

串件拼修对策下两级备件维修供应系统 动态管理模型

王慎, 李庆民*, 彭英武

海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033

摘要: 在备件维修供应系统日常运作中,通过对库存和维修资源分配进行动态管理,能够在现有库存配置方案下提高保障效能。针对串件拼修对策下两级维修供应系统,分别建立了有限维修资源约束下多维修渠道故障件的送修和库存分配动态管理模型。根据备件库存动态分析模型(Dyna-METRIC)原理,建立了保障系统的蒙特卡罗仿真模型,并将动态管理模型嵌入其中。使用传统先到先服务(FCFS)原则和指定可用度目标确定不同初始库存配置方案,将这些方案作为仿真模型输入进行仿真试验。结果表明,采用本文模型后保障系统效能相比传统 FCFS 原则有了明显提高,证明了模型的正确性。

关键词: 库存管理; 维修; 动态模型; 串件拼修; 备件

中图分类号: V215.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2013)06-1326-10

可修复备件维修供应过程中,经常会遇到装备任务强度随时间变化的情况,在这种非稳态条件下,通常采用串件拼修对策代替换件维修,使装备的战备完好性和可用度在现有的保障资源配置下达到上限^[1-2]。该对策被美国空军和海军沿用多年,取得了较好的保障效果。

串件拼修对策下多级维修供应系统可修复备件库存配置问题,已在 Sherbrooke 建立的 VARI-METRIC 模型体系中得以解决^[3]。但基于 VARI-METRIC 原理的库存配置模型主要完成各站点库存水平的建立^[4],从保障系统长期运行角度保证能效比最优,并不关注保障系统日常运作时以天为单位的资源配置决策制定。对于备件维修供应系统而言,日常运作层面的资源配置决策主要涉及不同故障件间如何安排维修顺序(送修决策)和不同站点备件申请间如何安排交付顺序(库

存分配决策)。这就需要有模型在需求和站点资产动态变化的条件下,对维修渠道内的故障件和不同站点的备件申请进行优先级排序,以保证一定时间窗口内系统能效比最优。

针对备件维修供应系统动态管理问题,国内外学者开展了一系列的研究工作。文献[5]~文献[8]分别建立了各自的库存分配模型;文献[9]比较了非稳态条件下3种库存分配策略的保障效果;文献[10]使用马尔可夫过程分析了备件库存系统的动态特性;文献[11]和文献[12]研究了故障件优先级分组对修理厂效能的影响;文献[13]研究了库存站点间的横向供应管理。上述文献只从库存或维修资源分配方面分析了优先级排序对系统效能的影响。文献[14]和文献[15]研究了基于实时维修能力和资产状况的库存分配与故障件送修联合决策模型,文献[16]和文献[17]研究了

收稿日期: 2012-06-29; 退修日期: 2012-10-10; 录用日期: 2012-10-19; 网络出版时间: 2013-02-26 17:47

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130226.1747.001.html

基金项目: 国防预研项目(51304010206, 51327020105)

* 通讯作者. Tel.: 027-83442947 E-mail: licheng0001@hotmail.com

引用格式: Wang S, Li Q M, Peng Y W. Dynamic management model of two-echelon maintenance and supply system for spare parts with cannibalization. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1326-1335. 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. 航空学报, 2013, 34(6): 1326-1335.

劣化系统和单部件系统的视情维修策略,但均没有考虑串件拼修对策和装备多层次对战备完好性的影响。

目前国外较有影响力并投入使用的模型有美国空军所用的航空备件分配与送修动态管理模型(DRIVE)和备件库存动态分析模型(Dyna-METRIC)。前者针对两级保障系统提出,以解决串件拼修对策下空军后方基地故障件送修安排和对使用现场(飞行基地)的库存分配^[3]。后者建立了便于扩展的维修供应系统仿真框架,美国空军曾多次运用该模型对新型保障策略进行评估^[18]。

DRIVE 模型同时考虑了库存与维修资源的分配,能较好地解决保障系统日常运作问题,但也存在局限性。例如,将维修资源和使用现场装备可用度联合分析,导致备件分配时必须考虑修理站点和修理过程的数据;当缺少修理用故障件时,计划修理和实际修理备件清单间的差异会影响分配计划执行。针对上述问题,本文结合 DRIVE 模型理论,在考虑后方基地和使用现场两级维修供应模式、装备组成具有 3 层级的情况下,以战备完好性指标为优化目标,分别建立故障件送修、库存分配优先级排序模型以及嵌入这些模型的保障系统仿真模型。并将不同可用度目标下备件配置方案输入仿真模型,进行仿真试验和结果分析。

1 问题描述、模型概念及假设

1.1 使用现场保障过程描述

根据备件在装备中的所在层级可将其分为现场可更换单元(LRU)和车间可更换单元(SRU),图 1 所示为一个典型的具有 3 层分解结构关系的装备^[2]。

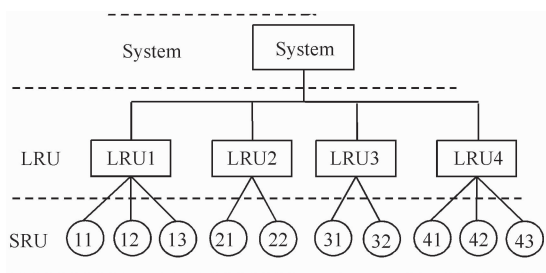


图 1 装备部件组成结构

Fig. 1 Structure of equipment spare parts

所有装备均配置在装备使用现场(OP),若使用现场的装备发生故障,采用换件维修的方式,拆卸故障 LRU 并对其进行维修。如果现场有该项 LRU 备件库存,就使用库存替换故障件;如果现场没有库存,采用串件拼修策略,从已坏装备上拆卸可用 LRU 并替换故障件;如果上述两种情况均不存在,就发生一次 LRU 短缺(空缺),并计入使用现场资产状态。LRU 的保障过程如图 2 所示,图中:NRTS 为产品在站点不能维修的概率。

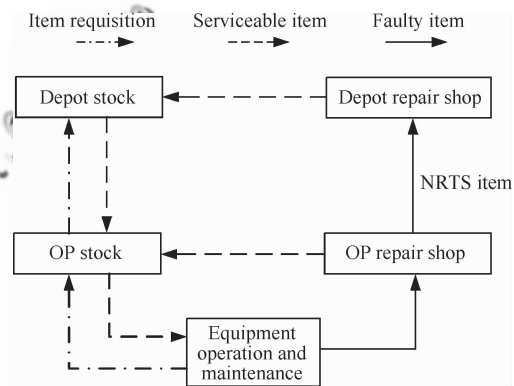


图 2 两级维修供应系统中 LRU 备件的保障过程
Fig. 2 Support process for LRU spare parts in two-echelon maintenance supply system

LRU 故障件在使用现场有一定的修复概率,如果现场不能维修,就将其送往后方基地修理厂(Depot)进行维修,同时向后方仓库申领一件该 LRU 备件。根据装备层次结构可知,LRU 进行维修时,其故障的原因是由于其所属分组件 SRU 故障导致,如果有 SRU 备件库存,使用库存替换故障件;如果没有库存,采用串件拼修策略,从已坏 LRU 上拆卸可用 SRU 并替换故障件;如果上述两种情况均不存在,故障 LRU 就成为待维修件(AWP),并计入使用现场资产状态。故障单元 SRU 在使用现场不能维修,将其送往后方基地修理厂进行修复,同时向后方库存申领一件该 SRU 备件。

1.2 后方基地保障过程描述

后方基地在安排故障件维修顺序(送修决策)和使用现场备件申请交付顺序(库存分配决策)时,不采用先到先服务(FCFS)原则,按照以下过程进行。

1) 故障件送修过程

在每个修理决策周期开始时,后方基地运行一次送修模型。模型根据整个保障系统的资产状态和修理计划期内的备件需求情况,按优先级递减顺序列出该修理周期待修备件的优先级排序表。在决策周期内,后方基地按照优先级排序表安排维修。

2) 库存分配过程

在每个分配决策周期开始时,后方基地运行一次分配模型。模型根据使用现场的资产状态和分配计划期末达到保障目标的概率,按优先级递减顺序列出该分配周期使用现场的优先级排序表。在决策周期内,后方基地按照优先级排序表,将修复件发送到各使用现场。

1.3 模型概念

1) 决策周期及取值范围

决策周期是指两次运行资源分配优先级排序模型的时间间隔。决策周期越短,模型对整个保障系统内的资源调配就越充分。但实际工作中资产数据统计需要花费时间,最后管理者掌握到的是“过去的数据”。为消除数据滞后对模型的影响,又要求决策周期必须足够大。本文将数据滞后设为1天,决策周期设为每星期决策1次。

2) 决策计划期及取值范围

决策计划期是指从做出决策到决策发生作用的时间,与决策作用的目标有关。例如,当后方决定修理备件 j 时,只有备件修理完并发送到任一使用现场,才会对装备可用度目标产生影响。备件 j 的送修计划期就是从“后方确定待修理件排序”到“任一使用现场申请被交付”的时间。同理,使用现场 l 的分配计划期是指从“后方确定待分配使用现场排序”到“使用现场申请被交付”的时间。

1.4 模型假设

1) 为便于模型求解,分配模型迭代求解时,假设计划期内发送的修复件在计划期结束前发送到使用现场;送修模型迭代求解时,假设计划期内后方维修的故障件在计划期结束前完成维修,并发送到使用现场;两个模型均忽略使用现场的换件维修时间。上述假设导致的误差会在下次模型运行时得到弥补。

2) 一定时间周期内,备件故障数服从负二项分布,不同备件间故障数相互独立^[19]。

3) 使用现场库存控制采用连续检测的(S-1, S)(S为库存数)库存策略,即缺少一件就向上级申请一件。

4) 使用现场维修采用串件拼修策略,即维修时将LRU空缺(短缺)集中到最少的装备上;将SRU空缺(短缺)集中到最少件数的LRU上。

5) 为避免模型过于繁琐,后方基地修理厂LRU和SRU的维修渠道不交叉。

2 库存分配模型

2.1 战备完好性指标

衡量备件供应保障的各种效能指标中,最常用的有战备完好性、备件满足率和装备期望可用度。在串件拼修对策下,库存分配模型中使用现场的战备完好性通常采用计划期末装备停机数 D_l 不大于指定值 y_l 的概率 $P(D_l \leq y_l)$ 来衡量^[3]。库存分配模型将根据战备完好性指标,确定不同使用现场的分配优先级排序值,本节对该指标的计算方法进行推导。

设 Q_j 为LRU j 的单机安装数,由于备件空缺(短缺)能够在装备之间进行集中合并,当且仅当装备中所有LRU备件计划期末短缺数满足 $BO_{jl} \leq y_l Q_j (j \in \text{LRU})$ 时,有 $D_l \leq y_l$ 。因此,使用现场 l 的战备完好性 A_l 可表示为

$$A_l = P(D_l \leq y_l) = \prod_{j \in \text{LRU}} P(BO_{jl} \leq y_l Q_j) \quad (1)$$

对整个保障系统而言,战备完好性为所有使用现场战备完好性之积,取对数后,得

$$\ln A = \sum_{l \in \text{OP}} \sum_{j \in \text{LRU}} \ln[P(BO_{jl} \leq y_l Q_j)] \quad (2)$$

式中:OP为装备使用现场组成的集合;LRU为所有LRU种类组成的集合。由式(2)可见,系统战备完好性指标具有可分离相加性,只需对任一使用现场中任一现场可更换单元LRU j 的 $P(BO_{jl} \leq y_l Q_j)$ 进行推导。

根据使用现场分配计划期开始时的LRU j 短缺(空缺)数 BO_{jl}^0 、计划期内累积可用库存 S_{jl} 、计划期内发送到后方的故障件数 X_{jl} 和SRU故障造成的待维修件数 Z_{jl} ,可得计划期末LRU j 短缺(空缺)数 BO_{jl} 为

$$BO_{jl} = X_{jl} + Z_{jl} + BO_{jl}^0 - S_{jl} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)等号右边,有

$$P(BO_{jl} \leq y_l Q_j) = P(X_{jl} + Z_{jl} \leq y_l Q_j + S_{jl} - BO_{jl}^0) \quad (4)$$

式中: X_{jl} 和 Z_{jl} 为相互独立的随机变量,式(4)等号右边可改写为卷积形式,即

$$P(X_{jl} \leq y_l Q_j + S_{jl} - BO_{jl}^0 - \tau) = \sum_{\tau=0}^{y_l Q_j + S_{jl} - BO_{jl}^0} P(Z_{jl} = \tau) \cdot f_{Z_{jl}}(\tau) F_{X_{jl}}(y_l Q_j + S_{jl} - BO_{jl}^0 - \tau) \quad (5)$$

式中: $F_{X_{jl}}$ 为 X_{jl} 的累积概率分布函数; $f_{Z_{jl}}$ 为 Z_{jl} 的概率密度函数。

2.1.1 分配计划期内发送后方故障件数的分布

使用现场发送到后方基地的故障件由两部分组成:①使用现场无法修理的LRU_j;②使用现场修理LRU_j时换下的SRU故障件。根据模型假设,计划期内发送到后方的LRU_j故障件数 X_{jl} 服从负二项分布,其均值与计划期内平均故障件数 λ_{jl} 的关系为

$$E(X_{jl}) = \lambda_{jl} NRTS_{jl} \quad (6)$$

式中: $NRTS_{jl}$ 为LRU_j不能在使用现场 l 维修的概率。为此,先计算计划期内故障件数的均值。

根据使用现场分配计划期范围 H_l 、使用现场的装备配置数量 N_l 、LRU_j的单机安装数 Q_j 、计划期内装备在使用现场的每天平均工作时间 DW_l 、LRU_j的故障间隔时间 $MTBF_j$ 和占空比 DC_j ,可推导出计划期内LRU_j在使用现场的故障均值 λ_{jl} 及其分组件SRU_k的故障均值 λ_{kl} 为

$$\lambda_{jl} = DW_l H_l DC_j Q_j N_l / MTBF_j \quad (7)$$

$$\lambda_{kl} = \lambda_{jl} R_{kj} (1 - NRTS_{jl}) \quad (8)$$

式中: R_{kj} 为LRU_j分组件SRU_k的更换因子,即故障LRU_j是由于所属分组件SRU_k故障所致的概率,可表示为

$$R_{kj} = DC_k Q_k MTBF_k / MTBF_j \quad (9)$$

式中: DC_k 、 Q_k 和 $MTBF_k$ 分别为SRU_k的占空比、单机安装数和故障间隔时间。

模型对负二项分布差均比的估计采用非线性回归估计模型^[19],该模型将一段时间内的故障数

差均比VTMR和故障数均值MEAN联系起来,即

$$VTMR = 1 + 0.14MEAN^{0.5} \quad (10)$$

至此,使用现场计划期内发送到后方的LRU_j故障件 X_{jl} 的累积概率分布为

$$F_{X_{jl}}(x) = \sum_{\tau=0}^x \binom{a+\tau-1}{\tau} b^\tau (1-b)^a \quad (11)$$

$$a = E(X_{jl}) / (VTMR_{jl} - 1)$$

$$b = (VTMR_{jl} - 1) / VTMR_{jl}$$

$$VTMR_{jl} = 1 + 0.14[E(X_{jl})]^{0.5} \quad (12)$$

同理可得,使用现场计划期内发送到后方的SRU_k故障件 z_{kl} 的累积概率分布为

$$F_{z_{kl}}(z) = \sum_{\tau=0}^z \binom{a+\tau-1}{\tau} b^\tau (1-b)^a \quad (13)$$

$$a = E(z_{kl}) / (VTMR_{kl} - 1)$$

$$b = (VTMR_{kl} - 1) / VTMR_{kl}$$

$$VTMR_{kl} = 1 + 0.14[E(X_{kl})]^{0.5} \quad (14)$$

2.1.2 分配计划期内待维修件数的分布

设使用现场的备件LRU_j包含 n 种SRU分组件,计划期内SRU故障造成的待维修件数为 Z_{jl} 。本节对 Z_{jl} 的概率密度函数 $f_{Z_{jl}}$ 进行推导。

设SRU_k单机安装数为 Q_k 、计划期初初始短缺(空缺)数为 BO_{kl}^0 ,在串件拼修假设下,包含这些空缺的LRU_j待修件数 Z_{kjl}^0 为

$$Z_{kjl}^0 = \left[\frac{BO_{kl}^0 + Q_k - 1}{Q_k} \right] \quad (15)$$

式中:运算符 $[\cdot]$ 为取整函数。计划期初初始SRU短缺造成的LRU_j待维修件数 Z_{jl}^0 为

$$Z_{jl}^0 = \max_{k=1,2,\dots,n} (Z_{kjl}^0) \quad (16)$$

设SRU_k计划期初初始库存为 s_{kl}^0 ,计划期内故障数为 z_{kl} ,计划期内故障造成的待维修件数为 Z_{kjl} ,则有

$$P(Z_{kjl} \leq z) = P(z_{kl} \leq Q_k Z_{jl}^0 - BO_{kl}^0 + s_{kl}^0 + Q_k z) \quad (17)$$

式中: $P(Z_{kjl} \leq z)$ 为随机变量 Z_{kjl} 的累积概率分布, Z 为累积概率分布自变量。

因此,计划期内SRU故障造成的LRU_j待维修件数 Z_{jl} 的累积概率分布为

$$P(Z_{jl} \leq z) = \prod_{k=1}^n P(Z_{kjl} \leq z) \quad (18)$$

Z_{jl} 的累积概率的概率密度函数为

$$f_{Z_{jl}}(z) = \begin{cases} P(Z_{jl} \leq z) - P(Z_{jl} \leq z-1) & z \geq 1 \\ P(Z_{jl} = 0) & z = 0 \end{cases} \quad (19)$$

至此,联立式(4)~式(19),可以对式(2)内任一使用现场 l 中任一现场可更换单元 LRU_j 的 $P(BO_{jl} \leq y_l Q_j)$ 进行计算。

2.2 待维修件所需 SRU 的确定

使用现场存在待维修件时,只需发送其需要的 SRU 组件包就可以改善使用现场的 LRU 库存。当确定对使用现场分配一件 LRU 备件后,后方基地应按照先待维修件所需 SRU 组件包、后 LRU 完整件的顺序进行分配。

设使用现场的现场可更换件 LRU_j 包含 n 种 SRU 分组件。在串件拼修假设下, LRU_j 待维修件所需 SRU 备件数可按由少到多排列,将需要 SRU 最少的待维修件,定义为“最小待维修件”。按下列步骤,以由少到多的顺序确定使用现场所有待维修件所需 SRU 备件的种类和数量:

① 对分组件 $SRU_k (k=1, 2, \dots, n)$,使用式(15)计算包含 BO_{kl} 的 LRU_j 待维修件数量 Z_{kjl} 。

② 使用式(16)计算包含所有分组件 SRU 短缺(空缺) $\{BO_{kl} | k=1, 2, \dots, n\}$ 的 LRU_j 待维修件数量 Z_{jl} 。

③ 将 Z_{jl} 与 $\{Z_{kjl}\}$ 中的元素逐个比较。若存在 k_0 使得 $Z_{k_0 j l} = Z_{jl}$,则最小待维修件中包含分组件 SRU_{k_0} 的空缺,其数量为 $BO_{k_0 l} - Q_{k_0} (Z_{jl} - 1)$ 。找出最小待维修件的所有 SRU 空缺后,记录、补齐并更新 $\{BO_{kl} | k=1, 2, \dots, n\}$ 。重复步骤①~步骤③,直到所有 SRU 短缺数为 0。

2.3 边际分析法

根据战备完好性指标确定不同使用现场的分配优先级排序是分配模型的关键问题。而边际分析法的特点是边际效益递减,本文所用战备完好性指标为凸函数^[3],因此,模型采用边际分析法,将使用现场中 LRU_j 库存增加一件所带来的边际效益 V_{jl} 作为分配 LRU_j 修复件时使用现场的优先级排序值。

在 1.4 节的假设 1) 下,使用现场中 LRU_j 的计划期内累积可用库存 S_{jl} 为上个计划期正在发送途中的修复件、本计划期开始的库存与本计划期内分配模型计划发送的修复件之和。由式(5)可见, $P(BO_{jl} \leq y_l Q_j)$ 为 S_{jl} 的函数,用 $P_{jl}(S_{jl})$ 表示,代入式(2),有

$$\ln A = \sum_{j \in OP} \sum_{l \in LRU} P_{jl}(S_{jl}) \quad (20)$$

据目标函数表达式可知,边际效益 V_{jl} 为

$$V_{jl} = \ln(P_{jl}(S_{jl} + 1)) - \ln(P_{jl}(S_{jl})) \quad (21)$$

利用边际分析法,确定 LRU_j 修复件分配时不同使用现场优先级排序值的步骤如下:

① 使用 2.2 节方法,计算各使用现场待维修件所需 SRU 的种类和数量,按先待维修件所需 SRU 组件包、后 LRU_j 完整件的顺序,形成各使用现场关于 LRU_j 产品树内备件的需求优先级排序表。

② 使用 2.1 节方法计算当前累积库存下各使用现场计划期末 LRU_j 短缺数不大于允许值的概率 $P_{jl}(S_{jl})$ 。

③ 根据边际效益 V_{jl} 的表达式,计算各使用现场库存增加一件 LRU_j 时的边际效益。

④ 选择边际效益值最大的使用现场作为优先分配的对象,按该使用现场的需求优先级排序表,将 LRU_j 库存 S_{jl} 增加一件。重复步骤②~步骤④,直到所有使用现场的 $P_{jl}(S_{jl})$ 超过指定上限值。

设 LRU_1 含有 3 个 SRU 分组件。根据上述步骤生成的 LRU_1 库存分配优先级排序表举例如表 1 所示。字段“LRU TYPE”为待修 LRU 编号;“Priority”为使用现场的分配优先级排序;“OP ID”为接收备件的使用现场编号;“Prob”为该使用现场计划期末 LRU_j 短缺数不大于允许值的概率;“OP CUM”为到目前记录为止该使用现场的出现次数;“Requisition”为使用现场对 LRU_j 产品树内备件的需求,“Requisition”为 110,表示使用现场 1 需要 SRU_1 、 SRU_2 各一件;“Requisition”为 1,表示需要 LRU_1 完整件一件;“Requisition”为 101,表示使用现场 1 需要 SRU_1 、 SRU_3 各一件。

表 1 LRU_1 库存分配优先级排序

Table 1 Priority sequence for LRU_1 inventory allocation

LRU TYPE	Priority	OP ID	Prob	Requisition	OP CUM
1	1	1	0.686 3	110	1
1	2	1	0.728 7	1	2
1	3	2	0.760 6	101	1

3 故障件送修模型

库存分配模型只是在已有资产情况下改善使用现场的战备完好性,而维修渠道内故障件维修顺序直接影响用于分配的修复件库存状况,也应对其进行优先级排序,使有限的维修资源得到最大化利用。由于在后方基地维修渠道的一个送修周期内只能通过有限数量的故障件,模型使用“送修决策周期内可用维修时间”作为维修资源的量化标准。本节所用方法可扩展到维修资源用经费量化的情况。

用于后方维修渠道 m 的故障件送修模型可描述为:在维修周期内可用维修时间有限的条件下,确定维修渠道 m 内不同备件的维修优先级排序,使“送修计划期内各项备件满足率之积”最大,目标函数表达式为

$$\prod_{j \in \text{FaultyItem}_m} \text{EFR}_j(S_j) = \prod_{j \in \text{FaultyItem}_m} P(X_j \leq S_j - \text{BO}_j^*) \quad (22)$$

式中: EFR_j 为备件满足率,表示送修计划期内备件需求不大于累积可用库存的概率; FaultyItem_m 为维修渠道 m 内所有故障件种类组成的集合; S_j 为送修计划期内累积可用库存; X_j 为计划期内各使用现场备件 j 故障数之和,服从负二项分布,其均值和差均比用 2.1.1 节方法计算。

根据目标函数和备件修理时间,确定同一维修渠道内故障件的维修优先级排序值是送修模型的关键问题。因 $\text{EFR}_j(S_j)$ 为凸函数^[20],故障件送修模型仍采用边际分析法,将备件 j 修复件库存增加所带来的边际效益 V_j 作为备件 j 的维修优先级排序值。据目标函数表达式和修理时间 T_j 可知,边际效益 V_j 为

$$V_j = \frac{\ln(\text{EFR}_j(S_j + 1)) - \ln(\text{EFR}_j(S_j))}{T_j} \quad (23)$$

利用边际分析法,确定同一维修渠道内不同备件维修优先级排序值的步骤如下:

- ① 计算当前累积可用库存 S_j 下各备件的满足率 $\text{EFR}_j(S_j)$ 。
- ② 根据边际效益 V_j 的表达式,计算各备件库存增加一件时的边际效益。
- ③ 选择边际效益值最大的组件作为优先维

修的组件,将其库存 S_j 增加一件。重复步骤①~步骤③,直到累积修理时间超过维修周期可用维修时间。

设后方修理厂有一条 LRU 通用维修渠道,根据上述步骤生成的 LRU 故障件送修优先级排序表举例如表 2 所示。字段“EFR”为该 LRU 计划期内的满足率;“Rep Time”为该 LRU 维修时间;“Rep Time CUM”为到目前记录为止维修渠道累计花费的修理时间;“LRU CUM”为到目前记录为止该 LRU 的出现次数。

表 2 LRU 故障件送修优先级排序
Table 2 Priority sequence for faulty LRU repair

Priority	LRU TYPE	EFR	Rep Time	Rep Time CUM	LRU CUM
1	2	0.659 3	11	11	1
2	2	0.798 0	11	22	2
3	3	0.829 7	12	34	1

4 仿真模型

根据 Dyna-METRIC 原理,设计了一个两级维修供应系统的双线程蒙特卡罗仿真模型,将本文建立的备件分配和送修优先级排序模型嵌入其中进行评估和验证。仿真模型中装备保障过程除备件分配和送修外,其他环节与 VARI-METRIC 理论相同,仿真处理流程如图 3 所示。其中,使用现场线程主要完成故障产生、修复件接收、故障件发送和驱动整个仿真模型运转。后方基地线程在决策周期开始时进行库存分配和故障件维修优先级排序,决策周期内根据排序结果向使用现场发送备件和安排故障件送修,并更新后方资产状况。

5 仿真实验及结果分析

设两级备件维修供应系统由 1 个后方基地 (Depot) 和 3 个使用现场 (OP_1 、 OP_2 、 OP_3) 组成。后方基地修理厂有 LRU、SRU 通用维修渠道各一个,采用三班轮流工作制。装备在各使用现场的配备数量分别为 20、15、18。装备系统的组成结构关系如图 1 所示,备件保障信息参数如表 3 所示。

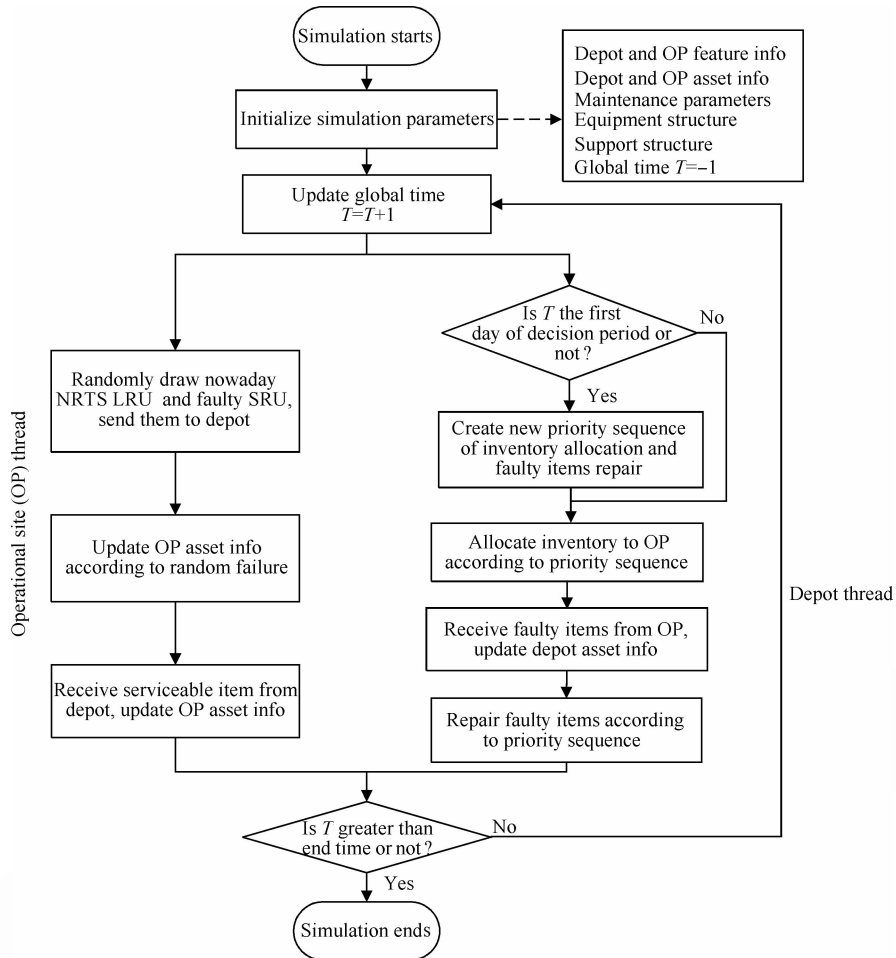


图3 两级维修供应系统仿真模型处理流程

Fig. 3 Data processing of simulation model for two-echelon maintenance supply system

表3 备件保障信息参数

Table 3 Information parameters of spare parts support

Unit	MTBF _j	Z _j	DC _j	T _j	NRTS _{j,or}	Price _j / Yuan
LRU ₁	345	1	0.8	10	0.56	103 400
LRU ₂	565	2	0.8	11	0.62	77 800
LRU ₃	495	1	0.8	13	0.68	55 400
LRU ₄	345	3	0.8	9	0.54	93 300
SRU ₁₁	2 400	2	0.7	5	1.00	15 700
SRU ₁₂	1 800	1	0.7	7	1.00	40 800
SRU ₁₃	2 100	1	0.7	7	1.00	18 300
SRU ₂₁	2 000	1	0.7	8	1.00	10 200
SRU ₂₂	2 600	2	0.7	4	1.00	9 600
SRU ₃₁	1 800	2	0.7	5	1.00	7 700
SRU ₃₂	2 200	1	0.7	3	1.00	8 900
SRU ₄₁	1 300	2	0.7	7	1.00	13 300
SRU ₄₂	3 100	1	0.7	6	1.00	22 800
SRU ₄₃	2 800	1	0.7	7	1.00	19 800

使用 VMTERIC 软件分别生成保障系统所有装备期望可用度 A_0 为 0.766 7、0.804 5、0.855 0、0.896 1 时的初始备件配置方案。如表 4 所示,表中“0/0/1/2”等表示 4 种可用度目标下的备件库存水平。

将这 4 个配置方案输入仿真模型,运行 1 000 天后得采用备件分配和送修优先级排序模型时保障系统装备可用度 A_0 随时间变化的曲线,如图 4 所示。

VARI-METRIC 理论的重要假设之一为:不同故障件间维修顺序和不同站点申请间交付顺序采用先到先服务原则^[4]。因此,利用 VMETRIC 软件生成的备件配置方案期望可用度反映了长期使用上述原则后系统装备可用度的期望值。本文根据蒙特卡罗仿真原理建立起的仿真模型除备件分配和送修原则外,其保障过程与 VMTERIC 理论相同。仿真模型的长期运行结果均值为采用优先级排序模型后系统装备期望可用度近似值。不同资源分配原则下期望可用度对比如表 5 所示。

表 4 不同可用度目标下备件库存水平

Table 4 Stock level for spare parts with different availability goals

Support site	LRU ₁	LRU ₂	LRU ₃	LRU ₄	SRU ₁₁	SRU ₁₂	SRU ₁₃
Depot	0/0/1/2	2/3/3/3	2/3/3/3	0/4/5/6	1/1/1/1	0/1/1/1	1/1/1/1
OP ₁	0/0/1/1	1/2/2/3	1/1/2/2	0/3/4/5	0/0/0/1	0/0/0/0	0/0/0/0
OP ₂	0/0/0/1	0/1/1/2	1/1/1/2	0/2/3/4	0/0/0/0	0/0/0/0	0/0/0/0
OP ₃	0/0/1/1	1/1/2/2	1/1/1/2	0/3/4/5	0/0/0/0	0/0/0/0	0/0/0/0
Support site	SRU ₂₁	SRU ₂₂	SRU ₃₁	SRU ₃₂	SRU ₄₁	SRU ₄₂	SRU ₄₃
Depot	2/2/2/2	2/2/2/2	2/2/2/2	1/1/1/1	6/7/7/7	1/1/1/1	2/2/2/2
OP ₁	0/0/0/1	0/1/1/1	0/1/1/1	0/0/0/0	1/1/1/2	0/0/0/1	0/0/0/1
OP ₂	0/0/0/1	0/0/1/1	0/0/0/0	0/0/0/0	1/1/1/1	0/0/0/0	0/0/0/0
OP ₃	0/0/0/0	0/0/0/1	0/0/0/1	0/0/0/0	1/1/1/1	0/0/0/0	0/0/0/0

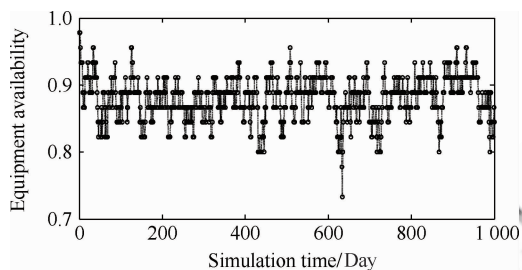
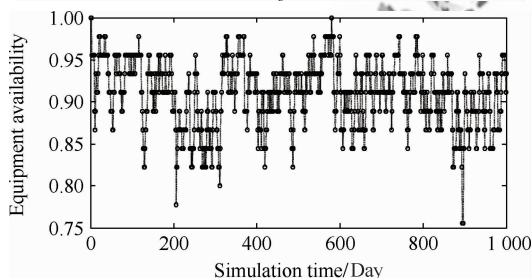
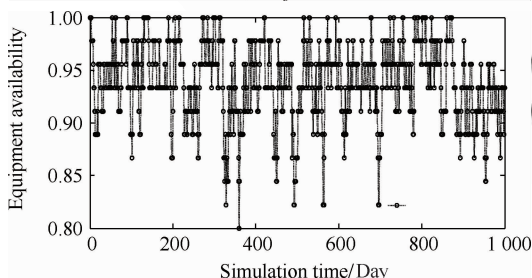
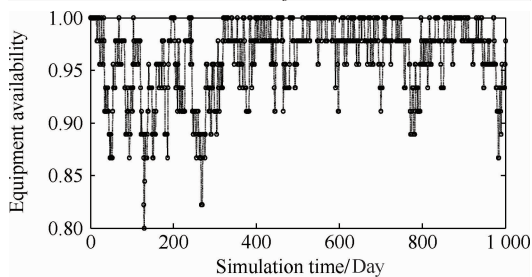
(a) $A_0=0.7667$ (b) $A_0=0.8045$ (c) $A_0=0.8550$ (d) $A_0=0.8961$

图 4 不同库存配置方案下仿真实验结果

Fig. 4 Simulation experiment results with different stock configuration projects

表 5 不同资源分配原则下的期望可用度

Table 5 Expected availability with different support resource allocation principles

Configuration project	Expected availability		
	FCFS model	Priority model	Improvement/%
Plan 1	0.766 7	0.880 2	14.8
Plan 2	0.804 5	0.910 1	13.1
Plan 3	0.855 0	0.940 4	10.0
Plan 4	0.896 1	0.962 4	7.4

由表 5 可见,无论是高可用度库存配置,还是低可用度库存配置,与使用备件分配和送修优先级排序模型的保障系统可用度相比,传统 FCFS 原则均有明显提高,且随着可用度目标的降低,改善效果更加明显。这是因为模型每次决策时根据系统最新状态进行资源分配调整,具有一定的全系统资产调配作用,对库存配置变化的敏感度较低,在低资产状况下更能体现模型的优越性。

6 结论与展望

针对串件拼修对策下的两级维修供应系统,本文分别建立了有限维修资源约束下的多维修渠道故障件送修和库存分配动态管理模型,增加了模型使用时的灵活性。根据备件库存动态分析模型原理,建立了两级维修供应系统的双线程蒙特卡罗仿真模型。通过仿真试验,将本文所建模型与传统 FCFS 资源分配原则进行对比分析,结果表明:在不同可用度目标库存配置下,保障系统效能均有明显提高,证明了本文所建模型的正确性和合理性。

本文模型运行时要求根据当前资产状态进行决策,这就需加强信息化条件下资产可视化系

统的建设,在各保障站点建立完善的信息收集手段,收集装备、设备、备件的数量、品种、状态和位置等各种实时信息。另外,对所用保障仿真模型可以进一步完善,合理搭建仿真框架,使之能够对各种装备设计参数以及保障策略进行运行分析和权衡选择。

参 考 文 献

- [1] Shah J, Avittathur B. The retailer multi-item inventory problem with demand cannibalization and substitution. *International Journal of Production Economics*, 2007, 106(1): 104-114.
- [2] Ruan M Z, Li Q M, Peng Y W, et al. Evaluation of equipment system availability for multi-echelon maintenance supply with cannibalization. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(4): 658-665. (in Chinese)
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. *航空学报*, 2012, 33(4): 658-665.
- [3] Sherbrooke C C. *Optimal inventory modeling of system: multi-echelon techniques*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2004: 112-133.
- [4] Sherbrooke C C. VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture multi-echelon availability models. *Operations Research*, 1986, 34(2): 311-319.
- [5] Miller B L. Real time METRIC for the distribution of serviceable assets. RM-5687-PR, 1968.
- [6] Federgruen A, Zipkin P. Approximations of dynamic multi-location production and inventory problems. *Management Science*, 1984, 30(1): 69-84.
- [7] Cai Z M, Kang R, Long J. System optimization-oriented dynamic spares configuration method. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 32(11): 2363-2366. (in Chinese)
蔡泽明, 康锐, 龙军. 面向系统优化的备件动态配置方法. *系统工程与电子技术*, 2011, 32(11): 2363-2366.
- [8] Liu X C, Wang L, Xu Y P, et al. Research on ABMS based wartime spares support adaptation decision. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(12): 2595-2598. (in Chinese)
刘喜春, 王磊, 许永平, 等. 战时可修复备件供应保障优化模型. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(12): 2595-2598.
- [9] Buyukkurt M D, Parlar M. A comparison of allocation policies in a two-echelon repairable-item inventory model. *International Journal of Production Economics*, 1993, 29(3): 291-302.
- [10] Wang N C, Kang R, Cheng H L. Study on the dynamic characteristics of spare inventory based on Markov process. *Acta Armentarii*, 2009, 30(7): 984-988. (in Chinese)
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. *兵工学报*, 2009, 30(7): 984-988.
- [11] Hausman W H, Scudder G D. Priority scheduling rules for repairable inventory systems. *Management Science*, 1982, 29(11): 1215-1232.
- [12] Adan I J B F, Slepchenko A, van Houtum G J. Reducing costs of spare parts supply systems via static priorities. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2009, 26(4): 559-585.
- [13] Zhang G Y, Li Q M, Li H. Modeling of unidirectional lateral transshipments in multilocation inventory systems. *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. *航空学报*, 2013, 34(5): 1092-1100.
- [14] Pyke D F. Priority repair and dispatch policies for repairable item logistics systems. *Naval Research Logistics*, 1990, 37(1): 1-30.
- [15] Caggiano E, Muckstadt A. Integrated real-time capacity and inventory allocation for repairable service parts in a two-echelon supply system. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2006, 8(3): 292-319.
- [16] Ge E S, Li Q M, Zhang G Y, et al. Optimization of condition-based maintenance for deteriorating system under imperfect maintenance. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 316-324. (in Chinese)
葛恩顺, 李庆民, 张光宇, 等. 考虑不完全维修的劣化系统最优视情维修策略. *航空学报*, 2013, 34(2): 316-324.
- [17] Ge E S, Li Q M, Peng Y W, et al. Condition-based maintenance model and optimization for single-unit system with multiple competing processes. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(3): 580-587. (in Chinese)
葛恩顺, 李庆民, 彭英武, 等. 多重故障并发下单部件系统视情维修建模与优化. *航空学报*, 2013, 34(3): 580-587.
- [18] Isaacson E, Boren M. *Dyna-metric Version 6: an advanced capability assessment model*. R-4214-AF, 1993.
- [19] Craig C. Estimation of the variance-to-mean ratio for AFLC recoverable items. Potomac: Sherbrooke & Associates, 1984: 34-47.
- [20] Sherbrooke C C. Metric: a multi-echelon technique for recoverable item control. *Operations Research*, 1968, 16(1): 122-141.

作者简介:

王慎 男, 博士研究生。主要研究方向: 装备综合保障系统建模与仿真。

Tel: 027-83442753-7402

E-mail: wangshen_hust@163.com

统仿真、装备综合保障等。

Tel: 027-83442947

李庆民 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 武器系

E-mail: licheng0001@hotmail.com

Dynamic Management Model of Two-echelon Maintenance and Supply System for Spare Parts with Cannibalization

WANG Shen, LI Qingmin^{*}, PENG Yingwu*Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*

Abstract: During the daily operation of a maintenance and supply system for spare parts, dynamic management involved in the daily allocation for inventory and repair resources can improve support effectiveness with the current stock-configuration scheme. In order to achieve the same result in a two-echelon support system with cannibalization strategy, dynamic scheduling models are established respectively for inventory allocation and faulty item sequence in the multi-repair-channel under the finite repair resources constraint. A Monte Carlo simulation model is also built in line with the dynamic multi-echelon technique for recoverable item control (Dyna-METRIC) framework which is used for simulation analysis on spare parts inventory. The dynamic scheduling models are embedded in our simulation model for testing and verifying. Initial stock-configuration schemes are provided according to the traditional principle of first come, first served (FCFS) and assigned availability goals, then treated as the inputs of the simulation model for experiment. The results show that support effectiveness with dynamic scheduling models is much better than that with traditional FCFS principle, which proves the validity of the model.

Key words: inventory management; maintenance; dynamic model; cannibalization; spare part

Received: 2012-06-29; **Revised:** 2012-10-10; **Accepted:** 2012-10-19; **Published online:** 2013-02-26 17:47

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130226.1747.001.html

Foundation items: National Defence Pre-research Foundation of China (51304010206, 51327020105)

*** Corresponding author.** Tel.: 027-83442947 E-mail: licheng0001@hotmail.com