轨道交通工程车辆全生命周期检修策略分析

蔡占齐　刘瑞兵　于子建
北京市轨道交通运营管理有限公司　北京　100068

摘　要：本文聚焦轨道交通工程车辆全生命周期检修策略。先阐述车辆分类、结构与系统组成，划分全生命周期阶段并分析各阶段特征。指出当前检修模式存在阶段适配性不足、模式单一、全周期成本管控缺失等问题。提出搭建智能化状态监测体系、推进检修流程标准化建设、强化全生命周期成本管控、提升检修队伍专业化水平等实施路径与保障措施，为车辆检修提供科学指导。

关键词：轨道交通工程车辆；全生命周期管理；检修策略

引言：轨道交通工程车辆是轨道交通建设与运营的关键装备，其运行状态直接影响运营安全。随着轨道交通的快速发展，车辆数量增多、技术复杂度提升，传统检修模式难以满足需求。全生命周期管理理念为车辆检修带来新思路，通过全面考虑车辆从设计制造到老化退役的全过程，制定针对性检修策略，可提高检修效率、降低成本、保障车辆可靠运行，具有重要研究价值。

1 轨道交通工程车辆概述与检修需求分析

1.1 轨道交通工程车辆分类

轨道交通工程车辆依据用途、结构及作业场景，可分为多种类型，各类车辆功能明确、适配不同作业需求。按作业用途可分为施工类、检修类、应急类三大类，施工类车辆包括轨道铺轨车、隧道掘进车、道床捣固车等，主要用于轨道交通线路的新建、扩建及改造施工；检修类车辆涵盖接触网检修车、轨道检测车、车辆段检修车等，负责线路、接触网、车辆本身的日常检测与维护；应急类车辆包括救援拖车、消防应急车等，用于处理车辆故障、线路事故等突发情况。按轨距可分为标准轨、窄轨工程车辆，适配不同规格的轨道交通线路[1]。按动力形式可分为电力、内燃工程车辆，其中电力车辆环保节能，广泛应用于城市轨道交通领域，内燃车辆则适用于无供电条件的野外施工场景，各类车辆的差异化特征，决定了其检修需求和检修重点的不同。

1.2 工程车辆结构与系统组成

轨道交通工程车辆结构复杂，由多个系统协同工作，共同保障车辆的正常运行，各系统相互关联、相互影响，任一系统出现故障都可能导致车辆无法正常作业。车辆整体结构主要包括车体、走行部、制动系统、动力系统、电气控制系统五大核心部分。车体作为承载基础，用于安装各类设备和部件，保障作业人员安全；走行部由转向架、轮对、轴箱等组成，负责车辆的行驶导向和载荷传递，是车辆运行的关键部件；制动系统用于控制车辆启停、调节行驶速度，保障车辆运行安全；动力系统为车辆提供行驶和作业动力，分为电力驱动和内燃驱动两种形式；电气控制系统是车辆的“大脑”，负责控制各系统协同运行，实现车辆的自动化作业和状态监测。

2 轨道交通工程车辆全生命周期阶段划分与各阶段特征

2.1 全生命周期阶段划分

结合轨道交通工程车辆的运行规律和技术状态变化，参考行业标准及实际管理经验，将其全生命周期明确划分为四个阶段，各阶段的时间节点和划分依据清晰，便于开展针对性管理和检修工作。设计制造阶段从车辆研发设计开始，至车辆出厂验收合格、交付使用结束，核心是保障车辆设计合理、制造达标，为后续运行和检修奠定基础；初期投用阶段（磨合阶段）从车辆交付使用开始，至车辆完成磨合、技术状态趋于稳定结束，通常持续 3-6 个月，具体时长根据车辆类型和作业强度调整；稳定运营阶段（成熟阶段）从车辆磨合完成开始，至车辆出现明显老化迹象、故障发生率显著上升结束，是车辆使用寿命最长、作业效率最高的阶段，通常占全生命周期的 70%以上；老化退役阶段（衰退阶段）从车辆技术状态大幅下降、故障频发开始，至车辆停止使用、报废处置结束，核心是做好故障应急处理和残值回收。

2.2 设计制造阶段

设计制造阶段是轨道交通工程车辆全生命周期的

起点，直接决定车辆的性能、可靠性和可检修性，其核心特征是“前瞻性、规范性、达标性”。设计阶段需结合轨道交通工程的作业需求，明确车辆的性能参数、结构设计和系统配置，重点考虑车辆的可检修性，预留检修空间、优化检修流程，降低后续检修难度和成本；同时，需严格遵循行业标准和安全规范，规避设计缺陷，保障车辆运行安全。制造阶段需严格按照设计方案执行，加强原材料检验、生产过程管控和成品检测，确保车辆零部件质量达标、装配精度符合要求，避免因制造质量问题导致后续运行故障[2]。该阶段的核心目标是生产出性能可靠、安全高效、便于检修的工程车辆，为后续各阶段的稳定运行和科学检修提供坚实基础，其质量水平直接影响车辆全生命周期的检修成本和使用寿命。

2.3 初期投用阶段（磨合阶段）

初期投用阶段即磨合阶段，是车辆从出厂到技术状态稳定的过渡时期，核心特征是“技术状态不稳定、故障发生率较低但偶发、部件磨合关键”。该阶段车辆各零部件刚投入使用，存在配合间隙不合理、表面粗糙度未达标等问题，需通过低负荷、循序渐进的作业方式，完成各部件的磨合，使车辆技术状态逐步趋于稳定。此阶段故障多为偶发性故障，主要集中在零部件配合不当、电气系统接触不良等方面，故障影响范围较小、处理难度较低。同时该阶段也是检修数据积累的关键时期，需加强车辆状态监测，记录零部件磨损情况、故障发生频次及处理方式，为后续检修策略的优化提供数据支撑。此外，需对作业人员进行操作培训，规范操作流程，避免因操作不当导致车辆损坏，确保磨合阶段安全有序推进。

2.4 稳定运营阶段（成熟阶段）

稳定运营阶段即成熟阶段，是轨道交通工程车辆全生命周期中持续时间最长、作业效率最高的核心阶段，核心特征是“技术状态稳定、故障发生率低且规律、作业负荷稳定”。经过初期磨合后，车辆各零部件配合默契，技术状态达到最佳水平，能够适应高强度、常态化的作业需求，故障发生率维持在较低水平，且故障类型相对固定，主要为零部件正常磨损、易损件老化等常规故障，便于提前预判和处理。该阶段检修工作的核心是预防性维护，通过定期检测、定期保养，及时更换易损件，排查潜在安全隐患，维持车辆稳定运行状态，避免故障扩大化。

3 全生命周期视角下现有检修模式存在的问题

3.1 阶段适配性不足，检修一刀切

现有检修模式最突出的问题是阶段适配性不足，采用“一刀切”的检修方式，未能结合车辆全生命周期各阶段的技术状态、故障特征和作业需求制定差异化检修策略，导致检修工作针对性不强、效率低下。无论是初期投用的磨合阶段，还是稳定运营的成熟阶段，亦或是老化退役的衰退阶段，均采用统一的检修周期、检修内容和检修标准，忽视了各阶段的核心需求。例如，初期磨合阶段本应侧重零部件磨合监测和轻微故障排查，却采用与稳定运营阶段相同的高强度检修，造成人力、物力资源浪费；而老化退役阶段本应加强应急维修和故障处置，却仍沿用常规检修流程，无法及时处理频发故障，增加安全风险。这种“一刀切”的检修方式，既无法满足各阶段的检修需求，也难以实现检修资源的合理配置[3]。

3.2 检修模式单一，预防性不足

现有检修模式较为单一，多以事后维修和定期检修为主，缺乏预防性和前瞻性，难以提前排查潜在安全隐患，导致故障扩大化，增加检修成本和安全风险。事后维修模式是在车辆出现故障后才进行维修处理，这种方式虽然能够解决当前故障，但无法提前防范故障发生，易引发安全事故，影响工程进度；定期检修模式按照固定周期开展检修工作，未考虑车辆实际运行状态和零部件磨损差异，存在“过度检修”或“检修不足”的问题，过度检修浪费资源，检修不足则无法及时发现隐患。同时现有检修模式缺乏对车辆状态的实时监测，无法精准掌握零部件运行状态和老化趋势，难以提前预判故障，导致预防性检修流于形式，无法从根本上降低故障发生率。

3.3 全周期成本管控缺失

现有检修工作缺乏全生命周期成本管控意识，成本管控仅集中在检修实施阶段，忽视了设计制造、初期投用、老化退役等阶段的成本管控，导致全生命周期检修成本居高不下。设计制造阶段未充分考虑可检修性，导致后续检修难度大、检修成本高；初期投用阶段缺乏科学的磨合管理，导致零部件磨损过快，增加后续检修频次和成本；稳定运营阶段过度检修或检修不足，既浪费资源，又可能因故障扩大化增加维修成本；老化退役阶段未做好残值回收和环保处置，导致资源浪费和额外成本支出。现有成本管控缺乏系统性，未建立全生命周期检修成本核算体系，无法精准统计各阶段检修成本，难以优化成本配置，导致检修资源浪费严重，全生命周期运营成本难以得到有效控制。

4 全生命周期检修策略实施路径与保障措施

4.1 智能化状态监测体系搭建

搭建智能化状态监测体系是实现全生命周期检修的核心支撑，能够实时、精准掌握车辆各系统、各零部件的运行状态，为差异化检修提供数据支撑，提升检修的针对性和前瞻性。首先，在车辆关键部位安装传感器、监测终端等设备，实现对动力系统、制动系统、走行部等核心系统的实时监测，采集运行参数、磨损数据、故障信号等信息；其次，搭建数据管理平台，对监测数据进行汇总、分析、处理，通过大数据分析技术预判零部件老化趋势和故障发生概率，及时发出预警信号，为预防性检修提供依据；最后，结合各生命周期阶段特征，优化监测指标和预警阈值，初期投用阶段侧重磨合数据监测，稳定运营阶段侧重常规磨损监测，老化退役阶段侧重故障信号监测，确保监测体系与各阶段需求精准适配，实现“早发现、早预警、早处置”。

4.2 检修流程标准化建设

推进检修流程标准化建设，能够规范检修行为，提升检修质量和效率，避免“一刀切”检修，实现各生命周期阶段检修工作的规范化开展。结合车辆各阶段的技术状态和检修需求，制定差异化的检修标准和流程，明确各阶段的检修周期、检修内容、检修方法和质量要求。初期投用阶段制定磨合检修流程，重点开展零部件配合监测和轻微故障排查；稳定运营阶段制定常规检修流程，强化预防性维护；老化退役阶段制定应急检修流程，提升故障处置效率。同时建立检修质量验收体系，规范检修记录、故障处理等环节，确保检修工作可追溯、可核查，加强检修流程的监督管理，及时纠正不规范检修行为，推动检修工作标准化、规范化发展。

4.3 全生命周期成本管控

强化全生命周期成本管控，需树立系统思维，将成本管控贯穿于车辆设计制造、初期投用、稳定运营、老化退役全过程，实现成本优化配置，降低全生命周期运营成本。设计制造阶段优化设计方案，提高车辆可检修性，降低后续检修成本；初期投用阶段加强磨合管理，减少零部件磨损，降低检修频次；稳定运营阶段优化检修周期和检修内容，避免过度检修和检修不足，合理配置检修资源；老化退役阶段做好残值回收、零部件拆解利用和环保处置，减少资源浪费和额外成本支出[4]。建立全生命周期检修成本核算体系，精准统计各阶段检修成本，分析成本构成，找出成本管控重点，优化成本管控措施，实现检修成本的动态管控，提升资源利用效率。

4.4 检修队伍专业化提升

检修队伍专业化水平是保障全生命周期检修策略落地见效的关键，需加强检修队伍建设，提升检修人员的专业能力和综合素质，适应智能化、精细化检修的需求。首先，制定针对性的培训计划，结合各生命周期阶段的检修重点和智能化监测设备的使用要求，开展专业技能培训，提升检修人员对车辆结构、系统原理、故障诊断、智能化设备操作的掌握程度；其次，建立健全考核评价体系，将检修质量、故障处理效率、成本控制等纳入考核范围，激励检修人员提升专业能力；最后，加强技术交流与合作，引进先进的检修技术和经验，鼓励检修人员开展技术创新，优化检修方法，提升检修效率和质量，打造一支专业、高效、高素质的检修队伍，为全生命周期检修工作提供人才保障。

结束语

轨道交通工程车辆全生命周期检修策略研究意义重大。通过明确各阶段特征与需求，剖析现有检修模式问题，提出智能化监测、标准化流程、成本管控及队伍提升等策略，能有效提升检修质量与效率，降低全生命周期成本。未来，随着技术发展，需持续优化检修策略，适应轨道交通工程车辆不断变化的需求，为轨道交通行业的高质量发展提供坚实保障。

参考文献

[1] 耿文超, 洪鹤鹏, 乔勇杰. 简析城市轨道交通工程车辆运用安全 [J]. 中国设备工程,2022(3):258-260.

[2] 杜薇, 唐涛, 李仲华, 等. 城市轨道交通虚拟编组系统工程安全保障方法研究 [J]. 城市轨道交通研究,2025,28(6):218-223.

[3] 赵锐, 赵祎杰, 熊欣, 等. 轨道交通车辆车门系统生命周期环境效益评价 [J]. 济南大学学报（自然科学版）,2025,39(1):11-19.

[4] 王俊哲, 朱琳, 刘志钢, 等. 基于可靠性分析的城市轨道交通设备生命周期风险评估 [J]. 城市轨道交通研究,2025,28(4):60-66.