

轨道交通车辆全寿命周期检修需求设计

王海涛¹, 万国强¹, 刘余², 徐志锋²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 上海慧程航空科技有限公司, 上海 200241)

摘要: 随着轨道车辆大规模投入使用, 用户越来越关心车辆的检修成本和服务可靠性, 将车辆检修需求纳入车辆设计体系, 并进行全寿命周期管理是提高车辆市场竞争力和用户满意度的有效途径, 可提高车辆设计水平, 解决车辆初始设计缺陷, 减少车辆投入使用后的改型成本; 构建了轨道交通车辆检修需求指标体系, 提出了车辆检修需求目标确定、分配、预计、控制的全寿命周期管理流程; 开展了基于 CRH380A 车型的全寿命周期检修需求设计, 发现了初始设计中的技术缺陷, 避免了车辆投入使用后带来的设计改型和资料浪费, 验证了轨道交通车辆开展全寿命周期检修需求设计的实用性。

关键词: 轨道交通; 检修需求; 直接维修成本; 服务可靠性

Design of Maintenance Requirement Management for the Life Cycle of Railway Vehicle

Wang Haitao¹, Wan Guoqiang¹, Liu Yu², Xu Zhifeng²

(1. Technology Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. Technology Department, Shanghai H-Visions Aviation Technology Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: With the large-scale use of rail vehicles, users are more and more concerned about the maintenance cost and operational reliability of vehicles. It is an effective way to integrate the vehicle maintenance demand (direct maintenance cost and service reliability) into the vehicle design system, and carry out life cycle management to improve the competitiveness of vehicle market and user satisfaction. In order to improve the level of vehicle design, solve the defects of initial vehicle design and reduce the cost of vehicle modification after putting into use. The maintenance demand index system is constructed, and the whole life cycle management process of vehicle maintenance demand target determination, distribution, prediction, design improvement and feedback are proposed. Based on the CRH380A model, the whole life cycle maintenance demand design is carried out, and the technical defects in the initial design are found, which avoids the design modification and data waste after the vehicle is put into use, and verifies the practicability of the whole life cycle maintenance demand design of rail transit vehicles.

Keywords: rail transit; maintenance needs; direct maintenance cost; service reliability

0 引言

在轨道车辆市场竞争中, 用户除了关心采购价格外, 更关心车辆全寿命周期检修成本和车辆可用性。需要在车辆设计初期充分考虑用户及市场对检修的需求, 从设计源头出发将检修需求贯彻到车辆设计过程, 避免检修设计不合理的“初始设计缺陷”问题, 减少车辆投入使用后改型成本。

轨道交通领域在国际化 and 竞争日趋激烈背景下, 各车辆制造商均将全寿命维修成本和可靠性融入到产品设计中来。瑞典国家铁路公司 (SJ) 向瑞典 ADtranz 公司订购 X2000 新时速高速摆式动车组时, 提出高可靠性要求外, 还特别提出了列车的寿命周期成本和维修性要求^[1]。德国

斯图加特公交集团 (SSB) 基于维修成本的考虑, 对供应商提供的产品质量和服务品质提出很高的要求^[2]。奥地利联邦铁路机车车辆维修采用以可靠性为中心的维修 (RCM) 方法, 对铁道机车车辆维修提出尽可能高的可靠性、尽可能低的维修费用^[3]。

我国车辆制造商在车辆设计时, 一般只考虑满足客户提出的性能、技术指标、保证列车的可靠性、安全性, 尽量降低列车的造价, 并没有将车辆投入使用后是否便于维修、维修费用是否合理作为设计目标去一并考虑^[1]。因此, 如何将用户需求转化为检修需求并贯彻至车辆设计, 是与国际接轨、拓展海外市场、提升产品竞争力的必要保证。

车辆制造商在车辆全寿命检修需求设计过程中, 需要解决几个核心问题: 首先, 用户对车辆的期望或需求是什么? 如何将用户对车辆需求转化为车辆的检修设计要求? 其次, 如何将设计要求传递至系统/子系统/部件? 再次, 如何确认车辆设计是否符合设计要求? 当设计不符合要求时, 如何优化设计使之符合设计要求? 最后, 车辆投入运营后是否达到了用户的期望? 若不满足用户需求, 如何

收稿日期: 2020-02-09; 修回日期: 2020-03-20。

作者简介: 王海涛 (1981-), 男, 河北唐山人, 高工, 主要从事轨道车辆设计及检修运用技术方向的研究

万国强 (1973-), 男, 江西南昌人, 高工, 主要从事轨道车辆设计及检修运用技术方向的研究。

改进?

基于相关标准研究^[4-5], 对标航空研究应用^[6-7], 结合轨道交通车辆研制特点, 给出了检修需求设计指标体系及全寿命周期检修需求设计方法。

1 车辆全寿命周期检修需求指标体系

检修需求设计目的是将服务可靠性、维修成本、带故障运行、检修间隔要求、维修性、工具/设备/工装等相关的维修需求有效落实至轨道车辆设计过程中, 在确保车辆运行安全性基础上, 以最少的检修时间、维修花费及维修资源来维持车辆高可用性, 实现“降费增效”。为将用户需求转化为车辆检修设计要求并约束车辆设计, 从用户车辆维修成本和服务可靠性需求角度出发, 建立车辆检修需求指标体系, 包括直接维修成本和服务可靠性。

参考 WATOG 国际标准^[6], 定义轨道交通车辆直接维修成本 (direct maintenance costs, DMC) 如下: DMC 是指在完成车辆或设备维修所需的工作中直接花费的人工时和材料费用, 单位为: 元/公里或元/万公里。

车辆服务可靠性直接影响客户满意度, 通过车辆在故障后引发的影响来定义服务可靠性指标, 通常用出库中断率、晚点率、任务中断率各类故障发生率来衡量车辆服务可靠性, 车辆服务可靠性指标见表 1。

表 1 车辆服务可靠性指标体系

指标	描述	备注
出库中断率	每百次出库中断次数	出库取消(调用热备份车)
出库可靠度	每百次出库正常出库次数	出库可靠度=1-出库中断率
任务中断率	每百次任务中断次数	途中停车(清客、救援)
任务可靠度	每百次任务正常任务次数	任务可靠度=1-任务中断率

车辆 DMC 和服务可靠性是反映车辆设计水平的综合设计指标, 通过直观可度量的指标体系, 反映用户最关注的车辆设计需求, 可有效的约束车辆设计, 车辆安全性、可靠性、维修性、可用性水平高低, 车辆检修规程, 检修工艺水平平均会体现在 DMC 和服务可靠性上面。例如增加冗余或保护措施, 可提升车辆安全性, 但降低了车辆的基本可靠性, 导致服务可靠性提升, DMC 升高。改善车辆维修性水平 (如可达性、模块化、免维修设计等), 可有效的缩短维修人工时, 降低 DMC, 提高车辆可用时间。服务可靠性和 DMC 又息息相关, 可靠性提升可采用更长的计划维修间隔, 并降低部件故障修频次 (平均故障时间, MTBF) 可减少 DMC, 而直接维修成本可反向驱动的服务可靠性要求 (如: 平均故障时间/无故障发现率, MTBF/NFF)。直接维修成本和服务可靠性是综合性设计指标, 能够有效的约束车辆设计。

2 检修需求全寿命周期设计

2.1 检修需求设计流程

检修需求设计指标体系建立后, 需要建立车辆全寿命周期检修需求设计流程 (如图 1 所示)。在车辆设计阶段,

需将检修设计需求量化并贯彻至车辆设计中, 包括检修需求目标确定、分配、预计与控制, 将各层级检修需求及其定量指标分配至系统/子系统/部件, 并通过预计结果与分配至比较, 判断是否满足分配指标, 当不满足要求时进行车辆设计优化。在车辆交付使用后, 根据车辆运维数据, 监控检修需求指标, 持续改进车辆设计, 实现全寿命周期检修需求设计闭环管理。

2.2 检修需求目标确定

根据相似车型数据和新研制车型设计方案, 结合市场和用户要求建立检修需求 (直接维修成本和服务可靠性) 目标, 提出车辆设计要求/准则。

整车 DMC 目标值确定, 需要充分搜集竞争车型数据, 涉及: 车辆组成、利用率、设计使用寿命、计划维修成本数据、故障维修成本数据等; 出于市场竞争角度考虑, 新开发车型全寿命周期 DMC 目标值应比竞争车型低 10%~15% 左右。

车辆服务可靠性目标值综合考虑市场要求、中断费用成本、运维经验三个方面。数据收集, 从市场需求角度给出一个大致服务可靠性要求, 但还要从费用和运维经验方面来综合考虑, 来确定整车服务可靠性目标。以任务中断成本为考核指标确定服务可靠性。已知竞争车型任务可靠度为 95%, 任务中断费用见表 2, 来确定新研制车型任务可靠度。

表 2 任务中断成本对比结果

任务中断成本构成	竞争车型成本 (¥/元)	比例参数	新研车型 (¥/元)
乘客相关	20 000	2	40 000
司乘人员相关	10 000	1.5	15 000
修理	80 000	1.2	96 000
额外成本	50 000	1.5	75 000
合计	160 000	合计	23 6000

通过对比分析, 可知新研车型任务可靠度必须高于 96.61% (即: $160\,000 \times (1 - 95\%) \geq 236\,000 \times (1 - \text{新车型任务可靠度})$) 时在成本方面具有优势。

2.3 检修需求指标分配

检修需求指标分配目的是将检修需求目标分解至系统或部件级别, 此过程需要与供应商确认, 并将检修需求分配值和检修需求设计要求/准则、详细的工作计划纳入供应商采购技术合同。

目前, DMC 以及服务可靠性相关的检修需求指标分配方法已经比较成熟。文献 [7] 给出了 DMC 分配方法。当只有一种竞争车型 DMC 成本已知时, 可按照竞争车型成比例地进行分配:

$$DMC_{i-新} = DMC_{新} \times \frac{DMC_{i-竞争}}{DMC_{竞争}} \quad (1)$$

其中: i 指第 i 个系统, $DMC_{i-新}$ 指新开发车型第 i 系统的直接维修成本分配值, $DMC_{i-竞争}$ 指竞争车型第 i 系统的 DMC 成本值, $DMC_{新}$ 指新开发车型整车 DMC 值,

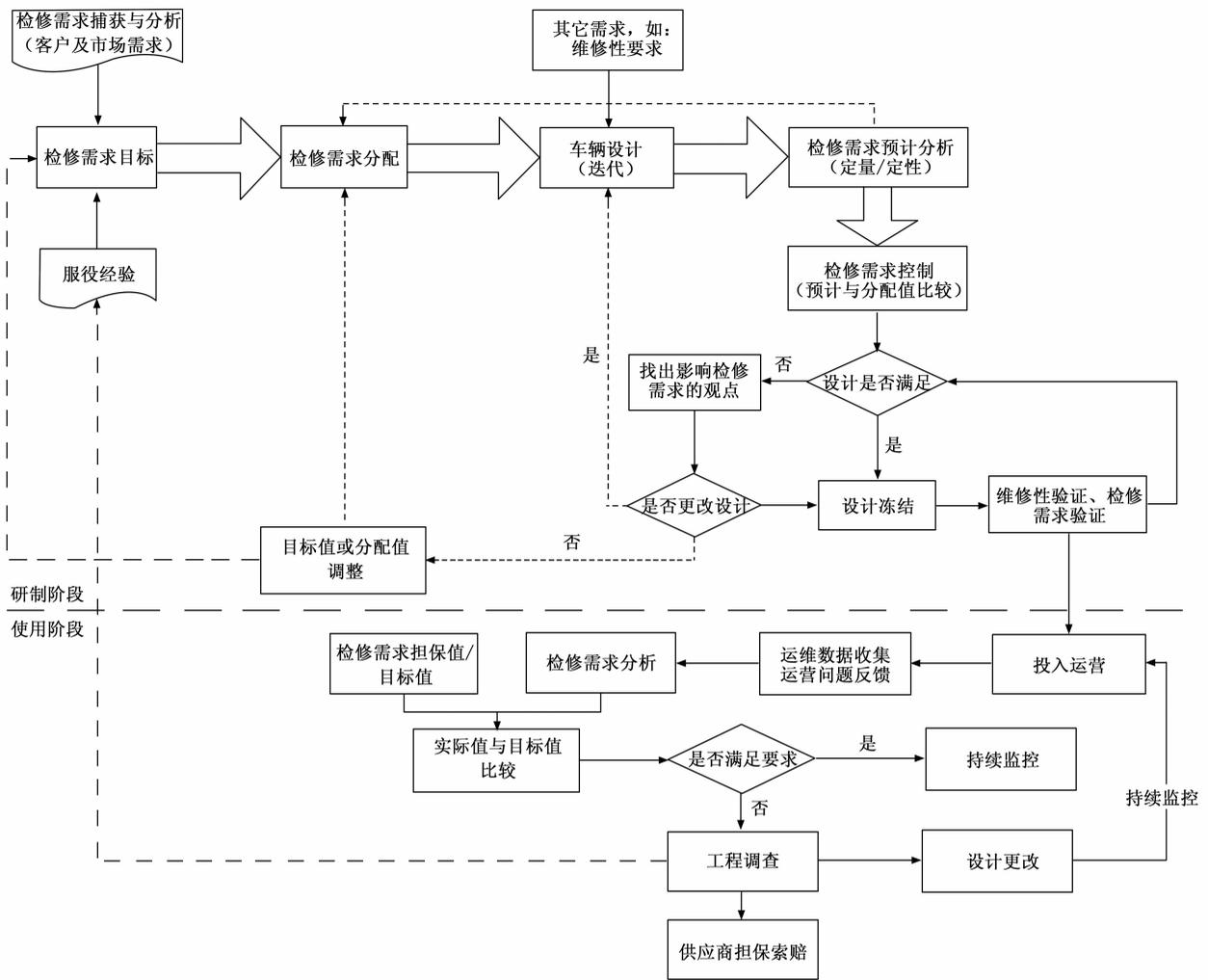


图 1 轨道交通车辆全寿命周期检修需求管理流程

$DMC_{竞争}$ 指竞争车型整车 DMC 值。

服务可靠性分配同样采用比例分配法 (同公式 1), 同时需要遵循以下几条原则:

- 1) 对于复杂度高的子系统、设备等, 应分配较低的可靠性指标。因为系统越复杂, 其组成单元就越多, 要达到高可靠性就越困难, 并且费用越高。
- 2) 对于技术上不成熟的系统, 应分配较低的可靠性指标。对于这种产品提出高可靠性要求会延长研制时间, 增加研制费用。
- 3) 对于在恶劣环境条件下工作的系统, 应分配较低的可靠性指标。因为恶劣的环境会增加系统的故障率。
- 4) 对于需要长期工作的系统, 应分配较低的可靠性指标。因为产品的可靠度随着工作时间的增加而降低。
- 5) 对于重要度高的产品, 应分配较高的可靠性指标。因为重要度高的系统故障会影响行车安全或秩序。
- 6) 对于已有可靠性指标的货架产品或技术成熟的系统, 不再参与可靠性分配。同时, 在进行可靠性分配时, 要从总指标中剔除这些单元的可靠性指标值。

2.4 检修需求预计与控制

检修需求预计与控制, 随着车辆设计深入, 检修需求

由下至上进行预计, 从部件、系统向整车级别汇总, 并与各层级分配指标进行对比, 针对不符合分配要求的项点, 给出设计更改措施, 直至满足整车的检修需求目标。

针对维修任务的预计是所有预计的基础, DMC 维修任务预计采用如下方法计算:

$$DMC = F \cdot Q \cdot (H + M) \quad (2)$$

式中, DMC 为 DMC 阵, 计算值, 表示 DMC 预计结果; F 为频次阵, INT 为任务间隔; $Q = [QPA_i]_{n \times n}$ 为数量阵, QPA 为每个任务对象在轨道车辆上的安装数量; $H = [LR \times T_{Mc, i}]_{n \times 1}$ 为人工成本阵, LR 为人工时费率, T_{Mc} 为维修人工时 (维修时间乘以人工数); $M = [C_{On_Mat, i}]_{n \times 1}$ 为材料成本阵, C_{On_Mat} 为材料费用。

服务可靠性检修需求指标主要是任务中断率, 预计模型如下:

$$MIR_c = QTY_c \times \lambda_c \times F_{任务中断} \times D_{运行} \quad (3)$$

其中: QTY_c 为车辆上某部件数量; λ_c 为部件失效率; $F_{任务中断}$ 为任务中断系数, 表示部件可能引起车辆任务中断的 LRU 的故障模式占部件故障模式的比例; $D_{运行}$ 为任务运

