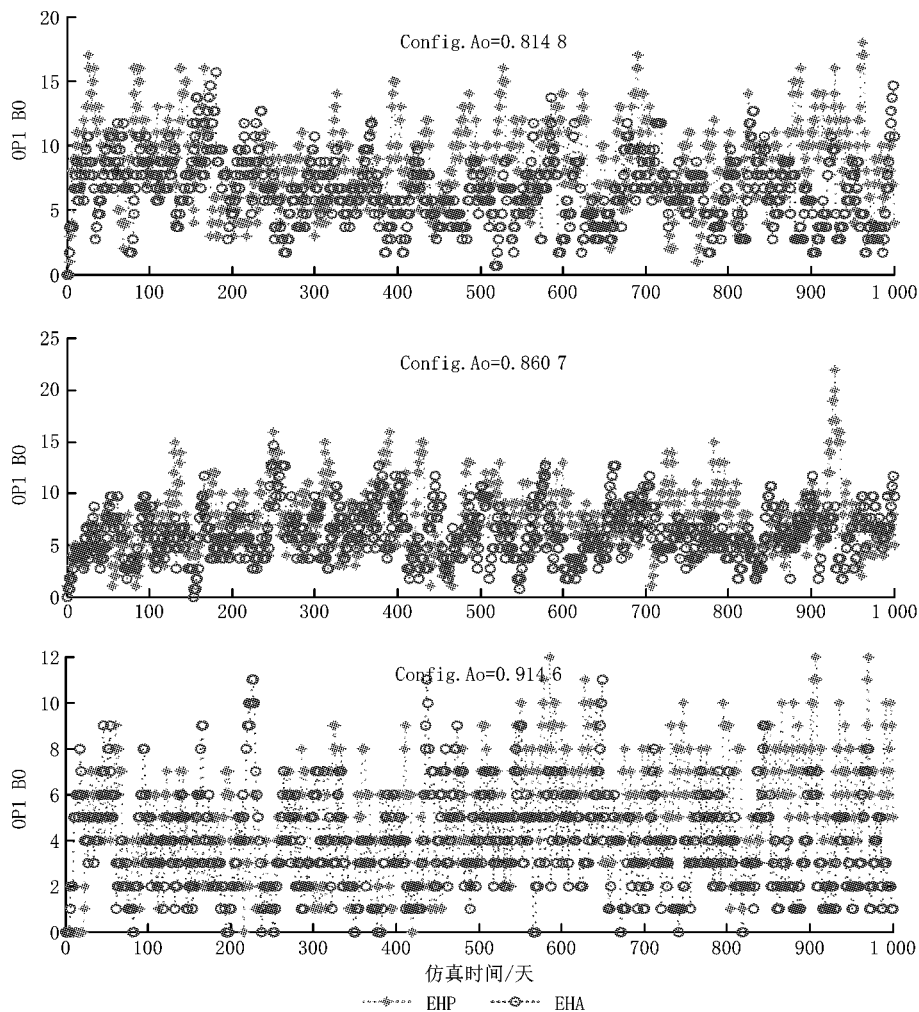


图6 不同库存配置方案下仿真实验结果

8 结束语

为解决可修件库存动态管理问题,本文首先分析了后方库存计划分配下的保障过程;其次针对串件部件和非串件部件任意混合的三层级设备系统,建立了两种典型保障性指标下的计算公式,给出了相应库存管理策略,搭建了用于效能评估的 Monte Carlo 仿真模型;最后考虑使用现场需求动态变化的影响,对 $(S-1, S)$, EHA, EHP 三种模型的保障效能进行了仿真实验对比。结果表明, EHA 模型除了保障效能相对 $(S-1, S)$ 模型有明显提高外,还具有较低的备件短缺数。

本文所建模型简单可行,库存管理人员只需在每个决策周期初汇总使用现场资产状况,运行模型生成分配排序表,在决策周期内根据分配排序表选择接收站点,就能做出适应需求变化的备件库存水平调整,提高设备使用的可用度。为进一步提高模型的适用性,未来将在具有任意等级划分的备件维修供应模式的情况下,对相应备件库存的动态管理问题继续探讨研究。另外,仿真模型采用 Monte Carlo 方法,虽然贴近实际但是大型计算比较慢,下一步将在当前仿真框架的基础上,设计基于离散事件调度的保障仿真模型,以提高计算效率。

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] SHERBROOKE C C. Metric: a multi-echelon technique for recoverable item control[J]. *Operations Research*, 1968, 16(1): 122-141.
- [3] SHERBROOKE C C. *Optimal inventory modeling of system: multi-echelon techniques*[J]. 2nd ed. Boston, Mass., USA: Artech House, 2004: 197-206.
- [4] GUO Linhan, WANG Kai, WANG Dan, et al. Multi-indenture multi-echelon spare part supply chain requirement modeling and simulation[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(10): 2211-2216 (in Chinese). [郭霖瀚, 王

作者简介:

王 慎(1983—),男,河南商丘人,博士研究生,研究方向:装备综合保障系统建模与仿真, E-mail: wangshen_hust@163.com;

+李庆民(1957—),男,山东菏泽人,教授,博士生导师,研究方向:武器系统仿真、装备综合保障工程等,通信作者, E-mail: liqingmin_bqgcx@163.com;

王文斌(1982—),男,吉林松原人,工程师,研究方向:武器系统与运用工程;

李 华(1972—),男,湖北黄梅人,高级工程师,研究方向:武器系统仿真、装备综合保障工程等;

刘任洋(1989—),男,江西南昌人,博士研究生,研究方向:装备综合保障工程。

恺,王 严,等.多级多层备件供应链需求建模与仿真[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10): 2211-2216.]

- [5] WONG H, HOUTUM V 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.
- [6] ZHANG Guangyu, LI Qingmin, LI Hua. Modeling of unidirectional lateral transshipment in multi-location inventory systems[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(5): 1092-1100 (in Chinese). [张光宇, 李庆民, 李 华. 零备件的多点库存单向转运模型与算法[J]. *航空学报*, 2013, 34(5): 1092-1100.]
- [7] SELCUK B. An adaptive base stock policy for repairable item inventory control[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 143(2): 304-315.
- [8] ZHENG Changzheng, LIU Zhixue, LIU Dan. Replenishment and equipment maintenance policies considering stochastic spare parts deterioration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(10): 2129-2138 (in Chinese). [郑长征, 刘志学, 刘 丹. 考虑备件随机折损的备件订货与设备维修策略[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10): 2129-2138.]
- [9] CHEN Mang, FU Zhuo. Repairable spare parts inventory optimization with recovery rate depending on continuous time-varying demand[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(5): 1087-1092 (in Chinese). [陈 铨, 符 卓. 连续时变需求与回收率相关的维修备件库存优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(5): 1087-1092.]
- [10] ISAACSON E, BOREN M. *Dyna-metric version6: an advanced capability assessment model*[R]. Santa Monica, Cal., USA: RAND Corporation, 1993.
- [11] PYKE D F. Priority repair and dispatch policies for repairable item logistics systems[J]. *Naval Res. Logist*, 1990, 37(1): 1-30.
- [12] MILLER B L, ABELL J B. *DRIVE(distribution and repair in variable environments): design and operation of the ogden prototype*[R]. Santa Monica, Cal., USA: RAND Corporation, 1992.
- [13] WANG Shen, LI Qingmin, PENG Yingwu. Dynamic management model of two-echelon maintenance supply system for spare parts with cannibalization[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(6): 1326-1335 (in Chinese). [王 慎, 李庆民, 彭英武. 串件拼修对策下两级备件维修供应系统动态管理模型[J]. *航空学报*, 2013, 34(6): 1326-1335.]