

高速列车车体工作模态试验与影响因素研究

王 伟

(江西现代职业技术学院 建筑工程学院, 江西 南昌 330095)

摘 要: 以 CRH2G 型高速列车为研究对象, 针对编组中的 7 号车体展开工作模态测试, 获得车体模态参数。在振型相同的基础上, 对采集的数据进行对比与统计, 分析各工况对工作模态参数识别的影响, 为试验的优化和改进提供依据。研究表明, 恒速、启动、降速、全程和静止等工况对模态参数识别能力有影响, 试验测点数目和测点位置影响所识别的模态阶数和主振方向。提出针对不同研究目的, 应合理选用测点数目和确定测点位置、测试可在列车正常运营时进行、样本数据尽量在具有足够能量的恒速运行时采集等建议。

关键词: 工作模态; 参数识别; 振动; 车体; CRH2G 型高速列车

中图分类号: U292.91⁺4; U270.1⁺1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.02.008

Research of Operating Modal Test and Influence Factors of High-speed Train Car-body

WANG Wei

(School of Civil Engineering and Architecture, Jiangxi Modern Polytechnic College, Nanchang, Jiangxi 330095, China)

Abstract: The seven car body of CRH2G high-speed train was chosen to do modal test, and modal parameters of the vehicle was obtained. Based on the same vibration mode, contrast and statistics were used to test data, and the influence of working condition to modal parameter identification was analyzed, which provided basis for the optimization and improvement. Research conclusions showed that working condition such as constant speed, starting, slow down, whole journey and static, would influence the precision of modal parameters, and number and location of test point would have great influences on the recognition of modal orders and vibration directions. According to different research purposes, some suggestions were put forward: number and location of measuring points should be reasonably selected; test may be done during the normal operation of the train; data sample can be collected in constant speed wind with enough energy.

Keywords: operating modal; parameter identifying; vibration; car body; CRH2G high-speed train

0 引言

随着列车运行速度越来越快, 其振动问题也越来越受到关注, 因为它不仅影响旅客乘坐的舒适度, 还关乎列车运行的安全性^[1]。车体结构设计是否合理直接影响到列车运行状况。模态分析作为研究振动问题的最基本方法, 能够方便地了解车体结构振动情况和薄弱环节, 可为车体结构优化设计和加工工艺提供技术指导^[2]。

模态分析分为计算模态和试验模态, 其中, 计算模态是由有限元计算获取模态参数; 而试验模态是通

过试验采集输入与输出信号, 经过参数识别, 获得模态参数的过程^[3]。试验模态又可分为实验室模态和工作模态^[4]。在实际运行中, 列车受到车辆运行状况、线路状态等影响, 其边界条件和工作频率不断变化, 而实验室采用的激励力和约束条件与列车真实情况存在较大差异, 因此, 试验获得的结果很难真实反映车体运行时的动力特性。相比之下, 工作模态测试得到的结果, 是车辆在运行过程中反复被激励的模态, 了解这些模态对解决动车组在实际运行过程中出现的问题十分重要。为得到车体真实的运行动力特性, 本文选用工作模态的试验方法对高速列车车体进行研究, 并针对试验影响因素作了进一步探索, 为试验优化提

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-04-11

供参考依据。

1 工作模态试验

1.1 试验准备

本工作模态试验在 CRH2G 型耐高寒抗风沙动车组上进行,其速度等级为 250 km/h,8 辆编组,即每列 8 辆,4 动 4 拖,2、3、6、7 号车为动车,1、4、5、8 号车为拖车,受电弓安装在 4 号和 6 号车上。考虑到在工作模态测试中,信号可能会受到干扰,影响测试效果,为此,需充分做好试验准备工作。

①列车中的 7 号车为动车且靠近车头,受到的激励大,振动情况显著,且该车体上未安设受电弓,测试信号受电流影响小,故 7 号车车体是比较理想的试验车体。

②采用 B&K 多通道分析仪搭建基于模态参数识别的车体振动测试平台。平台采用的三向加速度传感器为压电型传感器,无需额外供电,测试系统受到的噪声影响小。

③传感器安装在绝缘磁座上,以减少系统受接地循环噪声的影响。平台采用专门定制的屏蔽导线,导线走线尽量避开电器设备等磁场较强的地方,并加以固定,防止晃动。

④测试平台搭建好后,先对热备动车组有关信号进行预采集,确保测试系统无明显信号干扰。进行正式有关信号采集时,务必时刻保持谨慎小心,认真监测时域信号并做好记录。对于有毛刺、漂移现象出现的信号采样时间需足够长。采集结束后,及时处理样本数据,截取信号平稳、信噪比高的高质量区段数据作为最终数据。

⑤注意导线缠绕、传感器量程选取等细节问题。

测点布置在能显示试验频段内模态特征及区别的区域,响应点数目取决于所选频率范围、期望模态振型和结构上所关心部位^[5]。根据受力分析、仿真试算和试验经验,试验把车体分 7 个截面,其中 3 个截面分别经过车体中央和转向架中线,如图 1 所示。每个截面布置 4 个测点,其中 2 个测点布置在车体两侧靠近边梁的底板上,另外 2 个测点布置在车体两侧窗户向上 15 cm 左右位置,如图 2 所示。车体以靠近 8 号车一端为起点,对测点编号,车体侧墙左边为 1、3、5、7、9、11、13 号;车体侧墙右边为 2、4、6、8、10、12、14 号;车体底板左侧为 15、17、19、21、23、25、27

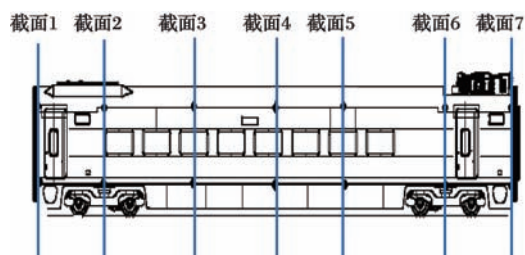


图 1 车体模态试验测点位置示意图

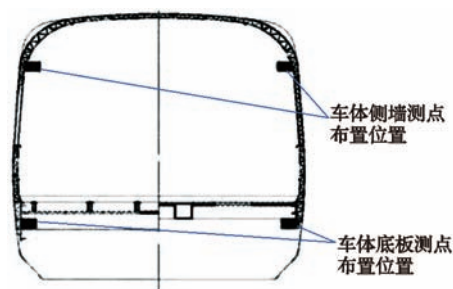


图 2 车体截面测点布置图

号;车体底板右侧为 16、18、20、22、24、26、28 号。设车体垂向为 z 方向,横向为 y 方向,纵向为 x 方向,每个测点分别测试 y 、 z 方向的振动信号。参见图 3。

1.2 试验测试

列车在正常线路上运行,将线路对列车的激励作为车体工作模态测试的激励源。本试验列车 CRH2G 高寒抗风沙动车组在兰新第二双线进行行车安全专项试验,为采集到所需的试验数据样本,被测模态的车组需在以下工况运行:

①启动加速:列车由静止采用满级牵引至速度 250 km/h;

②制动减速:列车由 250 km/h 采取常用制动到静止;

③恒速:列车分别保持恒速级 180 km/h、200 km/h、220 km/h 运行;

④静止:列车设备全部开起并保持列车速度为 0;

⑤全程:按照正常运营情况,列车在完整区间内往返运行。

1.3 试验数据处理

如图 3 所示,测试结束后,在 B&K 软件中建立几何模型,指定实际的测点位置,使几何模型节点与实际测点坐标一一对应,然后将样本数据导入软件,加载到模型上,接着采用 SSI 法计算获取稳态图,并自动识别模态参数。值得注意的是测点命名需与传感器测试通道名相对应。由于车体的整车振动主要由前几阶低频整车模态决定,因而,本文采用模态截断的方法,设置分析频率为 0~20 Hz,只分析低频范围内所关注的整车模态。

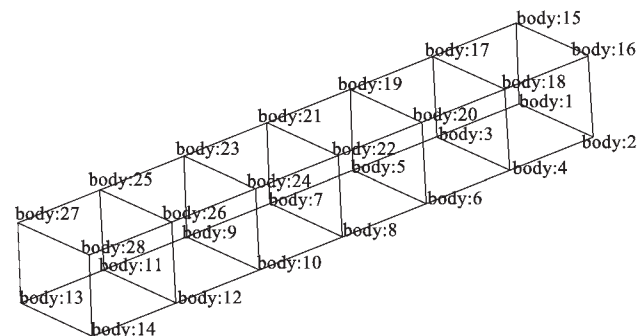


图 3 加载试验数据的几何模型

2 工作模态影响因素分析

2.1 运行速度级对工作模态识别参数的影响

从表 1 中可以看出,在 3 种不同速度级下采集的

数据样本都能识别出垂向 + 横向一阶菱形、垂向一阶弯曲、横向一阶弯曲和垂向一阶扭转这四阶模态，且不同速度级的相同振型对应的频率值基本一致，离散度小。同模态参数是车体结构的固有特性，与输入条件无关的原理描述一致，说明试验采集的数据样本是有效的。至于数值存在微小差异，可能是车体本身非线性造成的^[6]。车体垂向一阶弯曲，是最重要的整车模态振型，其模态频率平均值为 10.937 Hz，大于 10 Hz，符合设计标准要求。

表 1 各速度级下运行工作模式试验汇总表 Hz

速度级 / (km·h ⁻¹)	模态频率			
	垂向、横向	垂向	横向	垂向
	一阶菱形	一阶弯曲	一阶弯曲	一阶扭转
180	9.829	10.870	13.040	15.540
200	9.712	10.810	12.710	15.620
220	10.130	11.130	12.340	15.400
平均值	9.890	10.937	12.697	15.520

2.2 运行工况对工作模式识别参数的影响

按照恒速、启动、降速、全程和静止工况，分类整理样本数据的分析结果，统计识别出垂向横向一阶菱形（振型①）、垂向一阶弯曲（振型②）、横向一阶弯曲（振型③）和垂向一阶扭转（振型④）的样本数，计算识别率，如表 2 所示。

表 2 运行工况对工作模式识别参数的影响

工况	采集的 样本数	振型①		振型②		振型③		振型④	
		样本数	识别率	样本数	识别率	样本数	识别率	样本数	识别率
恒速	16	13	0.81	13	0.81	10	0.63	12	0.75
启动	9	7	0.78	7	0.78	5	0.56	7	0.78
降速	4	3	0.75	2	0.50	2	0.50	3	0.75
全程	11	8	0.73	5	0.45	5	0.54	3	0.27
静止	6	2	0.33	0	0.00	0	0.00	0	0.00

从识别结果整体分析，列车恒速运行工况下采集的数据样本最容易识别出整车模态；静止工况下采集的数据样本几乎识别不出模态；启动和降速工况下采集的数据样本比全程工况下采集的数据样本识别率高。经分析判定，本试验采用 SSI 识别法，其要求输入激励为白噪声或平稳信号，即试验输入信号越平稳，软件识别数据精度越高^[7]。把全程、加速、减速等运行工况作为环境激励，这必然导致输入激励的不平稳，结果自然没有恒速工况下的识别精度高。此外，静止工况下采集的数据样本没能识别出模态参数，是因为运行工况有足够的能量，产生的激励力能激发出整车的主要工作模态，而静止工况则不能。

2.3 试验测点对工作模式识别参数的影响

改变样本数据加载到几何模型测点上的数目，以获得不同测点数目试验结果。由于研究针对的是整车模态，因此，以模型长边线数作为数据加载方案的依据，即 7 个测点（1 条边线）、14 个测点（2 条边线）、21 个测点（3 条边线）、28 个测点（4 条边线）4 种情况。

模型上其余没有加载数据的测点，根据邻近测点数据，按照距离插值获得数据。不同测点数目方案参数识别结果如表 3 和图 4 所示。从表 3 中可以看出，振型相同而振动方向不同的两阶模态频率相离或相等。随着测点数目的增多，各阶模态频率趋于稳定，模态阶数以横向一阶弯曲振型为中心，向两侧增加。在分别布置 14 个测点、21 个测点和 28 个测点的情况下，都能识别出一阶菱形、一阶弯曲和一阶扭转振型。由此可见，测点数目布置越多，得到的整车模态振型也越多，识别精度也越高。观察图 4 可知，在 11.5 Hz 附近，4 种布置测点的方案虽然能识别垂向一阶弯曲振型的强方向性模态，但振型图都掺杂着其他方向的振动响应，而这种响应随着测点的增多逐渐减小。因此，就相同振型而言，随着测点数目的增多，空间混叠现象逐渐减少，模态振型趋于光滑。

在 14 个测点基础上，进一步研究测点位置对工作模式参数识别的影响。同样，为保证模型上加载的数据能最大限度表达出整个车体信息，测点位置只在原测点所在截面上变动，如表 4 所示。对比 3 种不同位置布置方案可以得出，方案 A 识别出的大多为垂向振型，方案 C 识别出的大多为横向振型，方案 B 识别出的 2 个方向的振型数趋于相当，且识别的模态阶数增加了一阶。由此可见，测点位置布置不同会导致识别结果差异，在测点数目不变的情况下，改变测点位置能识别出更多阶模态。经分析可知，整车模态振型是车体各部位振动叠加的结果，而各测点数据包含了测点位置局部范围内的振动信息，所以测点位置是模型部位之间的相对振动情况的反映，决定了几何模型表征的振动动画。

表 3 不同测点数目下模态频率识别结果 Hz

测点 数目	横向摇摆 + 垂向沉浮	横向一 阶菱形	垂向一 阶菱形	横向一 阶弯曲	垂向一 阶弯曲	横向二 阶弯曲	垂向二 阶弯曲	垂向二 阶菱形
7 测点	-	-	-	11.570	12.650	12.650	-	19.000
14 测点	-	10.110	-	11.420	12.750	15.830	16.570	-
21 测点	3.060	10.070	10.070	11.490	12.800	15.920	16.800	-
28 测点	1.014	9.712	9.712	11.260	12.340	15.650	16.800	18.830

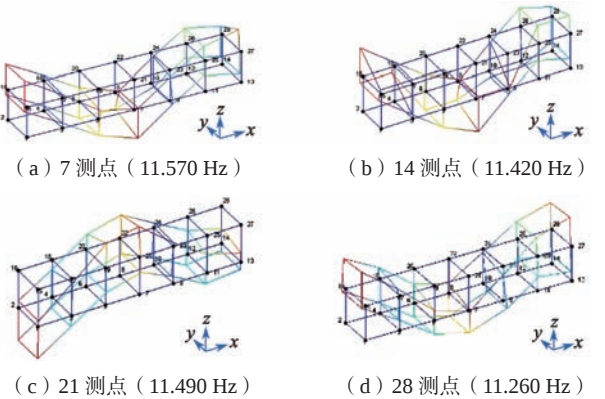


图 4 不同测点数目下垂向一阶弯曲振型图

表 4 测点位置对工作模态识别参数的影响

方案	测点位置	模态频率 /Hz							
		垂向一 阶菱形	横向一 阶菱形	垂向一 阶弯曲	横向一 阶弯曲	垂向一 阶扭转	横向二 阶弯曲	垂向二 阶弯曲	横向二 阶菱形
A	15-16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28	10.110	-	11.440	12.650	15.920	-	18.140	-
B	2-4-6-8-10-12-14-15-17-19-21-23-25-27	10.110	-	11.420	12.750	15.830	16.570	-	18.950
C	2-4-6-8-10-12-14-16-18-20-22-24-26-28	-	10.150	11.380	12.630	-	16.490	-	18.800

3 结语

① 180 km/h、200 km/h、220 km/h 等列车常用的运营速度级都能很好地识别出一阶菱形、弯曲、扭转振型的整车模态，因此，试验可以安排在列车正常运营时进行。

②恒速、启动、降速、全程和静止等工况会影响模态参数的识别能力，工作模态试验样本数据应在具有足够能量的恒速运行工况下采集。

③试验测点布置越多，得到的整车模态振型越多，识别精度越高，振型也趋于光滑。但是就一阶菱形、一阶弯曲和一阶扭转的振型而言，在测点个数分别为 14、21 和 28 的情况下也能很好地识别出来，所以对于一些研究，适当减少测点数目，也可以得到理想的结果。这样既可以节约试验时间，节省试验经费，又可以降低因试验而造成安全事故的风险。

④试验测点位置是模型部位之间的相对振动情况的反映，决定了几何模型表征的振动动画，因此它对所能识别出的整车模态的振动方向和阶数有一定影响。

⑤测点位置和测点数目对模态参数识别影响很大，

因此，运行模态试验开始前，应根据不同的研究目的，通过仿真等科学方法，合理确定测点数目和位置。这样有助于优化试验过程，获得满意的试验结果。

参考文献：

[1] 石芳. 基于 I-DEAS 的高速客车谐响应分析 [J]. 铁道机车车辆工人, 2008(12): 23-27.

[2] 刘昌领, 罗晓兰. 基于 ANSYS 的六缸压缩机连杆模态分析及谐响应分析 [J]. 机械设计与制造, 2013(3): 26-29.

[3] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析——理论实验与应用 [M]. 2 版. 天津: 天津大学出版社, 2014.

[4] 罗升. 运行汽车工作模态分析研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

[5] 平学成, 王先亮, 朱韶光, 等. B 型地铁铝合金车体工作模态分析 [J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(1): 115-117.

[6] 陈林. 基于试验模态分析的动车组动态设计研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

[7] 张洪. 基于运行模态识别的铁路客车动力学特性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2005.

作者简介: 王 伟 (1990-), 男, 硕士, 助教, 现主要从事结构工程和振动模态研究。

动态消息

新一代中小运量跨座式单轨列车
在中车长客股份公司亮相

2018 年 1 月 26 日上午, 中车长客股份公司发布了最新研制的新一代中小运量跨座式单轨列车。跨座式单轨列车因其占地面积小、爬坡能力强并且节能环保而受到众多城市的青睐。此次发布的新一代单轨车以超过 10 年的运营经验和研发数据为基础, 采用了全自动驾驶、永磁牵引、抗寒防雪等最新科技成果, 在提升运量的同时, 实现了列车的轻量化与节能, 降低了工程建设和运营成本, 将成为城市轨道交通列车谱系中的又一颗明星。

此次发布的新一代跨座式单轨列车有大型、中小型和小型 3 种车型供选择, 可根据客流情况灵活编组, 4 辆编组列车最大载客量分别为 962 人、792 人和 552 人。车身采取大曲面、流线型设计, 加上现代化的外观彩绘, 充分展现了速度感与时代感。由于采用更加成熟的双轴转向架和空气弹簧悬挂系统, 解决了单轨车辆运行稳定

性和舒适性的技术难题, 提高了乘客的乘坐体验。同时车辆走行装置全部处于地板下方而不侵入室内, 使得车内更加宽敞、通透。

列车采用全自动驾驶技术和永磁牵引电机技术, 同时列车在一些部件上还采用了碳纤维复合材料, 进一步达到轻量化的效果, 单车减重可达 25% 以上, 从而减少 22.7% 的能耗。在安全性上, 列车设置了蓄电池紧急牵引功能, 当供电设备故障时, 列车可利用蓄电池将车辆牵引到最近车站, 然后组织旅客疏散, 同时还具备多种可靠的救援方式, 为单轨车辆的安全性提供科技支撑。

为应对我国北方寒冷的天气环境, 列车结合我国高寒动车组的核心技术, 为低温、严寒地区提供了专业、完善的防寒解决方案, 确保车辆能够在 -40℃ 低温环境下正常启动、运营, 配合研发的专用破冰除雪车, 车辆能够在各种极端路面条件下畅行无阻。

整车采用模块化的设计方式, 用户可以根据实际需求进行灵活的配置选择, 如加装以太网列车网络控制系统、单车动力包、智能化旅客信息系统、智能化粒子变色玻璃窗等升级设计, 真正实现交通装备的定制化。

(金万宝)