

陈敦,王根会,穆彦虎,等.大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动影响因素分析[J].地震工程学报,2017,39(2):0205-0212.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0205

CHEN Dun, WANG Gen-hui, MU Yan-hu, et al. Analysis of the Influencing Factors of Train-bridge Coupled Vibration of a Large-span Simply-supported Steel Truss Railway Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 0205-0212. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0205

大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动影响因素分析^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: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。从桥梁结构的桥门架、宽跨比、曲线钢桁梁桥和车辆系统的轨道不平顺以及货车编组角度出发,研究大跨度简支钢桁梁桥车-桥耦合振动的影响因素。经过计算分析得出:钢桁梁桥桥门架对桥梁跨中加速度影响较大;曲线钢桁梁桥随着线路半径的增大,各车辆动力响应参数逐渐变小,轮轨力受到影响;钢桁梁桥宽跨比的增加使得横向刚度随之增加,桥梁横向振动变小;各项车辆动力响应均随着轨道情况变差而总体呈现逐渐增大趋势,车辆安全性、舒适性和平稳性指标逐渐变差;全列空车编组和空重混编对钢桁梁车-桥耦合系统是不利的编组形式,实际情况中应该避免。

关键词:大跨度钢桁梁桥;车-桥耦合振动;影响因素分析;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)02-0205-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0205

Analysis of the Influencing Factors of Train-bridge Coupled Vibration of a Large-span Simply-supported Steel Truss Railway Bridge

CHEN Dun^{1,2,3}, WANG Gen-hui³, MU Yan-hu¹, 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: With the rapid development of rail transportation in China, high-speed and heavy-load railways have become the trend of development in this field. In such systems, it is important to consider the interaction process between the train and the bridge, along with the influential factors, when a train passes through a bridge. In this paper, a 156-m long simply-supported steel

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。

truss bridge of the Huang Han-hou New Yellow River Railway is taken as an example. A dynamic model of the train-bridge was constructed considering a wheel-rail relationship. Serpentine movements and track irregularity were used as self-excited excitation sources of the train-bridge system. The finite element software ANSYS and UM (Universal Mechanism) were used to simulate the train-bridge coupled vibrations. The influence of the bridge structure of the portal frame, wide-span ratio, curve of the steel truss and track irregularity, as well as the marshaling coaches on the train-bridge coupled vibrations were discussed with the numerical simulations. The results showed that the gantry of the steel truss bridge had greater influence on the acceleration. As the line radius of the curved steel truss bridge increased, the dynamic responses of the train became smaller, thus affecting wheel-rail force. Moreover, with increasing wide-span ratio, the lateral stiffness of the bridge increases, and the bridge lateral vibration became smaller. When the track conditions became worse, the dynamic responses of the train increased considerably and the comfortable and stability worsened. The findings indicate that the full empty grouping and empty-weight mixed grouping schemes are harmful to the coupled system of a train-bridge, which should be avoided in practical operation.

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

0 引言

伴随我国轨道交通的迅猛发展,桥梁在跨越河谷和特殊地形路段发挥着举足轻重的作用,而简支钢桁梁桥因其自身优势广泛得到应用^[1]。同时,随着高速铁路的发展进程,车辆与桥梁的耦合振动问题变的日益突出。

列车通过桥梁时将引起桥梁结构振动,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、车辆轴重、轮轨接触以及线路状况(缺陷、钢轨接缝、道岔等)等众多影响因素^[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等或相近,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^[5]。

目前,国内许多科研院校开展了车-桥耦合振动系统影响因素的研究。曹雪琴^[4]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^[5]对各种复杂桥梁结构的车-桥耦合振动影响因素问题进行了探究。但已有研究还远远不能满足现有铁路桥型以及高速重载化的发展进程^[6],本文针对铁路钢桁梁桥型,考虑大跨度简支的特性,研究车-桥耦合振动系统的各影响因素,为车-桥耦合系统控制理论提供数据支撑,也为今后同类型桥梁动力学性能的鉴定和优化设计提供参考,具有一定的

理论和实际意义。

1 工程背景

本文以黄韩侯铁路线上大跨度简支钢桁梁桥(新黄河特大桥)作为工程背景进行车-桥耦合振动研究。黄(陵)韩(城)侯(马)铁路为我国I级电气化客货两运铁路,设计载荷为中一活载,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、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。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^[6]。

通过分析轮轨接触几何关系,并计算轮轨接触

法向力、蠕滑力及蠕滑力矩来明确轮轨之间的相互作用。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。

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

(1)

式中: A_h 和 L_h 分别为蛇行运动的振幅及波长; φ_{hni} 是车辆第 n 转向架的 i 轮对对应的相位角,可设范围满足均匀分布; v_0 为车辆运行速度^[7]。

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^[8],并通过此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^[6]。

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

(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-桥耦合振动系统的建立

3.1 桥梁模型的建立

本文采用大型有限元分析软件 ANSYS 对桥梁进行三维空间建模,模型采用 beam188 号梁单元进行仿真分析,共建立节点 236 个,单元 1 416 个,如图 1 所示,所用材料属性如表 1 所列。

3.2 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

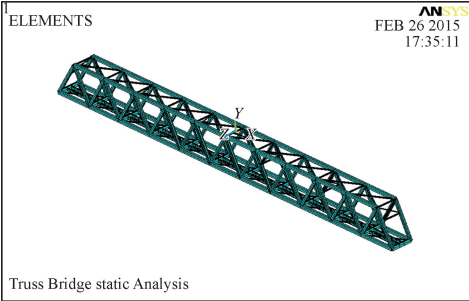


图 1 全桥有限元模型
Fig.1 Finite element model of bridge

表 1 材料属性
Table1 Material properties

参数	钢材	混凝土
弹性模量 EX/Pa	2.1×10 ¹¹	3.5×10 ¹⁰
泊松比 PRXY	0.3	0.166 7
密度 DENS/(kg·m ⁻³)	7 850	2 500

真软件 UM(Universal Mechanism)进行仿真。车辆间通过三维车钩和缓冲装置进行连接,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,随后建立转向架模型,如图 2(a)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 2(b)所示;客车采用 25K 型客车,如图 2(c)所示;货车采用 C80 型货车,如图 2(d)所示。

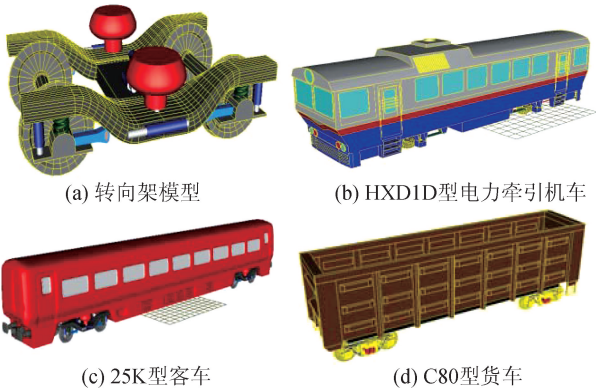


图 2 车辆模型
Fig.2 Train models

3.3 车-桥耦合系统建立

对于车-桥耦合系统的建立采用 ANSYS-UM 软件联合进行仿真模拟。首先通过所建立 ANSYS 桥梁模型,运算得到其质量、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(.fum)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 将生成数据导入得到 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,如图 3 所示为编组火车通过桥梁时的情景。

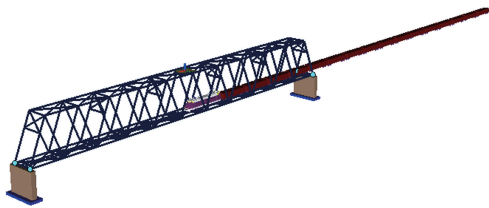


图 3 货车编组过桥车-桥耦合分析模型
Fig.3 Train-bridge coupled model

4 车-桥耦合系统振动影响因素分析

4.1 桥门架对车-桥耦合系统的影响

对于钢桁梁桥来说,桥门架在桥梁结构中起到至关重要的作用。本文将建立无桥门架的等跨钢桁梁桥,在其余各参数不改变的情况下,让单个机车通行,与有桥门架的钢桁梁桥来进行对比和分析,得到桥门架在钢桁梁桥车-桥耦合系统中所起的作用和影响,分析结果如表 2 所列。

表 2 桥梁及车辆动力响应结果

Table 2 Results of dynamic responses of the bridge and the train

动力参数项	有桥门架		无桥门架	
	结果	评价	结果	评价
桥梁	跨中位移	横向	1.002	满足
	幅值/cm	竖向	4.3	满足
	跨中加速度幅值	横向	0.27	满足
	$/(m \cdot s^{-2})$	竖向	0.19	满足
车辆	脱轨系数		0.52	满足
	轮重减载率		0.24	满足
	轮轨横向力/kN		8.1	满足
	轮轨垂向力/kN		167.2	满足
	车体加速度	横向	0.33	满足
	$/(m \cdot s^{-2})$	竖向	0.42	满足
	Sperling 指标	横向	1.98	优秀
		竖向	1.87	优秀

从表 2 可以分析得到,单个机车通过无桥门架的钢桁梁桥时,有无桥门架对桥梁跨中横(竖)向位移最大幅值影响不大,但当车辆行驶至桥梁跨中位置时,桥梁跨中横向位移达到最大幅值并在其附近持续进行振动;桥门架对桥梁跨中加速度影响较大,无桥门架的钢桁梁其竖(横)向加速度均有很大的增加;钢桁梁桥无桥门架的各车辆动力响应较之有桥门架的钢桁梁,对脱轨系数影响明显,接近临界值,其余动力响应参数变化不是很大;在钢桁梁的设计

中考虑到桥门架对车辆和桥梁动力性能的影响,应该加以设计和优化,以确定车辆的运行安全和桥梁的稳定性。

4.2 曲线钢桁梁桥对车-桥耦合系统的影响

对于车-桥耦合系统模拟过程中,桥梁上的列车轨道一般采用直线段铺设,忽略曲线段,但这种近似忽略难免会对分析结果造成一定的偏差^[9]。本文所选取的桥梁在桥上小里程 12 m 范围内位于线路半径 $R=600\text{ m}$ 的缓和曲线段上,笔者将按实际轨道情况进行模型建立,并且保证其他参数不变的情况下,仅改变线路情况,使得直线轨道变成曲线轨道布置,分别考虑缓和曲线半径为 $R=0\text{ m}$ 、 $R=800\text{ m}$ 和 $R=1\,000\text{ m}$ 的情况,以 100 km/h 时速的编组货车通过桥梁,对其进行对比分析研究。

图 4 给出了编组货车通过直线和曲线钢桁梁桥轨道时,机车第 1 轴轮对左轮脱轨系数随时间变化的曲线。

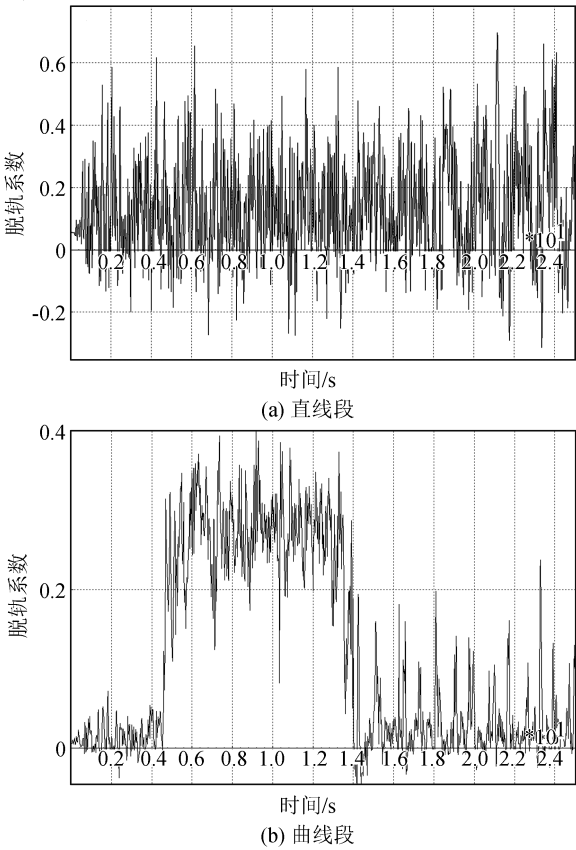


图 4 直线和曲线钢桁梁桥轮对脱轨系数随时间变化图
Fig.4 Time series of derailment coefficient of the wheel set at straight and curved section of steel-truss bridge

通过表 3 可以分析得到:编组货车通过线路半径为 0 m、600 m、800 m 和 1 000 m 的曲线钢桁梁桥,车-桥耦合系统动力响应值均在规范允许范围

内;从图 4 可知,车辆通过曲线钢桁梁桥时,车辆动力响应参数图形较之直线轨道变化较大,是因为车辆行驶至缓和曲线段车辆动力响应幅值发生波动引起的;车辆通过曲线钢桁梁桥时,桥梁跨中位移和振动加速度与通过直线钢桁梁桥的位移和振动加速度相似,影响不是很大,桥梁跨中加速度随线路半径增大随之微量增大;车辆通过曲线钢桁梁桥时,车体振动加速度变化明显,这是由于曲线钢桁梁桥线路的半径不同,车辆在轨道中心线附近摆动;轮轨横向力受到线路曲线的影响很大,轮轨垂向力也随之变化,轮轨横向力左右轮轨受到曲线轨道的影响有所不同,外侧轮横向力小于内侧轮;车辆通过曲线钢桁梁桥,随着线路半径的增大,各车辆动力响应参数逐渐变小。

表 3 曲线钢桁梁车-桥耦合系统响应结果

Table 3 Dynamic Responses of train-bridge coupled system at curved section of steel-truss bridge

		<i>R</i> =0	<i>R</i> =600 m	<i>R</i> =800 m	<i>R</i> =1 000 m
脱轨系数		0.68	0.43	0.41	0.38
轮重减载率		0.19	0.39	0.29	0.21
轮轨横向力/kN		7.0	21.1	18.7	15.2
轮轨垂向力/kN		151.3	125.8	110.4	98.4
车体加速度	横向	0.84	0.32	0.42	0.59
	纵向	0.92	0.48	0.64	0.72
Sperling 指标	横向	2.86	3.15	3.02	2.95
	纵向	3.01	3.21	3.11	3.07
跨中位移/mm	横向	1.007	1.018	1.014	1.011
	纵向	20.2	20.9	20.8	20.5
跨中加速度	横向	0.79	0.43	0.55	0.67
	纵向	0.42	0.30	0.38	0.41

5 宽跨比和行车速度对车-桥耦合系统的影响

根据已有研究表明^[10],当桁架高 *H* 不变时,变化桁架宽 *B*,主桁架及纵梁不变,只将横梁、横联和平纵联腹杆变化,会对钢桁梁桥的横向刚度产生很大的影响。我国规范^[11]规定下承式简支钢桁梁横向刚度限值 $B/L=1/20$ 。本文将分别采用宽度为 8.6、9.6、10.6、11.6 及 12.6 m 的宽度,保持系统其他参数不变进行研究,如表 4 所示。与此同时,列车行驶速度对桥梁乃至车辆本身的动力性能也产生巨大的影响^[4]。在相同宽跨比的情况下,分别又以时速 100、110、120、130 及 140 km/h 的单个机车通过桥梁,并作出影响图便于分析。

从图 5 可以看出,对于钢桁梁桥宜用宽跨比来表示横向刚度的限值。简支钢桁梁 Sperling 指标、车体横向加速度、桥梁跨中横向位移随着宽跨比的

表 4 宽跨比对车-桥耦合系统响应的影响

Table 4 Effects of wide span ratio on the dynamic responses of train-bridge coupled system

<i>B</i> /m	8.6	9.6	10.6	11.6	12.6
<i>B</i> / <i>L</i>	0.055	0.062	0.068	0.074	0.081
脱轨系数	0.52	0.36	0.41	0.39	0.27
Sperling 指标(横向)	1.98	1.59	1.50	1.26	1.09
车体横向加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	0.33	0.27	0.20	0.17	0.15
车体竖向加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	0.42	0.47	0.49	0.46	0.49
跨中横向位移/mm	1.002	0.785	0.613	0.552	0.491
跨中竖向位移/mm	4.3	4.18	4.16	4.32	4.20

增加而降低;钢桁梁桥的宽跨比的增加,主要导致桥梁横向振动的减小,对竖向振动的影响很小;从表 4 可知,计算的车辆速度(100~140 km/h)和宽跨比(0.055~0.081)范围内,车辆和桥梁结构各动力响应均满足响应规范的要求;随着车辆速度的增加,车辆的加速度和位移数值也随之增加,车辆的舒适性和安全性不断下降,桥梁结构的动力响应总体呈现增大趋势,在计算车速范围内还未出现共振现象。

6 轨道不平顺对车-桥耦合系统的影响

轨道不平顺作为车-桥耦合系统主要的激励源,对车辆行驶安全性、平稳性和舒适性都有重要的影响^[12]。各国都采用不同的轨道谱来表征轨道的不平顺(表 5)。

表 5 轨道谱分类

Table 5 Classification of track spectrum

轨道谱	分类				
美国	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
(FRA)	(FRA-1)	(FRA-2)	(FRA-3)	(FRA-4)	(FRA-5)
德国	高干扰(GER-H)			低干扰(GER-L)	
(GER)					

在其余参数不变的情况下,采用时速 120 km/h 编组客车通过桥梁来进行不同轨道不平顺作用的研究,其计算结果见表 6。

从表 6 可以看出,轨道情况按照下列顺序依次变差:GER-L>GER-H>FRA-6>FRA-5>FRA-4>FRA-3>FRA-2>FRA-1;车辆系统中,各项车辆动力响应数值均随着轨道情况变差而总体呈现逐渐增大趋势,车辆安全性、舒适性和平稳性指标逐渐变差;轨道不平顺对桥梁跨中横向位移影响变化微小,其他桥梁结构动力响应参数随轨道不平顺情况变差而增加,轨道不平顺对桥梁结构的影响较为明显。

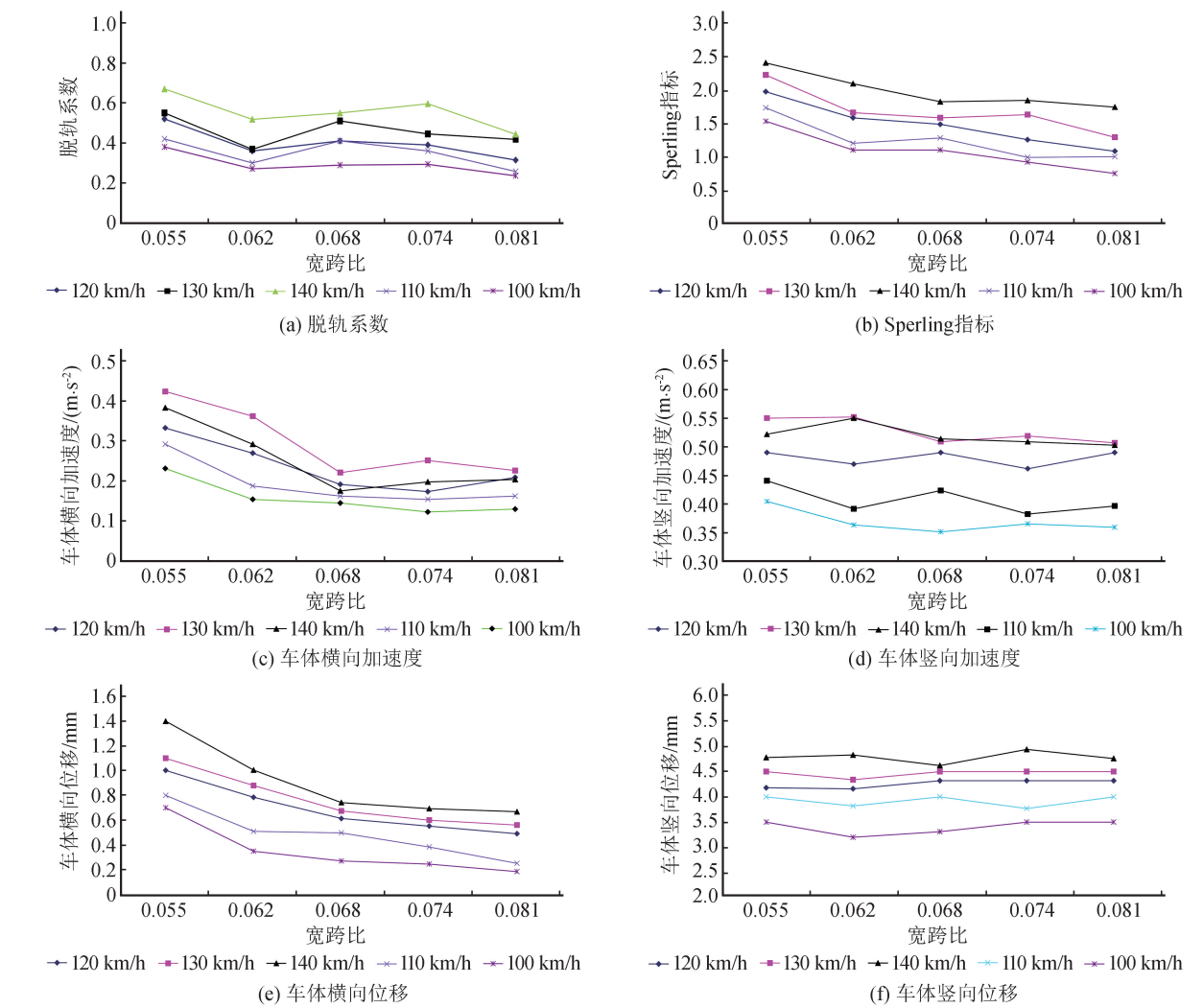


图 5 宽跨比及车速对车-桥耦合系统响应的影响

Fig.5 Effect of wide span ratio and speed on the dynamic responses of train-bridge coupled system

表 6 不同轨道不平顺作用下各动力响应分析

Table 6 Dynamic response analysis under different track irregularity

动力响应		轨道不平顺							
		FRA-1	FRA-2	FRA-3	FRA-4	FRA-5	FRA-6	GER-L	GER-H
脱轨系数		0.7	0.65	0.63	0.6	0.57	0.4	0.32	0.11
	轮重减载率	0.49	0.41	0.45	0.4	0.29	0.28	0.26	0.14
车体加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	横向	1.35	1.27	1.1	0.95	0.86	0.73	0.64	0.52
	竖向	1.38	1.33	1.27	1.18	0.94	0.87	0.77	0.67
Sperling 指标	横向	2.48	2.42	2.39	2.33	2.35	2.09	2.1	1.9
	竖向	2.48	2.45	2.45	2.44	2.44	2.33	2.22	2.11
跨中位移/mm	横向	1.637	1.445	1.037	1.348	1.006	0.996	0.887	0.754
	竖向	21.4	19.4	18.4	17.5	16.2	15.3	14.2	13.9
跨中加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	横向	0.8	0.77	0.73	0.54	0.59	0.36	0.33	0.2
	竖向	0.58	0.58	0.44	0.4	0.22	0.21	0.17	0.13

7 货车编组对车-桥耦合系统的影响

根据以往对车-桥耦合振动的研究证明,货车编组情况对整个车-桥系统影响较大。为探究货车编组情况对车-桥耦合系统的影响,现采用如表 7 所列

的三种编组情况,以相同的车速和轨道不平顺情况通过桥梁模型进行分析,计算结果如表 8 所列。

通过对表 8 数据的分析得到如下结论:空车作用下的钢桁梁桥竖向位移比重车和混合编组时小很多,主要是因为空车轴重比其他的轴重小,所以车辆

表 7 编组工况

Table 7 Marshaling conditions

工况	编组情况	车速/(km·h ⁻¹)	轨道不平顺
工况一	1M(HXD3 型机车)+16T(空车)	100	美国 5 级功率谱
工况二	1M(HXD3 型机车)+16T(C80 型重车)	100	美国 5 级功率谱
工况三	1M(HXD3 型机车)+8T(空车)+8T(C80 型重车)	100	美国 5 级功率谱

表 8 货车编组对车-桥系统响应的影响

Table 8 Effect of freight car marshalling on dynamic responses of train-bridge coupled system

动力响应参数	全列空车	全列重车	空重混编
脱轨系数	1.3	0.68	0.98
轮重减载率	0.57	0.19	0.35
轮轨横向力/kN	7.46	7.0	8.35
轮轨垂向力/kN	119.4	151.3	133.6
车体加速度/(m·s ⁻²)	横向	1.14	0.84
	竖向	1.35	0.92
Sperling 指标	横向	3.35	2.86
	竖向	3.87	3.01
跨中位移/mm	横向	1.924	1.007
	竖向	17.2	20.2
跨中加速度/(m·s ⁻²)	横向	1.5	0.79
	竖向	0.25	0.42

轴重是影响桥梁竖向位移的主要原因;桥梁跨中横向位移和跨中横向加速度在全列空车过桥时数值最大,在全列重车过桥时数值最小,这是因为随着整个列车质量的增大,在一定程度上抑制了列车的振动;脱轨系数、轮重减载率、车体横向加速度、车体竖向加速度和 Sperling 指数在全列空车作用下数值最大,空重混编作用下其次,在重载作用下最小;列车空载时的轮轨横向力以及轮轨垂向力比重载时要小,特别是轮轨垂向力;全列空车编组和空重混编对钢桁梁车-桥耦合系统是不利的编组形式,实际情况中应当避免。

8 结论

本文利用 ANSYS 和 UM 软件联合仿真分析技术实现对钢桁梁桥桥门架、曲线钢桁梁、宽跨比、车辆行车速度、轨道不平顺和货车编组等因素对钢桁梁桥车-桥耦合振动系统的影响分析,得出如下主要结论:

(1) 单个机车通过无桥门架的钢桁梁桥时,桥门架对桥梁跨中竖(横)向位移最大幅值影响不大,但当车辆行驶至无桥门架的钢桁梁桥跨中位置时,桥梁跨中横向位移达到最大幅值并在其附近持续进行振动;桥门架对桥梁跨中加速度影响较大,对其

竖、横向加速度均有显著的增加。同时,无桥门架对脱轨系数影响明显,接近临界值,其余动力响应参数变化不是很大。

(2) 编组货车通过线路半径为 0、600、800 和 1 000 m 的曲线钢桁梁桥时,车-桥耦合系统动力响应值均在规范允许范围内。车辆通过曲线钢桁梁桥时,车辆动力响应参数图形较之直线轨道变化较大。曲线钢桁梁桥对桥梁跨中位移和振动加速度影响不是很大,桥梁跨中加速度随线路半径增大随之微量增大,同时对车体振动加速度变化明显。轮轨横向力受到线路曲线的影响很大,轮轨垂向力也随之变化,外侧轮横向力小于内侧轮;随着线路半径的增大,各车辆动力响应参数逐渐变小。

(3) 简支钢桁梁 Sperling 指标、车体横向加速度、桥梁跨中横向位移随着宽跨比的增加而降低;钢桁梁桥宽跨比的增加,主要导致桥梁横向振动的减小,对竖向振动的影响很小。随着车辆速度的增加,车辆的加速度和位移数值也随之增加,车辆的舒适性和安全性不断下降,桥梁结构的动力响应总体呈现增大趋势。

(4) 对于不同的轨道不平顺工况,各项车辆动力响应数值均随着轨道情况变差而总体呈现逐渐增大趋势,车辆安全性、舒适性和平稳性指标逐渐变差;轨道不平顺对桥梁跨中横向位移影响变化微小,其他桥梁结构动力响应参数随轨道不平顺情况变差而增加,轨道不平顺对桥梁结构的影响较为明显。

(5) 空车作用下的钢桁梁桥竖向位移比重车和混合编组时小很多。桥梁跨中横向位移和跨中横向加速度在全列空车过桥时数值最大,在全列重车过桥时数值最小。脱轨系数、轮重减载率、车体横向加速度、车体竖向加速度和 Sperling 指数在全列空车作用下数值最大,空重混编作用下其次,在重载作用下最小。列车空载时的轮轨横向力以及轮轨垂向力比重载时要小,特别是轮轨垂向力。全列空车编组和空重混编对钢桁梁车-桥耦合系统是不利的编组形式,实际情况中应当避免。

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 (Volume 1)[M].Beijing:China Communications Press,2006.(in Chinese)

[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 Wan-ming, XIA He. Train-track-bridge Dynamic Interaction: Theory and Engineering Application [M]. Beijing: Science Press,2011.(in Chinese)

[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 Xue-yi, WANG Ping. Dynamics of Vehicle Track Subgrade Coupling System [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press,2007.(in Chinese)

[4] 曹雪琴.钢桁梁桥横向振动[M].北京:中国铁道出版社,1991.
CAO Xue-qin. Transverse Vibration of Steel Truss Bridge[M]. Beijing:China Railway Publishing House,1991.(in Chinese)

[5] 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 Xiao-zhen, MA Wen-bin, QIANG Shi-zhong. Coupling Vibration Analysis of Vehicle-bridge System by Iterative Solution Method[J].Journal of Vibration and Shock,2002,21(3): 21-25.(in Chinese)

[6] 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.(in Chinese)

[7] 王福天.车辆系统动力学[M].北京:中国铁道出版社,1994.
WANG Fu-tian. Dynamics of Vehicle System [M]. Beijing: China Railway Publishing House,1994.(in Chinese)

[8] 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, ZENG Qing-yuan. Train-bridge Time-varying System Mode Synthesis Technique[J], Journal of Vibration and Shock,1988,25(1):1-9.(in Chinese)

[9] 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 Hong-jie, CAO Yan-mei, et al. Dynamic Analysis of Train-bridge System under Random Excitations [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20 (3): 142-149. (in Chinese)

[10] 曾庆元,郭向荣.列车-桥梁时变系统振动分析理论与应用[M].北京:中国铁道出版社,1999.
CENG Qing-yuan, GUO Xiang-rong. Theory and Application of Train Bridge Time Variant System Vibration Analysis [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999. (in Chinese)

[11] 中华人民共和国铁道部.TB10002.1-99,铁路桥涵设计基本规范[S].北京:中国铁道出版社,2000.
The Ministry of Railways of the people's Republic of China. The TB10002.1-99, Railway Bridge and Culvert Design Basic Specification[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.(in Chinese)

[12] 陈果,翟婉明.铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J].西南交通大学学报,1999,34(2):138-142.
CHEN Guo, ZHAI Wan-ming. Numerical Simulation of the Stochastic Process of Railway Track Irregularities[J].Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34 (2): 138-142. (in Chinese)