

文章编号:1674-2974(2016)09-0105-08

# 纵连板式无砟轨道简支梁桥动力响应试验研究\*

戴公连<sup>1,2</sup>, 龙绿军<sup>1</sup>, 刘文硕<sup>1,2†</sup>

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

**摘要:**开展了行车条件下高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道-桥梁系统的动力响应现场测试, 测试 CRH380A-001 型列车以 285~350 km/h 时速通过时无砟轨道-32 m 标准预应力混凝土简支梁的动力响应. 通过现场采集与数据分析, 得到了钢轨、轨道板、底座板、桥面板的竖横向加速度幅值, 桥墩顶纵横向绝对位移. 结果表明: 结构各层加速度在列车时速达到 295 km/h 左右时, 急剧增大, 之后顺速降低, 出现陡波峰; 车致振动加速度响应自钢轨-轨道板-底座板-桥面板, 自上至下呈明显的递减趋势, 振动衰减较为明显. 此外, 基于实测的梁体自振频率与阻尼比, 分析了梁体动挠度的简化计算方法, 计算结果与实测梁体动挠度较接近. 实验结果可为改进数值分析模型、验证计算结果提供依据.

**关键词:** 高速铁路; CRTS II 型板式无砟轨道; 动力响应; 简支箱梁桥; 现场试验

**中图分类号:** U211.3; U441.3

**文献标识码:** A

## Experimental Study on the Dynamic Response of Continuous Slab Tracks and Simply Supported Bridges

DAI Gong-lian<sup>1,2</sup>, LONG Lv-jun<sup>1</sup>, LIU Wen-shuo<sup>1,2†</sup>

(1. College of Civil Engineering, Central South Univ, Changsha, Hunan 410075, China;

2. National Engineering Lab for High Speed Railway Construction, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** A dynamic experiment for CRTS II slab ballastless track - bridge system under the train running condition was carried out. The dynamic response of CRTS II and standard 32m simply supported prestressed concrete box girders was measured under CRH380A-001 trains traveling at the speed of 285 to 350 km/h. Through the field collection and data analysis, the vertical and transverse acceleration amplitudes of the rail, track plate, base plate, and beam panel were obtained. The vertical and transverse absolute displacements of the pier top were also obtained. The results show that abrupt wave crests appear, as the acceleration of each structure increases fast and then reduces significantly when the train speed reaches about 295 km/h. At that time, the vehicle induced acceleration response of the rail-track plate-base plate-beam panel has a significant decline trend, and the vibration attenuation is relatively obvious. Furthermore, the simplified method for computing the dynamic deflection of a girder was analyzed based on the measured natural frequency and damping ratio of the girder, and the calculated values are close to the measured ones. The study results can provide the basis for improving the numerical analysis model and verifying the

\* 收稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378503), National Natural Science Foundation of China(51378503); 中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2014T003-D/2014G001-D); 中南大学硕士生自主探索创新项目(2016ZZTS408)

作者简介: 戴公连(1964-), 男, 河南夏邑人, 中南大学博士, 教授

† 通讯联系人, E-mail: liuwenshuo@csu.edu.cn

calculation results.

**Key words:** high-speed railway; longitudinal continuous slab ballastless track; dynamic response; simply supported box bridge; field study

CRTS II 型板式无砟轨道具有重量轻、维修养护工作量少、稳定性高等优点,在我国京津城际、京沪、京广、沪杭、杭长等客运专线得到广泛应用,截止至 2014 年 10 月,国内铺设里程单线已超过 10 000 km.

车致桥梁振动问题,国外早在 20 世纪 70~80 年代便已进行较广泛的研究<sup>[1-2]</sup>,取得了比较大的成果.对于铺设无砟轨道的高速铁路桥梁来说,梁轨系统各层结构的动力特性是其重要研究课题之一.夏禾等在法国的 Antoining 大桥及我国秦沈客运专线上进行了高速列车作用下的动力试验,得到了梁体、桥墩及车辆的一些动力指标<sup>[3-4]</sup>.翟婉明院士根据秦沈客运专线行车实验,分析了车-轨道-桥梁系统的相互作用机制,认为高速列车/桥梁振动分析中需充分考虑轨道结构参振并引入精确的动态轮轨作用关系<sup>[5]</sup>.中国铁道科学研究院开展时速 200~250 km 及 300~350 km 高速铁路桥梁动力试验,对常用跨度简支梁桥以及连续梁桥的自振特性、刚度参数、梁体动力响应以及动车组通过桥梁时的安全性和平稳性进行了分析<sup>[6-7]</sup>.

然而,已有轨道-桥梁系统动力特性的研究多为理论分析<sup>[8-12]</sup>,实验较少,且试验多为短期试验,此次试验对不同车型、不同时速下梁轨系统的动力响应进行了长达 5 个月的测试.可为改进数值分析模型、验证计算结果提供依据,对提高高速铁路桥梁的动力设计水平、保证行车安全,具有重要意义.

## 1 测试试验方案

### 1.1 桥梁及 CRH380A-001 型列车介绍

选择一座 12 孔 32 m 标准跨径简支箱梁桥的其中 3 孔为试验对象.桥面净宽 12 m,防护墙内侧净宽为 8.8 m;线路中心梁高 3.05 m,两侧梁高 3.078 m;梁长 32.6 m,计算跨度 31.5 m.横桥向支座中心距 4.5 m.桥墩采用圆端形低墩,基本约为 3.5~5 m,桥台采用矩形空心台,基础采用直径  $\Phi 1.0$  m 的钻孔桩,桩长约为 21.5~24 m.桥上采用 CRTS II 型板式无砟轨道.

试验测得 50 趟 CRH380A-001 型列车在不同时速激励下轨道-桥梁系统的动力响应. CRH380A-001 型列车为 8 节编组、4 轴,轴距为 2.5 m,钩到钩距离为  $L_v$ ,约 25 m.定员最大轴重为 16 t,空车质量 35.9 t,转向架质量 7.3 t,其簧下质量 2 t<sup>[13]</sup>.实测列车速度分布情况见表 1.列车通过桥梁时的车-梁-墩-基础系统见图 1.

表 1 CRH380A-001 型列车速度分布  
Tab. 1 The speed distribution of CRH380A-001

行车速度/(km·h <sup>-1</sup> )					
287.8	292.4	292.9	293.3	294.6	294.7
295	296.3	297	297.3	298	299
299.6	299.7	305	305.5	311	312
319	323.1	329.7	334.2	337.6	344.8
345	347.3				

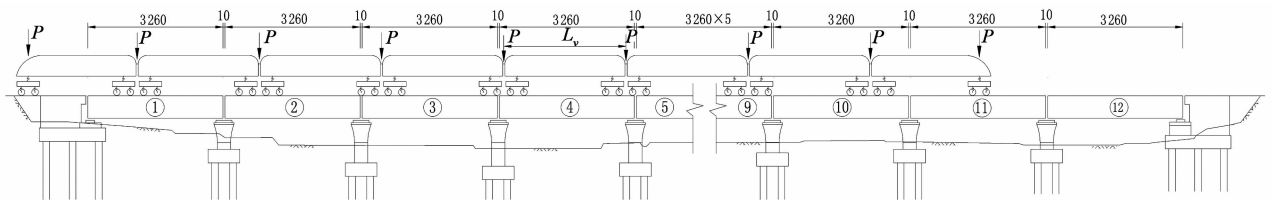


图 1 桥跨布置示意图(单位:cm)

Fig. 1 Bridge span arrangement (unit: cm)

### 1.2 测点布置

选择与桥台相接的 1,12 号两孔简支梁及中间 6 号孔简支梁为测试对象,在选定桥跨的梁端、1/4

跨、1/2 跨等关键断面布置测点,钢轨、轨道板、底座板、桥面板、墩台、路基、地面等处均设有加速度传感器,总共设置了 120 个加速度、59 个位移计、9 个应

变.测点布置见图 2,图中,桥上结构布置的仪器,“中”表示布置在线路中心线,“右线”表示布置在小

里程至大里程方向的右线外侧,未经说明部分均布置在小里程至大里程方向的左线外侧.

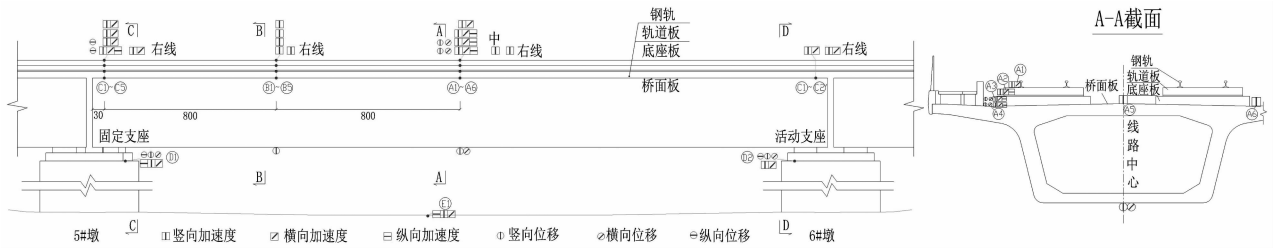


图 2 传感器测点布置示意图  
Fig. 2 Sensor locations in the experiment

### 1.3 测试仪器

采用 ICP、941B 型拾振器、SMW-WYDC-25D 型位移计等传感器采样,并用北京东方振动和噪声技术研究所研发的网络便携式动态数据同步采集系统自动采集存储上传数据. ICP 由磁座吸附在钢轨上,桥上位移计用钢脚架固定,墩顶相对位移计用磁性表座固定,为得到列车运行速度,在钢轨上粘贴了应变花,仪器安装情况见图 3.

目前,常见的测试与分析梁体自振频率的方法有脉动法、车辆余振法、跳梁法及力锤敲击法等.文中采用车辆余振法,选取 6# 跨,通过对车辆通过后的余波进行自谱分析,得到梁体(在上部轨道系统作用下)的一阶竖向、横向自振频率,见表 2.

由表中数据可知,实测梁体一阶竖向自振频率为 6.875~7.5 Hz,梁体一阶横向自振频率为 9.9~10.45 Hz.在上部轨道系统作用下的梁体竖向自振频率比裸梁的自振频率大.虽然轨道结构加大了桥梁的荷载,但 CRTS II 型板式无砟轨道是纵向连续的,桥跨通过剪力齿槽与底座板固结在一起,增大了梁端的约束,不同桥跨通过上部轨道结构相互影响,其总体刚度增大.根据实测信号,得到梁体一阶竖向自振的阻尼比为 0.06.

表 2 梁体实测一阶自振频率(单位:Hz)

Tab. 2 The measured first order natural vibration frequency

方向	频率/Hz					平均值
竖向	6.875	6.875	6.875	7.145	7.150	7.187 5
	7.255	7.350	7.350	7.5	7.5	
横向	9.9	9.9	9.9	10.140	10.140	10.18
	10.235	10.345	10.340	10.45	10.45	



图 3 仪器安装图  
Fig. 3 Experimental apparatus installation

## 2 梁体自振频率及阻尼比

桥梁横向、竖向自振频率及阻尼比,是表征桥梁动力特性、检验桥梁动力性能的重要指标.

参考文献[14],计算梁体的一阶竖向自振频率公式为: $\omega^2 = \pi^4 EI / l^4 \mu$ ,其中  $l$  为梁体长度, $\mu$  为每延米质量,取 24 540 kg/m.用此公式算得裸梁的自振频率为 5.95 Hz.

参考文献[7],实测 32 m 简支箱梁的竖向基频为 6.8 Hz.

## 3 CRH380A-001 运行下加速度动力响应

加速度的大小可反映轨道-桥梁各层结构振动的强弱.为研究车致桥梁振动响应在无砟轨道结构各层(钢轨、轨道板、底座板)以及与桥梁之间的传递规律,在各层结构均布置了加速度传感器进行测试.

### 3.1 无砟轨道-简支梁桥系统各层结构竖向加速度

以 6# 跨为例,分析无砟轨道各层及桥面板的竖向加速度响应.对测得的信号进行时域分析,得到列车不同时速运行下结构的加速度响应幅值,见图 4.所取值为列车运行时,有载侧加速度响应幅值,另

外,线路中心跨中截面桥面板的加速度响应也对应给出。

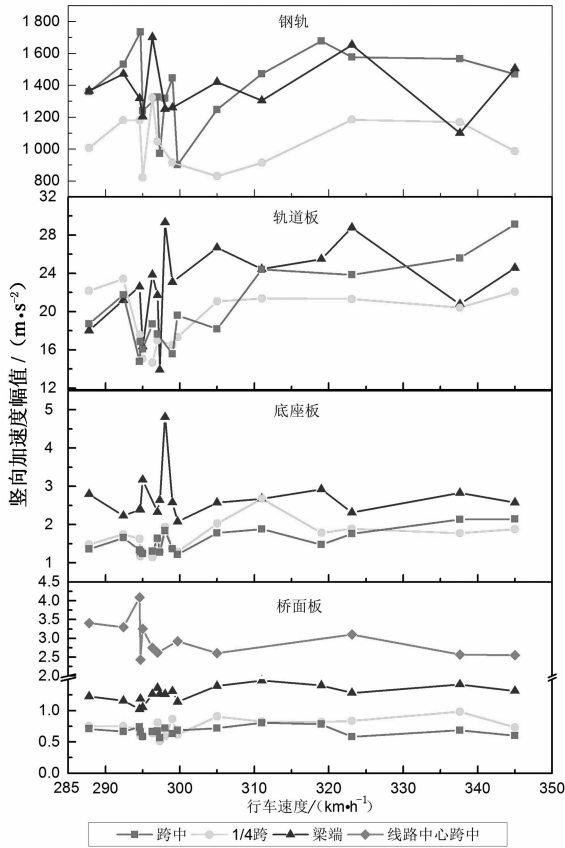


图4 钢轨/轨道板/底座板/桥面板  
竖向振动加速度幅值

Fig. 4 Vertical vibration acceleration amplitude of rail/rail plate/ base plate/ bridge panel

从图中可知:

1)当列车行驶速度为285~350 km/h时,各层结构竖向振动的加速度幅值随速度变化在一定范围内波动,呈现一定的随机规律性。这是由于车轮与轨道的接触状态不同<sup>[15]</sup>(即车辆作用在轨道-桥梁系统上力的大小、方向、作用点不同)导致的。另外,桥梁结构频率特性、车辆频率特性、车-轨道-桥梁的阻尼、车辆运行速度、轨道不平顺等都会影响轨道-桥梁系统的加速度响应,故结构竖向加速度幅值并不受列车运行速度单一影响。

2)分析各截面的车致振动加速度响应,梁端截面处轨道板、底座板、桥面板竖向加速度幅值相比跨中、1/4跨截面较大;而钢轨竖向加速度幅值在1/4跨截面最小,在梁端截面与跨中相差不大。

3)结构各层竖向加速度幅值-速度曲线均在列车速度为295 km/h左右时,急剧增大,之后顺速降低,出现陡波峰。同一截面处不同层结构竖向加速度

随速度变化的曲线变化趋势相近。

列车以一定时速通过桥跨,对轨道-桥梁系统产生激励荷载,使结构受迫振动。参考文献[16],其竖向激励频率主要取决于列车速度 $v$ (km/h)和车长 $d$ (m),激励频率 $f_{\text{激励}} = v/(3.6d) = 0.0111v$ 。当激励频率为结构自振频率的 $1/i$ ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )时,将产生共振或超谐共振,使结构的加速度幅值急剧变大。由第2节可知,实测的梁体(在上部轨道系统作用下)的一阶竖向自振频率为6.875~7.5 Hz,则其共振速度为619.4~675.7 km/h,二阶超谐共振速度为309.7~337.8 km/h。在实测的列车运行速度285~350 km/h范围内,存在二阶超谐共振速度。

图4中实测的各层结构竖向加速度幅值-速度曲线,在列车速度为295 km/h左右时,出现二阶超谐共振的现象。出现波峰的速度与理论计算的梁体二阶超谐共振速度有一点出入,相差不是很大。引起这种差别的原因有:测试数据本身存在误差,包括加速度幅值、列车速度、桥梁自振频率等;理论计算方法为近似计算,和实际情况有区别。

4)在CRH380A-001列车动荷载作用下,车致振动竖向加速度响应自钢轨-轨道板-底座板-桥面板,呈明显的递减趋势,振动衰减较为明显。如表3所示。

表3 竖向加速度响应幅值范围  
Tab. 3 Vertical acceleration amplitude range

位置	竖向加速度幅值范围/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )		
	跨中	1/4跨	梁端
钢轨	900~1 734	822~1 323	1 099~1 700
轨道板	14.8~29.1	14.7~23.4	13.9~29.3
底座板	1.22~2.14	1.14~2.68	2.08~4.8
桥面板	0.56~0.80	0.51~0.98	1.02~1.48

5)桥面板的振动是研究轨道-桥梁系统动力特性的重要指标。

根据测试得到的数据,线路中心桥面板的竖向加速度相对两侧较大,最大幅值为 $4.1 \text{ m/s}^2$ ,接近《高速铁路设计规范》(TB 10621-2014)限值 $0.5g$ <sup>[17]</sup>。箱梁的桥面板相当于一块薄板固结在两块腹板上,由图2可知,桥面板有载侧的测点在箱梁腹板附近,其振动为梁体的整体振动,而线路中心线处桥面板的振动除了梁体的整体振动,还有桥面板的局部振动。UIC规范中规定的桥面板加速度为沿线路桥面的加速度,规范中桥梁竖向加速度限值需说明具体的部位。

3.2 无砟轨道-简支梁桥系统各层结构横向加速度  
为研究无砟轨道-简支梁桥系统的横向振动特

性,同样在跨中和梁端等位置布置了横向加速度传感器,以 6# 跨为例,相应截面有载侧各层结构横向振动加速度幅值见图 5。

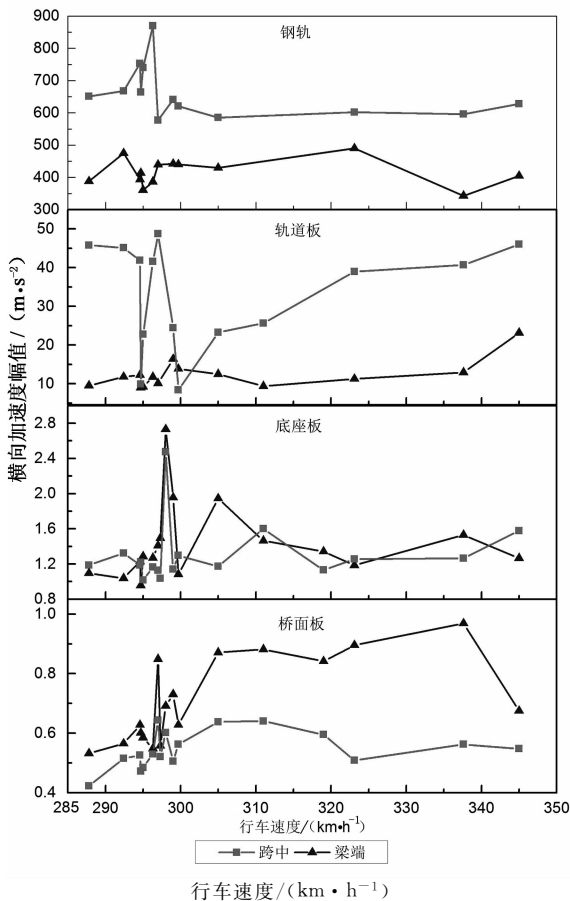


图 5 钢轨/轨道板/底座板/桥面板横向振动加速度幅值

Fig. 5 Transverse vibration acceleration amplitude of rail/rail plate/base plate/bridge panel

从图中可以看出:

1) 当列车行驶速度为 285~350 km/h 时,各层结构横向振动的加速度幅值随速度变化在一定范围内波动. 其值在列车速度为 295 km/h 左右时,出现波峰。

参考文献[18],车桥第一种横向共振速度  $v_{br} = 3.6 f_{bn} d / i (n = 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots)$ , 其中  $f_{bn}$  为桥梁的  $n$  阶横向自振频率。

由第 2 节可知,实测的梁体(在上部轨道系统作用下)的一阶横向自振频率为 9.9~10.45 Hz, 则其共振速度为 891.9~941.4 km/h, 二阶超谐共振速度为 445.95~470.7 km/h, 三阶超谐共振速度为 297.3~313.8 km/h. 在实测的列车运行速度 285~

350 km/h 范围内,存在三阶超谐共振速度。

图 5 中实测的各层结构横向加速度幅值-速度曲线,在列车速度为 295 km/h 左右时,出现三阶超谐共振的现象. 同竖向加速度,出现波峰的速度与理论计算的梁体三阶超谐共振速度相差不大。

2) 对比分析各截面的车致振动加速度响应幅值可知,钢轨、轨道板跨中截面横向加速度幅值相对梁端截面较大,桥面板跨中截面横向加速度幅值相对梁端截面较小。

3) 在 CRH380A-001 列车动荷载作用下,车致振动横向加速度响应由上至下同样呈明显的递减趋势,振动衰减较为明显. 如表 4 所示。

表 4 横向加速度响应幅值范围  
Tab. 4 Transverse acceleration amplitude range

位置	横向加速度幅值范围	
	跨中	梁端
钢轨	576.7~870.0	342.6~489.6
轨道板	8.42~46.01	8.96~23.16
底座板	1.02~2.48	0.96~2.73
桥面板	0.42~0.64	0.53~0.97

#### 4 CRH380A-001 运行下位移动力响应

高速铁路运行速度高,对线路的平顺性提出了更高的要求. 由于桥梁在高速铁路中占的比重相当大,严格控制桥梁的变形十分必要. 试验对梁底及桥墩的绝对位移进行了测试. 列车以 299 km/h 速度通过时,6# 跨梁底跨中挠度时程曲线见图 6。

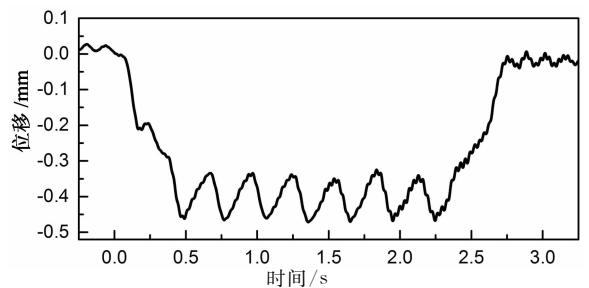


图 6 位移时程曲线

Fig. 6 Time history curve of displacement sensor

#### 4.1 竖向动挠度简化计算

##### 4.1.1 列车荷载简化

一个集中荷载  $P_0$  以速度  $v$  通过桥跨,当其到达跨中时,跨中挠度最大,根据位移互等定理,  $P_0$  作用在其他截面时,跨中的位移,与车轮作用在跨中时,该截面的位移相等,见图 7。

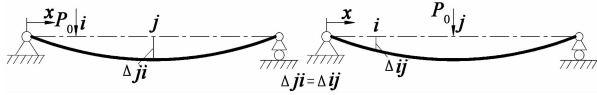


图7 位移互等定理图示

Fig. 7 Displacement reciprocal theorem

根据跨中作用一个集中力  $P_0$  时,梁体的挠度曲线:  $y = P_0 x / (48EI) \cdot (3l^2 - 4x^2) (0 \leq x \leq l/2)$ .

因此,计算跨中动挠度时,可将移动的  $P_0$  荷载简化成跨中随时间变化的点荷载. 得到简化的点荷载  $P$  为:

$$P = \begin{cases} P_0(-4 \frac{v^3}{l^3} t^3 + 3 \frac{vt}{l}), & 0 \leq t \leq \frac{l}{2v}; \\ P_0(-4 \frac{(l-vt)^3}{l^3} + 3 \frac{l-vt}{l}), & \frac{l}{2v} \leq t \leq \frac{l}{v}; \\ 0, & t > \frac{l}{v}. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $v$  为列车速度;  $l$  为桥跨长度.

CRH380A-001 为 8 节编组,车辆总长 203 m,参考文献[16],可将列车荷载简化为移动荷载列,由 9 个集中力组成,如图 1 所示. 试验车为空车,前后两个集中力较小,取 150 N,中间的集中力取 300 N. 则从列车以时速 300 m/h 进入 1 孔桥到离开 1 孔桥,简化的跨中点荷载随时间的变化曲线见图 8. 荷载曲线与实测梁底跨中竖向位移时程曲线图 6 形状一样,一定程度上反应了荷载简化的可行性.

#### 4.1.2 竖向动挠度计算

根据动力学原理,将梁体跨中的竖向振动简化

成集中质量块的单自由度振动.

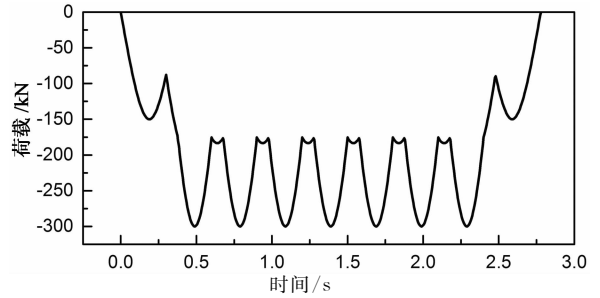


图8 简化荷载曲线

Fig. 8 Simplified load curve

设梁体跨中的竖向位移为  $u$ .

根据 3 中实测结果,上部轨道作用下梁体竖向自振频率  $f = 7.1875 \text{ Hz}$ .

阻尼比  $\zeta = 0.06$ . 刚度  $k = 48EI/l^3$ , 根据桥跨的设计资料,算得  $k = 5.79 \times 10^5 \text{ kN/m}$ . 则  $\omega = 2\pi f = 45.16$ , 由于阻尼比很小,  $\omega_n = \omega_D = \omega$ ,  $\omega^2 = k/m$ , 质量  $m = k/\omega^2 = 284 \text{ t}$ , 运动方程  $m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t)$ , 代入 4.1.1 节中的荷载, 得到一个集中力通过梁跨的  $u(t)$ , 见式(2). 根据 Duhamel 积分的原理, 将 9 个集中力通过梁跨得到的  $u(t)$  叠加. 用软件编写程序解得其数值解, 不同速度下动挠度数值解的最大值见表 5.

表 5 动挠度简化计算最大值  
Tab. 5 Simplified calculation of maximum dynamic deflection

列车速度 / (km · h <sup>-1</sup> )	287.8	295	305	323.1	337.6	345
动挠度 / mm	0.576	0.582	0.587	0.587	0.578	0.57

$$u(t) = \begin{cases} \frac{P_0}{m\omega_D} \int_0^t (-4 \frac{v^3}{l^3} \tau^3 + 3 \frac{v\tau}{l}) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau, & 0 \leq t \leq \frac{l}{2v}; \\ u(\frac{l}{2v}) + \frac{P_0}{m\omega_D} \int_{\frac{l}{2v}}^t (-4 \frac{(l-v\tau)^3}{l^3} + 3 \frac{(l-v\tau)}{l}) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau, & \frac{l}{2v} \leq t \leq \frac{l}{v}; \\ e^{-\zeta\omega_n t} [u(\frac{l}{v}) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}(\frac{l}{v}) + \zeta\omega_n u(\frac{l}{v})}{\omega_D} \sin \omega_D t], & t > \frac{l}{v}. \end{cases} \quad (2)$$

#### 4.2 实测墩顶及梁底绝对位移

实验测得了梁体的动挠度、梁体跨中横向位移及墩顶的纵横向绝对位移,其动位移的最大值见表 6. 给出了 1#, 6#, 12# 三孔桥在不同行车速度下, 相应位置的位移幅值.

由表 6 中数据可知:

1) 在表中列车速度下,梁体的最大动挠度为 0.566 mm, 则最大挠跨比为 1/55 600; 梁底跨中最大横向位移 0.131 mm; 墩顶横向最大位移为 0.082 mm; 墩顶纵向最大位移为 0.160 mm.

2) 中间孔桥 6# 跨的梁底跨中横向位移比边跨 1# 跨、12# 跨的大, 挠度比边跨的小.

3)实测的跨中动挠度与 4.1.2 中的简化计算相比,简化计算值比较大,引起这种差别的原因有:测试数据本身存在误差;简化计算方法为近似计算,和实际情况有区别;简化计算最大动挠度时,轴重取 300 kN,是根据满员轴重减掉一部分人群荷载得到的值,与实际的试验车轴重有差别。

表 6 墩顶及梁底绝对位移实测最大值  
Tab.6 Absolute displacement maximum of pier top and beam

项目	列车经过测点时速度/(km·h <sup>-1</sup> )						
	287.8	295	305	323.1	337.6	345	
动挠度 /mm	1#跨	0.540	0.554	0.507	0.498	—	0.536
	6#跨	0.485	0.492	0.461	0.485	0.484	0.501
	12#跨	0.505	0.504	0.530	0.534	0.520	0.566
梁底跨中 横向位移 /mm	1#跨	0.056	0.044	0.050	0.068	—	0.043
	6#跨	0.126	0.120	0.131	0.103	0.107	0.100
	12#跨	—	0.087	—	0.080	—	—
墩顶横向 位移 /mm	1#跨	0.060	0.082	0.067	0.052	—	—
	6#跨	0.074	0.069	0.065	0.067	0.067	0.067
	12#跨	0.052	0.052	—	0.060	0.059	0.060
墩顶纵向 位移 /mm	1#跨	0.048	0.052	0.076	0.059	—	0.090
	6#跨	0.160	0.143	0.052	0.058	0.056	0.088
	12#跨	—	0.060	—	0.046	—	—

以 6#跨为例,列车不同时速运行下的位移幅值见图 9。实测跨中动挠度与简化计算结果随速度变化的趋势有差别,但大体走势相似,均在列车速度约为 310 km/h 时,达到最大值。引起这种差别的原因有:测试数据本身存在误差,包括位移幅值、列车速度等;简化计算方法为近似计算,和实际情况有区别;实际影响梁体动挠度的不止列车速度,而简化计算只分析了速度的影响。在工程允许的误差范围内,简化计算方法可行。

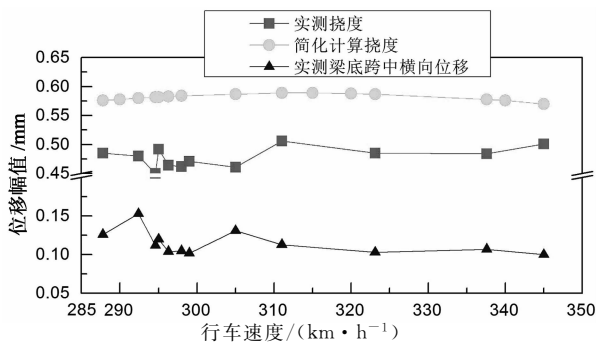


图 9 梁体绝对位移幅值  
Fig.9 Absolute displacement amplitude of beam

### 5 结 语

1)当列车行驶速度为 285~350 km/h 时,各层结构加速度幅值随速度变化在一定范围内波动,加速度幅值-行车速度曲线均在列车速度为 295 km/h 左右时,急剧增大,之后顺速降低,出现陡波峰。

2)在 CRH380A-001 列车荷载作用下,车致振动加速度响应自钢轨→轨道板→底座板→桥面板,呈明显的递减趋势,振动衰减较为明显。

3)桥面板线路中心处竖向加速度相比线路两侧较大,最大幅值为 4.1 m/s<sup>2</sup>,接近《高速铁路设计规范》(TB 10621-2014)限值 0.5 g。

4)实测列车以不同速度通过时,梁体的最大动挠度为 0.566 mm,与简化计算方法得到的最大动挠度值比较接近,在工程允许的误差范围内,简化计算方法可行。桥墩墩顶横向动位移最大值为 0.082 mm,墩顶纵向最大位移为 0.160 mm。

### 参考文献

[1] CHU K H, GARG V K, WIRIYACHAI A. Dynamic interaction of railway train and bridges[J]. Vehicle System Dynamics, 1980, 9(4): 207-236.

[2] DIANA G, CHELI F. Dynamic interaction of railway systems with large bridges[J]. Vehicle System Dynamics, 1989, 18(1): 71-106.

[3] 夏禾,张楠,张鸿儒. 300 km/h 高速铁路 PC 槽型梁动力试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 99-105.  
XIA He, ZHANG Nan, ZHANG Hong-ru. Experimental study of a prestressed trough bridge for high speed railway[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 99-105. (In Chinese)

[4] 夏禾,张楠,高日,等. 铁路桥梁与高速列车的动力试验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(9): 166-172.  
XIA He, ZHANG Nan, GAO Ri, et al. Experimental study on a railway bridge and high speed trains[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9): 166-172. (In Chinese)

[5] 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. (In Chinese)

[6] 刘鹏辉,姚京川,尹京,等. 时速 200~250 km·h<sup>-1</sup> 高速铁路桥梁动力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 96-102.  
LIU Peng-hui, YAO Jing-chuan, YIN Jing, et al. Experimental study on dynamic behaviors of 200~250 km·h<sup>-1</sup> high-speed railway bridges[J]. China Civil Engineering Journal,

- 2013,46(3):96-102. (In Chinese)
- [7] 杨宜谦,姚京川,孟鑫,等. 时速300~350 km·h<sup>-1</sup>高速铁路桥梁动力性能试验研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(3):14-19. YANG Yi-qian, YAOa Jing-chuan, MENG Xin, *et al.* Experimental study on dynamic behaviors of bridge for 300~350 km·h<sup>-1</sup> high speed railway[J]. China Railway Science, 2013,34(3):14-19. (In Chinese)
- [8] 蒋丽忠,龙卫国,余志武,等. 辅助钢梁加固重载铁路桥梁的动力响应分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013,40(7):28-33. JIANG Li-zhong, LONG Wei-guo, YU Zhi-wu, *et al.* Dynamic response analysis of heavy-haul railway bridge strengthened by bonding assisted steel beams[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013,40(7):28-33. (In Chinese)
- [9] 辛涛,高亮. 高速铁路高架桥上无砟道岔动力特性研究[D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2011:75-133. XIN Tao, GAO Liang. Research on dynamic characteristics of ballastless turnouts on viaducts in high speed railway[D]. Beijing: College of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University,2011:75-133. (In Chinese)
- [10] 罗震,翟婉明. 高速铁路无砟轨道结构受力及轮轨动力作用分析[D]. 成都:西南交通大学机械学院,2008:52-79. LUO Zhen, ZHAI Wan-ming. Analysis of structure mechanics and rail dynamic interaction of ballastless track in high-speed railway[D]. Chengdu: College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University,2008:52-79. (In Chinese)
- [11] 高芒芒. 高速铁路列车-线路-桥梁耦合振动及列车走行性研究[J]. 中国铁道科学,2002,23(2):135-138. GAO Mang-mang. Studies on train-track-bridge coupling vibration and train performance on high-speed railway bridges [J]. China Railway Science, 2002,23(2):135-138. (In Chinese)
- [12] 邓露,王芳. 汽车制动作用下预应力混凝土简支梁桥的动力响应及冲击系数研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015,42(9):52-58. DENG Lu, WANG Fang. Study of the dynamic response and impact factors of simply-supported prestressed concrete girder bridge due to vehicle braking [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015,42(9):52-58. (In Chinese)
- [13] 祝锐,王文静. CRH380A-001综合检测车动车构架载荷测试方法研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2012:5-9. ZHU rui, WANG Wen-jing. Study on load measurement for motor bogie frame of CRH380 A-001 inspection train[D]. Beijing: College of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, 2012:5-9. (In Chinese)
- [14] Ladislav Fryba. 铁路桥梁动力学[M]. 北京:科学出版社,2007:38-40. FRYBA L. Dynamics mechanics of railway bridge[M]. Beijing: Science Press,2007:38-40. (In Chinese)
- [15] 向俊. 列车脱轨机理与脱轨分析理论研究[D]. 长沙:中南大学土木工程学院,2006:49-68. XIANG Jun. Study on mechanism and analysis theory of train derailment[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Central South University, 2006:49-68. (In Chinese)
- [16] 郑健. 中国高速铁路桥梁[M]. 北京:高等教育出版社,2008:111-113. ZHENG Jian. China high-speed railway bridge[M]. Beijing: Higher Education Press,2008:111-113. (In Chinese)
- [17] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S]. 北京:国家铁路局,2014:70-71. TB 10621-2014 Standard for design of high speed railway [S]. Beijing: National Railway Bureau, 2014:70-71. (In Chinese)
- [18] 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. (In Chinese)