

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.014

基于改进 PSO 的航天测控装备维修器材库存优化

刘洪林, 许庆, 臧思虎
(航天工程大学士官学校, 北京 102200)

摘要: 针对维修器材积压浪费的问题, 对航天测控装备维修器材库存进行优化。借鉴现有多级库存优化相关研究成果, 采用改进的粒子群优化算法, 将测控装备维修器材库存优化过程描述为在测控装备的可用度达到规定水平, 考虑非串件拼修和串件拼修 2 种维修策略, 构建基于测控装备可用度和器材保障费用约束的维修器材库存优化模型, 获得测控装备维修器材最优的携运行方案, 通过实例进行验证。结果表明, 该模型与优化算法具有一定的可信性及较好的应用价值。

关键词: 粒子群算法; 航天测控; 维修器材; 库存优化

中图分类号: E91; E075 **文献标志码:** A

Stock Optimization of Space TT&C Maintenance Equipment Based on Improved PSO

Liu Honglin, Xu Qing, Zang Sihu
(School of Non-commissioned Officer, Space Engineering University, Beijing 102200, China)

Abstract: Aiming at the problem of overstock and waste of maintenance materials, the inventory of maintenance materials for aerospace TT&C (tracking, telemetry and command) equipment is optimized. Referring to the existing research results of multi-level inventory optimization, the improved particle swarm optimization algorithm is used to describe the inventory optimization process of maintenance equipment of TT&C equipment as follows: when the availability of TT&C equipment reaches the specified level, considering 2 maintenance strategies of non string repair and string repair, constructs the inventory optimization model of maintenance equipment based on the constraints of equipment availability and equipment support cost. The optimal carrying operation scheme of maintenance equipment of TT&C equipment is acquired and verified by an example. The results show that the model and optimization algorithm are trusted, and has great application value.

Keywords: particle swarm optimization; aerospace TT&C; maintenance equipment; stock optimization

0 引言

航天测控装备维修器材应紧贴任务要求, 采用适当的方法、技术或手段对储备与供应过程等进行优化, 实现提升维修器材保障水平、降低保障费用等目的。目前测控装备维修器材储备和供应, 主要是基于历年经验, 依据比例法或基数计算法实施, 即按照类似装备维修器材消耗规律或同类装备历年维修器材消耗记录进行器材请领与储备。不同装备故障规律不同、同类装备年度任务不同, 致使维修器材消耗种类与数量也不尽相同, 必然带来“用而不备”和“备而不用”等问题, 从而削弱任务遂行能力, 造成维修器材积压浪费; 因此, 利用科学方法开展航天测控装备维修器材库存优化研究具有重要的现实意义。

1 改进 PSO 法概述

粒子群优化算法 (particle swarm optimization,

PSO) 是 Kennedy 等受人工生命研究成果启发, 通过模拟鸟群觅食时的迁徙与群聚行为而提出的基于群体智能的全局随机搜索算法^[1]。基本 PSO 算法在应用时存在明显的早熟收敛问题, 笔者采用改进的 PSO 算法, 使每个粒子均具备惯性作用、认知能力、社会能力和创新能力, 在对自身知识和从其他粒子汲取知识进行思考的同时, 能够对自身现有知识进行组合、关联与变换, 并在外界因素激励下实现创新, 使得粒子群的整体搜索能力提高至新的水平^[2]。通过调节粒子群迭代惯性权重与速度位置更新方式, 提高了迭代速度与精度。改进后的 PSO 算法求解步骤^[3]如下:

1) 初始化一群粒子, 如粒子群规模 M , 每个粒子的维数 W , 迭代次数 Y , 最大惯性权重 δ_{\max} 和最小惯性权重 δ_{\min} 。在约束条件范围内随机设置每个粒子的初始位置与速度。

2) 通过目标函数获取单个粒子的适应度。

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-09-25

基金项目: 军内科研项目

作者简介: 刘洪林(1976—), 男, 吉林人, 硕士, 讲师, 从事航天测控装备维修保障研究。E-mail: 11469267@qq.com。

3) 将单个粒子的适应度与其经历过的最好位置 P_m 相比, 若较好, 则将其作为当前最好位置 P_m 。

4) 将每个粒子的适应值与整个粒子群所经历的最好位置 P_{best} 作比较, 若较好, 则重新设定 P_{best} 。

5) 在 4) 的基础上, 更新粒子速度、位置以及惯性权重^[4]。惯性权重的更新公式如下:

$$\delta = \delta_{\max} - (\delta_{\max} - \delta_{\min})(y/Y)^2 \quad (1)$$

6) 判断终止条件, 满足终止条件, 执行 7); 否, 则转到 2)。

7) 迭代停止, 输出 P_{best} 以及对应适应度等控制、状态及统计等变量。

在粒子群迭代的过程中, 随机数的产生会使测控装备维修器材需求量 x 的值为小数。实际应用中, 测控装备维修器材需求量 x 的解与测控装备维修器材库存 s 相对应, 由于 s 为整数; 因此, 应将 x 向上取整数。笔者将测控装备维修器材保障费用作为适应度函数。

改进的 PSO 算法提高了粒子的全局搜索能力, 其收敛速度获得大幅提升。与现有大多数混合 PSO 算法比较, 笔者应用的改进 PSO 算法并没有增加调整的参数, 且在计算时间上优势明显。

2 航天测控装备维修器材库存优化建模

航天测控装备维修器材库存问题抽象为一类多级多层库存问题^[5]。宏观层面要求实现固定和机动测控任务模式下的维修器材库存优化。固定测控任务模式下, 应以确保测控装备保持一定的可用度水平且降低维修器材保障费用为目标, 提高维修器材库存的精确化水平; 机动测控任务模式下, 应以降低维修器材携、运行量的冗余度和器材保障费用为目标, 为用户提供精确的维修器材携、运行决策支持。微观层面要求实现考虑不同维修策略的维修器材库存优化。通常固定模式下测控装备维修时不考虑基于串件拼修的维修策略, 而机动模式下由于任务的紧急性以及远离固定保障基地等特殊性的, 测控装备维修时可能选择基于串件拼修的维修策略。维修策略的选择对测控装备可用度和维修器材保障费用均会产生一定影响, 并会对测控装备维修器材的库存与供应带来一定影响; 因此, 应研究解决 2 种维修策略下的测控装备维修器材库存优化问题。笔者借鉴现有多级库存优化相关研究成果, 将测控装备维修器材库存优化过程描述为在测控装备的可用度达到规定水平的前提下, 建立测控装备可用度与维修器材保障费用的联系, 考虑非串件拼修和串件

拼修 2 种维修策略, 构建基于测控装备可用度和器材保障费用约束的维修器材库存优化模型, 通过相应的算法求解, 最终获取使测控装备保证一定的可用度水平且保障费用最低的器材库存方案。

2.1 模型基本假设

测控装备发生故障时, 首先选择在现场执行换件维修, 当测控装备下级某一子系统或部件发生故障时, 应首先选择在部队级保障机构对子系统或部件进行换件修复处理。如果部队级保障机构的检测与维修能力有限, 则需选择将故障单元或部件送至上级保障机构进行维修, 上级保障机构将现场可更换单元(line replaceable unit, LRU)、修理场所可更换单元(shop replaceable unit, SRU)修复后及时供应至库存中。针对测控装备维修器材库存优化模型作出假设如下:

- 1) 测控装备维修器材执行(S-1,S)库存策略, 不考虑批量维修;
- 2) 对测控装备及其部件的维修均执行换件维修策略;
- 3) 测控装备所有部件均为 LRU 或 SRU, 假设所有 LRU 和 SRU 部件均能重复维修和重复使用;
- 4) 测控装备各组成部件地位均等, 若对应的维修器材短缺时对测控装备可用度的影响结果一致;
- 5) 最高层级的保障机构能够修复所有故障单元或部件;
- 6) 所有部件的故障事件与修复事件均发生于测控装备的任务周期内;
- 7) 单位时间内维修器材需求率服从泊松分布, 不同故障单元或部件的在修量独立;
- 8) 故障部件的送修、对应器材的供应按照维修保障组织的层级逐级向上执行, 无同一层级保障机构之间的横向保障问题;
- 9) 除故障消耗外, 不考虑因其他原因导致维修器材短缺的情况。

2.2 模型建立的基本步骤

非串件拼修策略或串件策略下的测控装备维修器材库存优化模型是一类典型的多级多层库存模型。囿于篇幅, 笔者给出非串件拼修和串件拼修策略下的维修器材库存优化模型建立的一般步骤:

- 1) 预计测控装备维修器材需求率。

分别获取部队级和基地级保障机构对 LRU 和 SRU 的平均需求率。其中, 由测控装备部队级站点对第一层级 LRU 的需求量求出其他层级的 LRU 和

SRU 的需求量；基地级保障机构对 LRU 的需求量等于基地级以下所有保障机构申请补给 LRU 数量的总和；基地级保障机构对 SRU 的需求，等于部队级所有保障机构申请补给数量与基地级维修 LRU 所需要 SRU 数量的总和。

2) 确定维修器材供应渠道均值及方差。

供应渠道维修器材数量由 2 部分构成：一是处于在修及送修状态的故障部件数量；二是正在进行供应的维修器材数量。可根据经典 METRIC 理论来确定各层级保障机构的供应渠道维修器材的均值和方差。

3) 建立非串件和串件拼修策略下的测控装备可用度模型。

区分非串件拼修和串件拼修 2 类情况，分别建立测控装备可用度计算模型。在非串件拼修策略下，测控装备维修时所需器材只能依靠本级维修库存或上级供应来满足；在串件拼修策略下，测控装备维修所需维修器材可通过拆换其他测控装备所属部件、本级器材库存或上级器材仓库供应来满足。

4) 建立基于可用度与费用约束的器材库存优化模型。

以测控装备维修器材整体保障费用最低为优化目标，以测控装备可用度大于规定水平为约束条件，建立基于可用度与费用约束的器材库存优化模型。该模型具体可描述为：维修器材对测控装备可用度水平的保持具有支撑作用，为使测控装备可用度保持在规定的水平之上，确定能使测控装备维修器材保障费用最小的库存方案。模型中的参数定义如下：

n ：部队级保障机构的编号；

j ：部件 LRU 的编号，且 $j=1,2,\dots,J$ ；

k ：部件 SRU 的编号，且 $k=1,2,\dots,K$ ；

N_n ：测控装备在部队级站点 n 的配置台数；

W_j ：部件 LRU _{j} 在测控装备中的单机安装数量；

s ：测控装备维修器材库存数或携带量；

x ：测控装备维修器材需求量。

在非串件拼修策略下，当测控装备所属部件出现故障后，执行换件维修时对维修器材的需求只能由现有保障机构的库存供应以及上级器材仓库供应来满足；因此，测控装备的可用度由测控装备的第一层级 LRU _{j} 的短缺数量来决定，由此可建立部队级各站点的测控装备可用度模型，具体可表示为：

$$A_n = \prod_{j=1}^J \{1 - \text{EBO}_{nj} / (N_n W_j)\}^{W_j} \quad (2)$$

式中， EBO_{nj} 表示部队级保障机构 n 对部件 LRU _{j} 的期望短缺数。其中，测控装备部件的期望短缺数 $\text{EBO}(s)$ 和部件库存量 s 有关， $\text{EBO}(s)$ 的计算模型为：

$$\text{EBO}(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s)p_r(x) \quad (3)$$

式中 $p_r(x)$ 表示待收维修器材数量的稳态概率分布。依据帕尔姆定理，故障部件的维修时间相互独立，并且服从均值为 t 的同一分布，在修部件服从期望为 mt 的泊松分布^[6]，即：

$$p_r(x) = (mT)^x e^{-mT} / x! \quad (4)$$

令 Q_{nc} 表示由于非串件策略发生故障而导致测控装备不可用的台数，在任意随机时间内，测控装备不可用台数 Q_{nc} 的概率分布函数为：

$$P(Q_{nc} = q) = \binom{N_n}{q} (1 - A_n)^q A_n^{N_n - q} \quad (5)$$

而测控装备不可用台数 $Q_{nc} \leq m$ 的累积概率分布函数表示为：

$$F(Q_{nc} \leq m) = \sum_{q=0}^m P(q) \quad (6)$$

在串件拼修策略下，当测控装备维修器材短缺时，可从其他测控装备上进行拆拼获取，若第 j 个短缺数满足 $\text{BO}_j \leq mW$ ，则由部件 LRU _{j} 因故障造成测控装备停机的台数 $Q_c \leq m$ 。对于测控装备中所有项目而言，必须同时满足 $\text{BO}_j \leq mW_j (j=1,2,\dots,J)$ 。则测控装备停机的台数 $Q_c \leq m$ 的累积概率分布函数表示如下：

$$F(Q_c \leq m | s) = P\left[\bigcap_{j=1}^J (\text{BO}_j \leq mW_j) | s\right] = P\left[\bigcap_{j=1}^J (X_j \leq mW_j) | s\right] \quad (7)$$

式中， s 表示部件 LRU _{j} 对应的器材库存的集合， X_j 表示部件 LRU _{j} 供应渠道的数量，由于 X_j 相互独立，则测控装备不可用台数 Q_c 的累积概率分布函数：

$$F(Q_c \leq m | s) = \prod_{j=1}^J P(X_j \leq s_j + mW_j) \quad (8)$$

测控装备不可用台数 Q_c 的密度函数：

$$g(m) = F(Q_c \leq m) - F(Q_c \leq m-1) \quad (9)$$

由此得到测控装备不可用台数的期望：

$$E[Q_c] = \sum_{m=0}^M mf(m) = YF(M) - \sum_{m=0}^{M-1} F(m) \quad (10)$$

式中： $F(m)$ 为测控装备不可用台数 m 的累积概率分布函数； M 为正整数， M 的取值可以大到使 $F(M)$

近似等于 1，并且满足 $M \leq N_n$ 。因此，可将串件拼修策略下测控装备的期望可用度表示为所有测控装备中完好台数与总台数的比值，即

$$A_c = [(N_n - E[Q_c]) / N_n] \times 100\% \quad (11)$$

在以上步骤基础上，可建立基于测控装备可用度与维修器材保障费用约束的器材库存优化模型。模型以测控装备维修器材整体保障经费最少为优化目标，以确保测控装备可用度达到规定水平之上为约束条件。优化模型具体如下：

$$\left. \begin{aligned} & \min \sum_j \sum_i s_{ij} C_i \\ & \text{s.t. } A \geq A_0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： A_0 为预先设定的测控装备可用度水平； C_i 为测控装备部件的单价； s_{ij} 为部件 LRU_j 在维修保障站点 i 的库存数量或携运行数量。

3 优化算例

以某型测控装备执行某次机动测控任务为例。设定某型测控装备保障周期为 8 760 h，要求整个保障周期内测控装备可用度大于 0.9。某型测控装备维修保障组织由 1 个基地保障机构(H0)和 3 个部队级保障机构(N1,N2,N3)构成，属于典型的两级维修保障组织。某型测控装备在 3 个部队级保障机构中配置的台数分别为[18,12,15]。假设某型测控装备由 4 个 LRU 和 10 个 SRU 构成，其结构关系、部件类型、部件单价以及部件单机安装数如图 1 所示。

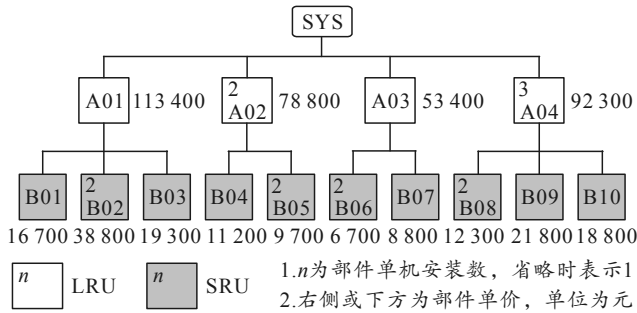


图 1 测控装备部件类型及构成关系

根据计算模型，可获取某型测控装备部队级保障机构对 LRU_j 在任务周期内的需求数量，并输入各级保障机构对 LRU_j 和 SRU_k 的平均维修时间等已知的时间数据，以及 LRU_j 和 SRU_k 在部队级保障机构维修的概率等数值，运行优化模型求解程序，可得到非串件拼修和串件拼修策略下的维修器材优化方案、各站点的测控装备可用度，以及整体的测控装备可用度等结果。表 1 为串件拼修策略下的测控装备维修器材最优库存方案。

表 1 串件拼修策略下维修器材最优库存方案

部件标识	N1	N2	N3	H0
A01	6	3	3	3
A02	4	4	5	4
A03	2	7	3	3
A04	5	3	5	4
B01	2	1	4	3
B02	1	1	3	2
B03	3	1	1	3
B04	2	2	3	4
B05	2	2	2	3
B06	1	3	1	4
B07	1	4	2	3
B08	2	1	1	4
B09	1	1	2	3
B10	2	1	2	2

4 结果分析

实践结果表明：测控装备遂行日常固定测控任务时，通常不会远离营区固定的保障机构，一般不允许选择串件拼修的维修策略；而遂行机动测控任务时，由于任务相对紧急，且远离定点保障单位，维修器材供应补给相对困难，通常会选择串件拼修的维修策略。在串件拼修策略下，从效果上看，可等同于增加可修部件的供应数量，缩短了维修器材的供应时间，将有助于提高测控装备的可用度水平。

经过优化计算，可得出非串件拼修策略和串件拼修策略下的测控装备整体可用度 A 、部队级各个站点的测控装备可用度 A_n ，以及测控装备维修器材总体保障费用。

2 种维修策略下的测控装备维修保障费效水平对比结果如表 2 所示，与非串件拼修策略相比较，采用串件拼修的条件下，各部队级保障站点以及整体的测控装备可用度均有一定程度的提高。

表 2 非串件与串件拼修下维修保障费效水平对比

策略	N1	N2	N3	最优方案	最优方案
	可用度	可用度	可用度	费用	可用度
非串件	0.962 6	0.962 5	0.957 3	7 173 000	0.960 8
串件	0.973 9	0.971 8	0.970 7	7 349 700	0.972 3

采用改进 PSO 的求解得到在串件策略下的测控装备单位可用度与单位费用的比值要大于非串件拼修策略下的比值，表明采取串件拼修策略能获得更高的维修保障费效比，这一结果与实际情况吻合。

如图 2 所示，当测控装备可用度要求 $A \geq 0.9$ ，且维修器材保障费用水平限制在 $5 \leq C \leq 10$ 时，通过分析器材保障费用水平限制下的费效曲线，可以看出在串件拼修策略下的维修器材最优方案将获取更高的测控装备可用度，符合测控装备维修保障的实际情况。