

文章编号: 1003-1421(2026)09-0096-10

引用格式: 宋唯维, 石建文, 叶玉玲, 等. 多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置影响因素及作用机理研究[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(9): 96-105.

SONG Weiwei, SHI Jianwen, YE Yuling, et al. Study on Influencing Factors and Interaction Mechanisms of Arrival and Departure Track Configuration for Suburban Railway under Multi-Network Integration[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(9): 96-105.

多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置影响因素及作用机理研究

宋唯维^{1, 2}, 石建文³, 叶玉玲⁴, 余攀⁵, 陈聪聪^{4, 6}

(1. 宁波大学 科学技术学院, 浙江 宁波 315300; 2. 宁波港产城文融合高质量发展研究院, 浙江 宁波 315300; 3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 咨询公司, 湖北 武汉 430063; 4. 同济大学 交通学院, 上海 201804; 5. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 线站院, 湖北 武汉 430063; 6. 山东交通学院 轨道交通学院, 山东 济南 250357)

摘 要: 为了揭示多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置的关键影响因素及其相互作用机理, 建立基于FISM-MICMAC的到发线设置影响因素分析模型。通过从跨线列车条件、客流条件、线路技术条件、运输组织和技术经济条件5个方面系统识别影响因素, 运用FISM方法构建影响因素层次结构模型并开展作用路径分析, 结合MICMAC方法对各因素的驱动性与依赖性进行分类, 识别出多网融合条件下到发线设置的根本因素和直接因素。结果表明: 客流需求、车站分布、快车停站方案和快车越行模式为根本影响因素; 线路通过能力、工程投资与建设难度、越行功能车站设计、快车过站速度以及快慢车开行数量和比例等为直接影响因素。研究揭示了多网融合条件下到发线设置决策的作用传导机制, 可为多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置提供参考。

关键词: 多网融合; 市域(郊)铁路; 到发线; 影响因素; FISM方法; MICMAC方法

中图分类号: U291.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251208002

Study on Influencing Factors and Interaction Mechanisms of Arrival and Departure Track Configuration for Suburban Railway under Multi-Network Integration

SONG Weiwei^{1, 2}, SHI Jianwen³, YE Yuling⁴, YU Pan⁵, CHEN Congcong^{4, 6}

(1. College of Science & Technology, Ningbo University, Ningbo 315300, Zhejiang, China; 2. Ningbo Port-City-Culture Integrated High-Quality Development Research Institute, Ningbo 315300, Zhejiang, China; 3. Consulting Company, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China; 4. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China; 5. Design and Research Institute of Railroads and Station, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China; 6. School of Rail Transportation, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, Shandong, China)

收稿日期: 2025-12-08

通信作者: 陈聪聪(1984—), 女, 山东烟台人, 山东交通学院轨道交通学院副教授。

基金项目: 上海市自然科学基金项目(22ZR1465800); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究开发计划项目(2022K011)

Abstract: To reveal the key influencing factors of arrival and departure track configuration for suburban railway under multi-network integration and their interaction mechanisms, an influencing factor analysis model based on FISM-MICMAC was developed. Potential influencing factors were systematically identified from five dimensions: inter-line train conditions, passenger flow conditions, line technical conditions, transport organization, and technical and economic conditions. The FISM method was used to construct a hierarchical structure model of influencing factors and conduct an action path analysis. Combined with the MICMAC method, the driving power and dependence of each factor were classified, and the root factors and direct factors affecting the arrival and departure track configuration under multi-network integration were identified. The results show that passenger demand, station distribution, express train stopping scheme, and express train overtaking mode are root influencing factors; line passing capacity, engineering investment and construction difficulty, overtaking function station design, express train passing speed, and the number and proportion of express and local trains are direct influencing factors. The study reveals the action transmission mechanism of decision-making on the arrival and departure track configuration under multi-network integration, and can provide a reference for the configuration of the arrival and departure tracks of the suburban railway under multi-network integration.

Keywords: Multi-Network Integration; Suburban Railway; Arrival and Departure Track; Influencing Factor; FISM Method; MICMAC Method

0 引言

当前国家层面正加快推进城市群与都市圈多层次轨道交通融合发展。市域(郊)铁路作为“四网融合”中功能定位最为多变的关键层次^[1], 普遍采用快慢车混跑的运输组织模式^[2-3], 需在沿线车站设置越行点以满足列车越行需求^[4]。到发线是支撑市域(郊)铁路越行功能的核心配线设施, 设置布局方案直接影响线路运营效率、应急能力和全生命周期成本。

近年来, 业内对于市域(郊)铁路到发线设置进行了很多相关研究, 宋唯维等^[5]构建了市域(郊)列车越行点选择模型; 陈阳等^[6]系统论证了2种越行模式在越行站设置方面的具体差异和适应条件; 周宏昌^[7]以重庆大足线为例, 对越行站的站型和越行速度进行综合比选; 李智基等^[8]分析了市域(郊)铁路不同车站的布置差异性; 高国飞等^[9]对市域快轨快慢车运营模式下的越行节省时间计算方法展开研究; 姚燕明等^[10]探讨了宁波市域铁路象山线的到发线设置方案; 文献[11-13]研究了市域(郊)铁路的到发线有效长的相关问题。

将多网融合限定在轨道交通领域, 在既有研究基础上, 聚焦多网融合条件下尤其是跨线列车运营场景下的市域(郊)铁路到发线设置问题, 采用模糊解释结构模型方法(FISM)与交叉影响矩阵相乘法

(MICMAC)结合的方法(以下简称“FISM-MICMAC模型”)系统分析市域(郊)铁路到发线设置的影响因素, 揭示各影响因素作用机理与交互关系, 为到发线优化设置提供理论依据。

1 研究方法 with 实施步骤

1.1 模糊解释结构模型

FISM模型用于识别和量化到发线设置中的关键影响因素, 同时处理影响因素之间的模糊关系, 模型构建分为如下步骤。

步骤1: 识别并确定影响因素集合 S 。

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (1)$$

式中: s_i 为第 i 个影响因素; n 为影响因素的总数。

步骤2: 应用三角模糊数构建模糊关联矩阵。三角模糊数 $\tilde{N}$ 定义为三重集合 (l, m, r) , 即 $\tilde{N} = (l, m, u)$, 隶属度函数 $\mu_{\tilde{N}}(x)$ 定义如式(2)所示。

$$\mu_{\tilde{N}}(x) = \begin{cases} 0 & x < l \\ (x - l)/(m - l) & l \leq x \leq m \\ (r - x)/(r - m) & m \leq x \leq r \\ 0 & x > r \end{cases} \quad (2)$$

式中: l , m 和 r 分别为三角模糊数的左端点值、可能值和右端点值, 且满足 $l \leq m \leq r$; x 为评价值。

运用德尔菲法获取各影响因素间的三角模糊数, 语言类模糊集与三角模糊数的对应关系如表1所示^[14]。

表1 语言类模糊集与三角模糊数的对应关系

Tab.1 Correspondence between linguistic fuzzy sets and triangular fuzzy numbers

语言项	三角模糊数
影响极大(VH)	(0.75, 1.0, 1.0)
影响大(H)	(0.5, 0.75, 1.0)
影响小(L)	(0.25, 0.5, 0.75)
影响极小(VL)	(0, 0.25, 0.5)
没有影响(N0)	(0, 0, 0.25)

基于专家问卷结果构建三角模糊关联矩阵 $\tilde{D}^k$, 三角模糊数 $\tilde{d}_{ij}^k = (l_{ij}^k, m_{ij}^k, r_{ij}^k)$ 代表专家 $k(k=1, 2, \dots, n)$ 对影响因素 s_i 与 s_j 间作用程度的模糊评价。三角模糊关联矩阵 $\tilde{D}^k$ 如式(3)所示。

$$\tilde{D}^k = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \tilde{d}_{1n}^k \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{d}_{n1}^k & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

采用去模糊化清晰值计算法(Clearing Function based on Crisp Score, CFCS)^[15]进行三角模糊矩阵去模糊化, 获得模糊关联强度矩阵 D 。

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

步骤3: 模糊关联强度矩阵 D 布尔化, 生成邻接矩阵 C 。确定阈值 λ , 筛选模糊关联强度矩阵 D , 满足以下条件。

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & d_{ij} \geq \lambda \\ 0 & d_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

步骤4: 生成可达矩阵 M 。按照布尔矩阵运算准则, 将邻接矩阵 C 与单位矩阵 I 相加, 并进行幂运算, 当矩阵 M 满足下列条件时, 即可得到邻接矩阵 C 对应的可达矩阵 M 。

$$M = (C + I)^{k+1} = (C + I)^k \neq (C + I)^{k-1} \neq \cdots \neq (C + I)^2 \neq (C + I) \quad (6)$$

步骤5: 划分影响因素层级, 建立FISM模型。基于可达矩阵的 M 相关参数, 利用式(7)—(9)求解可达集 $R(s_i)$ 、先行集 $A(s_i)$ 和交集 $Q(s_i)$ 。基于层级划分结果绘制多级递阶结构图, 构建FISM模型。

$$R(s_i) = \{s_j | s_j \in S, s_{ij} = 1\} \quad (7)$$

$$A(s_j) = \{s_i | s_i \in S, s_{ij} = 1\} \quad (8)$$

$$Q(s_i) = \{s_i | s_i \in S, R(s_i) \cap A(s_j) = R(s_i)\} \quad (9)$$

1.2 交叉影响矩阵相乘模型

基于可达矩阵 M 开展MICMAC分析, 各影响因素的驱动力 D_i 由其可达矩阵 M 中对应行中是1的元素个数表示, 如式(10)所示; 各影响因素的依赖性 R_j 由其可达矩阵 M 中对应列中是1的元素个数表示, 如式(11)所示。MICMAC的分析结果通过MICMAC集群分类图表示。

$$D_i = \sum_{j=1}^n s_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n s_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

1.3 FISM-MICMAC方法实施流程

应用FISM-MICMAC方法开展到发线设置影响因素分析, 流程分为3步。到发线设置影响因素分析实施流程如图1所示。

(1) 识别影响因素: 通过案例和文献调研, 初步筛选影响因素, 经专家访谈确定最终影响因素集合。

(2) 构建FISM模型: 依托专家问卷构建三角模糊关联矩阵, 去模糊化后设定阈值得到邻接矩阵, 推导可达矩阵并完成层级划分, 构建FISM模型。

(3) MICMAC集群分类: 基于可达矩阵计算各影响因素的驱动力和依赖性, 分别作为横、纵坐标, 生成MICMAC集群分类图。

2 到发线设置影响因素识别

结合案例、文献及行业、地方等各级设计标准, 从跨线列车条件、客流条件、线路技术条件、运输组织、技术经济条件5个方面初筛出30个到发线设置影响因素, 邀请高校、科研设计单位、建设运营单位和政府相关管理部门的9位专家进行问卷调查, 并结合专家意见修正清单。

影响因素筛选遵循“相关性、独立性、可操作性、一致性”原则, 优先保留直接因素, 合并语义重叠或高度相关因素, 将派生性指标归入上位因素, 最终确定18个到发线设置影响因素如表2所示。

3 FISM-MICMAC模型构建

3.1 FISM模型构建

3.1.1 构建模糊关联矩阵

针对18个到发线设置最终影响因素, 汇总分

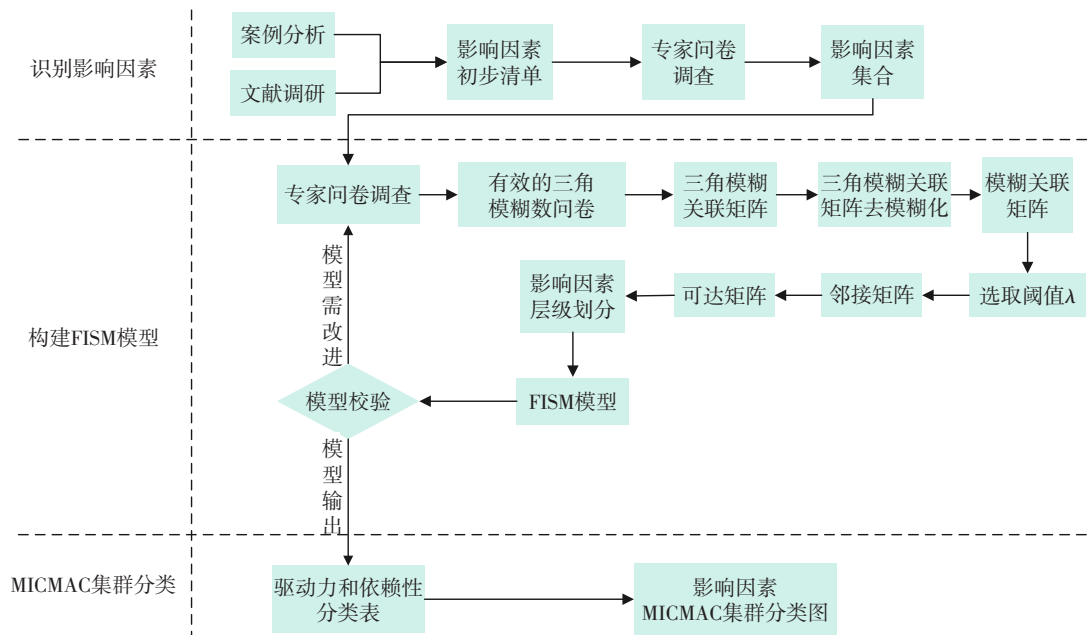


图1 到发线设置影响因素分析实施流程

Fig.1 Implementation process of influence factors analysis for arrival and departure track configuration

表2 到发线设置影响因素

Tab.2 Influencing factors of arrival and departure track configuration

序号	类别	初选影响因素	处理结果	去向(最终影响因素)	依据
1	跨线列车条件	列车性能差异	合并	跨线列车参数与性能 O_1	同源参数
2		列车长度差异	合并		同源参数
3		列车开行类型和数量	保留		关键因素
4	客流条件	客流需求	保留	客流需求 O_3	关键因素
5		客流特征	合并		派生指标
6		客运量	合并		派生指标
7	线路技术条件	线路通过能力	保留	线路通过能力 O_4	关键因素
8		运输能力	合并	线路设计标准 O_5	语义重叠
9		敷设方式	合并	车站分布 O_6	派生指标
10		线路技术标准	合并	线路设计标准 O_5	关键因素
11		越行站站型	合并	越行功能车站设计 O_7	同源参数
12		车站数量与分布	合并	车站分布 O_6	关键因素
13		列控系统类型	保留	列控系统类型 O_8	关键因素
14		远期列车编组长度	保留	远期列车编组长度 O_9	关键因素
15		车站类型	合并	车站设置到发线技术条件 O_{10}	条件综合
16	运输组织	快慢车开行数量	合并	快慢车开行数量与比例 O_{11}	同类参数
17		快慢车开行数量比例	合并		同类参数
18		快慢车行车间隔	保留	快慢车间隔时间 O_{12}	关键因素
19		快车停站方案	保留	快车停站方案 O_{13}	关键因素
20		快车越行慢车模式	保留	快车越行模式 O_{14}	关键因素
21		慢车被不同快车越行次数	保留	慢车被越行频次 O_{15}	关键因素
22		快车过站速度	保留	快车过站速度 O_{16}	关键因素
23		快慢车速度差	保留	快慢车速度差 O_{17}	关键因素
24	技术经济条件	工程投资	合并	工程投资与建设难度 O_{18}	经济因素
25		工程规模	合并		经济因素
26		工程实施性	合并		工程难度表征
27		工程地质条件	合并		工程难度表征
28		工程建设难度	合并		工程难度表征
29		工程实施条件	合并		工程难度表征
30		设站条件	合并	车站设置到发线技术条件 O_{10}	条件综合

析9份匿名专家问卷,采用三角模糊数聚合评分, 糊关联矩阵,再通过CFCS方法,得到到发线设置对分歧较大条目二次核对统一口径后,构建三角模 影响因素的模糊关联矩阵 D_o ,如式(12)所示。

$$D_o = \begin{bmatrix} 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.71 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 1.08 & 1.08 & 0.24 & 0.24 & 0.61 & 0.24 & 0.71 & 0.24 & 1.08 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.08 & 1.36 & 1.08 & 0.81 & 0.81 & 0.61 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \\ 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 1.08 & 1.08 & 1.08 & 1.08 & 1.08 & 0.52 & 1.17 & 0.80 & 1.36 & 1.08 & 0.57 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \\ 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.71 & 1.36 & 0.61 & 0.71 & 0.80 & 1.08 & 0.24 & 0.52 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.08 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.71 & 0.57 & 0.24 & 0.52 & 0.61 & 0.71 & 0.24 & 1.08 & 0.24 & 1.36 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.08 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.61 & 0.24 & 0.24 & 0.52 & 1.36 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.71 & 0.61 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.61 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.71 & 1.36 \\ 1.08 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.61 & 0.24 & 1.17 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.08 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.52 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.17 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.71 & 0.24 & 1.17 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.61 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.61 & 0.24 & 0.24 & 0.52 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.52 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.71 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.52 & 0.24 & 0.80 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.71 & 0.24 & 0.24 & 0.52 & 0.24 & 0.24 & 0.52 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.61 & 0.71 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.80 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \\ 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 1.17 & 0.24 & 1.36 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 & 0.24 \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.1.2 邻接矩阵获取与可达矩阵构建

采用对比实验法确定阈值 λ ,设置阈值候选集合 $\lambda \in \{0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3\}$,逐一生成邻接矩阵与可达矩阵,综合对比网络稠密度、连通性、层级稳定性及路径可解释性。结果表明,在 $\lambda = 1.1$ 条件下,结构稠密度适中、未出现孤立影响因素,层级

划分清晰且关键因素层级较为稳定,能够兼顾信息真实性与结构可解释性,因此取 $\lambda = 1.1$ 。结合得到的到发线设置影响因素模糊关联矩阵 D_o ,依据式(5)计算得到到发线设置影响因素邻接矩阵 C_o ,如式(13)所示。

$$C_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

依据布尔矩阵运算规则,依据式(6)对 $C_o + I$ 矩阵进行幂运算,得到到发线设置影响因素可达矩阵 M_o ,如式(14)所示。

$$M_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.1.3 到发线设置影响因素层级划分

根据可达矩阵 M_o ，计算可达集、先行集和交集。确定最高层元素，随后将第一层影响因素从可达矩阵中移除，重复上述步骤，得到到发线设置影响因素层级划分如表3所示。

表3 到发线设置影响因素层级划分

Tab.3 Hierarchical classification of influencing factors for arrival and departure track configuration

层级	层级因素
L_1	$O_2, O_4, O_5, O_7, O_{11}, O_{12}, O_{15}, O_{16}, O_{18}$
L_2	$O_1, O_8, O_9, O_{10}, O_{17}$
L_3	O_{13}, O_{14}
L_4	O_3, O_6

3.1.4 构建到发线设置影响因素 FISM 模型

依据表3中的层级划分结果，梳理各层影响因素作用关系，绘制多层次递阶结构图，构建到发线设置影响因素的 FISM 模型如图2所示。

3.2 到发线设置影响因素 MICMAC 集群类别分布

基于可达矩阵 M_o ，依据式(10)—(11)对18个影响因素的驱动力和依赖性进行计算，得到到发线设置影响因素驱动力与依赖性如表4所示，到发线设置影响因素 MICMAC 集群类别分布如图3所示。

4 结果分析

4.1 FISM 模型分析

由图2可知，到发线设置影响因素呈4级递阶

结构，可划分为3组。

(1) 顶层影响因素组(L_1 层): 是到发线设置的直接影响因素，组内存在多组影响与交互关系， O_4, O_{18}, O_7 相互独立，对到发线设置影响最为直接。

(2) 底层影响因素组(L_3, L_4 层): O_3, O_6, O_{13} 和 O_{14} 自下而上逐层传导，客流需求、车站分布、本线和跨线快车的停站方案及越行模式是到发线设置的根本影响因素。

(3) 中间层影响因素组(L_2 层): 包含 O_8, O_{17} 等5项影响因素，衔接上下层传导路径，各因素间关系复杂，是到发线设置的关键影响因素。

4.2 MICMAC 分析

到发线设置的18个影响因素的驱动力与依赖性分布于不同象限。

第Ⅰ象限为自治因素集群，包含 O_1, O_9, O_{10}, O_{17} ，驱动力与依赖性均较低，位于 FISM 模型中层，相对独立，但在特定条件下可能成为系统稳定的隐患，在进行到发线设置方案设计中应予以重点关注。

第Ⅱ象限为独立因素集群，包含 $O_{13}, O_3, O_8, O_{14}, O_6$ ，驱动力高，依赖性低，多属于底层影响因素，对系统具有显著的牵引效应，其中 O_3 和 O_6 是到发线设置的最根本影响因素。

第Ⅲ象限为联系因素集群，无影响因素落入，表明系统各影响因素整体稳定性较好。

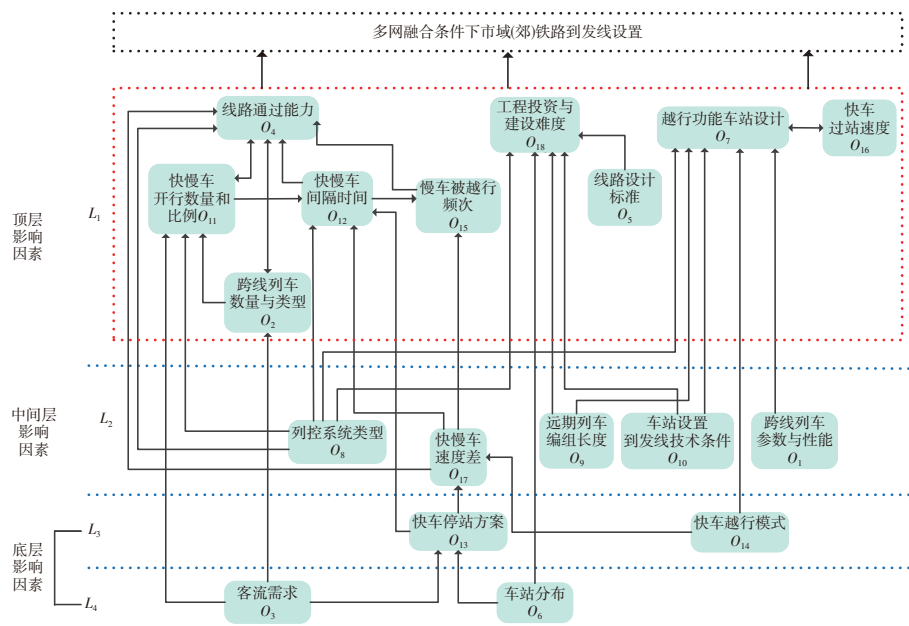


图2 到发线设置影响因素的FISM模型
Fig.2 FISM model of influencing factors for arrival and departure track configuration

表4 到发线设置影响因素驱动力与依赖性					
Tab.4 Driving power and dependence of influencing factors for arrival and departure track configuration					
影响因素 O_i	驱动力 D_i	依赖性 R_j	影响因素 O_i	驱动力 D_i	依赖性 R_j
O_1	5	1	O_{10}	5	1
O_2	5	11	O_{11}	5	11
O_3	8	1	O_{12}	5	11
O_4	5	11	O_{13}	7	3
O_5	4	10	O_{14}	11	1
O_6	12	1	O_{15}	5	11
O_7	4	10	O_{16}	4	10
O_8	10	1	O_{17}	6	5
O_9	5	1	O_{18}	4	10

第Ⅳ象限为依赖因素集群，包含 $O_2, O_4, O_{11}, O_{12}, O_{15}, O_5, O_7, O_{16}, O_{18}$ ，驱动力低，依赖性高，处在 FISM 模型顶层，对到发线设置有直接影响，应重视此类因素变化。

4.3 到发线设置影响路径及作用机理

基于 FISM 模型，得到各影响因素对到发线设置的作用路径。影响因素在 4 级递阶结构下的作用机理通过 5 个链条实现。

第 1 条作用路径：“客流需求与车站分布决定论”。路径 $L_3-L_2-L_1$ 中 $O_3, O_6, O_{13}, O_{17}, O_2, O_{11}, O_{12}, O_{15}, O_{18}$ 和 O_4 间的作用链。客流需求与车站分布首先决定了线路的服务水平目标与运输强度，并

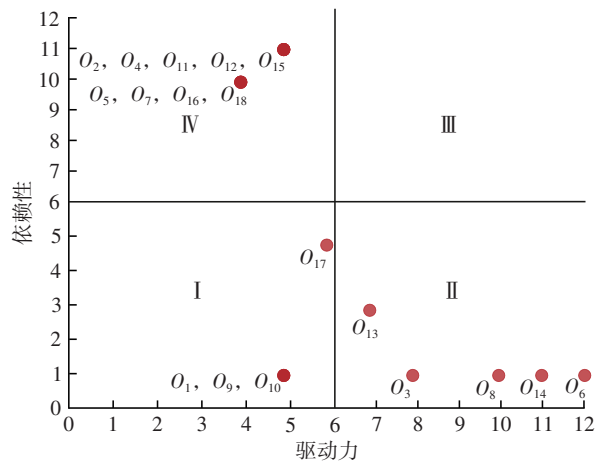


图3 到发线设置影响因素 MICMAC 集群类别分布
Fig.3 MICMAC cluster category distribution of influencing factors for arrival and departure track configuration

通过快车停站方案与快慢车速度差形成越行方案，使慢车被越行频次成为线路通过能力重要的校核指标。在有跨线列车开行条件下，跨线列车数量与类型会影响快慢车开行数量和比例以及快慢车间隔时间，提升线路越行作业的复杂性，在工程层面表现为线路通过能力和工程投资及建设难度的约束增强，从而影响到发线规模与功能配置方案。

第 2 条作用路径：“越行模式决定论”。路径 $L_3-L_2-L_1$ 中 $O_{14}, O_{17}, O_{12}, O_{15}, O_4$ 和 O_7 间的作用链。越行模式不同，越行组织方式和车站越行作业组织

形式不同,快慢车速度差增大或者快车占比提高均会增加慢车被越行的频次,使线路通过能力和列车运行图更为敏感,并通过越行功能车站的布置形式来约束到发线的设置方案。

第3条作用路径：“列控系统决定论”。路径 L_2-L_1 中 o_8 , o_{11} , o_{12} , o_4 , o_{18} 和 o_7 间的作用链。列控系统类型通过约束快慢车间隔时间与列车开行数量, 决定线路通过能力上限值。列控系统约束的行车间隔时间越大, 运行图可调整空间越小, 对越行的次数和越行功能车站的能力要求越高, 在工程层面表现为工程投资与建设难度以及越行功能车站设计的约束, 影响到发线的工程方案。

第4条作用路径：“列车性能和参数决定论”。路径 L_2-L_1 中 O_9 , O_{11} , O_{18} 和 O_7 间的作用链。列车编组长度、列车性能等参数决定到发线有效长和平纵断面的技术要求,在工程上体现为投资和建设难度的变化。同时影响越行站的站型和作业组织方式,最

终通过越行功能车站设计方案影响到发线设置方案。

第5条作用路径：“车站条件决定论”。路径 L_2-L_1 中 O_{10} 、 O_{18} 和 O_7 间的作用链。车站设置到发线技术条件体现在站坪长度、平纵断面条件等工程边界条件，对到发线的规模和功能配置具有刚性约束。在投资与建设难度的约束下，往往需要优化越行功能车站的方案，进而影响到发线设置方案。

通过到发线设置 FISM-MICMAC 模型和路径分析,得到客流需求与车站分布、越行模式、列控系统、列车和车站条件 5 个决定因子群的多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置机理如图 4 所示。

由图4可知,多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置机理表现为以下几个方面。

(1) 客流需求与车站分布通过影响行车组织中的快车停站方案、快慢车速度差等关键参数, 改变越行需求和到发线占用时间, 并通过工程投资与建设难度约束作用于到发线设置。

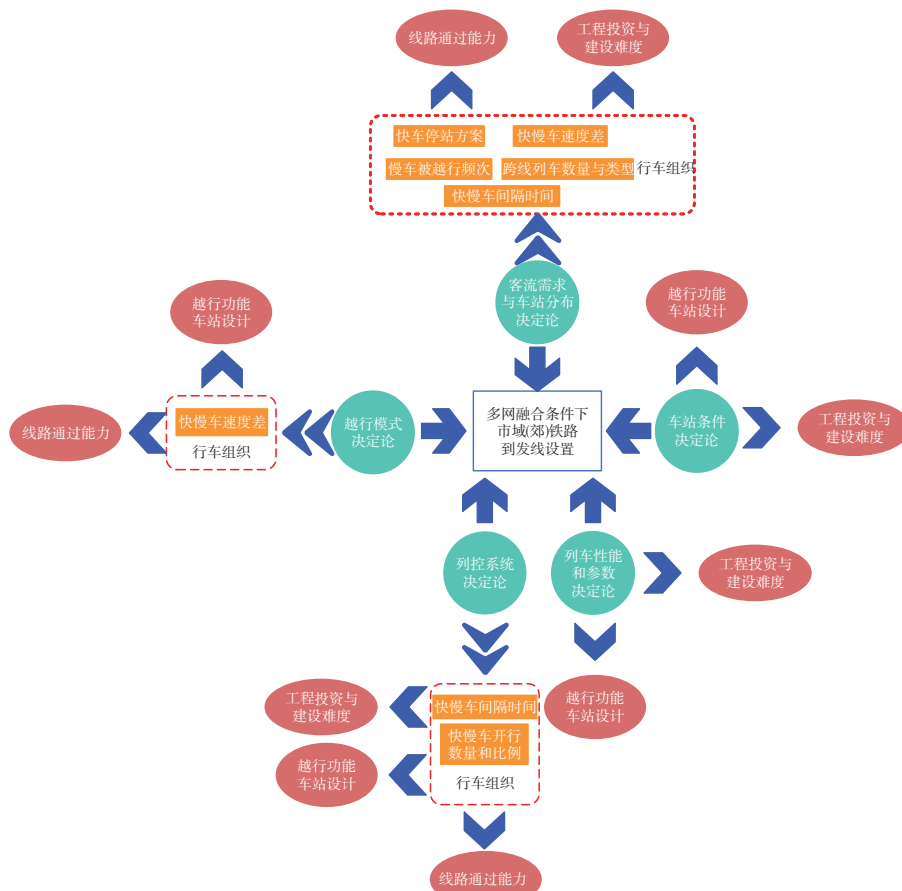


图4 多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置机理

Fig.4 Mechanism of arrival and departure track configuration for suburban railway under multi-network integration

(2) 越行模式(快车不停站越行、停站越行及混合式越行)通过影响快慢车速度改变越行组织模式与慢车被越行频次,使线路通过能力对运行图结构更为敏感,并直接约束越行功能车站设计,从而作用于到发线设置。

(3) 列控系统类型通过约束最小行车间隔时间和快慢车开行数量和比例,界定线路通过能力上限值,当列控系统约束偏紧时,越行冲突便向站内到发线占用转移,进而通过工程投资与建设难度和越行功能车站设计约束作用于到发线设置。

(4) 列车性能与参数通过约束越行作业条件和站场规模要求,直接作用于工程投资与建设难度,并对越行功能车站设计提出要求,进而影响到发线设置。

(5) 车站条件通过站坪长度、平纵断面条件等工程边界条件约束工程投资与建设难度并限制越行功能车站设计的可实施性,进而影响到发线设置。

5 到发线设置优化建议

基于到发线设置影响因素的FISM-MICMAC模型和得到的机理路径,提出多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置优化建议。

(1) 重点关注客流需求和车站分布。客流需求和车站分布是到发线设置的基础。在设计阶段,应准确预测客流模式、数量,识别高峰时段和客流分布特征,在既定车站分布基础上合理确定跨线和本线列车开行数量、快车停站方案、远期列车编组长度,并结合不同网络线路间的接驳关系合理确定跨线列车接入点。

(2) 规划合理的快车越行模式。多网融合条件下,特别是跨线列车共线运营条件下,应结合客流需求、车站分布、列车性能、快车潜在停靠点以及技术经济要求,规划合理的快车越行模式。越行模式直接影响快慢车的开行与停站策略,合理的越行模式有助于提高运营效率和服务水平,建议在到发线设置时考虑两种或多种越行模式冗余,增强运营的灵活性。

(3) 重点关注列控系统类型。列控系统选型应满足市域(郊)铁路需求并考虑多网融合形式和跨线衔接线路的兼容性。列控系统类型直接影响快慢车开行数量、间隔时间、到发线布局 and 有效长、线路

通过能力及越行功能车站设计和工程投资与建设难度,应统筹考虑列控系统类型与到发线的协同设计。

(4) 充分考虑本线和跨线列车性能和参数。规划设计阶段应结合本线和跨线列车的特性,采用协同设计策略,解决不同类型列车共线运营对到发线设置的影响问题,优化到发线设置。

(5) 关注线路的通过能力。规划设计阶段应充分考虑线路通过能力,制定合理高效的行车组织方案,优化越行点位置和越行功能车站配置,以满足客流需求并提高运营效率。

(6) 关注经济性和建设难度。规划设计阶段,应综合评估到发线的全生命周期成本,选择最经济性设计方案,并通过技术创新和改进施工技术降低建设难度和成本。在满足客流需求和服务标准的前提下,统筹优化本线和跨线列车的开行方案,优化快慢车开行频次和越行模式,减少越行功能车站数量,有效控制到发线的工程造价,降低工程建设难度。

6 结论

应用FISM-MICMAC模型,分析多网融合条件下市域(郊)铁路到发线设置的影响因素和作用机理,主要研究结论如下。

(1) 到发线设置影响因素呈4级递阶结构。根本影响因素包括:客流需求、车站分布、快车停站方案和快车越行模式;直接影响因素包括:线路通过能力、工程投资与建设难度、越行功能车站设计、快车过站速度、快慢车开行数量和比例、快慢车间隔时间、慢车被越行频次、线路设计标准和跨线列车数量与类型。

(2) 到发线设置的影响机理路径:客流需求与车站分布,越行模式,列控系统,列车性能和参数,车站条件。

(3) 到发线设置的优化建议:重点关注客流需求和车站分布,规划合理的快车越行模式,重点关注列控系统类型,充分考虑本线和跨线列车性能和参数,关注经济性和建设难度。

参考文献:

- [1] 余攀,宋唯维,陈友文.“四网融合”条件下市域(郊)铁路互联互通模式及技术要求探讨[J].综合运输,2022(6):44-48.

- YU Pan, SONG Weiwei, CHEN Youwen. Modes and Technical Requirements of Suburban Railway Interconnection under the Urban-Regional Rails Network Convergence[J]. China Transportation Review, 2022(6): 44-48.
- [2] 杨智轩, 韩宝明, 赵 鹏. 市域铁路列车运行组织探讨[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(4): 14-19.
- YANG Zhixuan, HAN Baoming, ZHAO Peng. Discussion on Train Operation and Organization of Suburban Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(4): 14-19.
- [3] 朱建昊, 陈军华, 郑 汉, 等. 多交路和快慢车协同运营的市域(郊)铁路通过能力评估方法[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(5): 247-258.
- ZHU Jianhao, CHEN Junhua, ZHENG Han, et al. Carrying Capacity Assessment Method for Coordinated Operation of Multi-Routing and Express/Local Trains in Urban(Suburban) Railways[J]. China Railway Science, 2025, 46(5): 247-258.
- [4] 徐 俊, 梁青槐, 韩 阔, 等. 市域快轨快慢车比例对越行站设置影响分析[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(9): 100-105.
- XU Jun, LIANG Qinghuai, HAN Kuo, et al. Analysis of the Influence of the Operation Proportion of Express/Local Trains on the Setting of Overtaking Stations in Regional Rapid Rail Transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(9): 100-105.
- [5] 宋唯维, 叶玉玲, 刘 楷, 等. 基于快慢车模式的市域(郊)列车越行点选择模型研究[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(1): 7-14.
- SONG Weiwei, YE Yuling, LIU Kai, et al. Research on Selection Model of Urban/Suburban Trains Overtaking Points under Fast-Slow Mode[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(1): 7-14.
- [6] 陈 阳, 陈福贵, 温念慈. 城市轨道交通快慢车越行模式研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(1): 149-155.
- CHEN Yang, CHEN Fugui, WEN Nianci. Overtaking Modes of Fast and Slow Trains in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(1): 149-155.
- [7] 周宏昌. 市域(郊)铁路快慢车运营组织模式下越行站以及越行速度方案研究: 以重庆市域(郊)铁路大足线为例[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(12): 17-24, 59.
- ZHOU Hongchang. Study on Overtaking Stations and Overtaking Speed Schemes under Operation and Organization Mode of Fast and Slow Trains in Suburban Railways: A Case Study of Dazu Line of Chongqing Suburban Railway[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(12): 17-24, 59.
- [8] 李智基, 代振环, 罗伟钊, 等. 市域(郊)铁路车站布置方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(6): 67-76.
- LI Zhiji, DAI Zhenhuan, LUO Weizhao, et al. Research on Layout Plans of Urban(Suburban)Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(6): 67-76.
- [9] 高国飞, 杜港德, 闫亚娜. 市域快轨快慢车模式越行节省时间研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(8): 65-73.
- GAO Guofei, DU Gangde, YAN Yana. Time Saving of Urban Rapid Rail Overtaking under Express and Slow Train Mode[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(8): 65-73.
- [10] 姚燕明, 王 韬, 宗二凯, 等. 基于快慢车模式的宁波市域铁路象山线配线方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 159-164, 169.
- YAO Yanming, WANG Tao, ZONG Er kai, et al. Track Allocation Scheme for Ningbo City Railway Xiangshan Line Based on Express/Local Train Operation Mode[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 159-164, 169.
- [11] 张友兵. 市域铁路车站股道有效长优化研究[J]. 铁道工程学报, 2025, 42(3): 65-69.
- ZHANG Youbing. Study on Optimization of Effective Length of Station Track in Urban Railway Stations[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2025, 42(3): 65-69.
- [12] 张继明, 周小辉, 吴 杉, 等. CTCS系统车站到发线有效长度优化方案研究[J]. 铁道通信信号, 2024, 60(12): 86-91.
- ZHANG Jiming, ZHOU Xiaohui, WU Shan, et al. Study on Optimization Scheme of the Effective Length of Station Arrival-Departure Line of CTCS System[J]. Railway Signalling & Communication, 2024, 60(12): 86-91.
- [13] 杨 俐. 上海市域铁路车站到发线有效长度设计优化方案研究[J]. 铁道通信信号, 2024, 60(9): 88-92.
- YANG Li. Research on the Scheme of Optimizing the Effective Length of Station Receiving-Departure Track in Shanghai Suburban Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2024, 60(9): 88-92.
- [14] WU W W, LEE Y T. Developing Global Managers' Competencies Using the Fuzzy DEMATEL Method[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(2): 499-507.
- [15] OPRICOVIC S, TZENG G H. Defuzzification within a Multicriteria Decision Model[J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2003, 11(5): 635-652.

(责任编辑 刘宁馨)