

空高联运快捷货物运输产品设计研究

方 星, 张玉环, 谢茹羽, 郑 煜*

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年8月27日; 录用日期: 2024年10月9日; 发布日期: 2024年10月17日

摘 要

空高联运具有多尺度运输、高时效、可靠性强、运力周转率高等优势, 可以为新时代背景下具有多品种、高附加值、高频次、小批量需求特性的货物提供高质量运输服务。不同于其他多式联运方式, 空高联运系统在技术、造价等客观条件制约下运力资源有限, 需要在最大程度满足货物运输需求的基础上, 提升空高联运系统的基础设施设备的利用率。本研究提出一种空高联运快捷货物运输产品设计方案, 提出多种类客户需求预测方法, 并结合服务网络设计思想, 创新空高联运运输产品设计方案, 将货物运输资源管理与货物运输调度进行多阶段一体化组织, 协同管理全货运与客机货运两种不同的货物调运模式, 实现服务网络与货物运输市场需求高度耦合、增加运营管理者经济收益。本设计方案可为交通运输部、物流企业等相关行业单位的货物运输运营管理者提供决策参考和依据。

关键词

空高联运, 需求预测, 运输产品设计, 货物调运优化

Air-to-Highspeed-Rail Intermodal Freight Transportation Transport Product Design

Xing Fang, Yuhuan Zhang, Ruyi Xie, Yu Zheng*

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 27th, 2024; accepted: Oct. 9th, 2024; published: Oct. 17th, 2024

Abstract

Air-to-highspeed-rail intermodal transport has the advantages of multi-scale transportation space, high transportation timeliness, strong transportation reliability and high capacity turnover rate. It can provide satisfactory services for the freight delivery with new demand characteristics, such as

*通讯作者。

文章引用: 方星, 张玉环, 谢茹羽, 郑煜. 空高联运快捷货物运输产品设计研究[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(5): 358-371.
DOI: 10.12677/orf.2024.145477

multiple varieties, high added value, high frequency and small batch, under the background of the new era. Unlike other multimodal transportation methods, the air-to-highspeed-rail transportation system has limited transportation resources due to objective constraints such as technology and cost. Therefore, it is necessary to improve the utilization rate of the infrastructure and equipment of the air-to-highspeed-rail transportation system while maximizing the satisfaction of cargo transportation needs. This study proposes a design scheme for a fast and efficient air-to-highspeed-rail intermodal freight transportation product. Based on accurate prediction of air-to-highspeed-rail intermodal freight demand, combined with service network design ideas, the design methodology of air-to-highspeed-rail intermodal transportation product is innovated. The management of freight transportation resources and freight transportation scheduling are integrated in multiple stages and levels, and the two different freight transportation modes of full freight and passenger flight are jointly managed to achieve high coupling between service network and freight transportation market demand, increase the economic benefits of operation managers, and provide decision-making references and basis for freight transportation operation managers of relevant industry units such as the Ministry of Transport and logistics enterprises.

Keywords

Air-to-Highspeed-Rail Intermodal Transportation, Demand Estimation, Transport Product Design, Optimization of Freight Transportation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为我国现代化综合交通服务空间的重要拓展、中国特色“航空 + 高铁”运输组织模式的充分体现，空高联运通过航空和高铁的组合运输实现货运产品的高效传输，空高联运的组合效应对我国航空和高铁发展具有重要意义。一方面，空高联运可以充分发挥“八纵八横”高铁网络的优势，弥补现有铁路货运体系中高端产品的不足，开发出适应不同时间需求的快运服务，以满足快运市场的多样化需求；另一方面，通过构建 200 公里内公路集货、200 至 650 公里内高铁集货，以及 650 公里以上航空运输的多层次货运体系，空高联运可以大幅提升货物的集散效率和整体能力，提升我国航空物流国际竞争力。此外，借助于枢纽机场与高铁快运物流基地的建设，空 - 高联运将有助于支撑目前总体规模迅速扩大的高时效性货物运输业务的高效化、网络化运行。

目前，中共中央、地方政府、民航、铁路等多方都对我国空高联运提供了强大的政策支撑。国务院办公厅发布的《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案(2021~2025 年)》强调，要创新多式联运的组织模式，丰富联运服务产品，积极发展铁路快运，推动冷链、危险品、国内邮件快件等专业化联运发展。同时，鼓励培育多式联运市场主体，推动铁路货运、航空寄递等加速转型为多式联运经营者。此外，在中国民航局与各省签署的战略协议中，针对郑州、重庆、成都等国际航空枢纽，提出了加速空铁多式联运物流港的建设；对于西安等枢纽，建议推动空铁联运的创新发展，建设机场与高铁物流基地，打造高效的空铁联运物流体系。民航局与铁路总公司达成了空铁联运战略合作协议，同时，关于高铁快运发展战略和成网运行的实施方案等相关研究也在持续推进中。空高联运货物运输对于我国产业结构调整、高经济价值产品开发、中西部经济的发展有重要的促进作用，同时使得我国国际贸易中货物流通愈加便捷，拓宽了我国中高端制造业产品销售的地理范围。然而，空高联运的快速发展也增加了对其管理

的难度。空高联运的主要运输对象为鲜花、电子设备等高附加值商品，货物种类繁多、货源分散、对运输服务要求高，货物运输需求呈现小批量、高频次的特点。如何对品种结构复杂、服务质量高度敏感的货物运输需求进行统一管理，提供合适的运输产品、识别并统一量化运输产品中的运输服务要求、分配与之相匹配的运输资源考验着空高联运经营人。

目前客货混运、货物客运的现象普遍存在，建立集成客运与货运的综合交通枢纽是当务之急，而将客货分离、建立专业化的货运中心亦是未来货物运输系统的发展方向。在两种运输形式并存情形下，协同管理全货运输资源与利用闲置空间进行货运的客运资源，共同服务于货物运输将是一个挑战。

鉴于此，本研究提出一种空高联运快捷货物运输产品设计方案，方案以空高联运货运需求预测方法为基础，结合服务网络设计思想，创新空高联运运输产品设计方案，将货物运输资源管理与货物运输调度进行多阶段一体化组织，协同管理全货运与客机货运两种不同的货物调运模式，方案包括空高联运货物运输需求预测理论与方法、空高联运货物运输产品设计方案、空高联运系统货物运输调度多阶段优化理论与方法三个模块，三个模块相互影响、互为反馈。本研究为实现满足货主、联运经营人、联运承运人等多方利益的空高联运货物运输产品设计提供理论支撑与方法指导，助力空高联运系统的可持续发展。

2. 国内外研究现状

本节主要归纳总结货运需求预测、运输产品设计、快捷货运服务网络设计等方面的近期研究。

2.1. 货物运输需求预测

货物运量预测作为制定运输计划、组织生产的基本依据，受到了广大学者的关注，对于货物运量预测的研究从未停止过。自 20 世纪 70 年代以来，随着计算技术和数学模型的不断完善，计算机的普及也推动了预测技术的显著进步。各种方法，如回归分析、时间序列、灰色预测、四阶段法、系统动力学、支持向量机以及神经网络等[1]-[8]已在运量预测中得到了广泛应用。具体来说，回归分析法是根据实际数据资料的发展趋势，从分析事物发展变化的因果关系入手，通过建立回归模型进行预测的方法，它能够反映出哪些变量对因变量有重要影响，以及这些影响的性质和程度，但缺点对于原始数据的完备性依赖度较高。灰色模型法的实质是一个关于变量数列的一阶微分方程的时间相应函数，可以根据能够得到的较少的局部数据来进行推算，其实现较简单，能够避免统计数据不足的缺点，能较好的掌握系统的自我变化规律，比较适用于短期的、数据严重缺失情况下的需求预测。时间序列模型的基本思想是通过时间序列的过去值和现在值来预测未来值，这个序列是将预测对象随时间推移而形成的数据序列。神经网络模型根据历史数据，利用机器学习方法，建立输入到输出的映射关系，从而实现预测。时间序列模型与神经网络模型可以较好的刻画预测对象的动态演化过程，但对运量需求产生机理的原理性解释较差。

不同于以往的运量预测问题，空高联运货物种类繁多，不同货物运量的时空演化具有不同特征，因此，本研究提出先利用货运需求不确定性特征对空高联运货物运输市场进行细分，再针对不同市场客户的不确定性程度的不同，设计与之匹配的一般性需求预测模型。

2.2. 运输产品设计研究

目前针对特定品种货物运输提出产品设计方案的研究较多，如陶樯等提出开行更多定期直达货运班列、开发适应市场需求的铁路冷藏运输产品[9]。崔艳萍等提出基于客户细分的煤炭货运产品设计思路[10]。有关多式联运货物运输产品设计的研究主要集中在多式联运产品的容量控制、动态定价[11][12]、运输产品性能指标的观测、量化与应用[13]。

货物运输快捷化是未来货运产品开发的主要趋势[14][15]，铁路快捷货物运输产品的相关研究比较

多,主要包括:产品设备配置[16];产品的营销、物流策略[17]-[19];产品结构优化[20][21];快捷货运班列的运输模式[22][23];产品运输组织原则和其基本形式[24]-[27]等。

以上铁路快捷货运产品的设计主要根据产品设计理论[28],经过需求特性分析、确定运输产品功能要素、制定运输产品组织运营计划等基本步骤对运输产品进行提前设计,产品的运输组织形式较为简单,大多只涉及单一运输模式(如普通快速铁路、铁路行包专列等)且无需中转集货或集货只发生在始发地、中途少数指定集散中心,不适用于空高联运货物运输产品的设计。区别于已存在的运输产品,空高联运的运输需求端大部分是多品种、小批量的高附加值商品,对于运输质量要求更高,且空高联运网络的多层次性、链路的异质性使得从起始地到目的地有多条运输路径可以选择,这导致了可供选择的产品组织运营方案也更多。最优的运输产品组织运营计划既要满足不同种类货物运输服务质量要求,又要充分利用空高联运运力资源,还要考虑多式联运运营人的运输成本。本研究借助服务网络优化的思想为空高联运系统构建新的运输产品设计方法,借助时空动态网络最优化理论工具帮助制定最优运输产品组织运营计划。

2.3. 快捷货运服务网络设计研究

运输服务网络基于交通物理网络构建,由物理节点与虚拟节点之间的运输服务组成的逻辑网络[29]。其设计目的是满足运输需求,为客货流制定相应的运输计划或运送网络[30],从而为运输企业在优化运营组织和资源配置方面提供重要支持[31]。近年来,关于运输服务网络设计的研究不断增加,尤其是在欧美发达国家,在货运、公共交通和航空服务网络设计等领域积累了丰富的经验和成果[32]。我国的研究人员在服务网络设计领域也取得了许多显著的成就[33]。快捷货运服务网络的设计目标是优化并制定适合快捷货物的运输服务网络,从而更好地满足其高时效性和高可靠性要求。快捷货物的运输方式主要包括铁路、公路和航空三种方式,也可以通过两种或全部进行联运。由于每种运输方式的特性各不相同,因此服务网络设计的内容也有所不同。

多式联运的快捷货运服务网络设计主要涉及运输方式与路径的选择、货运服务枢纽的选址以及动态服务网络的构建。运输方式和路径的选择决定了在不同区域内采用的运输方式和行驶路线[34]-[36]。货运服务枢纽的选址则需要根据需求,在货运节点中选择那些能够高效衔接多种运输方式的节点,这是快捷货运服务网络设计的关键环节。Alumur 等人采用分层设计思路,在确保送达时间的前提下,从陆路和航空运输网络中为快捷货物选择枢纽[37];Merakli 等人在设计枢纽选址方案时,考虑了需求的不确定性,通过两种建模方法,使得方案具有良好的鲁棒性[38]。动态服务网络设计也是综合运输体系中快捷货物运输服务的重要研究内容。Crainic 将货物运输企业的服务网络设计问题分为频度服务网络设计和动态服务网络设计,并为此建立了数学模型[39];在设计快捷货运的动态服务网络时,除了需要考虑流量平衡和服务频率等因素外,还需关注服务时间和运行调度,这使得传统研究方法难以准确描述这些问题[40]。时空网络方法因其在处理带时刻的网络设计问题时具有明显优势,被应用于动态服务网络设计模型的构建。王保华等人和 Crainic 等人分别采用时空网络的建模方法,前者将不同类型的节点分层,后者则侧重资源利用与管理[41][42]。

不同于其他多式联运系统,空高联运系统的快捷货运服务网络设计存在以下新问题:空高联运系统的航空运输包含客机腹舱与全货机两种运输资源,针对客货混运的情况,如何在有限的航空线路资源约束下,协同规划客运航班时刻表、货运航班时刻表,高效利用两种不同的运输资源尤为重要;如何收集、量化客户的运输需求,满足多目标优化运输任务。针对第一个问题,本研究提出了两阶段空-高联运货物调运优化策略。第一阶段面向协议货主、普通货主,在全货运交通枢纽支撑下,构建空高联运全货运服务网络优化模型;第二阶段面向自由货主,基于客运为主、货运辅助的客货混运基础设施条件,构建

基于航空与高铁客运的货物调运优化模型。针对第二个问题，本研究提出了产品要素信息处理框架、服务信息传递机制与运输产品组织运营计划生成机制，可以实现定量描述客户运输需求并将其转化为服务网络的资源使用约束，通过求解服务网络优化模型，确定运输产品的最优组织运营计划。

3. 多阶段空高联运快捷货物运输产品设计

多阶段空高联运快捷货物运输产品设计方案包含三个模块，分别是空高联运货物运输需求预测理论与方法、空高联运货物运输产品设计方法、空高联运系统货物运输调度多阶段优化理论与方法。

3.1. 空高联运需求预测理论与方法

空高联运货物运输市场货物品类繁多，针对客户需求的不确定特征对空高联运货运市场进行细分，可以分为协议货主、普通货主、自由货主三类。精确把握各种类型货物运输需求是提供、安排高效货物调运策略的前提。空高联运需求预测理论与方法分为三部分内容：货运需求不确定性特征识别、不确定性量化方法与不同类型客户需求预测方法(见图 1)。

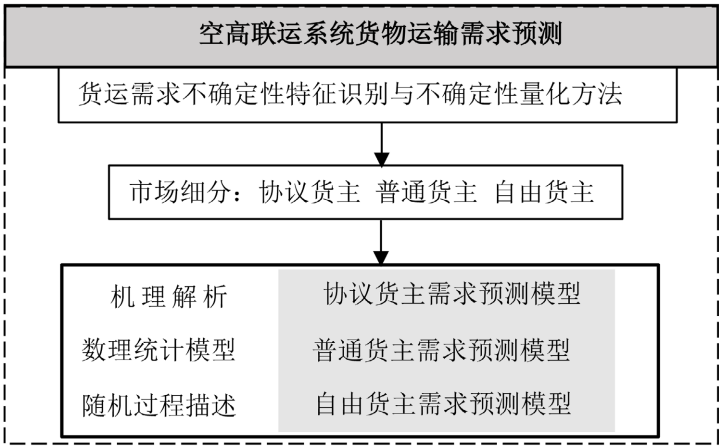


Figure 1. Air-to-highspeed-rail intermodal freight transportation demand estimation theory and methodology module
图 1. 空高联运需求预测理论与方法模块

收集货物运输需求历史数据，对货物运输需求进行特征分析，利用基于最大熵的可预测性指标及其他异常值辨识方法，表征货物运输需求不确定性。细分货物运输市场为三类：1) 定义不确定性低的客户为协议货主，运输需求呈现相对稳定或者随时间明显规律性递增、递减的特征，常见的协议货主包括每个季节新上市的高档服装、为医院持续供应的药物、医疗物品等；2) 定义不确定性较高且呈规律性上升或下降的客户为普通货主，运输需求表现为短时间突然上升、而后恢复正常，常见的普通货主包括受市场销售策略影响较大的电子产品(手机、平板电脑等)，受天气、环境变化影响较大的农产品等；3) 定义不确定性持续性偏高，且无明显的规律性变动的客户为自由货主，货物运输需求的产生具有随机性，常见的自由货主包括邮政快递、包裹等。针对不同客户需求特点应当采用不同需求预测方法(见表 1)。

3.2. 空高联运货物运输产品设计方法

空高联运主要负责运输高附加值的货品，这类货品多为工业成品或半成品，种类繁多，涵盖包裹、邮件、食品、生鲜、药品、服装、办公用品、电子产品、机械设备和精密仪器等。与大宗货物相比，这些货品的价值和时效敏感性更为显著，因此对运输的时效性、准确性和安全性提出了更高要求，同时对运输费用的敏感度相对较低。这类高附加值货品通常批量小、运输频率高，种类多样，物流特点表现为流

量较小且流向分散。正是由于空高联运系统大部分服务于以生产高附加值货物为主的货源较为分散的中小型企业、单位或个体，为这些客户提供符合其需求特性的运输产品，满足其货物运输服务需求，收获客户满意度、培养稳定的货源市场，是空高联运长期盈利的基本保证。因此，需要研究面向货物运输需求的产品设计方法，尤其要注重空高联运客户的多样性，设计多样化的运输产品。空高联运货物运输产品设计方法分为三部分内容：空高联运货物运输产品需求特性分析方法、定义空高联运运输产品功能要素、设计服务信息传递机制与运输产品组织运营计划生成机制(见图 2)。

Table 1. The demand characteristics and demand forecasting methodologies of different types of customers
表 1. 不同类型客户的需求特点与需求预测方法

客户类型	客户需求特点	需求预测模型	需求预测方法
协议货主	货源较为稳定，市场波动较小或者波动有规律可循	将时间序列模型与计量经济模型组合形成协议货主运输需求预测模型，此类模型的优势在于既能描述时间演化规律又能阐述生成机理	多元统计回归模型与时间序列 ARIMA 相结合的需求预测方法
普通货主	受市场波动或外部环境的变化(如新政策的颁布、突发紧急事件等)影响较大，具有突发性增长或下降的特征	采用数理统计模型与时间序列模型相组合的方法，并将数理统计模型中的参数与货物需求变动关键特征建立联系，如销售量突增出现时刻、增长持续时长、高峰峰位等	基于高斯函数的最小二乘拟合多峰曲线模型的需求预测方法
自由货主	不确定性持续性偏高	利用数理统计方法描述自由货主货物运输需求的统计特性，或运用随机过程理论刻画其需求生成过程	对每批次货物运输量进行正态拟合，对货物批次到达的时间间隔进行泊松分布拟合

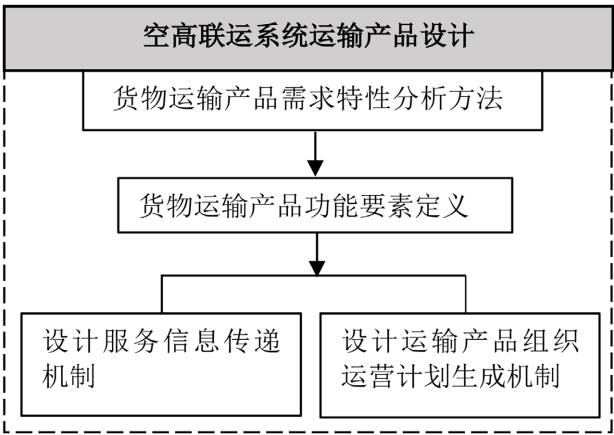


Figure 2. Air-to-highspeed-rail intermodal freight transportation transport product design methodology module
图 2. 空高联运货物运输产品设计方法模块

3.2.1. 空高联运货物运输产品需求特性分析方法

根据产品设计理论，产品需求特性是进行产品设计的前提、可以通过需求特性分析获得。结合空高联运运输的特点，从货主、货源两个层面，对空高联运货物运输需求特性的基本点进行重新定义。当货主层面的需求特性基本点的信息内容与货源层面相冲突时，优先货主的需求特性信息作为后续产品设计的基准。

货主类型是需求特性分析的关键点。货主类型根据大的市场细分可分为协议货主、普通货主、自由货主，货主类型决定了提供给货主运输产品的服务质量的高低。协议货主、普通货主对运输价格敏感度低，运送的货物经济附加值更高，运输服务质量的稳定性要求更高，采用全货飞机、全货运高铁运输并以集装箱式为运输单元形式，收取较高的运输费用。集装箱运输是多式联运的优势之一，货物装载集装箱可以节省货物的由于包装浪费的时间与费用，不涉及箱内货物的专业机械装卸过程，使得货物转运的效率更高，转运过程中的货损、货差事故大为减少，提高了运输的时效性与安全可靠。自由货主一般为零散货主，货物形式一般为零担货物，如包裹、快递等，运输需求随机性高，利用客运飞机腹舱、客运高铁列车车厢运输，可以保证一定的运输时效性，但是运输安全可靠偏低，一般运输费用偏低。不同类型货主的销售方法见表2，货主、货源层面的需求分析基本点及对应的市场调查内容与方法见表3。此外，货物运量是运输需求特性分析的重点，可以通过空高联运需求预测获得。货物运输时间敏感度为运输需求特性分析的难点，可通过货物时间价值计算方法获得。

Table 2. Sales methodologies for different types of shippers
表 2. 不同类型货主类型的销售方法

货主类型	销售阶段	销售类型	销售方法
协议货主	第一阶段	协议销售	面向具有固定运输频率和一定批量需求的大型货主。通过提前签订协议，预售部分集装箱箱位给这些客户。
普通货主	第二阶段	普通销售	在出发前一到两天，根据市场需求的变化，将未售出的箱位提供给普通货主，通常通过线上平台完成交易。
自由货主	第三阶段	自由销售	在客运飞机、客运高铁出发前，根据近期市场需求状况，接受或拒绝自由货主订单，一般通过线上销售

Table 3. Basic points of demand analysis at the level of shippers and sources, and corresponding market research content and methodologies
表 3. 货主、货源层面的需求分析基本点及对应的市场调查内容与方法

	需求分析基本点	货运市场调查内容	货运市场调查方法
货主层面	货主类型、货主运输时间敏感度、运输风险承受力、运输价格敏感度、运输方式偏好(如绿色运输、直达式运输)等	货主偏好的运输时间、运输风险承受力、货主能承担的运输价格、运输方式偏好等	问卷调查、咨询、集体面谈、走访客户等
货源层面	货物品类、货物运量、货物运输时间敏感度、货物流向、货物自身价值、适用的运输方式等	货物品类、货物运量、货物自身价值、适用的运输方式等	

3.2.2. 定义空高联运运输产品功能要素

在全运输需求特性分析基础上，依据需求特性分析的结果确定货运产品要素，再将确定的货运产品要素进行组合，形成多样化、差异化、定制化的货运产品。运输需求特性分析的分析内容可以包括：货源构成、流量流向、运输时效性要求、运输安全稳定性要求、运输价格要求等，分析方法包括：数理统计、数据挖掘等。产品要素组合的要素内容可以包括：货源构成、流量流向、运输时效性要求、运输安全稳定性要求、运输价格要求等，组合方法为根据目标市场特征及客户需求进行产品组合。

详细分析协议货主、普通货主的需求特性，组合多种运输产品功能要素，为协议货主、普通货主提供多样化运输产品，对自由货主则提供产品功能要素单一的运输产品。协议货主、普通货主的运输产品

功能要素一般包括：运输重量、运输时效性、运输距离、运输方式偏好、运输条件、货物运输类型、运输货物价值、运价敏感度、运价率水平等。而自由货主的运输产品功能要素相对简单，包括：运输时效性、运价率水平。

运输产品的基本信息由功能基本要素组成，每个功能基本要素都包含了该运输产品对于该要素的等级选择或数量赋值，例如：在分析时效性功能要素时，可以针对航空和高铁现有的货运产品，根据服务时限将其划分为：当日达、次晨达(全程 12 小时)、次日达(全程 24 小时)、隔日达(全程 36 小时)以及其他类型；运输距离功能要素，可以为短距离、中长距离、长距离等，运输条件功能要素可以为普通运输、冷链运输、危险物运输等，货物运输类型功能要素可以为整车运输、零担运输、集装箱运输等，运输方式偏好功能要素可以为直达式运输、绿色运输、转运运输等。

运输产品的功能基本要素从多个维度(时效性、安全性、运输方式等)为客户提供运输服务的具体信息。为满足运输服务功能基本要素中定义的服务质量要求，需要利用最优化理论与技术确定运输组织形式、运输衔接方式、飞机航班或高铁班列开行频率，形成具体的货物运输产品组织运营方案。

3.2.3. 设计服务信息传递机制与运输产品组织运营计划生成机制

通过产品运输需求特性分析，确定不同产品的产品功能要素组合，利用服务网络设计思想制定运输产品的具体的组织运营计划。服务网络是建立在物理网络基础上、基于运输需求的、由空高联运经营人联合航空、高铁货物运输管理者在节点间提供各种运输服务构成的虚拟网络。不同于物理网络，空高联运服务网络主要针对货物运输需求配置安排载运设备、人力资源、航空时刻资源、高铁时刻资源，实质上表现为联运经营人对运输资源的合理配置和利用。

利用服务网络优化实现运输产品设计需要解决两个问题：一是服务信息(即产品功能要素信息)传递机制的设计；另一个是运输产品组织运营计划生成机制的设计。

前者的设计思路为：建立产品功能要素信息处理框架，实现将不同产品功能要素在统一标准下量化，并定义产品功能要素信息转换函数，将产品的运输服务要求转换为可定量描述的服务网络中的资源使用约束，设计货运服务信息传递机制，利用该机制将转换得到的约束嵌入到服务网络优化模型中。产品功能要素信息转换函数的形式多样，如时效性功能要素内容为“次晨达”的信息可转换为不等式形式 $\text{travel_time} < 12 (\text{hour})$ ，如果允许不确定性存在，还可以将 travel_time 视作随机变量，构造随机约束，形式为 $\text{Pr}(\text{travel_time} \leq 12) > \alpha$ ， α 为置信度。如运输方式偏好功能要素内容为“绿色运输”的信息可转换为等式约束，即 $\text{mode_selection_flight} = 0$ ，将干线运输模式为飞机的选择变量设置为 0，引导长距离干线运输由能源消耗更低的高铁完成。

后者的设计思路为：通过求解服务网络优化模型，得到最优的货物运输路径选择决策，将最优货物运输路径信息反馈回运输产品设计模块，即得到运输产品的组织运营计划。

综上所述，空高联运的产品设计过程可以概括如下：

第一步，分析货物运输产品需求特性，确定产品功能要素组合；

第二步，利用统一的产品要素信息处理框架，对各产品功能要素进行定量描述并转化为服务网络的资源使用约束；

第三步，利用货运服务信息传递机制将转换得到的约束嵌入到服务网络优化模型中；

第四步，根据服务网络优化模型的最优决策结果，确定运输产品的最优组织运营计划。

3.3. 空高联运系统货物运输调度多阶段优化理论与方法

区别于其他多式联运模式(如铁陆运输、海铁运输)的大批、稳定、重量级货源，空高联运服务于轻量级、多批次、高时效、高安全性的运输需求，这些运输货物的价值往往较高，如鲜花、高附加值农产品、

医疗设备与药物、电子设备等。一方面为保证运输安全可靠的进行，需要配备一定的人力、物力维持运输过程中的安全驾驶以及不同交通模式间的可靠衔接；另一方面，为实现运输的高时效性，提高交通工具高使用率，需要在兼顾客观物理条件与规章制度的约束下、提前对航班与列车进行周密的排班计划，协调统筹人力、物力、运力资源，使其更好地服务于货物运输。此外，为了保证飞机与高铁在货物运输中能够高速行驶，空高联运对于货运飞机、货运高铁的货物承载量与货物形式规格有着严格规定，且相较于班轮、货运铁路等其他货运工具，货运飞机、货运高铁的载货空间相对有限且单位空间的载货重量也有严格限制。在以上条件的制约下，实现空高联运高效运输需要：1) 实施货物运量预测，精准把握货物运输需求，进行运输产品设计，明晰货物运输服务要求；2) 对运力、人力、物力资源进行提前规划与合理配置；3) 在有限的运输资源条件下，做合理的货物调运路径选择。因此，提出基于运输产品设计的空 - 高联运货物调运多阶段优化理论与方法(见图 3)，主要内容包括：1) 空高联运系统综合网络框架；2) 空高联运全货运服务网络优化模型与算法；3) 基于航空与高铁客运的货物调运优化模型与算法。

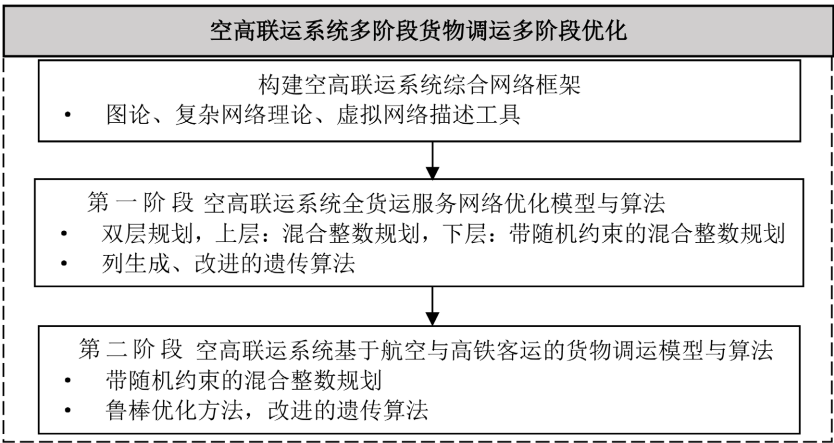


Figure 3. Theory and methodology module of multi-stage optimization for air-to-highspeed-rail intermodal freight transportation system

图 3. 空高联运系统多阶段货物调运多阶段优化理论与方法模块

3.3.1. 空高联运系统综合网络框架

空高联运以航空 - 高铁联合运输为主，在其他运输活动如仓储、集结、疏散等相协调配合下完成，需要建立综合网络框架帮助分析空高联运相对复杂的运输过程。首先，梳理空 - 高联运系统的作业流程，重点考察货物存储、货物转运、装卸载货物中间任务具体实现方法，定义相关经济成本、时间成本等的量化方程，尤其要将由于规模经济效应带来的边际成本递减特性考虑其中。然后，基于实地调研和企业咨询方法，剖析目前空 - 高联运系统的交通基础设施的类型及其基本交通工具的配备情况，如货运航空中心、高铁交通枢纽、客货两用综合航空交通枢纽等。基于不同运输空间尺度分类，分析空 - 高联运网络结构特点，重点分析省内单层级辐射型空 - 高联运网络、城市群多层级辐射型空 - 高联运网络、国际贸易多层级辐射型空 - 高联运网络等三种典型网络的拓扑结构与交通元素的特点。最后，融合多种具体运输流程、网络结构形式，运用虚拟网络、时空网络图等工具从静态、动态不同角度描述网络，构建空高联运综合网络框架。

在综合网络框架下，根据协议货主、普通货主、自由货主的市场细分，制定两阶段空 - 高联运货物调运优化策略。第一阶段面向协议货主、普通货主，在全货运交通枢纽支撑下，构建空高联运全货运服务网络优化模型；第二阶段面向自由货主，基于客运为主、货运辅助的客货混运基础设施条件，构建基于航空与高铁客运的货物调运优化模型。

3.3.2. 空高联运全货运服务网络优化模型与算法

实施空高联运的益处在于借助综合交通枢纽如空港、陆港的建设,充分发挥航空、高铁发挥各自比较优势,提升货物运输效率,降低社会物流成本,促进经济社会发展。与此同时,空高联运的发展也会优化航空、高铁的资源配置:一方面,航空与高铁的紧密衔接使得中心枢纽至目的地的短途快速运输任务可以由高铁来完成,从而减少了目的地周边小型机场的需求,优化了区域内的交通运输布局;另一方面,通过将短途货物流从航空港口转移到高铁,释放出的航空运力可以更集中于长途运输,增强了航空运输的效率,优化了运输产品结构,并提升了其经济效益。鉴于此,在做服务网络设计时,应当充分发挥航空干线长距离快捷运输、高铁干线长距离稳定安全运输、高铁支线中、短距离高可达性运输的优势。

构建具有双层结构特征的服务网络设计模型,上层模型探索如何针对货物运输服务要求以及网络运行状态分时分地、合理的分配运输资源。运输资源包括:航班时刻资源、高铁班列时刻资源、机场机务人力资源、高铁站点服务人力资源、中转站装卸载机械工具资源等。下层模型探索基于不同运输目标的(如运输总成本最低、运输总延迟最小、运输总碳排放最低等)、在上层运力资源合理分配作用下的、空高联运货物的分配规律。

具体来说,上层为混合整数规划模型,用来优化运力资源配置,优化目标为最大化货物运输利润,即实现货物运输总收益与服务网络运营总成本之间的差值最大。基本决策包括:链路为航空货运模式时的航班时刻选择、链路为高铁货运模式时的班列开行时刻选择、飞机机型的选择等,约束条件分为三类,第一类约束保证客运资源与货运资源不产生冲突,如同一时间段货运航班线路不能和客运航班线路相冲突;第二类为机场和高铁中心枢纽的人力资源、物力资源约束,如机场服务的飞机数不能超过其最大容纳飞机数,高铁站点同时入站的高铁班列不能超过其所能容纳的最多高铁班列数,同时启航的飞机数不能超过机场机务人员所能服务的最多数量,中转站需要操作的货物不能超过其装配的装卸载货物机械工具所能服务的总量;第三类为航空或高铁运营规章制度所定义的约束,如为了保障安全行驶,单位周期内飞机或高铁最多服务频次等。可以利用列生成算法求解上层规划。

下层为混合整数规划模型,在给定运力资源配置条件下,求解最优的货物调运方案。基本决策包括:最优运输路径一级疏散地选择,最优运输路径二级疏散地选择,最优运输路径各路段运输模式选择;最优运输路径各路段航班或高铁班列班次选择,最优运输路径各路段航班或高铁班列货物运载量;基本约束条件为:各级货物集散地的货物转运时间约束,用以保证货物中转时间大于货物装、卸载所需要的操作时间;不同机型飞机运载的货物重量约束;单列高铁车厢运载的货物重量约束;并将来自运输产品设计过程中的由运输产品功能要素组合转换而来的资源使用约束嵌入其中。可以根据不同的运输决策准则,设置不同的优化目标,如最小运输总延迟、最低运输碳排放、最低运输总成本等。可以利用改进的遗传算法求解下层模型。

基于构建的空高联运服务网络设计模型,探究交通枢纽类型(如客货混运交通枢纽、纯货运交通枢纽、纯客运交通枢纽等),航空货运飞机最大承载量,货物转运过程中的存储量限制、单位存储成本,转运过程中的作业执行效率等等影响因子对运输成本、运输延迟、运输过程中总碳排放量的影响。分析比较不同调度策略下(如最低运输成本、最小运输延迟、最低运输能源消耗)上层运力资源配置方案的不同。

货物运输产品的组织运营计划可以通过服务网络设计实现,通过产品功能要素信息处理框架将货物运输产品基本功能要素信息转换为运输资源使用约束条件,并将约束条件集嵌入到空高联运服务网络设计模型中,运用优化理论工具,生成最优服务运输网络,满足不同货物的运输需求,得到货物运输产品的最优组织运营计划,收获完整的货物运输产品设计。

3.3.3. 基于航空与高铁客运的货物调运优化模型与算法

面向自由货主，基于现有的客货混运基础设施，利用客运飞机闲置腹舱空间和客运高铁闲置车厢空间等运输货物，在优先满足客运运输、全货物运输的前提下，考虑人力、物力、不确定环境等多方限制，最大化多式联运运营管理者经济收益，构建航空和高铁客运的货物调运优化模型。模型形式为带随机约束混合整数多目标规划，设置两个优化目标：最大化货物运输总收益，最小化货物运输总延迟，基本决策包括：货物在客运航班的货物运载量、货物在客运高铁班列的货物运载量、是否对货物进行拆分运输、货物运输一级集疏散地选择，货物运输二级集疏散地选择等。基本约束条件为：客运飞机闲置空间运载货物重量约束，客运高铁车厢闲置空间运载货物重量约束，各级货物集疏散地的货物转运时间约束等。利用鲁棒优化、多目标优化等优化方法求解该模型，首先应用鲁棒优化方法将随机约束转换为确定性约束，再运用多目标优化方法将多目标优化问题转化为单目标优化问题，运用改进的遗传算法求解该模型，若模型涉及多周期决策，则利用基于滚动优化的启发式算法求解该模型。

恶劣的天气、混乱的机场环境、以及受成本制约可能存在的地面运输、机组人员、排班计划等资源不足状态，都可能导致飞机航班的延误、取消。考虑飞机航班延误情况，分析不同飞机延误概率对于货物运输总收益、货物运输总延迟以及货物调运决策的影响；在联运经营人持不同程度飞机延误时间感知度条件下，对比货物运输总收益、货物运输总延迟以及货物调运决策的不同。

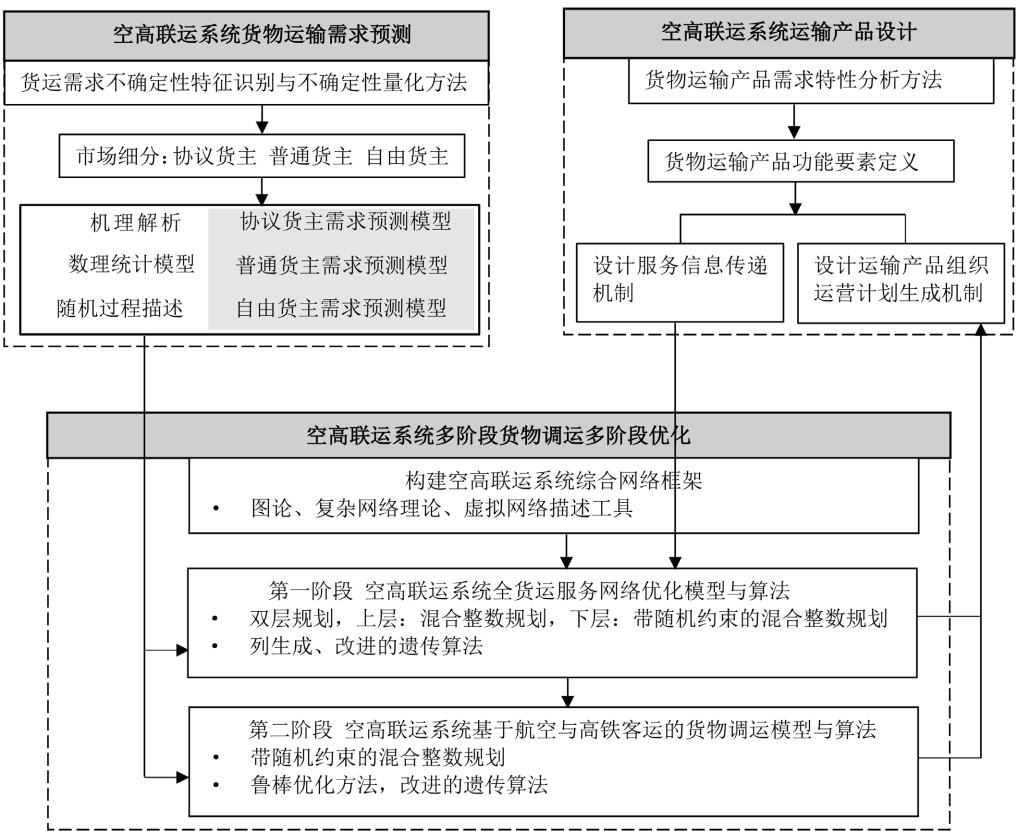


Figure 4. Air-to-highspeed-rail intermodal freight transportation transport product design scheme
图 4. 空高联运快捷货物运输产品设计方案

自由货主运输需求量具有不确定性，考虑空高联运经营人对超售风险的态度，分析联运经营人的不同风险承担能力对于货物运输总收益、货物运输调运决策的影响。

使用客运飞机闲置腹舱空间和客运高铁闲置车厢空间运载货物时, 运力资源的供给情况由当天搭乘乘客量以及乘客行李腹舱托运量决定。当日搭乘客运飞机的乘客多, 则办理行李腹舱托运的总量就大, 飞机腹舱闲置空间就小, 货物运输量就减少; 同样的, 当日搭乘高铁班列的乘客越多, 空闲车厢就减少, 货物运输空间就越小。如果同一批次的货物运输量较大, 而适时的飞机与高铁的闲置运输资源又不够, 则需要采取货物拆分操作。因此, 探索货物拆分对于货物运输总收益、货物运输总延迟以及货物调运决策的影响。

综上所述, 本文提出了基于多阶段优化的空高联运快捷货物运输产品设计方案, 分为三个模块(见图 4)。其中, 空高联运货物运输需求预测理论与方法模块、空高联运货物运输产品设计方法模块的输出结果为空高联运系统多阶段货物运输调度优化理论与方法模块的输入信息, 空高联运货物运输产品设计方法模块与空高联运系统多阶段货物运输调度优化理论与方法模块之间又存在相互作用与反馈的关系。

4. 结束语

本文提出了空高联运快捷货物运输产品设计方案, 将空高联运系统的货物运输需求预测、运输产品设计和货物调运进行一体化组织, 从全过程视角优化空高联运货物运输, 兼顾了货运市场需求方、货物运输承运人以及空高联运运营人的利益。方案中提出的运输产品设计与服务网络优化之间的交互作用机制, 拓展了运输产品设计的内涵; 提出的货物运输调运的多阶段优化理论与方法, 可以突破交通管理者、联运经营人和实际承运人之间的职责界限和收益壁垒, 实现多方共赢; 方案立足于当前国内客货混运的货物运输现状, 提出的协同管理客运与货运资源的理论与方法更适应未来客货分离、全货运专业运输的趋势。本研究可为国家交通运输部门及物流企业等相关行业单位的货物运输运营管理者提供决策参考和依据。

基金项目

国家自然科学基金项目(72301175)、国家自然科学基金项目(72274125)、国家自然科学基金项目(72471149)。

参考文献

- [1] Yang, Y. (2015) Development of the Regional Freight Transportation Demand Prediction Models Based on the Regression Analysis Methods. *Neurocomputing*, **158**, 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.01.069>
- [2] Zhu, J. (2015) Research on Logistics Demand Forecasting and Transportation Structure of Beijing Based on Grey Prediction Model. *Science Journal of Applied Mathematics and Statistics*, **3**, 144-152. <https://doi.org/10.11648/j.sjams.20150303.17>
- [3] Barua, L., Zou, B. and Zhou, Y. (2020) Machine Learning for International Freight Transportation Management: A Comprehensive Review. *Research in Transportation Business & Management*, **34**, Article ID: 100453. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100453>
- [4] 张明, 韩松臣, 黄林源. 基于双重力模型和人工神经网络的空中交通流量组合预测[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(5): 764-770.
- [5] 李智, 白军成. 基于分解集成的航空货运需求区间预测研究[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(9): 2773-2778, 2784.
- [6] 曹允春, 龚曼丽. 专业货运机场航空物流需求预测研究[J]. 综合运输, 2023, 45(10): 156-162.
- [7] 张义军, 贾进, 王广莹, 等. 基于 GA-SVM 模型的三峡过闸货运需求预测[J]. 综合运输, 2023, 45(10): 149-155.
- [8] 乔婧. 综合交通运输网络背景下规划航道货运需求预测——以湘桂运河为例[J]. 物流科技, 2023, 46(15): 86-88.
- [9] 陶樵, 罗荣武, 高辉, 等. 铁路冷藏运输发展对策分析[J]. 铁道货运, 2019, 37(6): 41-45.
- [10] 崔艳萍, 王瑞斌. 铁路煤炭货运产品设计的探讨[J]. 铁道货运, 2014(12): 13-17.
- [11] 刘迪. 集装箱海铁联运箱位分配与动态定价决策优化[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2016.

- [12] Wang, H., Wang, X. and Zhang, X. (2017) Dynamic Resource Allocation for Intermodal Freight Transportation with Network Effects: Approximations and Algorithms. *Transportation Research Part B: Methodological*, **99**, 83-112. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.007>
- [13] Woxenius, J. (2012) Directness as a Key Performance Indicator for Freight Transport Chains. *Research in Transportation Economics*, **36**, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.03.007>
- [14] Zhong, Y. and Zhang, Q. (2000) Strengthening Marketing Operation and Enlarging the Quotient of Freight Express Transportation Market for Railway. *Traffic and Transportation Studies* (2000), Beijing, China, 31 July-2 August 2000, 332-335. [https://doi.org/10.1061/40503\(277\)52](https://doi.org/10.1061/40503(277)52)
- [15] Li, J., Shen, y., Li, y. and Hu, s. (2000) Express Freight Transportation of Railway in China. *Traffic and Transportation Studies* (2000), Beijing, China, 31 July-2 August 2000, 743-747. [https://doi.org/10.1061/40503\(277\)122](https://doi.org/10.1061/40503(277)122)
- [16] Yang, H. and Xia, S. (2000) Reality and Prospects of the Developing Railway-Based Express Freight Transport in China. *Traffic and Transportation Studies* (2000), Beijing, China, 31 July-2 August 2000, 265-270. [https://doi.org/10.1061/40503\(277\)114](https://doi.org/10.1061/40503(277)114)
- [17] 王嘉. 我国铁路货运改革战略定位研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [18] 孙杨. 铁路货运拓展物流增值服务的发展模式研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [19] 陈健. 珠三角地区铁路货运现状分析与营销对策探讨[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [20] 李珊, 钟雁, 李冠成. 关于快速货物运输产品策略的探讨[J]. 铁道货运, 1998(5): 5-7.
- [21] 黄鑫. 适应社会多层次运输需求打造铁路货运系列产品[J]. 铁道货运, 2004(4): 17-19.
- [22] 唐晓龙. 客货分线条件下铁路快捷货运产品体系研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [23] 付强. 铁路快捷货物运输系统分析及其列车开行方案研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [24] 张静. 我国铁路快捷货运班列开行方案研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [25] 侯倩. 整体路网条件下的铁路货运产品开发[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [26] 兰劲棕. 我国铁路快捷货物运输组织相关问题研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [27] 董惜凌. 高速铁路快捷货物运输组织相关问题研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [28] 郭玉华. 中国铁路货运营销理论与发展[M]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [29] Crainic, T.G. and Rousseau, J. (1986) Multicommodity, Multimode Freight Transportation: A General Modeling and Algorithmic Framework for the Service Network Design Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, **20**, 225-242. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(86\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0191-2615(86)90019-6)
- [30] Kim, D. (1997) Large Scale Transportation Service Network Design: Models, Algorithms and Applications. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [31] Zhu, E., Crainic, T.G. and Gendreau, M. (2014) Scheduled Service Network Design for Freight Rail Transportation. *Operations Research*, **62**, 383-400. <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1254>
- [32] Wieberneit, N. (2007) Service Network Design for Freight Transportation: A Review. *OR Spectrum*, **30**, 77-112. <https://doi.org/10.1007/s00291-007-0079-2>
- [33] 董晓岩, 刘军, 王莹. 货物运输服务网络设计问题的研究现状与展望[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2008, 7(3): 59-64.
- [34] Laaziz, E.H. and Sbihi, N. (2019) A Service Network Design Model for an Intermodal Rail-Road Freight Forwarder. *International Journal of Logistics Systems and Management*, **32**, 465-482. <https://doi.org/10.1504/ijlsm.2019.098328>
- [35] 钟校, 张玉召, 任斌. 考虑碳排放的快捷货运方式选择模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 250-256.
- [36] 李海鹰, 曹玥, 廖正文, 等. 基于服务网络的综合快运方案优化[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 136-145.
- [37] Alumur, S.A., Yaman, H. and Kara, B.Y. (2012) Hierarchical Multimodal Hub Location Problem with Time-Definite Deliveries. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **48**, 1107-1120. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.04.001>
- [38] Meraklı, M. and Yaman, H. (2016) Robust Intermodal Hub Location under Polyhedral Demand Uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, **86**, 66-85. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.010>
- [39] Crainic, T.G. (2000) Service Network Design in Freight Transportation. *European Journal of Operational Research*, **122**, 272-288. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(99\)00233-7](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(99)00233-7)
- [40] Hewitt, M., Crainic, T.G., Nowak, M. and Rei, W. (2019) Scheduled Service Network Design with Resource Acquisition and Management under Uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, **128**, 324-343. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.08.008>

-
- [41] 王保华, 何世伟, 宋瑞, 等. 快捷货运动态服务网络设计优化模型及其算法[J]. 铁道学报, 2009, 31(5): 17-22.
- [42] Crainic, T.G., Hewitt, M., Toulouse, M. and Vu, D.M. (2018) Scheduled Service Network Design with Resource Acquisition and Management. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 7, 277-309.
<https://doi.org/10.1007/s13676-017-0103-x>