

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.02.002

# 面向可持续发展的既有线改造 理论与方法研究

丁树奎

(中国城市轨道交通协会, 北京 100038)

**摘要:** 针对当前城轨交通既有线改造中存在的网络协同不足、设备更新路径依赖及可更新性设计缺失等问题, 基于《中国城市轨道交通既有线改造指导意见》的框架, 探讨城市轨道交通既有线改造的理论创新方向, 并提出将可更新性列入装备性能评估体系, 面向线网将设备系统与线路解耦重构, 通过线路集群化改造完善线网整体功能, 运用城市更新“三生”理论构建城轨更新改造衍生、再生、共生体系等关键点。通过这些理论创新, 系统促进既有线改造完善线网整体功能, 降低设备更新换代成本, 提高设备维护效率, 并推动城轨交通行业的可持续发展。

**关键词:** 城市轨道交通; 既有线改造; 理论创新; 设备可更新性; 设备解耦重构; 线路集群

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)02-0008-06

## Theoretical Innovation in Urban Rail Transit Reconstruction: A Framework for Network Integration and Equipment Upgradability

DING Shukui

(China Association of Metros, Beijing 100038)

**Abstract:** Addressing the current challenges in urban rail transit line reconstruction, such as insufficient network synergy, path dependency in equipment updates, and the lack of upgradability design, this study explores theoretical innovation directions. It proposes key strategies, including incorporating upgradability into the equipment performance evaluation system, decoupling equipment from lines for network-oriented reconstruction, and improving the overall network functionality through clustered line reconstruction. These theoretical innovations aim to systematically promote the reconstruction of existing lines, reduce the cost of equipment upgrades, improve maintenance efficiency, and drive the sustainable development of the urban rail transit industry. Based on the framework of *Guidelines for reconstruction of existing urban rail transit lines in China*, this study addresses critical challenges in urban rail transit reconstruction, including insufficient network coordination, path dependency in equipment upgrades, and inadequate upgradability design. It proposes a comprehensive theoretical framework with four key innovations: integrating “upgradability” into equipment performance evaluation systems; implementing network-oriented decoupling of equipment systems from physical infrastructure; enhancing overall network functionality through clustered line reconstruction approaches; and developing derivative, regenerative, and symbiotic systems for rail transit reconstruction based on the “production-living-ecology” theory of urban renewal. These theoretical advances provide systematic solutions to optimize network functionality, reduce equipment replacement costs, enhance maintenance efficiency, and promote sustainable development in the urban rail transit sector. The proposed framework offers valuable guidance for policy-making and implementation strategies in urban rail transit modernization.

收稿日期: 2025-02-15 修回日期: 2025-02-21

作者简介: 丁树奎, 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事城市轨道交通建设及技术管理与研究, dingshukui@yeah.net

基金项目: 北京市科技计划(Z231100003823027)

引用格式: 丁树奎. 面向可持续发展的既有线改造理论与方法研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 8-13.

DING Shukui. Theoretical innovation in urban rail transit reconstruction: a framework for network integration and equipment upgradability[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 8-13.

**Keywords:** urban rail transit; existing line reconstruction; theoretical innovation; equipment upgradability; equipment decoupling reconstruction; line cluster

## 0 引言

自 20 世纪 60 年代我国首条地铁开通以来, 经过 50 多年的发展, 城轨交通运营里程已超过 12 168 km, 取得了显著成就。2020 年, 城轨运营线路总长度首次超过在建线路, 这标志着我国城轨交通发展进入了一个新的历史阶段, 即运营与建设并重、以运营为主导的发展阶段。据统计, 截至 2024 年底, 我国内地已有 10 座城市 34 条线路运营超过 15 年, 这些线路的设备设施系统设计使用寿命和服役年限即将到期。同时, 运营超过 10 年的线路也将陆续进入设备专业系统(简称为“设备”)更新周期, 更新改造需求日益迫切。

为落实国务院关于推动大规模设备更新的要求, 2024 年 6 月 13 日, 中国城市轨道交通协会发布了《中国城市轨道交通既有有线改造指导意见》(简称“《指导意见》”)<sup>[1]</sup>。该《指导意见》为今后一段时期制订既有有线改造的技术政策、标准规范、发展规划和实施计划提供参考。

既有有线改造既是城轨交通系统建成运营后持续保持功能的需要, 也是改进和完善线网功能的机遇, 高水平实施更新改造有利于促进城轨交通整体的提质、降本、增效。既有有线改造为现存“卡脖子”装备的自主化和国产化替代提供了重要契机, 也是绿色城轨、智慧城轨、融合城轨、国创城轨建设的重要途径。通过既有有线改造对城轨交通的系统性进行优化提升, 可进一步满足人民群众日益提高的美好出行需要, 激发城市活力, 对于城轨交通由规模增长向质量增强转型以及实现可持续高质量发展具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。

近年来, 国内学者对城市轨道交通既有有线改造进行了广泛研究<sup>[5-6]</sup>。然而, 现有研究多聚焦于单一线路更新工程, 缺乏对系统性需求的整理和统筹规划, 缺少从网络、线路、站点 3 个层面的体系化分析和中长期的整体规划。因此, 迫切需要对改造工程进行顶层设计, 系统地规划既有有线改造的目标方向和策略措施。

技术生命周期理论<sup>[7]</sup>与设备老化管理<sup>[8]</sup>为既有有线改造提供了理论依据。技术生命周期理论指出, 技术会经历导入、成长、成熟和衰退 4 个阶段。设备老化管理则强调对设备老化风险的管理, 以确保设备在整个生命周期内保持良好的性能。基于这些理论, 既有有线改造中装备的可更新性成为一项重要的考量因素。在既

有线改造中, 充分考虑设备的可更新性, 可以延长设备的使用寿命, 降低更新成本, 并提高线网的运营效率。

综上所述, 探索既有有线改造的理论创新方向, 对于系统开展更新改造具有基础性作用。既有有线改造需要将可更新性作为重要的设计原则, 从线网协同视角出发, 实现既有有线改造的可持续发展。

## 1 城轨交通既有有线改造面临的挑战

既有线路改造普遍还处于试验和探索阶段, 目前尚缺乏明确的政策指导和方向性引领。传统的改造模式中, 由于缺乏系统规划和顶层设计, 逐步显现出一些问题, 如新建线路对未来设备更新需求预留不够、设备更新存在路径依赖、功能层面主动式网络化缺乏路径规划等。

### 1.1 未来更新需求预留不足

新建线路在规划建设时对未来设备更新需求预留不足, 导致后续更新改造时面临较大难度和较高成本。具体而言, 在空间规划方面, 新建线路设计时可能未充分预见未来设备更新的空间需求, 致使改造时面临空间狭小、施工难度加大的问题, 甚至需拆除或改造部分既有设施, 乃至临时中断运营。此外, 在接口兼容性方面, 对设备系统在未来更新改造过程中, 如何与替代系统或相关系统进行兼容, 以及如何整体统筹不同寿命周期、存在关联关系与相互影响的系统考虑不足, 可能导致更新改造过程中需要进行复杂的适配和调试, 增加改造成本和时间。

### 1.2 设备更新存在路径依赖

一方面, 在既有有线改造过程中, 存在过度依赖引进设备的倾向, 片面强调“修旧如旧”, 依赖原引进设备供应商, 这种做法不仅限制了技术创新的可能性, 还可能导致供应链因为依赖单一供应商而变得较为脆弱。另一方面, 存在另一个极端倾向, 即对原设备采取全面替换的策略, 忽略新旧设备设施的兼容与结合, 这种做法虽能简化新旧设备接口、降低改造难度, 但全面替换的做法无疑增加了设备更新的成本。

### 1.3 功能层面主动式网络化缺乏路径规划

在现有有线网规划建设过程中, 受传统按线建设模式的影响, 往往仅形成形态层面的网络, 缺乏从“自然成网”向“引导成网”转变的明确路径, 以及通过更新改造实现网络化的具体策略。部分城市在既有有线

改造时,过于关注单一线路的升级,忽视了线路间的协同效应,导致更新改造未能有效提升整体网络效率。尽管一些城市将提高整体网络效率作为改造目标,但在方法路径上对线路集群的系统性规划重视不足,未能形成系统性的规划。

## 2 既有线改造提升可更新性的创新方向

通过《指导意见》的编制、行业调研和课题研究,笔者所在课题组逐步对未来一段时期内既有线改造的几个理论方向有了进一步认识。在既有线改造过程中,应避免仅从单一系统、线路或短期视角出发的局限性思维。若使更新改造更具前瞻性、可持续性,需要在以下4个方面进行创新。一是站在全生命周期角度,将可更新性纳入设备性能评估体系;二是站在网络资源共享角度,推进设备系统面向线网重构;三是站在提升线网效能角度,运用线路集群理论促进“更新改造成网”;四是站在城市更新大局,运用城市更新“三生理论”构建城轨更新改造衍生、再生、共生体系等。

### 2.1 将可更新性列入设备性能评估体系

设备系统客观存在寿命限制和服役期限,对其进行更新改造是一项长期、周期性、持续性任务,这一过程需周期性地投入大量资源。随着各城市线网规模的不断扩大,存量资产规模亦随之增长,因此在设备全生命周期内考虑如何降低更新改造成本和难度显得尤为重要。

传统的RAMS(可靠性、可用性、维护性和安全性)评估体系,在评估设备全生命周期及长期性能方面已显现出局限性。为此,将可更新性(upgradability)纳入RAMS体系,形成RAMSU,已成为适应新时代需求的趋势。RAMSU体系的建立,能够更全面地反映设备全生命周期性能,降低设备更新成本,延长设备使用寿命,并进一步提升设备的市场竞争力。

设备可更新性是指设备在设计、制造和使用过程中,将未来便于实施经济、安全更新改造作为重要需求、场景和设计输入,为未来更新改造创造条件、预留条件。

设备可更新性的核心内容涵盖了模块化设计、技术兼容性、可扩展性、易维护性、可持续性、用户参与性、经济性以及智能化与数字化等方面。通过可更新性设计,设备能够适应不断变化的技术需求和环境条件,延长使用寿命,降低总体成本,并提升用户满意度。这一理念在现代设备设计和制造中具有重要意

义,特别是在快速发展的技术领域(如信息技术、工业设备、城市基础设施等)。其核心内容包括以下9个方面:

1) 模块化设计:指组件具备独立性,由多个独立的功能模块组成的,每个模块可以单独升级或替换,而不影响其他模块的运行。

2) 接口标准化:指模块之间的接口采用标准化设计,便于新模块的兼容和集成。

3) 灵活配置:指通过模块的组合和替换,实现设备功能的灵活调整和扩展。

4) 技术兼容性:包括向后兼容、向前兼容及跨平台兼容。向后兼容指新设备或升级后的设备能够兼容旧系统的技术标准和协议,确保平滑过渡。向前兼容指设备设计时预留未来技术升级的空间,支持新技术的快速集成。跨平台兼容指设备能够适应不同的操作系统、软件平台或硬件环境。

5) 可扩展性:包括硬件可扩展、软件可升级及容量弹性强。硬件可扩展指设备设计时预留扩展接口或插槽,支持硬件功能的扩展(如增加存储容量、提升处理能力等)。软件可升级指通过固件或软件更新,提升设备性能或增加新功能。容量弹性强指设备能够根据需求动态调整资源分配,支持规模扩展。

6) 可持续性:包括资源节约、材料可回收及生命周期管理。资源节约指设备设计时考虑节能环保,降低能源消耗和环境影响;材料可回收指采用可回收材料,减少设备报废后的环境负担;生命周期管理指通过技术升级和改造,延长设备的使用寿命,减少资源浪费。

7) 用户参与性包括3方面。用户自定义指允许用户根据需求自定义设备功能或配置;反馈机制指建立用户反馈渠道,收集用户需求和建设,指导设备的更新和改进;培训与支持指为用户提供技术培训和支

8) 经济性包括3方面。有利于成本控制指在保证可更新性的前提下,控制设备的初始成本和升级成本;有利于投资保护指通过技术升级和改造,保护用户的初始投资,避免设备过早淘汰;有利于效益最大化指通过可更新性设计,提升设备的长期使用效益。

9) 智能化与数字化:包括智能升级、数字化管理及数据驱动优化。支持智能升级指设备支持通过人工智能、大数据等技术实现智能化升级;支持数字化管理指通过数字化平台管理设备的运行状态、维护记录和升级历史;支持数据驱动优化指利用数据分析优化

设备性能，指导更新改造策略。

## 2.2 面向线网将设备系统与线路解耦重构

提高城轨设备设施可更新性，将线路设备与线路解耦是一项重要工作。运用解耦理论，在新建或更新改造过程中，将线路设备系统与线路解耦，并面向线网网络或线路群重构设备系统，将既有的线路级(版)的系统重构为网络级(版)的系统，实现设备系统的灵活配置、资源共享和高效运维。

### 2.2.1 城轨交通设备更新改造具有很强的系统性

城轨交通是由整体性强、安全性高的多系统联动构成的大系统，具有多设备构成专业系统，多专业系统构成线路，多线路构成线路集群，多线路集群构成全线网的多级多要素特征，各层级多要素之间协同性影响更新改造的整体效果。城轨交通行业落实国家关于大规模设备更新的部署，应以“系统”为单位推进既有有线更新改造。

### 2.2.2 解耦与重构是融合发展的基本路径

重构是融合理念的具体体现，也是城轨交通行业智能智慧化赋能生产力及生产关系调整在大规模设备更新改造中的实践和创新，可在业务、系统、网络和数据底座等方面进行重构。

### 2.2.3 线路解耦理论的核心内容

1) 业务重构：线路和线网调度指挥业务重构，两级调度合署指挥，按照同调度工种多线路或单线路多调度工种进行业务重构，强化线网协同指挥功能；车站级跨线路业务重构，通过业务重构、管理适配和技术创新，整合换乘车站服务和管理业务。

2) 设备系统与线路分离：将设备系统(如信号系统、供电系统、通信系统等)从具体的线路中解耦，使其能够独立于线路运行，实现跨线路的共享和灵活配置。适应业务重构需求，整合重构与之匹配的应用软件。

3) 模块化与标准化设计：通过模块化和标准化设计，使设备系统能够快速适配不同线路的需求，降低改造成本和复杂度。

4) 面向线网的重构：以线网整体为视角，重新规划和配置设备系统，提升全网资源利用率和运营效率。

### 2.2.4 线路解耦理论的具体应用

1) 信号系统解耦：实现信号系统与线路的解耦，支持列车跨线路运行和调度。通过统一的信号控制平台，实现多条线路的协同调度，优化列车运行间隔和换乘衔接。

2) 供电系统解耦：建立区域化供电网络，将供电

系统从单条线路中解耦，实现跨线路的电力资源共享和负荷均衡。引入智能电网技术，实时监控和调整供电负荷，提高供电系统的可靠性和能效。

3) 通信系统解耦：建设统一的通信网络平台，支持多条线路的数据传输和资源共享。通过5G、物联网等技术，实现设备系统的实时监控和远程运维。通信网络的整合重构，改变传统应用系统“烟囱”式体系架构和各个专业系统自成体系的网络拓扑，所有应用系统均接入线路骨干网和线网骨干网，共享通信网络资源和网络安全服务。

4) 车辆系统解耦：采用标准化车辆设计，使车辆能够跨线路运行，提高车辆利用率和调度灵活性，建立车辆共享池，根据客流需求动态调配车辆，减少车辆闲置和资源浪费。

5) 数据底座算力平台解耦：城轨行业创建并应用的城轨云，基于云计算技术的虚拟化、算力(计算、存储、网络和安全)资源的按需动态分配、高容错的安全性以及节能环保等特性，具备全部业务整体承载、专业系统网络覆盖、大数据平台信息共享、纵深防御网络安全及综合运维能力，实现线网和线路计算资源的统一配置，为各专业系统由线路级重构为网络级提供算力资源。

6) 面向线网重构成网络级设备系统，涵盖线网资源整合、动态重构与适配、枢纽节点优化及智能化运维几方面。线网资源整合指对全网设备系统进行统一规划，识别可共享的资源(如供电设备、信号设备、维修设备、数字化底座等)，优化资源配置，建立区域性设备中心，集中管理和维护关键设备，降低运维成本。动态重构与适配指根据线网客流变化和运营需求，动态调整设备系统的配置和运行模式，通过智能化技术，实现设备系统的自动适配和优化，提升线网整体运营效率。枢纽节点优化指在换乘枢纽站点，重点优化设备系统的衔接和共享，如统一信号控制、共享供电设备等，提升换乘效率和运营可靠性。智能化运维指引入大数据和人工智能技术，实现设备系统的智能化运维，如故障预测、健康状态评估、远程维护等。建立全网设备状态监控平台，实时掌握设备运行情况，支持快速决策和响应。

### 2.2.5 线路解耦理论的实施策略

开展顶层规划与设计，在城轨交通规划中，将设备系统解耦和线网重构作为核心原则，制定全网设备系统优化方案。系统筹划分阶段实施，根据线路的重

要性和改造紧迫性,分阶段实施设备系统解耦和重构,优先解决高负荷线路和关键节点的瓶颈问题。

### 2.3 从线路集群着手实施与线路解耦

实现设备系统与线路解耦,进而面向线网进行重构,可以从线路集群着手。对线网中的线路进行集群规划建设是提升线网功能的关键举措。《指导意见》提出,应引导从注重形态层面的“网络化”向注重功能层面的“网络化”,实现从以往“自然成网”向“引导成网”“更新改造成网”的“主动成网”转变。城轨线网的完善需要通过持续更新改造逐步实现,这是客观规律,很难通过一次建设就能使线网整体功能具有很高水平,也不能期待通过一次性改造对线网做全面更新实现整体变革。推进“主动成网”提升线网功能,关键切入点是引入线路集群理念,化整为群、分阶段规划与实施。设备与线路解耦面向线网重构,起步可以从面向线路群做起。

#### 2.3.1 线路集群理念

线路集群的理念是突破按线规划建设的局限,结合城市空间形态,对处于相同客流廊道的城轨线路,按线路群理念进行系统规划建设运营,形成“一干多支”“快慢结合”“共线运行”“跨线运行”的多条线路组成的线路群组。通过将多条线路视为一个整体系统,实现资源共享、运营协同、灵活配置、线网重构等。将线网按功能划分为若干线路群、站群,通过每个线路群、站群的功能提升实现线网的功能提升。线路集群不仅使得线路之间的换乘更加便捷,客流疏散更加高效,提高了整个线网的运营效率,同时为城轨交通的装备创新提供了重要的应用场景和需求引领,深刻影响设备的系统结构。

线路集群理念是随着城轨融合化、智能化发展,逐步形成的系统性理论和方法,在行业需求驱动、技术进步推动以及业内研究实践方面,已经逐步成为共识。线路集群理念在国内外城市(如东京<sup>[9]</sup>、伦敦、墨尔本等)有多个成功案例。如图 1 所示,澳洲墨尔本地铁线网呈现出典型的一干多支、共线运行特征。图中各色线条区分了不同的线路群,每个线路群均由核心线路及若干支线构成,并在市中心的市区环线(City Loop)实现线路间的换乘衔接。相较而言,我国雄安新区的城市轨道交通线网亦采用了相似的设计理念,如图 2 所示,表现为“一干多支、快慢结合”的布局模式。其中 R1 线作为骨干快线,与其他线路有机结合,共同构成了新区轨道交通的网络骨架。



图 1 墨尔本地铁线网

Figure 1 Train network of Melbourne metro



图 2 雄安新区城市轨道交通线网规划

Figure 2 Train network of Xiong'an New Area metro

#### 2.3.2 既有线改造中的线路集群理念

线路集群的理念同样适用于更新改造领域。为使既有线网实现“引导成网”“更新改造成网”的“主动成网”和功能层面的“网络化”,对既有线网进行线路集群的研究、划分、规划是重要的前提,为设备设施在更新改造过程中面向线网的重构提供了坚实基础。换言之,改造线路首先要明确集群,并融入相应集群。

线路集群理论体系研究方向可集中以下两方面。一是确立既有线网线路集群划分的指标和依据,如城市形态及客流廊道、线路客流、线路功能等;二是研究集群内骨干线路和骨干系统的识别方法。理论研究可借助复杂网络结构和功能的网络理论,分析城市轨道交通网络的拓扑结构、客流分布、换乘效率等;引入网络理论中的度分布、聚类系数等指标,以评估线

路集群的效率和效果；同时，利用交通流理论分析线网的客流分布、运行效率等，并借助排队论、流体力学等模型深入探讨线路集群的客流聚散效率和运行效率。

### 2.3.3 线路集群与设备自主化

利用集群中的自主化系统覆盖需更新的引进系统是既有线设备系统更新改造中线路群理念的一个重要场景。《指导意见》明确将“自主先进”作为既有线改造的基本原则之一，强调加强核心技术装备的自主攻关与应用，确保全生命周期供应链的安全可控和技术的先进性。同时，《指导意见》将“创新引领，提升自主化能力”列为六大措施之一，规划了涵盖系统级、零件级、新技术产品的自主化需求，旨在提升自主创新能力和降低设备更新换代的成本，提高维护效率，进而降低运营成本。在各城市线网中，常见引进设备和自主化设备共存的情况，其中引进设备的服务期限通常已经长于自主化设备，因此需先于自主化设备进行改造。通过合理划分线路集群，可以优先利用集群中的自主化系统延伸覆盖引进系统，或优先改造自主化程度较高的线路，并以此为基础逐步覆盖引进设备，最终实现整个线路集群的自主化改造，从而有效降低改造成本。

## 2.4 城轨更新改造的“三生”演进：衍生、再生、共生

城市更新在建筑进化规律的研究中，融合城市规划、建筑学、社会学、生态学等多学科成果，以可持续发展理念为指引，结合城市更新的需求和实践，形成了“建筑三生”理论，即从“衍生”“再生”到“共生”三个阶段。“建筑三生”是城市更新领域的重要理论框架，其核心思想和方法已经在全球范围内得到广泛应用，并为城市更新的可持续发展提供了重要指导。其中“衍生”指城市更新过程中，通过功能升级、空间重构等方式，使原有城市空间和功能得到延续和发展；“再生”强调对老旧城区、废弃工业区等进行功能重塑和环境修复，使其重新焕发活力，实践中概括为“留、改、拆、添”四字；“共生”注重城市更新中各利益相关方的协同合作，以及人与自然、历史与现代的和谐共存，实践中概括为“拼贴”形成“共生”的城市。

在既有线更新改造过程中，建议研究借鉴“建筑三生”理论。首先城市轨道交通的更新改造本身也属于城市更新的范围，特别是城轨服务设施和站城融合设施等跟城市紧密结合部分的改造。车站、高架桥、车辆段、TOD是城市建筑的一部分，车站出入口的优化直接与城市设施紧密相关。其次，城轨机电设备系统，随着既有线开通年限的逐步增长，新旧设备的共

存成为常态，“建筑三生”理论可作为解决设备更新迭代问题的重要借鉴。在城轨设备的更新过程中，“衍生”体现在通过技术创新和模式创新，使城轨衍生出新的功能和服务，以满足不断变化的市场需求和运营要求；“再生”策略主要体现在对老旧设备进行技术升级和功能改造，以延长其服役寿命；“共生”策略主要体现在将新旧设备进行整合优化，发挥各自优势，提升整体系统效率。城轨设备与线路解耦面向线网重构也有利于城轨更新实现“三生”。

在城轨更新“三生”理论研究中，可结合技术生命周期理论的系统分析方法和报废/老化管理的理念，评估城轨交通设备的全生命周期性能、成本和环境影响，为设备更新改造提供决策依据，有助于实现设备的可持续发展和优化配置。

## 3 结论

既有线改造是城轨交通发展的重要历史进程，需要积极探索理论创新。通过对当前城轨交通既有线改造面临的问题与挑战进行深入分析，本文提出了城市轨道交通既有线改造的顶层目标规划、理论创新方向和策略措施，提升既有线改造的科学性和有效性，推动城轨交通行业的可持续发展。

1) 将可更新性纳入设备性能评估体系，形成RAMSU，能够更全面地反映装备全生命周期性能，降低设备更新成本，延长设备使用寿命，并提升装备的市场竞争力。

2) 面向线网将设备系统与线路解耦重构，可以实现设备系统的灵活配置、资源共享和高效运维，提高城轨设备设施可更新性。

3) 从线路集群着手实施线路解耦，通过合理划分线路集群，可以优先利用集群中的自主化系统延伸覆盖引进系统，或优先改造自主化程度较高的线路，最终实现整个线路集群的自主化改造，从而有效降低改造成本。

4) 在城轨更新改造过程中，借鉴城市更新“三生”理论，结合技术生命周期理论和设备老化管理理念，将“衍生”“再生”和“共生”理念应用于设备更新改造，有助于实现设备的可持续发展和优化配置。

未来，城轨交通既有线改造需要进一步加强理论研究和技术创新，探索更多适应城市发展和乘客需求的改造模式和技术装备，为建设以智慧城轨、绿色城轨、融合城轨、国创城轨为特征的高质量城市轨道交通贡献力量。

(下转第38页)

- [5] 彭京, 冯江华, 肖磊, 等. 智轨电车自主导向与轨迹跟随技术研究[J]. 控制与信息技术, 2020(1): 27-31.  
PENG Jing, FENG Jianghua, XIAO Lei, et al. Research on autonomous guidance and track following technology of autonomous-rail rapid tram[J]. Control and information technology, 2020(1): 27-31.
- [6] 孙帮成, 刘志明, 崔涛, 等. 汽车列车多轴转向控制方法及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 154-163.  
SUN Bangcheng, LIU Zhiming, CUI Tao, et al. Research on multi-axis steering control method and simulation of train-like vehicle[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(4): 154-163.
- [7] LENG Han, REN Lihui, JI Yuanjin. Cascade modular path following control strategy for gantry virtual track train: time-delay stability and forward predictive model[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 71(7): 6969-6983.
- [8] LENG Han, REN Lihui, JI Yuanjin. Path following control strategy for gantry virtual track train[C]//2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2022: 4062-4067.
- [9] WANG Zehan, LU Zhenggang. Reconfigurable model predictive control for virtual track train path-tracking considering hinge force[C]//2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Chiang Mai, Thailand. IEEE, 2022: 1-5.
- [10] 湖南省市场监督管理局. 智能轨道快运电车通用技术条件: DB43/T 1837—2020[S]. 长沙: 湖南省新型城市轨道交通标准化技术委员会, 2020.
- [11] Bouchner P. Interactive driving simulators: history, design and their utilization in area of HMI research[J]. International journal of systems applications, engineering & development, 2016(10): 179-188.
- [12] KHOSRAVANI S, KHAJEPOUR A, FIDAN B, et al. Development of a robust vehicle control with driver in the loop[C]//2014 American Control Conference. Portland, OR, USA. IEEE, 2014: 3482-3487.
- [13] 袁希文, 冯江华, 胡云卿, 等. 智轨电车自动循迹感知与控制系统[J]. 控制与信息技术, 2020(1): 19-26.  
YUAN Xiwen, FENG Jianghua, HU Yunqing, et al. Perception and control module of the automatic tracking system for autonomous-rail rapid tram[J]. Control and information technology, 2020(1): 19-26.
- [14] 严永俊, 王金湘, 胡云卿, 等. 智轨电车横向运动预测控制研究[J]. 控制与信息技术, 2020(2): 25-30.  
YAN Yongjun, WANG Jinxiang, HU Yunqing, et al. Research on lateral motion prediction and control of autonomous-rail rapid tram[J]. Control and information technology, 2020(2): 25-30.
- [15] FENG Jianghua, HU Yunqing, YUAN Xiwen, et al. Development and validation of an automatic all-wheel steering system for multiple-articulated rubber-tire transit[J]. IET electrical systems in transportation, 2021, 11(3): 227-240.

(编辑: 王艳菊)

(上接第13页)

## 参考文献

- [1] 丁树奎. 扎实推进既有有线改造促进城轨可持续高质量发展[J]. 城市轨道交通, 2024(7): 1.  
DING Shukui. Solidly promote the transformation of existing lines and promote the sustainable and high-quality development of urban rail[J]. China metros, 2024(7): 1.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通既有有线改造指导意见(一): 任务与形势、定义与分类、原则与目标[J]. 城市轨道交通, 2024(6): 31-34.
- [3] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通既有有线改造指导意见(二): 策略与措施[J]. 城市轨道交通, 2024(7): 8-10.
- [4] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通既有有线改造指导意见(三): 路径与重点、保障措施[J]. 城市轨道交通, 2024(8): 18-20.
- [5] 魏运, 楚柏青, 光志瑞. 我国城市轨道交通既有有线改造路径探讨[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 17-21.  
WEI Yun, CHU Baiqing, GUANG Zhirui. Exploration of the path of refurbishment of urban rail transit lines[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 17-21.
- [6] 施董燕, 周明. 上海轨道交通既有有线运能提升研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 135-139.  
SHI Dongyan, ZHOU Ming. Transport capacity enhancement for Shanghai urban rail transit existing lines[J]. Urban mass transit, 2024, 27(10): 135-139.
- [7] 王山, 谭宗颖. 技术生命周期判断方法研究综述[J]. 现代情报, 2020, 40(11): 144-153.  
WANG Shan, TAN Zongying. Review of technology life cycle analysis methods[J]. Journal of modern information, 2020, 40(11): 144-153.
- [8] International Electrotechnical Commission. Obsolescence management: EN IEC 62402-2019[S]. Geneva: IEC, 2019.
- [9] 李妍. 东京都市圈轨道交通与城市协调发展分析[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 167-171.  
LI Yan. Analysis on coordinated development of rail transit and cities in Tokyo metropolitan area[J]. Railway engineering, 2022, 62(2): 167-171.

(编辑: 王艳菊)