

城市轨道交通行业走向 AI 未来的挑战

姜宇 何秀霞 孙恒

浙江众合科技股份有限公司 杭州 311305

DOI:10.12238/ems.v7i12.16439

[摘要] 随着我国轨道交通建设的高速发展，完善轨道交通智化越发重要，应用人工智能提升运营安全与维保效能是未来的发展方向。本文从人工智能在轨道交通行业中的应用现状展开研究；从智能列控、感知客服、客流预测、设备维护与风险应对等方面分析人工智能对行业潜在的技术颠覆；最后分析了 AI 对行业冲击的不确定性与应对共赢策略。本文对 AI 在未来轨道交通中的应用挑战提供了一定的实用参考价值。

[关键词] 人工智能；城轨交通；智能运维；感知技术；数字孪生；风险管理

1. 引言

至 2025 年 6 月，我国城市轨道交通运营里程突破 1.1 万公里，覆盖 54 个城市，运营线路达 326 条。随着轨道交通的高速发展，城市的客流压力持续增加，对运营调度、通信信号、牵引供电、运营服务和设备智能维护管理提出了新的技术要求，庞大的路网运维数据和记录是人工智能技术融入轨道交通行业的优势^[1-3]。人工智能近年在数字经济、科技基础、医疗、教育、互联网行业取得的显著成效，以及在类脑计算、深度学习、强化学习等实现载体的技术突破，论证了人工智能融入轨道交通行业的可能性和必然趋势。

2. 城轨交通AI应用现状

当前智能运维平台面临三大约束，一是数据孤岛，各子系统数据接口协议异构（如信号系统采用 Modbus，供电系统使用 IEC 61850），导致跨系统故障关联分析延迟≥15分钟（北京地铁 2024 年统计）；二是实时性不足，传统基于阈值的预警模型误报率达 32%（上海地铁 14 号线实测数据），难以支撑主动决策；三是轻量化缺失：车载边缘计算设备内存占用超 80%，制约实时诊断（广州地铁 18 号线测试案例）。国内各家地铁公司陆续搭建地铁智能运维平台，人工智能在轨道交通设备维护保障方面具备成熟的技术基础。以北京、上海、南京、广州地铁为例，北京地铁针对业务数据来源不统一、格式壁垒严重、有效数据互通难等痛点，对运维数据统一数据接入存储，集中高效共享，一站式融合处理多子系统；上海地铁从维护、分析、管理 3 方面分析运维需求，从感知、平台、服务 3 层构建运维平台，为城轨交通网络建立综合健

康管理标准体系^[4]；南京地铁从设备设施管理信息化、平台化、移动化方面建立智能运维平台，保证运维安全，保障高效，服务主体完善^[5-6]；广州地铁基于工业互联网、传感技术、大数据处理构建协同可迭代的智慧地铁生态，加速粤港澳大湾区交通网络体系互联互通^[7]。

3. AI对行业的潜在创新

3.1 列车运行控制

在人工智能的技术支持下，基于自动化等级 4 级 (Grade of Automation 4, GoA4) 无人值守的全自动运行系统 (Fully Automatic Operation, FAO) 技术深入研发互联互通的全自动列车运行系统，深化共线、跨线、越行等互联互通的全自动典型运营场景设计，满足多专业协同控制联动技术，落实城际-市域-城轨“三网融合”。提升列车智能化水平、优化列车自动驾驶性能和适应性，从效率、节能、舒适性等多目标综合优化，实现列车最佳运行控制，设计新一代车地通信与环境感知系统，降低对轨旁设备的依赖，提升列车控制效率，设计列车灵活组队与虚拟编组、连挂、解挂算法^[8]；车车通信时延≤50ms（对比 CBTC 的 200ms），支持动态虚拟编组：列车间距压缩至 15m（传统 60m），通过率提升 40%。推广列车健康管理自认知决策技术，突破传统预警分级局限、快速重投响应瓶颈与远程受控约束，使列车在异常事件中具备自主快速决策与自愈能力，基于联邦学习的故障诊断模型（如轴承过热），在数据不出域前提下，30 秒内生成处置方案，误判率<5%（杭州地铁实测）。减少因人工响应延迟导致的误操作及非规范处置，推动列车智能化向“类脑”层级演进。

3.2 全息感知客服

全息智能客服系统包含线网预约服务、热线招援管理、线网信息广播、智能票务服务、出行服务管理和服务督办管理六大模块。针对特殊人群，提供线上预约/扫码音视频通话及线下一键呼叫服务，并集成热线管理、工单管理、监听监看，实时发布信息与智能应急联动功能^[9]。公司官网、微博、公众号等公共媒体平台与客服感知系统全自动联动，实现信息智能更新发布、责任追溯及平台自主监控维护，同时支持移动端服务反馈统计、投诉自动受理（即投即办）和月/季年度服务评估。面向乘客提供站内路径规划、一体化导航及标识指引等全息感知服务。

3.3 客流预测管理

早高峰时段突发客流的高效处置与及时安全疏散是客流预测的核心目标。面对火灾与暴雨侵入等应急情况，需精确定位车站安全隐患，并实现广播、闸机、排风排气等设备的一体化自动联动。未来 AI 技术应覆盖全场景和全流程，构建数字化模型（含车厢、站台、大厅、进/出站口及紧急疏散场景等），其基础为多元数据采集，核心为全息立体化行为识别与记录，最终实现乘车拥挤度、在站密度、容限度预测与智能化的疏散引导客流。

3.4 设备故障预警

下一代故障预警系统需构建完备的智能运维体系（涵盖车辆、能源、通信、信号系统），融合四电、AFC、车站机电、列控及站台环控等多系统，实现与智能调度系统协调联动的一体化保障。该系统需对运输资源（线路/站场/车辆/供电/通信/信号/备品备件/维修工具等）实施动态监控、优化配置与调度运转，并同步建立智能运维决策系统与大数据监测安全评估系统，以提升隐患排查与风险管控能力；同时完善智能巡检系统，突破安全巡检单体设备的局限，基于设备功能逻辑实施综合巡检，实现故障智能化推演判断能力，将设备监测、报警预测、应急处置策略融入综合运维系统，结合 BIM 信息管理模型为故障精准定位与处置决策提供数字孪生依据。“构建信号系统数字孪生体，映射 10 万多设备参数，实现故障模拟推演（如道岔卡滞），预测准确率>90%，维修响应时间缩短 60%。

3.5 风险应对处置

城轨建设与运营面临超大规模路网在线设备、超强客流、

庞大职工安全操作管理及多源外部系统侵扰等系列压力，需通过技术革新突破隔离，实现多源融合对标。城轨智能化进程需保留既有规范规章，并推行两大策略。首先需“数据轻量化”，基于 AI 视觉/感知/学习进化智能组合计算^[10]，按“一系统一方法”分布计算处理，滤除无效信息，保留核心逻辑决策关联数据，降低通信带宽开销，提升安全事件识别效能。例如采用知识蒸馏技术，将 10GB 的 BERT 故障诊断模型压缩至 300MB（压缩率 97%），在车载边缘设备推理速度提升 5 倍，带宽占用降低 90%。其次，“处置轻量化”，解决系统自检逻辑简单化与分散独立导致的处置低效问题。通过分布式网络剪枝/权值共享/参数压缩优化 AI 计算，输出轻量化神经网络模型及调度中心可直存处置结果（可见即可用），精简设备档案，实现安全事件自主识别处置。例如可建立分级响应机制，Level 1（低风险），AI 自主处置（如车门复位），响应<10 秒；Level 2（高风险）：人机协同（如接触网断电），AI 提供 3 套预案，人工决策时间压缩至 30 秒。

4. AI 冲击行业的不确定影响

当前 AI 技术仍处于弱人工智能向强人工智能转型关键阶段，对城轨技术路线、产业形态、系统模式及训练基础存在多重不确定性。需推动 AI 从传统“以数据为中心”向以“运维管理为中心”转变，将“大数据计算”升级为融合行业特征因果关系的“数据理解”。

4.1 数据依赖问题

AI 需大量训练数据支撑计算，但城轨行业很多重大故障发生频次低（一旦发生则危及行车安全），故障脚本数据不足导致 AI 推断准确性存疑。

4.2 精度依赖问题

AI 可信度面临挑战，其归纳总结的本质，与 IT 系统基于规则判断的确定性逻辑存在差异。过度依赖 AI 可能将简单问题复杂化，此为 AI 全面落地城轨行业的关键障碍。

4.3 时间依赖问题

AI 对中长期的预测判断能力薄弱，而城轨设备的全生命周期管理的关键阶段恰在中后期，（此阶段设备故障率显著高于前期），需通过一定的业务机制弥补此技术短板。

5. AI 时代的包容共赢策略

AI 融入城轨运营、维护、装备、服务、安全及应急领域存在挑战，同时也带来发展新思路和变革。城轨行业安全是

基础, AI 是效率工具, 可提升效率但无法完全取代人, 亦无法承担岗位附加职责, 且必须受人工监督。“AI+城轨”共赢策略如下。

5.1 行业转型升级

构建智慧 AI 平台, 推动城轨行业由“运营管理”向“经营管理”形态转变, 基于实际运营能效与路网架构, 重新定位 AI 平台业务职能, 辅助管理人员实现灵活运输组织与高效调度指挥, 拓展产业发展新空间。

5.2 新技术融入赋能

以 AI 为载体, 快速对接北斗定位、5G 联接重构、云计算、量子计算等新技术, 例如隧道内定位精度可达 0.1 米(对比传统 1 米), 支持车辆精准停靠(误差<5cm), 减少车门-站台门间隙事故等, 增强超大城市轨交网络化的智能化维护能力。

5.3 人机互补提升运营质量

通过人机优势互补攻克行业难点。无人化自动巡检增强技术可突破维修物资共享壁垒、专家知识库储备不足、单兵应对能力差及网络化应急响应高成本等瓶颈。例如 AI 处理 99% 常规调度(如列车折返计划); 人工聚焦 1% 突发危机(如暴雨侵入), 结合 AR 眼镜实时获取 AI 辅助指令(如水位预警), 处置效率提升 50%。

6 结语

至 2030 年, AI 驱动城轨系统将可实现故障自愈率>80%(当前<30%); 能耗优化 15% 以上(通过列车群协同调速); 应急响应延迟<1 分钟(当前平均 5 分钟)。未来技术路径将呈现四大转型: 用精准便捷的全景管控替代传统乘客服务, 用全息感知技术融合传统的集中监测系统, 用主动进化的列车群网降低地面设备依赖, 基于“类脑”计算, 构建‘感知-决策-执行’闭环, 突破规则驱动型控制的局限性, 彰显 AI 赋能城轨交通的共赢优势。

[参考文献]

- [1] 陆鑫源, 朱莉, 张郁, 等. 城市轨道交通信号智能运维系统应用与实践[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(03): 82-86.
- [2] 殷瑞忠, 李广刚. 南京地铁设施设备运维管理平台建设及应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022 (10): 92-98.
- [3] 张雯柏, 彭翠云, 张立都, 等. 铁路信号集中监测智能分析与故障诊断测试脚本系统设计与实现[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29 (01): 71-76.
- [4] 景亮, 方晖, 张森. 城市轨道交通信息化云平台及大数据平台建设[J]. 现代城市轨道交通, 2020 (08): 129-134.
- [5] 郝勇, 赵健. 基于人工智能技术的轨道交通智慧车站研究[C]. 智慧城市与轨道交通 2022. 229-236.
- [6] 吴昊. 城市轨道交通列车自主感知系统及关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (06): 230-233.
- [7] 兰青辉, 刘锦峰, 陈晓轩. 人工智能技术在轨道交通信号系统测试中的应用[J]. 铁路技术创新, 2021 (S1): 121-126.
- [8] 段亚美, 施聪, 黄晓荣. 基于故障预测与健康管理技术的城市轨道交通信号系统健康管理体系[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23 (12): 177-181.
- [9] 王瑞锋. 基于智能检测监测与大数据技术的城市轨道交通智能运维管理[J]. 现代城市轨道交通, 2021(11): 85-89.
- [10] 宋浩, 韩广晖. 基于 BIM 和 AI 技术的铁路桥梁智能布跨研究[J]. 铁路计算机应用, 2022, 31 (07): 32-36.
- [11] 李云、王崇国、殷江宁. 基于云边协同的城市轨道交通信号系统方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (07): 194-199.
- [12]. 李立男、王明莉, 基于人工智能的轨道交通信号控制系统设计研究[J]. 信息记录材料, 2025, 26 (1): 101-119
- [13] 刘扬. 轨道交通信号系统的智能优化与性能提升[J]. 中国储运 2024 (6): 100-101.
- [14] 才让草. 基于人工智能的轨道交通信号配时自动控制方法探讨[J]. 电视技术, 2020, 44 (2): 32-33.
- [15] 林云志, 基于垂域大模型的轨道交通智能化初探[J]. 电气化铁道, 2024, 35 (06): 59-63.
- [16] 贺莉娜、郭泽阔, 基于人工智能和大数据的城市轨道交通智能化运维生态系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (9): 79-84.

作者简介: 姜宇 (1978—), 女, 项目经理/高级工程师, 硕士研究生, 交通信息工程及控制。

基金项目: 杭州市重大科技创新项目 (2022AIZD0071)