DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.101

“光谷光子号”悬挂式单轨列车开发

刘玉文[1]，丁叁叁[1]，王安军[2]
（1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111；
2.武汉光谷交通建设有限公司，湖北 武汉 430073）

摘　要：悬挂式单轨列车是城市轨道交通的重要组成部分，在我国具有较为广阔的应用前景。文章首先介绍了悬挂式单轨列车的发展，然后从总体方案、转向架系统、车体系统、电气系统、制动系统、网络系统几方面分析了“光谷光子号”悬挂式单轨列车技术方案，并在安全性、智能化、低碳环保等方面论述了其关键性能。“光谷光子号”悬挂式单轨列车各部件及整车均通过了相关的仿真测试、试验验证，现场应用情况表明，列车整体性能可满足行业应用需求。

关键词：悬挂式单轨列车；转向架系统；网络系统；智能化；光谷光子号；城市轨道交通

中图分类号：U270.1；U239.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)04-0059-07

0　引言

随着社会的发展和城市化进程的加快，大城市交通压力不断增大，城市轨道交通不断发展[1-5]。当前，各大城市地铁线网已逐步完成规划建设，通过中低运量轨道交通实现地铁主干线路的站点接驳和线路加密成为解决人们出行“最后一公里”需求的关键。在众多中低运量轨道车型中，悬挂式单轨列车具有爬坡能力强、转弯半径小、建设周期短、地面资源占用少等优势，有较为广阔的应用前景[6-8]。与普通轨道列车相比，悬挂式单轨列车走行部位于车顶，车轮被钢制轨道梁包裹，列车整体悬挂于架设在空中的轨道梁下。本文将回顾悬挂式单轨列车的发展历史，重点针对中车青岛四方机车车辆股份有限公司（后简称中车四方）研制的“光谷光子号”悬挂式单轨列车的总体方案、关键技术及产品验证情况进行论述，并对未来发展进行展望。

1　发展历程

1820年，莫斯科近郊的米亚奇科沃村修建了最早的悬挂式单轨系统，其车轮在水平梁上方移动，车厢通过悬臂与车轮相连后悬挂在梁上，牵引动力来自马匹拉动。1825年6月25日，英国切森特（Cheshunt）悬挂式单轨线路建成，线路全长0.75英里（1.21 km），这是第1条客运悬挂式单轨交通。这条单轨是基于英国工程师亨利·罗宾逊·帕尔默（Henry Robinson Palmer）在1821年获得单轨系统专利设计的，其水平梁由立柱支撑，车轮运行在水平梁上方，两节车厢分别吊挂在水平梁两侧。

1901年5月，世界上第1条商用客运空轨线路德国伍珀塔尔（Wuppertal）线开通运营，线路全长13.3 km，采用了德国人Eugen Langen设计的悬挂式单轨列车系统。该系统至今仍在正常运营中，其车辆主要参数如表1所示。

目前，德国主要还有多特蒙德大学线和杜塞尔多夫线两条悬挂式单轨列车线路。其中，多特蒙德大学线的1号线始建于1993年，初期长度1.75 km，2003年延长至3.00 km，线路为单线设计，中间设避让线，两列车往返运行；2号线在1984年建成，线路长度1.05 km，采用无人驾驶系统。杜塞尔多夫线（如图1所示）建成于2003年，该线是双线，线路总长2.50 km，有4个站点，列车为两车编组，车体材料为铝合金，采用无人驾驶技术。多特蒙德大学线车辆采用20世纪80年代与90年代初的老型车辆，而杜塞尔多夫线车辆是新

通信作者：刘玉文，男，正高级工程师，从事轨道车辆总体集成技术研究；E-mail: sf-liuyuwen@cqsf.com
引用格式：刘玉文, 丁叁叁, 王安军. “光谷光子号”悬挂式单轨列车开发[J]. 机车电传动, 2024(4): 59-65.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.101.
Citation：LIU Yuwen, DING Sansan, WANG Anjun. Development of the Optics Valley Photon suspended monorail train[J]. Electric drive for locomotives, 2024(4): 59-65.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.101.

型车辆，车辆主要技术参数如表2所示。

1964年，日本为促进单轨交通系统的发展，成立了“日本单轨协会”，制定了单轨交通相关标准。在日本政府的支持下，多条悬挂式单轨线路相继建成，主要包括湘南线和千叶都市线。其中，湘南线是1971年湘南县修建的从江之岛站到神奈川大船站的悬挂式单轨线路，线路全长6.6 km，设8座车站，列车为3辆编组，最高运行速度75 km/h，采用铝合金车体材料和DC 1 500 V供电电压，列车定员498人，属中运量单轨交通系统。千叶都市线是1988年千叶市开通的第1条悬挂式单轨列车线路，后期又修建了延长线，线路总长15.2 km，是该市主要的公共交通形式（如图2所示）。2012年7月，日本三菱重工集团研制的悬挂式单轨列车投入运营，列车采用两辆固定编组，每节车定员78人，最高运行速度达80 km/h，成为日本最先进的悬挂式单轨列车。

表1 伍帕塔尔线车辆参数

Table 1 Vehicle parameters of Wuppertal suspended monorail

参数名称	参数值
供电电压/V	DC 600/750
列车长度/m	24.060
列车宽度/m	2.2
空车质量/kg	23 408
最高运行速度/(km·h^{-1})	60
最大加速度/(m·s^{-2})	1.2
最大减速度/(m·s^{-2})	2.3



图1 杜塞尔多夫线

Fig. 1 Dusseldorf line

表2 杜塞尔多夫线车辆参数

Table 2 Vehicle parameters of Dusseldorf suspended monorail

参数名称	参数值或说明
列车编组数/辆	2
车体材料	铝合金
驾驶方式	无人驾驶
单辆车辆长度/mm	8 232
车辆宽度/mm	2 244
车辆高度/mm	2 623
车辆定距/mm	5 890
最小转弯半径/m	30
最大坡度/%	10.47



图2 千叶线

Fig. 2 Chiba line

2 技术方案

2015年，中车四方开始对悬挂式单轨列车进行研发，“光谷光子号”是第3代悬挂式单轨列车产品（如图3所示），具有平稳性更好、安全性更高、智能化更强、速度更快、载客量更大、观景更便利等特点，综合性能得到总体提升。

2.1 总体方案

“光谷光子号”悬挂式单轨列车平面图如图4所示。列车编组为2辆编组，每辆车设置2个转向架，均为动力转向架。转向架在轨道梁中运行，通过受电靴从设

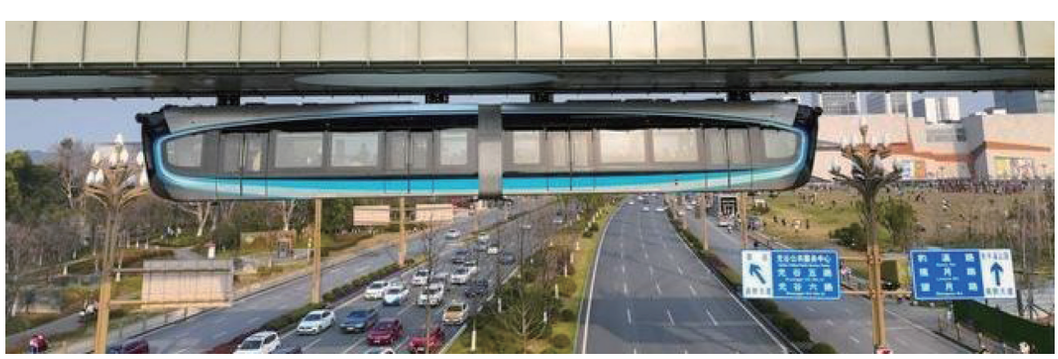


图3 “光谷光子号”悬挂式单轨列车

Fig. 3 Optics Valley Photon suspension monorail train

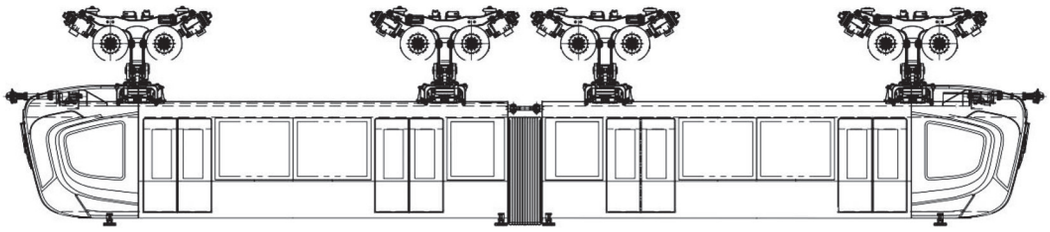


图4　“光谷光子号”悬挂式单轨列车平面布置

Fig. 4　Layout of Optics Valley Photon suspension monorail train

置在轨道梁中的供电轨受电。供电轨提供的直流高压电经过DC/AC变流器变压变频后供给转向架上的交流永磁同步电机，再由永磁同步电机驱动转向架带动列车运行。列车主要参数如表3所示。

表3　“光谷光子号”车辆参数

Table 3　Vehicle parameters of Optics Valley Photon suspended monorail

参数名称	参数值或说明
列车编组数/辆	2
车体材料	铝合金
单辆车辆长度/mm	11 525
车辆宽度/mm	2 480
车辆高度/mm	3 686
空车质量/ kg	29 600
最高运行速度/(km·h^{-1})	60
常用加速度/(m·s^{-2})	1.0
常用减速度/(m·s^{-2})	1.0
紧急减速度/(m·s^{-2})	1.2

2.2　转向架系统

与传统轨道车辆采用的有导向轮缘的钢轮相比，悬挂式单轨列车采用充气橡胶轮，无导向装置。这种方式的车轮与轨道梁匹配难度、转向架设计难度都更大，因此基于列车走行部设计与车桥耦合设计相结合的整体设计理念，采用了三级减振技术，在解决以上两个问题基础上，还解决了运行平稳性难题。转向架系统方案如图5所示，采用两轴结构，包括构架、走行轮、导向轮、齿轮传动装置、基础制动装置、一二系悬挂装置及相关附件，其结构和主要尺寸同轨道梁相匹配，保证列车以最高允许速度安全平稳运行。

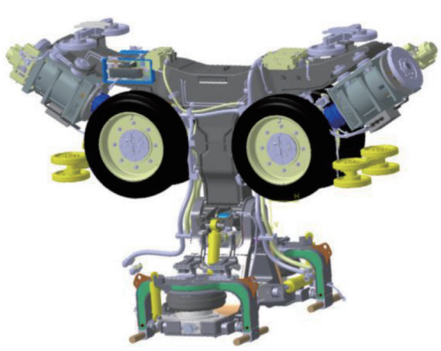


图5　转向架

Fig. 5　Bogie

2.3　车体系统

列车的走行部和悬挂机构均在车顶，车体侧面和地板上布置了大面积的观景窗，因此车体的设计和施工难度都大大增加。为在确保强度的同时尽可能减重，采用了车体拓扑优化技术，同时引入了新材料和新结构，实现了车辆轻量化设计。车体系统方案如图6所示，车体主要由底架、车顶、侧墙、端墙及司机室等部件构成，为大型薄壁铝合金型材焊接形成的整体承载式结构，具有等强度、轻量化等优点。

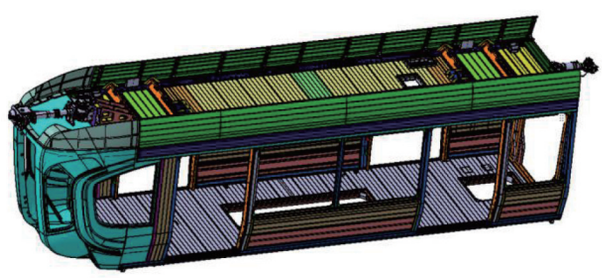


图6　车体结构

Fig. 6　Carbody structure

2.4　电气系统

1）高压系统

列车设置高压母线，确保通过断电区时的受流稳定性。设计实现了接触轨供电、超级电容供电、车间电源供电等多种供电模式，以满足列车在不同场景下的供电需求。主回路配置了接地检测装置，进行预警提示，提升运营效率。

2）牵引系统

牵引电机采用永磁同步牵引电机，具有可靠性高、能耗低、重量轻、体积小、加速性能好等优势，可以实现1.0 m/s^{2}的启动加速度和10%以上的系统节能。牵引逆变器采用高度成熟的SVPWM控制方法，可根据不同电压输出目标调节励磁电流与转矩电流，实现对速度与转矩的精确控制，具有良好的稳态与动态响应特性。

3）辅助供电系统

为实现轻量化、低噪声、冗余性高的辅助供电系统，选用2台SIV（辅助逆变器）+2台蓄电池的基本单

元，采用高频链路设计、谐振软开关技术。通过辅助变流器的自举功能，确保蓄电池严重馈电时的系统供电。通过输入高压冗余供电，提升系统冗余性。

4）超级电容

为实现列车自走行能力，配置了超级电容。自走行时，牵引动力电源通过能量型超级电容提供。全列车配置 1 套超级电容，安装在 Mc1 车的车顶。在选型时，结合列车实际运营工况，充分发挥储能系统优势，同时有效降低超级电容及启动电源容量配置，减少设备安装空间及重量，最终确定该电容容量为 12.9 kW·h。电容通过 DC/DC 充电机进行充放电，循环寿命 20 万次以上，且具备远程监控功能。在从无网区到有网区过渡时，可实现受流轨供电和超级电容供电自动转换；自走行系统支持制动能量回收，可提高能量利用率。

2.5 制动系统

采用微机控制、被动式液压制动系统，微机控制单元为车控架构，液压控制单元为架控架构，并配置辅助缓解单元。列车每辆车内配置一套微机控制单元（EBCU），转向架上安装液压控制单元、被动式液压夹钳和辅助缓解单元。液压控制单元根据微机控制单元发出的指令，输出相应的液压制动力，控制相应转向架上的被动式液压盘式制动单元动作。

采用电液混合制动，优先发挥电制动，不足部分通过摩擦制动以“等磨耗”原则补偿。当所有动车的实际电制动力之和可以满足全列车的制动力需求时，全部制动力由电制动系统承担，动车和拖车都不施加摩擦制动；当实际电制动力不能满足全列车的制动力需求时，全列车需要补充的制动力将平均分配到各辆车上，并以液压制动的形式进行补充。

2.6 控制系统

按照 IEC 61375 标准组建基于 MVB 网络的列车控制系统。通过冗余设计，包括总线 A/B 路冗余、中央控制单元冗余、关键信号采集冗余、数据记录冗余、硬线冗余等，确保列车可靠工作。

采用 LCU 系统，提高继电器替代率，降低车辆重量，减少配电柜体积，提升控制系统智能化水平。同时，基于车地无线系统数据，研究团队开展了地面 PHM 模型分析，建立了牵引、制动、乘客服务、空调等多个系统的 PHM 模型，支持列车的故障预测和健康管理。

3 关键技术

研究团队对“光谷光子号”悬挂式单轨列车的安全技术（列车结构安全、防火安全、网络安全等），智能技术（自我感知、自动防护、自动运维等），低碳环保技术（轻量化技术、灵活编组技术、拓扑优化车体技术、永磁电机牵引技术、高压直进体感控制变频热泵空调技术、时变照明和制动能量飞轮回收技术等）等方面开展了研究，提升了列车总体性能。

3.1 安全技术

“光谷光子号”悬挂式单轨列车是国内唯一一个获得 DAkkS 第三方国际认证的悬挂式单轨列车，在安全性方面的设计主要包括 4 个方面：

1）结构安全

轨道梁采用 C 型包围结构，走行部完全包裹在轨道梁内，确保悬挂式单轨列车没有脱轨风险；车辆采用大安全系数的悬吊结构，枕梁、构架等关键承载部件均经过千万次疲劳试验；悬吊结构采用冗余设计，在某一套突然失效的情况下，另一套可以立即启用，保证车辆安全行驶。

2）网络安全

在新的网络安全标准 ISO/IEC 62443 的指导下进行设计，配置防火墙模块，实施车地数据通信安全防护策略：划分内外网，外网数据必须经防火墙确认后方可传输至内网；统一外网访问接口，设置分级访问维护权限。

3）防火安全

列车满足 EN 45545 防火标准，安装了烟火报警系统、灭火器和细水雾灭火系统，可以在火险初始苗头阶段发现并及时扑灭，避免造成损失。列车在正线完成了细水雾装置实车喷淋试验，这是国内首次开展的细水雾实车喷淋试验。

4）疏散安全性

车辆设计时，设置了多种救援疏散方式，包括应急蓄电池救援、联挂及逃生门救援、逃生绳垂向救援、充气逃生滑梯救援和地面云梯车救援等。

3.2 智能技术

列车系统融合了互联网、云计算、大数据、5G 通信等新技术，提升了智能行车、智能运维、智能服务水平。运用到的智能技术主要有以下几点：

①GoA3 级自动驾驶。根据时刻表，列车实现了自动唤醒、自动出库、自动上线载客、运营结束后自动回库、自动休眠的功能，全过程无须人工操作。

②PHM 智能运维。PHM 可全方位监测车辆关键部件的健康状态，一旦发现健康异常，系统会提前预警，确保故障发生前问题部件的修复或更换，提高车辆可靠性，降低全寿命周期费用。PHM 系统架构如图 7 所示。

③车内环境智能控制与智能化终端。环境智能控制技术可使车厢内环境保持舒适；智能化终端可感知列车运行信息，提升乘客乘车的舒适性和便捷性。

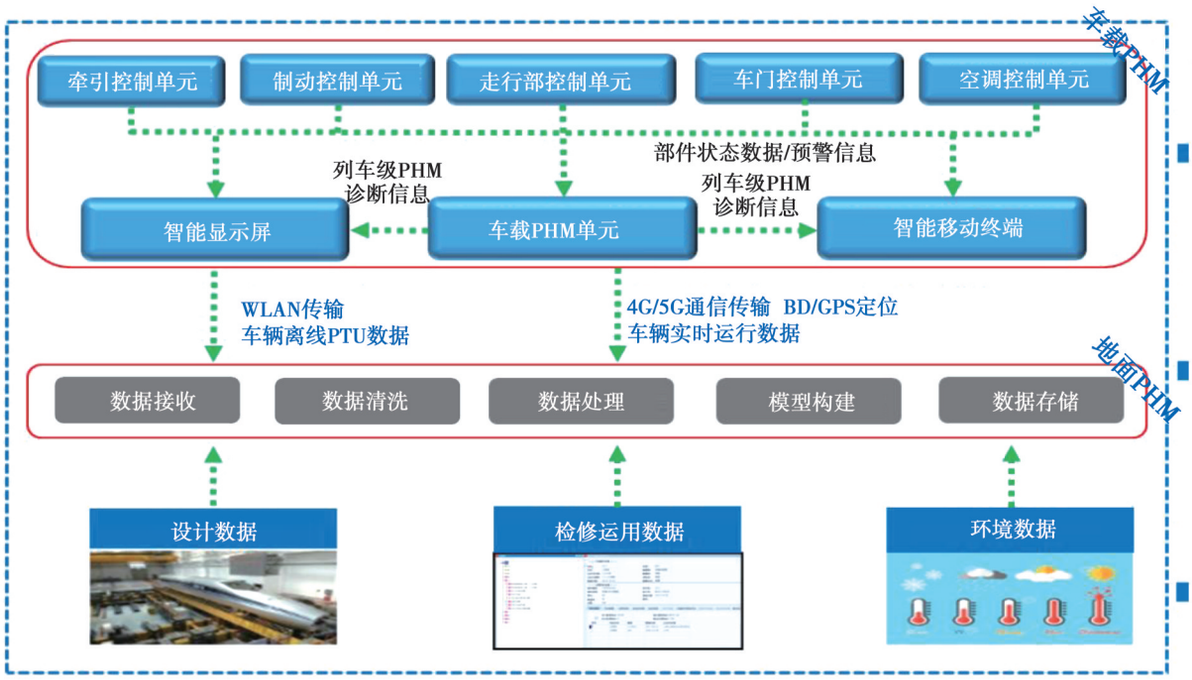


图 7　PHM 系统架构

Fig. 7　Architecture of the PHM system

3.3　低碳环保技术

列车设计时，研究团队开展了一系列低碳环保技术研究。通过空气动力学设计和轻量化设计，减少了运行阻力；通过系统优化，提高了牵引、制动、空调、照明等的效率；通过对整车能量的系统管理，综合提升了列车效能。

主要技术设计包括：采用专门研发的小型高效永磁电机牵引系统，效率提升了 10% 以上；实现了电制动到零速和制动能量回收，在小型化、轻量化设计的同时，更加节能；采用高压直进体感控制变频热泵空调，实现节能 15% 以上；通过列车制动能量回馈配合储能回收技术，有效提高能量利用率，初步估算整条线路每年可节省用电 23×10^4 kW·h。

4　产品验证与运用

在设计研发过程中，研究团队对悬挂式单轨列车的关键系统均开展了仿真分析及试验验证，以保证运行安全性与可靠性，包括各系统的功能试验、性能试验和环境适应性试验。

针对车体强度的仿真分析显示，车体结构在各静强度工况下，各部位最大范式等效应力（Von Mises Stress）均小于材料屈服极限，静强度应力计算结果满足 EN 12663 标准。在疲劳工况下，焊缝疲劳损伤总和值均小于 1，满足车体 30 年正常运营的需求。在最大垂直载荷工况下整车的最大范式等效应力云图如图 8 所示。

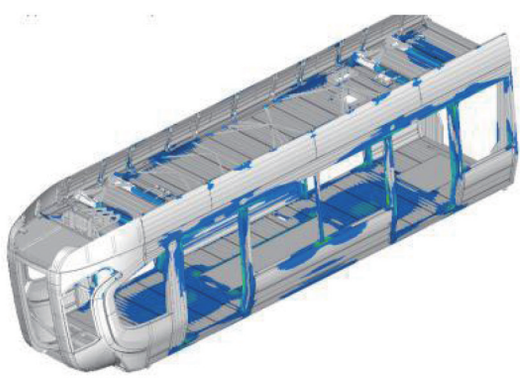


图 8　整车应力云图

Fig. 8　Stress contour plot of vehicle

针对车体枕梁结构，研究团队完成了 1 000 万次的疲劳强度试验，枕梁结构无变形、无裂纹。枕梁疲劳试验载荷加载示意图如图 9 所示。

在武汉光谷的空轨旅游线上，研究团队开展了“光谷光子号”悬挂式单轨列车动力学试验，测试车辆的运行平稳性及舒适度。实车线路试验表明，“光谷光子号”悬挂式单轨列车的运行平稳性指标小于 2.5，达到 GB 5599—2019 标准的优秀级，舒适度指标小于 2.5，达到 UIC 513 标准的舒适级。车辆运行平稳性和舒适度的测点布置图及典型试验结果如图 10 所示。

作为国内首条开通运营的空轨线路，“光谷光子号”悬挂式单轨列车线路从 2023 年 9 月 26 日在武汉光谷正式开通运营以来，现场运行稳定可靠，其舒适性、安全性、智能化等总体性能表现优秀，可满足行业应用需求。

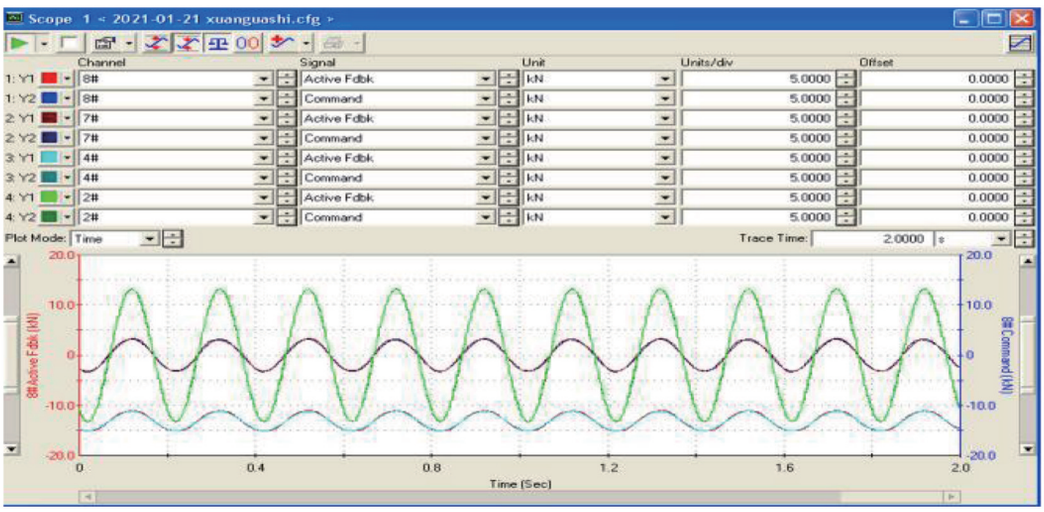
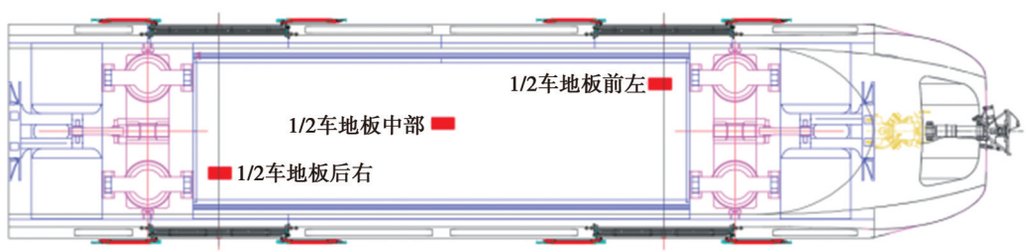
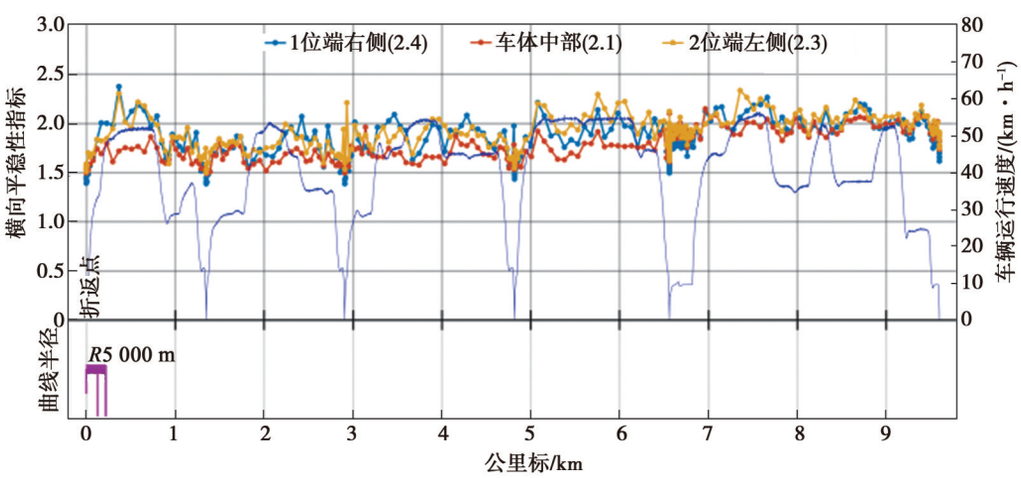


图 9　枕梁疲劳试验载荷加载

Fig. 9　Load application for fatigue test of bolster



(a) 测点



(b) 测试结果

图 10　运行平稳性及舒适度试验

Fig. 10　Test for riding stability and comfort

5　结束语

与其他城市轨道交通工具相比，悬挂式单轨列车具有如下优势：①悬挂在空中运行，视角更高，视野更开阔；②客室内噪声更小，乘坐体验更舒适；③空中运行，不受地面道路所限，旅行更快捷；④占地少，节省土地资源；⑤建设周期短、迁移方便。由于施工所用的轨道梁和墩柱是钢结构，全部由工厂预制，因此半年内即可完成线路建设；同时，如果客流改变，列车系统还可以通过增减列车编组或整系统拆卸迁移至另一线路等方式，适应城市的快速发展。

不同的交通方式有不同的应用场景，悬挂式单轨列车主要适用于大城市骨干交通站点之间的接驳、中小城市干线交通、大型航站楼之间、大型景区、地形复杂的山区和拥挤的老城区等。随着悬挂式单轨列车智能化程度的进一步提升，运行速度的进一步提高，运营效率的进一步提升，建设和维护成本的进一步降低，悬挂式单轨列车作为城市立体交通的一种重要制式，未来将会有更广阔的应用空间。

参考文献：

[1] 刘洋, 曹玉峰, 蔡小培, 等. 国内外轨道交通综合试验基地现状与发展趋势[J]. 中国铁路, 2023(9): 47-56.
LIU Yang, CAO Yufeng, CAI Xiaopei, et al. Current status and development trend of rail transit comprehensive test bases at home and abroad[J]. Chinese railways, 2023(9): 47-56.

[2] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2016, 51(2): 209-226.

[3] 李雪松, 晁宇宏, 徐闯闯, 等. 我国中低运量城市轨道交通发展现状分析及相关对策建议[J]. 现代城市轨道交通, 2024(7): 1-7.
LI Xuesong, CHAO Yuhong, XU Chuangchuang, et al. Analysis of current development status and suggestions for countermeasures for medium and low traffic volume urban rail transit in China[J]. Modern urban transit, 2024(7): 1-7.

[4] 梁建英, 王松文, 丁叁叁, 等. 我国城际轨道交通及发展[J]. 机车电传动, 2014(6): 6-9.
LIANG Jianying, WANG Songwen, DING Sansan, et al. Development of intercity rail transit in China[J]. Electric drive for locomotives, 2014(6): 6-9.

[5] 刘玉文, 丁叁叁, 尤维秀. 下一代地铁列车创新和设计[J]. 铁道车辆, 2021, 59(1): 35-37.
LIU Yuwen, DING Sansan, YOU Weixiu. Innovation design of next generation metro train[J]. Rolling stock, 2021, 59 (1): 35-37.

[6] 周庆瑞, 金锋. 新型城市轨道交通[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
ZHOU Qingrui, JIN Feng. New modes of urban rail transit [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

[7] 周美艳. 悬挂式空中列车的应用发展[J]. 国外铁道车辆, 2014, 51(2): 10-14.
ZHOU Meiyan. Application and development of the suspension type sky train[J]. Foreign rolling stock, 2014, 51(2): 10-14.

[8] 白永平, 彭长福. 悬挂式单轨列车研制及试验[J]. 机车电传动, 2023(2): 97-102.
BAI Yongping, PENG Changfu. Development and test of suspended monorail train[J]. Electric drive for locomotives, 2023(2): 97-102.

Development of the Optics Valley Photon suspended monorail train

LIU Yuwen[1], DING Sansan[1], WANG Anjun[2]

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China;
2. Wuhan Optics Valley Traffic Construction Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract: Suspended monorail trains represent an important component of urban rail transit and this mode of transportation is regarded as promising for applications in China. This paper begins with an introductory interview of the development of suspended monorail trains and subsequently analyzes the technical schemes of the Optics Valley Photon suspended monorail trains from various perspectives, including the general design, bogie system, car body system, electrical system, braking system, and network system. It further elaborates on key performance aspects such as safety, intelligence, low-carbon emissions, and environmental protection. The Optics Valley Photon suspended monorail trains have been successfully verified through simulation testing and experiments at both the component and vehicle levels. Furthermore, actual train operation on the track has demonstrated overall performance in alignment with industry application requirements.

Keywords: suspended monorail train; bogie system; network system; intelligence; Optics Valley Photon; urban rail transit

收稿日期：2023-11-03；修回日期：2024-04-12