

陈敦,王根会,穆彦虎,等.铁路大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动研究[J].地震工程学报,2017,39(5):820-828.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.820

CHEN Dun, WANG Genhui, MU Yanhu, et al. Train-Bridge Coupled Vibration Analysis of a Large-span Simply-supported Steel-truss Railway Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 820-828. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.820

铁路大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动研究^①

陈敦^{1,2,3}, 王根会³, 穆彦虎¹, 彭惠⁴

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:桥梁作为线路工程中不可或缺的重要枢纽,对列车通过桥梁时,桥梁和车辆之间相互作用的问题迫切需要做出解答,特别是针对铁路钢桁梁,并考虑大跨度简支特性的车-桥耦合振动问题研究更具有一定的理论与实际意义。以黄韩侯铁路新黄河特大桥 156 m 简支钢桁梁桥作为工程背景,建立车辆动力模型、桥梁有限元模型并考虑轮轨关系,以蛇形运动和轨道不平顺作为系统的自激激励源,利用大型有限元软件 ANSYS 以及 UM(Universal Mechanism)动力学分析软件联合进行仿真分析,实现单个机车、编组客车和编组货车以设计时速通过桥梁时对大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动的研究。经过计算分析得出:大跨度钢桁梁桥的横向刚度相对较小;不同编组情况以设计时速通过桥梁时,车辆和桥梁的各项动力响应参数均在规范允许的范围之内;编组货车通过桥梁时,桥梁跨中横向、竖向加速度较之其他编组情况要大。

关键词:大跨度钢桁梁桥;车-桥耦合;振动分析;数值模拟

中图分类号:U24; U441⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2017)05-0820-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0820

Train-bridge Coupled Vibration Analysis of a Large-span Simply-supported Steel-truss Railway Bridge

CHEN Dun^{1,2,3}, WANG Genhui³, MU Yanhu¹, PENG Hui⁴

(1. State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

4. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710065, Shaanxi China)

Abstract: Over recent years, high-speed and heavy-load railways have developed in China. For a railway line, bridges are very important hubs along the line. Studies on the interaction between trains and bridges are very important for safe railway operations, especially for problems regarding the train-bridge coupled vibration of simply-supported steel-truss railway bridges, which have been widely used in recent years. In this paper, a 156-m-long simply-supported steel-truss bridge

① 收稿日期:2016-04-25

基金项目:国家自然科学基金(41401077,41630636);中国科学院西部之光“西部博士”项目(51Y351211)

作者简介:陈敦(1989-),男,甘肃武威人,博士研究生,主要从事动力学方面的研究。E-mail:chendun@lzb.ac.cn。

of the Huang Han-hou New Yellow River railway was studied. Numerical simulation using ANSYS and UM software is used together to study the train-bridge coupled vibration problems when a single locomotive, marshaling passenger coach, and freight coach pass the bridge. The results show that the lateral stiffness of the large-span steel-truss bridge is relatively small. The dynamic response parameters of the train and bridge all fell within the allowable limits when the different marshaling passenger coaches pass the bridge with the design speed. Compared with conditions of a single locomotive and marshaling passenger coach, the lateral and vertical accelerations of the bridge are obviously greater when the marshaling freight coaches pass.

Key words: the long-span steel truss bridge; train-bridge coupled vibration; dynamic response; numerical simulation

0 引言

伴随着我国铁路运输业的现代化进程,高速重载铁路得到了长足的发展。铁路桥梁作为轨道交通的重要枢纽,生命线工程的重要组成部分,在跨越河谷和特殊地形路段中发挥着举足轻重的作用。随着桥梁的应用更加普遍,其所占比例也在不断增大,仅广珠城际铁路就达到 94%。在桥梁建筑材料中,钢材由于其自身受力良好、便于制造、运输和更换的特性被广泛应运于桥梁建设之中^[1]。

列车通过桥梁时将引起桥梁结构的振动,而这种振动会反作用于车辆的振动,这种相互作用与影响称之为车-桥耦合振动^[2]。车-桥耦合振动不仅与桥梁自身特性有关,而且还取决于车辆行驶速度、类型、编组情况、轮轨接触以及线路状况^[3]。当车速达到某个程度时,车辆的激励频率与桥梁结构的自振频率便会相近或相等,将引起整个车-桥系统发生共振^[4],使桥梁和车辆动力响应迅速增大,甚至会超过限制导致列车脱轨、桥梁垮塌。2000 年 6 月,一列时速 290 km/h 从巴黎驶往伦敦的列车在法国北部出轨,造成 14 人受伤;2003 年 7 月一列特快列车在日本长崎发生脱轨,6 节车厢脱轨,60 余人伤亡;2007 年 3 月由阜康开往乌鲁木齐的运煤列车在阜康市境内经过铁路桥梁时,桥梁坍塌,9 节运煤重载货车脱轨,使得 8 节货车侧翻,并有 3 节坠落河中。

早在 20 世纪 50 年代,李国豪^[5]、陈英俊^[6]和胡人礼^[7]等就对车-桥耦合振动问题开展了很多工作,为我国车-桥耦合振动理论研究奠定了基础。随后,夏禾等^[4]对铁路桥梁在不同条件下的耦合振动进行了大量研究。曹雪琴^[8]除对简支梁桥的竖向振动进行分析外,还研究了列车过桥时单跨箱型钢桁梁桥空间振动及其影响因素。李小珍等^[9]对各种复杂桥梁结构(大跨度钢斜拉桥、大跨度连续拱桥组合钢桥、斜交刚构连续桥等桥型)的车-桥耦合振动问题

进行了细致探究。翟婉明等^[2]从轮轨关系出发研究列车-轨道-桥梁耦合振动理论,开发了 TTBSIM 动力分析软件。曾庆元等^[10]建立 21 个自由度的车辆模型,避开轮轨接触的随机性,由势驻值原理以其“对号入座”法则,采用实测蛇行运动作为系统激振源求解车-桥耦合系统的动力响应。潘家英等^[11]采用桥梁空间模型,用简化轮轨接触连接桥梁与车辆动力学方程。

但是随着铁路高速重载化的发展,尤其是面对逐渐增加的桥梁跨径,如何验证大跨度钢桁梁桥设计的合理性,保证铁路的正常运输秩序与车辆的安全性、平稳性和舒适性成为亟待解决的问题,本文以黄韩侯铁路大跨度简支钢桁架桥为研究对象,建立车辆动力模型、桥梁有限元模型并考虑轮轨关系,以蛇形运动和轨道不平顺作为系统的自激激励源,利用大型有限元软件 ANSYS 以及 UM(Universal Mechanism)动力学分析软件联合进行仿真分析,开展不同列车编组通过条件下车-桥耦合振动动力响应过程研究,以期对未来同类型桥梁动力学性能的检定和优化设计提供参考。

1 工程背景

黄(陵)韩(城)侯(马)铁路为我国 I 级电气化客货两运铁路,设计载荷为中-活载,设计时速 120 km/h,是连接陕西省与山西省的重要能源运输通道,货车的载重和运载量将远远大于客车。该桥型采用 156 m 无竖杆整体节点平行弦三角桁架下承式简支钢桁梁桥跨越黄河主河道,纵向支座中心间距 156 m,横向支座中心为 8.6 m,梁端到支座中心线 1 m,桁高 17 m,节间长 14.1 m+9×14.2 m+14.1 m。钢桁梁结构自重 13.74 t/m,容重 78.5 kN/m。二期恒载包括钢轨、道砟、轨枕、防水层、保护层、桥面板、挡砟墙及人行道等重量,按 120.0 kN/m 计算,桥平面位于直

线段,且不设置纵坡,桥台小里程采用钻孔桩基础,大里程采用挖井基础。

2 理论分析模型

列车-桥梁动力相互作用空间分析模型由车辆

模型和桥梁模型组合而成,分析模型如图1所示,所用参数含义如表1所示。将车辆与桥梁看作一个联合动力体系,以轮轨接触处为界面,分别建立两者的运动方程,通过轮轨几何相容条件和相互作用平衡条件来连接,采用迭代法求解系统响应^[4]。

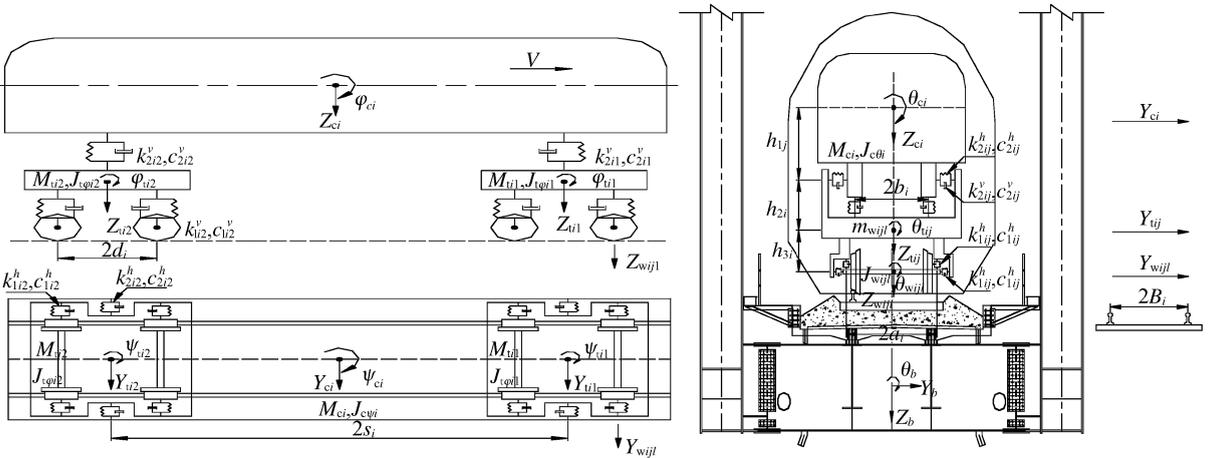


图1 理论分析模型

Fig.1 Theoretical analysis model

表1 理论模型参数含义

Table 1 Theoretical model parameters

参数符号	参数含义	参数符号	参数含义	参数符号	参数含义
M_{ci}	第 i 节车体质量	J_{cpi}	第 i 节绕 z 轴的质量惯性矩	J_{cbj}	第 i 节第 j 个转向架绕转向架 y 轴的质量惯性矩
J_{cxi}	第 i 节绕 x 轴的质量惯性矩	J_{cpi}	第 i 节绕 z 轴的质量惯性矩	J_{cpij}	第 i 节第 j 个转向架绕转向架 x 轴的质量惯性矩
J_{cpi}	第 i 节绕 y 轴的质量惯性矩	M_{tij}	第 i 节第 j 个转向架质量	J_{cpij}	第 i 节第 j 个转向架绕转向架 z 轴的质量惯性矩
N_{wi}	第 i 节每个转向架上的轮对数	ζ_j	转向架符号函数	η_{jl}	轮对符号函数
T	系统运动的总动能	V	总弹性势能	Q	阻尼总耗散能量

备注: i 表示第 i 节车; j 表示第 j 个转向架; l 表示第 l 个转向架; c 表示车体; t 表示转向架。

通过分析轮轨接触几何关系,并计算其接触法向力、蠕滑力、蠕滑力矩来明确其之间的相互作用。采用轮对蛇形波和轨道不平顺作为车-桥耦合振动系统的激励源,轮对蛇形波通过人工构造蛇形运动函数来获得,而将轨道不平顺引入轨道接触几何关系。假定轮对蛇形波为具有随机振幅及相位的正弦波,如式(1)所示。

$$y_h(t) = A_h \sin\left(\frac{2\pi v_0 t}{L_h} + \varphi_{hmi}\right) \quad (1)$$

式中: A_h 和 L_h 分别为蛇行运动的振幅及波长; φ_{hmi} 是车辆第 n 转向架的 i 轮对对应的相位角,可假设在范围内满足均匀分布; v_0 为车辆运行速度^[12]。

不计外力荷载的情况下,用轮轨关系将车辆和桥梁的动力学方程组合可得到车-桥耦合振动总方程。对于桥梁模型大量的自由度采用模态综合法来

减少其自由度^[13],并通过模态综合法变换得到桥梁振动方程,再与车辆运动方程、轮轨关系进行组合得到总的动力学方程,如式(2)所示,最后采用 Newmark- β 数值积分方法对车-桥耦合动力学方程进行求解^[4]。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{vv} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_v \\ \ddot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{vv} & \mathbf{C}_{vb} \\ \mathbf{C}_{bv} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_v \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{vv} & \mathbf{K}_{vb} \\ \mathbf{K}_{bv} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_v \\ \mathbf{X}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_v \\ \mathbf{F}_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中:下标 v 为车辆; b 为桥梁; \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别表示车辆的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{X} 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别表示系统位移、速度和加速度。

3 车-桥耦合系统振动性能评价指标

车辆通过桥时将产生振动,若这种振动超过一定

的允许范围,则会对列车的运行安全性和稳定性产生影响。如果正常的轮轨关系被破坏,将造成脱轨甚至车辆倾覆。对于桥梁结构,如果车辆过桥时发生共振,将会导致桥梁垮塌,造成严重的危害。故对车-桥耦合系统振动性能进行评价不仅保证了桥梁的安全和稳定,也对车辆安全和行车舒适提供了依据^[14]。

车辆和桥梁之间相互作用的动力响应评价指标主要从列车过桥时的桥梁动力性能、车辆运行安全性、车辆运行稳定性三个方面考虑。桥梁动力性能评价主要是桥梁结构的刚度(包括竖向和横向刚

度);车辆安全性主要考虑车辆过桥时是否出现车轮脱轨和车辆倾覆问题,一般情况下是通过轮重减载率、脱轨系数以及轮轨横向力等几个重要指标作为评价标准;车辆运行稳定性评价标准有欧洲的 Sperling 指标、日本的舒适度系数、美国的 Janeway 指标等^[15]。

根据对各国^[16-17]车-桥耦合系统振动性能评价标准的总结,并结合本文新黄河特大桥 156 m 简支钢桁梁桥的实际工程背景,将所用车-桥耦合系统振动性能评价标准总结如表 2 所列。

表 2 车-桥耦合系统振动性能评价表

Table 2 Evaluation list of vibration performance of train-bridge coupled system

评价标准		限定标准	
桥梁动力性能响应	横向自振频率	$f \geq 111/L = 0.712 \text{ Hz}$	
	竖向自振频率	$f_L = 23.85 L^{-0.593} = 1.20 \text{ Hz} < f_v < f_U = 94.76 L^{-0.748} = 2.169 \text{ Hz}$	
	横向振动幅值	$A_{\max} \leq L/2.2B = 8.25 \text{ mm}$	
	桥梁竖向加速度	$[a_v]_{\max} \leq 0.35g = 3.5 \text{ m/s}^2$	
	桥梁横向加速度	$[a_b]_{\max} \leq 0.14g = 1.4 \text{ m/s}^2$	
	桥梁跨中竖向挠度	$[\omega] \leq L/900 = 8.89 \text{ cm}$	
脱轨系数		0.8	
轮重减载率		0.6	
车辆动力性能响应	机车	61.91 kN	
	客车	24.95 kN	
	货车	47.74 kN	
	轮轨垂向力		170 kN
	机车	车体横向加速度	$\leq 2.45 \text{ m/s}^2$
		车体竖向加速度	$\leq 1.47 \text{ m/s}^2$
	客车	车体横向加速度	$\leq 0.15g = 1.5 \text{ m/s}^2$
		车体竖向加速度	$\leq 0.20g = 2 \text{ m/s}^2$
	货车	车体横向加速度	$\leq 0.50g = 5 \text{ m/s}^2$
		车体竖向加速度	$\leq 0.70g = 7 \text{ m/s}^2$
机车		≤ 2.75	
客车	Sperling 指数	≤ 2.50	
货车		≤ 3.50	

4 桥梁数值仿真模型建立

为减少仿真过程中造成的误差,确保分析结果的精度。本文严格按照《黄韩侯铁路芝阳至禹门口段增建二线新黄河特大桥 156 m 简支钢桁梁施工图》选取结构参数,利用有限元软件 ANSYS 和 MIDAS/CIVIL 建立全桥三维空间模型。

4.1 MIDAS/CIVIL 模型

MIDAS/CIVIL 模型的建立主要采用梁单元,模型坐标系 x 、 y 和 z 分别对应桥梁顺桥向、横桥向和竖桥向。材料取值如表 3 所列,全桥包括主梁在内共建立节点 695 个,梁单元 1 209 个,如图 2 中(a)所示。

4.2 ANSYS 模型

在 ANSYS 软件中采用 beam 188 号梁单元进

表 3 材料属性

Table 3 Material properties

参数	取值
钢材	Q345
弹性模量	210 GPa
泊松比	0.3
容重	$7.698 \times 10^4 \text{ N/m}^3$

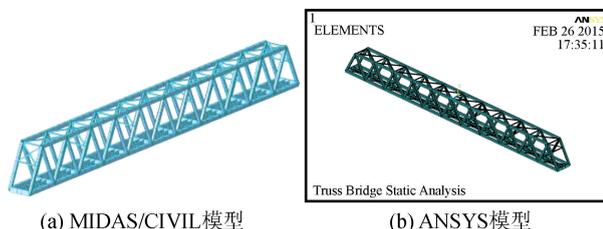


图 2 全桥有限元模型

Fig.2 Finite element model of bridge

行模拟,共建立节点 236 个,单元 1 416 个,如图 2 中(b)所示,所用材料属性如下表 4 所列。

表 4 材料属性

Table 4 Material properties

参数	钢材	混凝土
弹性模量 EX	2.1×10^{11}	3.5×10^{10}
泊松比 PRXY	0.3	0.166 7
密度 DENS	7 850	2 500

表 5 156 m 钢桁梁桥自振频率分析

Table 5 Self vibration frequency analysis of 156-m-long steel-truss bridge

振型	ANSYS 分析结果		MIDAS/CIVIL 分析结果		振型描述
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	
1	1.432	0.698	1.467	0.682	全桥横向半波正对称振动
2	1.655	0.604	1.681	0.598	全桥竖向半波正对称振动
3	1.996	0.501	2.086	0.479	全桥横向半波正对称振动
4	2.463	0.406	2.500	0.400	全桥横向全波反对称振动
5	3.876	0.258	4.081	0.245	全桥反对称扭转振动
6	4.048	0.247	4.149	0.241	全桥竖向全波反对称振动
7	4.284	0.233	4.324	0.227	全桥横向一个半波正对称振动
8	4.996	0.200	5.040	0.198	全桥竖向全波反对称振动
9	5.799	0.172	5.809	0.172	全桥横向一个半波正对称振动
10	6.385	0.156	6.235	0.160	全桥横向全波反对称振动

表 6 156 m 钢桁梁自振频率评定

Table 6 Vibration frequency evaluation of 156-m-long steel-truss girder

	软件	数值	评判	软件	数值	评判
横向刚度评定	标准	$f_g \geq 111/L = 0.712$ Hz(既有线路桥隧设备暂行技术条件)				
	ANSYS	1.432	满足	MIDAS/CIVIL	1.467	满足
	标准	$f_h \geq 110/L \sim 120/L = (0.705 \sim 0.769)$ Hz(日本铁道构造物设计标准)				
	ANSYS	1.432	满足	MIDAS/CIVIL	1.467	满足
竖向刚度评定	标准	$f \geq 90/L = 0.577$ Hz(铁路桥梁检定规范)				
	ANSYS	1.432	满足	MIDAS/CIVIL	1.467	满足
	标准	$T \leq 1.8$ s(前苏联规范)				
	ANSYS	0.698	满足	MIDAS/CIVIL	0.682	满足
竖向刚度评定	标准	$f_v \geq 70L^{-0.8} = 1.232$ Hz(日本铁路结构设计标准-混凝土结构)				
	ANSYS	1.655	满足	MIDAS/CIVIL	1.681	满足

通过对桥梁横、竖向刚度的计算与评定,由表 5 和表 6 可得知:ANSYS 和 MIDAS/CIVIL 软件建立的三维桥梁模型自振频率计算结果数据相近,模型建立准确无误;桥梁的第一阶振型为全桥横向半波正对称振动,频率为 1.432 Hz,说明桥梁横向刚度较之竖向刚度要小;桥梁模型在第 5 阶振型中才出现扭转振型,说明该桥具有良好的抗扭特性;156 m 简支钢桁梁桥横竖向刚度均满足规范要求。

6 车-桥耦合振动系统的建立

6.1 车辆模型的建立

车辆模型的建立采用俄罗斯多体系统动力学仿

5 桥梁自振频率分析

对 ANSYS 和 MIDAS/CIVIL 软件建立的三维空间桥梁模型进行计算,提取 156 m 钢桁梁桥前 10 阶自振频率、自振周期以及振型特征如表 5 所列。

为验证钢桁梁桥在振动过程中的稳定性是否具有足够的竖向和横向刚度,现依据不同国家的规范对 156 m 钢桁梁桥自振频率做以下评定,如表 6 所列。

真软件 UM(Universal Mechanism)进行。车辆间通过三维车钩和缓冲装置连接,并考虑轮轨关系,建立完整三维空间模型,每辆车计 42 个自由度。从轨顶开始自下而上建立模型,采用 6 自由度的标准轮对,如图 3 中(a)所示,随后建立转向架模型,如图 3 中(b)所示,用一系悬挂系统连接轮对与转向架,建立转向架后用二系悬挂系统连接车体,得到车辆模型。机车采用 HXD1D 型电力牵引机车,如图 3 中(c)所示;客车采用 25K 型客车,如图 3 中(d)所示;货车采用 C80 型货车。

根据常见编组情况和实际运行中编组实施办法,对机车、客车以及货车进行不同的编组,来对车-

桥耦合系统开展仿真模拟分析,具体编组情况如表 7 所列。

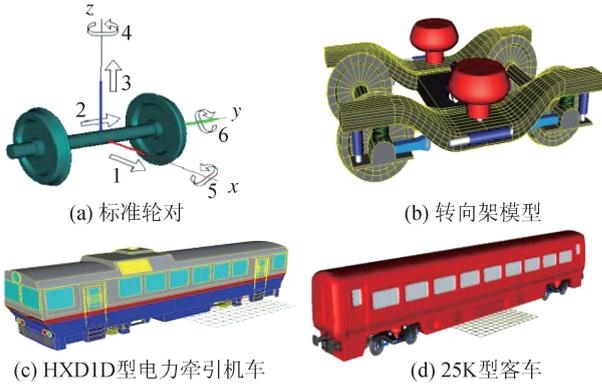


图 3 车辆模型

Fig.3 Train models

表 7 编组情况

Table 7 Marshalling conditions

所用车辆	编组情况
工况一 机车(HXD1D型)	1M(机车)
工况二 机车(HXD1D型) 客车(25 K型)	1M(机车)+16T(客车)
工况三 机车(HXD1D型) 货车(C80型)	1M(机车)+16T(货车)

6.2 车-桥耦合系统建立

对于车-桥耦合系统的建立采用 ANSYS 和 UM 软件联合进行仿真模拟。首先通过所建立的 ANSYS 桥梁模型,得到其质量、刚度矩阵以及振型;然后调用 ANSYS 中的宏文件 um.mac 自动运行 ANSYS 与 UM 软件的接口程序 ANSYS-UM,经过数据转换生成包括质量矩阵、刚度矩阵(.fem)文件和模态振型(.rst)在内的桥梁结构文件;随后利用 UM Input 的 Wizard of flexiblesubsystems 将生成数据导入到 UM 软件中。把建立好的三维车辆模型在桥梁模型上进行加载,设置轮轨关系,选用 60 kg/m 标准断面轨和 LMA 型磨耗踏面,线路按直线段考虑,为减小车辆起动初始振动的影响,线路铺设距离桥头 50 m,采用美国不平顺 5 级轨道谱以及人工构造轮对蛇形波作为系统激励源。通过 UM Train-Bridge Interaction 来实现单个机车和编组客车以 120 km/h、编组货车以 100 km/h 的速度通过桥梁结构,通过轮轨数据交互来实现对车-桥耦合振动系统的研究分析。车-桥耦合振动系统模型如图 4 所示。

7 车-桥耦合系统动力响应分析

7.1 车辆动力响应分析

通过对车辆系统不同编组情况过桥时的动力响

应进行分析,得到车辆各项动力响应参数,包括脱轨系数、轮重减载率、轮轨横(垂)向力、车体横(竖)向加速度以及 Sperling 指标的数值。



(a) 单机车

(b) 编组货车

图 4 车-桥耦合振动系统模型

Fig.4 Model of vehicle bridge coupled vibration system

图 5 和图 6 为单个机车过桥时,第 1 轴轮对左轮的脱轨系数和右轮轮重减载率随时间变化的曲线。

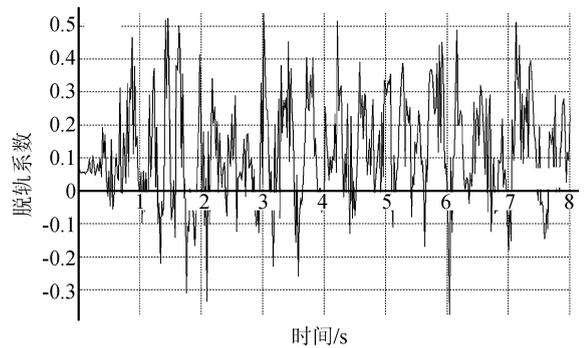


图 5 第一轴左轮脱轨系数

Fig.5 Derailment coefficient of left wheel of the first axle

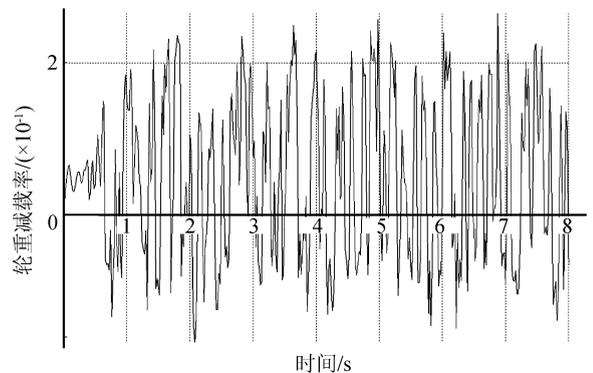


图 6 第一轴右轮轮重减载率

Fig.6 Load reduction ratio of right wheel of the first axle

从图 5 可以看出,单个机车通过钢桁梁桥时,第一轴左轮脱轨系数最大值为 0.5,小于表 2 中的限制 0.8,在规范允许的范围之内;从图 6 可以看出,单个机车通过钢桁梁桥时,第一轴右轮轮重减载率最大值为 0.26,小于表 2 中的限制 0.6,也在规范允许范围内;综上研究可知,单个机车通过钢桁梁桥时,机

车行驶安全平稳。

图 7 为编组客车过桥时的轮轨力。由图 7 可以看出,轮轨垂向力 165 kN,均远大于轮轨横向力 4.5 kN,且几乎大一个数量级;轮轨垂向力小于表 2 中的限制 170 kN,轮轨横向力远小于表 2 中的限制 61.91 kN,都在规范允许的范围之内;垂向力是通过轮轨传递给桥梁的,故对桥梁竖向位移产生显著影响。

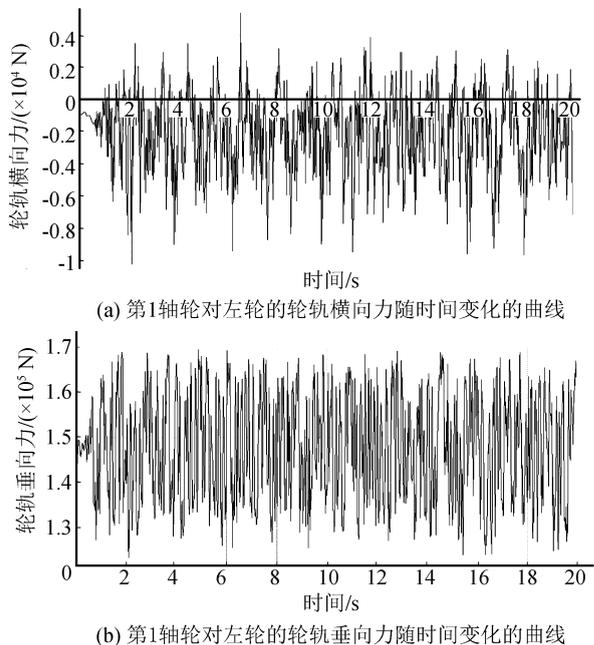


图 7 轮轨力

Fig.7 Wheel-rail force

图 8 给出了编组货车过桥时,车体的横向和竖向振动加速度随时间变化的曲线。从图 8 可以看出,编组货车过桥时,车体的横(竖)向振动加速度极值都为 0.8 m/s^2 左右,均远小于规范规定的车体横向加速度 5 m/s^2 和车体竖向加速度 7 m/s^2 ,货车车辆处于安全状态。

7.2 桥梁结构动力响应分析

通过对整个车-桥耦合系统的计算得到桥梁结构各项动力响应参数包括桥梁跨中横(竖)向位移以及横(竖)向振动加速度。

图 9 给出了单个机车过桥和编组客车过桥时,桥梁跨中的竖向位移随时间变化的曲线。由图 9 (a)可知,单个机车当行驶到跨中位置时,跨中竖向位移出现极小值;由图 9(b)可看出,编组客车当机车行驶到跨中位置时,因其机车自重大跨中竖向位移出现最小值,随后客车行驶中逐渐平稳。

当编组货车通过桥梁时,桥梁跨中的横向和竖

向位移及振动加速度随时间的变化曲线如图 10 所示。

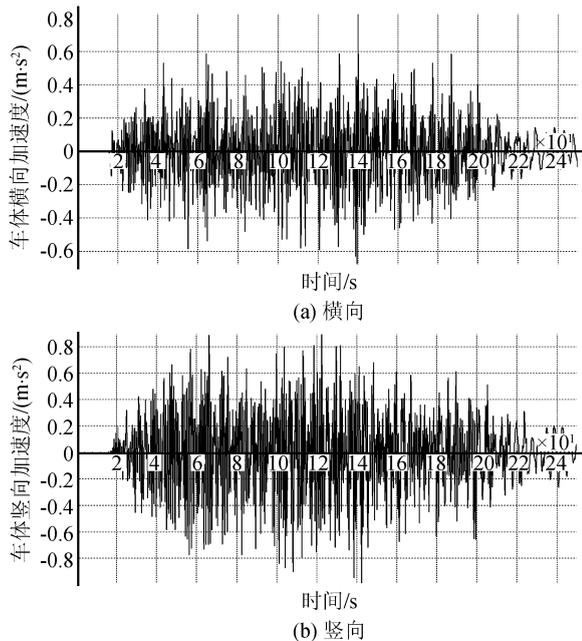


图 8 车体加速度

Fig.8 Acceleration of train body

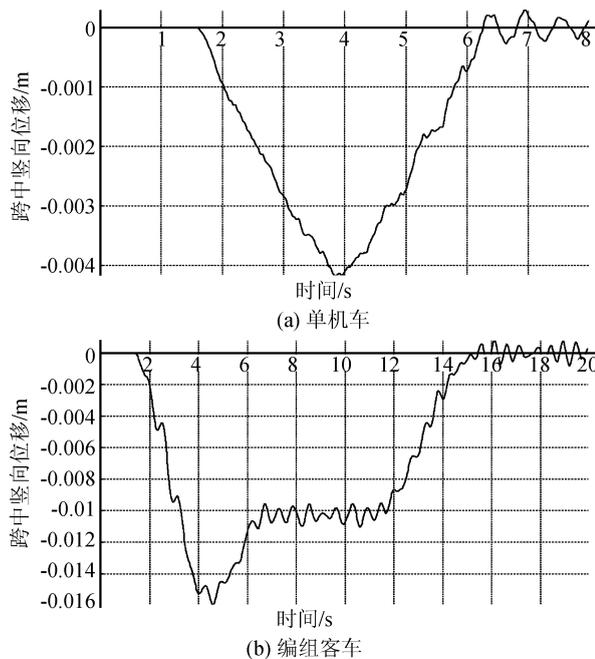


图 9 车辆过桥时桥梁跨中竖向位移

Fig.9 Vertical displacement of the bridge when the train passes

由图 10(a)可以看出,编组货车行驶过程中,桥梁跨中横(竖)向位移始终处于最大值,这是因为编组货车重量较统一,形成了持续稳定的极值。由图 10(b)可以看出,编组货车通过桥梁结构时,桥梁跨

中横向加速度最大值为 0.47 m/s^2 , 小于规范限制 1.4 m/s^2 , 桥梁跨中竖向加速度最大值为 0.28 m/s^2 , 远小于规范限制 3.5 m/s^2 , 桥梁处于安全状态。从图 9~图 10 可以看出, 由于轨道在整个分析过程中均输入了轨道不平顺和轮对蛇形波, 导致机车、客车以及货车各项参数在出桥后的动力响应并不趋向于零。但当车辆行驶在桥梁上时, 各项参数的动力响应均较车辆入桥之前和出桥之后的响应剧烈, 波动较大, 说明柔性的桥梁结构对车辆的运行稳定性乃至安全性有着极大的影响。

8 车-桥耦合振动结果分析

通过对单个机车、编组客车和编组货车通过桥

梁时的耦合计算数据的提取和总结来进行列表分析。车辆系统各项参数的动力响应数值如表 8 所列, 桥梁系统各项参数的动力响应数值如表 9 所列, 并根据表 2 的评价体系对车-桥耦合振动动力响应进行评价。结果表明, 156 m 大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合系统各项动力响应参数均在规范允许的范围, 都达到设计要求。

从表 9 可知: Sperlign 指标均处于优秀范围, 车体振动处于比较舒适、理想的状态, 说明车辆以设计时速在桥上运行的安全性和稳定性得到了保障。单个机车的车-桥耦合振动分析各项参数动力响应均小于编组客车和编组货车分析的各项参数动力响应; 单个机车、编组客车和编组货车通过桥梁时, 桥

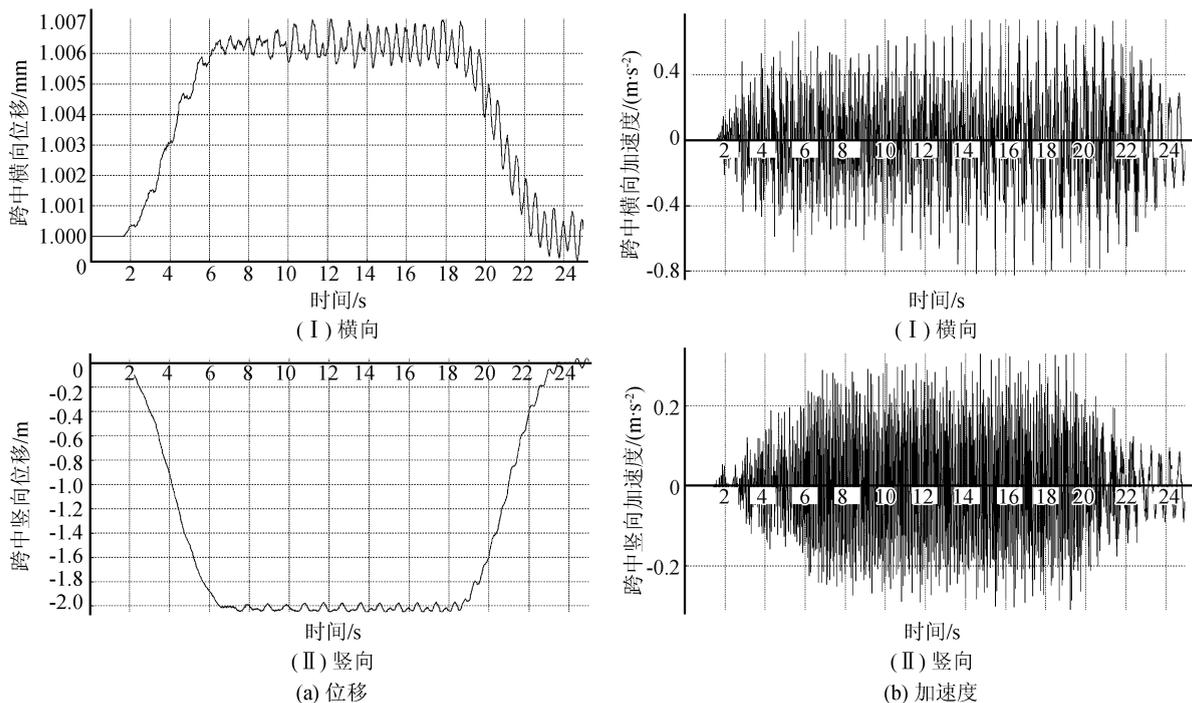


图 10 桥梁跨中位移及加速度

Fig.10 Displacement of bridge at the mid-span

表 8 车辆动力响应结果分析

Table 8 Analysis of dynamic responses of the train

动力参数项	单个机车		编组客车				编组货车				
			机车		客车		机车		货车		
	结果	评价	结果	评价	结果	评价	结果	评价	结果	评价	
脱轨系数	0.52	满足	0.52	满足	0.57	满足	0.67	满足	0.68	满足	
轮重减载率	0.24	满足	0.26	满足	0.29	满足	0.26	满足	0.19	满足	
轮轨横向力/kN	8.1	满足	11.5	满足	11.2	满足	6.7	满足	7.0	满足	
轮轨垂向力/kN	167.2	满足	165.7	满足	76.4	满足	166.8	满足	151.3	满足	
加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横向	0.33	满足	0.97	满足	0.86	满足	0.81	满足	0.84	满足
	竖向	0.42	满足	1.24	满足	0.94	满足	0.84	满足	0.92	满足
Sperlign 指标	横向	1.98	优秀	2.27	优秀	2.35	优秀	2.27	优秀	2.86	优秀
	竖向	1.87	优秀	2.43	优秀	2.44	优秀	2.22	优秀	3.01	优秀

表9 桥梁动力响应结果分析

Table 9 Analysis of dynamic responses of the bridge

动力参数项		单个机车		编组客车		编组货车	
		结果	评价	结果	评价	结果	评价
跨中位移幅值/mm	横向	1.002	满足	1.006	满足	1.007	满足
	竖向	4.3	满足	16.2	满足	20.2	满足
跨中加速度幅值/($m \cdot s^{-2}$)	横向	0.27	满足	0.59	满足	0.79	满足
	竖向	0.19	满足	0.22	满足	0.42	满足

梁跨中横向位移分别为 1.002 mm、1.006 mm 及 1.007 mm,其变化微小;跨中竖向位移幅值从小到大依次为单个机车(4.3 mm) < 编组客车(16.2 mm) < 编组货车(20.2 mm);编组货车的车-桥耦合振动分析各项参数动力响应均大于编组客车分析的各项参数动力响应,尤其是桥梁跨中横向、竖向加速度较之其他编组情况要大,说明编组货车对桥梁的振动影响较大。

9 结论

本文通过利用 ANSYS 和 UM 软件联合仿真分析实现单个机车、编组客车和编组货车以设计时速通过桥梁时,对大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动的研究。通过车辆过桥时桥梁和车辆的各项动力响应参数结果分析,可以得到如下结论:

(1) 大跨度简支钢桁梁桥横向刚度较之竖向刚度要小,且具有良好的抗扭特性,桥梁横(竖)向刚度均满足规范要求。

(2) 单个机车、编组客车和编组货车以设计时速通过 156 m 大跨度简支钢桁梁桥时,车-桥耦合系统各项动力响应参数均在规范允许的范围内,均达到设计要求,桥上行车的安全性和稳定性得到了保障。

(3) 轮轨垂向力均远大于轮轨横向力,机车垂向力最大,垂向力通过轮轨传递给桥梁,对桥梁竖向位移产生巨大影响。

(4) 单个机车、编组客车和编组货车通过桥梁时,桥梁跨中横向位移变化微小,其幅值从小到大依次为单个机车 < 编组客车 < 编组货车,单个机车当行驶到跨中位置时,跨中竖向位移出现极小值;编组客车当机车行驶到跨中位置时,因其机车自重跨中竖向位移出现最小值,随后客车行驶中逐渐平稳;编组货车行驶过程中,桥梁跨中竖向位移始终处于最大值。

(5) 编组货车通过桥梁时,桥梁跨中横向、竖向

加速度较之其他编组情况要大,可见编组货车对桥梁乃至车辆系统本身的动力影响较大,应该引起重视,实际情况中要加以注意。

参考文献(References)

- [1] 吴冲.现代钢桥(上册)[M].北京:人民交通出版社,2006.
WU Chong.Modern Steel Bridge[M].Beijing:China Communications Press,2006.
- [2] 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 Wanming, XIA He. The Train-track-bridge Dynamic Interaction Theory and Engineering Application[M]. Beijing: Science Press,2011.
- [3] 刘学毅,王平.车辆-轨道-路基耦合系统动力学[M].成都:西南交通大学出版社,2007.
LIU Xueyi, WANG Ping. Dynamics of Vehicle Track Subgrade Coupling System[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press,2007.
- [4] 夏禾,张楠.车辆与结构动力相互作用[M].北京:科学出版社,2002.
XIA He, ZHANG Nan. Dynamic Interaction of Vehicle and Structure[M]. Beijing: Science Press,2002.
- [5] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1992.
LI Guohao. Stability and Vibration of Bridge Structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House,1992.
- [6] 陈英俊.车辆荷载下桥梁振动基本理论的演变[J].桥梁建设,1975(2):21-35.
CHEN Yingjun. The Evolution of The Basic Theory of Bridge Vibration Under Vehicle Load[J]. Bridge Construction, 1975 (2):21-35.
- [7] 胡人礼.普通桥梁结构振动[M].北京:中国铁道出版社,1988.
HU Renli. Vibration of Common Bridge Structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House,1988.
- [8] 曹雪琴.钢桁梁桥横向振动[M].北京:中国铁道出版社,1991.
CAO Xueqin. Transverse Vibration of Steel Truss Bridge[M]. Beijing: China Railway Publishing House,1991.

- 学报,2006,38(12):2070-2072,2076.
- WANG Haiyun, XIE Lili. Characteristics of Near-fault Strong Ground Motions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2070-2072, 2076.
- [10] 杨迪雄, 赵岩. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 579-587.
- YANG Dixiong, ZHAO Yan. Effects of Rupture Forward Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Seismic Performance of Base-isolated Building Structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 579-587.
- [11] 杜永峰, 徐超, 李慧. 近断层地震作用下基础隔震结构抗倾覆性能的分析[J]. 兰州理工大学学报, 2012(5): 111-115.
- DU Yongfeng, XU Chao, LI Hui. Analysis of Overturing Resistant Performance of Base-isolated Structures Subjected to Near-fault Earthquake[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012(5): 111-115.
- [12] 韩森, 段燕玲, 孙欢, 等. 近断层地震动特征参数对基础隔震结构地震响应的影响参数[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 8-13.
- HAN Miao, DUAN Yanling, SUN Huan, et al. Influence of Characteristics Parameters of Near-fault Ground Motions on the Seismic Responses of Base-isolated Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 8-13.
- [13] 贺秋梅, 李小军, 杨宇. 近断层速度脉冲型地震动作用基础隔震建筑位移反应分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 1-13.
- HE Qiumei, LI Xiaojun, YANG Yu. Displacement Response Analysis of Base-isolated Buildings Subjected to Near-fault Ground Motions with Velocity Pulse[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(1): 1-13.
- [14] 李小军, 贺秋梅, 开兴军. 地震动速度脉冲对大跨斜拉桥减震控制的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(2): 272-285.
- LI Xiaojun, HE Qiumei, QI Xingjun. Seismic Mitigation Control Effects of Long-span Cable-stayed Bridges to Ground Motions with Velocity Pulse[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 272-285.
- [15] 蓝宗建, 田玉基. 钢筋混凝土巨型框架多功能减震结构的调频减振原理[J]. 工业建筑, 2002, 32(1): 4-6.
- LAN Zongjian, TIAN Yuji. Structure-control Mechanism of Multifunctional Vibration-absorption of RC Megaframe Structures[J]. Industrial Construction, 2002, 32(1): 4-6.
- [16] 戴纳新, 谭平, 周福霖. 新型压电变摩擦阻尼器的研发与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 205-214.
- DAI Naxin, TAN Ping, ZHOU Fulin. Piezoelectric Variable Friction Damper and Its Performance Experiments and Analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 205-214.
- ***
- (上接第 828 页)
- [9] 李小珍, 马文彬, 强士中. 车桥系统耦合振动分析的数值解法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 21-25.
- LI Xiaozhen, MA Wenbin, QIANG Shizhong. Coupling Vibration Analysis of Vehicle-bridge System by Iterative Solution Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 21-25.
- [10] 曾庆元, 杨毅, 骆宇安, 等. 列车-桥梁时变系统的横向振动分析[J]. 铁道学报, 1991, 2(13): 38-46.
- ZENG Qingyuan, YANG Yi, LUO Ning'an, et al. Lateral Vibration Analysis of Train-bridge time Varying System[J]. Journal of the China Railway Society, 1991, 2(13): 38-46.
- [11] 潘家英, 高芒芒. 铁路车-线-桥系统动力分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- PAN Jiaying, GAO Mangmang. The Dynamic Analysis of Railway Vehicle Line Bridge System[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [12] 王福天. 车辆系统动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- WANG Futian. Dynamics of Vehicle System[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.
- [13] 杨毅, 曾庆元. 列车-桥梁时变振动系统模态综合法[J]. 振动与冲击, 1988, 25(1): 1-9.
- YANG Yi, ZHENG Qinyuan. Train-bridge Time-varying System Mode Synthesis Technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 1988, 25(1): 1-9.
- [14] 夏禾, 张宏杰, 曹艳梅, 等. 车-桥耦合系统在随机下的动力分析及其应用[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 142-149.
- XIA He, ZHANG Hongjie, CAO Yanmei, et al. Dynamic Analysis of Train-bridge System under Random Excitations[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 142-149.
- [15] 万家. 高速列车-无砟轨道-桥梁耦合系统动力学性能仿真研究[D]. 北京: 铁道科学研究院, 2005.
- WAN Jia. Study on the High-speed Train-Ballastless Track-bridge Coupling System Dynamics Simulation[D]. Beijing: Academy of Railway Sciences, 2005.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥梁检定规范: 铁运函[2004]120[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- People's Republic of China Ministry of Railways Rail. Railway Bridges Test Specification: Transport Letter[2004]120[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [17] 国家铁路局. 轨道几何状态动态检测及评定: TB/T 3355-2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- National Railways. Dynamic Testing and Evaluation Track Geometry: TB/T 3355-2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.