文章编号：1003-1421(2026)07-0001-13
引用格式：张心仪，陶思宇，彭其渊，等.综合客运枢纽多模式交通时刻表优化研究综述[J].铁道运输与经济，2026，48(7)：1-13.
ZHANG Xinyi，TAO Siyu，PENG Qiyuan，et al. Literature Review on Timetable Optimization for Multi-Modal Transportation in Integrated Passenger Transport Hubs[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(7)：1-13.

综合客运枢纽多模式交通时刻表优化研究综述

张心仪[1,2,3]，陶思宇[1,2,3]，彭其渊[1,2,3]，张永祥[1,2,3]，冯 涛[1,2,3]，罗 雪[4]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都 611756；2.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程研究中心，四川 成都 611756；3.西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都 611756；4.中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司，重庆 401120)

摘 要：随着干线铁路、城际铁路与城市轨道交通“四网融合”进程的推进，以轨道交通为主导的多模式交通时刻表优化逐渐成为研究核心。系统梳理该领域研究，将其划分为2类范式：以干线铁路等主导交通方式为基准、衔接方式被动调整的“协调”范式，以及多模式交通时刻表同时作为变量联合寻优的“协同”范式。针对当前研究在应对随机干扰时鲁棒性不足、微观换乘负效用量化缺失及跨主体博弈机制空白等问题，提出未来应聚焦数字孪生驱动的闭环调控、融合行为科学的广义效用评价及基于合作博弈的利益分配机制，推动研究从静态理想化模型向高韧性动态治理转型。

关键词：综合客运枢纽；时刻表优化；协调优化；协同优化；研究综述
中图分类号：U292.4；U115 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251121003

Literature Review on Timetable Optimization for Multi-Modal Transportation in Integrated Passenger Transport Hubs

ZHANG Xinyi[1,2,3]，TAO Siyu[1,2,3]，PENG Qiyuan[1,2,3]，ZHANG Yongxiang[1,2,3]，FENG Tao[1,2,3]，LUO Xue[4]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Transportation Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 4. Chongqing Survey and Design Research Institute Co., Ltd., China Railway Eryuan Engineering Group, Chongqing 401120, China)

Abstract: With the advancement of the “four-network integration” strategy involving trunk railways, intercity railways, and urban rail transit, timetable optimization for multi-modal transportation, predominantly led by rail transit, has emerged as a core research focus. This paper systematically reviewed the research in this field and classified it into two paradigms: the “coordination” paradigm, which uses dominant transport modes such as trunk railways as benchmarks and passively adjusts feeder modes, and the “synergy” paradigm, which treats timetables of multi-modal transportation as simultaneous variables for joint optimization. To address current problems such as insufficient robustness against stochastic disturbances, the lack of quantification for micro-level transfer negative utility, and the absence of cross-agent game mechanisms, it is proposed that future research should focus on digital twin-driven closed-loop control, generalized utility evaluation integrating behavioral

收稿日期：2025-11-21
通信作者：陶思宇(1980—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，西南交通大学交通运输与物流学院副教授。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502)；广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA21077011-2)

science, and benefit distribution mechanisms based on cooperative game theory, to promote the transition of research from static idealized models to high-resilience dynamic governance.
Keywords: Integrated Passenger Transport Hub; Timetable Optimization; Coordination Optimization; Synergy Optimization; Literature Review

0　引言

综合客运枢纽不仅是国家综合立体交通网的关键物理载体，更是实现区域协调发展与各类交通方式无缝衔接的战略中枢。随着《交通强国建设纲要》与《国家综合立体交通网规划纲要》的深入实施，推动干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通“四网融合”，构建“全国123出行交通圈”，已成为我国交通运输高质量发展的核心任务。在此背景下，综合客运枢纽作为异构交通网络交汇的节点，其运行效率直接决定了旅客全链条出行的通达性与服务品质。

然而，在枢纽硬件设施日益完善的同时，运输组织层面的“软联通”仍面临严峻挑战。由于干线铁路、民航、城市轨道交通及地面公交等系统往往隶属于不同的运营主体，时刻表编制遵循各自独立的利益诉求与技术规范，导致不同方式间缺乏有效的运营联动。特别是在面对高速铁路与航空带来的“脉冲式”高密度集聚客流时，这种缺乏互动的独立调度模式易引发系统性失效：一方面，列车晚点时接驳车辆往往因受限于既定时刻表而“空车空跑”；另一方面，客流高峰到达时又因运力响应滞后而造成站台旅客大规模积压。因此，强化跨系统统筹，通过时刻表的优化实现多模式交通在时空资源上的精准“协调”与系统“协同”，成为提升枢纽整体效能、满足旅客“零距离换乘”需求的必然选择。研究旨在系统梳理该领域的理论演进与技术现状，为构建高效、韧性的现代综合客运枢纽运营体系提供理论参考。

1　综合客运枢纽多模式交通时刻表优化概述

1.1　概念与内涵

综合客运枢纽多模式交通时刻表优化是指以客运枢纽为节点，将某种或多种交通方式的发车时刻、停站时间等时刻表要素作为决策变量，构建数学或仿真模型，在满足各子系统安全运营约束与枢纽物理容量限制下，求解系统最优的运行方案的过程。目前该领域的时刻表优化研究可以分为“协调”与“协同”2种不同的优化范式。

协调优化是一种基于分层递阶逻辑的序贯优化模式。其核心在于根据交通方式在路网中的层级关系，确立“主导交通方式”与“衔接交通方式”。其中，“主导交通方式”通常指在综合交通网络中承担骨干运输职能、运量大、运距长且时刻表受宏观路网刚性约束的交通方式(如干线铁路、民航)；“衔接交通方式”则是指在枢纽内主要承担集疏运功能、运距短、发车频率高且调度相对灵活的交通方式(如城市轨道交通、地面公交)。该范式将主导方式的时刻表视为硬约束，通过单向调整衔接方式的时空配置以实现局部匹配。

协同优化是一种基于整体耦合逻辑的联合优化模式。该范式打破了单一方式主导的层级壁垒，将枢纽内2种及以上的交通方式时刻表同时作为决策变量。通过构建多层耦合网络模型，在全局视角下同步调整各方式的时刻表资源，以寻求系统总成本最低或联运效率最高的帕累托最优解。协同优化的本质是多自由度的联合寻优，旨在挖掘不同交通方式间潜在的时间互补性与资源共享效益。两者的核心区别在于决策变量的耦合程度与优化的作用方向。协调、协同概念对比如图1所示。

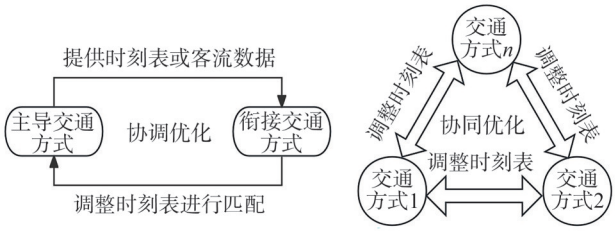

图1　协调、协同概念对比

Fig.1　Comparison of coordination and synergy concepts

1.2　研究历程

综合客运枢纽内多模式交通的时刻表优化研究，旨在提升系统效率与乘客体验，其发展轨迹清晰地展现了从聚焦单向适应的“协调”优化，逐步演进至更深层次系统整合的“协同”优化的历程。

在早期探索阶段(2009—2014年)，研究主要聚焦于解决枢纽内部最基本的衔接问题。学者致力于以一种主导交通方式(如铁路)的时刻表或输出客流为基准，对衔接交通方式(如公交、地铁)的时刻表进行“被动”调整。此阶段的核心议题是枢纽内部的协调调度与换乘便利化[1]，研究多以最小化乘客总换乘时间或等待时间为单一优化目标[2-3]。在模型构建上，这一阶段的研究多采用数学规划方法，例如建立非线性规划模型或应用复合模型方法(含线性规划、排队论等)来求解。

在快速发展与多元演进阶段(2015—2019年)，研究场景得到了极大丰富，从常规运营扩展到了末班车衔接[4-5]等特殊场景，旨在发挥客运服务的末端保障功能。同时，优化目标也从单一的“时间最短”演变为多目标优化，学者开始系统性地平衡“乘客服务水平”(如最大化换乘成功率、最小化流失乘客数)与“企业运营成本”(如最小化车辆数)[6]。随着模型复杂度的提升，求解算法也相应革新，以遗传算法(Genetic Algorithm，GA)及其变种(如NSGA-Ⅱ)为代表的元启发式算法，因其高效性而成为该阶段解决此类NP-hard问题的主流工具。

在深度整合与智能化发展的新阶段(2020年至今)，研究范式开始实现从“协调”向“协同”的跃迁。学者认识到单向被动调整的局限性，转而探索将多个交通方式的时刻表同时作为决策变量进行联合优化。在空铁联运领域，Ke等[7]开创性地构建了航班与高铁时刻表的联合优化模型，并在此基础上于2024年进一步提出了集“列车流、航班流、接驳班车流、旅客流”于一体的多流协同调度模型[8]，标志着研究进入了跨系统深度整合的新高度。在范式革新的同时，人工智能、仿真等新技术也开始与优化模型深度融合。为应对客流的强动态性与不确定性，研究者将深度学习预测模型嵌入优化循环[9]，引入多智能体强化学习以实现动态决策[10]，或利用蒙特卡洛仿真与排队网络来预测实时客流[11]。同时，为处理不确定性，应用更先进的鲁棒优化方法[12]。在向“协同”范式迈进的同时，“协调”模式自身的研究也在持续深化。具体表现为，研究场景进一步拓展至节假日夜间运营[13]、枢纽过饱和[14]以及航班延误[15]等复杂情境，并发展出更为精细的优化模型。

2　国内外综合客运枢纽多模式交通时刻表优化研究现状

2.1　协调优化

在综合客运枢纽多模式交通时刻表优化研究中，一个重要的分支是基于某一种交通方式的时刻表或因此产生的输出客流，对其他交通方式的时刻表进行优化调整。此类研究共享同一核心协调策略，即以主导交通方式的运营节奏为基准，单向地优化衔接交通方式。

2.1.1　研究对象

协调优化的研究对象主要集中于枢纽内外的“两两”衔接关系，根据主导交通方式和衔接交通方式的不同，呈现出显著的多样性。

研究最为集中的是轨道交通的内部衔接，特别是铁路-地铁的协调。此类研究是双交通系统集成调度领域的核心议题，旨在通过调整地铁时刻表来高效接运和疏散集中到达的铁路客流。多项研究通过调整地铁时刻表来提升枢纽的整体运输效率与服务质量[16-19]。研究场景不仅涵盖常规运营，也深入到了特殊情境，例如Li等[13]针对节假日夜间运营进行了优化；Long等[5]探讨了末班车服务保障功能；马晓天等[14]则重点研究了铁路客流脉冲特性导致的枢纽站过饱和问题；Du等[12]探讨了铁路到站时间波动下的不确定性协调。此外，孙峣等[10]应用多智能体强化学习方法，将地铁列车视为智能体进行动态协调。

其次是轨道-公交的协调。该研究聚焦于通过公交时刻表编制与车辆调度的集成，为轨道客流(特别是高铁客流)构建一个高效、可靠、经济且服务优质的转运系统。相关研究对常规运营下的公交衔接进行了深入探讨[20-23]。近年来，随着需求响应式交通的发展，研究对象逐渐从固定线路扩展至灵活接驳模式，Wang等[24]与张进等[25]针对可变线路公交与地铁的协同调度问题，构建了路径与时刻表同步优化的模型，解决了固定站点与灵活需求点的时间衔接难题。此外，考虑到枢纽集疏运体系中的多方式博弈，程毅等[26]引入了竞争机制，量化分析了出租车、私家车等竞争方式对高铁接运公交时刻

表优化的影响。研究场景同样扩展到了特殊时段与突发事件，Dou 等[4]通过调整公交时刻表以降低末班车换乘失败率；Chen 等[27]则构建了铁路中断情况下公交应急疏散的模型；Almasi 等[28-29]对包含接驳公交与铁路的系统进行了优化。

此外，空铁联运及其他场景也是研究热点。学者探索了多种组合。在固定航班时刻表下，多项研究探讨了如何优化高铁时刻表以强化衔接，叶彬彬等[15]构建了平衡换乘人数与运行图调整成本的优化模型，并定量考虑了航班延误概率对换乘可靠性的影响；可钰等[30]以最大化可达 OD 数量为目标，通过时刻表微调显著提升了联运网络的通达性，并兼顾了对既有运行图扰动的最小化；Tan 等[9]结合深度学习预测客流，旨在实现联运旅客吞吐量最大化与列车时刻偏差最小化；Jiang 等[31]聚焦于需求驱动的时刻表设计；而 Ke 等[32]则精细区分了“同步次数”和“同步航班覆盖”目标；梅正男等[33]研究在固定高铁时刻表下调整航班时刻表。另一些研究关注如何调整城市轨道交通或地铁运营以服务于空铁联运及枢纽换乘客流，如 Wang 等[11]利用仿真预测枢纽实时客流来协同优化地铁时刻表与路径；何文晖等[34]构建了包含乘客路径选择的模型。更广义的研究则突破了单一运输方式的限制，李兴华[35]的研究涵盖了枢纽内部铁路、公路客运、公交及出租车等多种交通网络的调度问题。

2.1.2　模型构建

（1）模型输入。客流需求的获取与表征是模型构建的先决条件。围绕如何处理客流信息，学术界提出 3 种主要的技术路径，这些路径的选择深刻影响着模型的适用性与求解难度。

第 1 种路径是基于历史数据的确定性输入。该方法将客流视为确定的、已知的外部参数，其数据来源多样。在城市轨道交通衔接研究中，最常用的数据源是自动售检票系统记录的动态客流[14, 19]；此外，也有研究通过现场实地调研[35]，或采用 Wi-Fi 探针等新技术来识别和统计换乘客流[19]。在空铁联运背景下，客流需求常基于给定的高铁到站客流[6]、航班旅客量[5, 33]，或通过分析历史航班延误数据来估算[15]。这种处理方式的优势在于模型结构相对简单，计算可解性强，适用于客流规律稳定的常规运营场景分析。然而，确定性假设忽略了需求的随机波动和运营中的不确定性，可能导致方案在实际应用中缺乏足够的鲁棒性。

第 2 种路径是通过仿真或预测手段生成客流。当历史数据难以获取或研究重点在于客流的动态演变过程时，该方法能够有效地模拟需求的随机性和时变性。一种常见的做法是构建客流过程推演模型，即从上游主导交通方式的到达客流出发，模拟旅客在枢纽内部设施(如通道、闸机、安检)的移动和排队过程，从而推导出下游衔接交通方式站台上的动态客流分布[16, 18]。为提升真实性，部分模型将旅客走行时间建模为服从特定概率分布的动态变量[21]。为了系统性地应对现实运营中的不确定性(如主导交通方式的延误、客流突增)，研究者发展了一系列不确定性建模方法。这包括利用概率模型，例如，通过蒙特卡洛仿真和排队网络系统预测实时客流分布。在此基础上，学者引入了不同的优化范式来寻求鲁棒解：一是随机规划，通常基于历史数据拟合概率分布(如考虑航班延误概率[15])，通过构建多情景集来优化期望性能；二是鲁棒优化，如 Du 等[12]采用的基于后悔值理论的方法，旨在优化最坏情况下的性能；三是机会约束规划，确保系统性能以高概率满足特定标准。更前沿的研究则将人工智能技术深度嵌入，例如在优化算法的迭代环中调用深度学习模型[9]，以实时预测不同时刻表下的联运客流量，或采用强化学习实现动态调整[10, 36]。这些方法显著提升了模型对现实复杂性的反映，是实现从静态规划向动态调控演进的关键。

第 3 种路径是采用服务质量的代理指标来间接表征需求。此类研究不直接输入具体的客流量数值，而是将“需求”抽象为取决于时刻表或客运枢纽服务能力的服务质量或网络性能指标。模型的目标不再是服务一个已知的客流量，而是最大化时刻表所能创造的服务潜力。在空铁联运研究中，这一思想体现得尤为突出，其优化目标常被设定为最大化空铁联运可达的 OD 数量[30]、最大化 OD 服务频率[34]或最大化有效的“同步(接续)次数”[15, 32]。这种方法将优化的重点从“满足既定客流”转向了“最大化潜在服务能力”。该视角为战略层面的网络规划与服务设计提供了独特的支撑，其核心是构建

一个内在连接性更强、服务覆盖面更广的运输网络。这种方法的兴起，标志着优化视角从“被动满足既定客流”向“主动创造最大服务能力”的转变。

（2）优化目标。目标函数的构建反映了旅客服务水平与运营商资源投入之间博弈关系。现有研究通常通过构建多目标加权函数或寻找帕累托前沿来量化这种权衡。

在优化目标的设定上，部分研究聚焦于单一维度的优化。最普遍的目标是最小化乘客的时间成本，具体表现为最小化总换乘时间、候车时间[16-19]、总停留时间[18]或总出行延误时间[27]等。然而，值得注意的是，这些研究大多将旅客视为同质群体，采用平均时间成本作为衡量指标，往往忽略了旅客在时间价值、风险偏好(如对可靠性的需求)以及舒适度(如拥挤厌恶)等方面的异质性。这种简化的处理方式限制了模型对真实旅客体验的反映。

然而，枢纽优化本质上是多目标的权衡过程，因此更多研究构建了多目标优化模型或采用加权求和的形式，以寻求“乘客体验”与“企业运营”间的帕累托最优。此类模型的核心是在乘客时间成本、服务可达性与换乘成功率以及企业运营效益与资源3个维度间进行权衡。其中，服务可达性与换乘成功率目标旨在提升服务的质量、覆盖范围与可靠性，例如最大化换乘成功数量[4-5]、目的地可达性[13]、空铁接续次数[15]、高铁–航空客流量[9]，以及最小化流失乘客数量[6]、滞留旅客数量[14]或换乘失败次数[22]。企业运营效益与资源目标着眼于提升运营方的效益与效率，包括最小化运营成本[11, 22]、使用车辆数[6, 20]或最小化对时刻表的调整幅度[9, 30, 34]。

常见的组合方式包括：将不同维度的成本加权为单一指标，如最小化乘客换乘等待时间成本与企业运营成本之和[21]，或最小化包含用户、运营及社会成本在内的总系统成本或总费用[28, 25, 35]；其次是平衡乘客时间成本与企业效益，如寻求最小化乘客换乘总时间与最小化使用公交车辆总数之间的平衡[20]，或同时最小化乘客等待时间与运营成本[11]；再次是平衡乘客时间成本与服务可达性，例如以最小化滞留旅客总数和最小化旅客换乘总等待时间为双目标[14]，或旨在最小化乘客等待时间并最大化空铁联运乘客数[33]，亦有模型综合权衡了可达性、可用性与等待时间等多项服务水平指标[13, 32]；最为常见的组合是平衡服务可达性与企业效益，例如权衡最小化流失乘客数与使用的公交车辆数[6]，寻求最大化成功到达目的地的乘客数量与最小化末班车总运营结束时间[5]，或平衡可达OD数量与时刻表调整量[30]。此外，亦有研究专门针对服务质量展开多维度平衡[12]，或构建包含全部3类目标的综合模型[22]。目前研究主要使用的模型输入与优化目标如图2所示。

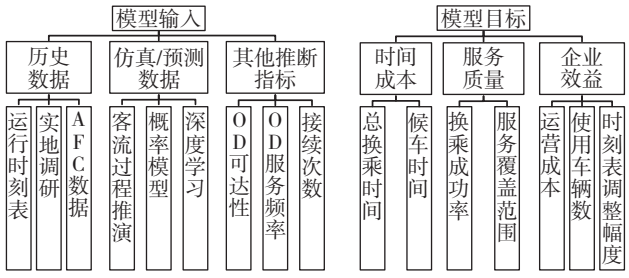

图2　模型输入及优化目标

Fig.2　Model inputs and optimization objectives

（3）约束条件。在约束条件的设定上，模型构建需严格遵守各交通子系统的内部技术规范、枢纽的物理限制以及跨模式换乘的衔接要求，这是确保时刻表在技术上安全可行、在运营上高效实用的核心保障。

第1类是交通系统内部的运营与技术约束，此类约束旨在维护各子系统自身的运营安全和效率。最核心的是安全间隔约束，这是防止车辆追尾或运行冲突的硬性规定，具体体现为轨道交通的最小安全追踪间隔(车头时距)、最小发车间隔乃至车站出发–到达间隔[14]，以及机场的尾流间隔约束[34]。其次是基础的运行时序约束，这些约束源于物理性能和运营规范，包括车辆的停站时间和区间运行时间均须在规定的最小和最大值之间。针对特定场景，还需纳入更精细的运营逻辑，例如为维持既定服务顺序而设定的列车无越行约束[9, 15]、为保障线路维护而设定的天窗维修时段[15]以及保障末班车服务的运营结束时间[5, 12-13]等。

第2类是资源与容量约束，用于界定系统服务能力的物理上限。最常见的是运载工具的容量限

制，即列车或公交的实际载客量不能超过其额定容量，这对于疏解高铁、航空带来的脉冲式大客流尤为关键，是防止旅客大规模滞留的基础。其次是枢纽设施的容量限制，这些约束反映了枢纽的物理瓶颈，如基于安全疏散标准设定的站台安全容量[11, 18]、防止枢纽内部拥堵的公交泊位容量[4, 22]、机场小时容量[34]乃至安检能力[18]。此外，模型还必须考虑运营商的资源限制，尤其是最大可用公交车辆总数或列车数，以及确保车辆得以执行既定任务的周转和连续性约束，在高密度客流场景下，Zhang等[37]引入了非凸非线性规划模型，量化分析了时变需求下拥挤条件与列车容量约束的非线性关系，为防止方案在过饱和状态下失效提供了理论支撑。

第3类是衔接与换乘逻辑约束，这是实现“无缝衔接”的核心，体现了模式间的匹配关系。最关键的是换乘时间窗口约束，即旅客的换乘时间必须在最小可行时间(由步行、寻路、安检等时间决定)和最大容忍时间(旅客愿意等待的上限)之间，这在空铁联运和轨道–公交接驳中均是核心约束。为保证服务质量，模型还常引入乘客最大等待时间[6, 27]作为服务底线，或引入满载率限制[6, 17, 28–29]以平衡运力效率与乘客舒适度。同时，为确保客流分配的合理性，模型需包含乘客流量守恒[27](确保所有乘客均被妥善安排服务)、需求满足[28–29]以及用于判断衔接是否成功的逻辑判断约束[4–5, 12, 14, 22]。

此外，针对时刻表重排或协同优化的研究，还引入了第4类约束，即对决策变量的调整范围限制。这类约束是实现“协同”与“稳定”相平衡的关键。允许列车或航班的时刻在其原始时刻表的特定时间窗内浮动[30, 32, 34]，或限制对首站发车时间、运行时间的调整幅度[4, 22]。引入此类约束的目的，是在寻求系统协同增益的同时，控制对既有时刻表的扰动，确保方案的鲁棒性和可实施性，以此在系统协同收益与对原始时刻表的影响之间取得平衡。目前研究主要使用的模型约束条件如图3所示。

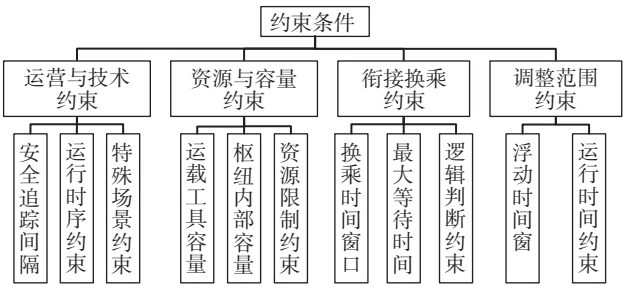

图3　模型约束条件

Fig.3　Model constraints

2.1.3　求解算法

协调优化问题通常涉及动态客流、能力约束和复杂的换乘关系，常被构建为(混合整数)非线性规划或大规模的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming，MILP)。鉴于问题的NP-hard特性及大规模求解需求，研究者采用的求解策略呈现出明显的层次性：对于结构清晰、规模适中的问题，精确算法仍是首选；而对于大规模组合优化问题，元启发式算法因其高效性而占据主导地位；面对高度动态和不确定的环境时，融合仿真与人工智能的方法则成为新的趋势。

元启发式算法因其高效性、灵活性以及处理非线性、非凸问题的能力，在枢纽协同优化领域获得了广泛应用。GA及其变种(如NSGA-II)是该领域应用最核心的元启发式方法，被广泛用于求解地铁时刻表、公交衔接时刻或定制公交线路停靠点顺序。有研究使用NSGA-II来平衡乘客时间(或流失乘客)与运营成本(车辆数)2个目标[6, 20]。蔡肇萍[17]采用了能动态调整交叉和变异概率的非线性自适应遗传算法。GA也常与其他方法混合使用，窦雪萍[22]将GA与枚举过程结合；何文晖等[34]提出了混合粒子群–遗传算法；Tan等[9]则构建了“GA+MIP+DeepFM”的复杂框架。

除遗传算法外，其他元启发式算法也得到了应用。模拟退火算法(Simulated Annealing，SA)同样被用于求解此类问题，马晓天等[14]使用了改进的SA算法；叶彬彬等[15]使用标准SA通过序贯优化策略求解双目标混合整数规划。基于邻域搜索的算法亦展现了其有效性；Wang等[11]针对地铁灵活调度问题设计了定制的变邻域搜索算法；Chen等[27]则设计了禁忌搜索算法(Tabu Search，TS)求解应急接驳的大规模MILP模型。此外，Jiang等[31]为求解其构建的整数非线性规划模型，开发了一种多模态游牧算法；Almasi等[28–29]也应用了粒子群优化和水循环算法等。

当问题能够被精确构建为数学规划模型时，精确算法及商业求解器提供了获取最优解的途径，被用于直接求解构建的MILP/整数规划模型[11, 35]，其优势在于解的最优性保证。但对于大规模NP-hard问题，其计算时间可能过长，限制了其在复杂枢纽或实时调度场景中的应用。求解器不仅用于独立求解，亦可嵌入启发式框架中作为子问题工具。例如，郭小乐等[6]在NSGA-II算法的适应度评价步骤中，调用CPLEX求解线性规划子问题以计算流失乘客数和所需车辆数。处理多目标MILP模型时，需先将其转化为单目标问题，常用策略包括ε-约束法，以及叶彬彬等[15]使用的分层/序贯优化策略。

仿真/预测的混合框架是处理动态和不确定性客流的重要趋势。除了已经提到过的将仿真或预测结果作为优化模型的输入参数，另一种更紧密的结合方式是将预测模型嵌入优化算法的迭代循环中，Tan等[9]在GA的适应度评估中调用DeepFM模型预测联运客流量；何文晖等[34]则将基于Logit模型的乘客路径选择嵌入到混合GA优化中。

其他算法也在少数研究中得到了应用，学者构建了特定的鲁棒决策框架、辅助算法或人工智能方法。为处理不确定性，Du等[12]采用“改进的基于概率场景集的后悔值理论”来选择鲁棒方案。为辅助生成初始解或进行分析；Chen等[27]在TS算法中使用了LP松弛取整和暴力搜索法；李兴华[35]利用fminbnd函数求解单变量非线性模型，并运用排队论$M/M/n$模型分析出租车服务能力。Almasi等[28-29]使用解析方法确定最优发车频率。随着人工智能技术的发展，多智能体强化学习(Multi-Agent Reinforcement Learning，MARL)也开始被应用，与传统的基于模型的优化方法不同，MARL更适用于解决模型难以精确构建或环境高度动态的实时决策问题。例如，孙峣等[10]将地铁列车建模为智能体，采用基于Actor-Critic框架的MARL方法，该研究将地铁列车建模为智能体，通过动态调整地铁时刻表(动作)来响应实时客流(环境状态)。MARL方法能够实现对不确定性的自适应调整，展现了从被动响应向主动智能调控演进的巨大潜力。综合客运枢纽时刻表优化主要求解算法对比如表1所示。

2.2　协同优化

相较于前述以单一交通方式时刻表调整为主的“协调”优化模式，多模式交通“协同”优化代表了更为深入和系统的整合思路。此类研究不再将某一交通方式的时刻表视为基准，而是将多个(至少2个)主要交通方式的时刻表同时视为决策变量，进行联合优化，旨在寻求整个多模式交通联运系统的全局或局部最优。这种跨系统、同步优化的方法能够更充分地挖掘不同模式间的协同潜力。协同优化范式由于其极高的模型复杂度和对多主体数据共享的严苛要求，目前在学术界仍处于探索的起步阶段，代表性研究成果尚不多见。

空铁联运系统的协同时刻表规划是协同优化的一个重要前沿领域。此类研究的核心在于打破传统上铁路与航空时刻表独立编制的模式。在此领域，Ke等[7]构建了一个以最大化加权可达OD对数量和最小化时刻表调整量为目标的双目标整数规划模型。该模型首次将航班时刻表与列车时刻表均作为决策变量进行联合优化，通过允许在预设时间窗内调整各自的到发时刻，模型能够主动创造更多有效的联运衔接机会，从而提升整个空铁联运网络的服务覆盖范围。

随后，Ke等[8]进一步深化和扩展了空铁协同优化的框架，提出了一个更为精细和综合的多流协同调度模型。这项研究不仅同时优化列车和航班时刻表，还将接驳班车(Shuttle Bus)的时刻表以及旅客自身的路径选择纳入统一模型中。通过构建基于时空

表1　综合客运枢纽时刻表优化主要求解算法对比

Tab.1　Comparison of main solution algorithms for timetable optimization in integrated passenger transport hubs

类别	代表算法	优势	局限性	典型应用场景
精确算法	分支定界法、混合整数规划	必得理论最佳解、理论基础扎实	耗时随规模激增、难解大规模网络	小规模枢纽协调、静态时刻表编制、子问题求解
元启发式算法	遗传算法、模拟退火、禁忌搜索	全局搜索能力强、不依赖问题凸性、较快获得满意解	易陷入局部极值、结果依赖调参经验	大规模非线性规划、多目标权衡优化、复杂网络协同
混合/智能算法	强化学习、蒙特卡洛仿真	应对高随机环境、在线决策速度快	数据需求大，收敛慢、决策逻辑缺乏可解释性	实时动态调度、脉冲客流响应、应急疏散

网络的多商品流模型，该研究实现了“列车流”“航班流”“接驳班车流”和“旅客流”的同步优化。此模型不仅考虑了不同枢纽的差异化换乘情境(步行快速换乘或乘坐接驳班车)，还以最小化联运旅客的总出行成本(包含在途、步行、等待、接驳及偏离期望出发时间的成本)为目标，从而在保障可达性的基础上，进一步提升了旅客的出行体验。值得注意的是，此类多模式交通时刻表协同优化问题通常具有高维度、非凸、强耦合的NP-hard特性，传统的集中式求解方法难以胜任。因此，该研究引入了基于增广拉格朗日松弛和乘子交替方向法的分解算法。这类分解算法(包括Benders分解、拉格朗日松弛、交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers，ADMM)等的核心思想是将原大规模复杂问题分解为若干个更易于处理的子问题(如分别优化列车时刻表、航班时刻表和客流分配)，通过迭代协调求解，是当前解决跨系统协同优化问题最有前景的技术路径之一。

综合枢纽内部多模式公共交通的协同调度则关注于枢纽内部多种衔接方式(如地铁、轻轨、常规公交)之间的时刻表协同。与前述协调优化中以铁路或航空为主导不同，此类研究着眼于枢纽内部各接驳方式间的相互作用。这些研究[2-3]针对包含多种公铁方式的综合枢纽，建立了以最小化枢纽内部乘客总费用(包含等候费用和换乘费用)为目标的协同调度模型。其关键在于将地铁、轻轨和常规公交的发车间隔同时作为决策变量进行优化，通过求解该非线性规划模型(采用遗传算法)，可以得到一组最优的发车间隔组合，使得枢纽内部不同公共交通方式的运力供给与客流需求在时间上达到最佳匹配，从而最大限度地减少乘客在枢纽内的总体时间耗费。模型同时考虑了各方式的车辆配置能力和运能匹配作为约束条件[38]。

针对常规运营时段的系统级同步问题，Huang等[39]构建了包含地铁线和公交线的双层超网络，并提出了一种两阶段协同优化框架。该研究首先通过用户均衡模型获取网络中的客流分布，随后建立MILP模型，以最大化全网同步率和断面服务水平为双重目标，对地铁和公交的时刻表进行同步优化。该研究设计了分阶段算法：第一阶段采用容量限制迭代算法进行客流分配，第二阶段将时刻表同步问题转化为MILP，并调用商业求解器进行精确求解，证明了在中等规模网络下获取全局最优解的可行性。该方法的创新之处在于突破了单一模式优化的局限，通过在双层网络中同时调整地铁与公交的发车间隔与时刻，在保证各子系统服务质量的同时，显著改善了跨模式换乘的衔接效率。

针对早间运营的换乘痛点，Kang等[38]提出了一种“地铁首班车+公交接驳”的联合优化方法。不同于以往仅调整公交时刻以适应既定地铁时刻的研究，该研究构建了集成混合整数规划模型，将地铁首班车的发车时刻与接驳公交的路径及时刻表同时作为决策变量。该模型不仅优化了地铁网络内部的时刻表以减少换乘等待，还同时规划了接驳公交服务以“桥接”地铁服务覆盖不足的时空断点。考虑到联合优化模型涉及列车时刻与公交路径的强耦合，变量空间巨大，该研究设计了一种定制化的序列分解算法，将原问题分解为地铁时刻表优化与接驳公交调度2个子问题交替求解。实验结果表明，这种“列车+巴士”的协同调度方案可将早间换乘等待时间降低53.4%，实现了跨模式运营资源的深度互补。

此外，随着市域铁路的快速发展，市域铁路与地铁系统间的换乘协同可能成为新热点。针对换乘过程中存在的“脉冲式”客流与过饱和问题，Huang等[40]提出了一种基于双层离散化方法的协同优化模型。该研究指出，传统的单层离散化难以捕捉换乘站短时高密度的客流冲击，因此构建了考虑动态需求的混合整数非线性规划模型，同时优化市域铁路与地铁的时刻表。通过引入ε-约束法将最小化换乘等待时间和滞留乘客数量转化为单目标求解，并设计了带阴影矩阵的改进模拟退火算法。结果显示，协同优化方案在上海地铁3号线与金山铁路的案例中，成功将换乘等待时间降低了55.8%，有效缓解了不同轨道交通层级间的运能匹配矛盾。

上述研究表明，“协同”范式正逐渐从理论探索走向复杂场景应用，从空铁联运扩展至城市内部的公铁及市郊通勤系统。通过将不同交通方式的时刻表纳入统一的优化框架，并引入双层离散化等精细化技术手段，能够有效应对脉冲客流、首末班衔

接及过饱和等复杂运营难题，挖掘出比单纯“协调”模式更大的系统增益。综合客运枢纽多模式交通时刻表优化研究代表文献如表2所示。

纵观国内外研究现状，综合客运枢纽多模式交通时刻表优化已呈现出从“单向接驳协调”向“双向系统协同”演进的清晰脉络。为了更清晰地展示两大范式的核心差异，“协调”与“协同”范式对比如表3所示。

在研究对象上，当前研究已从经典的轨道-公交接驳，扩展至涵盖“空-铁-公”及市域铁路的多网融合系统；在模型构建上，正经历从基于静态时刻表的确定性规划，向兼容“脉冲式”客流与过饱和场景的动态鲁棒优化转型，部分前沿研究已开始尝试构建双层超网络或引入时空网络模型以模拟复杂的换乘行为；在求解算法上，为应对协同优化带来的决策变量激增，研究重心已从早期的单纯精确算法，转向“定制化分解策略(如序列分解)+改进智能算法(如带阴影矩阵的模拟退火)”的混合求解路径，以在计算效率与解的质量间寻求平衡。

然而，必须指出的是，尽管模型复杂度不断提升，现有的研究范式在通向大规模工程应用时仍呈现出“强耦合风险”与“主体博弈缺位”并存的特征：一方面，随着协同涉及的交通方式增多，系统耦合复杂度呈几何级数增长，任何一个子系统的微小扰动都可能通过时刻表传导至全网，产生难以预测的级联效应，导致模型在处理大规模网络时极易陷入计算维数灾难；另一方面，无论是“协调”还是“协同”范式，绝大多数研究仍基于“单一决策主体”与“完全信息共享”的理想化假设，普遍忽略了铁路、民航与地方公交集团之间真实存在的行政壁垒，以及不同主体在调整时刻表时面临的极不均衡的成本差异。这两大特征共同构成了当前理论研究的边界，也为后续的优化指明了方向。

3　评述与展望

3.1　研究评述

综合上述文献梳理可知，国内外学者在综合客运枢纽时刻表优化领域已建立了较为完备的理论体系，从早期的单向接驳协调逐步演进至多模式系统协同。然而，面对高质量发展背景下旅客对美好出行的向往以及枢纽运营的复杂现实，既有研究仍存在以下4个维度的关键局限。

表2　综合客运枢纽多模式交通时刻表优化研究代表文献

Tab.2　Representative literature on timetable optimization research for multi-modal transportation in integrated passenger transport hubs

文献来源	研究对象	优化目标			应用场景	模型输入	决策变量	求解算法
		时间成本	服务质量	企业效益				
孙　峣等[10]	高速铁路-地铁	✓		✓	常规运营	动态学习与分布假设	地铁停站时间	MARL
Wang等[11]	高速铁路-地铁	✓		✓	应急管理	仿真预测	地铁列车数，到发时间	ε-约束法，VNS，仿真
Chen等[27]	铁路-公交	✓	✓		应急管理	时变客流与过饱和需求	公交路径，开行方案，车辆分配	TS，LP取整
Dou等[4]	铁路-公交		✓	✓	末班车	基于服务规则	公交开行方案	MILP，CPLEX
郭小乐等[6]	铁路-公交		✓	✓	常规运营	给定高铁到达客流	公交发车决策	NSGA-II，CPLEX
Ke等[8]	系统协同	✓			常规运营	给定时变客流	时空网络弧流量	ADMM，LR，DP
Tan等[9]	高速铁路-航班		✓	✓	常规运营	内嵌预测模型	高铁时刻表	GA，DeepFM
可　钰等[30]	高速铁路-航班		✓	✓	常规运营	基于OD可达性	高铁时刻表	CPLEX，分层优化

表3　“协调”与“协同”范式对比

Tab.3　Comparison of “coordination” and “synergy” paradigms

特征	协调范式	协同范式
核心理念	主从型/被动适应	对等型/主动共创
决策变量	主导交通方式为刚性输入，调整衔接交通方式	多种方式时刻表联合优化
优化范围	局部化，聚焦于单一换乘节点或线路对	系统化，考虑网络效应与端到端旅程
典型场景	铁路-地铁、轨道-公交、空铁联运	空铁联运、枢纽全模式网络
关键方法	数学规划、元启发式算法	集成式MIP、网络流模型、分解算法
主要局限	潜力受限于主导交通方式，优化空间有限	计算复杂度高，需深度的数据整合与共享

（1）预先规划的刚性时刻表难以适配现实中的复杂随机情况。无论是“协调”还是“协同”范式，现有研究多基于历史统计数据或固定时刻表进行离线规划，假设客流需求在一定时间内是确定的或服从已知分布。然而，在综合客运枢纽中，干线铁路的晚点往往具有长尾分布特征，且换乘客流呈现显著的脉冲式特征。一旦上游干线列车发生晚点，既定的接驳时刻表往往无法动态响应，导致公交车辆在站台空等空发，而后续到达的密集客流却面临无车可坐的困境。既有的鲁棒优化模型虽然考虑了参数不确定性，但本质上仍属于开环控制，无法在运营中断发生时实时重构时刻表。这种“静态规划”与“动态场景”的错配，使得理论上的最优方案缺乏应对随机扰动的弹性，在早晚高峰或恶劣天气等关键时刻极易失效。

（2）优化目标侧重宏观效率，对微观换乘负效用量化不足。在优化目标的设定上，现有文献普遍采用“系统总时间最小”或“运营成本最低”等效率指标，倾向于将旅客视为同质化的流量单元。这种处理掩盖了旅客在枢纽换乘过程中的非线性心理感知。例如，旅客对“乘坐过程中车辆晚点”与“在站台等待”的时间感知存在显著差异，且对由于时刻表不协调导致的换乘失败具有极强的厌恶心理。缺乏对这些微观行为特征(如行走疲劳、焦虑感)的量化，使得优化结果虽然在数据上实现了总时长最短，但可能会导致部分旅客(如携带大件行李者、老年人)的实际换乘体验极差。缺乏对这些非线性、主观性服务体验指标的精细化量化，使得优化结果往往是“数据上的最优解”，而非“旅客满意的优质解”。

（3）理想化的协同假设忽视了跨主体的利益壁垒。现有协同优化模型多追求系统总效益最大化，却普遍忽略了“调整成本的异质性”。在既有运营模式与技术要求的限制下，干线铁路运行图具有极强的计划刚性与时空耦合性，其调整过程涉及复杂的跨局调度与资源分配，灵活性远低于城市公交。然而，现有研究往往假设各交通方式具有对等的调整灵活性，且愿意为了整体利益而无条件共享数据。这种基于“完全信息共享”与“单一决策主体”的理想条件假设，无法解释并解决现实中铁路局集团公司与地方公交企业因利益诉求不一致而产生的博弈僵局，导致理论模型因缺乏利益补偿机制而难以落地。

（4）协同维度的扩张引发“维数灾难”与级联风险。这是当前“协同”范式面临的严峻技术挑战。随着纳入协同的交通方式数量增加，系统的耦合复杂度呈几何级数增长。一方面，现有模型难以刻画紧耦合系统中的“级联效应”，即单一方式的微小扰动可能被放大为全网拥堵；另一方面，在极度复杂的强耦合约束下，传统的求解算法往往失效，模型极易陷入“无可行解”或计算时间不可接受的困境，使得协同优化的鲁棒性大打折扣。

3.2　未来展望

面对高质量发展背景下旅客全链条出行的精细化需求，综合客运枢纽时刻表优化研究亟需在广度与深度上实现突破。在梳理现有研究范式局限性的基础上，凝炼出该领域未来演进的总体框架。研究展望如图4所示。该框架旨在通过技术手段、评价维度与协作机制的协同，推动研究从静态理想化模型向高韧性动态治理转型，具体涵盖以下4个重点方向。

（1）构建基于数字孪生的时刻表在线动态重排机制。针对静态模型韧性不足的问题，未来研究应超越单纯的客流监测，转向“态势感知+实时推演”的闭环控制。利用数字孪生技术映射枢纽内的实时运力与客流状态，重点突破短时客流预测与时刻表滚动优化的结合技术。当监测到主导交通方式(如高速铁路)发生大范围延误时，系统应能自动触发重排算法，在分钟级内生成接驳车辆的临时发车方案，实现从“按图行车”向“按需发车”的战术级响应转变。

（2）融入行为科学，构建以人为本的多维效用评价体系。未来的优化目标应从单一的时间/成本效率维度，拓展至包含心理学与行为科学维度的广义效用函数。研究应深入结合离散选择模型与行为实验数据，量化旅客对换乘可靠性(时间方差)、舒适度(拥挤感知)、无缝衔接体验的支付意愿。通过构建多用户类别的多目标优化模型，在保障系统基本效率的同时，优先满足不同群体(如老弱病残、商务客流)的差异化需求，真正落实“以人为本”的交通发展理念，提升服务人性化水平。

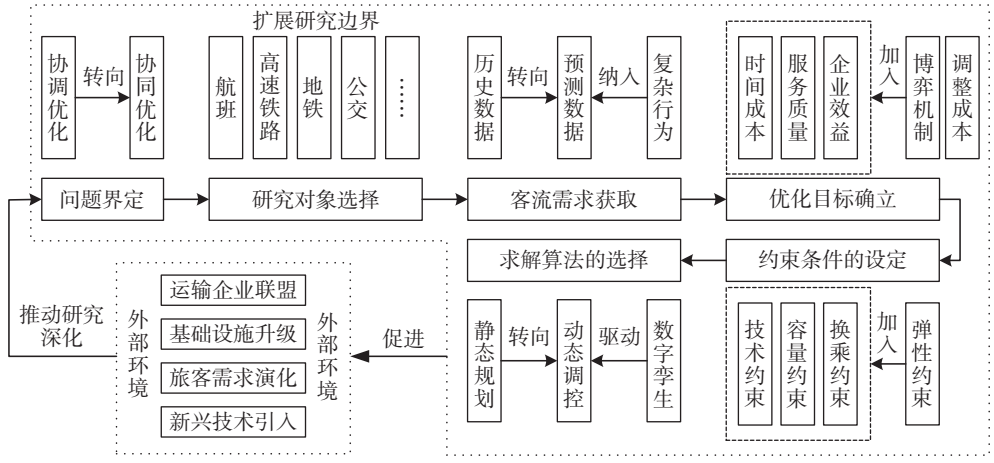

图4　研究展望

Fig.4　Research prospects

（3）设计考虑调整成本异质性的多主体协同与补偿机制。针对多主体协同困境，未来的研究需要突破纯技术优化的边界，构建考虑差异化调整权重的目标函数，真实反映主导交通方式的高调整成本，并将管理科学中的博弈论引入协同优化模型。考虑到调整干线铁路时刻表的成本远高于调整城市公交，研究应重点设计基于Shapley值法或核仁法的收益分配模型。量化时刻表协同调整带来的增量客流收益，并据此制定“影子价格”或转移支付契约，通过对高调整成本方(如铁路局集团公司)进行合理的经济补偿或政策激励，打破行政壁垒，促成多方在时刻表编制层面的实质性协作。

（4）研发面向大规模复杂系统的分解协调算法与韧性控制技术。针对多模式协同带来的计算复杂性与级联风险，未来应重点研究基于分解协调(如ADMM、列生成)的高效求解算法，将全局优化解耦为子系统协同。同时，应坚持以“全时全网协同”为长远演进目标，并以“弹性协同”作为当前技术突破的切入点。通过构建允许时空资源微量松弛的“弹性约束”模型，量化级联失效风险构建具备容错能力的动态协同边界，在确保系统鲁棒性的前提下逐步扩大协同的时空范围，最终实现从“局部弹性适配”向“全域系统融合”的平稳过渡。

参考文献：

[1] 管亚丽，陈　科，李海波．铁路客运站与城市轨道交通换乘衔接组织研究[J]. 城市公用事业，2010，24(5)：5-7，54.
GUAN Yali，CHEN Ke，LI Haibo. Research on the Interchange between Railway Station and Urban Rail Transit[J]. Public Utilities，2010，24(5)：5-7，54.

[2] 王琳虹．综合交通客运枢纽内各方式间的协调调度研究[D]. 长春：吉林大学，2009.

[3] 宗　芳，王琳虹，贾洪飞．综合客运枢纽内各方式协调调度模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2010，38(3)：53-57，63.
ZONG Fang，WANG Linhong，JIA Hongfei. Coordinated Scheduling Model of Traffic Modes in Comprehensive Passenger Transport Hub[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)，2010，38(3)：53-57，63.

[4] DOU X P，MENG Q，GUO X C. Bus Schedule Coordination for the last Train Service in an Intermodal Bus-and-Train Transport Network[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2015，60：360-376.

[5] LONG S H，MENG L Y，MIAO J R，et al. Synchronizing last Trains of Urban Rail Transit System to Better Serve Passengers from Late Night Trains of High Speed Railway Lines[J]. Networks and Spatial Economics，2020，20(2)：599-633.

[6] 郭小乐，宋　瑞，何世伟，等．高铁车站接运公交时刻表与车辆调度综合优化[J]. 铁道学报，2019，41(1)：20-28.
GUO Xiaole，SONG Rui，HE Shiwei，et al. Integrated Optimization of Feeder Bus Timetabling and Vehicle Scheduling for High Speed Railway Terminals[J]. Journal of the China Railway Society，2019，41(1)：20-28.

[7] KE Y，NIE L，YUAN W Y. Joint Optimization of Flight and Train Timetables for Air and High Speed Railway Integration Services with Maximum Accessibility[J]. Transportmetrica B：

Transport Dynamics，2022，10(1)：207-236.

[8] KE Y，WU X，NIE L，et al. Synchronizing Train，Aircraft，Shuttle，and Passenger Flows in Intermodal Timetabling：A Time-Space Network-Based Formulation and a Decomposition Algorithm Using Alternating Direction Method of Multipliers[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2024，159：104464.

[9] TAN Y Y，LI Y B，WANG R X，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.

[10] 孙　峣，柯水平，贾　宁，等. 基于多智能体强化学习的地铁接驳高铁客流疏散优化研究[J]. 北京交通大学学报，2025，49(4)：19-28.
SUN Yao，KE Shuiping，JIA Ning，et al. Study on Optimization of Metro-to-High Speed Rail Passenger Flow Dispersion Based on Multi-Agent Reinforcement Learning[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(4)：19-28.

[11] WANG X R，LYU Y，SUN H J，et al. A Simulation-Based Metro Train Scheduling Optimization Incorporating Multimodal Coordination and Flexible Routing Plans[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2023，146：103964.

[12] DU Y J，YE X Z，CHEN D J，et al. Last-Train Timetable Synchronization for Service Compatibility Maximization in Urban Rail Transit Networks with Arrival Uncertainties[J]. Applied Mathematical Modelling，2025，138：115768.

[13] LI X，LIU Y，ZHANG Q. Festival Timetable Synchronization of Metro Trains and High Speed Railway Trains for Late-Night Operations：An Integrated Bi-Directional Transfer Optimization Model[J]. Transportation Letters，2024，16(10)：1252-1267.

[14] 马晓天，黄志鹏，王　旋. 基于过饱和条件的市域铁路与地铁运行图协同优化[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(8)：3082-3092.
MA Xiaotian，HUANG Zhipeng，WANG Xuan. Collaborative Optimization of Suburban Railway and Metro Timetables Based on Oversaturation Condition[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(8)：3082-3092.

[15] 叶彬彬，黄志鹏，张　可，等. 空铁联运模式下考虑航班延误的高铁运行图优化[J]. 深圳大学学报(理工版)，2025，42(4)：464-472.
YE Binbin，HUANG Zhipeng，ZHANG Ke，et al. Optimization of High Speed Railway Scheduling Considering Flight Delays in Air-Rail Intermodal Mode[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)，2025，42(4)：464-472.

[16] 胡倩芸，柏　赟，曹耘文，等. 铁路枢纽站地铁列车运行图的衔接优化[J]. 铁道科学与工程学报，2016，13(12)：2503-2507.
HU Qianyun，BAI Yun，CAO Yunwen，et al. Optimization of Subway Timetable at the Railway-Subway Transfer Station[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2016，13(12)：2503-2507.

[17] 蔡肇萍. 基于铁路客运枢纽衔接的城市轨道交通列车时刻表协调优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2019.

[18] 庄黄蕊，柏　赟，明先俊，等. 考虑铁路换乘客流的地铁列车发车时刻与限流方案协同优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2020，44(5)：779-784.
ZHUANG Huangrui，BAI Yun，MING Xianjun，et al. Study on Collaborative Optimization of Subway Train Departure Time and Current Limiting Scheme Considering Railway Transfer Passenger Flow[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)，2020，44(5)：779-784.

[19] 戴镙桦. 基于铁路到达客流的轨道交通协调调度优化研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2021.

[20] 袁振洲，刘立强，王佳冬，等. 考虑不均匀发车间隔的高铁接运公交时刻表与车辆调度优化[J]. 北京交通大学学报，2021，45(4)：44-53.
YUAN Zhenzhou，LIU Liqiang，WANG Jiadong，et al. Feeder Bus Timetabling and Vehicle Scheduling Optimization for High Speed Railway Station with Uneven Departure Interval[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2021，45(4)：44-53.

[21] 高俊华，张　姚，蒋阳升. 考虑动态走行时间的铁路换乘公交衔接优化[J]. 铁道运输与经济，2022，44(10)：25-31.
GAO Junhua，ZHANG Yao，JIANG Yangsheng. Optimization of Transfer from Railway to Bus Considering Dynamic Travel Time[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(10)：25-31.

[22] 窦雪萍. 多模式公共交通运行协调优化方法[D]. 南京：东南大学，2016.

[23] 李楠煜．基于出行成本的接驳公交时刻表优化研究[J]. 交通世界，2022(26)：7-10.

[24] WANG Y B，LI Q Q，HAN Z F，et al. Coordinated Optimization of Feeder Flex-Route Transit Scheduling for Urban Rail Systems[J]. Applied Sciences，2025，15(8)：4342.

[25] 张　进，李文权，郭蓉蓉．可变线路公交接驳地铁的时刻表构建方法[J]. 西南交通大学学报，2025，60(5)：1259-1267.
ZHANG Jin，LI Wenquan，GUO Rongrong. Schedule Design Method for Feeder Flex-Route Transit Connecting Urban Rail Transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2025，60(5)：1259-1267.

[26] 程　毅，张　生，向冠华．考虑竞争关系的高铁接运公交时刻表优化方法[J]. 公路与汽运，2024，40(3)：26-32.

[27] CHEN Y，AN K. Integrated Optimization of Bus Bridging Routes and Timetables for Rail Disruptions[J]. European Journal of Operational Research，2021，295(2)：484-498.

[28] ALMASI M H，SADOLLAH A，MOUNES S M，et al. Optimization of a Transit Services Model with a Feeder Bus and Rail System Using Metaheuristic Algorithms[J]. Journal of Computing in Civil Engineering，2015，29(6)：04014090.

[29] ALMASI M，SADOLLAH A，KANG S，et al. Optimization of an Improved Intermodal Transit Model Equipped with Feeder Bus and Railway Systems Using Metaheuristics Approaches[J]. Sustainability，2016，8(6)：537.

[30] 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.

[31] JIANG Y S，CHEN S W，AN W Y，et al. Demand-Driven Train Timetabling for Air and Intercity High Speed Rail Synchronization Service[J]. Transportation Letters，2023，15(4)：321-335.

[32] KE Y，NIE L，LIEBCHEN C，et al. Improving Synchronization in an Air and High Speed Rail Integration Service *via* Adjusting a Rail Timetable：A Real-World Case Study in China[J]. Journal of Advanced Transportation，2020，2020：5081315.

[33] 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.

[34] 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.

[35] 李兴华．综合客运枢纽交通方式协调调度[D]. 长春：吉林大学，2014.

[36] 蔡燕林．时变需求下轨道接驳公交运输组织优化研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2024.

[37] ZHANG T Y，LI D W，QIAO Y. Comprehensive Optimization of Urban Rail Transit Timetable by Minimizing Total Travel Times under Time-Dependent Passenger Demand and Congested Conditions[J]. Applied Mathematical Modelling，2018，58：421-446.

[38] KANG L J，LI H，SUN H J，et al. First Train Timetabling and Bus Service Bridging in Intermodal Bus-and-Train Transit Networks[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2021，149：443-462.

[39] HUANG K，WU J J，SUN H J，et al. Timetable Synchronization Optimization in a Subway-Bus Network[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2022，608：128273.

[40] HUANG Z P，MA X T，TIAN X P，et al. Train Timetable Synchronization Optimization for Subway-Suburban Rail Transfer Systems：A Double-Level Discretization Approach[J]. Computers & Industrial Engineering，2025，207：111314.

(责任编辑　金　晶)