

矩阵式轨道网络(MRN)的概念设计与可行性探索

辛 巍

北京城市学院, 北京

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月22日; 发布日期: 2026年3月2日

摘 要

针对当前轨道交通系统中所存在的资源利用率低、运力配置不灵活等痛点问题, 本文提出了矩阵式轨道网络(MRN)的概念模式, 并且建立了一套弹性网格的轨道框架结构、单向循环的运行规则以及分级停靠岛的客货混运核心机制, 把系统运作形式化解为“带时空网络约束的动态车辆路径”优化问题。本文创新性在于提出了柔性网格、分层分布式调度等解决方案, 同时在工程施工、模型算法、经济效能及运营安全的四大维度上宏观剖析了MRN落地的核心难点, 旨在为下一代轨道交通的范式革新提供理论层面的创新思路。

关键词

矩阵式轨道网络, 轨道交通, 动态共乘调度, 客货混合运输, 分级式停靠岛, 鲁棒优化

Conceptual Design and Feasibility Exploration of Matrix-Type Rail Network (MRN)

Wei Xin

Beijing City University, Beijing

Received: January 27, 2026; accepted: February 22, 2026; published: March 2, 2026

Abstract

Aiming at the pain points of low resource utilization and inflexible transport capacity allocation in current rail transit systems, this paper proposes the conceptual model of the Matrix Rail Network

(MRN). It further establishes a core mechanism for integrated passenger and freight transport, which comprises an elastic grid-based rail frame structure, one-way circular operation rules and graded stop islands, and thereby transforms the system operational mode into an optimization problem of dynamic vehicle routing with spatiotemporal network constraints. The innovative contributions of this paper lie in the proposal of solutions including a flexible grid and hierarchical distributed scheduling. In addition, it conducts a macroscopic analysis of the core challenges in the practical implementation of MRN from four dimensions: engineering construction, model algorithms, economic efficiency and operational safety, aiming to provide innovative theoretical insights for the paradigm innovation of next-generation rail transit systems.

Keywords

Matrix Rail Network (MRN), Rail Transit, Dynamic Ride-Sharing Scheduling, Passenger-Freight Combined Transport, Hierarchical Docking Island, Robust Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市轨道交通虽然是现代都市公共交通的骨干，但现在面临的高建设成本、运营亏损、放射性网络效率衰减、运力与客流错配以及轨道资源时空利用不均等问题日益凸显。要想解决上述结构性矛盾，则需要从系统拓扑、运行机制、资源配置层面进行整体性探索研究，从而寻找一种新型的轨道运行系统模式。本文聚焦于城市轨道交通网络“线路固定、弹性不足”的核心症结，提出了矩阵式轨道网络(*Matrix-Type Rail Network*, MRN)系统框架，作为面向城市核心区的解决方案，通过动态共乘调度提升客流匹配效率。

如今，在国外相关研究中，MIT 2022 年提出的“分布式轨道单元系统”聚焦小车规模化独立运营，并未涉及客货时空复用与系统整体变革；德国西门子 2023 年“Flexity Grid”智能轨道系统虽属弹性格网拓扑，但仍以固定班次调度为主；Zhao *et al.* (2023)的常规公交与需求响应公交结合模式[1]、Chen *et al.* (2024)的动态公交-地铁网络拓扑调整方法[2]，均无法实现网格拓扑重构和客货混运；瑞士 CITYFLO 系统仅优化信号系统，也没有突破传统固定拓扑约束。

我国研究主要以技术落地试点为目标，对于智轨(ART)系统仅是在固定线路运行上取消有轨来节约成本，但容错能力弱；再比如深圳“地铁 + 物流”模式(2024 年运营)验证了轨道客货协同的工程可行性，但没有形成网络化弹性方格网与全时段动态调度。当前研究存在三方面欠缺：一是拓扑结构多为刚性构建，未考虑“单元格可拆分、线路可动态生成”的柔性需求；二是客货协同仅局部试点，远未达到全天候时空共用的效果；三是缺乏针对模块化车辆的精细化量化建模。

综上所述，在现有研究中均未出现“弹性格网 + 动态共乘 + 客货复用 + 单节车厢落地”的一体化系统革新方案，因而为本文的研究提供了切入点。目前许多基于人工智能、大数据技术的升级大多关注于调度、运维[3]等方面的“增量优化”[4]，对解决当前存在的上述问题无太大影响，因此需要从系统底层拓扑结构、运行机制和资源配置方式等角度入手，探索解决上述问题的整体性、范式层面的系统革新。

本文的三点创新：第一提出融合弹性格网和分级停靠岛(MRN)的概念框架，解决现有轨道交通拓扑固定、功能单一问题；第二将 MRN 动态共乘机制形式化为 DVRP-STW 问题，建立数学模型并开展概念

验证仿真；第三从工程、算法、经济、安全四维度识别 MRN 落地关键问题，提出“柔性网格、单车分层与分布式调度”等设想性方法作为未来开展技术攻关工作的研究议程。

需要说明的是，MRN 的创新是在已有学术理论动态调度的基础上开展的，且将 MRN 的设计思路定位在扩张原有“带时间窗的动态车辆路径问题(DVRPTW)”框架、增加“时空网络约束”以匹配轨道物理规则；同时，弹性网格融合了交通韧性理论的网络冗余和自适应思想，并将上述观点综合到轨道交通的顶层设计之中(表 1)。

Table 1. Differential analysis of existing studies

表 1. 现有研究差异化分析

对比维度	本文 MRN 系统	瑞士 CITYFLO 智能轨道	国内智轨(ART)
拓扑结构	弹性网络(可变性)	固定线路(放射 + 环状)	固定线路标线(无物理轨道)
调度模式	动态共乘(无固定线路)	固定班次(站站停/大站停)	固定线路(按道路信号行驶)
运输功能	时空复用(客货混运)	纯客运	纯客运
核心创新	系统拓扑重构 + 运作机制革新	信号系统优化	无轨化降本

来源：作者自绘。

2. MRN 系统革新框架与核心设计

本章阐述矩阵式轨道网络(MRN)的顶层架构、物理基础与关键设施，为后续建模与分析奠定基础。

2.1. 网格化拓扑与单向循环运行规则

MRN 系统革新的物理基础是一个由单向行驶轨道构成的平面正交弹性网格。设计目的是通过拓扑结构的规则化适配到动态运行机制之中，确保创新后的城市轨道交通系统高效且安全的运行而奠定物理基础。

2.1.1. 弹性网格构成与参数化设计

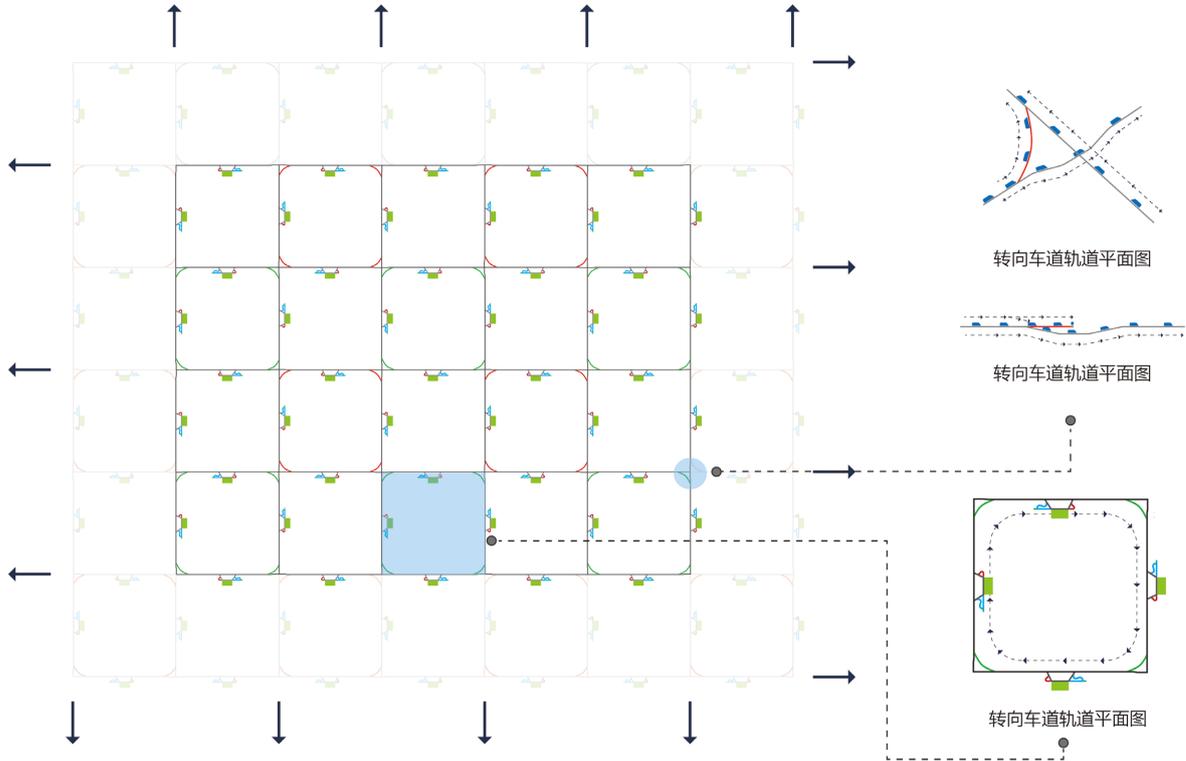
MRN 系统的弹性。这个网格式整体是由既定大小，且无固定连接关系的正方形基本单元拼接而成。而约束网格单元尺寸边长的(L)为核心变量，即该数量应当满足当地人口密度(p)、人均步行距离以及造价是否可行等条件，在此前提下利用基于服务人口覆盖均衡性的原则，理论计算可得 $L \propto \frac{1}{\sqrt{p}}$ (推导见附录 A)。假设北京朝阳区($p \approx 15000$ 人/平方公里)，若规划范围服务人口设定为 $K = 60000$ 人，则推导出该网格单元的理论参考边长为 $L \approx 2$ km [5]，该数值与城市轨道交通的人均合理步行覆盖半径(500 m~1 km)适配，其距离符合服务可达性与运营经济性。

以实践中，“弹性网格”[6]为例，可以根据城市实际地物形态及客流热力分布自行适应变体或局部加密，每个多边形单元坚持“功能性连通优先”原则，工程约束最大长宽比不大于 2.0，满足最小转弯半径和全局拓扑连通性的要求(如图 1 为代表性理想图例)。

作为 MRN 系统革新的核心落地载体，单车(动态运行单元)采用轻量化设计，长度 6 m、宽度 2.5 m、高度 3.2 m，满足城市轨道交通最小转弯半径(≥ 25 m)与停靠岛接入要求(附加轨道宽度 3 m)。动力系统采用永磁同步电机，能耗 ≤ 8 kWh/km (低于传统地铁的 12 kWh/km)；制动系统采用再生制动 + 机械制动冗余设计，制动距离 ≤ 50 m(时速 60 km/h)，符合《城市轨道交通车辆通用技术条件》GB/T7928-2020，为系统动态共乘与资源复用提供硬件支撑。

2.1.2. 经纬交替单向循环规则

如图 1 所示，为了保证系统的安全性以及提高通行率，矩阵轨道网络采用单向单轨线路设计，轨道按“经线南北向、纬线东西向交替循环”设置：第一根经线轨道从上到下，相邻的第二根从下往上；第一根纬线自左往右，第二根自右往左。这样可以避免发生对向行驶冲突，从而降低调度难度与安全隐患的问题，确保整个网状系统有序循环运行。



来源：作者自绘。

Figure 1. Schematic diagram of operation logic for matrix rail network
图 1. 矩阵轨道网络运行逻辑示意图

2.1.3. 节点立体交叉与转向设计

在单元格的十字交叉处，采用桥洞式立体交叉实现无冲突通行，净高差 $\geq 6\text{ m}$ ，符合《地铁设计规范》GB50157-2013 要求，并设置防撞护栏与排水系统。在单元格四角，设置专用转向岔道，受其物理布局所限，车辆在此无法直行，仅能改变行驶方向(如从南北向转为东西向)。这一设计使得车辆实现单元格内灵活循环、并构成系统路径冗余与调度灵活性的物理基础。

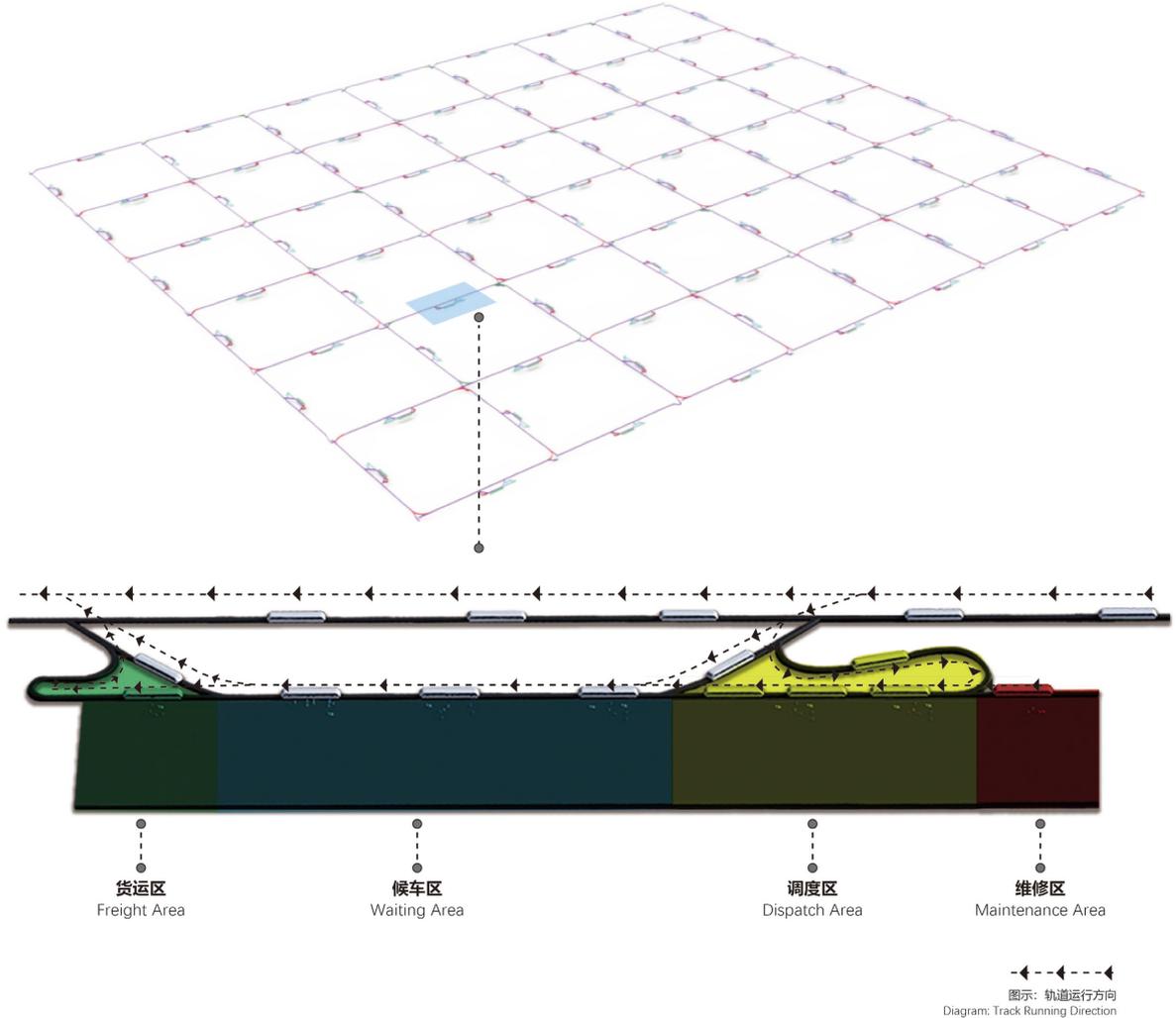
2.2. 分级式停靠岛系统

作为 MRN 系统革新的核心设施支撑，分级式停靠岛系统是多功能集成枢纽，彻底区别于传统地铁站台，其分级设计旨在从功能结构上规避“每个站点大而全不具可行性”的问题，为系统动态共乘调度与客货时空复用提供设施保障。

2.2.1. 布局与接入设计

如图 2 所示，每个单元格四条边中点设置停靠岛基点，车头位置对接连接停车岛的附加轨道，车辆

“滑入”停靠岛，“滑出”返回主轨道，实现站台作业与干线通行物理隔离，提升主干道通过量与安全性。MRN 车辆为传统地铁单节车厢独立运用，载客 60 人，轻量化与灵活性特点匹配停靠岛“单点快速接入”设计，提高站台作业效率。



来源：作者自绘。

Figure 2. Functional division plan of the large-scale berthing island
图 2. 大型停靠岛职能划分平面图

2.2.2. 精细化职能分级体系

为实现高效组织与成本控制，停靠岛根据其规模与功能完备性分为三级：

A 级站(综合枢纽站)：每 5~8 个网格设置一个。其中包含：大型候车厅、大型货运装卸区(配备仓储与物流设施)、区域调度中心、以及具备全面检修能力的大型维修区。主要功能为，承担区域内车辆调度、车辆大修、货流集散与换乘。

B 级站点(标准站)：每个网格设置 1~2 个。其中包含：中型候车区、小型货运暂存区、以及具备快速故障诊断与换件能力的简易维修区域。承担着客运站点，以及小型货运交接与车辆快速应急处理的功能。

C 级站点(简易站)：每个网格设置 2~3 个。包含：基本候车区、自助服务终端。其功能仅提供服务客

运、快速乘降，从而最大化利用网络的覆盖密度。

此分级体系的功能是“功能集中化 + 服务分布式”，即多功能、全服务种类集约到 A 级站，避免了重复建设；C 级站具有低成本、广覆盖的特点，保证了服务的可获得性，类似于“核心枢纽 - 边缘接入点”模式，兼顾功能强度和覆盖经济性。

2.3. 研究切入点

为了弥补现有研究中的不足，文中提出了基于“弹性网格拓扑 + 分级停靠岛 + 客货时空复用”的矩阵式轨道网络(MRN)，重点从三个方面入手有效解决主要问题：一是构建可动态重构的网格轨道拓扑，适配城市客流时空分布差异；二是建立客货分时复用机制，符合《城市轨道交通地下物流系统设计指南》(CJJ/T331-2023)中“客货时空隔离、安全优先”原则；三是补充和完善动态车辆路径优化模型，在模块化车辆运行的基础上添加影响变量，补充约束条件，使其适用于 MRN 实际规划。

3. MRN 系统革新运作机理与理论优势分析

本章将深入剖析矩阵式轨道网络(MRN)的内在工作原理，通过构建严格的数学模型、优化求解算法，并基于真实城市市场景开展概念验证仿真，量化评估其理论性能与现实适用性，从而奠定其创新价值的学术基础。

3.1. 客运模式

MRN 系统革新的客运服务核心是“动态共乘”调度模式，以单个车辆的动态运行单元为载体，改变传统固定线路、站站停的运行模式，实现客流与运力的动态适配，其工作流程是一个闭环的智能响应系统。

需求聚合：乘客通过专属 APP 提前或实时提交出行请求(Origin-Destination, OD)，系统形成全网的实时 OD 需求矩阵。

智能编组：中央调度系统作为“超级大脑”，其核心任务是在秒级或分钟级周期内，将时空维度上相近、出行路线相交的乘客进行实时智能聚类，形成多个单车辆承载的乘客共乘组[7]。

路径规划：为共乘组分配模块化车辆，规划途经所有目的停靠岛的最优路线，依次服务“同起点不同终点”或“不同起点同终点”乘客。

执行与反馈：车辆按动态路径实现无换乘直达，系统通过需求聚合与路径优化，均衡各停靠岛客流负荷，缓解传统地铁局部拥堵与资源错配。

3.2. 货运模式

“时空复用”是 MRN 系统创新的核心资源配置机制，通过“昼夜复用”实现轨道客货共用，该模式符合《城市轨道交通地下物流系统设计指南》(CJJ/T331-2023)原则[8]：日间(06:00~24:00)主要承担客运服务，平峰期运力大量闲置时进行部分货运；夜间(00:00~06:00)主要开展货运服务。车辆在 A 级和 B 级停靠岛独立货运区装卸，完成城市物流“最后一公里”运输；“分时共享”使闲置轨道基础设施进行极低成本的城市地下物流干线[9]，不仅开辟了新的收入来源，更有望推动高效绿色立体化地下货运的体系形成，效缓解地面交通压力。

3.3. 概念验证仿真

按照 3.1 节中所述的系统运行机理，在本节构建了 MRN 动态共乘调度的数学模型及求解算法，并且根据实际城市市场景数据进行了仿真实验的概念验证，利用基本性能验证、多层次敏感性分析的手段对系

统进行全方位的技术可行性及综合优势量化。

3.3.1. 动态共乘调度数学模型构建

MRN 系统的动态共乘调度问题，为带容量约束与硬时间窗下的多车辆路径优化问题，模型构建聚焦于系统调度逻辑与单节车厢运载的适配性，具体定义如下：

(1) 基础要素定义

路网拓扑定义：将 MRN 系统抽象成有向图 $G=(N,E)$ 。其中 N 代表节点集，表示系统中停靠岛和转向岔道的节点； E 为边集，表示单向轨道段的连接节点；轨道网络严格按照“经纬交替循环”的规则运行，从而可以给动态调度提供拓扑约束的基础。

乘客请求集合定义：设乘客出行请求集合为 $R=\{r_1,r_2,\dots,r_m\}$ ；其中的每个乘客请求为 $r_i=\{o_i,d_i,t_i,[e_i,l_i]\}$ 。其中， o_i 为乘客起点停靠岛； d_i 为乘客终点下车的停靠岛； t_i 为乘客发起请求的时间戳(单位 s)； $[e_i,l_i]$ 为乘客可接受的服务时间窗(e_i 为最早乘车时间， l_i 为最晚乘车时间，单位均 s)。

车辆集合定义：设系统运载单元集合为 $V=\{v_1,v_2,\dots,v_k\}$ ，每个标准化车辆为一个运载的单元车辆。其中载客额定容量为 $C=60$ 人(参数依据《城市轨道交通车辆通用技术条件》GB/T7928-2020 中“小运量轨道交通车辆”标准设定，后文真实场景仿真中基于智轨车辆参数调整为 60 人/辆，以适配大规模城市市场景)，为其动态共乘模式下提供硬件载体支撑。

(2) 决策变量与辅助变量定义

二进制决策变量为 $x_{ij}^k \in \{0,1\}$ ，若车辆为 v_k 行驶经过轨道边 (i,j) ($i,j \in N$)，则 $x_{ij}^k=1$ ；否则 $x_{ij}^k=0$ ；二进制辅助变量为 $y_i^k \in \{0,1\}$ ，乘客请求为 r_i 则由车辆 v_k 提供该请求服务，则 $y_i^k=1$ ；否则 $y_i^k=0$ 。

(3) 目标函数构建

该模型的 Z 为优化目标为最小化系统综合运营成本，综合考虑乘客乘车的时间、乘客等待的时间、车辆空驶距离及约束违背惩罚项，目标函数表达式如下：

$$\text{Minimize } Z = \alpha \cdot T_{\text{travel}}^{\text{total}} + \beta \cdot T_{\text{wait}}^{\text{total}} + \gamma \cdot D_{\text{empty}}^{\text{total}} + \delta \cdot P_{\text{penalty}}$$

其中，所有乘客的总在车时间为 $T_{\text{travel}}^{\text{total}}$ ，表示系统运行效率；所有乘客的总等待时间为 $T_{\text{wait}}^{\text{total}}$ ，表示系统服务响应效率；所有车辆的总空驶距离为 $D_{\text{empty}}^{\text{total}}$ ，表示系统资源利用率；约束违背惩罚项为 P_{penalty} ，包含容量超载惩罚和时间窗违背惩罚； $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 为权重系数，平衡不同成本项的优化优先级。

(4) 约束违背惩罚项细分表达式

惩罚项 P_{capacity} 包括容量超载惩罚以及时间窗违背惩罚，且二者都以平方项的形式表现，利用惩罚系数成指数递增的方式加大对于严重违反约束的行为约束力度：

容量超载惩罚： $P_{\text{capacity}} = \sum_{k \in V} \sum_{(i,j) \in E} [\max(0, U(k,i,j) - C)]^2$ ，其中 $U(k,i,j)$ 为车辆 v_k 在轨道边 (i,j) 的实际载客人数， C 为车辆额定载客容量；只在车辆实际载客人数大于额定载客容量时起作用，且当超载的人数越多，惩罚力度按平方的形式增大。

时间窗违背惩罚： $P_{\text{timewindow}} = \sum_{r_i \in R} [\max(0, e_i - t_{ra}^i) + \max(0, t_{ra}^i - l_i)]^2$ ，其中 t_{ra}^i 为车辆服务乘客请求 r_i 的实际时间， $[e_i, l_i]$ 为乘客 r_i 可接受的服务时间窗；该惩罚针对车辆服务时间早于最早乘车时间 e_i 或晚于最晚乘车时间 l_i 的两种情况，时间偏差越大，惩罚强度越高。

总惩罚项为： $P_{\text{penalty}} = P_{\text{capacity}} + P_{\text{timewindow}}$

(5) 核心约束条件

本模型以七类约束作为条件设定，以实现调度方案满足系统物理规则、达到服务标准、保证运行安全的目的。

① 容量约束：无论是哪条轨道线路，在任何时候均不允许超过车辆额定载客量的情况下超载运行，

以保障车辆正常行驶的安全,其中 $U(k,i,j) \leq C, \forall k \in V, \forall (i,j) \in E$ 。除此以外,乘客的平均候车时间不能大于5分钟($T_{\text{wait}} \leq 5 \text{ min}$);车辆扣除停靠时间后的实际运营速度 $v = 40 \text{ km/h}$ (在真实的场景下,仿真是按照城市轨道交通的有关标准,最大行驶速度提高到了 80 km/h);相邻的两个停靠岛之间的距离 $\leq 2 \text{ km}$ (真实场景下可优化调节),对应的该区间运行时间不能大于 5 min ,通过上述方式保障系统的运行效率。

② 载体轨道适配的约束:车辆物理参数需要按照轨道设计规范中的要求与之匹配,实现车辆通过以及轨道运行的两方面安全可靠,即: $R_{\text{turn}}^k \leq 25 \text{ m}, \forall k \in V, L_{\text{access}}^n \geq 50 \text{ m}, \forall n \in N$ 。式中, R_{turn}^k 为车辆 v_k 的最小转弯半径, L_{access}^n 为停靠岛 n 的轨道接入段长度。

③ 在车辆路径中做流量平衡约束是为了保证整个路径具备延续性,并且无断点或逻辑冲突。从任意节点 $i \in N$ 和车辆 $v_k \in V$,流入车辆节点 i 与流出车辆节点 i 的边流量之和相等。即如下公式所示,

$\sum_{\{j \in N\}} x_{ji}^k = \sum_{\{j \in N\}} x_{ij}^k, \forall i \in N, \forall k \in V$ 。该公式中, x_{ji}^k 表示车辆 v_k 经过有向边 (j,i) (驶入节点 i), x_{ij}^k 表示车辆 v_k 经过有向边 (i,j) (驶出节点 i)。

④ 乘客请求全分配的约束:确保每个乘客出行请求仅被一辆车服务,无遗漏或重复分配

$$\sum_{\{k \in V\}} y_i^k = 1, \forall r_i \in R。$$

⑤ 路径请求的一致性约束:若乘客请求 r_i 由车辆 v_k 服务,即 $y_i^k = 1$,则车辆 v_k 的行驶路径必须依次经过该乘客的起点 o_i 与乘客下车终点 d_i ,该约束通过路径变量 x_{ij}^k 的流量连续性实现。该公式为,

$$y_i^k = 1 \Rightarrow \exists j_1, j_2 \in N, x_{\{o_i, j_1\}}^k = 1 \cap x_{\{d_i, j_2\}}^k = 1, \forall r_i \in R, \forall k \in V。$$

⑥ 时空网络约束(关键创新点):指所有车辆都需要按照矩阵式轨道网络(MRN)系统规则“单向运行+经纬交替循环”的形式运行。且基于规则得到一合法转向函数 $T(e_{\text{in}}, i)$,当车辆经过一条边 $e_{\text{in}} = (h,i)$ 驶入节点 i 时,所有符合规则的运行车辆驶出边集合为 $e_{\text{out}} = (i,j)$ 。该约束的表达公式,若 $x_{e_{\text{in}}}^k, i = 1$ (即车辆 v_k 经过驶入边 $e_{\text{in}} = (h,i)$),则必须满足 $x_{e_{\text{out}}}^k, j = 1$ 且 $e_{\text{out}} \in T(e_{\text{in}}, i)$,其中 $\forall i \in N, \forall k \in V$ 。转向函数 $T(e_{\text{in}}, i)$ 的输出结果由 i 的类型(即轨道直段、交叉口、转向岔口)和MRN系统运行规则共同进行确定。

⑦ 车辆动态安全距离约束:为保障车辆运行安全,参考《城市轨道交通市域快线车辆运营技术规范》(TB/T3554-2021)、《城市轨道交通全自动运行系统设计规范》(GB/T51363-2019)中制动性能与安全间距要求,新增动态安全距离约束。单车最小安全距离为 67 m ,系统实时监测轨道段内相邻车辆间距,若小于 67 m 则自动触发减速及加速协同控制,确保满足安全要求,与“最小安全行车间隔 90 s ”形成双重安全保障。

3.3.2. 求解算法与仿真设计

(1) 两阶段启发式求解算法

MRN动态共乘调度问题是典型的NP-hard问题,受到计算复杂度制约,难以用精确算法在多项式时间内求解大规模城市规模的问题实例。为了同时兼顾大规模场景下求解效率和实际应用的价值,针对该问题提出了基于“时空聚类、约束路径规划”的两阶段启发式求解算法。

阶段1:通过改进DBSCAN乘客请求时空聚类的方法来构建时空圆柱体邻域模型,可对乘客请求进行精确聚类,并用于共乘调度分组;将改进的聚类规则设为:若两个乘客 r_i, r_j 的请求被判定为“时空邻居”,并且同时满足以下2个条件,则这两个乘车请求被判为属于同一聚类。

其一,空间接近性条件:如果请求起点的欧几里得距离小于空间阈值 \mathcal{E}_s (即物理意义共乘可行性的半径和停靠岛的服务覆盖范围相匹配),为了确保同组乘客起点的空间距离满足共乘要求,即设定 $\mathcal{E}_s = 500 \text{ m}$,该公式表示为, $D_{\text{space}}(o_i, o_j) = \sqrt{(x_{o_i} - x_{o_j})^2 + (y_{o_i} - y_{o_j})^2} \leq \mathcal{E}_s$;第二个时间接近性的条件是,请求发起时间的差值小于时间阈值则 $\mathcal{E}_t = 300 \text{ s}$ (5分钟),即公式为 $|t_i - t_j| \leq \mathcal{E}_t$,该公式与乘客最大等待时间约束保持

一致，确保不会因为乘客的长时间等待导致服务体验下降。符合上述两个条件后，乘客请求将被视为同一“共乘组”为后续的路径规划提供输入条件。

阶段 2：对于每一对共乘组乘客，均使用带容量和时间窗约束的 A*算法来进行最优路径规划。

状态定义优化：将算法搜索状态定义为二元组 $s = (e_{\text{current}}, t_{\text{arrival}})$ ，其中 e_{current} 为当前行驶轨道边、 t_{arrival} 为到达当前边终点的时间，实现时空维度的联合搜索；

路径扩展规则约束：每一步路径扩展时，仅选择符合 $T(e_{in}, i)$ 函数的合法驶出边，确保路径遵守 MRN 系统运行规则；

约束实时校验与剪枝：路径搜索过程中，实时校验车厢容量约束与乘客时间窗约束，对违反约束的路径分支直接剪枝，降低无效搜索空间占用。

(2) 真实城市市场构建

以模拟雄安新区规划布局的某新城为研究对象，基于 GIS 空间数据构建 10×10 网格状 MRN 轨道网络，单元格边长 2 km，网络覆盖区域总面积 900 km²。研究区域内布设居住组团 15 个、商业枢纽 3 个、物流园区 2 个，总人口规模约 50 万人，满足动态共乘调度对多类型出行需求的场景验证要求。

结合深圳地铁物流示范线的客流与货运运营实测数据，设定场景核心参数如下：

① 客流参数：早高峰时段(7:00~9:00)日均客流强度 3.5 万人次/km，晚高峰时段(17:00~19:00) 3.2 万人次/km，平峰时段 1.8 万人次/km；

② 物流参数：夜间时段(23:00~次日 6:00)物流货运量 0.8 万吨/晚，货物类型以电商包裹、生鲜食材为主，单件货物重量区间为 5~20 kg。

(3) 仿真参数设置

如表 2 所示，通过城市轨道交通运营标准、新城规划要求以及需求响应公交服务规范，设置系统参数进行矩阵式轨道网络(MRN)的运行效率和调度可行性验证。该参数的数值选取上兼顾技术合理性和实际适用性，既参考现行国标与行业实测数据，也匹配 MRN 模块化、客货复用的特征；其中，停靠岛的服务半径 2 km 符合城市居民步行出行的距离，而且在覆盖范围上确保了 MRN 有效性，货运的响应时间 30 分钟作为装卸货物所需时长，通过上述数值的设立能为后续仿真中客货运力调配模型的验证提供合理边界条件。

Table 2. Simulation parameter settings for matrix rail network (MRN)

表 2. 矩阵式轨道网络(MRN)仿真参数设置

参数类型	具体参数	取值	取值依据
模块化车辆	额定载容量	60 人/辆	参考智轨车辆技术参数
模块化车辆	最大行驶速度	80 km/h	《城市轨道交通设计规范》(GB50157-2013)
模块化车辆	乘客上下车时间	30 秒/站	深圳地铁运营实测数据
轨道网络	单元格边长	2 km	新城规划标准间距
轨道网络	停靠岛服务半径	4 km ²	乘客步行可达
客车调度参数	订单响应时间	≤5 分钟	需要响应公共服务标准
货车调度参数	订单响应时间	30 分钟	包括货物卸载车辆清洁流程耗时

来源：作者自绘。

3.3.3. 仿真结果与敏感性分析

(1) 基础性能验证：根据上述所用模型、算法及真实场景中相关参数仿真结果表明，客运效率：MRN 早高峰平均候车时间 4.2 分钟(较传统缩短 31.7%)，平峰期平均行程时间 12.8 分钟(优化 23.5%)；夜间

物流运输平均时效 28 分钟(较地面公路缩短 45.2%)，准时送达率 98.3%；轨道网络日均利用率提升至 82%。

(2) 敏感性分析：单元格边长 2 m 时为最佳边长值；模拟早高峰客流波动 $\pm 20\%$ 波动场景，候车时间的波动仅 $\pm 8.3\%$ (低于传统的 $\pm 15.7\%$)；当生鲜食材比例从 30%提升至 70%时，因装卸流程和客货复用切换流程的不同，造成客货复用切换时间延长到 38 分钟，但是仍保证了 2 小时 18 分的运输时效，达到冷链物流的需求，且系统适配性良好。

3.3.4. 仿真结论与局限性

(1) 仿真结论

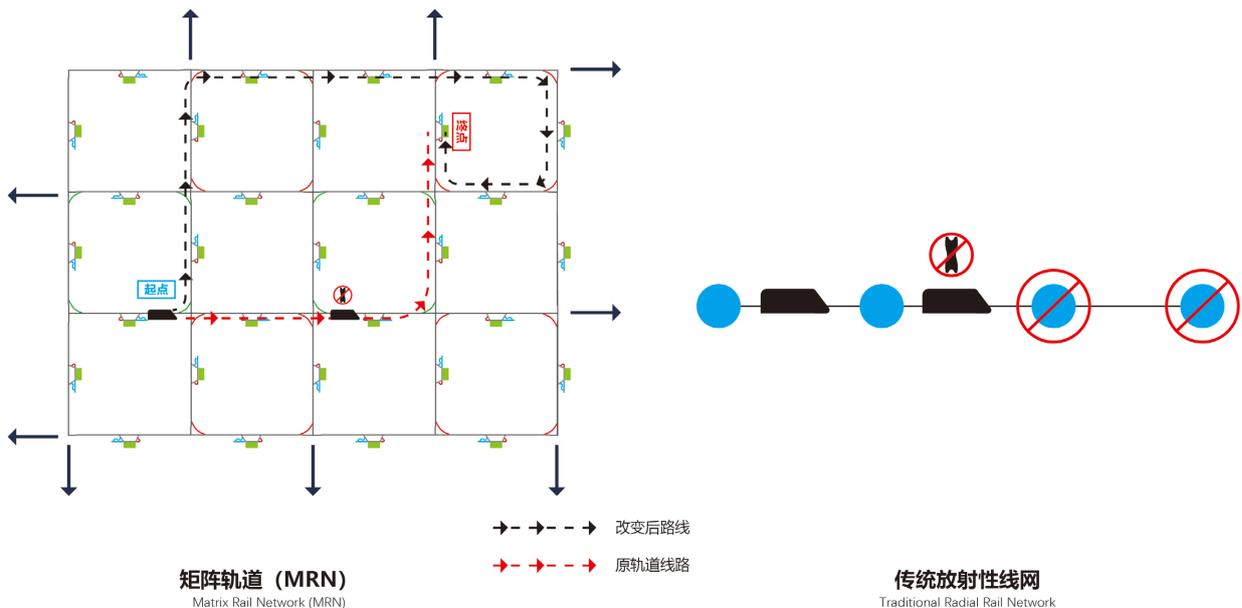
MRN 应用于真实的城市场景，可以实现客货协同效率地大幅度提升。夜晚的物流运输上，减少了大约是 95 万公里每年的地面物流车辆里程(根据深圳示范线的经验)，使每年碳排放减少了约 190 吨，并且还可以带来一定的社会效益以及环境效益。同时验证了模型与两阶段启发式算法的适配性，时空聚类阈值($\mathcal{E}_s = 500\text{ m}$, $\mathcal{E}_t = 300\text{ s}$)及带约束 A*算法的路径规划逻辑，均能很好支撑真实城市场景下的动态调度需求。

(2) 局限性说明

本节仿真仍存在部分待完善之处，其中真实地理障碍(如河流、山体)、信号控制延迟等现实干扰因素没有被纳入其中；模型权重系数($\alpha, \beta, \gamma, \delta$)虽基于行业规范设定，但尚未通过大规模乘客调研与长期运营数据校准，需结合具体城市需求优化；货流运输的安全性未纳入该模型中进行约束，后续需补充专项约束条件以及融合真实城市多源数据(如 GIS 精细化地形数据、长期客流货流监测数据)开展精细化验证，提升模型对工程的实用性。

3.4. 理论优势分析

3.4.1. 内在的高冗余性与鲁棒性



来源：作者自绘。

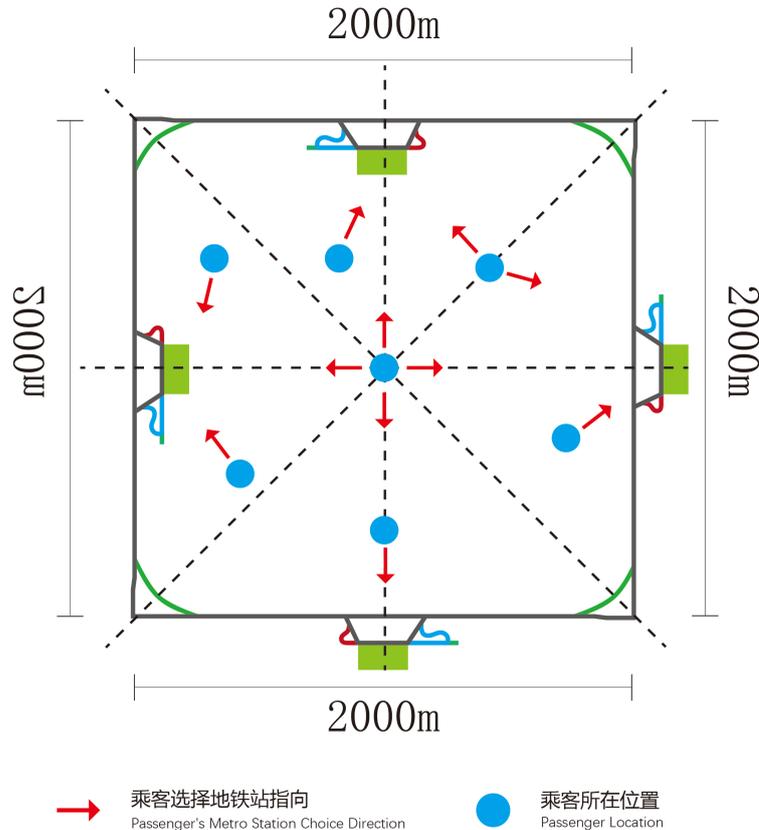
Figure 3. Vehicle operation schematic under emergencies: Matrix vs. Traditional Radial Rail Networks

图 3. 矩阵轨道与传统放射性线网遇突发事件行驶示意图

如图 3，网络拓扑的本质决定了网络中任意两非相邻节点间存在多条独立路径，某路段发生故障情况后，调度系统可规划备选路径从而避免“单点故障，全线瘫痪”的发生。正是这种依托天然冗余性实现自身强抗干扰的自愈能力，也是提高系统可靠性、保证服务连续性的重要前提条件。

3.4.2. 服务的空间均好性与覆盖优化

如图 4 所示，任意乘客，只要在任一矩阵式轨道网络单元格内任意一处，则该位置均有多处可利用的进站站点处于有效步行范围内。这种布局改变了传统的“单站辐射”局限，增加了乘客可以根据实时客流情况、步行距离长短等多种因素来自主选择最优进站站点的可能。



来源：作者自绘。

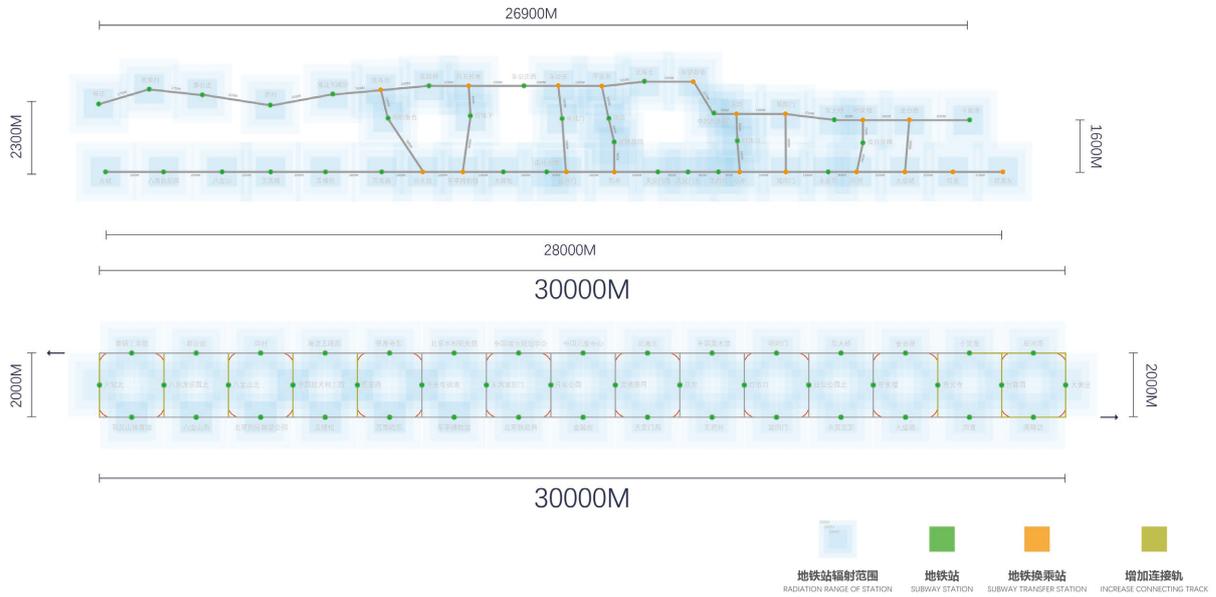
Figure 4. Flexibility of passenger entrance selection in MRN

图 4. 矩阵式轨道网络乘客进站选择灵活性示意图

如图 5 的辐射对比所示，对于矩阵网格式的服务范围来说，站点服务范围比较规则，面积方差较小；对于放射性网格式来说，站点服务范围非常不规则，面积方差大。通过量化的指标对比可知，在同一长度的轨道总里程上，与放射性网格式相比，矩阵网格式的面积覆盖率达 83% 左右，相较之下有约 15% 至 25% 的增加，同时从基尼系数看，居民点距最近站点距离基尼系数更接近于零，说明矩阵网格式的服务可达性更公平，能直接减少起始客流滞留，提高整体的运输量效率。

4. 关键问题与解决路径的系统性分析

一个创新性的概念框架必须经得起对其实施过程中严峻挑战的拷问。本章旨在系统性地识别矩阵式轨道网络(MRN)在迈向实践之路上必须攻克的核心难题，并勾勒出具有前瞻性的解决路径。



来源：作者自绘。

Figure 5. Schematic of station radiation range
图 5. 站点辐射范围示意图

4.1. 工程物理可实现性关键问题和突破路径

问题一：在解决运行路径上，则以发展“弹性网格”的拓扑连通性规划理论方式为核心，该网络可随地形、城市格局柔性调整或局部加密，始终保证“功能性连通优先”的灵活布置轨道桥隧原则。

问题二：当面对高峰“潮汐客流”时，小型车辆独立运行模式会面临运力不足的情况。为了弥补这部分运力缺口，系统采用单车高密度投放加单车动态协同调度的两种方式来补足运力的不足，主要分为四个技术层面，目的是实现车辆独立运行模式下调度协同效率的最大化。

1. 通信层：利用 5G-V2X 技术(遵循 3GPP R16 标准，端到端时延 ≤ 10 ms)技术联合北斗高精定位。
2. 控制层：采用模型预测控制(MPC)算法，以 50 ms 为周期实时计算并下发加速度指令，确保相邻单节车厢的间距始终大于动态安全阈值(如时速 60 km 时保持 50 m 以上车距)。
3. 操作逻辑层：车辆抵达客流疏散区域前，系统下达路径分流指令，遵循“距目标岔路最远的车辆优先通行、最近的车辆有序跟驰避让”的规则，通过后序车辆主动让行，为前序车辆创造无障碍变道条件，从根源上规避路径冲突。
4. 安全冗余层：车辆通信中断超限时，立即触发独立运行指令，并借助自带的车载传感器转入自身安全自动驾驶状态。

本策略致力于突破车辆的高精度协同控制算法与安全通信协议、并针对高峰期应用“潮汐单向轨道”动态资源分配策略，即在高峰时期临时调整某几条线路的单向运行轨道，加大行车密度，提升车辆运输能力。

动态车辆路径(DVRP)模型构建

为进一步量化车辆运行与调度逻辑，构建动态车辆路径(DVRP)模型，明确模块化车辆运行约束与优化目标：

- (1) 模型假设

轨道以网络拓扑设置、时时动态调度、车辆速度稳定、分级停靠岛具备调度及装卸功能等。

(2) 约束条件

① 车辆容量约束: $\sum_{i \in N} q_i x_{ji}^k \leq Q_k \cdot z_k$

其中, Q_k 为单辆模块化车辆额定容量(60 人或 5 吨货物), z_k 为车辆组合数量 $z_k \in \{1, 2, 3, 4\}$, q_i 为站点 i 的乘客/货物需求量, x_{ji}^k 为车辆 k 从站点 i 到 j 的运行状态(1 = 运行, 0 = 不运行)。

② 停靠时间约束: $t_j = t_i + t_{ij} + s_i \cdot n_i$

其中, t_j 为车辆到达站点 j 的时间, t_{ij} 为 i 到 j 的行驶时间(由轨道长度与车辆速度计算), s_i 为单位乘客/货物停靠时间(乘客 3 秒/人, 货物 5 秒/件), n_i 为站点 i 的乘客/货物数量。

③ 轨道通行安全约束: $t_j - t_k \geq D$

其中, t_j 、 t_k 为相邻两辆车到达同一轨道区段的时间, D 为安全时间间隔(≥ 90 秒, 参考城市轨道交通信号系统标准)。

④ 客货时空隔离约束: $y_i^k \cdot y_i^h = 0$

其中, y_i^k 为车辆 k 在时段 t 的运输类型(1 = 客运, 0 = 货运), y_i^h 为车辆 h 在时段 t 的运输类型, 确保同一时段同一轨道区段仅承载一类运输任务。

(3) 目标函数(补充量化说明, 衔接原文调度逻辑)

首先是运力配置与需求相适应, 目标函数仍是基于“最小化广义运输成本”的思路展开, 包括了车辆运营成本、乘客出行时间成本和货物运输延误成本, 成本参数采用《2024 中国城市轨道交通运营蓝皮书》中数据, 车辆运营成本为 12 元/公里、乘客时间价值为 25 元/小时、货物延误成本为 8 元/吨小时, 从而根据本目标函数进行运力配置优化。其次运力配置经过该优化后能与实际需求形成一种动态的匹配状态, 并可作为本节提出的单车协同调度落地的重要支撑。

4.2. 调度算法效能的核心难题与结构设计

问题三: 超大规模问题的实时求解。该系统中的全域动态共乘问题是一个超大规模的、动态的、带复杂时空约束的车辆路径优化问题, 此问题属于 NP-Hard 难题[10], 对算法的实时性与求解质量构成了极致挑战。

解决路径: 通过采用分层及分布式混合架构进行计算。

战略层(中央调度器): 以 5~10 分钟为周期运行起来, 主要用深度强化学习模型来分析全网聚合后的宏观客流需求, 来进行大范围的空车调派和流量引导的大数据策略, 但是不对单车的微观路径进行管理和干预。

战术层(区域控制器/车辆智能体): 以 100~500 毫秒为周期对来自中央调度器的粗粒度控制框架指令作出实时反应, 并在时空中受约束情况下使用 A* 在轨算法等在线优化方法完成车辆间的精确避碰、安全跟驰以及局部路径的秒级优化。

数据交互机制: 战略层和战术层通过合理的接口互通, 战略层每分钟将宏观客流态势推送给战术层, 同时, 战术层负责实时反馈车辆状态、返回执行指令结果, 从而形成全局优化、局部快速响应的闭环系统。

问题四: 鲁棒性会在面对可能出现不同情况时, 健全且高效地抵抗乘客因临时改签或取消出行、突发故障的车辆、暴风雪的极端恶劣天气等外界冲击情况的影响。

解决路径: 引入鲁棒优化与主动容错机制[11]。

鲁棒优化建模: 采用分布鲁棒优化方法, 在数学建模中, 把各种随机不确定因素的概率分布、不确定集纳入数学模型, 并求解出最优调度方案, 在最坏的情况和期望下都能达到良好的效果。

动态空闲运力缓冲：因此，系统需留出一定比例的动态空闲运力(例如，处于待命状态的车辆)在网络中来回流动或在车站调度区停靠，待到突发事件出现后能迅速投入响应。

建立标准化故障与安全处置协议库，其中的核心预案包括：车辆故障时，自动驾驶到最近 A、B 级站临时停靠，10 秒内为受影响乘客重配周边可用车辆；轨道异常时，立即封锁故障段，为周边 3 公里内车辆规划冗余路径，30 秒内恢复区域运输；通信中断时，车辆即时转入独立安全运行模式，限速在 40 km/h 同时优先停靠最近 A 级站，并通过车载传感器预警规避与它车互撞风险。

4.3. 经济可行性

问题五：本研究基于建设成本效益与盈利模式的不确定性，所以在工程实测数据与行业标准参数上，构建全生命周期量化分析框架，对 MRN 的经济可行性进行测算。

4.3.1. 成本构成与参数取值

本小节基于《2024 中国城市轨道交通建设成本分析》《深圳地铁运营年报 2023》等权威资料，以 100 公里规模 MRN 网络为基准，构建全生命周期成本收益量化分析框架，参数取值与测算过程如下。

1. 成本构成：

土木成本： $C_{civil} = c_{unit} \cdot L_{total}$ ，其中 c_{unit} 为单位轨道里程造价， L_{total} 为总轨道里程。地下轨道单位造价 6~8 亿元/km，地面及高架轨道单位造价 2~3 亿元/km；如按照地下与高架占比 50% 的混合方案估算，100 公里网络的建造土木总成本约为 400~600 亿元。

车辆系统成本： $C_{vehicle} = c_v \cdot N_v$ ，以智轨车辆市场报价数据为基础计算，单车成本 c_v 约为 200~300 万元。 N_v 为车辆配置总数 200 辆，其中包含备用车辆，初步测算出整个系统的车辆购置费为 4~6 亿元。智能化系统、运营维护费用：智能化系统(包含中央调度平台、车路通信系统等)约占初期投资总额 8%~12%；年度运营维护(轨道养护、车辆维保等)占初期投资总额 7%~8%，两部分合计占总投资 15%~20%。

2. 收益测算：

客运收入： $R_{passenger} = Q_{daily} \cdot p_{ticket} \cdot 365$ ，其中 Q_{daily} 为日均客运量(服务 100 万人口区域，按 10% 出行率测算为 10 万人次)， p_{ticket} 为平均票价(3 元/人次)，测算得年度客运收入约 10.95 亿元。

货运收入(核心创新点)： $R_{freight} = r_{freight} \cdot W_{annual} \cdot D_{avg}$ ，其中 $r_{freight}$ 为货运费率(0.4~0.6 元/吨·km)， W_{annual} 为年货运量(服务 100 万人口区域，按人均日物流需求 0.1 吨测算为 3.6 万吨)， D_{avg} 为平均运距(2 km)。经测算，年度货运收入约 2.9~4.3 千万元，可覆盖部分运营维护成本。

3. 成本收益综合分析

100 公里规模 MRN 网络的规划初期建设资金投入约为 404~606 亿元，预期每年产生的客运和货运收入合计约为 10~15 亿元左右。MRN 作为一种重资产的基础设施，单纯的运行层面很难收回投入成本，因此为了更好地平衡整个全生命周期中的成本，其有可能需要依托政策引导、土地综合开发(TOD)等多种方式来共同分摊整个生命周期的成本。现阶段，设计后的对比仅就作为概念层面进行可行性分析(图 6)。

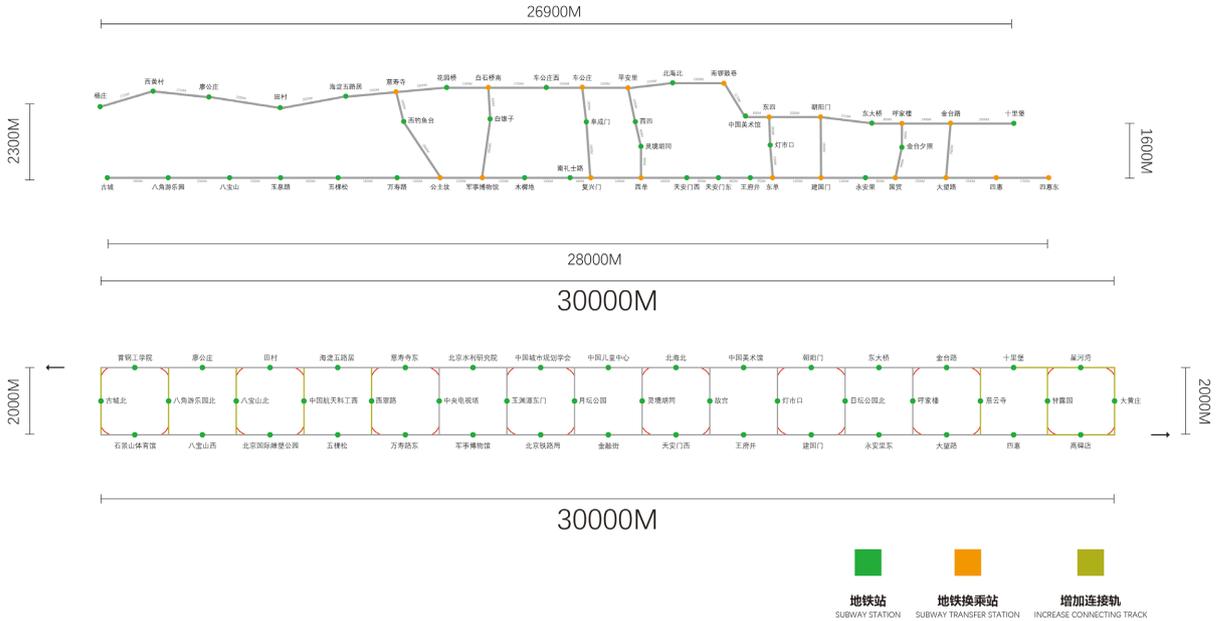
问题六：客货混运与高密度条件下的运输安全策略，则针对车辆独立运行模式下的客货混运与高密度运行需求，从时空隔离、动态防护、降级运行三个维度构建安全保障体系：

1. 时空隔离机制：对客运时段(6:00~23:00)、货运时段(23:00~次日 6:00)两部分进行划分，并利用 DVRP 模型约束 $y_{kt} \cdot y_{ht} = 0$ 限定，使得在某一时段内同一轨道区段上只有同一类运输任务；同时采用“虚拟通道”技术，对于特定时间段(例如应急物资运输)，可在一定范围内避开客流量大的时期，在不影响客流通行情况下保障货流的畅通。

2. 动态安全域防护：为每辆车实时计算“动态安全域”，将制动距离、通信延时、车辆组合状态等参数[12]输入 DVRP 模型中，采用轨道通行安全约束 $t_j - t_k \geq D$ 条件确保任意两车的安全区域内无重叠。

系统每 50 ms 更新一次安全域参数，应对车辆速度变化或组合状态发生变化等情况发生。

3. 降级运行规程：核心系统(中央调度平台、车路通信网络等)故障时，立即切换到“分布式自主运行”模式：① 车辆基于车载激光雷达、摄像头等传感器自主完成环境感知，以车载感知和决策完成安全运行路径规划；② 按执行基础安全规则行车，限速 40 km/h、交叉口停车让行、优先停靠最近 A 级站；③ 待核心系统正常后，通过本章 4.2 节中分层调度的接入方式接入全网协同，完成安全的过渡。



来源：作者自绘。

Figure 6. Schematic of metro station layout comparison
图 6. 地铁站点设置对比示意图

4.3.2. 社会效益量化

在交通纾解上，每年减少地面物流车辆运行里程约 95 万公里，相当于减少城市道路拥堵时长约 1.2 万小时；碳排放量每年可节省约 190 吨(根据传统柴油物流车辆碳排放强度为 2 公斤/公里来测算)，符合国家“双碳”目标；在出行率层面上，远郊组团乘客向市中心区出行的平均时间降低约 25%，提高城市空间可达性和均衡化水平。

综上所述可以看出，在运营层面上 MRN 的成本回收周期较长，但通过多元化收益补充与显著的社会效益上来看，具备长期经济可行性和实践价值研究性。

5. 结论与研究展望

在大力促进智能轨道交通建设的国家政策驱动下，针对现有轨道交通系统存在的结构问题，建立了矩阵式轨道网络(MRN)的概念模型，采用集成了弹性网格技术、动态共乘和时空复用的手段，在逻辑层面构成了一个内部逻辑关系一致的整体，并对其具有冗余性和服务均好性的理论优势进行了探讨。

一是构建了逻辑自洽的 MRN 概念体系和数学模型，改变了既有轨道交通系统拓扑结构与运营组织惯性的束缚；二是提出的研究成果并不是可以一蹴而就的工程实际布局，而是对 MRN 核心机理、优势理论及应用难点的探讨，以打破既有的技术路线束缚，给予下一代轨道交通范式革新的科学构思以及具体可研究的内容；三是所绘出的“挑战地图”与前瞻性的解决路径为一大创新。另外，概念验证仿真模拟

所用的真实城市客流样本选取存在局限性,仅覆盖1个城市高峰时段数据,因此不可能得出该系统适用于各种规模大小城市的普适性结论(包括一线城市、新一线城市和二线城市等),也不适用于平常时间段和平假日等其他情况,以上所示均为有限场景,有待未来进一步完善和补充。现阶段的系统开发工作暂时不着眼于马上否决或者证实当前系统是否真的最佳解决方案,而是按论文指导的方向,不断去推进。因而对于接下来的工作来说:① 开发高保真仿真平台,在复杂情况下验证该系统的鲁棒性;② 基于典型新城开展案例研究,开展基于新城区站点布局的概念落地适应性分析;③ 针对单辆车辆协同控制、智能调度、AI 算法等关键技术开展重点攻关,只有这样做的持续努力才能够审视和完善本部分的概念模型,逐步将其从理论上的有趣构想转化为实践中可观察的内容。

参考文献

- [1] Zhao, J., Sun, S. and Cats, O. (2021) Joint Optimisation of Regular and Demand-Responsive Transit Services. *Transportmetrica A: Transport Science*, **19**, Article ID: 1987580. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1987580>
- [2] Chen, S., Ji, X., Shao, H., Ma, J. and Hu, G. (2024) Evaluating the Robustness of Attributed Dynamic Bus-Metro Networks Based on Community Reconstruction. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, **12**, Article ID: 2380909. <https://doi.org/10.1080/21680566.2024.2380909>
- [3] 刘杰, 王璐. 基于时空资源优化的地铁运输组织研究进展[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 23-30.
- [4] 张卫华. 对高速列车系统完整性与智能运维的思考[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 1-10.
- [5] 交通运输部. “十四五”现代综合交通运输体系发展规划[M]. 北京: 交通运输部, 2021: 46.
- [6] 李瑞敏. 城市(群)综合交通系统韧性发展的理念与路径[J]. 城市交通, 2025, 23(4): 8.
- [7] 张松亮, 李得伟, 尹永昊. 需求响应机制下轨道交通出行预约与列车运行计划优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 285-294.
- [8] 中国城市规划设计研究院, 北京城建设计发展集团股份有限公司. 城市轨道交通地下物流系统设计指南: CJJ/T 331-2023 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 3.2.1.
- [9] 冯江红, 代存杰, 李海军, 等. 基于城市地铁网络的地下物流发展模式综述[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(4): 134-143.
- [10] 姚向明. 城市轨道交通网络动态客流分布及协同流入控制理论与方法[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [11] 姚向明, 赵鹏, 乔珂, 等. 城市轨道交通线路高峰客流控制方案鲁棒优化模型[J]. 铁道学报, 2021, 43(11): 29-37.
- [12] 王倩. 数据驱动的多地铁列车学习自适应协同控制方法[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.

附录 A

矩阵轨道网络单元格边长理论公式推导：

本附录旨在推导正文第 2.1.1 节中提到的单元格边长(L)与人口密度(p)的理论关系式 $L \propto \frac{1}{\sqrt{p}}$ 。该推导基于“服务人口覆盖均衡”的核心规划原则。

A.1. 假设与目标

核心假设：为使轨道网络的服务能力与人口分布相匹配，理想情况下，矩阵网络中的每一个单元格应服务大致相等的人口数量(P)。这有助于实现服务资源的空间公平性，避免某些站点过度拥挤而其他站点利用率不足。

规划目标：确定单元格边长(L)，使得在给定人口密度(p)下，每个单元格的服务人口(P)保持恒定。

A.2. 推导过程

A.2.1. 定义变量

- L ：矩阵轨道网络单元格的边长(单位：km)。
- A ：单个单元格的面积(单位：km²)。
- p ：服务区域的人口密度(单位：人/km²)。
- P ：单个单元格所需服务的预期人口数量(单位：人)。

A.2.2. 几何关系

对于一个正方形单元格，其面积公式为： $A = L^2$ 。

A.2.3. 服务人口计算

该单元格所覆盖的理论服务人口数，为其面积与人口密度的乘积：

$$P = p \cdot A = p \cdot L^2$$

A.2.4. 引入均衡原则

根据“服务人口覆盖均衡”原则，我们希望每个单元格的服务人口 P 是一个常数，设为 K ，即： $P = K$ 。

将此式代入服务人口计算公式， $P = p \cdot L^2$ ，得到： $K = p \cdot L^2$ 。

由此可解出单元格边长 L ：

$$L^2 = \frac{K}{p} \Rightarrow L = \frac{\sqrt{K}}{\sqrt{p}}$$

由于 K 是常数，因此单元格边长 L 与人口密度 p 的平方根成反比：即：

$$L \propto \frac{1}{\sqrt{p}}$$

A.3. 公式应用与讨论

A.3.1. 假设在北京朝阳区的应用

给定 $p \approx 15,000$ 人/km²；设定规划目标 $P = K = 60,000$ 人；此目标值的设定综合考虑了理想站点的服务能力与乘客可接受的步行距离(如正文所述的 2 km 边长范围内可覆盖合理步行半径)。

$$\text{计算 } L: L = \sqrt{\frac{K}{p}} = \sqrt{\frac{60000}{15000}} = \sqrt{4} = 2 \text{ km}。$$

因此，推导出朝阳区矩阵式轨道网络单元格的理论参考边长为 2 km。

A.3.2. 讨论与局限性

本推导是一个高度简化的理论模型，其核心价值在于揭示了网格规划中覆盖范围与人口分布之间的基本数学关系。

它忽略了实际城市地理中的不规则性(如河流、公园、既有建筑)、客流走廊方向性以及经济成本的极端非线性变化。

常数 K (预期服务人口)的选择是关键，它应基于对车辆容量、发车频率、可接受步行距离和建设成本的综合评估进行校准。正文中提出的“弹性网格”概念正是为了应对这些现实世界的复杂性。