第 48 卷　第 3 期
2018 年 5 月
吉 林 大 学 学 报（工 学 版）
Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)
Vol. 48　No. 3
May 2018

基于改进和声搜索算法的越库车辆排序

王占中[1]，卢　月[1]，刘晓峰[2]，赵利英[1]

（1. 吉林大学 交通学院，长春 130022；2. 吉林省运输管理局，长春 130022）

摘　要：实现越库的关键是如何衔接集货车辆和送货车辆，合理的车辆排序可以有效减少越库作业时间。提出采用改进的和声搜索算法(IHS)解决最优化模型，根据和声搜索算法参数值在求解过程中的局限性，采用动态调节方法设定参数；固定参数采用田口试验优化进一步提高运行结果的准确性。仿真结果表明：改进的和声搜索算法在解决越库车辆排序问题上比和声搜索算法(HS)和禁忌搜索算法(TS)寻优能力更强，搜索结果更加接近整体最优解。

关键词：交通运输系统工程；越库系统；和声搜索算法；车辆排序；田口试验；临时库存

中图分类号：TP301.6　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-5497(2018)03-0688-06

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb20170106

Improved harmony search algorithm on truck scheduling for cross docking system

WANG Zhan-zhong[1], LU Yue[1], LIU Xiao-feng[2], ZHAO Li-ying[1]

(1. *College of Transportation, Jilin University, Changchun* 130022, *China*; 2. *Transport Management Bureau of Jilin Province, Changchun* 130022, *China*)

Abstract: The key of realizing the cross dock is to design the joint of inbound trucks and out bound trucks. A proper sequence makes the cross docking more efficient and needs less makespan. Regarding the number of items in the temporary inventory was proportional to the makespan, this paper transfers the objective function of minimizing the makespan into minimizing the number of items in the temporary inventory. An Improved Harmony Search (IHS) algorithm is proposed to solve the optimization problem. Based on the solving limitation on the parameter value of harmony search algorithm, dynamic adjustment method is used to set parameters. The fixed parameters optimized by Taguchi experiments effectively improve the accuracy of solutions further. The simulation results show that the IHS solutions are more close to the overall optimal solutions than the Harmony Search and Tabu Search. HIS is better in terms of searching for optimal solutions to solve the problem of sequencing among inbound and outbound trucks.

Key words: engineering of communications and transportation system ; cross docking; harmony search algorithm; truck scheduling; taguchi experiment; temporary storage

---

收稿日期：2017-02-14.

基金项目：国家自然科学基金项目(51578262).

作者简介：王占中(1965-)，男，教授，博士生导师. 研究方向：物流资源优化技术. E-mail：wangzz@jlu.edu.cn

0　引　言

越库是产品在物流环节中，不经过中间仓库或站点，直接从一个运输工具换载到另一个运输工具的物流衔接过程。越库系统可以在短时间内处理大量物品，加快库存周转速度，减少库存需求空间和客户响应时间，在控制物流成本的同时，提高客户服务水平。

目前，研究人员在越库场景和求解目标方面展开广泛的研究。如：Yu 等[1] 根据越库门的数量、是否有临时库存与集送货车辆进出的次数提出 32 种越库组合方法，并着重研究带有临时库存的单集、送货门的越库模型。Yu[2] 在先前研究的基础上，进一步研究了多集货门及送货门的越库模型。Madani-Isfahani 等[3] 以运作时间作为目标函数建立了多越库门的越库模型。Mohtashami[4] 建立了允许送货车辆反复进出装货平台的越库模型，在车辆交换时间较短的情况下有较好的表现。

在求解方面，以智能算法为主，较为典型的有禁忌搜索算法、模拟退火算法和遗传算法等。Madani-Isfahani 等[3] 通过萤火虫算法求得的越库车辆序列比模拟退火算法求得的序列运作时间短。Arabani 等[5] 建立了带有临时库存的单集、送货门的越库模型，采用多种智能算法（如遗传算法、蚁群算法与粒子群算法等）求解相应问题。Soltani 等[6] 运用模拟退火算法和混合变量邻域搜索算法求解大规模的越库车辆排序问题。Assadi 等[7] 建立混合线性规划模型，采用模拟退火算法和遗传算法求解相应问题。缪朝炜等[8] 采用自适应遗传算法求解带有车辆容量限制以及时间窗约束的越库车辆排序问题。

和声搜索算法作为新兴的启发式算法，具有概念容易理解、抽样简单和参数变量少的优点。针对当前研究存在的不足，本文将和声搜索算法用于越库车辆排序问题的优化求解。

1　描述及模型设计

1.1　问题描述

假设越库系统仅有一个卸货平台和一个装货平台，在装货平台前存在临时库存。当到达装货平台的货物与当前送货车辆的需求不匹配时，物品可以存储在临时库存中，等到合适的送货车辆进入卸货平台后再将货物进行装载。越库系统作业流程如图 1 所示。

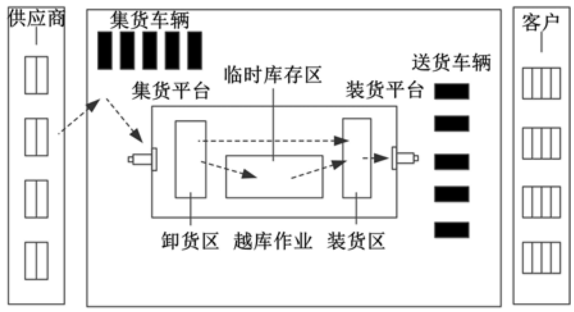

图 1　越库作业流程图

Fig. 1　Flow chart of cross docking

1.2　数学模型

建立模型前需进行如下假设：

（1）所有的集、送货车辆都可以被使用，且集、送货作业可以同时进行。

（2）禁止送货车辆同时从集货车辆和临时库存装货。

（3）临时库存大小没有限制，但物品不允许长期存储于临时库存中。

（4）每种类型的集货物品总数等于每种类型的送货物品总数。

（5）集货车辆所装载的不同类型的物品卸货顺序可以随意确定。

（6）送货车辆物品装货顺序与集货车辆物品卸货顺序保持一致。

（7）所有集、送货车辆因交替装卸货所导致的延迟时间一致。

（8）所有物品从集货平台到装货平台的移动时间相等。

（9）集、送货车辆每次只能卸载或装载一个物品，物品装卸货均耗 1 单位时间。

本文以越库作业完工时间 T 为目标函数建立数学模型，首先对建模所需数学符号做如下定义：T 为总运作时间；c_i 为集货车辆 i 进入集货平台的时刻；F_i 为集货车辆 i 离开集货平台的时刻；d_j 为送货车辆 j 进入装货平台的时刻；L_j 为送货车辆 j 离开装货平台的时刻。$v_{ij}=1$ 表示有物品从集货车辆 i 移动到送货车辆 j，$v_{ij}=0$ 表示其他情况。$p_{ij}=1$ 表示在集货车辆序列中集货车辆 i 排在集货车辆 j 之前，$p_{ij}=0$ 表示其他情况。$q_{ij}=1$ 表示在送货车辆序列中送货车辆 i 排在送货车辆 j 之前，$q_{ij}=0$ 表示其他情况。R 为集货车辆数；S 为送货车辆数；N 为物品种类数；r_{ik}

为最初装载在集货车辆 i 中的 k 物品总数；s_{jk} 为最初送货车辆所需要 k 物品的总数；D 为因装卸货车辆交替所耽搁的时间；V 为物品从集货平台到装货平台移动时间；x_{ijk} 为集货车辆 i 转移物品 k 到送货车辆 j 的数量；M 为较大正实数。

目标函数 P_0 为：

$$\min T$$

$$\text{s.t.}\quad T \geqslant L_j, j \in \forall \tag{1}$$

$$\sum_{j}^{S} x_{ijk} = r_{ik}, i \in \forall, k \in \forall \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{R} x_{ijk} = s_{jk}, j \in \forall, k \in \forall \tag{3}$$

$$x_{ijk} \leqslant M v_{ij}, i \in \forall, j \in \forall, k \in \forall \tag{4}$$

$$F_i \geqslant c_i + \sum_{k=1}^{N} r_{ik}, i \in \forall \tag{5}$$

$$c_j \geqslant F_i + D - M(1 - P_{ij}) \tag{6}$$

$$i \in \forall, j \in \forall, i \neq j$$

$$c_i \geqslant F_j + D - M p_{ij} \tag{7}$$

$$p_{ii} = 0, i \in \forall \tag{8}$$

$$L_j \geqslant d_j + \sum_{k=1}^{N} s_{jk}, j \in \forall \tag{9}$$

$$d_j \geqslant L_i + D - M(1 - q_{ij}) \tag{10}$$

$$i \in \forall, j \in \forall, i \neq j$$

$$d_i \geqslant L_j + D - M q_{ij} \tag{11}$$

$$i \in \forall, j \in \forall, i \neq j$$

$$q_{ii} = 0, i \in \forall \tag{12}$$

$$L_j \geqslant c_i + V + \sum_{k=1}^{N} x_{ijk} - M(1 - v_{ij})$$

$$i \in \forall, j \in \forall \tag{13}$$

以上所有变量均大于等于零。

集货车辆货品一部分直接搬送到送货车辆上，一部分暂存于临时库存中。货品直接转移到送货车辆上比转移到临时库存后再转移到送货车辆上所需时间少。为此，货品转移到临时库存中的数量越少，总越库作业所需时间越少。储存在临时库存中的物品数量多少由集、送货车辆之间的排序引起，因此集、送货车辆排序的优劣可以通过临时库存中物品数量的多少判断。

为此，求解越库数学模型需设计计算临时库存所存储物品数量的方法，首先对符号进行如下定义：t_i^r 为集货车辆 i；t_j^s 为送货车辆 j；T^r 为已被安排顺序的集货车辆组；T^s 为已被安排顺序的送货车辆组；L_k 为临时库存中各种货品数量集合；r'_{ik} 为在某一次迭代次数中集货车辆 i 所装载的产品类型 k 的物品数量；s'_{jk} 为在某一次迭代次数中送货车辆 j 所需要的产品类型 k 的物品数量；P_{ij}^{RT} 为集、送货车辆都被排序后，由集货车辆 i 转移到临时库存的物品总数；P_j^{AT} 为由送货车辆 j 对应的集货车辆发送到临时库存的物品总数；P^{AT} 为所有的集货车辆发送到临时库存的物品总数。

目标函数 P_1 为：

$$\begin{cases} \min\ P^{AT} \\ P^{AT} = \sum_{j=1}^{S} P_j^{AT} \end{cases} \tag{14}$$

Step1 生成 $T^r = \{t_1^r, t_2^r, \cdots, t_{R-1}^r, t_R^r\}$，$T^s = \{t_1^s, t_2^s, \cdots, t_{S-1}^s, t_S^s\}$。

Step2 根据集、送货车辆顺序，将集货平台上集货车辆 t_i^r 上的货品装载到装货平台上送货车辆 t_j^s 上。

Step2.1 如果送货车辆 t_j^s 没有装满所需货品，即，如果 $\sum_{k=1}^{N}[\max\{s'_{jk} - r'_{ik}, 0\}] \neq 0$。

将临时库存中 L_k 货品装入送货车辆 t_j^s 中，更新 L_k、s'_{jk}。若装满所需货品，进入 Step3；若没有装满所需货品，将集货车辆 t_i^r 上的货品放入临时库存 L_k 中，更新 L_k、$t_{i'}^r$、s'_{jk}，计算 P_{ij}^{RT}，进入 Step2。这里 P_{ij}^{RT} 计算公式如下：

$$P_{ij}^{RT} = \sum_{k=1}^{N}[\max\{r'_{ik} - s'_{jk}, 0\}] \tag{15}$$

Step2.2 如果送货车辆 t_j^s 装满所需货品，即，如果 $\sum_{k=1}^{N}[\max\{s'_{jk} - r'_{ik}, 0\}] = 0$。

计算 P_{ij}^{RT}，进入 Step3。这里 P_{ij}^{RT} 计算公式如下：

$$P_{ij}^{RT} = \sum_{k=1}^{N}[\max\{(r'_{ik} - s'_{jk}) - s'_{jk}, 0\}] \tag{16}$$

Step3 计算 P_j^{AT}。

$$P_j^{AT} = \sum_{i=1}^{R} P_{ij}^{RT} \tag{17}$$

Step4 若存在送货车辆没有装满所需货品，更新送货车辆 t_j^s、r'_{ik}，进入 Step2；若所有送货车辆均装满所需货品，计算 P^{AT}：

$$p^{AT} = \sum_{j=1}^{S} p_j^{AT} \tag{18}$$

2 改进的和声搜索算法

2.1 和声搜索算法求解过程

和声搜索（Harmony search，HS）算法由 Geem 等于 2001 年提出[9]。首先在和声解集

HM 内随机生成 HMS 组初始解，然后以记忆库取值概率 $HMCR$ 选择是在 HM 内搜索新解，还是在和声记忆库外取值。若解来自于 HM 内，则需依据音调调整概率 PAR 选择是否对新解作频宽 BW 大小的局部扰动。最后，判断新解目标值是否优于 HM 内的最差解。若是，则用新解替换最差解，继续迭代，直至满足终止条件为止。

2.2　改进的和声搜索算法

基本的和声搜索算法其参数是固定的，但参数在不同迭代时期有不同的表现形式。例如，在迭代初期较大的 BW 搜索较优结果的能力较好，但在迭代末期较小的 BW 有更好的表现[10,11]。为提高 HS 算法的搜索能力，IHS 算法在音调调整步骤对 PAR 和 BW 做动态调整。BW 和 PAR 的计算过程如式(19)(20)(21)所示：

$$\mathrm{PAR}(gn)=\mathrm{PAR}_{\min}+\frac{(PAR_{\max}-PAR_{\min})}{NI}\times gn \quad (19)$$

$$BW(gn)=\mathrm{BW}_{\max}\exp(c\times gn) \quad (20)$$

$$c=\ln\left(\frac{\mathrm{BW}_{\min}}{\mathrm{BW}_{\max}}\right)\Big/ NI \quad (21)$$

式中：$PAR(gn)$、$BW(gn)$ 分别为每一次迭代的 PAR 和 BW 的值；$PAR_{\max}$、$PAR_{\min}$ 分别为 PAR 的最大值和最小值；$BW_{\max}$、$BW_{\min}$ 分别为 BW 的最大值和最小值；gn 为迭代次数；NI 为总迭代次数。

2.3　参数设定

田口试验被广泛地应用于工程设计中，用来确定最优的试验条件。每个参数的影响能力可以通过信噪比（Signal to noise ratio，SNR）表示，通过 SNR 在控制因子中寻找变异量小的组合。根据 HS 算法和 IHS 算法参数特点，设置不同参数水平如表 1 和表 2 所示。以试验组 1 中数据为基础，通过 MINITAB 软件得到两种算法的参数在不同水平下的信噪比主效应图如图 2 和图 3 所示。

表 1　HS 算法的因子及其水平

Table 1　Levels of parameters for HS

变量	HS 变量水平			
	L_1	L_2	L_3	L_4
HMS	5	10	15	20
$HMCR$	0.7	0.9	0.95	0.99
PAR	0.2	0.4	0.6	0.7
BW	0.01	0.35	0.7	1.0

表 2　IHS 算法的因子及其水平

Table 2　Levels of parameters for IHS

变量	HS 变量水平		
	L_1	L_2	L_3
HMS	10	15	20
$HMCR$	0.70	0.85	0.99
$PAR_{\min}$	0.05	0.25	0.40
$PAR_{\max}$	0.60	0.80	0.90
$BW_{\min}$	0.05	0.25	0.40
$BW_{\max}$	0.80	0.90	1.00

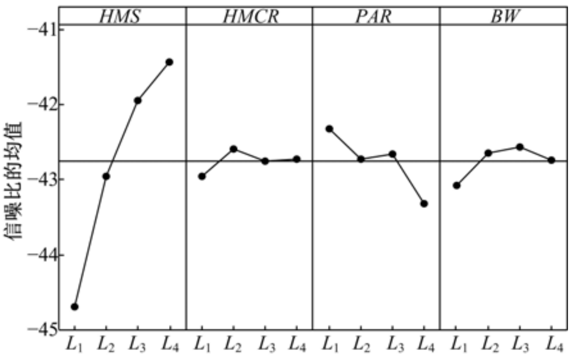

图 2　HS 参数的信噪比主效应图

Fig. 2　Main effects plot for SNR of HS factors

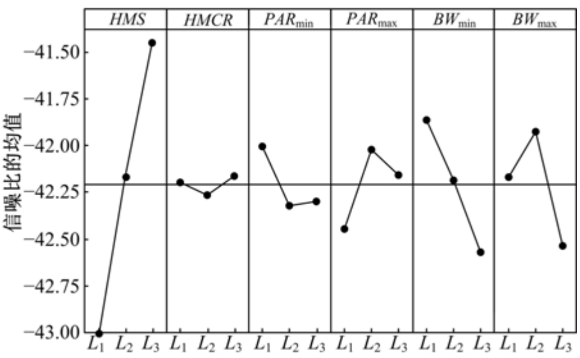

图 3　IHS 参数的信噪比主效应图

Fig. 3　Main effects plot for SNR of IHS factors

根据图 2 可知，HS 算法的 4 种参数中，HMS 对信噪比的影响最大，PAR 的影响次之，然后分别是 BW 和 $HMCR$ 。根据图 2 选取参数 HMS 为 20，$HMCR$ 为 0.9，PAR 为 0.2，BW 为 0.7。

根据图 3 可知，IHS 算法的 6 种参数中，HMS 对信噪比的影响最大；$BW_{\min}$ 和 $BW_{\max}$ 的影响分别次之；然后是 $PAR_{\max}$ 和 $PAR_{\min}$；最后是 $HMCR$ 。根据图 3 选取参数 HMS 为 20；$BW_{\min}$ 和 $BW_{\max}$ 分别为 0.05 和 0.9；$PAR_{\max}$ 和 $PAR_{\min}$ 分别为 0.8 和 0.05；$HMCR$ 为 0.99。

3 实例结果对比分析

本文采用文献[1]中的20个测试组数据。利用Matlab编程实现应用改进的和声搜索算法求解越库系统数学模型。20个测试组用IHS算法、HS算法和TS算法各计算10次，分别得到每组数据的试验最优解、试验最差解和试验平均解。应用枚举法求解20组数据最优解与最差解。如表3所示，根据枚举法对比TS算法、HS算法和IHS算法，3种算法的试验最优解为最优解的数量分别为12、17、19；试验最差解的均值分别为304.1、312.7和409.4，其中IHS算法的试验最差解整体小于HS算法和TS算法的试验最差解；试验总平均值分别为310.065、277.915和273.385，其中IHS算法的试验总平均值整体小于HS算法和TS算法的试验总平均值。

表3 算法的试验解比较

Table 3 Comparison of experimental solutions

组别	最优解	TS算法			HS算法			IHS算法		
		试验最优解	试验最差解	平均解	试验最优解	试验最差解	平均解	试验最优解	试验最差解	平均解
1	93	93	164	115.1	93	137	110.6	93	133	98.6
2	147	165	203	178.5	147	204	162.7	147	210	155.1
3	233	233	233	233	233	256	235.3	233	233	233
4	265	286	427	343.1	265	312	287.3	265	299	293.2
5	180	217	327	247.1	180	217	194.8	180	217	191.1
6	151	151	219	157.8	151	162	154.3	151	162	153.2
7	127	127	158	140.3	136	195	142.1	136	158	140.6
8	241	241	352	266.4	251	262	258.3	241	262	257.3
9	204	204	265	222	204	233	214.2	204	226	210.6
10	155	155	259	175.8	155	155	155	155	155	155
11	204	204	403	242.7	204	259	234.9	204	259	226.4
12	472	472	870	585.5	480	485	484.5	472	485	483.1
13	310	346	725	463.9	310	427	389.7	310	427	379.6
14	305	305	572	388	305	386	324.8	305	386	317.4
15	219	256	349	287	219	295	261	219	275	253
16	239	252	513	324.6	239	266	250.8	239	259	250.2
17	300	300	405	360.9	300	390	354	300	390	342
18	290	290	522	392.3	290	381	349.2	290	375	348.6
19	459	504	568	552.8	459	564	484.8	459	564	481.3
20	429	433	654	524.5	429	668	446	429	607	498.4

4 结束语

本文介绍了一种新颖的配送方式——越库作业，研究了只有一个入库门和一个出库门且带有暂存区的越库中心的作业车辆调度问题。从越库作业的总完工时间出发，以运作时间最小化为目标，建立了越库车辆排序问题的数学模型。为了减小计算中延迟时间的影响，将总运作时间的求解转化为计算临时库存中存储的物品数量。采用改进的和声搜索算法求解问题的近似最优解，与基本和声搜索算法和禁忌搜索算法进行比较，结果表明：改进的和声搜索算法在最优解数量与解整体优越性方面均优于基本和声搜索和禁忌搜索算法。

参考文献：

[1] Yu W, Egbelu P J. Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 184(1): 377-396.

[2] Yu W. Truck scheduling for cross docking systems with multiple receiving and shipping docks[J]. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 2015, 7(2): 174-196.

[3] Madani-Isfahani M, Tavakkoli-Moghaddam R, Naderi B. Multiple cross-docks scheduling using two meta-heuristic algorithms[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 74: 129-138.

[4] Mohtashami A. Scheduling trucks in cross docking

systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks[J]. Applied Soft Computing，2015，36(C)：468-486.

[5] Arabani A R B，Ghomi S M T F，Zandieh M. Metaheuristics implementation for scheduling of trucks in a cross-docking system with temporary storage[J]. Expert Systems with Applications，2011，38(3)：1964-1979.

[6] Soltani R，Sadjadi S J. Scheduling trucks in cross-docking systems：a robust meta-heuristics approach [J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2010，46(5)：650-666.

[7] Assadi M T，Bagheri M. Scheduling trucks in a multiple-door cross docking system with unequal ready times[J]. European Journal of Industrial Engineering，2016，10(1)：103-125.

[8] 缪朝炜，苏瑞泽，张杰. 越库配送车辆调度问题的自适应遗传算法研究[J]. 管理工程学报，2016，30(4)：166-172.
Miao Zhao-wei，Su Rui-ze，Zhang Jie. An adaptive genetic algorithm for the truck scheduling problem in the crossdock distribution center[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management，2016，30(4)：166-172.

[9] Geem Z H，Kim J H，Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm：harmony search[J]. Simulation，2001，76(2)：60-68.

[10] Mahdavi M，Fesanghary M，Damangir E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation，2007，188(2)：1567-1579.

[11] Valaei M R，Behnamian J. Allocation and sequencing in 1-out-of-N heterogeneous cold-standby systems：multi-objective harmony search with dynamic parameters tuning[J]. Reliability Engineering & System Safety，2016，157：78-86.