

DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2018.04.17

集装箱海铁联运港口混堆堆场箱区均衡分配模型

武慧荣¹,朱晓宁²,邓红星¹

(1. 东北林业大学 交通学院,黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

摘要:集装箱海铁联运港口堆场是集装箱港口作业的重要节点,主要堆存通过水运、铁路及公路等不同运输方式进出港口的集装箱,涉及作业箱型种类多,堆存策略直接影响港口的生产作业效率。以箱区作业量均衡为目标对集装箱海铁联运港口混堆堆场的箱区分配问题进行研究。在滚动计划的基础上,以堆场箱区作业量均衡为目标,建立混堆堆场箱区分配模型,设计了模拟退火算法求解,并进行算例分析。结果表明:所建模型能够有效降低混堆堆场箱区工作量的不平衡性,求解算法可有效收敛获得较优解,优化堆场箱区分配,提高港口作业效率。

关键词:交通运输工程;混堆;箱区分配;模拟退火算法

中图分类号:U169.6

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2018)04-109-07

Container Space Equilibrium Assignment Model of the Mixed Storage Yard in Container Sea-Rail Port

WU Huirong¹, ZHU Xiaoning², DENG Hongxing¹

(1. School of Traffic, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, P. R. China;

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: The yard in container sea-rail port is an important node of container port operations, mainly storing the containers in and out of the port with different modes of transportation such as waterway, railway and highway. There were various types of containers in the yard of container sea-rail port, and its storage scheme directly impacted the performance and productivity of port. The problem of box allocation in the mixed storage yard of container sea-rail port was studied with the goal of balancing the operation quantity in the container area. According to rolling plan, the container space assignment model of the mixed storage yard was established with the target to balance the operation quantity of the container area. The simulated annealing algorithm was designed, and the example analysis was carried out. The results show that the proposed model is effective to reduce the workload imbalance of the mixed storage yard; and the algorithm can effectively converge to obtain a better solution, optimize container space assignment of the yard and improve the operation efficiency of the port.

Key words: traffic and transportation engineering; mixed storage; container space assignment; simulated annealing algorithm

0 引言

集装箱堆场的作业集装箱包括进口箱和出口箱,其堆存方式有进、出口箱分别堆存和进、出口箱混合堆存两种方式。进、出口箱混合堆存能有效提高集装箱堆场空间资源利用率。同时,海铁联运是

集装箱多式联运的主要运输形式,对集装箱海铁联运港口混合堆场作业进行优化,受到学界越来越多的关注。

集装箱海铁联运港口混堆堆场主要负责通过船舶、列车及外集卡进出港口的集装箱堆存作业,涉及作业箱型种类多。研究集装箱混合堆场的箱区作业

收稿日期:2016-08-04;修订日期:2016-12-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金项目(2572015CB16);黑龙江省自然科学基金项目(E2017002);黑龙江省教育厅科研资助项目(12543017)

第一作者:武慧荣(1980—),女,山西夏县人,讲师,博士,主要从事集装箱多式联运方面的研究。E-mail: wuhuirong@126.com。

分配问题,均衡箱区间作业箱量,可有效减少堆场作业时间,提高港口运行效率。

ZHANG Chuqian 等^[1]研究了集装箱堆场分配问题,建立了混堆堆场分配的整数规划模型,该模型以船舶装卸作业完成时间最小为目标,获得集装箱在堆场箱区合理分配方案。K. H. KIM 等^[2]建立了集装箱堆存分配的混合整数规划模型,该模型以提高堆场空间利用率、减少船舶装卸作业时间为目标,研究了码头出口集装箱的堆存分配问题。E. KOZANE 等^[3]研究了堆场的箱区分配问题,提出了一种迭代搜索算法,求解提出集装箱堆场的最佳堆区分配策略和作业计划。M. BAZZAZI 等^[4]研究了进口集装箱堆场箱位分配问题,以箱区间作业量平衡为前提,集装箱存取时间最小为目标,建立了整数规划模型,应用遗传算法求解得到合理方案。S. SAURÍ 等^[5]研究了进口集装箱堆场空间堆存策略问题,提出了3种堆存策略,以翻箱数最小为目标建立了概率分布模型,求解最优堆存策略。FAN Lingfang 等^[6]建立了码头出口集装箱堆场的堆位分配模型,根据模型特点采用两阶段算法进行求解。D. H. LEE 等^[7]综合考虑了船舶的泊位分配和集装箱堆场分配问题,建立了集装箱转运枢纽的泊位和堆场分配整数规划模型,该模型以作业成本最小为目标,应用启发式算法进行求解。王斌^[8]考虑了进出口箱量为随机量时的集装箱堆场分配问题,建立了堆场分配的两阶段分配模型,第1阶段以各箱区各箱区作业量均衡为目标,第2阶段减少了集卡在堆场和泊位之间的行走距离。郑红星等^[9]研究了集装箱港口混堆堆场的箱区分配问题,建立箱区指派优化模型,以提高堆场空间资源的利用率。毛钧等^[10]分别以堆场各箱区贝位间作业箱量均衡和堆场到泊位间距离最小为目标,建立了集装箱混堆堆场配置两阶段优化模型。王力等^[11]建立了铁路集装箱中心站混堆堆场分配两阶段优化模型,第1阶段实现堆场箱区分配,第2阶段完成箱位指派。范磊等^[12]研究了堆场取箱作业中的倒箱问题,以贝位内取箱作业中倒箱数量最少为目标,建立取箱作业数学模型,应用启发式算法求解。武慧荣等^[13]研究了“船舶-堆场-列车”混堆堆场箱位分配问题,以压箱数最小为目标建立了箱位分配模型,设计了启发式算法求解。严南南等^[14]建立了堆场出口箱分配的两阶段模型,第1阶段以均衡各箱区贝位间作业箱量为目标建立箱区分配模型,第2阶段以龙门吊使用数量最少为目标建立作业线分配模型。刘婵娟等^[15]研究了集装箱出口箱堆场箱

位分为问题,以翻箱操作最少、内集卡运输距离最小和贝位箱量均衡为目标,建立了多目标优化模型。

由以上研究可见:目前集装箱堆场分配问题研究主要针对于集装箱港口和铁路中心站,而对于集装箱多式联运港口堆场,即同时满足船舶、列车和集卡集装箱装卸、堆存作业的多式联运作业堆场空间配置问题研究较少。集装箱海铁联运港口混堆堆场在布局、流程等各方面都与传统的集装箱港口堆场不同,笔者以集装箱海铁联运港口混堆堆场为研究对象,建立混堆堆场箱区分配模型,目标是均衡堆场各箱区间作业量。

1 模型建立

1.1 问题描述

集装箱海铁联运港口堆场作业集装箱主要是船舶、列车、集卡的到发港集装箱装卸及堆存堆场作业。根据集装箱在进出、口箱混堆堆场作业中所处状态不同,将作业集装箱分为6种类型,6类箱型的堆存作业如图1。

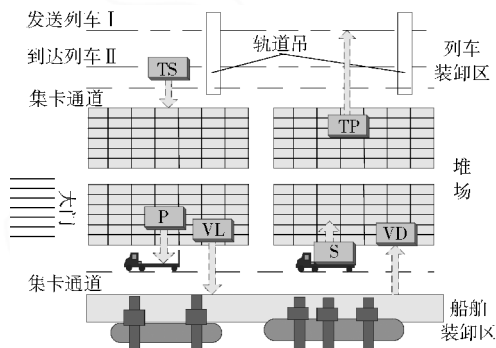


图1 6类箱型的堆场作业示意

Fig. 1 Operation schematic of 6 types of containers at storage yard

1) VD 型箱:指尚在船上等待卸船,将被运至堆场堆存的进口箱。

2) P 型箱:已在堆场堆存,等待外集卡提走的进口箱。

3) TP 型箱:已在堆场堆存,等待装上列车的进口箱。

4) VL 型箱:已在堆场堆存,等待装船的出口箱。

5) TS 型箱:指尚在列车上等待卸车,将被内集卡运进堆场堆存的出口箱。

6) S 型箱:指尚未分配到堆场,等待被外集卡运进堆场堆存的出口箱。

集装箱港口作业模式通常是连续作业,选定一个固定时间段作为计划周期,基于滚动计划模式安

排堆场作业计划。考虑上述6种类型的进、出口集装箱混合堆存,已知各集装箱作业时间,以堆场箱区间作业量均衡为目标,建立集装箱海铁联运港口混堆堆场箱区均衡分配模型,合理分配各箱区的作业量,从而提高堆场装卸设备作业效率。

1.2 假设条件

根据实际情况,笔者针对模型做出以下假设:

- 1) 所涉及的集装箱为同尺寸集装箱;
- 2) 计划期内,船舶、列车、集卡集装箱到达和离开的时间及各自的作业箱量已知;
- 3) 计划期内,到达的集装箱装卸顺序已知;
- 4) 集卡的取、送箱时间在计划期内不存在延误;
- 5) 堆存作业时,不存在集装箱直装、直卸情况,所有箱都落在箱区。

1.3 混堆堆场箱区均衡模型

1.3.1 符号及变量

B 表示集装箱堆场内箱区数目; i 表示堆场中箱区编号, $i \in [1, B]$; D 表示一个计划期内的总计划时段数; t 表示计划期内第 t 个计划时段, $t \in [1, D]$; C_i 表示堆场中箱区 i 的堆存能力; $B_{it(VL)}$ 表示 t 时段由箱区 i 提走装船的 VL 型箱量; $B_{it(VL)}^0$ 表示计划期开始时已经在堆场的箱区 i 中,将在 t 时段上船的 VL 型箱量; $B_{ikt(VL)}$ 表示在 k 时段分配到箱区 i 中,在 t 时段上船的 VL 型箱量, $k \in [1, t]$; $B_{it(VD)}$ 表示 t 时段由船舶卸到堆场箱区 i 的 VD 型箱量; $B_{iht(VD)}$ 表示 t 时段由船舶卸到箱区 i 中, h 时段将从堆场提走的 VD 型箱量, $h \in [t, D]$; $B_{it(VD')}$ 表示 t 时段由船舶卸到堆场箱区 i 中,在计划期外从堆场提走的 VD 型箱量; \bar{V}_t 表示计划期内堆场中各箱区 VD、VL 型箱作业箱量的平均值; $B_{it(TS)}$ 表示 t 时段内由列车卸到箱区 i 的 TS 型箱量; $B_{it(TS')}$ 表示计划期内 t 时段由列车卸到箱区 i 中,在计划期外将被装上船的 TS 型箱量; $B_{igt(TS)}$ 表示 t 时段由列车卸至堆场箱区 i 中,在 g 时段将被装上船的 TS 型箱量, $g \in [t, D]$; $B_{it(TP)}$ 表示 t 时段内由箱区 i 提走装上列车的 TP 型箱量; $B_{ilt(TP)}$ 表示 l 时段分配到箱区 i 中,在 t 时段将被装上列车的 TP 型箱量, $l \in [1, t]$; $B_{it(TP)}^0$ 表示计划期开始时已经在堆场的箱区 i 中,在 t 时段内被装上列车的 TP 型箱量; \bar{T}_t 表示计划期内堆场中各箱区 TP、TS 型箱量的平均值; $B_{it(S)}$ 表示 t 时段到港并分配到堆场箱区 i 的 S 型箱量; $B_{itq(S)}$ 表示在计划时段 t 到达港口,分配到堆场箱区 i 中,在 q 时段将被装船的 S 型箱作业箱量, $q \in [t, D]$; $B_{it(S')}$ 表示 t 时段到达港

口,分配到堆场箱区 i 中,在计划期外将被装上船的 S 型箱作业箱量; $B_{it(P)}$ 表示计划期内 t 时段客户从箱区 i 提走的 P 型箱量; $B_{imt(P)}$ 表示 m 时段内到达港口,分配到箱区 i 中,客户在 t 时段提走的 P 型箱量, $m \in [1, t]$; $B_{it(P)}^0$ 表示计划期开始时已在堆场箱区 i 中,在 t 时段被客户提走的 P 型箱量; \bar{VT}_t 表示计划期内堆场中各箱区 VD、VL、TP、TS、P、S 型箱作业箱量的平均值; $B_{i0(W)}$ 表示计划期开始时堆存在箱区 i 中的集装箱数量; $B_{it(W)}$ 表示计划期内 t 时段结束时堆存在箱区 i 中的集装箱数量。

1.3.2 目标函数

集装箱海铁联运港口混堆堆场箱区作业箱量均衡模型的目标函数如式(1)~(4):

$$\min F = \alpha_1 \cdot f_1 + \alpha_2 \cdot f_2 + \alpha_3 \cdot f_3 \quad (1)$$

$$f_1 = \sum_{t=1}^D \sum_{i=1}^B |(B_{it(VD)} + B_{it(VL)}) - \bar{V}_t| \quad (2)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^D \sum_{i=1}^B |(B_{it(TP)} + B_{it(TS)}) - \bar{T}_t| \quad (3)$$

$$f_3 = \sum_{t=1}^D \sum_{i=1}^B |(B_{it(VD)} + B_{it(VL)} + B_{it(TP)} + B_{it(TS)} + B_{it(P)} + B_{it(S)}) - \bar{VT}_t| \quad (4)$$

式(1)表示将船舶、列车及外集卡装卸产生的作业箱分配到各箱区,使各箱区作业箱量尽量均衡,式中: $\alpha_x (x=1,2,3)$ 表示相应目标值的权重系数, $\sum_x \alpha_x = 1$; 式(2)~(4)分别表示船舶装卸计划、列车装卸计划在各箱区作业箱量均衡及整个堆场箱区作业总量均衡,以各箱区作业量的平均差为最小表示。

1.3.3 约束条件

$$\bar{V}_t = \frac{\sum_{i=1}^B (B_{it(VD)} + B_{it(VL)})}{B}, t \in [1, D] \quad (5)$$

$$\bar{T}_t = \frac{\sum_{i=1}^B (B_{it(TP)} + B_{it(TS)})}{B}, t \in [1, D] \quad (6)$$

$$\bar{VT}_t = [\sum_{i=1}^B (B_{it(VD)} + B_{it(VL)} + B_{it(TP)} + B_{it(TS)} + B_{it(P)} + B_{it(S)})] / B, t \in [1, D] \quad (7)$$

$$B_{it(VD)} = B_{it(VD')} + \sum_{h=t}^D B_{iht(VD)}, i \in [1, B], t \in [1, D] \quad (8)$$

$$B_{it(VL)} = B_{it(VL)}^0 + \sum_{k=1}^t B_{ikt(VL)}, i \in [1, B], t \in [1, D] \quad (9)$$

$$B_{it(TS)} = B_{it(TS')} + \sum_{g=t}^D B_{igt(TS)}, i \in [1, B], t \in [1, D] \quad (10)$$

$$B_{it(TP)} = B_{it(TP)}^0 + \sum_{l=1}^t B_{ilt(TP)}, i \in [1, B], t \in [1, D] \quad (11)$$

$$B_{it(S)} = B_{it(S')} + \sum_{q=t}^D B_{itq(S)}, i \in [1, B], t \in [1, D] \quad (12)$$

$$B_{it(P)} = B_{it(P)}^0 + \sum_{m=1}^t B_{imt(P)}, i \in [1, B], t \in [1, D] \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^D \sum_{t=k}^D B_{ikt(VL)} = \sum_{t=1}^D \sum_{q=t}^D B_{itq(S)} + \sum_{t=1}^D \sum_{g=t}^D B_{itg(TS)}, i \in [1, B] \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^D \sum_{h=t}^D B_{iht(VD)} = \sum_{t=1}^D \sum_{l=t}^D B_{ilt(TP)} + \sum_{m=1}^D \sum_{t=m}^D B_{imt(P)}, i \in [1, B] \quad (15)$$

$$B_{it(W)} = B_{i(t-1)(W)} + [(B_{it(VD)} + B_{it(TS)} + B_{it(S)}) - (B_{it(VL)} + B_{it(TP)} + B_{it(P)})], i \in [1, B], t \in [2, D] \quad (16)$$

$$B_{it(W)} \leq C_i, i \in [1, B], t \in [1, D] \quad (17)$$

$$B_{it(VD)}, B'_{it(VD)}, B_{it(VD)}, B_{it(VL)}, B'_{it(VL)}, B_{ikt(VL)}, B_{it(TS)}, B'_{it(TS)}, B_{itg(TS)}, B_{it(TP)}, B'_{it(TP)}, B_{ilt(TP)}, B_{it(P)}, B'_{it(P)}, B_{imt(P)}, B_{it(S)}, B'_{it(S)}, B_{itq(S)}, B_{it(W)}, C_i, i, t, h, k, g, l, q, m \text{ 均为非负整数} \quad (18)$$

式(5)~(7)分别表示各种箱型在堆场各箱区作业箱量的平均值;式(8)~(13)分别表示6种箱型的箱流约束;式(14)~(15)表示各种箱型的关系;式(16)~(17)表示堆场各箱区的堆存容量约束;式(18)为模型中各变量的非负整数约束。

2 模型求解

根据所建的混堆堆场箱区均衡分配模型的特点,采用模拟退火算法进行求解。模型解空间为各时段分配到各箱区的集装箱量,解表示为矩阵 A_x , 矩阵按

照变量 $B_{it(VD')}, \sum_{h=t}^D B_{iht(VD)}, B_{it(TS')}, \sum_{g=t}^D B_{itg(TS)}, B_{it(S')}, \sum_{q=t}^D B_{itq(S)}$ 顺序为行,以箱区编号 $i(i \in [1, B])$ 顺序为列,构造每个时段 $t(t \in [1, D])$ 各箱区对应的解矩阵 A_x 。

模型求解步骤如下:

Step 1: 定义初始温度为 T_0 , 预定终值温度为 T_f , 温度下降次数 $d=0$, 温度衰减系数 θ , 马尔科夫链长度为 L 。

Step 2: 初始可行解生成。

Step 2-1: 获取各个箱区在计划期初始时刻 $B_{it(VL)}^0, B_{it(TP)}^0$ 和 $B_{it(P)}^0$ 的值, 各时段各箱型的分配总量, 以及各个箱区的总箱量 $B_{i0(W)}$; 若 $t=1$ 转入 **Step 2-2**。

Step 2-2: 若 $i=1$ 转入 **Step 2-3**。

Step 2-3: 计算 $B_{it(VL)}^0, B_{it(TP)}^0$ 和 $B_{it(P)}^0$ 提走后堆场中各箱区的箱量 $B_{it(W)}$ 。

Step 2-4: 根据矩阵从上到下顺序确定 $B_{it(VD')}, \sum_{h=t}^D B_{iht(VD)}, B_{it(TS')}, \sum_{g=t}^D B_{itg(TS)}, B_{it(S')}, \sum_{q=t}^D B_{itq(S)}$ 的值。

Step 2-5: $i=i+1$, 判断 i 值, 若 $i>B$ 则转入 **Step 2-6**; 否则转入 **Step 2-3**。

Step 2-6: $t=t+1$, 判断 t 值, 若 $t>D$ 则初始解生成结束; 否则转入 **Step 2-2**, 继续循环。

Step 3: 迭代次数 $k=1$ 。

Step 4: 产生新解。

Step 4-1: 获取当前矩阵解 A_x 。

Step 4-2: $t=1$, 则转入 **Step 4-3**。

Step 4-3: 确定时段 t 内 $B_{it(VD')}, \sum_{h=t}^D B_{iht(VD)}, B_{it(TS')}, \sum_{g=t}^D B_{itg(TS)}, B_{it(S')}, \sum_{q=t}^D B_{itq(S)}$ 的值, 获取各类箱型在 t 时段内分配到各箱区平均箱量, 作业量大于平均箱量的箱区为集合 a , 作业量小于或等于平均箱量的箱区为集合 b , 判断 b 是否为非空集合, 若集合 b 为非空集合, 则从集合 a 中任意选择一个箱区, 该箱区箱量减1, 同时从集合 b 中未满足箱区中任选一个箱区使其箱量加1; 否则转入 **Step 4-4**。

Step 4-4: $t=t+1$, 判断 t 值, 若 $t>D$ 则产生新解, 新解生成结束; 否则转入 **Step 4-3** 循环。

Step 5: 以堆场箱区作业量均衡作为算法的适应度函数为: $E(A_x) = \min[\alpha_1 \cdot f_1 + \alpha_2 \cdot f_2 + \alpha_3 \cdot f_3]$ 。

Step 6: 根据模拟退火算法, 新解被接受概率 $C_{x_1x_2}$ 为:

$$C_{x_1x_2} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\Delta E_{x_1x_2}}{T}\right), & \Delta E_{x_1x_2} > 0 \\ 1, & \Delta E_{x_1x_2} < 0 \end{cases}$$

式中: $\Delta E_{x_1x_2} = E(A_{x_2}) - E(A_{x_1})$ 。

Step 7: $k=k+1$, 若 $k>L$ 则作退温操作, $T_{d+1} = \theta T_d$, $d=d+1$, 则转入 **Step 8**; 否则, 转入 **Step 4**。

Step 8: 循环终止。判断是否满足预定终值温度 T_f , 若 $T_{d+1} \geq T_f$, 则转入 **Step 3**; 当达到预定终值温度 T_f 时, 输出当前节为最优解, 结束程序。

模型算法流程如图2。

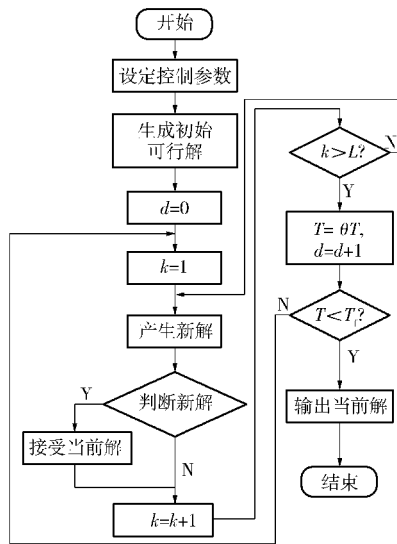


图2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow of the model

3 算例实验

某集装箱海铁联运港口混堆堆场,共10个箱区。每个箱区有360个箱位,其中15个贝位、每个贝位6排,最大堆垛层数4层。该堆场采用滚动周期计划模式,一个计划周期为3d,每天分2个时段,即3d共划分为6个时段。根据港口运行情况,取值 α_χ 分别为0.5、0.2、0.3。

计划时段 t 内由船舶、列车和外集卡分别卸到堆场各箱区中,在计划期外和计划期内分别被从堆场提走的VD、TS、S型箱总量如表1。

表1 VD、TS、S作业箱量

箱型	时段 t					
	1	2	3	4	5	6
$\sum_{i=1}^{10} B_{ih}(\text{VD}')$	50	65	40	60	20	0
$\sum_{i=1}^{10} \sum_{h=t}^T B_{ih}(\text{VD})$	80	75	68	56	44	32
$\sum_{i=1}^{10} B_{it}(\text{TS}')$	0	18	20	30	25	10
$\sum_{i=1}^{10} \sum_{g=t}^T B_{ig}(\text{TS})$	40	22	31	24	15	6
$\sum_{i=1}^{10} B_{it}(\text{S}')$	20	18	5	10	6	4
$\sum_{i=1}^{10} \sum_{q=t}^T B_{iq}(\text{S})$	43	35	27	23	10	8

计划期开始已经在箱区中,在计划时段 t 被装上船的VL、TP、P型箱的箱量为 $B_{it}^0(\text{VL})$ 、 $B_{it}^0(\text{TP})$

和 $B_{it}^0(\text{P})$,如表2~4。

表2 作业箱量 $B_{it}^0(\text{VL})$

Table 2 Container volumes of $B_{it}^0(\text{VL})$										TEU
时段 t	箱区 i									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	12	15	16	19	24	17	1	13	3	10
4	9	24	6	34	36	7	10	4	28	6
5	15	13	7	18	14	16	14	23	14	2
6	21	7	11	10	15	5	2	12	5	17

表3 作业箱量 $B_{it}^0(\text{TP})$

Table 3 Container volumes of $B_{it}^0(\text{TP})$										TEU
时段 t	箱区 i									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8	9	8	18	6	1	9	7	5	4
2	6	13	12	3	18	11	12	0	11	21
3	12	5	7	10	5	12	16	9	6	14
4	5	10	13	7	11	24	8	6	18	10
5	4	12	6	9	9	9	13	1	3	7
6	4	8	14	1	14	8	4	4	5	12

表4 作业箱量 $B_{it}^0(\text{P})$

Table 4 Container volumes of $B_{it}^0(\text{P})$										TEU
时段 t	箱区 i									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	5	8	11	6	10	6	1	6	3
2	1	6	12	5	4	8	12	0	5	3
3	2	4	7	8	12	2	6	1	5	4
4	1	5	13	7	5	4	8	1	4	1
5	1	8	6	9	9	10	4	1	3	4
6	1	2	14	10	4	6	4	2	5	5

计划期内到达港口,分配到堆场箱区 i ,在计划期内 t 时段提走的VL、TP、P型箱箱量为 $\sum_{i=1}^{10} \sum_{k=1}^t$

$B_{ikt}(\text{VL})$ 、 $\sum_{i=1}^{10} \sum_{l=1}^t B_{ilt}(\text{TP})$ 、 $\sum_{i=1}^{10} \sum_{m=1}^t B_{imt}(\text{P})$,见表5。计划期开始时已在各箱区中的箱量见表6。

表5 作业箱量 $B_{ikt}(\text{VL})$ 、 $B_{ilt}(\text{TP})$ 、 $B_{imt}(\text{P})$

Table 5 Container volumes of $B_{ikt}(\text{VL})$ 、 $B_{ilt}(\text{TP})$ 、 $B_{imt}(\text{P})$							TEU
箱 型	时段 t						
	1	2	3	4	5	6	
$\sum_{i=1}^{10} \sum_{k=1}^t B_{ikt}(\text{VL})$	0	0	68	74	87	55	
$\sum_{i=1}^{10} \sum_{l=1}^t B_{ilt}(\text{TP})$	30	21	24	30	22	15	
$\sum_{i=1}^{10} \sum_{m=1}^t B_{imt}(\text{P})$	27	25	38	56	32	35	

表 6 初始箱量

Table 6 Initial container volumes

箱区 i	箱 量/TEU
1	190
2	184
3	205
4	156
5	235
6	140
7	200
8	130
9	170
10	150

根据文中所建堆场箱区分配模型和求解算法,应用 MATLAB 求解模型。主要运行参数设置如下:初始温度 $T_0=99$;预定温度 $T_f=1$;温度衰减系数 $\theta=0.99$; $L=500$ 、 $L=1\ 200$,分别进行模型求解。

当 $L=500$ 时,运算 10 次得到平均目标值为 271.01 TEU,运行时间平均为 413.7 s;在其他参数固定情况下,当 $L=1\ 200$ 时,运算 10 次得到平均目标值为 272.47 TEU,运行时间平均为 1 203.1 s。运行结果显示:目标值没有大的波动,算法得到了比较稳定地运行结果, $L=500$ 时耗时较短。因此,确定 $L=500$ 时,运行目标函数值趋向收敛,如图 3,各类型集装箱在各时段分配到各箱区的箱量如表 7。

表 7 各箱型在各时段各箱区的分配结果

Table 7 Assignment results of container types in each case in each period

TEU

箱 型	箱区 $i(t=1)$										箱区 $i(t=2)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B_{it}(VD')$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	6	6	6	6	6	7	7	7	7
$\sum_{h=t}^D B_{ih}(VD)$	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7	8	8	8	8
$B_{it}(TS')$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2
$\sum_{g=t}^D B_{ig}(TS)$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	2	2	2	2	3	3	1
$B_{it}(S')$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2
$\sum_{q=t}^D B_{iq}(S)$	5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	4	3	3	3	3	3	4	4	4	4
箱 型	箱区 $i(t=3)$										箱区 $i(t=4)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B_{it}(VD')$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$\sum_{h=t}^D B_{ih}(VD)$	7	7	7	6	6	7	7	7	7	7	6	5	5	5	5	6	6	6	6	6
$B_{it}(TS')$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$\sum_{g=t}^D B_{ig}(TS)$	4	3	3	3	3	3	4	3	4	1	3	2	2	2	2	2	3	3	2	3
$B_{it}(S')$	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\sum_{q=t}^D B_{iq}(S)$	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2
箱 型	箱区 $i(t=5)$										箱区 $i(t=6)$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B_{it}(VD')$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sum_{h=t}^D B_{ih}(VD)$	5	4	4	4	4	4	5	4	5	5	4	3	3	3	3	3	4	3	4	2
$B_{it}(TS')$	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\sum_{g=t}^D B_{ig}(TS)$	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
$B_{it}(S')$	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
$\sum_{q=t}^D B_{iq}(S)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1

由算例求解结果及图 3 可看出:笔者所建的集装箱海铁联运混堆堆场箱区均衡分配模型及算法能

在较短时间内收敛并得到较优解,可有效地解决集装箱多式联运港口混堆堆场箱区分配问题。算例实

验所得分配方案可使港口船舶、列车到发集装箱在各箱区中的作业量均衡,从而达到堆场箱区间作业量的总体均衡,提高堆场作业设备的利用率,提升装卸速度,减少船舶、列车在港时间。

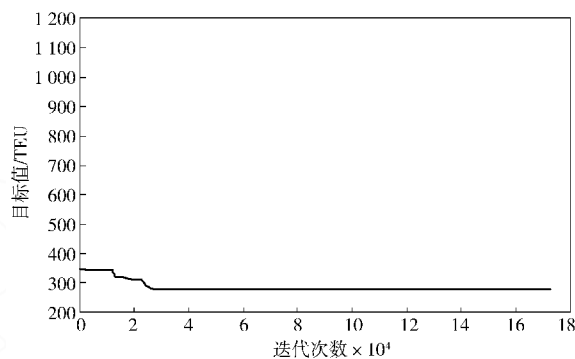


图3 目标函数收敛

Fig. 3 The convergence diagram of target function

4 结 语

为提高集装箱海铁联运港口堆场作业效率,笔者在滚动计划基础上,建立了混堆堆场箱区分配优化模型,模型目标为各箱区作业量的平均差为最小,并以均衡堆场各箱区的集装箱作业量,设计了模拟退火算法进行求解。算例验证表明:所建模型和算法能够实现集装箱港口“船舶-堆场-列车”混堆堆场箱区均衡分配,将计划期内各时段到达的各类集装箱均衡地分配到各箱区,平衡各箱区集装箱作业量,提高堆场作业效率,实现堆场作业资源优化。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Chuqian, LIU Jiyin, WAN Yat-wah, et al. Storage space allocation in container terminals[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003, 37(10): 883-903.
- [2] KIM K H, PARK K T. A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers[J]. *European Journal Operational Research*, 2003, 148(1): 92-101.
- [3] KOZAN E, PRESTON P. Mathematical modeling of container transfers and storage location at seaport terminals[J]. *OR Spectrum*, 2006(28): 519-537.
- [4] BAZZAZI M, SAFAEI N, JAVADIAN N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(1): 44-52.
- [5] SAURÍ S, MARTÍN E. Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, 47(6): 1038-1057.
- [6] FAN Lingfang, CHEN Lu. An algorithm for the storage location assignment problem for outbound containers in a container terminal[J]. *Systems Engineering*, 2011, 29(10): 80-85.
- [7] LEE D H, JIN Jiangang, CHEN Jianghang. Terminal and yard allocation problem for a container transshipment hub with multiple terminals[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(2): 516-528.
- [8] 王斌. 集装箱码头堆场的一种动态随机堆存方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(4): 147-153.
WANG Bin. Dynamic and stochastic storage model in a container yard[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2007, 27(4): 147-153.
- [9] 郑红星, 王晓薇, 董键, 等. 混堆模式下集装箱堆场箱区指派优化方法[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2013, 37(1): 1-5.
ZHENG Hongxing, WANG Xiaowei, DONG Jian, et al. Optimization method of container storage space allocation based on mixture storage[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering)*, 2013, 37(1): 1-5.
- [10] 毛钧, 李娜, 靳志宏. 基于混堆模式的集装箱码头堆场空间资源配置优化[J]. *大连海事大学学报*, 2014, 40(1): 117-122.
MAO Jun, LI Na, JIN Zhihong. Optimization of the allocation of space resources in a container terminal based on mixed stacking pattern[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2014, 40(1): 117-122.
- [11] 王力, 朱晓宁, 闫伟, 等. 铁路集装箱中心站堆场混堆优化模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(2): 172-178.
WANG Li, ZHU Xiaoning, YAN Wei, et al. Optimization model of mixed storage in railway container terminal yard[J]. *Journal of Transportation System Engineering and Information Technology*, 2013, 13(2): 172-178.
- [12] 范磊, 梁承姬. 堆场取箱作业中倒箱问题的启发式算法研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(1): 133-138.
FAN Lei, LIANG Chengji. Heuristic algorithm for re-handling problems in retrieving operation in container port[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2014, 33(1): 133-138.
- [13] 武慧荣, 朱晓宁. “船舶-堆场-列车”混堆堆场箱位分配模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(4): 198-203.
WU Huirong, ZHU Xiaoning. Container slot allocation model of mixed storage in “ships, yard, trains” yard[J]. *Journal of Transportation System Engineering and Information Technology*, 2015, 15(4): 198-203.
- [14] 严南南, 崔景云. 集装箱码头堆场出口箱区空间分配动态模型[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(2): 163-168.
YAN Nannan, CUI Jingyun. Dynamic model of block space allocation on container terminal yard[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2016, 35(2): 163-168.
- [15] 刘婵娟, 胡志华. 集装箱堆场出口箱位分配优化模型算法[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 30(5): 490-497.
LIU Chanjuan, HU Zhihua. Space allocation optimization model and algorithm for outbound containers in the yard[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 30(5): 490-497.

(责任编辑:刘 韬)