



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2304474

引用格式:李玉民,李腾,王知临,等.基于外部转运式的货运空铁联运衔接方案设计[J].科学技术与工程,2024,24(18):7843-7850.

Li Yumin, Li Teng, Wang Zhilin, et al. Connecting scheme design of freight air-rail intermodal transport based on external transfer type[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7843-7850.

交通运输

基于外部转运式的货运空铁联运衔接方案设计

李玉民,李腾,王知临,马芳媛

(郑州大学管理学院,郑州 450001)

摘要 在高附加值、高时效性要求的货物日益激增的需求驱动下,航空货运和高铁货运联运常态化趋势逐渐显现。在运输方式转换中,衔接环节一定程度上影响着联运货物的运输成本和运输效率,为进一步优化空铁联运方案,提出了基于“全货机+高铁货运专列”联运外部转运衔接模式,构建货运空铁联运衔接模型,设计货运空铁时刻表衔接方案及摆渡车调度方案,并设计遗传算法对模型进行求解,并进一步分析衔接成本及衔接时间。以某日虹桥机场 T2 航站楼和上海虹桥高铁站的部分实际时刻表数据为例,得到一个货运空铁联运衔接方案。对该方案进行仿真,结果表明:需设置 3 辆摆渡车在空铁之间完成货物的衔接作业,此时各摆渡车的工作量得到合理分配,且每批货物的衔接成本最小;在货运空铁联运总成本中,衔接成本占 20% 左右,且货运空铁联运在长途运输中成本优势更为明显;装卸货效率是影响货运空铁联运衔接时间的关键因素。从而为未来长途货运空铁联运运营提供参考。

关键词 综合交通运输;空铁联运;遗传算法;衔接模式;运输组织

中图法分类号 U15;

文献标志码 A

Connecting Scheme Design of Freight Air-Rail Intermodal Transport Based on External Transfer Type

LI Yu-min, LI Teng, WANG Zhi-lin, MA Fang-yuan

(Management College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

[Abstract] Air-rail intermodal freight transportation offers a promising solution to address the increasing demand for high-value and time-sensitive goods. In the transformation of transport mode, the connecting link was affected by the transport cost and transport efficiency of combined transport goods to a certain extent. Based on the external transfer connection mode of “all-cargo aircraft + high-speed rail freight train”, a model was constructed for optimizing the connection timetable and ferry scheduling scheme in air-rail intermodal freight transportation to further optimize the air-rail intermodality scheme. To solve this model, an approach based on genetic algorithms was developed. Connection cost and connection time were further analyzed. The model and approach were tested in a real-world case of air-rail freight transportation using the timetable data of Hongqiao Airport T2 Terminal and Shanghai Hongqiao High-speed Railway Station on a specific day. The simulation results show that three ferry cars are needed to transport the goods in the air-rail connection. In this scheme, the workload of each ferry car is reasonably distributed, and the cost of each batch of goods is the smallest. The connection cost accounts for about 20% of the total cost, and the cost advantage of air-rail intermodality in long-distance transportation is more obvious. The efficiency of loading and unloading is the key factor affecting the connection time of air-rail intermodality. It can provide a guidance for the future operation of long-distance air-rail intermodality.

[Keywords] integrated transportation; air-rail intermodal transport; genetic algorithm; connection mode; transportation organization

近年来,高时效性、高附加值类货物的运量持续快速增长,货运市场对运输的时效性和经济性提出了更高的要求。目前中国航空货运正处于专业发展阶段,航空货运需求随着跨境电子商务的迅猛发展而逐年增加,且行业垂直化整合加速。随着中

国高铁的发展,铁路客货运输逐步分流,铁路货运能力持续增加^[1]。2022 年中国高铁运营里程达到 4.2 万 km,高铁快递作为一种新兴且高效的快递运输方式逐渐崭露头角,目前已设立 3 200 多家经营机构,遍布全国 300 多个城市。从民航运输机场的

收稿日期:2023-06-15 修订日期:2024-03-26

基金项目:国家自然科学基金(72101041);河南省软科学项目(242400411138);河南省高校哲学社会科学基础研究重大项目(2023ZKYJ21)

第一作者:李玉民(1969—),男,汉族,河南南阳人,博士,教授。研究方向:物流与供应链管理。E-mail:liyumin@zhu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

货邮吞吐量来看,中国航空货运业务大部分在东部地区开展,2021年华东地区邮件吞吐量占全国42.1%,中东部地区“航空+铁路”衔接格局已基本形成,因此在东部城市群范围内,“全货机+高铁货运专列”的货运空铁联运模式具有一定可行性。目前,中国铁路成都局集团有限公司正积极探索货运“空铁联运一单制”物流新模式,在西成高铁上完成首次跨境商品运输。在航空货运和高铁快运网络不断完善的大背景下,“全货机+高铁货运专列”联运有望成为高时效性、高覆盖率的货运服务新模式,有利于推进构建高效快捷的“全球123快物流圈”体系,优化中长距离高时效货物的运输服务体系,更好地满足高附加值、高时效快递产品的要求。

目前关于空铁联运的研究多集中于旅客空铁联运,在空铁联运时刻表优化方面,可钰等^[2]和Tan等^[3]针对不同类型的客流起讫点(origin-destination, OD),通过调整高铁时刻表提高客流OD可达性。梅正男等^[4]通过调整航空时刻表提高空铁联运OD服务频率。何文晖等^[5]基调整城市轨道交通列车时刻表,以实现列车与航班和高铁时刻表的衔接优化。在此基础上,部分学者基于铁路和民航的时刻表构建了空铁联运网络并进行优化,徐凤等^[6]针对单层网络无法有效刻画空铁联运系统复杂结构的问题,提出一种基于多层网络的空铁联运双层加权网络模型。吕宗磊等^[7]在枢纽航线网络基础上,引入高铁线路建立优化模型以减少网络成本。吴明昊等^[8]在建立由航班、高速铁路和空铁换乘系统构成的复合网络的基础上,构建双层优化模型,使区域间的出行总时间最小化。此外还有文献研究了旅客空铁联运的服务和定价,陆溪等^[9]从联运网络的角度出发,对空铁联运恢复旅客行程的方法进行研究;孟海洋等^[10]对高铁与民航的竞争空间距离进行分析,探究民航与高铁的竞争性问题;Jiang等^[11]提出了空铁联运乘客需求趋势的巴斯扩散+分解选择+季节波动预测模型。Yuan等^[12]探讨空铁联运不同乘客群体的路径异质性,通过识别不同的乘客群体以精确改善空铁联运服务;蒋琦玮等^[13]制定了具有较强竞争力的空铁联运定价策略。关于货运空铁联运,申皓等^[14]在考虑货物时间价值的基础上进行货运空铁联运转运枢纽的选址。欧阳杰等^[15]归纳分析无缝衔接式、外部转运式及内部接驳式3种货运空铁联运衔接模式,重点论证了空铁联运转站场的I型、L型和U型3种空间布局模式及运输特性。

以上文献多基于旅客空铁联运进行研究,对于

货运空铁联运的相关研究较少,且相关文献集中于对转运枢纽选址及空间布局模式的研究。目前货运空铁联运处于初步发展阶段,缺乏对货运空铁联运时刻表衔接方案设计、高效组织货运衔接作业的研究。基于外部转运式的“全货机+高铁货运专列”联运模式具有一定可行性,如何对两者之间的运输组织进行设计和协调,进而高效组织空铁之间的货运衔接作业至关重要。

因此,现针对现有研究不足,基于“全货机+高铁货运专列”联运外部转运衔接模式,在借鉴旅客空铁联运时刻表衔接方案的基础上,将空铁联运中货物的时间价值视为一种运输成本^[16],同时考虑多批次货物从多始发地至多目的地之间的分流、转运和衔接,以成本最低为目标构建货运空铁联运的衔接模型,并在此基础上设计最优货运空铁联运时刻表衔接方案及机场与高铁站之间的摆渡车调度方案,最后对各货物批次的衔接成本及衔接时间进行对比分析,探索货运空铁联运在长途运输中的成本优势及未来优化方向,助力货运空铁联运衔接模式的实现。

1 货运空铁联运模式分析

1.1 货运空铁联运组织模式

(1)航空货运模式。使用全货机将货物运往机场。全货机运输具有诸多优势:一是运力固定,在航班载货量是固定的情况下,全货机的运力不受乘客托运行李多少的影响;二是时效性高,可以与地面运输网络形成互补与联动;三是物流效率高,通过全货机运输的货物不需要去机场货站楼办理托运和取货,货物在机场的停留时间大幅缩减。

(2)铁路货运模式。使用高铁货运专列将货物运往目的地。中国高铁已覆盖95%的100万人口及以上的城市,高铁货运专列可以充分发挥高铁成网运行和安全快捷等优势,适合大批量、规模化的货物运输,极大增强批量快件运力供给,能有效满足客户对高附加值、高时效快递的服务需求,且几乎不受天气影响,更好满足货运空铁联运的运输需求。

(3)外部转运衔接模式。本文提出采用外部转运模式实现货运空铁联运的衔接。货物的航空运输作业和高铁运输作业由机场和高铁站各自独立完成,其中航空货物的作业流程在机场货运区进行,高铁货物的作业流程在高铁货运站内进行。在机场和高铁站之间,使用摆渡车对联运货物进行接驳,解决机场和高铁站之间“无缝衔接”的问题。该模式需要在航空-公路-铁路3种交通方式之间进行

2次货物中转作业,且机场货运站和铁路站场相对独立作业,两者均可各自完成货物装卸等系列作业。

1.2 货运空铁联运流程设计

结合机场货运空铁联运实际情况,综合给出货运空铁联运的作业流程,如图1所示。流程设计之前,进行如下必要的假设:①假设货物为高价值货物,航空货运方式为全货机货运,高铁货运方式为货运专列运输;②考虑到货运空铁联运流程的繁琐和复杂性,且目前在国内进行初步尝试,货运空铁联运流程设计主要考虑国内货物联运;③假设各流程操作顺利进行,没有其他特殊情况发生。

在满足以上假设的基础上,货运空铁联运作业具体流程如下:①飞机进港以后,货运人员接机,并进行单据核对和货物验收工作;②外场拖车将货物从机坪运到空铁联运货运区;③进行航空集装箱的拆解,组织卸货;④进行分拣组配作业,称重后将货物集装到铁路集装器;⑤将铁路集装器装载至摆渡车运往高铁站;⑥摆渡车到达高铁站后,将铁路集装器按照货运装车计划装载至高铁货运专列;⑦完成单据交接,高铁货运专列驶离高铁站。

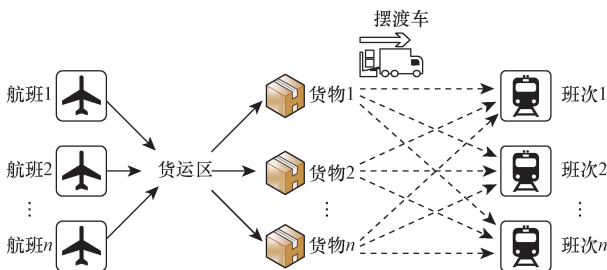


图1 货运空铁联运流程

Fig. 1 Air-rail intermodal transport process

2 模型构建

2.1 问题描述

采用外部转运式的货运空铁联运衔接模式,货物首先通过航空运输到达机场,在机场货运区进行卸货和分拣等作业流程,再由摆渡车转运至高铁站,最终通过高铁货运专列运往目的地。针对航空转运至高铁的货运空铁联运服务,基于机场与高铁站之间的货物转运需求,考虑飞机航班和高铁班次的时间衔接以及不同批次货物的分拣和分流,设计货运空铁联运的时刻衔接方案及空铁之间货物转运的摆渡车调度方案,使货运空铁联运衔接时间最短,衔接作业成本最小,从而更好地协调和优化货运空铁联运衔接模式,助力未来货运空铁联运常态化运营。

2.2 模型假设

(1)机场和高铁站之间存在多辆摆渡车同时作业。

(2)所有摆渡车型号一致。

(3)摆渡车行走过程中,全程运行速度恒定。

(4)不考虑道路拥堵以及车辆事故等突发情况。

(5)所有批次货物装卸作业的单位成本一致。

(6)所有批次货物分拣作业的单位成本一致。

(7)摆渡车每次取送货作业的运输成本一致。

(8)货物装卸作业成本包含所需设备成本和人工成本。

(9)不考虑外场拖车、装器拆解等作业的时间及成本。

(10)同一批次货物同时进行各项作业,到达高铁站时刻一致。

(11)模型只考虑单向情况,货物先在机场进行卸货和分拣作业,之后通过摆渡车从机场运往高铁站,最后在高铁站进行装货作业。

2.3 模型建立

2.3.1 目标函数

模型第一个目标函数为货物等待时间成本最小。货物等待时间成本指从飞机航班降落时刻开始到高铁班次离站时刻为止货物的等待时间成本,即

$$Z_1 = \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G X_{ph}^g c_g Q_g (T_h - T_p) \quad (1)$$

式(1)中: P 为飞机航班集合, $p \in P$; H 为高铁班次集合, $h \in H$; G 为分拣后货物集合, $g \in G$; X_{ph}^g 为航班 p 上第 g 批货物被装载到高铁 h 班次上,取1时表示装载,否则取0; c_g 为单位货物的时间价值; Q 为货运量; T_h 为高铁 h 的班次离站时刻; T_p 为飞机 p 的航班降落时刻。

模型第二个目标为承运人承运成本最小。承运人承运成本包括飞机卸货成本、货物分拣成本、摆渡车装货成本、摆渡车卸货成本、摆渡车固定成本、摆渡车耗电成本、高铁装货成本、摆渡车空闲时间价值成本、高铁运输成本,即

$$Z_2 = \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G X_{ph}^g Q_g (c_{px} + c_j + c_{hz}) + \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G X_{ph}^g Q_g (c_h S_h + c_g t_s) + \sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G Y_{fg} Q_g (c_{fz} + c_{fx}) + \sum_{f=1}^F (K S c_{fd} + c_{fg}) + \sum_{f=1}^F c_f t_{fk} \quad (2)$$

式(2)中: c_{px} 为飞机单位货物卸货作业成本; c_j 为单位货物分拣作业成本; c_{hz} 为高铁单位货物装货作业成本; c_h 为高铁单位货物运输成本; S_h 为高铁里程; t_s 为高铁班次历时; F 为摆渡车集合, $f \in F$; Y_{fg} 为第 g 批货物被装载到摆渡车 f 上,取1时表示装载,否则取0; c_{fz} 为摆渡车单位货物装货作业成本; c_{fx}

为摆渡车单位货物卸货作业成本; K 为摆渡车每日完成作业次数; S 为机场到高铁站往返路程; c_{fd} 为摆渡车单位里程耗电成本; c_{fg} 为单辆摆渡车固定运营成本; c_f 为单辆摆渡车的时间价值; t_{fk} 为单辆摆渡车每日空闲时间。

两个目标函数分别为承运人的承运成本和货物的等待时间成本, 此处采用线性加权法将两个目标函数合为一个总目标函数, 各个目标函数的权重系数大小反映了各目标在货运空铁联运中的重要程度。两个目标函数权重分别为 m 和 n , 即综合联运成本最小, m 、 n 在 $0 \sim 1$ 之间, 且 $m + n = 1$, 加权后目标函数为

$$\min Z = m \left[\sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G X_{ph}^g c_g Q_g (T_h - T_p) \right] + n \left[\sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G X_{ph}^g Q_g (c_{px} + c_j + c_{hz}) + \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^G X_{ph}^g Q_g (c_h S_h + c_g t_s) + \sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G Y_{fg} Q_g (c_{fz} + c_{fx}) + \sum_{f=1}^F (K S c_{fd} + c_{fg}) + \sum_{f=1}^F c f t_{fk} \right] \quad (3)$$

式(3)中: T_p 为飞机 p 的航班降落时刻; t_{fk} 为单辆摆渡车每日空闲时间。

2.3.2 约束条件

航班 p 上第 g 批货物被装载到高铁 h 班次上, 即当 $X_{ph}^g = 1$ 时, 高铁班次出发时刻必须能够满足货物在机场和高铁站之间转运的时间要求, 即

$$\sum_{g=1}^G X_{ph}^g Q_g (t_{px} + t_{fz} + t_{fx} + t_{hz} + t_j) + t_{fy} \leq T_h - T_p \quad (4)$$

式(4)中: t_{px} 为飞机单位货物卸货作业时间; t_{fz} 为摆渡车单位货物装货作业时间; t_{fx} 为摆渡车单位货物卸货作业时间; t_{hz} 为高铁单位货物装货作业时间; t_j 为单位货物分拣作业时间; t_{fy} 为摆渡车从机场到高铁站的行走时间。

每批货运量小于高铁货运专列车载重量和全货机载重量, 即

$$Q_g \leq D_p \quad (5)$$

式(5)中: D_p 为高铁货运专列车载重量。

$$Q_g \leq D_h \quad (6)$$

式(6)中: D_h 为全货机载重量。

每一批次货物总货量不超过所有摆渡车总载重量, 且满足每辆摆渡车最小载重率, 即

$$\sum_{f=1}^F D_f d \leq Q_f \leq \sum_{f=1}^F D_f \quad (7)$$

式(7)中: D_f 为摆渡车载重量; d 为摆渡车最小载重率。

一天中摆渡车总货运量可以满足空铁联运货运总需求, 即

$$K \sum_{f=1}^F D_f \geq Q \quad (8)$$

$$X_{ph}^g \in \{0, 1\} \quad \forall g \in G, p \in P, h \in H \quad (9)$$

$$Y_{fg} \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F, g \in G \quad (10)$$

$$K \in \mathbf{N}^+ \quad (11)$$

3 算法设计

步骤1 染色体编码与解码。如图2所示, 将所需要选择的 $M + 1$ 个决策变量进行编码, 生成长度为 $M + 1$ 的序列, 其中第1个为摆渡车规模决策变量, 第2至 $M + 1$ 个为摆渡车调度决策变量, 每个基因表示为 $0 \sim 1$ 的随机4位小数。

步骤2 生成初始种群。随机产生 K 个初始串结构数据, 每个串结构数据称为1个序列。所有序列构成了初始种群。

步骤3 适应性评价。将结构串数据解码为 $M + 1$ 个决策变量, 确定货物对应的摆渡车规模及摆渡车调度方案, 并计算出该衔接方案的目标函数值, 根据目标函数值的大小衡量序列的适应性。

步骤4 选择与交叉。采用随机竞争选择策略进行选择操作。每次按照轮盘赌选择机制选取一对序列, 然后让这对序列竞争, 适应度高的被选中, 如此反复, 直到选满为止。按照交叉概率 P_c 挑选2个父代序列, 通过两个染色体的交换组合, 把父串的优秀特征遗传给子串, 从而产生新的优秀序列。

步骤5 变异。在群体中随机选择数个序列, 以概率 P_m 随机改变所选中的序列串结构数据中某个基因的值。

步骤6 进化终止条件。由于本文模型简化后, 变量个数较少且算法收敛速度快, 因此设置连续迭代100次后终止。

利用精英保留策略进行全局最优解更新, 以最大迭代次数为终止条件, 遗传算法求解流程如图3所示。

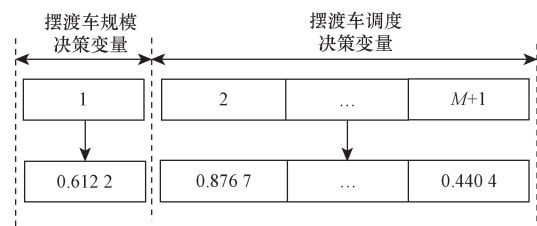


图2 染色体编码

Fig.2 The chromosome coding

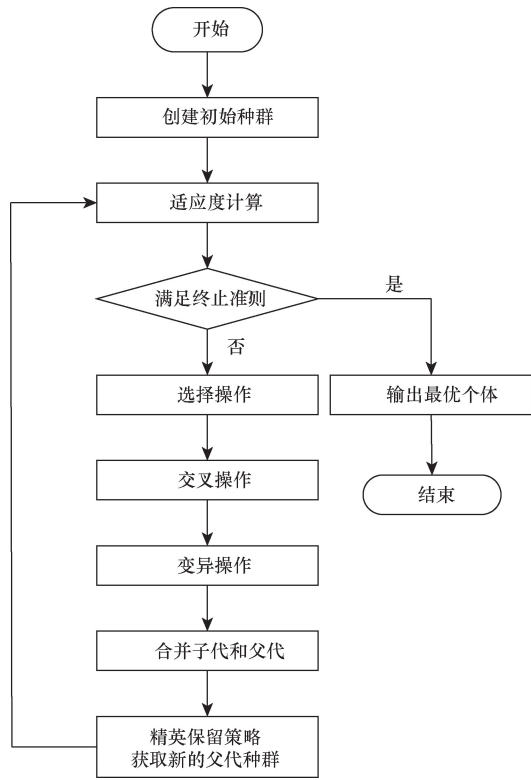


图3 遗传算法求解流程
Fig. 3 The genetic algorithm

4 实例分析

4.1 实例描述

上海是全球前三、中国民航规模最大的航空货运枢纽。2021年,上海浦东和虹桥两座机场年货邮吞吐量达436.6万t,同比增长8.47%,超过2017年423万t的历史高点,刷新上海航空货运枢纽保障能级的新纪录,为全球产业链供应链稳定贡献了中国力量。2022年受疫情影响上海机场货邮吞吐量有所下降,因此2021及以前年份的数据最具参考价值。上海虹桥机场货运量中九成以上是国内货物运输,且上海虹桥机场T2航站楼与虹桥火车站相邻,具备建立区域性货运空铁联运枢纽的条件,开展区域货运空铁联运服务,故以上海虹桥机场为例进行研究,选取某日到达上海虹桥机场T2航站楼的部分航班时刻表如表1所示。为了使计算结果有较强的对比性,选取距离上海高铁里程相对较近的城市杭州和盐城,假设其货运量分别为11t和9t,选取距离上海高铁里程相对适中的城市南京和芜湖,假设其货运量分别为16t和6t,选取距离上海高铁里程相对较远的城市合肥和台州,假设其货运量分别为12t和8t。

结合航空货运及高铁货运的实际运营情况,假设单辆摆渡车固定运营成本为150元/(辆·d),载重

表1 上海虹桥机场部分航班时刻表
Table 1 Part of the flight schedule of Shanghai Hongqiao Airport

起飞时间	到达时间	航班号	候机楼	起始地	目的地	航空里程/km
07:00	09:15	MU5100	虹桥(T2)	北京	上海虹桥	1 088
09:30	10:50	FM9206	虹桥(T2)	福州	上海虹桥	678
09:10	11:30	ZH9503	虹桥(T2)	深圳	上海虹桥	1 221
08:05	12:20	GS6587	虹桥(T2)	海口	上海虹桥	1 810
11:20	13:25	HO1112	虹桥(T2)	深圳	上海虹桥	1 221
12:30	14:05	FM9348	虹桥(T2)	武汉	上海虹桥	840

量1t,平均最小载重率为50%,装卸货成本为10元/t,耗电成本0.2元/km,行走速度60km/h,飞机卸货成本20元/t,高铁装货成本20元/t,货物分拣成本5元/t,全货机进行运输时的单位货物运输成本为0.3元/(t·km),载重量100t,高铁货运专列进行运输时的单位货物运输成本为0.1元/(t·km),载重量60t,货物时间价值为0.1元/(t·min),摆渡车时间价值为0.1元/(辆·min),摆渡车装卸货时间为2min/t,飞机卸货时间为4min/t,高铁装货时间为4min/t,货物分拣时间为2min/t。货物等待时间成本最小化目标是保证托运人的利益,承运人承运成本最小化目标是保证承运人的利益,本文综合考虑将托运人利益和承运人利益视为同等重要,将两个目标函数的权重同样设为0.5,其他应用场景,可以根据不同轻重,取不同权重。

4.2 结果分析

基于本文所建模型结合遗传算法,设置算法相关参数,运行得到基于外部转运式的货运空铁联运衔接最优方案。输入航班数据、高铁班次数据、货物数据等相关参数,利用遗传算法求解货运空铁联运衔接方案设计,算法结果收敛图如图4所示,此时需要设置3辆摆渡车在空铁之间完成货物的衔接作业,摆渡车工作量分配方案如表2所示,货运空铁联运衔接方案如表3所示。

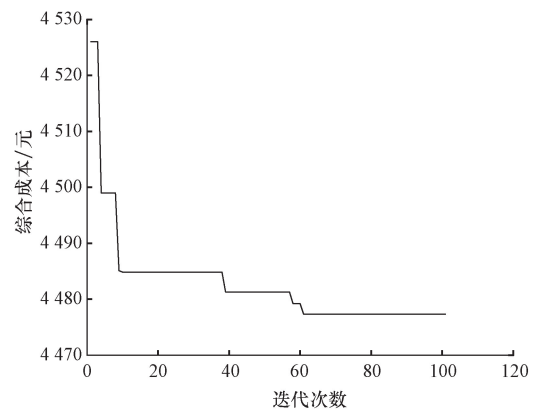


图4 算法收敛曲线
Fig. 4 The genetic algorithm convergence curve

表2 摆渡车工作量分配

Table 2 The workload of the ferry vehicles

货物批次	1	2	3	4	5	6
摆渡车1分配货物/t	7	0	5	2	4	3
摆渡车2分配货物/t	5	3	4	5	4	2
摆渡车3分配货物/t	0	3	7	2	3	3

为分析比较货运空铁联运的衔接成本及衔接时间,根据所得最佳空铁联运衔接方案,计算每批货物的衔接成本、衔接时间及空铁联运总成本、空铁联运总时间,如表4所示。

分析对比结果可知,货运空铁联运衔接成本占总成本的百分比在20%左右,其中第2、4、6批货物的衔接成本占空铁联运总成本的百分比偏高,可能因为第4批货物运输的高铁里程最短,第2、6批货物运输的航空里程最短。可见当空铁联运里程较长,航空里程超过1 000 km时衔接成本占总成本的百分比为合理,说明货运空铁联运在长途运输中成本优势更为明显。

货运空铁联运总时间在7 h左右,说明通过空铁联运可以实现货物的次日达,其中货运空铁联运衔接时间占总时间的百分比在40%左右,整体偏高。

在进行货物空铁衔接作业时,需要对货物进行装卸、分拣及运输等作业,且每批货物需要进行两次装卸货作业,计算每批货物的装卸货作业时间如表5所示。

装卸货作业时间占衔接时间的百分比在80%左右,其中第2批货物装卸货作业时间占衔接时间的百分比偏低,可能因为该批货物数量较少,装卸货作业所需时间较短,第3批货物装卸货作业时间占衔接时间的百分比最高,可能因为该批货物数量最多,装卸货作业所需时间较长。空铁联运货物多为高价值货物,通过航空集装箱载运,其根据飞机货舱的形状设计,因此规格和型号甚多,拆解和集装耗费大量时间,再加上人工安全固定、货物清点等流程,装卸时间自然比较漫长。由此可见装卸货效率是影响货运空铁联运衔接时间的主要因素,衔接时间的增加会直接导致货运空铁联运总时间增加,货运时间价值也会增加,最终使货运空铁联运总成本增加。

5 结论

本研究提出的基于“全货机+高铁货运专列”

表3 货运空铁联运衔接方案

Table 3 Freight air-rail intermodal transport connection plan

货物批次	货运量/t	到达机场时间	高铁班次 出发时间	高铁班次 到达时间	乘坐高铁车次	目的地	高铁里程/km
1	12	09:15	12:03	14:31	G1956	合肥	465
2	6	10:50	14:03	16:53	G1464	芜湖	294
3	16	11:30	15:00	15:59	G264	南京	301
4	9	12:20	14:49	17:12	G8354	盐城	157
5	11	13:25	15:32	16:32	G7365	杭州	158
6	8	14:05	16:11	19:19	G7571	台州	484

表4 空铁联运成本及时间对比

Table 4 Cost and time comparison of freight air-rail intermodal transport

货物批次	1	2	3	4	5	6
衔接成本/元	1 036.80	566.10	1 446.20	767.40	897.60	624.43
空铁联运总成本/元	5 511.60	1 962.90	7 788.60	2 862.60	4 939.00	3 027.63
衔接成本占总成本百分比/%	18.81	28.84	18.57	26.81	18.17	20.62
衔接时间/h	2.80	3.22	3.50	2.48	2.12	2.10
空铁联运总时间/h	7.52	7.38	6.82	9.12	5.20	6.82
衔接时间占总时间百分比/%	37.25	43.57	51.34	27.24	40.71	30.81

表5 货物装卸时间对比

Table 5 Comparison of cargo loading and unloading time

货物批次	1	2	3	4	5	6
装卸货时间/h	2.40	1.20	3.20	1.80	1.70	1.60
装卸货时间占衔接时间百分比/%	85.71	37.31	91.43	72.58	80.31	76.19

联运外部转运衔接模式具有高时效、低成本的优势,可有效满足客户货运需求,有助于货运空铁联运模式的实现。通过构建货运空铁联运衔接模型,以成本最低为目标对货运空铁时刻表衔接方案及摆渡车调度方案进行设计和协调,并进一步分析比较货运空铁联运的衔接成本及衔接时间,虽然某些结果可能会与实际略有出入,但以下结论仍具有一定的普适性。

(1)基于外部转运式的货运空铁联运衔接方案具有可行性,本文模型可以得到最优货运空铁联运衔接方案。实例中设置3辆摆渡车在空铁之间完成货物衔接作业时,可满足空铁之间货物转运需求,摆渡车工作量得到均衡分配,且成本达到最优。

(2)货运空铁联运更适合长途货物运输。货运空铁联运衔接成本占联运总成本20%左右,且货运空铁联运里程越长,衔接成本占空铁联运总成本的百分比越小。

(3)货物装卸效率是影响货运空铁联运衔接时间的关键因素。货运空铁联运衔接时间占总时间的百分比在40%左右,削弱了货运空铁联运的高时效优势,其中货物装卸货作业时间占比高达80%左右。因此为实现货运空铁联运更好地衔接,保证货运空铁联运的时效性,需加快机场和高铁站的硬件设施建设,同时推进空铁信息互联,实现货物装卸、货物在途、到达预报等信息交换共享,以提高货物装卸货效率。

本文研究仅考虑高铁接续航空的货运空铁联运服务,相同情况下航空接续高铁同样适用,且未来需要考虑常态化、大批量的货运空铁联运。

参 考 文 献

- [1] 连峰,杜怡颖,杨忠振. 基于铁路货运能力的集港集装箱班列组织优化[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(2): 277-286.
Lian Feng, Du Yiyang, Yang Zhongzhen. Operation optimization of container train liner based on railway freight capacity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(2): 277-286.
- [2] 可钰,聂磊,袁午阳. 基于空铁联运OD可达性的高铁时刻表优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 23-29.
Ke Yu, Nie Lei, Yuan Wuyang. A timetabling model for high-speed railway based on accessibility of air and high-speed rail intermodality service[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 23-29.
- [3] Tan Y, Li Y, Wang R, et al. Improving synchronization in high-speed railway and air intermodality: integrated train timetable rescheduling and passenger flow forecasting[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(3): 2651-2667.
- [4] 梅正男,聂磊,任广建,等. 基于空铁联运OD服务频率优化的航班时刻表调整模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3581-3589.
Mei Zhengnan, Nie Lei, Ren Guangjian, et al. Flight timetable adjustment model based on optimization of OD service frequency of air-rail intermodality[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3581-3589.
- [5] 何文晖,孙克洋,王兵,等. 考虑空铁联运的城市轨道交通时刻表优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 351-358.
He Wenhui, Sun Keyang, Wang Bing, et al. Optimization of urban rail transit timetable considering air-rail intermodal transportation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 351-358.
- [6] 徐凤,朱金福,陈丹. 基于多层网络的空铁联运双层加权网络结构特性[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(1): 49-56.
Xu Feng, Zhu Jinfu, Chen Dan. Structure characteristics of air-rail double-layer weighted network based on multilayer network[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2023, 20(1): 49-56.
- [7] 吕宗磊,吴志帅,徐涛,等. 面向空铁联运的枢纽航线网络优化模型[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(4): 1188-1194.
Lv Zonglei, Wu Zhishuai, Xu Tao, et al. Hub-Spoke airline network optimization model for air-high-speed rail intermodal transportation[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(4): 1188-1194.
- [8] 吴明昊,陈康,卢柄宜. 空铁联运协同下的跨域航空服务网络优化[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(5): 13-19.
Wu Minghao, Chen Kang, Lu Bingyi. Network optimization of inter-regional air service under the coordination of air and high-speed rail[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(5): 13-19.
- [9] 陆溪,邵荃. 基于空铁联运的延误旅客行程恢复方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12150-12155.
Lu Xi, Shao Quan. Itinerary recovery method for delayed passengers based on air-rail combined transport[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 12150-12155.
- [10] 孟海洋,陈思琦,李红昌,等. 基于旅客时间价值的高铁民航竞争空间距离研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10755-10762.
Meng Haiyang, Chen Siqu, Li Hongchang, et al. Spatial competition distance between civil aviation and high-speed railway from the view of time value of passengers[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10755-10762.
- [11] Jiang Y, Gao S, Guan W, et al. Bass + BL + seasonality forecasting method for demand trends in air rail integrated service[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2022, 18(2): 281-298.
- [12] Yuan Y, Yang M, Feng T, et al. Heterogeneity in passenger satisfaction with air-rail integration services: results of a finite mixture partial least squares model[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2021, 147(7): 133-158.
- [13] 蒋琦玮,穆鹏程,姚加林. 基于双层规划模型的空铁联运定价策略研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(12): 3130-3137.
Jiang Qiwei, Mu Pengcheng, Yao Jialin. Research on pricing strategy of air-rail combined transport based on bi-level programming model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(12): 3130-3137.
- [14] 申皓,张锦,孙文杰,等. 基于货物时间价值的空铁联运转运枢纽选址优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1):

- 48-57.
Shen Hao, Zhang Jin, Sun Wenjie, et al. Optimization of air-rail transshipment hub location based on time value of goods[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 48-57.
- [15] 欧阳杰, 尚芮, 梁旭. 快件空铁联运组织模式及联运站场布局研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(9): 108-115.
Ou Yangjie, Shang Rui, Liang Xu. Research on organization mode and station yard layout of air-rail express transportation[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(9): 108-115.
- [16] 冯芬玲, 孙楠佳. 考虑时间价值的中非多式联运路径与出海港选择[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 45-53.
Feng Fenling, Sun Nanjia. Time value based route and port selection for China and Africa multimodal transportation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 45-53.