

基于修正车体有限元模型的列车故障模拟

刘璐 陈双喜

(西南交通大学 机械学院 成都 610031)

摘要: 研究如何建立、修正和运用有限元模型来模拟动车组车载部件故障。将三维的列车车体几何模型简化为二维模型,并建立合理的耦约束关系。对模型进行模态分析,提取自然频率和模态振型,结合实验数据对模型的弹性模量和密度参数进行修正,并对修正模型进行动态响应分析得到车体振动响应。研究表明:1)修正后车体的一阶垂向、横向、棱形和扭转模态与实验误差大幅度缩小,仿真与实验数据的结果吻合;2)螺栓断裂故障仿真例子则表明基于修正模态的有限元模型可指导列车实验测点的布置、实验数据的分析和故障的判定。

关键词: 高速列车车体;模态分析;模态修正;故障模拟

中图分类号: U270.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3030

Fault simulation of train based on updated finite element model of car body

Liu Lu Chen Shuangxi

(School of Mech. Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The building, updating and application of the finite element model of high speed train car body are investigated. The complicated three dimension model of car body was represented by a simplified two dimension model, and reasonable coupled constraint conditions were imposed. First, the natural frequency and vibration modes of the car body were obtained by finite element modal analysis. Then the model was updated by using experiment results, parameters such as elastic modulus and density were modified. Finally, dynamic response of car body was calculated from the updated finite element model. The results indicates: 1) The error of modified first four modes has been significantly reduced, the simulation coincides well with experiment data; 2) The example of bolt failure simulation shows that the updated finite element model of car body can guide the placement strategy of testing point, analysis of testing results and fault judgment.

Keywords: high speed train car body; modal analysis; modal correction; fault simulation

1 引言

随着列车速度提高,动态环境极具恶化^[1-12],采用铝合金材料双层结构车体是提高列车车体强度和寿命的有效手段。双壳结构比单壳结构要重一些,但是中空挤压材料具有强度高、刚度大、噪声低的特效,节省单壳结构中的大量必须使用的加强材料^[2]。因此,高速列车车顶和侧墙均采用合理设计的双壳结构。由于车体属于壳结构,在建立车体动力学模型过程中,必须考虑车体的柔性。通常有限元分析中,各个零部件采用各种方法进行自由度耦合,模型的正确性和有效性无法得到根本保证,而材料特征参数、网格划分、边界条件近似程度、结构简化使得有限元模型存在一定的误差^[3]。

模型修正技术是近三十年工程界发展的热点,修正理论有参考基准法、混合矩阵法、特征结构匹配法、特征值取

逆法、误差矩阵法等^[4]。本文以高速列车车体为研究对象,应用 ANSYS 有限元^[5]软件对车体有限元模型进行模态分析,研究如何根据试验数据对车体有限元模型^[6]进行修正,将模型误差降低到可接受的范围内。同时还研究运用修正的模型对典型的车载设备故障进行动态响应分析的可行性和有效性,从而指导列车长期服役过程中动力学性能、关键设备的跟踪试验测点安装及故障诊断。

2 列车车体有限元模型

根据二维图纸建立列车头车的三维几何模型。应用 Solidworks 软件创建两车的模型如图 1 所示。然后对几何模型进行简化和补充,具体步骤:1)省略了玻璃车窗、侧墙众多挂件、车内(车下)管道、车下裙板、车下众多挂件、地板下垫块、设备舱内相关部件,省略了螺栓等联接件;车下设备、车内箱柜等简化为简单的质量块;2)对三维实体逐个进

行检查和简化,进行必要的几何清理,去除小尺寸的倒角、圆角、小孔等几何特征,因为这样的几何特征对整体结构的刚度、强度影响不大。随后是降低模型的维数,即将三维实体模型转化为二维壳体模型。降维方法是用零件中间平面的面元素代替三维实体元素。例如,对于图中红色的车体侧墙(如图 1、图 2(a)和图 2(b)所示),是三维实体,选取侧墙横截面的中面作为基准面(如图 2(c)所示),通过平移零件的上表面或者下表面,在该基准面建立面元素,然后删除上下表面的面元素,实现将三维侧墙简化为二维壳体,简化后的侧墙如图 2(c)和图 2(d)所示。

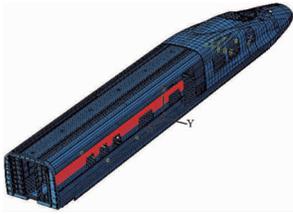
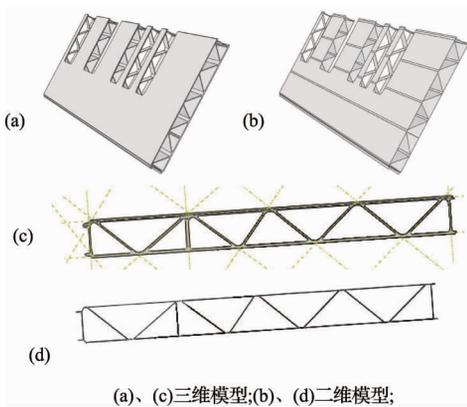


图 1 列车车体几何模型



(a)、(c)三维模型;(b)、(d)二维模型;

图 2 列车侧墙简化

对于铝合金车体框架结构,采用二阶 8 节点壳体单元 shell93 模拟;对于车下、车内其他设备和装置采用一阶 4 节点壳体单元 shell181 模拟,壳体单元的厚度与三维模型一致。根据实际情况,采用不同网格长度:车体底板、侧墙、顶板的网格尺寸从 200~500 mm;对于头车的骨架部分,需要较小的网格长度确保足够的单元数目,网格长度为 20~50 mm,对局部地区进行细化,尺寸小于 20 mm。通过设置集中质量点来简化模拟具有一定质量的车内座椅、内设、车下设备。头车模型单元数 130 292 个,节点数为 346 711 个。

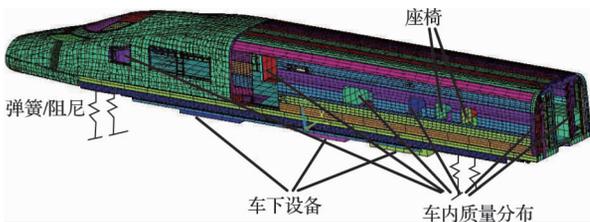


图 3 列车车体有限元模型

各个零部件通过绑定约束和自由度耦合实现整车装配;墙部件之间通过绑定接触约束进行联接;车下横梁和侧墙、头车骨架联接采用耦合自由度方法来实现;车下设备与车下横梁之间的螺栓联接也通过节点自由度耦合实现。整个车体通过弹簧阻尼模拟空气弹簧实现约束。

3 有限元模型的修正

车体模态实验采用多点激励模态实验系统,整个实验系统包括信号发生器、功率放大器、电磁激振器、传感器、信号采集和分析系统组成。实验系统激励为 4 点协调激励,如图 4 所示。整个实验参照铁道车辆模态实验行业标准“TB/T 3115-2005”和实验大纲要求。实验结果:一阶垂向、一阶菱形、一阶横向和一阶扭转频率分别为 11.2 Hz、13.5 Hz、15.5 Hz、18.1 Hz。

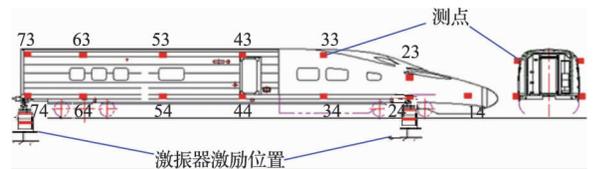


图 4 模态测试测点图

对于各种基于模态分析的动力学响应分析,首先需要进行模态分析。本文选取的模态求解方法是 Block Lanczos 法。铝合金车体的弹性模量为 70 GPa,密度为 2 700 kg/m³。车体的整体模态振型包括车体菱形变形、垂向弯曲、车体扭转、横向弯曲等整体模态和一些局部模态。通过仿真得到的头车车体主要整体模态如图 5 所示,一阶垂向、一阶菱形、一阶横向和一阶扭转 4 个主要频率分别为 13.2 Hz、15.3 Hz、19.1 Hz、23.2 Hz。仿真结果中比实验结果偏大。由于有限元模型运用耦合自由度和绑定接触模拟焊接以及螺栓连接,模型比真实情况刚性强;部分车内和车下复杂结构予以省略,质量比实际车体偏小,因此车体模型的频率比实验结果大。因此模型需要修正。

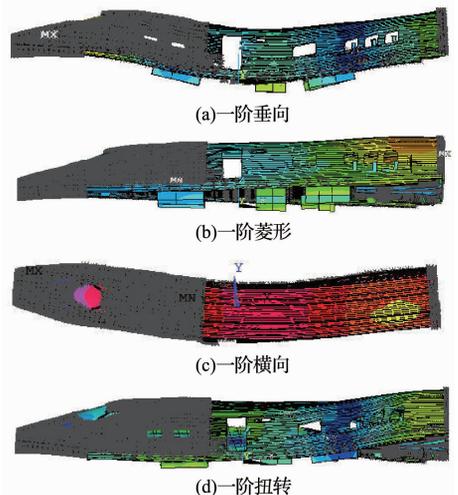


图 5 车体模态振型

模型^[7]修正以结构参数(模量、密度)为设计变量,以自振频率为状态变量,定义实测频率和计算频率的相对误差为目标函数:

$$f_{obj} = \min \left(\left| \frac{f_1 - f'_1}{f'_1} \right| + \left| \frac{f_2 - f'_2}{f'_2} \right| + \left| \frac{f_3 - f'_3}{f'_3} \right| + \left| \frac{f_4 - f'_4}{f'_4} \right| \right) \quad (1)$$

式中: f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 为仿真频率, f'_1 、 f'_2 、 f'_3 和 f'_4 为实验实测频率。

通过灵敏度分析可知,仿真一阶垂向频率 f_1 、一阶菱形频率 f_2 、一阶横向频率 f_3 和一阶扭转频率 f_4 随密度增加而减小,随模量减小而增加。通过修正模量降低系统的刚度,通过提高密度修正整车的质量。TB/T 1335—2005 规定一阶垂向固有频率 f_1 应该大于 10 Hz,状态变量中考虑此限制条件。详细优化过程省略。优化后取头车车体模量参数 62.5 GPa,密度参数 2 980 kg/m³,车体质量与图纸保持一致。

修正后,车体整车模态:一阶垂向弯曲、棱形变形和横向弯曲与实验相比(Δf 为实测频率与仿真之差)相差较小,分别为 0.1 Hz、0.2 Hz 和 0.7 Hz。车体扭转与实验相比相差 2.3 Hz,但和修正前比较,误差已经小很多。通过计算频率相关性(仿真与实验台实测数据)可知,模型与试验频率的相关性为 0.99,大于 0.8,模型和实验结果具有高相关性。基于该修正的有限元模型,可进行模态动态响应分析、稳态动态分析、随机响应分析和响应谱分析等。

表 1 车体固有频率比较

模态阶数	试验频率 /Hz	初始固有频率/Hz	修正频率/Hz	Δf	模态振型
1	11.2	13.2	11.1	0.1	一阶垂向
2	13.5	15.3	13.7	0.2	一阶菱形
3	15.5	19.1	16.2	0.7	一阶横向
4	18.1	23.2	20.4	2.3	一阶扭转

4 应用修正模型模拟故障举例

列车车载设备常见机械故障^[8]有螺栓断裂、结构裂纹等。很多车下设备通过螺栓悬挂在车下横梁,如图 6 所示,1、2、3、4 标注了螺栓联接位置,每个联接位置有 2 个 M16 螺栓(一共 8 个螺栓)将车下设备悬挂在车下横梁上。由于螺栓预紧力不足、表面不平整等因素的存在,螺栓可能在运行过程中出现松动、过载甚至最终疲劳断裂。下面对此故障进行有限元模拟。

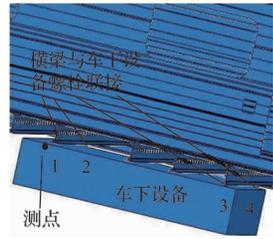
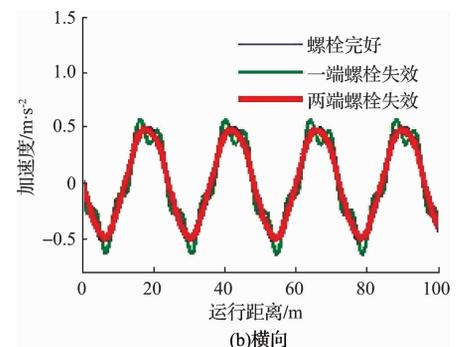
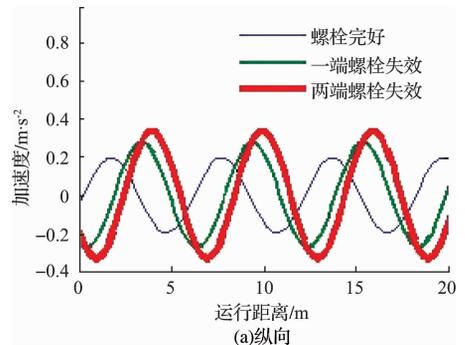


图 6 车下悬挂螺栓联接图

假设列车车体受到垂向短波不平顺(波长 6 m,约等于无砟轨道的轨道板长度)和横向长波轨道不平顺(波长 24 m)激励。列车速度为 300 km/h。对 3 种工况进行模拟分析:1)螺栓完好联接;2)一端螺栓断裂(图 6 中标注 1 所示);3)两端螺栓均断裂(图 6 中标注 1、标注 2 所示)。

图 7 所示为测点处(图 6 中的测点)纵向、横向和横向加速度响应比较。螺栓完好情况下,测点纵向加速度响应(图 7(a))幅值 0.2 m/s²。一端螺栓、两端断裂后,测点纵向加速度响应分别增大到 0.28 m/s²、0.34 m/s²,相位差分别为 0.53 π 、0.71 π 。可见,螺栓断裂后测点响应特征为纵向加速度的幅值和相位差同时增大。

测点横向加速度如图 7(b)所示,幅值没有明显变化,但是波形有所差别。图 8 给出了 3 种工况下,测点横向加速度响应的希尔伯特黄变换^[9-11]三维时频幅值谱。螺栓完好和两端螺栓断裂情况下,测点响应在 3.5 Hz(对应波长 24 m 的横向轨道不平顺)附近波动;而一端螺栓断裂情况,测点响应除了在 3.5 Hz 附近波动,还存在 13.8 Hz(对应波长 6 m 的垂向轨道不平顺)的高频振动。可见,螺栓断裂导致垂向与横向振动响应的耦合。因此,若横向振动响应中存在垂向激励频率,设备则存在故障。



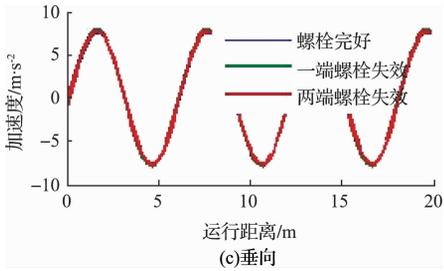


图 7 测点振动响应

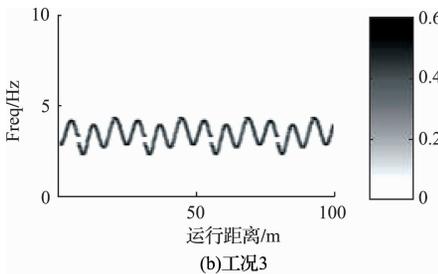
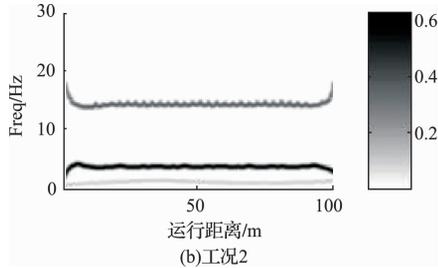
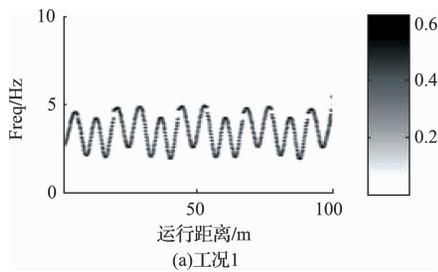


图 8 测点横向振动时频谱

图 7(c)给出了测点的垂向加速度响应。螺栓断裂后,垂向加速度响应几乎没有受到影响。因此,从垂向加速度响应并不能看出螺栓联接故障。

上述仿真假设车下悬挂设备不存在激励源。下面考虑车下悬挂设备存在激励源情况下(如车下空调系统存在工频振动)测点响应。假设图 6 所示的车下设备中心存在激励力 100 N,频率为 60 Hz 的工频激励,对前述三种螺栓联接工况下测点响应进行分析。

图 9 给出了测点的纵向加速度响应。螺栓完好情况下,测点纵向加速度响应幅值 0.3 m/s^2 。一端螺栓、两端断裂后,测点纵向加速度响应幅值分别增大到 0.34 m/s^2 、 0.43 m/s^2 。对响应进行经验模态分解,得到高频振动分量

imf_1 和低频振动分量 imf_2 。高频分量没有明显差异,低频分量反映了如图 7(a)一样的性质:测点纵向加速度响应低频振动分量 imf_2 在螺栓失效后明显变大,相位差没有变化,同样分别为 0.53π 、 0.71π 。可见,螺栓断裂对工频振动分量并没有影响,低频分量(对应波长 6 m 的垂向轨道不平顺)的幅值和相位差同时增大。因此,对于存在工频干扰的信号,应该首先剔除该信号后再观察剩余分量的变化情况。

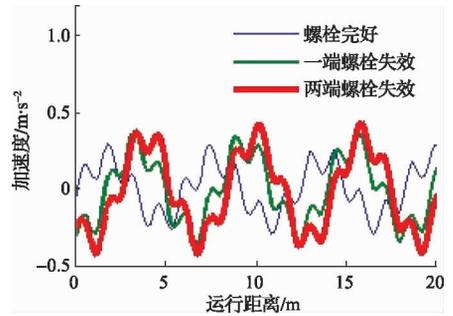


图 9 测点纵向振动响应

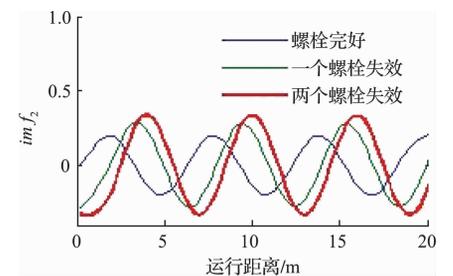
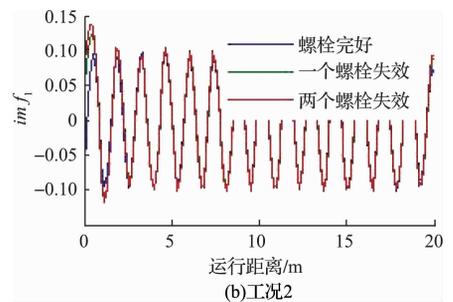


图 10 测点纵向振动经验模态分解

测点横向加速度如图 11 所示,波形与图 7(b)几乎没有差异,即工频振动并没有明显影响到系统的横向振动。图 12 给出了 3 种工况下,测点横向加速度响应的希尔伯特黄变换三维时频幅值谱。主要差别在于:工况 1 情况下,13.8 Hz(对应波长 6 m 的垂向轨道不平顺)附近振动是稳态线性的;工况 2 情况下,13.8 Hz 附近的频带存在明显的非线性特征。可见,螺栓断裂导致垂向与横向振动响应的耦合,而工频振动又导致了高频分量的非线性。

与图7(c)类似,螺栓断裂后,测点垂向加速度响应几乎没有受到影响,图略。即使存在工频激扰,从垂向加速度响应并不能看出螺栓联接故障。

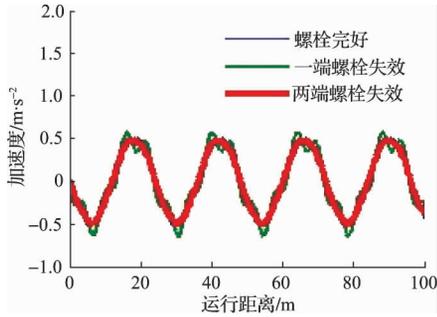


图11 测点横向振动响应

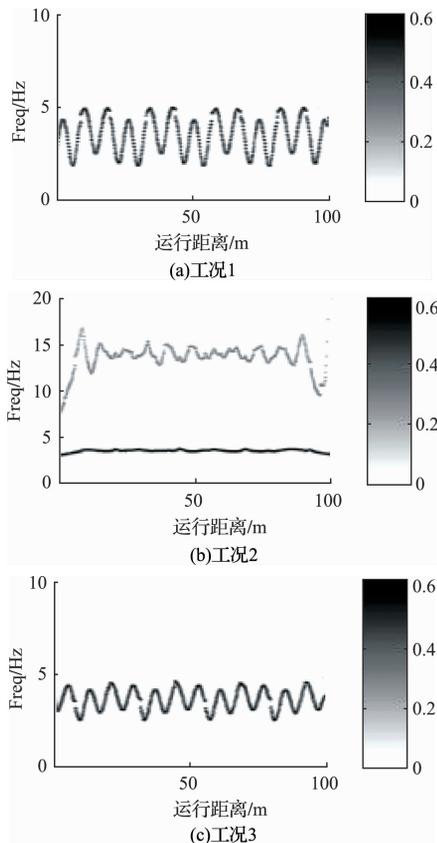


图12 测点横向振动时频谱

5 结 论

由于有限元模型运用简化方法模拟焊接以及螺栓连接,模型比真实情况刚性强;部分车内和车下复杂结构予以省略,质量比实际车体偏小,仿真结果常常比实验结果大,因此必须结合实验对有限元模型进行修正,然后才能运用修正的模型进行动力学计算。本文螺栓断裂故障仿真例子表明,基于修正模态的有限元模型可指导列车实验测点的布置、实验数据的分析和故障的判定。

参考文献

- [1] 沈志云. 高速列车的动态环境及其技术的根本特点[J]. 铁道学报,2006,28(4):1-6.
- [2] 陈文宾,丁壹壹. 国产化 CHR2 型 200km/h 动车组铝合金车体及技术创新[J]. 机车电传动,2008(2):1-4.
- [3] 程霄翔,费庆国,何顶顶. 基于响应面的大型输电塔结构有限元模型动力修正[J]. 振动与冲击,2011,30(5):116-121.
- [4] JOHN E M. Assignment of eigenvalue sensitivities from receptance measurement[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2009(23):931-1939.
- [5] 马占龙,王高文,张健,等. 基于有限元及神经网络的磨削温度仿真预测[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(11):1080-1084.
- [6] 邹大军,李锡文,何锐波,等. 基于有限元分析的粉末介电常数测试装置研制[J]. 仪器仪表学报,2013,24(2):423-427.
- [7] 李涛,张方,姜金辉. 基于 HHT 变换和独立分量技术的模态参数识别[J]. 国外电子测量技术,2014(03):34-35.
- [8] 姚亚夫,张星. 基于瞬时能量熵和 SVM 的滚动轴承故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(10):957-961.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(01): 1-41.
- [11] HUANG N E, WU Z, LONG S R, et al. On instantaneous frequency [J]. Advances in adaptive data analysis, 2009, 1(02): 177-229.
- [12] ZHANG X Q, YIN G L, GAO G Q, et al. Instrument for insulation conditions detection of roof insulator on high-speed-train [J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 50-59.

作者简介

刘璐,1981年出生,博士,专业方向:高速列车的安全性测试研究、信号分析与处理,可靠性研究。
E-mail: xiaolu_net@126.com