

车桥耦合振动的拱桥吊杆应力冲击系数分析*

朱志辉^{1,2}, 罗思慧¹, 张磊¹, 王力东^{1,2}, 余志武^{1,2}, 孟鑫³

(1. 中南大学土木工程学院 长沙, 410075) (2. 中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室 长沙, 410075)

(3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所 北京, 100081)

摘要 基于车桥耦合振动理论及地基微波雷达现场试验,研究了高速铁路拱桥的吊杆应力冲击系数。列车和轨道-桥梁模型分别采用刚体动力学和有限元方法建立,两子系统间通过轮轨线性 Hertz 接触理论实现耦合。采用地基微波雷达对吊杆两端位移进行测试,分析得到桥梁动力特性、吊杆应力时程及其冲击系数。对比地基微波雷达试验数据,验证理论模型的正确性,并基于该模型分析车速、单双线行驶和轨道不平顺对吊杆应力冲击系数的影响规律。结果表明:吊杆应力冲击系数随车速的增加而增大,当车速为 300 km/h 时车桥共振导致吊杆应力冲击系数显著增大;德国低干扰轨道谱样本对吊杆应力冲击系数影响较小,但随着轨道平顺性的劣化,吊杆应力冲击系数显著增大。

关键词 列车-轨道-桥梁耦合系统; 地基微波雷达; 系杆拱桥; 吊杆; 冲击系数

中图分类号 TH744; U238

引言

系杆拱桥因其良好的跨越能力和优美的造型得以广泛应用^[1],吊杆是其关键受力构件,对拱桥安全性具有重要影响。吊杆失效轻则引起吊杆静张力重分布,对拱桥结构整体受力安全产生不利影响,重则导致桥面坍塌等恶性事故^[2]。车辆荷载产生的冲击作用会导致吊杆在远低于其静力强度的情况下发生疲劳失效^[3]。因此,研究车辆作用下的拱桥吊杆应力冲击系数,对桥梁检测、评估以及维护等工作具有重要意义。Huang 等^[4]对中承式钢管混凝土拱桥在高速公路车辆作用下主梁的冲击系数进行了研究。Shao 等^[5]研究了桥梁粗糙度和车速对吊杆应力冲击系数的影响。Malm 等^[6]指出铁路拱桥吊杆约 60% 的变幅循环应力源自车桥振动。因此,为准确分析移动列车作用下的吊杆冲击效应,应基于列车-轨道-桥梁耦合系统模型开展研究。朱劲松等^[7]采用自主编制的公路车辆-桥梁耦合振动计算程序分析了中下承式钢管混凝土系杆拱桥中结构阻尼、路面不平顺度、车速及车重对吊杆应力冲击系数不均匀性的影响。朱志辉等^[8]基于车-线-桥耦合动力学模型,采用虚拟激励法从随机振动的角度研究了车速和轨道不平顺对重载铁路拱桥吊杆应力的影响。通常在桥梁局部构件设计时,一般采用影响线

加载得到局部活载杆件的静应力,并通过动力放大系数考虑动力效应^[9],该方法被多个国家的规范所采用。但是,高速铁路桥梁动力系数受车速等因素影响显著,上述方法不够准确^[10],因此需要进一步针对高速铁路拱桥吊杆应力冲击问题开展理论研究。

现场测试及结构健康监控是评估桥梁动力响应及冲击系数的另一有效手段^[11],通过试验获得桥梁基本动力特性,也可有效提高数值仿真精度。相对于传统位移和吊杆应力测试方法,地基微波雷达具有远程非接触、环境因素干扰小、测试精度高和不受天窗时间限制等优点,在高速铁路大跨度桥梁变形监测上具有较好的应用^[12]。Maizar 等^[13]将雷达测试技术与数值模型结合,用于检测桥梁固有频率的变化。黄声享等^[14]将地基微波干涉雷达与 GPS 技术进行对比,表明地面微波干涉雷达技术可以精细地测量桥梁挠度的动态变化,并反映其动态变形特征。

针对上述问题,笔者主要研究了移动列车作用下不同行车条件对高速铁路系杆拱桥吊杆应力冲击系数的影响规律。首先,基于车桥耦合动力学理论建立了列车-轨道-桥梁耦合系统模型;其次,以海南东环铁路万宁系杆拱桥为例,采用地基微波雷达测试了该桥的行车动力响应,并基于试验数据验证了万宁桥理论模型的正确性;最后,基于该模型研究了行车速度和轨道不平顺对吊杆应力冲击系数的影响。

* 国家自然科学基金资助项目(51678576);国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201204)

收稿日期:2018-11-05;修回日期:2019-03-05

1 吊杆应力冲击系数计算模型

1.1 列车-轨道-桥梁耦合系统模型

列车-轨道-桥梁耦合系统模型分为车辆和轨道-桥梁两部分子系统。单节车辆简化为由 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对以及一系和二系悬挂组成的质量-弹簧-阻尼器系统,考虑车体、转向架的沉浮和点头自由度以及轮对的沉浮自由度,基于刚体动力学方法建立 10 自由度车辆模型。基于有限元方法建立轨道-桥梁子系统,两子系统之间通过线性 Hertz 轮轨接触模型进行耦合,则车辆-轨道-桥梁耦合系统动力方程^[15-16]表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_v \\ \ddot{\mathbf{X}}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_v \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{bmatrix} + \mathbf{K}_{\text{sys}} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_v \\ \mathbf{X}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_v \\ \mathbf{F}_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: \mathbf{M} 、 \mathbf{K} 和 \mathbf{C} 别为质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; \mathbf{X} 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为节点位移、速度和加速度向量; \mathbf{F} 为节点荷载向量;下标 v, b 和 sys 分别代表车辆子系统、轨道-桥梁子系统和车辆-轨道-桥梁耦合系统。

矩阵和向量的具体形式可参考文献[17],采用 Newmark- β 法对式(1)进行求解。

1.2 吊杆应力冲击系数

基于试验测量或列车-轨道-桥梁耦合系统模型计算得到吊杆两端节点的位移时程 $X_{\text{top}}(t)$ 和 $X_{\text{bot}}(t)$,则吊杆动应力时程 $\sigma_d(t)$ 表示为

$$\sigma_d(t) = \frac{X_{\text{bot}}(t) - X_{\text{top}}(t)}{L} E \quad (2)$$

其中: L 和 E 分别为吊杆长度和弹性模量。

《铁路桥梁检定规范》(铁运函[2004]120 号)指出,动力系数为列车运行对结构产生的动态反应与静态反应之比,则吊杆应力动力系数可表示为

$$1 + \mu = \sigma_{\text{dmax}} / \sigma_{\text{smax}} \quad (3)$$

其中: μ 为吊杆应力冲击系数; σ_{dmax} 为动力分析时吊杆最大动应力; σ_{smax} 为吊杆最大静应力。

根据《铁路桥涵设计基本规范》(TB10002.1-2005),吊杆动力系数(dynamic coefficient, 简称 DC)可以写为

$$\text{DC} = 1 + \alpha \left(\frac{6}{30 + L_0} \right) \quad (4)$$

其中: $\alpha = 4(1-h) \leq 2$, h 为填土厚度;对于局部活载杆件, L_0 为影响线加载长度。

基于 Matlab 语言编制了车桥耦合振动的吊杆应力冲击系数计算程序,计算流程如图 1 所示。

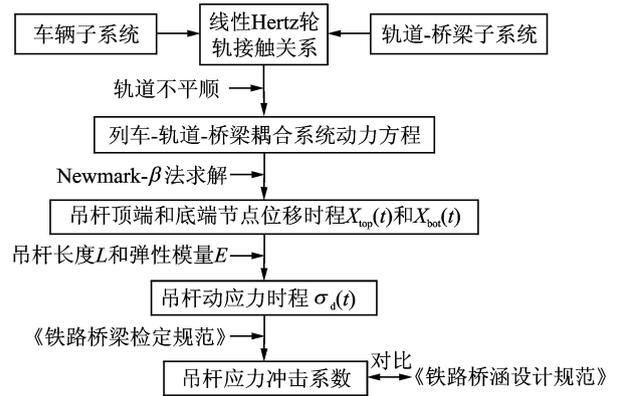


图 1 吊杆应力冲击系数求解流程

Fig. 1 Flow of solving stress impact factor of suspender

2 地基微波雷达测试原理及试验验证

近年来,雷达技术逐渐应用于桥梁挠度测量、结构损伤检测和动态变形监测等领域^[18]。地基微波雷达测试原理由线性调频连续波(linear frequency modulated continuous wave, 简称 LFM CW)、相位干涉测量技术和位移投影技术^[12]组成。LFM-CW 型雷达具有低截获概率特性,测试精度受目标物体运动速度影响较小,波束抗干扰能力强,能够进行多目标精准识别和远距离测量^[20]。地基微波雷达工作原理如图 2(a)所示,频率带宽为 B 的微波信号以时间周期 T 循环重复发射,经被测目标反射后的回波信号与发射信号之间存在 τ 的时间延迟,将二者混频后得到的差拍信号进行解调得到目标位移。在初始频率为 f_0 的情况下,差拍信号 $v_B(t)$ ^[20] 可表示为

$$v_B(t) = \eta \exp \left\{ j \left[2\pi \frac{B}{T} \tau t + 2\pi f_0 \tau - \pi \frac{B}{T} \tau^2 \right] \right\} \quad (5)$$

其中: η 为信号衰减系数; j 为虚数单位。

根据差拍信号的中心频率 f_B 和电磁波波速 c 即可得到目标距离 R

$$R = f_B c T / 2B \quad (6)$$

图 2(b)所示的相位干涉测量技术可以实现高精度的动态位移测量^[12]。被测目标在电磁波传播方向上的运动导致了物体表面反射信号之间的相位差 $\Delta\varphi$,则沿波传播方向位移 d_r 可以表示为

$$d_r = \frac{c}{f} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (7)$$

其中: f 为地基微波雷达的工作频率,可取 10 GHz / 24 GHz ISM (ISM 为国际通用的工业、科学和医学雷达工作频段)。

由于雷达的发射波长为厘米级,通过相位差估计目标位置可以达到很高的精度。

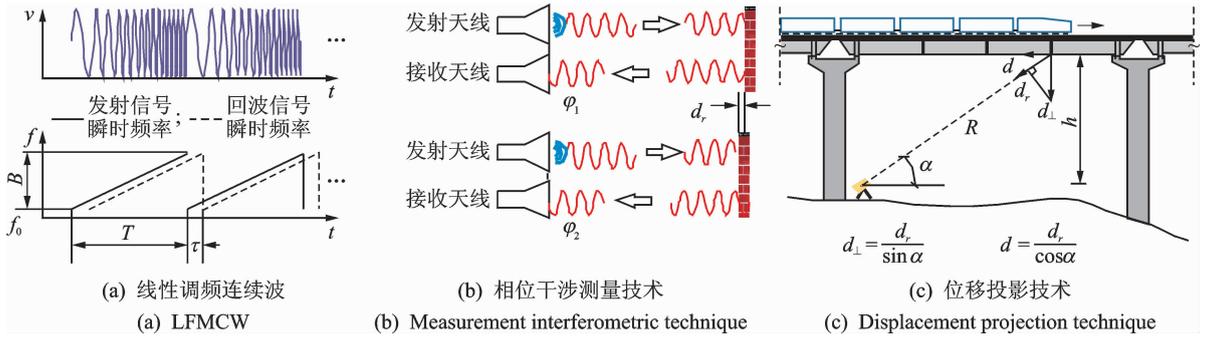


图 2 地基微波雷达测试原理

Fig. 2 Testing principle of ground-based microwave radar

在实际测试中,地基微波雷达测量结果为沿波传播方向的径向位移,还需基于如图 2(c)所示的位移投影技术^[12]将其转化为垂向和水平位移变化值。雷达测试系统直接测量得到距离变化量 d_r 和仰角 α ,通过几何计算即可得到垂向位移 d_{\perp} 和水平位移 d 。

本研究雷达采用 $B=300$ MHz 的步进频率波形,探测视角不小于 30° ,最大测距可达 750 m,最高采样频率为 200 Hz。在动态变形检测系统中,通过调整测量距离和工作频段可使位移估计精度优于 0.01 mm。

为验证地基微波雷达位移测试精度,以图 3 所示的移动模型车过 5 跨简支梁为测试对象,在试验室内分别采用动态位移传感器(linear variable differential transformer, 简称 LVDT)和地基微波雷达对简支梁跨中位移响应进行对比测试,室内试验布置如图 4 所示。其中 LVDT 量程为 50 mm,非线性误差为 0.25%。从图 5 给出的 2 种方法测试得到的第 3 跨跨中竖向位移时程对比结果可以看出,2 种

测试方法的位移测试时程曲线结果吻合较好。其中动态位移传感器和地基微波雷达测量的跨中位移最大值分别为 0.578 和 0.597 mm,二者误差仅为 3.29%,表明地基微波雷达可以较好地应用于桥梁动挠度的试验测量。

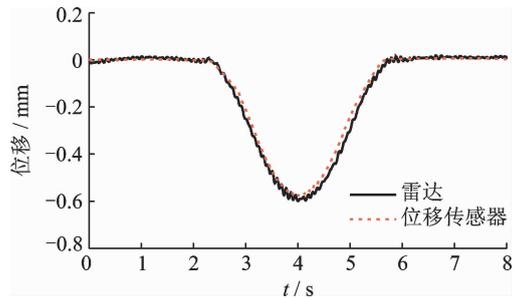


图 5 跨中测点位移时程曲线对比

Fig. 5 Comparison of displacement time history curve of mid-span measurement point

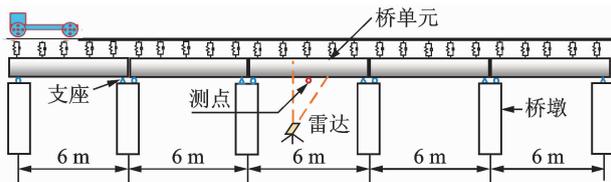


图 3 5 跨简支梁试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of five-span simply supported beam test

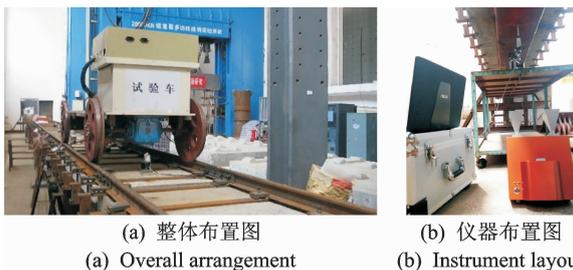


图 4 试验现场布置图

Fig. 4 Test site layout

3 万宁桥现场行车动力响应试验

3.1 桥梁概况

海南万宁系杆拱桥为南北走向(海口—三亚)的预应力混凝土下承式系杆拱桥,桥梁全长为 63.5 m,跨度为 61.5 m,拱轴线为二次抛物线($y = x^2 / 76.875$),矢跨比为 1/5。万宁桥桥型布置及吊杆编号如图 6 所示。线路等级为铁路 I 级,桥面铺设双线有砟轨道,道砟厚度为 0.63 m,线间距为 4.6 m,设计时速为 250 km/h。梁体混凝土重度 γ 取 26.25 kN/m³,二期恒载按 210 kN/m 考虑。桥梁主梁、拱肋、横撑和挡渣墙均采用 C55 混凝土。桥面上共有 18 根间距为 6 m 的钢绞线柔性吊杆,截面积为 1.169×10^{-2} m²,抗拉强度为 1 860 MPa。拱肋为钢筋混凝土构件,高为 2.0 m,拱肋净宽为 1.0 m。

3.2 万宁桥试验方案

万宁桥上跨城市主干道,且处于通车运营阶段,

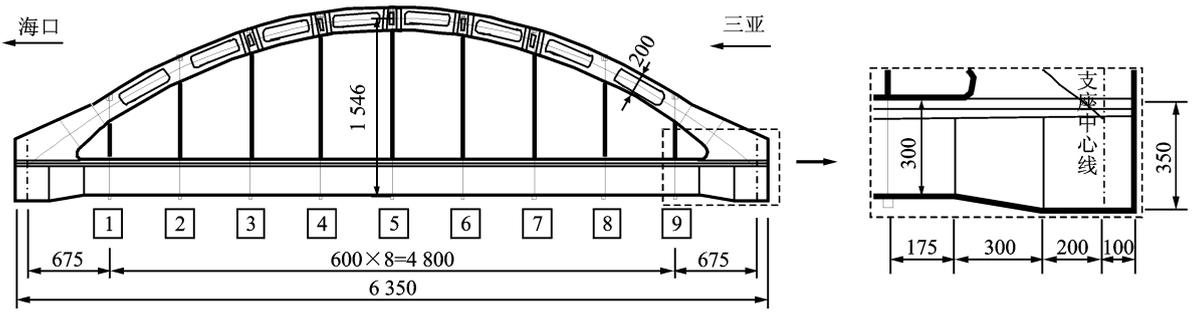


图 6 万宁桥桥型布置图(单位:cm)

Fig. 6 The layout drawing of Wanning Bridge (unit: cm)

地基微波雷达可做到非接触多测点的位移精确测量,相较于传统测量方法更为简便。2017 年 1 月,采用地基微波雷达对万宁桥在 CRH1A 型列车通行状态下的动态变形进行了测试,并根据桥梁动态响应数据分析其自振频率和吊杆动应力。测点布置如图 7 所示,CD₁ 为主梁 3/10 跨行车侧测点,CD₂ 和 CD₃ 分别为跨中行车侧 5# 吊杆顶端测点和底端测点。

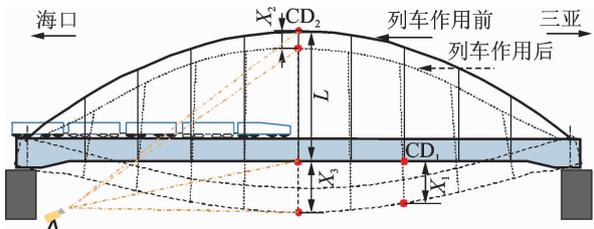


图 7 万宁桥动力测试示意图

Fig. 7 Wanning Bridge deformation test diagram

现场测试如图 8 所示,将地基微波雷达置于万宁桥下城市主干道上,调整角度对准试验测点后进行动态变形测量。地基微波雷达工作频段为 24 GHz ISM,采样频率为 200 Hz。根据试验方案对万宁桥进行了多组试验,表 1 给出了其中 2 组测量试验的工况信息。工况 1 可根据明显的余振响应得出桥梁自振特性;工况 2 同时测量了吊杆两端位移时程响应,可计算得到吊杆动应力时程曲线。

表 1 试验测量工况

Tab. 1 Test measurement cases

工况	测点	列车类型	车辆质量/t	上/下行	车速/(km · h ⁻¹)
1	CD ₁	CRH1A	49.2/42	下行	120
2	CD ₂	CRH1A	49.2/42	上行	215
	CD ₃				

3.3 测试结果分析

从图 9 给出的工况 1 的 CD₁ 位移时程曲线可



(a) 现场行车试验
(a) Field traffic test



(b) 3/10 跨边缘测点
(b) 3/10 spanning edge measuring points



(c) 吊杆两端测点
(c) Measuring points at both ends of the boom

图 8 现场行车试验及测点位置

Fig. 8 Field traffic test and location of measuring points

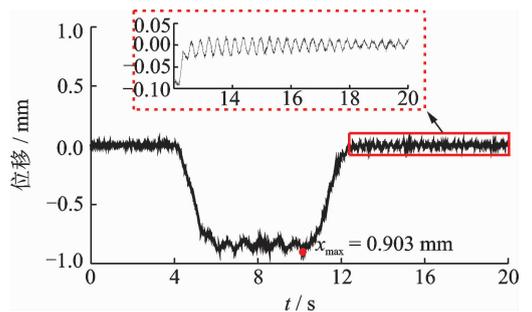


图 9 工况 1 的 CD₁ 测点位移

Fig. 9 Displacement test results of CD₁ in case1

以看出,列车经过时吊杆产生了明显位移波动,CD₁ 位移最大值为 0.903 mm。根据列车出桥后的桥梁自由振动时程曲线,可计算得到万宁桥阻尼比为 0.039 6,1 阶竖向自振频率为 3.373 Hz,大于《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)规定的最小限值 2.058 Hz(23.58L^{-0.592}),表明万宁桥刚度满足高速铁路的设计要求。

图 10 给出了由工况 2 的 CD₂ 和 CD₃ 之间的相对位移变化值计算得到的行车侧 5# 吊杆应力时程曲线,吊杆应力最大值为 16.837 MPa,吊杆应力冲击系数为 0.093,小于《铁路桥涵设计基本规范》推荐公式所计算的吊杆应力冲击系数 0.211。

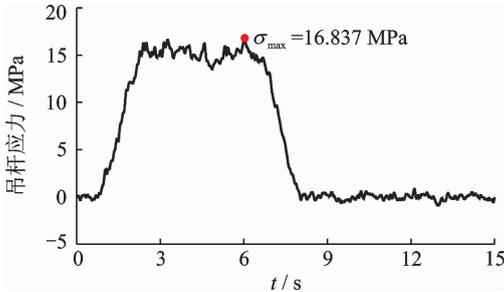


图 10 工况 2 的 5# 吊杆应力

Fig. 10 Stress of 5# suspender in case2

4 万宁桥理论模型及验证

采用有限元软件 Ansys 建立如图 11 所示的万宁桥轨道-桥梁有限元模型,其中:桥面板采用板单元 SHELL 181 模拟;拱肋、桥墩、横纵梁、横撑、钢轨和轨枕均采用梁单元 BEAM188 模拟;吊杆采用杆单元 LINK180 模拟;扣件、道砟和支座等均采用弹簧单元 COMBIN14 模拟。为防止钢轨和轨枕发生刚体转动,分别约束了钢轨的 Rot_x 和轨枕的 Rot_y 方向自由度,桥墩墩顶采用刚性支座,墩底固结。为模拟列车上桥时的初始振动状态,在桥梁两端各添加了 28.5 m 长的轨道延长段。考虑配筋率的影响,混凝土主梁弹性模量为 3.99×10^{10} Pa,密度为 2 973 kg/m³,拱肋弹性模量为 3.91×10^{10} Pa,密度为 2 625 kg/m³,二者泊松比均为 0.3,桥墩和轨枕采用 C50 混凝土。扣件及道砟参数如表 2 所示。

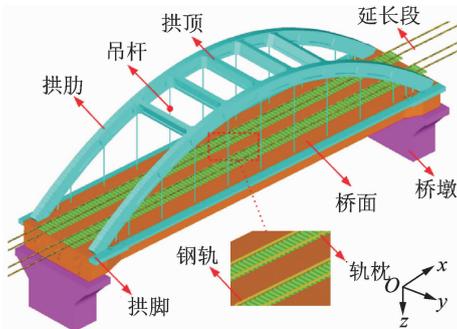


图 11 万宁桥有限元模型

Fig. 11 Finite element model of Wanning Bridge

表 3 给出了万宁桥前 10 阶自振频率和振型的有限元计算结果,其中主梁竖弯自振频率为 3.149 Hz,与试验测试的自振频率 3.373 Hz 相比,

表 2 万宁桥弹簧参数

Tab. 2 Parameters of springs of Wanning Bridge

部件	方向	刚度/(N·m)	阻尼/((N·s)·m ⁻¹)
扣件 弹簧	<i>x</i>	3.0×10^7	2.0×10^3
	<i>y</i>	3.0×10^7	6.0×10^4
	<i>z</i>	6.0×10^7	7.5×10^4
	Rot _{<i>x</i>}	3.0×10^{13}	1.0×10^5
道砟 弹簧	<i>x</i>	1.28×10^8	5.4×10^5
	<i>y</i>	1.28×10^8	5.4×10^5
	<i>z</i>	1.28×10^8	5.4×10^5
	Rot _{<i>y</i>}	3.0×10^{13}	5.4×10^5

误差为 6.6%,表明万宁桥有限元模型动力特性与实桥吻合较好。由图 12 可以看出,拱肋、主梁分别第 1、第 5 阶发生横弯,拱肋率先发生横向弯曲,表明拱肋横向刚度小于主梁横向刚度。

表 3 万宁桥自振特性

Tab. 3 Natural vibration characteristics of Wanning Bridge

阶次	自振频率/Hz	振型描述
1	1.070	拱肋横弯
2	3.078	拱肋反对称横弯
3	3.149	主梁竖弯
4	4.391	主梁、拱肋竖弯
5	4.960	主梁、拱肋扭转加横弯
6	5.853	拱肋对称横弯
7	6.194	主梁、拱肋竖弯
8	7.572	拱肋两侧不对称竖弯
9	7.930	拱肋竖弯
10	8.001	两侧拱肋向内横弯

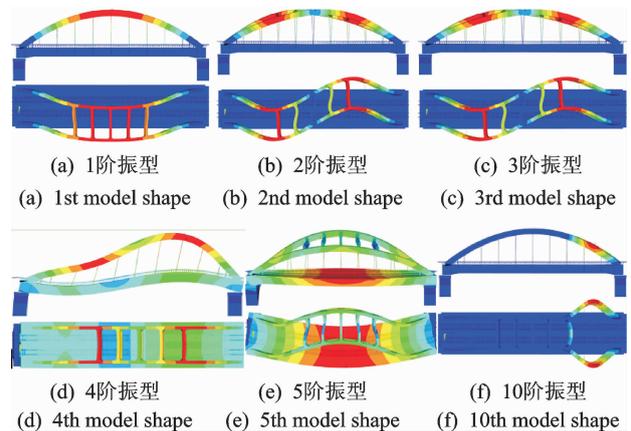


图 12 万宁桥主要振型图

Fig. 12 The major model shapes of Wanning Bridge

结合实际线路情况,根据 1.1 节所述理论建立了万宁桥的列车-轨道-桥梁耦合系统模型,CRH1A 型列车编组为 5M3T(MTMMTMTM,M 为动车,T 为拖车),车辆参数如表 4 所示。采用德国低干扰轨道不平顺谱样本,积分步长取 0.001 s,以表 1 中对应的行车工况计算桥梁的动力响应。

表4 车辆参数

Tab. 4 Vehicle parameters

车辆参数	符号/单位	动车	拖车
车辆质量	m_c/kg	4.08×10^4	3.44×10^4
转向架质量	m_t/kg	3.2×10^3	2.6×10^3
轮对质量	m_w/kg	2.0×10^3	2.1×10^3
1级悬挂刚度	$k_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.0×10^5	2.0×10^5
1级悬挂阻尼	$c_1/((\text{N} \cdot \text{S}) \cdot \text{m}^{-1})$	5.0×10^4	5.0×10^4
2级悬挂刚度	$k_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.0×10^6	1.0×10^6
2级悬挂阻尼	$c_2/((\text{N} \cdot \text{S}) \cdot \text{m}^{-1})$	4.0×10^4	4.0×10^4
转向架半间距	l_c/m	9.5	9.5
轮对间距之半	l_t/m	1.35	1.35
车辆全长	l_v/m	26.7	26.7
车身惯性矩	$J_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.06×10^6	2.74×10^6
转向架惯性矩	$J_t/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	7.2×10^3	1.7×10^3

图13给出了万宁桥现场试验测试值和列车-轨道-桥梁耦合系统模型计算结果的对比。图13(a)为工况1下CD₁测点的位移时程曲线,由图可以看出,二者的位移时程曲线变化规律基本一致,试验和计算位移最大值分别为0.893和0.972 mm,二者相对误差为8.8%,表明模型计算结果与实际情况比较吻合。图13(b)为行车侧5#吊杆动应力的时程曲线,其中试验和计算吊杆应力最大值分别为16.730和15.512 MPa,二者相对误差为7.28%,而应力变化规律基本一致,试验和计算吊杆应力冲击系数分别为0.085和0.079,二者的相对误差为7.06%。综上所述,基于万宁桥的列车-轨道-桥梁耦合系统计算模型基本正确。

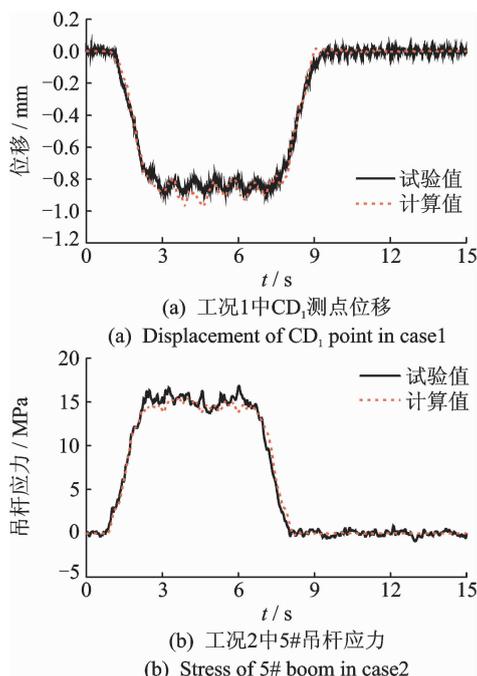


图13 试测值与计算值对比图

Fig. 13 Contrast diagram of measured and calculated value

5 吊杆应力冲击系数分析

为进一步研究不同行车条件对桥梁吊杆应力冲击系数的影响,基于列车-轨道-桥梁耦合系统模型进行了吊杆应力冲击系数的影响参数研究。

5.1 车速的影响

采用德国低干扰轨道不平顺谱,积分步长取0.001 s,考虑编组为5M3T的CRH1A型列车以50~350 km/h(按25 km/h递增)之间的13种速度单线行驶过桥,研究车速对吊杆应力冲击系数的影响。

从图14给出的行车侧吊杆动应力最大值可以看出,桥梁左右两端的吊杆动应力呈现均匀的对称性,中部吊杆动应力最大值大于两端吊杆动应力最大值,吊杆动应力最大值随车速的增加呈增大的趋势,中部吊杆动应力最大值受车速影响较为显著。

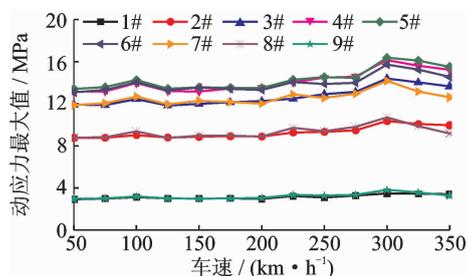


图14 不同车速下的吊杆动应力最大值

Fig. 14 Maximum dynamic stress under different speeds

根据对称性,图15仅给出了1#~5#吊杆应力冲击系数随车速的变化规律。由图可以看出,整体上吊杆应力冲击系数随车速增加而增大,其中车速为300 km/h时吊杆动应力和冲击系数均显著增大。

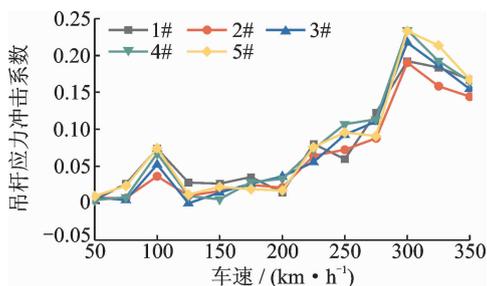


图15 不同车速下的吊杆应力冲击系数

Fig. 15 Stress impact factor of suspenders under different speed

图16为跨中5#吊杆梁端和拱肋锚固点的竖向位移时程曲线以及由此计算的吊杆长度变化值,可以看出列车以300 km/h的速度过桥时,引起主梁位移振幅不断增大,但拱肋位移振幅变化不如主梁明显,从而导致吊杆长度变化值显著增加。根据

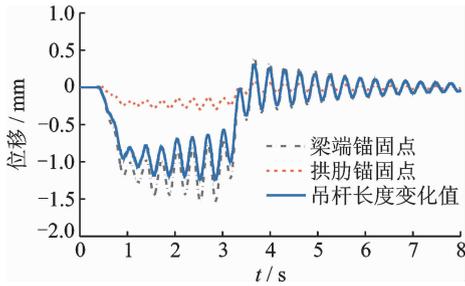


图 16 300 km/h 时 5# 吊杆两端位移时程曲线

Fig. 16 Time history curve of 5# suspender at 300 km/h

文献[21]的桥梁共振车速计算公式可知,对于 CRH1A 型列车来说,固定间距系列移动荷载作用下竖向共振车速可以表示为

$$v_{br} = 3.6 f_{bn} d_v / i = 302.68 \text{ km/h} \quad (8)$$

其中: v_{br} 为引起桥梁共振的列车临界车速; i 为乘子,这里 $i=1$; d_v 为车辆全长,CRH1A 型列车单节车长为 26.7 m; f_{bn} 为桥梁第 n 阶竖向自振频率。

万宁桥 1 阶竖向自振频率 $f_{b1} = 3.149 \text{ Hz}$ 。因此,当车速为 300 km/h 时,列车激励引起桥梁产生共振响应,导致吊杆应力和冲击系数均显著增大。

5.2 轨道不平顺的影响

选取与 5.1 节相同的行车条件,采用德国低干扰轨道谱作为初始轨道不平顺样本,将样本幅值进行缩放,在原始样本的基础上乘以 0, 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0 的缩放系数,分别代表最好、较好、初始、较差和最差的轨道平顺度^[22],研究轨道不平顺对吊杆应力冲击系数的影响。图 17 给出了不同轨道平顺性状态下行车侧吊杆的最大动应力 σ_{dmax} 和最大静应力 σ_{smax} ,图 18 给出了相应吊杆的应力冲击系数。

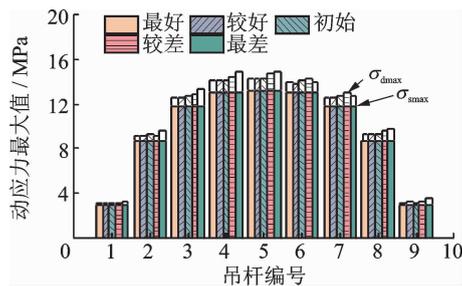


图 17 不同轨道平顺度下的吊杆应力

Fig. 17 Suspension stress under different track irregularity level

由图 17 可知,随着轨道平顺性的劣化,吊杆动应力最大值呈增加趋势,中部吊杆动应力最大值较端部吊杆增加更为显著。由图 18 可知,吊杆应力冲击系数随轨道平顺性的劣化而增大。初始状态下吊杆应力冲击系数最大值仅为 0.082,小于规范设计值的 0.233,可见初始状态下的高速铁路轨道不平顺对吊杆应力冲击系数的影响满足规范要求。

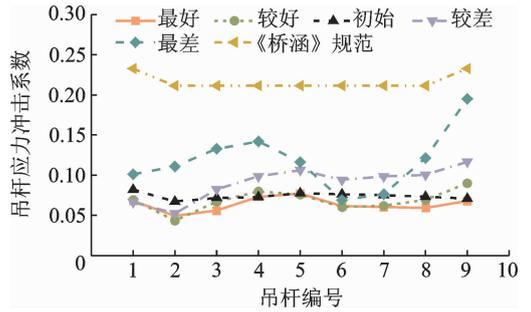


图 18 不同轨道平顺度下的吊杆应力冲击系数

Fig. 18 Impact factor under different track irregularity level

6 结 论

- 1) 地基微波雷达作为一种新型非接触式测试方法,能方便有效地测试列车作用下桥梁动挠度和吊杆动应力变化。
- 2) 拱桥吊杆应力分布具有对称性,跨中吊杆动应力最大值大于两端吊杆动应力最大值。从整体上看,吊杆动应力和应力冲击系数均随着车速的增加而增大,当车速为 300 km/h 时车辆和桥梁发生共振,导致吊杆应力大幅增加,因此需严格控制车速,避免发生共振。
- 3) 在设计车速和德国低干扰轨道谱条件下,CRH1A 型动车组实际运营引起的吊杆应力冲击系数远小于规范值,整体上吊杆应力冲击系数随轨道平顺性的劣化而增加。实际运营时,应保障轨道平顺度,减少车辆产生的冲击作用,提高吊杆寿命。

参 考 文 献

[1] 方志,汪建群,颜江平. 基于频率法的拉索及吊杆张力测试[J]. 振动与冲击,2007,26(9):78-82.
Fang Zhi, Wang Jianqun, Yan Jiangping. The tension measurement of cables and suspenders with frequency method[J]. Journal of Vibration & Shock, 2007, 26 (9):78-82. (in Chinese)

[2] 邑强. 拱桥新型吊杆安全性及其静动力影响研究[J]. 桥梁建设,2011,28(1):39-42.
Yi Qiang. Study of safety of new type suspenders and their impact on static and dynamic performance of arch bridge[J]. Bridge Construction, 2011, 28 (1): 39-42. (in Chinese)

[3] 殷新锋,丰锦铭,刘扬,等. 考虑车-桥耦合振动及桥面平整度退化影响的拱桥吊杆疲劳分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2017,44(9):17-25.
Yin Xinfeng, Feng Jinming, Liu Yang, et al. Fatigue analysis for suspenders of arch bridge addressing vehicle-bridge co-upled vibration and road surface progressive deterioration[J]. Journal of Hunan University;

- Natural Sciences, 2017, 44(9): 17-25. (in Chinese)
- [4] Huang Dongzhou. Dynamic and impact behavior of half-through arch bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 133-141.
- [5] Shao Yan, Sun Zongguang, Chen Yifei. Analysis of the impact effect of the suspender system in a half-through concrete filled steel tubular arch bridge[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 477: 705-709.
- [6] Malm R, Andersson A. Field testing and simulation of dynamic properties of a tied arch railway bridge[J]. Engineering Structures, 2006, 28(1): 143-152.
- [7] 朱劲松, 邑强. 中下承式拱桥吊杆应力冲击系数不均匀性研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(13): 5-10.
Zhu Jinsong, Yi Qiang. Non-uniformity of stress impact factor of suspenders on half-through or through arch bridges[J]. Journal of Vibration & Shock, 2012, 31(13): 5-10. (in Chinese)
- [8] 朱志辉, 赵婷婷, 王力东, 等. 基于随机振动模型的重载铁路拱桥吊杆应力冲击系数研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(6): 955-964.
Zhu Zhihui, Zhao Tingting, Wang Lidong, et al. Stress impact factor of the suspenders of heavy-haul railway arch bridge based on random vibration model[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(6): 955-964. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB10002. 2—2005 铁路桥梁钢结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [10] Macdougall C, Green M F, Shillinglaw S. Fatigue damage of steel bridges due to dynamic vehicle loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(3): 320-328.
- [11] Chen Zhiwei, Cai Qinlin, Lei Ying, et al. Damage detection of long-span bridges using stress influence lines incorporated control charts[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(9): 1689-1697.
- [12] Kuras P, Owerko T, Ortyl L, et al. Advantages of radar interferometry for assessment of dynamic deformation of bridge[C] // 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012). Stresa, Lake Maggiore: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012: 885-891.
- [13] Maizar M, Zhang Lihai, Miramini S, et al. Detecting structural damage to bridge girders using radar interferometry and computational modelling[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(10): e1985.
- [14] 黄声享, 罗力, 何超. 地面微波干涉雷达与GPS测定桥梁挠度的对比试验分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(10): 1173-1176.
Huang Shengxiang, Luo Li, He Chao. Comparative test analysis for determining bridge deflection by using ground-based SAR and GPS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(10): 1173-1176. (in Chinese)
- [15] Zhu Zhihui, Wang Lidong, Yu Zhiwu, et al. Non-stationary random vibration analysis of railway bridges under moving heavy-haul trains[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(3): 1850035.
- [16] 桂水荣, 张政韬, 陈水生, 等. 桥面不平引起车桥系统随机振动车速因素分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(6): 1223-1228.
Gui Shuirong, Zhang Zhengtao, Chen Shuisheng, et al. Influence analysis of vehicle speeds on random vibration of vehicle-bridge coupling systems caused by deck irregularity[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1223-1228. (in Chinese)
- [17] 朱志辉, 龚威, 王力东, 等. 列车-轨道-桥梁耦合系统动力方程求解方法对计算精度和效率的影响[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(5): 17-26.
Zhu Zhihui, Gong Wei, Wang Lidong, et al. Influence of solution method for dynamics equation of train-track-bridge coupled system on calculation precision and efficiency[J]. China Railway Science, 2016, 37(5): 17-26. (in Chinese)
- [18] 徐亚明, 王鹏, 周校, 等. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥梁动态形变监测研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(7): 845-849.
Xu Yaming, Wang Peng, Zhou Xiao, et al. Research on dynamic deformation monitoring of bridges using ground-based interferometric radar IBIS-S[J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2013, 38(7): 845-849. (in Chinese)
- [19] Wang Guochao, Munoz-Ferreras J M, Gu Changzhan, et al. Application of linear-frequency-modulated continuous wave (LFMCW) radars for tracking of vital signs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(6): 1387-1399.
- [20] Max S, Vossiek M, Gulden P. Fusion of FMCW secondary radar signal beat frequency and phase estimations for high precision distance measurement[C] // Radar Conference, EuRAD 2008. European: IEEE, 2008: 124-127.
- [21] 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 Weiwei, Zhang Nan. Analysis of resonance mechanism and conditions of train-bridge system[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(5): 52-58. (in Chinese)
- [22] 李慧乐, 夏禾, 张楠, 等. 基于车桥耦合动力分析的钢桥疲劳损伤与剩余寿命评估[J]. 铁道学报, 2017, 39(1): 104-110.
Li Huile, Xia He, Zhang Nan, et al. Assessment of fatigue damage and remaining life of steel bridges based on train-bridge coupling dynamic analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(1): 104-110. (in Chinese)



第一作者简介: 朱志辉, 男, 1979年2月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为车-线-桥耦合系统动力学理论等。曾发表《An efficient multi-time-step method for train-track-bridge interaction》(《Computers & Structures》2018, Vol. 196)等论文。
E-mail: zzh0703@163.com

