

面向区域一体化的多层次轨道交通网络耦合机制与协同发展策略研究

旷利平

湖南高速铁路职业技术学院, 中国·湖南 衡阳 421002

【摘要】伴随我国城镇化进程步入中后期,城市群与都市圈已成为要素流动的核心载体,跨行政边界的通勤与商务出行需求激增。干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路及城市轨道交通构成的四类轨道系统,虽在物理空间上逐步叠合,但在功能协同、标准统一、运营管理等方面仍存在显著割裂,“四网融合”作为国家交通战略的关键命题,其理论体系与量化工具尚显薄弱。本文立足网络科学和运输经济学交叉视角,首先厘清四类轨道交通的功能分层与衔接逻辑,系统梳理制约一体化发展的体制性、技术性与规划性障碍。继而构建多层次轨道交通融合度(Multi-layer Rail Integration Degree, MRID)的定量评价模型,从设施联通、运营协同、服务一体三个维度设置12项底层指标,并提出融合度与全网出行效能之间的非线性关联方程。经蒙特卡洛仿真与灵敏度分析发现:MRID存在显著阈值效应(阈值约0.63~0.68),跨过该阈值后网络效能呈超线性增长;跨线贯通比例每增加10%,全网平均在途时间压缩约7.9%~8.6%。在此基础上,设计“标准趋同→制式兼容→票务贯通→治理一体”的四阶递进路径,并以某湾区近三年实践数据进行实证检验,验证了模型的有效性与路径的可行性。研究成果可为都市圈轨道一体化规划及政策制定提供量化依据与决策参考。

【关键词】多层次轨道交通; 四网融合; 网络协同; 融合度模型

【基金项目】2024年湖南省职业院校教育教学改革项目,项目编号:ZJGB2024087。

截至2025年底,我国常住人口城镇化率已突破67%,以京津冀、长三角、某湾区、成渝双城经济圈为代表的城市群,承载了全国超过70%的GDP和近60%的常住人口。人口与经济活动的密集集聚,使得跨城通勤、商务往来、休闲旅游等中短途出行量呈指数级攀升。既有以单一制式为主导的轨道交通供给模式,难以兼顾“高速远距、快捷城际、通勤市域、密集城区”的多元需求层次。

2019年中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》,首次从国家层面提出推动干线、城际、市域、城轨“四网融合发展”。2024年起,国家铁路局以某湾区为先行试验区,启动标准衔接、装备统型、安检互认等专项工程;2025年广东省率先出台全国首部地方性轨道融合法规。然而,实践中“物理互联易、机制协同难”的矛盾仍然突出,既有研究多停留于定性描述或单技术环节,缺乏系统性的定量分析框架。

1 四网功能分层与融合障碍的系统诊断

1.1 四类轨道交通的角色定位与层级关系

从服务半径、设计速度、站间距和发车频率四个维度可清晰区分四类制式:

干线铁路(含高铁):服务半径 $>300\text{km}$, $v=250\sim 350\text{km/h}$,站间距 $\geq 30\text{km}$,发车间隔 $15\sim 60\text{min}$,主要解决跨省及核心城市间长距离运输。

城际铁路:服务半径 $80\sim 300\text{km}$, $v=160\sim 250\text{km/h}$,站间距 $5\sim 20\text{km}$,发车间隔 $10\sim 30\text{min}$,服务于都市圈相邻城市间通勤与商务。

市域(郊)铁路:服务半径 $30\sim 80\text{km}$, $v=100\sim 160\text{km/h}$,站间距 $2\sim 5\text{km}$,发车间隔 $5\sim 15\text{min}$,连接主城与新城、卫星城镇。

城市轨道交通(地铁为主):服务半径 $<30\text{km}$, $v=30\sim 80\text{km/h}$,站间距 $0.8\sim 2\text{km}$,发车间隔 $2\sim 8\text{min}$,覆盖城区内部日常出行。

1.2 制约深度融合的核心障碍

(1) 信号制式壁垒:干线及城际广泛采用CTCS(中国列车控制系统,以CTCS-2为主流),地铁普遍采用CBTC(基于通信的移动闭塞系统)。两种系统在信息传输协议、安全制动模型、轨旁设备布置上根本性迥异,导致列车无法跨界运行。目前仅有少量市域线采用CTCS-2+ATO作为折中方案,但与CBTC仍无法互通。

(2) 运营主体分割:国铁集团掌控干线及大部分城际;地方铁路公司或城际运营企业负责部分城际;市域及地铁则归属地方交通委(局)或其下属轨道公司。主体间利益分配、调度权限、应急指挥机制均独立运作,缺少常设协调机构。

(3) 票务与信息孤岛:旅客须分别购票、多次安检,票制不统一,清分清算缺乏标准。即便在广东“四线贯

通”后，跨制式换乘仍须二次验票，与“一票通达”尚有差距。

(4) 规划时序脱节：城市地铁规划与城际、市域规划分属不同审批通道，建设周期不一致，导致换乘站预留不足、通道不畅，新建线路客流培育困难，运营后亏损严重。

2 多层次轨道交通融合度（MRID）量化模型

2.1 建模原则与网络抽象

将四类轨道视为四层网络 $G_k = (V_k, E_k)$ ，其中 $k \in \{d, c, s, m\}$ 分别代表干线、城际、市域、地铁。各层网络通过换乘枢纽节点实现耦合。定义融合度 $F \in [0, 1]$ ，该值越高表示系统越趋向一体化。

2.2 三级指标体系构架

采用“目标—维度—指标”三层结构，设置三个一级维度，其下共12项二级指标：见表1

权重通过熵权法结合专家调研确定，一级维度权重经AHP修正后取 $\omega_p = 0.42$ ， $\omega_o = 0.31$ ， $\omega_s = 0.27$ 。

综合融合度公式：

$$F = 0.42F_p + 0.31F_o + 0.27F_s$$

其中各二级指标先进行极值标准化处理。

2.3 融合度与网络效能的耦合方程

定义网络效能 E 为全网旅客平均出行效用，取平均出行时间 T 、平均换乘次数 H 、平均票价率 C 三个可测变量，采用柯布-道格拉斯型效用函数：

$$E = \frac{1}{T^\alpha \cdot H^\beta \cdot C^\gamma} \quad (\alpha, \beta, \gamma > 0)$$

换乘时间 t_{tr} 随融合度提升而衰减，设 $t_{tr} = t_0 e^{-\lambda F}$ 。同时，跨线比例 R 直接影响直达OD覆盖比例 $P_{dir} = P_0 + \mu F$ 。

则全网平均出行时间可表达为：

$$T = \sum_{ij} q_{ij} \left[\sum_{e \in route} t_e + h_{ij} \cdot t_0 e^{-\lambda F} \right]$$

其中 q_{ij} 为OD需求占比， h_{ij} 为换乘次数， t_e 为区间运行时分。

通过对广东省城际网实际OD数据进行拟合，标定参数 $\lambda \approx 1.2$ ， $\mu \approx 0.35$ 。

2.4 仿真设计与关键阈值辨识

采用蒙特卡洛方法，生成不同网络拓扑（放射状、环状、网络状）和不同融合度水平（ F 从0.1到0.9步长0.05），各运行1000次模拟，计算平均网络效能。结果发现：

(1) 当 $F < 0.45$ 时， E 增长平缓，边际增益小于0.3%；

(2) 当 $0.45 \leq F \leq 0.62$ 时， E 进入加速上升段，边际增益增至0.8%~1.2%；

(3) 当 $F > 0.63$ 时， E 呈现超线性跃升，边际增益超过2.0%，且在 $F = 0.65$ 0.68 处出现明显拐点。

该阈值效应可解释为：当融合度超过临界值，跨线服务网络形成“相变”，大量OD对从“换乘可达”转变为“直达可达”，极大减少了换乘阻抗。跨线比例每提升10%，全网T平均下降8.3%（波动区间7.9%~8.6%）。

3 “四网融合”的递进式实现策略

基于上述量化分析，本文提出四阶段递进策略，各阶段间存在逻辑承接关系。

(1) 阶段一：标准体系趋同（基础筑基）

重点任务包括统一车辆限界、供电电压（交流/直流兼容）、站台高度、通信频段。国家铁路局已颁布《市域（

表1 多层次轨道融合度评价指标体系

一级维度	二级维度	计量方式	权重（熵权法）
物理融合 F_p	换乘枢纽密度	可换乘站数/总站数	0.18
	跨线物理接口比例	具备跨线轨道连通区间数/总区间	0.22
	共用站场比例	共用车站数/总站数	0.15
	线路重叠系数	并行同走廊线路长度占比	0.10
运营融合 F_o	运行图协同度	时刻表衔接匹配度（专家打分）	0.12
	调度统一指挥比例	由统一中心调度线路数/总线路	0.14
	应急联动响应时间比	实际联动时间/最优理论时间	0.09
	跨线列车对数占比	跨线运行列车对数/总运行对数	0.16
服务融合 F_s	票制一票通覆盖率	支持一票制线路数/总线路	0.15
	安检互认站点比例	互认站点数/换乘站点总数	0.14
	信息发布统一度	多源信息整合平台覆盖范围	0.11
	旅客投诉率（逆指标）	每万人投诉次数归一化	0.09

郊)铁路设计规范》并修订5项验收标准,涵盖LTE-M、CBTC等通信制式验收要求。建议在此基础上进一步编制《四网融合通用技术条件》国家标准,明确各制式接口参数。

(2) 阶段二:信号系统兼容(核心攻坚)

信号互联互通是最大技术瓶颈。当前可行技术路线有两条:一是研发双模车载设备,支持在CTCS和CBTC区间自动切换;二是在新建市域线路上统一采用CTCS-2+ATO,并预留CBTC升级接口。建议优先在跨线运营需求最强的少数走廊(如广深走廊)开展双制式列控现场试验,积累工程数据。

(3) 阶段三:票务与安检互认(服务贯通)

推行“一次购票、一次支付、一次安检、一码通行”。实现此目标需建立区域级清分清算中心,统一票制规则,并明确安检标准等效互认。广东城际“四线”已实现扫码乘车和“验检合一”,下一步应将范围拓展至地铁与市域线。

(4) 阶段四:运营治理一体化(机制固化)

最终需成立跨区域、跨主体的轨道运营协调委员会,统一编制全网运行图,建立联合调度中心,制定应急联动预案。可借鉴日本“直通运转”协议模式,通过合同约定各方权责与收益分配。广东省施行的条例为此提供了法律基石,但执行细则仍需细化。

4 实证检验——以某湾区为例

试验区概况与数据来源

某湾区是国家唯一“四网融合”全试点区域。截至2025年底,区内干线铁路(含高铁)里程约1200km,城际铁路约600km,市域(郊)线约200km,城市地铁超1500km。AB、AC、AD、A东环四条城际已实现“四线贯通”运营。

融合度测算与模型匹配

依据表1指标及数据,计算得到2023年、2024年、2025年各维度值

表2 某湾区逐年融合度演变

年份	F_p	F_o	F_s	综合 F
2023	0.42	0.35	0.38	0.388
2024	0.51	0.44	0.49	0.481
2025	0.60	0.55	0.63	0.592

2025年实测 $F=0.592$,已进入加速区间($0.45\sim0.63$),与实际客运量表现一致:2025年五一假期首日四条城际发送旅客23.9万人次,同比增长67%,说明融合的客流效应开始释放。

(1) 效能提升验证

对比2023与2025年,全网平均换乘次数由2.1次降至1.6次(降幅23.8%),跨线直达OD覆盖率由31%升至49%。利用式(3)反推理论效能提升约为34%,实际客流增长约42%(考虑到票价优惠等额外因素),模型预测方向与幅度基本吻合。

(2) 阈值逼近预测

按照当前年均提升 $0.08\sim0.10$ 的速度,预计2027年 F 可达 $0.68\sim0.72$,届时将越过阈值,进入效能爆发期。但需注意,若制度“软联通”滞后,则可能延缓突破。

5 结束语

四网融合本质是物理层、运营层、服务层三维度的系统性耦合,任何单一维度的推进均难以产生显著效能增益。构建的融合度指数MRID可有效量化一体化进程,该指数与全网出行效能间呈非线性关系,阈值位于 $0.63\sim0.68$ 区间,跨线运营比例对效能提升具有高杠杆效应(每增10%节约时间约8%)。某湾区实证表明,现有融合度约0.59,已接近阈值,未来2~3年是融合红利集中释放的关键窗口期。

建议尽快出台国家层面《四网融合信号系统互联互通技术规范》,明确双模车载设备技术标准;支持大湾区先行先试,建立跨制式票务清分清算示范平台;将融合度指标纳入城市群轨道交通规划审批的约束性评估体系。模型假设OD需求固定,未考虑融合诱导的新增出行需求,后续可引入弹性需求函数。此外,信号兼容的经济性分析、多主体博弈均衡等问题亦值得深入探索。

参考文献:

- [1] 王睿,刘启钢,杨晓,等.城市群多层次轨道交通协同发展机制研究[J].中国工程科学,2025.
- [2] 国家铁路局.市域(郊)铁路设计规范(TB10624-2025)[S].北京:中国铁道出版社,2025.
- [3] 李永,张辉,赵明.城际铁路与城市地铁信号系统互联互通方案比选[J].铁道通信信号,2024.
- [4] 张鹏,陈浩,王宁.适应四网融合的市域铁路列控系统过渡策略研究[J].铁道标准设计,2024.
- [5] 交通运输部,国家铁路局.关于加强城际铁路、市域(郊)铁路监督管理的意见[Z].交铁发〔2024〕12号,2024.
- [6] 广东省交通运输厅.2025年广东省轨道交通运营年度报告[R].
- [7] 陈晓红,周志华.复杂网络视角下的多制式轨道交通耦合度分析[J].系统工程理论与实践,2024.