文章编号：1003-1421(2026)02-0049-12
引用格式：崔育铭，郭欣，孙会君.跨城通勤背景下路网资源优化对策研究——以京津城际铁路为例[J].铁道运输与经济，2026，48(2)：49-60.
CUI Yuming，GUO Xin，SUN Huijun. Optimization Strategies for Transportation Network Resources in the Context of Intercity Commuting：A Case Study of Beijing-Tianjin Intercity Railway[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：49-60.

跨城通勤背景下路网资源优化对策研究——以京津城际铁路为例

崔育铭[1]，郭　欣[2]，孙会君[2]

(1.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；2.北京交通大学 系统科学学院，北京　100044)

摘　要：随着跨城通勤需求的持续增长，主要交通枢纽客流承载压力不断加大，亟需以四网融合为引领，对现有路网资源实施多层级优化升级，加快构建一体化高效出行服务体系。以京津城际铁路亦庄站为研究对象，通过分析现有列车运行数据和客流特征，针对列车停站覆盖能力不足、联动运力未完全发挥等典型问题，构建了基于多时段协同的轨道交通列车停靠-编组动态耦合优化模型，优化跨城通勤背景下客流分布不均衡、列车停靠比例低等问题。通过设计启发式算法，对天津到北京方向的列车运行图进行优化。结果表明：京津城际铁路需要在早高峰时段采用大编组列车释放线路能力，为亦庄站增加停站创造条件；同时通过量化列车班次停靠数量，均衡北京主要铁路枢纽的客流分布。最后，就加快四网融合与出行一体化、完善票价政策以及实施政府和社会资本合作模式开发旅游资源提出策略建议，以提升亦庄站对客流的吸引力，带动周边区域经济发展，实现整体网络的提质增效。

关键词：城际铁路；跨城通勤；列车停靠-编组动态耦合优化；四网融合；文旅资源开发
中图分类号：U293.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250328002

Optimization Strategies for Transportation Network Resources in the Context of Intercity Commuting：A Case Study of Beijing-Tianjin Intercity Railway

CUI Yuming[1]，GUO Xin[2]，SUN Huijun[2]

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Systems Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the continuous growth of intercity commuting demand, major transportation hubs are facing increasing passenger flow pressure. There is an urgent need for guidance with the integration of four railway networks (mainline railway, intercity railway, urban railway, and subway), implementation of multi-level optimization and upgrading of existing road network resources, and acceleration of the construction of an integrated and efficient travel service system. This paper took

收稿日期：2025-03-28
基金项目：国家自然科学基金项目(U2469201，72471020)；中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2023X011)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2023YJ322)

Yizhuang Station on the Beijing–Tianjin Intercity Railway, as a case study. By analyzing existing train operation data and passenger flow characteristics, typical issues such as insufficient train stop coverage and underutilized interlinked capacity were identified. A dynamic coupling optimization model for train stops and formation based on multi-time period collaboration was constructed to address issues such as the uneven distribution of passenger flow and the low proportion of train stops in the context of intercity commuting. Through the design of a heuristic algorithm, the train working diagram for the direction from Tianjin to Beijing was optimized. The results show that the Beijing–Tianjin Intercity Railway needs to adopt larger train formations during the morning peak to release line capacity and create conditions for adding stops at Yizhuang Station. Meanwhile, by quantifying the number of train departures, the passenger flow distribution at major railway hubs in Beijing can be balanced. Finally, policy suggestions are put forward, including accelerating the integration of four transportation networks and integrated travel services, improving fare policies, and implementing government and social capital cooperation models to develop tourism resources. These measures aim to enhance the attractiveness of Yizhuang Station to passenger flow, stimulate economic development in the surrounding areas, and achieve overall network quality improvement and efficiency enhancement.

Keywords: Intercity Railway; Intercity Commuting; Dynamic Coupling Optimization of Train Stops and Formations; Integration of Four Railway Networks; Cultural and Tourism Resource Development

0　引言

在全球城市化进程不断加速的背景下，完善的交通网络发挥着先导、引领和整合的关键作用，其不仅推动了资源的高效流动和经济地理格局的重塑[1]，而且带动跨城通勤的现象[2]。近年来，越来越多居民选择在核心城市邻近地区购房居住，而在核心城市就业，形成跨越行政边界的“职住分离”模式，跨城通勤正日益成为一个引人关注的重要现象。其背后的推动因素一方面是高房价和高生活成本促使部分人群向周边城市转移，另一方面则得益于跨区域医疗、教育、交通等公共服务的不断完善，交通走廊的加速成型使得区域内带动聚集效应愈发明显[3-4]。关于跨城通勤，早期研究多集中于都市圈层面，关注市域铁路如何服务通勤客流[5-6]；随着高速铁路和城际轨道交通的迅速崛起，城市空间结构与通勤形态正在被深刻重塑，跨城通勤的范围也逐渐超越了传统的都市圈边界，扩展至更广阔的城市群层面[7-8]。

国外学者早在1988年就对跨城通勤这一概念进行了界定[9]，以日本东海道新干线、德国城际快车(Inter City Express，ICE)与法国高速铁路(Train à Grande Vitesse，TGV)为代表的高速铁路网络在跨城通勤方面积累了成熟经验，通过统一的技术标准、票务系统及换乘枢纽布局，推动地铁、市郊铁路与干线铁路之间的无缝衔接，提升整体运行效率与服务水平[10-11]。在我国，跨城通勤在京津冀、长三角、珠三角等城市群呈现出高频率的趋势[12-13]。多中心结构的加快形成对以轨道交通为主的多层次出行体系提出了更高要求，为加快区域协调与高质量发展，国家层面陆续出台了《国家综合立体交通网规划纲要》《交通强国建设纲要》等重要政策文件，强调交通互联互通在产业协同、要素流动与公共服务共享中的关键作用。在此背景下，我国主要城市正加速构建以干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路及城市轨道交通为主体的多层次交通网络，构建互联互通、高效便捷的轨道交通一体化网络，形成“四网融合”发展格局。

日益完善的综合立体交通体系使跨城通勤需求得以快速释放，然而各运输方式之间并非简单的“叠加”关系，而需要综合考虑各类交通方式的互联互通，才能最大化进行运力资源的协调配置。现阶段，我国轨道交通已初步形成多制式、多层次并行发展的局面，但在运营实践中依然存在时刻安排和站点设置上缺乏有效协调、运力调度与资源配置不平衡、不同交通方式间信息系统对接不足，以及车站与周边交通配套衔接不够等突出问题[14-15]，均在不同程度上影响了整体运输效率，也制约了跨城通勤需求的充分满足。同时，城市群内部“职住分离”现象趋于显著，核心城市与周边地区间的超大

规模客流在早晚高峰时段往往导致关键线路与枢纽站的高负荷运转，如何通过运营组织、信息共享和站点规划等多方面的协同升级来提升跨城通勤服务品质，已成为城市群交通管理迫切需要破解的重要课题。基于上述背景，以京津冀城市群跨城通勤的典型案例——京津城际铁路(北京南—滨海)在运力组织方面的实践为研究对象，通过对现有站点运营中存在的问题进行分析，提出基于多时段协同的轨道交通列车停靠–编组动态耦合优化模型，最后给出相关策略建议，旨在为应对日益增长的跨城通勤需求提供参考。

1　京津城际铁路运营挑战

1.1　京津城际铁路现状分析

京津城际铁路是我国最早建设并投入运营的高速城际铁路之一，自2008年正式投入运营以来，不仅承担了大量跨省通勤需求，同时也在服务区域经济和社会发展中发挥了重要作用。根据北京市2022—2024交通发展年度报告[16–18]，北京至天津站在2021—2023年度旅客发送量分别为540.2万、142.7万和868.5万人次，天津站已成为北京年度发送量最大的目的地。而且随着两地出行需求的增加，京津城际铁路运力紧张与超员现象愈发严重，候补购票需求较大，旅客出行需求难以得到充分满足。

为应对运力紧张问题，国铁部门对京津城际铁路的运行组织进行了多次调图和优化，部分车次采用重联或长编动车组列车的方式，整体运输能力较调整前提升了18%[19]。与此同时，根据《2024北京市交通发展年度报告》[18]，2023年北京南站年发送量达5 017.3万人次，高峰日发送量达24万人次，位居全市火车站客流之首，对车站的接发能力、站台周转和旅客服务提出了极高要求。北京南站长期承受较大客流压力，北京地区急需增设站点停靠来分流北京南站压力。而亦庄区作为北京经济技术开发区的重要区域，聚集了大量高新技术企业和就业人口，因此京津城际铁路于2024年10月1日正式开通了亦庄站这一重要停靠点，其作为中间站配置有2台4线。亦庄站车站示意图如图1所示。

亦庄站的开通实现了京津城际铁路列车在北京市内多点停靠，其周边旅客无需前往北京南站，从而减轻了北京南站的客流压力，同时也为北京站和北京西站分担了部分中远程旅客的转移需求，进一步优化了全市主要铁路枢纽的客流分布。此外，亦庄站还通过便捷的交通接驳方式，与首都机场和大兴国际机场形成良好的协同效应，使整体交通网络更加高效。然而，随着旅客需求的持续增长以及亦庄站开通带来的客流变化，现有的运营组织与运力调度模式仍需进一步优化，以实现整体网络的提质增效，为构建高效协同的城市通勤出行模式奠定坚实基础。

京津城际铁路在实际运营中，通勤客流出行集中在高峰时段，部分车次的上座率超过100%，而平峰期上座率低于40%，呈现出高峰时段列车过度拥挤、平峰时段运力闲置的突出矛盾。2025年京津城际铁路下行方向开行列车平均满载率如图2所示。

1.2　亦庄站运营组织存在的问题

截至2024年12月9日，亦庄站开通初期已累计发送旅客7.9万人次，到达旅客8.6万人次，高峰时段客流密度显著增加。亦庄站增设停靠可以减少

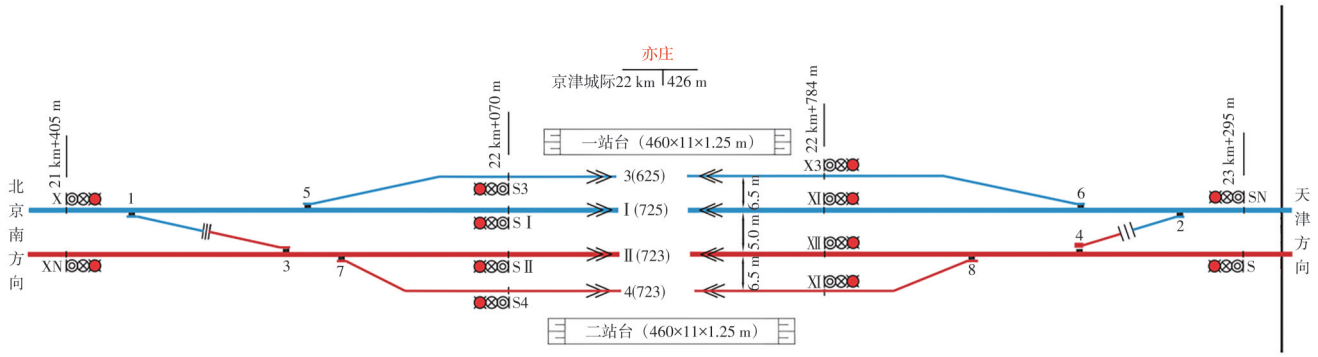


图1　亦庄站车站示意图

Fig.1　Schematic diagram of Yizhuang Station

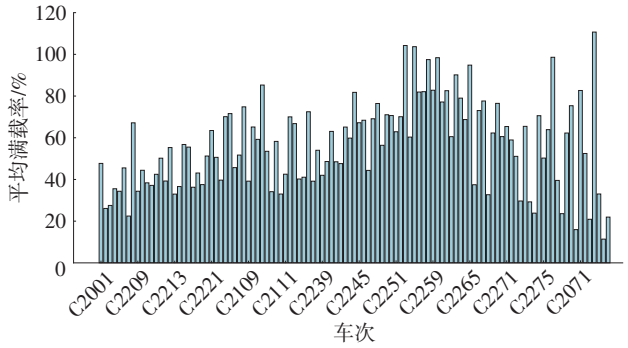


图2　2025年京津城际铁路下行方向开行列车平均满载率

Fig.2　Average occupancy rate of trains (Tianjin-bound) on Beijing-Tianjin Intercity Railway in 2025

北京南站的客流压力，提高管内其他列车的接发车次，缓解站台资源紧张问题。例如，秦皇岛与北京之间的高速列车G8927，G8929，G8931等可在北京南站增开车次，提高北京管内列车周转效率。基于上述背景，研究将重点梳理亦庄站现行运营组织中存在的问题。

当前经由亦庄站的动车组列车多达266列，其中：管内高速动车组列车13列，城际动车组列车239列，临时城际动车组列车14列，但停靠亦庄站的仅有25列城际动车组列车。下行(天津方向)停靠13列，时间分布为6:00—7:00、19:00—20:00、21:00—22:00各1列，7:00—8:00、8:00—9:00、9:00—10:00、17:00—18:00、18:00—19:00各2列，停站时间不均衡，高峰时段停站次数较少，9:30—17:30约8 h没有列车停靠，旅客出行不方便。上行(北京方向)停靠12列，时间分布为6:00—7:00、8:00—9:00、17:00—18:00、18:00—19:00、20:00—21:00、21:00—22:00各1列，7:00—8:00、9:00—10:00、16:00—17:00各2列，9:48—16:31间约6 h 43 min没有列车停靠，覆盖能力不足。亦庄站(天津方向)时间段列车停靠次数分布如图3所示。亦庄站(北京方向)时间段列车停靠次数分布如图4所示。

亦庄新城作为具有全球影响力的创新型产业集群和科技服务中心，其核心交通枢纽亦庄站当前的列车停靠比例与区域发展需求存在明显差距。京津城际铁路上行方向各站点停靠比例如图5所示，京津城际铁路各站点中，亦庄站上行停靠比例仅为10.3%，远低于滨海站和武清站(均超过20%)。这一现状制约了亦庄站的枢纽功能发挥，难以匹配其在区域交通体系中的战略定位。适时优化列车停靠频次，将有效提升区域交通可达性，改善通勤效率，从而更好地支撑亦庄新城产城融合与高质量发展。此外，京津城际铁路运营车辆的编组形式具有一定的灵活性，合理调节编组以释放线路能力，进而为亦庄站增加停站创造条件，缓解高峰时段的运力紧张问题。

2　基于多时段协同的轨道交通列车停靠-编组动态耦合优化模型构建与求解

2.1　问题描述

京津城际铁路在实际运营中，若只增加站点停靠比例而不优化列车编组方案，不仅难以有效缓解

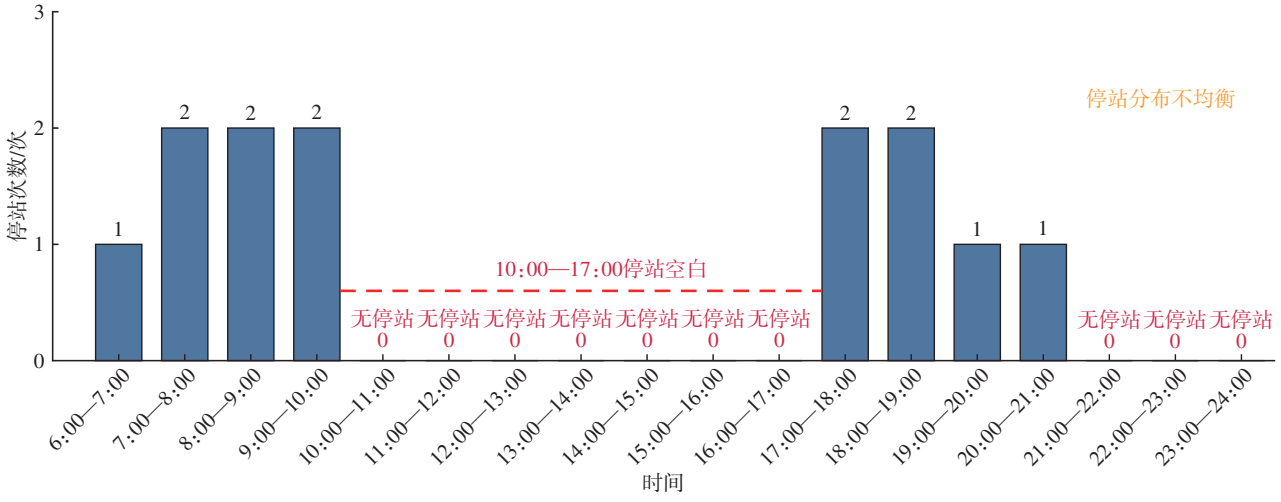


图3　亦庄站(天津方向)时间段列车停靠次数分布

Fig.3　Distribution of train stop frequencies by time period at Yizhuang Station (Tianjin-bound)

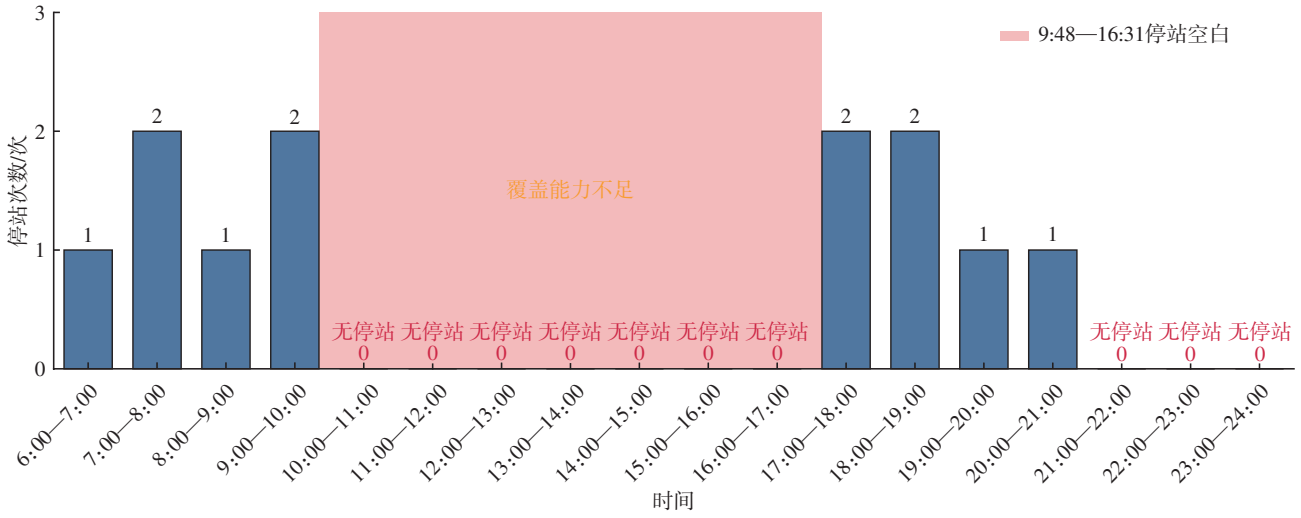


图4　亦庄站(北京方向)时间段列车停靠次数分布

Fig.4　Distribution of train stop frequencies by time period at Yizhuang Station (Beijing-bound)

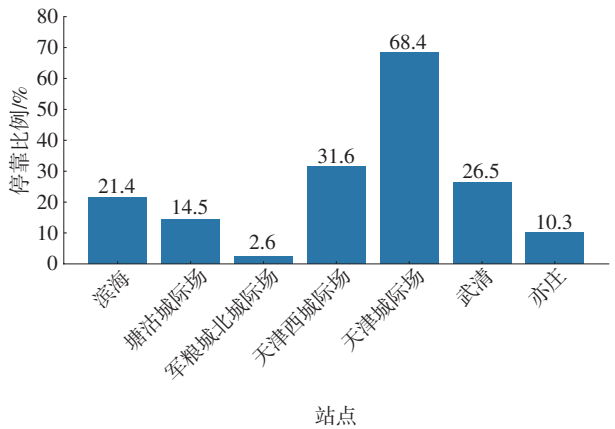
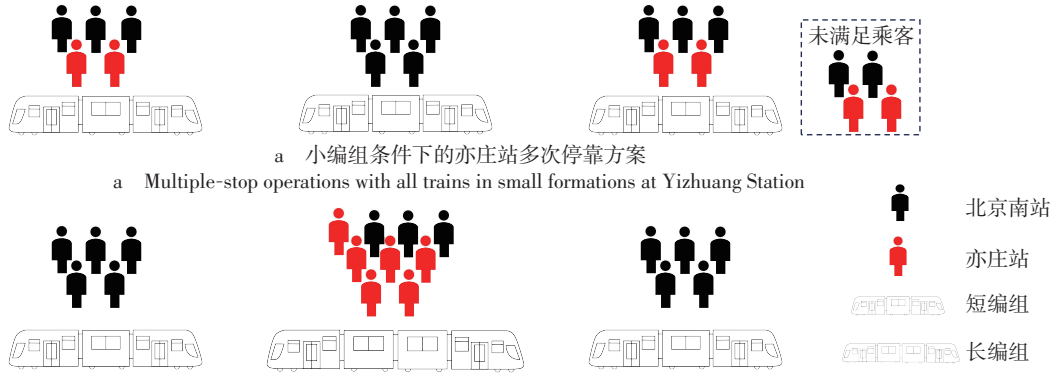


图5　京津城际铁路上行方向各站点停靠比例

Fig.5　Station-wise stop proportion on Beijing–Tianjin Intercity Railway (Beijing-bound)

高峰压力(由于列车发车间隔压缩空间有限)，还增加了平峰时段的旅客出行时间，从而降低整体运营效率。需求响应的列车停靠与编组方案如图6所示。在研究时段内，当部分旅客需求无法被满足时将会积压至后续时段，且需多次列车停靠，如图6a所示。当列车编组扩大后，如图6b所示，仅需单次列车停靠即可满足研究时段内所有旅客的全部需求，从而提升列车运行效率。因此，研究基于已知的客流时空分布特征，构建基于多时段协同的轨道交通列车停靠–编组动态耦合优化模型，不仅能实现供需精准匹配，也能释放线路资源，为增加列车停靠频次创造条件，从而增强区域通勤效率。具体而言，在高峰时段，通过加大重联编组比例重点满足通勤客流需求；在平峰时段，充分发挥重联列车的运输潜力以提升运能利用率；综合提升列车停靠频次的多时段协同运营模式，既可以提升列车全时



a　小编组条件下的亦庄站多次停靠方案

a　Multiple-stop operations with all trains in small formations at Yizhuang Station

b　大小编组混合条件下的亦庄站单次停靠方案

b　Single-stop operation with mixed small and large formations at Yizhuang Station

图6　需求响应的列车停靠与编组方案

Fig.6　Demand-responsive train stop and formation plan

段上座率，又可以通过多时段协同服务增强铁路线路的市场竞争力，实现运输效率与经济效益的双重提升，更好地支撑产城融合发展。

2.2　符号定义

集合、参数及变量定义如表1所示。

表1　集合、参数及变量定义

Tab.1　Definitions of sets, parameters, and variables

符号		定义
集合	K	列车集合，$\|K\|$为运行列车的总数量，其中$K=\{1,2,\cdots,\|K\|\}$
	K_{opt}	待优化列车集合，$K_{opt}\subseteq K$
	S	站点集合，$\|S\|$为线路上的总站点，其中$S=\{1,2,\cdots,\|S\|\}$
	S_{opt}	待优化停靠站点集合，$S_{opt}\subseteq S$
	A_i	与站点i属于同一市域的其他站点集合，$A_i\subseteq S$
	T	时段集合，$t\in T$
	T_{req}	强制停靠的时间段集合，$T_{req}\subseteq T$
参数	$\hat{x}_{k,i}$	计划运行图中列车k是否在站点i停靠
	$\hat{a}_{k,i}$	计划运行图中列车k到达站点i的时间
	s_k	计划运行图中列车k的首发站
	$D^t_{i,j}$	时段t站点i到j的旅客需求
	$U^t_{i,j}$	时段t未满足的站点i到j的旅客需求
	τ^{start}_t，τ^{end}_t	时段t的起止时刻
	$t^{run}_{i,i+1}$	从站点i到$i+1$的区间运行时间
	t^{acc}_i，t^{dec}_i	站点i的启动加速与停车减速附加时间
	t^{dwell}_i	在站点i的停靠时间
	Δt_{min}	相邻列车的最小追踪间隔
	C_m	m编组列车的定员数量
	$p_{i,j}$	站点i到j的票价
	K^i_{min}	站点i在时段$t\in T_{req}$内至少需要停靠的列车数
	$B_{i,t}$	站点i所属市域其他站点在时段t的接驳能力上限，$i\in S_{opt}$
	$Q_{i,t}$	站点i在时段t通过列车停靠分流的客流量，$i\in S_{opt}$
	$R_{i,t}$	站点i所属市域在时段t的总到达客流量，$i\in S_{opt}$
决策变量	$x_{k,i}$	0-1变量，取值为1表示列车k停靠站点i，否则不停靠
	z_k	0-1变量，取值为1表示列车k采用16编组，否则为8编组
	$\delta^t_{k,i}$	0-1变量，取值为1表示列车k在时段t到达站点i
	$y^t_{k,i,j}$	列车k在时段t到达站点i搭载到站点j的旅客数量

2.3　模型构建

研究构建了基于多时段协同的轨道交通列车停靠-编组动态耦合优化模型，目标函数旨在考虑停靠与编组联合策略后的服务总收益，满足不同时段客流需求，缓解换乘枢纽的客流压力，提升系统整体的运行效率。目标函数具体包括以下方面。①新增停靠站点后，各换乘枢纽协同水平F_1。计算如式(1)所示，其中α为协同水平系数，k为Sigmoid函数陡峭程度的调节系数。当枢纽站点的换乘接驳能力超过作业能力时，通过增加同市域内其他站点的停靠实现分流作用。②大编组行车方案产生的额外成本F_2。如式(2)所示，β表示大编组列车产生的额外运行成本。③调整列车停靠计划而引起的时刻表偏差F_3。如式(3)所示，γ表示单位偏差成本系数。④未满足需求的旅客惩罚成本F_4。如式(4)所示，ε为未满足旅客需求的单位惩罚系数。⑤新增停靠站点后旅客通勤效率增加收益F_5。如式(5)所示，E_i为停靠站点i对旅客的效率提升系数。⑥票价收益F_6。如式(6)所示。将上述6个目标函数转换为单目标函数，最大化综合效益如式(7)所示。

$$F_1=\alpha\cdot\sum_{t\in T}\sum_{i\in S_{opt}}(Q_{i,t}/(1+e^{-k(R_{i,t}-B_{i,t})})) \tag{1}$$

$$F_2=\beta\cdot\sum_{k\in K}z_k \tag{2}$$

$$F_3=\gamma\cdot(\sum_{k\in K_{opt}}\sum_{i\in S_{opt}}x_{k,i}-\hat{x}_{k,i}) \tag{3}$$

$$F_4=\varepsilon\cdot(\sum_{t\in T}\sum_{i,\,j\in S,\,j<i}(D^t_{j,i}-\sum_{k\in K}y^t_{k,j,i})) \tag{4}$$

$$F_5=\sum_{t\in T}\sum_{i\in S_{opt}}E_i\cdot Q_{i,t} \tag{5}$$

$$F_6=\sum_{k\in K}\sum_{i,\,j\in S,\,j<i}\sum_{t\in T}p_{j,i}\cdot y^t_{k,j,i} \tag{6}$$

$$\max F=F_1+F_5+F_6-F_2-F_3-F_4 \tag{7}$$

2.3.1　列车运行与停靠约束

为降低对既有运行计划的扰动，仅对待优化列车在待优化站点的停靠方案进行调整。具体来说，非优化列车的停靠策略保持不变，待优化列车在非待优化站点的停靠策略亦保持不变。此约束表示为

$$x_{k,i}=\hat{x}_{k,i}\qquad\forall k\in K\backslash\{K_{opt}\},\ i\in S \tag{8}$$

$$x_{k,i}=\hat{x}_{k,i}\qquad\forall k\in K_{opt},\ i\in S\backslash\{S_{opt}\} \tag{9}$$

列车到发时间计算约束，根据区间运行时间、停站时间和停靠产生的加减速附加时间计算，其中，s_k为列车k的首发站。此约束表示为

$$a_{k,i}=\hat{a}_{k,i}\qquad\forall k\in K,\ i=s_k \tag{10}$$

$$d_{k,i}=a_{k,i}+t^{dwell}_i\cdot x_{k,i}\qquad\forall k\in K,\ i\geqslant s_k \tag{11}$$

$$a_{k,i}=d_{k,i-1}+t^{run}_{i-1,i}+t^{acc}_{i-1}\cdot x_{k,i-1}+t^{dec}_i\cdot x_{k,i}\qquad\forall k\in K,\ i>s_k \tag{12}$$

列车运行安全间隔约束，为保证运行安全，列车k到达站点i的时间要与列车$k-1$的离开站点i的

时间满足最小时间间隔要求。此约束表示为

$$a_{k,\,i} \geqslant d_{k-1,\,i} + \Delta t_{\min} \qquad \forall k \in K,\ i > s_k \tag{13}$$

为简化模型结构，对于列车运行图中首发站之前的站点，统一设置其到发时间为零，即不进行调度计算，此约束表示为

$$a_{k,\,i} = 0 \qquad \forall k \in K,\ i < s_k \tag{14}$$

$$d_{k,\,i} = 0 \qquad \forall k \in K,\ i < s_k \tag{15}$$

在指定时间段，待优化停靠站点应满足最小服务能力要求，即在每一要求时段$t \in T_{\text{req}}$，每个待优化站点i停靠的列车数量不能低于预设值$K^i_{\min}$，此约束表示为

$$\sum_{k \in K} \omega^t_{k,\,i} \geqslant K^i_{\min} \qquad \forall i \in S_{\text{opt}},\ t \in T_{\text{req}} \tag{16}$$

2.3.2　旅客需求分配约束

以递推形式记录各时段未被满足的旅客需求。任意时段t，从站点i到站点j的未满足需求$U^t_{i,\,j}$，由上一时段$t-1$的剩余需求$U^{t-1}_{i,\,j}$与当前时段新增需求$D^t_{i,\,j}$相加，再减去该时段被列车承载的旅客数，此约束表示为

$$U^t_{i,\,j} = U^{t-1}_{i,\,j} + D^t_{i,\,j} - \sum_{k \in K} y^t_{k,\,i,\,j} \qquad \forall i,\ j \in S,\ t \in T,\ i < j \tag{17}$$

为确保客流分配遵循合理的供需关系，任意时段t从站点i到站点j的乘车人数不得超过该时段的旅客需求，此约束表示为

$$\sum_{k \in K} y^t_{k,\,i,\,j} \leqslant U^{t-1}_{i,\,j} + D^t_{i,\,j} \qquad \forall i,\ j \in S,\ t \in T,\ i < j \tag{18}$$

列车在任意时段t在车站区间的载客量不得超过对应编组的最大容量，列车编组由z_k决定，此约束表示为

$$\sum_{i=1}^{j} \sum_{m=j+1}^{|S|} \sum_{1}^{t' \leqslant t} y^{t'}_{k,\,i,\,j} \leqslant C_8(1 - z_k) + C_{16} z_k$$

$$\forall k \in K,\ j \in \{1,\ 2,\ \cdots,\ |S-1|\},\ t \in T \tag{19}$$

为实现列车与对应时段的匹配，引入辅助决策变量$\delta^t_{k,\,i}$，用于判断列车k到达站点i的时间是否属于时段t，此约束表示为

$$a_{k,\,i} \geqslant \tau^{\text{start}}_t - M(1 - \delta^t_{k,\,i}) \qquad \forall k \in K,\ i \in S,\ t \in T \tag{20}$$

$$a_{k,\,i} < \tau^{\text{end}}_t + M(1 - \delta^t_{k,\,i}) \qquad \forall k \in K,\ i \in S,\ t \in T \tag{21}$$

仅当列车k在时段t到达站点i时，且在站点i和j停靠，才能分配相应区段的旅客需求，此约束表示为

$$y^t_{k,\,i,\,j} \leqslant M \cdot \delta^t_{k,\,i} \cdot x_{k,\,i} \cdot x_{k,\,j} \qquad \forall k \in K,\ i,\ j \in S,\ t \in T,\ i < j \tag{22}$$

站点i在时段t通过列车停靠分流的客流量$Q_{i,\,t}$以及站点i所属市域在时段t的总到达客流量的计算表达式为

$$Q_{i,\,t} = \sum_{k \in K} x_{k,\,i} \cdot \Big(\sum_{j \in S \setminus \{A_i\},\ j < i} y^t_{k,\,j,\,i} \Big) \qquad \forall i \in S_{\text{opt}},\ t \in T \tag{23}$$

$$R_{i,\,t} = Q_{i,\,t} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in A_i} x_{k,\,p} \cdot \Big(\sum_{j \in S \setminus \{A_i,\ \{i\}\},\ j < p} \sum_{t \in T} y^t_{k,\,j,\,p} \Big)$$

$$\forall i \in S_{\text{opt}},\ t \in T \tag{24}$$

2.4　算法设计及优化结果

本研究设计基于遗传算法的启发式算法对上述模型进行求解，算法流程图如图7所示。运行环境为Windows11操作系统，Core i7-12700H CPU，16 GB内存。以京津城际铁路上行方向列车运行图为例进行实验，优化列车开行方案与列车运行图，模型参数设置如表2所示，优化后目标函数收敛结果如图8所示。优化后目标函数值提升了13%，算法在运行到281代后收敛，当迭代次数设置为600代时求解时间为7 778 s。优化前列车停靠与编组方案如图9所示，优化后列车停靠与编组方案如图10所示，优化前后重联列车比例对比如图11所示。对比分析表明，在早高峰期间采用大编组列车可释放线路能力，为亦庄站增加停站创造条件，

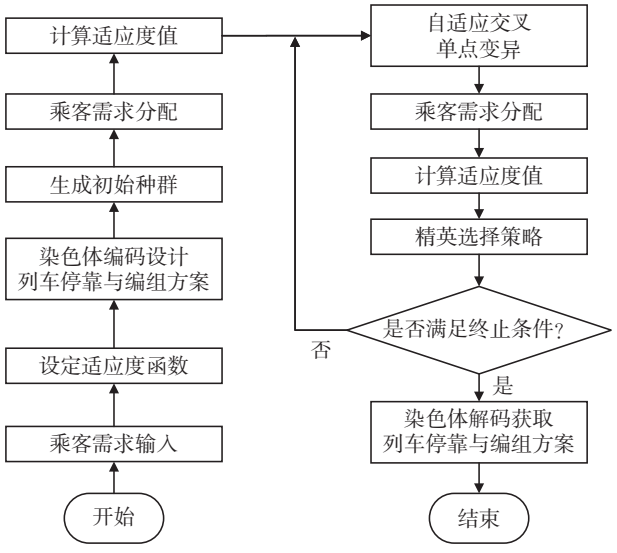


图7　算法流程图

Fig.7　Algorithm flow diagram

表2　模型参数设置

Tab.2　Model parameter settings

模型参数	取值	模型参数	取值
Δt_{min}/min	4	β/元	10 000
C_8/人	576	γ/(元/次)	8 000
C_{16}/人	1 193	ε/(元/人)	10
α	30	E_t/元	60
k	1	$\tau_t^{end}-\tau_t^{start}$/min	30

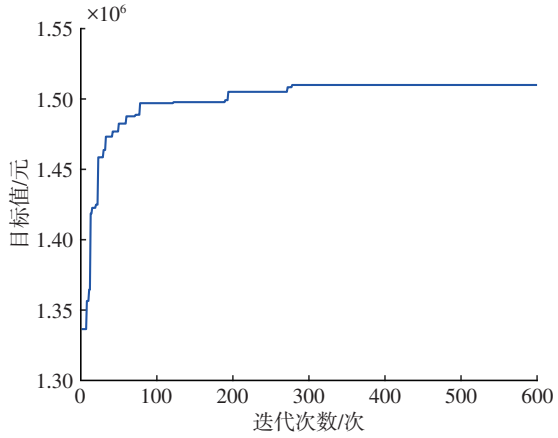


图8　目标函数收敛结果

Fig.8　Convergence results of objective function

缓解高峰时段的运力紧张问题。依据亦庄站客流数据，在各关键时段的停靠列车数量均有所提升，早高峰增加停靠列车2列，中午时段增加停靠列车2列，晚高峰增加停靠列车2列，通过在旅客需求集中时段增加编组规模与停靠次数，亦庄站实现了全天候的列车覆盖服务，有效提升了旅客出行的可达性。

2.5　实验对比分析

为验证研究提出的联合优化模型的优越性，设计了模型对比实验。在实验2中构建了一个基准对比模型，该模型仅考虑列车停靠方案的优化，而将编组配置作为固定参数输入。实验1通过控制变量实验求解提出的联合优化模型，可以清晰地量化编组动态优化对整体运营效率的提升贡献。实验2目标函数迭代次数如图12所示，实验2在迭代次数上收敛速度更快，但目标函数值低于实验1。因为在实验2中，由于未考虑动态编组配置，难以根据不同时段的客流变化灵活调整运力分配，导致部分高峰时段内未能满足实际客流需求。同时，实验2优化后列车停靠方案如图13所示，实验2的列车运行图中列车共产生8次停靠，而实验1的列车运行图中列车共产生6次停靠，表明实验1在满足相同需求情况下可以减少停靠次数，进而减少对现有列车运行图的影响，其在运力运量灵活匹配效率方面具有明显的优势。由于京津城际铁路客流在节假日与平日存在差异，在实验3中将节假日的客流输入到联合优化模型。实验3目标函数迭代次数如图14所示，实验3在迭代次数上收敛速度与实验1相近，但目标函数低于实验1。实验3优化后列车停靠方案如图15所示，实验3的列车运行图中在早高峰安排了10辆大编组列车以满足节假日的客流需求，晚高峰仅有1列大编组列车，实验3的列车运行途中共产生7次停靠，其中早高峰增加停靠列车2列，

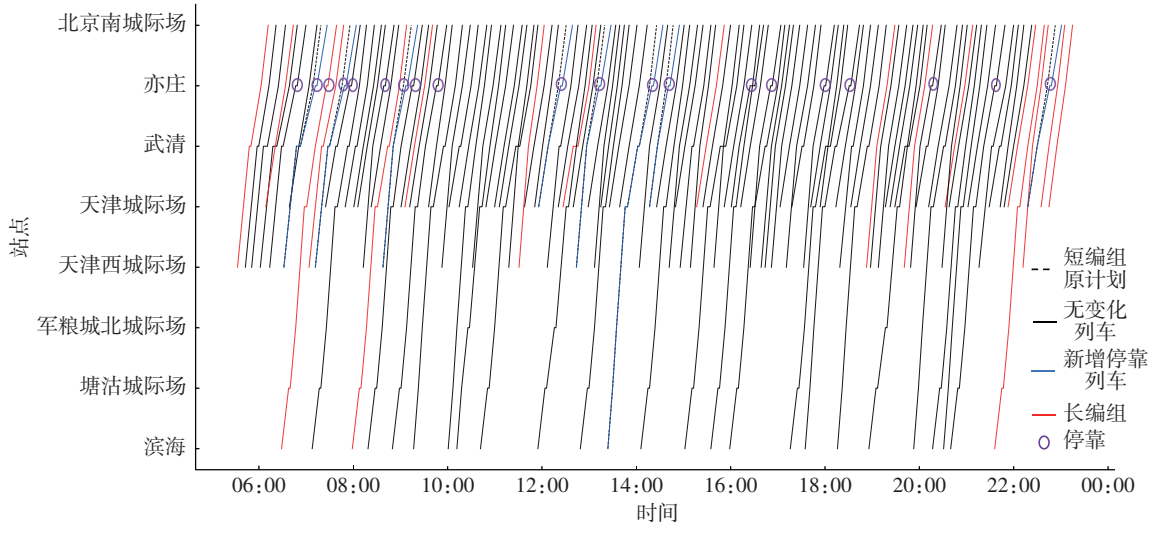


图9　优化前列车停靠与编组方案

Fig.9　Train stop and formation plan before optimization

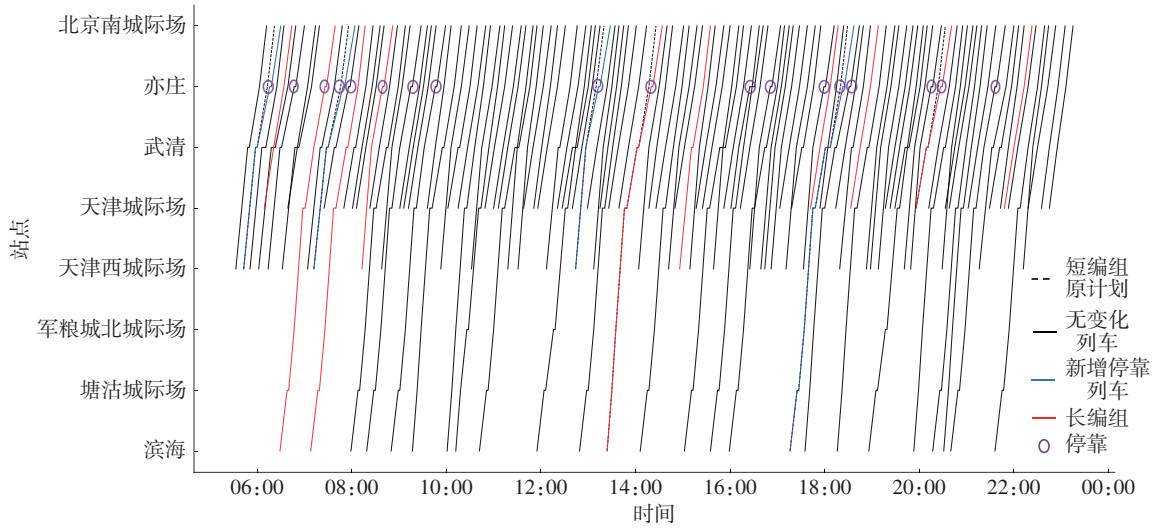


图10　优化后列车停靠与编组方案

Fig.10　Train stop and formation plan after optimization

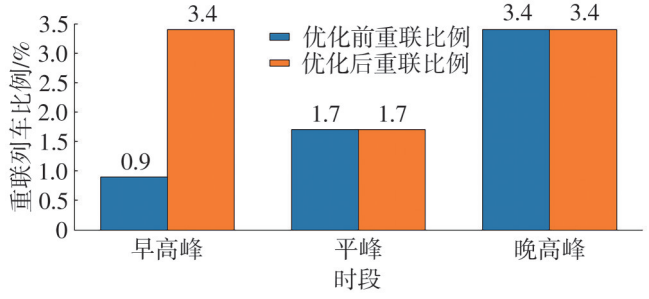


图11　优化前后重联列车比例对比

Fig.11　Comparison of coupled train ratios before and after optimization

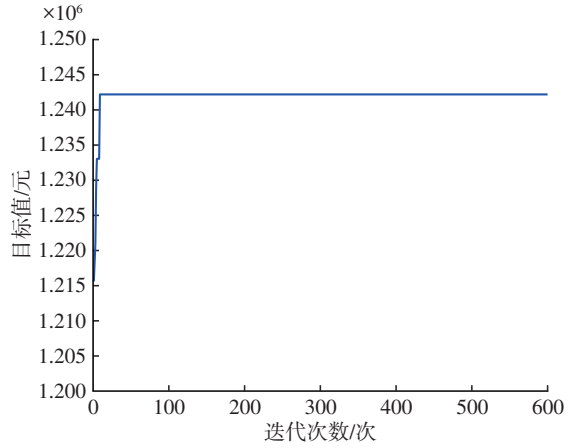


图12　实验2目标函数迭代次数

Fig.12　Objective function iterations for experiment 2

中午时段增加停靠列车3列，晚高峰增加停靠列车2列，与实验1相比在中午时段多增靠1列，表明不同时期的客流对编组影响较大，对停靠方案影响较小。

3　京津城际铁路亦庄站其他优化策略

亦庄站作为京津城际铁路服务通勤客流的重要节点，对区域经济的发展起着重要的推动作用，除了优化列车停靠与编组方案，还可从以下方面制定针对性的优化政策：一是加快四网融合，以提升接驳运力与换乘效率；二是深化票价政策，合理引导客流分布；三是依托政府与社会资本合作模式，激发旅游资源与交通协同发展的潜力，推动区域经济高质量发展。

3.1　加快四网融合，实现出行一体化服务

（1）协同优化时刻表，提升系统协同作业能力。国铁现有运行线路在高峰时段客座率已经超过100%，但各运营主体之间在车次调度和客流信息共享程度方面有待加强，运力与客流组织的联动效应尚未完全发挥，高峰时段换乘需求难以有效匹配，导致接驳效率较低，旅客出行体验受限。因此，应建立亦庄站运营协调管理机制，加强与城市交通之间的深度融合，通过整合各系统的时刻安排，提高不同交通系统之间的协同作业能力，实现车次、客流信息的共享与实时更新；在高峰期实时监控客流数据，结合智能调度系统，动态调整地铁、公交和出租车运力；强调灵活编组的作用，提高不同交通系统之间的适应能力，确保在高峰期间更好地满足旅客需求。

（2）优化交通接驳设计。借鉴“微中心”“小驿站”等先进规划理念，在亦庄站周边打造集换

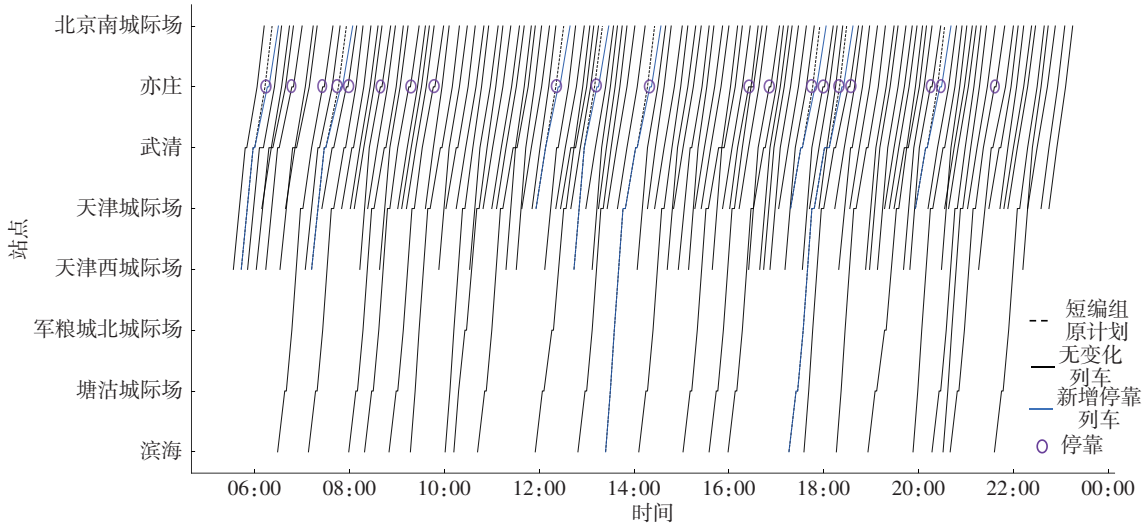


图13　实验2优化后列车停靠方案

Fig.13　Optimized train stop plan for experiment 2

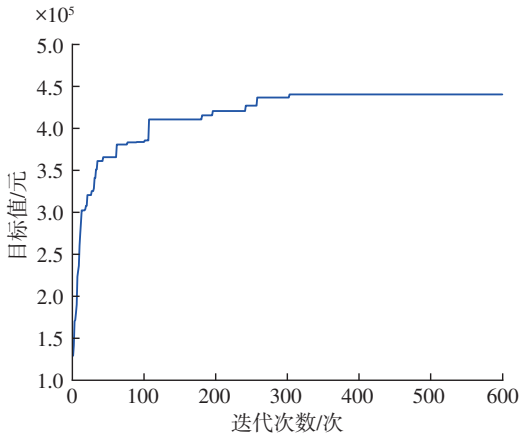


图14　实验3目标函数迭代次数

Fig.14　Objective function iterations for experiment 3

乘、休憩、商业服务为一体的综合性接驳空间，通过设置小型公交枢纽、优化公交站点布局及增设短驳线路，同时规划出租车和网约车专用上下客区域，合理分流不同交通方式。应加快推动地铁与国铁安检互认的实施，启动地铁与国铁连廊“多规合一”等规划手续，通过优化安检流程和设施，减少重复安检环节，结合换乘通道建设规划与流线组织优化，完善连廊设施等便捷换乘条件。

（3）实行跨线运营，提高运营效率。亦庄站作为京津城际铁路的重要新站点，所连接的城市轨道交通仅有一条亦庄线，相比于多线路、立体化的轨道交通网络，亦庄站的轨道交通衔接仍显不足，部

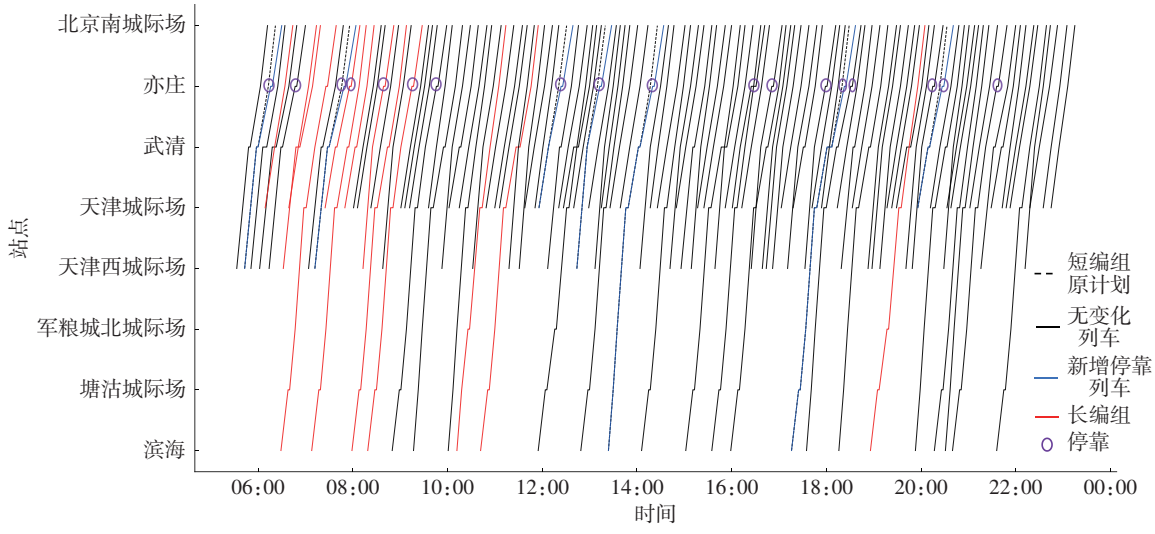


图15　实验3优化后列车停靠方案

Fig.15　Optimized train stop plan for experiment 3

分旅客无法便捷抵达目的地。应推动亦庄线与北京地铁17号线的跨线运营，17号线计划于2025年实现全线贯通，届时基于两线的交汇节点位于17号线次末端站，且17号线贯穿北京东部城区的南北方向，开通跨线运营(亦庄站—十里河站—工人体育场站)可以在对17号线整体客流影响较小的情况下，有效缩短亦庄站旅客到CBD等核心区域的旅行时间，同时与多条轨道线路贯通，实现网络优化。

3.2　优化票价结构，制定优惠政策

（1）实行多策并施的票价机制。京津城际铁路凭借其高效的运营模式，已成为京津冀区域内主要通勤工具，尤其在武清和亦庄之间的通勤中占据了重要地位，除了针对跨城高频通勤群体建立梯度票价机制外，同样可以在非高峰时段推出折扣票价政策，以此引导出行需求错峰分布。

（2）构建适合低收入通勤群体的普惠性政策。通勤费用对于低收入群体构成了经济压力，以亦庄与武清的通勤人员为例，工作日往返2次，月度交通支出约为1 100元，这一费用在2024年北京居民平均消费支出中约占近30%，对于低收入家庭而言，这一比例已超出其可接受的经济负担范围，因此应对低收入群体制定具有针对性的票价支持政策。

3.3　提升旅游服务与公共交通的协同发展

（1）采用政府和社会资本合作(Public-Private Partnership，PPP)模式开发旅游资源。京津城际铁路客流结构主要由通勤和旅游2类构成，通勤出行集中于工作日高峰时段，而旅游出行更多集中于平峰时段，通过加强亦庄站对旅游客流的服务能力，在非高峰时段引导旅客上下车，可以避免高峰时段过度拥挤、平峰时段资源浪费，进而提升列车全天利用率，增强沿线区域的经济辐射能力。例如，亦庄站周围拥有南海子公园、博大公园及企业文化园等旅游资源，其中南海子公园是北京市最大的湿地公园，以及北京四大郊野公园之一，具有丰富的旅游价值，当前旅游资源与车站之间缺乏一体化开发。《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》指出：“推进能源、铁路、电信、水利、公用事业等行业自然垄断环节独立运营和竞争性环节市场化改革”。因此，开发亦庄站周围的旅游资源可采用政企协作机制，既减轻政府财政负担、充分发挥社会资本在运营效率方面的专业能力，又能够激发旅游资源与交通协同发展的潜力。

（2）开设旅游专线服务，打造文旅融合新地标。亦庄站周边旅游配套服务不够完善，接驳体系尚未健全，可以开通连接亦庄站与周围景区之间的直达接驳系统，将亦庄站候车区域打造为文化展示窗口，构建“车站+景区”的联动推广模式，定期举办非遗展览、湿地摄影大赛、湿地徒步等活动。

4　结束语

研究以京津城际铁路亦庄站为对象，探讨跨城通勤服务网络的核心矛盾。研究发现，当前运营中存在停站分布不均衡、联动运力未完全发挥等典型问题，为此建立了基于多模态协同的轨道交通列车停靠-编组动态耦合优化模型，以考虑停靠与编组联合策略后的服务总收益为目标，满足不同时段客流需求，缓解换乘枢纽的客流压力，提升系统整体的运行效率。以京津城际铁路为例，通过设计启发式算法对模型进行求解。结果表明：京津城际铁路需要在早高峰时段采用大编组列车释放线路能力，为亦庄站增加停站创造条件；同时通过量化列车班次停靠数量，均衡北京铁路枢纽主要车站的客流分布。最后，就加快四网融合与出行一体化、完善票价政策以及实施政府和社会资本合作模式开发旅游资源提出策略建议，提升亦庄站对客流的吸引力，带动周边区域的经济发展，实现整体网络的提质增效。后续研究亟需利用大数据挖掘亦庄站出入站旅客的出行时空特征，做好动态优化接驳组织，更好地支撑通勤效率的提升和区域经济的发展。

参考文献：

[1] 朱华晟，姚　飞，岳嘉琛. 高铁开通对沿线城市知识创新的影响：基于国内外文献的分析[J]. 世界地理研究，2024，33(8)：161-173.
ZHU Huasheng，YAO Fei，YUE Jiachen. High Speed Railways and Regional Knowledge Innovation：Based on the Literature Review[J]. World Regional Studies，2024，33(8)：161-173.

[2] 林雄斌，杨家文，孙东波. 都市区跨市公共交通规划与空间协同发展：理论、案例与反思[J]. 经济地理，2015，

35(9)：40-48.
LIN Xiongbin，YANG Jiawen，SUN Dongbo. Metropolitan Inter-Jurisdictional Public Transportation and Spatial Coordinated Development：Theory，Cases and Reflections[J]. Economic Geography，2015，35(9)：40-48.

[3] 林雄斌，卢　源. 都市区跨区域通勤特征与影响因素研究：以京津城际高铁为例[J]. 城市规划，2021，45(12)：104-113.
LIN Xiongbin，LU Yuan. Intercity Commuting in China's Metropolitan Area：The Case of Beijing-Tianjin Intercity High Speed Railway[J]. City Planning Review，2021，45(12)：104-113.

[4] 张　纯，马　畅. 基于租房数据的京津冀城市群跨城通勤特征及影响因素研究[J]. 地理科学进展，2024，43(5)：841-853.
ZHANG Chun，MA Chang. Characteristics of Inter-City Commuting and Influencing Factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Mega-Region Based on Housing Rental Data[J]. Progress in Geography，2024，43(5)：841-853.

[5] 王　超，郭　婷，武剑红，等. 北京市发展市郊铁路双环线构想研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(6)：74-79.
WANG Chao，GUO Ting，WU Jianhong，et al. Conception of Developing Suburban Double Loop Lines in Beijing[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(6)：74-79.

[6] 王德利. 市郊铁路建设与超大城市“1小时通勤圈”空间重构研究：基于环京通勤圈的实证分析[J]. 城市问题，2023(12)：70-77.
WANG Deli. Research on Spatial Structure Reconstruction of the One-Hour Commuting Circle around Beijing Led by Suburban Railway[J]. Urban Problems，2023(12)：70-77.

[7] 王　荻，许　劼. 高铁城际人流视角下的都市圈空间联系格局重构：以长三角沪宁沪杭走廊为例[J]. 上海经济，2022(4)：61-78.
WANG Di，XU Jie. The Reconstruction of the Inter-Urban Network from the Approach of High Speed Rail Passenger Flow：Evidence from Shanghai-Nanjing and Shanghai-Hangzhou Corridor in the Yangtze River Delta[J]. Shanghai Economy，2022(4)：61-78.

[8] 王　垚，钮心毅，李志鹏. 苏沪跨城通勤的影响因素与作用机制初探[J]. 城市规划，2023，47(2)：58-66.
WANG Yao，NIU Xinyi，LI Zhipeng. A Preliminary Study on the Influencing Factors and Mechanism of Inter-City Commuting between Suzhou and Shanghai[J]. City Planning Review，2023，47(2)：58-66.

[9] SUH S H. The Possibility and Impossibility of Intercity Commuting[J]. Journal of Urban Economics，1988，23(1)：86-100.

[10] DUARTE C M，FERNÁNDEZ M T. The Influence of Urban Structure on Commuting：An Analysis for the Main Metropolitan Systems in Spain[J]. Procedia Engineering，2017，198：52-68.

[11] 蓝　宏，荣朝和. 日本东海道新干线对城市群人口和产业的影响及启示[J]. 经济地理，2017，37(8)：93-98.
LAN Hong，RONG Chaohe. Influence and Enlightenment of Tokaido Shinkansen on City Cluster Industry and Population Distribution[J]. Economic Geography，2017，37(8)：93-98.

[12] 金　安. 同城背景下城际交通特征演变趋势及发展对策[J]. 铁道运输与经济，2017，39(4)：84-89.
JIN An. Characteristics Evolution Trend and Development Countermeasures of Inter-City Transit under City Integration[J]. Railway Transport and Economy，2017，39(4)：84-89.

[13] 张学良，聂清凯. 高速铁路建设与中国区域经济一体化发展[J]. 现代城市研究，2010，25(6)：7-10.
ZHANG Xueliang，NIE Qingkai. High Speed Rail Construction and the Regional Economic Integration in China[J]. Modern Urban Research，2010，25(6)：7-10.

[14] 才　溢. “四网融合”背景下市域(郊)铁路衔接地铁客流服务研究[J]. 智慧轨道交通，2024，61(5)：99-104.
CAI Yi. Study on the Service to Passenger Flow Transferred between Urban (Suburban) Railway and Metro under the Background of “Integration of Four Networks”[J]. Intelligent Rail Transit，2024，61(5)：99-104.

[15] 孙　宝. “四网融合”理念下无锡市域(郊)铁路规划研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(5)：183-191，218.
SUN Bao. Research on the Urban (Suburban) Railway Planning of Wuxi under the Concept of “Four Networks Integration”[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(5)：183-191，218.

[16] 北京交通发展研究院. 2022北京市交通发展年度报告[R]. 北京：北京交通发展研究院，2022.

[17] 北京交通发展研究院. 2023北京市交通发展年度报告[R]. 北京：北京交通发展研究院，2023.

[18] 北京交通发展研究院. 2024北京市交通发展年度报告[R]. 北京：北京交通发展研究院，2024.

[19] 张群琛. 轨道连通京津冀[N]. 北京城市副中心报，2023-06-28(4).

(责任编辑　金　颖)