

考虑港口忙闲时间窗约束的多式联运路径优化^①

郑红星^② 邵思杨^③ 吴云强

(大连海事大学交通运输工程学院 大连 116026)

摘 要 随着海运贸易量的持续增长,以港口为核心枢纽的多式联运引起了多方关注。为追求多式联运整体效益,立足承运商角度,研究集港模式下集装箱多式联运的路径优化问题,基于港口忙闲时间段考虑忙闲时间窗约束,兼顾中转节点的周期性时间窗以及各运输方式的班期限制,构建以总运输成本最小为目标的路径优化模型,并设计改进遗传算法(IGA)对模型求解。结果表明,与不考虑港口忙闲时间段相比,考虑该因素可令集港货物有效错开港口业务繁忙期,进而避免过高的预集港费和晚集港费;同时,忙碌时间窗越接近截港时刻,空闲时间窗之间的间隔越长,对承运商的影响越大,因此考虑港口忙闲时间窗的运输方案更为合理。

关键词 忙闲时间窗;班期限制;多式联运;路径优化;改进遗传算法(IGA)

0 引 言

多式联运凭借其运输灵活、可靠与环保的优势,成为了交通运输行业新的发展趋势。与此同时,大量外贸商品的出口流通形成了以港口为中心的集装箱多式联运运输方式,以港口为终点的多式联运集港运输模式引起了广泛关注。

近年来,国内外学者对集装箱多式联运路径优化进行的研究主要集中在时间窗约束和中转衔接两方面。

带时间窗的多式联运路径优化可细分为单一时间窗、模糊时间窗、混合时间窗。单一时间窗方面,吴晓莉等人^[1]以汽车销售为背景,建立了以总运输成本最小为目标的由单起点到多终点的优化模型,并通过蚁群算法求解。模糊时间窗方面,熊桂武^[2]和梁晓慷^[3]考虑到客户对运输时效性的要求,建立了以客户模糊满意度最大且运输成本最小为目标的多式联运路径优化模型;于雪峤等人^[4]考虑运输时

间客户满意度的同时,加入中转节点作业时间窗约束,建立了以总费用最小为目标的多式联运路径优化模型。混合时间窗方面,吕学伟等人^[5]考虑到运输方式的硬时间窗和收货时间的软时间窗,构建了以总运输成本最小为目标的混合时间窗模型;张小龙等人^[6]则将中转节点设置为软时间窗,将目的地节点设置为硬时间窗,建立了考虑运输成本、时间成本以及环境成本的多目标多式联运路径优化模型。纵观考虑时间窗的多式联运路径优化文献,大多数以运输总成本最小、客户满意度最大或者收益最大为优化目标,以转运次数、各节点货物流量平衡等为核心约束,兼顾货物抵达各节点的时间约束,构建数学模型,并设计相应的算法求解,最终给出最优的多式联运路径。

考虑中转衔接的文献可以细分为节点耗时和班期限制两方面。涉及节点耗时的文献中,王清斌等人^[7]认为转换时间和成本的变化会对运输方案选择产生影响,将转换时间设置为服从正态分布规律的非确定值,令转换成本随转换时间变化,以总成本

① 国家自然科学基金(71473024, 71872025)资助项目。

② 男,1971年生,博士,教授;研究方向:物流系统优化与仿真;E-mail: zhredstar@dlmu.edu.cn

③ 通信作者,E-mail: ssydwyyx0214@163.com

(收稿日期:2019-01-25)

最小为目标,建立了带有时间约束的混合整数规划模型。刘杰等人^[8]考虑到运输方式转换的实际性给出了运输方式中转备选集,并根据不同出发时间会对运输费用造成影响,建立了基于备选集的多式联运动态路径优化模型。辛春林等人^[9]考虑到危险品运输过程中,运输费用和人口风险具有较强的时变性,将中转作业细分为中转运输、卸货装货和等待出发3项子作业,构建了以费用和风险的加权值最小为目标的多式联运最短路径选择模型。刘松^[10]将中转节点耗时转换为路段权重,将考虑中转的多式联运问题转化为网络最短路径问题,并构建了以总时间最短为目标的多式联运路径优化模型。杨雄等人^[11]提出了基于路径多样性的网络节点影响力探测和评估方法,能够更细粒度地对节点影响力进行有效的排序。考虑到班期限制的文献中,彭勇等人^[12,13]提出了含班期限制的多式联运路径决策模型,验证了班期限制对多式联运路径决策有较大影响。在此基础上,又进一步建立了以总运输费用、总运输时间、总运输风险为优化目标的模型,求解得出考虑班期限制的多式联运路径优化模型更加合理这一结论。纵览考虑中转衔接的文献,大多数都将中转节点或者中转作业拆分开,以总成本最小、总运输时间最短或总运输风险最小为优化目标,重点兼顾中转等待成本,以场站换装能力限制、班期限制、各节点时间限制为核心约束,构建多式联运路径优化模型并求解。

综上所述,现有的文献从不同的视角对集装箱多式联运路径优化问题进行了研究,然而这些研究大多数都只考虑到运输过程中的总成本最小化或利益最大化,涉及终点节点处理货物工作效率的文献

较少。港口是货物及旅客的转运枢纽,其作业复杂多样,且与公路、铁路、海关等诸多口岸单位密切相关^[14]。在以港口为终点的多式联运作业中,港口的工作效率往往会对运输成本造成较大影响,若承运商没有考虑港口忙闲度,仅仅保证在船期截止前抵达港口,可能会因未能及时装卸货物耽误船期,也可能因过早抵达港口增加承运商的等待成本,故本文将港口的忙闲度纳入研究。

为此,本文在系统分析港口业务规律的基础上,预测港口堆场业务的忙闲时段,以其来约束出口集装箱抵港的时机,并考虑出口箱的船期和中转节点的现实条件,使多式联运承运商的总成本最少,最终给出出口集装箱多式联运的最优方案。

区别已有文献,本文重点考虑港口的忙闲时间窗,综合考虑中转节点的周期性时间窗以及中转节点各运输方式的班期。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

如图1所示,在一个按照运输枢纽层次划分层级的集装箱多式联运网络中,将一批货物从起点城市 O 运到终点港口 D 。中间有若干个可以进行运输方式转换的节点,节点城市转换运输方式需要一定的转换时间和转换成本,以及与中转时间成正比的中转等待成本。各中转节点都有带周期性的空闲时间窗,在空闲时间窗之外到达该节点需等待下一个空闲时间窗才能进行中转作业。每个节点发往下一个节点的水路和铁路运输都有固定的到达和离开时刻,公路运输可随时出发。

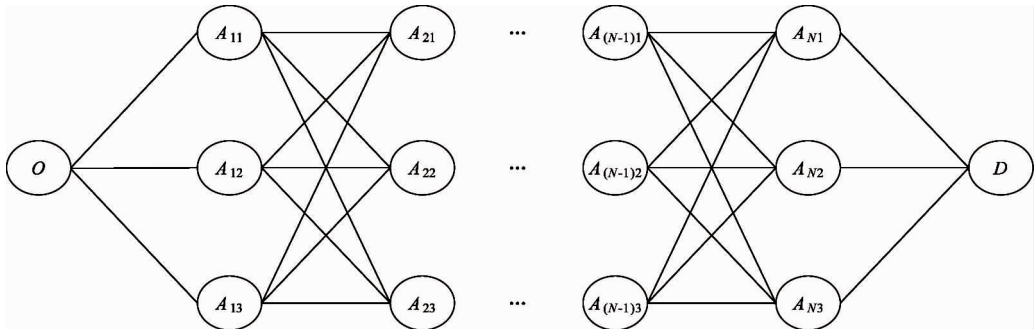


图1 集装箱多式联运网络图

本文问题可描述为:某一多式联运承运商承运一批出口集装箱货物,该货物需经一固定港口出口,重点考虑该港口的忙闲时间窗,兼顾出口集装箱的船期和中转节点的时间限制等现实约束,以运输成本、中转成本、中转等待成本和港口等待成本最小为优化目标,最终给出出口集装箱多种运输方式的最佳组合和最优路径。

1.2 假设条件

- (1) 货物不能拆分;
- (2) 任意两节点之间只能选择一种运输方式;
- (3) 运输方式的转换只能发生在节点处,且同一节点最多转换一次;
- (4) 运输工具与中转设施能力充足;
- (5) 火车和轮船有固定的出发时刻,汽车可随时出发;
- (6) 两节点之间,不同运输方式的运输距离相同,运输时间不同。

1.3 符号说明

基本符号与变量:

O : 运输任务的起始点; D : 运输任务的终止港口; i, j, h : 运输节点; A : 运输节点集合,且 $i, j, h \in A$; A^- : 中转节点集合; I : 与节点 i 相邻的节点集合; $\varphi(i)$: 节点 i 的外邻节点集合,即从节点 i 出发能够抵达的下一个节点的集合; $\psi(i)$: 节点 i 的内邻节点集合,即从其他节点出发能够抵达节点 i 的运输节点的集合; $\varphi(i), \psi(i) \in I \in A^- \in A$; V : 运输方式集合($k \in V, k = 1, 2, 3$ 分别表示公路、铁路、水路运输方式); T_i^E : 节点 i 开始进行中转作业的时刻; T_i^L : 节点 i 停止中转作业的时刻; T : 中转站空闲周期; $[T_i^E + \omega T, T_i^L + \omega T]$: 中转站的周期性空闲时间段, $\forall i \in A^-, \omega = 1, 2, 3 \dots$; T_D^{E1}, T_D^{E2} : 港口空闲时间段起始时刻; T_D^{L1}, T_D^{L2} : 港口空闲时间段终止时刻; $[T_D^{E1}, T_D^{L1}], [T_D^{E2}, T_D^{L2}]$: 港口的空闲时间段; T^L : 货物抵达港口的最晚时刻; t_i^{kl} : 在节点 i 处由 k 运输方式转换为 l 运输方式的操作时间; t_{ij}^k : 从节点 i 到节点 j 选择 k 运输方式的运输时间; c_i^{kl} : 在节点 i 处由 k 运输方式转换为 l 运输方式的转换成本; c_{ij}^k : 从节点 i 到节点 j 采用 k 运输方式的运输成本; t_i^m : 节点 i 处火车出发时刻; t_i^n : 节点 i 处轮船出发时刻; F_{ij}^k :

从节点 i 到节点 j 采用 k 运输方式的运输能力; G_{ij}^k : 从节点 i 到节点 j 采用 k 运输方式的运输总量; C : 运输任务总成本; Q_z : 惩罚系数,代表中转点的单位等待成本; Q_D : 惩罚系数,代表港口的单位等待成本; M : 一个无穷大的数。

中间变量:

t_i^a : 节点 i 处货物到达的时刻; t_i^d : 节点 i 处货物离开的时刻; t_d : 货物在港口等待集港的时间; t_i : 中转节点 i 处等待进行中转作业的时间。

$$t_i = \begin{cases} T_i^E - t_i^a & t_i^a < T_i^E \\ 0 & T_i^E + \omega T \leq t_i^a \leq T_i^L + \omega T \\ T_i^E + (\omega + 1)T - t_i^a & \\ T_i^L + \omega T < t_i^a < T_i^E + (\omega + 1)T & \end{cases}$$

决策变量:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{从节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 采用 } k \text{ 运输方式} \\ 0 & \text{从节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 采用其他运输方式} \end{cases}$$

$$y_i^{kl} = \begin{cases} 1 & \text{在节点 } i \text{ 处由 } k \text{ 运输方式转换为 } l \text{ 运输方式} \\ 0 & \text{在节点 } i \text{ 处不发生运输方式的转换} \end{cases}$$

1.4 模型构建

$$\min C = \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in V} x_{ij}^k \cdot c_{ij}^k + \sum_{i \in A} \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} y_i^{kl} \cdot c_i^{kl} + Q_z \cdot \sum_{i \in A^-} (t_i^d - t_i^a) + Q_D \cdot t_d \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{h \in \psi(i)} \sum_{k \in V} x_{hi}^k - \sum_{j \in \varphi(i)} \sum_{k \in V} x_{ij}^k = -1 \quad i = O \quad (2)$$

$$\sum_{h \in \psi(i)} \sum_{k \in V} x_{hi}^k - \sum_{j \in \varphi(i)} \sum_{k \in V} x_{ij}^k = 0 \quad \forall i \in A^- \quad (3)$$

$$\sum_{h \in \psi(i)} \sum_{k \in V} x_{hi}^k - \sum_{j \in \varphi(i)} \sum_{k \in V} x_{ij}^k = 1 \quad i = D \quad (4)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in I} \sum_{k \in V} x_{ij}^k = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} y_i^{kl} \leq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{h \in \psi(i)} x_{hi}^k + \sum_{j \in \varphi(i)} x_{ij}^l \geq 2y_i^{kl} \quad \forall i \in A, \forall k, l \in V \quad (7)$$

$$t_h^d + x_{hi}^k \cdot t_{hi}^k + y_i^{kl} \cdot t_i^{kl} - t_i^d \leq (1 - x_{hi}^k)M \quad \forall h, i \in A, \forall k, l \in V \quad (8)$$

$$t_i^a + y_i^{kl} \cdot t_i^{kl} + x_{ij}^l \cdot t_{ij}^l - t_j^a \leq (1 - x_{ij}^l)M \quad \forall i, j \in A, \forall k, l \in V \quad (9)$$

$$G_{ij}^k \leq F_{ij}^k \quad \forall i, j \in A, \forall k \in V \quad (10)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in V} x_{ij}^k \cdot t_{ij}^k + \sum_{i \in A^-} \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} y_i^{kl} \cdot t_i^{kl} + \sum_{i \in A^-} t_i \leq T^L \quad (11)$$

$$\sum_{h \in A} \sum_{k \in V} x_{hi}^k \cdot t_{hi}^k + \sum_{k \in V} y_i^{kl} \cdot t_i^{kl} \leq t_i^m \quad \forall i \in A, l = 2 \quad (12)$$

$$\sum_{h \in A} \sum_{k \in V} x_{hi}^k \cdot t_{hi}^k + \sum_{k \in V} y_i^{kl} \cdot t_i^{kl} \leq t_i^n \quad \forall i \in A, l = 3 \quad (13)$$

$$t_d = \begin{cases} T_D^{E1} - (t_i^d + t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k) & t_i^d + t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k < T_D^{E1} \\ 0 & T_D^{E1} \leq t_i^d + t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k < T_D^{L1} \\ T_D^{E2} - (t_i^d + t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k) & T_D^{L1} \leq t_i^d + t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k < T_D^{E2} \\ 0 & T_D^{E2} \leq t_i^d + t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k < T_D^{L2} \end{cases} \quad \forall i \in A, j \in D, \forall k \in V \quad (14)$$

其中,式(1)第1项为运输成本、第2项为中转成本、第3项为货物在中转节点等待进行转换作业的惩罚成本、第4项为货物在港口等待集港的惩罚成本;式(2)、(3)、(4)表示起点、中转节点、终点平衡约束,即保证能够获得一条从起点到终点的运输路径;式(5)表示两节点之间只能选择一种运输方式;式(6)表示每一节点最多换装一次;式(7)保证运输方式的一致性,即若节点 h 到节点 i 选择 k 运输方式且在节点 i 处进行运输方式 k 到 l 的转换,那么从节点 i 到节点 j 一定会选择 l 运输方式进行运输;式(8)、(9)表示相连2个节点之间的时间关系,即中转节点转换运输工具时可能存在中转等待时间;式(10)保证运量不超过运输方式的运输能力;式(11)保证货物在船期终止时刻前到达港口;式(12)表示若在节点 i 处选择火车运输,则需保证在该节点火车出发前完成中转;式(13)表示若在节点 i 处选择轮船运输,则需保证在该节点轮船出发前完成中转;式(14)表示货物在港口等待集港的时间 t_d 的计算方式, $(t_i^d + t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k)$ 表示货物抵达港口的时刻。

2 求解算法

本文设计了基于禁忌搜索(tabusearch, TS)思想的改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA),即在传统的遗传算法的基础上引入了禁忌搜索中禁忌表与邻域搜索的思想;同时,对遗传算法进行改进,设计了随迭代次数变化的动态参数 HR 和 PR ,并在GA算法中融入了接受准则的思想,以一定的概率接受劣解,从而使算法可以跳出局部最优解,算

法流程如图2所示。

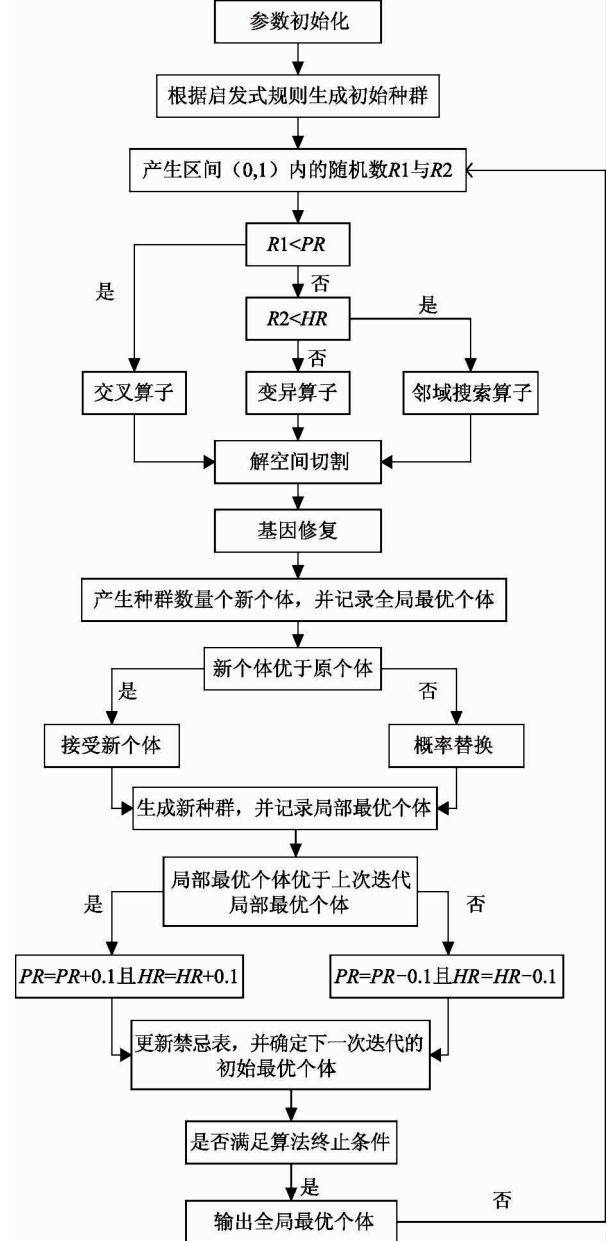


图2 算法流程图

2.1 解的表示与初始种群生成策略

本文采用双层染色体进行编码,其中第1层表示所经过的中转节点,且长度为运输枢纽层级数量,第2层表示各个运输节点之间所采用的运输方式,且长度为运输经过的所有节点数量减1。

鉴于所选中转节点受到节点空闲时间段与等待成本的影响,且运输方式主要受到运输成本与转换成本的影响以及所选中转节点与所采用运输方式相互影响,制定了如下初始种群生成策略。

步骤 1 初始化相关参数, m 表示第 1 层中转节点的数量, n 表示第 2 层中转节点的数量, j 表示种群内个体的序号, 令 $j = 1$;

步骤 2 随机从 m 与 n 中各自选择一个随机整数, 从而生成个体 j 第 1 行;

步骤 3 针对个体第 2 行, 比较出发节点与第 1 层所选中转节点之间不同运输方式的条件下到达中转节点的时刻与节点可以最早空闲时刻之间的差值, 选择最小差值所代表的运输方式, 若时间差值一样, 则选择此路段运输成本最低的运输方式, 把它作为出发节点与第 1 层中转节点之间的运输方式;

步骤 4 按照上述同样的方式, 获得第 1 层中转节点与第 2 层中转节点间的运输方式。比较不同运输方式下到达港口的时刻, 若时刻超过最晚时刻, 则删除此种运输方式, 且比较其他运输方式到达港口时刻与离它最近的港口空闲时间窗的差值, 选择差值最小所对应的运输方式, 当作第 2 层中转节点到达港口的运输方式;

步骤 5 令 $j = j + 1$, 若 j 大于种群规模 p , 则结束, 否则令 $i = 1$, 执行步骤 2。

2.2 新个体生成策略

本文采用 3 种新个体生成策略, 分别为交叉、变异以及邻域搜索策略, 具体策略如下。

(1) 交叉

选取最优个体第 1 层或者第 2 层的部分染色体片段与任意其他染色体对应部分进行交叉, 从而形成新染色体。

(2) 变异

任选一个染色体, 针对染色体第 1 层, 把某个中转节点换成此中转节点层的其他中转点; 或者针对染色体第 2 层, 把某 2 个运输节点之间的运输方式换成其他可以采用的运输方式, 从而形成新染色体。

(3) 邻域搜索策略

针对某个个体, 在已知中转节点的情况下, 改变其各节点之间的运输方式, 选择总成本最小时对应的个体当作新个体, 其具体步骤如下:

步骤 1 针对个体的第 1 层基因, 把起始点与第 1 层中转节点之间的运输方式换成其他可以采用的运输方式, 若到达第 1 层中转节点的时刻超过第

1 层中转节点与第 2 层中转节点之间的运输方式的出发时刻, 则在满足时间约束的条件下改变第 1 层中转节点与第 2 层中转节点之间的运输方式, 以此类推, 调整其他节点之间的运输方式, 从而生成一个新个体;

步骤 2 按照上述方式, 改变起始点与第 1 层中转节点之间的运输方式, 若已不存在没有采用过的运输方式, 则改变第 1 层中转节点与第 2 层中转节点之间的运输方式, 并在满足时间约束的条件下改变其他节点之间的运输方式, 直到生成所有满足条件的新个体;

步骤 3 计算各新个体的目标函数, 将总成本最低的个体当作原个体对应形成的新个体。

2.3 解空间切割

在初始种群生成与新个体生成过程中, 可能生成货物在节点的离开时刻超过运输方式的出发时刻或者货物到达港口的时刻超过最晚时刻的个体。针对此种个体, 需要在生成过程中进行删除, 从而提高算法的运行速度。

2.4 基因修复

在新个体生成过程中, 可能存在以下 2 种情况: (1) 节点之间不存在个体基因所对应的运输方式; (2) 到达节点的时刻早于节点最早开始空闲时刻。针对此 2 种情况, 需要进行基因修复, 使不可行解或者较劣解变成可行解或者较优解, 具体步骤如下:

步骤 1 针对任一个体, 从染色体第 2 行开始, 判断此种运输方式是否存在于此相邻 2 个节点之间, 若存在此种运输方式, 则转到步骤 2, 否则, 转到步骤 3;

步骤 2 计算到达第 1 个中转节点的时刻, 若小于节点最早开始空闲时刻, 则改变运输方式, 选取其他成本更低的运输方式; 计算到达第 2 个中转节点与港口的时刻, 按照上述方法改变其运输方式;

步骤 3 比较节点间存在的运输方式到达下一节点的时刻, 选取到达时刻与节点开始空闲时刻之间的差值最小所对应的运输方式替换之前的运输方式;

步骤 4 输出新生成的个体。

2.5 禁忌表

每一个适应度值几乎只与一个个体相对应, 因

此为了避免某个个体多次出现,把禁忌对象设为个体的适应度值。禁忌表分为短禁忌表和长禁忌表,短禁忌表为 $DC \times 1$ 的矩阵,长禁忌表为 $CC \times 1$ 的矩阵,其中 DC 为短禁忌表的长度, CC 为长禁忌表的长度。在每一次迭代完成之后采取如下操作:

步骤1 若迭代次数小于 DC , 在短禁忌表中,依次以前一行替换后一行。根据适应度值的大小对种群中的个体排序,并依据此排序选取不存在于短禁忌表中的适应度值放入短禁忌表的第1行,从而形成新短禁忌表,并把此适应度对应的个体当作下一次迭代的初始最优个体;

步骤2 若迭代次数大于 DC , 在种群中按照适应度从小到大的顺序选取个体。若此个体对应的适应度值存在于短禁忌表中,则重新选取个体,直到个体的适应度值不存在于短禁忌表中。若此个体的适应度值存在于长禁忌表中,则此数值出现次数 $m = m + 1$; 若 $m > M$ (最大允许出现的次数),重新选取个体,直到所选取的个体适应度值不存在于短禁忌表中且 m 不大于 M 。选取完满足条件的个体后,转到步骤3;

步骤3 以短禁忌表的最后1行替换长禁忌表的第1行,且从第2行开始,依次以长禁忌表中前一

行替换后一行,从而生成新长禁忌表。在短禁忌表中,依次以前一行替换后一行,并把此个体的适应度值放入短禁忌表的第1行,从而形成新短禁忌表,并把此个体当作下一次迭代的最优初始个体。

3 算 例

3.1 案例描述

某多式联运承运人将一批 50 集装箱的货物从城市 A 运输到终点港口 D , 经由港口 D 出口外销。运输途中可由 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 这 7 个集装箱中转站进行运输方式的转换,货物需在船期截止前抵达港口并完成装船作业。船期截止时刻为由出发时刻开始计时的第 50 个小时。多式联运网络图及各节点之间的连接方式如图 3 和图 4 所示。

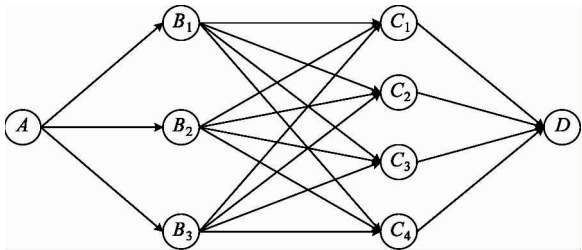


图 3 多式联运网络图

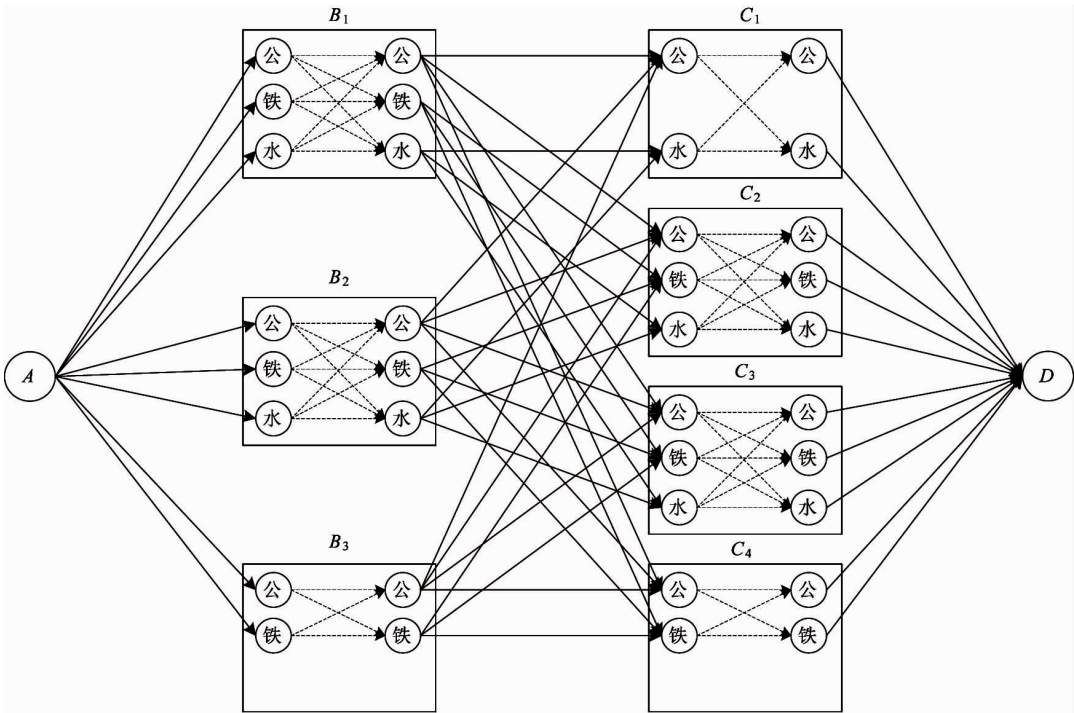


图 4 各节点连接方式

3.2 参数取值

根据《国际集装箱汽车运输费收规则》以及中国铁路总公司 2018 年发布的《关于调整铁路集装箱运价有关事项的通知》得到铁路和公路的在途运输费用计算公式为:运输费用=(运输基价 1+运输基价 2×运输距离)×货运量。水路运输采用包干计费 950 元/箱,且各运输方式的单位运价及运输速度见表 1,各中转节点的空闲时间窗及周期见表 2,各运输方式转换的中转成本和中转时间见表 3,各

运输节点间的距离见表 4,各节点火车轮船时刻表见表 5。

表 1 各运输方式的单位运价及运输速度

运输方式	公路	铁路	水路
运输速度(km/h)	60	80	36
运输基价 1(元/箱)	15	440	—
运输基价 2(元/(箱·km))	8	3.185	—
运费(元/箱)	—	—	950

注:“—”表示该节点不存在此种计价方式

表 2 各中转节点的空闲时间窗及周期

节点	B_1	B_2	B_3	
时间窗	[03:00–05:00]	[02:00–04:00]	[01:00–05:00]	
周期(h)	2	2	3	
节点	C_1	C_2	C_3	C_4
时间窗	[05:00–08:00]	[09:00–12:00]	[00:30–03:30]	[00:30–03:30]
周期(h)	3	2	1	1

表 3 各运输方式转换的中转成本(元/箱)和中转时间(h/箱)

运输方式	公路		铁路		水路	
	中转费用	中转时间	中转费用	中转时间	中转费用	中转时间
公路	0	0	5	0.05	10	0.1
铁路	5	0.05	0	0	7	0.15
水路	10	0.1	7	0.15	0	0

表 4 各运输节点间的距离(km)

	A	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3	C_4	D
A	0	1021	910	877	—	—	—	—	—
B_1	1021	0	—	—	535.27	342.45	401.4	288	—
B_2	910	—	0	—	737.38	550.79	565.26	378.29	—
B_3	877	—	—	0	806.27	690.07	356.33	535.46	—
C_1	—	535.27	737.38	806.27	0	—	—	—	630.03
C_2	—	342.45	550.79	690.07	—	0	—	—	795.64
C_3	—	401.4	565.26	356.33	—	—	0	—	481.94
C_4	—	288	378.29	535.46	—	—	—	0	598.93
D	—	—	—	—	630.03	795.64	481.94	598.93	0

注:“—”表示节点间不直接连通

表 5 各节点火车轮船时刻表

中转节点	运输班期	
	火车	船舶
B_1	第 1 天 17:14	第 1 天 06:00
B_2	第 1 天 15:22	第 1 天 17:30
B_3	第 1 天 16:08	—

(续表 5)

C_1	—	第 2 天 09:30
C_2	第 2 天 11:40	第 2 天 10:20
C_3	第 2 天 10:42	第 2 天 10:30
C_4	第 2 天 12:42	—

注:“—”表示该节点不存在此种运输方式

4 结果分析

当港口不存在时间窗约束时,货物抵达港口即可卸货,不需承担港口处的等待成本。由改进遗传算法解得的最优解为:运输路径 AB_2C_3D ,运输方式分别为铁路—水运—水运。运行总成本是348 540元,运行总时间为47.9 h,小于船期截止的时刻,方案成立。

考虑港口忙闲度时,解得的多式联运最优运输方案会随港口忙闲时间窗的变化而变化。不同港口忙闲时间窗的计算结果比较见表6。

(1) 当港口忙闲时间窗为[1 700, 1 900]和[2 100, 2 200]时由改进遗传算法解得的最优解:运输路径 AB_3C_3D ,运输方式为水路—公路—铁路,运

输总成本是361 670元,运行总时间为40.7 h。
(2) 当港口忙闲时间窗为[2 300, 2 500]和[2 800, 2 900]时由改进遗传算法解得的最优解:运输路径 AB_2C_4D ,运输方式为水路—公路—铁路,运输总成本是392 020元,运输总时间为44.2 h。
(3) 当港口忙闲时间窗为[2 650, 2 800]和[2 980, 3 180]时由改进遗传算法解得的最优解为:运输路径 AB_1C_3D ,运输方式为水路—公路—公路,运输总成本是454 060元,运输总时间为45.5 h。
在此时间窗下,不考虑港口忙闲时间窗的运输方案虽然能在船期截止前抵达港口,但抵达时刻却在港口较为繁忙的时间段,不能及时进行集港作业,承运人不仅需额外承担晚集港费和翻倒费,甚至会因延误装货时间导致无法装船。

表6 不同港口忙闲时间窗的计算结果比较

港口时间窗	最佳方案	总成本(元)	总时间(h)	运输成本(元)
无	23 233	348 540	47.9	259 020
[1 700, 1 900], [2 100, 2 200]	33 312	361 670	40.7	289 130
[2 300, 2 500], [2 800, 2 900]	24 312	392 020	44.2	314 800
[2 650, 2 800], [2 980, 3 180]	13 311	454 060	45.5	401 560

港口时间窗	最佳方案	中转成本(元)	中转等待成本(元)	港口等待成本(元)
无	23 233	45 000	44 520	0
[1 700, 1 900], [2 100, 2 200]	33312	46500	26040	0
[2 300, 2 500], [2 800, 2 900]	24312	46500	30720	0
[2 650, 2 850], [2 980, 3 180]	13311	37500	15000	0

综上所述,考虑港口忙闲度与不考虑港口忙闲度得到的最佳方案不相同,不同的港口忙闲时间窗对应的最佳方案也各不相同。不考虑港口忙闲度情况下得到的最优方案往往会因为追求总成本最小使得总运输时间偏长,抵达港口时刻接近截港时刻。但是实际工作中,港口普遍存在无法及时处理到港货物的繁忙的时间段。若承运商不考虑港口忙闲度,那么对于抵港时刻接近截港时刻的最佳运输方案需谨慎采用。

通过对比分析可知,港口忙闲度对运输成本、运输路径及运输方式的选择有较大的影响。不考虑港口忙闲时间窗的情况下,得到的最佳运输方案有较大概率需承担因抵港时机不合适产生的高额晚集港

费和预集港费,甚至会令货物赶不上装船。考虑港口忙闲时间窗的情况下,港口的忙闲时间窗距离截港时刻越近,对运输方案造成的影响越大;由于港口忙闲时间窗对货物抵港时机进行了约束,运输时间长的方案总成本不一定最低;港口空闲时间段之间的时间间隔越大,对运输方案带来的影响越大,承运商不得不尽可能满足此约束来避免港口等待成本过高。因此,承运商在制定多式联运运输方案时,必须将港口的忙闲度纳入考虑范围,使得货物抵港时刻更合理,运输方案更贴合实际。

5 结 论

本文对考虑港口忙闲度情况下的集装箱多式联

运路径优化问题进行了研究,构建了相对应的模型,并且运用改进遗传算法对其求解,同时设计案例验证其可行性。通过对结果的分析得出以下结论:(1)港口忙闲时间窗对承运人制定运输方案有较大影响,越接近截港时刻影响越大;(2)港口空闲时间窗之间的间隔越大,对运输方案的影响越大;(3)将港口空闲时段划分为几段,平均每段空闲时长越短但整体空闲频率越高对承运商的影响越小;(4)在制定运输方案时,承运人若没有考虑到港口忙闲度,不仅会增加港口等待时间浪费大量运力资源,甚至会耽误下一个运输计划;(5)若货物抵港时刻接近截港时刻且处于港口繁忙时段,那么承运商不仅需要承担额外集港费用,还需承担因无法装船导致的货物与财产损失。综上所述,承运商在制定运输计划时必须考虑港口忙闲度,令各类资源得到合理使用,运输计划更加贴合实际。

参考文献

[1] 吴晓莉,马华伟. 多式联运环境下带时间窗的多产品运输问题研究[J]. 物流工程与管理,2014,36(5):74-77+12

[2] 熊桂武. 具有模糊时间窗的多模式联运建模及优化[J]. 工业工程,2012,15(4):7-11

[3] 梁晓慷. 基于模糊运输时限的铁路集装箱多式联运路

径优化研究[J]. 铁道运输与经济,2017,39(12):55-60

[4] 于雪娇,郎茂祥,王伟哲,等. 考虑模糊需求的多式联运路径优化[J]. 北京交通大学学报,2018,42(3):23-29+36

[5] 吕学伟,杨斌,黄振东. 混合时间窗约束下多式联运最优路径选择研究[J]. 铁道运输与经济,2018,40(8):6-11

[6] 张小龙,陈小鸿. 混合时间窗约束下多目标多式联运路径优化研究[J]. 综合运输,2018,40(8):98-104

[7] 王清斌,韩增霞,计明军,等. 基于节点作业随机特征的集装箱多式联运路径优化[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(6):137-144

[8] 刘杰,何世伟,宋瑞,等. 基于运输方式备选集的多式联运动态路径优化研究[J]. 铁道学报,2011,33(10):1-6

[9] 辛春林,冯倩茹,张建文. 时变条件下多式联运危险品路径优化研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(6):104-110

[10] 刘松. 考虑节点耗时的多式联运路径及运输方式的组合优化研究[J]. 物流工程与管理,2017,39(8):80-82

[11] 杨雄,黄德才,詹秀秀,等. 探测和评估复杂网络影响力节点的路径多样性核度中心方法[J]. 高技术通讯,2016,26(2):129-138

[12] 彭勇,刘星,刘松. 班期限制对多式联运路径决策的影响[J]. 科学技术与工程,2017,17(32):168-173

[13] 彭勇,刘星,罗佳,等. 考虑班期限制的货物多式联运路径优化研究[J]. 中国科技论文,2017,12(7):787-792

[14] 朱云龙,罗焕佐,薛劲松,等. 港口业船舶优化调度模型设计[J]. 高技术通讯,2000,10(7):79-81

Multimodal transport route optimization considering the restriction of port busy and idle time window

Zheng Hongxing, Shao Siyang, Wu Yunqiang

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract

With the continuous growth of maritime trade volume, multimodal transport with port as the core hub has attracted much attention. In order to pursue the overall benefits of multimodal transport, from the carrier's point of view, studying on the optimization of container multimodal transport routing problem under the container gate-in mode, based on the constraints of the busy period of the port which gives the busy time window and idle time window and considering the periodic time window of the transit node and the time limit of each transport mode schedule, a routing optimization model with the goal of minimizing total transportation cost is constructed and then an improved genetic algorithm(IGA) is designed to solve the model. The result shows: compared with the none considering of busy period of the port, considering this factor could help containers in the port effectively stagger the busy period, thus avoiding excessive pre-collection fees and charges for arriving late; Meanwhile, the closer the busy time window to the port close time and the longer the interval between idle time windows could both get the greater impact on the carrier. Therefore, the carrier must fully consider this factor when actually developing the transportation plan.

Key words: busy and idle time window, schedule limit, multimodal transport, route optimization, improved genetic algorithm(IGA)