

# 城市轨道交通列车-桥梁系统动力响应数值分析及现场测试

王少钦<sup>1</sup>, 曹明盛<sup>2</sup>, 李宇杰<sup>3</sup>, 郭薇薇<sup>2</sup>

(1.北京建筑大学理学院,北京 100044; 2.北京交通大学土木与建筑工程学院,北京 100044;  
3.北京市地铁运营有限公司,北京 100044)

**摘要:**为验证地铁桥梁监测系统采集数据的可靠性,提高轨道交通系统结构设施安全监督力度,以北京地铁5号线惠新西街北口站-大屯路站的三跨连续箱梁桥为研究对象,考虑列车的动力加载效应,通过实验测试与数值模拟计算相互验证、时域分析与频域分析相结合的方法,对行车过程中桥梁的横向、竖向位移及加速度时程曲线及其变化趋势进行分析,验证了计算程序及实验测试结果的可靠性;通过傅里叶变换分析不同车速下桥梁振动加速度频谱,验证了对桥梁振动起控制作用的频率范围;通过计算不同车速下列车的轮重减载率、脱轨系数、横向力、Spurling指标等,对行车安全性及平稳性进行评价。

**关键词:**桥梁;列车;振动响应;安全性;平稳性

**中图分类号:** U441+.3; U448.21+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0790-09  
**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.016

## 引言

伴随着北京、上海、广州等大城市经济的高速发展和人口的迅速增长,广大市民对公共交通的需求日益提升。城市轨道交通以其安全、快速、准时、环保等特点逐渐成为市民出行的首选交通工具,也是中国解决城市交通拥堵、环境污染等问题的一项重要举措。在城市轨道交通建设过程中,由于成本、既有线路、河流、建筑物等因素的限制修建了大量高架桥线路,桥梁结构在长期环境腐蚀和列车移动荷载反复作用下,结构安全性及耐久性将会受到较大影响,在轨道交通系统的运营过程中需要格外关注。

作为首都的重要公共交通出行方式,北京的城市轨道交通发展迅猛,由于空间限制,线路上的桥梁、隧道等土建设施也越来越多。北京地铁13号线高架线路比重高达92.6%,5号线的高架线路比重也达到了38.8%。随着运营年限的增加及外界环境的不断变化,这些土建设施的结构会产生不间断的细微变化,已有的病害会不断加剧,新的病害也不断出现,若不及时进行维修和养护工作,会对列车安全运行产生极大危害,影响轨道交通安全运营。

国内外对于城市轨道交通桥梁结构和行车安全的研究主要集中在以下几个方面:部分学者以轨道

交通线路中的高架桥梁为研究背景,建立相应的车桥耦合动力分析模型,分析车速、风荷载等因素对桥梁及列车振动响应的影响,评价桥梁安全性、行车平稳性以及乘车舒适性<sup>[1-7]</sup>。但由于各方面的限制,大部分文献集中于数值模拟计算,较少涉及列车运营过程中桥梁结构振动响应的现场实验测试<sup>[8-10]</sup>。一些大型桥梁安装了健康监测系统,对应进行的实验测试及数值计算也相对较多<sup>[11-14]</sup>,但以城市轨道交通桥梁及列车相互作用为研究对象的文献较少<sup>[15-16]</sup>,尤其是对北京市轨道交通桥梁及列车动力相互作用及安全性的研究。

## 1 桥梁振动响应测试

北京市地铁运营公司建立了土建设施监控生产管理信息平台,利用信息化管理手段,实现数据的集中管理,完善养护维修处置体系,提高监督力度,改善地铁运营安全环境。图1所示为北京轨道交通桥梁监测系统,通过布置各种传感器对梁体裂缝、跨中挠度、加速度等内容进行实时监测,以便及时发现异常情况,确保桥梁结构的安全性。为了验证监测系统采集数据的可靠性,北京地铁公司联合多所高校、科研院所对北京地铁5号线的多座高架桥振动响应进行现场测试,并结合车-桥动力相互作用分析模型,对桥梁的

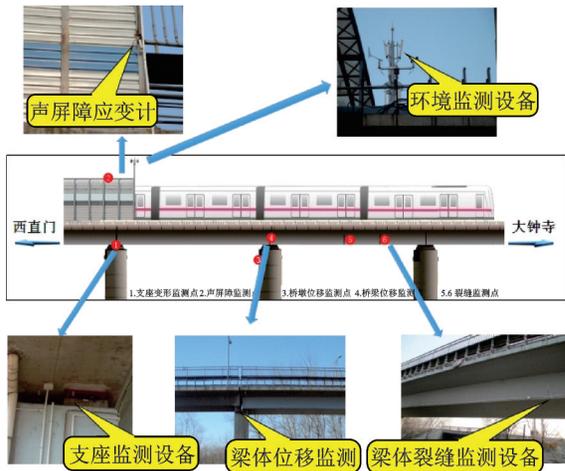


图 1 北京轨道交通桥梁监测系统

Fig. 1 Rail transit bridge monitoring system in Beijing

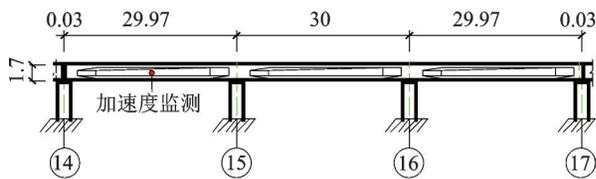
振动响应、车辆的运行指标进行计算及评估。

选取地铁 5 号线上的典型桥梁进行现场试验测试,图 2 所示为惠新西街北口站-大屯路车站的 3×30 m 三跨连续箱梁桥的现场照片、结构布置及横断面图。

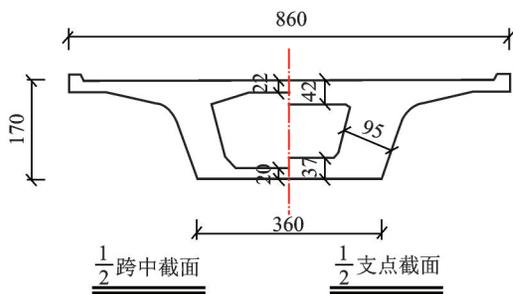
现场实验所采用的测试设备如图 3 所示,其中



(a) 桥梁现场  
(a) Bridge on-site



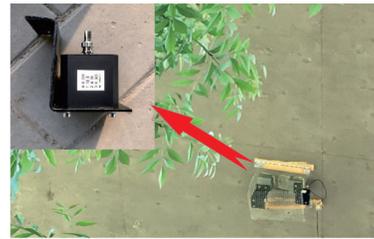
(b) 桥梁布置图(单位:m)  
(b) Equipment layout (Unit: m)



(c) 桥梁横断面(单位:cm)  
(c) Cross section of bridge (Unit: cm)

图 2 三跨连续箱梁桥

Fig. 2 3-spans continuous box girder bridge



(a) 桥梁加速度测试  
(a) Acceleration test



(b) 桥梁挠度测试  
(b) Deflection test

图 3 测试设备及现场布置

Fig. 3 Measuring equipment and site layout

边跨跨中加速度采用 TCZ-1A 型加速度频率传感器,精度为  $10^{-3}g$ ,量程为  $\pm 2g$ ,采样频率为 100 Hz;跨中挠度采用 BJQN-V2.0(非接触)多点动态智能检测系统,精度为  $\pm 0.02\text{ mm}$ ,检测距离 0.1-500 m,分辨率为 0.01 pix,采样频率为 100 Hz。

将测试所得桥梁边跨跨中挠度数据进行低通滤波处理后,绘于图 4。由图 4 可以看出,列车经过时桥梁的最大挠度为 5.16 mm,该曲线能够较好地反映列车经过桥梁时其挠度变化及振动情况,准确地反映车辆的动力加载作用。

将测试所得桥梁边跨跨中的横向加速度数据进行低通滤波处理后,绘于图 5。由图 5 可知,列车经过时,桥梁的跨中横向振动加速度幅值为  $4.62\text{ cm/s}^2$ ,其时程曲线变化趋势与实际情况相吻合,能够准确地反映列车上桥前、在桥上运行期间及过桥后桥梁的振动情况。

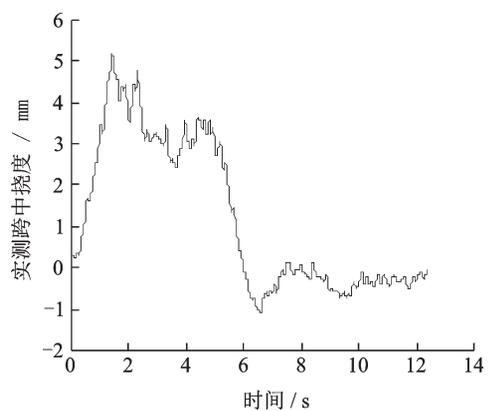


图 4 实测跨中挠度时程

Fig. 4 Measured deflection time history in the mid-span

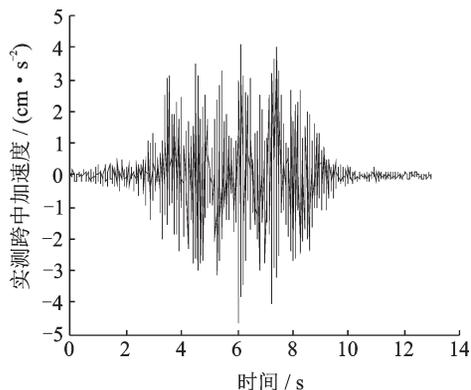


图5 实测横向加速度时程

Fig. 5 Measured lateral acceleration time history

虽然受现场条件及实验设备的限制,部分测试数据不够理想,但以上实测跨中挠度及横向加速度数据说明该实验测试结果具有较高的可信度。

## 2 列车-桥梁动力相互作用分析

由于轨道不平顺、轮对蛇行运动等原因,列车在桥上运行时不可避免的会引起桥梁结构振动,从而增大结构的内力,使结构产生局部疲劳,影响桥梁的工作状态和使用寿命;同时桥梁的振动又会反作用于列车,影响其走行平稳性及安全性,因此建立如图6所示的车-桥动力相互作用分析模型进行仿真模拟计算。

为了克服有限元法计算桥梁结构动力响应工作量巨大的缺点,本文利用振型正交性,通过广义坐标离散的方法,把互相耦联的数百个节点运动方程耦,转化为独立的模态方程进行求解。

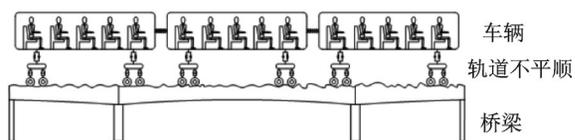


图6 车辆-桥梁动力分析模型

Fig. 6 Dynamic analysis model between vehicle &amp; bridge

采用有限元软件MIDAS建立桥梁的有限元模型,提取对结构动力响应起控制作用的前若干低阶振型进行计算分析<sup>[17]</sup>。将桥梁的前10阶自振频率及振型列于表1。由表1可知,该桥的刚度较大,其第10阶自振频率已经达到20.33 Hz。结合工程经验及模态分析结果,取其前20阶振型参与计算,即可满足精度要求。

列车车辆模型是由车厢、转向架、轮对及弹簧-阻尼悬挂装置组合成的多自由度振动系统,模型基本假定及具体参数含义可以参考相关文献[17]。对于四轴列车,每节车厢考虑27个自由度。考虑地铁实际运营状况,本文计算中采用由6节车厢组成的

表1 桥梁自振频率及振型特征

Tab. 1 Natural frequency and mode shapes of the bridge

模态号	频率/Hz	振型特征描述
1	3.55	三跨主梁正对称竖弯
2	4.60	三跨主梁反对称竖弯
3	6.60	二阶三跨主梁正对称竖弯
4	12.66	二阶三跨主梁反对称竖弯
5	14.47	三阶三跨主梁反对称竖弯
6	15.82	三阶三跨主梁正对称竖弯
7	18.24	四阶三跨主梁反对称竖弯
8	19.53	中跨主梁纵漂
9	19.94	第三跨主梁纵漂
10	20.33	第一跨主梁纵漂

地铁B1型列车,其主要技术参数如表2所示。

表2 列车主要技术参数

Tab. 2 Main parameters of train

车辆参数/单位	数值
车辆全长 $L$ /m	19
车辆定距 $2s$ /m	12.6
固定轴距 $2d$ /m	2.3
车体质量 $M_c$ /t	48.2
转向架质量 $M_t$ /t	2.55
轮对质量 $m_w$ /t	1.42

根据拉格朗日运动方程推导车辆-桥梁系统的动力平衡微分方程

$$\begin{bmatrix} M_{vv} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{R}_v \\ \ddot{R}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{vv} & C_{vb} \\ C_{bv} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{R}_v \\ \dot{R}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{vv} & K_{vb} \\ K_{bv} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_v \\ R_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_v \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中下标“b”,“v”分别代表桥梁和车辆, $M$ 为质量矩阵, $C$ 为阻尼矩阵, $K$ 为刚度矩阵, $R$ 为位移向量, $F$ 为作用在桥梁和车辆上的外力。

系统激励采用美国五级谱转换的时域不平顺样本,序列全长2000 m,不平顺测点间距0.50 m,轨向不平顺幅值为16.89 mm,高低不平顺幅值为26.37 mm。

对于时变系数的运动方程(1),通过Newmark- $\beta$ 算法进行积分迭代求解,采用FORTRAN语言编写相应计算程序,对列车匀速通过桥梁过程中系统各部分的振动响应进行计算,具体计算流程如图7所示。

### 2.1 桥梁振动响应

经现场观测,5号线地铁列车经过该三跨连续箱梁桥时的车速保持在71-75 km/h,因此在车-桥动力作用计算程序中取列车运行速度70 km/h,将计算所得桥梁边跨跨中竖向及横向位移时程曲线绘于

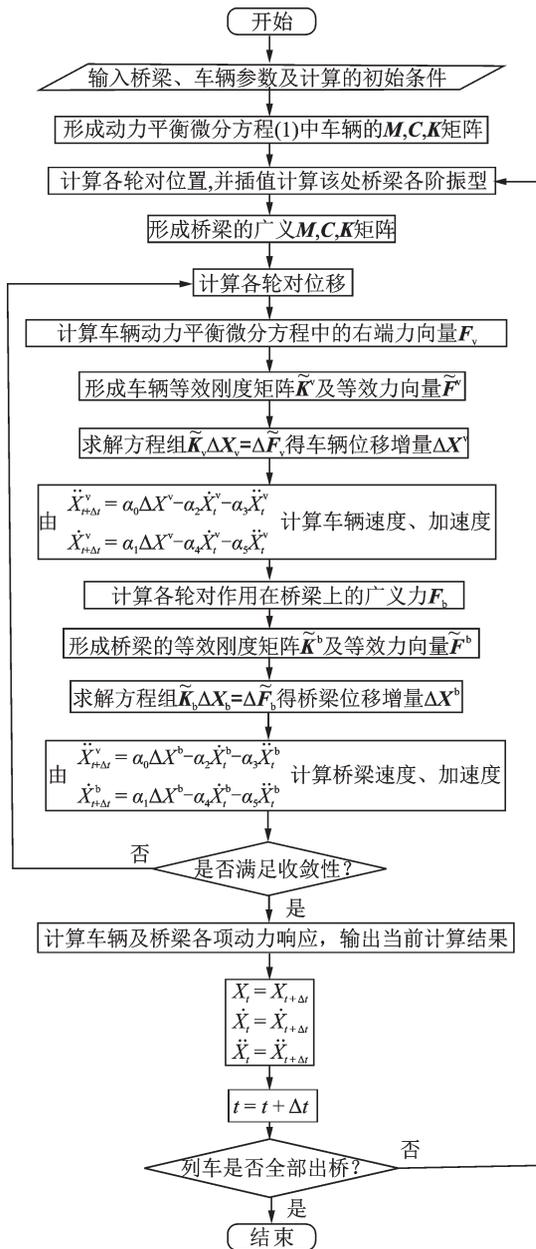


图 7 车桥动力响应计算流程图

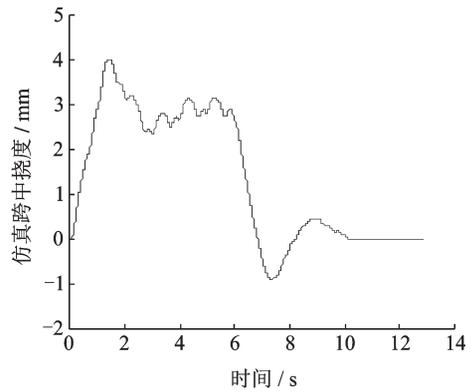
Fig. 7 Calculating process of the bridge-vehicle dynamic responses

图 8,加速度时程曲线绘于图 9。

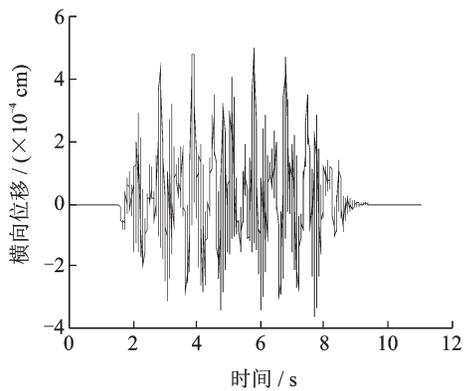
对比图 4 与图 8(a)的边跨跨中位移时程曲线可以看出,曲线的振动趋势基本保持一致,幅值比较接近,均能反映列车的动力加载引起的竖向位移变化;但计算所得桥梁最大挠度为 4.02 mm,与实测结果 5.16 mm 间存在一定差异。

由图 8(b)可以看出,桥梁跨中横向位移非常小,说明桥梁在该方向的振动较弱,这与混凝土桥刚度较大的振动特性保持一致。受实验设备精度限制,现场未对桥梁横向位移进行测试。

对比图 5 与图 9(b)的桥梁跨中横向加速度时程曲线可以看出,两图均能够准确反映 6 节车厢的动力加载过程以及列车通过后桥梁的余振衰减过程,



(a) 竖向位移  
(a) Vertical displacements



(b) 横向位移  
(b) Lateral displacements

图 8 桥梁边跨跨中位移时程曲线

Fig. 8 Deflection time history of the bridge mid-span

实验测试与模拟计算所得时程曲线变化趋势保持一致,但计算所得桥梁横向加速度极值为 3.55 cm/s<sup>2</sup>,比实测结果的 5.01 cm/s<sup>2</sup> 偏小。

对比图 9(a)和(b)可知,桥梁竖向振动加速度的幅值比横向偏大。

分析仿真计算与实测数据间误差产生的主要原因有:

- (1) 该桥东西两侧为城市公路主干道,总有大型车辆经过,较大的车身重量及道路拥堵造成的车辆加速及减速等,均会引起地面有较明显的振动,导致实测数据偏大;
- (2) 桥梁的施工误差及细微的材料损伤、测试设备的精度及误差等均对测试结果有影响;
- (3) 北京地铁 5 号线上的巨大客流量使得车身重量大于计算车重;
- (4) 有限元建模时由于桥墩资料缺失,仅建立主梁的有限元模型,会对计算结果产生影响。

在后续研究中,需尽量选择桥梁两侧道路中车辆较少的时间段进行测试,以减少汽车振动及噪声的影响;通过精细化有限元建模,如增加桥梁下部结

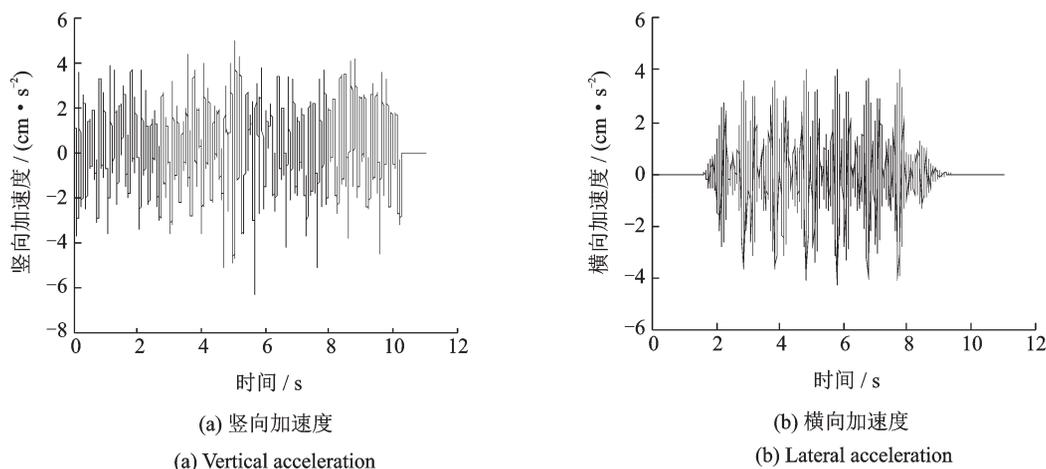


图9 桥梁跨中加速度时程曲线

Fig. 9 Acceleration time history of the bridge mid-span

构等,可适当减小模型简化造成的误差。

经过以上数值计算验证,说明本次实测数据数值比较准确,变化趋势比较合理,测试结果具有较好的可靠性,可用于检验北京轨道交通桥梁监测系统数据的正确性,也证明了自编计算程序计算结果的可靠性。

利用计算程序,改变列车的运行速度,可得到不同车速下桥梁跨中节点的加速度时程数据。参考文献[6],将各种工况下桥梁跨中竖向加速度经快速傅里叶转换(FFT)为如图10所示的频域数据,再结合

桥梁的模态分析结果,确定对桥梁振动影响较大的模态。

由图10可以看出,桥梁的竖向加速度响应主要集中在低频模态,尤其是20 Hz以下的频率对桥梁振动贡献较大:车速为40和100 km/h时桥梁的峰值频率为4.66,4.45 Hz,振动主要由主梁反对称竖弯控制;车速为80 km/h时桥梁的峰值频率为3.47 Hz,振动主要由主梁的正对称竖弯控制;车速为60 km/h时桥梁的峰值频率为5.26 Hz,振动主要由主梁的二阶正对称竖弯控制。对照表1的模态分析结

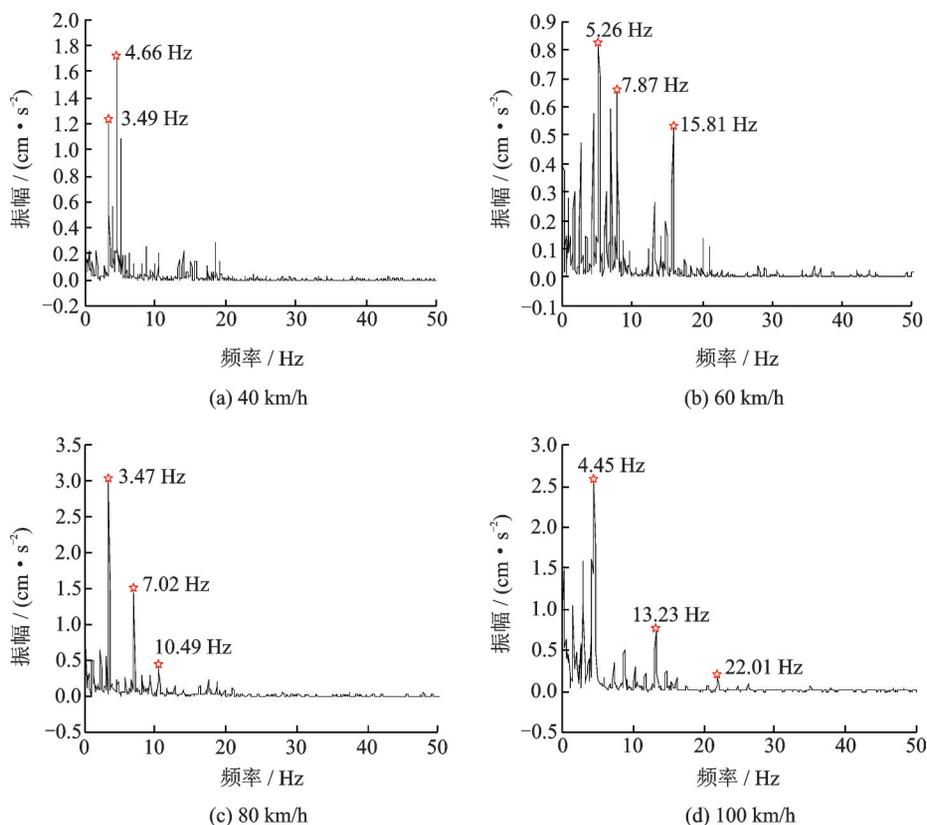


图10 不同车速下桥梁振动加速度频谱

Fig. 10 Frequency domain analysis at different vehicle speeds

果,可知桥梁的振动响应主要由基频模态控制。

### 2.2 行车安全性及平稳性

在现行规范中,行车安全性的评判指标主要为:轮重减载率、脱轨系数及横向力等<sup>[17]</sup>。《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》<sup>[18]</sup>中规定:轮重减载率第一限度为 0.6,脱轨系数第一限度为 1.2,轮对横向力限值为 23.37 kN。

当车速为 70 km/h 时,1-6 节车厢的轮重减载率、脱轨系数及横向力时程曲线如图 11 所示。

由图 11 可以看出,列车在桥上运行过程中,其

轮重减载率、脱轨系数及横向力的时程曲线变化趋势及数值变化范围均比较合理;由于每节车辆长度为 19 m,车辆运行速度为 70 km/h 即 19.4 m/s,因此第 2,3,4,5,6 节车厢上桥的时间约为 0.98,1.96,2.94,3.92,4.90 及 5.88 s,从各行车指标的放大图可以清楚地显示第 1-6 节车厢相继上桥、出桥的时间间隔及其对应的振动响应变化情况,均与实际情况相符。因此可以认为计算数据比较合理,可以验证计算程序的可靠性。

调整列车运行速度在 40-100 km/h 范围内变化,计算所得不同车速下各行车安全性指标最大值

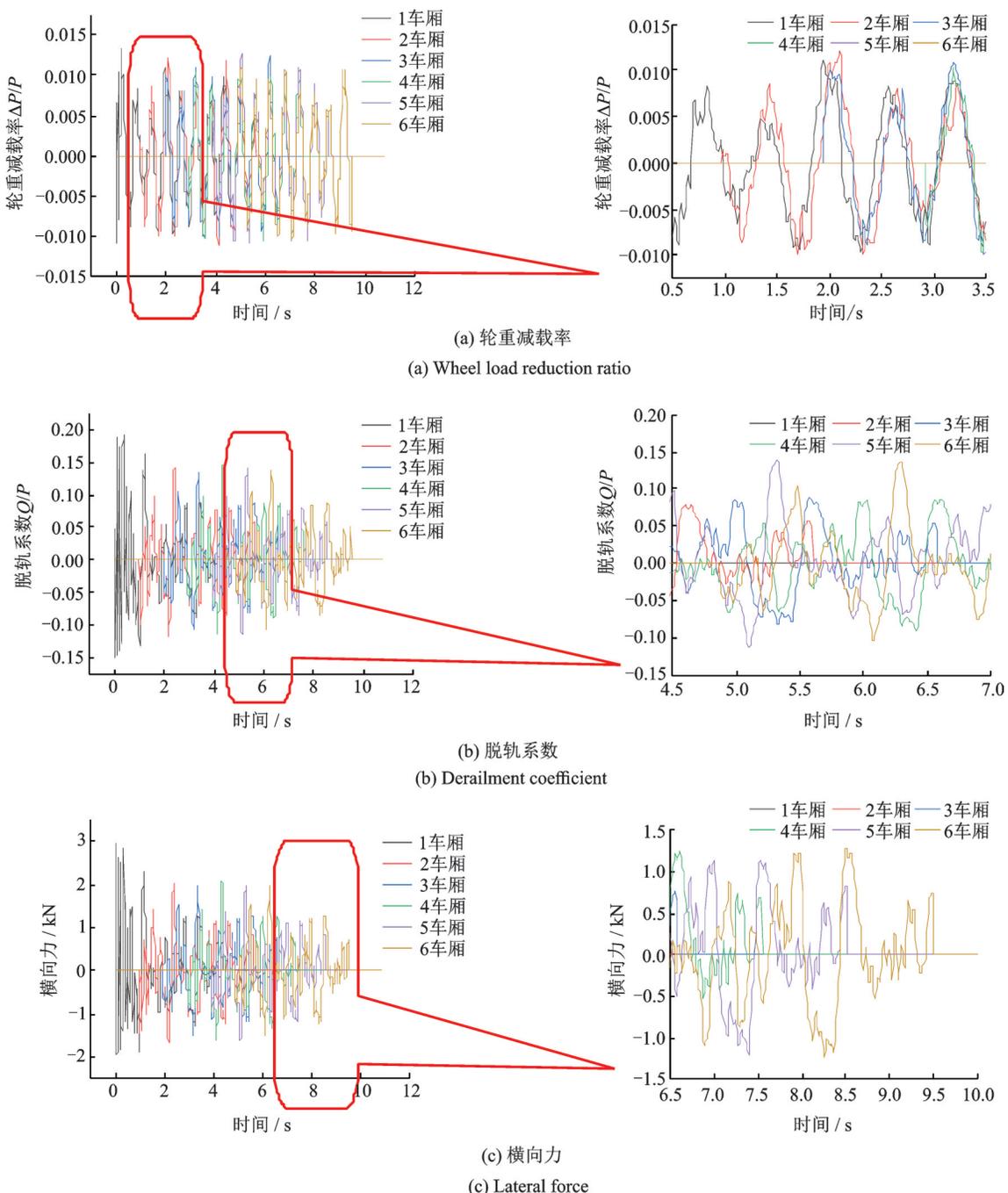


图 11 行车安全性指标时程曲线

Fig. 11 Running safety indicators time history

如图12所示。

由图12(a)可以看出,车速变化对轮重减载率的影响并不明显,不同车速下其最大峰值集中在0.14-0.16范围内;由图12(b)和(c)可以看出列车的脱轨系数与横向力极值受车速变化影响较大,并且二者均在车速为60,90 km/h时出现明显的峰值,行

车过程中应引起注意。由图12中可以看出,列车以不同的速度匀速行驶通过该箱梁桥时,其各项安全指标均在比较合理的范围,均能满足限值要求。

车速为70 km/h时列车的横向及竖向振动加速度频谱如图13所示,从图中可以看出列车的振动主要集中在0-10 Hz范围内。

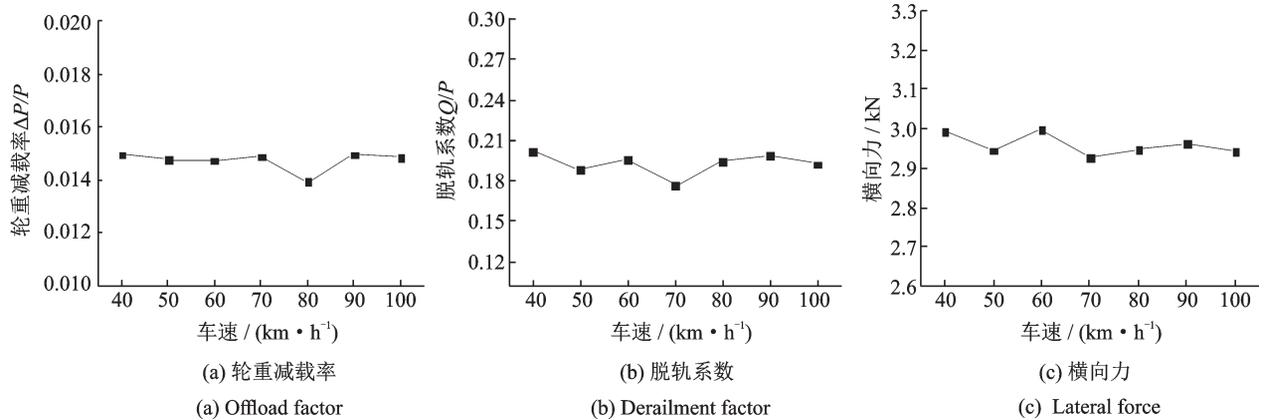
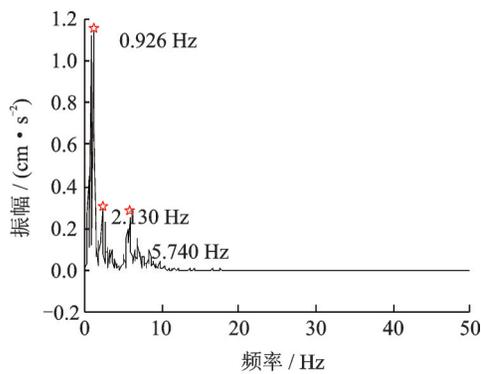


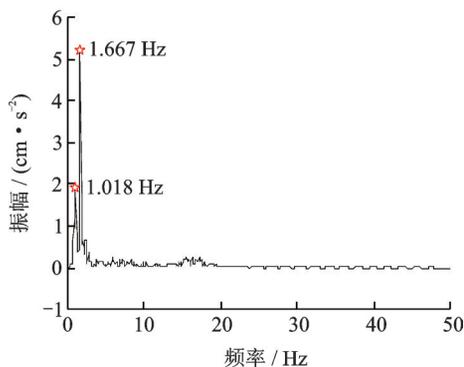
图12 行车安全性指标

Fig. 12 Running safety indicators



(a) 竖向加速度频域

(a) Frequency domain of vertical acceleration



(b) 横向加速度频域

(b) Frequency domain of lateral acceleration

图13 列车加速度频域分析

Fig. 13 Frequency domain analysis of train acceleration

对于列车运行平稳性通常采用 Sperling 指标进行评价<sup>[17-18]</sup>,该指标的计算方法如图14所示。

采用下式计算由不同频率成分的加速度幅值计

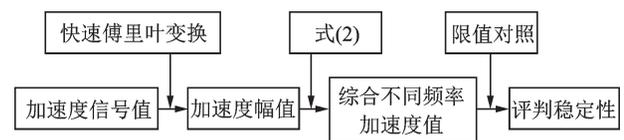


图14 Sperling 指标计算方法

Fig. 14 Sperling indices calculation steps

算综合加速度值

$$W = \sqrt[10]{W_1^{10} + W_2^{10} + \dots + W_n^{10}} \quad (2)$$

其中

$$W_i = 7.08 \sqrt[10]{\frac{A_i^3}{f_i} F(f_i)} \quad (3)$$

式中  $A_i$  为加速度时域信号转换为频域信号后频率  $f_i$  所对应的加速度幅值;  $F(f)$  为频率修正系数, 表达式为:

垂向振动:

$$F(f) = \begin{cases} 0.325f^2, & f = 0.5-5.9 \text{ Hz} \\ 400/f^2, & f = 5.90 \text{ Hz} \\ 1, & f > 20 \text{ Hz} \end{cases} \quad (4)$$

横向振动:

$$F(f) = \begin{cases} 0.8f^2, & f = 0.5-5.4 \text{ Hz} \\ 650/f^2, & f = 5.4-26 \text{ Hz} \\ 1, & f > 26 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5)$$

由 Sperling 指标对应的客车运行平稳性等级评价标准如表3所示。

根据图14及公式(2)和(3)计算得到不同车速下列车的运行平稳性指标评价结果如表4所示。由

表3 客车运行平稳性等级

Tab. 3 Train running stability level

平稳性等级	评定	平稳性指标 $W$
1级	优	$<2.5$
2级	良好	2.5-2.75
3级	合格	2.78-3.0

表4 Sperling 指标评价结果

Tab. 4 Sperling indicators

车速/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	横向 $W_{\max}$	评价 结果	竖向 $W_{\max}$	评价 结果
40	1.88	优秀	1.33	优秀
50	2.36	优秀	1.46	优秀
60	2.69	良好	1.63	优秀
70	2.88	合格	1.77	优秀
80	2.97	合格	1.94	优秀
90	3.02	不合格	2.11	优秀
100	3.08	不合格	2.23	优秀

表4可以看出,列车的平稳性指标随车速的提高而逐渐增大,平稳性逐渐变差,尤其是横向指标,当车速超过90 km/h时,平稳性已超出3级的限值,此时列车的横向晃动应该会比较明显,对乘客的乘车舒适性会有明显的影响;竖向指标在计算时速范围内的评价结果均为优秀。由此可知,对于行车平稳性评价,列车的横向振动响应起控制作用。

### 3 结 论

本文以北京地铁5号线的三跨连续箱梁桥为研究对象,建立了车辆-桥梁动力相互作用分析模型,通过实验测试与数值计算相结合的方法对桥梁的动力响应及列车的运行平稳性进行分析,得出结论如下:

(1) 通过将实测数据与计算结果进行对比,验证了实测数据的可靠性以及所建立车-桥动力作用分析模型及计算程序的正确性,进而模拟了不同工况下车辆、桥梁的动力响应。

(2) 列车运行速度在40-100 km/h范围时,计算所得列车轮重减载率、脱轨系数、横向力等行车安全性指标均比较合理,满足安全限值要求;但列车的运行平稳性指标会在车速超过90 km/h时稍有超限,车辆的横向振动响应对行车平稳性评价起控制作用,对乘客的乘车舒适性有较大影响。

本次实验测试及计算分析数据比较合理,可用于验证北京地铁公司所建立桥梁监测系统采集数据的可靠性,为北京城市轨道交通列车的安全平稳运行提供参考。

### 参考文献:

- [1] 李永乐,杨 恽,赵 彤,等.大跨高墩城市轨道交通斜拉桥车辆走行性研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(1):90-94.  
Li Yongle, Yang Yi, Zhao Tong, et al. Research on vehicle running performance of large span and high pier urban rail transit cable-stayed bridge[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(1): 90-94.
- [2] 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 Zhenguo, Lei Xiaoyan. Improved method and application of rail transit vehicle-bridge coupled vibration simulation[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018,(11): 60-65.
- [3] 秦佳良.轨道交通槽形梁结构低频噪声预测与优化研究[D].华东交通大学,2018.  
Qin Jialiang. Prediction and optimization of the structure-borne low-frequency noise from a rail transit trough girder [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [4] 舒 鹏.大跨度城市轨道交通专用桥梁横向刚度研究[D].西南交通大学,2018.  
Shu Peng. Research on lateral stiffness of large-span urban rail transit bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [5] 汪振国,雷晓燕,罗 锐,等.城市轨道交通高架U型梁车-轨-桥耦合振动分析[J].噪声与振动控制,2017,37(4):132-137.  
Wang Zhenguo, Lei Xiaoyan, Luo Kun, et al. Coupling vibration analysis of urban rail transit U-beam vehicle-track-bridge[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(4): 132-137.
- [6] 雷晓燕,汪振国,罗 锐.城市轨道交通简支箱梁桥结构振动特性分析[J].铁道工程学报,2017,34(9):96-102.  
Lei Xiaoyan, Wang Zhenguo, Luo Kun. Analysis of structural vibration characteristics of urban rail transit simply supported box girder bridges[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(9): 96-102.
- [7] Paul C Fitzgerald, Abdollah Malekafarian, Daniel Cantero, et al. Drive-by scour monitoring of railway bridges using a wavelet-based approach[J]. Engineering Structures, 2019, 191: 1-11.
- [8] 方 圆,李建中,刘 钊,等.连续刚构桥梁车桥耦合竖向动力行为分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(1):14-19.  
Fang Yuan, Li Jianzhong, Liu Zhao, et al. Analysis of vertical dynamic behavior of continuous rigid frame

- bridge vehicle-bridge coupling [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2012, 25(1): 14-19.
- [9] 杭 锦, 张允士. 高架城市轨道交通车辆及桥梁振动的理论研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 83-87.
- Hang Jin, Zhang Yunshi. Theoretical research on vibration of elevated urban rail transit vehicles and bridges [J]. Urban Rail Transit Research, 2018, 21(4): 83-87.
- [10] 谢伟平, 刘 亨. 城市轨道交通“公轨合一”型高架桥车桥耦合振动分析[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 119-126.
- Xie Weiping, Liu Heng. Analysis of vehicle-bridge coupling vibration of urban rail transit viaduct with ‘public and rail in one’ [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 119-126.
- [11] Liang Lin, Li Xiaozhen, Yin Jun, et al. Vibration characteristics of damping pad floating slab on the long-span steel truss cable-stayed bridge in urban rail transit [J]. Engineering Structures, 2019, 191: 92-103.
- [12] 肖 鑫. 基于车-桥一体化监测的铁路钢桥损伤预警及可靠度评估研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017.
- Xiao Xin. Research on railway steel bridge damage early warning and reliability evaluation based on vehicle-bridge integrated monitoring [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017.
- [13] 刘兴旺. 大跨桥梁健康监测数据自诊断与状态评估方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- Liu Xingwang. Research on self-diagnosis and condition assessment methods of long-span bridge health monitoring data [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [14] 黄志广. 大跨度悬索桥温度场现场监测与数值分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- Huang Zhiguang. On-site monitoring and numerical analysis of temperature field of long-span suspension bridges [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [15] Li X, Liang L, Wang D. Vibration and noise characteristics of an elevated box girder paved with different track structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 425: 21-40.
- [16] 吴亮秦, 吴定俊, 李 奇. 城市轨道交通薄壁槽形梁车桥动力特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 31-37.
- Wu Liangqin, Wu Dingjun, Li Qi. Experimental study on dynamic characteristics of thin-walled trough beam bridges for urban rail transit [J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 31-37.
- [17] 张 楠, 郭薇薇, 夏 禾. 高速铁路车桥耦合动力学 [M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2018.
- Zhang Nan, Guo Weiwei, Xia He. High-speed Railway Vehicle-bridge Coupling Dynamics [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2018.
- [18] GB 5599-85. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 1985.

## Numerical analysis and test of dynamic responses of train-bridge system in urban rail transit

WANG Shao-qin<sup>1</sup>, CAO Ming-sheng<sup>2</sup>, LI Yu-jie<sup>3</sup>, GUO Wei-wei<sup>2</sup>

(1.School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2.School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3.Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation Limited, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to verify the reliability of the monitoring data collected by the bridge system of Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation and improve the structure safety supervision level of the capital, a three span continuous box girder bridge from Huixin-Xijie-Beikou-Station to Datun-East-Road-Station in Metro Line 5 is taken as an example, while the dynamic action between a running train and bridge is taken into account, both a field test and numerical calculation are adopted to verify each other, time domain and frequency domain are analyzed meanwhile. The reliability of the written program and the test data are both verified by the vertical and lateral deflection and acceleration responses of the bridge. The frequency domain analysis of the vibration responses of the bridge is carried out by the Fourier transform, and the main frequencies contributing to the vibration of the bridge are verified. The offload factor, derailment factor, lateral force and Sperling index of the train at different speeds are calculated, and the running safety and stability of the train are evaluated.

**Key words:** bridge; train; vibration responses; safety; running stability

**作者简介:** 王少钦(1981-),女,博士,副教授。电话:13811122413;E-mail: wangsq81@163.com