



基于粒子群算法的 出口集装箱堆场箱位分配研究

黎明, 翟金刚

(鲁东大学数学与信息学院, 山东烟台 264025)

摘要: 码头堆场中出口集装箱的箱位分配是典型的NP-hard优化问题, 考虑集装箱的质量及目的港, 以出口集装箱的装船路径和堆区的翻箱率为目标, 建立适合出口集装箱堆场箱位分配的数学模型, 以粒子群算法进行求解, 数据实验表明该模型能够提高堆场的作业效率, 具有一定的实用性。

关键词: 集装箱堆场; 箱位分配; 翻箱率; 粒子群算法

中图分类号: O 212

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0042-05

Export container slot allocation based on PSO

LI Ming, ZHAI Jin-gang

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

Abstract: Export container slot allocation of the container yard is a typical NP-hard optimization problem. A mathematic model of export container slot allocation is established under consideration of the container's mass and target port and targeted at the loading path and the transposition rate of container as a goal. The model is solved by particle swarm optimization algorithm, and the experimental data show that the model can improve the operational efficiency of the yard and it is practical.

Key words: container yard; container slot allocation; container transposition rate; PSO

集装箱运输是世界上货物最主要的运输方式之一, 大多数集装箱都必须要先通过集装箱堆场, 获取集装箱箱位分配位置以后, 把集装箱通过堆场设施及集卡运输到指定位置, 再按照集装箱船舶配载的要求, 装载到船舶中。其中, 出口集装箱的堆场箱位分配对于提高集装箱的装船速度、缩短船舶在港时间和提高港口堆场工作效率, 有着十分重要的意义。

针对集装箱堆场的箱位分配问题, 目前国内外对集装箱堆场箱位分配的研究主要有整数规划、遗传算法等, 大多是以静态方式进行的。2001年, Andreas Bortfeldt等^[1]在前人研究的基础上, 运用混合遗传算法, 在一个较为完整的贪婪

式启发式的基础上, 加入实际的约束, 通过不断改变特定的遗传算子, 从而产生具有稳定遗传因子的后代, 为解决集装箱的配载问题提供了新的理论方法。康海贵等^[2]在滚动式计划的基础上, 研究了进、箱混堆箱位分配问题, 应用整数规划方法平衡各箱区作业量, 并以此数量为约束条件, 最小化集卡的行驶距离和同组进口箱所占箱区数量, 并通过装卸效率, 根据模型设计算法, 利用Lingo优化软件对模型进行求解, 算法表明了动态箱位分配降低了箱区工作量的不平衡性和同组箱所占箱区数量, 加速了船舶的装卸效率。王志明等^[3]以重庆港实际情况建立了以提箱时间为约束, 以最小化翻箱率为目标的集装箱后方堆场箱位分

收稿日期: 2012-04-20

作者简介: 黎明(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事最优化理论与算法方面的研究。

配模型, 提出了基于遗传算法的解决方案, 通过数据仿真比较证明了该优化策略的优越性和实用性。沈剑峰等^[4]建立了基于知识的箱位分配模型, 并通过实例表明该模型的有效性。刘艳等^[5]针对进箱时间的不确定性, 应用模糊机会约束规划方法平衡各箱区作业量, 并以箱区作业量为约束条件, 最小化集卡的行驶距离和同组进口箱所占箱区的数量, 建立了集装箱堆场箱位分配模糊优化模型, 用实例表明了该模型能够提高船舶的装卸效率。江南等^[6]设计了码垛模型, 该模型能够有效避免不同种类集装箱的叠压现象, 可以充分利用堆场空间, 同时使翻箱作业尽量减少。Kim等^[7]采用层次分析法研究了出口集装箱的堆场位置优化, 使得装船时倒箱最少。Mohammad Bazzazi等^[8]以最平衡箱区作业量为目标, 最小化集装箱的在港时间, 并用遗传算法进行了求解验证。

本文将研究集装箱的堆场箱位分配, 把箱区的稳性与提箱时可能产生的翻箱率结合起来建立多目标数学规划模型, 并采用粒子群算法来进行计算仿真。

1 问题描述

出口箱堆场的箱位分配是整个集装箱装船顺序的一个部分, 也是一个关键的起点步骤。箱位分配的好坏直接关系着堆场的工作效率, 影响着装船的时间和堆场的工作效率。分配不好还会耽误船舶在港口的停泊时间, 影响船舶及航运公司的经济效益。箱位分配就是要把出口的集装箱先运送到港口码头, 然后通过码头计算机管理系统输入集装箱的质量、目的地等相关信息, 通过人工和计算机的优化, 借助集卡或龙门吊等堆场设备把集装箱堆放到各个场区的过程。其中最重要的就是如何分配集装箱的位置, 即箱位, 使得各个场区所堆放的集装箱到达船舶泊位的距离最短, 并使整个堆场中出口集装箱装船时的翻箱率最低。由于出口集装箱到达港口堆场的时间都是随机的, 为了简化问题, 本文研究的是整批出口集装箱的箱位分配问题。

2 模型的建立

考虑集装箱堆场的特殊要求, 将堆场中出口集装箱到船舶泊位的路径与装船时的翻箱率结合起来, 建立数学模型进行求解。

2.1 模型假设

为了更好地解决实际问题, 对问题做如下假设: 进入码头堆场的所有集装箱的尺寸都是20ft柜; 不考虑集卡和吊桥作业对集装箱箱位分配的影响; 冷藏箱、危险箱等特殊箱的箱位分配有特殊的规定, 在此忽略不予考虑; 集装箱的质量、航程、尺寸等信息不可随意更改; 港口堆场有翻箱的缓冲区, 却暂不考虑翻箱过程中的落箱位置; 箱位分配的各个场区都是均匀分布的。

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 分别为第 i 个集装箱在堆场中分配的贝位、列位和层位, $i \in I_n$; $\bar{b}, \bar{l}, \bar{h}$ 分别为码头堆场可以堆放集装箱总的贝位、列位和层位数, $i \in I_n$; t_i 为记载第 i 个集装箱的航线信息, 用正整数表示, $i \in I_n$ 。

2.3 出口集装箱到船舶泊位的路径

集装箱堆场根据贝位、列位分成若干个长方形的场区, 各个场区予以区分, 这样便于装卸和管理。每个场区的集装箱的贝位、列位和层位都是有要求的, 一般层位不能超过6层(特殊的除外)。堆场中的集装箱的堆放一般遵循PSCW原则, 即同一目的港(Port)、同一尺寸(Size)、同一种类(Category)、质量级别(Weight)要分开放置, 同时堆场中的集装箱要按照重箱压轻箱(使得装船时减少提箱的翻箱率)的规则统一分配。

每个集装箱从堆场运到港口码头, 首先都需要用装卸桥把集装箱吊到最高位置, 然后再从该位置水平移动到泊位。

设第 i 个集装箱的箱位位置为 (b_i, l_i, h_i) , 则其到装卸桥的垂直距离为 $\bar{h}+1-h_i$, 到船舶泊位的水平距离即为 l_i , 则堆场中 n 个集装箱箱位到船舶泊

位的路径即为

$$s = \sum_{i=1}^n (\bar{h} + 1 - h_i + l_i) \quad (1)$$

$$1 \leq h_i \leq \bar{h} \quad (11)$$

$$b_i, l_i, h_i, t_i \in I_n, i \neq j, i, j \in I_n \quad (12)$$

2.4 堆场中的翻箱

由于堆场中的集装箱摆放不均，集装箱的质量、航程均有不同，集装箱在装船的过程中应尽量避免翻箱操作。在堆放集装箱时，在满足重箱压轻箱的基础上，应尽量满足航程远的集装箱放在下面，航程近集装箱放在上面。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，航程远的集装箱放在了航程较近的集装箱的下面，则产生翻箱，即

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, (b_i=b_j) \wedge (l_i=l_j) \wedge (h_i>h_j) \wedge (t_i>t_j), i \neq j, i, j \in I_n \\ 0, else \end{cases} \quad (2)$$

那么所有集装箱堆放到堆场场区后所产生的总的翻箱率可表示为：

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

2.5 箱位分配规则

集装箱的箱位分配要遵循“一箱一位”的原则，即每个集装箱只能堆放到一个位置，堆场场区中的每个箱位也只能堆放一个集装箱。由此可得

$$(b_i-b_j)^2+(l_i-l_j)^2+(h_i-h_j)^2>0 \quad i \neq j, i, j \in I_n \quad (4)$$

为了使出口集装箱更好地装船，尽量减少堆场中的翻箱率和作业时间，在箱位分配过程中，应遵循重箱在上的规则，即使质量大的集装箱放置在上面，则有

$$h_i>h_j, \text{ 当 } (b_i=b_j) \wedge (l_i=l_j) \wedge (m_i \geq m_j), i \neq j, i, j \in I_n \quad (5)$$

2.6 多目标整数规划模型

由上可建立整数规划模型：

$$\min \begin{cases} f_1 = s \\ f_2 = \rho \end{cases} \quad (6)$$

$$s.t. \quad (b_i-b_j)^2+(l_i-l_j)^2+(h_i-h_j)^2>0 \quad (7)$$

$$h_i>h_j, \text{ if } (b_i=b_j) \wedge (l_i=l_j) \wedge (m_i \leq m_j) \quad (8)$$

$$1 \leq b_i \leq \bar{b} \quad (9)$$

$$1 \leq l_i \leq \bar{l} \quad (10)$$

3 粒子群算法及模型求解

3.1 基本粒子群算法

粒子群算法是近年来人工智能发展过程中出现的一种新算法，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，根据自己及同伴的飞行经验不断动态调整其飞行速度和轨迹，使得整个群体有着较好的搜索能力，又能保证避免获得局部最优解，从而获得全局最优解^[9-11]。

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 $x_p=(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pD})^T$ ($x_{pq} \in [x_q^{\min}, x_q^{\max}]$ ，其中 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， $v_p=(v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pD})^T$ ($v_p \in [v_q^{\min}, v_q^{\max}]$ ，其中 v_q^{\min} ， v_q^{\max} 分别为粒子的最小最大速度)为第p个粒子的飞行速度， $q=1, 2, \dots, D$ 。 $x_p^{best}=(x_{p1}^{best}, x_{p2}^{best}, \dots, x_{pD}^{best})^T$ 为第p个粒子迄今为止搜索到的最优位置， $x^{gbest}=(x_1^{gbest}, x_2^{gbest}, \dots, x_D^{gbest})^T$ 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，粒子根据以下式子进行更新和调整自己的位置：

$$v_{pq}^{k+1} = w v_{pq}^k + c_1 r_1 (x_{pq}^{best} - x_{pq}^k) + c_2 r_2 (x_q^{gbest} - x_{pq}^k) \quad (13)$$

$$x_{pq}^{k+1} = x_{pq}^k + v_{pq}^{k+1} \quad (14)$$

式中： $i=1, 2, \dots, m$ ； k 为迭代次数； w 为惯性因子； 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。

3.2 集装箱堆场箱位分配算法流程

由于模型2.6是一个含约束条件的多目标规划问题，正常情况下很难求得最优解，其求解思路大多是通过化多目标为单目标，然后运用求解单目标的方法进行求解。在多目标规划的求解方法中，线性加权和法是一种非常实用有效的目标函数构造方法，其方法简单，计算量小，较为容易求得结果。根据集装箱堆场的实际情况和箱区分

布的特点, 可采用线性加权和法来进行求解。对于 2.6 节中给出的多目标规划模型, 为平衡两个目标的数量级, 现对原目标函数进行变形如下:

$$f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 \quad (15)$$

其中 λ_1 和 λ_2 可由码头堆场中对于翻箱和箱区的稳性要求来平衡设置。当堆场中所有集装箱的装船路径最短, 或堆场中集装箱的翻箱率最小时, 均可以节约堆场成本, 减少船舶在港等待时间, 提高装载和运营效率, 因此在此令 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 。

构造集装箱堆场箱位分配的粒子群算法流程 (CPA-PSO) 如下:

第 1 步: 算法初始化。设定最大迭代次数 N_{\max} , 种群规模 M , 惯性因子 w , 给定 m_i, t_i 以及 $b, l, h, i=1, 2, \dots, n$, 粒子的边界及最小最大速度分别为 $x_q^{\min}, x_q^{\max}, v_q^{\min}, v_q^{\max}, q=1, 2, \dots, 3n$, 给定充分大的数 \bar{M} 。

第 2 步: 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: $x_p^0 = (x_{p1}^0, x_{p2}^0, \dots, x_{pn}^0)$, $best_p := +\infty, gbest_p := +\infty, p=1, 2, \dots, M, q=1, 2, \dots, 3n$, 置 $k:=0$ 。

第 3 步: 令 $p:=1, S := \{1, 2, \dots, \bar{b}\} \times \{1, 2, \dots, \bar{l}\} \times \{1, 2, \dots, \bar{h}\}$ 。

1) 令 $\Psi_p^k := S$ 。

2) 令 $D_p^k := (x_{p2}^k, x_{p3}^k, \dots, x_{pn}^k), \Psi_p^k := \Psi_p^k \setminus D_p^k$ 。

3) 若 $\exists i, j \in [1, n], x_{pi}^k = x_{pj}^k$; 则任取 $\bar{d} \in \Psi_p^k$, 令 $x_{pj}^k := \bar{d}$ 。转 2), 否则, 进行下一步。

第 4 步: 将 $b_i, l_i, h_i, x_p^k, m_i$ 代入 (2), (3), (7) ~ (12), 若均成立, 则代入 (15) 式计算第 p 个粒子的适应值为 f_p^k ; 否则, 令 $f_p := \bar{M}$, 进行下一步。

第 5 步: 若 $f_p^k < best_p$, 则 $best_p = f_p^k, x_{p_{best}}^p := x_p^k$ 。

第 6 步: 若 $p < M$, 则 $p := p + 1$, 转第 3 步 1)。

第 7 步: 令 $tmp := \min_p best_p, x_{tmp} := \arg \min_p best_p$ 。

若 $tmp < gbest$ 成立, 则 $gbest := tmp$,

$x_{gbest} := x_{tmp}$ 。

第 8 步: 把 v_p^k, x_p^k 代入 (13) 和 (14) 式进行粒子的速度与位置更新。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 $x_{pq}^{k+1} = x_{pq}^k + [v_{pq}^{k+1}]$, 其中 $[\cdot]$ 为取整函数。若 $x_{pq}^k < x_q^{\min}$,

$x_{pq}^k := x_q^{\min}$, 若 $x_{pq}^k > x_q^{\max}, x_{pq}^k := x_q^{\max}; p=1, 2, \dots, M$ 。

第 9 步: 若 $k < N_{\max}$, 则 $k := k + 1$, 转第 3 步。

4 仿真实验

下面针对本模型利用数据 (表 1) 进行仿真实验, 到达某港口的批次集装箱的质量与航线信息如表 1 所示, 集装箱堆场的某箱区的贝位、列位、层位分别为 3, 6, 6, 应用本文模型和 CLA-PSO 算法进行求解, 得到集装箱在船舶中的配载位置如表 2 所示, 其最优适应值曲线如图 1 所示。

由数据仿真实验可知, 对于出口集装箱堆场

表 1 某港口堆场集装箱的质量与航线信息

n	m	t												
1	5	2	16	8	5	31	6	5	46	6	3	61	8	3
2	5	3	17	6	5	32	6	3	47	6	1	62	6	4
3	6	3	18	7	3	33	7	2	48	5	2	63	7	2
4	3	4	19	8	4	34	8	4	49	4	4	64	5	5
5	4	2	20	7	2	35	6	1	50	5	3	65	5	4
6	4	5	21	6	1	36	5	3	51	8	5	66	4	3
7	7	4	22	7	4	37	6	3	52	6	6	67	6	2
8	6	5	23	7	3	38	5	5	53	4	3	68	7	1
9	7	3	24	4	2	39	4	4	54	7	2	69	3	3
10	7	2	25	6	3	40	5	2	55	8	5	70	5	4
11	8	4	26	4	1	41	6	4	56	8	5	71	4	4
12	7	4	27	5	4	42	6	1	57	6	6	72	6	5
13	6	3	28	7	3	43	5	3	58	3	1	73	7	3
14	7	5	29	6	2	44	8	5	59	5	4	74	4	4
15	5	4	30	5	5	45	8	4	60	4	6	75	3	2

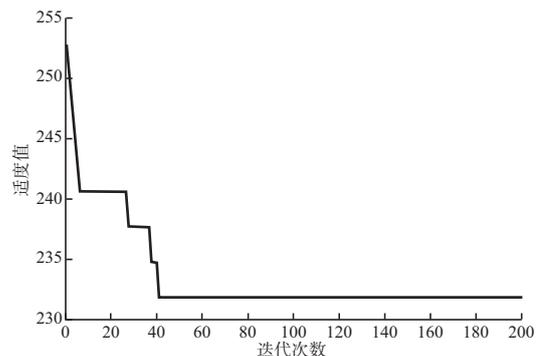


图 1 粒子最优适应值曲线

表2 某港口集装箱在堆场上的箱位分配

<i>n</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>n</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>n</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>t</i>
1	3	2	1	2	26	1	1	5	1	51	2	4	3	5
2	2	2	3	3	27	1	2	5	4	52	1	3	1	6
3	2	3	3	3	28	1	4	5	3	53	3	1	1	3
4	1	1	1	4	29	3	2	4	2	54	3	4	3	2
5	3	1	3	2	30	1	2	1	4	55	2	4	4	4
6	2	1	2	5	31	1	3	5	5	56	2	4	5	5
7	1	4	2	4	32	2	3	6	3	57	1	3	2	6
8	1	3	3	5	33	3	4	2	2	58	1	1	4	1
9	3	3	3	3	34	1	5	2	4	59	1	2	6	4
10	3	2	6	2	35	3	1	5	1	60	2	1	1	6
11	2	4	6	4	36	2	2	4	3	61	1	5	4	3
12	1	4	3	4	37	3	3	1	3	62	2	3	2	4
13	2	3	4	3	38	1	2	2	5	63	3	4	4	2
14	1	4	1	5	39	2	1	3	4	64	1	2	3	5
15	1	2	4	4	40	3	2	2	2	65	2	2	1	4
16	2	4	1	5	41	2	3	1	4	66	3	1	1	3
17	1	3	4	5	42	3	1	6	1	67	3	2	5	2
18	3	3	4	3	43	2	2	5	3	68	3	4	5	1
19	1	5	1	4	44	2	4	2	5	69	1	1	2	3
20	3	4	1	2	45	1	5	3	4	70	2	2	2	4
21	1	1	6	1	46	3	3	2	3	71	2	1	5	4
22	1	4	4	4	47	3	3	6	1	72	1	3	6	5
23	3	3	5	3	48	3	2	3	2	73	1	4	6	2
24	3	1	4	2	49	2	1	4	3	74	2	1	6	3
25	2	3	5	3	50	2	2	6	4	75	1	1	3	4

注：设迭代次数为 $N_{max}=200$ ，惯性因子 $w=0.56$ ， $c_1=c_2=1.49$ ，粒子数目为 $M=60$ ，最后求得最优适应度值为 $f=232.46$ 。

中的箱位分配问题，粒子群算法的收敛速度快，有着较好的适用性。

5 结论

出口集装箱堆场的箱位分配问题是个比较复杂的有约束多目标非线性规划优化问题，在实际箱位分配中常与堆场中集装箱的大小、到港

时间、箱区划分放规则、作业机械等因素有关。本文是按照集装箱堆场箱区的划分，在考虑堆放后集装箱装船提箱的路径及堆场的翻箱率的基础上，以集装箱的航线做为约束，建立起出口集装箱堆场箱位分配的多目标整数规划模型。并以粒子群算法为基础构造了CPA-PSO算法进行求解。

参考文献：

- [1] Andreas Bortfeldt, Hermann Gehring. A hybrid genetic algorithm for the container loading problem[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131: 143-161.
- [2] 康海贵, 刘海, 周鹏飞. 基于混堆的集装箱堆场动态箱位分配研究[J]. 水运工程, 2009(8): 73-77.
- [3] 王志明, 符云清. 基于遗传算法的集装箱后方堆场箱位分配策略[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(8): 2 939-2 941.
- [4] 沈剑峰, 金淳, 高鹏. 基于知识的集装箱堆场箱位分配计划研究[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(9): 146-148.
- [5] 刘艳, 周鹏飞, 唐海贵. 集装箱堆场箱位分配模糊优化研究[J]. 水运工程, 2009(11): 1-5.
- [6] 江南, 余宏志, 谭周提. 拥堵集装箱堆场箱位分配优化模型与算法[J]. 铁道学报, 2011, 33(11): 8-15.
- [7] Kim K H, Bae J W. Re-marshaling export containers in port container terminals[J]. Computers and Industrial Engineering, 1998, 35(3, 4): 655-658.
- [8] Mohammad Bazzazi, Nima Safaei, Nikbakhsh Javadian. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal[J]. Computers and Industrial Engineering, 2009 (56): 44-52.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

(本文编辑 武亚庆)