

# 上海轨道交通车辆延寿评估方法探讨

张枝森

(上海地铁维护保障有限公司车辆分公司,200237,上海//工程师)

**摘 要** 为了保障列车长期安全、可靠地运营,降低列车总体运维成本,开展车辆寿命评估以支撑其后续使用决策是十分必要的。探讨了整车状态评估的总体流程,探讨了车体和转向架状态、机械部件状态、电气部件状态、线缆状态的具体评估方法,并提出了制定车辆延寿改造方案的总体原则。所提出的评估方法可为其他使用寿命到限车辆评估体系的建立提供参考,也为车辆退行更新处置相关工作打下了基础。

**关键词** 城市轨道交通; 车辆; 寿命评估; 延寿改造

**中图分类号** U279.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.S1.007

## Discussion on Evaluation Method for Shanghai Rail Transit Vehicle Service Life Extension

ZHANG Zhisen

**Abstract** In order to ensure the long-term safe and reliable operation of trains and reduce overall operation and maintenance costs, it is necessary to conduct vehicle lifespan evaluation to support subsequent usage decisions. The overall process of whole vehicle condition evaluation is explored, and specific methods for evaluating conditions of carbody and bogie, mechanical component, electrical component and cable are discussed, and the general principles for developing vehicle lifespan extension renovation plans are put forward. The proposed evaluation methods can provide reference for establishing other evaluation systems for other vehicles having service life approaching the limit, and also lay a foundation for the related work of vehicle retirement, upgrade, and disposal.

**Key words** urban rail transit; vehicle; lifespan evaluation; lifespan extension renovation

**Author's address** Vehicle Branch of Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co., Ltd., 200237, Shanghai, China

地铁车辆作为高价值资产,延寿或报废的决策将影响其经济性:若车辆的实际使用寿命大于设计寿命,在使用至设计寿命后就将车辆报废,无疑是对资产的巨大浪费;若因设计、制造和运维等环节

因素影响车辆的使用寿命达不到设计寿命,继续使用至设计寿命又存在诸多安全隐患。

上海轨道交通自 1993 年 1 号线投运以来,已从运营里程 16 km、96 辆车逐步发展到运营里程超过 800 km、车辆数超过 7000 辆的运营规模。其中,2024 年至 2026 年将有近 88 列、560 辆车的运营年限超过 20 年,为了确保这些车辆能够继续长期安全、可靠地运营,也为了降低车辆总体运维成本,亟需开展寿命评估以支撑后续使用决策,保障运营安全。此外,基于政府部门的审批决策规范化,需要全面、科学的评估规范和结论为审批决策提供依据。

根据 COMET(国际地铁联盟)报告:对 32 个地铁车型进行了调研,计划进行状态评估和延寿的车型有 14 个,其中有 8 个车型已实现延寿。延寿评估典型案例是香港、圣地亚哥和圣保罗的案例,但目前涉及具体整车型评估方法的文献报道较少<sup>[1-6]</sup>。

列车延寿工作总体按照“先评估、后延寿”的原则开展,先对车辆状态开展评估,根据评估结论确定车体、转向架及电气部件等设备的补强、更新方案及延寿的使用寿命。

### 1 车辆延寿评估流程

车辆延寿评估流程如图 1 所示。

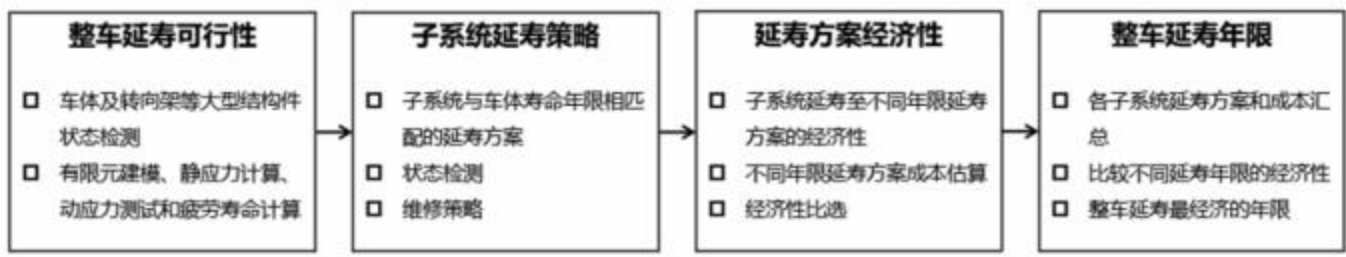


图 1 车辆延寿评估流程

Fig. 1 Process of vehicle lifespan extension evaluation

车辆主体结构车体的寿命决定了整车的寿命,因此状态评估的核心就是评估主体结构车体及转向架的使用寿命,并制定相应的延寿改造方案。对于车辆的其他子系统,通过相应的状态评估分析以及对标上海轨道交通现有及未来列车相关技术规



范和发展方向,在延寿改造中结合当前状态进行匹配性升级改造。车辆状态评估主要分为车体和转向架评估、机械部件评估、电气部件评估和线缆评估 4 块内容。

## 2 车体和转向架状态评估

车体结构和转向架构架是确定车辆延寿可能性的最为关键的两个部件。在日常维护中较难发现两者的缺陷,即使缺陷被发现,其维修难度又较大或维修替换成本较高。尤其是车体结构,其寿命决定了车辆延寿的可行性和整车的寿命;而对于转向架构架,虽然可以通过维修或更换来延寿,但其成本将影响整车延寿的经济性。因此,有必要对车体结构和转向架构架进行专业评估,已确定其结构薄弱点和使用寿命。

评估方法主要为:建立车体结构和转向架构架的有限元模型,结合目视检查、无损检测 and 不同工况下的动态测试,对有限元模型进行校验,然后通过有限元模型仿真计算对车体结构和转向架构架进行疲劳分析,进而计算出车体和转向架的实际寿命。具体评估流程入图 2 所示。



图 2 车体及转向架状态评估流程

Fig. 2 Process of carbody and bogie condition evaluation

车体疲劳寿命计算应该符合以下要求：

- 1) 测试对象为试验列车中的状态良好的车辆,至少选取 1 节拖车和 1 节动车进行测试,车轮和钢轨条件应处于磨合一段时间后的正常状态。
- 2) 测试时间不低于一个完整的运营周期,包括列车出库、全天运营、入库。将采集到的动应力-时间历程整理成若干个应力谱,并通过雨流计数法统计出动应力谱的频次。
- 3) 基于有限元强度评估结果、无损探伤结果确定应变贴片区域;测试通道数量应全面覆盖车体/转向架关键区域、薄弱点等代表性区域,以确保评估结果真实有效。每节车的测试点不少于 40 个。

4) 测试项目包括关键部位应力、三向振动加速度、车钩力、抗侧滚扭杆载荷和车辆运行速度等。

5) 根据车体关键焊缝接头类型及承载方向,参考 IIW(国际焊接学会)标准,选取合适疲劳等级的 S-N 曲线及相关参数。通过累积损伤理论计算测试段的疲劳损伤值,结合测试段所对应里程,折算出车体结构关键焊缝的使用寿命。

根据强度和疲劳寿命计算的结果,可以确定影响车辆延寿的薄弱区域,并对薄弱区域提出具体的补强方案和维保策略,形成车体和转向架补强延寿方案,并计算校核补强后车体和转向架的延寿年限。

除此之外,为了确保车辆能有效达到预期的延寿年限,建议采取额外检查或维保等措施,并制定作业流程,以确保将来所有影响车辆寿命的运营参数的修改都必须被记录和评估,这包括：

- 1) 定期目视检查列车以识别损坏的出现。建议对敏感区域进行定期检查,检查一些列车上不需要拆卸就可以检查到的区域。对于难以检查的区域,需要检查列车数量将受到限制(1 列或 2 列车)。检查周期将配合以下两个决定因数的关键程度:估计寿命与预期寿命的差距以及损坏所造成的后果的严重性级别。
- 2) 跟踪负载变化情况。确保将来随着运营和维护条件的变化,作为计算剩余寿命基础的负载条件不会出现不利的变化:延长线开通导致行驶速度提高、网络状态的恶化、列车年里程的增加等。若发现负载参数发生了显著变化,可提醒运营部门进行调整。

## 3 机械部件状态评估

除了车体和转向架以外的其它机械部件包括贯通道、车钩和缓冲装置、受电弓、车门系统的机械部件、制动系统的机械部件、牵引系统的机械部件、空调通风系统的机械部件。机械部件状态评估流程如图 3 所示。



图 3 机械部件状态评估流程

Fig. 3 Process of mechanical component condition evaluation



### 3.1 数据分析

一般来说,通过对无损耗零部件的定期维护和状态测试以及对有磨耗的活动性零部件的定期更换是可以实现机械部件的不断延寿,从而使其寿命与整车的延寿寿命相匹配。

首先,需对机械系统的部件进行细分,将机械部件划分为无损耗和有磨耗的部件,并了解各部件的使用寿命和对列车安全运营的影响,识别与延寿相关的主要部件。其次,通过查阅机械部件在服役期间的历史信息,包括更换部件、更换频率、故障率和故障类型以及维修修程,了解机械部件自投入运营以来所经历架/大修的次数,以及每次架/大修后机械部件的状态变化和维护情况。机械部件的故障一般是渐进性故障,主要是由产品参数的劣化过程(磨损、腐蚀、疲劳、老化)逐渐发展而形成的。机械部件故障特点是,发生的概率与使用时间呈正相关,且只在部件有效寿命的后期才表现出来。渐进性故障一旦发生,就标志着产品寿命的终结。因而渐进性故障往往是机械部件需进行更新的标志。由于这种故障是逐渐发展的,因此,通常可以通过早期状态监测来预防。

此外,还需要了解机械部件的停产和备件情况以及升级的需求,据此进行延寿评估。

### 3.2 状态检查

机械部件的状态检查主要分为外观检查、功能检查,检查项点如下:

检查篷布脱线、破裂、钩板的磨损度;连接框检查项点:检测钩板、钩板尺寸;对中心轴、钩锁总压缓冲器颈部进行探目视检查管路接头损坏、电钩驱动机构调节弹簧的损坏情况;检测缓冲器静态压缩试验。

电弓总成探伤;检测升弓静态压力曲线;目视检查高压接线盒的损坏情况;检测断路器内阻值、绝缘子检查项点:目视检查门页定位销损坏情况、丝杆

电阻值;检测电加热器三相绕组电阻值和三相电流。

### 3.3 延寿评估

经过上述的数据分析和状态检查,还需要结合维保修程、备件保障情况和技术局限性等方面提出机械部件的延寿方案,以确保延寿后机械部件整个生命周期的可靠性、可用性和安全性。

机械部件的妥善保养与其使用寿命是息息相关的。因此,对于目前状态良好或无需更换的机械部件,可以通过增加维修项点和维修频率来持续跟踪部件的状态变化,从而在保障系统安全性的同时提高延寿的经济性。

备件的库存量和车辆延寿期内的供应情况很大程度上会影响延寿策略的制定。若机械部件备件供应及供应商服务有保障,则可以对比分析更新方案和采购备件的成本,同时考虑两种延寿策略在架大修成本上的差异。

基于以上的评估结论和不同延寿策略,可提出一种或几种机械部件延寿方案,例如,整体更新、部

外观、紧急开门装置面罩、上下导轨变形情况、制动装置损坏情况、门页定位销的定位槽变形磨损、门槛和门肩压轮外观;轴承套探伤;检测电机减速齿轮转动轴、碳刷长度、制动装置功能。

5) 制动系统机械部件检查项点:目视检查空压机电机、空气干燥器、气制动控制面板底板、检查单元制动机、空气过滤器、各类阀的损坏生锈情况;检测空压机、空气干燥器、气制动控制面板、各类阀的气密性和功能;单元制动机推杆探伤;测试单元制动机、空气过滤器泄漏情况;气缸探伤和气密性测试。

6) 牵引系统机械部件检查项点:目视检查牵引电机风罩损坏和生锈情况、齿轮箱箱体损伤和腐蚀情况;牵引电机绝缘阻值测试、三相绕组阻值、耐压测试、动平衡测试、空转测试;齿轮箱座吊杆、大小齿轮齿廓、小齿轮轴探伤;齿轮箱轴向间隙测试和跑合试验;外毂轮齿和内齿筒轮齿探伤。

7) 空调通风系统机械部件检查项点:检测压缩机吸排气性能;检测压缩机电机三相绕组、三相电流和绝缘值;压缩机氮气检漏;压缩机保压检漏;压缩机真空检测;检测通风风机、冷凝风机叶轮动平衡;检测通风风机、冷凝风机整机振动检测限值;电机定子线圈真空高压浸漆和耐电压测试、电机转子动平衡测试;检测电机三相绕组、三相电流和绝缘值;检查空调加热器各个加热管正常加热和绝缘和性能检测。各机械系统主要

1) 贯通道检查项点:目视漏水的情况;检查上踏板磨损情况;锁闭装置功能正常。

2) 车钩和缓冲装置检查项点:检查车钩连接销、钩杆、钩杆连接销尺寸;车钩连接环、钩头轴颈、液缸损坏情况、缸体缓冲段锈蚀情况;车钩杆外观、接地线和垂向支撑弹簧;检测液压缓冲器大螺母硬度;液压缓冲器

3) 受电弓检查项点:受电弓升降弓状态和时间;检测受电弓检查避雷器、连接电缆、熔断器情况;检测避雷器直流参数、熔断器绝缘电阻。

4) 车门系统机械部件检查项点:外观损坏、密封胶老化、下部定



