

## 轻轨线路 120 km/h 铰接式列车关键技术研究

王文华<sup>1,2</sup> 都青华<sup>1,3</sup> 郑恒亮<sup>1</sup> 高义超<sup>1</sup> 薛文根<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. 中南大学交通运输工程学院, 410083, 长沙; 3. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都)

**摘要** [目的] 目前应用于轻轨线路铰接式列车的设计速度为 100 km/h, 这样的速度等级在一定程度上制约了轻轨线路向市郊、卫星城等区域扩展, 有必要对轻轨 120 km/h 铰接式列车的总体设计、转向架设计、铰接装置设计等关键技术开展深入研究。[方法] 基于轻轨线路的条件、特点及列车技术参数, 确定了轻轨 120 km/h 铰接式列车总体设计的边界条件。提出了轻轨 120 km/h 铰接式列车总体设计方案, 确定了列车的主要技术参数值。采用理论分析、仿真模拟及台架试验等方法, 获取精确的动力学参数, 对铰接装置的结构强度、转向架构架强度及车辆系统动力学响应等进行了全面的分析与评估。[结果及结论] 该型铰接式列车的总体设计方案、转向架设计方案及车端连接设计方案可以有效优化转向架悬挂系统与轮轨的关系, 提升列车在曲线区段的通过能力, 提升列车运行的稳定性和安全性。

**关键词** 轻轨列车; 铰接式列车; 车辆动力学

**中图分类号** U482.1

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2025.02.019

## Research on Key Technologies for 120 km/h Articulated Light Rail Trains

WANG Wenhua<sup>1,2</sup>, DU Qinghua<sup>1,3</sup>, ZHENG Hengliang<sup>1</sup>, GAO Yichao<sup>1</sup>, XUE Wengen<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. School of Traffic &amp; Transportation Engineering, Central South University, 410083, Changsha, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] Currently, the design speed of articulated LRV (light rail vehicle) is 100 km/h, which somewhat restricts the expansion of light rail lines to the suburbs, satellite cities, and other areas. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research on key technologies for 120 km/h articulated LRV transit, including designs for the overall train, bogie and articulation devices. [Method] Based on the conditions and characteristics of LRV lines and the vehicle technical parameters, the boundary conditions for the overall design of 120 km/h LRV are determined. An overall design scheme for the

120 km/h articulated LRV is proposed, and the main train technical parameters are established. Through theoretical analysis, simulation modeling, and bench tests, precise dynamic parameters are obtained. Comprehensive analysis and evaluation are performed on the structural strength of the articulation devices, the bogie frame strength, and the dynamic responses of the vehicle system. [Result & Conclusion] The overall design scheme, bogie design scheme, and vehicle-end connection design scheme for this type of articulated train can effectively optimize the relationship between the bogie suspension system and the wheel-rail interaction, improve the train capability to negotiate curved sections, and enhance operational stability and safety.

**Key words** light rail train; articulated train; vehicle dynamics

铰接式列车一般在 2 个车体之间通过铰接式转向架实现列车编组。该编组方式下, 列车具有转弯半径小、爬坡能力强、运动灵活性强等特点, 且列车的转向架总数量减少, 使得列车自重降低, 轮轨磨损程度减少。采用铰接方式, 不仅可以增强列车蛇行的运动约束, 减少曲线行驶时的横向位移, 还可提升列车运行的安全性。基于上述优点, 欧洲及东南亚很多国家多条轻轨线路采用了铰接式列车。据统计, 这些轻轨线路的线路总长度已超过 1.8 万 km<sup>[1]</sup>。

轻轨线路铰接式列车的运用场景可从城市区域向郊区扩展, 服务于卫星城及旅游线路。目前, 应用于轻轨线路的铰接式列车的设计速度为 100 km/h, 这样的速度等级在一定程度上制约了轻轨线路向市郊、卫星城等区域扩展, 因此, 研究 120 km/h 速度等级下轻轨列车的铰接装置设计、车辆转向架技术及车辆动力学性能等关键技术, 对于轻轨制式的发展具有重要意义。

## 1 基于市场需求确定边界条件

本文针对德国西门子公司生产的 S200/U4 系

列、法国阿尔斯通公司生产的 TFS-1/U5/B07 系列、西班牙卡弗公司生产的 M4 系列等共计 28 个车辆项目的铰接式列车,从线路条件、系统接口、列车编组、结构尺寸及系统配置等方面进行分析,深入研究轻轨列车的市场特征及产品需求。

### 1.1 轻轨线路的条件及特点

1) 调研项目大多采用标准轨距,线路的最小水平曲线半径为 25 m,最大坡度为 90‰,但最大坡度大于 60‰的项目数占调研项目总数的 72%。

2) 车站站台高度为 820 ~ 1 000 mm,不同项目间站台高度的差异较大。

3) 供电方式多采用接触网,部分线路采用第三轨。新能源供电(如氢燃料电池)目前尚无商用项目。

4) 限界计算按照德国铁路车辆协会编制的

Bostrab:2006《轨道车辆运营限界》标准进行,但该标准对具体限界及车辆轮廓并未统一要求,需按照项目所在城市的要求进行设计。

### 1.2 列车技术参数

1) 轻轨列车的基本编组单元主要有 2 车体 3 转向架、3 车体 4 转向架两种。其中,2 车体 3 转向架更具有典型性,使用此基本编组单元的项目占比(项目数与调研项目总数的比值)为 75%。

2) 线路轨距为 1 435 ~ 1 450 mm,采用典型值(1 435 mm)的项目占比为 95%。

3) 线路曲线半径为 25 ~ 150 m,采用典型值(25 m)的项目占比为 85%。

对调研项目中 13 个主要车辆技术参数进行统计,其结果如表 1 所示。在此基础上选择主流模式,以便更好地适应轻轨线路新造及翻新的市场需求。

表 1 轻轨车辆主要技术参数统计结果

Tab.1 Statistical results of LRV main technical parameters

项目	设计速度/(km/h)	轴重/t	头车长度/m	司机室长度/m	车辆宽度/m	车辆定距/m	车辆高度/m
调研数据	70 ~ 100	8.5 ~ 12.5	12.56 ~ 15.26	1.40 ~ 1.95	2.30 ~ 2.70	8.9 ~ 11.3	3.50 ~ 3.85
典型值	80	10.5	13.43	1.66	2.65	10.0	3.61
项目	地板高度/mm	车钩高度/mm	轴距/m	车轮直径/mm	起动加速度/(m/s <sup>2</sup> )	最大减速度/(m/s <sup>2</sup> )	
调研数据	864 ~ 1 050	600 ~ 730	1.8 ~ 2.1	660 ~ 740	1.00 ~ 1.60	2.24 ~ 3.20	
典型值	960	650	1.9	720	1.34	2.50	

注:13 个技术参数采用典型值的项目占比分别为 75%、60%、75%、60%、90%、75%、70%、80%、55%、70%、65%、60%、50%。

### 1.3 关键部件配置

进一步分析调研项目中车辆铰接装置、转向架配置等关键部件的可选类型及典型配置,其结果如表 2 所示。

表 2 关键部件的可选类型及典型配置

Tab.2 Optional types and typical configurations of key components

关键部件	可选类型	典型配置
铰接机构	双回转轴承 + 中心销、球轴承 + 中心销	双回转轴承 + 中心销
轴承布局	外置、内置	外置
一系悬挂	锥形簧、人字簧、钢弹簧	人字簧
二系悬挂	空气弹簧、钢弹簧、橡胶簧	空气弹簧
制动型式	空气制动、液压制动	空气制动
驱动悬挂	空心轴、半悬挂	空心轴

注:6 个关键部件采用典型配置的项目占比分别为 90%、65%、50%、60%、60%、60%。

## 2 轻轨 120 km/h 铰接式列车总体方案设计

在上文调研统计结果的基础上挖掘用户的潜在需求,从提速高效、舒适便捷等角度,基于系统工程的正向设计原则,对轻轨线路 120 km/h 铰接式列车进行总体方案设计。

### 2.1 列车总体方案

基于打造铰接式列车技术平台的角动,本研究选取的基础车型为 3 车体 4 转向架。该车型可通过去除中间车体模块快速实现 2 车体 3 转向架编组模式,且可以通过增加中间车体模块快速实现 4 车体 5 转向架等更长的编组模式。

列车总体采用模块化、标准化设计:

1) 车体为全铝合金,各车体间采用单端/双端铰接方式;

2) 转向架采用铰接结构,装配于 2 个车体之间,分为铰接动力转向架和铰接无动力转向架 2 种类型;

3) 制动系统采用电-空制动模式,设置了磁轨制动装置,以增大列车的紧急制动减速度;

4) 车门采用等间距设计,并与车站的站台门等位匹配;

5) 内装及车内设备采用模块化设计,可方便更换横向及纵向的座椅布置;

6) 牵引及辅助系统设备(如牵引逆变器、辅助逆变器等)采用小型化、集成化设计,以满足车下窄小空间各供电设备的安装要求;

7) 供电系统设备采用标准化、模块化接口设计,除受电弓外,也可将供电系统设备更换为动力电池、超级电容、氢燃料电池等可选配置,以满足不同项目的差异化需求。

去掉中间铰接模块,本文设计的轻轨列车可通过重联实现列车的2节编组、4节编组及6节编组。通过中间铰接模块扩展,还可实现列车的3节编组、4节编组及5节编组。本文设计的铰接式列车基础设计方案如图1所示。

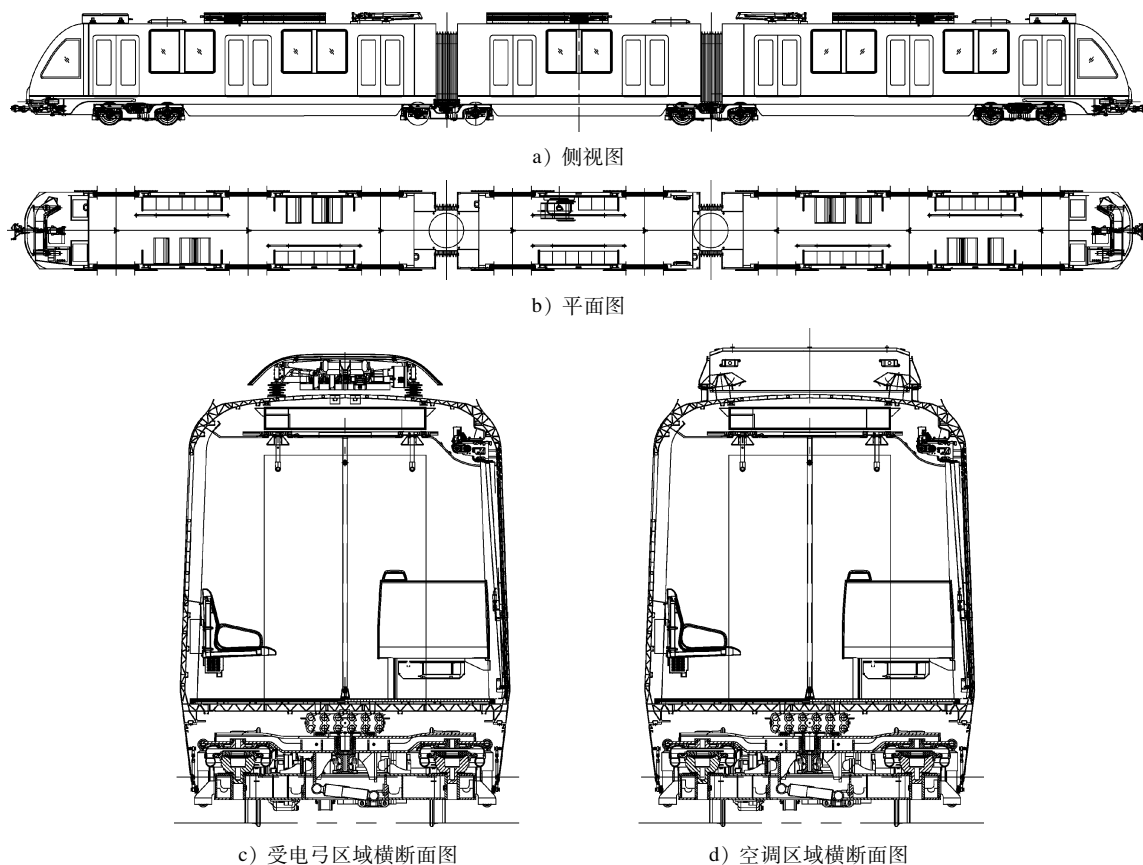


图1 本文设计的轻轨铰接式列车基础设计方案

Fig.1 Foundation design scheme of articulated LRV designed in this paper

## 2.2 参数设计与关键技术识别

确定轻轨列车基础车型的设计方案后,应进一步确定车辆的主要技术参数值。选取技术参数值时,既要考虑轻轨列车市场需求的普适性、技术的先进性,也要考虑产品的可扩展性,使得产品可以快速地进行了差异化、系列化开发。

本文以接触网受电的轻轨线路为研究对象,选取的轻轨铰接式列车主要技术参数值如表3所示。

## 3 120 km/h 铰接式列车关键技术研究

轻轨列车要在120 km/h下安全、稳定运行,其铰接转向架设计、车端连接设计、动力学参数设计是实现列车提速运行能力的关键。铰接式列车提速至120 km/h后,相同轴距的转向架在蛇行时频率增加,横向振动加剧,车辆的横向平稳性及乘客的乘坐舒适性下降,因此,需要重点研究铰接式转向架的轮轨关系、悬挂参数匹配性、结构强度安全

表3 本文选取的轻轨铰接式列车主要技术参数值  
Tab.3 Main technical parameter values of articulated LRV selected in this paper

参数名称	参数值
设计速度/(km/h)	120
轴重/t	12.5
车辆长度/m	38.6
车辆宽度/mm	2 650
轨距/mm	1 435
水平区段的最小曲线半径/m	25
最小竖曲线半径/m	900
供电电压/V	750 (直流供电)
最大坡度/‰	60
地板高度/mm	980 ~ 1 050
车钩高度/mm	550
牵引加速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.0(v从0增至50 km/h时), 0.5(v从0增至120 km/h时)
制动减速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.2(常用), 2.5(紧急)

注:  $v$  为列车运行速度;“常用”为控制列车速度或到站对标的日常停车工况;“紧急”为紧急情况下列车以最大减速度停车工况。

性及车端联挂约束结构的可靠性<sup>[2]</sup>,以确保铰接式列车提速后的运行性能。

### 3.1 转向架技术方案

#### 3.1.1 转向架结构设计

转向架分为3种类型:端部动力转向架、中间铰接动力转向架及无动力转向架。为满足列车在不同编组下的配置要求,轻轨线路120 km/h铰接式列车的动力转向架结构及铰接拖车转向架结构如图2所示。转向架主要由钢板焊接构架、轴箱外置轮对、一系悬挂锥形弹簧、二系悬挂空气弹簧及钢板焊接摇枕等组成。转向架通过摇枕装置同车体、铰接机构连接,在铰接处形成两车之间、车辆与转向架之间解耦的2个回转自由度,使列车能够顺利通过小曲线半径的线路区段。转向架整体采用模块化设计,所有相同位置及相同功能的转向架及其部件均可互换。

#### 3.1.2 强度仿真分析与试验

##### 3.1.2.1 仿真分析

本文按欧洲标准 EN 13749:2021《轨道交通 轮副和行走机构 转向架结构要求的规定方法》规定的静强度及疲劳载荷工况进行仿真,并按德国焊接学会颁布的 DVS 1612:2014《轨道车辆用钢焊接接头的设计和疲劳等级》的 MKJ(材料疲劳极限)曲线

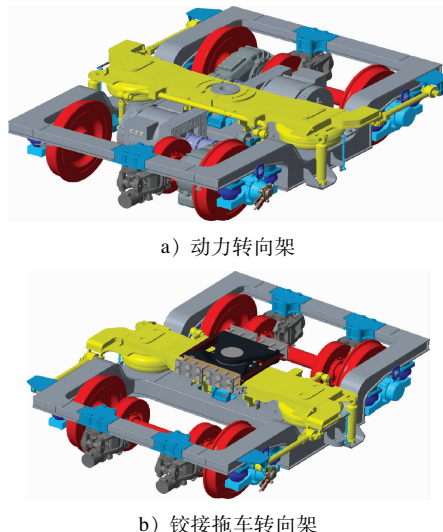


图2 动力转向架及铰接拖车转向架结构

Fig.2 Motor bogie and articulated trailer bogie structures

图,对转向架构架的焊缝疲劳强度进行评估。

转向架构架的有限元模型如图3所示,对转向架构架进行静强度与疲劳强度评估,计算结果表明:构架的静强度满足 EN 13749:2021 的要求,最大应力发生在牵引拉杆和侧梁上盖板焊接的焊缝处;超常载荷工况下构架的安全系数均大于1;构架的疲劳强度满足 DVS 1612:2014 的要求,构架焊缝的利用度均小于1。

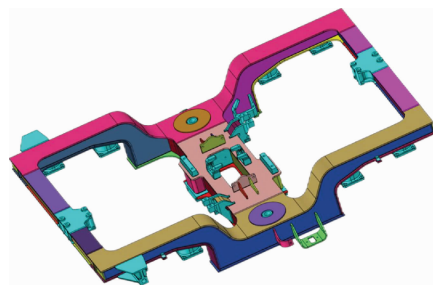


图3 转向架构架的有限元模型

Fig.3 Finite element model of bogie frame

转向架构架的一阶模态振型及二阶模态振型如图4所示。由图4可知:转向架构架的一阶模态固有频率为48.2 Hz,二阶模态频率为54.5 Hz。

##### 3.1.2.2 台架试验

根据 EN 13749:2021 及国际铁路联盟颁布的 UIC 615-4:2003《动力转向架构架强度试验方法》对载客工况的规定,台架试验应结合仿真分析结果中应力较大的点位来布置应变片。

转向架构架台架试验的加载现场如图5所示。本文完成了超常载荷工况下的静强度试验,并完成



了模拟运营工况下的 1 000 万次疲劳试验。试验结果表明:转向架构架未出现结构破坏及焊缝损伤,试验结果可以满足 EN 13749:2021 标准要求。

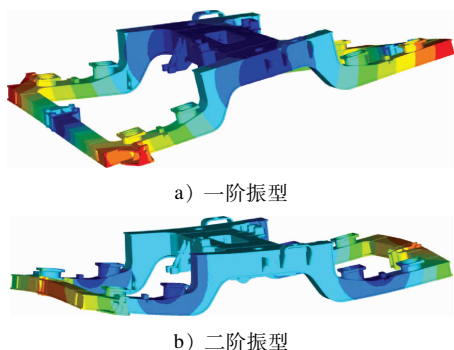


图 4 转向架构架的一阶模态振型及二阶模态振型

Fig. 4 First order vibration mode and second order vibration mode of the bogie frame

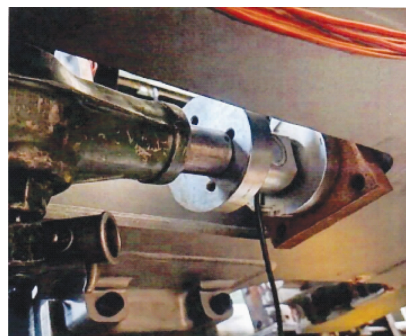
### 3.1.3 动力学仿真结果分析

基于本文选取的各主要技术参数,构建得到车辆系列动力学模型,如图 6 所示。采用 Simpack 软件对转向架悬挂及车体系统进行建模,其中:铰接结构上半部分与 A 车固连,下半部分与 C 车固连;此外,铰接结构与枕梁通过中心销在  $z$  向(垂直于轨道平面方向)连接,车体与转向架之间通过牵引拉

杆连接,以传递纵向力。



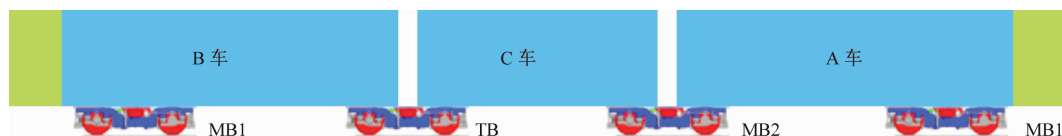
a) 转向架垂向加载



b) 转向架横向加载

图 5 转向架构架台架试验的加载现场

Fig. 5 Loading site of bogie frame bench test



注:MB1—端部动力转向架;MB2—铰接动力转向架;TB—铰接拖车转向架;A 车、C 车—铰接列车端部车辆;B 车—铰接列车中间车辆。

图 6 车辆系列动力学模型示意图

Fig. 6 Diagram of vehicle series dynamics model

#### 3.1.3.1 动力学性能预测结果

在直线线路区间及典型曲线线路区间(含曲线半径为 25 m、50 m、100 m 及 150 m 的线路区段) 2 种线路工况下,基于车辆系列动力学模型,分别对采用 S1002 型、LM 型 2 种踏面型式轻轨车辆的新轮和磨耗轮进行动力学性能预测。预测结果表明,采用本文选取的各主要技术参数时,列车的临界速度、运行平稳性及安全性均能满足相关标准要求。

#### 3.1.3.2 车辆故障工况下的动力学性能分析

进一步对一系橡胶弹簧老化、空气弹簧失气、二系横向/垂向减振器失效及车间减振器失效等故障进行动力学性能分析。分析结果显示:

1) 空气弹簧失气情况下,车辆垂向运行平稳性指标变大,此时列车须限速,  $v \leq 60$  km/h。

2) 2 节车厢间铰接位置处纵向减振器失效情况下,车辆横向运行平稳性指标变大,此时应  $v \leq 110$  km/h。考虑到临界速度、运行平稳性及脱轨系数等指标均需要有一定安全裕量,建议转向架两侧旁承与车体底架接触面的摩擦因数保持稳定,建议该值取 0.20 ~ 0.25。

### 3.2 铰接技术方案

#### 3.2.1 铰接结构方案

通过对既有车辆铰接形式的结构、变位、受力、拆装、维护、成本等方面进行综合比较,本文设计的轻轨铰接式列车采用铰接座 + 中心销的结构设计方案。图 7 为铰接装置的结构示意图。如图 7 所示,该设计方案包括了轴承座、支撑座等主要部件。铰接装置两端采用螺栓连接在车体底架端部,并通

过中心销与转向架装配,实现了2个转动自由度解耦。在转向架与铰接座之间设置了磨耗垫,为车辆提供一定的抗侧滚能力及回转刚度<sup>[3]</sup>。

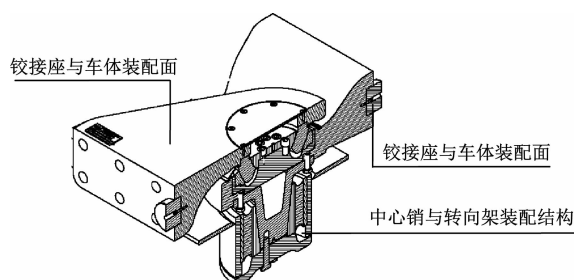


图7 铰接装置的结构示意图

Fig.7 Diagram of articulated device structure

为满足列车运行中的变位要求,该铰接装置须满足2节相连车体之间相对摇头、点头及侧滚的相对转角控制要求,其中:2个车体相对摇头角范围为 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ;2个车体间相对点头角范围为 $-2.5^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$ ;2个车体间相对侧滚角范围为 $-3.2^{\circ} \sim 3.2^{\circ}$ 。

### 3.2.2 铰接座强度仿真分析

采用四面体网格分别建立了铰接装置轴承座和支撑座的有限元模型,如图8所示。其中:轴承座受到的外部力主要为轴承力,以及车体垂向、纵向及横向的作用力,仿真时在轴承安装位置进行加载;支撑座受到的外部力主要为车体垂向、纵向及横向的作用力,以及磨耗板的支持力和中心销纵向、横向的作用力,仿真时在轴承安装位置、磨耗板安装位置及中心销安装位置进行加载<sup>[4]</sup>。

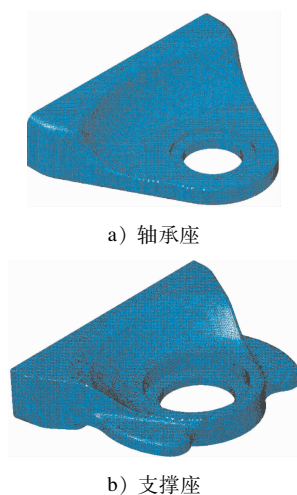


图8 铰接装置轴承座和支撑座的有限元模型

Fig.8 Finite element model of articulated device bearing seat and support seat

### 3.2.2.1 静态载荷工况下的仿真结果

1) 轴承座的应力最大值为436 MPa(小于材料的屈服强度1 050 MPa)。最大应力出现在轴承座轴承安装孔上下孔交界位置,其安全系数为2.41。

2) 支撑座的应力最大值为308 MPa(小于材料的屈服强度1 050 MPa)。最大应力出现在磨耗板安装位置的台阶边角处,其安全系数为3.41。

### 3.2.2.2 动态载荷工况下的仿真结果

1) 轴承座的应力最大值为160 MPa(小于材料的疲劳强度极限值565 MPa),最大应力出现在轴承座轴承安装孔上下孔交界的位置,其安全系数为3.53。

2) 支撑座的应力最大值为114 MPa(小于材料的疲劳强度极限值565 MPa),最大应力出现在耳板与圆柱体交界的位置,其安全系数为4.96。

## 4 结语

轻轨120 km/h铰接式列车是未来城市轨道交通线路设计中值得关注的车型之一。该车不仅具有丰富多元的运用场景、舒适便捷的车辆性能、低成本的全寿命周期运用维护等特点,还可通过不同的编组设计方案,实现轻轨线路不同区段、不同运营时段的运能需求。

基于本文的研究成果,在轻轨120 km/h铰接式列车关键技术中,应重点关注以下3个方面:

1) 列车运行速度提高到120 km/h后,车辆的动力学性能是确保列车运行稳定性和安全性的关键因素。研究表明,在车厢间、转向架与车体间增加减振器,是必不可少的调整措施。该措施能够缓解车体间点头与横向振动,减少车辆的振动和冲击,提高车辆的临界速度及乘客的乘坐舒适度。

2) 铰接转向架同时承载2个车体的端部动态载荷。2个车体同时施加在转向架上的振动载荷不尽相同,这导致转向架构架的振动频谱特征趋于复杂,需结合实际运用条件,设定合适的工况组合,开展针对性的分析,以提高转向架承载能力及列车运行安全性。

3) 通过铰接车体模块增加列车编组后,由于中间2个车体间的铰接缺少纵向阻尼,无法有效吸收和分散碰撞能量,因此,在进行多编组铰接车辆设计时,还应关注车体两端的碰撞吸能结构设计。

(下转第100页)

自动切断电动推杆的供电电源,同时反馈伸缩到位信号。该方案提高了翼尾伸缩装置的安全性和可靠性,并为控制器预留了到位反馈,提高了控制方案的可扩展性。

## 参考文献

- [1] 王瑞东,倪章松,张军,等. 高速列车串列升力翼翼型优化设计[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 129.  
WANG Ruidong, NI Zhangsong, ZHANG Jun, et al. Optimization design of tandem airfoils on high-speed train[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(2): 129.
- [2] 高建勇,张军,倪章松,等. 高速列车车顶-升力翼组合气动特性[J]. 实验流体力学, 2023, 37(1): 29.  
GAO Jianyong, ZHANG Jun, NI Zhangsong, et al. The aerodynamic characteristics of roof-wing combination of a high-speed train[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(1): 29.
- [3] 成庶,刘翊,王成强,等. 基于自抗扰的高速列车升力翼攻角驱动系统同步控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 1.  
CHENG Shu, LIU Xuan, WANG Chengqiang, et al. Synchronous control of high-speed train lift wing angle of attack drive system based on active disturbance rejection[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 1.
- [4] WANG C, WU Y. Toward static and transient stress-constrained topology optimization for shell-infill structures[J]. Computers & Structures, 2024, 299: 107370.
- [5] 张臻,周扬忠. 永磁同步电机位置伺服系统改进变结构自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 263.  
ZHANG Zhen, ZHOU Yangzhong. An improved variable structure active disturbance rejection control for the permanent magnet synchronous motor position servo system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 263.
- [6] 匡萃璋,汪华章,陈昊. 基于非线性自抗扰控制的双闭环PMSM速度控制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41

(8): 105.

- KUANG Cuizhang, WANG Huazhang, CHEN Hao. Research on double closed-loop PMSM speed control strategy based on nonlinear active disturbance rejection control[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(8): 105.
- [7] 邵雪卷,康鹏飞,张井冈,等. 直流电机位置伺服系统新型控制策略研究[J]. 控制工程, 2024, 31(9): 1537.  
SHAO Xuejuan, KANG Pengfei, ZHANG Jinggang, et al. Research on new control strategy of DC motor position servo system[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(9): 1537.
- [8] 杨赛东,张士雄,刘亚奇. 基于二阶LADRC的多电机同步控制系统研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(17): 104.  
YANG Saidong, ZHANG Shixiong, LIU Yaqi. Research on multi-motor synchronous control system based on second order LADRC[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(17): 104.
- [9] 张羽,关振宏,王涛,等. 基于自抗扰控制技术的多电机同步控制[J]. 电气自动化, 2017, 39(2): 9.  
ZHANG Yu, GUAN Zhenhong, WANG Tao, et al. Multi-motor synchronous control based on active disturbance rejection control technique[J]. Electrical Automation, 2017, 39(2): 9.
- [10] CHEN Q, DONG F, TAO L, et al. Multiple motors synchronization based on active disturbance rejection control with improved adjacent coupling[C] // 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu: IEEE, 2016: 4510.
- [11] 李韵麒. 基于隔离解耦电路的多电动推杆限位检测电路[J]. 中国机械, 2024(11): 47.  
LI Yunqi. Multi-electric push rod limit detection circuit based on isolation decoupling circuit[J]. Machine China, 2024(11): 47.

- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
- 第一作者:朱彦,正高级工程师,zhuyan.ck@crrecg.cc  
通信作者:王成强,正高级工程师,13756668375@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 95 页)

## 参考文献

- [1] HONDIUS H, 张建平. 德国西门子公司新开发的 Mireo 号铰接式电动车组[J]. 国外铁道机车与动车, 2020(3): 1.  
HONDIUS H, ZHANG Jianping. Newly developed Mireo articulated EMU by Siemens Germany[J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2020(3): 1.
- [2] 高祥. 100 km/h 轻轨车辆铰接式转向架研究[J]. 技术与市场, 2019, 26(2): 37.  
GAO Xiang. Research on articulated bogie of 100 km/h light rail vehicle[J]. Technology and Market, 2019, 26(2): 37.
- [3] 胡鑫,黄运华,焦建英. 铰接式转向架及铰接装置的应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(5): 19.  
HU Xin, HUANG Yunhua, JIAO Jianying. Application of articu-

lated bogies and articulated devices[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(5): 19.

- [4] 刘凯,朱戡,刘洋,等. 轻轨车辆铰接装置强度分析[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(11): 62.  
LIU Kai, ZHU Kan, LIU Yang, et al. Strength analysis of articulated device for light rail vehicles[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(11): 62.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
- 通信作者:王文华,正高级工程师,whwang1981@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license