

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略

李凤月, 齐小刚, 宋卫星, 班利明

引用本文:

李凤月, 齐小刚, 宋卫星, 班利明. 基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2343–2352.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0205>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于混合元启发式算法的订单分批问题

Hybrid metaheuristic algorithm for order batching problem

控制与决策. 2022, 37(8): 2110–2118 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0364>

#### 预制构件并行生产线资源配置与生产调度集成优化

Integrated resource allocation and production scheduling for parallel concrete precast production lines

控制与决策. 2022, 37(9): 2399–2406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0113>

#### 求解约束优化问题的改进果蝇优化算法及其工程应用

Improved fruit fly optimization algorithm for solving constrained optimization problems and engineering applications

控制与决策. 2021, 36(2): 314–324 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0557>

#### 区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

控制与决策. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

#### 考虑碳限额的制造/再制造混合系统生产优化决策

Production optimization decision of manufacturing/remanufacturing under carbon emission permits

控制与决策. 2021, 36(9): 2249–2256 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1457>

# 基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略

李凤月<sup>1</sup>, 齐小刚<sup>1†</sup>, 宋卫星<sup>2</sup>, 班利明<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 数学与统计学院, 西安 710126; 2. 中国人民解放军32272部队, 兰州 730030)

**摘要:** 针对装备维修保障仓库系统运营费用高、仓库点位布局不合理、备件库存结构不合理等问题,建立以多品种联合补货问题为基础的装备维修备件仓库选址-库存控制决策联合优化模型,模型可用于求解仓库的开设位置、维修活动需求点的指派情况、仓库补货时间以及库存水平等.根据模型的结构特点,利用多种群协同进化的方法改进传统果蝇优化算法的位置更新方式,设计一种内外两层搜索策略的混合果蝇优化算法,外层搜索策略作为算法的主程序用于搜索仓库选址决策变量,内层搜索策略采用改进的RAND算法用于搜索库存控制决策变量.仿真结果表明,混合果蝇优化算法具有良好的求解效率,能够确保库存系统在一定服务水平的基础上有效降低库存运营总成本.

**关键词:** 联合补货; 仓库选址; 库存控制; 两层搜索策略; 混合果蝇优化算法

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2021.0205

**引用格式:** 李凤月,齐小刚,宋卫星,等.基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略[J].控制与决策,2022,37(9):2343-2352.

## Location-inventory joint optimization strategy based on hybrid fruit fly optimization algorithm

LI Feng-yue<sup>1</sup>, QI Xiao-gang<sup>1†</sup>, SONG Wei-xing<sup>2</sup>, BAN Li-ming<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710126, China; 2. Unit 32272 of the Chinese People's Liberation Army, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** In view of the high operating cost of the equipment maintenance support warehouse system, unreasonable warehouse location layout, unreasonable spare parts inventory structure and so on, this paper establishes a joint optimization model of equipment maintenance spare parts warehouse location-inventory control decision-making based on the multi-item joint replenishment problem. The model can be used to solve the warehouse location, demand point assignment, warehouse replenishment time and inventory level. According to the structural characteristics of the model, the traditional fruit fly optimization algorithm is improved by using the multi-swarm co-evolution feature, and a hybrid fruit fly optimization algorithm with internal and external search strategies is designed. The outer searches strategy search for warehouse location decision variables, and the inner search strategy uses an improved RAND algorithm to search for inventory control decision variables. The simulation results show that the hybrid fruit fly optimization algorithm has good solution efficiency, which ensures that the inventory system can effectively reduce the total inventory operation cost on the basis of a certain service level.

**Keywords:** joint replenishment; warehouse location; inventory control; two-tier search strategy; hybrid fruit fly optimization algorithm

## 0 引言

随着武器装备高新技术含量的增加,装备结构变得越来越复杂,装备维修保障活动开始由传统的粗放型、经验型向精确型、节约型转变.装备保障系统由维修所需的各类维修资源和管理手段共同组成<sup>[1]</sup>.目

前,装备维修主要采用的修理方式是换件修理,为了保持装备的完好性和战斗力,装备的日常维修维护需要储存大量的维修备件.而现有的维修备件管理调度存在着配送任务繁重、仓库点位布局不合理、备件需求不确定、备件库存控制缺乏规划等问题,给后

**收稿日期:** 2021-02-01; **录用日期:** 2021-06-03.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61877067); 近地面探测技术重点实验室开放基金项目(TLGZ2019A002); 重点实验室稳定支持项目(6142414200511).

**责任编辑:** 刘宝碇.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: xgqi@xidian.edu.cn.

勤保障周转维修备件带来了极大的不便. 依靠传统理念, 存储大量维修备件虽然可以保证战斗力, 但容易库存积压, 造成一定的经费损失. 据统计, 维修备件的消耗经费占到装备保障总经费的1/3左右<sup>[2]</sup>, 如果只单一地追求经济效益, 则会因为维修备件不足直接影响到部队的保障力. 资源储备点的选址优化同样是装备保障系统决策的重要组成部分, 合适的储备点位置可以有效提高备件的获取效率, 直接影响着装备维修保障效率和流通过程<sup>[3]</sup>. 加强维修备件的管理研究是避免维修保障高耗低效的有效途径, 因此, 开展装备维修备件仓库选址与库存控制联合优化研究具有重要意义.

近年来, 已有不少学者对多品种维修备件库存控制决策优化问题做了相关研究, 如何合理地安排维修备件的补充及出库模式, 是库存控制决策优化的关键. Balintfy<sup>[4]</sup>在1964年首次提出可订购点( $S, c, s$ )策略, 标志着多品种联合补货问题(joint replenishment problem, JRP)研究的开始. 如今, 对JRP模型已有了更多深入的研究. 文献[5]建立了统一订购 $M(s, S)$ 策略下的库存控制模型, 该策略是可订购点策略的一种特殊情形, 首先假设订货点和订购提前期为零确定最大库存量, 然后考虑不为零的情况确定订货点. 文献[6]建立了一种资源约束下的军用飞机消耗品联合补货模型, 并使用改进的自适应遗传算法求解该模型. 文献[7]针对随机型需求条件的联合补货问题, 改进了已有的组订购点( $Q, S$ )策略模型, 进一步加强了连续检查策略的研究深度. 文献[8]构建了一个四级分布式库存系统的最优库存策略模型, 可求解每个阶段每个产品的最佳批量、安全库存、再订购点以及服务水平. Moon等<sup>[9]</sup>在Kaspi等<sup>[10]</sup>的研究基础上, 提出了一种新的联合补货与配送问题(joint replenishment and distribution, JRD), 并采用RAND算法求解该模型, 无论是效率还是精度都远优于遗传算法与差分进化算法. 如今, JRD模型已经成为库存优化研究的热点. 然而, 现有的JRD模型更多假设每个储备点只能销售一类产品<sup>[11-12]</sup>, 这一假设显然不现实. 文献[13]提出的多产品联合补给与配送模型弥补了这一缺陷, 但不适用于需求随机的情形.

在存储点选址问题方面, 较多的研究独立考虑仓库选址<sup>[14-15]</sup>和库存控制问题, 然而这都容易得到次优化决策. 实际情况仍存在着仓库选址与需求点位置不适应、物资的供应量与实际需求量不协调等问题, 不利于整个库存系统运营优化. 因此, 选址-库存联合优化问题的研究是如今研究的重点. 文献[16]

最早研究了基于补货策略的选址-库存联合优化问题, 采用两阶段法对所建模型进行了求解. 文献[17]通过添加仓储点数量决策变量对文献[16]进行改进, 提出了一种混合自适应差分进化算法有效求解模型, 但所建模型适合需求确定的情形. 针对这一问题, 文献[18]构建需求随机的选址-库存优化模型, 并对比了联合补货策略与独立补货策略, 结果表明联合补货策略优于独立补货策略. 文献[19]提出了一种多产品、多配送中心和多容量限制的选址-库存优化模型, 并设计一种禁忌搜索和模拟退火相结合的算法成功求解模型. 文献[20-21]研究了多级供应链中的选址-库存-路径问题, 将其转化为一个非线性整数规划模型, 但所研究的问题均是针对单一产品.

综上所述, 如何选择合适地点开设仓库, 并制定最优的补货、配送库存方案, 是决策者需要攻克的难题. 以往的研究缺少对多品种选址、补货与配送联合优化的研究, 这类选址-库存模型决策变量数量较多, 其数学性质更为复杂, 传统的智能算法容易出现不收敛或陷入局部最优等问题. 鉴于此, 本文提出一种基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略. 主要工作如下:

1) 考虑维修备件的不缺货概率和需求等待时间两个服务水平指标, 以多品种联合补货问题为基础, 对已有的联合补货与配送模型进行改进, 建立定期检查策略下的仓库选址与库存控制联合优化模型.

2) 对数学模型结构特点进行分析, 并以此设计一种内外两层搜索策略的混合果蝇优化算法. 利用多种群协同进化方式改进传统的果蝇优化算法, 其外层搜索策略用于搜索仓库选址决策变量, 内层搜索策略采用改进的RAND算法, 用于搜索库存控制决策变量.

3) 对4个具有广泛代表性的数值案例进行仿真分析, 仿真结果表明, 所提出方法有效降低了库存运营成本, 可达到联合优化的目的, 得到更加符合实际需求的库存系统管理方案.

## 1 仓库选址-库存控制一体化模型

### 1.1 问题描述

如图1所示, 考虑由 $m$ 种装备维修备件、1个基地仓库、 $n$ 个候选的基层仓库和 $q$ 个维修活动需求点组成的分布式库存系统. 图1中:  $T_{0j}$ 为基地仓库备件 $j$ 的补货周期;  $T_{wj}$ 为基层仓库 $w$ 处备件 $j$ 的补货周期. 假设基层仓库的实际开设位置未知, 仅已知基层仓库的候选位置.

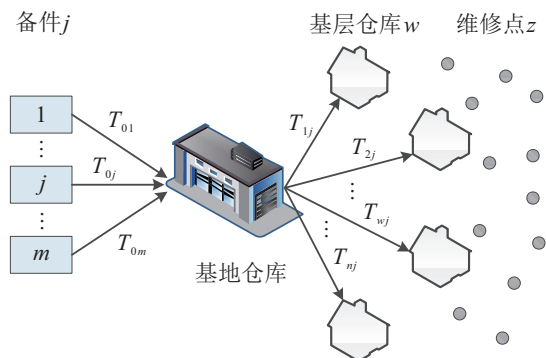


图1 分布式库存系统

由于基层仓库直接面向维修活动需求点,库存状态直接影响作战任务,基层仓库的库存管理要求比较严谨,需要考虑补货提前期,设定安全库存,以防止因缺货造成装备备件供应不足. 另外,还应考虑基层仓库装备备件的不缺货概率和需求等待时间. 基地仓库定期对自身进行补货并向实际开设的基层仓库配送备件,间接影响着装备维修活动,相对于基层仓库可采用较为松弛的管理策略. 该库存系统的决策目标是制定合适的仓库选址与库存控制决策方案,使得基层仓库备件库存满足一定服务水平且库存系统运营总成本尽可能达到最小.

基于上述原因,使得分布式库存系统决策方案需包含以下几点: 1) 确定基层仓库的实际开设位置; 2) 确定维修活动需求点到实际开设基层仓库的指派方案; 3) 确定仓库(基地/基层)的补货周期、库存水平以及安全库存水平.

## 1.2 模型构建

### 1.2.1 符号定义及说明

参数符号及其含义如表1所示.

表1 参数符号及其含义

参数	含义
$w$	基层仓库候选位置标识
$j$	备件种类标识
$z$	需求点标识
$T$	基本循环周期
$k_j$	基地仓库备件 $j$ 的补货周期乘子
$f_{wj}$	$k_j/f_{wj}$ 为 $w$ 处基层仓库备件 $j$ 的补货周期乘子
$T_{0j}$	基地仓库备件的补货周期, $T_{0j}=k_j T$
$T_{wj}$	$w$ 处基层仓库备件 $j$ 的补货周期, $T_{wj}=k_j T/f_{wj}$
$Y_w$	$w$ 处基层仓库是否开设,若开设,则 $Y_w = 1$ , 否则 $Y_w = 0$
$X_{wz}$	需求点 $z$ 是否指派给 $w$ 处基层仓库,若指派,则 $X_{wz} = 1$ , 否则 $X_{wz} = 0$
$r_0$	基地仓库的补货启动成本
$r_{0j}$	基地仓库关于备件 $j$ 的额外补货成本
$h_{0j}$	基地仓库备件 $j$ 的单位存储成本
$r_{wj}$	向 $w$ 处基层仓库运输备件 $j$ 的配送成本
$h_{wj}$	$w$ 处基层仓库备件 $j$ 的单位存储成本

### 1.2.2 构建选址-库存模型

维修备件库存系统主要包括补货、存储和配送3个环节. 一般地,后勤装备周转维修资源的仓库采用定期库存控制法,以年为周期进行备件采购补充到最高库存水平. 研究发现,采用同步仓库的补货与配送订单策略可以使库存总成本最小化,并促进物流管理<sup>[13]</sup>. 该策略的基本方法是通过确定一个基本循环周期  $T$  协调每种装备维修备件的补货周期,因此基地仓库备件  $j$  的补货周期可以表示为  $T_{0j} = k_j T$ . 由于基层仓库的补货周期不超过基地仓库的补货周期,即  $w$  处基层仓库备件  $j$  的补货周期  $T_{wj} \leq T_{0j}$ , 定义  $T_{wj}$  为

$$T_{wj} = \frac{k_j T}{f_{wj}}, \quad (1)$$

其中  $k_j \geq f_{wj}$ ,  $k_j, f_{wj}$  为自然数.

本文库存系统年均总成本主要包括年均订购成本、年均存储成本以及基层仓库的年均固有成本. 由于缺货成本很难估算,建模中使用服务水平作为模型的约束条件. 装备维修备件的服务水平可以用备件的缺件数、满足率、需求等待时间等表示<sup>[7]</sup>.

#### 1) 年均订购成本.

订购成本主要包括基地仓库的补货启动成本、额外补货成本和到基层仓库的配送成本,所以年均订购成本  $C_O$  计算公式如下:

$$C_O = \frac{r_0}{T} + \sum_j \frac{r_{0j}}{k_j T} + \sum_w \sum_i \sum_j \frac{r_{wj} f_{wj}}{k_j T} Y_w. \quad (2)$$

#### 2) 年均存储成本.

仓库产生的存储成本主要由循环库存成本和安全库存成本组成. 库存量变化类型一般分为周期型和连续性两种,基地仓库备件消耗由基层仓库的定期补货活动产生,所以备件消耗呈现周期型<sup>[13]</sup>,基地仓库的年均循环库存成本  $C_{H1}$  为

$$C_{H1} = \sum_{\forall j, \forall w} \frac{1}{2} h_{0j} Y_w \left( k_j T - \frac{k_j T}{f_{wj}} \right) D_{wj}. \quad (3)$$

其中:  $D_{wj} = \sum_{\forall z} d_{zj} Y_w X_{wz}$ ,  $d_{zj}$  为需求点  $z$  处产生备件  $j$  的平均需求量.

基层仓库备件的消耗由需求点维修活动产生,备件消耗视为连续的. 基层仓库直接面向维修活动,除了循环库存还应设置安全库存. 安全库存水平由要求的服务水平、需求标准差、补货周期和补货提前期决定<sup>[22]</sup>,基层仓库  $w$  备件  $j$  安全库存水平  $SS_{wj}$  可表示为

$$SS_{wj} = \xi_{wj} \sigma_{wj} X_{wz} Y_w \sqrt{\frac{k_j T}{f_{wj}} + L_w}. \quad (4)$$

其中:  $L_w$  为  $w$  处基层仓库的补货提前期;  $\xi_{wj}$  为安全系数;  $\sigma_{wj} = \sum_{\forall z} \sigma_{zj} Y_w X_{wz}$ ,  $\sigma_{zj}$  为需求点  $z$  处备件  $j$  的需求标准差. 由此可以得到基层仓库的年均存储成本  $C_{H2}$  为

$$C_{H2} = \sum_{\forall j, \forall w, \forall z} h_{wj} \left( \frac{k_j T}{2 f_{wj}} d_{zj} X_{wz} Y_w + SS_{wj} \right). \quad (5)$$

3) 年均固有成本.

年均固有成本主要考虑基层仓库的固定开设成本以及与固定距离成本<sup>[16]</sup>. 年均固有成本计算方式如下:

$$C_L = \sum_{\forall w} p_w Y_w + \sum_{\forall w} t_w Y_w. \quad (6)$$

其中:  $p_w$  为在候选位置  $w$  处的基层仓库固定开设费用,  $t_w$  为候选位置  $w$  处的距离成本.

4) 服务水平.

服务水平考虑满足率和需求等待时间两个衡量指标. 满足率用备件的不缺货概率表示, 实际维修备件的库存水平需要满足补货提前期和补货周期这两个时间段的备件需求. 用  $\alpha$  表示  $t$  内不缺货的概率,  $D_t$  表示时间  $t$  内的需求量, 则  $t$  内备件库存水平  $S$  应满足如下不等式:

$$P(D_t \leq S) = \sum_{x=0}^S P(D_t = x) \geq \alpha. \quad (7)$$

除满足率约束外, 维修备件的库存水平还应考虑需求等待时间, 需求等待时间表示在可能发生缺货的时间周期内缺货持续的时间. 给定需求等待时间指标  $\beta$ , 则库存水平需满足如下不等式:

$$\frac{EBO}{d} \leq \beta. \quad (8)$$

其中:  $EBO = \sum_{x=S+1}^{\infty} (x-S) f'_t(x)$ <sup>[23]</sup>, 为备件的预期缺货量;  $f'_t(x)$  为备件需求随机分布的密度函数;  $d$  为备件需求率.

构建选址-库存模型如下:

$$TC = C_O + C_{H1} + C_{H2} + C_L. \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \sum_{x=0}^{S_{wj}} P(D_{T_{wj}} + L_w) \geq \alpha, \forall w, j; \quad (10)$$

$$\frac{EBO_{wj}}{D_{wj}} \leq \beta, \forall w, j; \quad (11)$$

$$\sum_{\forall w} X_{wz} = 1, \forall z; \quad (12)$$

$$X_{wz} \leq Y_w, \forall z, w; \quad (13)$$

$$k_j, f_{wj} \in N^+, \forall w, j; \quad (14)$$

$$X_{wz}, Y_w \in \{0, 1\}, \forall z, w. \quad (15)$$

其中: 式(9)为目标函数, 即库存系统总成本; 式(10)为各基层仓库备件供应的满足率约束; 式(11)为各基层仓库备件供应的需求等待时间约束; 式(12)约束了每个维修活动需求点有且只能指派给一个基层仓库; 式(13)表示只有实际开设的基层仓库才能被指派需求点; 式(14)和(15)规定了参数的基本类型.

## 2 模型的求解

### 2.1 模型结构分析

为了方便描述, 将基地仓库补货周期乘子记为  $K$ , 即  $K = (k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_N)$ , 同理设置  $F$ 、 $Y$  和  $X$  分别对应所有的  $f_{wj}$ 、 $Y_w$  和  $X_{wz}$ . 目标函数主要由库存控制和仓库选址两部分构成, 所含决策变量包括  $T$ 、 $K$ 、 $F$ 、 $X$ 、 $Y$ . 其中:  $T$ 、 $K$ 、 $F$  属于库存控制决策变量,  $X$ 、 $Y$  属于仓库选址部分决策变量. 对于给定的  $X$ , 根据式(13)和(15)即可求出决策变量  $Y$ . 对于给定的  $T$ 、 $K$ 、 $F$ , 还可以得出各仓库库存水平  $S$  和安全库存水平  $SS$ ,  $S$  为式(10)和(11)计算得出的最大值,  $SS$  可由式(4)计算得出. 因此, 本文模型的关键决策变量是  $K$ 、 $F$ 、 $T$  和  $X$ , 其他变量均可由这4个关键变量进一步得出. 下面针对模型的库存决策部分进行最优条件分析.

库存决策部分关键决策变量包括  $T$ 、 $K$ 、 $F$ . 假设给定一个选址决策集合  $x$ , 即可得出所有开设仓库的集合  $W$  和需求点的指派集合  $Z_w$ , 其中  $W = \{w | Y_w = 1\}$ ,  $Z_w = \{z | X_{wz} = 1\}$ . 对于库存控制决策的求解, 由于备件需求的不确定性, 使得目标函数  $TC$  中含有确定部分和随机部分, 随机部分仅存在于安全库存成本里. 已有研究表明, 同时优化这两个部分求解繁琐且缓慢<sup>[8]</sup>. 由于该类模型的总成本主要由确定部分构成, 本文采用确定型的近似求解方法<sup>[9]</sup> 分析目标函数的主要性质. 给定选址决策变量, 得到式(9)的确定部分如下:

$$\begin{aligned} De = & \frac{r_0}{T} + \sum_j \frac{r_{0j}}{k_j T} + \sum_{w \in W} \sum_{z \in Z_w} \sum_j \frac{k_j T}{2 f_{wj}} d_{zj} h_{wj} + \\ & \sum_{w \in W} \sum_j \frac{1}{2} h_j \left( k_j T - \frac{k_j T}{f_{wj}} \right) D_{wj} + \\ & \sum_{w \in W} \sum_j \frac{r_{wj} f_{wj}}{k_j T} + \sum_{w \in W} p_w. \end{aligned} \quad (16)$$

进而有

$$\frac{\partial De}{\partial T^2} = \frac{2}{T^3} \left( r_0 + \sum_j \frac{r_{0j}}{k_j T} + \sum_{w \in W} \sum_j \frac{r_{wj} f_{wj}}{k_j} \right). \quad (17)$$

由式(17)可知,  $\partial^2 De / \partial T^2 > 0$ , 因此对于给定的

$K$  和  $F, De$  为凸函数.

通过最优性条件  $\partial De / \partial T = 0$ , 得到最优基本循环周期  $T^*$  为

$$T^* = \sqrt{\frac{2\left(r_0 + \sum_j \frac{r_{0j}}{k_j} + \sum_{w \in W} \sum_j \frac{r_{wj} f_{wj}}{k_j}\right)}{\sum_{w \in W} \sum_{z \in Z_w} \sum_j k_j d_{zj} \left(h_j + \frac{h_{wj} - h_j}{f_{wj}}\right)}}. \quad (18)$$

对于给定的一组  $T$  和  $F$ , 最优值  $k_j$  应满足  $De(k_j) \leq De(k_j + 1)$  且  $De(k_j) \leq De(k_j - 1)$ , 即有

$$A = \frac{2\left(r_0 + \sum_{w \in W} f_{wj} C_{wj}\right)}{\sum_{w \in W} \sum_{z \in Z_w} T^2 d_{zj} \left(h_j + \frac{h_{wj} - h_j}{f_{wj}}\right)}, \quad (19)$$

$$k_j(k_j - 1) \leq A \leq k_j(k_j + 1). \quad (20)$$

对于给定的一组  $T$  和  $K$ , 最优值  $f_{wj}$  应满足  $De(f_{wj}) \leq De(f_{wj} + 1)$  且  $De(f_{wj}) \leq De(f_{wj} - 1)$ , 即有

$$B = \frac{\sum_{z \in Z_w} k_j^2 T^2 d_{zj} (h_{wj} - h_j)}{2C_{wj}}, \quad (21)$$

$$f_{wj}(f_{wj} - 1) \leq B \leq f_{wj}(f_{wj} + 1). \quad (22)$$

## 2.2 混合果蝇优化算法

根据 2.1 节模型结构特点分析, 本文模型的求解采用内外两层搜索策略, 外层搜索策略作为算法的主程序, 用于搜索选址决策变量  $X$ , 内层搜索策略采用改进的 RAND 方法, 用于搜索库存控制决策变量  $T, K$  和  $F$ . 利用麻雀搜索算法 (sparrow search algorithm, SSA)<sup>[24]</sup> 多种群协同进化的优点改进果蝇优化算法 (fruit fly optimization algorithm, FOA)<sup>[25]</sup>, 设计一种混合果蝇优化算法 (hybrid fruit fly optimization algorithm, HFOA), 该算法可以有效求解所建立的模型, 基本流程如图 2 所示.

### 2.2.1 种群编码与位置更新

#### 1) 种群编码.

混合果蝇优化算法针对选址决策变量  $X$  进行外层搜索, 采用实数编码的方式对果蝇种群编码, 种群位置向量对应  $q$  个维修活动需求点与  $n$  基层仓库的指派情况. 例如, 设置果蝇个体  $i$  的位置向量为  $X_i = (x_i^1, \dots, x_i^z, \dots, x_i^q)$ , 则分量  $x_i^z$  应满足果蝇的初始搜索范围  $1 \leq x_i^z \leq n$ , 其所表示的实际意义为: 选择在候选位置  $x_i^z$  处开设的基层仓库且维修活动需求点  $z$  被指派给  $x_i^z$  处的基层仓库, 即  $Y_w = 1, X_{wz} = 1, w = x_i^z$ .

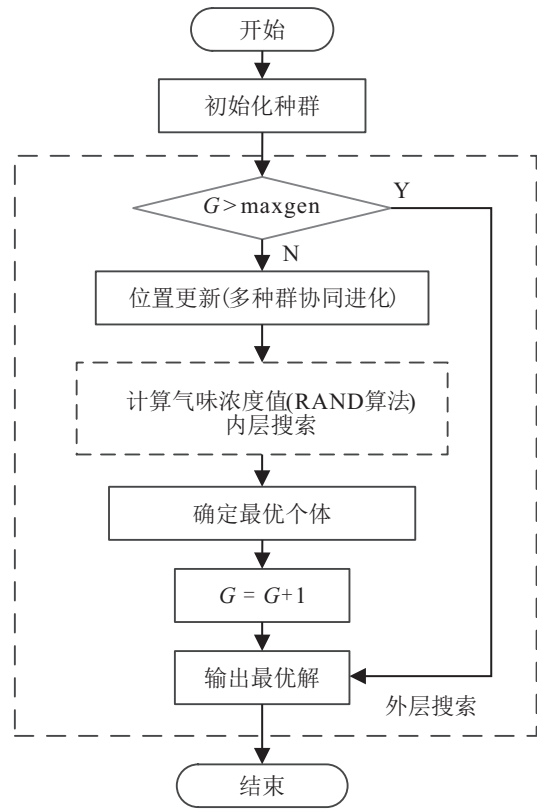


图 2 HFOA 算法流程

#### 2) 位置更新.

果蝇优化算法 (FOA) 具有寻优机制简单明了、易于理解、编程容易实现等优点, 为了保留其本质寻优特性, 并解决算法容易陷入局部极值的问题, 这里没有采用传统的果蝇种群位置更新方式, 而是结合了麻雀搜索算法中多种群协同进化的方法. 麻雀搜索算法的核心思想是将麻雀群体分为发现者和加入者, 发现者在种群中负责寻找食物并为整个麻雀种群提供觅食区域和方向, 加入者利用发现者来获取食物. 此外, 当麻雀种群意识到危险时会做出反捕食行为, 以此防止算法陷入局部最优.

基于麻雀搜索算法核心思想, 将果蝇个体的气味浓度值从小到大排序, 设置果蝇群体. 前 50% 为“发现者”, 后 50% 为“加入者”, “反捕食行为”仅发生在“发现者”的前 10%. 具体操作如下:

#### ① 果蝇“发现者”位置更新方式.

设置果蝇“发现者”, 进行大方向范围搜索, 是一种多样性保存策略, 有

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + \text{rand}(\text{FR}_1), & R_1 \leq \text{ST}_1; \\ X_i^t + \text{rand}(\text{FR}_2), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (23)$$

其中:  $t$  为迭代次数;  $X_i^t$  为第  $t$  代果蝇个体  $i$  的位置向量;  $\text{FR}_1$  为完全随机飞行范围, 由实际问题确定的初始搜索范围决定;  $\text{FR}_2$  为半随机飞行范围, 由基层仓库的综合成本决定, 其综合成本越低, 果蝇飞向该处

进行搜索概率越大. 两种搜索类型的选择由随机数  $R_1 (R_1 \in [0, 1])$  和飞行判定值  $ST_1$  决定.

### ② 果蝇“加入者”位置更新方式.

设置果蝇“加入者”, 追随“发现者”进行二次搜索, 是一种加速收敛的策略, 有

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_p^{t+1} + \text{rand}(\text{FR}_3), & \text{Smell}_i^t \leq ST_2; \\ X_i^t + \gamma_1 \cdot \text{rand}(\text{FR}_2), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (24)$$

其中:  $\text{Smell}_i$  为果蝇个体  $i$  的气味浓度值,  $X_p$  为目前“发现者”所占据的最优位置,  $\lambda_1$  为扰动因子. 个体飞行范围  $\text{FR}_3$  由  $X_p$  决定, “加入者”随机飞向“发现者”最优位置附近, 通过控制  $\text{FR}_3$  分量为零的数量约束飞行距离, 分量值为零的数量越多, 距离“发现者”最优位置越近.

### ③ 果蝇“反捕食行为”方式.

通过设置“反捕食行为”防止果蝇总是停留在某一位置, 防止陷入局部最优, 有

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^{t+1}, & \text{Smell}_i^{t+1} < S_{\text{best}}^t; \\ X_{\text{best}}^t + \gamma_2 \cdot \text{rand}(\text{FR}_4), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (25)$$

其中:  $X_{\text{best}}$  为当前全局历史最优位置;  $S_{\text{best}}$  为当前全局历史最优气味浓度值;  $\lambda_2$  为扰动因子;  $\text{FR}_4$  为个体飞行范围, 由  $X_{\text{best}}$  决定. 蝇个体随机飞向全局历史最优位置附近, 通过控制  $\text{FR}_4$  分量为零的数量约束飞行距离.

## 2.2.2 气味浓度值的计算

气味浓度值  $\text{Smell}_i = \text{Function}(\psi_i)$ , 其中  $\text{Function}$  为气味浓度判定函数,  $\psi_i$  为气味浓度判定值. FOA 算法中  $\psi_i$  为距离  $\text{Dist}_i$  的倒数,  $\psi_i$  难以均匀分布在搜索空间中, 使 FOA 的应用受到极大限制. 因此, 这里直接将果蝇的气味浓度判定函数设定为该模型的目标函数  $\text{TC}^{[26]}$ . 由于  $\text{TC}$  中除了选址决策变量  $K$  外, 还包含库存控制决策变量  $K$ 、 $F$  和  $T$ , 无法直接得出气味浓度值  $\text{Smell}_i$ , 本文改进 RAND 方法以计算  $K$ 、 $F$  和  $T$  以及气味浓度值  $\text{Smell}_i$ .

类比 Huang<sup>[27]</sup> 和 Wang 等<sup>[12]</sup> 提出的方法, 结合第 2.1 节中最佳条件修正  $T$  的边界, 有

$$T_{\max} = \sqrt{\frac{2\left(C + \sum_j C_j + \sum_{w \in W} \sum_j C_{wj} \bar{f}_{wj}\right)}{\sum_{w \in W} \sum_{z \in Z_w} \sum_j d_{zj} h_j}}, \quad (26)$$

$$T_{\min} = \sqrt{\frac{2\left(\sum_j \frac{C_j}{k_j} + \sum_{w \in W} \sum_j \frac{C_{wj}}{k_j}\right)}{\sum_{w \in W} \sum_{z \in Z_w} \sum_j \bar{k}_j d_{zj} h_{wj}}}. \quad (27)$$

$K$  和  $F$  中的每个元素的初始下界设为 1, 改进后的 RAND 算法基本步骤如下.

改进的 RAND 算法.

输入:  $\psi_i$ ;

输出:  $\text{Smell}_i, T, K, F$ .

计算  $T$  的上下界  $T_{\max}, T_{\min}$ ;

将  $[T_{\max}, T_{\min}]$  分成  $g$  等份,  $[T_1, T_2, \dots, T_g]$ ;

for  $j_0 = 1$  to  $g$  do

$r \leftarrow 1$ ;  $T(r) \leftarrow T_{j_0}$ ;  $F(r) \leftarrow [1, 1, \dots, 1]$ ;

while  $r == 1$  or  $T(r) \neq T(r-1)$  do

由式(20)计算  $K(r)$ , 即  $T(r), F(r) \Rightarrow K(r)$ ;

由式(22)计算  $F(r+1)$ , 即  $T(r), K(r) \Rightarrow F(r+1)$ ;

由式(18)计算  $T(r+1)$ , 即  $K(r), F(r+1) \Rightarrow T(r+1)$ ;

$r = r + 1$

end

计算  $\text{TC}_{j_0}, \text{TC}(K(r-1), T(r), F(r), \psi_i) \Rightarrow \text{TC}_{j_0}$

end

$\text{Smell}_i \leftarrow \min \text{TC}_{j_0}$

选择并记录  $\text{Smell}_i$  以及对应的  $T, K, F$ .

## 2.2.3 算法的计算流程

混合果蝇优化算法计算流程如下.

step 1: 初始化参数. 种群规模  $\text{sizepop}$ , 最大迭代次数  $G$ .

step 2: 随机初始化果蝇种群  $X_i, \text{Smell}_i$ . 初始位置生成方法如下:

$$X_i = \begin{cases} \text{rand}(\text{FR}_1), & i < \text{sizepop}/2; \\ \text{rand}(\text{FR}_2), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (28)$$

step 3: 多类种群位置更新. 根据第 2.2.1 节所述的位置更新方式进行果蝇群体位置更新操作.

step 4: 利用第 2.2.2 节改进的 RAND 算法求解计算果蝇的个体气味浓度值  $\text{Smell}_i$  和对应的  $T, K$  和  $F$ .

step 5: 找出果蝇种群中气味浓度值最高的个体, 方法如下:

$$[\text{bestS}, \text{bestIndex}] = \min_{\forall i} (\text{Smell}_i). \quad (29)$$

step 6: 保存全局最高气味浓度值  $S_{\text{best}}$ 、最优位置坐标  $X_{\text{best}}$  以及对应的  $T$ 、 $K$  和  $F$ . 方法如下: 若  $\text{bestS} \leq S_{\text{best}}$ , 则有  $S_{\text{best}} = \text{bestS}$ ,  $X_{\text{best}} = X_i, i = \text{bestIndex}$ .

step 7: 当迭代次数达到最大时, 停止迭代并输出结果, 否则返回 step 2.

### 3 仿真与分析

#### 3.1 案例仿真

以某后勤保障区域的分布式库存系统为例,该库存系统由1个基地仓库、5个候选待开设的基层仓库以及30个维修活动需求点构成. 仿真实验中,假设维修活动需求点的备件消耗服从正态分布,案例问题的基础数据范围如表2所示,部分数据来源于文献[25]. 仿真实验由4组数值案例构成,其中案例1和案例2的基础数据由表2随机生成,具有一定的代表性. 相对于案例1,案例3将4号位置基层仓库的单位存储成本提高了10%~30%. 相对于案例2,案例4增加了两个候选待开设的基层仓库,新的基层仓库基础数据由表2随机生成.

表2 案例参数范围

参数	范围
需求点平均需求量 $d_{zj}$	$U[500, 2\ 500]$
需求标准差 $\sigma_{zj}$	$U[20, 200]$
补货启动成本 $r_0$	300, 500
额外补货成本 $r_{0j}$	$U[25, 50], U[20, 35]$
配送成本 $r_{wj}$	$U[3.5, 5], U[4, 8]$
基地仓库存储成本 $h_{0j}$	$U[0.5, 1.5], U[1, 2]$
基层仓库存储成本 $h_{wj}$	$U[1.5, 2.5], U[2, 3.5]$
基层仓库补货提前期 $L_w$ (年)	$U[0.002, 0.04], U[0.005, 0.05]$
候选位置的固定开设成本 $p_w$	$U[350, 550], U[400, 700]$
距离成本 $t_w$	$U[100, 300], U[200, 350]$
不缺货概率 $\alpha$	$U[0.95, 0.95], U[0.93, 0.98]$
需求等待时间 $\beta$	$U[0.002, 0.04], U[0.005, 0.02]$

使用HFOA、FOA、PSO和GA四种算法在Matlab 2018b仿真平台对数值案例进行仿真分析. 所有算法的种群规模为200,迭代次数为1000次. 设置HFOA算

法干扰因子  $\gamma_1 = 0.6, \gamma_2 = 0.3$ , 飞行判断值  $ST_1 = 0.5, ST_2 = 0.5$ ; PSO算法学习因子  $c_1 = 1.5, c_2 = 1.5$ ; 惯性权重  $\omega_{max} = 0.9, \omega_{min} = 0.4$ ; GA算法交叉率  $p_c = 0.9$ , 突变率  $p_m = 0.1$ .

#### 3.2 仿真分析

使用HFOA、FOA、PSO和GA四种算法分别对4个数值案例同时随机求解30次,仿真结果如下:

1)表3给出了4种算法在各案例其中一次的求解结果. 可以看出, HFOA算法在4个案例中求解方案的总成本均是最优的. 本文模型考虑的成本包括固有成本和可变成本,其中可变成本是指补货配送成本和存储成本. 案例1中,基础数据显示2号、4号位置的固有成本并不是最低的,但单位存储成本和配送成本相对其他位置偏低,4种算法在求解选址决策时集中在2号和4号位置进行最优搜索, HFOA算法求解基层仓库的最优开设位置是2号、4号. 案例2中,基础数据显示1号和5号位置的固定成本相对较高,4号位置基层仓库的可变成本最高,其余位置的可变成本相差不明显,4种算法在求解选址决策时容易集中在1号、2号、3号和5号位置进行搜索, HFOA算法求解基层仓库的最优开设位置是2号和3号. 相对案例1,案例3中4号位置基层仓库的单位存储成本有了明显的提高,4种算法的选址决策结果均不再选择在4号位置开设仓库. 相对案例2,案例4中新增加7号位置的配送成本相对其他位置偏低,4种算法求解选址决策时均集中在7号位置进行搜索. 由仿真结果可见,基层仓库的可变成本相对固有成本对仓库选址决策影响更大, HFOA算法相比其他算法求解的方案成本更低.

表3 选址-库存控制决策方案对比

案例	算法	TC	开设位置	$F$	$K$	$T$	$\Delta_{HFOA} / \%$
1	GA	17577	2,3,4	[3, 4, 3]; [1, 1, 1]; [2, 2, 2]	1, 1, 1	0.069	16
	SO	16376	2,3	[3, 4, 3]; [1, 1, 1]	1, 1, 1	0.068	8
	FOA	18014	1,2,4	[1, 1, 1]; [2, 3, 2]; [3, 3, 3]	1, 1, 1	0.070	19
	HFOA	15147	2,4	[3, 2, 1]; [3, 3, 2]	1, 1, 1	0.069	0
2	GA	19700	2,3,5	[2, 3, 3]; [2, 2, 2]; [4, 5, 4]	1, 1, 1	0.074	15
	PSO	18420	1,5	[1, 1, 2]; [4, 5, 5]	1, 1, 1	0.072	7
	FOA	20612	1,2,3,5	[1, 1, 2]; [1, 2, 2]; [5, 6, 5]; [1, 1, 1]	1, 1, 1	0.074	20
	HFOA	17177	2,3	[3, 3, 3]; [4, 5, 4]	1, 1, 1	0.073	0
3	GA	18580	1,2	[1, 1, 1]; [3, 2, 3]	1, 1, 1	0.070	16
	PSO	17157	2	[3, 2, 1]	1, 1, 1	0.068	7
	FOA	18742	1,2,3	[1, 1, 1]; [2, 3, 2]; [1, 2, 1]	1, 1, 1	0.069	17
	HFOA	16002	2,3	[3, 2, 2]; [1, 1, 1]	1, 1, 1	0.069	0
4	GA	19690	2,7	[2, 3, 2]; [4, 3, 3];	1, 1, 1	0.074	16
	PSO	18489	1,7	[2, 1, 1]; [4, 4, 3];	1, 1, 1	0.073	9
	FOA	20864	1,3,7	[2, 1, 1]; [5, 4, 4]; [3, 4, 3]	1, 1, 1	0.072	23
	HFOA	16937	3,7	[4, 5, 4]; [3, 4, 3]	1, 1, 1	0.073	0

2) 库存控制决策方案在4个案例中有类似的特征,这里以案例2为例进行分析说明. 4种算法的 $T$ 均集中在0.073年,基地仓库的周期乘子均为1,基地仓库每隔0.073年( $T_{0j} = k_j T$ )补充所有备件. 基层仓库的周期乘子相差较大,所以基层仓库的补货周期( $T_{wj} = k_j T / f_{wj}$ )相差较大. 这表明基地仓库的最优补货周期 $T_{0j}$ 与选址决策方案关联性较弱,基层仓库的最优补货周期 $T_{wj}$ 与选址决策方案关联性较强,基层仓库的库存选址方案直接影响了库存控制决策优化,这一结论也与实际情况相吻合.

3) 表4给出了4种算法求解各案例的最小目标成本 $TC_{min}$ 、最大目标成本 $TC_{max}$ 、平均目标成本 $TC_{ave}$ 以及HFOA算法求解平均目标成本相对减少百分比 $\Delta TC_{ave}$ . 可见,HFOA算法在4个案例中的最小目标成本、最大目标成本和平均目标成本相对GA、PSO和FOA算法均是最优的,且在案例4中HFOA算法的 $\Delta TC_{ave}$ 相对其他案例更为明显. GA、PSO和FOA算法的平均目标成本与最大/最小目标成本差值较大,HFOA算法的平均目标成本与最小目标成本相差不到300,与最大目标成本相差不到500,显然HFOA算法每次求解的目标成本相差更小. 这表明了FOA算法相比GA、PSO和FOA算法具有较强的鲁棒性,在案例4中的表现尤为突出,这是因为案例4比其他3个案例多了两个候选位置,使得算法搜索空间变大,HFOA算法相对其他算法的全局搜索能力更优.

表4 目标成本对比

案例	算法	$TC_{min}$	$TC_{max}$	$TC_{ave}$	$\Delta TC_{ave} / \%$
1	GA	16454	18964	17491	15
	PSO	16168	17233	16713	9
	FOA	16514	18609	17951	18
	HFOA	15147	15578	15264	0
2	GA	18457	21321	19960	16
	PSO	18185	19248	18585	8
	FOA	19108	21291	20132	17
	HFOA	17057	17459	17191	0
3	GA	17448	19690	18479	16
	PSO	16711	17628	17047	7
	FOA	17532	19660	18838	18
	HFOA	15792	16265	15915	0
4	GA	19178	20974	19973	17
	PSO	17569	19591	18875	11
	FOA	19354	22284	20484	20
	HFOA	16845	17461	17055	0

4) 图3和图4分别对比了案例1和案例2中HFOA、FOA、GA和PSO算法的收敛过程,图5对比了案例1中算法的平均收敛过程. 可见,HFOA算法相对FOA、GA和PSO算法收敛效果最好,虽然HFOA算法收敛速度慢于FOA算法,但无明显差别. 实验表明,本文HFOA算法结合了麻雀搜索算法中的多类群

体位置更新方式,进行多种群协同进化,在保留果蝇算法本质寻优特性的基础上,解决了算法容易陷入局部极值的问题,使得种群具有良好的多样性,增强了算法的全局寻优能力,HFOA算法在仿真实验中表现出良好的寻优效果.

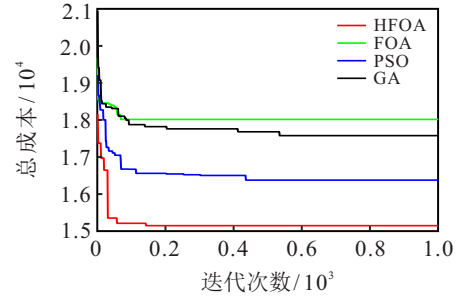


图3 算法收敛过程对比(案例1)

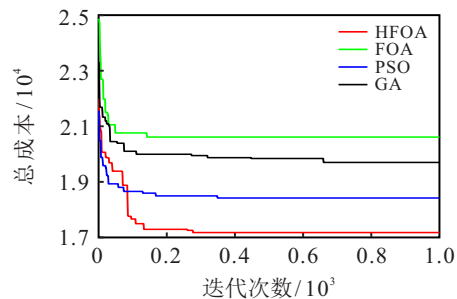


图4 算法收敛过程对比(案例2)

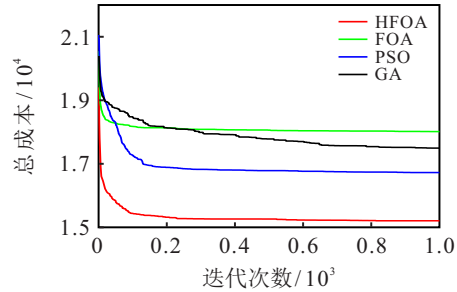


图5 算法平均收敛过程对比

5) 以案例1为例,将4种算法的求解结果作进一步处理,如图6所示. HFOA算法30次求解目标函数总成本均低于FOA、GA和PSO算法的求解结果,且不存在异常值. 图7对比了HFOA算法的最佳收敛过程与平均收敛过程,收敛结果仅相差117. 仿真结果表明,HFOA算法相比于其他算法收敛结果最为稳定可靠,HFOA算法具有更好、更稳定的寻优能力.

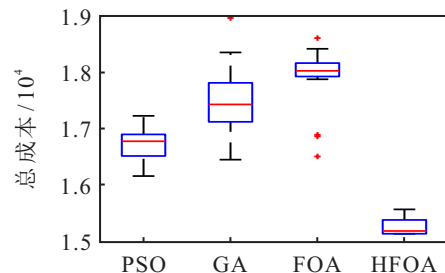


图6 算法求解结果对比

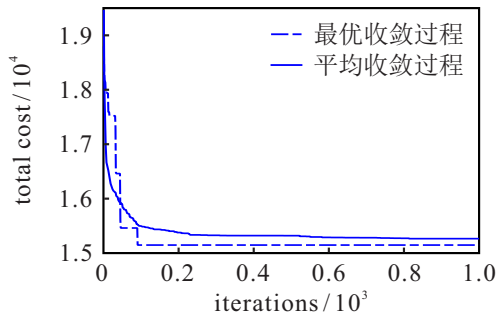


图7 HFOA平均收敛过程与最佳收敛过程对比

6) 以HFOA算法的最佳仿真求解结果为例说明案例1的选址-库存决策方案. 选址决策方案结果表

表5 方案1库存控制决策方案

备件类型	TC	$T$	$F_2$	$F_4$	$K$	$S_0$	$S_2$	$S_4$	$SS_2$	$SS_4$
备件1			3	3	1	3 652	906	1 121	125	158
备件2	15 147	0.069	2	3	1	4 146	1 294	1 312	191	221
备件3			1	2	1	3 685	1 930	1 475	281	272

### 4 结论

本文对维修备件的分布式库存系统管理优化问题进行研究,提出了一种基于混合果蝇优化算法的仓库选址与库存控制联合优化方法. 采用同步基地仓库的补货与配送订单策略建立了数学模型,所建模型可以确定基层仓库的选址决策方案和各仓库的库存控制决策方案. 为了提高传统果蝇优化算法的求解效率,引入麻雀搜索算法中的多种群位置更新方式进行多种群协同优化,在保留果蝇算法本质寻优特性的基础上,解决了算法容易陷入局部极值的问题,提高了算法的全局寻优能力. 仿真结果表明,混合果蝇优化算法具有良好的求解效率,所得的联合优化决策方案在确保库存系统一定服务水平的基础上,有效降低了库存运营总成本. 本文研究有利于装备维修保障的库存管理工作,为有效实施物资供应保障决策提供一定的理论依据.

### 参考文献(References)

[1] 孙笑, 宋卫星, 班利明, 等. 复杂人力资源约束下的抢占式维修工序调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 393-400.  
(Sun X, Song W X, Ban L M, et al. Preemptive maintenance process scheduling under complex human resource constraints[J]. Control and Decision, 2022, 37(2): 393-400.)

[2] 高颖杰, 曹继平, 雷宁, 等. 装备维修保障资源配置优化研究综述[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(3): 102-106.  
(Gao Y J, Cao J P, Lei N, et al. Review of study

on equipment maintenance support resource allocation optimization[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(3): 102-106.)

示选择在2号、4号位置开设基层仓库,指派给2号基层仓库的需求点包括1~4以及6、9、10、12、20、21、23、28、30号,剩余指派给4号基层仓库. 库存控制决策方案如表5所示,设置基本循环周期为0.069年,约25天. 基地仓库各备件  $K = 1$ ,基地仓库各备件的补货周期为25天. 2号基层仓库的3种备件补货周期分别为8.3天、12.5天和25天;4号基层仓库各备件的补货周期分别为8.3天、8.3天和12.5天.  $S_0$ 为基地仓库的库存水平;  $S_2$ 为2号基层仓库库存水平;  $S_4$ 为4号基层仓库库存水平;  $SS_2$ 为2号基层仓库安全库存水平;  $SS_4$ 为4号基层仓库的安全库存水平.

[3] 张巍, 姜大立, 苏秋月. 战时军事物流调运网络选址配置与物资分配[J]. 指挥与控制学报, 2019, 5(2): 99-106.  
(Zhang W, Jiang D L, Su Q Y. Site selection and distribution of wartime military logistics transportation networks[J]. Journal of Command and Control, 2019, 5(2): 99-106.)

[4] Balintfy J L. On a basic class of multi-item inventory problems[J]. Management Science, 1964, 10(2): 287-297.

[5] 张建荣, 于永利, 张柳, 等. 维修器材联合订货的库存决策模型[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 109-112.  
(Zhang J R, Yu Y L, Zhang L, et al. Inventory decision model of joint ordering policy with maintenance materials[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(1): 109-112.)

[6] Li J Y, Ji Z H. Joint replenishment problem of military aircraft consumptive items under resource constraint[C]. The 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. Prague, 2017: 786-790.

[7] 刘亚东, 孙志刚, 杨英杰. 改进组订购点策略在器材库存控制中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(3): 162-166.  
(Liu Y D, Sun Z G, Yang Y J. Improved team order point policy in inventory control of material[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(3): 162-166.)

[8] Das D, Hui N B, Jain V. Optimization of stochastic,

- ( $Q, R$ ) inventory system in multi-product, multi-echelon, distributive supply chain[J]. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 2019, 18(5): 405-418.
- [9] Moon I K, Cha B C, Lee C U. The joint replenishment and freight consolidation of a warehouse in a supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 133(1): 344-350.
- [10] Kaspi M, Rosenblatt M J. On the economic ordering quantity for jointly replenished items[J]. *International Journal of Production Research*, 1991, 29(1): 107-114.
- [11] Wang L, Qu H, Li Y H, et al. Modeling and optimization of stochastic joint replenishment and delivery scheduling problem with uncertain costs[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013, 2013: 1-12.
- [12] Wang L, Liu R, Liu S. Variable neighborhood search incorporating a new bounding procedure for joint replenishment and delivery problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2017: 1-23.
- [13] Carvajal J, Castaño F, Sarache W, et al. Heuristic approaches for a two-echelon constrained joint replenishment and delivery problem[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 220: 107420.
- [14] Wang Y, Ma X L, Wang Y H, et al. Location optimization of multiple distribution centers under fuzzy environment[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2012, 13(10): 782-798.
- [15] Saeidian B, Mesgari M S, Ghodousi M. Evaluation and comparison of genetic algorithm and bees algorithm for location-allocation of earthquake relief centers[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 15: 94-107.
- [16] Silva F, Gao L. A joint replenishment inventory-location model[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2013, 13(1): 107-122.
- [17] Wang L, Qu H, Chen T, et al. An effective hybrid self-adapting differential evolution algorithm for the joint replenishment and location-inventory problem in a three-level supply chain[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013: 270249.
- [18] Qu H, Wang L, Liu R. A contrastive study of the stochastic location-inventory problem with joint replenishment and independent replenishment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(4): 2061-2072.
- [19] Raoofpanah H, Ghezavati V. Extended hybrid tabu search and simulated annealing algorithm for location-inventory model with multiple products, multiple distribution centers and multiple capacity levels[J]. *Production Engineering*, 2019, 13(6): 649-663.
- [20] Saragih N I, Bahagia S N, Suprayogi, et al. A heuristic method for location-inventory-routing problem in a three-echelon supply chain system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127: 875-886.
- [21] Guo H, Li C D, Zhang Y, et al. A nonlinear integer programming model for integrated location, inventory, and routing decisions in a closed-loop supply chain[J]. *Complexity*, 2018, 2018: 1-17.
- [22] Otero-Palencia C, Amaya-Mier R, Yie-Pinedo R. A stochastic joint replenishment problem considering transportation and warehouse constraints with gainsharing by Shapley Value allocation[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(10): 3036-3059.
- [23] Chen Y K, Gao Q, Su X B, et al. Research on optimization of spare parts inventory policy considering maintenance priority[J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2018, 9(6): 1336-1345.
- [24] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [25] Shan D, Cao G H, Dong H J. LGMS-FOA: An improved fruit fly optimization algorithm for solving optimization problems[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 1-9.
- [26] 石建平, 李培生, 刘国平, 等. 求解约束优化问题的改进果蝇优化算法及其工程应用[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 314-324.  
(Shi J P, Li P S, Liu G P, et al. Improved fruit fly optimization algorithm for solving constrained optimization problems and engineering applications[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(2): 314-324.)
- [27] Huang D. Erratum to “Solving the multi-buyer joint replenishment problem with the RAND method” [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 59(1): 182-183.

## 作者简介

李凤月(1994—), 女, 硕士生, 从事装备维修保障资源优化配置的研究, E-mail: 792325239@qq.com;

齐小刚(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事健康管理与故障诊断、资源调度与优化算法等研究, E-mail: xgqi@xidian.edu.cn;

宋卫星(1982—), 男, 工程师, 从事装备维修保障等研究, E-mail: 88159073@qq.com;

班利明(1982—), 男, 工程师, 从事装备维修保障的研究, E-mail: 78503373@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)