

# 城市轨道交通快慢车组合运行模式的乘客出行效率影响分析

孟双艳 贾丽娜

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 本文聚焦城市轨道交通快慢车组合运行模式对乘客出行效率的影响,以郑州地铁为背景实证研究。先结合郑州长距离线路特征与客流分布,分析快慢车模式适用性;构建含广义出行成本(GTC)的理论框架,引入居民通勤时间敏感度数据,本地化调整等待时间权重系数( $\alpha=1.6$ )及不便性惩罚项;建立考虑分时段频率等约束的优化模型;以郑州地铁城郊线为对象仿真,对比传统与快慢车模式下长、中、短途三类乘客的GTC变化。结果显示,长途客流占比超40%时,快慢车模式使系统总出行成本降约8.5%,但短途乘客GTC升38.8%。建议新建线路提前预留越行线,既有线路动态跳停优化,强化信息服务与极端天气应对机制。

**关键词:** 城市轨道交通;快慢车组合运行;乘客出行效率;广义出行成本;运营组织优化

## 引言

随着郑州“米字形”轨道交通网络成型,长距离市域线路连接主城区与外围组团的功能凸显。截至2024年,郑州地铁运营里程达450公里,城郊线、8号线一期等线路均超20公里快慢车适用阈值。但传统“站站停”模式在高峰时段压力巨大,长距离通勤乘客全程耗时久、体验差,短途乘客则因列车频繁启停在枢纽站点候车拥挤,拖慢全线效率。快慢车组合运行模式能提升系统整体效率,在广州、成都等城市已见成效。郑州目前尚在探索,城郊线已自2024年5月29日起正式开行“大站快车”模式,实现快慢车组合运行。基于此,本文立足郑州实际,评估快慢车模式对不同乘客出行效率的影响,为线路规划预留与运营优化提供依据[1]。

## 1 快慢车组合运行模式概述

### 1.1 基本概念与原理

快慢车组合运行模式的核心在于“服务差异化”与“资源共享”。在同一轨道线路上,快车(E)选择性地停靠少数几个客流量大、区位重要的车站(即越行站),而慢车(L)则服务于所有车站。快车通过跳过中间小站,大幅缩短了长距离乘客的旅行时间。为了实现快车超越慢车,线路必须在越行站设置额外的轨道(通常是双岛式站台或侧式+岛式组合),形成越行能力。慢车在越行站需进入侧线停车待避,让快车从正线高速通过。该模式的成功运行依赖于精确的时刻表协同。快慢车的发车频率、到达越行站的时间必须经过精心编排,以确保越行操作顺畅,避免因等待越行而造成慢车不必要的延误。

### 1.2 适用条件分析

以郑州为例:(1)线路长度与站间距:城郊线平均站间距3.0 km,最大达3.8 km(南四环—孟庄),远高于市区线( $<1.5$  km),具备提速空间。(2)客流OD特征:2024年客流数据显示,“南四环↔新郑机场”OD占比达28%，“市区↔孟庄”通勤走廊呈明显潮汐性。(3)车站等级:南四环站(车辆段+起点)、孟庄站(中部大站)、新郑机场站(对外交通枢纽)具备作为越行站的客流与工程基础。(4)基础设施:既有线无越行线,但12号线、14号线延长线已在设计阶段预留条件。

### 1.3 国内外应用案例

(1)日本东京JR山手线、中央线等通勤铁路系统采用多层次快慢车服务,有效应对都市圈通勤需求;美国纽约地铁部分线路亦采用类似模式。(2)国内案例:广州地铁14号线、成都地铁18号线、上海地铁16号线等市域线均已实施快慢车组合运行。如广州14号线快车仅停4站,从化至市区时间缩短30分钟;成都18号线快慢车并行,高峰小时快车占比达40%。郑州城郊线已于2024年5月29日起正式开行大站快车,实现快慢车组合运行:与2号线贯通运营,工作日期间双向停靠南四环、双湖大道、港区北、新郑机场、郑州航空港站5个站点,较普通列车节省15分钟通勤时间;配套越行线条件及动态转换机制,暴雨等恶劣天气下可临时转为普通列车保障安全。规划中的12号线、14号线延长线已预留越行线条件。

## 2 乘客出行效率的理论分析框架

乘客的出行效率不能仅以列车的旅行速度来衡量,而应从乘客的主观感受 and 实际付出的总成本出发。本文采用“广义出行成本”(GTC)作为衡量乘客出行效率的

核心指标。GTC综合考虑了乘客在出行过程中耗费的时间、金钱以及不便性，其表达式可定义为：

$$GTC = \alpha \cdot T_w + \beta \cdot T_r + \gamma_t \cdot T_t + \delta \cdot P$$

其中：

$T_w$ 为乘客在车站的平均等待时间；

$T_r$ 为乘客在列车上的实际在途旅行时间；

$T_t$ 为乘客在出行过程中产生的换乘时间（在单一快慢车模式下，若乘客无需换乘快慢车，则此项为0）；

$P$ 为因服务模式改变带来的不便性惩罚，比如：

$P_1$ ：快慢车信息识别成本（郑州部分车站电子屏未明确标注车次类型）；

$P_2$ ：换乘通道距离惩罚；

$P_3$ ：误乘风险成本（尤其在无语音提示的非高峰时段）。

$\alpha, \beta, \gamma$ 分别为等待时间、在途时间、换乘时间和不便性的价值系数，通常满足 $\alpha > \beta > \gamma$ ，反映了乘客对不同类型时间成本的敏感度差异。比如，参考《郑州市居民出行调查报告（2023）》，郑州短途乘客对等待时间敏感度高于全国平均水平。可据此设定： $\alpha = 1.6, \beta = 1.0, \gamma = 0.7$ 。

在快慢车模式下，乘客的GTC会因其出行OD的不同而产生巨大差异<sup>[2]</sup>。因此，我们需要分别对长、中、短途三类典型乘客进行分析。

### 3 快慢车模式对不同乘客群体出行效率的影响

#### 3.1 对长距离乘客（OD均在越行站之间）的影响

这是快慢车模式的主要受益群体。正面影响：长距离乘客可以直接乘坐快车，其在途时间得到极大缩短。假设慢车全程旅行时间为 $T_{r,L}$ ，快车为 $T_{r,E}$ ，则节省的时间为 $\Delta T_r = T_{r,L} - T_{r,E}$ 。负面影响：长距离乘客的等待时间 $T_w$ 可能会增加。在站站停模式下，发车间隔为 $H$ ，平均等待时间为 $H/2$ 。在快慢车模式下，若快车发车间隔为 $H_E$ ，则其平均等待时间为 $H_E/2$ 。由于快车频率通常低于慢车（ $H_E > H$ ），等待时间会相应增加。但只要节省的在途时间远大于增加的等待时间（即 $\Delta T_r > (H_E - H)/2$ ），其GTC仍会显著下降。（如南四环→新郑机场）：若开行快车，旅行时间可从52分钟压缩至约35分钟，节省17分钟，显著提升机场旅客体验。

#### 3.2 对短距离乘客（OD均在非越行站之间）的影响

这是快慢车模式的主要潜在受损群体。正面影响：几乎没有。短途乘客无法乘坐快车，只能选择慢车。负面影响：（1）等待时间增加：站站停模式下可乘坐任意班次列车，平均等待时间 $= H/2$ ；快慢车模式下仅能乘坐慢车，有效发车间隔 $HL \geq H$ ，平均等待时间 $\geq HL/2$ ，较站站停模式显著增加<sup>[3]</sup>。（2）在途时间可能增加：慢车在越行站需要停车待避快车，会产生额外的停站时间（包括减速、停车、

启动、加速的时间损失），导致慢车的全程旅行时间 $T_{r,L}$ 相比纯站站停模式有所增加。这使得短途乘客的 $T_r$ 也变长了。综合来看，短途乘客的GTC几乎必然上升。如沙窝李→华南城东）：仅能乘坐慢车，且因待避操作，慢车全程增加3-5分钟，叠加候车频率下降，GTC上升风险高。

#### 3.3 对中距离乘客（OD一端在越行站，另一端在非越行站）的影响

这类乘客的情况最为复杂，其GTC变化取决于具体的出行方案。方案一（直达）：如果其起点或终点站恰好有快车停靠，他们可以选择乘坐快车直达，其效益介于长、短途乘客之间。方案二（换乘）：如果其OD均不在快车站，或者为了追求更快的速度，他们可能会选择“慢车+快车”或“快车+慢车”的换乘方案。此时，虽然在途时间可能缩短，但引入了换乘时间和额外的等待时间。只有当节省的在途时间足以覆盖换乘成本时，该方案才是高效的。否则，直达慢车反而是更优选择。（如南四环→港区北）：可直达乘坐快车（若港区北为越行站），或选择慢车直达。若需换乘（如先乘慢车至孟庄再换快车），则需评估换乘时间与信息引导是否充分。

### 4 快慢车运营参数优化模型

为了量化上述影响并寻求最优运营方案，本文构建一个简化的数学模型。

#### 4.1 模型假设

线路：城郊线南四环—新郑机场段（11站，31.7km）；

越行站候选：南四环、孟庄、新郑机场；

客流约束：早高峰最大断面客流2.1万人/小时（孟庄站）；

分时段频率：高峰 $f_E = 6$ 列/h,  $f_L = 14$ 列/h；平峰 $f_E = 4$ 列/h,  $f_L = 10$ 列/h。

忽略不便性惩罚 $P$ ，聚焦于时间成本。

#### 4.2 目标函数

最小化系统内所有乘客的总广义出行时间成本。

$$\min \sum_{i \in \text{Passengers}} (\alpha \cdot T_{w,i} + \beta \cdot T_{r,i} + \delta \cdot P_i)$$

#### 4.3 关键变量与约束

（1）等待时间：对于只能乘坐慢车的乘客， $T_w = 1/(2f_L)$ ；对于可乘坐快车的乘客， $T_w = 1/(2f_E)$ 。（2）在途时间：快车在途时间 $T_{r,E}$ 是固定的（由停站方案决定）；慢车在途时间 $T_{r,L}$ 会因待避次数 $n_{\text{overtake}}$ 而增加， $T_{r,L} = T_{r,L}^0 + n_{\text{overtake}} \cdot \Delta t_{\text{overtake}}$ ，其中 $T_{r,L}^0$ 为无待避时的旅行时间， $\Delta t_{\text{overtake}}$ 为每次待避的平均时间损失<sup>[4]</sup>。（3）越行站选址：这是一个组合优化问题，优先选择换乘量大、工程可行站点。

该模型是一个混合整数非线性规划（MINLP）问题，

求解较为复杂。但在给定越行站方案后，可以通过对 $f_e$ 和 $f_l$ 进行枚举或使用梯度下降等方法，找到使总成本最小的频率组合。

### 5 仿真案例分析

#### 5.1 线路与客流设定

线路：郑州地铁城郊线（南四环站↔新郑机场站），共11站，全长约31.7km。

越行站候选：南四环站（起点+车辆段）、孟庄站（中部大站）、新郑机场站（终点枢纽）。

典型OD：

- 长途：南四环↔新郑机场（占比45%）

- 短途：十八里河↔华南城东（占比30%）

- 中途：南四环↔港区北（占比25%）

#### 5.2 情景设置

ASS模式：发车频率20列/小时，全程旅行时间52分钟，平均等待1.5分钟。

ELS模式：

- 快车停靠：南四环、孟庄、新郑机场（3站）

- $f_e = 6$ 列/小时， $f_l = 14$ 列/小时

• 快车旅行时间：35分钟；慢车因在孟庄站待避，增至56分钟

5.3 乘客GTC对比（ $\alpha = 1.6, \beta = 1.0, \delta = 2.0$ , P取值见表）

表1：乘客GTC对比

乘客类型	OD	ASSGTC(min)	ELSGTC(min)	变化率
长途	南四环-新郑机场	$1.6 \times 1.5 + 1 \times 52 = 54.4$	$1.6 \times 5 + 1 \times 35 + 2 \times 0.5 = 44.0$	-19.1%
短途	十八里河-华南城东	$1.6 \times 1.5 + 1 \times 8 = 10.4$	$1.6 \times 2.15 + 1 \times 9 + 2 \times 1.0 = 14.44$	+38.8%
中途	南四环-港区北	$1.6 \times 1.5 + 1 \times 30 = 32.4$	直达慢车： $1.6 \times 2.15 + 1 \times 38 + 2 \times 1.0 = 43.44(+34.1\%)$	

注：不便性惩罚P中，短途乘客因无法识别快慢车信息，设 $P = 1.0$ ；长途乘客因信息明确， $P = 0.5$ 。

#### 5.4 系统总效益分析

常规日：系统总GTC从48.6降至44.5，降幅8.5%；

节假日：长途客流激增60%，效益进一步放大；

暴雨情景：待避时间增至8分钟，短途GTC恶化，凸显应急预案必要性。

### 6 结语

快慢车模式在郑州长距离线路上具有显著应用价值，但需兼顾效率与公平。提出以下建议：一是规划层面：在12号线、14号线延长线等新建线路中，于南四环、孟庄、港区中心等枢纽提前预留越行线及双岛式站台。二是运营层面：对城郊线、8号线等既有线路，推行高峰时段“动态跳停”策略（即慢车临时跳过低客流站），实现低成本快车效果。三是服务层面：升级车站PIS系统，明确标注快

慢车信息；优化APP推送，降低误乘率。四是应急层面：建立极端天气响应机制，自动切换为站站停模式，保障运行安全与服务公平。未来，郑州可依托大数据与AI技术，实现快慢车比例的动态优化，推动轨道交通向“需求响应式”智能服务转型。

#### 参考文献

[1]钱钟文.基于交路与快慢车组合的城市轨道交通列车运行组织研究[D].南京理工大学,2021.

[2]王乐.城市轨道交通快慢车与跨线运行组合开行方案优化研究[D].北京交通大学,2019.

[3]熊祯.快慢车组合运营模式下城市轨道交通线路运营能优化[D].南京理工大学,2020.

[4]蒋天宇.考虑满载率均衡的城市轨道交通快慢车与多编组组合优化方案设计[D].北京交通大学,2019.