

# 车体模态仿真优化方法研究

孙权

(中车大连机车车辆有限公司 辽宁 大连 116022)

**摘要:** 本文以铝合金车体结构为基础, 研究车下吊装设备不同连接方式对整备模态频率的影响, 通过对比位移和模态结果, 分析几种模拟方式的合理性, 并找到合理的模态仿真方法。

**关键词:** 模态; 车体; 有限元; 整备

## 0 引言

模态分析是车体结构有限元分析中重要的一项, 其结果对整个车体及零部件的设计有着至关重要的影响<sup>[1,2]</sup>。其中, 车体整备模态分析结果影响二系簧下转向架的设计, 其动力学指标应避开车体模态分析结果; 车体整备模态涉及车下及车上各设备, 对于有输出的设备譬如空压机等, 其运行振动频率和车体局部固有频率的匹配也有一定的要求<sup>[3,4]</sup>。不同的仿真方法对整车模态结果影响较大, 寻找合理的模拟方法是模态计算中最关键的要素。

## 1 模态分析及其理论

### 1.1 模态分析

结构模态通常运用有限元法进行仿真分析, 可以直接计算得到结构的固有频率、不同频率下的振型及刚体运动等。车体结构模态分析属于多自由度系统的频率和振型的求解过程, 又分为自由模态分析和约束模态分析<sup>[2]</sup>。其中, 自由模态给予结构完全的自由, 因此在理论分析和计算中, 前6阶频率通常很小可近似为0, 此时反映结构6个刚体运动, 即3个刚体平动和3个刚体转动。通常影响结构模态的因素有质量、刚度和阻尼, 对于车体模态分析, 可以忽略阻尼的影响, 则刚度和质量是最为关键的因素。

### 1.2 算法原理

对于车体的动力学问题, 可以根据三维弹性动力学基本方程及力的边界条件, 并利用等效积分形式的 Galerkin 方法, 得到弹性体振动的有限元格式下的动力学微分方程, 如下:

$$M\ddot{a}(t) + C\dot{a}(t) + Ka(t) = Q(t) \quad (1)$$

式中:  $\ddot{a}(t)$  — 结构的结点加速度向量;

$\dot{a}(t)$  — 结构的结点速度向量;

$a(t)$  — 结构的结点位移向量;

$M$  — 结构的质量矩阵;

$C$  — 结构的阻尼矩阵;

$K$  — 结构的刚度矩阵;

$Q(t)$  — 结构的结点载荷向量。

公式(1)是车体振动分析的动力学基础, 在进行自由模态求解时, 可不计阻尼。

### 1.3 单元类型

根据上述理论分析可知, 对于车体模态仿真结果, 影响最大的两个因素是质量和刚度。其中, 质量是整个结构设计客观存在的参数, 来自钢结构和其他外部设备, 此部分无法改变数值大小但可以改变分布。结构刚度主要体现在质量的分布上, 质量分布和局部刚度之间的联系, 关系到整个车体结构的模态。所以在有限元模拟中, 质量分布所需的单元类型是最关键的因素。

通常在有限元分析中, 质量点、外力和约束等通过刚性单元和柔性单元间接施加, 即 RBE2 和 RBE3 单元。这两种单元的模拟结果有相当大的区别。RBE2 单元的主节点为施加点, 从节点为结构上的单元节点, 通过 RBE2 单元的算法将主从节点绑定, 位移结果表现为主从节点位移完全一致, 即 RBE2 单元模拟刚性连接, 结构不产生变形, 但出现应力集中。RBE3 单元的主节点为结构单元节点, 而从节点则为施加点, 该单元允许主节点之间产生相对位移, 即施加点的载荷会按照各主节点的权重重新匹配给主节点。两种单元位移和应力对比云图如图 1 和图 2 所示。

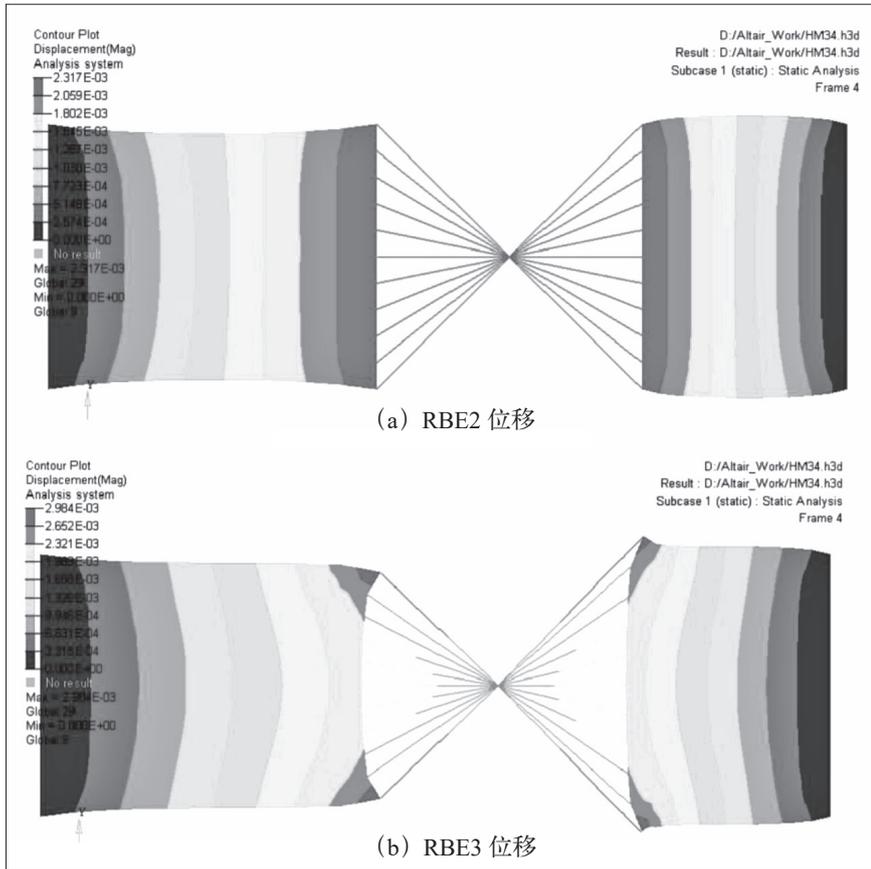


图1 RBE2和RBE3位移对比

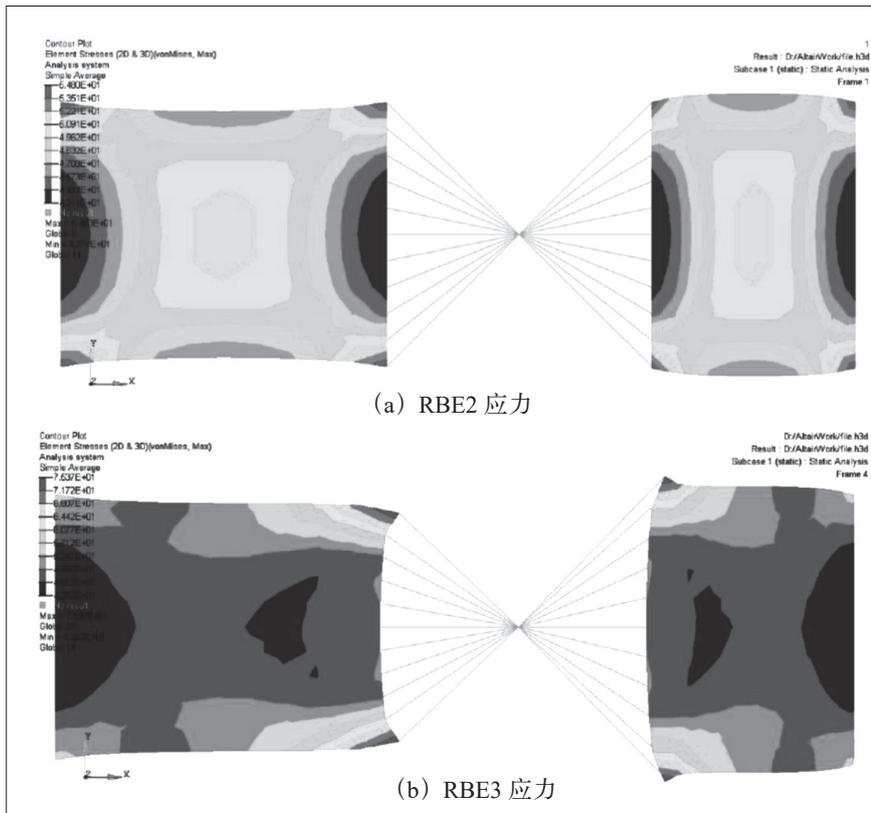


图2 RBE2和RBE3应力对比

通过对比可知，两种单元类型对位移的影响不同。在车体模态分析中，车下吊装设备的质量分布方式，对结构位移和刚度有较大影响，因此本文围绕两种单元模拟方法，分析车体模态仿真方法的合理性。

## 2 车体建模

### 2.1 车体设备布局

图3为普通铝合金车体设备分布情况，其主要由车顶大设备和车下大设备两部分构成。

车上设备主要影响车顶棚的刚度，车下设备影响底架刚度和底架挠度。在车体模态分析中，一阶垂向弯曲模态较为重要，而底架的刚度对整体模态影响很大，所以车下吊装设备的质量分布模拟方式，对车体垂弯模态的影响很大，不同模拟方式可能会有较大差异甚至得出错误的结果。

车下设备通常均为吊装模式，通过主横梁间接将设备和底架连接在一起，主横梁和底架通过螺栓或点焊进行连接。常规的模拟方法是简化车下吊装横梁结构，直接将设备简化成质量点，通过RBE3单元把质量分布到底架边梁的安装位，甚至通过RBE2单元连接质量点。此模拟方法对结构局部刚度做了不合理的简化，即将局部刚度强制最大或最小，与理论和实际不符，因此本文将采用模拟主横梁的方法，对几种方法下的模态结果进行对比分析。

### 2.2 车体设备模拟

该车体底架包括5个主要设备布置，其中质量较大的3个设备分布于车身中心线以及中心线的两侧，分别为0.57t、1.1t和1.3t；而2个质量较小的设备分布于底架两端，质量仅为0.12t。这2个设备不仅质量

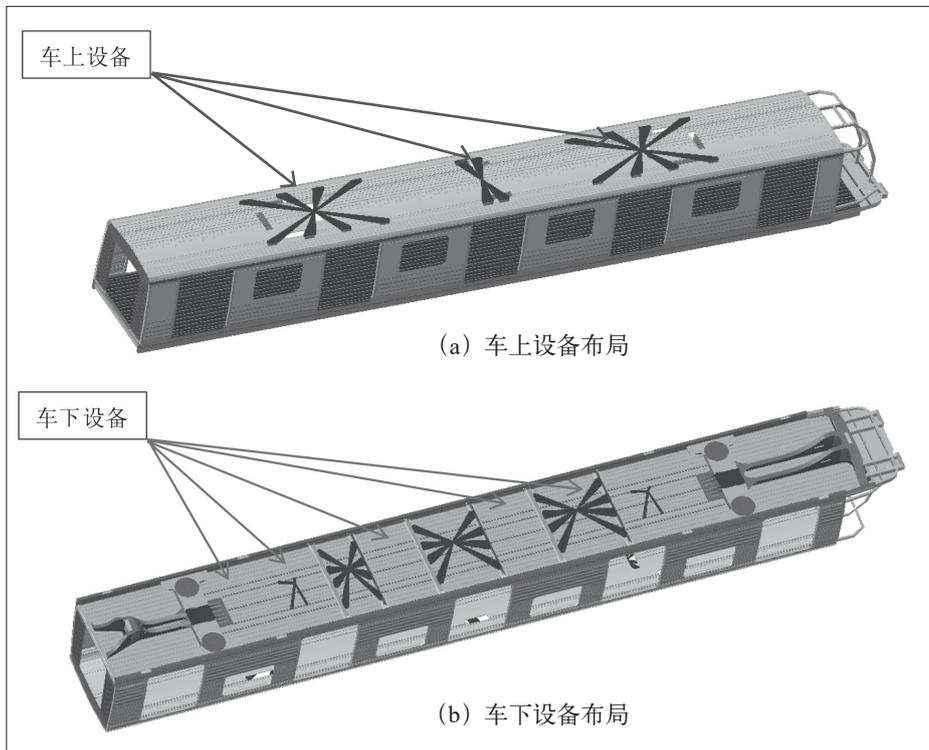


图3 车上车下设备布局

相对于其余设备小得多，而且分布位置靠近两端，对底架整体刚度影响较小，因此中间3个质量大的设备是模态的主要影响因素。如图4所示，通过RBE单元分别模拟车下设备质量分布。

通过图4可知，运用传统RBE2和RBE3单元进行模拟，质量最终施加于底架边梁滑槽上。通过分析可知，无论是使用RBE2还是RBE3单元，其主节点和从节点最终都通过一定的算法加权到边梁，使得底架刚度受单元类型和位置的影响较大。实际结构设备的质量由主横梁承载，因此主横梁应该体现在有限元模型上，但无论是使用主横梁还是直接连接，均涉及质量分布单元的选择。如图5所示，为带有主横梁的底架结构，分别通过RBE2和RBE3单元分配质量的示意图。

通过有限元软件对上述4种模拟方法进行计算，对比并分析合理性。

### 3 有限元分析

#### 3.1 模态计算

本文通过HyperMesh软件对结构进行有限元建模，运用

ANSYS软件计算车体模态，结果如图6所示。

#### 3.2 结果分析

通过结果可知，8.37Hz和10.12Hz为最小和最大的模态频率，而其余2种模拟方法的结果介于两数值之间。RBE3单元直接连接边梁时，底架中间设备布局区域产生较大变形，整体向下呈现塌陷的状态。由上述理论分析可知，RBE3单元可以在主节点之间产生相对位移，并且其主节点分布在边梁滑槽的表面，导致其产生较大位移差，边梁局部刚度“软化”，而实际结构安装区域具备较大刚度，因此该模拟方法欠合理。RBE2单元直接连接边梁，得到最大频率10.12Hz。

根据理论分析可知，其主节点为质量点，连接在滑槽上的各个从节点完全依照质量点的位移产生形变，即造成连接关系局部刚性化，而且在静强度计算时，该处会产生局部应力集中。虽然实际设备在此处通过螺栓连接，但吊座附近仍然会有小变形产生，因此完全采用刚性分布质量不具备合理性。

根据上述分析可知，由RBE单元直接分配质量并不能获得良好的计算结果，反而可以得到频率范围区间，因此采用主横梁间接分布质量的连接方式，从理论上可以抵消局部偏“软”和偏“硬”的情况。

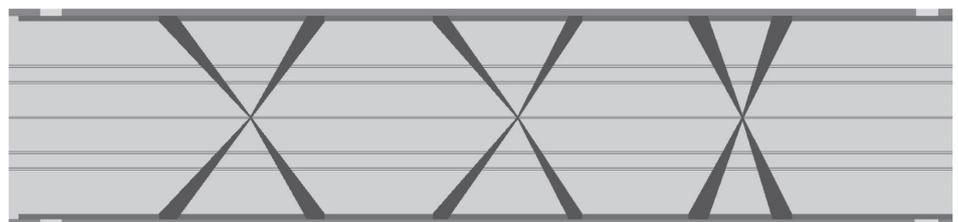


图4 底架设备RBE模拟

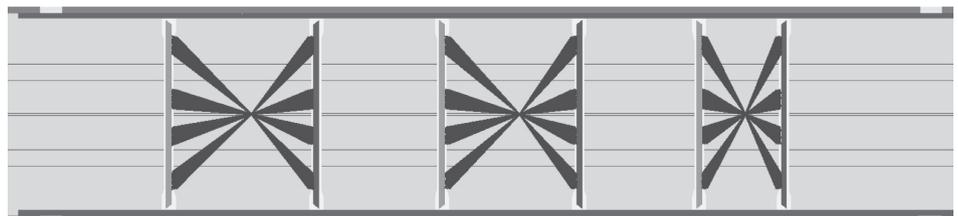


图5 底架设备RBE模拟(带主横梁)

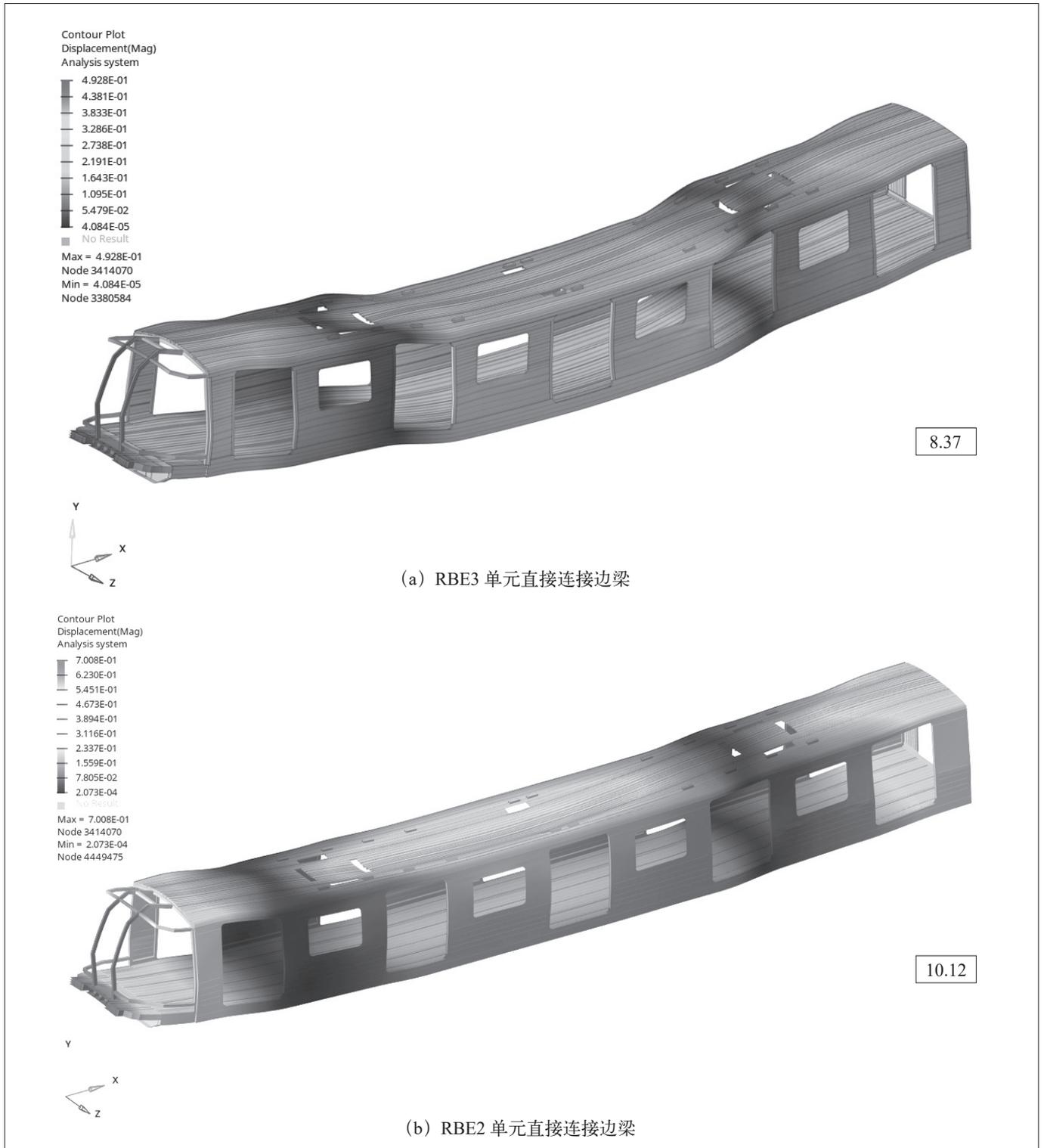


图6 车体模态结果

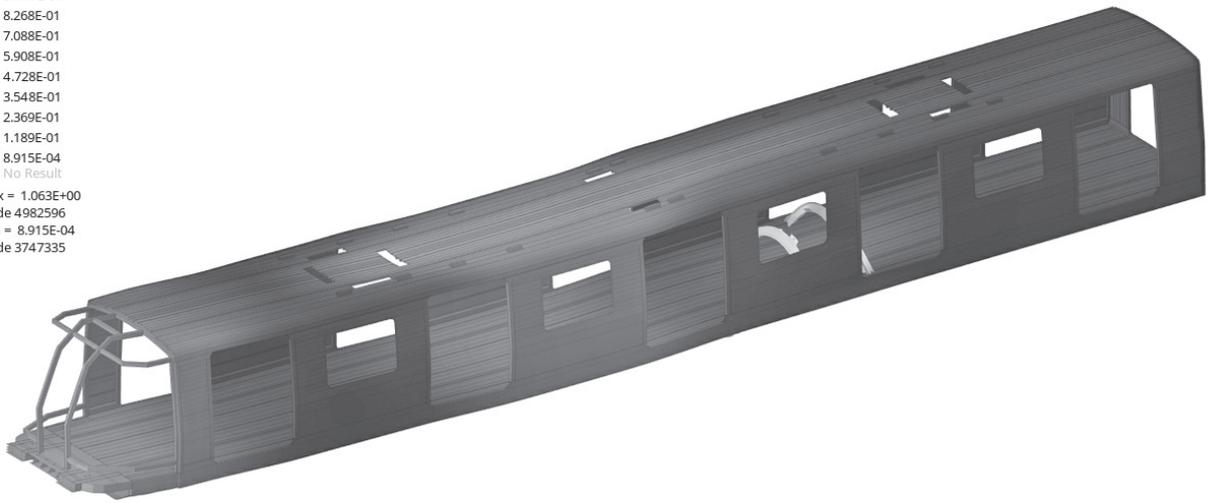
RBE3 单元连接主横梁时，虽然结果 8.91Hz 可以很好地落在频率合理范围内，但通过图 6 (c) 可以发现，主横梁仅通过两端连接滑槽，而中间部分通过较“软”的 RBE3 单元分布质量。这种情况会造成横梁中间部分的单元位移，完全由质量点的位移加权到各个

主节点，因而横梁处原有的刚度由 RBE3 单元取代，在模态计算结果中体现为：从整体看为车体垂向弯曲模态，而从底架局部看则为主横梁的局部振动模态。出现这种结果的原因，一方面，横梁处原有的刚度由 RBE3 单元取代；另一方面，设备本身应具备一定

Contour Plot  
Displacement(Mag)  
Analysis system

1.063E+00
9.447E-01
8.268E-01
7.088E-01
5.908E-01
4.728E-01
3.548E-01
2.369E-01
1.189E-01
8.915E-04
No Result

Max = 1.063E+00  
Node 4982596  
Min = 8.915E-04  
Node 3747335



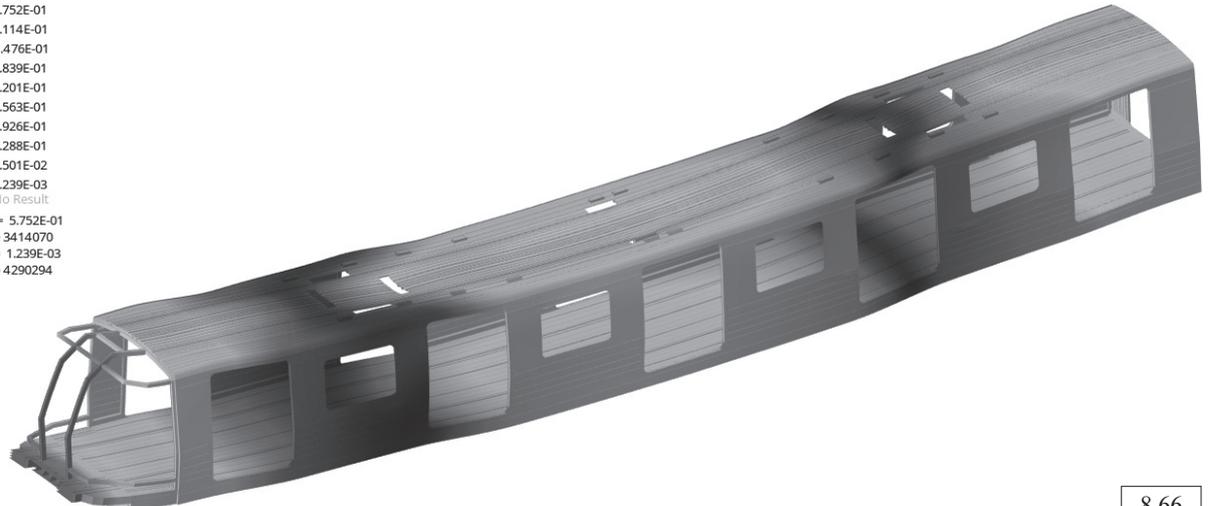
8.91

(c) RBE3 单元直接连接主横梁

Contour Plot  
Displacement(Mag)  
Analysis system

5.752E-01
5.114E-01
4.476E-01
3.839E-01
3.201E-01
2.563E-01
1.926E-01
1.288E-01
6.501E-02
1.239E-03
No Result

Max = 5.752E-01  
Node 3414070  
Min = 1.239E-03  
Node 4290294



8.66

(d) RBE2 单元直接连接主横梁

图6 车体模态结果

的刚度值，然而这部分刚度并没有参与到模态计算中，反而被刚度更低的RBE3单元所取代。

设备质量已经简化为一个单独的质量点，那么其刚度必然不能从结构上获得，因此只需要在原来

的模拟方法上，将RBE3单元替换成RBE2单元。这样不仅弥补了设备刚度缺失，而且只在横梁吊挂设备安装位附近局部增加刚度，而横梁整体和边梁

(下转第18页)

试中，阀座密封处泄漏率满足规定的要求。

#### 4.9 动作寿命试验

试验阀门安装在热态试验系统上，升高阀门进口压力，直到阀门起跳、排放、再回座为一个动作循环。当整定压力、超过压力、回座压力、开启高度均在合格范围后开始计数，完成要求次数后进行密封性能检测。试验过程中也可以规定阀座密封性检查。密封性检查时降低阀门进口压力，完全去除阀腔内的凝液，再将进口压力提升至密封压力，维持规定的时间，观察泄漏情况。

试验过程中，整定压力、启闭压差、开启高度等性能参数在允许范围内，阀门动作无卡阻现象；密封性测试中，阀座密封处泄漏率满足规定的要求。试验结果合格。

### 5 结语

蒸汽安全阀是保护设备超压的关键设备。其动作

可靠性、密封性均关系到系统设备的安全。本文介绍的一种用于蒸汽介质安全阀的关键零部件结构的设计，经过试验验证，该结构设计合理可行，可满足多种特殊工况；其性能稳定可靠，可运用于核电、军工、火电等多种蒸汽系统场合。

#### 参考文献：

[1] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 弹簧直接载荷式安全阀 :GB/T 12243-2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.

[2] 韩肇俊. ASME B16.34-2004《法兰、螺纹和焊接端连接的阀门》标准及1996版变动情况介绍[J]. 中国特种设备安全，2007(04):56-64.

作者简介：顾朝党(1981.03-)，男，汉族，云南曲靖人，本科，工程师，研究方向：机械与自动化设计。

(上接第12页)

连接刚度不变，符合实际。并且在设备安装位，螺栓连接具有较大刚度，即使局部有应力集中，也不会影响底架的整体刚度，有效将底架刚性矛盾转移到主横梁局部刚性上，在整车模态计算中可以取得较合理的结果(仅讨论车下设备分布对整车模态的影响)。该分布质量方法下，一阶垂向弯曲频率为8.66Hz，尽管与第一种方法相比提高了0.29Hz，但从振型和位移云图上可知，底架中间的整体位移变成底架横梁和中间的共同位移，更符合理论和实际。

### 4 结语

本文以铝合金车体为研究对象，通过理论分析研究了影响模态的几个因素，采用4种不同的车下设备质量分布模拟方法，分别计算出各情况下的车体整备垂向弯曲模态频率，并且对结果进行分析，得出以下结论：

(1) 对于车体整备模态一阶垂弯频率，最大的影

响因素是底架设备质量分布模拟方法；

(2) 采用RBE2和RBE3单元直接连接设备质量，仅能得出各振型下合理的频率范围；

(3) 设备安装梁和柔性单元搭配，会造成梁结构刚度损失；

(4) 设备刚度和安装梁对整体模态计算均有一定的贡献，但必须通过刚性单元模拟质量分布。

#### 参考文献：

[1] 任重. ANSYS实用分析教程[M]. 北京：北京大学出版社，2003:10-20.

[2] 岳译新，林文君，雷挺. 地铁铝合金车体模态和稳定性有限元分析[J]. 机械，2008(4):20-22.

[3] 孙建国，苏永章. 车体地板局部模态及谐响应分析[J]. 电力机车与城轨车辆，2012,35(5):55-58.

[4] 刘钊，秦仙蓉，朱传敏，等. 机械振动[M]. 上海：同济大学出版社，2016:1-15.