

文章编号:1671-1637(2012)02-0032-06

磁浮列车单铁悬浮车桥耦合振动分析

梁鑫, 罗世辉, 马卫华, 吴庆, 许自强

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为研究单铁悬浮车桥耦合振动,将悬浮控制系统、车辆结构、弹性轨道梁及桥梁安装系统作为整体系统,建立整体系统的磁浮列车的悬浮控制-弹性桥梁-机械结构垂向耦合振动模型,以不同频率的外力激励模拟磁浮列车不同的速度下对桥梁的作用,分析了不同梁型在整体系统耦合条件下的跨中挠度与振动加速度的变化。研究表明:单铁悬浮稳定后,简支梁跨中挠度约为两跨连续梁悬浮处挠度的2.5倍;以 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速通过桥梁时其挠度略小于 $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速通过工况,但前者再次达到稳定状态所需时间约为后者的 $1/3$;车辆以相同速度通过桥梁时,连续梁悬浮处跨中挠度约为简支梁的 40% ,且前者振动加速度小于后者;仿真过程中桥梁安装临界刚度范围为 $(5.5\sim 6.5)\times 10^7\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$;两跨连续梁动力学性能较简支梁更为优秀。

关键词:磁浮列车;车桥耦合振动;单铁悬浮;悬浮控制;动力学模型

中图分类号:U237 **文献标志码:**A

Coupling vibration analysis of single-magnet suspension vehicle-bridge for maglev train

LIANG Xin, LUO Shi-hui, MA Wei-hua, WU Qing, XU Zi-qiang

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the coupling vibration of single-magnet suspension vehicle-bridge, suspension control system, vehicle structure, elastic track beam and bridge installation system were taken as a whole system, and maglev train suspension control-elastic bridge-mechanical structure vertical coupling vibration model of whole system was established. The effects of maglev train at different speeds on bridge were simulated by using external loads with different frequencies. The changes of mid-span deflection and vibration acceleration for different beam types were analyzed under the coupling condition of whole system. Study result shows that the mid-span deflection of simple-supported beam is about 2.5 times as the suspension position deflection of two-span-continuous beam when single-magnet suspension process achieves stable state. When train passes bridge at the speed of $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, the deflection is slightly smaller than that at the case of $400\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, the time that requires to achieve stable state for former case is about $1/3$ of latter case. The mid-span deflection at suspension position for continuous beams is about 40% of the deflexion for simple-supported beam when train passes bridge at an identical speed, and the vibration acceleration of former case is smaller than that of latter case. The range of bridge critical mounting stiffness in simulation process is from $5.5\times 10^7\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ to $6.5\times 10^7\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, and the dynamics performance of two-span-continuous beam is better than that of simple-supported

收稿日期:2011-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51005190);霍英东教育基金会项目(122014);牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2008TPL_T03)

作者简介:梁鑫(1984-),男,山东临沂人,西南交通大学工学博士研究生,从事磁浮列车系统动力学研究。

导师简介:罗世辉(1964-),男,江西赣州人,西南交通大学教授,工学博士。

beam. 1 tab, 12 figs, 13 refs.

Key words: maglev train; vehicle-bridge coupling vibration; single-magnet suspension; suspension control; dynamics model

Author resumes: LIANG Xin(1984-), male, doctoral student, +86-28-87601973, liangxin_151@163.com; LUO Shi-hui(1964-), male, professor, PhD, +86-28-86466023, shlue@home.swjtu.edu.cn.

0 引言

磁浮列车是一种基于电磁悬浮原理,采用无接触运行的新型轨道交通工具,它具有高速、平稳、舒适、噪音低、转弯半径小等优点^[1],目前已在德国、日本、中国得到了应用^[2],其相关研究工作在世界范围内都有进行。磁浮列车悬浮控制系统是磁浮列车与传统轮轨列车区别的关键所在,它是通过控制电磁铁与轨道梁之间的电磁力来实现磁浮车辆的悬浮^[3-4]。磁浮列车运行是一个悬浮控制-机械结构-弹性桥梁相互耦合的复杂问题,工程应用中常常增大轨道梁质量及安装刚度来缓解系统耦合所带来的问题,如悬浮稳定问题,然而这将导致建设成本大幅提高,限制了磁浮交通的发展与推广^[4-5]。

近年来,国内外学者对磁浮列车车桥耦合问题进行了多角度的研究,并取得了一定的进展。姜卫利等建立了磁浮车-高架桥垂向耦合模型,分析了桥梁的刚度和高架桥线路不平顺、不同车速通过不同梁跨度时对磁浮车-高架桥垂向动力学响应的影响^[1-2];邓亚士等将磁浮车辆、轨道梁及其下部桥梁视为一个整体的大系统,建立了磁浮车辆-轨道梁-桥梁动力耦合模型,研究了在参数正弦不平顺作用下的系统振动响应规律^[3];翟婉明等分析了悬浮控制系统、弹性桥梁的动态特性,并研究了车辆在悬浮控制系统作用下,对不同的跨长、刚度桥梁,车辆悬浮间隙及桥梁跨中的挠度随车速的变化^[4];Lee 等研究了磁浮列车以不同的车速通过桥梁时,车速及载荷对桥梁跨中挠度的影响,并得出相关结论^[6-7]。

本文将悬浮控制系统、车辆机械结构、弹性轨道梁及下部桥梁系统作为整体大系统进行研究,建立了包括单铁悬浮控制模型、轨道模型、车辆模型的磁浮列车的悬浮控制-弹性桥梁-机械结构垂向耦合振动模型,以不同频率的外力激扰模拟磁浮车在不同速度下对桥梁的作用,研究了不同型式梁在整体大系统耦合条件下的跨中挠度、振动加速度的变化,以及不同频率的激扰对车、桥的振动影响。

1 悬浮控制-弹性桥梁-机械结构垂向耦合振动模型

1.1 单铁悬浮模型

磁浮列车通过一系列的悬浮控制点实现车辆的悬浮^[6],每一个悬浮控制点所实现的都是一种有源主动控制过程,其最基本要求就是要保证磁浮列车在各种内外扰动作用下仍然能够保持平衡稳定的悬浮^[7-8]。对于单个控制点可以视为单磁铁的悬浮控制过程^[8],其垂向物理模型见图 1, $z(t)$ 为自由悬浮物的垂向位移, F 为悬浮力。设质量为 m 的悬浮物悬浮于固定电磁铁下方,其具有单一的垂向自由度,电磁控制线圈电流为 $i(t)$,悬浮物与电磁铁之间的悬浮间隙为 $c(t)$,电磁铁线圈电感为 $L(t)$ 。设 N 为电磁铁绕组的匝数, A 为铁芯极面积, Φ_T 为电磁铁的磁通, μ_0 为磁导率, $u(t)$ 为电磁铁绕组电压, t 为时间, R 为线圈中电阻,根据电磁学基本原理,电磁铁线圈电感为^[8]

$$L(t) = \frac{N\Phi_T}{i(t)} = \frac{\mu_0 NA}{2c(t)} \quad (1)$$

电磁铁绕组的电学方程为

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d}{dt}[L(c)i(t)] = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2c(t)} \cdot \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2[c(t)]^2} \frac{dc(t)}{dt} \quad (2)$$

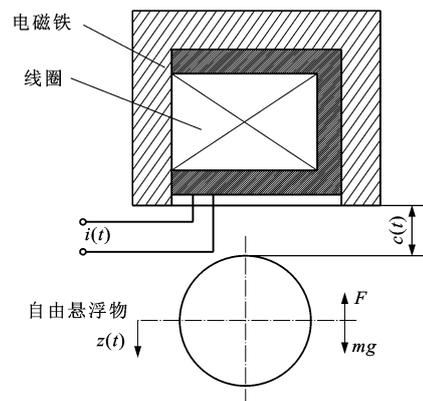


图 1 单磁铁垂向悬浮模型

Fig. 1 Vertical suspension model of single magnet

悬浮物垂向运动微分方程为

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = -F[i(t), c(t)] + mg \quad (3)$$

$$F[i(t), c(t)] = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (4)$$

$$F(i_0, c_0) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i_0}{c_0} \right)^2 \quad (5)$$

式中： $F(i_0, c_0)$ 为单磁铁在平衡位置时的瞬间悬浮力。

在实际过程中，悬浮过程是一个动态平衡过程^[6]，单铁悬浮过程中的悬浮力随悬浮间隙 $c(t)$ 和电流 $i(t)$ 的变化而不断变化^[8]，因此，任一瞬态的悬浮间隙由平衡时的悬浮间隙 c_0 和微小的波动间隙 $\Delta c(t)$ 两部分构成。同样，电流 $i(t)$ 也由平衡时的额定电流 i_0 和微小的波动电流 $\Delta i(t)$ 构成，即

$$c(t) = c_0 + \Delta c(t)$$

$$i(t) = i_0 + \Delta i(t)$$

由于 2 种微小波动都非常小，现只考虑微小波动的一次项的影响，则单铁悬浮的线性力学模型为

$$F[i(t), c(t)] = F(i_0, c_0) + K_c \Delta c(t) + K_i \Delta i(t) \quad (6)$$

$$K_c = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2c_0^3}$$

$$K_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_0}$$

式中： K_c 、 K_i 分别为 $\Delta c(t)$ 、 $\Delta i(t)$ 引起悬浮力变化的系数。

1.2 磁浮车辆-轨道垂向耦合动力学模型

磁浮列车运行对线路、桥梁结构的动力作用须将磁浮车辆、轨道及桥梁视为整体系统进行研究^[4-6]。本文建立包括单铁反馈控制系统在内的磁浮车辆-轨道垂向耦合动力学模型，见图 2。本文采用 Euler-Bernoulli 梁基本模型，建立了简支与两跨连续梁模型，模型中车辆只具有沉浮自由度，由此得

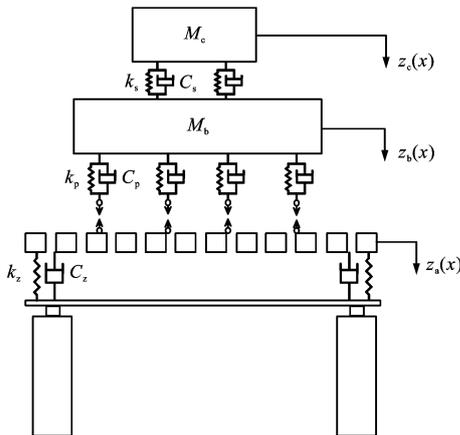


图 2 磁浮车辆-轨道垂向动力学模型

Fig2 Maglev vehicle-track vertical dynamics model

到磁浮车辆系统垂向多刚体动力学方程，对车体有

$$M_c \frac{d^2}{dx^2} z_c(x) + C_s \frac{d}{dx} z_c(x) + k_s z_c(x) = M_c g \quad (7)$$

对磁转向架有

$$M_b \frac{d^2}{dx^2} z_b(x) - C_p \frac{d}{dx} z_c(x) - k_p z_c(x) = M_b g - F \quad (8)$$

式中： M_c 为车辆的质量； M_b 为悬浮架的质量； C_p 为车辆悬浮阻尼； k_p 为车辆悬浮刚度； C_s 为车辆二系垂向阻尼； k_s 为车辆二系垂向刚度； $z_b(x)$ 、 $z_c(x)$ 分别为悬浮架、车辆的垂向位移。图 2 中 k_z 、 C_z 、 $z_a(x)$ 分别为轨道梁的安装刚度、安装阻尼和垂向位移。

将磁转向架和车体视为一个机械系统，则两者之间的弹簧阻尼力视为内力^[9-10]，由此得到机械结构的垂向微分方程为

$$M_c \frac{d^2}{dx^2} z_c(x) + M_b \frac{d}{dx} z_b(x) = (M_c + M_b)g - F \quad (9)$$

对于 Euler-Bernoulli 弹性轨道梁而言，垂向动挠度为^[11]

$$z(x) = \sum_{j=1}^n \varphi_j(x) q_j(x) + z_a(x) \quad (10)$$

式中： $\varphi_j(x)$ 为 j 阶模态幅值； $q_j(x)$ 为 j 阶模态函数。式(1)~(10)组成了单铁悬浮-车辆-轨道耦合系统的动力学方程。

2 参数选择

根据单铁悬浮与实际磁浮车辆比例计算，给出仿真过程中使用的模拟车辆模型参数，见表 1，其中 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 分别为轨道梁绕 x 、 y 、 z 方向的转动惯量。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

项目	参数值	项目	参数值
一系质量/kg	772	轨道梁转动惯量/ (kg·m ²)	I_{xx} 160
二系质量/kg	2 100		I_{yy} 10 830
轨道梁质量/kg	2 970		I_{zz} 10 892
轨道梁密度/(kg·m ⁻³)	2 500	杨氏模量/(N·m ⁻²)	2.5×10^{10}

3 仿真结果分析

3.1 支座安装刚度对轨道梁挠度的影响

磁浮车辆在简支梁上悬浮时，跨中挠度随支座安装刚度的变化情况见图 3。从图 3 中可以看出，针对文献[3]的控制模型，桥梁跨中挠度随支座安装刚度的减小而增大。当 $k_z > 6.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时，桥梁的跨中挠度受 k_z 的影响较小，当安装刚度进一步减小，桥梁跨中挠度迅速增大，因此，为了实现较好的车桥耦合动力学性能，依据本文控制模型

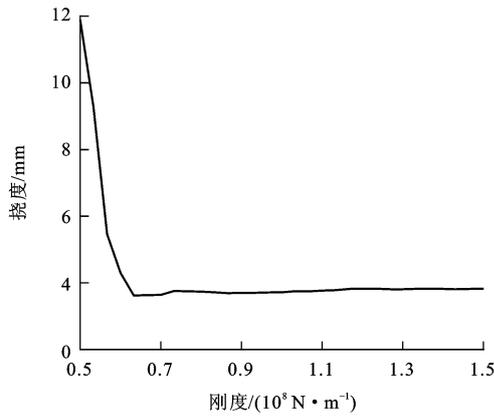


图 3 跨中挠度随安装刚度的变化

Fig. 3 Change of mid-span deflection with mounting stiffness

及弹性桥梁模型,结合磁浮车辆的悬浮间隙为 8~10 mm,桥梁支座安装临界刚度范围为 $(5.5\sim 6.5)\times 10^7\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

3.2 梁型对悬浮车辆的悬浮影响

简支梁和两跨连续梁梁型对悬浮稳定过程及跨中挠度的影响分别见图 4、5。从图 4 中可以看出,在这 2 种梁上,悬浮系统都能够迅速地悬浮一定高度,并保持稳定状态,即不同的梁型对磁浮车辆的悬浮过程影响不大。

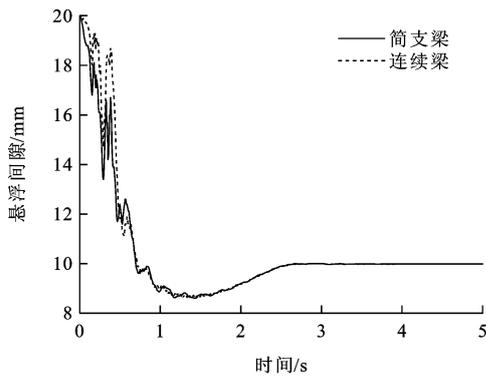


图 4 梁型对悬浮过程的影响

Fig. 4 Influences of beam types on suspension processes

然而,梁型对悬浮过程跨中挠度有很大的影响^[10],从图 5 中可以看出,简支梁的跨中挠度要明显大于连续梁悬浮处挠度,前者稳定值约为后者的 2.5 倍,对于连续梁悬浮处的挠度与第 2 跨挠度方向相反,前者幅值约为后者的 2 倍。

3.3 车速对桥梁的动力学响应的影响

磁浮列车以一定速度通过桥梁时,跨中位置是固定不变的,此时可认为磁浮列车车体质量点以一定速度依次通过桥梁跨中处,车速不同时,跨中处受到外力时间间隔(频率)不同。此外,根据弹性梁的挠度特性^[11-12],车辆通过桥梁时,质量点作用于跨中

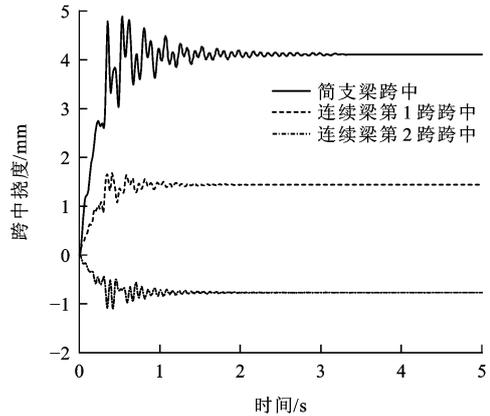


图 5 不用梁型对跨中挠度的影响

Fig. 5 Influences of beam types on mid-span deflections

处外力的大小总是从小到大,其变化规律类似于一个简谐函数。基于以上分析,仿真时可以用一个正弦力模拟悬浮车辆通过桥梁时车辆对跨中处的外部激励。设车辆的长度为 L ,车辆通过桥梁跨中时的速度为 v ,将车辆的质量视为集中在在质心位置,忽略相邻车辆之间的间距,则车辆通过跨中的时间为 $\frac{L}{v}$,即外部激励的作用频率 f 为 $\frac{v}{L}$ ^[13]。车辆分别以 200、300、400 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 通过跨度为 24 m 的桥梁时的外部激励时间历程见图 6。

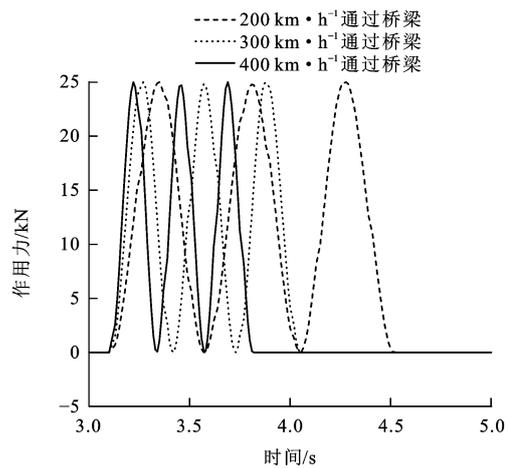


图 6 车-桥作用力时间历程

Fig. 6 Time processes of vehicle-bridge interaction forces

图 7~12 为列车以不同速度通过 24 m 跨度简支梁和两跨连续梁时,跨中挠度及振动加速度的变化。从图 7~12 中可得出如下结论。

(1)列车以不同的速度通过简支桥梁时,其挠度略有差异,车速越大,挠度略有增大,但是,车辆通过后,桥梁达到再次稳定的时间却有明显的差异,以 200 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 通过桥梁再次达到稳定的时间约是

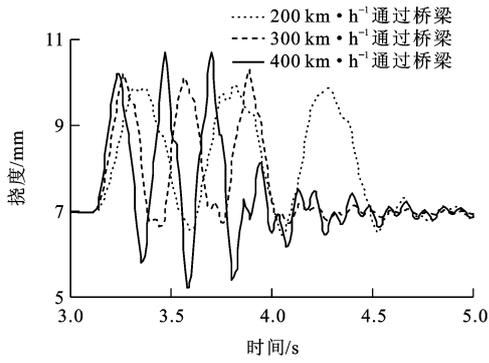


图7 简支梁的跨中挠度变化

Fig. 7 Changes of mid-span deflections for simple-supported beam

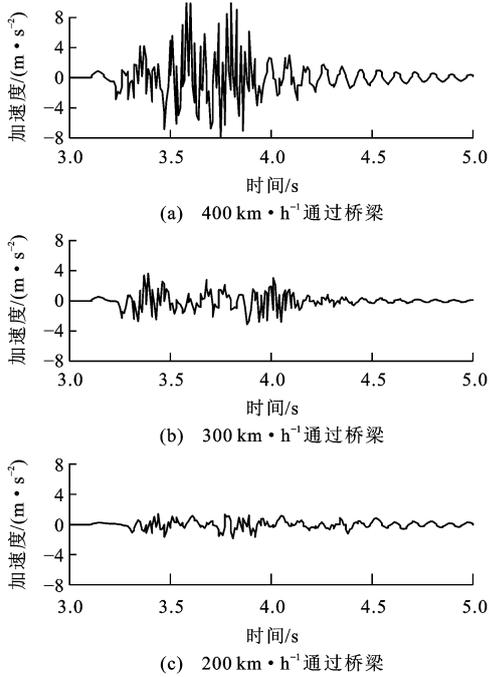


图8 简支梁跨中的振动加速度变化

Fig. 8 Changes of vibration accelerations at simple-supported beam mid-span

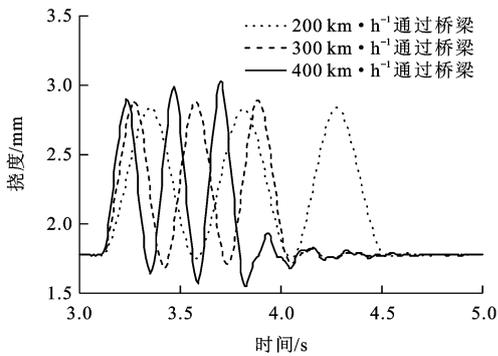


图9 第1跨跨中挠度变化

Fig. 9 Changes of deflections at middle of first span
400 km · h⁻¹的 1/3。

(2)不同的车速对桥梁跨中作用,桥梁的振动加

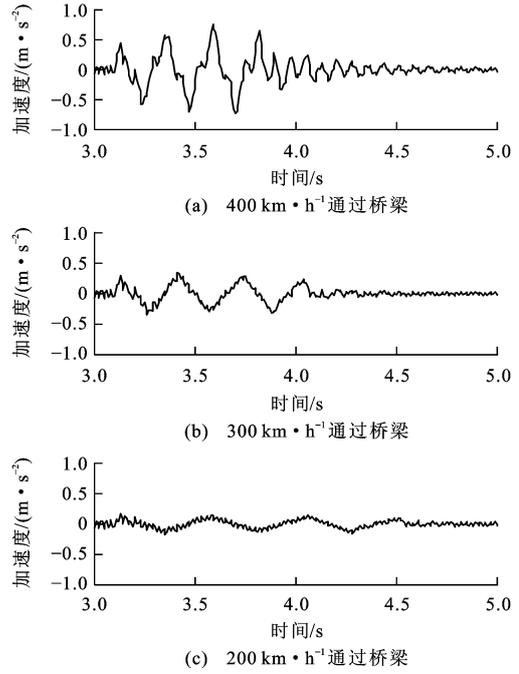


图10 第1跨跨中振动加速度变化

Fig. 10 Changes of vibration accelerations at middle of first span

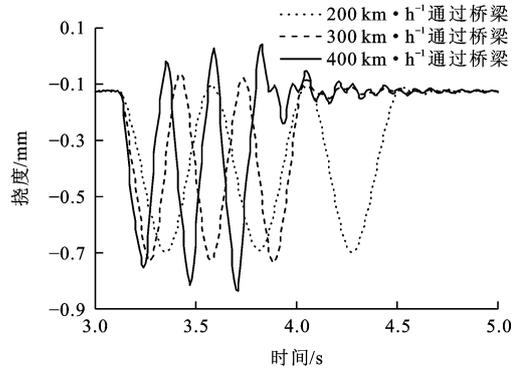


图11 第2跨跨中挠度变化

Fig. 11 Changes of deflections at middle of second span

速度有明显的差异,200 km · h⁻¹通过桥梁的振动加速度约为 400 km · h⁻¹的 1/3。

(3)相同车速的磁浮列车对于简支梁和两跨连续梁的作用有明显的差异,列车连续梁悬浮处跨中挠度大约是简支梁跨中挠度的 40%。

(4)对于桥梁振动加速度,车速 400 km · h⁻¹通过简支梁的振动加速度接近 9 m · s⁻²,远远大于相同车速下连续梁的振动加速度,但对于两跨连续梁,第1跨连续梁的挠度及加速度都略大于第2跨,因此,从动力学角度来说,连续梁优于简支梁。

4 结 语

(1)轨道梁的支座安装刚度对梁的挠度有一定的影响,支座安装刚度增大,桥梁的挠度动力响应将

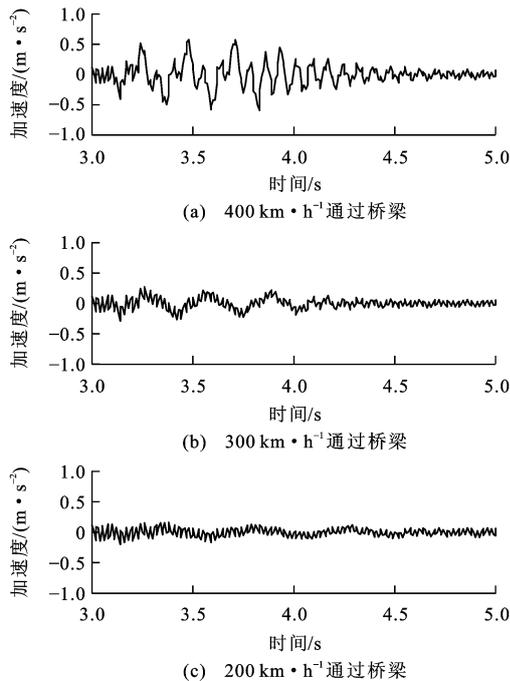


图12 第2跨跨中振动加速度变化

Fig. 12 Changes of vibration accelerations at middle of second span

减弱,因此,为了实现较好的车桥耦合动力学性能,依据本文控制模型及弹性桥梁模型,结合磁浮车辆的悬浮间隙为8~10 mm,桥梁支座安装临界刚度范围为 $(5.5\sim 6.5)\times 10^7\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

(2)不同的梁型对磁浮列车的悬浮稳定影响不大,在简支梁和两跨连续梁上,悬浮系统都能够迅速地悬浮一定高度,并保持稳定状态。

(3)相同车速的列车对于简支梁和连续梁的作用有明显的差异,尤其表现在桥梁的振动加速度方面。对于跨度相同的简支梁和两跨连续梁,简支梁的挠度要明显大于连续梁,且振动加速度也较大。相同车辆、不同车速通过桥梁时,不同频率的车-桥作用力对桥梁的挠度有一定的影响,但影响不明显,对简支梁的振动加速度影响远大于连续梁,因此,从动力学的角度说,连续梁要优于简支梁。

参考文献:

References:

[1] 姜卫利,高芒芒. 轨道梁参数对磁浮车-高架桥垂向耦合动力响应的影响研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 71-75.
JIANG Wei-li, GAO Mang-mang. Study of the effect of track beam parameters on vertical coupled dynamic response of maglev vehicle-viaduct [J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 71-75. (in Chinese)

[2] 时瑾,魏庆朝,吴范玉. 高速磁浮铁路轨道梁振动分析及控制研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(10): 76-80.

SHI Jin, WEI Qing-chao, WU Fan-yu. Study on vibration of the beam of magnetic levitation express railway and its control [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(10): 76-80. (in Chinese)

[3] 邓亚士,魏庆朝,时瑾. 高速磁浮桥上轨道梁振动特性初步研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(3): 248-254.
DENG Ya-shi, WEI Qing-chao, SHI Jin. Vibration characteristics of guideway specific for bridge of maglev under irregularities [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(3): 248-254. (in Chinese)

[4] 翟婉明,赵春发. 磁浮车辆/轨道系统动力学(I)——磁/轨相互作用及稳定性[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 1-10.
ZHAI Wan-ming, ZHAO Chun-fa. Dynamics of maglev vehicle/guideway systems (I)—magnet/rail interaction and system stability [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 1-10. (in Chinese)

[5] 赵春发,翟婉明. 磁浮车辆/轨道系统动力学(II)——建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 163-175.
ZHAO Chun-fa, ZHAI Wan-ming. Dynamics of maglev vehicle/guideway systems (II)—modeling and simulation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 163-175. (in Chinese)

[6] LEE J S, KWON S D, KIM M Y, et al. A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guideway bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 328(3): 301-317.

[7] ROTE D M, CAI Y. Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1383-1390.

[8] 李莉,孟光. 电磁型磁悬浮列车动力学研究综述[J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 110-114.
LI Li, MENG Guang. Summary of the dynamic research on EMS-maglev trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(4): 110-114. (in Chinese)

[9] 鲍佳. 磁浮列车悬浮控制与动力学仿真[D]. 成都:西南交通大学, 2003.
BAO Jia. Suspension control and dynamic simulation of maglev [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)

[10] ZHENG Xiao-jing, WU Jian-jun, ZHOU You-he. Numerical analyses on dynamic control of five-degree-of-freedom maglev vehicle moving on flexible guideways [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 235(1): 43-61.

[11] CAI Y, CHEN S S, ROTE D M, et al. Vehicle/guideway dynamic interaction in maglev systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(3): 526-530.

[12] YAU J D. Aerodynamic vibrations of a maglev vehicle running on flexible guideways under oncoming wind actions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(10): 1743-1759.

[13] JU S H, LIN H T. Resonance characteristics of high-speed trains passing simply supported bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(5): 1127-1141.