

基于改进细菌觅食算法的自动化 立体仓库集成优化

董 海¹, 齐新娜²

(1. 沈阳大学应用技术学院, 辽宁沈阳 110000; 2. 沈阳大学机械工程学院, 辽宁沈阳 110000)

摘 要: 针对自动化立体仓库存在的出入库任务多、堆垛机利用率失衡、产品质量差别大及任务执行过程对质量产生影响的问题, 提出一种基于权重策略及非均匀消除-扩散概率分布的情绪化细菌觅食算法. 构建以运行时间最小化、堆垛机利用率均衡化、货架稳定性、对产品质量影响程度为目标的集成优化模型; 针对细菌觅食算法存在的趋化步长不确定及消除-扩散概率恒定等不足, 在趋化过程中引入高斯分布搜索机制更新个体位置, 避免算法陷入局部最优; 引入情绪化突变, 并在突变过程引入权重策略更新个体速度, 并赋予细菌个体情绪感知因子实现个体速度自适应更新; 针对原始算法消除-扩散概率的恒定性, 提出非均匀概率分布代替传统的常数分布, 以确保种群多样性. 仿真及算法对比结果表明, 本文提出的算法具有较好的性能.

关键词: 自动化立体仓库; 细菌觅食算法; 情绪化突变; 高斯分布搜索机制; 权重策略; 非均匀概率分布
中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)05-1001-12
电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200315

Integrated Optimization of Automated Warehouse Based on Improved Bacterial Foraging Algorithm

DONG Hai¹, QI Xin-na²

(1. College of Applied Technology, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110000, China;
2. College of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110000, China)

Abstract: In view of the problems existing in the automated warehouse, such as many in and out tasks, unbalanced utilization of stacker, great difference in product quality and the impact of task execution process on quality, an emotional bacteria foraging algorithm based on weight strategy and non-uniform elimination diffusion probability distribution is proposed. In order to minimize the running time, equalize the utilization rate of stacker, stabilize the shelf and influence the quality of products, an integrated optimization model is built. In view of the shortcomings of the bacterial foraging algorithm, such as uncertain chemotaxis step length and constant elimination diffusion probability, the Gaussian distribution search mechanism is introduced to update the individual position in the chemotaxis process to avoid the algorithm falling into local optimization, and the emotion is introduced in the mutation process, the weight strategy is introduced to update the individual speed, and the individual emotion perception factor is given to realize the adaptive step size to avoid the premature convergence of the algorithm; around the constancy of probability in the elimination diffusion process, the non-uniform probability distribution is proposed to replace the traditional constant distribution to ensure the population diversity. Simulation and algorithm comparison results show that the proposed algorithm has better performance.

Key words: automated warehouse; bacterial foraging algorithm; emotional mutation; Gaussian distribution search mechanism; weight strategy; non-uniform probability distribution

1 引言

当今生产物流的发展趋势迅猛, 在高密度的存取

需求下, 自动化立体仓库在诸多领域得到了广泛应用, 其运作过程中的调度问题也成了国内外学者的研究热点.

杨玮等^[1]针对多载具自动化立体仓库,构建以堆垛机最小化行程时间为优化目标的数学模型,并提出一种双层遗传算法进行求解,该算法在不同的订单规模和载具数量下均可获取最优解;蔡安江等^[2]针对两端式自动化立体仓库中堆垛机的单一命令作业方式和复合命令作业方式,构建以堆垛机完成出/入库作业订单的总运行时间为优化目标的数学模型,并提出一种涡流搜索算法,该算法可有效实现堆垛机的动态调度,并提高存储效率;Yu Lingjiao 等^[3]以运行时间及产品相关性为优化目标构建数学模型,并提出一种多种群遗传算法,避免了原始遗传算法的内在收敛,为货位分配和出入库动态仿真提供了一种有效的方法;何运杰^[4]将自动化立体仓库堆垛机拣选过程看作对称的旅行商问题,并以有向图中长度最短的 Hamilton 圈为优化目标构建数学模型,并提出一种粗粒度并行遗传算法,实现了并行计算,节省了计算成本;李鹏飞等^[5]针对所构建的以出入库效率及货架稳定性为因素的双目标优化模型,提出一种基于病毒协同的遗传算法,解决了传统算法在优化过程中存在的易陷入局部最优的问题;F Ramtin 等^[6]开发了一种低复杂度的高效算法,并构建基于货物预期吞吐量的以最小化预期运行时间为目标的货位分配优化模型,实现了系统高效的动态调度;A H Gharehgozli 等^[7]通过对存取作业任务进行排序,构建以双库存自动存取系统中堆垛机的总行程时间为优化目标的数学模型,提出了一种多项式时间内求解该模型的算法,避免了优化结果的侧重性。

经以上分析可知,自动化立体仓库优化问题的模型构建形式单一,且算法改进机制存在一定的局限性.针对上述问题,本文考虑从运行时间、堆垛机利用率均衡化、货架稳定性、对产品质量影响程度四个角度出发构建多目标调度优化模型,并提出一种基于权重策略及非均匀概率分布的情绪化细菌觅食算法(Emotional Bacteria Algorithm Based on Weight Strategy and Non-uniform Probability Distribution, WNEBFA).引入情绪化突变实现自适应步长,并在此过程引入权重策略^[8]更新个体速度,利用非均匀概率分布代替常数分布改善个体在消除-扩散过程中的恒定性概率,通过仿真及算法对比验证该算法在解决自动化立体仓库问题上的可行性及优越性.

2 问题描述及相关假设

本文主要针对自动化立体仓库系统中堆垛机的双命令运行方式,其整个工作流程如图 1 所示(菱形表示位置;矩形表示执行任务过程).

为方便研究,对货架及堆垛机的运行参数作如下假设:

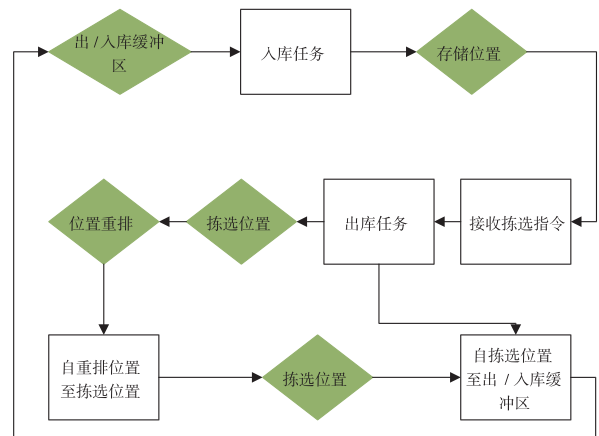


图1 堆垛机工作流程图

- (1) 货位大小相同,且只能存放一个货物.
- (2) 各货架长、宽、高、排、列、层等参数一致.
- (3) 各巷道宽度相同.
- (4) 每个巷道只有一台堆垛机.
- (5) 堆垛机装卸货物对货物质量无影响.
- (6) 堆垛机的水平及垂直方向的运动相互独立.
- (7) 堆垛机接收拣选任务与货位分配任务之间无时间差.
- (8) 堆垛机在作业过程中,1次最多只能装载1件货物.
- (9) 出入库缓冲区位于出入库同侧.
- (10) 初始状态下,堆垛机停放于出入库起点.

3 构建优化模型

3.1 模型参数定义

模型所涉及的参数及其定义如表 1 所示.

表 1 模型参数定义

模型参数	定义
v_x	堆垛机水平方向运行速度
v_y	堆垛机垂直方向运行速度
a_x	堆垛机水平方向加速度
a_y	堆垛机垂直方向加速度
F	累计分布函数
F_x	水平方向分布函数
F_y	垂直方向分布函数
E	期望值
α	填充度系数 $\alpha \in [0.5, 1]$
T_x	水平方向最大运行时间
T_y	垂直方向最大运行时间
T	总运行时间

续表

模型参数	定义
t	可变运行时间 $t \in [0, T]$
t_1	第一个货架中的拾取/放置时间
t_2	第二个货架中的拾取/放置时间
t_r	自检索位置到重新排列位置的时间
t_p	出/入库缓冲区拾取/放置时间
t_0	货位分配物品放置及拣选任务拾取时间和
t_{jk}	经货位 $\theta_j(l_j, m_j, n_j)$ 、 $\theta_k(l_k, m_k, n_k)$ 用时
L	货位长度
H	货位宽度
A	货架总数
B	各货架列数
C	各货架层数
l	货物所在货架排数
m	货物所在货架列数
n	货物所在货架层数
λ	路径
j	巷道
k	产品类别
e	决策空间元素之一
P	周转率
N	入库任务数
M	出库任务数
w	时间对质量影响的权重
G_x	货架重心的横坐标
G_y	货架重心的纵坐标
G_{\max}	货架的承重能力
θ	货位
θ_i	出/入库缓冲区位置
$\theta_{(i+1)}$	存储位置
$\theta_{(i+2)}$	拣选位置

3.2 运行时间最小化模型

堆垛机执行货位分配及拣选任务的时间决定了系统的运作效率,因此,堆垛机运行时间的最小化为本文的优化目标之一。

堆垛机执行货位分配任务时水平及垂直方向分布函数分别如式(1)、式(2)所示:

$$F_x(t) = \begin{cases} \frac{a_x t^2}{4L}, & 0 \leq t \leq \frac{2v_x}{a_x} \\ \frac{v_x t}{L} - \frac{v_x^2}{a_x L}, & \frac{2v_x}{a_x} \leq t \leq \frac{L}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_y(t) = \begin{cases} \frac{a_y t^2}{4H}, & 0 \leq t \leq \frac{2v_y}{a_y} \\ \frac{v_y t}{H} - \frac{v_y^2}{a_y H}, & \frac{2v_y}{a_y} \leq t \leq \frac{H}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \end{cases} \quad (2)$$

堆垛机执行拣选任务时水平及垂直方向分布函数分别如式(3)、式(4)所示:

$$F_x(t) = \begin{cases} \frac{a_x t^2}{2L} + \frac{a_x^2 t^4}{16L^2}, & 0 \leq t \leq \frac{2v_x}{a_x} \\ -\frac{v_x^2}{L^2} t^2 + \left[\frac{2v_x^3}{a_x L^2} + \frac{2v_x}{L} \right] t - \frac{2v_x^2}{a_x L} - \frac{v_x^4}{a_x^2 L^2}, & \frac{2v_x}{a_x} \leq t \leq \frac{L}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \end{cases} \quad (3)$$

$$F_y(t) = \begin{cases} \frac{a_y t^2}{2H} - \frac{a_y^2 t^4}{16H^2}, & 0 \leq t \leq \frac{2v_y}{a_y} \\ -\frac{v_y^2}{H^2} t^2 + \left[\frac{2v_y^3}{a_y H^2} + \frac{2v_y}{H} \right] t - \frac{2v_y^2}{a_y H} - \frac{v_y^4}{a_y^2 H^2}, & \frac{2v_y}{a_y} \leq t \leq \frac{H}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \end{cases} \quad (4)$$

本文所研究的堆垛机执行双命令,且货位分配及拣选之间无时间差,因此,在堆垛机总的运行过程中,水平及垂直方向的累计分布函数分别如式(5)、式(6)所示:

$$F_x(t) = \begin{cases} \frac{3a_x t^2}{4L} + \frac{a_x^2 t^4}{16L^2}, & 0 \leq t \leq \frac{2v_x}{a_x} \\ -\frac{v_x^2}{L^2} t^2 + \left[\frac{2v_x^3}{a_x L^2} + \frac{3v_x}{L} \right] t - \frac{3v_x^2}{a_x L} - \frac{v_x^4}{a_x^2 L^2}, & \frac{2v_x}{a_x} \leq t \leq \frac{L}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_y(t) = \begin{cases} \frac{3a_y t^2}{4H} - \frac{a_y^2 t^4}{16H^2}, & 0 \leq t \leq \frac{2v_y}{a_y} \\ -\frac{v_y^2}{H^2} t^2 + \left[\frac{2v_y^3}{a_y H^2} + \frac{3v_y}{H} \right] t - \frac{3v_y^2}{a_y H} - \frac{v_y^4}{a_y^2 H^2}, & \frac{2v_y}{a_y} \leq t \leq \frac{H}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \end{cases} \quad (6)$$

堆垛机累计分布函数如式(7)所示:

$$F(t) = F_x(t) \cdot F_y(t) \quad (7)$$

运行时间期望值如式(8)所示:

$$E(t) = \int_0^{\max(T, T_r)} (1 - F(t)) dt \quad (8)$$

每台堆垛机负责两个货架(I、II)内随机存放的货物的拣选,为方便研究,对部分变量作出如下定义.

对于货架I而言,

定义1 货架中的存储位置被占用的概率表达式为

$$P_0 = 1 \quad (9)$$

定义2 货架中的存储位置为空的概率表达式为

$$P_e = 0 \quad (10)$$

对于货架II而言,

定义3 货架中的存储位置被占用的概率表达式为

$$P_0 = 2\alpha - 1 \quad (11)$$

定义4 货架中的存储位置为空的概率表达式为

$$P_e = 2 - 2\alpha \quad (12)$$

对于货架I、II而言,

定义5 货架I中的货位为空并且被货架II占的概率表达式为

$$P_\tau = P_e \cdot P_0 = 2 - 2\alpha \quad (13)$$

定义6 货架I和货架II中的货位均被占用的概率表达式为

$$P_\mu = P_0 \cdot P_0 = 2\alpha - 1 \quad (14)$$

定义7 P_1 表示从货架I上拾取/放置的条件概率,且

$$P_1 = \frac{P_\mu}{P_\tau + 2P_\mu} = \frac{2\alpha - 1}{2 - 2\alpha + 2(2\alpha - 1)} = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha} \quad (15)$$

定义8 P_2 表示从货架II上拾取/放置的条件概率,且

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{P_\tau}{P_\tau + 2P_\mu} + \frac{P_\mu}{P_\mu + 2P_\tau} \\ &= \frac{2 - 2\alpha}{2 - 2\alpha + 2(2\alpha - 1)} + \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 1 + 2(2 - 2\alpha)} \\ &= \frac{1}{2\alpha} \end{aligned} \quad (16)$$

对于 $\theta_i, \theta_{(i+1)}, \theta_{(i+2)}$ 而言,

定义9 自出入库缓冲区位置至存储位置运行时间表达式为 $t_{(\theta_i, \theta_{(i+1)})}$.

定义10 自存储位置至拣选位置运行时间表达式为 $t_{(\theta_{(i+1)}, \theta_{(i+2)})}$.

双命令循环同时涉及存储和检索操作,由式(1)~(16)可推出本文的优化目标之一,即,最小化总运行时间,如式(17)所示:

$$\begin{aligned} \text{Minf}(T) &= 2t_p + 2 \cdot E(t_{(\theta_i, \theta_{(i+1)})}) + 2 \cdot E(t_{(\theta_{(i+1)}, \theta_{(i+2)})}) \\ &= 2t_p + 2 \cdot E(t_{(\theta_i, \theta_{(i+1)})}) + t_1 + E(t_{(\theta_{(i+1)}, \theta_{(i+2)})}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left[\left(\frac{2\alpha - 1}{2\alpha} \right) \cdot t_1 + \left(\frac{1}{2\alpha} \right) \cdot t_2 \right] \\ &+ \frac{\alpha}{2} \left[2 \cdot E(t_r) + \left(\frac{4\alpha - 1}{2\alpha} \right) \cdot t_1 + \left(\frac{1}{2\alpha} \right) \cdot t_2 \right] \end{aligned} \quad (17)$$

3.3 均衡堆垛机的利用率

均衡堆垛机的利用率是指使所有堆垛机的工作量达到平均水平^[9].

每条巷道有两排货架,以第一条巷道为例,该条巷道的出库周转率如式(18)所示:

$$P = \sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C P_{1mn} + \sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C P_{2mn} \quad (18)$$

则各巷道灯的平均出库率如式(19)所示:

$$\bar{P} = \sum_{l=1}^A \sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C P_{lmn} / \frac{A}{2} \quad (19)$$

均衡堆垛机的利用率为本文优化目标之一,即实现每个巷道实际的出入库率总和与其应承担的平均出入库率之差的平方和的最小化,如式(20)所示:

$$\begin{aligned} \text{Minf}(l, m, n) &= \\ &\sum_{\beta}^{A/2} \left[\left(\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C P_{(2\beta-1)mn} + \sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C P_{(2\beta)mn} \right) - \bar{P} \right]^2 \end{aligned} \quad (20)$$

3.4 货架稳定性模型

同一货架的不同货位上的物品质量可能悬殊很大,为使货架保持稳定,需要使货架的重心尽可能低^[10]. 货架货位结构示意图如图2所示.

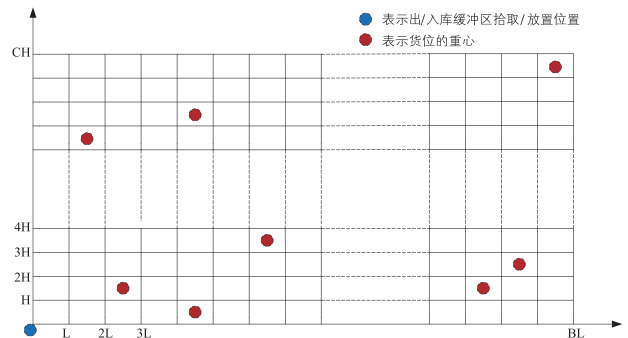


图2 货架货位示意图

对货架上每个货位,货物重心位于货位中心位置,如图2中的红色实心点所示,整体货架重心位置坐标为 (G_x, G_y) ,其中:

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C \left[G_{mn} \cdot \left(m - \frac{1}{2} \right) L \right]}{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C G_{mn}} \\ G_y &= \frac{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C \left[G_{mn} \cdot \left(n - \frac{1}{2} \right) H \right]}{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C G_{mn}} \end{aligned} \quad (21)$$

本文的优化目标之一则为实现货架重心的最小

化,即

$$Minf(G_x) = \frac{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C \left[G_{mn} \cdot \left(m - \frac{1}{2} \right) L \right]}{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C G_{mn}} \quad (22)$$

$$Minf(G_y) = \frac{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C \left[G_{mn} \left(n - \frac{1}{2} \right) H \right]}{\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C G_{mn}} \quad (23)$$

3.5 出入库任务对产品质量影响程度模型

针对堆垛机的路径及堆垛机作业对货物质量影响程度作出如下定义。

定义 11 若任务的执行过程经路径 λ , 则 $v_\lambda = 1$, 否则, $v_\lambda = 0$ 。

定义 12 若执行任务的过程连续经货位 $\theta_j(l_j, m_j, n_j)$ 、 $\theta_k(l_k, m_k, n_k)$, 则 $e_{jk} = 1$, 否则 $e_{jk} = 0$ 。

定义 13 若第 λ 次出入库作业经货过位 θ_j , 则 $\vartheta_{j\lambda} = 1$, 否则 $\vartheta_{j\lambda} = 0$ 。

堆垛机完成出入库任务对产品质量影响程度的最小化模型如式(24)表示:

$$Minf(e) = \sum_{j=1}^{\max(N,M)} \left\{ \max \left[0, \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{k=1}^{N+M} t_{jk} e_{jk} - T \right] \cdot w \right\} \cdot v_\lambda \quad (24)$$

3.6 约束条件

针对上述模型构建如式(25)~(34)所示约束:

s. t.

$$0 \leq t \leq T \quad (25)$$

$$0 \leq t_{jk} \leq T \quad (26)$$

$$1 \leq l \leq A \quad (27)$$

$$1 \leq m \leq B \quad (28)$$

$$1 \leq n \leq C \quad (29)$$

$$\sum_{m=1}^B \sum_{n=1}^C G_{mn} \leq G_{\max} \quad (30)$$

$$N + M \leq A \cdot B \cdot C \quad (31)$$

$$\sum_{\lambda}^{\max(N,M)} \vartheta_{j\lambda} = 1 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, N + M\} \quad (32)$$

$$\sum_{\lambda}^{\max(N,M)} e_{out_\lambda} = M \quad \forall k \in (1, 2, \dots, N + M) \quad (33)$$

$$\sum_{\lambda}^{\max(N,M)} e_{in_\lambda} = N \quad \forall k \in (1, 2, \dots, N + M) \quad (34)$$

且式(25)~(34)所示约束所涉及的变量均为正整数。

4 改进的细菌觅食多目标优化算法

4.1 算法参数定义

为了更好地阐释本文提出的算法,对改进算法涉及的符号定义如表2所示。

表 2 算法参数含义

算法参数	含义
i	细菌个体
j	趋化步骤
k	繁殖步骤
l	消散步骤
N_c	趋化步骤次数
N_{re}	繁殖步骤次数
N_{ed}	消散次数
N_s	游动长度
P_e	消散概率
$C(i)$	趋化步长
C	概率步长
N	细菌总数
Q	优化变量个数
a	常数因子
S_0	刺激阈值
S	刺激函数
d_0	引诱因子深度度量系数
w_0	引诱因子宽度度量系数
h_e	细菌趋避高度度量系数
w_e	细菌趋避宽度度量系数
r_g	个体全局感知
r_h	个体历史感知
c_0	加速度系数
p_0	动力因子
w	权重
$rand$	随机函数
J_{health}	健康适应度函数
$J_{cc}(\theta, Pi(j, k, l))$	个体间吸引/排斥作用值
$v(i, j, k, l)$	细菌速度
$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_Q]$	Q 维搜索域内一个点
θ_g	全局位置
θ_{gb}	全局最佳位置
θ_{pb}	局部最佳位置
$\theta^i(j, k, l)$	个体 i 的位置
$f(\theta_g)$	全局最佳位置适应度
$f(\theta(i, j, k, l))$	细菌个体远离全局的最佳位置

4.2 改进的趋化操作

细菌个体在整个生命周期内以随机的方式在空间内各维度间进行游动及翻转^[11],所述的随机方式导致算法的搜索能力差,且当搜索空间较大时,算法易陷入

局部最优^[12]. 此外, 每个细菌的运动相互孤立, 导致个体间缺乏信息交换能力. 本文提出基于高斯分布^[13] 的搜索机制, 该机制可根据不同目标构造水平及垂直方向上的不同的高斯函数, 利用该函数跟踪、预测目标位置, 从而促进个体间信息交互并提升算法的跟踪精度. 对趋化性细菌的运动规律进行如下调整:

若

$$\theta_{pb}^i(j, k, l) \neq \theta_{gb}^i(j, k, l) \quad (35)$$

则

$$\begin{aligned} \theta^i(j+1, k, l) &= \theta^i(j, k, l) + C(i) \\ &\times N[v^i(j, k, l), \vartheta^i(j, k, l)] \end{aligned} \quad (36)$$

否则

$$\begin{aligned} \theta^i(j+1, k, l) &= \theta^i(j, k, l) + C(i) \\ &\times N[v^*(j, k, l), \vartheta^*(j, k, l)] \end{aligned} \quad (37)$$

其中

$$v^i(j, k, l) = \frac{\theta_{pb}^i(j, k, l) + \theta_{gb}^i(j, k, l)}{2} - \theta^i(j, k, l) \quad (38)$$

$$v^*(j, k, l) = \frac{\theta_{pb}^i(j, k, l) - \theta_{gb}^i(j, k, l)}{2} - \theta^i(j, k, l) \quad (39)$$

$$\vartheta^i(j, k, l) = |\theta_{pb}^i(j, k, l) - \theta_{gb}^i(j, k, l)| \quad (40)$$

$$\vartheta^*(j, k, l) = \left| \frac{\theta_{pb}^i(j, k, l)}{i} - \theta_{gb}^i(j, k, l) \right| \quad (41)$$

$$C(i) = \frac{1}{1 + N_s} \quad (42)$$

如式(35)~(42)所表达: 当 $\theta_{pb}^i(j, k, l) \neq \theta_{gb}^i(j, k, l)$ 时, 个体将以步长 $\frac{1}{N_s + 1}$ 逐渐向 $\theta_{pb}^i(j, k, l)$ 和 $\theta_{gb}^i(j, k, l)$ 的中心位置移动, 否则, 个体将以相同的步长及方式逐渐向 $\frac{\theta_{pb}^i(j, k, l)}{i}$ 和 $\theta_{gb}^i(j, k, l)$ 的中心位置移动.

4.3 群集操作

接近最优路径的细菌个体可跟随其他较低梯度的细菌个体进行觅食, 以便更快地收敛. 菌群密度高, 则食物梯度高. 该群集机制可建如式(43)所示模型:

$$\begin{aligned} J_{cc}(\theta, P(j, k, l)) &= \sum_{i=1}^N J_{cc}^i(\theta, \theta^i(j, k, l)) \\ &= \sum_{i=1}^N \left[-d_0 \exp(-w_0 \sum_{m=1}^Q (\theta_{gb}^i(j, k, l) - \theta_{gb}^m(j, k, l))) \right] \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \left[-d_c \exp(-w_c \sum_{m=1}^Q (\theta_{gb}^i(j, k, l) - \theta_{gb}^m(j, k, l))) \right] \end{aligned} \quad (43)$$

4.4 情绪化突变

在情绪化突变操作中, 假设细菌个体有心理, 每种细菌都有两种情绪: 快乐和悲伤. 利用著名的韦伯-费克纳定律定义情绪感知因子^[14]. 由韦伯-费克纳定律描述的刺激强度 p 大小之间的关系, 如式(44)所示:

$$p = k \ln \left[\frac{S}{S_0} \right] \quad (44)$$

细菌的全局感知 r_g 和历史感知 r_h 可分别通过式(45)和式(46)定义:

$$r_g = -k \frac{S[f(\theta_g) - f(\theta(i, j, k, l))]}{S_0} \quad (45)$$

$$r_h = -k \ln \frac{S[f(\theta_{pb}) - f(\theta(i, j, k, l))]}{S_0} \quad (46)$$

细菌的快乐和悲伤两种情绪会动态地改变细菌的运行速度, 如式(47)、式(48)所示:

快乐的细菌个体速度

$$\begin{aligned} v(i, j, k, l) &= w \times v(i, j, k, l) \\ &\quad + c \times r_g \times r_h \times rand \times [f(\theta_g) - f(\theta(i, j, k, l))] \end{aligned} \quad (47)$$

悲伤的细菌个体速度

$$\begin{aligned} v(i, j, k, l) &= w \times v(i, j, k, l) \\ &\quad + c \times \frac{r_h}{r_g} \times rand \times [f(\theta_g) - f(\theta(i, j, k, l))] \end{aligned} \quad (48)$$

计算情绪感知因子如式(49)所示:

$$es = \frac{r_g}{r_h} \quad (49)$$

随机函数 $rand$ 为 $[0, 1]$ 内任意值, 通过对比其与随机函数大小实现细菌个体速度的自适应调整, 提高寻优精度. 当 $rand$ 小于 es , 利用式(47)更新细菌个体的速度; 否则, 利用式(48)更新细菌个体的速度.

4.5 繁殖操作

在适当的条件下, 每个个体会分裂成两个子个体, 健康适应度差的个体会被清除. 为了保留细菌趋化过程中的良好经验, 本文将细菌适应度在趋化过程中的历史最优值作为健康适应度函数 J_{health} ^[15], 如式(50)所示:

$$J_{health} = \sum_{j=1}^N J(i, j, k, l) \quad (50)$$

4.6 非均匀概率分布的消除-扩散操作

为提高细菌个体的搜索能力, 一些细菌在该过程将被消除, 而一些则根据概率分散在搜索空间中, 该过程中具有最佳适应度值和最差适应度值的细菌均以相同概率被消除^[16], 从而影响算法的性能.

线性消除概率^[17]定义如式(51)所示:

$$P_e(i) = \frac{i-1}{\frac{C}{2}-1} \quad i \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{C}{2} \right\} \quad (51)$$

非均匀分布概率分布可用于定义非线性行为, 如式(52)所示:

$$P_e(i) = \left[\frac{i-1}{\frac{C}{2}-1} \right]^2 \quad i \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{C}{2} \right\} \quad (52)$$

可将线性分布^[18]及非线性分布可推广为包含消除-扩散指数,分别定义如式(53)、式(54)所示:

$$P = P_e + \left[i - \left(\frac{C}{4} - 0.5 \right) \right] \frac{C - 1}{(N_{ed} - 1) \left(\frac{C}{2} - 1 \right)} \quad (53)$$

$$P = P_e \left[\frac{C - 1}{N_{ed} - 1} \right] \left[2 \cdot \left(\frac{i - 1}{\frac{C}{2} - 1} \right)^2 - 1 \right] + P_e \quad (54)$$

4.7 算法流程

本文提出的 WNEBFA 的流程图如图 3 所示。

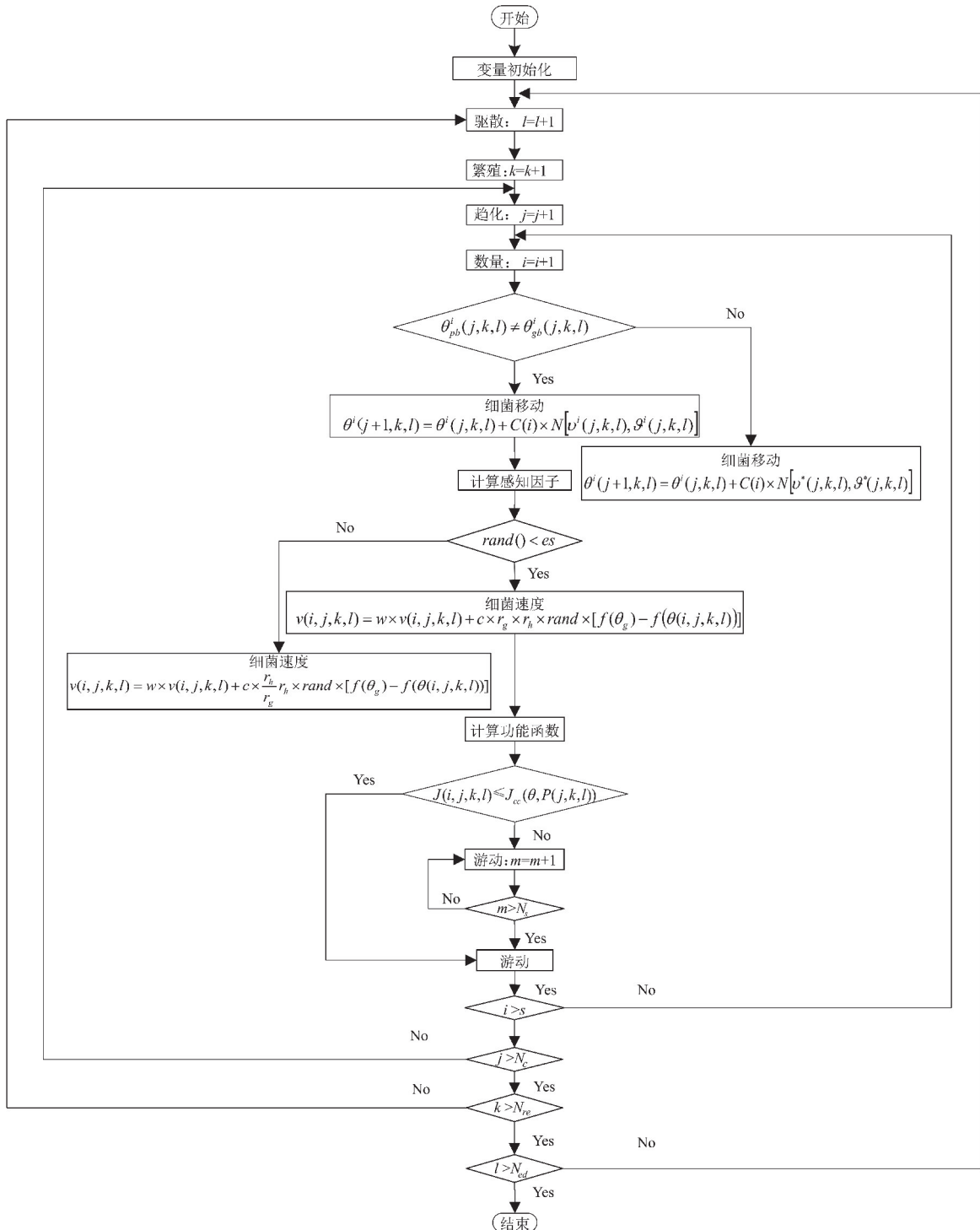


图3 算法流程图

5 仿真分析与对比

为了验证本文提出的 WNEBFA 的性能,将其应用于六大基准函数及某企业的大型自动化立体仓库系统,并与原始细菌觅食算法^[16] (Bacterial Foraging Algorithm, BFA) 及免疫细菌觅食算法^[19] (Immune Bacteria Foraging Algorithm, IBFA)、社会学习自适应细菌觅食算法^[15] (Social Learning Adaptive Bacteria Foraging Algo-

rithm, SLABFA) 进行对比分析。

5.1 算法性能验证

利用如表 3 所示的基准函数,对 WNEBFA、BFA、IBFA、SLABFA 的收敛性进行仿真验证,其中: $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 为单模态基准函数; $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 为多模态基准函数; $f_5(x)$ 、 $f_6(x)$ 为固定多模态基准函数,参数设置如表 4 所示。维度均为 50,并进行 1000 次迭代,六者的运算结果如表 5 所示。

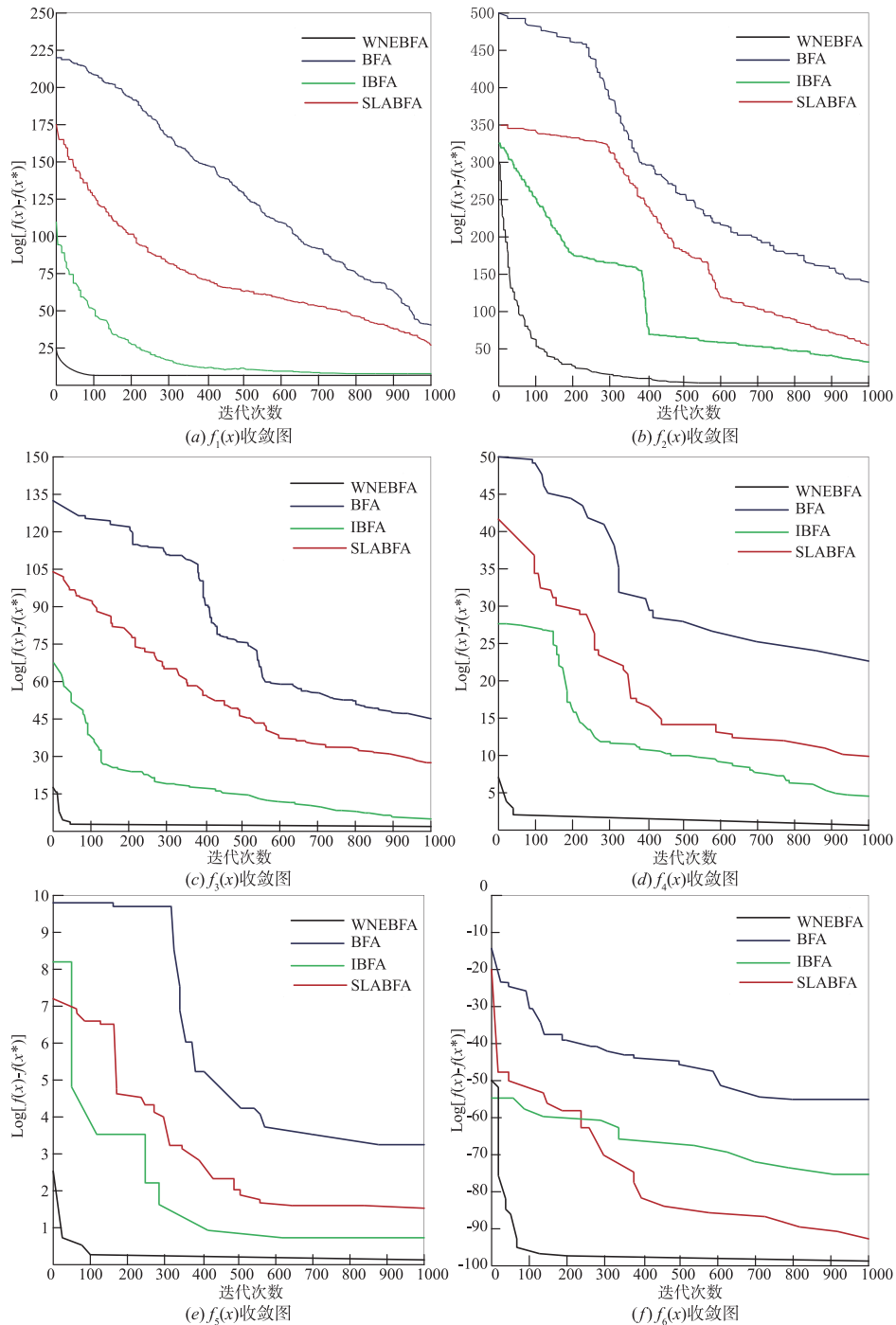


图4 算法收敛性比较

通过对表 5 所示结果的分析可知,本文提出的 WNEBFA 算法体现出较 BFA、IBFA、SLABFA 好的运算性能。

表 3 基准函数

函数	维度	界限	f_{min}
$f_1(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	50	[-30,30]	0
$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	50	[-10,10]	0
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	50	[-500,500]	0
$f_4(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	50	[-5,5]	0
$f_5(x) = \left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6} \right)^{-1}$	50	[-65,65]	1
$f_6(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{x_i(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]^2$	50	[-5,5]	0.0003

表 4 算法相关参数

算法	N_c	N_s	N_{re}	N_{ed}	P_e	迭代次数	$C(i)$
BFA	50	125	5	4	0.25	500	0.05
IBFA	50	125	5	4	0.25	500	0.10
SLABFA	50	125	5	4	0.25	500	0.15
WNEBFA	50	125	5	4	0.25	500	0.20

表 5 运算结果

函数	数值	WNEBFA	BFA	IBFA	SLABFA
$f_1(x)$	平均值	6.28E-01	6.55E+04	2.14E+04	1.17E+06
	标准差	4.57E-01	6.17E+05	6.19E+03	1.13E+06
$f_2(x)$	平均值	2.47E-02	5.13E-01	3.95E+04	2.69E+01
	标准差	1.34E-02	9.56E-02	2.10E+05	1.40E+01
$f_3(x)$	平均值	-2.09E+04	-3.34E+03	-1.17E+04	-7.37E+03
	标准差	8.02E-01	6.32E+02	9.71E+02	9.32E+02
$f_4(x)$	平均值	-4.89E+02	-4.88E+02	4.93E+02	2.57E+02
	标准差	3.49E-01	7.75E+01	3.39E-01	8.82E+01
$f_5(x)$	平均值	9.98E-01	2.03E+00	3.97E+00	1.82E+00
	标准差	1.29E-10	1.26E+00	4.16E+00	1.04E+00
$f_6(x)$	平均值	3.47E-04	5.13E-04	1.07E-02	4.64E-03
	标准差	2.77E-05	1.50E-04	9.87E-03	5.09E-03

各算法的收敛性对比结果如图 4 所示. 图 4 所示的收敛性结果表明本文所提出的 WNEBFA 算法在各种模

态基准函数的运算上,均表现出较另外三个比较算法好的收敛性,说明 WNEBFA 能在计算成本较小的情况下获取到最优解。

5.2 仿真分析

现对仿真参数进行如下设置:算法参数设置如表 4 所示;货架及堆垛机参数设置如表 6 所示。

表 6 货架及堆垛机相关参数

v_x	v_y	a_x	a_y	L	H	A	B	C
1m/s	3m/s	0.3m/s ²	0.2m/s ²	1m	1m	20	70	10

货物在库的需求量、质量、优化前后存储位置的相关信息如表 7 所示。

表 7 货物在库的相关信息

编号	作业周期内平均需求量/个	重量/kg	优化前存储位置(m,n)	优化后存储位置(m,n)
1	4	11	(2,3)	(7,1)
2	7	23	(3,5)	(5,1)
3	11	7	(3,7)	(3,6)
4	16	10	(12,3)	(7,2)
5	7	13	(5,3)	(18,2)
6	16	9	(5,10)	(2,2)
7	3	11	(6,8)	(16,2)
8	16	12	(11,6)	(4,6)
9	7	6	(9,7)	(14,7)
10	3	7	(12,4)	(15,7)
11	4	6	(8,6)	(14,5)
12	11	9	(1,2)	(8,3)
13	7	27	(2,5)	(2,1)
14	3	6	(12,7)	(13,6)
15	16	9	(4,8)	(3,3)
16	4	6	(11,4)	(7,3)
17	4	7	(1,5)	(15,8)
18	6	19	(12,8)	(8,1)
19	16	9	(5,7)	(4,4)
20	10	11	(10,4)	(6,2)
21	10	18	(6,1)	(4,1)
22	8	17	(7,2)	(10,1)
23	9	17	(4,9)	(8,1)
24	11	11	(5,7)	(4,3)
25	11	7	(2,6)	(5,4)
26	16	19	(13,4)	(1,1)
27	7	9	(10,6)	(12,5)
28	11	12	(3,9)	(5,2)
29	16	11	(14,8)	(1,2)
30	11	7	(4,9)	(7,7)

运用所建立的堆垛机运行时间最小化模型对该任务进行优化仿真,堆垛机调度运行时间随迭代次数增加而变化的优化曲线如图 5 所示。

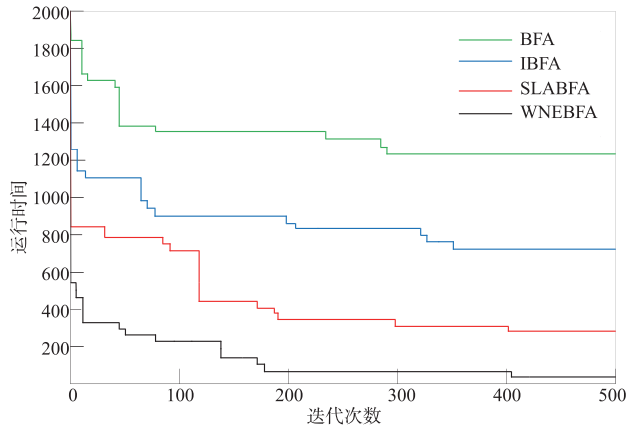


图5 堆垛机运行时间优化曲线

由图 5 可知堆垛机运行时间优化曲线阐释了各算法的优化效率,本文提出的 WNEBFA 在优化效率上表现出较 BFA、IBFA、SLABFA 优越的性能。

算法在货架稳定性及运行时间方面的优化性能,如表 8 所示。

表 8 算法优化性能对比

算法	G_x	G_y	运行时间/s
BFA	33.04	5.81	1853
IBFA	25.17	2.96	1226
SLABFA	21.09	1.74	875
WNEBFA	18.82	0.93	537

依据表 8 信息,运用稳定性系数描述货架的稳定性,稳定性系数越小说明稳定性越好,各算法对比结果如图 6 所示。

由图 6 所描述的信息可知经本文提出的 WNEBFA 优化后的货架稳定性系数较 BFA、IBFA、SLABFA 优化

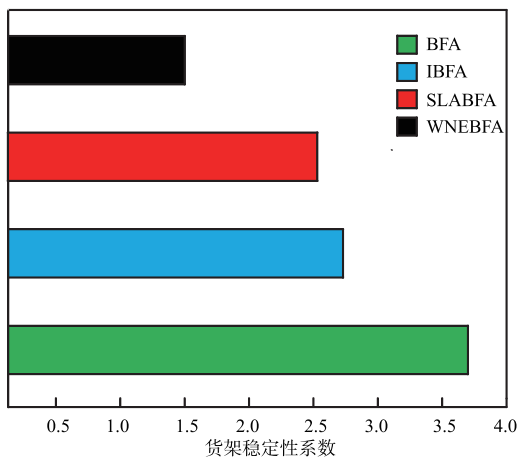


图6 货架稳定性优化结果对比图

后的小,由此可知 WNEBFA 优化后的货架的稳定性更好。

堆垛机运行的过程会对其载有货物的质量在一定程度上产生影响,本文利用影响程度系数阐释该过程,系数越小表示质量影响程度越小,产品质量影响程度系数随时间变化趋势如图 7 所示。

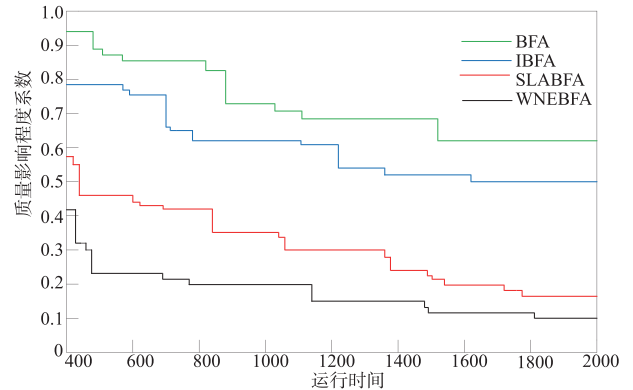


图7 质量影响程度曲线

在运行时间内,BFA 质量影响程度系数在 0.097 ~ 0.431 之间变化;IBFA 质量影响程度系数在 0.179 ~ 0.58 之间变化;SLABFA 质量影响程度系数在 0.532 ~ 0.798 之间变化;WNEBFA 质量影响程度系数在 0.743 ~ 0.932 之间变化,经上述分析,本文提出的 WNEBFA 在该方面表现出较好的性能。

针对堆垛机利用率均衡化对本文的目标函数进行仿真,结果如图 8 所示。

每个巷道实际的出入库率总和与其应承担的平均出入库率之差的平方和的最小化为评定该目标函数的标准,由图 8 可知,WNEBFA 可较快速度实现目标函数的最小化,在此方面表现出良好的优越性。

综上所述,本文提出的 WNEBFA 在求解运行时间最小化模型、堆垛机利用率均衡化模型、货架稳定性模型、对产品质量影响程度最小化模型均表现出了较

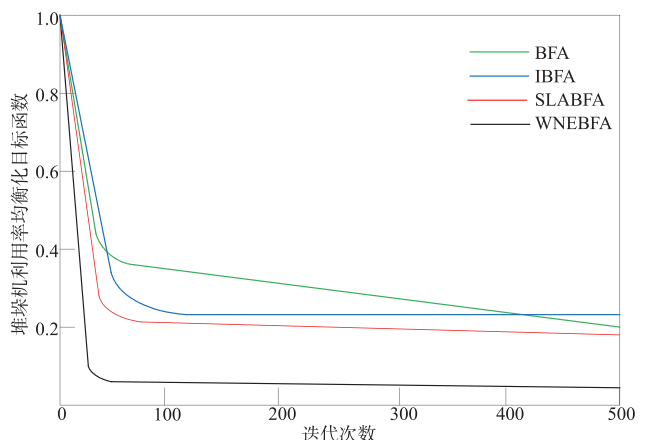


图8 堆垛机利用率均衡化曲线

BFA、IBFA、SLABFA 优越的性能,并能为用户提供 Pareto 最优解集,用户可根据货架的承重能力和自动化立体仓库的实际运行情况确定最终解。

6 结束语

本文提出基于权重策略及非均匀概率分布的情绪化细菌觅食算法,通过利用韦伯-费克纳定律赋予细菌个体情绪感知因子实现了情绪化突变,并在突变过程引入权重策略更新个体速度;在趋化步骤中引入高斯分布搜索机制提升算法搜索能力;建立非均匀概率分布的消除-扩散机制,利用该分布代替传统的常数分布实现种群多样性。仿真实验结果验证了该算法在解决自动化立体仓库调度问题具有良好的计算性能。

参考文献

- [1] 杨玮,刘江,岳婷,等.多载具自动化立体仓库货位分配与作业调度集成优化[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):247-255.
Yang W, Liu J, Yue T, et al. Integrated optimization of location allocation and job scheduling in multi-carrier automated storage and retrieval system[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(1): 247-255. (in Chinese)
- [2] 蔡安江,薛晓飞,郭师虹,等.两端式自动化立体仓库布局堆垛机调度[J].中国机械工程,2019,30(6):735-741.
Cai A J, Xue X F, Guo S H, et al. Stacker scheduling of layouts for automatic warehouse with double ended[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(6): 735-741. (in Chinese)
- [3] Jiao Y L, Xing X C, Zhang P, et al. Multi-objective storage location allocation optimization and simulation analysis of automated warehouse based on multi-population genetic algorithm[J]. Concurrent Engineering Research and Applications, 2018, 26(4): 1-11.
- [4] 何运杰.基于粗粒度并行遗传算法的货格式立体仓库路径优化研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2018.
He Y J. Research on Path Optimization of Goods Format Solid Warehouse Based on Coarse-grained Parallel Genetic Algorithm[D]. Ma' anshan, China: Anhui University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] 李鹏飞,马航.基于病毒协同遗传算法的自动化立体仓库货位优化模型[J].中国管理科学,2017,25(5):70-77.
Li P F, Ma H. Virus based on cooperative genetic algorithm automated warehouse space optimization model[J]. Chinese Management Science, 2017, 25(5): 70-77. (in Chinese)
- [6] Ramtin F, Pazour J A. Product allocation problem for an AS/RS with multiple in the aisle pick positions[J]. IET Transactions, 2015, 47(12): 1379-1396.
- [7] Gharehgozli A H, et al. Polynomial time algorithms to minimize total travel time in a two-depot automated storage/retrieval system[J]. Transportation Science, 2017, 51(1): 19-33.
- [8] 褚鼎立,陈红,王旭光.基于自适应权重和模拟退火的鲸鱼优化算法[J].电子学报,2019,47(5):992-999.
Chu D L, Chen H, Wang X G. Whale optimization algorithm based on adaptive weight and simulated annealing[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(5): 992-999. (in Chinese)
- [9] 陈雪.基于改进粒子群算法的A集团自动化立体仓库的优化研究[D].北京:北京交通大学,2018.
Chen X. Research on Optimization of Group A Automated Warehouse Based on Improved Particle Swarm Optimization[D]. Beijing, China: Beijing Traffic University, 2018. (in Chinese)
- [10] 李志宾.自动化立体仓库调度优化问题研究[D].太原:中北大学,2017.
Li Z B. Research on Scheduling Optimization of Automated Warehouse[D]. Taiyuan, China: Zhongbei University, 2017. (in Chinese)
- [11] 王新刚,衣鹏飞.改进型细菌觅食算法求解FJSP问题[J].计算机与数字工程,2018,46(6):1094-1098.
Wang X G, Yi P F. Improved bacterial foraging algorithm for solving flexible job-shop scheduling problem[J]. Computer and Digital Engineering, 2018, 46(6): 1094-1098. (in Chinese)
- [12] Musal U, Bakare G A, Mati A, et al. Radial distribution network enhancement with d-statcom using bacterial foraging algorithm[J]. Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment, 2018, 14(2): 249-260.
- [13] 田国会,尹建芹,闫云章,等.基于混合高斯模型和主成分分析的轨迹分析行为识别方法[J].电子学报,2016,44(1):143-149.
Tian G H, Yin J Q, Yan Y Z, et al. Gaussian mixture models and principal component analysis based human trajectory behavior recognition[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(1): 143-149. (in Chinese)
- [14] 方宝富,李勇,王浩.基于情绪感染的情感机器人任务分配算法研究[J].小型微型计算机系统,2016,37(8):1730-1734.
Fang B F, Li Y, Wang H. Research on emotional robot task allocation algorithm based on emotional contagion[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(8): 1730-1734. (in Chinese)
- [15] 谢平平,李银红,刘晓娟,等.基于社会学习自适应细菌

- 觅食算法的互联电网 AGC 最优 PI/PID 控制器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5440 - 5448.
- Xie P P, Li Y H, Liu X J, et al. Optimal PI/PID controller design of AGC based on social learning adaptive bacteria foraging algorithm for interconnected power grids [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 36(20): 5440 - 5448. (in Chinese)
- [16] Pasino K M. Biomimichy of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(3): 52 - 67.
- [17] Sahib M A, Abdulnabi A R, Mohammed M A. Improving bacterial foraging algorithm using non-uniform elimination-dispersal probability distribution [J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(3): 3341 - 3349.
- [18] 张瑞, 蒋晨之, 苏剑波. 基于稀疏特征挑选和概率线性判别分析的表情识别研究 [J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1710 - 1718.
- Zhang R, Jiang C Z, Su J B. Expression recognition based on sparse feature selection and probabilistic linear discriminant analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(7): 1710 - 1718. (in Chinese)
- [19] 张明锐, 蒋利明, 孙华, 等. 基于免疫细菌觅食算法的大容量光伏阵列 GMPPT 算法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 104 - 111.
- Zhang M R, Jiang L M, Sun H, et al. Large capacity photovoltaic array GMPPT algorithm based on immune bacteria foraging algorithm [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 36(1): 104 - 111. (in Chinese)

作者简介



董海 男, 1971 年出生, 山东淄博人. 教授, 博士, 主要从事先进生产系统建模优化与控制、供应链管理等方面研究.



齐新娜 女, 1994 年出生, 辽宁阜新人. 工业工程专业硕士研究生, 就读于沈阳大学机械工程学院, 主要从事车间调度、生产流程优化与控制等方面的研究.
E-mail: 1205344726@qq.com