

集装箱装船顺序的多目标整数规划优化模型

黎明, 翟金刚

(鲁东大学 数学与信息学院, 山东 烟台 264025)

摘要: 为了解决集装箱堆场装船顺序问题, 根据集装箱船舶和配载的实际情况, 考虑集装箱的航程, 结合集装箱的装载位置, 以集装箱堆场的翻箱率、船舶卸载时的翻箱率以及装船后的稳性为目标, 建立了装船顺序的多目标规划模型, 并基于粒子群算法构造了求解算法, 通过 MATLAB 进行仿真实验, 数据结果表明, 该模型具有一定的合理性与可行性。

关键词: 装船顺序; 航程; 组合优化; 整数规划; 粒子群算法; 多目标规划

中图分类号: O212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)10-3636-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.009

Multi-objective integer programming optimization model for loading sequence of container ship

LI Ming, ZHAI Jin-gang

(School of Mathematics & Information, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China)

Abstract: In order to solve the loading sequence of the container yard, according to the container ship and the actual situation of loading, considered the voyage of the container, combined with the container loading position, made the rate of turning the containers in the container yard and unloading from the ship, the ship's stability as a goal, this paper established a multi-objective programming model to the container loading sequence, meanwhile, presented a new solution algorithm on the basis of particle swarm optimization, and made the simulation experiment using MATLAB. The date results show that the model has certain rationality and feasibility.

Key words: loading sequence; range; combinatorial optimization; integer programming; particle swarm optimization (PSO); MOP

0 引言

集装箱装船顺序是集装箱运输的重要组成部分,是保障集装箱安全、快捷运输的基础。集装箱装船顺序是典型的 NP-hard 组合优化问题,受到堆场集装箱的摆放、作业机械、集卡运输、船舶结构等因素的影响,因此,如何把堆场中的集装箱在集装箱船舶上按照一定的规则进行有序的装载,提高船舶装载率,从而使得装船后船舶的稳性较高,减少堆场中的翻箱率,是一个非常值得关注的问题。

近年来,集装箱配载一直是许多学者关注的焦点,Chen 等人于 1992 年提出了应用于集装箱船舶配载中的关于单个集装箱问题的 0-1 线性规划的分析模型,可用于特殊集装箱的配载问题,并利用数值仿真得到了验证^[1]。

Ambrosino 等人对于海湾集装箱船的配载问题,给出了 0-1 线性规划模型,并构造集装箱配载的特殊约束条件,采用启发式算法进行求解,取得了较好的效果^[2]。

Bortfeldt 等人指出了平等禁忌搜索算法,这种算法的优点是避免局部最优解,以给定点的禁忌长度来求得全局最优解,并在集装箱配载仿真中说明了其有效性^[3]。

卫家俊利用改进的降序最先适应的集装箱船舶配载算法进

行模拟配载,结果表明了该算法能够较好地解决集装箱船舶配载问题的求解^[4]。

文献[5~8]中指出集装箱船舶配载问题是一个 NP-hard 问题,并应用遗传算法求解了一般的配载及装船顺序等问题。

王晓等人针对港口装船顺序利用实际数据,建立了数学矩阵模型,制定合理算法,并通过 MATLAB 程序得出算法的实用性^[9]。

喻斌等人针对船舶配载问题,编制了相应的软件,具有较强的实用性和应用性^[10]。

Junqueira 等人基于船舶垂直与水平稳性,建立了线性整数规划模型,并用计算机软件进行了求解,得到了较为理想的结果^[11]。

刘健男通过分析遗传算法的收敛速度,提高其搜索全局最优解的能力,并用于求解集装箱船舶配载的 0-1 数学规划模型中,数据证明了算法的实效性^[12]。

Derelia 等人构造了一种混合蜂群算法,利用蜜蜂在采蜜的过程中将信息不断地反馈给同伴,并对信息进行优劣筛选,最终确定最优目标值。他们将这种方法应用到集装箱的多箱配载中,在解决配载模型中收到了较好的效果^[13]。

易正俊等人在已知集装箱取箱顺序的前提下,把堆场集

收稿日期: 2012-03-15; 修回日期: 2012-04-17

作者简介: 黎明(1985-),男,河南新县人,硕士,主要研究方向为最优化理论与算法(leondawn@163.com); 翟金刚(1973-),男,内蒙古满洲里人,副教授,硕士,博士研究生,主要研究方向为最优化方法、智能计算等。

集装箱的翻箱优化问题转换为集装箱最短路径求解问题,并采用脉冲耦合神经网络(PCNN)对问题进行求解,算法对于降低堆场集装箱的翻箱率、减少集装箱的堆积起到了重要作用^[14]。

前人所研究的集装箱配载及装船顺序多是基于堆场路径优化,大多是以启发式算法来进行求解,对集装箱配载研究得较多,对装船顺序研究得过少。本文根据集装箱的装船需求,结合集装箱船舶具体属性和配载的规则,以船舶稳定性和堆场中的最小翻箱率为目标,以集装箱装载重量和航程为约束,建立了 $4n$ (n 为集装箱装载的总数量)个变量、 $2n^2 + 2n$ 个约束的集装箱装船顺序的整数规划模型。

1 问题描述

集装箱装船顺序是指在集装箱的运输过程中,将某港口堆场中一定数量的集装箱按照分块装载依次摆放到船舱的过程。其中码头堆场和船舶中的集装箱均是按照贝位、列位和层位三维空间摆放。在集装箱的装船过程中,应将重量大、航程远的集装箱放在船舶的下面,避免船舶在到达下一港口时卸载集装箱所导致过多翻箱操作,从而减少运作成本。在整个装船过程中,始终保持船舶的稳性,同时要尽可能地减少堆场中的翻箱操作。

2 模型的建立

2.1 模型假设

影响集装箱配载的因素较多,如果一一考虑,将不利于模型的求解。为了较好地解决实际问题,作如下假设:

- 某堆场中装载的集装箱的尺寸规格相同,都是 20 尺柜。
- 暂不考虑堆场中集卡和吊桥作业对集装箱配载的影响。
- 集装箱的装载不包含冷藏箱、危险箱等特殊箱。
- 堆场中集装箱的翻箱操作只在同一贝位、或者同一列位进行翻箱,假设有翻箱时落箱的缓冲区,即暂不考虑落箱位置。

2.2 定义变量

根据实际问题,把模型所用到的变量定义如下:

- n 为堆场中集装箱的数量,令 $I_n = \{1, 2, \dots, n\}$ 为指标集。
- m_i 为第 i 个集装箱的质量,为已知量, $i \in I_n$ 。
- u_i 为第 i 个集装箱到达的港口时间序号,用正整数表示,为已知量, $i \in I_n$ 。
- b_i, l_i, h_i 为第 i 个集装箱在堆场中的贝位、列位和层位,为已知量, $i \in I_n$ 。
- B, L, H 为船上总的贝位、列位和层位。
- B_i, L_i, H_i 为第 i 个集装箱在船上所在的贝位、列位和层位, $i \in I_n$ 。
- t_i 为第 i 个集装箱的装船时间,用正整数表示, $i \in I_n$ 。

2.3 集装箱船稳性

当集装箱船空载时,假设其重心为船舶的几何形心为

$\left(\frac{B}{2}, \frac{L}{2}, \frac{H}{2}\right)$ 。当集装箱装船后,集装箱的重心坐标为 $\left(\frac{\sum_{i=1}^n B_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{\sum_{i=1}^n L_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{\sum_{i=1}^n H_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}\right)$ 。为使船在给定的装船空间中装船后仍保持稳定,应使水平方向重心与空载时尽可能吻合,高度上尽可能降低,即

$$\min z = \left(\frac{\sum_{i=1}^n B_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - \frac{B}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n L_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n H_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

2.4 堆场中的翻箱

由于堆场中的集装箱摆放不均,加上装船过程中对重量、航程的要求,集装箱在移箱的过程中应尽量避免翻箱操作。当两个集装箱位于堆场中的同一贝位、同一列位、不同层位时,若层位低的集装箱优先装载,则产生翻箱,即

$$\xi_{ij}^1 = \begin{cases} 1 & (b_i = b_j) \wedge (l_i = l_j) \wedge (h_i > h_j) \wedge (t_i > t_j) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $i \neq j; i, j \in I_n$ 。

那么整个堆场在某次装船过程中所产生的总的翻箱率可表示为

$$\rho_1 = \frac{\sum_{i < j} \xi_{ij}^1}{n} \quad (3)$$

2.5 装载规则

首先,集装箱在船舶上不能有重位,即两个集装箱不可能摆放在船上的同一位置,则有

$$(B_i - B_j)^2 + (L_i - L_j)^2 + (H_i - H_j)^2 > 0 \quad (4)$$

两个集装箱不能同时装船,即

$$t_i \neq t_j, i \neq j \quad i, j \in I_n \quad (5)$$

当两个集装箱拟置于船上同一贝位、同一列位、不同层位时,显然下面的集装箱应该先装到船上,因而有

$$t_i > t_j \quad \text{if} (B_i = B_j) \wedge (L_i = L_j) \wedge (H_i > H_j) \quad (6)$$

在装船过程中,应使质量大的集装箱放置在下面,则有

$$H_i > H_j \quad \text{if} (B_i = B_j) \wedge (L_i = L_j) \wedge (m_i \leq m_j) \quad (7)$$

其中: $i \neq j; i, j \in I_n$ 。

2.6 卸载时的翻箱

当两个集装箱摆放在船舶上同一贝位、同一列位、不同层位时,若层位低的先到达港口,则产生翻箱操作,即

$$\xi_{ij}^2 = \begin{cases} 1 & (B_i = B_j) \wedge (L_i = L_j) \wedge (H_i > H_j) \wedge (u_i > u_j) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

则在卸载过程中,总的翻箱率为

$$\rho_2 = \frac{\sum_{i < j} \xi_{ij}^2}{n} \quad (9)$$

2.7 多目标整数规划模型

由上可建立整数规划模型如下所示:

$$\min \begin{cases} f_1 = \rho_1 + \rho_2 \\ f_2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n B_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - \frac{B}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n L_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n H_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{s. t. } (B_i - B_j)^2 + (L_i - L_j)^2 + (H_i - H_j)^2 > 0 \quad (11)$$

$$(t_i - t_j)^2 > 0 \quad (12)$$

$$t_i > t_j \quad \text{if} (B_i = B_j) \wedge (L_i = L_j) \wedge (H_i > H_j) \quad (13)$$

$$H_i > H_j \quad \text{if} (B_i = B_j) \wedge (L_i = L_j) \wedge (m_i \leq m_j) \quad (14)$$

$$1 \leq B_i \leq B \quad (15)$$

$$1 \leq L_i \leq L \quad (16)$$

$$1 \leq H_i \leq H \quad (17)$$

$$1 \leq t_i \leq n; B_i, L_i, H_i, t_i \in I_n \quad (18)$$

3 粒子群算法及模型求解

3.1 基本粒子群算法

粒子群算法(PSO)是由美国电气工程师 Eberhart 和社会心理学家 Kennedy 于 1995 年基于鸟群觅食行为而提出的。粒子群算法是一种高效的智能算法,算法把每个优化问题中的可行解看成是一个粒子,粒子在飞行过程中,其飞行速度和轨迹根据自己及同伴的飞行经验不断进行动态调整,使得整个群体有着较好的区域搜索的能力。由于该算法概念简单、实现方便、收敛速度快、参数设置少,近年来一直被广泛应用于函数优化、神经网络、模糊系统控制、信号处理等学术领域^[15-17]。

在粒子群算法中,每个个体称为一个粒子,代表着一个潜在的可行解。在一个 D 维的目标搜索空间中,设群体由 M 个粒子构成,每个粒子可以看成是空间的一个点,粒子根据自身及同伴的飞行经验进行动态调整。设 $x_p = (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pD})^T$ (其中, $x_{pq} \in [x_q^{\min}, x_q^{\max}]$, $x_q^{\min}, x_q^{\max}$ 分别为粒子的边界取值)为第 p 个粒子的位置; $v_p = (v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pD})^T$ (其中, $v_p \in [v_q^{\min}, v_q^{\max}]$, $v_q^{\min}, v_q^{\max}$ 分别为粒子最小最大速度)为第 p 个粒子飞行速度, $q = 1, 2, \dots, D$ 。 $x_p^{\text{best}} = (x_{p1}^{\text{best}}, x_{p2}^{\text{best}}, \dots, x_{pD}^{\text{best}})^T$ 为第 p 个粒子迄今为止搜索到的最优位置, $x^{\text{gbest}} = (x_1^{\text{gbest}}, x_2^{\text{gbest}}, \dots, x_D^{\text{gbest}})^T$ 为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置。在每次迭代过程中,粒子根据以下公式子进行更新和调整自己的位置:

$$v_{pq}^{k+1} = \chi [v_{pq}^k + c_1 r_1 (x_{pq}^{\text{best}} - x_{pq}^k) + c_2 r_2 (x_q^{\text{gbest}} - x_{pq}^k)] \quad (19)$$

$$x_{pq}^{k+1} = x_{pq}^k + v_{pq}^{k+1} \quad (20)$$

其中: $p = 1, 2, \dots, M$; $q = 1, 2, \dots, D$; w 为惯性因子; k 为迭代次数; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数,这两个参数是用来保持群体的多样性; c_1 和 c_2 是学习因子,也称加速因子,使粒子能够调整自身方向,向粒子本身历史最优值和群体历史最优值靠近,如果适当调整这两个参数,可以减少局部最小值的困扰,同时可以使收敛速度变快; χ 表示收缩因子,是关于 c_1 和 c_2 的函数,能够保证粒子群算法的收敛性,通常定义为

$$\chi = \frac{2}{|2 - l - \sqrt{l^2 - 4l}|} \quad l = c_1 + c_2, l > 4 \quad (21)$$

式(19)右端的第二项是“认知”部分,代表着粒子对自身的的学习;第三项是“社会”部分,代表着粒子间的协作。粒子根据当前位置、上一次迭代的速度和自身最好经验与群体最好经验之间的距离来更新速度,从而可由式(20)飞向新的位置。

3.2 集装箱装船顺序的粒子群算法

多目标规划问题一般很难求得最优解,其求解思路大多是

通过各种方法转换多目标为单目标,然后利用求解单目标的方法进行求解。常用的化简方法有极大极小法、罚函数法、乘法、加权法、分层求解法等。针对 2.7 节中给出的多目标规划模型,为平衡两个目标的数量级,现采用二次平方加权的方法对原目标函数进行如下变形:

$$f = \lambda_1 (f_1 - 0.3)^2 + \lambda_2 (f_2 - 3)^2 \quad (22)$$

其中: $\lambda_1, \lambda_2 > 0$, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。由于翻箱率与船舶稳性是影响装船顺序的两个主要因素,它们对多目标规划的影响是不可忽略的,同等重要,因此,取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 。

构造集装箱装船顺序的粒子群算法(CLS-PSO)如下:

a) 初始化。给定 $b_i, l_i, h_i, m_i, u_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 以及 B, L, H , 设定最大迭代次数 $N_{\max}$, 种群规模 M , 粒子的边界及最小最大速度分别为 $x_q^{\min}, x_q^{\max}, v_q^{\min}, v_q^{\max} (q = 1, 2, \dots, 4n)$ 给定充分大的数 $\bar{M}$, 并计算 χ 。

b) 算法开始。随机产生 M 个粒子的初始位置 x_p^0 和速度 v_p^0 , 其中, $x_p^0 = (x_{p1}^0, x_{p2}^0, \dots, x_{pn}^0)$, $x_{pi}^0 = (B_{pi}^0, L_{pi}^0, H_{pi}^0, t_{pi}^0)$, 令 $w_{pi}^0 = (B_{pi}^0, L_{pi}^0, H_{pi}^0)$, 令 $\text{best}_p = +\infty$, $\text{gbest} = +\infty$, $i = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, M, q = 1, 2, \dots, 4n$, 置 $k = 0$ 。

c) 令 $p = 1, S = \{1, 2, \dots, B\} \times \{1, 2, \dots, L\} \times \{1, 2, \dots, H\}$, 进行:

(a) 令 $\Omega_p^k = S$;

(b) 令 $D_p^k = (d_{p1}^k, d_{p2}^k, \dots, d_{pn}^k)$, $\Omega_p^k = \Omega_p^k \setminus D_p^k$;

(c) 若 $\exists i, j \in [1, n]$, $d_{pi}^k = d_{pj}^k$, 则任取 $\bar{d} \in \Omega_p^k$, 令 $d_{ij}^k = \bar{d}$, 转(b), 否则, 进行下一步。

d) 将 $b_i, l_i, h_i, x_p^k, m_i$, 代入式(2)(3)(8)(9)(11)~(18), 若均成立, 则代入式(22)计算第 p 个粒子的适应值为 z_p^k ; 否则, 令 $z_p = \bar{M}$, 进行下一步。

e) 若 $z_p^k < \text{best}_p$, 则 $\text{best}_p = z_p^k, x_p^{\text{best}} = x_p^k$ 。

f) 若 $p < M$, 则 $p = p + 1$, 转(a)。

g) 令 $\text{tmp} = \min_p \text{best}_p, x_{\text{tmp}} = \arg \min_p \text{best}_p$, 若 $\text{tmp} < \text{gbest}$ 成立, 则 $\text{gbest} = \text{tmp}, x_{\text{gbest}} = x_{\text{tmp}}$ 。

h) 把 v_p^k, x_p^k 代入式(19)(20), 得到 v_p^{k+1}, x_p^{k+1} ; 若 $v_{pq}^{k+1} < v_q^{\min}, v_{pq}^{k+1} = v_q^{\min}$, 若 $v_{pq}^{k+1} > v_q^{\max}, v_{pq}^{k+1} = v_q^{\max}$ 。令 $x_{pq}^{k+1} = \lfloor x_{pq}^k + \lfloor v_{pq}^{k+1} \rfloor \rfloor$, 其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取整函数。若 $x_{pq}^k < x_q^{\min}, x_{pq}^k = x_q^{\min}$; 若 $x_{pq}^k > x_q^{\max}, x_{pq}^k = x_q^{\max}$; $p = 1, 2, \dots, M$ 。

i) 若 $k < N_{\max}$, 则 $k = k + 1$, 转步骤(c)。

4 仿真实验

下面针对本模型利用某港口实际数据(表1)进行仿真实验,集装箱船舶在某港口依靠时的空舱贝位、列位、层位分别为 2、6、4,应用本文模型和 CLS-PSO 算法进行求解。设迭代次数为 $N_{\max} = 200, c_1 = c_2 = 1.49445$, 粒子数目为 $M = 48$, 最后求得最优适应度值为 $f = 0.3685$, 其中 $f_1 = 0.1041, f_2 = 2.6412$ 。其最优适应度值曲线如图1所示,得到集装箱在船舶中的配载位置如表2所示。

由数据仿真实验可知,针对集装箱船舶装船过程中的数据复杂、变量多等特点,结合粒子群算法,该模型可以较好地解决集装箱的装船顺序问题。

表 1 某港口堆场集装箱所在位置、重量及航程信息

n	b	l	h	u	m	n	b	l	h	u	m
1	1	1	4	2	3	25	3	1	4	1	4
2	1	1	3	3	2	26	3	1	3	4	4
3	1	1	2	2	3	27	3	1	2	2	2
4	1	1	1	4	6	28	3	1	1	3	5
5	1	2	4	5	5	29	3	2	4	4	7
6	1	2	3	1	3	30	3	2	3	5	3
7	1	2	2	7	6	31	3	2	2	5	6
8	1	2	1	4	4	32	3	2	1	6	4
9	1	3	4	6	5	33	3	3	4	3	3
10	1	3	3	3	6	34	3	3	3	4	5
11	1	3	2	2	3	35	3	3	2	5	5
12	1	3	1	2	6	36	3	3	1	6	7
13	2	1	4	6	4	37	4	1	4	3	4
14	2	1	3	5	7	38	4	1	3	2	8
15	2	1	2	4	5	39	4	1	2	5	6
16	2	1	1	5	6	40	4	1	1	6	6
17	2	2	4	5	6	41	4	2	4	4	4
18	2	2	3	7	7	42	4	2	3	3	7
19	2	2	2	4	8	43	4	2	2	5	8
20	2	2	1	3	7	44	4	2	1	6	8
21	2	3	4	2	5	45	4	3	4	3	8
22	2	3	3	1	5	46	4	3	3	2	6
23	2	3	2	3	5	47	4	3	2	5	5
24	2	3	1	4	3	48	4	3	1	4	7

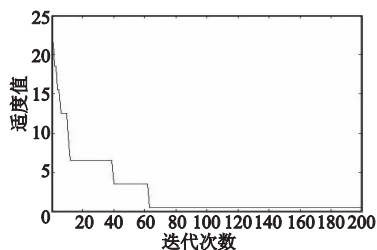


图 1 粒子最优适应值曲线

表 2 某港口集装箱在船舶上的装载位置及装船顺序

n	B	L	H	t	n	B	L	H	t
1	1	3	4	32	25	1	5	4	23
2	1	6	3	40	26	2	4	4	44
3	2	6	4	48	27	1	6	4	45
4	2	4	2	42	28	2	6	2	46
5	2	3	3	7	29	2	1	3	18
6	2	5	4	30	30	1	6	1	19
7	2	2	1	15	31	1	3	2	20
8	2	5	1	27	32	1	5	2	21
9	2	3	2	6	33	2	5	3	29
10	1	2	4	26	34	2	4	3	43
11	2	6	3	47	35	1	4	3	36
12	1	3	3	31	36	2	4	1	41
13	1	5	1	1	37	2	5	2	28
14	2	1	2	17	38	1	1	3	12
15	2	6	1	24	39	1	4	1	14
16	2	2	3	25	40	2	2	2	16
17	1	3	1	8	41	1	5	3	22
18	2	1	1	9	42	1	2	2	3
19	1	1	2	10	43	1	1	1	4
20	1	2	3	11	44	2	3	1	5
21	1	1	4	13	45	1	2	1	2
22	1	4	4	37	46	2	2	4	33
23	1	6	2	38	47	1	4	2	34
24	2	3	4	39	48	2	1	4	35

5 结束语

集装箱船舶装船顺序问题是典型的组合优化问题,约束条件较为繁杂,在实际装载中还与堆场中集装箱的摆放、船舶类型与大小、航海时间等因素相关联。本文是在集装箱按照船舶稳性和堆场翻箱率的基础上,以集装箱的航程作为约束,建立集装箱装船顺序的多目标整数规划模型,并以粒子群算法为基础,构造了 CLS-PSO 算法进行求解,通过 MATLAB 仿真实验证明了模型的合理性。本文提出的关于集装箱船舶装船顺序的多目标整数规划优化模型,兼顾了船舶的稳性和航程要求,使得优化后的方案具有较好的现实性和可行性,因而具有一定的理论价值和实用价值。

参考文献:

- [1] CHEN C S, LEE S M, SHEN Q S. An analytical model for the container loading problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 80(1): 68-76.
- [2] AMBROSINO D, SCIAMACHEN A, TANFANI E. Stowing a containership: the master bay plan problem[J]. *Transportation Research Part A*, 2004, 38(2): 81-99.
- [3] BORTFELDT A, GEHRING H, MACK D. A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem[J]. *Parallel Computing*, 2003, 29(5): 641-662.
- [4] 卫家俊. 一种集装箱配载问题改进算法探讨[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2009, 28(5): 969-972.
- [5] 程文明, 赵道致. 基于遗传算法的集装箱配载问题研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2005(9): 107-109.
- [6] 李虎, 霍佳震, 陈瑶. 一种求解船舶配载问题的混合遗传算法[J]. *工业工程与管理*, 2006(3): 27-31.
- [7] 王莉莉, 于红. 集装箱装船顺序优化模型及遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(15): 234-238.
- [8] 樊铁成, 马孜, 罗勋杰. Pareto 遗传算法在集装箱配载优化中的应用[C]//第 24 届中国控制会议论文集(下册). 2005: 1377-1381.
- [9] 王晓, 陈海燕. 关于合理确定集装箱码头装船顺序的算法[J]. *经济数学*, 2005, 22(3): 284-290.
- [10] 喻斌, 张兢. MatrixVB 组件在集装箱船舶配载系统开发中的应用[J]. *中国水运*, 2007, 7(1): 150-152.
- [11] JUNQUEIRA L, MORABITO R, YAMASHITA D S. Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints[J]. *Computers and Operational Research*, 2008, 39(1): 1-12.
- [12] 刘健男. 遗传算法研究及在航运船舶配载系统中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 19-32.
- [13] DERELIA T, DASB G S. A hybrid 'bee(s) algorithm' for solving container loading problems[J]. *Applied Soft Computing*, 2010, 11(2): 2854-2862.
- [14] 易正俊, 江静, 胡勇. 堆场集装箱翻箱的 PCNN 优化控制算法[J]. *自动化学报*, 2011, 37(2): 341-344.
- [15] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 谢晓峰, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 129-134.
- [17] 潘峰, 陈杰, 甘明刚, 等. 粒子群优化算法模型分析[J]. *自动化学报*, 2006, 32(3): 368-377.