

文章编号: 1003-1421(2026)08-0168-12

引用格式: 程诗雅, 陈喜春, 田小鹏. 考虑价格折扣的集装箱多式联运路径优化[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(8): 168-179, 216.
CHENG Shiya, CHEN Xichun, TIAN Xiaopeng. Optimization of Container Multimodal Transportation Routes Considering Price Discounts[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 168-179, 216.

考虑价格折扣的集装箱多式联运路径优化

程诗雅, 陈喜春, 田小鹏

(兰州交通大学 交通运输学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 多式联运路径优化决策对实现可持续发展目标具有重要意义。以集装箱运输客运化为基础, 引入基于里程运量的铁路运输价格折扣策略, 构建以运输能力、通过能力、最大列车频率等为约束, 以最小化托运人成本和最大化承运人利益为双目标的货物运输路径优化模型, 旨在确定最优货物运输路径和集装箱班列开行频率。利用 ε -约束法将其转化为单目标优化模型, 并采用GUROBI对转化后的模型进行求解, 最后通过实际案例验证模型有效性。研究表明: 该模型能够有效生成货物运输路径和列车开行频率, 确保既能降低托运人成本又能提升承运人利益, 同时铁路运输的价格折扣策略能够显著促进货物从公路运输向铁路运输转移, 为多式联运的可持续发展提供了借鉴和参考。

关键词: 集装箱多式联运; 价格折扣; 路径优化; 双目标优化; ε -约束法

中图分类号: U169.62 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250516002

Optimization of Container Multimodal Transportation Routes Considering Price Discounts

CHENG Shiya, CHEN Xichun, TIAN Xiaopeng

(College of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Route optimization decisions for multimodal transportation are of great significance for achieving sustainable development goals. Based on the passenger-like operation of container transportation, a price discount strategy for railway transport based on mileage and freight volume was introduced. A dual-objective optimization model for freight transportation routes was constructed with constraints such as transport capacity, passing capacity, and maximum train frequency to minimize shipper costs and maximize carrier benefits, aiming to determine the optimal freight transportation routes and operating frequencies of container block trains. The ε -constraint method was used to transform the model into a single-objective optimization model, and GUROBI was used to solve the transformed model. Finally, the effectiveness of the model was validated through a real-world case. The results show that the model can effectively generate freight transportation routes and train operating frequencies, ensuring both reduced shipper costs and enhanced carrier benefits. Meanwhile, the price discount strategy for railway transport can significantly promote the shift of freight from road transport to railway transport, providing references for the sustainable development of multimodal transportation.

Keywords: Container Multimodal Transportation; Price Discount; Route Optimization; Dual-Objective Optimization; ε -Constraint Method

收稿日期: 2025-05-16

通信作者: 陈喜春(1979—), 男, 吉林农安人, 兰州交通大学交通运输学院教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目(72161023); 甘肃省杰出青年基金项目(25JRRA142)

0 引言

货物运输领域,公铁联运通过整合公路与铁路优势,优化运输资源配置,实现多模式协同,在提升效率与可靠性、降低运营成本、减少环境污染方面作用显著,是现代综合交通体系的关键环节。伴随经济全球化,货物运输需求呈现高频次、准时化特征,对传统运输组织模式提出挑战。为此,“铁路集装箱客运化”理念产生,借鉴旅客运输的班列化运营模式,以提升货运组织效率。在此背景下,集装箱多式联运路径优化问题成为研究焦点,其核心在于确定最优运输路径与列车开行频率,以优化托运人与承运人双方利益。同时,传统公路运输面临环境污染严重、能源消耗大等问题,加之货运需求的持续增长,推动货物运输结构调整,特别是促进大宗货物“公转铁”,已成为实现交通运输可持续发展的关键战略。已有研究表明,将公路货物转移至铁路网运输能够有效降低运输成本、减少碳排放量,并提升运输与转运过程的综合效益^[1]。然而,有效实施“公转铁”政策亟需理论支撑与决策工具。鉴于此,研究聚焦于构建包含运价折扣机制的多式联运路径优化模型,旨在为“公转铁”提供科学依据。

现有研究在路径优化方面成果颇丰,学者们普遍关注成本、时间、碳排放等多目标优化。例如,Fahimnia等^[2]构建路径规划模型,以运输总成本和碳排放总量最小为目标,采用改进的交叉熵算法求解;Crainic等^[3]建立线性规划模型,以满足节点需求为前提,以运输成本最小化为目标,解决枢纽节点分配和网络货流分配的问题;Yang等^[4]研究基于广义期望值总运输成本和广义风险值最大运输时间的模糊双目标下多式联运轴辐式网络设计问题,设计了两阶段求解方法。有关研究进一步拓展了优化的维度,张旭等^[5]构建随机需求下的路径优化模型,针对不同碳税机制下的多式联运路径优化问题,以最小的总费用和碳排放总量为目标进行研究;綦潘安等^[6]综合考虑班期限限制、运力限制等因素,构建路径规划模型,以总成本最小为目标;冯芬玲等^[7]综合考虑环境污染、能源消耗和安全因素的多式联运社会总成本概念,建立协同优化模型,将社会总成本最小化;刘杰等^[8]构建低碳环境下的联运路径模型,

以碳排放最小化、成本最小化为目标;苏杭等^[9]考虑不确定需求,引入三角模糊数表示运输需求,构建以广义物流成本最小为目标的冷藏集装箱多式联运路径优化模型;李玉民等^[10]、邓学平等^[11]和艾子妍等^[12]以时间、费用、碳排放为多目标,前两者将多目标问题通过线性加权法转化为单目标问题求解,后者则设计了快速非支配性排序遗传算法求解;简文良等^[13]进一步考虑运输时间可靠性,以广义成本最小为目标构建路径选择模型;夏阳等^[14]采用铁路集装箱客运化运输组织模式,提升货物送达速率,吸引大量适箱货源转移至铁路集装箱运输;郑旻^[15]从运营角度探讨国内多式联运班列的提质升级策略,指出班列开行质量与组织效率是影响铁路集装箱竞争力的关键因素之一。然而,现有研究在优化目标设定上,未能充分考量并揭示托运人与承运人之间复杂的利益互动关系,这种关系对于保障多式联运系统合作的稳定性和持续性至关重要。

在价格机制方面,中期固定价格合同虽能平衡双方利益,却难以动态响应市场变化,既限制了托运人的成本优化空间,也导致铁路运量难以提升。供应链管理领域已经证实数量折扣策略对成本节约的显著效果。Qiu等^[16]研究表明,在大多数情况下,采用数量折扣策略可以为物流企业带来更高的利润;在特定的运输场景中,如Lu等^[17]在冷链物流领域建立了基于运费补贴的铁路冷链物流网络优化模型;Dabia等^[18]在车辆径路问题中,将数量折扣策略应用于考虑物流外包的车辆路径问题中;王能民等^[19]在利润与配送任务优化中,将数量折扣策略体现在成本结构中;王思睿等^[20]在联合采购与配送中,构建了考虑数量折扣的多中心仓库优化模型,探索了资源约束与数量折扣之间的相互影响。然而,在多式联运场景下,如何系统性地将铁路承运的里程运量与灵活的价格折扣策略相结合,以有效激励“公转铁”并协调双方利益,相关研究仍显匮乏。

综上所述,现有研究在多式联运路径优化方面存在双重局限:一是对托运人与承运人利益平衡的关注度不够;二是缺乏将铁路里程运量与动态价格折扣策略有效结合的系统性方法。为了突破这些局限,从多式联运经营人的角度出发,提出了一种基于里程运量的分段折扣定价模型。该模型综合考虑

托运人成本和承运人利润,通过运量-折扣联动机制,突破传统固定价格约束,同步优化运输路径和价格策略,激发“公转铁”潜能。通过采用 ε -约束法,对双目标优化问题进行求解,获得托运人成本与承运人利润的帕累托解集。本研究不仅为多式联运路径优化提供了新视角,还有助于推动“公转铁”政策的实施,为实现可持续运输提供了理论依据和实践参考。

1 问题描述

1.1 多式联运网络

研究考虑了一个集装箱公铁联运网络,用 N 表示所有节点的集合,其中包括货源节点、需求节点、班列始发节点、班列终到节点、铁路中间节点;用 A 表示运输网络中所有运输弧的集合,将每个运输弧对应相应的始节点和终节点,从而形成点到弧的衔接,其中 A^{rail} 表示铁路运输弧, $A^{\text{rail}} \subset A$ 。在多式联运网络中,给定多个OD货物需求。研究旨在优化货物运输路径、货流分配和列车开行频率,有效地完成集装箱货物的运输。

绘制多式联运网络示意图如图1所示。货物从货源节点O出发,可通过2种运输方式抵达目的地。一种为全公路运输,即货物全程经由公路路段直接从货源节点O运送至需求节点D;另一种为公铁联运,例如货物先经公路运输从货源节点O抵达铁路站点1,随后进入铁路运输子网络,沿1→2→6的铁路路径完成铁路路段运输,最终在铁路站点6驶出铁路子网络,再通过公路运输将其运送至需求节点D。这种公铁联运模式充分发挥了公路运输灵活性与铁路运输大运量、高效率的优势,实现了运输资源的优化配置与多模式协同。

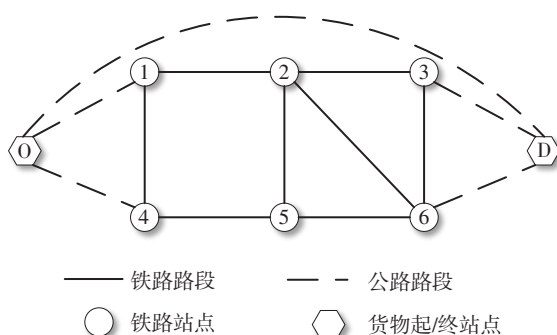


图1 多式联运网络示意图

Fig.1 Schematic diagram of multimodal transportation network

基于集装箱客运化组织理论,在铁路运输部分采用“全直达”运输组织模式,在此模式下班列进行“点对点”开行,沿途不进行甩挂作业。该模式要求货物在指定的始发和终到节点间进行运输,使得货流在网络中向特定开行节点聚集。全直达模式虽限制了货物在运输过程中的灵活性,但也提高了运输效率和计划性。将该种运输方式进行图示,绘制“全直达”运输组织模式如图2所示。该模式下,用 S 表示所有铁路班列服务集合,箱流层间的每趟班列作为一个独立的服务单元,由若干铁路运输弧依次连接而成。由于并非所有节点都具备班列开行条件,货流会向部分开行节点集聚,转化为箱流后通过铁路进行运输。

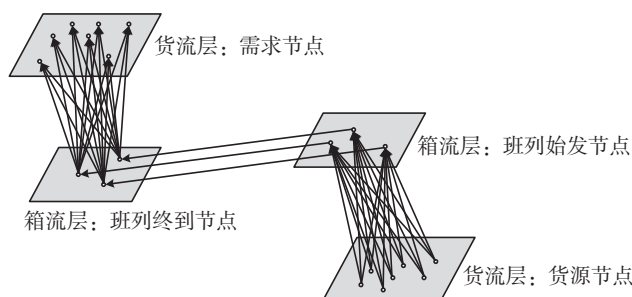


图2 “全直达”运输组织模式

Fig.2 “All-direct” transportation organization mode

在此多式联运网络中,考虑多组货物运输需求,用 W 表示所有运输需求的集合。不同的运输需求有不同的货源节点和需求节点,需运送的货物量也不相同。在运输网络中规定每趟列车的始发节点和终到节点。若货物选择公铁联运,则在网络中从货源节点O出发,采用公路运输运送到班列始发节点,与不同运输需求的货物汇合,形成箱流后采用直达班列运送至班列终到节点,最后运用公路运输运送至各批货物的需求节点D。

在网络构建过程中,需要明确以下关键假设。
①本研究聚焦于战术层面的静态服务网络设计,仅涉及空间维度上集装箱箱流的移动,而不包含时间维度的路线决策;
②所有货物均采用直达运输组织模式下的集装箱班列运输,研究重点在于优化列车服务频率和流量分布;
③任意2个节点之间均存在固定的公路运输路径,货物可根据运输需求在集装箱班列多式联运和全公路运输之间灵活选择,同时考虑到铁路子网络中弧容量的限制,为确保模型的

简化与可行性，暂不考虑道路容量和转运节点容量的限制。

基于以上网络架构与运作模式的设定，后续研究将围绕如何优化货物运输路径、合理分配货流以及确定列车开行频率等关键问题展开，以实现多式联运系统的高效运作与可持续发展。

1.2 折扣方式

在货物运输中，传统的固定价格机制虽能维持短期单箱收益，但易导致班列因货源不足而被迫减少开行频次，造成固定资源的浪费，且难以激励客户规模化运输；折扣策略可通过降低边际成本，运用短期让利换取长期运量增加，吸引公路货源转向铁路运输，使得网络效率提升、社会效益增值。

在多式联运网络基础上，为有效落实“公转铁”战略、提升铁路运输竞争力，针对全直达式铁路集装箱班列提出基于里程运量的价格折扣。运用复合指标里程运量，同时对运输距离和运输规模2部分进行衡量，在里程维度表示单批货物在铁路运输子网络中的实际运送距离，反映出运输的空间跨度；运量维度指单次运输任务中货物的总体规模，反映出运输的规模经济性。

为更清晰地说明折扣方式，在图1多式联运网络示意图的基础上绘制基于价格折扣的多式联运示意图如图3所示。假设网络中有一批货物需从O点运输至D点，在铁路运输子网络中有多条服务班列可供选择，假设进行路径选择后，选定图中彩色线路进行运输，由此绘制运输路径及运量分配如表1所示。因价格折扣仅发生在铁路子网络中，即图3所示阴影部分区域，所以需先从货物运输路径中获取铁路运输路径，从而确定对应的铁路运输弧，进而得到运输弧总长度即铁路运输总长度，将此长度与货物运输量相乘，获得该批货物的里程运量，进而选取合适的折扣区间。

基于图3、表1，该批货物选择2条铁路班列及全公路运输共同完成该批货物的运输任务，在采取

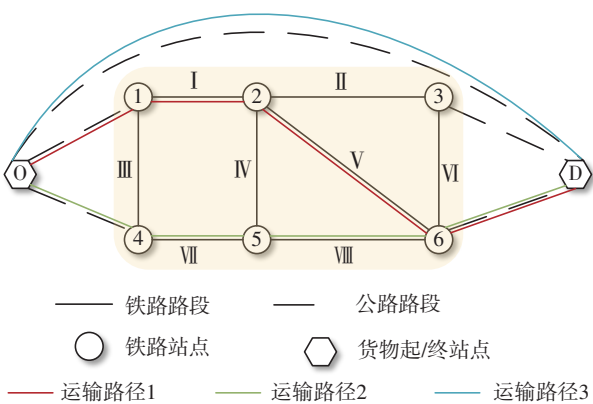


图3 基于价格折扣的多式联运示意图
Fig.3 Schematic diagram of multimodal transportation based on price discount

折扣时，不考虑全公路运输即运输路径中标明R的部分，只需参考路径运量和铁路运输弧长度共同确定折扣区间，其中运量的单位为TEU，采用标准20 ft集装箱进行运输。对该批货物进行折扣定价时只需计算 $843 \times 80 + 789 \times 100$ 的值，以此获得货物的里程运量，并选择合适折扣区间。通过这种与铁路运输贡献直接相关的折扣设计，货主选择铁路运输的意愿将因成本降低而增强，从而有望推动“公转铁”的实施，优化运输结构。

1.3 符号说明

为方便理解与计算，定义运算过程中需使用的集合、参数及相关变量，符号定义如表2所示。

2 模型建立

2.1 约束条件

(1) 货运量平衡。保证每批货物 w 的公铁联运运输量与纯公路运输的运输量之和等于货物总量。该约束确保所有货物均被运输，且运输路径的选择满足货物总量的要求。

$$\sum_{j \in J(w)} y_w^j + z_w = q_w \quad \forall w \in W \tag{1}$$

式中： y_w^j 为货物 w 选择铁路运输路径 j 的运输量，TEU； z_w 为货物 w 选择公路运输的运输量，TEU； q_w

表1 运输路径及运量分配
Tab.1 Transportation routes and freight volume allocation

起终点	运输路径编号	货物运输路径	铁路运输路径	对应铁路运输弧	铁路运输弧总长度/km	路径运量分配/TEU	总运量/TEU
O→D	1	O→1→2→6→D	1→2→6	I→V	843	80	200
	2	O→4→5→6→D	4→5→6	VII→VIII	789	100	
	3	O→D(R)	—	—	—	20	

表2 符号定义
Tab.2 Symbol definitions

类别	符号	含义
集合	S	铁路服务的集合, $s \in S$
	N	运输站点集合, $n \in N$
	A	运输弧的集合, $a \in A$
	W	运输货物集合, $w \in W$
	K	货物折扣区间, $k \in K$
	A^{rail}	铁路运输弧的集合, $A^{\text{rail}} \subset A$
	A_s^{rail}	服务 s 上铁路运输弧的集合, $A_s^{\text{rail}} \subset A^{\text{rail}}$
参数	$J(w)$	货物 w 的可用运输路径集合
	q_w	货物 w 的需运输总量
	m_s	服务 s 的最大开行频率
	u_s	服务 s 每开行一趟列车的固定成本
	c_s	服务 s 上列车的最高载运容量
	l_s	服务 s 上列车的最低载运容量
	c_a^{rail}	弧段 a 上列车的通行能力
	q_k^u	区段 k 货物里程运量的上限
	q_k^l	区段 k 货物里程运量的下限
	p_j^{rail}	公铁联运路径 j 下铁路运输部分的运价
	p_j^{road}	公铁联运路径 j 下公路运输部分的运价
	p_w^{road}	货物 w 选择纯公路运输时的运价
	l_j^{rail}	铁路运输路径 j 的路径长度
	l_{wj}^{road}	货物 w 选择铁路运输路径 j 时, 两端接驳公路的路径长度
	l_w^{road}	货物 w 选择纯公路运输时的路径长度
	p_{wk}^{rail}	货物 w 满足区段 k 运量要求时, 铁路运输部分单位价格
	d_w	公铁联运路径下, 基于 OD 折扣后货物 w 铁路部分的总体运费
	O_s	服务 s 的起始站
	D_s	服务 s 的终到站
	x_s	服务 s 上列车的开行频率
	z_w	货物 w 选择公路运输的运输量
	y_w^j	货物 w 选择铁路运输路径 j 的运输量
	β_w^k	0-1 变量, 用于确定货物 w 铁路运输运量所属的折扣区段 k
	γ_w^s	0-1 变量, 若货物 w 选择服务 s 运输则为 1, 否则为 0

为货物 w 需运输的总量, TEU。

(2) 弧段运输能力限制。该约束条件保证铁路提供的运输能力可以满足相应的货运需求。约束条件的中间部分表示弧段货运量, 左侧表示该弧段最少需要载运的货物量, 右侧表示该弧段可以提供的最大运输能力。此约束确保铁路运输在不超过其运力限制的同时也不会随意进行运输。

$$x_s \cdot l_s \leq \sum_{w \in W} \sum_{j \in J(w)} y_w^j \cdot \lambda_{sj}^a \leq x_s \cdot c_s \quad \forall s \in S, a \in A_s^{\text{rail}} \quad (2)$$

式中: x_s 为服务 s 上列车的开行频率, 列/d; l_s 为服务 s 上列车的最低载运容量, TEU; c_s 为服务 s 上列车的

最高载运容量, TEU; λ_{sj}^a 根据具体运输网络确定取值, 若运输路径 j 属于服务 s 且包含弧 a 则为 1, 否则为 0, 用于筛选出属于服务 s 且包含弧 a 的运输路径 j 。

(3) 弧段列车通行能力限制。该约束条件保证铁路网络中的每个弧段所通过的货运量均在弧段通行能力限制内, 即对弧段每单位时间可以通过列车的最大数量进行限制。在实际运输中, 特别是对于货运列车, 每个区段的列车通行数量往往受到严格规定。因此, 引入该约束, 以确保铁路网络的列车通行量不超过其设计能力。

$$\sum_{s \in S} x_s \cdot \delta_s^a \leq c_a^{\text{rail}} \quad \forall a \in A^{\text{rail}} \quad (3)$$

式中: δ_s^a 根据具体运输网络确定取值, 若服务 s 经过弧段 a 则为 1, 否则为 0, 用于筛选出经过弧段 a 的服务 s ; c_a^{rail} 为弧段 a 上列车的通行能力, 列/d。

(4) 列车开行频率限制。考虑到列车数量有限, 每条铁路线上的列车频率受上限限制。该约束规定每条线路上列车的开行频率不得超过其最大允许开行频率, 以确保铁路资源的合理利用。

$$x_s \leq m_s \quad \forall s \in S \quad (4)$$

式中: m_s 为服务 s 的最大开行频率, 列/d。

(5) 货物上下站点约束。选取全直达运输组织模式, 班列进行点对点开行, 货物到达开行节点后直接运输到终点站, 因此设置货物上下站点约束, 确保货物运输正确运行。在该约束下, 某批货物若选择了一个服务, 则该服务的起始站和货物的实际上车站相同, 该服务的终点站和货物的实际下车站相同。

$$\sum_{s \in S} \gamma_w^s \cdot O_s = b_w \quad \forall w \in W \quad (5)$$

$$\sum_{s \in S} \gamma_w^s \cdot D_s = a_w \quad \forall w \in W \quad (6)$$

式中: γ_w^s 为 0-1 变量, 若货物 w 选择服务 s 运输则为 1, 否则为 0; O_s 为服务 s 的起始站; b_w 为货物 w 的实际上车站; D_s 为服务 s 的终到站; a_w 为货物 w 的实际下车站。

(6) 货物折扣定价约束。在正常运价的前提下对铁路运输进行折扣定价, 探究折扣定价对货物运输的相关影响。该约束只在采用价格折扣策略时采用, 其中约束(7)和(8)用于判断货物采用哪个折扣区间; 约束(9)确保了每一批次货物只可选择一个折扣区间; 约束(10)和(11)用于确定该批次货物选择铁路运输部分的货物运输总价。

$$\sum_{j \in J(w)} y_w^j \cdot l_j^{\text{rail}} \leq q_k^e + (1 - \beta_w^k) \cdot M \quad \forall w \in W, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J(w)} y_w^j \cdot l_j^{\text{rail}} \geq q_k^s + (\beta_w^k - 1) \cdot M \quad \forall w \in W, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \beta_w^k = 1 \quad \forall w \in W \quad (9)$$

$$d_w \geq \sum_{j \in J(w)} y_w^j \cdot p_{wk}^{\text{rail}} \cdot l_j^{\text{rail}} + (\beta_w^k - 1) \cdot M \quad \forall w \in W, k \in K \quad (10)$$

$$d_w \leq \sum_{j \in J(w)} y_w^j \cdot p_{wk}^{\text{rail}} \cdot l_j^{\text{rail}} + (1 - \beta_w^k) \cdot M \quad \forall w \in W, k \in K \quad (11)$$

式中： l_j^{rail} 为铁路运输路径 j 的长度，km； q_k^e 和 q_k^s 为折扣区间的区段 k 货物里程运量的上限和下限，TEU·km； β_w^k 为0-1变量，确定货物 w 选择铁路运输的运量所在的区段 k ； d_w 为公铁联运路径下，基于OD折扣后货物 w 铁路部分的总体运费，元； p_{wk}^{rail} 为货物 w 满足区段 k 运量要求时，铁路运输部分的单位价格，元/(TEU·km)。

2.2 目标函数

以多式联运经营人作为主体，综合考虑托运人成本和承运人利润，以实现双方利益的均衡。构建一个双目标优化模型，以托运人成本最小化和承运人利润最大化为目标进行求解，并通过引入铁路运输价格折扣策略，进一步优化运输路径选择和运量分配。

其中，式(12)为托运人成本最小化目标函数，该目标包含公铁联运成本和纯公路运输成本2部分，通过优化路径选择和运量分配，确保在满足运输需求的前提下，托运人能以最低成本完成货物运输；式(13)为承运人利润最大化目标函数，该目标旨在最大化承运人的净利润，由承运人的运营收入和运营成本2部分组成，承运人需在满足运输需求的基础上，通过合理规划列车开行频率和运量分配，最大化其利润。

$$\min Z_1 = \sum_{w \in W} \left[\sum_{j \in J(w)} \left(p_j^{\text{rail}} \cdot l_j^{\text{rail}} + p_j^{\text{road}} \cdot l_{wj}^{\text{road}} \right) \cdot y_w^j + p_w^{\text{road}} \cdot l_w^{\text{road}} \cdot z_w \right] \quad (12)$$

$$\max Z_2 = \sum_{w \in W} \sum_{j \in J(w)} p_j^{\text{rail}} \cdot l_j^{\text{rail}} \cdot y_w^j - \sum_{s \in S} u_s \cdot x_s \quad (13)$$

式中： p_j^{rail} 为路径 j 下，铁路运输部分单位运价，

元/(TEU·km)； p_j^{road} 为路径 j 下，公路运输部分单位运价，元/(TEU·km)； p_w^{road} 为货物 w 选择纯公路运输时的运价，元/(TEU·km)； l_{wj}^{road} 为货物 w 选择铁路运输路径 j 时，两端接驳公路的路径长度，km； l_w^{road} 为货物 w 选择纯公路运输时的路径长度，km； u_s 为服务 s 每开行一趟列车的固定成本，元。

在可持续发展的背景下，提高铁路运输的市场份额成为重要的决策目标，利用折扣策略不仅可以实现双方利益的平衡和优化，更在一定程度上促进运输的可持续发展，式(14)和式(15)为价格折扣策略下的目标函数。其中，式(14)与式(12)逻辑相同，表示最小化托运人成本；式(15)与式(13)逻辑相同，表示最大化承运人利润；其在原有公路成本基础上采用折扣策略降低铁路运费，从而进一步减少总成本，折扣策略通过运量-价格联动机制，激励托运人选择铁路运输，同时保障承运人在规模效应下提升利润，实现双赢。

$$\min Z_3 = \sum_{w \in W} \left[\sum_{j \in J(w)} \left(p_j^{\text{road}} \cdot l_{wj}^{\text{road}} \cdot y_w^j + p_w^{\text{road}} \cdot l_w^{\text{road}} \cdot z_w \right) + d_w \right] \quad (14)$$

$$\max Z_4 = \sum_{w \in W} d_w - \sum_{s \in S} u_s \cdot x_s \quad (15)$$

2.3 模型求解

本研究采用 ε -约束法系统求解双目标优化问题，该方法通过将承运人利润最大化作为主目标，托运人成本最小化作为次目标，分阶段生成Pareto最优解集。在求解过程中，对模型进行了线性化处理，确保模型的线性特性。具体而言，对于模型中的逻辑约束条件，引入了足够大的常数 M ，将非线性逻辑关系转化为线性约束条件。这种线性化处理使得模型能够在保持线性结构的基础上，准确地表达复杂的决策逻辑。经过线性化处理后，模型被转化为一个混合整数线性规划模型，适用于商用求解器进行求解。

首先，在不考虑托运人成本约束的情况下，获得承运人利润最大化下的模型结果，记为 Π_r 。该步骤确立了利润目标的上界，为后续分析提供基础标准。这种优先优化利润的策略既符合承运人在实际市场中的主导地位，又能保证模型解的可行性。

在获得最大利润值后，构建 ε -约束优化模型，将承运人利润约束设置为不同比例下的阈值($\varepsilon \in$

{1.0, 0.9, ..., 0.1})。对于每个 ε 值,以托运人成本最小化为目标进行优化求解,同时确保承运人利润不低于 $\varepsilon \cdot \Pi_r$ 。通过这种参数调整,可以较为全面地分析2个目标之间的权衡关系,生成分布均匀的Pareto前沿解。在算法实现上,采用求解器处理混合整数规划问题,这种方法不仅保证了每个解的弱Pareto最优性,还可以有效避免传统加权法可能导致的解分布不均的问题,为决策者提供全面的方案。最后,通过分析不同 ε 值下的优化结果,可以清晰展现承运人利润与托运人成本之间的关系,为多式联运系统的定价与路径优化提供决策支持。

3 案例分析

3.1 案例描述

以某真实运输网络为例,分析多批货物从各自起始点运往目的地的路径优化问题。运输网络如图4所示,对图中各个网络节点进行编号,并标明节点名称,节点间的连线表示存在的铁路路径,结合铁路建设要求及相关文献表述,设置具体长度为公路距离的1.2倍,单位为km。此外,各批货物的起始地、目的地均已在图4中标注。在运输网络中存在固定开行的集装箱运输客运化直达班列,铁路服务信息如表3所示,表中列出运输网络所提供服务的

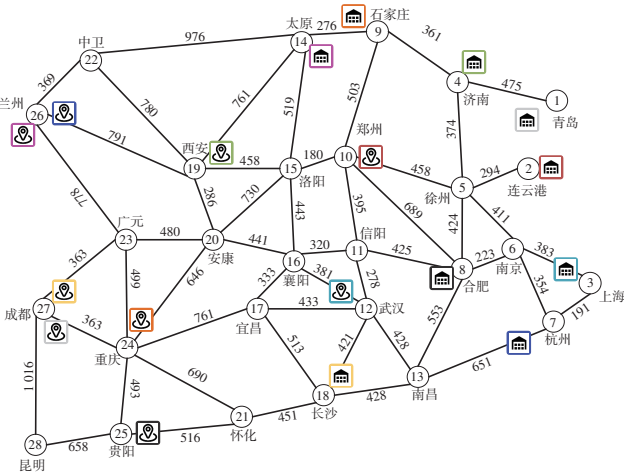


图4 运输网络

Fig.4 Transportation network

表3 铁路服务信息
Tab.3 Railway service information

服务编号	节点路径	开行成本
1	2→5→10	60 100
2	3→6→5→10→15→19→26	214 400
3	3→7→13	67 400
4	4→5→10→15→19	117 500
5	6→8→13→18→21→25	173 600
6	8→11→16→20→24	146 600
7	9→10→15→20→24	164 700
8	10→15→20→23→27	140 200
9	12→17→24→27	95 500
10	14→22→26	107 600
11	18→17→24→27	130 900
12	28→27→23→26	172 500

元

信息如表4所示,详细描述需运送货物的信息。在深入分析铁路运输成本特性的基础上,依据规模经济理论构建了价格折扣模型,鉴于铁路运输单位成本随运量增加呈递减趋势这一经济现象,对不同运量规模下的成本变化予以综合考量。据此,设计出随里程运量增长而逐级提升的折扣方案,折扣区间如表5所示,详细列示了各折扣区间的具体参数,以直观呈现价格折扣策略的实施细节。通过该案例,进一步验证模型的有效性,并分析不同运输路径和运量分配方案对托运人成本和承运人利润的影响。

3.2 结果分析

在案例中,货物运输统一使用20 ft集装箱,列车的容量定为100 TEU;列车的最大开行频率为3列每周期,模型根据具体情况选择合适的运行频率;弧段 a 上列车的通行能力定为20列每周期;限制列车最低载运容量为最大载运容量的0.3倍;铁路货运价格取4.6元/(TEU·km);公路货运价格取5.3元/(TEU·km)。使用GUROBI 11.0.1求解上述案例,可获得模型的相关解。

3.2.1 基于固定价格的结果分析

在运输价格固定的情况下,当利润松弛阈值为0.6时,模型在保证承运人利润不低于理论最大值60%的前提下,实现了托运人成本的最小化。此时,铁路运输费用为10 046 410元,公路运输费用为4 603 602元,铁路开行固定成本为1 838 700元,托运人总花费14 650 012元,铁路运量达到1 235 TEU,承运人总利润为8 207 710元。在上述情况下,基

表4 货物信息
Tab.4 Cargo information

货物 编号	货运量/ TEU	起始点名称	起始点 图标	装载节点号(到始发地的道路距离/km)	终到点名称	终到点 图标	卸载节点号(到目的地的 道路距离/km)	全公路 距离/km
1	185	青岛鑫连丰国际 货运代理公司		2(221), 3(831), 4(352), 6(541), 8(758), 9(618), 10(668), 12(1 085), 14(814), 18(1 428), 28(2 560)	东光集团成都 工业园		10(1 226), 13(1 454), 19(739), 24(286), 25(634), 26(837), 27(22)	1 869
2	230	远港物流西站		2(7), 3(507), 4(378), 6(330), 8(454), 9(659), 10(573), 12(832), 14(853), 18(1 144), 28(2 380)	普洛斯(郑州) 物流园		10(12), 13(828), 19(505), 24(1 188), 25(1 426), 26(1 113), 27(1 218)	559
3	158	上海物流园区		2(450), 3(41), 4(813), 6(277), 8(437), 9(1 092), 10(921), 12(792), 14(1 288), 18(1 065), 28(2 317)	和昌工业园		10(503), 13(368), 19(722), 24(881), 25(1 056), 26(1 348), 27(1 123)	795
4	276	济南临港经济 开发区		2(360), 3(834), 4(44), 6(613), 8(669), 9(319), 10(465), 12(872), 14(519), 18(1 205), 28(2 332)	西安浐灞国际港		10(489), 13(1 072), 19(17), 24(711), 25(1 091), 26(651), 27(735)	929
5	210	东华农产品物流 中心		2(770), 3(294), 4(1 006), 6(405), 8(467), 9(1 300), 10(1 004), 12(661), 14(1 459), 18(767), 28(2 022)	中国兰州农产品 交易中心		10(1 129), 13(1 697), 19(626), 24(989), 25(1 397), 26(19), 27(866)	1 997
6	310	长安工业聚集区		2(509), 3(482), 4(647), 6(187), 8(26), 9(864), 10(546), 12(366), 14(998), 18(704), 28(1 932)	贵阳经济技术 开发区		10(1 439), 13(1 120), 19(1 091), 24(405), 25(12), 26(1 398), 27(639)	1 458
7	175	河钢集团石家庄 钢铁有限责任公司		2(699), 3(1 176), 4(325), 6(924), 8(911), 9(49), 10(437), 12(941), 14(167), 18(1 234), 28(2 223)	汽车工业配套园		10(1 157), 13(1 191), 19(671), 24(32), 25(411), 26(960), 27(297)	1 422
8	180	中鼎物流园		2(845), 3(1 322), 4(477), 6(1 043), 8(972), 9(232), 10(415), 12(926), 14(32), 18(1 203), 28(1 310)	东川物流园		10(1 161), 13(1 728), 19(659), 24(967), 25(1 376), 26(16), 27(845)	997
9	100	三一重工产业园		2(1 131), 3(1 028), 4(1 155), 6(845), 8(690), 9(1 231), 10(795), 12(333), 14(1 224), 18(13), 28(1 310)	成都建工国际 建筑科技产业园		10(1 182), 13(1 432), 19(695), 24(295), 25(668), 26(829), 27(36)	1 135

表5 折扣区间
Tab.5 Discount range

折扣编号	实施折扣	区间下限/(TEU·km)	区间上限/(TEU·km)
0	1.0	0	100 000
1	0.9	100 000	300 000
2	0.8	300 000	600 000
3	0.7	600 000	1.00×10 ³⁴

于固定价格的货物运输信息如表6所示。

从表6中可以得知,货物1,7,8选择全部使用铁路进行运输;货物3选择全部进行公路运输;货物2,4,5,6选择部分采用公铁联运,部分采用全公路运输。为进一步分析模型结果,对不同阈值下的模型进行求解,生成基于固定价格的不同阈值结果如表7所示,分析不同 ε 值下模型的求解结果。

通过 ε -约束法在利润松弛阈值 $\varepsilon \in [1.0, 0.1]$ 的范围内求解,揭示了该模型中承运人与托运人之间的关系。承运人利润目标函数作为主目标,其数值随着 ε 的改变而改变。基于固定价格的不同阈值相关变量分析如图5所示。当 ε 从1.0降至0.1时,承运

表6 基于固定价格的货物运输信息
Tab.6 Freight transportation information based on fixed price

货物编号	总货运量/ TEU	使用服务	服务频率	服务装载率	运送货量/ TEU
1	185	8	2	0.93	185
2	230	公路运输	—	—	30
		1	2	1.00	200
3	158	公路运输	—	—	158
4	276	公路运输	—	—	176
		4	1	1.00	100
5	210	公路运输	—	—	10
		2	2	1.00	200
6	310	公路运输	—	—	115
		5	2	0.98	195
7	175	7	2	0.88	175
8	180	10	2	0.90	180
9	100	公路运输	—	—	100

人利润阈值逐渐下降,此时铁路运量呈现分段下降趋势,在 $\varepsilon=0.8$ 和 $\varepsilon=0.4$ 处存在明显拐点,这种非线性响应可能源于运输网络的结构重构效应。在 $\varepsilon \geq 0.8$ 的高利润区间,随着托运人成本的下降,此时

表7 基于固定价格的不同阈值结果
Tab.7 Results of different thresholds based on fixed price

ε	$\varepsilon \cdot \Pi_r$	托运人成本/元	承运人利润/元	铁路运量/TEU
1.0	13 679 517	22 623 675	13 679 517	1 824
0.9	12 311 565	18 120 226	12 311 565	1 824
0.8	10 943 614	15 906 406	10 943 613	1 759
0.7	9 575 662	15 192 316	9 575 661	1 434
0.6	8 207 710	14 650 012	8 207 710	1 235
0.5	6 839 759	14 107 708	6 839 758	1 037
0.4	5 471 807	13 601 586	5 471 806	863
0.3	4 103 855	13 151 671	4 103 855	778
0.2	2 735 903	12 715 736	2 735 903	596
0.1	1 367 952	12 337 044	1 367 951	363

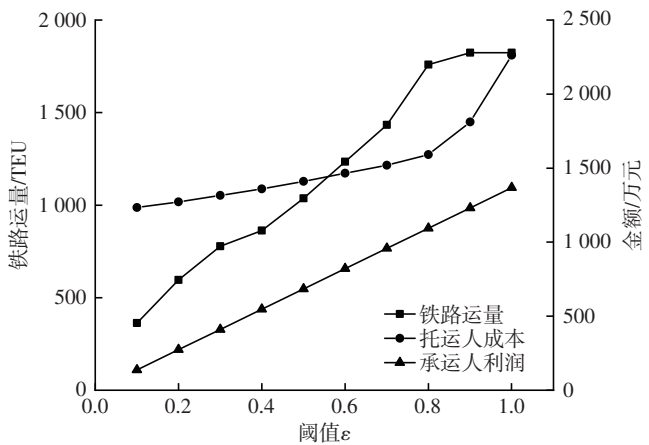


图5 基于固定价格的不同阈值相关变量分析

Fig.5 Analysis of related variables under different thresholds based on fixed price

铁路运量仍保持较高的基准水平，表明承运人通过维持高频服务实现了利润优先策略；当 $\varepsilon \leq 0.8$ 时，随着承运人利润约束的逐渐放松，铁路运量开始快速下降。 $\varepsilon \in [0.8, 0.4]$ 时铁路运量降幅达50.9%，利润阈值的降低导致承运人减少服务频率或运力分配，在此区间内利润阈值小幅变动便可使铁路运量大幅变化。

由上述分析可得，当 $\varepsilon \geq 0.8$ 时系统处于承运人主导的“利润锁定”状态，折扣政策难以有效激发模式转换； $\varepsilon \in [0.8, 0.4]$ 时形成关键敏感性区间，在此区间内利润约束的放松可导致铁路运量大幅下降；当 $\varepsilon < 0.4$ 时结果的进一步优化空间受限。上述结果为有关部门制定差别化激励政策提供了量化依据，建议在运输旺季适当提高 ε 至0.6~0.7区间以保障铁路服务稳定性，而在淡季可降低至0.4~0.5区间以促进社会成本节约。

3.2.2 基于价格折扣的结果分析

在进行铁路折扣的情况下，当 ε 为0.5时，生成相关结果。此时，铁路运输费用为8 981 277元，公路运输费用为3 739 542元，铁路开行固定成本为2 139 700元，托运人总花费12 720 819元，铁路运量达到1 385 TEU，承运人总利润为6 841 577元。基于价格折扣的货物运输信息如表8所示。

表8 基于价格折扣的货物运输信息
Tab.8 Freight transportation information based on price discounts

货物编号	总货运量/TEU	使用服务	服务频率	服务装载率	运送货运量/TEU
1	185	公路运输	—	—	5
		8	2	0.90	180
2	230	公路运输	—	—	30
		1	2	1.00	200
3	158	公路运输	—	—	158
4	276	公路运输	—	—	46
		4	3	0.77	230
5	210	公路运输	—	—	10
		2	2	1.00	200
6	310	公路运输	—	—	10
		5	3	1.00	300
7	175	公路运输	—	—	175
		7	2	0.88	175
8	180	公路运输	—	—	80
		10	1	1.00	100
9	100	公路运输	—	—	100

从表8可以得知，货物1，2，4，5，6，8部分采用全公路运输，部分选择公铁联运；货物3，9选择全公路运输；货物7选择公铁联运。为进一步分析模型，对铁路折扣下不同阈值的模型进行求解，基于价格折扣的不同阈值结果如表9所示，基于价

表9 基于价格折扣的不同阈值结果
Tab.9 Results of different thresholds based on price discount

ε	$\varepsilon \cdot \Pi_r$	托运人成本/元	承运人利润/元	铁路运量/TEU
1.0	13 679 517	18 580 555	13 679 517	1 824
0.9	12 311 565	17 212 604	12 311 566	1 824
0.8	10 943 614	15 844 652	10 943 614	1 824
0.7	9 575 662	14 476 700	9 575 662	1 824
0.6	8 207 710	13 222 198	8 207 754	1 744
0.5	6 839 759	12 720 819	6 841 577	1 385
0.4	5 471 807	12 485 175	5 476 252	1 074
0.3	4 103 855	12 322 182	4 106 170	880
0.2	2 735 903	12 196 673	2 765 259	624
0.1	1 367 952	12 117 087	1 429 583	370

格折扣的不同阈值相关变量分析如图6所示，分析不同 ε 值下折扣后模型的求解结果。

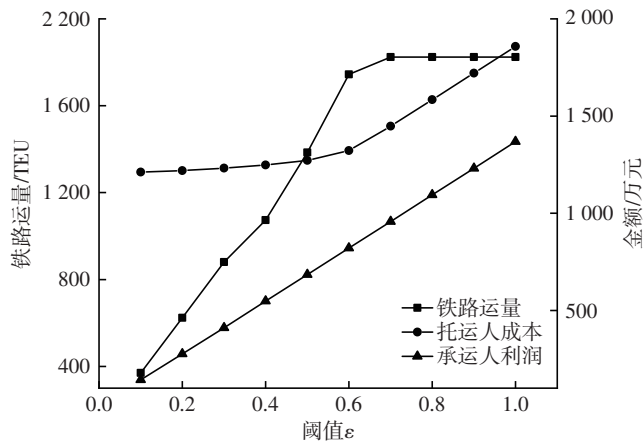


图6 基于价格折扣的不同阈值相关变量分析
Fig.6 Analysis of related variables under different thresholds based on price discount

从表9及图6可知，在进行折扣策略后，随着 ε 值从1.0到0.1，托运人成本呈现分段下降特征，在 $\varepsilon \in [1.0, 0.6]$ 区间内，成本降幅达28.8%，平均边际降幅为每0.1阈值7.21%；当 $\varepsilon < 0.6$ 后，成本曲线趋于平缓，弹性系数从 $\varepsilon = 0.6$ 时的0.23下降至 $\varepsilon = 0.2$ 时的0.013，托运人成本对阈值变化的敏感性降低，表明系统进入成本刚性区间。在实施价格折扣策略后，在较高阈值的情况下托运人成本下降较快。铁路运量在 $\varepsilon \geq 0.7$ 时保持稳定状态，当 $\varepsilon = 0.6$ 时出现首次下降，降幅为4.3%，而在 $\varepsilon = 0.4$ 处发生阶跃式降低，相对 $\varepsilon = 0.6$ 降幅38.4%。

3.2.3 折扣策略实施前后结果分析

对比折扣前后的相关结果，结合对铁路折扣策略的分析表明，无论利润松弛阈值 ε 如何变化，实

施折扣后的系统总成本均显著低于固定价格方案，且始终能有效促进“公转铁”的运输结构调整。不同阈值下折扣实施前后变化量如表10所示。

当 ε 在1.0至0.1的区间内变动时，折扣策略使托运人成本降幅稳定在0.39%~17.87%之间，形成持续的成本节约效应，在不考虑阈值为1的情况下， $\varepsilon = 0.6$ 时成本节约最显著；承运人利润变化呈现稳定微增特征；铁路运量在折扣策略实施后普遍增加，在 $\varepsilon \in [0.5, 0.7]$ 时折扣策略的实施对铁路运量的促进效果最为显著。这种普遍性优势源于折扣机制的双重作用：一方面，铁路运价随里程运量增加而梯度下降的特性，系统性地降低了单位运输成本；另一方面，价格信号引导货流重新分配，使更多货物从公路运输转向铁路网络。

折扣策略实施前后托运人成本对比如图7所示，折扣策略实施前后铁路运量对比如图8所示。基于铁路运输实施货物里程运量折扣策略，对托运人成本和承运人利润均产生了显著的影响。通过分析，清晰地观察到折扣政策实施后托运人成本的减少以及铁路运量的增加。这一对比不仅揭示了折扣政策的经济效益，还为未来的运输成本管理和政策制定提供了有力的数据支持，有助于更全面地评估其对货物运输的影响，并进一步优化运输资源配置。

3.2.4 折扣机制灵敏度分析

当固定利润松弛阈值为0.5时，通过系统调整各区间折扣率，观察托运人成本及铁路运量的响应特性。折扣机制灵敏度分析如表11所示，折扣改变情况中+5%表示折扣力度减弱，即折扣率上调，-5%表示折扣力度增强，即折扣率下调。

表10 不同阈值下折扣实施前后变化量
Tab.10 Variations before and after implementation of discount under different thresholds

ε	托运人成本变化量/元	托运人成本变化率/%	承运人利润变化量/元	承运人利润变化率/%	铁路运量变化量/TEU	铁路运量变化率/%
1.0	4 043 120	17.87	0	0.00	0	0.00
0.9	907 622	5.01	1	0.00	0	0.00
0.8	61 754	0.39	1	0.00	65	3.70
0.7	715 616	4.71	1	0.00	390	27.20
0.6	1 427 814	9.75	44	0.00	509	41.21
0.5	1 386 889	9.83	1 819	0.03	348	33.56
0.4	1 116 411	8.21	4446	0.08	211	24.45
0.3	829 489	6.31	2 315	0.06	102	13.11
0.2	519 063	4.08	29 356	1.07	28	4.70
0.1	219 957	1.78	61 632	4.51	7	1.93

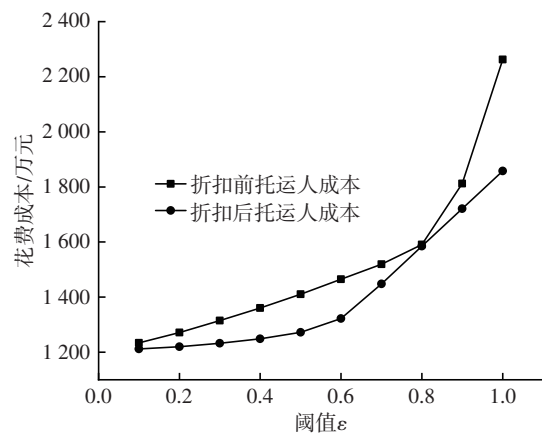


图7 折扣策略实施前后托运人成本对比

Fig.7 Comparison of shipper costs before and after implementation of discount strategy

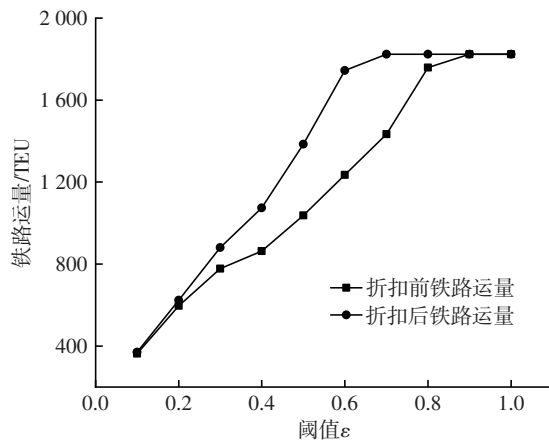


图8 折扣策略实施前后铁路运量对比

Fig.8 Comparison of railway freight volume before and after implementation of discount strategy

灵敏度分析表明，所有折扣情景下托运人成本均低于无折扣基准，其中折扣力度越大，成本节约越强，验证了折扣机制的成本优化效能；铁路运量在全折扣区间保持正向增长，折扣力度也与运量增长呈正相关；承运人利润呈现微小波动，证实利润松弛机制有效吸收了折扣冲击。

上述结果证实了折扣机制的优势，其不仅可以持续优化托运人成本，提升铁路市场份额，同时可

将利润波动进行有效控制，实现市场份额扩张与利润稳定的平衡。

4 结论

以集装箱多式联运为背景，围绕货物运输客运化的核心思想，构建了考虑运输能力限制的路径优化与价格折扣策略模型，旨在实现托运人成本最小化与承运人利益最大化的双目标协同优化。通过理论建模与实证分析，验证了模型的有效性，并揭示了价格折扣策略对运输结构调整的显著作用。本研究不仅为多式联运网络的优化设计提供了新的理论框架，也为运输行业的可持续发展提供了实践指导。主要结论如下。

(1) 优化模型的可行性与有效性。研究构建的托运人成本最小化与承运人利益最大化双目标优化模型，通过 ϵ -约束法求解，能够有效生成Pareto解集。研究证明，在不同利润松弛阈值下，模型均能实现运输路径的科学决策，为多式联运系统提供了可靠的优化工具。

(2) 价格折扣策略的显著效益。基于里程运量的铁路运输价格折扣策略对运输结构调整具有显著促进作用。实证结果表明，该策略在 $\epsilon=0.6$ 时可实现铁路运量提升41.21%、托运人运输成本降低9.75%的显著效果，有效推动了“公转铁”的运输模式转型，实现了经济效益与环境效益的双赢。

(3) 运输网络的动态优化规律。研究揭示了运输系统在不同利润阈值下的响应特性，识别出 $\epsilon \in [0.8, 0.4]$ 的关键敏感性区间。在此范围内，适度放松利润约束可产生显著的运量影响，同时带来一定的成本节约效应，为运输企业制定差异化运营策略提供了重要依据。

研究成果为多式联运系统的路径优化与价格策略设计提供了理论支撑与实践工具，对推动货运组织客运化、促进绿色低碳运输发展具有重要意义。

表 11 折扣机制灵敏度分析
Tab.11 Sensitivity analysis of discount mechanism

折扣改变情况	托运人成本/元	托运人成本变化量/元	承运人利润/元	承运人利润变化量/元	铁路运量/TEU	铁路运量变化量/TEU
无折扣	14 107 708	—	6 839 758	—	1 037	—
+5%	13 115 290	992 418	6 843 529	-3 771	1 265	-228
原折扣	12 720 819	1 386 889	6 841 577	-1 819	1 385	-348
-5%	12 194 597	1 913 111	6 843 725	-3 967	1 540	-503
-10%	11 885 304	2 222 404	6 851 786	-12 028	1 783	-746

未来的研究可进一步考虑动态需求与不确定性因素,以增强模型的适用性与鲁棒性。

参考文献:

- [1] 康 禄. 低碳背景下公铁联运路径优化研究[J]. 铁道货运, 2024, 42(5): 39-45.
KANG Lu. Route Optimization of Road-Rail Intermodal Transportation under Low Carbon Background[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(5): 39-45.
- [2] FAHIMNIA B, SARKIS J, CHOUDHARY A, et al. Tactical Supply Chain Planning under a Carbon Tax Policy Scheme: A Case Study[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164: 206-215.
- [3] CRAINIC T G, KIM K H. Chapter 8 Intermodal Transportation[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [4] YANG K, YANG L X, GAO Z Y. Hub-and-Spoke Network Design Problem under Uncertainty Considering Financial and Service Issues: A Two-Phase Approach[J]. Information Sciences, 2017, 402: 15-34.
- [5] 张 旭, 张海燕, 袁旭梅, 等. 需求不确定下基于不同碳税机制的双目标多式联运路径优化[J]. 公路交通科技, 2025, 42(2): 41-51.
ZHANG Xu, ZHANG Haiyan, YUAN Xumei, et al. Dual-Objective Multimodal Transport Route Optimization Based on Different Carbon Tax Mechanisms under Uncertain Demand[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(2): 41-51.
- [6] 綦潘安, 计明军, 冯 泽, 等. 考虑多任务集装箱多式联运路径优化方案研究[J]. 工业工程与管理, 2022(3): 54-63.
QI Panan, JI Mingjun, FENG Ze, et al. Research on the Route Optimization Scheme of Multimodal Transportation Considering Multi-Task Container[J]. Industrial Engineering and Management, 2022(3): 54-63.
- [7] 冯芬玲, 张清雅. 基于环境的多式联运运输方式协同组织优化模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(6): 95-100.
FENG Fenling, ZHANG Qingya. Multimodal Transport Mode Co-Organized Optimization Model Based on the Environment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(6): 95-100.
- [8] 刘 杰, 彭其渊, 殷 勇. 低碳背景下的多式联运路径规划[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 243-249.
LIU Jie, PENG Qiyuan, YIN Yong. Multimodal Transportation Route Planning under Low Carbon Emissions Background[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(6): 243-249.
- [9] 苏 航, 李海军. 不确定需求下冷藏集装箱低碳多式联运路径优化[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(1): 61-69.
SU Hang, LI Haijun. Route Optimization on Low-Carbon Multimodal Transport of Refrigerated Containers under Uncertain Demand[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(1): 61-69.
- [10] 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 Optimization of China-EU Container Multimodal Transport Considering Various Factors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(10): 2239-2248.
- [11] 邓学平, 陈 露, 田帅辉. 不确定需求下考虑混合时间窗的多式联运路径优化[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(4): 689-698.
DENG Xueping, CHEN Lu, TIAN Shuaihui. Multimodal Transport Path Optimization Considering Mixed Time Windows under Uncertain Demand[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(4): 689-698.
- [12] 艾子妍, 张 旭, 武 旭. 中欧集装箱多式联运服务网络设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(6): 2217-2228.
AI Ziyen, ZHANG Xu, WU Xu. Design of China-Europe Intermodal Container Transport Service Network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(6): 2217-2228.
- [13] 简文良, 谢美娟, 何 艺. 考虑运输时间可靠性的公铁联运路径选择研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(3): 38-49.
JIAN Wenliang, XIE Meijuan, HE Yi. Research on Route Choice for Road-Rail Intermodal Transportation Considering Travel Time Reliability[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(3): 38-49.
- [14] 夏 阳, 魏玉光, 朱加发, 等. 铁路集装箱客货运输组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(S1): 27-31.
XIA Yang, WEI Yuguang, ZHU Jiafa, et al. Transportation Organization of Passenger-Like Container Train[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(S1): 27-31.
- [15] 郑 旸. 中铁集装箱公司国内多式联运班列提质升级策略研究[J]. 铁道货运, 2024(7): 18-23, 30.

(下转第 216 页)