

# 串件拼修对策下多级维修供应的装备系统可用度评估

阮旻智<sup>1</sup>, 李庆民<sup>1,\*</sup>, 彭英武<sup>1</sup>, 黄傲林<sup>1,2</sup>, 王慎<sup>1</sup>

1. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033
2. 海军工程大学 电子工程学院 指挥自动化系, 湖北 武汉 430033

**摘要:** 实施串件拼修对策是提高装备保障效能的有效途径,能够在现有保障条件下使装备可用度达到上限。针对该问题,在备件多级维修供应模式下,根据串件拼修的特点,并结合可修复备件库存分配建模理论(METRIC),建立了非串件系统、串件系统以及不完全串件系统可用度评估模型。研究了串件对策下装备保障效能的分析流程和方法。通过实验设计,确定初始备件库存方案,在给定的方案下,对不同串件对策下装备的可用度进行评估。采用 VMETRIC 平台对模型进行验证,结果表明,本文模型结果与 VMETRIC 仿真结果具有相当高的吻合度,证明了模型的正确性。

**关键词:** 装备保障工程; 多级维修供应; 串件拼修; METRIC 模型; 可用度; 备件

**中图分类号:** V215.7 **文献标识码:** A

装备综合保障工程中,多级维修供应系统的可修复备件库存分配建模理论(METRIC)是在换件维修的假设前提下进行,实际情况中,对于同型装备并具有通用性的备件项目,采用串件拼修对策能够在现有的保障体制、维修供应模式以及维修资源配置情况下,使装备的战备完好性和可用度达到上限<sup>[1]</sup>。METRIC 是求解稳态条件下的备件库存分配模型,对于装备任务强度随时间变化时,例如,空军战斗机从平时到战时过渡期内飞行时间的突变,之后将是飞行量较低的持续作战期,在这种非稳态条件下,串件拼修问题通常被提出。目前,国外较先进的备件库存动态分析模型(Dyna-METRIC)、可持续航材保障模型(ASM)以及美国空军所用的航空部附件分配与送修动态管理模型(DRIVE),其假设前提都是在装备使用

现场(飞行基地)对现场可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU)实行具体的串件拼修对策,该对策已被美国空军和海军沿用多年,取得了较好的保障效果。实战证明:串件拼修对策是提高装备维修保障能力的有效途径。

自 Sherbrooke 在 1968 年提出 METRIC 理论<sup>[2]</sup>以来,国内外针对多级维修供应系统的备件库存分配建模问题进行了大量研究,文献[3]~文献[6]研究了航空装备备件的库存优化问题;文献[7]和文献[8]将 METRIC 理论应用于海军舰艇装备保障,建立了舰载装备备件的多级库存分配模型,文献[9]~文献[11]研究了备件需求率随时间变化条件下的多级库存系统,并建立了装备的时变可用度评估模型;文献[12]研究并建立了需求率低、价格高的贵重备件 3 级库存分配模型。

收稿日期: 2011-06-20; 退修日期: 2011-08-14; 录用日期: 2011-08-28; 网络出版时间: 2011-12-23 12:25

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111223.1225.001.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20111223.1225.001

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: 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. 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.

上述文献所给出的备件模型都是在连续检测(S-1,S)库存策略和换件维修方式等假设前提下建立的,没有考虑串件拼修对策对装备可用度的影响。文献[13]分析了在维修保障过程中选择串件对策的最佳条件;文献[14]以航空装备备件的维修保障为背景,开发并建立了相应的仿真模型对串件拼修对策的性能进行测试和分析;文献[15]和文献[16]建立了串件对策下的装备可用度模型,并对其维修保障能力进行了分析;文献[17]研究了串件系统的马尔可夫过程模型;文献[18]研究了面向任务的串件拼修问题并提出了基于遗传算法的模型求解方法。

上述文献都是针对完全串件系统进行研究,没有考虑由串件项目和非串件项目组成的混合系统,本文则针对该问题,在多级维修供应模式下,在换件维修(非串件)的假设前提下求解备件的最优初始库存分配方案,根据给定的备件方案,在串件拼修对策下,建立不完全串件系统的可用度评估模型,并对其结果进行分析。

## 1 串件拼修对策描述及其特性分析

串件拼修是将发生短缺的备件项目统一集中在尽可能少的装备系统中的一种维修策略。如图1所示:假设在没有备件库存的情况下,同型号的3个设备发生故障,其故障原因是其所属的LRU<sub>1</sub>故障所致,通过设备1与设备2之间进行LRU<sub>2</sub>串件,设备1与设备3之间进行LRU<sub>3</sub>串件,串件拼修后能够将所有的故障单元集中在设备1中,同时,能够使设备2与设备3恢复正常。

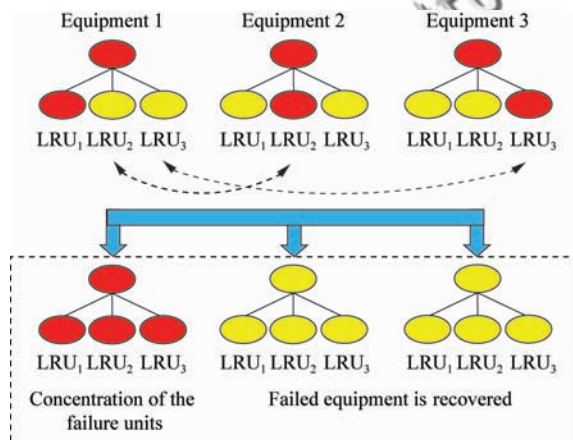


图1 装备之间的串件拼修过程

Fig. 1 Process of cannibalization among equipments

选择串件拼修的前提条件是:同型号装备并且具有通用性的备件项目;故障单元的维修时间大于其拆卸安装时间。随着制造工艺水平的发展以及装备保障性设计要求的不断提高,新型装备一般都具有较高的集成度和通用性,其大多数关键性备件都具有新开发的插件系统,这使得备件的拆卸和更换更加容易进行,为实施串件拼修创造了良好的条件。

串件拼修对策能够在有限的维修资源约束及特定的保障模式下,使装备系统的可用度达到上限。在日常维修管理工作中,维修机构可能不会对故障单元实施具体的串件策略,在战时或紧急任务情况下,由于受维修保障资源携带能力的限制,串件拼修对策经常被提出。Sherbrooke<sup>[19]</sup>对美国乔治空军基地的机群进行试验,给出了按串件和非串件两种不同对策下的备件最优库存方案,并对两种对策下的装备可用度进行分析。分析结果表明:按非串件对策得出的备件方案具有较强的鲁棒性(抗干扰性),在实际情况中,无论选择串件对策与否,其保障效果都比较好;而按串件对策计算得出的备件方案,在维修机构未采用串件对策时,保障效果会变得相当差。因此,当确定初始备件方案时,一般按非串件对策进行,若维修机构采用串件策略时,则按该对策对装备可用度进行分析。

## 2 多级维修供应的初始备件配置模型

### 2.1 备件需求率预测

组件 $j$ 在站点 $m$ 的需求率由两部分构成:站点 $m$ 所保障的所有单位 $l(l \in \text{Unit}(m))$ 为组件 $j$ 不能维修的数量之和;组件 $j$ 的母体 $b(b \in \text{Aub}(j))$ 发生故障的原因来自于组件 $j$ 故障所致的次数。则需求率 $\lambda_{mj}$ 的计算公式为

$$\lambda_{mj} = \sum_{l \in \text{Unit}(m)} \lambda_l \text{NRTS}_{lj} + \sum_{b \in \text{Aub}(j)} \lambda_{mb} (1 - \text{NRTS}_{mb}) q_{mbj} \quad (1)$$

式中:NRTS为不能进行维修的比例,分别对应不同的下标; $q_{mbj}$ 为母体部件 $b$ 发生故障的原因是由于其分组件 $j$ 故障所导致的概率,即故障隔离概率。

备件需求率可以根据式(1)进行递推,递推的  
© 航空学报编辑部 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

开始是从使用现场的第 1 层级组件 LRU 进行, 则使用 LRU 的需求率为

$$\lambda_{mj} = \frac{365DC_j(1 - RIP_j)HW_m Z_j N_m}{7MTBF_j(1 - RtOK_j)} \quad m \in \text{Echelon}(N), j \in \text{Inden}(1) \quad (2)$$

式中:  $m \in \text{Echelon}(N)$  为处于最低级别的使用现场;  $j \in \text{Inden}(1)$  为处于装备系统第 1 层级的 LRU;  $RIP_j$  为组件  $j$  的原位维修率;  $DC_j$  为占空比;  $RtOK_j$  为重测完好率;  $N_m$  为站点  $m$  的装备配置量;  $HW_m$  为每周平均工作时间;  $Z_j$  为组件  $j$  在其母体中的单机安装数量;  $MTBF_j$  为组件  $j$  的平均无故障间隔时间。

根据使用现场的装备配置量、系统结构和维修条件等参数, 可以推导出故障隔离率为

$$q_{mbj} = \frac{DC_j Z_j MTBF_b (1 - RtOK_b) (1 - RIP_j)}{MTBF_j (1 - RtOK_j) (1 - RIP_b)} \quad (3)$$

## 2.2 备件供应渠道均值与方差的确定

1) 不考虑维修渠道有限的情况下, 站点  $m$  对组件  $j$  的平均在修数量为  $\lambda_{mj}(1 - NRTS_{mj})T_{mj}$ ,  $T_{mj}$  为组件  $j$  的平均修复时间。

2) 令  $\text{SUP}(m)$  表示站点  $m$  的上一级保障单位, 则由上一级站点  $n(n \in \text{SUP}(m))$  向站点  $m$  进行供应补给中的备件数量为  $\lambda_{mj} NRTS_{mj} O_{mj}$ , 站点  $m$  向上级  $n$  申领备件时, 因备件短缺而造成补给延误的数量为  $f_{mj} EBO_{\text{SUP}(m), j}$ , 上述两项之和为对站点  $m$  进行供应和补给的备件数量。其中,  $f_{mj}$  为影响站点  $m$  的短缺占备件短缺的总数的比例, 即

$$f_{mj} = \lambda_{mj} NRTS_{mj} / \lambda_{\text{SUP}(m), j} \quad (4)$$

3) 组件  $j$  因等待分组件而造成分组件  $k$  修理延误的数量等于  $\sum_{k \in \text{Sub}(j)} h_{mj k} EBO_{mk}$ , 其中  $h_{mj k}$  为组件  $j$  产生分组件  $k$  的需求占需求总量  $\lambda_{mk}$  的比例, 设  $q_{mj k}$  为分组  $k$  的故障率, 则有:

$$h_{mj k} = \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) q_{nj k} / \lambda_{mk} \quad (5)$$

供应渠道由上述 3 部分组成, 则第  $j$  项备件在站点  $m$  的供应渠道数量  $X_{mj}$  的均值和方差分别为

$$E(X_{mj}) = \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) T_{mj} + \lambda_{mj} NRTS_{mj} O_{mj} + f_{mj} EBO_{\text{SUP}(m), j} + \sum_{k \in \text{Sub}(j)} h_{mj k} EBO_{mk} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(X_{mj}) = & \lambda_{mj} (1 - NRTS_{mj}) T_{mj} + \lambda_{mj} NRTS_{mj} O_{mj} + \\ & f_{mj} (1 - f_{mj}) EBO_{\text{SUP}(m), j} + \\ & f_{mj}^2 VBO_{\text{SUP}(m), j} + \sum_{k \in \text{Sub}(j)} h_{mj k}^2 VBO_{mk} + \\ & \sum_{k \in \text{Sub}(j)} h_{mj k} (1 - h_{mj k}) EBO_{mk} \quad (7) \end{aligned}$$

式中:  $O_{mj}$  为站点  $m$  向上级申请备件  $j$  的延误时间;  $EBO_{mj}$  及  $VBO_{mj}$  分别为备件期望短缺数和短缺数方差。

$$EBO_{mj} = \sum_{X_{mj}=s_{mj}+1}^{\infty} (X_{mj} - s_{mj}) p(X_{mj}) \quad (8)$$

$$VBO_{mj} = E(BO_{mj}^2) - EBO_{mj}^2 \quad (9)$$

$$E(BO_{mj}^2) = \sum_{X_{mj}=s_{mj}+1}^{\infty} (X_{mj} - s_{mj})^2 p(X_{mj}) \quad (10)$$

式中:  $S_{mj}$  为站点  $m$  的第  $j$  项备件的库存量;  $BO_{mj}$  为备件  $j$  在站点  $m$  的短缺数。

当差均比  $\text{Var}(X_{mj})/E(X_{mj})=1$  时,  $p(X_{mj})$  用泊松概率分布计算; 当  $\text{Var}(X_{mj})/E(X_{mj})>1$  时, 用负二项分布近似计算<sup>[20]</sup>。当  $\text{Var}(X_{mj})/E(X_{mj})<1$  时, 用二项分布对  $p(X_{mj})$  作近似估计。

## 3 串件拼修对策下的装备可用度评估

### 3.1 非串件系统

对于非串件系统, 当部件发生故障时, 只能通过现有备件库存或上级供应补给的方式对故障单元进行更换维修, 不能通过与其他系统之间进行串件而将故障部件统一集中。装备可用度取决于其所属的第 1 层级单元  $LRU_j(j \in \text{Inden}(1))$  的短缺量大小, 则使用现场站点  $m(m \in \text{Echelon}(N))$  的装备期望可用度为

$$A_m = \prod_{j \in \text{Inden}(1)} \{1 - EBO_{mj} / (N_m Z_j)\}^{Z_j} \quad (11)$$

令  $D_{nc}$  为非串件项目故障而导致装备停机的数量, 在任一随机时间内, 系统停机数量  $D_{nc}$  的概率分布函数为

$$P(D_{nc} = d) = \binom{N_m}{d} (1 - A_m)^d A_m^{N_m - d} \quad (12)$$

装备系统停机数量  $D_{nc} \leq y$  的累积概率分布函数为

$$G(D_{nc} \leq y) = \sum_{d=0}^y P(d) \quad (13)$$

### 3.2 串件系统

在串件对策下,备件空缺(短缺)能够在装备之间进行集中合并,若第  $j$  个项目短缺数满足  $BO_j \leq yZ_j$ ,则由该项目故障而导致装备停机的数量  $D_c \leq y$ 。对于装备中的所有项目而言,必须同时满足  $BO_j \leq yZ_j, j=1, 2, \dots, J$ 。则装备停机数量  $D_c \leq y$  的累积概率分布函数为

$$G(D_c \leq y | s) = P\left[\bigcap_{j=1}^J (BO_j \leq yZ_j) | s\right] = P\left[\bigcap_{j=1}^J (X_j \leq yZ_j + s_j)\right] \quad (14)$$

式中:  $s = \{s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_J\}$  为备件库存量集合;  $X_j$  为备件  $j$  的供应渠道数量,由于  $X_j$  之间相互独立,则停机数量  $D_c$  的累积概率分布函数和分布密度函数分别为

$$G(D_c \leq y | s) = \prod_{j=1}^J P(X_j \leq yZ_j + s_j) \quad (15)$$

$$g(y) = G(D_c \leq y) - G(D_c \leq y-1) \quad (16)$$

装备停机数量的期望值为

$$E(D_c) = \sum_{y=0}^n yg(y) = nG(n) - \sum_{y=0}^{n-1} G(y) \quad (17)$$

式中:  $n$  为正整数,  $n$  的取值可以大到使累积概率分布函数  $G(n)$  近似等于 1,并满足  $n \leq N_m$ 。串件系统的期望可用度可以表示为所有装备中完好装备数占装备总数的百分比,即

$$A_c = \frac{N_m - E(D_c)}{N_m} \times 100\% \quad (18)$$

### 3.3 不完全串件系统

装备组成结构中,并不是所有的项目都能够进行串件,例如:美空军 F-16 战机携行战备配套的 176 项 LRU 中,约有 44 项(占 25%)属于难串件项目;而 F-15 战机的 237 项 LRU 中,有 45 项(占 19%)属于难串件项目<sup>[19]</sup>。

在一个由非串件项目和串件项目组成的系统中:令  $j=1, 2, \dots, J_{nc}(0 < J_{nc} \leq J)$  表示非串件项目;  $j=J_{nc}+1, J_{nc}+1, \dots, J$  表示串件项目;  $D_{nc}$  为非串件项目故障而导致系统停机的数量;  $D_c$  为串件项目故障而导致系统停机的数量;  $D$  为所

有项目故障而导致系统停机的总数。串件项目发生的短缺能够转移并集中在由非串件项目故障而停机的系统中,因此有:

$$D = \max \{D_{nc}, D_c\} \quad (19)$$

系统中非串件项目和串件项目的故障数相互独立,则  $D$  的累积概率分布函数为

$$G\{D \leq y | s\} = G\{D_{nc} \leq y | s, D_c \leq y | s\} = G(D_{nc} \leq y)G(D_c \leq y) \quad (20)$$

式中:  $D_{nc}$  和  $D_c$  的概率分布函数分别按式(13)和式(15)进行计算,当  $EBO_{mj} \ll N_m Z_j$  时,有

$$A_m \approx \prod_{j \in J_{nc}} \exp(-EBO_{mj}/N_m) = \exp\left[-\left(\sum EBO_{mj}\right)/N_m\right] \quad (21)$$

则由非串件项目故障造成系统停机数  $D_{nc}$  的均值和方差可分别近似表达为

$$E(D_{nc}) \approx \sum_{j \in J_{nc}} EBO_j \quad (22)$$

$$\text{Var}(D_{nc}) \approx \sum_{j \in J_{nc}} VBO_j \quad (23)$$

根据  $\text{Var}(D_{nc})/E(D_{nc})$ ,  $p(D_{nc})$  可根据泊松分布、负二项分布或者二项分布进行计算。

计算不完全串件系统的期望可用度时,首先根据式(12)确定由非串件项目而造成系统停机数  $D_{nc}$  的概率分布  $p(D_{nc})$ ,若  $EBO_{mj} \ll N_m Z_j$  时,则根据式(22)和式(23)计算  $\text{Var}(D_{nc})/E(D_{nc})$  来确定  $p(D_{nc})$ ,利用式(13)计算装备停机数量的累积分布  $G(D_{nc} \leq y)$ ;然后根据式(15)计算由串件项目而造成系统停机数的累积分布函数  $G(D_c \leq y)$ ,根据式(20)确定不完全串件系统的停机总数的累积分布  $G(D \leq y)$ ;最后,根据式(17)计算装备停机数量的期望值  $E(D)$ 。则不完全串件系统的期望可用度为

$$A = \frac{N_m - E(D)}{N_m} \times 100\% \quad (24)$$

## 4 初始方案确定及保障效能分析流程

首先,需要确定备件的初始库存数量。通过第 1 节的分析可知:在换件维修方式下得出的备件库存方案具有较强的鲁棒性,而串件对策得出

的方案鲁棒性较差。因此,按换件维修方式确定系统备件初始库存量,若设定的可用度指标为  $A_0$ ,在保证系统可用度达到  $A_0$  前提下,使备件费用最低,其优化模型为

$$\begin{cases} \min \sum_j \sum_m C_j s_{mj} \\ \text{s. t. } A \geq A_0 \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $C_j$  为第  $j$  项组件的单价;  $s_{mj}$  为站点  $m$  的第  $j$  项备件库存量。

对式(11)的等号两端取对数可得:

$$\begin{aligned} \ln A_m &= \sum_{j \in \text{Inden}(1)} Z_j \ln[1 - \text{EBO}_{mj} / (N_m Z_j)] \approx \\ &= -\frac{1}{N_m} \sum_{j \in \text{Inden}(1)} \text{EBO}_{mj} \end{aligned} \quad (26)$$

使用站点  $m$  ( $m \in \text{Echelon}(N)$ ) 的装备第 1 层级备件  $\text{LRU}_j$  ( $j \in \text{Inden}(1)$ ) 短缺量大小直接影响装备可用度,初始化备件库存量  $\bar{s} = 0$ , 计算每一次迭代过程中的边际效应值  $\delta(m, j)$  为

$$\delta(m, j) = \left\{ \sum_m \sum_j \text{EBO}_{mj}(\bar{s}) - \sum_m \sum_j \text{EBO}_{mj}(\bar{s} + \mathbf{O}(m, j)) \right\} / C_j \quad (27)$$

式中:  $\bar{s}$  为库存量矩阵;  $\mathbf{O}(m, j)$  为站点  $m$  的第  $j$  项备件为 1, 其他全为 0 的矩阵。  $\max \delta(m, j)$  对应最优站点  $m^*$  以及最优备件项目  $j^*$ , 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, 直到满足模型中所设定的可用度指标为止。

在计算得到的初始备件库存量基础上, 根据系统中的可串件项目, 针对具体的串件对策计算整个保障体系内装备系统的平均停机数量和期望可用度, 对保障效能进行分析。

最后, 设定仿真参数和仿真流程, 采用仿真方法对解析法得出的方案进行评估和验证, 通过分析、比较解析法和仿真方法所得到的结果, 对备件方案进行调整, 确定并得到最优备件方案。一套完整的最优备件方案确定方法和保障效能分析流程如图 2 所示。首先按换件维修方式确定备件初始库存量; 在此基础上计算不同的串件对策下的装备可用度, 根据仿真对结果进行评估和验证, 最

后调整串件对策确定最优方案。

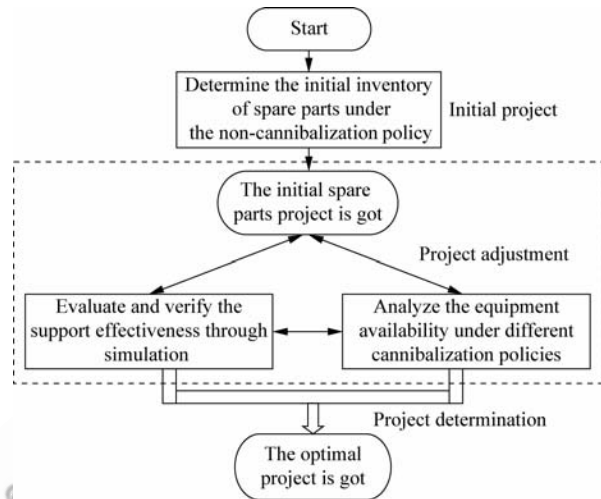


图 2 保障效能分析流程及最优方案确定

Fig. 2 Flow chart of support effectiveness and determination of project of optimal spare parts

## 5 实验设计及结果分析

假设由一个基地站点 ( $H_0$ )、3 个基层站点 ( $J_1, J_2, J_3$ ) 组成的两级维修供应体系中, 对配置在基层的装备保障效能进行分析并确定其备件最优库存方案, 装备在各基层级的配备数量  $N_m$  分别为 [18, 12, 15]。装备系统的组成结构关系如图 3 所示, 图中 SRU 为车间更换单元。装备备件清单及其相关参数如表 1 所示。

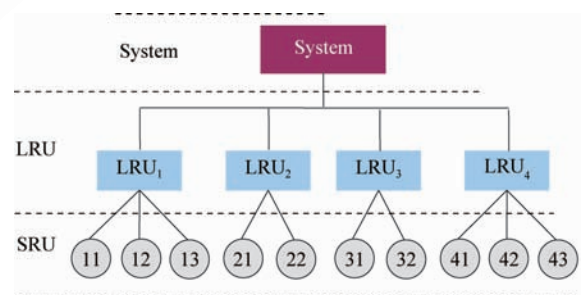


图 3 装备部件组成结构

Fig. 3 The structure of system spare parts

保障周期为一年, 在保障周期内, 上级规定整个保障系统的所有装备可用度  $A$  不低于 0.9。根据保障性分析流程, 首先按非串件对策的假设下, 运用边际分析法对备件库存模型进行优化, 得到的初始备件方案如表 2 所示。

表 1 装备备件清单及相关参数

Table 1 The list of spare parts and their parameters

Spare parts	MTBF <sub>j</sub>	Z <sub>j</sub>	RIP <sub>j</sub>	DC <sub>j</sub>	RtOK <sub>j</sub>	T <sub>j</sub>	NRTS <sub>j</sub>	C <sub>j</sub>
LRU <sub>1</sub>	345	1	0.2	0.8	0.1	10	0.56	113 400
LRU <sub>2</sub>	565	2	0.2	0.8	0.1	11	0.62	78 800
LRU <sub>3</sub>	495	1	0.2	0.8	0.1	13	0.68	53 400
LRU <sub>4</sub>	345	3	0.2	0.8	0.1	9	0.54	92 300
SRU <sub>11</sub>	2 400	2	0.1	0.7	0.2	5	0.67	16 700
SRU <sub>12</sub>	1 800	1	0.1	0.7	0.2	7	0.75	38 800
SRU <sub>13</sub>	2 100	1	0.1	0.7	0.2	7	0.58	19 300
SRU <sub>21</sub>	2 000	1	0.1	0.7	0.2	8	0.72	11 200
SRU <sub>22</sub>	2 600	2	0.1	0.7	0.2	4	0.78	9 700
SRU <sub>31</sub>	1 800	2	0.1	0.7	0.2	5	0.69	6 700
SRU <sub>32</sub>	2 200	1	0.1	0.7	0.2	3	0.77	8 800
SRU <sub>41</sub>	1 300	2	0.1	0.7	0.2	7	0.63	12 300
SRU <sub>42</sub>	3 100	1	0.1	0.7	0.2	6	0.55	21 800
SRU <sub>43</sub>	2 800	1	0.1	0.7	0.2	7	0.62	18 800

表 2 非串件对策下的最优备件方案

Table 2 The optimal project of spare parts with non-cannibalization

Support sites	Support sites						
	LRU <sub>1</sub>	LRU <sub>2</sub>	LRU <sub>3</sub>	LRU <sub>4</sub>	SRU <sub>11</sub>	SRU <sub>12</sub>	SRU <sub>13</sub>
H <sub>0</sub>	3	4	3	8	2	2	3
J <sub>1</sub>	2	3	2	8	0	0	1
J <sub>2</sub>	1	2	2	5	0	0	0
J <sub>3</sub>	1	2	2	6	1	0	1

Support sites	Support sites						
	SRU <sub>21</sub>	SRU <sub>22</sub>	SRU <sub>31</sub>	SRU <sub>32</sub>	SRU <sub>41</sub>	SRU <sub>42</sub>	SRU <sub>43</sub>
H <sub>0</sub>	4	3	3	2	9	3	5
J <sub>1</sub>	1	1	1	0	2	1	1
J <sub>2</sub>	1	1	1	0	1	1	1
J <sub>3</sub>	1	1	1	0	1	1	1

执行表 2 所示的备件方案后,3 个基层现场的装备可用度分别为: $A_{j_1}=0.920 6$ 、 $A_{j_2}=0.888 1$ 、 $A_{j_3}=0.890 7$ ,整个保障体系的装备可用度  $A=0.901 96$ ,保障费用  $C=549.3$  万元,备件模型在程序优化迭代过程中所得到的最优费效曲线如图 4 所示。得到初始备件优化方案后,根据基层单位所采用的不同串件策略,对装备可用度进行评估和分析。表 3 所示为不同串件对策下,装备可用度可达到的实际值,其中:下标  $j_1$ 、 $j_2$ 、 $j_3$  分别表示 3 个基层现场;串件对策中:1 表示串件,0

表示不串件,例如 0110 表示对装备中的 LRU<sub>2</sub> 和 LRU<sub>3</sub> 进行串件,而 LRU<sub>1</sub> 和 LRU<sub>4</sub> 不进行串件。

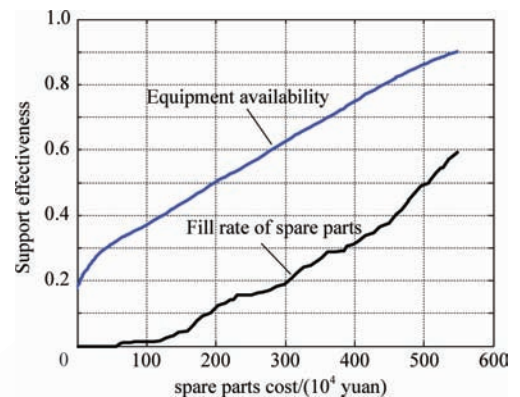


图 4 备件方案的最优费效曲线

Fig. 4 The curve of effectiveness vs cost for spare parts

表 3 不同串件对策下的装备可用度

Table 3 Equipment availability with different modes of cannibalization

Repair policies	Site A <sub>j1</sub>	Site A <sub>j2</sub>	Site A <sub>j3</sub>	Support system A <sub>x</sub>	VMETRIC result	Result errors/%
1000	0.928 5	0.898 9	0.902 4	0.911 88	0.912 75	0.090
0110	0.932 7	0.896 2	0.902 7	0.912 96	0.914 40	0.160
1100	0.935 1	0.905 6	0.911 6	0.919 41	0.919 65	0.030
1110	0.937 0	0.907 1	0.913 4	0.921 19	0.921 21	0.002
1111	0.945 4	0.926 0	0.931 6	0.935 63	0.935 65	0.002

基层站点可根据自身的维修能力和条件对装备实施不同的串件对策,串件拼修可以相应地提高可用度,例如,若对装备实施完全串件对策(1111)时,整个保障体系的装备可用度可达到 0.935 63,相比非串件对策时,可将装备可用度在原有基础上(0.901 96)提高近 3.4%。将本文实验数据代入 VMETRIC 备件优化软件中进行仿真评估,得到的仿真结果与本文计算结果进行比较,两种结果几乎一致,证明了本文所建模型的正确性和合理性。

在装备使用过程中,各保障站点可根据当前各备件的状态信息(包括当前需求率、维修数量、正在补给中的数量、短缺数量),对各站点的备件库存量进行动态调整,使整个保障效能达到最佳。

## 6 结论与展望

在多级维修供应模式下,给出了装备备件初

始库存量的优化方法,建立了非串件系统、完全串件系统以及不完全串件系统的可用度评估模型,在串件拼修对策下,提出了装备保障效能的分析流程和方法。通过实验给出了计算结果并对其进行了分析,采用国外先进的 VMETRIC 仿真平台对模型进行检验,结果表明:在串件拼修对策下,能够在现有备件库存方案的基础上进一步提高装备可用度和保障效能,本文结果与 VMETRIC 仿真结果之间的误差在 0.002%~0.090% 之间,证明了本文所建模型的正确性和合理性。

备件模型的求解需要大量的已知参数,对于输入数据的要求较高,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,因此,需要加强信息化条件下装备保障工程配套设施的建设,在各保障站点建立完善的保障性分析记录数据库。另外,在装备使用阶段,随着所掌握的装备保障性数据的不断准确和完善,可根据当前保障体系的状态信息,建立备件送修与动态分配管理模型,对备件库存量进行动态调整,进一步提高装备保障效能。

### 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] Sherbrooke C C. METRIC: a multi-echelon technique for recoverable item control. *Operations Research*, 1968, 16(1): 122-141.
- [3] de Haas H F M, Verrijdt J H C M. Target setting for the departments in an aircraft repairable item system. *European Journal of Operational Research*, 1997, 99(3): 596-602.
- [4] Yoon K B, Sohn S Y. Finding the optimal CSP inventory level for multi-echelon system in Air Force using random effects regression model. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(3): 1076-1085.
- [5] Wang N C, Kang R. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with fill rate as objective. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1043-1047. (in Chinese)  
王乃超,康锐.基于备件保障概率的多级库存优化模型. *航空学报*, 2009, 30(6): 1043-1047.
- [6] Lee L H, Chew E P, Teng S Y, et al. Multi-objective simulation-based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(2): 325-341.
- [7] Sleptchenko A, van der Heijden M C, van Harten A. Effects of finite repair capacity in multi-echelon, multi-indenture service part supply systems. *International Journal of Production Economics*, 2002, 79(3): 209-230.
- [8] Rustenburg W D, van Houtum G J, Zijm W H M. Spare parts management at complex technology-based organizations: an agenda for research. *International Journal of Production Economics*, 2001, 71(1): 177-193.
- [9] Jung W. Recoverable inventory systems with time-varying demand. *Production and Inventory Management Journal*, 1993, 34(1): 77-81.
- [10] Liu Y, Wu C, Li Y, et al. Evaluation model of equipment time-varying availability in two-echelon spare support system. *Acta Armanentarii*, 2010, 31(2): 253-256. (in Chinese)  
刘勇,武昌,李阳,等.两级备件保障系统的装备时变可用度评估模型. *兵工学报*, 2010, 31(2): 253-256.
- [11] Lau H C, Song H W, See C T, et al. Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation. *European Journal of Operational Research*, 2006, 170(1): 91-105.
- [12] Sun J C, Li S J, Lu Y M, et al. Simulation and research on the three-echelon storage model of the valuable spare parts in weapon equipment. *Acta Armanentarii*, 2008, 29(7): 854-858. (in Chinese)  
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. *兵工学报*, 2008, 29(7): 854-858.
- [13] Fisher W W, Brennan J J. Performance of cannibalization policies in a maintenance system with spares, repair, and resource constraints. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1986, 33(1): 1-15.
- [14] Fisher W W, Brennan J J. Model for cannibalization policy performance comparisons in a complex maintenance system. *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*. San Diego, CA, USA: North-Holland, 1985: 585-589.
- [15] Byrckett D L. Units of equipment available using cannibalization for repair-part support. *IEEE Transactions on Reliability*, 1985, 34(1): 25-28.
- [16] Salman S, Cassidy C R, Pohl E A, et al. Evaluating the impact of cannibalization on fleet performance. *Quality and Reliability Engineering International*, 2007, 24(4): 445-457.
- [17] Fisher W W. Markov process modeling of a maintenance system with spares, repair, cannibalization and manpower constraints. *Mathematical and Computer Modeling*, 1990, 13(7): 119-125.
- [18] Li L W, Zhang J J, Zhang T, et al. Mission oriented can-

nibalization policy problem and its solving algorithm. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2009, 29(7): 97-104. (in Chinese)

李羚伟, 张建军, 张涛, 等. 面向任务的拼修策略问题及其求解算法. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(7): 97-104.

[19] Sherbrooke C C. *Optimal inventory modeling of system: multi-echelon techniques*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2004.

[20] Sherbrooke C C. *Estimation of the variance-to-mean ratio for AFLC recoverable items*. Potomac, MD: Sherbrooke & Associates, 1984.

#### 作者简介:

阮旻智 男, 博士研究生。主要研究方向: 装备综合保障仿真、保障资源规划等。

Tel: 027-83442753-7402

E-mail: ruanminzhi830917@sina.com

李庆民 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 装备综合保障仿真技术、海军水中兵器对抗仿真与试验等。

Tel: 027-83442947

E-mail: licheng0001@hotmail.com

## Evaluation of Equipment System Availability for Multi-echelon Maintenance Supply with Cannibalization

RUAN Minzhi<sup>1</sup>, LI Qingmin<sup>1,\*</sup>, PENG Yingwu<sup>1</sup>, HUANG Aolin<sup>1,2</sup>, WANG Shen<sup>1</sup>

1. *Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*

2. *Department of Command and Robotization, School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*

**Abstract:** Cannibalization policy is an effective approach to improve support effectiveness. Under the current support condition, it can make equipment availability reach the upper limit. This paper establishes respectively availability models of a non-cannibalization system, a cannibalization system and a partial cannibalization system under the mode of multi-echelon maintenance supply in accordance with the characteristics of cannibalization combined with multi-echelon technique for recoverable item control (METRIC) theory. The analysis flow and method of support effectiveness are studied. In a given example, The initial spare parts inventory project is obtained under which the equipment availability is analyzed with different cannibalization policies. VMETRIC simulation is used to test the results, and the verification shows that there is high consistency between the two results, which proves the validity of the model.

**Key words:** equipment support engineering; multi-echelon maintenance supply; cannibalization; METRIC model; availability; spare part

**Received:** 2011-06-20; **Revised:** 2011-08-14; **Accepted:** 2011-08-28; **Published online:** 2011-12-23 12:25

**URL:** www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111213.1225.001.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20111213.1225.001

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

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