



新型磁浮车辆车体设计与分析

王以祥

中铁科工集团有限公司, 湖北 武汉 430000

摘 要： 基于空簧中置悬浮架技术, 设计新型磁浮车辆车体, 通过 Ansys 有限元分析软件对其进行静强度分析和模态分析, 验证设计满足要求。

关 键 词： 空簧中置悬浮架; 车体结构; 静强度分析; 模态分析

Design and Analysis of New Maglev Vehicle Body

Wang Yixiang

CHINA RAILWAY SCIENCE & INDUSTRY GROUP CO., LTD. Wuhan, Hubei 430000

Abstract： Based on the technology of mid-set levitation frame, a new type of maglev vehicle body is designed. Static strength analysis and modal analysis are conducted using Ansys finite element analysis software to verify that the design meets the requirements.

Key words： mid-set levitation frame; carbody structure; static strength analysis; modal analysis

一、引言

通过时速 160—200km/h 磁浮样车研制, 验证了空簧中置悬浮车辆技术方案, 能够很好的解决传统 HSST 磁浮车辆的技术方案存在对车 / 轨耦合振动敏感、最大构造速度与地铁轻轨相当而运量较低的缺点。传统 HSST 磁浮车辆技术采用口字形悬浮架, 车体底架有 6 个支撑枕梁, 而新型磁浮车辆采用空簧中置悬浮架, 车体底架采用 5 个支撑枕梁结构, 车体底部设备安装空间更大, 车体重量更轻, 更有利于底部电气设备集成化, 便于维修保养, 而枕梁距离端部结构较远, 受力复杂, 因此, 需要设计一种适用于新型空簧中置悬浮的车体结构。

二、车体设计

新型磁浮车辆车体采用薄壁筒型整体承载结构, 轻量化的中空铝合金型材, 设计采用模块化设计理念, 包括底架、车顶、侧墙、端墙和司机室骨架五大模块。

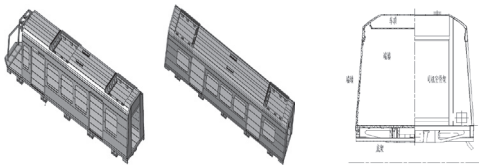


图 2-1 车体结构

(一) 底架

底架由边梁、地板、枕梁、I 端端部结构、II 端端部结构等组成。在地板下部设计嵌入式高低 C 型槽, 既满足电气设备、管路和线槽的安装要求, 又有效提升底部设备的散热条件。地板与边梁、端横梁均采用搭接结构, 方便生产焊接。枕梁包括 3 个长枕梁和 4 个短枕梁, 1、3、5 位采用长枕梁, 通过直线滑轨将悬浮架与车体连接; 2、4 位采用短枕梁, 沿车体中心线对称布置, 通过

固定座将悬浮架与车体连接。端部结构主要由牵引梁、纵梁、横梁、前梁、车钩座板以及横向筋板组成。I 端端部结构和 II 端端部结构基本相似, 主要区别是纵梁、牵引梁长度。

与传统技术相比, 端部枕梁纵梁延伸至与底架横梁相接, 能够支撑设置在底架端部的端部结构, 使底架结构更加稳定地承受纵向拉压载荷。端部枕梁纵梁的自由端设置有枕梁纵梁倒圆角, 能够增加底架结构纵向方向的强度。底架边梁只在枕梁处保留型材下部结构, 其余无连接需求的下部型材均去除材料处理, 枕梁上下腹板开长圆孔减重。

(二) 车顶

车顶由车顶边梁、中顶板、侧顶板、空调平顶、排风座、端顶板组成。焊接接头设计多采用搭接密封焊和对接密封焊, 保证车顶的密封性; 下沉式空调平顶设计, 当空调安装后, 空调顶部与车顶平齐。

(三) 侧墙和端墙

侧墙由侧墙板和立柱组成, 侧板沿车体中心对称布置, 根据车门的布置, 将侧墙分为三个模块。在侧墙板、立柱内侧设 C 型槽, 用以安装车内设备。端墙主要由端墙板、端立柱、横梁组成, 为车间贯通道提供安装基础, 将相邻车厢联通。

(四) 司机室骨架

位于 Mc 车前端, 为头罩提供骨架支撑。主要由立柱、横梁、筋板、焊卡组成。为进一步提高支撑强度, 在支撑柱外侧, 焊接筋板。

(五) 模块间连接设计

各模块之间以插接焊或搭接焊方式连接: 底架和侧墙板采用搭接焊; 底架与侧墙立柱、端墙立柱之间采用 T 型坡口焊; 底架横梁与端墙板、端墙立柱均采用搭接焊; 侧墙和车顶采用插接焊; 侧墙与端墙立柱采用搭接焊, 保证焊接的密封性; 车顶与端墙板采用 T 型焊接, 焊接为密封焊。



三、车体计算分析

（一）模型处理

采用三维软件建立车体模型，导入 Ansys 分析软件中，为了更好的模拟车体结构，不同的结构形式采用不同的单元：车体结构为铝合金薄板，采用选取薄板中性层的方式建立中面模型，使用 shell181 单元模拟；车上线缆质量、内饰和载客荷载以均布载荷的方式直接施加在地板上。车门、空调及地板下的电气设备使用质量单元 mass21 模拟，采用 reb3 单元模拟螺栓连接。

（二）静强度计算

根据新型磁浮列车技术规格书，提取主要计算参数和车体悬挂设备，如表 3.1、3.2 所示。

表 3.1 主要计算参数

序号	名称	数值	备注
1	长（mm）× 宽（mm）× 高（mm）	15510×2800×2990	
2	车体铝合金骨架质量（kg）	3545.78	净重
3	AW3 载客量（kg）	9000	
4	客室线缆及线槽支架质量（kg）	100	
5	悬浮架线缆及线槽支架质量（kg）	146	
6	底架线缆及线槽支架质量（kg）	390	
7	液气布管及驾驶室设备质量（kg）	220	
8	车头面罩、玻璃、内墙板质量（kg）	363	
9	司机室内装、座椅质量（kg）	612.66	
10	灯具、内顶板、刮雨器、遮阳帘、灭火器质量（kg）	98	
11	客室内装质量（kg）	1538.1	
12	客室灯具质量（kg）	120	
13	车门质量（kg）	780	（195×4）
14	车辆滑块、螺栓等紧固件质量（kg）	300	
15	风道、废排质量（kg）	123	
16	油漆、裙板、贯通道及其他质量（kg）	702.5	
17	车钩（kg）	245	
18	防寒材（kg）	51.6	

表 3.2 车体悬挂设备

序号	设备名称	质量（kg）	数量
1	悬浮控制器	30	20
2	DC330V 配电柜 A	47	1
3	高压分线箱	85	1
4	DC330V 悬浮电源	300	1
5	DC330V 配电柜 B	31	1
6	1.5MW 牵引逆变器	360	1
7	电抗器	166	1
8	高压电器柜	165	1

序号	设备名称	质量（kg）	数量
9	三相辅助逆变器及 DC110V 充电机	400	1
10	蓄能器组	29.6	1
11	避雷器	12	1
12	库用插座	18.5	1
13	330V 蓄电池	350	1
14	110V 蓄电池	140	1
15	风缸	24.5	1
16	风源控制单元	27.4	1
17	液压制动控制单元	41.9	1
18	液压支撑控制单元	15.2	1
19	GXN 蓄能器组 0.5L	2.71	1
20	接地电阻	3.5	2
21	空调	281	2
22	114 综合柜	130	1
23	115 继电器柜	140	1
24	152 空调柜	110	1
25	153 电源电气柜	110	1
26	喇叭	5	1

车体结构主要材料为铝合金，材料的主要力学性能如表 3.3 所示。

表 3.3 车体材料力学性能

部件名称	材料名称	密度 /kg/m ³	弹性模量 /MPa	泊松比	屈服强度 （0.2%）/MPa	
					非焊缝区	焊缝区
车体结构挤压型材	ENAW6005AT6	2700	7.2×10 ⁴	0.33	215	104
其他（如板材等）	ENAW6082T651	2700	7.2×10 ⁴	0.33	260	104

根据标准《BS EN 12663-1-2010 铁路应用 铁路车辆车体的结构要求》、新型磁浮列车技术规格书和标准确定了 14 个计算工况，如表 3.4 所示。

表 3.4 计算工况

工况序号	工况描述
1	整备状态
2	1.3 倍最大运营状态
3	整备状态下顶盖承受 200cm ² 静压力
4	整备状态下顶盖承受 400cm ² 静压力
5	整备状态下架车工况
6	整备状态下起吊工况
7	最大垂向载荷加设备纵向 3g 冲击加速度
8	最大垂向载荷加设备横向 1g 冲击加速度
9	最大垂向载荷加设备垂向 1.5g 冲击加速度
10	最大垂向载荷加横向 0.75m/s ² 的横向加速度



工况序号	工况描述
11	整备状态下车钩座作用 280kN 纵向拉伸力
12	整备状态下车钩座作用 350kN 纵向压缩力
13	最大垂向载荷状态下车钩座作用 280kN 纵向拉伸力
14	最大垂向载荷状态下车钩座作用 350kN 纵向压缩力

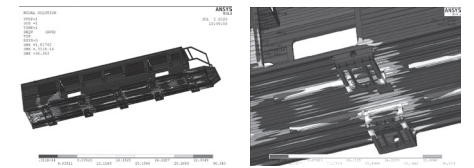
工况5，整体应力较小，较大的应力均位于架车垫板附近区域以及门框立柱与边梁连接区域，最大应力为67.69MPa，位于左侧边梁下侧与第一位枕梁型材连接区域，此处为焊接连接，许用应力为104MPa，安全系数=104/67.69=1.54。



>图3-1整车应力云图

图3-2应力分布局部放大

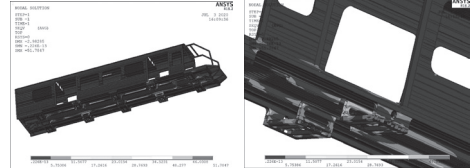
工况7，整车大部分等效应力较小，相对较大的应力位于各枕梁与地板连接位置、用于安装吊挂设备的C型槽以及后车钩部分，最大应力为36.34MPa，位于第四位枕梁型材与地板连接位置，此处为焊接连接，许用应力为104MPa，安全系数=104/36.34=2.86。



>图3-3整车应力云图

图3-4应力分布局部放大

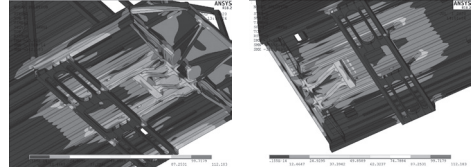
工况8，整车大部分等效应力较小，相对较大的应力位于各枕梁型材与地板的连接位置，最大应力为51.78MPa，位于第二位枕梁与枕梁型材连接位置，此处为焊接连接，许用应力为104MPa，安全系数=104/51.78=2.01。



>图3-5整车应力云图

图3-6应力分布局部放大

工况14，车大部分等效应力较小，相对较大的应力位于前后端车钩座附近，最大应力为112.18MPa，位于前车钩座到第一位枕梁型材的纵梁位置，此处材料为EN AW6082 T651，许用应力为215MPa，安全系数=215/112.18=1.9。



>图3-7整车应力云图

>图3-8应力分布局部放大

(三) 模态分析

对整车车体进行了自由模态分析，并提取了前14阶模态。

表3.5 AW0状态模态分析结果

阶次	频率 (Hz)	振幅 (mm)	振型
1	6.36	1.00	一阶车头端侧墙横向弯曲
2	7.45	1.08	一阶车体垂向弯曲
3	12.76	0.99	一阶地板垂向弯曲
4	13.88	0.85	二阶地板垂向弯曲
5	16.46	1.49	一阶车头扭转
6	16.53	0.89	二阶地板垂向弯曲 + 车头扭转
7	18.83	0.99	三阶地板垂向弯曲 + 空调底板垂向弯曲
8	20.04	1.25	一阶后侧空调安装座横向弯曲
9	21.83	0.84	二阶车体扭转
10	22.02	0.97	五阶地板垂向弯曲 + 空调底板垂向弯曲
11	25.61	1.84	一阶后空调底板垂向弯曲
12	25.81	1.20	一阶车体横向弯曲
13	26.92	1.32	车头架与前空调安装座反向横向弯曲
14	27.77	1.50	前吊挂C型槽横向弯曲

四、结束语

从静强度分析结果来看，工况5、工况7、工况8和工况14的最大应力值较大，结构安全系数分别为1.54、2.86、2.01和1.9，主要分布在枕梁与边梁，枕梁与地板连接处，其他区域应力较小，均在合理范围内，设计满足要求。在施工图设计时，在枕梁与边梁连接位置，增加圆角过渡设计；在枕梁与地板连接位置，增加垫板和圆角过渡设计，既能保证焊缝质量，又能使枕梁所受应力平顺传导到地板和边梁上，改善枕梁受力条件。从模态分析结果来看，一阶车体垂向弯曲为7.45Hz，大于悬浮架前两阶固有频率的1.4倍，避开了共振频率区域，设计满足要求。

综上所述，本文基于空簧中置悬浮架技术，设计的新型车体结构，满足车辆承载要求，模块化设计，设备布置更加灵活，架修更加方便，可以作为新型磁浮工程化应用的参考。

参考文献

[1] BS EN 12663-1-2010 铁路应用 铁路车辆车体的结构要求.
[2] CJ/T 375-2011 中低速磁浮交通车辆通用技术条件.
[3] 冯金柱 HSST 型磁悬浮列车 铁道知识.
[4] 胡俊雄 雷成 马卫华 董黎生 中低速磁浮列车中置式悬浮架的耦合姿态分析 铁道学报 2021, 43(10).
[5] 周策 罗世辉 马卫华 时速160 ~ 200 km 中速磁浮受流系统动力学研究 机械 2021, 48(08).
[6] 胡昂茹 赵春发 蔡文锋 龚俊虎 冯洋 两种中低速磁浮车辆动力学性能仿真对比分析 机械工程学报 2023, 59(10).
[7] 李云锋 中低速五转向架磁悬浮列车走行机构研究与理论设计 国防科技大学.
[8] 武震啸 中低速磁浮车辆曲线通过性能研究 西南交通大学 交通运输工程 2018.
[9] 中铁磁浮科技(成都)有限公司 中低速磁浮列车的车体底座结构 CN202022798436.3 UTILITY_MODEL; 2020-11-25.
[10] 中铁磁浮(成都)有限公司 新型磁浮车辆技术规格书.
[11] 中铁高新工业股份有限公司 时速160—200km 磁浮交通关键技术工程化应用研究 工业研合 -2018-01.