

文章编号:1006-2106(2015)09-0060-07

简支铁路桥梁加固前后共振响应分析^{*}

周长东¹ 刘 斌^{2**}

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 对外经济贸易大学, 北京 100029)

摘要:研究目的:由于加固前后铁路简支桥梁自振频率发生变化,车桥系统发生共振时对应的列车速度发生改变,因此需要分析加固前后桥梁的共振响应是否满足要求。本文介绍车桥系统发生共振的原理,研究影响车桥系统共振响应的因素,采用 ANSYS 软件和多体动力学软件 UM(Universal Mechanism)分析加固前后桥梁仿真模型的车桥耦合动力性能。

研究结论:(1)对于小跨径直线桥梁,加固前后桥梁发生共振时对应的列车速度发生明显改变;(2)通过桥梁加固,其发生竖向共振时列车速度已经超出高速列车的速度范围;(3)列车第二共振速度时桥梁的竖向振幅和加速度远小于列车处于第一共振速度时,故可以不考虑;(4)对桥梁进行加固,能够明显减小共振时桥梁竖向及横向的跨中振幅和跨中加速度;(5)本研究成果可为简支铁路桥梁的共振控制提供借鉴。

关键词:铁路桥梁;共振控制;车桥耦合;加固;车速

中图分类号:U448 **文献标识码:**A

Research on the Resonance Response of Simply – supported Railway Bridge Before and After Reinforcement

ZHOU Chang – dong¹, LIU Bin²

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. University of International Business and Economics, Beijing 100029, China)

Abstract: Research purposes: According to the change of natural frequency of the simply – supported railway bridge before and after strengthening, the resonance speed of train is changed. So it is necessary to analyze the resonance response whether meet the requirements when the bridge is strengthened. In this paper, the resonance mechanism about vehicle – bridge system is introduced, the influence factors of resonance response about vehicle – bridge system are studied, and the dynamic interaction between train and bridge before and after strengthening is analyzed through ANSYS and multi – body dynamics software UM.

Research conclusions: (1) Results of the vehicle – bridge simulation calculation indicate that the resonance speed is changed before and after strengthening of the straight small span bridge. (2) The resonance speed outstrips the normal speed range of high speed train after strengthening of bridge. (3) The vertical amplitude and acceleration of bridge when the train on second resonance speed is much lower than that of the first resonance speed, so it can be ignored. (4) The amplitude and acceleration can be reduced obviously when vertical and transverse bridge resonance occurs according to the strengthening of bridge. (5) The research methods and results can provide references for the resonance control of the simply – supported railway bridges.

Key words: railway bridge; resonance control; vehicle – bridge interaction; strengthen; speed of train.

^{*} 收稿日期:2015-06-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51478033,51178029)

^{**} 作者简介:周长东,1971 年出生,男,教授,博士生导师;刘斌,1987 年出生,男,助理工程师。

在车桥系统中,当列车引起的激振频率与桥梁结构的自振频率接近或相等时,车桥体系将发生共振现象,使车桥系统动力响应急剧增大,从而造成桥梁的纵横向振动加剧。竖直方向振动过大会对列车的舒适性造成影响并对桥梁结构造成损伤,而横向振动过大会导致列车运行不平顺甚至导致脱轨等严重后果。

我国《高速铁路设计规范(试行)》(TB 10621—2009)在参考欧洲 UIC 规范并根据大量车桥耦合分析结果的基础上,规定了桥梁自振频率下限,用以避免车桥系统发生共振现象。但是铁路简支桥梁加固以后会改变桥梁结构的自振频率,列车提速会改变激振频率,并且不同的列车长度也会引起发生共振的列车速度的变化,这些都为桥梁发生共振提供了多种不确定因素,因此分析桥梁加固后车桥系统共振以及如何避免共振的发生具有重要的理论和工程意义^[1]。

1 桥梁加固后自振频率

本文进行分析的桥梁模型为三跨简支铁路桥梁,单跨 32.7 m,梁高 2.5 m,采用 60 kg/m 钢轨,Ⅱ型轨枕,两片 T 梁通过横隔板相连,每跨梁上共设 8 道横隔板,除靠近支座处横隔板到梁端距离为 4.3 m 外,其余横隔板间距均为 4 m,梁体和横隔板采用 C50 混凝土。

加固方案为对桥梁全长进行纵向加固,每片 T 梁腹板两侧各设置 2 根纵向预应力钢筋,桥梁近支座 1/4 跨范围内的已有横隔板间增设 1 个预制混凝土横

隔板,尺寸为 1.8 m × 1.56 m × 0.3 m,横隔板内均匀布置 4 根横向预应力筋,已有横隔板两侧各布置 2 根预应力钢筋,预应力筋采用低松弛 $\phi 15.2$ mm、1860 级无粘结钢绞线。

桥梁模型取单跨简支 T 梁进行模拟,混凝土单元采用空间实体单元 soild65 进行模拟,预应力钢筋采用 link10 进行模拟。建模过程中不考虑普通钢筋影响,桥梁预应力筋采用直线配筋。由分析结果可知,加固前桥梁自振频率分别为 3.20 Hz、4.95 Hz 和 8.63 Hz,加固后桥梁自振频率变为 4.95 Hz、5.53 Hz 和 11.32 Hz。

2 车桥系统共振分析

对于中小跨度的铁路简支桥梁,引起车桥共振的因素很多。车辆自重通过规则排列的轮对形成的周期性加载,是竖向共振的主要形成因素;由轨道不平顺以及车辆蛇行运动引起的横向周期性激励,是横向共振的主要形成因素。由此可以推断出车桥共振的影响因素包括列车速度、列车的轴距和编组、列车的载重、桥梁的跨度、桥梁的竖向以及横向刚度^[2-3]。

2.1 车桥竖向共振原理分析

通过模型分析简支铁路桥梁的竖向共振原理,将列车轮对对桥梁的作用简化为等间距的集中力 P ,并且其间距 d_v 与车辆长度 l_v 相等,车桥共振分析示意图如图 1 所示。

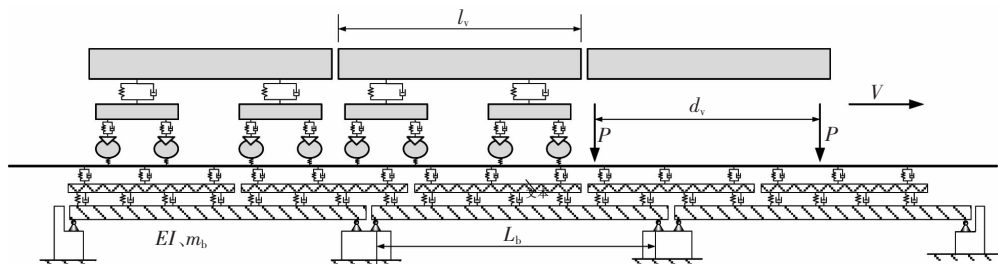


图 1 车桥共振分析示意图

可以得到桥梁运动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m_b \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c_b \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \sum_{k=0}^{N-1} \delta \left[(x - V(t - \frac{nd_v}{V})) \right] (P - m_s \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c_v \dot{u} + k_v u) \quad (1)$$

式中 n ——第 n 个集中力;

V ——列车运行速度;

u ——列车轮对弹簧变形;

\dot{u} ——轮对弹簧的广义速度向量;

m_s ——轮对簧下质量;

k_v, c_v ——轮对弹簧的刚度和阻尼;

EI, m_b, c_b ——简支桥梁的刚度、单位长度质量以及阻尼系数。

对式(1)采用振型分解法进行求解得到:

$$y(x,t) = \sum_{j=1}^K q_j(t) \phi_j(x) \quad (2)$$

式中 $\phi_j(x)$ ——桥梁的第 j 阶振型, $\phi_j(x) = \sin(j \bar{\omega} t)$;

$\bar{\omega}$ ——荷载的激励圆频率, $\bar{\omega} = \pi V/L_b$;

L_b ——桥梁跨度。

若忽略桥梁阻尼并对方程(2)进行解耦,并且只考虑基频振型,可以得到桥梁竖向挠度方程为:

$$y(x, t) = \frac{2PL_b^3}{EI\pi^4} \frac{1}{1-\beta^2} \sin \frac{\pi x}{L_b} \left[\sum_{n=0}^{N-1} \sin \bar{\omega} \left(t - \frac{nd_v}{V} \right) - \beta \sum_{n=0}^{N-1} \sin \omega \left(t - \frac{nd_v}{V} \right) \right] \quad (3)$$

式中 ω ——简支梁的圆频率, $\omega = \frac{\pi^2}{L_b^2} \sqrt{\frac{EI}{m_b}}$;

β ——频率比, $\beta = \bar{\omega}/\omega$;

$1/(1-\beta^2)$ ——动力放大系数。

式(3)中, 括号内第一项为稳态反应, 无临界速度; 第二项为瞬态反应, 存在发生极值的速度 $V_{bi} = f_b d_v / i$, 其中 f_b 为桥梁竖向自振频率, V_{bi} 为第 i 共振速度^[4-6]。

由式(1)和式(3)可以得出, 影响桥梁竖向共振的因素有铁路简支桥梁的刚度 EI 、跨度 L_b 、质量 m_b 、阻尼比 ζ ; 列车的轴重 P 、列车长度 l_v 等, 这也与前面的推断相符合。铁路简支桥梁进行加固以后, 桥梁自身的刚度、质量与阻尼比均会发生变化, 从而导致发生共振时的列车速度以及竖向振幅发生改变。

2.2 车桥横向共振原理分析

列车在轨道上行驶时, 横向的周期性激励源主要有轮对蛇行运动以及轨道不平顺。桥梁加固以后列车速度提高, 轮对的蛇行运动会加剧轮对与轨道间的作用力, 从而成为车桥系统横向振动的主要激励源。而且有研究表明, 当轮对蛇行运动的激振频率与桥梁横向有载自振频率相同时, 车桥系统会发生横向共振。

蛇行运动引起的轮轨间的相对位移以及转角可以用随机函数进行表示:

$$y(x) = A \sin \left(\frac{2\pi x}{L_s} + \varphi \right) = A \sin \left(\frac{2\pi V}{L_s} t + \varphi \right) \quad (4)$$

$$\theta = \frac{\lambda}{b} y \quad (5)$$

式中 $y(x)$ ——轮轨间相对位移;

θ ——转角;

V ——列车速度;

L_s ——蛇行运动的主波长, $L_s = 2\pi\sqrt{br_0/\lambda}$;

b ——左右两轮滚动圆的直径;

r_0 ——车轮的滚动半径;

λ ——车轮踏面锥度;

φ ——蛇行运动初相角^[7-8]。

可以得到横向共振列车速度为 $V_{bi} = f_b L_s / i$, 其中 L_s 的确定需要考虑轮缘磨损程度的影响, 其取值在 6.65 ~ 15.7 m 之间, 通常磨耗型蛇行波长为 8.5 m。

铁路简支桥梁进行加固以后, 桥梁横向自振频率 f_b 发生改变, 从而导致车桥横向共振的列车速度 V_{bi} 也发生改变。

3 UM 车桥耦合共振分析

本文以 TGV 高速列车以及 ICE-3 高速列车为研究对象, 在多体动力学软件 UM 中建立高速列车的动车和拖车的非线性动仿真模型。桥梁模型通过 UM 与 ANSYS 的接口程序导入, 将单跨简支桥梁在 UM 软件中进行组装, 分析高速列车通过三跨铁路简支桥梁时车辆与桥梁振动的动力学参数。

3.1 车桥竖向共振分析

高速列车由于速度较高, 所以动车作用在桥上的时间很短, 不会形成较大的振幅, 并且由于桥梁结构阻尼的影响, 振动会迅速的衰减, 因此在计算中可以选取高速列车的拖车长度为车体长度。TGV 列车车体长度为 18.7 m, ICE-3 列车车体长度为 26.3 m, 铁路简支桥梁加固前竖向自振频率为 4.95 Hz, 加固后竖向自振频率为 5.53 Hz。根据 $V_{bi} = f_b d_v / i$ 可以得出, TGV 列车通过未加固桥梁时竖向共振速度为 $V_{b1} = 333.2$ km/h、 $V_{b2} = 166.6$ km/h、 $V_{b3} = 111$ km/h, 通过加固后桥梁时竖向共振速度为 $V_{b1} = 372.3$ km/h、 $V_{b2} = 186.1$ km/h、 $V_{b3} = 124.1$ km/h; ICE-3 列车通过未加固桥梁时竖向共振速度为 $V_{b1} = 468.7$ km/h、 $V_{b2} = 234.3$ km/h、 $V_{b3} = 156.2$ km/h, 通过加固后桥梁时竖向共振速度为 $V_{b1} = 523.6$ km/h、 $V_{b2} = 261.8$ km/h、 $V_{b3} = 174.5$ km/h。图2、图3、图4和图5分别给出了列车在第一共振速度通过桥梁时桥梁的竖向共振响应。

由图可以得出, 桥梁加固前 TGV 列车第一共振速度与目前高速列车速度接近, 桥梁加固后 TGV 列车和 ICE-3 列车的第一共振速度均已经超出了目前阶段高速列车运行的通常速度。TGV 及 ICE-3 列车在第一共振速度下通过桥梁, 桥梁的跨中竖向振幅和跨中竖向加速度比其他速度通过桥梁时明显增大, 但是跨中竖向位移增大并不明显。TGV 列车在桥梁加固前以 333.2 km/h 通过桥梁时, 桥梁跨中竖向振幅为 2.42 mm, 跨中竖向加速度为 2.35 m/s²。加固后以 372.3 km/h 通过桥梁时, 桥梁跨中竖向振幅为 1.05 mm, 较加固前减小了 56.6%; 跨中竖向加速度为 1.68 m/s², 较加固前减小了 28.5%。ICE-3 列车在桥梁加固前以 468.7 km/h 通过桥梁时, 桥梁跨中竖向振幅为 2.98 mm, 跨中竖向加速度为 2.95 m/s²。加固后以 523.6 km/h 通过桥梁时, 桥梁跨中竖向振幅为 1.43 mm, 较加固前减小了 52.0%; 跨中竖向加速度为 1.56 m/s², 较加固前减小了 47.1%。TGV 列车在桥梁加固后达到第一共

振速度时,动车会对桥梁跨中竖向共振响应产生较大影响。

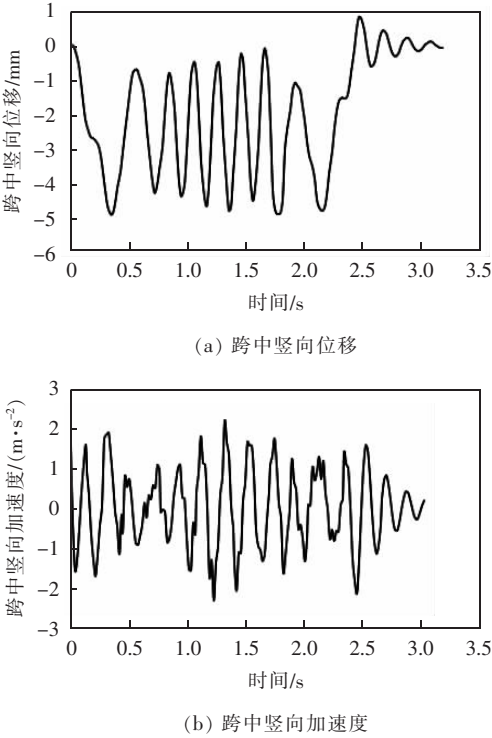


图2 加固前 TGV 列车 $V_{bl}=333.2$ km/h 通过时的桥梁竖向共振响应

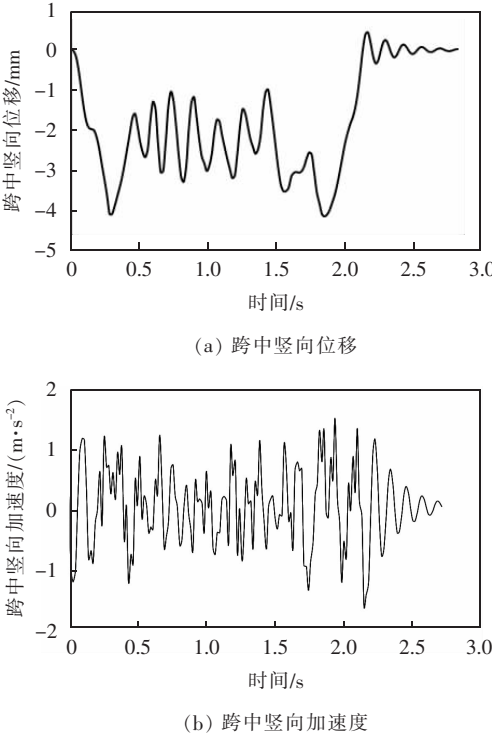


图3 加固后 TGV 列车 $V_{bl}=372.3$ km/h 通过时的桥梁竖向共振响应

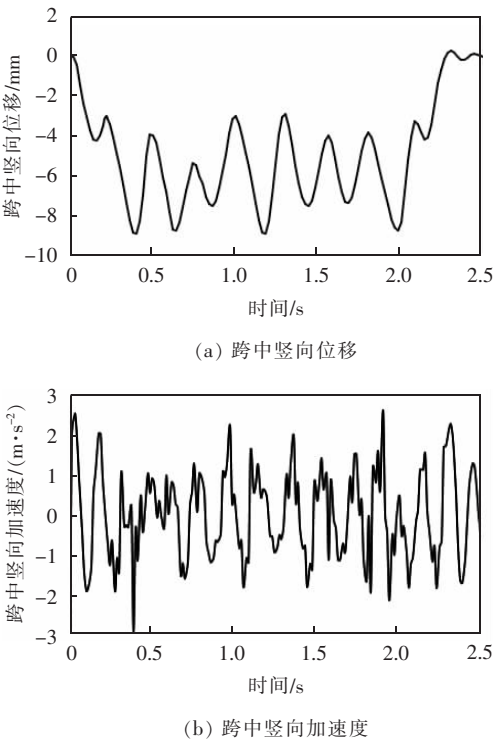


图4 加固前 ICE-3 列车 $V_{bl}=468.7$ km/h 通过时的桥梁竖向共振响应

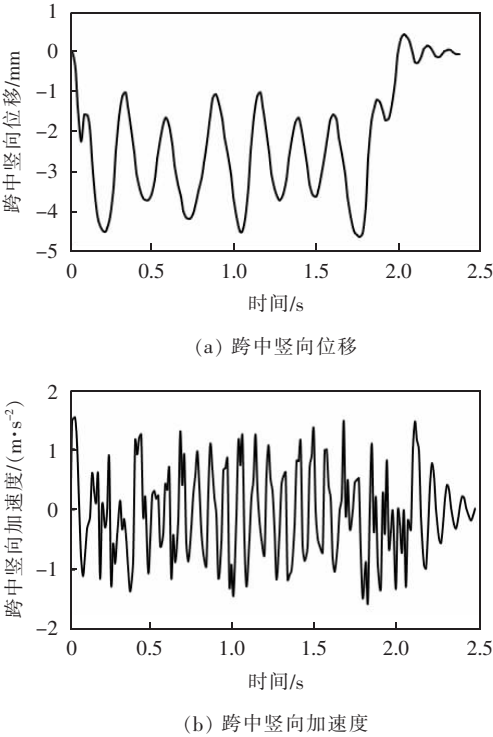


图5 加固后 ICE-3 列车 $V_{bl}=523.6$ km/h 通过时的桥梁竖向共振响应

桥梁加固前后,ICE-3 列车的竖向第二共振速度在高速列车通常速度附近,所以需要分析桥梁在 ICE-3 列车达到第二共振速度时的竖向共振响应。同时

为了更好的检验理论推导的正确性,在 UM 中以 10 km/h 的速度等级对车桥耦合系统的共振反应进行分析。其中 TGV 列车的速度范围为 0 ~ 400 km/h, ICE - 3 列车的速度范围为 0 ~ 550 km/h。

TGV 列车与 ICE - 3 列车在不同速度等级下的桥梁竖向振幅如图 6、图 7 所示。

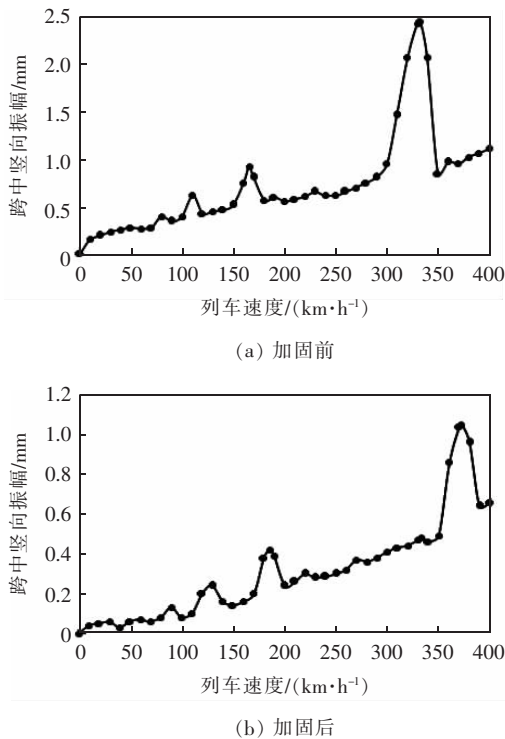


图 6 TGV 列车不同速度等级桥梁竖向振幅

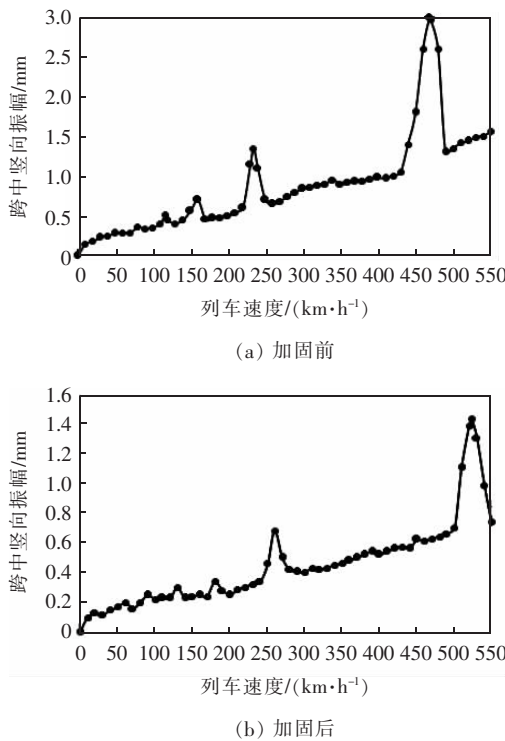


图 7 ICE - 3 列车不同速度等级桥梁竖向振幅

由图 6、图 7 可以看出,UM 车桥耦合仿真分析的计算结果与通过原理分析得出共振速度公式得到的计算结果相一致。列车在第一、第二、第三共振速度时,桥梁跨中竖向振幅均有明显突变,桥梁跨中的竖向振幅总体趋势是随列车速度增大而变大。桥梁加固前后发生共振时,竖向位移与加速度均未超出《铁路桥梁检定规范》规定(32 m 预应力铁路简支桥梁竖向挠度通常值为 24.6 mm,桥梁桥面板的垂向加速度限值为 3.43 m/s²),也未超出《高速铁路设计规范》规定(梁体竖向挠度在列车速度 250 km/h 时为 22.8 mm,在列车速度 300 km/h 时为 21.3 mm,在列车速度 350 km/h 时为 20 mm)^[9-10]。

桥梁加固前后发生共振时跨中竖向振幅如表 1 所示。桥梁加固前跨中竖向振幅在 TGV 列车达到第二共振速度时是第一共振速度时的 37.6%,加固后为 40.9%;桥梁加固前跨中竖向振幅在 ICE - 3 列车达到第二共振速度时是第一共振速度时的 45.5%,加固后为 47.9%。由此可知,第二共振速度时的跨中竖向振幅远小于第一共振速度时的跨中竖向振幅,若列车达到第一共振速度时桥梁竖向共振响应未超限,则可不分析其第二共振速度时的竖向共振响应。

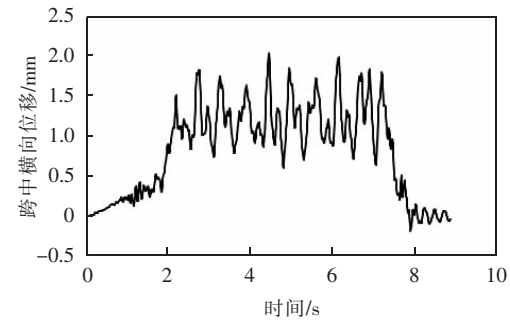
表 1 桥梁加固前后各共振速度竖向振幅 (单位:mm)

列车类型	加固前跨中竖向振幅			加固后跨中竖向振幅		
	第一共振速度	第二共振速度	第三共振速度	第一共振速度	第二共振速度	第三共振速度
TGV	2.42	0.91	0.61	1.05	0.43	0.24
ICE - 3	2.97	1.35	0.70	1.42	0.68	0.34

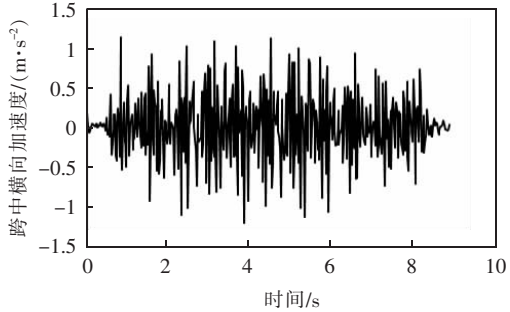
3.2 车桥横向共振分析

取蛇行波长 $L_s = 8.5$ m,根据列车横向共振速度公式 $V_{bl} = f_b L_s / i$ 可以得到该简支桥梁加固前横向共振发生时列车速度为 $V_{bl} = 97.9$ km/h,桥梁加固后横向共振发生时列车速度为 $V_{bl} = 151$ km/h。以 TGV 列车与铁路简支桥梁为分析模型进行车桥耦合共振分析。为了验证列车横向共振速度计算公式,桥梁加固前后设定分析速度等级分别为 5 km/h 和 10 km/h。加固前后桥梁跨中横向共振响应如图 8、图 9 所示,列车在分析速度范围内桥梁加固前后的最大跨中横向振幅如图 10 所示。

根据《铁路桥梁检定规范》规定,32 m 预应力铁路简支桥梁横向振幅通常值为 1.23 mm,安全限值为 3.62 mm,横向加速度安全限值为 1.4 m/s²。桥梁加固前横向共振时跨中横向振幅为 2.04 mm,远超过通常值,但尚未达到安全限值;跨中横向加速度为 1.22 m/s²,接近安全限值。加固后桥梁跨中横向共振振幅为 1.57 mm,略超过通常值,但远小于安全限值;跨中横

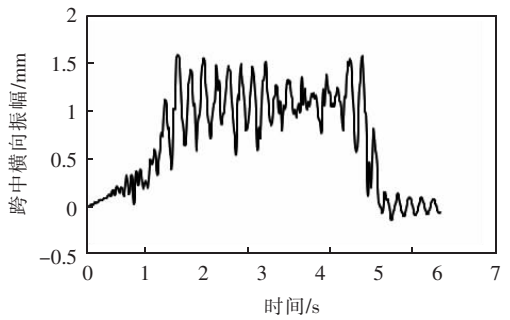


(a) 跨中纵向位移

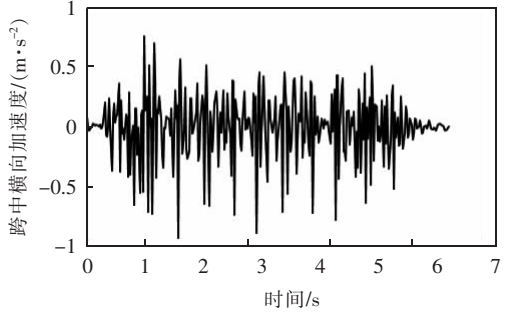


(b) 跨中横向加速度

图8 加固前 TGV 列车 $V_{bl}=97.9$ km/h 通过时的桥梁横向共振响应

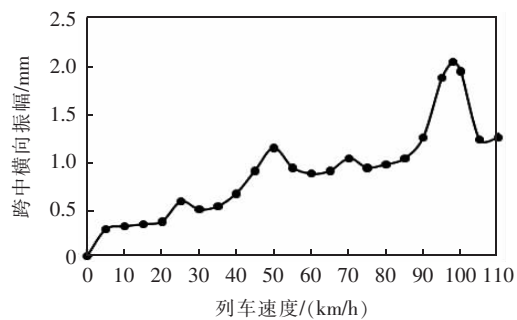


(a) 跨中横向振幅

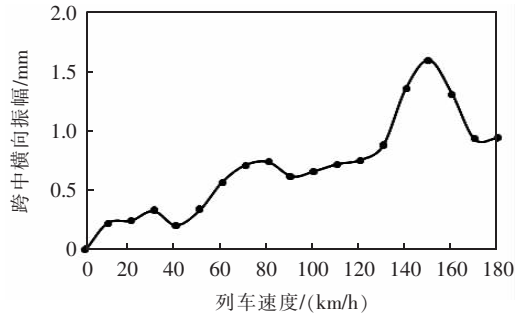


(b) 跨中横向加速度

图9 加固后 TGV 列车 $V_{bl}=151$ km/h 通过时的桥梁横向共振响应



(a) 加固前



(b) 加固后

图10 TGV 列车不同速度等级桥梁横向振幅

向加速度为 0.93 m/s^2 , 小于安全限值。桥梁加固后横向共振振幅比加固前减小了 22.7% , 横向加速度减小了 23.1% , 桥梁加固后在车桥发生共振时, 其横向共振响应满足安全性需要。

图10表明, 当列车速度达到一定值时, 桥梁会发生横向共振, 桥梁跨中横向振幅产生突变。图中振幅突变时的列车速度与列车横向共振速度公式计算结果相一致。

4 结论

本文分析了车桥系统共振的影响因素以及发生共振的原理, 通过车桥耦合仿真分析, 研究了桥梁加固前后发生共振时列车速度的变化, 验证了列车共振速度计算公式的正确性, 分析了桥梁加固前后发生共振时的动力响应, 得出了以下结论:

(1) 对 32 m 预应力简支 T 型梁桥的加固增大了结构的自振频率, 从而使得车桥系统发生共振时列车的速度增大。桥梁加固前发生共振时列车的速度在《铁路桥梁检定规范》中规定的高速列车速度的通常值附近, 桥梁加固后列车的共振速度高于《铁路桥梁检定规范》规定的高速列车速度通常值。

(2) 当桥梁的跨度不变时, 桥梁共振的动力响应与自身的质量、横向刚度、纵向刚度以及阻尼有关。桥梁加固提高了自身影响共振响应的这些因素, 从而使

得桥梁加固以后发生共振时桥梁的跨中振幅和跨中加速度明显减小。

(3) 列车竖向共振速度的计算公式与车桥耦合仿真分析结果相一致。桥梁在列车达到第一共振速度所产生的竖向动力响应要远大于列车第二共振速度时的动力响应,如果桥梁在列车第一共振速度时的竖向动力响应不超限,则不必分析其列车第二共振速度时的竖向动力响应。

(4) 桥梁横向共振主要影响因素是轮对蛇行运动以及轨道不平顺,列车横向共振速度计算公式与车桥耦合仿真分析结果一致。桥梁加固前虽然列车速度较低,但达到横向共振速度时桥梁的跨中横向振幅远超过了《铁路桥梁检定规范》规定的通常值,跨中横向加速度接近《铁路桥梁检定规范》规定的安全限值;桥梁加固后车桥发生共振时其横向共振响应远小于加固前,满足安全需要。

参考文献:

- [1] 夏禾,郭薇薇,张楠. 车桥系统共振机理和共振条件[J]. 铁道学报,2006(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(5): 52-58.
- [2] 苏木标,李建中,邹振祝. 铁路简支梁桥竖向共振影响因素的分析[J]. 工程力学,2003(4):59-66.
Su Mubiao, Li Jianzhong, Zou Zhenzhu. Analysis of the Factors Influencing Vertical Resonance of Simply Supported Railway Girders[J]. Engineering Mechanics, 2003(4):59-66.
- [3] Wakui H, Matsumoto N, Tanabe M. A Study on Dynamic Interactions Analysis for Railway Vehicles and Structures - mechanical Model and Practical Analysis Method [J]. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 1994(2):96-104.
- [4] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京:科学出版社,2002.
Xia He. Vehicle and Structure Dynamic Interaction [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [5] 秦文孝. 高速列车桥梁系统竖向共振影响因素及预防措施研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
Qin Wenxiao. Study on Influencing Factors and Preventive Measures for Vertical Resonance of High Speed Train - Bridge System [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [6] 郑晓龙. 反向曲线铁路桥梁车桥耦合动力分析研究[J]. 铁道工程学报,2014(12):46-51,56.
Zheng Xiaolong. Analysis and Study of Train - bridge Coupling Dynamic of Anti - curve Railway Bridge System [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(12):46-51,56.
- [7] 刘文峰,宿健,何玉珊,等. 32 m 跨简支铁路桥梁横向振动的研究分析[J]. 振动、测试与诊断,2004(1):57-60.
Liu Wenfeng, Su Jian, He Yushan, etc. Research on Horizontal Vibration of 32 m Span Simply Supported Railroad Bridges [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2004(1):57-60.
- [8] 王贵春,潘家英. 轨道不平顺导致的车桥耦合振动分析[J]. 铁道工程学报,2006(8):30-33,57.
Wang Guichun, Pan Jiaying. Analysis of Vehicle - bridge Coupled Vibration due to Track Irregularities [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(8): 30-33,57.
- [9] 铁运函[2004]120号,铁路桥梁检定规范[S].
Rail Transport Letter [2004] No. 120, Railway Bridge Test Specification [S].
- [10] TB 10621—2009,高速铁路设计规范(试行)[S].
TB 10621—2009, Code for Design of High Speed Railway (Trial) [S].