doi: 10.7690/bgzdh.2015.03.003

舰载机有限可修复备件库存模型

张 帅[1]，唐金国[2]，孙 媛[2]，李季颖[2]

（1. 海军航空工程学院研究生管理大队，山东 烟台 264000；
2. 海军航空工程学院科研部，山东 烟台 264000）

摘要：为在舰载机可修复备件库存管理中保持合理的库存及必要的订货补充，提出有限可修复备件库存模型。分析舰载机有限可修复备件维修供应模式；基于储存理论，研究连续采购模型，给出适用于 Vari-Metric 理论的有限可修复备件适用性修改方法；研究有限可修复备件批量采购模型，给出批量采购的最优订购点和最优订购量，并进行实例分析。结果表明：该方法有较高的理论参考价值，对提高舰载机备件供应保障能力具有积极意义。

关键词：有限可修复备件；库存；舰载机

中图分类号：TJ07 **文献标志码**：A

Inventory Model of Partially Repairable Items for Carrier-Based Aircraft

Zhang Shuai[1], Tang Jinguo[2], Sun Yuan[2], Li Jiying[2]

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate*, *Naval Aviation Engineering College*, *Yantai* 264000, *China*;
2. *Office of Research & Development*, *Naval Aviation Engineering College*, *Yantai* 264000, *China*)

Abstract: In order to keep reasonable aircraft repairable spares inventory and necessary supplementary, partially repairable items inventory model is put forward. The maintenance and supply model of partially repairable items of carrier-based aircrafts is analyzed. The continuous procurement model is discussed based on inventory theory, and an adaptive improved model for partially repairable items is presented based on Vari-Metric theory. The bulk purchase model of partially repairable items is studied, and the optimum values of reorder point and order quantity are given, and an application instance is provided. The results of the instance show that the method is of higher theoretical value and is meaningful to improve the logistics support capability of carrier-based aircrafts spare parts.

Keywords: partially repairable items; inventory; carrier-based aircraft

0 引言

可修复备件是故障或损坏后，采用经济可行的技术手段修理，能恢复其原有功能的备件[1-2]。舰载机上可修复备件数量较大，大多直接关系到舰载机的可用度，且占据了绝大部分的备件保障经费，可修复备件的修复，不仅可以节约维修资源和费用，而且对提高装备可用性有着重要的作用[3-4]。可修复备件多级库存控制基础是Sherbrooke、Slay等人以Palm定理为基础提出并完善的Vari-Metric理论[5-7]。

在运用以上理论模型时，一般假设可修复备件可以完全修复，从而适用$(s-1, s)$库存策略，使问题简化。但在实践中，舰载机可修复备件并不是可以无限循环修复使用的，绝大多数属于有限可修复，依据故障类型和故障程度存在一定的报废和消耗概率。为准确地制定可修复备件库存策略，必须考虑备件的有限可修复性，制定合理的备件补充规划。

1 问题分析

为保障舰载机战备完好性和持续作战能力，备件要有一定的储备以补偿维修过程中的可修复备件或者因为可修复备件不适用或报废而额外增加的备件需求。舰载机可修复备件维修供应保障是个多级问题，不仅要关心各个飞行场地的备件需求，还包括负责保障的上级保障机构的备件库存数及维修能力。海军舰载机实行三级维修保障模式：舰员级、中继级和基地级[8-9]。舰载机以航母为基地时，舰员级和中继级处于航母上，两者共享库存，将舰员级和中继级看作基层级，则舰载机是两级保障模式。舰载机备件供应渠道如图 1 所示。

舰载机可修复备件库存模型基于 Vari-Metric 理论，采用$(s-1, s)$库存策略，各维修等级对故障件具备一定的维修能力并储备一定数量的备件。基层级以一定的维修概率 r 对故障件进行维修，对于超出维修能力的故障件，送至后方基地；后方基地接收来自各个基层站点送修的故障件，对各基层站点提供维修补给支持。由于经济性和技术性等原因，送修至后方基地的故障件有一定的报废率 f。对于保障系统内部来说，由于可修件故障率较低，价格高，对于超出基层级维修范围的备件都送至后方基地进行维修处理，因此基层站点可以遵循 Vari-Metric 理论进行库存控制，不必考虑备件报废问题；后方基地对各个基层站点送修的所有备件采

收稿日期：2014-09-12；修回日期：2014-10-27

作者简介：张 帅(1984—)，男，江苏人，博士，从事海军航空、导弹装备综合保障理论与应用研究。

取合适的处理措施，对于不宜修复的备件作报废处理。因为存在可修备件的报废问题，为保证维修供应系统的正常运转，后方基地需要在满足备件保障指标约束的基础上依据经济性原则确定合理的订购量 Q 和订购点 R，对外向生产商订购备件以补充报废的故障件。

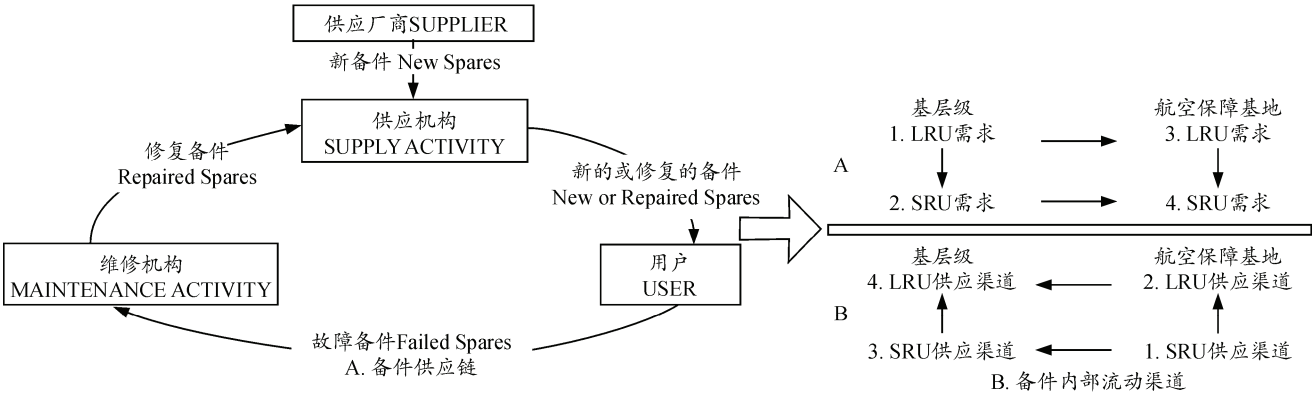

图 1　备件供应渠道流程

2　问题分析

2.1　备件需求

如图 1 所示，备件需求产生于舰载机使用现场。设某备件项 LRU 的平均故障间隔时间为 MTBF，某基层级使用站点 j 舰载机数量为 N_j，备件项 LRU 的单机安装数为 Z_0，任务期内，每架舰载机平均每天飞行时间为 T_{FY}，则该备件项 LRU 故障率为

$$m_{0,j} = \frac{T_{\mathrm{FY}} \cdot Z_0 \cdot N_j}{\mathrm{MTBF}} \tag{1}$$

故障 LRU 在基层级维修概率为 $r_{0,j}$，假设 LRU 故障仅因下层级 SRU_i 故障所致，所占比例为 $q_{i,j}$，则此 SRU_i 需求率为

$$m_{i,j} = m_{0,j} r_{0,j} q_{i,j} \tag{2}$$

后方基地的 LRU 需求是各基层站点送修的超出维修能力的故障 LRU 和：

$$m_{0,0} = \sum_{j=1}^{J} m_{0,j}(1 - r_{0,j}) \tag{3}$$

后方基地 SRU_i 需求由 2 部分组成：一是基层级送修的故障 SRU_i，二是后方基地修理 LRU 产生的 SRU_i 需求。后方基地 SRU_i 需求率为

$$m_{i,0} = \sum_{j=1}^{J} m_{i,j}(1 - r_{i,j}) + m_{0,0} q_{i,0} \tag{4}$$

2.2　连续采购模型

有限可修复备件订购问题的核心就是确定合理的订购量 Q 和订购点 R。经典的库存理论是 Wilson 最优订货批量公式 EOQ[10]：

$$Q = \sqrt{\frac{2\Omega m}{tc}} \tag{5}$$

式中：Ω 为单次订购费用；t 为年度保管费率；c 为备件单价。

经济订货是在多次订货(会增大备件的获取费用)和少次订货(会维持较高水平的库存量并增加储存费用)间取得最优的决策。订购量 Q 的最小值为 1，表示只要发生一次需求就订货。当可修复备件的单价很高，后方基地对可修复备件的需求量很低时，Q 值接近于 1，这时只需要确定再次订货的时间。

当 Q 值接近于 1，即执行$(s-1, s)$库存策略，并且可以对此项备件采取连续采购时，作为一种近似方法，仍然可以利用经典的 Vari-Metric 理论进行备件库存控制，修正的方法就是利用模型中的维修时间。假设后方基地故障件平均修理时间为 T_1，向生产商采购的平均时间为 T_2，备件报废率为 f，对于报废的备件需要向生产商采购，则修正后的备件修理时间 T 为

$$T = (1 - f)T_1 + fT_2 \tag{6}$$

由公式可知，当备件报废率较低时，对备件修理时间的影响较小。将修正后的备件修理时间 T 作为后方基地故障件平均修理时间，可以利用多级 Vari-Metric 理论进行库存管理。

2.3　批量采购模型

当 Q 值大于 1 时，需要确定可修复备件的订购量和订购点，即确定间隔期需求量的概率分布。因间隔期需求方差与均值之比一般大于 1，故可以利用正态分布进行近似计算[11]，经过反复的迭代计算确定最优值。但是正态分布计算很繁琐，鉴于 Laplace 分布与正态分布具有相似性，可以利用 Laplace 分布进行计算[12]，且由于需求若服从 Laplace 分布，订购量 Q 和订购点 R 相互独立，不需要迭代，简化了计算。

设后方基地某项故障件到达率为 m，报废率为 f，订购平均时间为 T_2，订购间隔期需求 $\mu = mfT_2$，订购间隔期需求标准差为 σ，订购点为 R，安全库存量 $k=(R-\mu)/\sigma$，则订购间隔期需求的 Laplace 分布为

$$p(x) = \left(\sqrt{2}/2\sigma\right) \cdot \exp(-\sqrt{2}\left|x - mfT_2\right|/\sigma) \tag{7}$$

根据库存平衡公式，后方基地库存状态(S)=现有库存备件数(OH)+待收备件数(DI)−短缺数(BO)，Hadley 和 Whitin 证明库存状态位于 L 和 $L+\mathrm{d}L$ 间的概率为 $\mathrm{d}L/Q$[11]，Presutti 和 Trepp 进而证明备件短缺数位于 y 和 $y+\mathrm{d}y$ 间的概率[12]为

$$\Pr\{y \leqslant \mathrm{BO} \leqslant y + \mathrm{d}y\} = \int_R^{R+Q} \left(\frac{\sqrt{2}}{2\sigma}\right) \exp\left[\frac{-\sqrt{2}\left(L + y - \mu\right)}{\sigma}\right] \mathrm{d}y \frac{\mathrm{d}L}{Q} \tag{8}$$

备件短缺数的概率分布为

$$\Pr\{\mathrm{BO} = y\} = \frac{1}{2Q} \exp\left[-\frac{\sqrt{2}\left(y + k\sigma\right)}{\sigma}\right]\left(1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}Q}{\sigma}\right)\right) \tag{9}$$

从而期望短缺数为

$$\mathrm{EBO} = \int_0^\infty \Pr\{\mathrm{BO} = y\}\,\mathrm{d}y = \frac{\sigma^2}{4Q} \mathrm{e}^{-\sqrt{2}k}\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{\sqrt{2}Q}{\sigma}}\right) \tag{10}$$

基于以上内容建立有限可修复备件的订购模型，在满足一定的备件短缺数指标下，确定最优的订购量 Q 和订购点 R，使得备件总的订购和储存费用最低。

$$\min \frac{\Omega mf}{Q} + tc\left[\frac{Q+1}{2} + R - \mu + \mathrm{EBO}\right] \tag{11}$$

约束条件为

$$\begin{cases} EBO \leqslant \beta \\ Q \geqslant 1 \\ R \geqslant -1 \end{cases} \tag{12}$$

式中 β 为备件短缺数指标。假设后方基地故障件平均维修时间为 T_2，则后方基地维修供应渠道平均件数

$$P = m\left(1 - f\right)T_1 \tag{13}$$

假设根据任务需求或相关标准要求的后方基地短缺数指标为 B，由于同时存在可修备件的维修供应渠道和订购供应渠道；因此，需要按供应渠道数量的比例将短缺数 B 在订购渠道和维修渠道之间进行分配。订购供应渠道短缺数指标 β 为

$$\beta = \frac{\mu B}{\left(\mu + P\right)} = \frac{BfT_2}{fT_2 + \left(1 - f\right)T_1} \tag{14}$$

上述问题为带有约束的最小值问题，运用 Lagrange 乘子法将上述问题转化为无约束问题，对上述最优订购模型优化求解，得出最优订购量 Q^* 和订购点 R：

$$Q^* = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{2\Omega mf}{tc} + \frac{\sigma^2}{2}} \tag{15}$$

$$R = -\frac{\sigma}{\sqrt{2}} \ln \frac{4Q\beta}{\sigma^2(1 - \mathrm{e}^{-\sqrt{2}Q/\sigma})} + mfT_2 = -\frac{\sigma}{\sqrt{2}} \ln \frac{4QBfT_2}{\sigma^2(1 - \mathrm{e}^{-\sqrt{2}Q/\sigma})[fT_2 + (1-f)T_1]} + mfT_2 \tag{16}$$

需要将维修供应渠道的备件数追加到订购点，得到修正后的最优订购点

$$R^* = R + P \tag{17}$$

根据得到的最优订购量 Q^* 和最优订购点 R^* 结合 Vari-Metric 理论对备件配置方案作进一步调整，即可得到修正后的最优备件库存方案。

3　实例分析

下面以有限可修复备件的批量订购模型为例进行应用分析。假设舰载机后方基地某项有限修复备件的年平均需求 m 为 50，后方基地此项备件报废率 f 为 0.1，备件单价为 50 000 元，每件备件年平均保管费率 t 为 0.2，备件平均维修时间 T_1 为 25 d，平均订购时间 T_2 为 200 d，每次订购费用 Ω 为 30 000 元，后方基地短缺数指标为 0.5。求取此项有限可修复备件后方基地的最优订购量 Q 和订购点 R。

订购间隔期平均需求为

$$\mu = 50 \times 0.1 \times 200 / 365 = 2.739\,7$$

间隔期需求标准差为

$$\sigma = \sqrt{\mu} = \sqrt{2.739\,7} = 1.655\,2$$

最优订购量为

$$Q^* = \frac{1.655\,2}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{2 \times 30\,000 \times 50 \times 0.1}{0.2 \times 50\,000} + \frac{2.739\,7}{2}} = 6.771\,3$$

维修供应渠道件数为

$$P = 50\left(1 - 0.1\right)25 / 365 = 3.082\,2$$

订购渠道短缺数指标 β 为

$$\beta = \frac{0.5 \times 0.1 \times 200}{0.1 \times 200 + \left(1 - 0.1\right)25} = 0.235\,3$$

最优订购点为

$$R^* = -\frac{1.655\,2}{\sqrt{2}} \ln \frac{4 \cdot 7 \times 0.235\,3}{2.739\,7(1 - \mathrm{e}^{-\sqrt{2} \cdot 7/1.655\,2})} + 50 \times 0.1 \times 200 / 365 + 3.082\,2 = 4.792\,0$$

将以上数据四舍五入求得最优订购点为 5，最优订购量为 7，进而结合 Vari-Metric 理论即可得到最优备件配置方案。

(下转第 32 页)