

基于 ACO 的横向供应策略两级备件库存研究

关 娇¹, 刘少伟², 刘 剑¹, 张 茜¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077; 2. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 对装备可维修备件库存配置进行科学的优化决策, 寻求装备可维修备件保障费用与装备战备完好性之间的最佳平衡在装备维修保障中是十分重要的。在此背景下进行多级可维修备件的库存研究, 建立可维修备件多级库存模型, 对模型中的重要参数和库存指标进行了评估, 设计蚁群优化算法, 将可维修备件以恰当的数量配置在恰当的多级库存系统中, 以达到备件平均延误时间允许下的最低备件保障费用。算例结果表明: 引入横向供应策略节省了 41.37% 的可维修备件的保障总费用。

关键词 库存系统; 可维修备件; 横向供应; 蚁群算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.020

中图分类号 TJ762.111 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0090-05

Research on Two-echelon Spare Parts Systems with Lateral Transshipments Based on ACO

GUAN Jiao¹, LIU Shao-wei², LIU Jian¹, ZHANG Qian¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: It is very important to make a scientific optimum decision on the repairable spare parts inventory allocation for complex equipment, and seek the best balance between spare parts cost and availability in maintenance. Thus, the focus of this paper is on the analysis of multi-echelon spare parts inventory system, the goal of it is to build a multi-echelon spare parts inventory model, evaluate the related parameters and inventory index, and develop ant colony optimization algorithm (ACO) in order to identify stocking policies to minimize system-wide spare parts support cost subject to the average waiting time per demanded part at each of the locations. The experiment gives insights into the relative improvement achievement achieved by applying lateral transshipments.

Key words: inventory system; repairable spare part; lateral transshipments; ant colony optimization algorithm

装备可维修备件的多级库存系统中增加横向供应策略, 将传统的树状结构模式扁平化, 强调各个基层级仓库之间的信息共享和资源共享, 可以大大缩

短备件平均延误时间。文献[1]进行了两级维修系统备件库存量的最优化模型研究, 利用基地级维修中心、后方维修中心和基地、后方维修中心之间往返

收稿日期: 2012-06-21

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JQ8035)

作者简介: 关 娇(1982-), 女, 安徽阜阳人, 硕士, 主要从事通信装备综合保障工程研究。

E-mail: lsw3721@163.com

的零件的概率分布之积计算基地级的故障件总数,模型的不足之处是没有考虑后方维修中心有备件库存的情况,降低了研究的通用性。文献[2]综合权衡备件经费与装备的最大可用度,建立备件供应保障的优化模型,模型中备件平均延误时间的计算使用的是一个经验公式,并假设基层级获取备件的平均反应时间和中继级获取备件的反应时间均为确定值,使问题过于简化,而本文中备件的平均延误时间与每一项备件都有关系,是一个系统指标。文献[3]给出了一种基于装备可用度的电子备件存储模型,能够在备件数量确定的条件下,通过最优的两级储备(基层级、中继级),使装备的使用可靠度最大,论文中没有考虑两级维修的情况。本文在两级库存系统中引入横向供应策略,利用蚁群算法对可维修备件库存配置进行科学的优化配置,寻求可维修备件库存保障总费用与装备备件平均延误时间之间的最佳平衡。

1 具有横向供应策略的两级库存系统数学模型

1.1 基本假设

建立具有横向供应策略的两级库存系统的数学模型基本假设有:①库存系统执行连续检查的(S-1,S)策略;②装备部件失效过程是一个泊松过程,均值为部件故障率^[4];③基层级可维修备件的需求过程是一个泊松过程,均值为该基层级中所有装备同种类型部件故障率的总和;④基地级维修中心有充分的维修能力,故障部件的维修时间服从独立同分布的某种一般分布;⑤横向供应比正常供应所需供应时间更短,供应费用更少;⑥各基层级存储的可维修备件完全共享;⑦一旦确定某备件的需求要通过横向供应来满足,将不会等待正常供应备件的到达;⑧从基地级到各基层级的备件运输时间是确定值。

1.2 数学模型

本文的研究目标是建立具有横向供应策略的两级库存系统的数学模型,确定满足所有基层级仓库备件平均延误时间允许下的最低库存系统总费用(包括基地级和所有基层级仓库的期望库存持有费用以及横向供应费用),同时确定各种备件在基地级仓库和各基层级仓库的最佳目标库存水平。

数学模型描述如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in I} h_i \bar{I}_{i0}(S_{i0}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i \bar{I}_{ij}(S_{i0}, S_{ij}) \\ \text{s. t.} \quad & \bar{W}_j \leq W_j^{\max}, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 \leq S_{ij} \leq S_{ij}^{\max}, i \in I, j \in J \\ 0 \leq S_{i0} \leq S_{i0}^{\max}, i \in I \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 为 n 类备件的集合; $J = \{1, 2, \dots, m\}$ 为 m 个仓库的集合; $\bar{I}_{i0}(S_{i0})$ 为备件 i 在基地级仓库目标库存水平为 S_{i0} 时的期望库存水平; $\bar{I}_{ij}(S_{i0}, S_{ij})$ 为备件 i 在基地级仓库目标库存水平为 S_{i0} 、在基层级仓库 j 目标库存水平 S_{ij} 为时基层级仓库 j 的期望库存水平; \bar{W}_j 为基层级仓库 j 中满足任一备件需求的平均延误时间; W_j^{\max} 为基层级仓库 j 中满足任一备件需求的最大延误时间; h_i 为第 i 类备件的存存持有费用。

基层级仓库 j 中满足任一备件需求的平均延误时间 \bar{W}_j 可以由下式确定:

$$\begin{aligned} \bar{W}_j = \frac{\sum_{i \in I} \lambda_{ij} (\alpha_j^i \bar{T}_i^r + \beta_j^i 0 + \theta^i \bar{T}_{ij}^d) / \Delta_j}{\sum_{i \in I} \lambda_{ij} (\alpha_j^i \bar{T}_i^r + \theta^i \bar{T}_{ij}^d) / \Delta_j} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: α_j^i 为基层级仓库 j 中备件 i 的需求由横向供应来满足的概率; β_j^i 为基层级仓库 j 中备件 i 的需求可由自身满足的概率; θ^i 为备件 i 的需求由于所有基层级仓库都缺货暂不能满足的概率; λ_{ij} 为基层级仓库 j 中备件 i 的平均需求率; Δ_j 为基层级仓库 j 中所有备件的需求率之和; \bar{T}_i^r 为备件 i 的横向供应时间; \bar{T}_{ij}^d 为仓库 j 中备件 i 的需求由于备件缺货(此时所有基层级仓库都缺货)的平均延误时间,根据 Little 公式得: $\bar{T}_{ij}^d = \bar{B}_{ij}(S_{i0}, S_{ij}) / \lambda_{ij}$ 。

2 备件期望库存水平与期望缺货水平

在 $M/G/\infty$ 的排队系统中,根据 Palm 定理推导出基地级备件的期望库存水平 $\bar{I}_{i0}(S_{i0})$ 和期望缺货水平 $\bar{B}_{i0}(S_{i0})$ 分别为^[5-6]:

$$\begin{cases} \bar{I}_{i0}(S_{i0}) = \sum_{k=0}^{S_{i0}-1} (k - S_{i0}) (\lambda_{i0} R_i)^k \exp(-\lambda_{i0} R_i) / k! \\ \bar{B}_{i0}(S_{i0}) = \sum_{k=S_{i0}+1}^{\infty} (k - S_{i0}) (\lambda_{i0} R_i)^k \exp(-\lambda_{i0} R_i) / k! \end{cases} \quad (3)$$

式中 R_i 为基地级备件 i 的平均修理时间。

将所有基层级仓库看作一个基层级库存集合体,基地级到基层级库存集合体的备件平均供应时间 $L_i = T_i + \bar{B}_{i0}(S_{i0}) / \lambda_{i0}$,其中 T_i 为备件平均运输时间。根据 Palm 定理,基层级库存集合体中备件 i 持有量为 τ 的概率 ρ_i^τ 为:

$$\begin{aligned} \rho_i^\tau(S_{i0}, S_i^{\text{tot}}) = \\ [(\lambda_{i0} L_i)^{S_i^{\text{tot}} - \tau} e^{-\lambda_{i0} L_i}] / (S_i^{\text{tot}} - \tau)!, \quad \tau \leq S_i^{\text{tot}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\lambda_{i0} = \sum_{j \in J} \lambda_{ij}$; $S_i^{tot} = \sum_{j \in J} S_{ij}$ 。

基层级库存集合体中备件 i 的期望库存水平及基层级仓库 j 中备件 i 的期望库存水平为:

$$\begin{cases} \bar{I}_i(S_{i0}, S_i^{tot}) = \sum_{l=1}^{S_i^{tot}} l \rho_l^i(S_{i0}, S_i^{tot}) \\ \bar{I}_{ij}(S_{i0}, S_{ij}) = \beta_j \bar{I}_i(S_{i0}, S_i^{tot}) / \sum_{j \in J} \beta_j \end{cases} \quad (5)$$

3 参数评估

模型中的重要参数 α_i^j 、 β_j^i 以及 θ^i , 本文给出以下评估方法。

对于基层级库存集合体, 基层级各仓库库存量均为零的状态对应的稳态概率用 Erlang 损失概率表示^[7]:

$$\theta^i = L(S_i^{tot}, \lambda_{i0} L_i) = \frac{(\lambda_{i0} L_i)^{S_i^{tot}}}{S_i^{tot}!} / \sum_{x=0}^{S_i^{tot}} \frac{(\lambda_{i0} L_i)^x}{x!} \quad (6)$$

对于单个基层级仓库, 基层级仓库 j 中备件 i 的需求可由自身满足的概率 β_j^i 可以表示为:

$$\omega_{kj}^i = \frac{P(\text{仓库 } j \text{ 是仓库 } k \text{ 的横向供应源} \mid \text{针对仓库 } k \text{ 的横向供应发生})}{P(\text{针对仓库 } k \text{ 的横向供应发生} \& \text{ 仓库 } j \text{ 是仓库 } k \text{ 的横向供应源})} \quad (11)$$

基层级仓库 j 中备件 i 的需求由横向供应来满足的概率 $\alpha_j^i = 1 - \beta_j^i - \theta^i$ 。

由于 α_j^i 与 β_j^i 的表达式互相嵌套, 可以设置 α_j^i (β_j^i) 的初值为任意值, 通过迭代求解, 当所有 α_j^i 和 β_j^i 前后两次迭代误差小于充分小的值, 算法停止, 输出评估值。

4 优化算法设计

具有横向供应策略的两级库存系统的数学模型是一个具有多个约束条件的非线性整数规划问题, 传统的优化方法解决该问题比较困难, 本文设计了针对该问题的蚁群算法, 这种算法是一种基于群体的模拟进化算法, 具有智能并行搜索、全局优化等优点^[8]。在本文问题的蚁群算法中, 蚂蚁下一个节点的选择方法以及信息素更新方法与传统的蚁群算法相同, 适应度函数为式(1)中的目标函数, 以下主要介绍蚁群网络的构造。

如果有 1 个基地级仓库, m 个基层级仓库, 每个仓库有 n 项备件, 那么决策变量 S_{ij} 有 $n(m+1)$ 个, 每个决策变量 S_{ij} 的取值为 $0 \leq S_{ij} \leq S_{ij}^{max}$, 对应的蚁群网络有 $n(m+1)$ 列, 每个 S_{ij} 对应的列有 $S_{ij}^{max} + 1$

$$\beta_j^i = 1 - L(S_{ij}, \bar{\lambda}_{ij} T_{ij}) = 1 - \frac{(\bar{\lambda}_{ij} T_{ij})^{S_{ij}}}{S_{ij}!} / \sum_{x=0}^{S_{ij}} \frac{(\bar{\lambda}_{ij} T_{ij})^x}{x!} \quad (7)$$

式中: $\bar{\lambda}_{ij}$ 为有横向供应的情况下基层级仓库 j 中备件 i 的实际平均需求率; T_{ij} 为基层级仓库 j 中备件 i 的平均供应时间。

在基层级仓库 j 可以向其它仓库提供横向供应时, 需求率 $\bar{\lambda}_{ij}$ 可以表示为:

$$\bar{\lambda}_{ij} = \lambda_{ij} + d_j^i \quad (8)$$

式中 d_j^i 为基层级仓库 j 有备件 i 库存时向其它仓库的横向供应率, 那么基层级仓库 j 的期望供应率为:

$$d_j^i \beta_j^i + 0(1 - \beta_j^i) = d_j^i \beta_j^i = \sum_{k=1, k \neq j}^m \omega_{kj}^i \alpha_k^i / \left(\frac{1}{\lambda_{ik} + T_{ir}^i} \right) \quad (9)$$

因此, 需求率 $\bar{\lambda}_{ij}$ 可以表示为:

$$\bar{\lambda}_{ij} = \lambda_{ij} + \sum_{k=1, k \neq j}^m \omega_{kj}^i \alpha_k^i / \left(\frac{\beta_j^i}{\lambda_{ik} + T_{ir}^i} \right) \quad (10)$$

式中 ω_{kj}^i 为针对基层级仓库 k 的横向供应可能发生时基层级仓库 j 作为供应源时向基层级仓库 k 供应备件 i 的概率。 ω_{kj}^i 描述为:

个节点: $0, 1, \dots, S_{ij}^{max}$, 组成的蚁群网络见图 1, 图中带箭头的线段表示某只蚂蚁可能的行走路径。在蚁群网络中建立了虚拟的始终点(节点 0)。蚂蚁从 0 点出发, 最后回到 0 点。蚂蚁在每一列中只经过一个节点, 蚂蚁走过的所有节点对应 $n(m+1)$ 个决策变量的值。

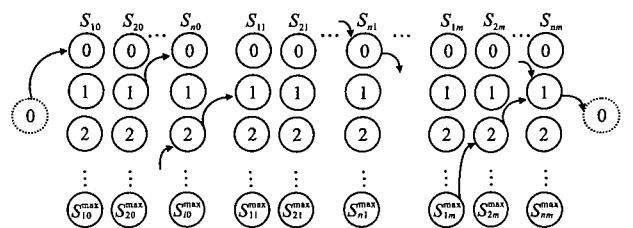


图 1 蚁群网络示意图

Fig. 1 Structure of ant colony net

在图 1 的蚁群网络中, 比如有 1 个基地级仓库, 2 个基层级仓库, 每个仓库有 3 项备件, 假如一只蚂蚁走过的路径为 $0-2-1-3 | -3-5-2 | -1-0-4 | -3-1-1-0$, 则表示 $S_{10} = 2, S_{20} = 1, S_{30} = 3; S_{11} = 3, S_{21} = 5, S_{31} = 2; S_{12} = 1, S_{22} = 0, S_{32} = 4; S_{13} = 3, S_{23} = 1, S_{33} = 1$ 。

基层级决策变量 S_{ij} 的最大值 S_{ij}^{max} 可以根据备件保障率(满足率) $F_{ij}(S_{ij}) \geq 1 - \epsilon$ 确定, 其中 ϵ 是充

分小的正数,比如 0.001。备件保障率 $F_{ij}(S_{ij})$ 为:

$$F_{ij}(S_{ij}) = \sum_{k=0}^{S_{ij}} \frac{(\lambda_{ij} T_{ij})^k e^{-\lambda_{ij} T_{ij}}}{k!}$$

同理可以确定基地级决策变量 S_{i0}^{max} 。在确定 S_{ij}^{max} 、 S_{i0}^{max} 时没有考虑横向供应策略,因此这 2 个值有一定程度的高估,实际上是放宽了约束条件,略增大了搜索范围,不影响蚁群算法的寻优结果。

层仓库,共有 10 种备件,每种备件的库存持有费用见表 1。每种备件在不同基层级仓库中的需求率见表 2。备件在基地级的平均修理时间为 4 d,从基地级仓库到各基层级仓库的运输时间为 2 d。横向供应时间均为 0.5 d,备件需求最大允许延误时间为 0.05 d。

5 算例应用

设两级库存系统中有一个基地级仓库,5 个基

表 1 备件的库存持有费用

Tab.1 Inventory hold cost of spare part

元/(个·d⁻¹)

备件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>h</i>	195.0	123.1	160.6	148.5	189.1	176.2	145.6	101.8	182.1	144.4

表 2 每种备件在不同基层级仓库中的需求率

Tab.2 Rate of demand of each spare part in each depot

备件品种	基层级 1	基层级 2	基层级 3	基层级 4	基层级 5
备件 1	0.064 6	0.042 3	0.040 6	0.073 5	0.047 7
备件 2	0.071 7	0.054 1	0.069 9	0.040 8	0.067 3
备件 3	0.076 9	0.072 5	0.057 8	0.067 3	0.052 1
备件 4	0.069 5	0.040 4	0.077 3	0.055 2	0.061 7
备件 5	0.047 1	0.045 6	0.058 6	0.073 3	0.046 0
备件 6	0.056 2	0.048 1	0.056 7	0.060 1	0.067 9
备件 7	0.077 4	0.047 9	0.073 8	0.068 4	0.055 1
备件 8	0.076 7	0.064 2	0.061 0	0.057 2	0.074 4
备件 9	0.056 4	0.050 9	0.048 1	0.052 2	0.074 1
备件 10	0.075 7	0.048 0	0.066 9	0.047 6	0.063 7

表 3 为有横向供应和无横向供应时各仓库各备件最优目标库存值,其中“,”左侧为有横向供应时的

备件数量,“,”右侧为无横向供应时的备件数量,对应的备件保障总费用分别为 8 236 元和 14 047 元。

表 3 各级仓库各备件最优目标库存值

Tab.3 Optimal expect inventory of each spare part in each depot

备件品种	基地级	基层级 1	基层级 2	基层级 3	基层级 4	基层级 5
备件 1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
备件 2	2,2	2,2	1,2	1,2	2,2	1,2
备件 3	2,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
备件 4	2,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
备件 5	1,3	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1
备件 6	1,3	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2
备件 7	2,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
备件 8	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
备件 9	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
备件 10	2,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

从本算例可以看出,有横向供应比无横向供应最低保障费用减少了 5 811 元,费用降低的幅度为

41.37%。可见横向供应策略是可维修备件两级库存系统中降低备件保障总费用的有效手段。

6 结语

在大型复杂武器装备都面临着使用保障费用高和战备完好性差两大难题的背景下,本文建立了具有横向供应策略的两级多品种可维修备件库存模型,并进行模型中相关参数和指标的评估,利用蚁群算法进行模型求解,目的是在满足每个基层级仓库平均延误时间允许的条件下,为每一个仓库中的每一种备件确定一个最佳的目标库存水平,使整个备件库存系统的备件保障费用最低。本文的研究对装备保障中可维修备件的多级库存问题的进一步研究有一定的现实意义。

参考文献(References):

- [1] 易发. 两级维修系统备件库存量的最优化模型研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2002(4): 2-7.
YI Fa. Optimal inventory model of two-echelon spare parts inventory system [J]. Military operations research and systems engineering, 2002(4): 2-7. (in Chinese)
- [2] 朱绍强, 李寿安, 李为吉. 具有最大可用度的航空备件供应模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(2): 22-24.
ZHU Shaoqiang, LI Shouan, LI Weiji. A spare parts providing model with the maximal availability [J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2005, 6(2): 22-24. (in Chinese)
- [3] 于娜, 李占明, 何鹏. 多级电子备件存储模型[J]. 现代电子技术, 2005, 20: 38-39.
YU Na, LI Zhanming, HE Peng. Multilevel inventory model of electronic spare parts [J]. Modern electronic technique, 2005, 20: 38-39. (in Chinese)
- [4] 刘少伟, 金荣, 张琳. 用粒子群算法优化装备初始备件量[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(1): 46-49.
LIU Shaowei, JIN Rong, ZHANG Lin. The optimization of initial spare parts based on particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of air force engineering

university; natural science edition, 2008, 9(1): 46-49. (in Chinese)

- [5] Kukreja A, Schmidt C P, Miller D M. Stocking decisions for low-usage items in multi-location inventory system [J]. Management science, 2001, 47: 1371-1383.
- [6] Sherbrooke C C. Optimal inventory modeling of systems, multi-echelon techniques [M]. London: Kluwer academic publishers, 2004.
- [7] Sheldon M Ross. Introduction to probability models [M]. Singapore: Elsevier press, 2007.
- [8] Dorigo M, Birattar M, Stutzle T, Stutzle. Ant colony optimization [J]. IEEE computational intelligence magazine, 2006, 1(4): 28-39.
- [9] 陈芳, 蔡忠义. 基于灰色 BP 神经网络的装备保障费用预测模型 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(1): 91-94.
CHEN Fang, CAI Zhongyi. Equipment support cost forecasting model based on grey system theory and BP neural network [J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2012, 13(1): 91-94. (in Chinese)

本刊相关链接文献:

- [1] 陈芳, 蔡忠义. 基于灰色 BP 神经网络的装备保障费用预测模型 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(1): 91-94.
- [2] 陈士涛, 李强, 杨建军, 等. 反导装备维修体制的 Monte-Carlo 仿真 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(4): 51-53.
- [3] 余付平, 冯有前, 杨荣. 基于联合过完备库的信号分离及重构 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(4): 56-58.
- [4] 韩贝贝, 舒涛, 基于混合粒子群算法的通用导弹固定平台布局优化 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(4): 42-44.
- [5] 黄仁全, 靳聪, 贺筱军, 等. 自适应局部增强微分进化改进算法 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(3): 84-86.

(编辑: 田新华)