

文化算法在越库作业调度中的应用

毛道晓*, 徐克林, 张志英

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

(* 通信作者电子邮箱 maodaoxiao@126.com)

摘要: 研究只有一个入库门和一个出库门的带有限暂存区的越库中心的作业调度问题。以额外搬运成本、暂存成本和换车成本总和最小化为目标, 建立动态规划模型。构建了具有两层进化机制的文化算法对问题进行求解。算法的种群空间采用遗传算法作为进化模式, 信度空间接收种群空间的优良个体形成知识并指导遗传算法的选择操作。通过在大、小规模情形下进行数值实验, 验证了文化算法的有效性。

关键词: 文化算法; 越库; 调度; 动态规划; 遗传算法; 贪婪算法

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A

Application of cultural algorithm in cross-docking scheduling

MAO Daoxiao*, XU Kelin, ZHANG Zhiying

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper studied on the operational scheduling problem in a cross-docking center of a single receiving and a single shipping door with finite temporary storage. A dynamic programming model was built with the objective to minimize the costs including additional handling, temporary storage and truck replacement cost. A cultural algorithm with two layer evolutionary mechanism was proposed to solve the problem. The evolution of population space adopted genetic algorithm, and the belief space received good individual from population space to form knowledge which was used to guide evolution in turn. Numerical experiments under small and big scale situations prove the validity of proposed cultural algorithm.

Key words: cultural algorithm; cross-docking; scheduling; dynamic programming; Genetic Algorithm (GA); greedy algorithm

0 引言

越库(Cross-docking)作为一种相当有效的物流技术,可以快速地将来自不同资源的货物,实现对外运输的规模经济效益,近些年被广泛地应用于不同领域的许多公司,如零售公司和零担运输公司等^[1-2]。越库的定义是在物流的任何中间点(仓库或配送中心)只实现收发货的功能而消除货物存储与订单获取的功能^[3]。货物从不同的方向运往越库中心,在越库中心完成卸载、分拣、存储、拣选和装车,然后送往不同的客户,该过程一般不超过 24 h^[4]。

尽管越库的概念相对简单,但实施却十分复杂,国内外关于越库的研究尚不多见。根据决策水平的不同,对越库的研究大致可以分为 3 个层次,即战略层、策略层和运作层^[5]。

战略层的研究主要考虑公司长期的计划,主要研究有越库中心选址^[1]和越库中心最佳形状确定^[6]等;策略层主要考虑中期计划,如仓门分配^[7]和车辆路径优化^[8]等;运作层主要考虑越库中心短期计划,如作业时间优化^[9]和作业调度^[4]等。本文研究的内容属于运作层,目前,国内外关于运作层的研究较少,主要有:马东彦等^[10]以总加权完工时间最小化为目标,提出逆向动态规划算法求解越库配送排序问题;Chen 等^[11]从调度的角度出发,提出了以完工时间最小化为目标函数的两阶段越库调度模型,在证明该问题是一个 NP 难问题的基础上,运用分支定界算法进行求解;俞亮等^[12]研究了两阶段越库调度问题,以最小化误工个数为目标,建立混合整数

规划模型,并提出了基于最早交货期的启发式算法求解问题。

然而上述文献大多是通过调度出入库车辆的顺序来优化作业时间而不考虑越库中心内部的作业成本。但是在现实中,越库中心内部作业十分复杂,如何有效地进行作业调度,降低作业成本对于企业来说十分重要。因此, Larbi 等^[5]在三种调度措施下研究越库中心内部转运的调度问题,以额外搬运成本和换车成本总和最小化为目标,构建算法进行求解。但是和上述其他文献一样, Larbi 等并不考虑暂存区的容量。而现实中的越库中心的面积十分有限,其暂存区的容量不可能无限大,因此在对问题进行研究时考虑暂存区容量具有实际意义。本文在文献^[5]的基础上,进一步研究在入库车信息已知的情况下,考虑暂存区的容量有限,以额外搬运成本、暂存成本和换车成本总和最小化为目标,建立动态规划模型,并构建文化算法进行求解。

1 越库调度模型建立

1.1 问题描述

在一个三级供应链网络中,假设有 m 个供应商、1 个越库中心和 n 个客户。由若干辆车将 m 个供应商的货物运到越库中心,在越库中心完成分装作业后再由若干辆车分别运往 n 个客户。当一辆入库车到达越库中心时,决策者需要决策将货物装入出库车或暂存。若决定将运往某客户的货物装车,并且恰好开往该客户的出库车占据出库门,则不产生换车成本,否则产生换车成本;若决定将运往某客户的货物暂存,则

收稿日期: 2012-11-05; 修回日期: 2012-12-05。

作者简介: 毛道晓(1991-),男,浙江乐清人,硕士研究生,主要研究方向:物流系统规划和优化; 徐克林(1945-),女,上海人,教授,博士生导师,主要研究方向:工业工程、物流工程与管理; 张志英(1971-),男,内蒙古人,副教授,博士,主要研究方向:调度控制、制造系统仿真。

产生额外搬运成本和暂存成本。为突出问题特性,假设:

1) 货物采用整车运输的方式,即只需一辆车即可完成供应链两节点间的货物运输;

2) 入库车到达的时间间隔很短,每次决策发生在其到达的时刻,决策针对入库车的货物进行,每次最多只能对一个客户的货物进行装车作业并在这之后将暂存区中与之同目的地的货物装车,在下一辆入库车达到之前,该客户的车一直占据出库门;

3) 对一辆入库车的货物完成决策后,如运往某客户的货物装车完毕,则该车立即离开出库门,下一辆入库车到达后,由另一辆出库车占据出库门,该过程不产生换车成本;

4) 当货物量较大时,可能会发生不论决策者如何决策,需要暂存的货物数量均大于暂存区容量的现象,因此规定超出暂存区容量的货物其暂存成本是未超出部分的若干倍。

1.2 动态规划模型

模型中用到的符号说明如下: m 为入库车数量; n 为出库车数量; h 为单位数量货物的暂存成本; g 为单位数量货物的额外搬运成本; t 为单次换车成本; x_{ij} 为从第 i 辆入库车运往第 j 个客户的货物数量 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$); q_i 为第 i 量入库车服务客户的个数; d_j 为每日运往客户 j 的货物总量, $d_j = \sum_{i=1}^m x_{ij}$; d_j^i 为对第 i 辆入库车作业结束后客户 j 未被满足的需求量; r 为越库中心暂存区的容量; r_k^* 为第 i 辆车到达时暂存区剩余的容量; w 为溢出暂存区的货物其暂存费用的惩罚倍数。

根据上述符号,建立如下动态规划模型。

1) 阶段:根据入库车的数量将问题分为 m 个阶段。

2) 状态:用一个二维矢量 L_k 表示模型中的状态,其中 $L_k = (e_k, y_k)$ ($k = 0, 1, \dots, m$)。当 $k > 0$ 时, e_k 表示对第 k 辆入库车作业结束后,开往客户 e_k 的出库车占据出库门; y_k 表示对第 k 辆入库车作业结束后暂存区中货物的集合,显然此时状态最多有 $\prod_{i=1}^k q_i$ 种。当 $k = 0$ 时, L_0 为初始状态,此时尚无入库车达到,故 e_0 为 1 到 n 中的任意值, y_0 为空集。

3) 决策和策略:对于任意一辆入库车,对其的决策过程 u 为确定将该车上装有的何种货物进行出库装车作业。当对所有入库车都决策完毕时便会产生由每次决策构成的策略,显然,这样的策略共有 $\prod_{i=1}^m q_i$ 种。

4) 状态转移方程:对第 k 辆入库车作业结束后,记某一状态 L_k 下的阶段成本为 $f_k(L_k)$,对第 $k+1$ 辆入库车采用某一决策 u 后的阶段成本按式(1)计算:

$$f_{k+1}(L_{k+1}) = \min \{f_k(L_k) + C_u(L_k)\} \quad (1)$$

其中 $f_0(L_0) = 0$, $C_u(L_k)$ 表示在状态 L_k 下采用决策 u 的成本。它是由额外搬运成本、暂存成本和换车成本组成,按式(2)计算:

$$C_u(L_k) = \sum_{j \neq e_{k+1}} x_{(k+1)j} \times g + \sum_{j \neq e_{k+1}} x_{(k+1)j} \times h + \left(\sum_{j \neq e_{k+1}} x_{(k+1)j} - r_{k+1}^* - \sum_{i=1}^k \sum_{j=e_{k+1}} x_{ij} \right) \times (w-1) \times h \times v_{k+1}^1 + t \times v_{k+1}^2 \quad (2)$$

其中: v_{k+1}^1 和 v_{k+1}^2 为两个 0-1 变量,其值分别由式(3)、(4)决定。

$$v_{k+1}^1 = \begin{cases} 0, & \sum_{j \neq e_{k+1}} x_{(k+1)j} \leq r_{k+1}^* + \sum_{i=1}^k x_{ie_{k+1}} \\ 1, & \sum_{j \neq e_{k+1}} x_{(k+1)j} > r_{k+1}^* + \sum_{i=1}^k x_{ie_{k+1}} \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{k+1}^2 = \begin{cases} 0, & d_{e_k}^k = 0 \text{ 或 } (d_{e_k}^k \neq 0, e_{k+1} = e_k) \text{ 或 } k = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

5) 全局最优:对每个 $L_m, f_m(L_m)$ 的最小值即为问题的最优解。

2 文化算法

文献[11]表明,尽管只有一个人库门和一个出库门的越库中心是一个简单的例子,但其调度问题仍然是个 NP 难问题,因此需要构建人工智能算法进行有效的求解。

文化算法(Cultural Algorithm, CA)作为一种新的进化算法是由 Reynolds^[13]在 1994 年提出的,是以文化进化思想为指导的智能优化算法。它由实现个体进化的种群空间和实现知识更新的信度空间组成,采取两层进化机制^[14]:种群空间的个体通过不断的进化产生更加优良的个体信息,并将其作为样本提供给信度空间;信度空间接受信息后在更新函数的作用下以知识的形式储存这些信息并最终用以指导种群空间的进化过程。算法模型如图 1 所示。

本文构建的文化算法以遗传算法(Genetic Algorithm, GA)作为种群空间进化的模式,将种群进化过程中得到的优良个体提供给信度空间,通过更新函数的作用在信度空间形成知识,并以一定的概率作用于种群空间进化的选择操作,算法的基本结构如图 2 所示。

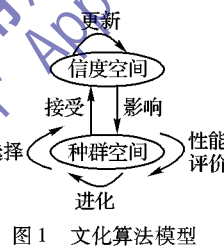


图1 文化算法模型

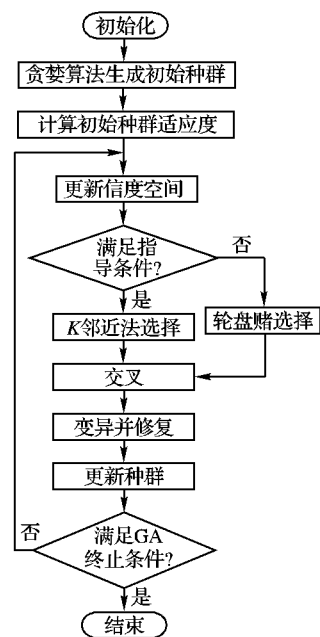


图2 文化算法流程

2.1 种群空间的设计

2.1.1 编码方式

由于实数编码在解的质量和算法效率方面均优于二进制编码,且实数编码所表示的问题更接近问题本身^[15],故本文采用实数编码。编码位串的长度为 m ,染色体序列为 (z_1, z_2, \dots, z_m) 。基因位的取值范围为 $\{1, 2, 3, \dots, n\}$,第 i 个基因位的数字 z_i 表示对第 i 辆入库车中运往客户 z_i 的货物进行装车处理。因此一条染色体就代表动态规划模型中的一个策略。

2.1.2 初始种群

本文采用贪婪算法生成初始种群。由于暂存区的容量有限,因此尽可能早地将数量最大的货物装车可以在一定程度上降低暂存区溢出的可能,减少惩罚成本。贪婪算法的基本思想是比较对相邻两辆入库车中数量最大的货物进行作业后的阶段成本

以确定染色体中相邻两个基因位的基因值,依次进行直到染色体上所有的基因值都确定。然而这样最多只能生成 m 个不一样的个体,为了保持种群的多样性,还需随机产生剩余的个体。贪婪算法产生初始种群的具体步骤如下:

步骤 1 对于每一辆入库车 i ,将 x_{ij} 从大到小进行排序,取最大的 x_{ij} 对应的 j 赋值给 e_i 。

步骤2 从第1辆入库车开始(即 $i = 1$),取 e_i 作为染色体的第 i 位编码并进行步骤3和步骤4(其中 $a > 0$)直至最后一辆车。

步骤3 对于 $a = i + 1, i + 2, \dots, m$,进行步骤3.1至3.2。

步骤3.1 若 $e_a = e_{a-1}$,则取 e_a 作为染色体的第 a 位编码并进行下一位基因编码;否则转步骤3.2。

步骤3.2 如果 $t + (x_{ae_{a-1}} - x_{ae_a})(g + h) \leq 0$,则取 e_a 作为染色体的第 a 位编码并进行下一位基因编码;否则取 e_{a-1} 作为染色体的第 a 位编码并进行下一位基因编码。

步骤4 对于 $a = i - 1, i - 2, \dots, m$,进行步骤4.1至4.2。

步骤4.1 若 $e_a = e_{a+1}$,则取 e_a 作为染色体的第 a 位编码并进行上一位基因编码;否则转步骤4.2。

步骤4.2 如果 $t + (x_{ae_{a+1}} - x_{ae_a})(g + h) \leq 0$,则取 e_a 作为染色体的第 a 位编码并进行上一位基因编码;否则取 e_{a+1} 作为染色体的第 a 位编码并进行上一位基因编码。

步骤5 随机产生若干个体,使初始种群中的个体数达到种群规模。

2.1.3 适应度函数

将对第 i 辆入库车完成操作后的阶段成本记为 $cb(i)$,对全部入库车完成操作后的成本记为 C ,则有:

$$C = cb(1) + cb(2) + \dots + cb(m) = \sum_{j \neq i_1} x_{ij} \times g + \sum_{j \neq i_1} x_{ij} \times h + \left(\sum_{j \neq i_1} x_{ij} - r \right) \times (w - 1) \times h \times v_1^1 + t \times v_1^2 + \sum_{i=2}^m \left(\sum_{j \neq i_i} x_{ij} \times g + \sum_{j \neq i_i} x_{ij} \times h + \left(\sum_{j \neq i_i} x_{ij} - r_i^* - \sum_{k=1}^{i-1} x_{ki} \right) \times (w - 1) \times h \times v_i^1 + t \times v_i^2 \right) \quad (5)$$

决策者希望成本 C 越小越好,于是本文设计适应度函数为:

$$f = B - C \quad (6)$$

其中 B 是一个大数。

2.1.4 选择

1) K 邻近法选择。

根据 K 邻近法的原理,将种群空间中的每个个体($ch1$)分别与信度空间中的每个优良个体($ch0$)进行相似性指数计算。具体计算公式如下:

$$Sum(ch1, ch0) = \sum_{i=1}^m ch1(i) \otimes ch0(i) \quad (7)$$

若两条染色体对应基因位上的值相等,那么 $ch1(i) \otimes ch0(i)$ 为1;否则为0。相似性指数 Sum 越大,表明种群空间的染色体与优良染色体越相近,其被选中的概率也越大。对于每个优良个体,从种群空间中按照相似性指数从高到低选择5个个体进入下一代。

2) 轮盘赌选择。

在轮盘赌选择中,个体被选择的概率按式(8)确定:

$$P_i = f_i / \sum_{j=1}^N f_j \quad (8)$$

其中: f_j 是个体 j 的适应度值, N 为种群规模。当在 $(0, 1)$ 产生的随机数 R_2 满足 $\sum_{j=1}^{i-1} P_j \leq R_2 < \sum_{j=1}^i P_j$,则个体 i 被选中。

2.1.5 交叉、变异与修复

交叉操作采用两点交叉的方式进行。首先产生一个随机数,若该数小于交叉率 P_c ,则进行交叉操作:随机产生两个交叉点,将双亲染色体上位于两个交叉点间的基因值进行互换,生成两个新的个体(如图3所示)。变异操作采用互换变异

的方式进行,即以一定的变异概率 P_m 随机选择一条染色体上的两个基因位,并将基因位上的基因值进行互换(如图4所示)。值得注意的是,由于入库车不一定载有每一个客户的货物,因此变异后的基因可能是非法的,需要对非法的基因进行修复。同样根据贪婪算法的思想,对于非法基因选择该辆入库车中 x_{ij} 最大的 j 作为该基因位上的基因值。

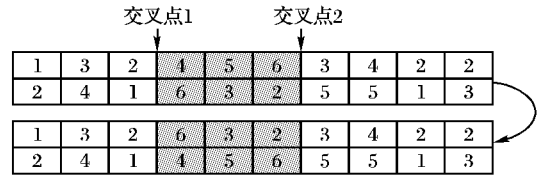


图3 交叉操作

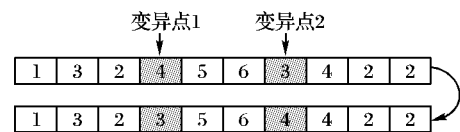


图4 变异操作

2.2 信度空间的设计

在文化算法的应用过程中,决定算法是否有效的关键之处在于选择的知识类型以及学习策略。即根据问题的不同特征,恰当地选择知识,并使知识有效地指导进化过程。为此本文进行了如下的设计。

2.2.1 信度空间初始化

由于一个个体代表一个策略,问题的解决需要一个尽可能好的策略,因此在算法设计时需要找到尽可能优良的个体。基于此,本文选用了包含优良个体信息的形势知识。信度空间存储当前种群空间中的优良个体,其初始化方式如下:将初始种群中的个体按照适应度值从大到小进行排序,并取前1/5的个体存入信度空间。这些优良个体就构成了形势知识。

2.2.2 信度空间更新

种群空间进化时,将当前种群空间中的个体按照适应度值从大到小进行排序,并依次与信度空间中的优良个体进行比较。若其值大于某个优良个体的适应度值,则将其插在该优良个体前面并剔除信度空间中末位的优良个体,直至某个个体适应度值小于信度空间中末位的优良个体,停止更新。

2.2.3 信度空间指导进化

在种群空间进化的过程中,信度空间在不断地积累更新知识。数值实验表明,在进化初期,信度空间积累的知识的的质量往往不高,若将此时的知识用于指导进化往往会导致早熟现象的发生,算法求解的质量较差。因此,本文设计一个随着进化代数 D 递减的函数 $R = (D + 30) / 2D$,将其作用于指导过程,以实现知识积累到一定程度后再指导种群空间进化的功能。函数 R 作用的机制为:当 $(0, 1)$ 间产生的随机数 R_1 大于 R 时,种群空间的选择操作采用 K 邻近法的方式进行,否则采用轮盘赌的方式进行。

2.3 算法终止条件的设计

本文设定两个终止条件,当满足其中任意一个时算法结束。终止条件1:当前最优解在规定的迭代次数内无法改善;终止条件2:达到预先设定的最大迭代次数。

3 数值实验

本文选取遗传算法(GA)作为文化算法(CA)的标杆,通过两者的比较,分析文化算法的性能。实验数据的产生方式如下:对于每个 m ,使 n 在 $[0.8m, 1.2m]$ 产生; x_{ij} 在 $[3, 9]$ 产

生并以0.5的概率取0,以模拟在实际情况中供应商不一定为每个客户服务的实际; $r = 50, h = 1, g = 0.2, t = 5, w = 3$; $P_c = 0.95, P_w = 0.005, N = 300$, 最大迭代次数为1000, 最大无法改善迭代次数为60。所有问题都在 T2370, 1.73 GHz 的处理器和 2 GB 内存的电脑上运算。

由于问题的 NP 难特性,问题的解空间会随 m 的增加迅速增加,算法的计算时间将会变得很长。因此,对于小规模问题,本文取 $m = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$, 对于大规模问题,取 $m = 20, 25, \dots, 50$ 进行数值实验。对于每个 m 运行 20 组不同的数据取其结果的平均值作为最终的结果,具体如表1、图5和图6所示。

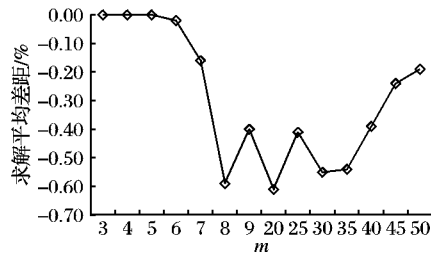


图5 CA与GA的求解差距

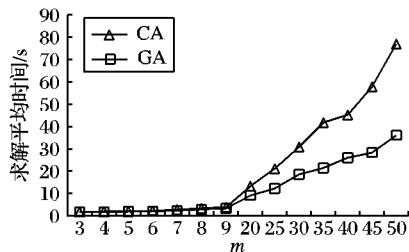


图6 CA与GA的求解时间的比较

表1 CA与GA的性能比较

供应商数量 m	客户数量 n	求解平均时间/s		求解平均差距/% (CA - GA) / CA
		CA	GA	
3	[2, 3]	1.8748	1.7594	0.00
4	[3, 4]	2.0229	1.8607	0.00
5	[4, 6]	2.1625	1.9492	0.00
6	[5, 7]	2.3172	2.1326	-0.02
7	[6, 8]	2.8602	2.4109	-0.16
8	[6, 10]	3.3648	3.0328	-0.59
9	[7, 11]	4.0250	3.3859	-0.40
20	[16, 24]	13.2531	9.2227	-0.61
25	[20, 30]	21.1422	12.3805	-0.41
30	[24, 36]	31.0125	18.6336	-0.55
35	[28, 42]	41.7922	21.4734	-0.54
40	[32, 48]	45.2867	26.0781	-0.39
45	[36, 54]	57.8883	28.4430	-0.24
50	[40, 60]	77.0695	36.1578	-0.19

由于研究的问题是成本最小化问题,因此计算结果越小表明方案越优。从表1和图5可以看出,在所测的14组数据中,除前3组外,文化算法求得的解的质量均优于遗传算法。以遗传算法为基准,文化算法求得的解与它的平均差距最大为0.61%,最小为0,这表明文化算法的信度空间构建的形势知识,以及知识对种群空间进化的指导都是有效的。

从表1和图6则可以看出,在小规模的情形下($m \leq 9$),文化算法求解用时略高于遗传算法;在大规模的情形下($m \geq 20$),随着 m 的增大,文化算法和遗传算法的求解时间均有所增加,但遗传算法求解时间增加相对缓慢。这表明,信度空间指导种群空间进化的过程在一定程度上会增加算法的

求解时间。

综合表1和图5~6可知,尽管文化算法求解用时高于遗传算法,但对于 $m = 50$ 的大规模问题,文化算法平均求解时间约为77s,处于可接受范围。同时,结合文化算法在求解质量方面的表现,可以认为本文所构建的文化算法是有效的。

4 结语

本文研究了带有限暂存区的越库作业调度问题。在只有一个入库门和一个出库门的越库中心,以额外搬运成本、暂存成本和换车成本总和最小化为目标,建立问题的动态规划模型。构建以遗传算法作为种群空间进化模式的具有两层进化机制的文化算法对问题进行求解。数值实验结果表明,文化算法中信度空间构建的知识及其对种群空间进化的指导是有效的,尽管因为信度空间对种群空间进化的指导增加了求解时间,但求解时间仍处于可接受范围内,同时所构建的文化算法的求解质量较遗传算法而言有所提升,算法具有良好性能。

参考文献:

- [1] ROSS A, JAYARAMAN V. An evaluation of new heuristics for the location of cross-docks distribution centers in supply chain network design [J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 55(1): 64-79.
- [2] van BELLE J, VALCKENAERS P, CATTRYSSSE D. Cross-docking: State of the art [J]. Omega, 2012(40): 827-846.
- [3] LI Y, LIM A. Cross docking - JIT scheduling with time windows [J]. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55(12): 1342-1351.
- [4] ALPAN G, LADIER A, LARBI R, et al. Heuristic solutions for transshipment problems in a multiple door cross [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(2): 402-408.
- [5] LARBI R, ALPAN G, BAPTISTE P, et al. Scheduling cross docking operations under full, partial and no information [J]. Computers & Operational Research, 2011, 38(6): 889-900.
- [6] BARTHOLDI J J, GUE K R. The best shape for a crossdock [J]. Transportation Science, 2004, 38(2): 235-244.
- [7] MIAO Z W, LIM A, MA H. Truck dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks [J]. Production, Manufacturing and Logistics, 2009(192): 105-115.
- [8] MUSA R, AMAOUT J, JUNG H. Ant colony optimization algorithm to solve for the transportation problem of cross-docking network [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 59(1): 85-92.
- [9] 但斌, 刘波. 物流配送中心直通配送运作时间优化研究 [J]. 管理学报, 2010, 7(2): 233-237.
- [10] 马东彦, 陈峰. 以总加权完工时间为目标的两台机越库排序的动态规划算法 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(5): 852-856.
- [11] CHEN F, LEE C Y. Minimizing the makespan in a two-machine cross-docking flow shop problem [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(1): 59-72.
- [12] 俞亮, 陈峰. 最小化误工个数的越库调度模型与启发式算法 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(12): 1984-1988.
- [13] REYNOLDS R G. An introduction to cultural algorithms [C] // Proceedings of the 3rd Annual Conference Evolution Programming. Singapore: World Scientific Publishing, 1994: 131-136.
- [14] 郭一楠, 王辉. 文化算法研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(9): 41-46.
- [15] 张琦, 曹江, 冯柯, 等. 基于两层决策和遗传算法的工程装备运用优化配置方法 [J]. 解放军理工大学学报, 2011, 12(4): 383-386.