

# 基于海铁联运的集装箱班列服务路径优化\*

张丰婷<sup>1</sup> 杨菊花<sup>1▲</sup> 于 江<sup>2</sup> 秦永胜<sup>1</sup> 沈发才<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学交通运输学院 兰州 730070; 2. 乌鲁木齐集团有限公司乌鲁木齐车务段 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:** 考虑海铁联运过程中影响集装箱班列开行的不确定因素,结合班列服务客户各自固定需求时间窗的实际需求,引入不确定规划区间来表示集装箱在客户节点的装卸箱服务时间,同时将具有时效性要求的需求时间窗设置为软约束,运用惩罚函数将其作为惩罚项整合到运输成本目标函数中,选择合理的惩罚系数,构建以运输成本低、运输时间少为目标的班列服务路径非线性多目标优化模型,针对不确定变量,采用机会约束规划转换模型得到考虑模糊时间的多目标路径优化模型,通过加权求和将多目标合并转化为单目标问题,并设计人工蜂群算法求解所构建的班列服务路径优化模型,并以盐田港海铁联运为实例进行了模型检验和对比分析。结果表明:①在硬时间窗约束下运输时间减少了88%,但成本增加了97%,充分表明了软时间窗设置的优势;②考虑不同的运输目标时,只考虑运输费用时,运输时间增加了5.3%;只考虑运输时间时,运输费用增加了67.8%。所建模型和算法能够很好的满足不同客户不同运输时效性的需求,在运输费用方面具有明显的优越性。

**关键词:** 交通规划;路径优化;不确定规划;时间窗软约束;人工蜂群算法

**中图分类号:** U695.2+2;U116.2 **文献标识码:** A **doi:**10.3963/j.jssn.1674-4861.2021.04.016

## Optimization of Container Train Service Route Based on Sea-Rail Intermodal Transportation

ZHANG Fengting<sup>1</sup> YANG Juhua<sup>1▲</sup> YU Jiang<sup>2</sup> QIN Yongsheng<sup>1</sup> SHEN Facai<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Urumqi Train Department of Urumqi Group Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

**Abstract:** Since uncertain factors are affecting the operation of container trains in the process of sea-rail intermodal transportation. Combined with the customers' demand for a fixed time window, the uncertain planning interval is introduced to represent the range of time in container loading and unloading at each customer node. Meanwhile, the demand time window with timeliness requirements is set as a soft constraint. The penalty function is integrated into the objective function of the transportation cost as a penalty term. A reasonable penalty coefficient is selected to construct a multi-objective optimization model of the train service path combined with the low transportation cost and less transportation time. For uncertain variables, the chance-constrained programming transformation model is used to obtain a multi-objective path optimization model considering fuzzy time. Then, the multi-objective problem is transformed into a single objective problem by weighted summation, and the artificial bee colony algorithm is designed to solve the constructed model. The results of sea-rail intermodal transportation in Yantian Port show that: ①The transportation time is reduced by 88% in the constraint of hard time windows, but the cost is increased by 97%, fully showing the advantage of soft time windows. ②When only the transportation cost is considered, the transportation time increases by 5.3%. When only the transportation time is considered, the transportation cost increases by 67.8%. These experimen-

收稿日期:2021-01-22

\* 甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA394)资助

第一作者简介:张丰婷(1996—),硕士研究生,研究方向:交通运输规划与管理.E-mail:912046152@qq.com

▲ 通信作者:杨菊花(1978—),博士,副教授,研究方向:交通运输规划与管理.E-mail:yangjuhua@mail.lzjtu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tal results confirm that the proposed model reduces the transportation cost and meets the needs of different transportation timeliness of different customers.

**Keywords:** transportation planning; route optimization; uncertain planning; constraint of soft time windows; artificial bee colony algorithm

## 0 引言

在国家积极推进运输结构调整的背景下,采取高效可行的措施实现大宗物资的“公转铁”成为当前亟待解决的问题。集装箱海铁联运是内陆集装箱多式联运的主要组成部分,为了达到优化集装箱海铁联运集疏运体系效率和调整不合理运输结构的目的,合作和效率同时得到提升将是我国海铁联运需要解决的主要问题之一<sup>[1]</sup>。多式联运经营人,作为海铁联运的主要组织者,其运输目的是了获取更高的收益,以较少的成本和较短的时间完成更多的运输任务。笔者以港口集装箱内陆集疏运为研究对象,就其集装箱班列服务路径优化问题展开研究,对提高联运企业收益有重要的现实意义。

联运路径的优化受运输费用、运输时间和环境等多种因素的影响。在研究中大多将运输时间或运输费用作为目标函数来优化多式联运运输路径,如刘璘等<sup>[2]</sup>提出了基于海铁联运的冷藏集装箱路径优化模型,以包括制冷成本、运输成本、转运成本在内的总成本最小为目标函数建立模型。Bhatta-charya 等<sup>[3]</sup>用混合整数规划来优化考虑多个成本和额外的容量约束的多式联运网络时间表。刘畅等<sup>[4]</sup>针对笔记本电脑高时效、高价值的特性构建时间价值成本模型,同时考虑多产地和多品级的特点,以综合物流成本最低为目标建立多式联运路径选择优化模型。

刘丹<sup>[5]</sup>、李玉民等<sup>[6]</sup>在多式联运下建立了以运输时间、费用等为优化目标的多目标优化模型,通过加权求和将多目标合并转化为单目标问题求解。Ziliaskopoulos 等<sup>[7]</sup>构建了集装箱多式联运路径优化模型,模型考虑了运输时间、中转时间等因素,以时间最短为目标建立优化模型。Yang 等<sup>[8]</sup>从多式联运经营者的角度出发,设计双重优化目标模型,最大限度地减少了集装箱多式联运的总运输成本和总运输时间。

在集装箱海铁联运研究方面,户佐安等<sup>[9]</sup>为提高集装箱海铁联运在港换装转运的作业效率,对有铁路专用线引入的集装箱码头集卡路径规划问题进行了研究。靳志宏等<sup>[10]</sup>为经济、合理地利用港口和中心站堆场资源,从海铁联运协调部门角度出发,研究

在共享堆场协议下的堆场分配问题。武慧荣等<sup>[11]</sup>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。以上研究深入探讨了海铁联运中的换装转运和堆场分配等重要问题,但对港口集疏运问题中的重要环节,即集装箱海铁联运班列服务路径优化对于提高集装箱海铁联运运量和服务质量方面的研究较少,其中 L.Garcia-Alonso 等<sup>[12]</sup>提出开行海铁联运班列能够提高海铁联运沿线地区的交通运输能力,缓解港口拥堵及城市交通压力,有利于交通运输结构和运输资源的合理化配置。本文着重对此展开分析和探讨。

与此同时,结合不同约束条件使得所建模型更贴合研究的问题实际,如殷亚等<sup>[13]</sup>针对多目标车辆路径问题的研究,考虑了车载量限制和硬时间窗的约束条件。Cetin 等<sup>[14]</sup>规定在特定时间段内将货物运送到收货人的手里,以此为约束条件进行路径优化。Fazayeli 等<sup>[15]</sup>同时考虑带有时间窗和模糊需求的实际情况,提出了混合整数模糊数学模型,结果表明时间窗和模糊需求不仅增加了问题的难度,同时也造成了成本和时间的额外支出。汤银英等<sup>[16]</sup>考虑不同运输方式的能力以及工作时间窗和发车班期,根据货主的具体货运需求,构建了运输成本最小、运输时间最少的多目标 0-1 整数规划模型。既有文献对运输时间不在收货时间窗内的运输路径考虑较少,对于多式联运经营人而言,在该种约束条件下产生的最优路径的运输成本不一定最优,且不在收货时间窗内得出的最优路径并不能满足现实需要,本文将需求时间窗作为软约束来求解此问题。

综上,针对集装箱海铁联运的研究主要集中在理论技术,以及集装箱海铁联运节点选址、网络布局优化等方面,本文着重从定量的角度研究集装箱海铁联运运输路径优化问题,并综合考虑集装箱在集疏运过程中产生的相关成本和时间,建立多目标优化模型,通过算例分析比较,得出基于海铁联运集装箱班列路径优化问题研究的实际使用价值。

笔者从多式联运经营人的角度,建立运输总成本和总时间最小的集装箱海铁联运集疏运班列服务路径优化模型,综合考虑了节点服务时间的不确定以及不满足需求时间窗的时间惩罚成本,从而使模

型更具现实意义。

## 1 问题描述与建模

### 1.1 问题描述

针对港口集装箱集疏运班列运输路径优化问题的描述如下。

1) 集装箱班列的货源为各类进出口物资,从实际情况出发,集装箱有2种流向:①到港的集装箱货物需要疏运至内陆腹地各城市;②内陆腹地各城市的出口货物也需集运至港口。

2) 每个客户都有服务时间窗的限制,分为最早开始服务时间和最晚开始服务时间,本文采用软时间窗限制,班列应在客户指定的时间窗内进行服务,否则加入违反时间窗所造成的时间效应费用。

3) 若干班列由港口向客户疏运集装箱或者从客户向港口集结集装箱,班列的容量限制和客户所属的集装箱场站以及各个节点客户的服务量已知,在服务的过程中每个客户只被访问1次。

从多式联运经营人角度,对某集装箱港口多对集装箱海铁联运集疏运班列多个内陆集装箱场站内的多个客户进行服务,不仅力求运输成本最低,还要使顾客的满意度高,即总的运输时间最少。集装箱班列对客户的服务简化为送箱和取箱,即在规划期内,利用集装箱海铁联运集疏运班列完成港口和内陆腹地各城市的集装箱运输需求,考虑客户指定的时间窗,在节点服务时间不确定的情况下,对集装箱海铁联运班列服务路径进行优化,最大程度地实现铁路集装箱运输企业、客户及多式联运经营人3方的利益最大化。

### 1.2 问题假设

为方便模型建立,作如下假设。

1) 不区分客户的需求货物种类,将所有客户节点同质化。

2) 设模型中的规划期为1周,在每个规划期内不同内陆集装箱场站范围内的客户分布是不同的,假设客户需求量已知。

3) 班列从港口出发,沿着某条运输路径将集装箱运送到指定客户的场站内或从客户所属的场站内取走集装箱货物后返回港口,其中每列集装箱班列只服务1条运输路径。

### 1.3 模型构建

模型参数如下。

$M$ :港口班列服务对象的集合; $i, j$ :港口及港口内陆集疏运范围内的服务客户,  $i, j = 0, 1, 2, \dots$ ,

$M$ , 其中0表示港口,  $1, 2, \dots, M$ 表示服务客户; $K$ :港口集装箱集疏运班列集合,  $K = 1, 2, \dots, K$ ; $N$ :单个集装箱班列的运输能力; $q_i$ : $i$ 节点客户的取箱量,  $i \in M$ ;  $s_i$ : $i$ 节点客户的送箱量,  $i \in M$ ; $c$ :班列的启运费用; $O_{ij}$ :班列从节点 $i$ 到 $j$ 间的运营费用,  $i, j \in M$ ; $C_{ij}$ :节点 $i$ 到 $j$ 的集装箱的单位运输费用,  $i, j \in M$ ; $t_{ij}$ :节点 $i$ 到 $j$ 某班列的行驶时间,  $i, j \in M$ ; $[e_i, l_i]$ :客户节点 $i$ 的服务时间窗, 其中 $e_i$ 为最早开始服务时间,  $l_i$ 为最早结束服务的时间,  $i \in M$ ; $p_i^k$ :惩罚函数; $\alpha_i$ :惩罚系数, 若班列提前到达客户节点 $i$ , 则产生单位时间的等待费用,  $i \in M$ ; $\beta_i$ :惩罚系数, 若班列晚于时间窗到达客户节点 $i$ , 则有单位时间的延迟费用,  $i \in M$ ; $a_i^k$ :班列 $k$ 到达节点 $i$ 的时间; $\widetilde{f}_i^k$ :班列 $k$ 在节点 $i$ 的单位装卸箱服务时间, 该变量由区间 $\widetilde{f}_i^k = [f_{ik}^U, f_{ik}^D]$ 表示; $w_i^k$ :若班列 $k$ 提前到达客户点 $i$ , 则等待的时间为 $w_i^k = e_i - a_i^k$ ; $d_i^k$ :若班列 $k$ 延迟到达客户点 $i$ , 则迟到的时间为 $d_i^k = a_i^k - l_i$ 。

连续变量 $y_{ij}^k$ :班列 $k$ 从节点 $i$ 到 $j$ 的运行过程中所装载集装箱的数量。

决策变量 $x_{ij}^k$ :班列 $k$ 是否从 $i$ 出发开向 $j$ , 如果是,  $x_{ij}^k$ 的值为1, 否则为0。

根据上述参数, 建立数学模型。目标函数见式(1)~(2)。

$$\min z = c \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M x_{0j}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^M o_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^M C_{ij} x_{ij}^k y_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M p_i^k \quad (1)$$

$$\min T = \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^M t_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M \widetilde{f}_i^k q_i / s_i + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M w_i^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M d_i^k \quad (2)$$

约束条件见式(3)~(12)。

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^M x_{0j}^k = \sum_{j=1}^M x_{j0}^k \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M x_{ij}^k = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M x_{ji}^k = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{0j}^k = \sum_{i=0}^M \sum_{j=1}^M s_i x_{ij}^k \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{0j}^k = \sum_{i=0}^M \sum_{j=1}^M q_i x_{ij}^k \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{i0}^k + (s_i - q_i) \sum_{i=0}^M x_{ij}^k = \sum_{i=0}^M y_{ij}^k \quad (7)$$



$$\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M y_{ij}^k \leq N x_{ij}^k \quad (8)$$

$$p_i^k = \alpha i \times \max(w_i^k, 0) + \beta i \times \max(d_i^k, 0) \quad (9)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$y_{ij}^k, a_i^k \geq 0 \quad (11)$$

$$w_i^k, d_i^k \geq 0 \quad (12)$$

式中:  $\widetilde{f}_{ik} = [f_{ik}^U, f_{ik}^D]$ 。

目标函数中,式(1)为海铁联运服务的总成本最低,总成本包括班列启运费用、班列运营服务段费用、与集装箱数量有关的变动成本和因为班列迟到或者早到而产生的惩罚成本4个部分;式(2)为总运输时间最短,运输时间包括节点间的运行时间、在节点的服务时间、早到产生的等待时间和迟到产生的延误时间4个部分。

在约束条件中,式(3)表示集装箱班列从港口出发,到达客户节点完成服务后返回港口的完整过程;式(4)表示每个客户有且仅被服务1次;式(5)表示班列从港口出发时的载箱量为此次运输路径中各节点送箱量的总和;式(6)表示班列完成各节点的服务后回到港口时的载箱量为班列在此次运输路径中各节点取箱量的总和;式(7)表示班列在任意节点的载箱量满足在该点送箱量与取箱量代数关系;式(8)表示班列在任意节点的载货量不超过班列的容量限制;式(9)表示惩罚成本的计算方法;式(10)是0-1约束;式(11)~(12)是非负约束。

由于集装箱在场站内的作业受场站规模、场站资源配置、作业量等的影响,难以获得班列在每个客户节点的装卸箱服务时间精确值。在这种情况下,决策者可以得到一定范围内的区间数,利用这些区间数代替准确值进行运输计划的制定。鉴于此,本文用区间值的形式表示此问题中的不确定装卸箱服务时间,建立了1个区间非线性规划模型,采用基于区间数排巧的转换方法来将区间模型转化为确定性优化模型。

## 2 模型转换

借鉴文献[17]中的区间规划理论,将随机机会约束规划转化为确定的等价数学规划。集装箱单位装卸服务时间为区间参数  $[f_{ik}^U, f_{ik}^D]$ ,运用区间运算法则,可以得到目标函数的最大值和最小值,见式(13)~(14)。

$$T_{\max} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M t_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M f_{ik}^D q_i / s_i +$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M w_i^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M d_i^k \quad (13)$$

$$T_{\min} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M t_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^M f_{ik}^U q_i / s_i + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M w_i^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M d_i^k \quad (14)$$

则目标函数  $T = [T_{\min}, T_{\max}]$

对于  $T$  中的任意值  $\lambda \in [T_{\min}, T_{\max}]$ ,风险系数  $\gamma$  的定义见式(15)。

$$\gamma = \frac{\lambda - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (15)$$

其中风险系数表示因参数的不确定性而使实际获得的目标函数值大于等于  $\lambda$  的风险因子,很明显,  $\gamma \in [0, 1]$ ,当  $\lambda = T_{\min}$  时,  $\gamma = 1$ ,表示风险不存在,决策者肯定可以获得小于等于  $T_{\max}$  的目标函数值。变换式(15)可得

$$\lambda = \gamma T_{\max} + (1 - \gamma) T_{\min} \quad (16)$$

式(16)表示在风险系数  $\gamma$  的前提下,决策者可以得到最小的目标函数值  $\lambda$ ,因此原模型中不确定的目标函数可以转换为确定性的目标函数。

此外,考虑到不确定参数会对实际获得的最优值造成偏差,给出最大偏差值:  $d = T_{\max} - T_{\min}$ ,根据决策者对偏差大小的要求,令  $d \leq d_{\max}$ ,  $d_{\max}$  表示决策者对偏差允许的最大值。

综上,原不确定性模型的目标函数可以据此转换为确定性模型,见式(17)~(19)。

$$\min z = c \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M x_{0j}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^M o_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^M C_{ij} x_{ij}^k y_{ij}^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M p_i^k \quad (17)$$

$$\min T = \gamma T_{\max} + (1 - \gamma) T_{\min} \quad (18)$$

$$T_{\max} - T_{\min} \leq d_{\max} \quad (19)$$

其余目标和约束条件均与式(3)~(12)一致。

## 3 人工蜂群算法

选用人工蜂群算法(ABC)进行求解。该算法的优点在于其多角色分工机制,蜜蜂按照自己不同的角色采用不同的方法进行搜索。蜜蜂在选择路径时,依据角色决定是否选用以前蜜蜂留下的信息和利用信息的方式,这样能以较大概率找到优化问题的最优解<sup>[18]</sup>。

### 3.1 人工蜂群算法流程

本文人工蜂群算法流程见图1。本文模型及算法的验证参照文献[19]中算例的具体数据。采用整数编码的方式对客户进行编码。对3个集装箱场

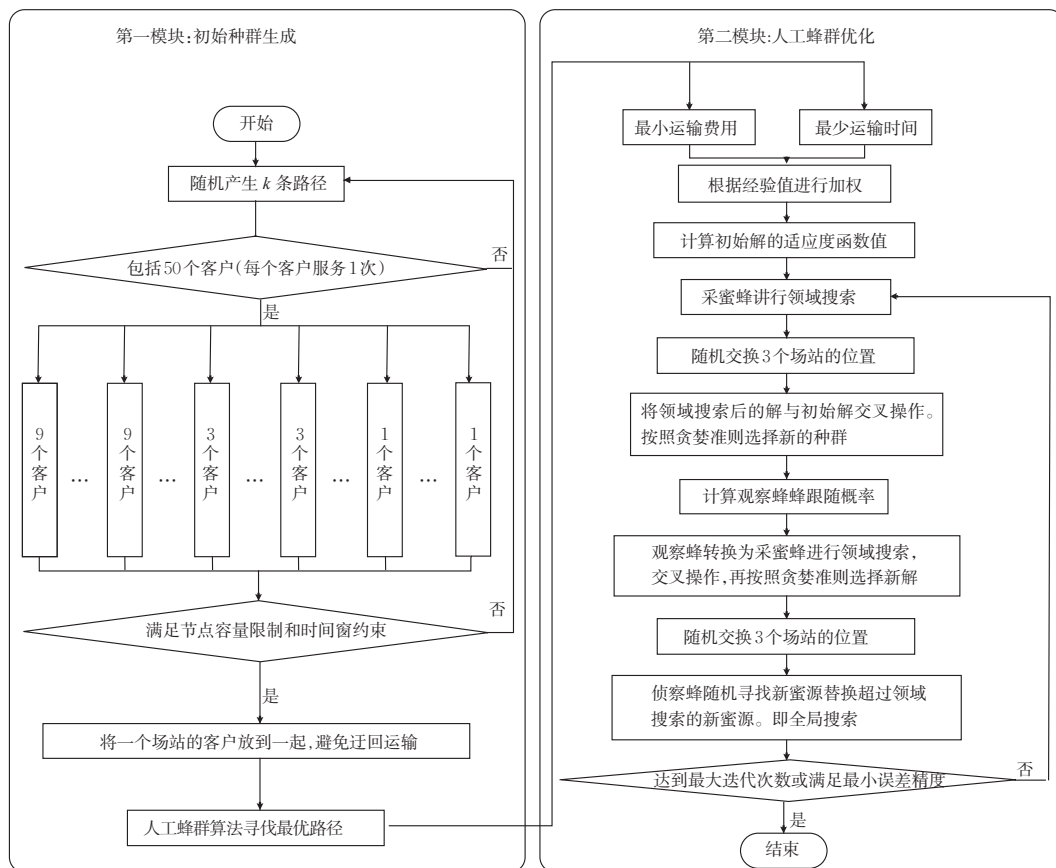


图1 算法流程图

Fig. 1 The algorithm flow

站内的50位客户编码,包括1~23的送货客户,24~50的取货客户,分配到 $k$ 条路径,每条路径的客户数为1~9,每条路径由容量140 TEU的集装箱班列服务,每位客户在目标低的情况下满足限制条件完成1次取或送服务。初始时刻,所有蜜蜂没有任何先验知识,其角色都是侦查蜂。全局随机搜索蜜源,并根据蜜源情况得出蜜源花蜜量,即蜜源的“收益度”。

### 3.2 人工蜂群算法的关键步骤

#### 3.2.1 初始种群的生成

初始种群生成步骤如下,通过判断到达每个场站的班列容量、费用和时间限制,生成包含50个客户的多条服务路径。

首先,产生路径数,每条路径产生9,8,...,2,1个客户分别迭代6 000次,直到有剩余客户,如果新产生路径与已产生路径的客户有重复则产生1条随机路径;然后,判断是否满足出发、途中运行和到达客户节点的容量限制和时间窗约束,将1个场站的客户放到一起,避免迂回运输。

#### 3.2.2 人工蜂群优化

初始种群包含该问题的可行解,考虑到文中有2个目标:成本和时间,将2个目标进行处理: $\min fitness = \text{目标}1 \times \tau + \text{目标}2 \times (1 - \tau)$ ,不确定变量装卸箱服务时间为: $\lambda = \gamma \times 3 + (1 - \gamma) \times 10$ ,运用人工蜂群算法进行寻优操作。

首先,采蜜蜂数搜索局部最优,直到采蜜蜂找到蜜源后,达到最大迭代次数后调整场站的顺序,判断是否满足结束条件;其次,跟随蜂跟随采蜜蜂增强局部搜索最优的概率,根据适应度值计算观察蜂跟随的概率,跟随蜂寻找蜜源,侦察蜂进行全局搜索;再次,当某只采蜜蜂和跟随蜂在其食物源邻域搜索次数达到控制参数时,仍然没有找到适应度值更低的新解,即放弃该食物源,随后采蜜蜂和跟随蜂转换为侦查蜂,并随机初始化该采蜜蜂的位置,初始解重新产生;最后,计算适应度值,判断循环结束的条件,当循环次数达到最大循环次数时,终止循环,输出最优解,否则返回采蜜蜂阶段继续搜索。根据贪婪选择机制,计算得到最优路径的适应度值,选择更低适应度值的解保留给下一代种群。

## 4 实例验证与分析

### 4.1 参数设置

人工蜂群算法求解程序中各项参数的设置情况如下。班列启运费用 200 000 元,班列单位服务段费用 20 元,单位等待费用 4 元,单位延误费用 1 元,班列容量 140 TEU。算法种群 50 个,采蜜蜂 25 只,跟随蜂 15 只,侦察蜂 10 只,最大迭代次数 5 000 次,蜜蜂搜索约束 100 次。按照以往经验取加权目标值的权重为 0.6 和 0.4。

### 4.2 实例数据

本文问题中都按 20 ft 集装箱进行计算,与集装箱数量有关的变动费用计算公式见式(20)。

$$C_{ij} = (500 + 2.025d_{ij}) \times n \quad (20)$$

班列在集装箱场站内进行集装箱装卸服务,此时间为不确定变量,用区间参数[3,10](min)来表示。本文参考文献[19]中的盐田港实例,取其中 50 个客户按规划期内各场站的集装箱运输量均匀分配到 3 个集装箱内陆场站,见表 1。

表 1 规划期内各场站的集装箱运输量和客户数

Tab. 1 Container transportation volume and number of customers at each station during the planning period

内陆集装箱场站	送箱需求客户/个	取箱需求客户/个	送箱需求(TEU)	取箱需求(TEU)
韶关	7	9	160	178
成都	8	9	200	224
武汉	8	9	104	114

假设客户的需求量服从[1,50]的随机均匀分布,满足表 1 各场站的集装箱运量和客户数。本文设置规划期为 1 周,将规划期分为 168 h 的时间间隔,每个客户的需求时间窗服从[0,168](h)的随机均匀分布。客户相关实验数据见表 2。

### 4.3 运行结果

运输成本的降低和运输时间的缩短在一定程度上是 1 种此消彼长的关系,同时满足成本和时间的减少是不切合实际的,故应保持成本和时间的均衡状态,即在尽可能降低运输成本的前提下追求运输服务时间最少。在本文中将 2 个目标都按式

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

进行各自的归一化处理,然后用线性加权法将多目标转为单目标进行求解。设置最大迭代次数,当达到一定迭代数时,算法收敛了,则说明可以找到符合本案例的优化解。迭代曲线不代表任何非支配解结果,而是表示迭代过程,曲线不断下降,说明算法有效,曲线下降速度较快,说明算法收

表 2 50 个客户的相关实验数据

Tab. 2 Relevant test data of 50 customers

序号	所属场站	运量	需求	需求时间窗	序号	所属场站	运量	需求	需求时间窗
1	成都	26	送	[13,85]	26	成都	24	取	[43,115]
2	成都	30	送	[22,94]	27	成都	14	取	[55,127]
3	成都	29	送	[34,106]	28	成都	23	取	[58,130]
4	成都	28	送	[40,112]	29	成都	32	取	[60,132]
5	成都	15	送	[47,119]	30	成都	11	取	[67,139]
6	成都	12	送	[55,127]	31	成都	13	取	[68,140]
7	成都	21	送	[65,137]	32	成都	13	取	[76,148]
8	武汉	25	送	[2,74]	33	武汉	27	取	[32,104]
9	武汉	17	送	[12,84]	34	武汉	22	取	[30,102]
10	武汉	19	送	[41,113]	35	武汉	16	取	[58,130]
11	武汉	16	送	[46,118]	36	武汉	27	取	[90,162]
12	武汉	27	送	[55,127]	37	武汉	22	取	[92,164]
13	武汉	18	送	[22,94]	38	武汉	26	取	[52,124]
14	武汉	32	送	[26,98]	39	武汉	21	取	[61,133]
15	武汉	34	送	[47,119]	40	武汉	27	取	[72,144]
16	韶关	30	送	[5,77]	41	武汉	20	取	[74,146]
17	韶关	27	送	[10,82]	42	韶关	40	取	[32,104]
18	韶关	12	送	[79,151]	43	韶关	40	取	[41,113]
19	韶关	13	送	[84,156]	44	韶关	15	取	[43,115]
20	韶关	17	送	[84,156]	45	韶关	22	取	[56,128]
21	韶关	31	送	[87,159]	46	韶关	12	取	[57,129]
22	韶关	30	送	[96,168]	47	韶关	36	取	[74,146]
23	韶关	30	送	[25,97]	48	韶关	13	取	[89,161]
24	成都	24	送	[28,100]	49	韶关	36	取	[51,123]
25	成都	18	取	[31,103]	50	韶关	15	取	[40,112]

敛快,效果好,最后曲线趋于平缓,说明算法已经收敛。见图 2。

本文使用 Matlab 软件进行模型求解,用盐田港案例验证模型的可行性,输出总成本和总时间的各项具体值,运行结果见表 3。

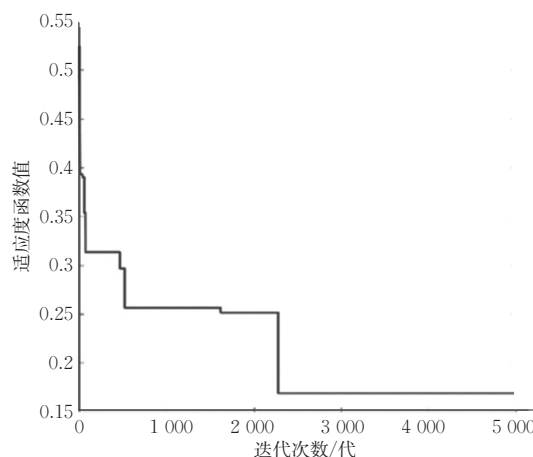


图 2 人工蜂群算法迭代过程图

Fig. 2 Iterative process of the artificial bee colony algorithm

总成本由 4 项成本组成,其中与集装箱数量有关的变动费用占比最高,此值与集装箱的数量和运输距离有关,箱数是确定的,可以通过合理运输路径的规划,减少运输距离,从而降低费用。其次



表3 盐田港服务班列的运输成本、服务时间  
Tab. 3 Transportation cost and service time of service trains of Yantian Port

费用/	总成本	启运费用	服务段费用	变动费用	惩罚成本
元	5 769 353	1 600 000	586 000	3 562 500	20 853
时间/	总时间	运行时间	服务时间	等待时间	延误时间
h	6 777	363	125	1 435	4 854

是班列启运费用,选择最少的班列数也是降低成本的措施之一。合理安排班列数是减少费用、提高经济效益的重要手段,只追求班列数最少,会出现不满足班列容量限制的条件,反之班列开行数增多,运输成本会增加。所以在实际中如何取舍取决于决策者对各目标的定位。本文在求解时追求路径条数尽可能最少,路径数为7时,不满足单条路径班列容量限制的要求,可得本研究的最优班列数为8。

总时间中,等待时间和延误时间较多,可知超出时间窗的行为合理,且在节点的服务时间影响也不小,考虑其不确定性也具有很重要的现实意义。为了更直观展示运行结果,将实验结果生成班列服务路径图。见图3。

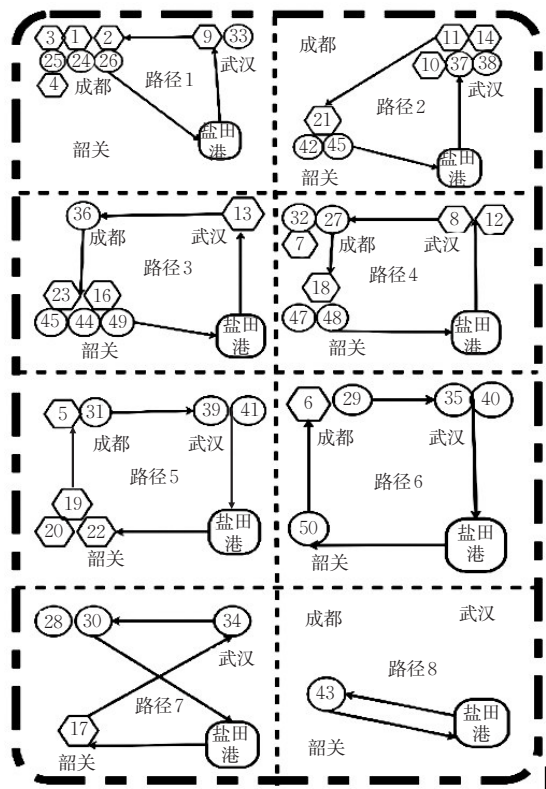


图3 班列服务路径图  
Fig. 3 Service route of trains

4.4 结果对比分析

为证明上述结果的合理性,设置如下4项对比实验,求解不同条件下的目标值,与表3结果进行比较。

4.4.1 优化算法运用前后结果对比

在不考虑优化算法的情况下,输出总成本和总时间的各项具体值,结果见表4。与表3中的各项结果对比均有所增加,造成运力资源浪费。

表4 不考虑优化算法的求解结果  
Tab. 4 Results without considering the optimization algorithm

费用/	总成本	启运费用	服务段费用	变动费用	惩罚成本
元	8 181 600	2 000 000	916 560	5 056 600	20 844
时间/	总时间	运行时间	服务时间	等待时间	延误时间
h	7 003	572	125	1 459	4 847

4.4.2 单目标规划与多目标规划结果对比

运输时间、运输费用存在相互约束甚至是相互排斥的关系,1个目标结果越优化,往往导致其他目标与预期结果相背离,不可能使每个目标同时达到最优。鉴于此,笔者将分别求解只考虑费用和只考虑时间2种情况下的各项目标值。

1) 经营者只追求运输费用最少时,算法求解结果见表5。

表5 只考虑运输费用的求解结果  
Tab. 5 Results only considering transportation costs

费用/	总成本	启运费用	服务段费用	变动费用	惩罚成本
元	7391 800	2 000 000	851 480	4 326 900	213 420
时间/	总时间	运行时间	服务时间	等待时间	延误时间
h	7 137	530	125	1 530	4 952

2) 经营者只追求运输时间最短时,算法求解结果见表6。

表6 只考虑运输时间的求解结果  
Tab. 6 Results only considering transportation time

费用/	总成本	启运费用	服务段费用	变动费用	惩罚成本
元	9 683 000	1 800 000	960 360	6 762 400	160 240
时间/	总时间	运行时间	服务时间	等待时间	延误时间
h	5 347	600	125	821	3 801

通过对比表3、表5和表6可知,单一追求运输费用最少,会造成总运输时间和总成本均增加;单一追求运输时间最少,花费的总运输成本较多目标规划几乎翻倍,均无法满足实际需要。因此多目标的设置更符合目前班列路径规划的实际要求,结果也更加合理,多式联运经营人可根据本文提出的模型为不同的客户需求提供不同的班列路径参考方案。

4.4.3 软硬时间窗约束结果对比

本文具有时效性要求的需求时间窗设置为软约束作为惩罚项整合到运输成本目标函数中,为证明该设置的合理性,将所有服务时间窗均设置为硬时间窗求解,结果见表7。

表 7 硬时间窗需求下求解结果

Tab. 7 The results are solved under the requirement of hard time window

费用/	总成本	启运费用	服务段费用	变动费用	惩罚成本
元	11 563 741 2 800 000	998 321	7 765 420	0	
时间/	总时间	运行时间	服务时间	等待时间	延误时间
h	812	688	125	0	0

从表 3 和表 7 的运行结果对比可以看出,需求时间窗软约束下产生的超出时间窗行为较为明显。虽然总运输时间大大缩短,但总运输成本增加了一倍,也无法满足实际需求。这是因为在需求时间窗作为强约束下求解最优运输路径时只能通过增加班列数来完成运输任务,启运成本的变化造成总运输成本的增加,多式联运经营人的收益必然降低。虽然超出时间窗的行为会产生一定的惩罚成本,但就实际求解来看,超出时间窗的行为能使得总的运输成本降低,说明超出时间窗的行为是合理的。说明本文提出的服务时间窗软约束下求解最优路径的模型具备较强的实用性。

## 5 结束语

1) 本文研究集装箱海铁联运集疏运路径优化问题,考虑海铁联运过程的不确定性,将集装箱在节点服务时间看作不确定变量,用区间数表示。以成本、时间最小作为优化目标,将需求时间窗和运输能力作为模型约束条件,针对不确定变量,采用机会约束规划转换模型得到清晰化的考虑模糊时间的多目标路径优化模型。

2) 在实际运输过程中,因违反客户时间窗约束而产生的时间效应损失真实存在,采用惩罚费用函数来表示,当惩罚数值较大时,会对海铁联运最优运输方案的选择产生较大的影响。因此,进一步探讨了惩罚系数取值不同对目标值的影响情况,以期求得目标值与惩罚系数之间的协调关系。

3) 通过设置 4 组不同的对比模型,与最优的求解结果进行对比分析,证明本文模型和算法的合理性以及优越性。

实际运输过程中,货物可能存在损耗,运输费用和运输距离、运输时间呈非线性关系,在以后的研究工作中,可以函数的方式表示其非线性的关系,对于班列路径的规划将更切合实际。

## 参考文献

### References

- [1] 齐颖秀,郎茂祥,董楠,等.集装箱海铁联运全程物流服务发
- [2] 刘 璘,朱小林.考虑总成本的冷藏集装箱海铁联运运输路径优化[J].华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(4):504-509.
- [3] BHATTA-CHARYA A, KUMAR S A, TIWARI M K, et al. An intermodal freight transport system for optimal supply chain logistics[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 38(1):73-84.
- [4] 刘 畅,关秀婷,张金伟,等.考虑时间价值成本的中欧笔记本电脑多式联运路径优化研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9):2352-2359.
- [5] 刘 丹,赵嵩正.可持续多式联运网络设计的多目标优化模型及算法[J].系统工程,2015,33(8):133-139.
- [6] 李玉民,郭晓燕,杨 露.考虑多目标的中欧集装箱多式联运路径选择[J].铁道科学与工程学报,2017,14(10):2239-2248.
- [7] ZILIASKOPOULOS A, WARDELL W. An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays [J].European Journal of Operational Research,2000,125(3):486-502.
- [8] YANG H L, DONG F, DI L. Segmented procurement optimization of container multimodal transport service based on convergent combination[J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2014, 14(4):17-22.
- [9] 户佐安,孙 燕,薛锋.基于海铁联运的港口集装箱运输集卡路径选择[J].交通运输工程与信息学报,2020,18(2):68-74.
- [10] 靳志宏,王小寒,任 刚,等.共享堆场协议下海铁联运集装

展对策研究[J].铁道运输与经济,2019,41(5):58-62.

QI Yingxiu, LANG Maoxiang, DONG Nan, et al. Research on the development strategy of container sea rail intermodal logistics service [J]. Railway Transportation and Economy, 2019, 41 (5): 58-62.(in Chinese)

[2] 刘 璘,朱小林.考虑总成本的冷藏集装箱海铁联运运输路径优化[J].华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(4):504-509.

LIU Lin, ZHU Xiaolin. Optimization of sea rail intermodal transportation path for refrigerated containers considering total cost [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition), 2017, 51 (4): 504-509.(in Chinese)

[3] BHATTA-CHARYA A, KUMAR S A, TIWARI M K, et al. An intermodal freight transport system for optimal supply chain logistics[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 38(1):73-84.

[4] 刘 畅,关秀婷,张金伟,等.考虑时间价值成本的中欧笔记本电脑多式联运路径优化研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9):2352-2359.

LIU Chang, GUAN Xiuting, ZHANG Jinwei, et al. Study on route optimization of China-EU laptop multimodal transportation considering time value cost[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16 (9): 2352-2359.

[5] 刘 丹,赵嵩正.可持续多式联运网络设计的多目标优化模型及算法[J].系统工程,2015,33(8):133-139.

LIU Dan, ZHAO Songzheng. Multi-objective optimization model and algorithm for sustainable multimodal transport network design[J].System Engineering, 2015, 33 (8):133-139. (in Chinese)

[6] 李玉民,郭晓燕,杨 露.考虑多目标的中欧集装箱多式联运路径选择[J].铁道科学与工程学报,2017,14(10):2239-2248.

LI Yumin, GUO Xiaoyan, YANG Lu. Route selection of China-Europe container multimodal transport considering multi-objectives[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(10):2239-2248.(in Chinese)

[7] ZILIASKOPOULOS A, WARDELL W. An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays [J].European Journal of Operational Research,2000,125(3):486-502.

[8] YANG H L, DONG F, DI L. Segmented procurement optimization of container multimodal transport service based on convergent combination[J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2014, 14(4):17-22.

[9] 户佐安,孙 燕,薛锋.基于海铁联运的港口集装箱运输集卡路径选择[J].交通运输工程与信息学报,2020,18(2):68-74.

HU zuoan, SUN Yan, XUE Feng. Container truck routing based on sea rail intermodal Transportation [J].Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18(2):68-74.(in Chinese)



- 箱堆场分配优化[J].中国航海,2020,43(3):105-111.
- JIN Zhihong, WANG Xiaohan, REN Gang, et al. Optimization of container yard allocation for sea rail intermodal transportation under shared yard agreement[J]. China Navigation, 2020, 43 (3): 105-111.(in Chinese)
- [11] 武慧荣,朱晓宁,邓红星.集装箱海铁联运港口混堆堆场箱区均衡分配模型[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(4):109-115.
- WU Huirong, ZHU Xiaoning, DENG Hongxing. Equilibrium distribution model of container yard in container sea rail intermodal port[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2018, 37 (4): 109-115.(in Chinese)
- [12] GARCIA-ALONSO L, SANCHEZ-SORIANO J. Analysis of the evolution of the inland traffic distribution and provincial hinterland share of the spanish port system[J]. Transport Reviews, 2010, 30(3):275-297.
- [13] 殷 亚,张惠珍.求解带硬时间窗的多目标车辆路径问题的多种混合蝙蝠算法[J].计算机应用研究, 2017, 34(12): 3632-3636.
- YIN Ya, ZHANG Huizhen. Multiple hybrid bat algorithms for solving multi-objective vehicle routing problem with hard time windows[J]. Computer Application Research, 2017, 34 (12): 3632-3636.(in Chinese)
- [14] CETIN S, A heuristic algorithm for vehicle routing problems with simultaneous pick-up and delivery and hard time windows [J]. Open Journal of Social Sciences, 2015, 3(3):35-41.
- [15] FAZAYELI S, EYDI A, KAMALADADI I N. Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: presenting a two-part genetic algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 119 (5):233-246.
- [16] 汤银英,戴炜东,陈 思.考虑多节点时间窗差异的集装箱多式联运路径选择研究[J].交通运输工程与信息学报, 2020, 18(1):34-42.
- TANG Yinying, DAI Weidong, CHEN Si. Research on container multimodal transport route selection considering the difference of multi node time window [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18 (1): 34- 42. (in Chinese)
- [17] 刘宝碇,赵瑞清,王 纲.不确定规划及应用[M].北京:清华大学出版社,2003.
- LIU Baoding, ZHAO Ruiqing, WANG Gang. Uncertain planning and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.(in Chinese)
- [18] 江铭炎,袁东风.人工蜂群算法及其应用[M].北京:科学出版社,2014.
- JIANG Mingyan, YUAN Dongfeng. Artificial bee colony algorithm and its application [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [19] 王梦楠.基于蚁群算法的集装箱港口海铁联运班列服务网络优化[D].大连:大连海事大学,2018.
- WANG Mengnan. Optimization of container port sea-rail combined transport service network based on ant colony algorithm [D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2018.(in Chinese)