

文章编号:1671-8879(2019)05-0068-10

基于 ANSYS 和 SIMPACK 联合仿真的大跨钢箱 提篮拱桥车-桥耦合振动分析

黄永明^{1,2}, 何旭辉^{1,2}, 邹云峰^{1,2}, 史康³, 左太辉^{1,2}, 李玲瑶^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075;
3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要:为高效求解高速铁路大跨钢箱提篮拱桥车-桥耦合振动特性,并考虑列车系统弹簧阻尼系与轮轨接触的非线性特征,充分利用 ANSYS 和 SIMAPCK 软件平台各自优势,提出了一套可高效求解复杂车桥耦合系统的分析方法。该方法利用 ANSYS 作为前处理,建立大跨钢箱提篮拱桥精细化有限元模型,运行 Lanczos 法进行模态分析,再利用 HBMAT 命令提取桥梁关键模态信息作为关键输入文件,而列车与轮轨接触在 SIMPACK 平台构建。通过 SIMAPCK 读取 ANSYS 输入的关键数据文件,建立车桥耦合分析的动力学模型。运用 SIMPACK 中的有限元接口模块(Flex Modal)构建一个质量可以忽略的虚刚体实现列车与桥梁的耦合。最后,以实测南广(南宁—广州)铁路西江特大桥动力响应数据为分析样本,通过计算值与实测值的对比,验证提出的方法的可靠性。结果表明:基于 ANSYS 和 SIMPACK 的联合仿真是开展车-桥耦合振动研究的有效方法;由轨道不平顺或轮对蛇行运动引起的周期性激励可能引发横向共振,而发生竖向共振的可能性较小;桥梁结构横向振幅由于受车辆偏载影响较大,单线行车的横向振幅大于双线行车;受激励频率的影响,竖向舒适度指标和加速度可能不随车速单调递增;脱轨系数、轮重减载率、竖向舒适度指标和加速度受活载导致的竖向振动影响较大,而横向舒适度指标和加速度则受偏载效应影响较大。研究结果可为类似桥梁的动力设计提供参考。

关键词:桥梁工程;钢箱提篮拱桥;耦合振动;联合仿真;多体动力学;现场实测

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.008

Analysis of coupled vibration between a long span steel-box basket-handle arch bridge and vehicle by co-simulation based on ANSYS and SIMPACK

HUANG Yong-ming^{1,2}, HE Xu-hui^{1,2}, ZOU Yun-feng^{1,2}, SHI Kang³,
ZUO Tai-hui^{1,2}, LI Ling-yao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;
3. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd, Chongqing 400067, China)

收稿日期:2019-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51508580, U1534206, 51508574, 51708202);国家重点研发计划项目(2017YFB1201204);
湖南省自然科学基金项目(2016JJ3149)

作者简介:黄永明(1988-),男,安徽阜阳人,讲师,工学博士研究生,E-mail:154801012@csu.edu.cn.

通讯作者:邹云峰(1984-),男,湖南邵阳人,副教授,工学博士,E-mail:yunfengzou@csu.edu.cn.

Abstract: To efficiently solve the characteristics of coupled vibration between a long span steel-box basket-handle arch bridge and vehicle, and consider the nonlinear characteristics of spring damping train system and wheel-rail contact, an efficient method for solving complex vehicle-bridge coupling systems was proposed, based on making full use of the advantages of ANSYS and SIMAPCK software platform. ANSYS was considered as pre-processing of the method, to establish a refined finite element model of the long span steel-box basket-handle arch bridge. The Lanczos method was used to model analysis, and the HBMAT command was used to extract the key modal information of the bridge as the key input file. The train contact with the wheel rail was established in SIMPACK platform. By reading the key inputs data of ANSYS files on SIMPACK, the dynamic model of the vehicle-bridge coupling analysis was established. The finite element interface module (Flex Modal) in SIMPACK was used to construct a virtual rigid body implementation with negligible quality to achieve the coupling of train and bridge. Finally, the dynamic response data of the Xijiang Bridge of Nanguang Railway was used as an example, and the reliability of the method was verified by comparing the calculated value with the measured value. The results show that the co-simulation based on ANSYS and SIMPACK is an effective method to study the coupling vibration between vehicle and bridge. The periodic excitation caused by the un-smoothness of the track or the snake motion of wheel may induce lateral resonance, however, the possibility of vertical resonance is small. In addition, because of the lateral amplitude of the bridge is greatly influenced by unbalance loading of vehicle, the lateral amplitude under single-line vehicle is larger than that of double-line vehicle. The vertical comfort index and acceleration may not increase monotonically with the running speed due to the influence of excitation frequency. Furthermore, the derailment coefficient, rate of wheel load reduction, vertical comfort index and acceleration are mainly affected by the vertical vibration caused by live load, while the lateral comfort index and acceleration are greatly affected by unbalance loading of vehicle. The results of the study can provide a reference for the design of similar bridge in the future. 2 tabs, 12 figs, 28 refs.

Key words: bridge engineering; steel-box basket-handle arch bridge; coupled vibration; co-simulation; multi-body dynamics; field measurement

0 引 言

高速列车通过桥梁时,因车辆的冲击作用,桥梁会发生变形和振动,而桥梁振动反过来又会导致轨道变形,进而使运行车辆的安全性和舒适性受到威胁,这是因为运行列车与所承载桥梁之间存在显著的动力相互作用^[1-4]。事实上,自 1825 年世界第一条铁路修建时,车辆与桥梁间的这种动力相互作用便引起工程师们的广泛关注。各国学者对车桥动力相互作用理论及其应用开始了漫长的探索,车-桥耦合振动研究取得了长足进展^[5-8]。在早期,力学研究水平落后,计算机应用尚未普及,研究方法和手段相对落后,学者们主要采用试验和理论相结合的研究

方式。Diana 等考虑了轮轨作用力影响、轨道弹性等因素,建立车-桥动力分析模型,综合分析了不同形式的桥梁、车辆、桥上轨道结构的离散方法^[9]。Xia 等考虑单向行车时偏心荷载作用和车辆蛇行条件,建立车桥系统空间耦合作用振动力学分析模型^[10-11]。翟婉明等充分考虑轨道结构参振,通过引入动态轮轨作用关系,建立了高速列车-轨道-桥梁动态相互作用模型,模拟了高速列车过桥动态行为^[12]。周昱采用 SIMPACK 建立 34 自由度的线性车辆模型,使用 ANSYS 建立了未考虑拉索几何非线性的桥梁模型,通过联合仿真对斜拉桥进行了车-桥耦合振动分析^[13]。

从取得的成果看,研究一般是基于传统动力学

分析方法,采用牛顿-欧拉方程或拉格朗日第二类方程导出车-桥系统运动微分方程,需要进行较繁重的代数和微分运算,且难以充分考虑轮轨蠕滑力及悬挂系统各元件的非线性问题^[14-18]。近年来,随着高速铁路建设的迅猛发展,车辆运行速度和桥梁跨度都大幅提高,高速列车与大跨桥梁间的动力相互作用也愈加突出。为确保高速铁路大跨度桥梁上车辆运行的安全性和舒适性,需要建立完整的车辆动力学精细化模型,更准确模拟桥梁空间变形,以进一步提高车-桥系统动力响应预测精度^[19]。然而,为求解列车通过桥梁时的动力响应问题,传统方法多采用自编程序的方式来模拟,这对研究者提出了较高要求,在推广应用方面也遇到较多问题。近些年随着商业多体动力学软件(如 UM、SIMPACK)的兴起,基于商业多体动力学软件来进行精细化的车-桥耦合分析研究日益增多。较自编程模式,多体动力学软件具有建模方便,精细化程度高,求解效率高等特点。

崔圣爱等充分考虑各种非线性因素的影响,采用基于 SIMPACK 和 ANSYS 的联合仿真技术,将车辆、桥梁子系统在轮轨接触面上进行数据交换,实现车-桥耦合振动联合仿真分析,计算了不同车速下列车通过简支梁桥的空间耦合振动响应^[20]。盛兴旺等采用 SIMPACK 和 ANSYS 联合数值仿真分析,计算动车组列车运行时车-桥动力响应,并以此评价桥梁在列车设计时速下车-桥系统的安全性和舒适性^[21]。韩兴等通过 ANSYS 和 SIMPACK 软件建立车-桥耦合振动仿真系统,计算了不同列车时速过桥工况下中承式铁路拱桥的动力响应,证明了联合仿真的优越性^[22]。李小珍等建立包含 F 轨与不包含 F 轨的磁悬浮列车-桥梁系统耦合振动模型,分析了 F 轨对磁悬浮列车-桥梁系统竖向耦合振动的影响^[23]。罗锟等通过 SIMPACK 软件的柔性轨道模块,结合自编钢轨 *.ftr 文件,对简支梁桥与列车联合仿真建模方法做了改进^[24]。勾红叶等依据车-桥耦合振动计算和动载试验实测结果,综合分析了铁路大跨 T 形刚构桥的动力性能^[25]。

随着高速铁路网的进一步延伸,为跨越中国西部山区的深沟峡谷、中东部地区的大江大河、东南沿海地区的海湾海峡,超大跨度高铁桥梁的修建不可避免。钢箱提篮拱桥由于拱肋与 2 个拱座交点的连线向内旋转倾斜,形成空间拱式结构,使得其横向稳定性得到大幅提高,但鲜有涉及其在高速列车作用下的动力性能研究。

本文以南广(南宁—广州)铁路西江特大桥(主

跨为 450 m)为背景,通过多体动力学软件 SIMPACK,充分考虑悬挂系统的各种非线性因素,建立 42 个自由度的列车多体动力学模型,使用 ANSYS 软件建立桥梁动力学分析模型,通过轮轨位移协调条件和相互作用力平衡条件联系(车、桥间的数据交换通过轮轨接触面上的离散点进行),采用有限元接口模块法开展车-桥耦合系统动力响应的仿真分析;基于建立的桥梁有限元模型,采用 ANSYS 中的 Lanczos 方法进行结构动力特性分析,为验证仿真分析结果的可靠性,基于该新建线路的联调联试,开展该桥的动力响应现场实测,并与仿真分析结果对比;最后,在仿真分析结果得到验证的前提下,开展高速铁路大跨钢箱提篮拱桥车-桥耦合振动特性研究。研究结果可为 SIMPACK 和 ANSYS 联合仿真的可靠性提供实测数据验证,为类似桥梁的动力设计提供参考。

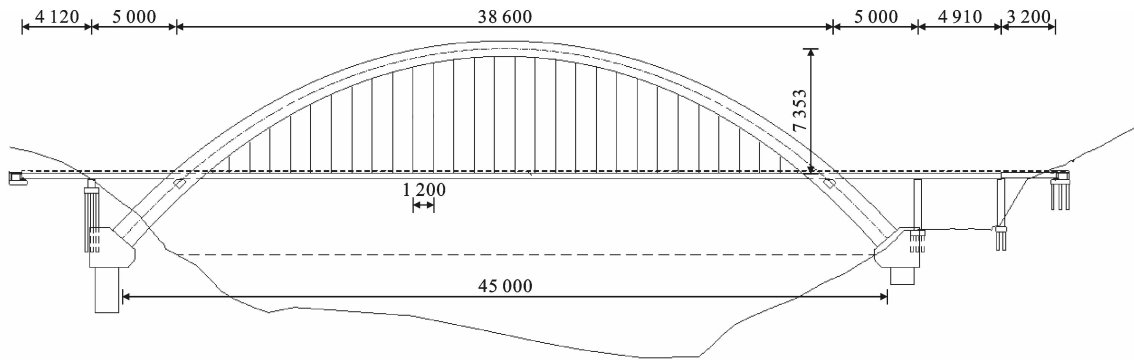
1 试验方法

1.1 桥梁概况

南广铁路西江特大桥是目前中国首座、世界上最大跨径中承式钢箱提篮拱桥,如图 1 所示。主跨 450.0 m,跨径布置为(41.2+50.0+386.0+50.0+49.1+32.0)m,矢跨比为 1/4,拱轴系数 m 为 1.5 的悬链线,桥面距拱顶 73.53 m。桥面采用钢纵横梁+混凝土桥面板体系,见图 2。宽 22.0 m、高 3.0 m,主纵梁为箱形结构(高、宽分别为 3.0、2.0 m),2 座主纵梁中心距 20.0 m,横梁高度为 3.0 m,除支座处的断面为箱形外,其余断面均为工形。拱肋为变高度钢箱结构,截面宽度为 4.0 m,拱脚处拱肋截面径向高度为 15.1 m,拱顶截面径向高度 9.1 m,拱肋钢板厚度为 30~50 mm。拱脚处 2 个拱肋间距 34.0 m,拱顶处间距 15.17 m,在桥面系与拱肋相交处设置横梁,通过支座连接横梁与桥面系主纵梁,其中一侧设固定支座,另一侧设滑动支座,纵桥向则设置阻尼器。吊杆采用高强度低松弛平行钢丝束,主跨吊杆间距 12.0 m。大桥为双线有砟铁路,线间距为 4.6 m,设计行车速度 250 km/h。

1.2 测试系统

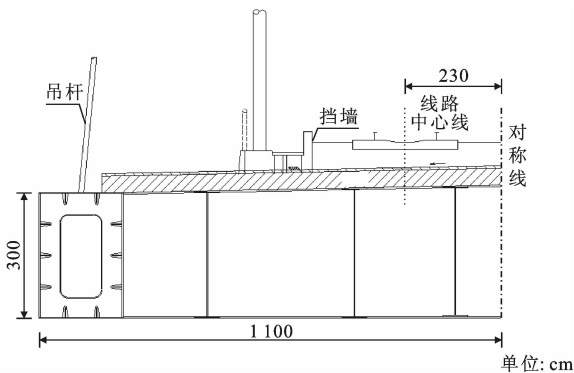
本文桥梁动力响应测试采用基于云计算开发的一套 DASP-MTS 在线健康监测系统^[26],该系统利用 3G 无线网络将实时数据上传至云端服务器;同时采用 Brower/Server 工作方式,使用过程中无需安装任何软件,解决了远程监控的难题;用户可在任意场所实时掌控系统中的各种监测量。该套系统



单位: cm

图 1 大桥整体布置

Fig. 1 Overall layout of main bridge



单位: cm

图 2 主梁断面

Fig. 2 Girder cross section

共包括 17 台 941 型拾振器、5 台二维超声风速仪、6 台动应变计和 1 套视频监测系统,主要监测桥梁动力响应和桥位处的风环境等。传感器主要布置于主梁跨中、四分之一跨、四分之三跨及拱顶位置,具体传感器布置如图 3、图 4 所示。

为提高数据存储与传输的效率,DASP-MTS 采取触发模式,即当桥梁响应超过设定的阈值时自动激发系统存储当次列车通过时的动力响应。动态信号采集则采用 INV3060A 型采集仪,测试时的采样频率为 50 Hz。此外,为测得反映列车走行安全性的脱轨系数和轮重减载率,依据规范^[27],在钢轨外、内侧的轨腰和轨底布置直角应变花以获得钢轨水平力和竖向力。在使用实测数据前,首先采用自编程序对数据进行预处理,剔除一些突变或虚假的数据,并及时对数据结果可靠性进行判断,进而可对采集参数实时调整。

1.3 测试工况

现场测试(图 5)依托中国新建南广高速铁路联调联试进行,依据联调联试计划安排测试工况。联调联试时,由于只有 1 列试验列车,整个试验过程中仅有单线行车,但同一速度、线路进行多次行车,列

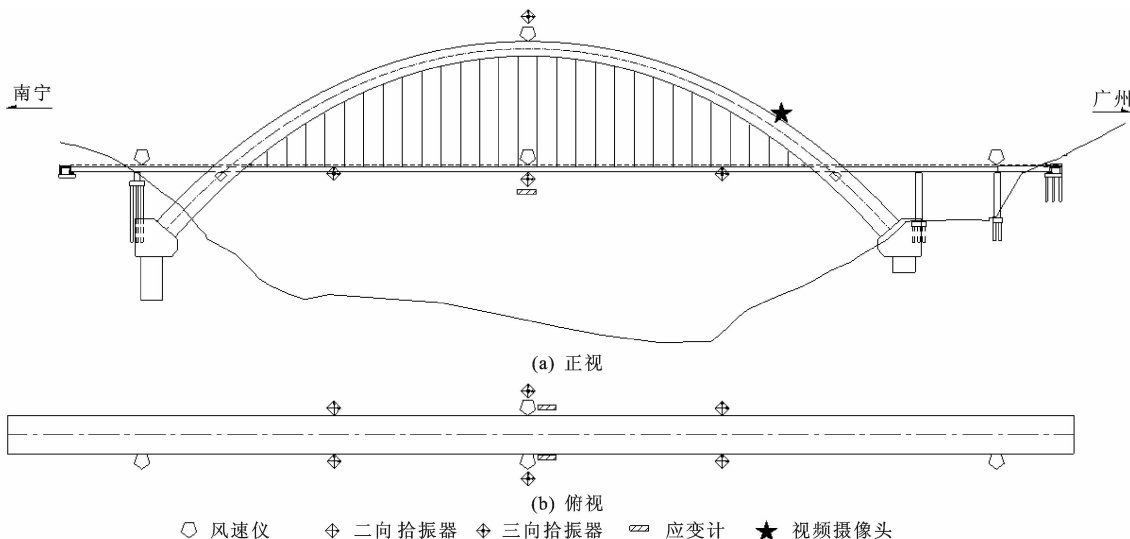


图 3 传感器布置

Fig. 3 Layout of sensors



图4 传感器941B现场布置

Fig. 4 Site layout of 941B sensor



图5 现场测试照片

Fig. 5 Field test photo

车从肇庆西到肇庆东上行正向、上行反向、下行正向及下行反向的行车方式运行;运行速度 V 在 $180 \sim 270 \text{ km/h}$ 范围内以 10 km/h 为步长进行逐级提速,最高试验速度达 275 km/h 。本次试验共进行约 80 个测试工况,试验列车采用 CRH380A 动车组(8 节编组,1 拖车+6 动车+1 拖车)。

2 仿真模型的建立

2.1 车辆多体系统动力学模型

车辆是由车体、转向架、轮对及悬挂系统等构成的复杂多体系统(轮对通过一系悬挂与转向架相连,转向架则由二系悬挂与车体相连,车体与每个构架间配有横向减振器、蛇形减振器和垂向减振器各 2 个),精确的车辆动力学模型不仅需要考虑轮轨接触几何关系、轮轨蠕滑力的非线性特性,还要考虑动车的机构参数中(如横向刚度、减振器阻尼等)的各种非线性因素。多体动力学方法通过力元和运动约束铰实现物体的相互联系,自动形成多体动力学方程,解决了传统人工推导方法的不足之处,并能充分考虑悬挂系统的各种非线性因素^[20]。由于缺乏 CRH380A 动车组的建模参数,本文采用多体动力学软件 SIMPACK 建立与其参数相近的 CRH2 列

车多体动力学模型,如图 6 所示。单节车辆模型由 1 个车体、2 个转向架及 4 个轮对共 7 个刚体组成,各刚体考虑浮沉、横摆、伸缩、摇头、点头和侧滚 6 个自由度,即单节车辆模型共计 42 个自由度。为验证单节车辆模型建模正确与否,可通过其名义力是否小于 0.01 m/s^2 进行判断。验证结果表明,本文建立的单节车辆模型最大残余加速度为 $9.93 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$,满足要求。

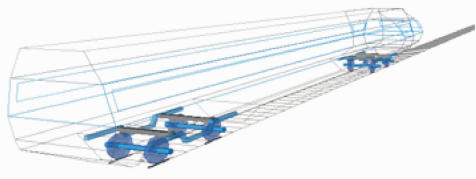


图6 车辆的多体动力学模型

Fig. 6 Multi-body dynamics model of vehicle

列车模型编组方式与现场测试列车一致(8 节编组,1 拖车+6 动车+1 拖车),采用多体系统动力学中的子结构技术将单节车辆模型进行组装。图 7 为建立的动车组模型非线性临界速度计算结果,可以看出,动车组模型非线性临界速度为 402 km/h ,建立的模型具有较好的运行稳定性。

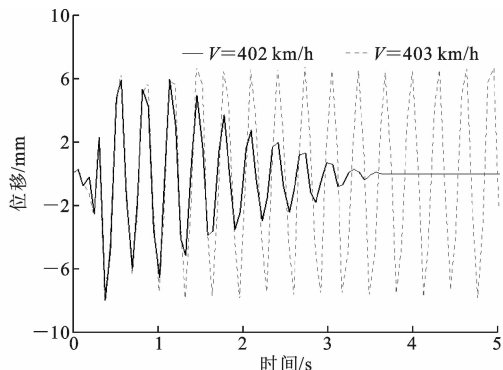


图7 非线性临界速度结果

Fig. 7 Results of non-linear critical velocity

2.2 桥梁有限元模型

桥梁动力学分析模型采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立,其中,拱肋、边墩、桥面系各纵横梁均采用三维梁单元 Beam44 模拟,吊杆采用三维杆单元 Link10 模拟,桥面板采用可考虑几何大变形的弹性壳单元 Shell63 模拟;桥面二期恒载按照 16 t/m 计算,将其作为均布质量分配到相应的桥面板以及纵横梁上;拱肋与桥面相交处支座、梁墩间支座约束条件通过主从节点处理。建立的桥梁动力学分析模型如图 8 所示,共计 9 863 个节点、23 217 个单元。

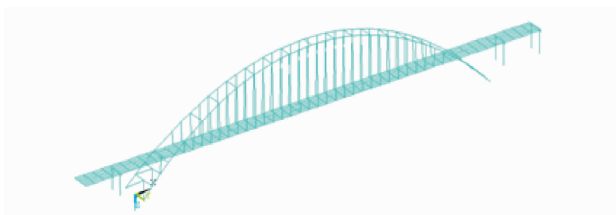


图 8 桥梁有限元模型

Fig. 8 Finite element model of bridge

2.3 交互式车-桥耦合模型

车辆和桥梁动力分析模型可分别由多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 ANSYS 建立。由于车桥间的动力相互作用是通过轮轨关系实现的,为此,车-桥耦合振动分析模型可看作一个由车辆模型和桥梁模型按一定轮轨关系组成的联合动力体系,且该体系以轮轨接触处为界面,通过轮轨位移协调条件和相互作用力平衡条件联系(车、桥间的数据交换通过轮轨接触面上的离散点进行),即车-桥耦合振动分析可由交互式仿真实现。图 9 为建立的交互式车-桥耦合振动仿真模型。计算中,轮轨间的法向力和纵横向蠕滑力分别由赫兹非线性接触理论和 Kalker 的滚动接触非线性理论(FASTSim 算法)确定;轨道不平顺采用德国低干扰轨道谱,考虑高低、水平和轨距 3 种不平顺,并采用三角级数法模拟时程;计算积分步长为 0.01 s,积分时长为 20 s。

需要说明的是, SIMPACK 中的弹性轨道模块(Flex Track)和有限元接口模块(Flex Modal)均可

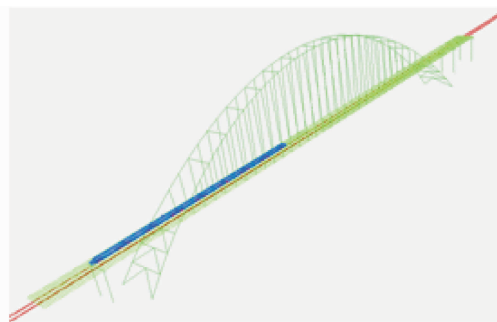


图 9 交互式车-桥耦合振动仿真模型

Fig. 9 Model of co-simulation of coupled vibration for vehicle and bridge

实现车-桥耦合振动分析,其中,弹性轨道法模块将桥梁作为一种边界条件和数据库的形式存在,车辆与弹性轨道之间通过轮轨接触离散点实现位移、速度、作用力的交换;有限元接口模块则通过构建一个质量可以忽略的虚刚体将桥梁和车辆连接,实现车-桥耦合振动分析。现有研究大多采用弹性轨道模块法,但该方法不是将桥梁结构作为一个独立的弹性体直接进行计算,无法对桥梁施加风荷载等外荷载。为此,本文采用有限元接口模块法开展车-桥耦合振动的交互式仿真分析。图 10 为弹性轨道模块和有限元接口模块 2 种方法获得的车-桥系统典型动力响应对比(动车组以运行速度 $V=200 \text{ km/h}$ 单线通过桥梁)。由图 10 可知,2 种方法结果的一致性侧面验证了本文结果的可靠性。

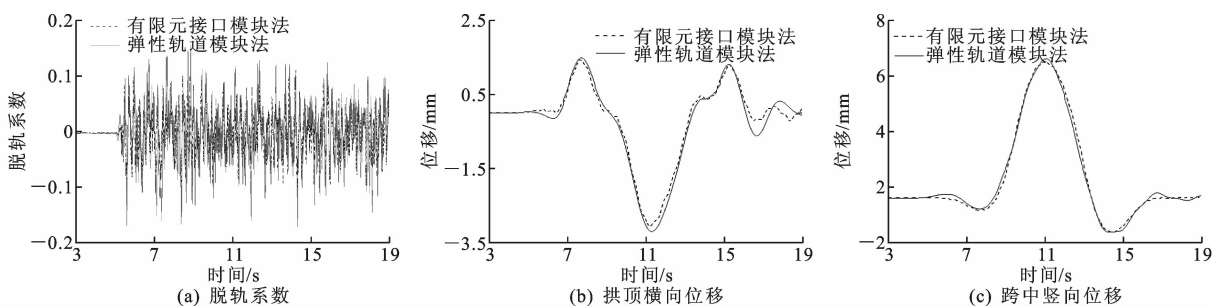


图 10 Flex Track 法和 Flex Modal 法动力响应分析结果对比($V=200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 10 Comparisons of dynamic response between Flex Track and Flex Modal ($V=200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)

3 车桥动力响应结果与分析

3.1 仿真分析与现场实测对比

桥梁结构动力特性是研究桥梁振动问题的基础。为此,基于建立的桥梁有限元模型,采用 ANSYS 中的 Lanczos 方法进行结构动力特性分析,并与现场实测结果对比。表 1 为大桥前 5 阶模态频率的实测与有限元分析结果对比。由表 1 可知,2 种

方法得到的自振频率非常接近,相对误差均小于 4%,证明了本文模型的正确性。

此外,采用 INV3060A 采集仪自带分析软件获得的阻尼比测试结果为 4.5%,大于《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01-2018)规定的钢桥阻尼比 0.5%。这是因为本桥为有砟铁路桥梁,两端设有阻尼器,结构与公路桥梁有较大区别,且钢结构的阻尼比大小与其工作状态有关(塑性工作状态,阻尼

比最大值可达 20%)，故可认为本文阻尼比测试结果合理。

表 1 动力特性测试值与计算值对比

Tab. 1 Comparisons of dynamic characteristic results between simulation and test values

模态阶次	现场测试值 f_1	有限元计算值 f_2	相对误差/%	振型描述
1	0.405	0.401	1.00	一阶对称侧弯(梁拱同侧)
2	0.463	0.454	1.98	一阶反对称竖弯
3	0.542	0.523	3.63	一阶对称侧弯(梁拱反侧)
4	0.733	0.705	3.97	主拱一阶反对称侧弯
5	0.893	0.871	2.53	二阶对称竖弯

表 2 为单线行车下桥梁典型动力响应实测与计算结果对比。由表 2 可以看出，桥梁竖向振动响应大于横向振动，这是因为车桥动力相互作用对桥梁竖向振动影响更为明显，且提篮拱桥横向刚度相对较大。需要说明的是，由于车辆运行速度较低时，桥梁结构动力响应相对较小，测量误差较大，故表 2 仅给出单线行车，200 km/h 速度运行下的结果。由表 2 可看出，各参数的计算结果略小于测试值。由于

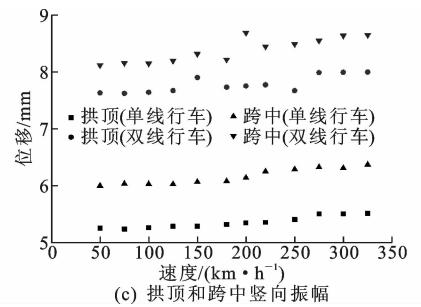
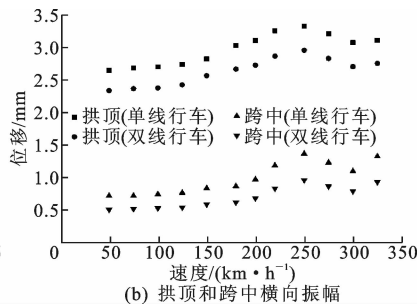
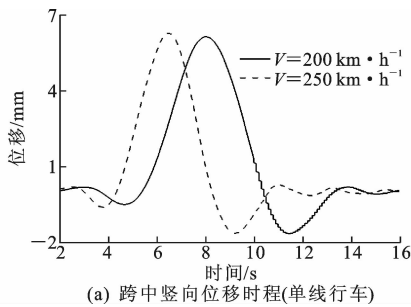


图 11 桥梁典型动力响应

Fig. 11 Typical dynamic responses of bridge

由图 11(b)可知，单、双线行车下拱顶和主梁跨中横向振幅随车速的变化趋势基本一致，振幅先随车速的增加而增大，在约 $V=250$ km/h 时达到峰值后便随车速的增加而略有减小。夏禾等指出轨道不平顺或轮对蛇行运动激发的周期性横向摇摆力可能会引发横向共振^[28]；据其提出的桥梁共振临界车速估算公式，结合本桥实际情况，估算其横向共振临界车速 $V_{lr}=3.6f_L L_s=3.6\times 0.40\times 180=259$ km/h (其中， f_L 、 L_s 分别为桥梁横向自振频率和轨道不平顺或轮对蛇行运动主波长)，与本文计算分析结果基本一致，但由于该桥梁阻尼较大(4.5%)，产生的动力放大效应不太明显。不管是拱顶还是主梁跨中，双线行车下的横向振幅均小于单线行车，这是因为横向振动受单线行车的偏载作用影响较大，而双线行车抑制了车辆的偏载作用。

列车参数、轨道不平顺谱等计算参数与实际情况有些出入，且计算没有考虑风荷载的影响，但本文振幅绝对值偏差在 1 mm 以内，故可认为计算值与测试值基本一致。

表 2 桥梁典型动力响应测试值与计算值对比 ($V=200$ km·h⁻¹)

Tab. 2 Comparisons of typical dynamic responses of bridge between simulation and test values ($V=200$ km·h⁻¹)

参数	拱顶振幅/mm		跨中振幅/mm		脱轨系数	轮重减载率
	竖向	横向	竖向	横向		
计算值	5.35	3.10	6.13	0.96	0.13	0.21
测试值	6.05	3.82	6.68	1.26	0.16	0.23
相对误差/%	-11.57	-18.85	-8.23	-23.81	-18.75	-8.70

3.2 耦合振动效应仿真分析结果

图 11 为桥梁典型动力响应。由图 11(a)可知，车辆通过桥梁时，跨中的振幅先增大后减小，待车辆驶出桥梁后，振动迅速衰减。桥梁振动特性受车辆运行速度影响较小，由于车辆到达某一位置的时间受车辆运行速度影响，故峰值的发生时间随速度变化而变化。

由图 11(c)可知，拱顶和主梁跨中竖向振幅随车速变化呈单调变化，没有出现共振峰值，且受行车方式(单线或双线)影响较小。这是因为本桥竖向基频小，竖向共振临界车速 V_{vr} 较低， $V_{vr}=3.6f_v d_v=3.6\times 0.46\times 25=41$ km/h (其中， f_v 、 d_v 分别为桥梁竖向自振频率和车辆长度^[23])，在所分析的列车运行速度范围内不会出现明显的竖向共振。由于双线行车的竖向活载远大于单线行车，故双线行车的竖向振幅也远大于单线行车。

动车的动力响应往往大于拖车^[15]，故图 12 仅以动车为例分析车辆典型动力响应。从图 12 可看出：双线行车与单线行车下的脱轨系数随车速变化趋势基本一致，均在 $V=250$ km/h 时出现了明显峰值，这是因为脱轨系数与横向力大小呈正比，而横向共振导致该速度时的横向力最大；其他速度下的响

应并未出现明显峰值,且竖向 Sperling 舒适度指标和竖向振动加速度出现了随列车运行速度的提高反而减小的现象,这可能是因为竖向振动与车辆的悬挂参数和轨道不平顺等激励的频率有关,激振频率随着列车运行速度增加而增大,进而可能远离车体的固有频率;双线行车时的活载较单线行车大,导致

桥梁较大的变形和振动。因此,双线行车下的脱轨系数、轮重减载率、竖向 Sperling 舒适度指标和竖向振动加速度均较单线行车大,而横向 Sperling 舒适度指标和横向振动加速度因单线行车时的偏载效应导致横向振动较大,单线行车下横向 Sperling 舒适度指标和横向振动加速度与双线行车时大致相当。

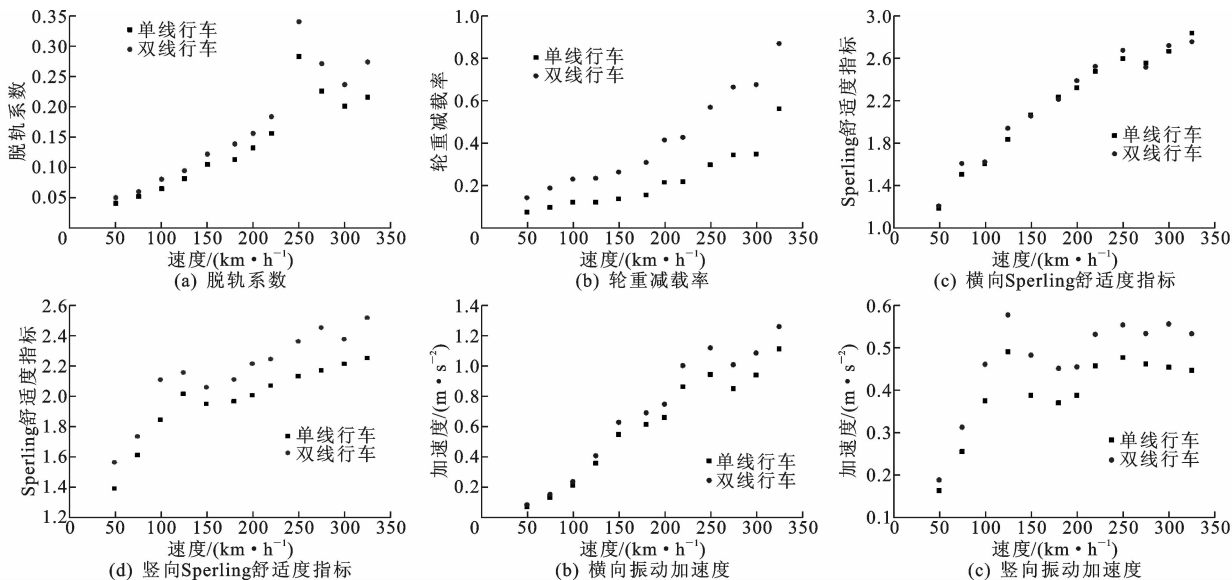


图 12 动车车辆典型动力响应

Fig. 12 Typical dynamic responses of vehicle of EMU train

结合《铁路车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB 5599-85),在本文考虑的列车运行速度范围内,脱轨系数小于第 2 限度 1.0,单线行车的轮重减载率小于第 2 限度 0.6,当行车速度大于 250 km/h 后,轮重减载率超过第 2 限度 0.6,但小于中国高速铁路试验中采用的动态限值 0.9,表明列车行车安全性仍满足要求;竖向 Sperling 舒适度指标及行车速度小于 250 km/h 时的横向 Sperling 舒适度指标均小于 2.5,最大横向 Sperling 舒适度指标也小于 3.1,因此 Sperling 舒适度指标达到良以上;横向加速度峰值为 1.26 m/s^2 ,略大于 1.0 m/s^2 的限值,竖向加速度峰值 0.58 m/s^2 ,小于 1.3 m/s^2 的限值。

4 结 语

(1)桥梁结构动力分析模型可通过有限元方法建立,三维空间车辆精细化模型则可通过多体动力学方法建立,进而通过 ANSYS 和 SIMPACK 的联合仿真能较精确模拟车辆和桥梁耦合振动特性,且弹性轨道模块和有限元接口模块 2 种方法得到的结果基本一致。基于 ANSYS 和 SIMPACK 的联合仿真开展车-桥耦合振动研究的方法有效。

(2)由轨道不平顺或轮对蛇行运动引起的周期

性激励可能引发横向共振,但发生竖向共振的可能性较小;桥梁结构横向振幅由于受车辆偏载影响较大,单线行车的横向振幅大于双线行车,竖向振幅则相反,其原因为竖向振幅主要取决于活载大小。

(3)在所研究的列车运行速度范围内,桥上列车行车安全性满足规范要求,Sperling 舒适度指标达到良以上。由于竖向振动与车辆的悬挂参数和轨道不平顺等激励的频率有关,竖向 Sperling 舒适度指标和加速度可能不随车速单调递增;脱轨系数、轮重减载率、竖向 Sperling 舒适度指标以及加速度受活载导致的竖向振动影响较大,而横向 Sperling 舒适度指标和加速度则受偏载效应影响较大。

(4)本文结果可为今后类似桥梁的动力设计提供参考。由于有风时车桥系统动力响应更大,对行车安全更为不利,下一步将考虑风荷载作用的联合仿真分析方法,分析风荷载作用下车桥系统动力响应。

参考文献:

References:

- [1] 翟婉明,夏 禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2011.

- ZHAI Wan-ming, XIA He. Train-track-bridge dynamic interaction: Theory and engineering application [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 夏 禾, 张 楠, 郭薇薇, 等. 车桥耦合振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
XIA He, ZHANG Nan, GUO Wei-wei, et al. Coupling vibrations of train-bridge system[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [3] 乔 朋, 钟承星, 王宗义, 等. 我国车桥耦合振动的研究现状及发展趋势[J/OL]. 重庆交通大学学报: 自然科学版. (2019-08-05) [2019-08-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/Detail.aspx?dbname=CAPJLAST&filename=CQJT20190804000&v=>.
QIAO Peng, ZHONG Cheng-xing, WANG Zong-yi, et al. State-of-the-art and trend of studies on vehicle-bridge coupling vibration in China [J/OL]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science. (2019-08-05) [2019-08-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/Detail.aspx?dbname=CAPJLAST&filename=CQJT20190804000&v=>.
- [4] HE X H, WU T, ZOU Y F, et al. Recent developments of high-speed railway bridges in China [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13 (12): 1584-1595.
- [5] DIMITRAKOPOULOS E G, ZENG Q. A three-dimensional dynamic analysis scheme for the interaction between trains and curved railway bridges [J]. Computers and Structures, 2015, 149: 43-60.
- [6] YANG Y B, LIN B H. Vehicle-bridge interaction analysis by dynamic condensation method [J]. Journal of Structure Engineering, 1995, 121(11): 1636-1643.
- [7] LI Y L, QIANG S Z, LIAO H L, et al. Dynamics of wind-rail vehicle-bridge systems [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93 (6): 483-507.
- [8] 罗 浩, 郭向荣. 大跨度提篮拱桥车桥耦合振动分析 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 147-149, 165.
LUO Hao, GUO Xiang-rong. Coupled vibration analysis between a long-span X style arch bridge and a train [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27 (2): 147-149, 165.
- [9] DIANA G, CHELI F. Dynamic interaction of railway systems with large bridges [J]. Vehicle System Dynamics, 1989, 18(1/2/3): 71-106.
- [10] XIA H, ZHANG N. Dynamic analysis of railway bridge under high speed trains [J]. Computers and Structures, 2005, 83(23/24): 1891-1901.
- [11] ZHANG N, XIA H. Dynamic analysis of coupled vehicle-bridge system based on inter-system iteration method [J]. Computers and Structures, 2013, 114: 26-34.
- [12] 翟婉明, 蔡成标, 王开云. 高速列车-轨道-桥梁动态相互作用原理及模型 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 132-137.
ZHAI Wan-ming, CAI Cheng-biao, WANG Kai-yun. Mechanism and model of high-speed train-track-bridge dynamic interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 132-137.
- [13] 周 昱. 基于 SIMPACK 和 ANSYS 的铁路桥梁耦合振动仿真分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
ZHOU Yu. Simulation of vehicle-bridge coupling vibration based on ANSYS and SIMPACK [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [14] 崔圣爱. 基于多体系统动力学和有限元方法的车桥耦合振动精细化仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
CUI Sheng-ai. Refined simulation study between vehicle and bridge based on multi-body system dynamics and finite element method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [15] 崔圣爱, 祝 兵, 黄志堂. 基于多体系统动力学和有限元方法的联合仿真在车桥耦合振动研究中的应用 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26(12): 4581-4584.
CUI Sheng-ai, ZHU Bing, HUANG Zhi-tang. Application of co-simulation based on multi-body system dynamics and finite element method on coupled vibration research between vehicle and bridge [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(12): 4581-4584.
- [16] 梁 鑫, 罗世辉, 马卫华, 等. 磁浮列车单铁悬浮车桥耦合振动分析 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 32-37.
LIANG Xin, LUO Shi-hui, MA Wei-hua, et al. Coupling vibration analysis of single-magnet suspension vehicle-bridge for maglev train [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 32-37.
- [17] 李永乐, 徐昕宇, 严乃杰, 等. 三线合一、三塔悬索桥风 8 车 8 桥耦合振动性能对比 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(6): 17-25.
LI Yong-le, XU Xin-yu, YAN Nai-jie, et al. Comparison of wind-vehicle-bridge coupling vibration characteristics for three-line three-tower suspension bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(6): 17-25.
- [18] 李小珍, 杨得旺, 郑 净, 等. 轨道交通桥梁减振降噪研究进展 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(7): 55-75, 136.

- LI Xiao-zhen, YANG De-wang, ZHENG Jing, et al. Review on vibration and noise reduction of rail transit bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 55-75, 136.
- [19] WALLRAPP O. Review of past developments in multi-body system dynamics at DLR-from FADYNA to SIMPACK[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(5): 339-348.
- [20] 崔圣爱, 祝兵, 白峰涛, 等. 琼州海峡跨海斜拉桥方案车桥系统耦合振动仿真分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 106-110.
CUI Sheng-ai, ZHU Bing, BAI Feng-tao, et al. Coupled vibration analysis of vehicle-bridge system for crossing-channel cabled-stayed bridge scheme over Qiongzhou Strait[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 106-110.
- [21] 盛兴旺, 郑纬奇, 何庭, 等. 厦深铁路榕江特大桥主桥车-桥耦合振动分析[J]. 桥梁建设, 2017, 47(2): 66-71.
SHENG Xing-wang, ZHENG Wei-qi, HE Ting, et al. Analysis of train-bridge coupling vibration of main bridge of Rongjiang River Bridge on Xiamen-Shenzhen Railway[J]. Bridge Construction, 2017, 47(2): 66-71.
- [22] 韩兴, 蔡子龙, 李鑫, 等. 高速铁路大跨度钢管混凝土拱桥车桥耦合振动仿真分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(4): 36-39.
HAN Xing, CAI Zi-long, LI Xin, et al. Coupled vibration analysis of vehicle-bridge system for long-span concrete filled steel tube arch bridge on high speed railway[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(4): 36-39.
- [23] 李小珍, 王党雄, 耿杰, 等. F轨对中低速磁悬浮列车-桥梁系统竖向耦合振动的影响研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 97-106.
LI Xiao-zhen, WANG Dang-xiong, GENG jie, et al. Study on the influence of F-rail in vertical coupling vibration of low-medium speed maglev train-bridge system[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 97-106.
- [24] 罗锐, 汪振国, 雷晓燕. 轨道交通车桥耦合振动仿真改进方法与应用[J]. 现代制造工程, 2018(11): 60-65.
LUO Kun, WANG Zhen-guo, LEI Xiao-yan. An improved method for simulation of vehicle-bridge coupling vibration and its application in rail transit[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(11): 60-65.
- [25] 勾红叶, 石晓宇, 周文, 等. 铁路大跨T形刚构桥车桥耦合振动与动力性能[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 679-686.
GOU Hong-ye, SHI Xiao-yu, ZHOU Wen, et al. Coupled train-bridge vibration and dynamic characteristics of long-span T-shaped rigid frame railway bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 679-686.
- [26] 史康, 何旭辉, 邹云峰, 等. 大跨度高速铁路桥梁健康监测系统研发[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 737-742.
SHI Kang, HE Xu-hui, ZOU Yun-feng, et al. Research and development of health monitoring system for long-span bridges of high-speed railways[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 737-742.
- [27] TB/T 2489—94, 轮轨水平力、垂直力地面测试方法[S].
TB/T 2489—94, Ground test method of rail horizontal and vertical force[S].
- [28] 夏禾, 郭薇薇, 张楠. 车桥系统共振机理和共振条件分析[J]. 铁道学报, 2006, 28(5): 52-58.
XIA He, GUO Wei-wei, ZHANG Nan. Analysis of resonance mechanism and conditions of train-bridge system[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(5): 52-58.