

# 我国标准地铁车辆的全寿命周期成本构成及控制

陈国锋<sup>1</sup> 蔡 勋<sup>2</sup> 蔡岳辰<sup>3</sup> 王晓晶<sup>1</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司资产能源部, 130062, 长春; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司检修运维事业部, 130062, 长春//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 对标准地铁车辆的全寿命周期成本进行分解, 分析车辆全寿命周期成本构成、成本因素及成本影响因素。统计了既有地铁车辆的全寿命周期成本构成, 并根据分析结果明确了降本方向。在修程修制及设备寿命的优化, 简统化(即简单、统一、标准化)、自主化、可维修性设计, 智能运维及均衡修的实施等方面, 提出了降本解决方案和具体措施。

**关键词** 地铁车辆; 全寿命周期; 成本管理

**中图分类号** F530.7

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.04.002

## Whole Lifecycle Cost Composition and Control of Standard Metro Vehicle in China

CHEN Guofeng, CAI Xun, CAI Yuechen, WANG Xiaojing

**Abstract** The whole lifecycle cost of standard metro vehicle is decomposed, and the vehicle full lifecycle cost composition, cost factors and cost influencing factors are analyzed. The whole lifecycle cost composition of existing metro vehicles is statistically analyzed. According to the analysis results, the cost reduction direction is defined, cost reduction solution and specific measures are put forward from aspects including the optimization of maintenance schedules, repair programs and equipment lifespan, simplification (simplicity, unity and standardization), autonomy, maintainability design, intelligent operation-maintenance and balanced repair implementation.

**Key words** metro vehicle; whole lifecycle; cost management

**First-author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

针对地铁市场产品种类繁多、不利售后维修的弊端, 中国中车集团有限公司牵头研发了一种系列化标准地铁(以下简称“标准地铁”)车辆。研究标准地铁车辆的全寿命周期成本, 可验证新技术和新产品的经济性, 为产品改进设计、降低车辆全寿命

周期成本提供科学依据。

本文对标准地铁车辆的全寿命周期成本进行分解, 分析成本因素及成本影响因素, 并对标准地铁车辆的全寿命周期成本进行量化分析, 并分析各项成本占比; 根据分析结果明确降本方向, 研究降本解决方案和具体措施, 为降低地铁车辆全寿命周期成本提供管控方法。

## 1 全寿命周期成本及其因素分析

### 1.1 全寿命周期成本的概念及分解

寿命周期是从项目概念到处置的一系列可识别的阶段。全寿命周期成本是项目的整个寿命周期所产生的总成本, 寿命周期成本只包括费用要素, 不包括收入或价值。车辆的全寿命周期成本以1列列车为单元进行成本核算, 涵盖了研发设计阶段、生产制造阶段、使用维护阶段及报废处理阶段的寿命周期全过程所有投入费用。

根据车辆全寿命周期全过程所包含的阶段, 车辆全寿命周期成本可分解为新车成本、使用维护成本及报废成本。其中使用维护成本包含检修成本(包含预防性维修及修复性维修成本)和能耗成本。

### 1.2 成本因素及成本影响因素

我国地铁既有产品基本均未到报废阶段, 无相应的报废成本数据, 故本文忽略报废成本的分析。

全寿命周期成本分析主要对车辆使用维护成本进行分析。其中检修成本主要包含人工成本和材料成本两类。检修的成本因素及成本影响因素见表1。

检修成本的主要影响因素为修程修制、设备寿命、可维修性设计、运维模式、检修方式。

## 2 全寿命周期成本的构成

### 2.1 新车成本的构成

对既有地铁车辆的新车成本、检修成本、能耗

表 1 检修的成本因素及成本影响因素

Tab.1 Maintenance cost factors and cost influencing factors

成本类型	成本因素	成本影响因素
人工成本	检修间隔	修程修制、设备寿命、检修方式
	检修时长	可维修性、运维模式、检修方式
	检修内容	可维修性、免维护设计、集成设计
材料成本	备件品种	等寿命设计、免维护设计、通用互换性
	备件数量	修程修制、设备寿命、运维模式
	备件价格	通用互换性、标准化、模块化、自主化设计

成本进行统计分析发现,新车成本占比约为 25%,检修成本占比约为 35%,能耗成本占比约为 40%。一般新车成本由项目合同价格决定。随着车辆轻量化、节能、智能化、降噪、环保等要求的不断提高,以及新技术、新产品的应用,新车成本难以下降,个别车型新车成本略有增加也属于合理范围内。

2.2 检修成本的构成

根据检修内容,地铁车辆的检修成本可按日常维修、架修、大修及修复性维修进行分解。检修成本来源于全寿命周期成本测算。全寿命周期成本测算数据包括预防性维修和修复性维修的材料成本和直接人工成本。依据地铁的修程修制和系统部件检修维护大纲,计算车辆预防性维修所产生的工时费与材料费,包含架修、大修的人工及材料成本。根据各系统预防性和修复性成本测算数据,统计每个系统的日常维修的人工、材料成本,统计每个系统的架修、大修人工成本和材料成本,统计每个系统的预防性维修人工、材料成本,统计每个系统的修复性维修人工、材料成本,统计整列车的预防性和修复性维修人工、材料成本。各检修修程的成本构成统计如表 2 所示。

表 2 各检修修程的成本构成统计			
Tab.2 Cost composition statistics of each maintenance schedule			
修程	检修总成本占比/%	检修成本中的材料成本占比/%	检修成本中的人工成本占比/%
日常维修	30.4	17.5	72.3
架大修	65.0	76.8	26.7
修复性维修	4.6	5.7	1.0

由表 2 可见,修复性维修成本占比很少,日常维修人工成本占检修总人工成本的 72.3%,架大修的

材料成本占检修总材料成本近 77%。由此可见,检修成本控制应主要考虑降低日常维修成本和架大修成本,重点考虑降低日常维修人工成本和架大修材料成本。

2.3 能耗成本构成

能耗包含牵引能耗和辅助能耗。能耗成本数据由地铁项目的线路进行的仿真分析计算获得。能耗成本与列车质量及空气动力学等息息相关。可采取车体轻量化设计、改善车辆空气动力学性能及牵引性能、电机选型等手段进行节能设计,进而降低能耗成本。

3 降本方案和具体措施

由成本构成分析可知,降低检修成本和能耗成本是有效降低全寿命周期成本的主要方向。根据全寿命周期成本因素及影响因素分析,通过修程修制及设备寿命优化,采用简化(即简单、统一、标准化)、自主化、可维修性设计,实施智能运维及均衡修等措施,能有效降低全寿命周期人工成本和材料成本。

3.1 修程修制及设备寿命的优化

3.1.1 修程修制的优化

分析既有车辆各零部件的寿命周期、检修维护、修程修制、检修周期及实际走行里程等基本情况,对比不同技术平台的技术优缺点,优化修程修制。标准地铁车辆预防性维修修程如表 3 所示。可提升架修、大修检修间隔,减少全寿命周期检修次数。列检最短检修周期为 1 d,月检最短检修周期为 1 月,年检最短检修周期为 1 年。

表 3 标准地铁预防性维修修程				
Tab.3 Standard metro preventive maintenance schedule				
类别	修程	维修周期判断指标		
		设计速度为 80 km/h 的列车运行里程/万 km	设计速度为 120 km/h 的列车运行里程/万 km	时间周期
日常维修	列检			1 d
	月检	1.17	1.67	1 月
	年检	14	20	1 年
定期检修	架修	70	100	5 年
	大修	210	300	15 年

3.1.2 设备寿命的优化

设备寿命的优化主要是基于既有地铁车辆的

运维数据,尽量延长设备寿命,提高设备寿命与修程修制的匹配性,减少设备全寿命周期中的零部件更换次数。首先,统计分析既有车辆各零部件的设计寿命、检修维护、实际更换等基本情况;然后,以设备实际使用寿命能力为基础,在不增加全寿命周期成本的前提下,采用等寿命设计及延寿设计,制定合理可行的方案,优化地铁车辆设备寿命。

### 3.1.3 具体优化建议及效果

在优化后的地铁车辆修程修制中,日常检修取消了周检,加大架修里程间隔,加大大修里程间隔和时间间隔,减少低级别检修次数,减少大修次数,延长车辆里程寿命,降低单位里程成本。

在设备寿命优化中,提高部件寿命与修程的匹配性,减少零部件更换次数,减少了备件品种和数量,减少过度修,有效降低全寿命周期成本。其中:轴承类部件和电器元件须结合车辆实际运营情况,按照里程和时间寿命管理;对于寿命未达到架大修年限的零部件,按照里程或时间寿命管理,规划到年检里;尽量减少检修更换次数,以节省材料成本和人工成本。

## 3.2 简统化、自主化、可维修性设计

### 3.2.1 简统化、自主化设计

统一设计旅客界面、操作界面及维护界面的形式,统一功能布局及设置布局,对各系统及部件接口进行标准化设计,对关键系统及部件的易损易耗件和备件进行规格化设计,进而实现不同类型车辆平台间的部件互换。在同类型车辆平台内,易损易耗件及主要维修单元应通用、可互换,各设备的同类接口应规格化、标准化,以实现不同厂家生产的车辆零部件通用互换。部分关键部件应尽量实现国内自主设计、自主制造。

### 3.2.2 可维修性设计

各设备及元部件应尽量采用快速拆装且免维护结构设计、少维修设计及集成化设计。例如:空调集成 PFC(功率因数校正)与变频器的一体式设计、集成升压板与变频板的一体式设计、卡接式滤网结构设计、集成式照明电源等。这些设计结构简单,维护便利,能减少日常维护项点,降低维修的人工成本。

### 3.2.3 优化效果

平台间、平台内、零部件及易损易耗件的简统化设计,能减少备件品种和数量,提升整车标准化、模块化水平,提升整车维修经济性,降低维修工时,

提升检修效率,提升车辆换修方便性和互换性,有效降低检修成本。

关键部件的自主化设计,不仅能降低该类部件的采购成本,还能降低使用成本和检修成本。

可维修性设计能提高设备的可维修性,减少检修项点,降低维修工时,提升检修效率。

## 3.3 智能运维及均衡修

### 3.3.1 智能运维

在车辆走行部、车下设备、弓网、空调、车门等部位安装传感器等监测设备,并配置地面智能监测系统,进而实现智能运维。

基于 PHM(故障预测与健康管理系统)的预测可实现状态修。PHM 系统可实现对制动系统性能的实时检测,通过检查闸瓦的间隙判断是否需要更换闸瓦等;PHM 系统可实时监测车门系统的开关门电流、开关门阻力、关键尺寸、部件的安装状态等,并在监测数据出现大幅变化时及时发出预警,实现预测修。此外,空调系统、牵引及辅助系统的清洁状态、性能测试、部件更换等检修,都能基于 PHM 系统的预测结果实现状态修。

轨旁检测系统具有 360°外观检测模板,其检测内容覆盖车体、车下装置、转向架、司机室、客室、车顶受电弓等车辆日常维保项点。

实现智能运维后,可使故障状态检查智能化。可取消扬声器和摄像头的日检,实现车身及司机室头罩的状态修。对于转向架轮对轴箱的尺寸检测、状态检查,以及轴箱轴承、齿轮箱轴承及牵引电机轴承的更换等作业,智能运维系统可根据维修数据、轨旁数据、走行部 PHM 健康评估结论及寿命预测结论,作出最优检修决策。

### 3.3.2 均衡修

日常维保采用均衡修模式。均衡修模式融合了月检和年检的作业内容,形成 12 个检修包或 24 个检修包,其可利用运营窗口期,灵活执行检修任务。当技术成熟、经验成熟,且具备足够的设备资源时,架修、大修也可采用均衡修模式。

### 3.3.3 优化效果

智能运维增加了状态修的服务范围,实现了部分项点的预测修,使部分设备实现了自动化日常巡检,可延长检修间隔,提升检修效率,减少检修用时,有效降低日常检修人工成本等。

通过检修智能化手段和基础业务的融合,实现数据采集、数据管理、数据分析及业务管理功能,为

产品提供维修决策,降低运营故障,优化修程修制,提升自动化水平及信息化水平,提高生产效率及车辆可靠性。均衡修各个工作包工作量均衡,工作量稳定,人员需求稳定,人工利用率高,检修效率高,有效降低了人车比。均衡修利用运营非高峰时段窗口期执行检修任务,提高了检修工作灵活性,减少了检修停时,降低了检修成本,提升了车辆可用性。

## 4 结语

通过修程优化、设备寿命优化,提高了修程与设备寿命匹配性,降低了全寿命周期人工及备件成本。通过可维修性设计、智能运维、均衡修等手段,提高了检修效率,降低了全寿命周期人工成本。通过简化、自主化设计,降低了备件采购成本。今后,随着智能运维系统普及和数据积累,车辆关键部件检修间隔能够适当得到有效延长,状态修范围能够进一步扩大,在提高车辆可靠性、减少故障率、减少过度修、降低全寿命周期成本方面还有降本挖潜空间。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB

(上接第4页)

## 4 结论

1) 车体铝合金结构在大幅减重的情况下,部分关键结构应力虽有所提高,但仍能够控制在标准要求的安全系数之内;

2) 车体铝合金结构和整备状态下的振动模态频率得到明显提高;

3) 采用参数优化技术,能大幅提高车体的轻量化空间。

## 参考文献

[1] 邓海,张国芹,张岩,等. 下一代高速智能化动车组研发构想[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 11.

DENG Hai, ZHANG Guoqin, ZHANG Yan, et al. Development concept of next generation high-speed intelligent EMU[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 11.

[2] 缪炳荣,张卫华,池茂儒,等. 下一代高速列车关键技术特征分析及展望[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 58.

50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[2] 中华人民共和国建设部, 国家发展和改革委员会. 城市轨道交通工程项目建设标准: 建标 BSI 104—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.

Ministry of Construction of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission. Construction standard of urban rail transit engineering project: JB BSI 104—2008[S] Beijing: China Planning Press, 2008.

[3] 中华人民共和国国家军用标准. 装备以可靠性为中心的维修分析: GJB 1378A—2007[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2007; 3-12.

National Military Standards of the People's Republic of China. Reliability centered maintenance analysis for material: GJB 1378A—2007[S]. Beijing: General Armament Department of the China People's Liberation Army, 2007; 3-12.

[4] International Electrotechnical Commission (IEC). Dependability management. Application guide-maintainability: CEI/IEC 60300-3-10; 2001[S]. London: BSI, 2001.

(收稿日期: 2022-09-09)

MIAO Bingrong, ZHANG Weihua, CHI Maoru, et al. Analysis and prospects of key technical features of next generation high speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 58.

[3] 佟维, 刘晓雪. 高速动车组铝合金车体结构优化策略[J]. 计算力学学报, 2009, 26(3): 424.

TONG Wei, LIU Xiaoxue. Optimization strategy of aluminum-alloy car-body of high speed train unit[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(3): 424.

[4] 高月华, 石晓飞, 谢素明, 等. 高速列车车体的灵敏度分析及轻量化设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 885.

GAO Yuehua, SHI Xiaofei, XIE Suming, et al. Sensitivity analysis and lightweight design for high-speed train car body[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5): 885.

[5] 贺小龙, 张立民, 鲁连涛, 等. 基于轻量化及刚度的铝合金车体承载结构参数选择研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(11): 26. HE Xiaolong, ZHANG Limin, LU Liantao, et al. Study on selection of aluminum alloy car body bearing structural parameters based on lightweight and stiffness[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(11): 26.

(收稿日期: 2022-08-01)