

# 城市轨道交通车辆内置轴箱转向架的结构分析与性能验证

李辰生<sup>1,2</sup> 宋永胜<sup>1,2</sup> 张蕊姣<sup>1</sup> 周耀斌<sup>1,2</sup>

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山;

2. 河北省轨道交通车辆转向架技术创新中心, 063035, 唐山//第一作者, 工程师)

**摘要** 目的:随着城市轨道交通的快速建设,对城市轨道交通车辆的运行品质有了更高的要求。减轻簧下质量、改善小曲线半径通过能力、减小轮轨磨耗、降低运行噪声已经成为城市轨道交通车辆的主要研究课题。方法:结合内置轴箱转向架结构空间紧凑、质量轻、曲线通过性能好等特点,研发出一种适用于我国 B2 型地铁限界的内置轴箱转向架。重点介绍了列车速度为 120 km/h 时内置轴箱转向架的设计参数、结构组成及技术特点,对转向架构架强度进行了计算及验证,并对列车进行了动力学分析及线路验证。结果及结论:内置轴箱转向架具有质量轻、轮轨作用力低等技术优势,完全符合城市轨道交通车辆运行条件需求。

**关键词** 地铁;内置轴箱转向架;结构分析;性能验证

**中图分类号** U270.331

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.08.027

## Structural Analysis and Performance Verification of Urban Rail Transit Vehicle Inboard Axle Box Bogie

LI Chensheng, SONG Yongsheng, ZHANG Ruijiao, ZHOU Yaobin

**Abstract** Objective: With the rapid development of URT (urban rail transit), higher requirements are placed on the operation quality of URT vehicles. Reducing the unsprung mass, improving the small radius curve negotiation capability, minimizing wheel-rail wear and reducing operational noise have become major research topics for URT vehicles. Method: Combining the compact structure, lightweight design, and excellent curve negotiation capabilities of the inboard axle box bogie, an inboard axle box bogie suitable for Chinese B2-type metro clearance is developed. The design parameters, structural composition, and technical characteristics of the inboard axle box bogie for 120 km/h speed level are emphatically introduced. The strength of the bogie frame is calculated and verified, and the dynamics analysis and line validation of the train are conducted. Result & Conclusion: The inboard axle box bogie of-

fers technical advantages such as lightweight construction and low wheel-rail force, fully meeting the operational requirements of URT vehicles.

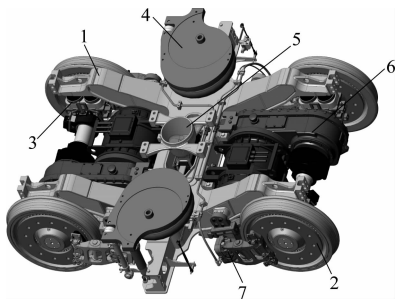
**Key words** metro; inboard axle box bogie; structural analysis; performance verification

**First-author's address** CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

城市轨道交通具有曲线半径小、线路条件差、列车起停频繁、空车与重车差别大、载客量大及运行噪声要求高等特点。这对城市轨道交通车辆转向架提出了更高的要求:首先,转向架应具有良好的曲线通过性能和适应线路扭曲的能力,有较高的运行安全可靠;其次,转向架应轻量化设计,具有较强的牵引能力和制动能力,使列车的起停加速度和制动减速度足够大;再次,满足空车与重车的载荷变化要求,噪声低,对环境污染小。内置轴箱转向架具有簧下质量轻、曲线通过能力强、适应扭曲线路能力好及运行噪声低等优点,能够很好地满足城市轨道交通车辆的运行要求<sup>[1-2]</sup>。为此,本文对城市轨道交通车辆内置轴箱转向架的结构及应用进行介绍。

## 1 内置轴箱转向架基本结构

内置轴箱转向架采用轴箱内置式无摇枕结构,采用二系弹簧悬挂,其整体结构如图 1 所示。构架采用钢板焊接形式;一系悬挂采用金属橡胶弹簧,拉杆式轮对定位方式;二系悬挂采用大曲囊空气弹簧,四点控制方式;牵引装置采用橡胶堆牵引方式;每根动轴设置 1 套驱动装置;每台转向架上配备 4 套盘型制动单元,对角布置 2 套停放制动单元。内置轴箱转向架主要技术参数如表 1 所示。



注:1—构架装置;2—轮对轴箱装置;3——系悬挂及轮对定位装置;  
4—二系悬挂装置;5—中央牵引装置;6—驱动装置;7—基础制动装置。

图 1 内置轴箱转向架整体结构示意图

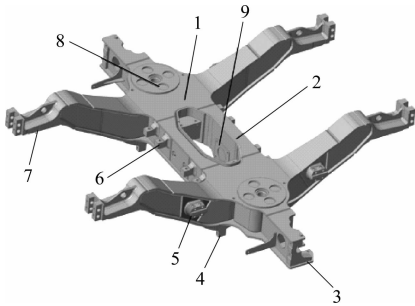
Fig. 1 Diagram of inboard axle box bogie overall structure

表 1 内置轴箱转向架技术参数

Tab. 1 Technical parameters of inboard axle box bogie			
技术参数	取值	技术参数	取值
轨距/mm	1 435	轴颈中心距/mm	1 100
轴重/t	14	轮对内侧距/mm	1 353
轴距/mm	2 200	车轮直径/mm	840(新轮), 770(磨损到限)
最高运行速度/ (km/h)	120	质量/kg	6 500

1.1 构架装置

构架装置是由符合 EN 10025 系列标准的 S355 钢板焊接而成的 H 形结构,且其结构强度须符合 UIC 615-4—2003《动力车—转向架和走行装置—转向架构架结构强度试验》要求。构架上设有电机安装座、齿轮箱安装座、空簧安装座、减振器安装座、一系簧安装座及拉杆安装座等。构架装置的焊接应符合 EN 15085 系列标准的要求,对所有关键焊缝进行超声波探伤。构架装置结构如图 2 所示。



注:1—侧梁组成;2—横梁组成;3—垂向减振器安装座;4—定位拉杆安装座;5—基础制动安装座;6—驱动装置安装座;7——系弹簧安装座;8—空气弹簧安装座;9—纵向牵引安装座。

图 2 构架装置结构示意图

Fig. 2 Diagram of frame device structure

1.2 轮对轴箱装置

轮对轴箱装置结构如图 3 所示。轮对轴箱装置

由车轮、车轴、轴承及轴箱等组成,且每条动力轮对上装有 1 套驱动装置和 1 套接地装置。车轴按照 BS 8535 系列标准进行设计和强度校核,选用符合 TB/T 2945—1999《铁道车辆用 LZ50 钢车轴及钢坯技术条件》标准的 LZ50 钢进行生产。车轮采用整体辗钢车轮,选用符合 TB/T 2817—2018《铁路货车用辗钢整体车轮》的 CL60 钢,强度满足 EN 13979 系列标准要求,车轮上安装轮装制动盘。内置式轴箱轴承采用免维护的双列圆锥滚子轴承。轴箱采用分体式铸造结构,设置一系橡胶弹簧和定位拉杆安装接口。

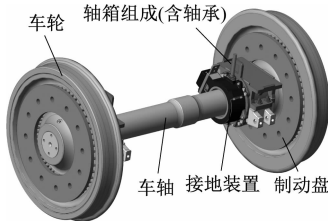


图 3 轮对轴箱装置结构示意图

Fig. 3 Diagram of wheelset axle box device structure

1.3 轮对定位和悬挂装置

转向架采用两级悬挂结构。一系悬挂包括金属橡胶弹簧、定位拉杆和轮对提吊等部件。每轴箱端部设置 2 组并联的金属橡胶弹簧。定位拉杆安装于轴箱和构架之间,用于约束轮对与构架的相对位移。轮对提吊安装于轴箱中部,起到轮对起吊功能,并兼做垂向止挡用。

二系悬挂主要包括空气弹簧、高度调整装置、抗侧滚扭杆、垂向和横向油压减振器、差压阀、横向缓冲止挡等部件。空气弹簧采用大曲囊结构,内部设有应急辅助弹簧,能在空簧无风时提供紧急状态下的支撑。车辆采用 4 点控制方式,每个空簧由 1 个高度阀控制,并在 2 个空气弹簧之间设置差压阀,用于平衡同一转向架 2 个空气弹簧之间的压力差。构架与牵引梁之间安装横向缓冲止挡,以避免车辆与转向架之间产生较大的横向位移。每台转向架设有 1 个横向减振器和 2 个垂向减振器,用于衰减车辆振动。二系悬挂结构如图 4 所示。

1.4 驱动装置

每台动力转向架上安装 2 套驱动装置。驱动装置由牵引电机、齿轮箱、挠性板联轴器 and 弹性橡胶联轴器等部件组成,牵引电机和齿轮箱弹性安装在构架上。驱动装置结构如图 5 所示。齿轮箱采用平行轴式的二级齿轮传动结构,其大齿轮安装于空心

轴上。为减小驱动装置所占用的横向空间,牵引电机和齿轮箱外壳刚性连接,轴头通过挠性板联轴器连接。弹性橡胶联轴器安装于车轴上;齿轮箱空心轴穿过车轴,通过空心轴的端面齿与弹性橡胶联轴器进行连接。在列车运行过程中,弹性橡胶联轴器提供不同工况下的变位能力。

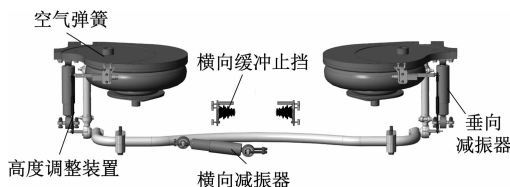


图 4 二系悬挂结构示意图

Fig. 4 Diagram of secondary suspension structure

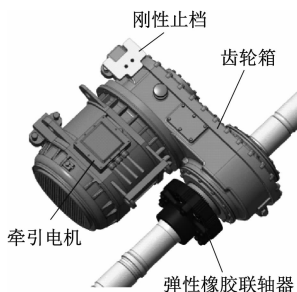


图 5 驱动装置结构示意图

Fig. 5 Diagram of driver device structure

### 1.5 中央牵引装置

每台转向架安装 1 套中央牵引装置。中央牵引装置结构如图 6 所示。中央牵引装置由牵引橡胶堆、牵引梁和提升止挡等部件组成。牵引橡胶堆纵向安装于构架横梁内侧,端部设置耐磨材料。牵引梁为铸造结构,经过拓扑优化实现了结构的轻量化,牵引梁与牵引橡胶堆和横向缓冲止挡接触部位均安装耐磨材料。提升止挡采用铸造结构,设有垂向间隙调整功能,兼做横向减振器安装座。牵引橡胶堆安装前经过预压缩与牵引梁连接,用于传递车辆运行过程中的各向载荷。

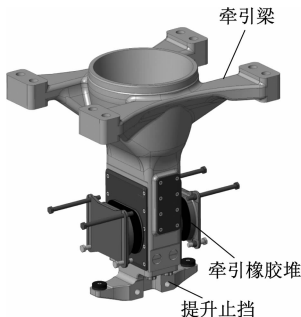


图 6 中央牵引装置结构示意图

Fig. 6 Diagram of central traction device structure

### 1.6 基础制动装置

基础制动装置采用轮盘制动形式,每台转向架安装 4 套基础制动单元,其中对角布置停放制动单元。基础制动管路布置于构架上方,停放制动缸设置单独供风管路。由于基础制动安装于构架外侧,制动缸自带制动缓解功能,不再单独布置手动制动缓解拉线。

## 2 构架强度分析及试验验证

### 2.1 构架静强度和疲劳强度分析

按照 UIC 615-4—2003、EN 13749:2011《铁路应用—轮对和转向架—转向架要求的规定方法》,采用 ANSYS 软件对构架进行静强度和疲劳强度分析。结果表明,在超常载荷工况下,构架的计算应力均小于对应材料的许用应力,静强度满足标准;在模拟运营载荷工况下,依据 Goodman-Smith 钢材疲劳极限图对构架结构进行疲劳强度评估。经评估,疲劳强度满足设计要求。

### 2.2 构架静强度和疲劳强度试验

参照 UIC 615-4—2003、EN 13749:2011 和 TB/T 2368—2005《动力转向架构架强度试验方法》,验证构架结构的静强度和疲劳强度性能。静强度试验包括超常工况载荷静强度试验和运营载荷静强度试验。构架的疲劳强度试验次数为 1 000 万次。在主结构疲劳强度试验前,在第 1 阶段过程中完成疲劳循环次数为 400 万次和 600 万次时,在第 2 阶段(疲劳循环次数为 800 万次时)和第 3 阶段(疲劳循环次数为 1 000 万次时)完成后,各进行 1 次磁粉探伤。

静强度试验和疲劳强度试验结果显示,构架均未出现任何裂纹,且满足强度要求。

## 3 列车动力学性能分析及试验验证

### 3.1 列车动力学性能分析

采用 Simpack 软件建立列车动力学模型进行仿真分析,参照 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》和 EN 12299:2009《铁路设施—乘客乘坐舒适度—测量和评估》对采用内置轴箱转向架列车的列车运行稳定性、列车运行平稳性和曲线通过性能进行评判。

#### 3.1.1 列车运行稳定性

首先,给定一段有限长的实际轨道随机不平顺激励样本函数,让列车运行在不平顺轨道上并激发

其振动;然后,让列车运行在理想光滑轨道上,通过观察系统的振动能否衰减到平衡位置,来判断系统是否出现蛇行失稳。若在某一车速下系统的振动不再收敛到平衡位置,则这时车速为列车的实际蛇行临界速度。

经过计算,在空车车轮半磨耗状态下,列车的实际蛇行临界速度为 174.609 km/h,在重车状态下,列车的实际蛇行临界速度为 191.797 km/h,高于列车实际运行速度。

### 3.1.2 列车运行平稳性

首先,采用时域内的轨道不平顺输入,用逐步积分法来求解非线性系统的动态响应,得到车辆在线路不平顺激励下的位移、加速度和加速度响应;然后,用 FFT(快速傅里叶变换)求出不同频率下的加速度值;最后,用 Sperling 平稳性计算方法计算车辆的横向及垂向平稳性指数。

当列车运行速度 $\leq 120$  km/h 时,计算可得:在空车状态下,横向最大平稳性指标为 2.34,垂向最大平稳性指标为 2.13;在重车状态下,横向最大平稳性指标为 1.75,垂向最大平稳性指标为 2.30。可见,采用内置轴箱转向架后,列车各向运行平稳性指标均满足小于 2.50 的要求,其运行平稳性属于优秀等级。

### 3.1.3 车辆曲线通过性能

列车由直线段驶入曲线段,特别是通过缓和曲线段时,由于各种激励的输入,轮轨之间产生复杂作用力,进而影响车辆的曲线通过性能。本文主要分析了列车以 70 km/h 运行速度通过超高为 120 mm、曲线半径为 300 m 曲线轨道时的安全性指标。

经过计算,车辆最大脱轨系数为 0.41,最大轮重减载率为 0.36,最大轮轨横向力为 20.07 kN。可见,各项性能均能满足曲线通过安全性要求,且有很大裕量。

## 3.2 列车动力学试验

列车采用 4 辆动车+2 辆拖车的 6 辆编组形式。试验环线的实际线路测试结果表明,列车以空车状态、运行速度 $\leq 132$  km/h 运行时,各向平稳性指标满足小于 2.5 的要求。

列车以不同速度等级、不同载重进行曲线安全性测试。试验数据表明,AW3(超载)工况下列车以 60 km/h 通过曲线时工况最为恶劣,产生最大脱轨系数为 0.38、最大轮重减载率为 0.46、最大轮轨横向力为 31.44 kN,各项性能均能满足曲线通过安全性指标。

## 4 结语

城市轨道交通车辆常规的转向架在列车通过曲线段线路时会产生较大的轮轨力,车轮磨耗严重,噪声大。内置轴箱转向架能避免上述问题,又能降低转向架质量,提高列车的运载能力。本文提出的内置轴箱转向架在结构设计、仿真计算和试验验证等各方面均符合标准要求,证明了该转向架性能完全满足我国市场需求。内置轴箱转向架在国外城市轨道交通车辆上已经得到了成功的应用,相信在市场需求的推动下,此种形式转向架具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 梁树林,傅茂海. 内侧悬挂转向架在城市轨道交通车辆中的应用研究[J]. 铁道车辆, 2006, 44(4):4.  
LIANG Shulin, FU Maohai. Research on application of inside suspension bogies in urban vehicles[J]. Rolling Stock, 2006, 44(4):4.
- [2] 刘志远,张文康,高纯友,等. 美国波士顿地铁轴箱内置式转向架结构设计[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3):162.  
LIU Zhiyuan, ZHANG Wenkang, GAO Chunyou, et al. Development of bogie with inboard bearing for Boston Metro in America[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3):162.
- [3] 中车唐山公司技术研究中心. 新一代智能化 B 型地铁构架强度计算报告[R]. 唐山:中车唐山公司技术研究中心,2017.  
Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd. Calculation report of new generation intelligent B-type metro frame strength[R]. Tangshan: Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd., 2017.
- [4] 中车唐山公司技术研究中心. 新一代智能化 B 型地铁构架静强度和疲劳强度评估报告[R]. 唐山:中车唐山公司技术研究中心,2018.  
Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd. Evaluation report of static strength and fatigue strength of new generation intelligent B-type metro frame[R]. Tangshan: Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd., 2018.
- [5] 中车唐山公司技术研究中心. 新一代智能化 B 型地铁列车动力学性能分析报告[R]. 唐山:中车唐山公司技术研究中心,2018.  
Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd. Analysis report of dynamics performance of new generation intelligent B-type metro train[R]. Tangshan: Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd., 2018.
- [6] 中车唐山公司技术研究中心. 新一代智能化 B 型地铁列车性能检测报告[R]. 唐山:中车唐山公司技术研究中心,2020.  
Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd. Test report of new generation intelligent B-type metro train performance[R]. Tangshan: Technical Research Center of CRRC Tangshan Co., Ltd., 2020.

(收稿日期:2021-03-02)