DOI: 10.3901/JME.2020.14.245

基于两种改进差分进化的可修备件多级库存 优化算法研究*

顾涛 李苏建

(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

摘要: 针对传统边际分析法求解多级可修备件库存模型解质量不高的问题, 提出两种改进差分进化算法对模型进行求解, 一种是带局部搜索的改进差分进化算法, 另一种是基于边际分析法的改进差分进化算法。两种算法分别运行了 20 次, 每次迭代上限设置为 5 000 次, 得到相同的最优解, 该解与已发表文献采用边际分析法求出的最优解相比库存总经费降低了 4.44%, 说明了两种算法具有一定的优越性。另外, 基于边际分析法的改进差分进化算法较带局部搜索的改进差分进化算法具有明显的优越性, 其中库存总经费均值低 2.4%、库存总经费标准差低 63.8%、迭代次数均值少 38.7%, 说明基于边际分析法的改进差分进化算法在优化水平、算法稳定性以及算法计算效率三个方面优于带局部搜索的改进差分进化算法。

关键词: 可修备件; 多级库存; 边际分析法; 改进差分进化算法

中图分类号: TG156

Research on Multi-level Inventory Optimization Algorithm of Repairable Spare Parts Based on Two Improved Differential Evolution

GU Tao LI Sujian

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: In view of the low quality of the traditional marginal analysis method to solve the multi-level repairable spare parts inventory model, two improved differential evolution algorithms are proposed to solve the model, one is the improved differential evolution algorithm with local search, the other is the improved differential evolution algorithm based on the marginal analysis method. The two algorithms run 20 times respectively, and the upper limit of each iteration is set to 5 000 times, and the same optimal solution is obtained. Compared with the optimal solution obtained by marginal analysis method in published literature, the total inventory cost is reduced by 4.44%, which shows that the two algorithms have certain advantages. In addition, the improved differential evolution algorithm based on the marginal analysis method has obvious advantages over the improved differential evolution algorithm with local search, among which the average value of total inventory cost is 2.41%, the standard deviation of total inventory cost is 63.8% and the average number of iterations is 38.7%. It shows that the improved differential evolution algorithm based on the marginal analysis method has three advantages: optimization level, algorithm stability and algorithm calculation efficiency. It is better than the improved differential evolution algorithm with local search.

Key words: repairable spare parts; multilevel inventory; marginal analysis method; improved differential evolution algorithms

0 前言

可修备件的可维修性决定了装备保障体系中应有修理的环节。在传统的零部件保障中, 大多数零部件进行原件修复的必要性不大, 所以基本上没有

修理的环节, 也没有专门的修理机构, 更换下来的零部件也基本上作为废品处理, 因此传统的备件体系只涵盖“筹措、储存、供应、管理”。而可修备件损坏后, 一般可通过更换其所属零部件即可恢复其基本性能, 且可修备件一般价格昂贵, 因此更换下来的可修备件应该经过专门的修理机构恢复性能后, 作为新备件进入相应的仓库进行流转, 以减少向生产厂家筹措可修备件的数量, 有效降低在新的维修方式下的装备保障费用。

* 国家部委资助项目(JCKY2018209C002)。20200111 收到初稿, 20200605 收到修改稿

可修备件的高价格决定了在备件保障中必须对其进行库存优化控制。统计表明,易损易耗可修备件在所有备件中所占的数量比例约为 10%,经费比例约为 50%,直接更换可修备件与更换零部件的所需费用之比更是高达 5:1 以上,传统的“越多越好”“以防万一”的库存控制模式在经费保障上将难以实现^[1]。因此在保障经费一定的前提下,根据维修保障需求、筹措周期、修理周期等条件,建立可修备件多级库存模型,研究保障体系中各级仓库最优库存技术,是提高装备保障效费比,实现“适时、适地、适量”保障的重要支撑。

许多学者对可修备件库存优化问题进行了研究,最早 SHERBROOKE^[2-3]建立了最适宜解决此类问题的 METRIC 和 VARI-METRIC 模型,之后很多学者根据实际情况从不同角度对模型进行了优化,使得所建模型更加贴合实际。孙江生等^[4-5]将模型由单维修等级改进为多级库存保障模型;RUAN 等^[6]放松了对备件稳定需求的假设,建立了动态配置模型;RICCARDO 等^[7]建立了带有横向转运的多级库存优化模型;在备件的报废研究方面,虽然目前对备件报废量已经有所考量,但都是简单使用报废率和故障率衡量,计算较为粗略^[8-10]。

差分进化算法(Differential evolution, DE)由 STORN 等^[11]PRICE 于 1995 年首次提出,主要用于求解实数优化问题。该算法是一类基于群体的自适应全局优化算法,属于演化算法的一种,由于其具有结构简单、容易实现、收敛快速、鲁棒性强等特点,因而被广泛应用^[12]。近几年大量学者使用改进差分进化算法针对生产调度、0-1 规划、特征选择等问题进行求解^[13-16],同时为提高差分进化算法的寻有能力,有些学者在传统差分进化算法基础上进行了改进。

本文应用差分进化算法对可修备件三级库存模型进行求解,在传统差分进化算法基础上考虑了多种变异方法,并针对算法提前出现早熟、无法求出更优解的问题,设计了一种自处理算法早熟的机制,提高了算法的寻优能力,同时在每次迭代中设计了一种局部搜索算法,以提高算法的寻优速度。

1 多级可修备件库存优化问题

1.1 模型描述

本文基于一个的三级库存模型,保障站点分为三个等级,基层级、中继级和基地级。一个基地级站点供应多个中继级站点,一个中继级站点供应多个基层级站点,三级均可存储可修备件,并对部分

可修备件具有一定的维修能力。可修备件分为两个层级,一个外场可更换件(Line-replacement unit, LRU)由多个内场可更换件(Shop-replacement unit, SRU)组成^[17]。

其运行模式如图 1 所示,当基层级发生 1 件 LRU 需求时,如果基层级有库存则进行更换,如果没有库存则向中继级申请 1 件 LRU(1→3),当基层级维修 LRU 时发现是其 SRU 导致故障,需要更换 SRU,如果基层级有 SRU 库存则进行更换(1→2),如果没有库存则向中继级申请 1 件 SRU(2→4);当中继级发生 1 件 LRU 需求时,如果中继级有库存则进行更换,如果没有库存则向基地级申请 1 件 LRU(3→5),当中继级维修 LRU 时发现是其 SRU 导致故障,需要更换 SRU,如果中继级有 SRU 库存则进行更换(3→4),如果没有库存则向基地级申请 1 件 SRU(4→6);基地级修理 LRU 时发现是其 SRU 导致故障,则产生 1 件 SRU 需求(5→6),对 SRU 进行更换。

图 1 保障体系运行模式

1.2 基本假设

可修备件多级库存问题有以下 8 个重要假设^[18]。

- (1) $(s-1, s)$ 订货策略,即后方仓库和基地之间采取缺 1 补 1 的订货策略,不进行批量订货。
- (2) 无限渠道排队假设,即在修备件不存在排队或相互影响的现象,维修平均时间不考虑其分布情况。
- (3) 故障件是否在基地修理取决于基地有没有维修能力,与其库存水平和工作负担无关。
- (4) 各个基地只从后方仓库补货,基地之间不存在横向供应。
- (5) 备件全部可修复,不考虑报废的情况。
- (6) 不考虑备件存储、运输、管理等附加成本,仅考虑备件本身的采购价格。
- (7) 所有 LRU 重要程度相同,一旦短缺便导致装备不可用。
- (8) 多重故障不同时发生。

1.3 符号定义

可修备件多级库存模型用到的符号及其含义定义见表 1。

表 1 可修备件参数表

符号	含义	符号	含义
i	SRU 的项目编号, $i=1,2,\dots,I$, 其中 $i=0$ 代表是 LRU	O_g	基地级有库存时, SRU 从基地级到中继级 g 申请至交付的时间
k	LRU 的项目编号, $k=1,2,\dots,K$	s_{ij}	基层级 j 的可修备件 i 库存量
g	中继级站点编号, $g=1,2,\dots,G$	s_{ig}	中继级 g 的可修备件 i 库存量
j	基层级站点编号, $j=1,2,\dots,J$, 其中 $j=0$ 代表是基地级站点	s_{i0}	基地级的可修备件 i 库存量
m_{ij}	基层级 j 的可修备件 i 年平均需求	s_{kj}	基层级 j 的 LRU_k 库存量
m_{0j}	基层级 j 的 LRU 年平均需求	f_{i0}	因基地级修理 LRU 产生的基地级 SRU_i 需求比例
m_{0g}	中继级 g 的 LRU 年平均需求	f_{ig}	基地级补给到中继级 g SRU_i 占基地级 SRU_i 需求比例
m_{ig}	中继级 g 的可修备件 i 年平均需求	f_{0g}	因中继级 g 无法修理 LRU 产生的基地级 LRU 需求比例
m_{i0}	基地级的可修备件 i 年平均需求	f_{ij}	中继级补给到基层级 j SRU_i 占中继级 SRU_i 需求比例
m_{00}	基地级的 LRU 年平均需求	f_{0j}	中继级补给到基层级 j 的 LRU 占中继级 LRU 需求比例;
T_{ij}	基层级 j 的可修备件 i 年平均修理时间	A	系统可用度
T_{0j}	基层级 j 的 LRU 年平均修理时间	A_m	系统可用度约束值
T_{0g}	中继级 g 的 LRU 年平均修理时间	A_j	基层 j 的装备可用度
T_{ig}	中继级 g 的可修备件 i 年平均修理时间	N_j	基层 j 的装备数量
T_{i0}	基地级的可修备件 i 年平均修理时间	Z_k	某个 LRU_k 在一个装备上安装数量, 即单机安装数
T_{00}	基地级的 LRU 年平均修理时间	c_i	备件 i 单价
r_{ij}	基层级 j 的可修备件 i 能在基层修理的概率	C	备件库存总价
r_{0j}	基层级 j 的 LRU 能在基层修理的概率	X_{ij}	基层 j 随时在修或补给的 SRU_i 的数量, 该供应渠道数为随机变量
r_{ig}	中继级 g 的可修备件 i 能在中继级修理的概率	X_{0j}	基层 j 随时在修或补给的 LRU 的数量, 该供应渠道数为随机变量
r_{0g}	中继级 g 的 LRU 能在基层修理的概率	X_{ij}	基层 j 随时在修或补给的 LRU_k 的数量, 该供应渠道数为随机变量
q_{ij}	在基层级 j 修理的 LRU 将产生故障隔离的 SRU_i 的条件概率	X_{00}	基地随时在修或补给的 LRU 的数量, 该供应渠道数为随机变量
q_{ig}	在中继级 g 修理的 LRU 将产生故障隔离的 SRU_i 的条件概率	X_{ig}	中继级 g 随时在修或补给的 SRU_i 的数量, 该供应渠道数为随机变量
q_{i0}	在基地级修理的 LRU 将产生故障隔离的 SRU_i 的条件概率	X_{0g}	中继级 g 随时在修或补给的 LRU 的数量, 该供应渠道数为随机变量
O_j	中继级有库存时, SRU 从中继级到基层 j 申请至交付的时间		

1.4 数学推导

1.4.1 需求率

基层级 j 的 LRU 年平均需求量 m_{ij} 等于基层级 j 的 LRU 年平均需求量乘 LRU 在本基层修理的概率, 再乘 LRU 修理产生 SRU_i 需求的概率

$$m_{ij} = m_{0j} r_{0j} q_{ij} \quad (1)$$

中继级 g 的 LRU 年平均需求量 m_{0g} 等于其保障的基层级站点申请补给的需求之和

$$m_{0g} = \sum_{j \in g} m_{0j} (1 - r_{0j}) \quad (2)$$

中继级 g 的 SRU_i 年平均需求量 m_{ig} 等于其保障的基层级站点申请补给的 SRU_i 需求之和再加上中继级修理 LRU 所需的 SRU_i 数量

$$m_{ig} = \sum_{j \in g} m_{ij} (1 - r_{ij}) + m_{0g} q_{ig} \quad (3)$$

基地级的 LRU 年平均需求量 m_{00} 等于其保障的中继级站点申请补给的需求之和

$$m_{00} = \sum_{g=1}^G m_{0g} (1 - r_{0g}) \quad (4)$$

基地级的 SRU_i 年平均需求量 m_{i0} 等于其保障的中继级站点申请补给的 SRU_i 需求之和再加上基地级修理 LRU 所需的 SRU_i 数量

$$m_{i0} = \sum_{g=1}^G m_{ig} (1 - r_{ig}) + m_{00} q_{i0} \quad (5)$$

1.4.2 基地级在修 LRU 数量的均值和方差

基地级修理的 LRU 数量由两部分组成: ① 基地级有 SRU_i 库存时, 基地级送修渠道 LRU 数量; ② 基地级无 SRU_i 库存时, 有所需 SRU_i 引起的延误后方仓库送修 LRU 数量。其均值 $E[X_{00}]$ 和方差 $Var[X_{00}]$ 为

$$E[X_{00}] = m_{00} T_{00} + \sum_{i=1}^I f_{i0} EBO(s_{i0} | m_{i0} T_{i0}) \quad (6)$$

$$Var[X_{00}] = m_{00} T_{00} + \sum_{i=1}^I f_{i0} (1 - f_{i0}) EBO(s_{i0} | m_{i0} T_{i0}) + \sum_{i=1}^I f_{i0}^2 VBO(s_{i0} | m_{i0} T_{i0}) \quad (7)$$

$$f_{i0} = m_{00}q_{i0} / m_{i0} \quad (8)$$

1.4.3 中继级 g 在修或补给的 SRU 数量的均值和方差

中继级 g 在修或补给的 SRU_i 数量等于中继级供应渠道件数再加上因基地级没有 SRU_i 现货而造成延误的件数, 其均值 $E[X_{ig}]$ 和方差 $Var[X_{ig}]$ 为

$$E[X_{ig}] = m_{ig}[(1-r_{ig})O_g + r_{ig}T_{ig}] + f_{ig}EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) \quad (9)$$

$$Var[X_{ig}] = m_{ig}[(1-r_{ig})O_g + r_{ig}T_{ig}] + f_{ig}(1-f_{ig}) \times EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) + f_{ig}^2 VBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) \quad (10)$$

$$f_{ig} = m_{ig}(1-r_{ig}) / m_{i0} \quad (11)$$

1.4.4 中继级 g 在修或补给的 LRU 数量的均值和方差

中继级 g 在修或补给的 LRU 数量由三部分组成: ① 基地级有 LRU 库存时, 中继级 g 在修的和从后方仓库补给的 LRU 数量; ② 基地级无 LRU 库存时, 引起补给延误的 LRU 数量; ③ 中继级 g 无 SRU_i 库存时, 引起延误修理 LRU 数量。其均值 $E[X_{0g}]$ 和方差 $Var[X_{0g}]$ 为

$$E[X_{0g}] = m_{0g}[(1-r_{0g})O_g + r_{0g}T_{0g}] + f_{0g}EBO \times$$

$$(s_{00}|E[X_{00}], Var[X_{00}]) + \sum_{i=1}^I EBO(s_{ig}|E[X_{ig}], Var[X_{ig}]) \quad (12)$$

$$Var[X_{0g}] = m_{0g}[(1-r_{0g})O_g + r_{0g}T_{0g}] + f_{0g}(1-f_{0g}) \times EBO(s_{00}|E[X_{00}], Var[X_{00}]) + f_{0g}^2 VBO(s_{00}|E[X_{00}], Var[X_{00}]) + \sum_{i=1}^I VBO(s_{ig}|E[X_{ig}], Var[X_{ig}]) \quad (13)$$

$$f_{0g} = m_{0g}(1-r_{0g}) / m_{00} \quad (14)$$

1.4.5 基层级 j 在修或补给的 SRU 数量的均值和方差

基层级 j 在修或补给的 SRU_i 数量等于基层级 j 供应渠道件数再加上因中继级 g 没有 SRU_i 现货而造成延误的件数, 其均值 $E[X_{ij}]$ 和方差 $Var[X_{ij}]$ 为

$$E[X_{ij}] = m_{ij}[(1-r_{ij})O_j + r_{ij}T_{ij}] + f_{ij}EBO(s_{ig}|m_{ig}T_{ig}) \quad (15)$$

$$Var[X_{ij}] = m_{ij}[(1-r_{ij})O_j + r_{ij}T_{ij}] + f_{ij}(1-f_{ij}) \times EBO(s_{ig}|m_{ig}T_{ig}) + f_{ij}^2 VBO(s_{ig}|m_{ig}T_{ig}) \quad (16)$$

$$f_{ij} = m_{ij}(1-r_{ij}) / m_{ig} \quad (17)$$

1.4.6 基层级 j 在修或补给的 LRU 数量的均值和方差

基层级 j 在修或补给的 LRU 数量由三部分组成: ① 中继级 g 有 LRU 库存时, 基层级 j 在修的和从后方仓库补给的 LRU 数量; ② 中继级 g 无

LRU 库存时, 引起补给延误的 LRU 数量; ③ 基层级 j 无 SRU_i 库存时, 引起延误修理 LRU 数量。其均值 $E[X_{0j}]$ 和方差 $Var[X_{0j}]$ 为

$$E[X_{0j}] = m_{0j}[(1-r_{0j})O_j + r_{0j}T_{0j}] + f_{0j} \times EBO(s_{0g}|E[X_{0g}], Var[X_{0g}]) + \sum_{i=1}^I EBO(s_{ij}|E[X_{ij}], Var[X_{ij}]) \quad (18)$$

$$Var[X_{0j}] = m_{0j}[(1-r_{0j})O_j + r_{0j}T_{0j}] + f_{0j}(1-f_{0j}) \times EBO(s_{0g}|E[X_{0g}], Var[X_{0g}]) + f_{0j}^2 \times VBO(s_{0g}|E[X_{0g}], Var[X_{0g}]) + \sum_{i=1}^I VBO(s_{ij}|E[X_{ij}], Var[X_{ij}]) \quad (19)$$

$$f_{0j} = m_{0j}(1-r_{0j}) / m_{0g} \quad (20)$$

1.4.7 可用度

因 LRU 及其 SRU 期望短缺而形成的基地 j 装备可用度公式如下

$$A_j = 100 \prod_{k=1}^K \{1 - EBO(s_{kj}|E[X_{kj}], Var[X_{kj}]) / (N_j Z_k)\}^{Z_k} \quad (21)$$

系统可用度等于各个基地装备可用数量除以系统中所有装备数量之和, 其中各个基地装备可用数量等于基地装备数量乘以 A_j

$$A = \left(\sum_{j=1}^J N_j A_j \right) / \sum_{j=1}^J N_j \quad (22)$$

1.4.8 数学模型

本文以系统可用度 A 作为约束条件, 以可修备件库存总费用 C 作为优化目标, 数学模型如下

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^I \sum_{j=0}^J c_i \cdot s_{ij} \\ \text{s.t. } A \geq A_m \end{cases} \quad (23)$$

2 模型求解算法设计

2.1 算法流程

2.1.1 带局部搜索功能的改进差分进化算法

带局部搜索功能的改进差分进化算法(Improved differential evolution algorithm with local search function, LS-DE), 该算法在差分进化算法基础上增加了局部搜索和处理早熟功能, 算法流程如图 2 所示, 步骤如下^[19]。

(1) 配置参数, 包括最大迭代次数 $maxIteration$ 、当前迭代代数 $Generation$ 、搜索上界 $Xmax$ 、搜索下界 $Xmin$ 、个体维数 Dim 、种群规模 NP 、库存矩阵 $Inventory$ 、缩放因子 F 、交叉概率 CR 、变异策略

Mutation_Strategy、交叉策略 *Cross_Strategy*、最大可用度 *Max_A*、种群个体相似度 *Similarity_Degree*、重置比例 *Reset_Proportion*。

(2) 初始化种群，根据 *Xmax* 和 *Xmin* 范围随机产生初始种群，但要求种群中每个个体的系统可用度都大于 *Max_A*，从一个高成本的库存位置向低成本进行优化。

(3) 计算种群中各个个体的适应度值，找出种群的最优值，赋值给临时变量 *Best_Inventory*。

(4) 随机选择变异算法，对种群的每个个体进行变异计算，计算完成后对发生变异的个体值进行整理，小于 0 的赋值为 0，有小数的四舍五入取整。

(5) 对种群的每个个体进行交叉操作，每一次交叉后判断个体的系统可用度是否大于 *Max_A*，如果大于则继续，如果小于则重新进行交叉操作。

(6) 计算交叉变异后种群中各个个体的适应度值，如果优于原种群，则进行替换，如果优于原种群最优值，则将该值赋给 *Best_Inventory*。

(7) 对现有最优解进行局部搜索获取更优值。

(8) 判断种群是否早熟，如果种群相似度大于 *Similarity_Degree*，则随机挑选种群中比例为 *Reset_Proportion* 的个体重新初始化。

(9) 判断是否满足结束条件，如果满足，则计算 *Best_Inventory* 的库存成本，如果不满足，则进入步骤(3)继续迭代。

图2 改进差分进化算法流程图

2.1.2 基于边际分析法的改进差分进化算法

基于边际分析法的改进差分进化算法(Improved differential evolution algorithm based on marginal analysis, MA-DE)，该算法与 LS-DE 算法区别有两点，一是在图 2 的初始化种群环节，使用边际分析法，计算出一组库存值，并赋值到种群中；二是去掉了图 2 中局部搜索的功能。边际分析法算法流程如图 3 所示，步骤如下。

(1) 初始化参数，令各备件在各站点库存值为零。

(2) 进行迭代计算，将 s_{ij} 增加 1，计算如式 24 所示的边际效益因子。

$$[A(s_{ij}+1)-A(s_{ij})]/c_i \quad (24)$$

(3) 每次迭代找出边际效益因子最大值，将其对应的备件以及站点库存增加 1。

(4) 计算系统可用度 A ，判断 A 是否达到约束条件 A_m ，如果达到则结束迭代，计算系统库存成本；如果未达到则返回步骤(2)。

图3 边际分析法算法流程

2.2 算法详细设计

2.2.1 变异算法

将 *Inventory*、*Best_Inventory*、*F* 等参数传入变异算法，随机挑选式 25-29 中的 1 种变异算法公式对变异结果种群 V 进行操作。

$$V(i,:) = Inventory(r(1,:),:) + F \cdot (Inventory(r(2,:),:) - Inventory(r(3,:),:)) \quad (25)$$

$$V(i,:) = Best_Inventory + F \cdot (Inventory(r(1,:),:) - Inventory(r(2,:),:)) \quad (26)$$

$$V(i,:) = \text{Inventory}(i,:) + F \cdot (\text{Best_Inventory} - \text{Inventory}(i,:)) + F \cdot (\text{Inventory}(r(1,:)) - \text{Inventory}(r(2,:))) \quad (27)$$

$$V(i,:) = \text{Best_Inventory} + F \cdot (\text{Inventory}(r(1,:)) - \text{Inventory}(r(2,:))) + F \cdot (\text{Inventory}(r(3,:)) - \text{Inventory}(r(4,:))) \quad (28)$$

$$V(i,:) = \text{Inventory}(r(1,:)) + F \cdot (\text{Inventory}(r(2,:)) - \text{Inventory}(r(3,:))) + F \cdot (\text{Inventory}(r(4,:)) - \text{Inventory}(r(5,:))) \quad (29)$$

2.2.2 交叉算法

将 Inventory , V , CR 等参数传入交叉算法, 对 Inventory 中每个个体的每个库存数进行交叉操作, 产生 0-1 之间的一个随机数, 如果不大于 CR , 则将 V 中个体该位置的库存数赋值到 U 中, 如果大于 CR , 则将 Inventory 中个体该位置的库存数赋值到 U 中对应位置, 如图 4 所示, 第 3、6 位置随机数不大于 CR , 则将 I_3 、 I_6 的值赋值到 U 中对应位置。为保证每次交叉操作时 V 中至少有一个位置数值赋值给 U , 随机指定一个位置 C_X , 不管随机数是否不大于 CR , 都将该值赋值到 U 中对应位置。

图 4 交叉算法示意图

2.2.3 局部搜索算法

普通差分算法多次迭代产生的种群个体适应度值可能都无法超过当前最优值, 因此寻优速度较慢, 为此在每次迭代选择操作之后增加一个局部搜索算法。该算法找出当前最优解中库存位置最高的备件单价, 将这个位置库存数减 1, 判断是否满足约束条件, 如果满足则退出局部搜索, 如果不满足, 则将该位置库存数还原, 找出备件单价次高价库存位置减 1, 并判断是否满足约束条件, 迭代直至找到满足约束条件的更优值或遍历每个库存位置, 则结束局部搜索。

2.2.4 自处理早熟算法

由于差分算法的变异原理导致算法在寻优过程后期, 种群中各个个体趋于相同, 产生更优值难度加大, 因此在每次迭代时, 如果种群个体相似度比例大于 Similarity_Degree , 则认为算法已经早熟,

将种群中比例为 Reset_Proportion 的个体重新初始化, 再继续寻优。

3 计算实例

试验目标是使用文献[20]中算例, 比较两种改进差分进化算法计算的结果与文献中使用边际优化法计算的结果。

3.1 运行环境

运行电脑主要配置: Intel Core i5 2.4 GHz CPU、8GB RAM, 操作系统: Windows 7, 数据分析与处理软件: Matlab R2018a。

3.2 实例设计

保障站点如图 5 所示, 1 个基地级站点、2 个中继级站点以及 3 个基层级站点。装备在基层级站点部署的数量分别为 18、12、15, 装备可修备件结构如图 6 所示, 各个可修备件参数如表 2、3 所示, 算法配置参数如表 4 所示。

图 5 保障站点图

图 6 可修备件结构图

3.3 试验结果

LS-DE 算法和 MA-DE 算法分别运行 20 次得到试验数据如表 5 所示, 计算结果为优化后的库存总经费和迭代次数, 其中迭代次数是第一次出现稳定计算结果的迭代次数。试验结果对比如表 6 所示, LS-DE 算法和 MA-DE 算法求得的最优值都为 215.62 万元, 但 MA-DE 算法较 LS-DE 算法具有明显的优越性, 库存总经费均值低 5.36 万元(2.41%), 说明总体优化水平较高, 库存总经费标准差低 3.88 万元(63.8%), 说明算法稳定性强, 迭代次数均值少 830 次(38.7%), 说明算法计算效率高。

表 2 可修备件参数表

序号	备件项	装备数 $Z/\text{个}$	单价 $C/\text{万元}$	故障隔离率 q_{ij}	故障隔离率 q_{ig}	故障隔离率 q_{i0}	维修率 r_{ij}	维修率 r_{ig}
1	LRU1	2	5.34	—	—	—	0.24	0.53
2	LRU2	2	7.88	—	—	—	0.28	0.49
3	LRU3	3	9.23	—	—	—	0.22	0.61
4	SRU11	2	0.67	0.42	0.48	0.33	0.33	0.57
5	SRU12	2	0.88	0.58	0.52	0.67	0.25	0.55
6	SRU21	2	1.12	0.38	0.34	0.25	0.28	0.47
7	SRU22	2	0.97	0.62	0.66	0.75	0.22	0.65
8	SRU31	2	1.23	0.56	0.54	0.55	0.31	0.58
9	SRU32	2	2.18	0.44	0.46	0.45	0.23	0.52

表 3 可修备件需求率

序号	备件项	基地级需求率	中继 1 需求率	中继 2 需求率	基层级 1 需求率	基层级 2 需求率	基层级 3 需求率
1	LRU1	45.5	35.3	61.6	46.4	41.4	39.7
2	LRU2	42.8	33.4	50.5	46.4	39.8	30.4
3	LRU3	40.4	37.2	66.4	47.7	43.4	41.7
4	SRU11	39.1	20.1	35.9	4.68	4.68	4.81
5	SRU12	59.4	22.2	41.9	6.46	6.46	6.64
6	SRU21	30.9	14.5	23.6	4.41	4.23	4.62
7	SRU22	57.4	27.6	44.6	7.12	6.91	7.53
8	SRU31	49.7	23.5	42.0	4.89	3.75	5.13
9	SRU32	45.0	20.1	35.9	3.84	2.94	4.04

表 4 算法参数配置表

$maxIteration$	$Xmax$	$Xmin$	Dim	NP	F	CR	$Similarity_Degree$	$Reset_Proportion$
5000	3	0	54	50	0.5	0.5	0.8	0.4

表 5 试验结果数据表

序号	LS-DE 算法		MA-DE 算法	
	库存总经费/万元	迭代次数	库存总经费/万元	迭代次数
1	222.88	2 536	216.44	820
2	221.97	1 680	216.14	1 950
3	219.50	1 980	218.26	1 120
4	217.49	2 444	222.52	1 430
5	227.03	2 332	221.88	2 100
6	233.74	2 960	216.01	1 398
7	215.62	2 033	215.62	1 196
8	228.27	1 787	221.97	770
9	223.05	2 101	216.14	1 450
10	237.01	2 626	215.86	1 330
11	226.93	2 469	217.55	1 005
12	215.86	1 434	216.83	1 553
13	215.62	1 947	215.86	1 209
14	219.62	2 556	217.49	998
15	222.88	2 740	219.62	1 707
16	218.26	1 835	215.77	1 367
17	226.02	1 130	215.62	1 201
18	217.49	1 608	216.67	1 043
19	217.04	2 368	217.67	1 220
20	230.45	2 295	215.62	1 385

表 6 试验结果对比分析表

序号	内容	LS-DE 算法	MA-DE 算法	比较(%)
1	库存值均值	222.84	217.48	2.4
2	库存值标准差	6.08	2.20	63.8
3	迭代次数均值	2 143	1 313	38.8

图 7、8 为两种算法分别运行 20 次，选出结果中的最优解绘制的算法收敛曲线图。LS-DE 算法在迭代了 2 033 次后优化至 215.62 万元，MA-DE 算法在迭代了 1 196 次后优化至 215.62 万元。算法迭代次数上限设置为 5 000 次，在之后的迭代过程中未得到更优值，两种算法都收敛于 215.62 万元。MA-DE 算法是在边际分析法优化结果 225.64 万元基础上继续寻找更优解，而 LS-DE 算法是随机初始化库存值得到库存总经费 271.73 万元，通过局部搜索算法在第 16 次迭代时得到一个较低的库存总经费值 244.73 万元，在这个基础上继续寻找更优解，相比 MA-DE 算法的初始库存总经费 225.64 万元，高出了 19.09 万元，因此得到稳态的 215.62 万元 LS-DE 算法花费了更多的时间。两种算法优化至 215.62 万元的可修备件库存分配情况相同，如表 7 所示。

图 7 LS-DE 算法收敛曲线图

图 8 MA-DE 算法收敛曲线图

表 7 可修备件库存分配表

可修备件编号	基地级	中继 1	中继 2	基层 1	基层 2	基层 3
LRU1	1	1	2	2	2	2
LRU2	0	1	1	2	2	1
LRU3	0	1	1	2	2	2
SRU11	1	1	2	0	0	0
SRU12	2	1	1	1	0	0
SRU21	2	1	1	0	0	0
SRU22	3	1	2	0	0	1
SRU31	2	1	2	0	0	0
SRU32	2	1	1	0	0	0

如表 8 所示,在可用度 98%作为约束条件下,本文两种改进差分进化算法经过 5 000 次迭代最终最优库存配置方案对应的库存总经费为 215.62 万,相比文献[20]的 225.64 万元降低幅度达到 4.44%,由此可见本文中算法寻优能力优于文献[20]中使用的边际分析法。

表 8 试验结果比较表

内容	文献[20]	本文结果
可用度(%)	98	98
费用/万元	225.64	215.62
费用降低幅度	—	4.44%

4 结论

本文面向装备的贵重可修备件三级库存模型求解问题,针对传统求解模型的边际分析法寻优质量不高缺点,提出并设计了两种改进差分进化算法对模型进行求解。

(1) 本文两种算法不仅具有较高的稳定性,并且求解结果与文献[20]计算结果相比降低了 4.44%,说明了本文算法的优越性。

(2) 本文 MA-DE 算法较 LS-DE 算法具有明显的优越性,其中库存总经费均值低 2.4%、库存总经费标准差低 63.8%、迭代次数均值少 38.7%,说明 MA-DE 算法在优化水平、算法稳定性以及算法计算效率三个方面优于 LS-DE 算法。

(3) 虽然本文算法计算用时要长于边际分析法,但在现实中一般为制定年度采购计划时计算一次,对计算时长要求不高,因此该缺点在实际应用中无影响。

参 考 文 献

- [1] 张连武. 维修器材保障及关键技术现状调研报告[R]. 北京: 北京科技大学, 2019.
ZHANG Lianwu. Research report on maintenance equipment support and key technology status[R]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2019.
- [2] SHERBROOKE C C. Metric: A multi-echelon technique for recoverable item control[J]. Operations Research, 1968, 16(1): 122-141.
- [3] SHERBROOKE C C. Vari-metric: Improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models[J]. Operations Research, 1986, 34(2): 311-319.
- [4] 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[J]. 兵工学报, 2008, 29(7): 854-858.
SUN Jiangsheng, LI Sujian, LÜ Yanmei, et al. Simulation research on three-level inventory model of valuable weapon spare parts[J]. Journal of Military Engineering, 2008, 29 (7): 854-858
- [5] XU Juan, ZUO Hongfu, SUN Lei. A multi-item, multi-echelon inventory allocation model for aircraft spare parts based on VARI-METRIC[J]. Information

- Technology Journal. 2014, 13(13): 2218-2223.
- [6] RUAN Minzhi, LI Hua, FU Jian. System optimization-oriented spare parts dynamic configuration model for multi-echelon multi-indenture system[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(5): 923-933.
- [7] RICCARDO P, COSTANTINO F, GRAVIO G D. Inventory model for a multi-echelon system with unidirectional lateral transshipment[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 65: 372-382.
- [8] 刘任洋, 李庆民, 李华, 等. 多指标约束下考虑报废的可修复备件携行方案优化[J]. 航空学报, 2016, 37(10): 3131-3139.
- LIU Renyang, LI Qingmin, LI Hua, et al. Optimization of carrying scheme of repairable spare parts under multi index constraints[J]. Journal of Aeronautics, 2016, 37(10): 3131-3139
- [9] 薛陶, 冯蕴雯, 秦强. 考虑报废的 K/N 冷备份冗余系统可修复备件优化[J]. 华南理工大学学报, 2014, 42(1): 41-46.
- XUE Tao, FENG Yunwen, QIN Qiang. Repairable spare parts optimization of K/N cold backup redundancy system considering scrap[J]. Journal of South China University of Technology, 2014, 42 (1): 41-46.
- [10] 张怀强, 卢远超, 王孟. 基于故障率的舰艇维修备品备件优化配置[J]. 火力与指挥配置, 2019, 44(5): 17-21.
- ZHANG Huaiqiang, LU Yuanchao, WANG Meng. Optimal configuration of spare parts for ship maintenance based on failure rate[J]. Firepower and Command Configuration, 2019, 44 (5): 17-21.
- [11] STORN R, PRICE K. Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [12] 宁桂英, 曹敦虔, 周永权. 求解 0-1 规划问题的改进差分进化算法[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(1): 120-132.
- NING Guiying, CAO Dunqian, ZHOU Yongquan. Improved differential evolution algorithm for solving 0-1 programming problem[J]. Systems Science and Mathematics, 2019, 39(1): 120-132.
- [13] KAMAL M, INEL M. Optimum design of reinforced concrete continuous foundation using differential evolution algorithm[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(1): 8401-8415.
- [14] MASON K, DUGGAN J, HOWLEY E. Evolving multi-objective neural networks using differential evolution for dynamic economic emission dispatch[C]// The Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. ACM, 2017.
- [15] ZHANG Lixia, ZENG Guangping, WEI Jinjin. Adaptive region-segmentation multi-focus image fusion based on differential evolution[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 33(3): 1954010.
- [16] IBRAHIM R A, ELAZIZ M A, LU S. Chaotic opposition-based grey-wolf optimization algorithm based on differential evolution and disruption operator for global optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 108(15): 1-27.
- [17] 张帅, 滕克难, 肖飞. 基于 Vari-Metric 的舰载机可修复件库存配置模型[J]. 火力与指挥控制, 2015(9): 157-162.
- ZHANG Shuai, TENG Kenan, XIAO Fei. Inventory allocation model of repairable parts for shipboard aircraft based on vari metric[J]. Fire and Command Control, 2015, 40(9): 157-162.
- [18] 周伟, 刘亚杰, 郭波, 等. 基于两级供应关系的武器装备贵重件初始配置模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1056-1061.
- ZHOU Wei, LIU Yajie, GUO Bo, et al. The initial configuration model of weapon equipment valuables based on two-level supply relationship[J]. System Engineering Theory and Practice, 2011, 31(6): 1056-1061.
- [19] QIN A K, HUANG V L, SUGANTHAN P N. Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 398-417.
- [20] 阮旻智, 彭英武, 李庆民, 等. 基于体系保障度的装备备件三级库存方案优化[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(7): 1623-1630.
- RUAN Minzhi, PENG Yingwu, LI Qingmin, et al. Optimization of three-level inventory plan of equipment spare parts based on system support degree[J]. System Engineering Theory and Practice, 2012, 32(7): 1623-1630.

作者简介: 顾涛, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为供应链计划优化、备件库存优化、生产调度优化等。

E-mail: babygo1003@163.com

李苏建, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为物流信息系统、企业物流管理等。

E-mail: lisujian@me.ustb.edu.cn