

# 时速 350 km 双层动车组相关技术参数对车体模态的影响

朱彦 李传胜 胡浩

(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//第一作者,正高级工程师)

**摘要** 以某时速 350 km、16 辆编组的双层动车组为研究对象,考虑车辆平衡对车辆布局进行优化,并对动车组除车体外的其他部件进行轻量化设计。建立车体有限元计算模型,采用控制变量法分析车体相关部位参数变化对车体模态的影响,优化车体结构,确定车辆整备状态下的模态频率。结果表明,通过合理的列车布局方案及编组形式,相比于 16 辆长编组单层动车组,双层动车组的定员可提高 31.8%;通过对动车组其他部件质量进行有效控制,质量降低 2.4 t;车辆整备状态下菱形模态振动频率可达 10.318 Hz。

**关键词** 高速列车; 双层动车组; 列车布局; 轻量化设计; 车体模态分析

**中图分类号** U270.32; U266.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.02.009

## Impact of Relevant Technical Parameters of 350 km/h Double-deck EMU on Vehicle Mode

ZHU Yan, LI Chuansheng, HU Hao

**Abstract** Taking a certain double-deck EMU with 16-vehicle formation and speed of 350 km/h as the research object, the vehicle layout is optimized considering vehicle balance, and the lightweight design of components except vehicle body is carried out. A vehicle body finite element calculation model is established, the influence of parameter changes of vehicle body related parts on the mode is analyzed using control variable method, then the vehicle body structure is optimized and the modal frequency of vehicle in conditioning state is confirmed. Results show that compared with 16-vehicle formation single-deck EMU, reasonable vehicle layout scheme and marshalling form can increase the passenger capacity by 31.8% for double-deck EMU; weight can be reduced by 2.4 t through effective control of the weight of other components; and diamond modal vibration frequency can reach 10.318 Hz when vehicle is in conditioning state.

**Key words** high-speed train; double-deck EMU; train layout; lightweight design; vehicle body mode analysis

**Author's address** CRRC Changchun Railway Vehicles

Co., Ltd., 130062, Changchun, China

随着高速铁路客流量持续攀升,以京沪高铁和京广高铁为代表的长大干线输送能力已接近饱和。为进一步满足快速增长的客流需求,缓解节假日期间干线运力不足问题,有必要开展载客能力更大的时速 350 km 双层动车组技术方案研究<sup>[1-6]</sup>。

本文结合双层动车组列车的特点,对影响双层动车组模态的参数,如列车布局、轻量化设计、车体参数等,以及整备状态下双层动车组的模态进行分析,以充分发挥其扩容增效优势。

## 1 双层动车组列车布局

本文研究的双层动车组列车高度为 4 500 mm,客室高度相比于普通动车组列车降低 300 mm。同时,车下空间匮乏,电气设备只能布置于车厢两端。因此,如何克服车辆高度空间不足给乘客带来的舒适度降低,以及如何确保在车下设备上移的情况下充分利用端部空间增加定员,最终达到质量平衡,成为车辆合理布局的关键。

针对上述问题,提出如下优化措施:

1) 客室两侧行李架将用于存放小件随身行李,但其设计时应满足可存放高度、深度尺寸分别为 260 mm、300 mm 的矩形截面行李的要求。

2) 下层客室地板过道区域采用凹陷的设计理念,以增加净通过高度。

3) 针对双层车辆,座椅上下层采用一、二位侧对称布置;一等座椅间距为 1 140 mm,二等座椅间距为 960 mm。

4) 牵引变流器、辅助变流器、污水箱、制动风缸等设备设置在车辆端部,其中牵引变流器采用一分为二的设计结构,对角布置。

5) 楼梯在一、二位端车长方向对称布置。

6) 卫生间和电气柜分设于车辆两端,且对角布置。

7) 空调机组中心对称布置。

据此计算得出,车上车下布局相对复杂的动车在  $X$  方向的重心为  $-150\text{ mm}$ ,在  $Y$  方向的重心

为  $-7.5\text{ mm}$ 。

单层和双层动车组载客量对比如表 1 所示。由表 1 可知,双层动车组可提升定员 31.8%。以京沪线为例,在原票价保持不变的情况下,双层动车组单程客票收入可增加约 20 万元。

表 1 单层和双层动车组各节车辆载客量对比 单位:人

车型	各节车辆载客量																总计
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>	10 <sup>#</sup>	11 <sup>#</sup>	12 <sup>#</sup>	13 <sup>#</sup>	14 <sup>#</sup>	15 <sup>#</sup>	16 <sup>#</sup>	
单层动车组	17	60	90	90	90	90	90	75	48	90	90	90	90	90	60	33	1 193
双层动车组	33	96	116	124	124	116	116	74	48	116	116	124	124	116	96	33	1 572

2 双层动车组车体轻量化设计

由于双层动车组车辆断面加大、定员增加,且每节车辆采用 2 个空调单元,较单层动车组车辆增重约 3 t,因此,需结合车辆 17 t 轴重要求,以美观舒适、防火环保和保证强度的原则对双层动车组车辆开展轻量化设计。

考虑车辆质量冗余,以动车组为研究对象,对内装、车内设备、转向架和电气系统进行轻量化设计。设计的主要内容包括合理选材、结构优化,以及电气设备的小型化、精细化设计。双层动车组具体减重措施及减重对比如表 2 所示。

表 2 双层动车组减重措施及减重对比

名称	减重措施	初始质量/kg	优化后质量/kg
内装	1. 顶板采用纸蜂窝材料;2. 防寒材采用碳纤维材料;3. 上层地板采用碳纤维材料	6 014.20	5 661.80
车内设备	1. 行李架采用镁铝合金材料;2. 座椅靠背内部骨架采用碳纤维材料,底座采用铝合金材料	2 979.30	2 711.43
电气系统	1. 提高牵引变流器电容计算精度,取消安装支架,减少电缆;2. 新开发小型电气柜;3. 将多功能车辆总线从以太网上拆下,以减少电缆	34 550.00	3 091.00
转向架	1. 枕梁由车体自带且上移;2. 采用铝合金材料,优化构架及齿轮箱等部件结构	19 332.00	17 907.02
总计		31 780.50	29 371.25

3 双层动车组车体模态分析

为避免转向架与车辆发生共振,车辆整备状态下模态值应大于 10 Hz。提高车辆整备模态值的主要方法是降低整备状态下车体质量或增加车体刚度。基于上述轻量化方案,双层动车组除车

体外其他部件减重后的质量为 52.3 t,因此需进一步研究如何在合理的质量指标范围内提高车体刚度。基于上述分析,结合以往设计经验,车体质量指标应不大于 13.4 t。由于影响车体菱形模态的主要部位为上层地板、下层地板、侧墙和车顶,借鉴单层动车组增设内隔墙和内端墙经验,以此 6 个部位为研究对象,建立有限元计算模型,通过控制变量法分析车体主要部位的材料、厚度及结构变化等参数对车体模态的影响,最终确定车辆整备状态下的模态。

3.1 变更上层地板结构材料

为使车体减重,采用铝蜂窝地板方案,侧墙厚度取 50 mm。建立的车体有限元模型质量为 12.655 t。通过计算得到的车体菱形模态值为 9.867 Hz。

由于铝蜂窝地板方案下的车体模态值较低,因此考虑选用铝型材地板,侧墙厚度仍取 50 mm,以此作为方案 1。建立的车体有限元模型质量为 12.401 t。方案 1 下的地板结构和车体模态位移分布云图如图 1 所示。

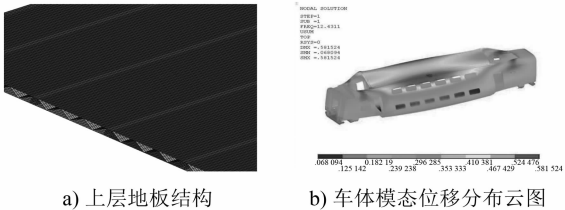


图 1 方案 1 下的上层地板结构和车体模态位移分布云图

3.2 侧墙结构加厚

选用铝型材地板,侧墙厚度由 50 mm 增加至 65 mm,以此作为方案 2。建立的车体有限元模型质量为 12.569 t。方案 2 下的车体模态位移分布云图如图 2 所示。

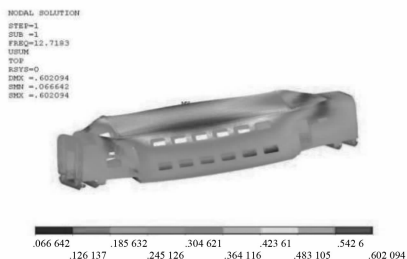


图2 方案2下的车体模态位移分布云图

### 3.3 增设内隔墙结构及变更车体横向尺寸

在方案1的基础上,在靠近车门位置增设厚度为10 mm的内隔墙,以此作为方案3。建立的车体有限元模型质量为12.688 t。方案3下的内隔墙结构和车体模态位移分布云图如图3所示。

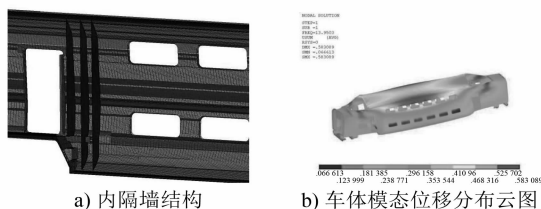


图3 方案3下的内隔墙结构和车体模态位移分布云图

在方案3的基础上,将内隔墙沿车体横向向中心线方向延长50 mm,作为方案4。建立的车体有限元模型质量为12.706 t。方案4下的内隔墙结构和车体模态位移分布云图如图4所示。

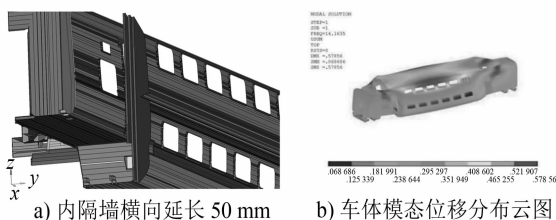


图4 方案4下的内隔墙结构和车体模态位移分布云图

在方案3的基础上,将内隔墙沿车体横向向中心线方向延长10 mm,作为方案5。建立的车体有限元模型质量为12.701 t。方案5下的内隔墙结构和车体模态位移分布云图如图5所示。

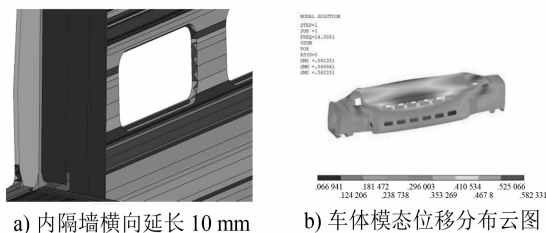


图5 方案5下的内隔墙结构和车体模态位移分布云图

### 3.4 增加车顶送风道开孔

在方案3的基础上,封堵车顶空调口并增加送风道开孔,作为方案6。建立的车体有限元分析模型质量为12.832 t。方案6下的车顶空调口开孔示意和车体模态位移分布云图如图6所示。

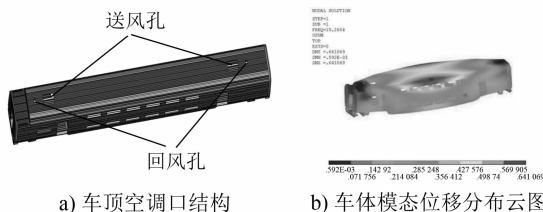


图6 方案6下的车顶空调口结构和车体模态位移分布云图

### 3.5 下层地板结构加厚

在方案6的基础上,将下层地板厚度由50 mm增加至80 mm,作为方案7。建立的车体有限元模型质量为12.943 t。方案7下的车体模态位移分布云图如图7所示。

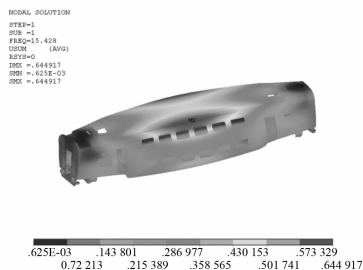


图7 方案7下车体模态位移分布云图

### 3.6 车顶型材加厚

在方案7的基础上,将车顶型材厚度由40 mm加厚至50 mm,作为方案8。建立的车体有限元模型质量为13.011 t。方案8下的车体模态位移分布云图如图8所示。

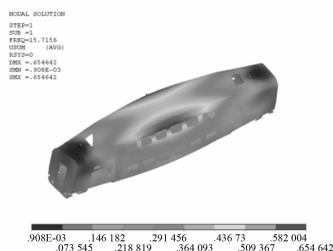


图8 方案8下的车体模态位移分布云图

### 3.7 增设内端墙结构

在方案8的基础上,在车辆两端距离车体纵向中心线6 070 mm的位置增加内端墙结构1,作为方

案9。建立的车体有限元模型质量为13.245 t。方案9下的内端墙结构和车体模态位移分布云图如图9所示。

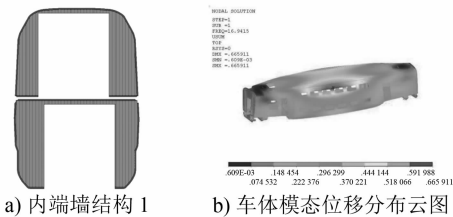


图9 方案9下的内端墙结构1和车体模态位移分布云图

在方案8的基础上,在车辆两端距离车体纵向中心线6 070 mm处增加内端墙结构2,作为方案10。建立的车体有限元模型质量为13.364 t。方案10下的内端墙结构和车体模态位移分布云图如图10所示。

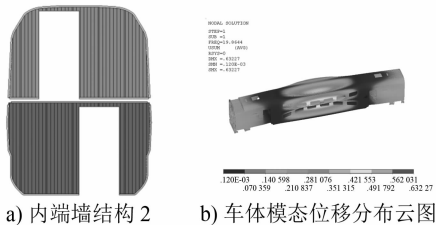


图10 方案10下的内端墙结构2和车体模态位移分布云图

3.8 车体模态分析结果

根据上述对比分析,形成车体结构参数优化结果,如表3所示。

表3 车体结构参数优化结果

方案	质量/t	模态值/Hz
初始	12.655	9.867
1	12.401	12.431
2	12.569	12.718
3	12.688	13.950
4	12.706	14.164
5	12.701	14.008
6	12.832	15.280
7	12.943	15.428
8	13.011	15.716
9	13.245	16.942
10	13.364	19.864

由表3可知,相比于铝蜂窝结构上层地板,铝型材上层地板结构可提高车体菱形模态振动频率2

Hz以上,且车体质量降低254 kg;内隔墙结构可提高车体菱形模态振动频率1.5 Hz,但车体质量增加287 kg;封堵车顶空调口并增加送风道开孔可提高车体菱形模态振动频率1.33 Hz,但车体质量增加144 kg;下层地板和车顶型材厚度增加对菱形模态振动频率影响较小;增加内端墙结构1,可提高车体菱形模态振动频率1.226 Hz,车体质量增加234 kg;增加内端墙结构2,可提高菱形模态振动频率4.148 Hz,车体质量增加353 kg。

基于上述分析,确定车体结构参数如表4所示。

表4 车体结构参数

车体部位	厚度/mm
上层地板	50
侧墙	50
内端墙	30
底架	80
车顶	50

注:上层地板选用铝型材材料;内端墙选用结构2。

结合轻量化设计理念,基于表4确定的结构参数对内端墙进行结构优化。建立的有限元模型质量为12.627 t,计算得到车体模态值为15.198 Hz,车辆整备状态下的模态值为10.318 Hz。优化后的内端墙结构和车体模态位移分布云图如图11所示。车辆整备状态下的模态位移分布云图如图12所示。

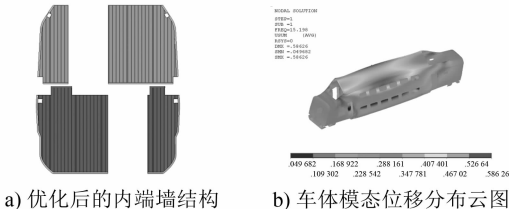


图11 内端墙结构优化方案和车体模态位移分布云图



图12 车辆整备状态下的模态位移分布云图

4 结论

1) 优化后双层动车组整车质量为64.927 t,模(下转第43页)

态下钢弹簧一阶自振频率与理论计算得到的频率基本吻合。通过振动测试,逐一排除干扰因素,找到钢弹簧断裂原因为74 Hz强迫振动。

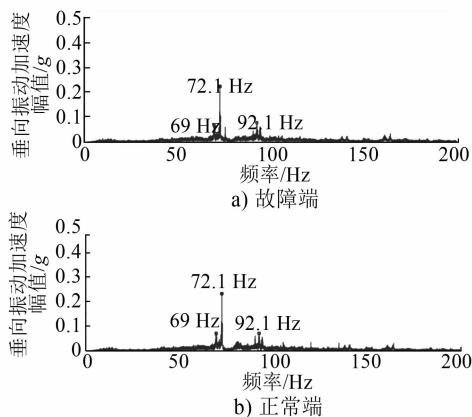


图19 车轮镟修后轴箱垂向振动加速度频谱图对比

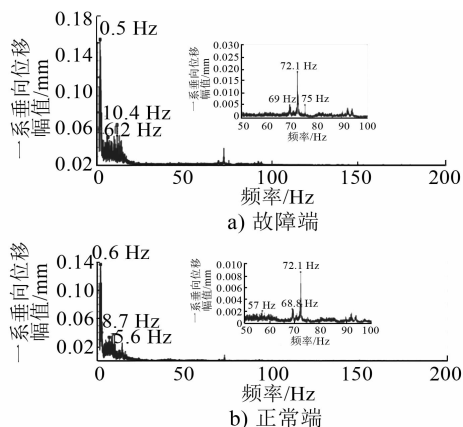


图20 车轮镟修后一系垂向位移频谱图对比

3) 通过车轮状态调查,找到钢弹簧断裂激扰源。因车轮存在严重5边形,导致钢弹簧受到74 Hz强迫振动,该频率处于外圈钢弹簧共振频率区间,导致钢弹簧在运用过程中出现强烈振动。同时钢弹簧在运用过程中支撑圈和有效圈之间存在高应力区,导致钢弹簧发生接触性疲劳断裂。通过车轮镟修,有效消除激扰源,解决了钢弹簧断裂故障问题。

## 参考文献

- [1] 王军,王玉梅,王安国,等.基于MSC.Marc的某高速列车一系悬挂钢弹簧疲劳断裂原因分析[J].机械工业标准化与质量,2013(10):37.
- [2] 杜需轩,梁益龙,雷磊,等.城轨机车HXD3B一系弹簧断裂失效分析[J].金属热处理,2016(8):189.
- [3] 陶曦东,卢俊平,元蕾,等.地铁车辆一系弹簧断裂分析[J].机车车辆工艺,2013(1):33.
- [4] 刘国云,曾京.钢弹簧故障状态的车辆动力学性能[J].城市轨道交通研究,2015(4):43.
- [5] CENELEC. Hot rolled steels for quenched and tempered springs—Technical delivery conditions; BS EN 10089:2002[S]. Brussels;CENELEC,2002.
- [6] CENELEC. Railway applications—Suspension components—Helical suspension springs, steel;BS EN 13298:2003[S]. Brussels;CENELEC,2003.
- [7] CENELEC. Cylindrical helical springs made from round wire and bar—Calculation and design—Part1: Compression springs; BS EN 13906-1:2013[S]. Brussels;CENELEC,2013.

(收稿日期:2020-09-05)

(上接第37页)

态频率可达10.318 Hz;通过对车辆其他部位进行轻量化设计,车辆减重2.4 t;相比于单层动车组,双层动车组载客量可提升31.8%。

2) 车辆设计需进一步结合人机工程学进行分析,如色彩选用明度低的冷色和透明度强的材料;客室界面(如座椅垫等)尽量采用竖长线条及纹理以体现空间感;照明灯光应尽量靠车辆两侧布置,亮度适当增加,但仍以柔光为主,以减轻双层动车组旅客因车厢高度不足引起的压抑感。

3) 持续开展轻量化设计,尤其是电气设备小型化设计,进而释放更多的质量和空间,进一步提高车辆的运能。

## 参考文献

- [1] 冯琳.国内外双层客车发展概述[J].国外轨道车辆,2011(4):1.
- [2] 张军,王成娟,马纪军.双层动车组车体结构灵敏度研究[J].铁道学报,2017(1):25.
- [3] 杨冠华,杨爱林,魏庆龙.国外双层动车组运用经验启示[J].综合运输,2018(8):123.
- [4] 张庆刚,乔珂,曹源.国外高速双层动车组的发展及对我国的启示[J].世界铁路,2018(7):103.
- [5] 王希刚.时速350公里双层动车组研发展望[J].装备制造技术,2018(1):81.
- [6] 李璐,赵鹏,宋文波.350 km/h的双层动车组列车服务设施布局研究[J].铁道运输与经济,2019(4):52.

(收稿日期:2020-09-05)