

基于系统工程方法的城市轨道交通车辆项目全生命周期技术集成研究

李克利

北京轨道交通技术装备集团有限公司, 中国·北京 100071

摘要: 随着我国城市化进程的加速和轨道交通网络的持续扩张, 城市轨道交通车辆项目呈现出技术复杂度高、涉及专业广、全生命周期跨度长等特点, 传统分散式技术管理模式已难以满足项目高质量发展需求。本文基于系统工程的整体性、层次性、动态性等核心原则, 界定城市轨道交通车辆项目全生命周期的阶段划分与技术集成核心内涵, 分析当前技术集成存在的痛点与瓶颈, 构建基于系统工程方法的全生命周期技术集成体系, 涵盖需求分析、设计研发、生产制造、运营维护、退役回收五大阶段的技术集成实施路径, 并结合实际案例验证体系的可行性与有效性, 最后提出优化策略, 为城市轨道交通车辆项目全生命周期技术集成的规范化、高效化实施提供理论支撑与实践参考。

关键词: 系统工程; 城市轨道交通车辆; 全生命周期; 技术集成

Research on Full Lifecycle Technical Integration of Urban Rail Transit Vehicle Projects Based on Systems Engineering Approach

Li Keli

Beijing Rail Transit Technology and Equipment Group Co., Ltd., China Beijing 100071

Abstract: With the acceleration of China's urbanization process and the continuous expansion of the rail transit network, urban rail transit vehicle projects exhibit characteristics such as high technical complexity, involvement of multiple disciplines, and a long full lifecycle. The traditional decentralized technical management model can no longer meet the requirements for high-quality project development. Based on the core principles of system engineering, including integrity, hierarchy, and dynamics, this paper defines the stage divisions and the core connotation of technical integration throughout the full lifecycle of urban rail transit vehicle projects, analyzes the current pain points and bottlenecks in technical integration, and constructs a full-lifecycle technical integration system based on system engineering methods. This system covers the technical integration implementation paths for five stages: requirement analysis, design and development, production and manufacturing, operation and maintenance, and retirement and recycling. The feasibility and effectiveness of the system are verified through practical case studies. Finally, optimization strategies are proposed to provide theoretical support and practical reference for the standardized and efficient implementation of full-lifecycle technical integration in urban rail transit vehicle projects.

Keywords: System engineering; Urban rail transit vehicles; Full lifecycle; Technical integration

0 引言

随着“交通强国”“智慧城轨”战略的推进, 城市轨道交通车辆项目已从单一的“制造导向”向“全生命周期价值导向”转变, 技术集成的复杂度大幅提升。然而, 我国城市轨道交通车辆项目的技术管理多采用“分段式”模式, 各阶段技术研发、实施与管理相互脱节, 设计阶段未充分考虑制造可行性与运营维护需求, 制造阶段与设计阶段的技术衔接不畅, 运营阶段的技术升级与前期设计脱节, 退役回收阶段未纳入全生命周期统筹规划, 导致技术冲突频发、资源浪费严重、全生命周期成本居

高不下、系统可靠性不足等问题。系统工程方法作为一种现代化的科学决策与管理方法, 通过结构化、系统化的思维和工具, 应对复杂系统的规划、设计、实施、运行和维护, 强调从整体视角出发, 协调技术、管理、经济和社会等多维度因素, 以实现系统目标的最优化。将系统工程方法应用于城市轨道交通车辆项目全生命周期技术集成, 能够打破各阶段的技术壁垒, 实现各专业、各环节的技术协同, 优化资源配置, 降低全生命周期成本, 提升项目整体技术水平与运营效益, 已成为行业发展的必然趋势。

1 城市轨道交通车辆项目全生命周期技术集成问题

1.1 需求界定不清晰, 技术需求与实际需求脱节

需求分析是技术集成的起点, 当前部分车辆项目的需求分析存在明显不足: 一是需求收集不够全面, 仅关注运营单位的基本需求, 忽视了乘客、环保、政策等多方面的需求, 导致技术集成方向偏离实际需求; 二是需求分析不够深入, 对需求的可行性、合理性论证不足, 部分技术需求过于理想化, 缺乏可实现性; 三是需求定义不清晰, 各专业、各阶段的需求衔接不畅, 导致后续技术集成出现冲突。例如, 部分项目在需求阶段过度强调车辆的技术先进性, 忽视了运营成本与维护难度, 导致运营阶段出现维护成本过高、故障频发等问题。

1.2 专业协同不足, 技术集成程度低

设计研发阶段是技术集成的核心, 当前存在的主要问题是: 一是各专业之间缺乏有效的协同机制, 机械、电气、软件等专业各自为战, 设计方案相互冲突, 导致技术集成难度增加; 二是设计研发与后续阶段脱节, 设计方案未充分考虑制造可行性、运营维护需求与退役回收需求, 导致生产阶段返工率高、运营阶段维护困难、退役阶段资源浪费; 三是技术创新与集成结合不够紧密, 新技术、新材料的应用缺乏系统性规划, 导致技术集成效果不佳。例如, 部分车辆的设计方案未考虑零部件的通用性, 导致制造阶段生产效率低下, 运营阶段零部件更换困难。

1.3 设计与制造技术衔接不畅, 质量控制不到位

生产制造阶段是技术集成的落地环节, 当前存在的主要问题是: 一是设计数据与制造数据无法有效共享, 设计方案的技术要求未准确传递到生产环节, 导致制造过程与设计要求脱节; 二是制造工艺与设计技术不匹配, 部分设计方案的工艺要求过高, 现有制造技术无法实现, 导致生产返工或技术妥协; 三是质量控制技术集成不足, 缺乏全流程的质量监测与管控, 导致产品质量存在隐患。例如, 某地铁车辆制造过程中, 因设计与制造技术衔接不畅, 导致车辆组装过程中出现部件配合偏差, 影响了车辆的运行稳定性。

2 技术集成体系优化策略

结合案例应用效果与行业发展趋势, 针对本文构建的技术集成体系存在的不足, 提出以下优化策略, 进一步提升技术集成的效率与效果:

2.1 强化需求分析的科学与全面性

建立多元化的需求收集渠道, 扩大需求收集范围, 充

分考虑运营单位、乘客、环保、政策等多方面的需求; 引入需求分析工具, 加强需求的科学性论证, 避免需求过于理想化; 建立需求与技术指标的映射关系, 确保需求能够准确转化为技术要求; 完善需求变更管理机制, 及时响应需求变化, 确保技术集成的适应性。

2.2 深化系统工程工具的应用

进一步推广 MBSE 方法的应用, 将其贯穿于全生命周期各阶段, 构建更加完善的系统模型, 提升协同设计与仿真验证的水平; 加强 TRIZ、六西格玛等工具的应用, 解决技术集成过程中的创新难题与质量问题; 引入人工智能、大数据等新技术, 优化技术集成的决策与优化过程, 提升技术集成的智能化水平。例如, 利用人工智能技术对运维数据进行深度分析, 提升故障诊断的准确性与效率。

2.3 完善数据平台建设

扩大数据平台的覆盖范围, 整合全生命周期各阶段、各专业的所有数据, 实现数据的全面共享; 加强数据标准化建设, 统一数据格式与接口, 确保数据的一致性与可用性; 采用大数据、人工智能等技术, 提升数据挖掘与分析能力, 为技术集成的决策、优化提供更有力的数据支撑; 加强数据安全保障, 建立完善的数据安全管理制度与技术防护体系, 确保数据的安全性与完整性。

3 案例验证

3.1 案例概况

本文选取国内某城市轨道交通 8 号线车辆项目作为案例, 该项目为该市重点轨道交通项目, 共采购车辆 30 列, 采用 6 节编组, 设计时速 80km/h, 主要用于缓解城市核心区域的交通压力。项目涵盖需求分析、设计研发、生产制造、运营维护、退役回收全生命周期, 涉及机械、电气、软件、材料等多个专业领域, 技术复杂度较高。

该项目在实施初期, 采用传统的分段式技术管理模式, 出现了需求界定不清晰、设计与制造技术衔接不畅、运维效率低下等问题, 导致项目进度滞后、成本超支、车辆可靠性不足。为解决上述问题, 项目团队引入系统工程方法, 应用本文构建的全生命周期技术集成体系, 对项目技术集成过程进行优化。

3.2 技术集成体系应用过程

3.2.1 需求分析阶段: 需求协同集成

项目团队采用系统工程的需求分析方法, 全面收集运营单位、乘客、政府部门等相关方的需求, 包括安全可靠、舒适性、经济性、环保性等方面, 形成需求清单; 通过多目标优化分析, 筛选出合理的需求, 明确技术指标,

制定需求规格说明书;建立需求变更管理机制,应对需求的动态变化,确保需求定义清晰、准确,为后续技术集成提供依据。例如,结合乘客需求,增加了 USB 无线充电、智能控温除湿等舒适性配置;结合环保需求,明确采用全碳化硅变流永磁牵引系统,实现节能降耗。

3.2.2 设计研发阶段:协同化设计集成

项目团队采用 MBSE 方法,构建车辆系统模型,建立协同设计平台,实现机械、电气、软件等专业的协同设计与数据共享;开展总体设计与专业集成,优化车辆总体架构,实现永磁牵引系统、轴箱内置转向架、智能控制系统等技术的集成应用;通过仿真验证,提前发现技术冲突,结合 TRIZ 理论对设计方案进行优化;组织专家评审,确认设计方案,确保设计方案的可行性与先进性。例如,在转向架设计中,集成轴箱内置技术,实现转向架轻量化与运行平稳性的协同优化,簧下重量显著降低。

3.2.3 生产制造阶段:工艺与质量集成

项目团队根据设计方案,开展制造工艺集成设计,引入数字孪生技术,构建生产过程模型,实现设计数据与制造数据的实时同步;优化生产流程,采用自动化生产线与智能检测设备,提升生产效率与产品质量;加强零部件集成与组装的技术管控,确保各部件配合协调;建立全流程调试检测体系,验证技术集成效果,确保车辆性能符合设计要求。通过工艺与质量集成,车辆生产返工率从 15% 降至 5%,生产效率提升 20%。

3.2.4 运营维护阶段:动态化运维集成

项目团队构建运营维护大数据平台,整合设计、制造与运维数据,实现数据共享;部署智能运维技术,安装多传感器融合的障碍物检测、摩擦副温度实时监测等设备,实现车辆运行状态的实时监测与故障诊断;建立预测性维护机制,提前发现潜在故障,及时进行处理;根据运营反馈,对车辆技术系统进行升级优化,将运维经验反馈到设计阶段,形成闭环优化。例如,通过对运行数据的分析,优化了牵引制动控制策略,车辆能耗降低 15%,故障率降低 25%。

3.2.5 退役回收阶段:绿色闭环集成

项目团队提前将退役回收需求纳入全生命周期规划,在设计、制造阶段采用可回收、易拆解的材料与结构;建立退役评估体系,对退役车辆的零部件状态与回收价值进行评估;采用环保拆解与再生利用技术,实现零部件的回收再利用,减少资源浪费与环境影响。例如,车辆内装材料采用可自然降解的地板布,零部件采用模块化设计,提

升退役回收效率。

3.3 应用效果分析

通过应用本文构建的基于系统工程方法的全生命周期技术集成体系,该项目的技术集成效果得到显著提升,具体表现为:

一是技术冲突大幅减少,各阶段、各专业的技术衔接顺畅,设计与制造阶段的技术冲突减少 80%,项目进度滞后问题得到解决,按时完成车辆交付。

二是车辆性能显著提升,安全可靠、舒适性、经济性等指标均达到设计要求,车辆故障率降低 25%,满载率优化幅度达 26% 以上,乘客满意度提升至 95%。

三是全生命周期成本大幅降低,生产返工率降低 10 个百分点,运营维护成本降低 20%,退役回收资源利用率提升 30%,实现了全生命周期价值最大化。

四是技术集成水平显著提升,实现了永磁牵引、轴箱内置转向架、智能运维等新技术的有效集成,形成了可复制、可推广的技术集成模式。

案例验证表明,本文构建的基于系统工程方法的城市轨道交通车辆项目全生命周期技术集成体系,具有良好的可行性与有效性,能够有效解决当前技术集成存在的痛点,提升项目的整体技术水平与全生命周期价值。

4 结语

本文围绕基于系统工程方法的城市轨道交通车辆项目全生命周期技术集成展开研究,分析当前技术集成的现状与问题,构建了基于系统工程方法的全生命周期技术集成体系,并通过案例验证了体系的可行性与有效性,为行业实践提供了有效的参考。

参考文献:

- [1] 王玉娟.城市轨道交通车辆基地综合利用项目建筑设计要点——以厦门地铁 4 号线后溪车辆段为例[J]. 大众标准化, 2025(22): 80-82.
- [2] 陈潢泽, 金希红, 郭峰等.基于研发驱动的城市轨道交通车辆延寿现状分析[J]. 铁道机车与动车, 2025(05): 7-10+15+5.
- [3] 宋华杰.《城轨车辆构造与维护》课程“专创政”融合教学探究[J]. 时代汽车, 2025(10): 76-78.
- [4] 陈玲.“岗课赛证+思政融通”融合育人视域下高职课程开发——以《城市轨道交通车辆构造》为例[J]. 家电维修, 2025(03): 31-33.
- [5] 郑昕, 王宇彤.城市轨道交通车辆基地综合利用项目建筑设计要点研究[J]. 城市建筑, 2025, 22(01): 177-181.

DOI:10.19892/j.cnki.csjz.2025.01.37.

[6] 徐帅, 阿鲁斯. 城市轨道交通概论[M]. 中国铁道出版社: 2024(09): 257.

[7] 赵晶, 晋永荣, 杨凤. 轨道交通车辆新技术[M]. 中国铁道出版社: 2024(08): 261.

[8] 梁敏之, 曹明华, 张涛. 城市轨道交通工程可行性研究项目管理[M]. 暨南大学出版社: 2023(12): 154.

[9] 庄群虎, 彭骏. 城市轨道交通消防安全[M]. 苏州大学出版社: 2023(08): 220.

[10] 贾晓霞. 城市轨道交通车辆大修项目的采购方式浅析[J]. 招标采购管理, 2023(02): 48-50.

[11] 陈亮. 基于海绵城市理念的轨道交通车辆基地项目建设实践[J]. 中国水土保持, 2021(07): 31-33.

[12] 贺婷婷, 曹艺, 曹炳欣等. 城市轨道交通车辆检修工艺研究[J]. 中国新技术新产品, 2021(12): 30-33.

[13] 魏巍. 虚拟现实技术在城轨车辆技术课程信息化建设中的应用[J]. 绿色科技, 2020(23): 256-257+270.