

复合联运物流运输网络建模与路径优化

张楠¹, 魏波², 陈聪²

(1. 天津海运职业学院航运经济系, 天津 300300; 2. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 在全球经济一体化背景下, 物流行业成为不可或缺的经济支柱之一, 在经济中的作用不断显现, 复合联运逐渐成为物流行业的重要运输方式。以空铁海复合联运作为研究对象, 构建不同的搜索空间, 确定边界条件并分析货运影响参数, 包括时间、成本、距离。以遗传算法为原则, 求解建立空铁海复合联运模型并进行路径优化。确定 3 组节点组, 每组都包含普通货物、特殊货物、航线拥堵 3 种情况, 分别优化成本、时间、距离, 为复合联运业务提供路径选择依据。通过分析, 在规定的搜索空间内分别选出了最优时间路线、最优成本路线、最优距离路线。期望可以在物流运输过程中实现降本增效、减少风险、提高行业竞争力的目的。

关键词: 复合联运; 路径优化; 搜索空间; 遗传算法

中图分类号: U122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)05-0102-09

随着“一带一路”倡议的不断推进, 打通沿线国家间的物流运输网络, 实现高效低成本的物流运输模式成为迫切问题, 国际间运输成本直接影响“一带一路”的发展状况^[1]。与此同时, 伴随着突发公共卫生事件和海上运输突发事件(苏伊士运河交通拥堵)的发生, 也使得国际运输不确定性显著增加, 直接影响国际运输成本和效率, 对世界经济的复苏带来了潜在风险。近期, 中国将俄罗斯符拉迪沃斯托克港作为内贸运输中转口岸, 极大地促进了中俄以及周边地区的贸易, 充分发挥复合联运在国际贸易物流运输中的优势^[2]。为更好地探索复合联运方式在当下国际物流运输中的作用, 本文对复合联运方式下的物流运输网络构建分析模型, 并利用遗传算法进行货运路径优化。

复合联运的优化问题受到了国内外很多专家学者的关注。陈泪梨等^[3]开展了不确定条件下的复合联运路径优化研究, 并通过采用随机规划理论, K 短路算法的方法来求解复合联运路径优化模型。丁立群^[4]认为考虑混合时间窗对运输效率的影响很有必要, 并针对复杂运输系统中的多个运输环节, 提出了一种基于混合时间窗口的多个运输环节的优化方法。Sun 等^[5]为了优化配送路线提出了一种新的自适应变异的自适应遗传算法来提高局部范围内的搜索能力, 比一般的遗传算法具有更快的收敛速度。户佐安等^[6]利用基于情景的鲁棒优化方

法, 以运输、中转和仓储费用之和最小的多式联运路径优化模型, 探究鲁棒优化解的质量与遗憾系数、随机数波动范围的关系, 对混合不确定条件下路径优化进行了分析。杨喆等^[7]为进一步提高算法的求解质量, 提出了带启发式因子的特殊解码方式, 设计了一种带邻域搜索策略的自适应差分进化算法, 验证结果稳定。在低碳全球化浪潮中, 碳排放逐渐被物流运输行业所重视。杨洛郡等^[8]通过采用模糊自适应遗传算法(FAGA)和快速非支配排序遗传算法(NSGA-II), 构建以运输时间、碳排放、运输成本为目标函数, 碳排放量为约束的绿色多式联运路径多目标优化模型。孙家庆等^[9]在现有研究基础上, 建立以物流总费用和碳排放为优化指标的物流路线优化模型。张旭等^[10]针对低碳复合联运路径优化中, 将直接运输费用、中转费用和时间费用相结合, 基于碳排费用构建了混合稳健性随机最优模型。在复合联运运输方式上研究人员的侧重也有所不同。马超^[11]在前人研究基础上引入鲁棒优化理论对复合联运路径优化研究中的海铁联运模式进行模型验证, 对中欧陆海联运路径决策进行了探究, 充分考虑了航运因素在联运模式下对路径的影响。杨晓康和宋秀峰^[12]在传统遗传算法的基础上, 引入模拟退火算法的 Metropolis 准则, 提升路径规划效率建立航空物流配送路径优化模型, 探索了一种航空物流配送路径优化的方法。

收稿日期: 2023-10-26

作者简介: 张楠(1981—), 男, 天津人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为港口与航运管理; 魏波(2001—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为飞行器设计; 通信作者陈聪(1982—), 女, 辽宁鞍山人, 硕士, 副教授, 研究方向为航空维修与故障诊断。

空铁海复合联运是物流运输中极为重要的一种模式,如何使复合联运成立并最终达到良好的效果,需要依据现有的航运图和空铁联运图构建并划分搜索空间,确保研究具有实际意义。对复合联运中所涉及的主要影响因素分别进行分析和数据提取,保证结果的正常输出。建立空铁海复合联运路径优化模型,为遗传算法求解奠定基础,并确定需要优化的参数:运输成本、运输距离、运输时间。通过构建搜索空间网络图来确定需要分析的城市节点,运用遗传算法对优化模型进行求解。以3组节点空间,每组分别用3种不同的案例情况进行求解,求出不同情况下的最优路径。

1 复合联运的参数选取

1.1 复合联运路径规划影响因素分析

运输时间、运输距离和运输成本是影响复合联运物流运输效率的重要参数。对复合联运的路径规划将其作为变量因子进行复合联运路径规划,找出最符合实际情况的最优路线。各种运输方式对比见表1。

(1)运输时间。复合联运包含了两种类型的货运时间。第一种是在每一种货运方式中间所产生的在途耗费时间;第二种是为了在一个节点上完成下一种运输方式所需要的材料处理、装卸等所花费的时间,被称为转运时间。在这两类运输事件中,如果有设备维修、桥梁和铁路改建等情况,则需要计算为总运输时间。不管是对物流企业,还是对顾客,运输时间的浪费都会造成经济效益的损失,因此,在大多数情况下,在进行复合联运路线计划的评价中,所有的运输时间都是一个关键的参量。在此基础上,提出一种基于遗传算法的优化复合联运路线时间的方式。

(2)运输距离。运输距离是指在一条复杂的交通路线上,每个换乘结点总路程的总和。而运输路程的数量与运输时间以及运输费用的耗费是成比例的,也就是说运输路程越长,运输费用就越高。所以,当对运输线路进行优化时,一般都会选择相对短的运输路程。

(3)运输成本。运输成本是指当货物的真实位置发生变化或出现真实移动时,由物流公司和顾客共同负担的总成本,包括每个运输方式所需要的过路费、燃油费,在某个结点处中途停车的装卸费用,搬运工人的人工费用,设备的维护费用等。

1.2 复合联运网络的数学表达

复杂交通网络包括多个结点与多个结点间的连线,这些连接可以是一条直线,也可以是多条并行的线,反映了各种交通方式之间的转换。在本文的案例中基于两点间的运输网络来进行构建,每组的起点、终点和中转点确定,求解两点之间的最短路径、最少时间和最低成本。

两个节点间的交通问题是复合联运系统中最根本的问题,也是复杂联运系统中最根本的问题。两点之间的运输问题实质上就是解决两点之间最短运输路线的问题,这个问题可以被描述成:存在一条连线,把它记为 (i, j, k) ,并且 i, j 都属于 N , k 属于 K ;以 i 为起始点,以 j 为结束点,以两个结点之间的传输方式为 k , N 为网络运输图中所有节点的集合, K 为网络运输图中运输方式的集合^[1]。

在一个连通图 $G(V_m, E_n)$ 中存在 m 个节点, n 条弧线,用 c_{ij} 来定义弧线 (i, j) 的长度,如果解决了连通图内起始点到节点 m 的运输最短距离,就得到连通图 $G(V_m, E_n)$,矩阵长度 $C = \{c_{ij} | l \leq i < n, 1 \leq j \leq m\}$,根据 A^* 算法(一种静态路网中求解最短路径最有效的直接搜索方法,也是许多其他问题的常用启发式算法),那么目标函数为 $\min L(A^*) = \sum_{v_i, v_j \in A} c_{ij}$ 。

在复合联运下的网络交通图中,交通模式和交通路径是相互联系的。在特定的交通路线被决定时,也就是决定了选择哪一种运输方式,而在判断一种运输方式的优劣时,往往以其相对的运输路径为判断标准。

2 空铁海复合联运模型

假设从S地向D地运输一批货物,沿途经过 N 个城市(转运点),在各个中转节点之间有 K 种可供选择的运输方式,而每一种运输方式对应着 Q 条运输路线。在一条运输路线上,各种运输模式的运输费用、运输时间和运输距离均不相同。在综合联运的总体规划中,如何对运输路线、运输方式进行选择,使运输方案更为合理。在综合考虑运输成本、运输时间、运输距离等3个因素后,对综合运输的运输路径与运输模式进行优化设计。

表1 各种运输方式对比

运输方式	优势	劣势
航空运输	运输时间短、速度快、安全性强	运输成本高、运输能力有限
铁路运输	运量大、成本低、运输性准确	运输路线固定、灵活性差、建设周期长
水路运输	运量大、成本低、运距长	运输速度慢、投资大

2.1 边界条件

将现实状况与模型分析的需要相结合,提出以下边界条件:①在两个结点间,每个结点最多只能进行一次运输模式的转换;②在综合联运的全流程中,运输量是恒定的,也就是说,在每一个中间点都不做运输量的增加和减少的作业;③在运输过程之外发生的费用未被计算在内;④当同一交通工具在一个结点上进行切换时,同一交通工具在邻近结点上只能产生一条交通工具的运输弧;⑤同一节点对象仅允许通过一次。

2.2 参数说明

$A = \{a_1, a_2, a_3\}$ 代表不同运输方式的集合,其中 a_1 为空运, a_2 为铁运, a_3 为海运; $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 代表复合联运路径节点的集合, b_{ij} 为节点 i 到节点 j 运输; $\varphi(i) = \{b_i | e_{ij} \in E\}$ 为节点 b_i 的外邻边集合, $\eta(i) = \{e_{ij} \in E\}$ 为节点 b_i 的内邻边集合; E 代表复合联运两点之间路径线段的集合, e_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间的线段; t 为运输时间, t_{ija_i} 为货物由运输方式 i 通过节点 i 至节点 j 的在途运输时间; c 为运输成本, c_{ija_i} 为货物由运输方式 i 通过节点 i 至节点 j 发生的运输成本; d 为运输距离, d_{ija_i} 为货物由运输方式 i 通过节点 i 至节点 j 的运输距离; $\delta_{b_i a_i \rightarrow a_j}$ 为货物在节点 b_i 由运输方式 a_i 转换为运输方式 a_j 所需的中转时间; $\omega_{b_i a_i \rightarrow a_j}$ 为货物在节点 b_i 由运输方式 a_i 转换为运输方式 a_j 所需的中转成本; $u_{b_i a_i \rightarrow a_j}$ 为一组 $(0, 1)$ 变量,其中 $u_{b_i a_i \rightarrow a_j} = 1$ 代表货物在节点 b_i 满足运输方式由 a_i 转换为 a_j 的能力,否则 $u_{b_i a_i \rightarrow a_j} = 0$ 。

2.3 决策变量

(1) 当 x_{ija_i} 取 1 时,表示货物由运输方式 a_i 通过节点 i 到节点 j 之间的道路,否则 $x_{ija_i} = 0$ 。

(2) 当 $y_{b_i a_i \rightarrow a_j}$ 取 1 时,表示货物在节点 i 存在运输方式 a_i 转变为运输方式 a_j ,否则 $y_{b_i a_i \rightarrow a_j} = 0$ 。

2.4 构建初始多目标优化模型

以运输时间、运输距离和运输成本为优化指标,在综合考虑多个因素的情况下,构建以综合运输时间、运输距离和运输成本为优化目标的综合运输路线优化模型^[13]。

(1) 最小运输时间 $\min T$ 。

$$\min T = \sum_{a_i=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija_i} t_{ija_i} + \sum_{a_i=1}^3 \sum_{a_j=1}^3 \sum_{i=1}^n y_{b_i a_i \rightarrow a_j} \delta_{b_i a_i \rightarrow a_j} \quad (1)$$

(2) 最小运输距离 $\min D$ 。

$$\min D = \sum_{a_i=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija_i} d_{ija_i} \quad (2)$$

(3) 最小运输成本 $\min C$ 。

$$\min C = \sum_{a_i=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija_i} c_{ija_i} + \sum_{a_i=1}^3 \sum_{a_j=1}^3 \sum_{i=1}^n y_{b_i a_i \rightarrow a_j} \omega_{b_i a_i \rightarrow a_j} \quad (3)$$

约束条件:

$$y_{b_i a_i \rightarrow a_j} \leq \mu_{b_i a_i \rightarrow a_j} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \{j | b_j \in \varphi(i) a_i=1\}} \sum_{a_i=1}^3 x_{ija_i} - \sum_{j \in \{j | b_j \in \mu(i) a_i=1\}} \sum_{a_i=1}^3 x_{ija_i} = \begin{cases} 1 & b_i \text{ 为起点} \\ 0, & b_i \text{ 不为起点或终点} \\ -1, & b_i \text{ 为终点} \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{a_i=1}^3 x_{ija_i} \leq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{a_i=1}^3 \sum_{a_j=1}^3 y_{b_i a_i \rightarrow a_j} \leq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \{j | b_j \in \eta(i)\}} x_{ija_i} + \sum_{j \in \{j | b_j \in \mu(i)\}} x_{ija_i} \geq 2y_{b_i a_i \rightarrow a_j} \quad (8)$$

$$x_{ija_i} = \begin{cases} 1, & 1 \leq i, j \leq n \\ 0, & 1 \leq i \leq 3 \end{cases} \quad (9)$$

$$y_{b_i a_i \rightarrow a_j} = \begin{cases} 1, & 1 \leq i, j \leq 3 \\ 0, & 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (10)$$

在上述模型中,式(1)为最短总运输时间优化模型,其中总运输时间包括对象在途运输时间和对象在某一节点转换运输方式所用的时间;式(2)是一个最短的总体路径距离的最优模型。其中,在复合联运模式下,如何选择中转节点以满足式(2)的条件是十分重要的评价指标;式(3)为最小总体运输成本的优化模型,其中路径优化以降低投入成本、提高效率、提高顾客满意度为目标;式(4)限制对象仅可在具有重新装载能力的节点进行运输模式的转换;式(5)使某个转换节点的输入量与输入量达到均衡;式(6)限制对象只能在这些道路中的一个路段中选择一个运输模式;式(7)限制对象在特定节点上最多只可以有一个运输模式的变换;式(8)确保了货物在组合联运中的连续;式(9)和式(10)为 $\in [0, 1]$ 决策变量。

上述建立的模型为复合联运多目标路径优化模型,但是在进行多目标模型的求解时,经常运用线性加权的方法来使多目标线性模型变为单目标优化模型,便于使每个目标模型都同时得到最优解。因此,将 3 个多目标函数通过加入权重因子来改进成一个单目标函数优化问题,有利于案例的结果分析和精简,改进后的函数模型为

$$\min T = \min \left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i f_i \right) \quad (11)$$

式中: λ_i 为优化目标函数 f_i 的权重因子, $\lambda_i \in [0, 1]$,通过 λ_i 赋予的不一样的权重因子,改进优化模型都可得到相对应的值。通过赋予运输时间、运输成本、运输距离不同的权重因子来得到不同案例情况下的结果。

2.5 模型求解

遗传算法(GA)是一种仿效达尔文理论中的自然选择与遗传机制的生物演化过程的计算模型,能够有效地模拟自然界中的演化过程,寻找最优化的解决方案,也是一种适者生存、选择最优解的过程,通常被用于寻求最优解。一个循环包含了下列步骤:染色体的变化,也就是对一个染色体的数值进行修改;通过对两条染色体的随机选择,对其中的一些基因进行交换,并计算出个体的适合度;求出每条染色体在当前循环下的适应值;弱肉强食;选择下一代的染色体。具有很强的鲁棒性。

在解决该问题时,该方法通过建立一个适应性函数,然后基于该适应性函数评估群体中每个可能的解决方案,再通过选择、交叉和变异等操作,反复进行,最后得到该问题的最佳解决方案。

复合联运路径优化模型的遗传算法求解过程分为以下几步^[14]。

(1)编码与译码。在 $[0, 1]$ 的范围内,对模型中的判决变量 x_{ija_i} 、 $y_{b_ja_i \rightarrow j}$ 进行二进制编码。

(2)初始化群体。当一个编码方案被选定之后,一般会通过一种随机的方式产生一组个体,这个组被称作初始化群体。

(3)适应性评估。在初始种群中,通过适应性函数 F_i 来评估每一个个体是否是一个可行的解决方案,适应性函数越大,说明该个体的适应性函数越好,可以进入下一步操作,否则将被淘汰。

(4)选择运算。选择运算的任务就是从经过适应度评估后保留下来的父代群体中,根据“轮盘赌选择方法”,选择出一部分个体,并将其遗传给下一代群体。

(5)交叉运算。依据交叉概率 $P_c = \frac{N_c}{N}$ (N_c 为交叉个体的个数, N 为表示种群个体的总数),按照一定的方法,将不同的基因进行了互换,形成了一个新的个体。

(6)变异运算。以变异基因概率 $P_m = \frac{B}{NL}$ (B 为变异基因个数, N 为种群个体的总数, L 为编码串的长度)为基础,将某个体中转运输节点和转换

后的运输方式编码串的部分基因用其他基因来替换,从而生成新的基因的过程。

(7)终止运算。当到达最大迭代时,将结束迭代循环,并从历次迭代中找出最优解决方案的代码串,将其译码,得到最优可行解决方案和目标函数。

在此模型中分别考虑了运输时间、运输成本、运输距离3个影响因素,由于多目标模型通过线性加权的方法转化为单目标优化模型更加容易求解且方便。因此将多目标转化为了单目标。通过完整的建模流程以及求解步骤来进行案例分析。

3 案例分析

在前文的案例分析中包括3种情况:普通情况、航路拥堵、特殊货品(生鲜),通过赋予不同的权重因子来在3种约束条件下进行算例验证,研讨3种情况下最优的复合联运路径。普通情况下运输成本要素占比权重最大,敏感度最强,对运输成本进行优化,通过仿真分析来确定一条最优路线,得到最低成本。航路拥堵情况下运输距离要素占比权重最大,敏感度最强,对运输距离进行优化,可以得到最优路径以及最短距离。生鲜的运输时间要素占比权重最大,敏感度最强,对运输时间进行优化,可以得到最优路径以及最少时间。最后根据不同的案例情况确定3条最优路线。并将3个案例情况分为一组,总共3组,每组的起始点不同。

某个物流公司一直提供着两个城市之间的物流运输服务,目前有一批货物要求从起点城市运往终点城市。在货运过程中,货运路径多,货运模式多,物流公司希望能找到一种最佳的货运方案。已知此次运送的货物重量为10 t,每一批货物的起始点和目的地都是不相同的,中间城市也是不相同的。每个城市节点之间可选择的货运运输方式有航空、铁路和海运3种。为了方便表示和运算,将所有城市均采用节点表示。

目前中国内河航运体系主要由长江、黄河、珠江和淮河等内河航线构成。长江航运线连接重庆、武汉、南昌、合肥、安庆、南京、上海等重要港口和物流枢纽;黄河航运线连接兰州、银川、呼和浩特、郑州、开封、洛阳、许昌、安阳、济南、东营等重要的内河港口和物流节点;珠江航运线依托珠江交通优势,沿线港口包括广州港、深圳港、珠海港等现代化物流枢纽;淮河航运线连接宿州、合肥、马鞍山、徐州、盐城等内河港口和物流节点。根据民航数据通信公司的数据,2018年春运中国航空覆盖城市超过200个,各大航空公司提供国内航班,涵盖了从主要

城市到二三线城市的广泛航线网络。同时中国的高铁网络已经超过 4.2 万 km,成为全球最长的高铁网络,网络已连接大多数国内主要城市。

根据中国内河航运体系和空铁联运节点,构建合适的搜索空间,并确定所需城市。3 组共有 11 个城市,每组又分别有 7 个城市,求解出多个城市之间每个案例情况下的最优路线。其中 A 代表天津,B 代表南通,C 代表郑州,D 代表泉州,E 代表连云港,F 代表广州,G 代表深圳,H 代表锦州,I 代表大连,J 代表烟台,K 代表上海。

(1)在第 1 组中,A 作为起点,G 作为终点,中转点包括 B、C、D、E、F,运输网络图如图 1(a)所示。

从中国航运和空铁网络分布看,并不是每个城市的节点都有 3 种交通方式。A 与 B、D 之间是空、铁、海 3 种交通方式,而与 C 间只有铁、空两种交通方式;B、C、D 与 E、F 之间的交通方式只有两种,E 与 G 之间的运输方式有 3 种,F 与 G 间的交通方式也只有两种,G 与 F 间的运输方式也只剩下了两种。利用建立的模型求解出在多种可供路径选择下的最优路径,使成本、时间、距离最优化。

(2)在第 2 组中,H 作为起点,F 作为终点,中转点包括 D、E、G、J、K,运输网络图如图 1(b)所示。

(3)在第 3 组中,I 作为起点,K 作为终点,中转点包括 A、C、D、J、E,运输网络图如图 1(c)所示。

3.1 数据分析

在现实的复合联运情况下,当在节点城市发生中转时,因为每个城市的交通状况以及城市基础设施建设都不太一样,所以中转费用也大不相同^[15]。为了简化模型计算过程,本文的运输成本模型中对中转情况不做详细讨论,仅对运输方式改变时的中转费用做统一量化,方便计算求解,运输时间亦是如此。通过进行大量的数据查找,确定了案例中的参数数据,数据分析结果见表 2~表 6。数据来源于中国铁路网、易舱网、国家统计局。

3.2 求解与分析

参数设定见表 7。首先确定节点城市的构建划分,以第 1 组为例,构建一组中的搜索空间,起点城市为 A,因为 A 和 B、D 之间存在 3 种运输方式,所以 A 与 B、D 之间的节点分别有 3 个,空铁海各自对应的节点。A 和 C 只有两种运输方式,所以 A、C 之间只有两个节点。通过构建 A 与 G 之间的搜索空间(图 2),更容易求得最优解。

遗传算法包含染色体编码、种群初始化、计算个体适应度函数值、选择操作、交叉操作、变异操作、

遗传算法迭代。

将上文的运输成本、时间、距离等数据信息导入模型中,根据遗传算法的设计要求,对每一种情况下的最优解进行求解,并给出每一种情况下的最优解。

3.2.1 第 1 组分析

通过优化处理,每个案例情况下考虑的最优因素不同,得到的最优路线和运输方式也不同。以下是分别对应的最优路径以及最优参数。在不同情形中,适应度函数随迭代次数而改变的情形如图 3 所示。

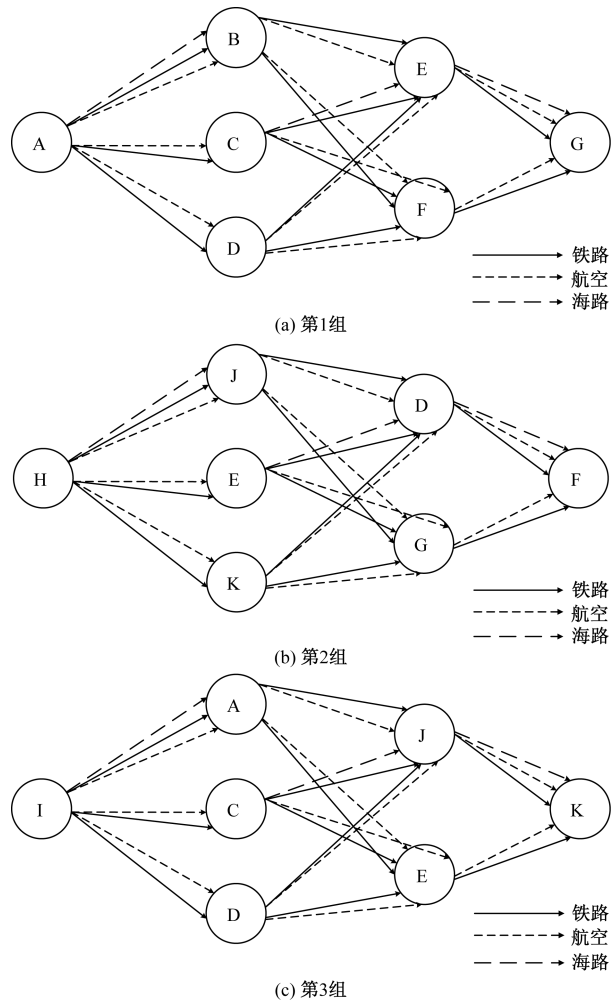


图 1 各组各节点间复合联运网络图

表 2 不同运输方式之间的转化时间及中转成本

运输方式	转化时间/h			中转成本/元		
	铁路	航空	海运	铁路	航空	海运
铁路	0	2.5	1	0	75	55
航空	2.5	0	1.5	75	0	60
海运	1	1.5	0	55	60	0

表 3 不同运输方式的运输单价

运输方式	铁路	航空	海运
运输单价/[元·(t·km) ⁻¹]	0.305	3.157	0.551

表4 第1组各城市节点不同运输方式的运输距离、在途运输时间及在途运输成本

序号	城市节点	运输距离/km			在途运输时间/h			在途运输成本/元		
		铁路	航空	海运	铁路	航空	海运	铁路	航空	海运
1	A→B	1 222	1 047	1 458	8	1.5	11.7	2 568.1	19 068.3	2 501
2	A→C	692	703		2	1.5		921.1	22 716.4	
3	A→D	1 275	940	2 234	9.3	1.4	11.9	3 028.7	16 826.8	1 733
4	B→E	1 200	1 000		6.2	1.6		3 202.5	30 056.5	
5	B→F	1 298	1 068		8.5	1.9		3 775.8	25 576.3	
6	C→E	870	860		7.3	1.6		3 886.5	23 456.2	
7	C→F	1 024	1 004		9.5	1.8		3 995.6	23 796.4	
8	D→E	711	505		9.5	1.7		3 446.7	36 576.4	
9	D→F	905	737		9.1	1.7		3 221.5	45 346.6	
10	E→G	117	131	2 344	5.9	1.2	17.7	3 449.6	26 456.5	2 270
11	F→G	803	466		1.4	0.9		3 006.5	13 453.5	

表5 第2组各城市节点不同运输方式的运输距离、在途运输时间及在途运输成本

序号	城市节点	运输距离/km			在途运输时间/h			在途运输成本/元		
		铁路	航空	海运	铁路	航空	海运	铁路	航空	海运
1	H→J	1 123	1 065	1 434	7.0	1.5	11.5	2 424.1	13 423.3	2 943
2	H→E	492	733	—	2.0	1.5		342.1	22 342.4	
3	H→K	554	754	2 535	9.1	1.4	10.5	1 032.7	13 422.8	1 742
4	J→D	1 432	533		6.5	1.6		3 452.5	33 423.5	
5	J→G	1 265	864		8.0	1.1		3 234.8	23 424.3	
6	E→D	834	862	—	7.5	1.5		3 453.5	21 567.2	
7	E→G	1 023	1 064	—	6.5	1.8		2 456.6	25 674.4	
8	K→D	724	523	—	6.2	1.7		3 245.7	25 646.4	
9	K→G	853	536	—	3.3	0.8		3 254.5	45 476.6	
10	D→F	142	164	1 474	5.2	1.2	16.7	3 535.6	35 646.5	2 345
11	G→F	854	475	—	1.4	0.9		3 034.5	23 453.5	

表6 第3组各城市节点不同运输方式的运输时间、在途运输时间及在途运输成本

序号	城市节点	运输距离/km			在途运输时间/h			在途运输成本/元		
		铁路	航空	海运	铁路	航空	海运	铁路	航空	海运
1	I→A	1 242	1 323	1 346	6.3	1.5	10.2	2 428.1	19 068.3	2 574
2	I→C	613	312	—	2.5	1.6		647.1	22 716.4	
3	I→D	1 433	934	2 124	8.2	1.4	11.4	5 634.7	11 226.8	1 532
4	A→J	1 224	1 042		6.2	1.7		3 244.5	33 756.5	
5	A→E	1 423	1 233		8.0	0.9		2 345.8	25 576.3	
6	C→J	870	843	—	7.3	1.6		3 444.5	23 456.2	
7	C→E	1 644	1 342	—	6.5	1.8		3 535.6	12 346.4	
8	D→J	724	503	—	9.5	1.2		3 242.7	26 576.4	
9	D→E	942	762	—	3.2	1.7		35 671.5	45 346.6	
10	J→K	124	132	3 123	5.9	1.5	18.4	3 249.6	12 456.5	2 135
11	E→K	842	464	—	1.5	0.9		3 666.5	15 453.5	

表7 参数设定

参数	取值	参数	取值
种群规模 P_{size}	15	最大迭代次数	200
交叉概率	0.95	变异概率	0.15

距离最短路径:A-航空→D-航空→E-铁路→G,长度为1 562 km。

最少成本路径:A-铁路→C-铁路→E-海运→G,成本为7 137.6元。

最短时间路径:A-航空→D-航空→F-航空→G,

时间为4 h。

由运算结果可以看出,在拥堵的情况下,最优路线为A-航空→D-航空→E-铁路→G,且最短距离为1 562 km。当以距离为优化参数时,航空运输所占的比例最大,可选择的线路最多,所优化的距离也最短,在货物运输时可以极大地防止意外发生,确保运输的安全高效。由迭代图可以看出,随着迭代次数的增加,最短路径下的适应度也在逐渐上升,适应度随着迭代次数的增加而增加,当上升到某

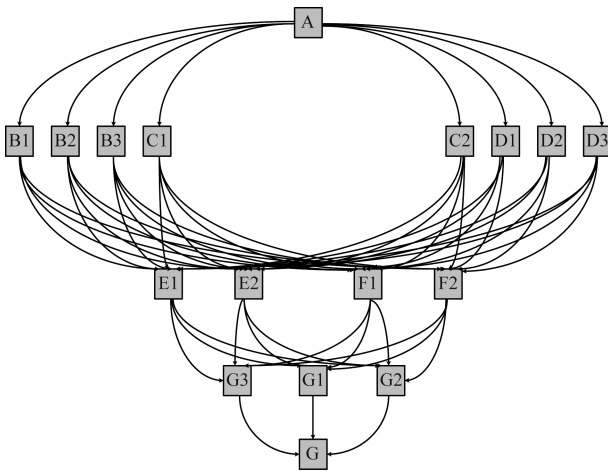
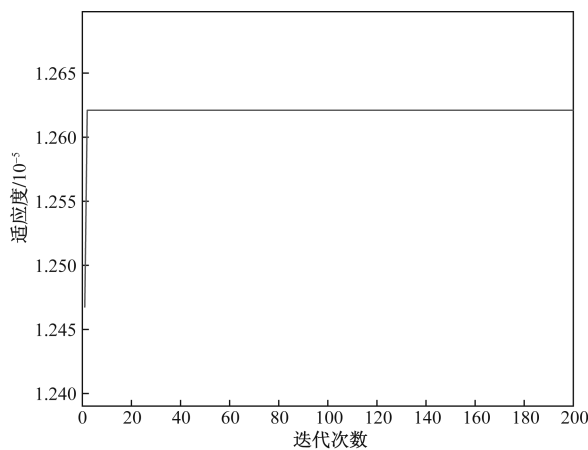
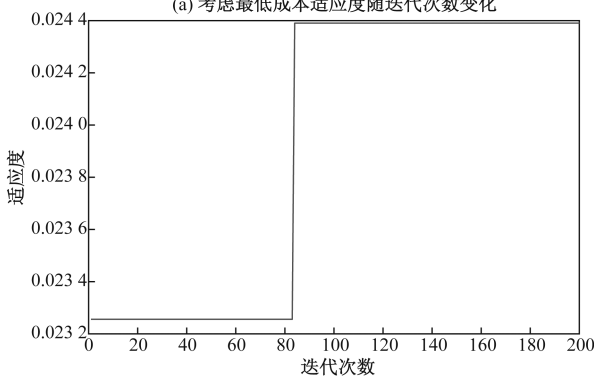


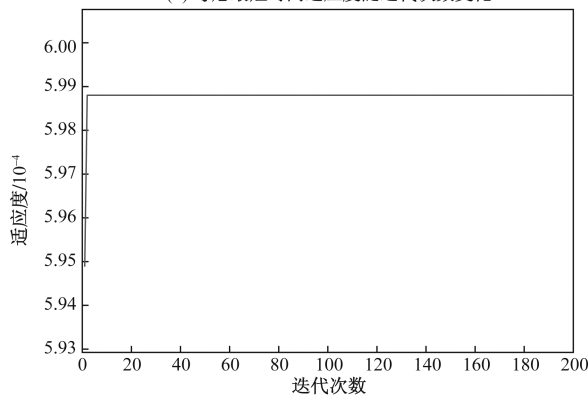
图 2 搜索空间



(a) 考虑最低成本适应度随迭代次数变化



(b) 考虑最短时间适应度随迭代次数变化



(c) 考虑最短路径适应度随迭代次数变化

图 3 适应度函数随迭代次数变化情况

一值时便趋于平缓。即寻到最优解。此时的运输距离最短,路线最优。在普通情况下,最少成本路径为 A-铁路→C-铁路→E-海运→G,最低成本为 7 137.6 元,从结果可知,当以成本为优化参数时,铁路占比最大,海运次之。由于铁运和海运的运输价格相比空运要低很多,所以在一般情况下受到发运人的青睐,可以在一定程度上节约成本,提高资金周转率和利用率。从迭代图也可以看出,当迭代次数达到某一值时,适应度最大,此时运输路径下的运输成本最低。在货物为生鲜的情况下,需要考虑时间为最优参数时,最短时间路径为 A-航空→D-航空→F-航空→G,最短时间为 4 h。从结果可以看到,航空运输是唯一的运输方式,可知在时间优化情况下,航空运输是最好的选择,可以以最快的速度到达终点城市,适用于对时间要求很高的货物。迭代图中,适应度图线呈正“S”形,在迭代次数中等时产生适应度突变,适应度达到最大值,选出的路径最优,时间最短。

3.2.2 第 2 组分析

每个案例情况下考虑的最优因素不同,得到的最优路线和运输方式也不同。以下是分别对应的最优路径。在不同情形中,适应度函数随迭代次数而改变的情形如图 4 所示。

距离最短路径:H-航空→K-航空→D-铁路→F,长度为 946 km。

最少成本路径:H-铁路→E-铁路→D-铁路→F,成本为 8 257.2 元。

最短时间路径:H-航空→E-航空→D-航空→F,时间为 4.3 h。

3.2.3 第 3 组分析

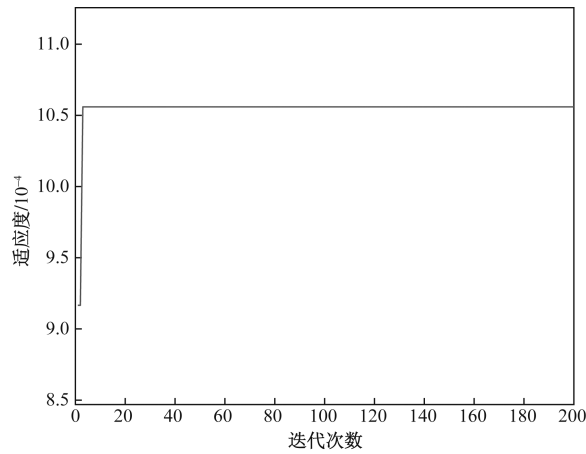
每个案例情况下考虑的最优因素不同,得到的最优路线和运输方式也不同。以下是分别对应的最优路径。在不同情形中,适应度函数随迭代次数而改变的情形如图 5 所示。

距离最短路径:I-航空→D-航空→J-铁路→K,长度为 783 km。

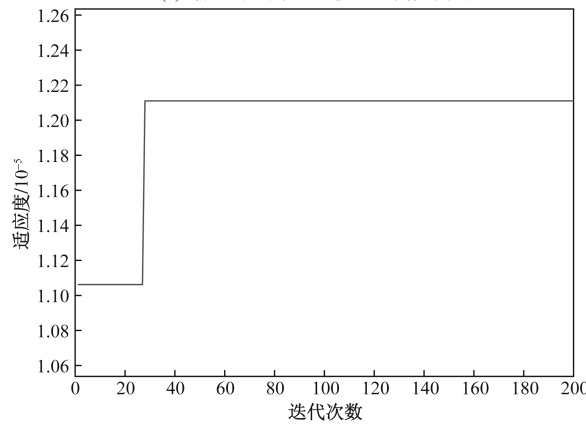
最少成本路径:I-海运→C-航空→J-海运→K,成本 8 121 元。

最短时间路径:I-航空→C-航空→J-航空→K,时间为 5 h。

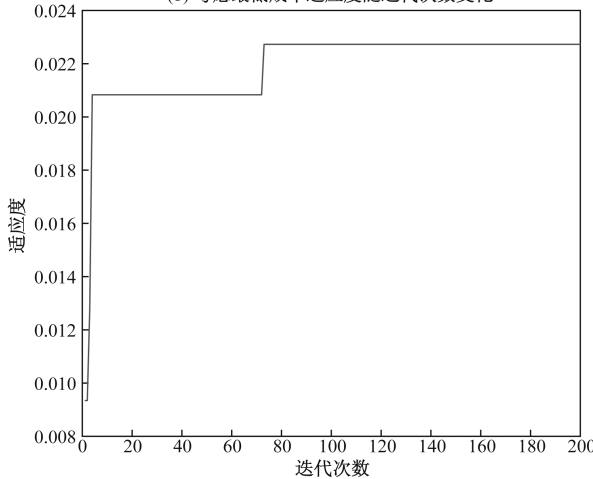
经过仿真分析,在实际运营过程中,根据货物所需的侧重点不同,可选择的运输方式也多种多样,可以达到降本增效,降低风险的目的。当把运输时间放在首位时,全航空运输是多种方案中的最



(a) 考虑最短路径适应度随迭代次数变化



(b) 考虑最低成本适应度随迭代次数变化



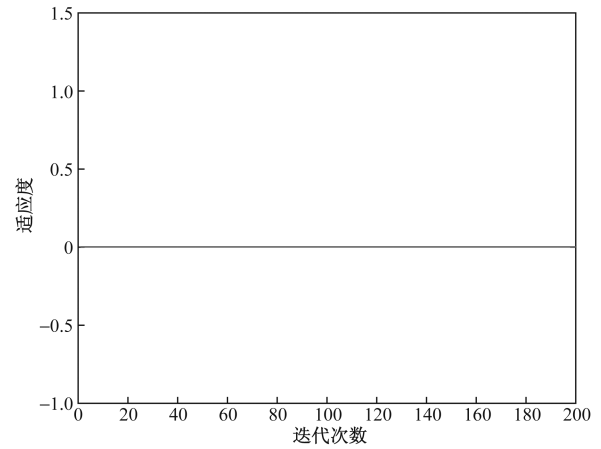
(c) 考虑最短时间适应度随迭代次数变化

图4 适应度函数随迭代次数变化情况

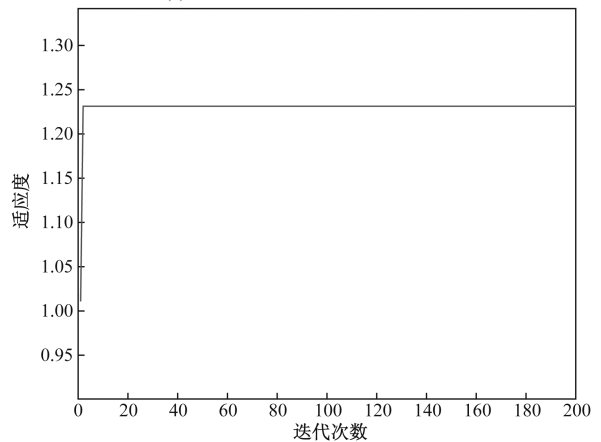
优方案,但是在运输成本上相比铁路和海运却有明显的劣势。当把运输成本放在首位时,铁海联运或全铁路运输是相对来说的最优方案,但是在运输时间上有着较明显的劣势。如果把运输距离放在第一位,空铁联运是最优的方案,距离最短。

4 结论

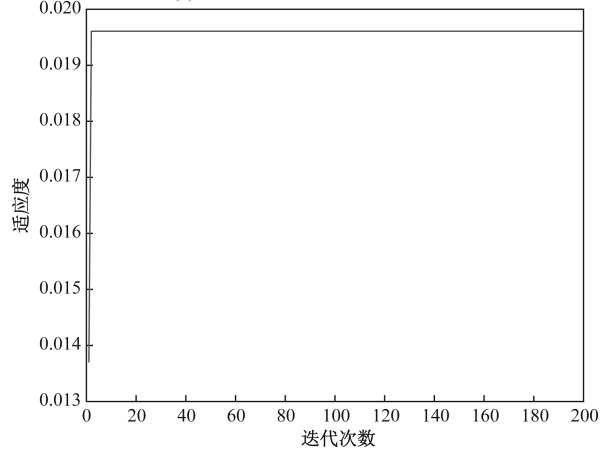
在不同的条件情况下,要想得到最优运输方案并优化该情况下的最大影响因素,选择的运输路线也大



(a) 考虑最短路径适应度随迭代次数变化



(b) 考虑最低成本适应度随迭代次数变化



(c) 考虑最短时间适应度随迭代次数变化

图5 适应度函数随迭代次数变化情况

不相同。包括航空在内的复合联运体系具有显著的降低运输时间的优点,可以提升运输的时效性,但是在运输成本上并不具有竞争能力,在缩短运输距离方面具有一定的竞争力。有铁路在内的复合联运体系对降低运输成本具备明显的优势,但在运输时效性方面不具备竞争力。而有海运在内的复合联运体系虽然在时间层面上没有优势,但是在成本和距离层面上可以配合空铁运输进行路线优化。在第1组中,不同

的案例得到的运输路线分别为距离最短路径:A-航空→D-航空→E-铁路→G;最少成本路径:A-铁路→C-铁路→E-海运→G;最短时间路径:A-航空→D-航空→F-航空→G。每一种优化参数的情况下都对应着不同的复合联运方案。在实际情况下,需要根据对货物需求情况进行运输方式的选择,确保达到理想的结果,提高效益,降低风险。

通过模型建立及遗传算法分析,将时间、成本和距离作为研究的主要因素,对空铁海复合联运路径选择进行了分析与研究,又对多组案例进行验证。然而,还有一些问题需要进一步探讨。例如,对运输方式转移的中转过程在某种程度上进行了简化,但是在这个过程中,并没有对中转过程所产生的存储等费用和时间进行了考虑。以及并没有将运输过程中的损耗情形纳入其中。但是,在实际的运输中,会出现一定概率的损耗情形。未来的研究中,可以对货物的损耗概率进行设定,将这种情形引入到模型中,展开对其的分析和研究。

参考文献

- [1] 周琢,徐建炜. 海运成本如何影响“一带一路”沿线国家的出口[J]. 世界经济研究, 2022(7): 32-44.
- [2] 海关总署. 海关总署关于进一步拓展吉林省内贸货物跨境运输业务范围的公告[EB/OL]. (2023/05/04)[2023-08-25]http://www.customs.gov.cn/customs/302249/zfxxgk/zfxxgkml34/5043908/index.html.
- [3] 陈汨梨,赵孝进,邓夕贵,等. 不确定条件下的复合联运路径优化[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 143-150.
- [4] 丁立群. 混合时间窗约束下复合联运路径选择探析[J]. 中国储运, 2023(4): 75-76.
- [5] SUN S Y Y. Research on improved genetic algorithm in path optimization of aviation logistics distribution center[J]. Ecological Restoration, 2020, 38(1): 1-9.
- [6] 户佐安,蔡佳,罗涓. 混合不确定条件下多式联运路径优化[J/OL]. 北京交通大学学报: 1-9[2023-11-30]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5258.U.20231026.1545.006.html.
- [7] 杨喆,邓立宝,狄原竹,等. 基于模糊需求和模糊运输时间的多式联运路径优化[J/OL]. 控制理论与应用: 1-9[2023-11-30]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.tp.20230612.0913.016.html.
- [8] 杨洛郡,张诚,郭军华. 不确定条件下公铁水多式联运多目标路径优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 56-65.
- [9] 孙家庆,王胜男,闫淑贤. 考虑碳排放的冷藏集装箱复合联运路径选择[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(2): 57-65.
- [10] 张旭,张海燕,袁旭梅,等. 双重不确定下低碳复合联运路径优化研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2022, 21(2): 113-121.
- [11] 马超. 中欧陆海快线应急运输路径选择研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
- [12] 杨晓康,宋秀峰. 基于遗传算法的航空物流配送路径优化分析[J]. 自动化仪表, 2022, 43(12): 109-112.
- [13] 尹传忠,邱慧妍,柯媛定,等. 区域枢纽港复合联运网络协同优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 63-70.
- [14] 路婷. 基于遗传算法的国际复合联运路径优化研究[J]. 物流科技, 2022, 45(12): 80-82.
- [15] 卓碧媛. 低碳环境下空铁复合联运路径选择评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

Modeling and Path Optimization of Composite Intermodal Logistics Transportation Network

ZHANG Nan¹, WEI Bo², CHEN Cong²

(1. Department of Shipping Economics, Tianjin Maritime College, Tianjin 300300, China; 2. Aeronautical Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: In the context of economic integration, the logistics industry has become one of the economic pillars, and composite intermodal transportation has become an important mode of transportation in the logistics industry. The air-rail-sea composite operation is used as the research object, different search spaces are constructed, and the boundary conditions are determined and analyze freight impact parameters: time, cost, distance. Based on the genetic algorithm, the established air-rail-sea composite transport model was solved and the path optimization was carried out. Three groups of node groups were identified, each of which included three situations: general cargo, special cargo, and route congestion, which optimized the cost, time and distance respectively, and provided a basis for the path selection of composite intermodal transport business. Through analysis, the optimal time route, the optimal cost route and the optimal distance route in the specified search space are selected. It is expected that the purpose of reducing costs and increasing efficiency, reducing risks and improving industry competitiveness can be achieved in the process of logistics and transportation.

Keywords: composite combined transport; path optimization; search space; genetic algorithm