

文章编号: 1674—8247(2022)06—0023—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2022. 06. 005

桥墩刚度对铁路大跨连续梁桥车桥耦合振动的影响研究

周川江 徐昕宇 郑晓龙 陈星宇

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:为研究桥墩刚度对高墩大跨连续梁桥的影响,本文以某高墩大跨铁路桥梁为背景,采用 MSC Patran 和 ADAMS Rail 软件联合仿真技术,对桥梁进行了车桥系统耦合振动分析,研究了桥墩横向刚度和桥墩高差对车辆和桥梁动力响应的影响,结果表明:(1)当桥墩横向刚度与原有刚度的比值在 0.6~1.4 范围内变化时,桥梁的横向动力响应变化不大,当桥墩横向刚度与原有刚度的比值由 0.6 降至 0.2 时,桥梁横向动力响应缓慢增大,当桥墩横向刚度与原有刚度的比值降低至 0.2 以下时,桥梁的横向动力响应急剧增大;(2)车辆动力性能受桥墩横向刚度变化的影响不大;(3)随着桥墩高差的增大,桥梁的跨中横向位移明显减小,列车和桥梁的其他动力响应指标的变化不大。

关键词:铁路桥梁;桥墩刚度;数值计算;大跨度连续梁桥;动力响应

中图分类号:U441⁺3

文献标识码:A

Study on the Influence of Pier Stiffness on Vehicle-bridge Coupled Vibration of Long-span Continuous Girder Bridge of Railway

ZHOU Chuanjiang XU Xinyu ZHENG Xiaolong CHEN Xingyu

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the influence of pier stiffness on high-pier long-span continuous girder bridges, this paper, based on a high-pier long-span railway bridge, analyzes the vehicle-bridge coupled vibration and studies the influence of transverse stiffness and height difference of piers on dynamic response of vehicle and bridge by using MSC Patran and ADAMS Rail software joint simulation technology. The results show that: (1) When the ratio of the transverse stiffness of the pier to the original stiffness changes within the range of 0.6~1.4, the transverse dynamic response of the bridge changes little. When the ratio decreases from 0.6 to 0.2, the transverse dynamic response of the bridge increases slowly. When the ratio decreases to below 0.2, the transverse dynamic response of the bridge increases sharply. (2) The dynamic performance of vehicle is not greatly affected by the change of transverse stiffness of the pier. (3) With the increase of height difference of piers, the mid-span transverse displacement of the bridge decreases obviously, while other dynamic response indicators of vehicle and bridge change little.

Key words: railway bridge; pier stiffness; numerical calculation; long-span continuous girder bridge; dynamic response

铁路桥梁是构成高速铁路的重要工程结构,必须具备足够的刚度和良好的整体性,才能确保高速列车

的运营安全性和乘坐舒适性。高速列车过桥时,力通过轮对经轨道作用到桥梁上,桥梁结构的整体刚度决

收稿日期:2021-09-24

作者简介:周川江(1993-),女,工程师。

引文格式:周川江,徐昕宇,郑晓龙,等.桥墩刚度对铁路大跨连续梁桥车桥耦合振动的影响研究[J].高速铁路技术,2022,13(6):23-29.

ZHOU Chuanjiang, XU Xinyu, ZHENG Xiaolong, et al. Study on the Influence of Pier Stiffness on Vehicle-bridge Coupled Vibration of Long-span Continuous Girder Bridge of Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6):23-29.

定了桥梁的动力性能,进而对列车过桥的安全性和平稳性产生影响。

我国研究人员从20世纪80年代就开始了车桥动力耦合振动的理论和应用研究,至今已建立了多种动力分析模型,制定了相应的评价标准。翟婉明等^[1]以简支箱梁桥为研究对象,分析了桥墩横向刚度对车-线-桥耦合系统动力性能的影响,结果表明桥墩横向刚度不足将严重影响列车过桥时的安全性和平稳性,当桥梁梁体和桥墩的横向刚度满足规范要求时,影响列车安全性和平稳性的主要是行车速度和轨道不平顺;夏禾等^[2]以多跨简支梁桥为研究对象,对车-梁-墩体系进行了动力相互作用分析,研究了桥墩振动对车辆运行安全性和平稳性的影响,并将仿真结果与实测结果进行了对比分析;宁晓骏等^[3]以多跨简支箱梁为研究对象,对高速铁路桥墩的横向刚度进行了研究,发现当简支梁桥的墩高增加时,桥梁的竖向振动和车辆的动力响应变化均不大,但是桥梁的横向响应变化较大;研究同时指出足够的桥墩横向刚度是高速列车运行的安全和平稳得以保证的重要因素;凌知民等^[4]以混凝土连续梁桥为研究对象,分析了桥梁的动力响应,结果表明低墩和高墩的墩顶振幅相对较小,而中等高度桥墩由于横向刚度相对较小,导致墩顶振幅较大。

已有研究的对象多为简支梁桥或普通墩高连续梁,然而高速铁路为了跨越江河、峡谷和既有线路,必须要设计一些大跨度特殊结构的桥梁。尤其是西部山区的高速铁路,线路大多横穿山岭或沟谷,从而出现很多大跨连续梁桥。同时,由于山区地势起伏较大,相邻桥墩的墩高差异也可能较大,当桥梁的桥墩刚度、相邻桥墩的高差改变时,可能会对桥上列车运行的安全性和平稳性产生不利的影响。然而,截至目前,相邻桥墩高差的影响方面与影响程度究竟如何,业界尚无借鉴的成熟经验。

车桥耦合振动分析是列车和桥梁动力响应研究中最常用的方法。本文以某高墩大跨连续梁桥为研究背景,采用MSC Patran和ADAMS Rail软件联合动力仿真技术,对桥梁进行车桥系统耦合振动分析,研究桥墩横向刚度和桥墩高差因素对车辆和桥梁动力响应的影响。

1 车-桥耦合振动模型

车桥耦合振动模型包含车辆子系统和桥梁子系统,子系统之间按照一定的轮轨运动关系耦合。铁路车辆由若干节车辆单元组成,假设车辆单元之间是相

互独立的。每节车辆单元是由车体、转向架、轮对及模拟悬挂结构的弹簧和阻尼元件组成的多自由度空间振动系统。车体和转向架均考虑点头振动、摇头振动、沉浮振动、横摆振动和侧滚振动,轮对则考虑沉浮振动、横摆振动和侧滚振动。对于四轴车辆而言,单节列车的总自由度为27个。在车桥耦合系统中,依据真实尺寸建立桥梁有限元模型,主梁和桥墩按二节点空间梁单元建立,桥墩和主梁之间依据实际的约束状况通过主从关系处理^[5]。

建立车辆动力模型和桥梁动力模型后,以轮轨接触处为界面,建立车桥耦合的轮轨几何相容关系和相互作用力平衡关系。通过求解车辆和桥梁的运动方程,用迭代计算来满足几何相容和力的平衡条件。轮轨间采用赫兹接触理论,考虑到轮对在钢轨存在着蠕滑力,借助Kalker的滚动接触简化理论来计算蠕滑力^[6]。

轨道不平顺是使车辆产生振动的重要原因,是车桥耦合振动的主要激励源之一^[7-8]。我国高速铁路总体技术条件中,建议采用德国高速线路不平顺谱密度函数来进行列车平稳性分析。因此,选用德国高速铁路低干扰谱模拟的轨道不平顺作为激励,该低干扰谱可适用于时速250 km以上的高速铁路,可考虑高低不平顺、方向不平顺和水平不平顺。德国低干扰谱转换的轨道高低不平顺样本如图1所示。

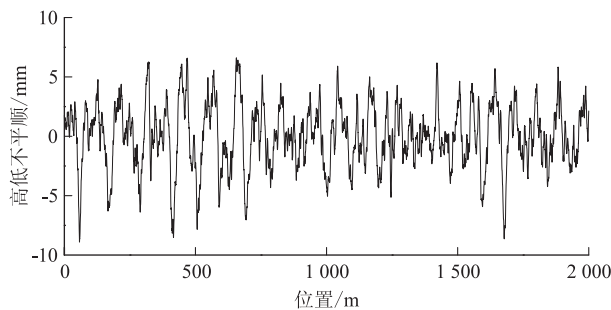


图1 轨道高低不平顺图

2 工程概况

该高墩大跨铁路桥为无砟轨道预应力混凝土连续刚构桥,梁体为单箱单室的变截面箱型梁,梁体全长352 m。箱梁顶板和底板宽度分别为12.6 m和7.8 m。全桥顶板厚62 cm,底板厚52 cm;底板在梁端梗肋处的厚度变化为52~120 cm;腹板厚度为50 cm,各支座附近腹板厚度的变化范围是50~110 cm。梁体采用C55混凝土。桥梁跨度为(92+168+92) m。桥墩采用矩形空心墩,配1号边墩,墩高32 m,墩顶横向宽

12 m,纵向宽 5.2 m;2 号主墩墩高 95.5 m,墩顶横向宽 9 m,纵向宽 10 m;3 号主墩墩高 100.5 m,墩顶横向宽 9 m,纵向宽 10 m;4 号边墩墩高 70 m;墩身变截面布置,墩顶横向宽 12 m,纵向宽 6 m。桥梁总体布置如图 2 所示。

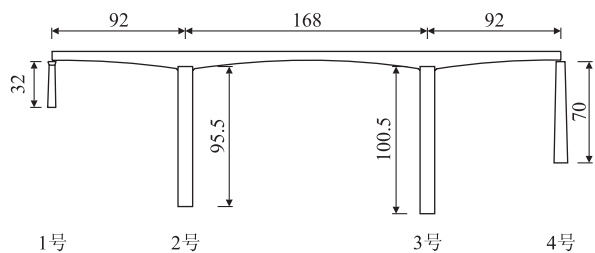


图 2 桥梁总体布置图(m)

采用有限元方法按实际尺寸建立桥梁分析模型。实测研究表明,混凝土桥阻尼比一般为 2%~3%,本文模型阻尼比按 2%选取。桥梁模型总共 328 个节点,322 个单元。桥梁结构各振型的基频如表 1 所示。

表 1 桥梁自振频率及振型表

序号	自振频率/Hz	振型主要特点
1	0.593	主梁纵飘
2	0.774	主梁对称横弯
3	1.050	主梁反对称横弯
4	1.191	主梁对称竖弯
5	2.118	主梁反对称竖弯

车辆采用 CRH3 动车组,共 8 节列车编组,编组形式为 M+T+4×M+T+M,其中 T 代表拖车,M 代表动车,车速分别为 250 km/h、300 km/h、350 km/h、400 km/h。

列车过桥的安全性通常用脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力来判断,而舒适性通常用列车车体的横向和竖向加速度来评判。TB 10621-2014《高速铁路设计规范》对上述参数的规定如表 2 所示。

表 2 列车安全性及舒适性评定指标及限值表

评价指标	限值
脱轨系数	≤ 0.8
轮重减载率	≤ 0.6
轮轴横向力	CRH3: 动车 ≤ 62.30 kN, 拖车 ≤ 57.72 kN
车体横向加速度	< 0.10 g
车体竖向加速度	< 0.13 g

为研究桥墩刚度对车桥耦合系统动力响应的影响,开展不同桥墩横向刚度和不同桥墩高差下的车桥耦合分析。桥墩横向刚度的影响通过改变桥墩的横截面特性来实现,桥墩高差的影响通过调整 2 号桥墩

的高度来实现。

3 桥墩刚度对车桥系统动力响应的影响

3.1 横向刚度影响

为充分研究桥墩横向刚度较小时车桥系统动力响应的变化规律,桥墩设定大多为刚度不足时的情况。设定的桥墩横向刚度与原刚度的比值分别为 0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4。各刚度比值下梁的一阶横弯和一阶竖弯自振频率如表 3 所示。

表 3 不同刚度比值下桥梁的主要阵型频率表

桥墩横向刚度比	一阶横弯频率/Hz	一阶竖弯频率/Hz
0.05	0.216	1.191
0.1	0.297	1.191
0.2	0.406	1.191
0.4	0.547	1.191
0.6	0.645	1.191
0.8	0.718	1.191
1	0.774	1.191
1.2	0.819	1.191
1.4	0.854	1.191

由表 3 可知,随着桥墩横向刚度的减小,桥梁的一阶横弯频率逐渐减小,而一阶竖弯频率保持不变。

3.1.1 桥梁动力响应

桥梁主跨跨中横向位移、主跨跨中竖向位移、梁端水平转角和 2 号与 3 号桥墩墩顶横向振幅随桥墩横向刚度和行车速度的变化情况如图 3 所示。

由图 3 可知,当桥墩横向刚度逐渐减小时,桥梁主跨跨中横向位移、梁端水平转角、2 号墩和 3 号墩的墩顶横向振幅普遍增大。当桥墩横向刚度在原有刚度的 0.6~1.4 倍范围内变化时,桥梁的各横向动力响应变化不大;但当桥墩的横向刚度与原有桥墩刚度的比值小于 0.6 时,桥梁各横向动力响应缓慢增大;当桥墩的横向刚度与原有桥墩刚度的比值小于 0.2 时,桥梁的各横向动力响应急剧增大;当桥墩横向刚度与原有刚度的比值为 0.4 时,桥梁主跨跨中横向位移与桥墩墩顶横向位移比原来增加 2 倍多;如果桥墩横向刚度与原有刚度的比值进一步减小至 0.1 倍时,桥梁主跨跨中横向位移与桥墩墩顶横向位移分别比原来增大 6 倍和 10 倍。400 km/h 速度下,刚度比为 0.1 时,主跨挠跨比由原来的 1/270 000 增大至 1/45 000。由此可知,桥梁主跨跨中横向位移、梁端水平转角、墩顶横向位移对桥墩横向刚度的变化比较敏感^[9-10]。

由图 3(b)可知,桥梁竖向振动响应受桥墩横向

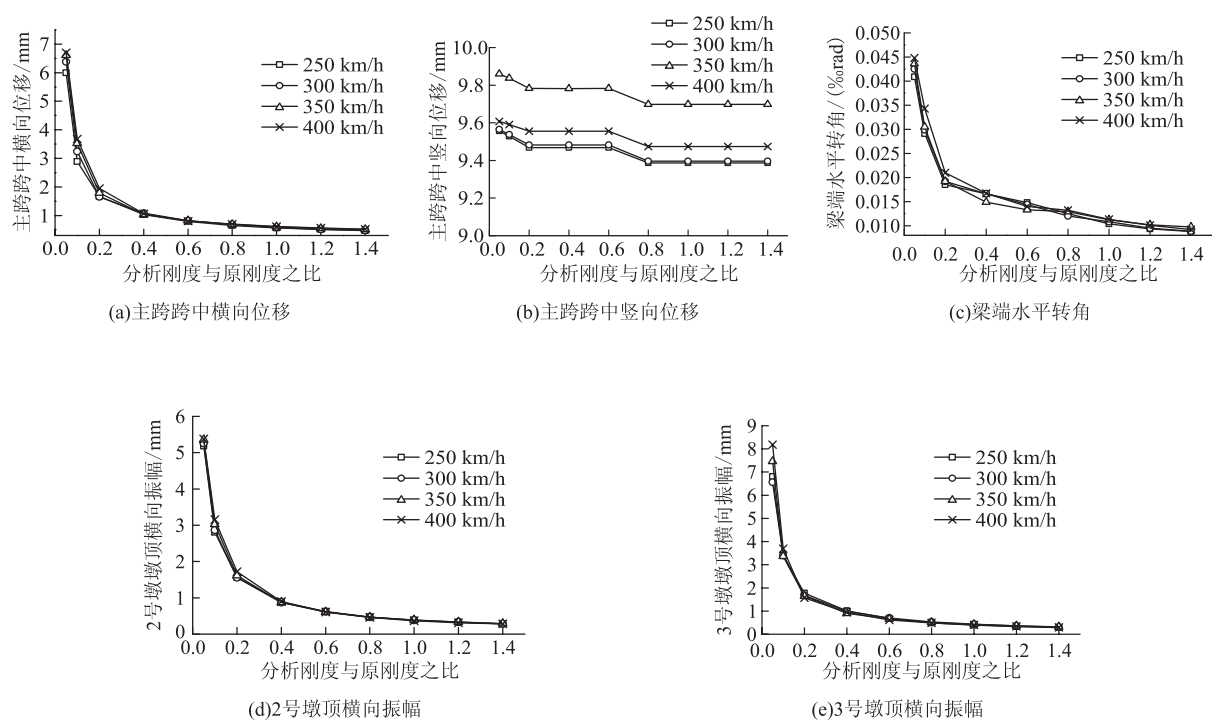


图3 不同桥墩横向刚度下的桥梁动力响应图

26

刚度变化的影响很小,横向刚度的变化主要影响桥梁的横向动力响应。表3中各刚度比值下,桥梁的一阶竖弯频率不变,也说明桥墩横向刚度的减小对桥梁竖向振动的影响有限。

250 km/h 车速,刚度比为 0.4、1.0 和 1.4 时,桥梁主跨跨中横向位移的时程曲线如图 4 所示。随着刚度比的减小,桥梁主跨跨中横向位移在列车过桥过程中整体增大。

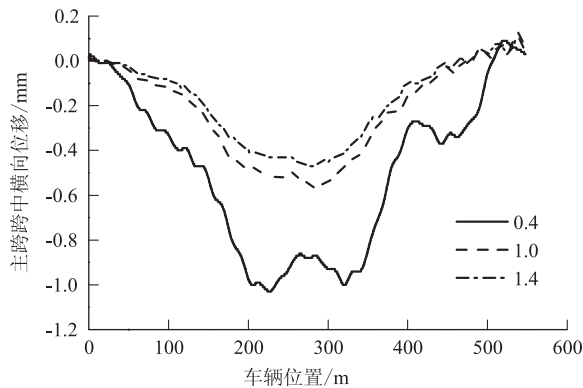


图4 不同刚度比下主跨跨中横向位移时程曲线图

3.1.2 车辆动力响应

脱轨系数、轮轴横向力、车体横向加速度和车体竖向加速度随桥墩横向刚度和行车速度的变化情况

如图 5 所示。

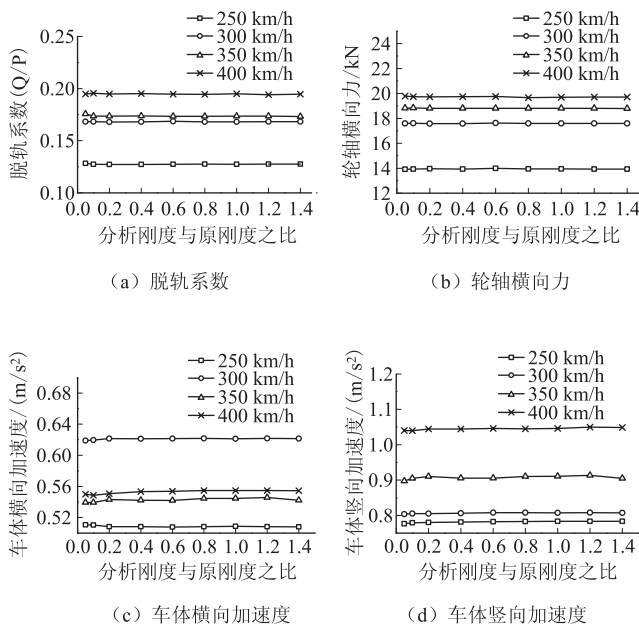


图5 不同桥墩横向刚度下的车辆动力响应

由图 5 和表 2 可知,总体上,在各桥墩横向刚度比值与各行车速度下,车体的安全性和舒适性均满足规范要求。桥墩横向刚度的变化对脱轨系数、车辆轮轴横向力、车体横向及竖向加速度的影响不大,这可

能是因为对大跨度桥梁而言,桥墩横向刚度与原始刚度的比值在 0.05 ~ 1.4 范围内变化时,桥墩横向刚度的改变相当于长波不平顺,因此对车辆的动力响应影响有限,此时行车速度和轨道不平顺可能成为影响车辆动力响应的主要原因;当桥墩横向刚度相同时,随着行车速度的提高,车辆的脱轨系数、轮轴横向力和车体竖向加速度均增大^[11]。

250 km/h 车速,桥墩横向刚度与原始刚度的比值为 0.4、1.0 和 1.4 时,选择第 7 节列车为研究对象,列车车体横向加速度从进桥到出桥的时程曲线如图 6 所示。从车体加速度时程曲线可以看出,在列车过桥的过程中,桥墩横向刚度比的改变对车体横向加速度产生的影响非常小。

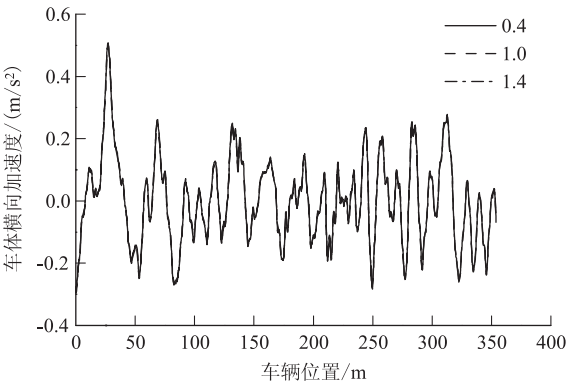


图 6 不同刚度比下车体横向加速度时程曲线

3.2 主墩高差的影响

该桥梁主墩为 2 号、3 号桥墩,两主墩原始高度分别为 95.5 m 和 100.5 m,原始高差为 5 m。为研究不同的主墩高差下车桥系统动力响应的变化规律,现通过减小 2 号墩的高度,来研究 2 号与 3 号墩高差分别为 5 m、25 m、50 m、70 m 时车桥系统响应的变化规律。不同主墩高差下,桥梁的一阶横弯和一阶竖弯自振频率如表 4 所示。

表 4 不同主墩高差下桥梁的主要阵型频率表		
主墩高差/m	一阶横弯频率/Hz	一阶竖弯频率/Hz
5	0.774	1.191
25	0.809	1.214
50	0.844	1.295
70	0.864	1.158

由表 4 可知,随着 2 号墩高度的减小,两主墩高差增大,桥梁的一阶横弯频率逐渐增大,一阶竖弯频率变化不大。

3.2.1 桥梁动力响应

桥梁主跨跨中横向位移、主跨跨中竖向位移、梁端水平转角和桥墩墩顶横向振幅随主墩高差和行车速度的变化情况如图 7 所示。

由图 7(a)和图 7(d)可知,各行车速度下,桥梁主跨跨中横向位移和 2 号墩墩顶横向振幅随着两主墩高差的增大而明显的减小;由图 7(b)、图 7(c)、图 7(e)

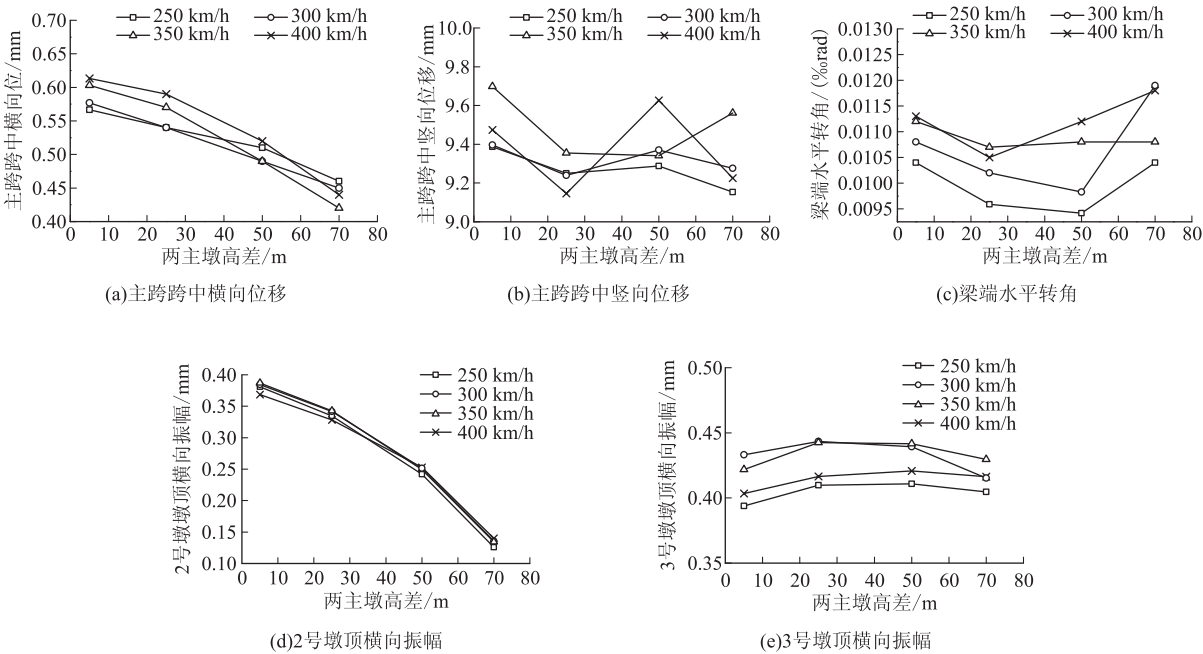


图 7 不同主墩高差下的桥梁动力响应图

可知,主墩高差的增大对桥梁主跨跨中竖向位移、梁端水平转角和 3 号墩墩顶横向振幅无明显影响。

结合表4中桥梁的一阶横弯和竖弯变化规律可知,2号墩墩高的减小会增加2号墩和桥梁整体的横向刚度,但对3号墩和桥梁竖向的整体刚度影响不大。通过减小2号墩的墩高来增大主墩高差的方式,会导致桥梁主跨横向位移和2号墩墩顶横向位移的减小,但是对桥梁主跨跨中竖向位移、梁端水平转角和3号墩墩顶横向位移不会产生太大的影响。

250 km/h 车速,两主墩高差为5 m、25 m、50 m 和70 m 时,桥梁主跨跨中横向位移的时程曲线如图8所示。随着2号墩墩高的减小,两主墩高差逐渐增大,桥梁主跨跨中横向位移在列车过桥过程中整体减小。

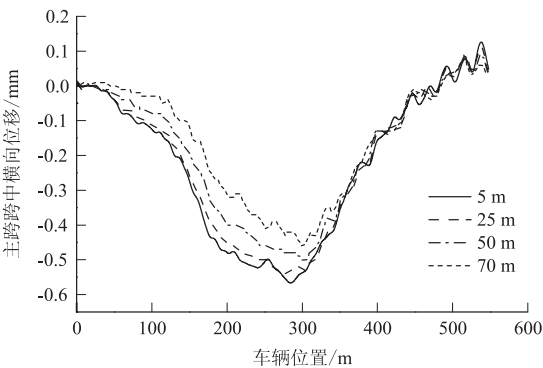


图8 不同主墩高差下主跨跨中横向位移时程曲线图

3.2.2 车辆动力响应

脱轨系数、轮轴横向力、车体横向加速度和车体竖向加速度随主墩高差和行车速度的变化情况如图9所示。

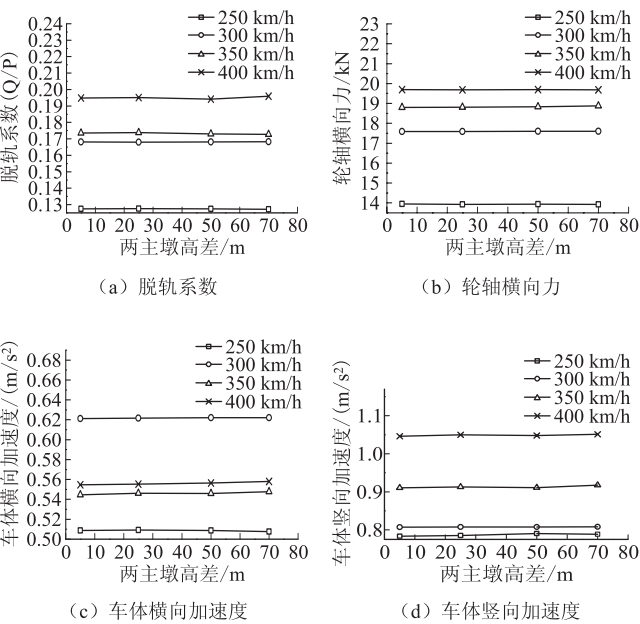


图9 不同主墩高差下的车辆动力响应图

由图9和表2可知,总体上,在各主墩高差与各行车速度下,车体的安全性和舒适性均满足规范要求。主墩高差对车辆脱轨系数、轮轴横向力、车体横向加速度和车体竖向加速度的影响不大,此时行车速度和轨道不平顺可能成为影响车辆动力响应的主要原因。当主墩高差相同时,脱轨系数、轮轴横向力和车体竖向加速度均随行车速度的提高而增大。

250 km/h 车速,主墩高差为50 m 和70 m 时,选择第7节列车为研究对象,该节列车的车体横向加速度从进桥到出桥的时程曲线如图10所示。从车体加速度时程曲线可以看出,在列车过桥的过程中,主墩高差在5~70 m 范围内的改变对车体横向加速度产生的影响非常小。

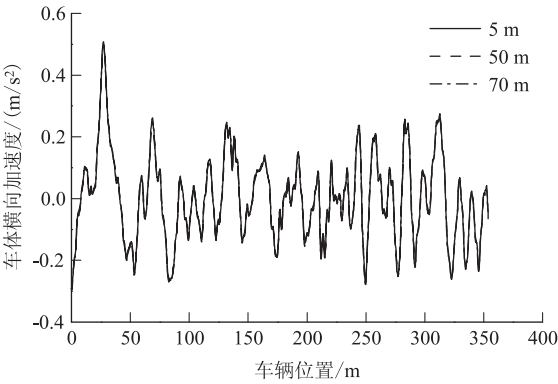


图10 不同主墩高差下车体横向加速度时程曲线图

4 结论

本文以某高墩大跨铁路桥梁为研究背景,研究了桥墩横向刚度和桥墩高差对车辆和桥梁动力响应的影响,得出主要结论如下:

- (1) 桥墩横向刚度的变化对高墩大跨连续梁桥的动力响应影响较大,随着桥墩横向刚度的减小,桥梁跨中和墩顶横向位移的增幅急剧增大。
- (2) 在车桥耦合振动体系中,桥墩横向刚度的变化对车辆的动力响应影响较小,这可能是因为对大跨度桥梁而言,桥墩横向刚度的改变相当于长波不平顺,因此对车辆的动力响应影响有限,此时行车速度和轨道不平顺可能成为影响车辆动力响应的主要原因。
- (3) 通过减小桥墩高度来增大与相邻桥墩的高差,将使该桥墩墩顶与桥梁跨中横向位移明显减小,但对其他桥墩以及桥梁竖向的动力响应影响不大;桥墩高差的改变对列车的动力响应总体影响不大。

参考文献:

- [1] 翟婉明, 王少林. 桥梁结构刚度对高速列车-轨道-桥梁耦合系统动力特性的影响[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(1): 19-26.
ZHAI Wanming, WANG Shaolin. Influence of Bridge Structure Stiffness on the Dynamic Performance of High-Speed Train-Track-Bridge Coupled System [J]. China Railway Science, 2012, 33(1): 19-26.
- [2] 夏禾, 陈英俊. 车-梁-墩体系动力相互作用分析[J]. 土木工程学报, 1992, 25(2): 3-12.
XIA He, CHEN Yingjun. Analysis of the Lateral Dynamic Interaction in Vehicle-Girder-Pier System [J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(2): 3-12.
- [3] 宁晓骏, 李小珍, 强士中. 高速铁路桥墩横向刚度的初步研究[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(1): 79-82.
NING Xiaojun, LI Xiaozhen, QIANG Shizhong. A Study on Lateral Rigidity of Bridge Pier in High Speed Railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(1): 79-82.
- [4] 凌知民, 曹雪琴, 项海帆. 铁路高墩连续梁桥车桥耦合振动响应分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(5): 98-102.
LING Zhimin, CAO Xueqin, XIANG Haifan. The Responding Analysis of Vehicle-Bridge Coupling Vibration on a Railroad Continuous Beam Bridge with High Pier [J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(5): 98-102.
- [5] 王昆鹏, 夏禾, 郭薇薇. 基于欧拉梁假定的柔性多体动力学车桥耦合振动分析模型[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(6): 55-61.
WANG Kunpeng, XIA He, GUO Weiwei. A Train-Bridge Coupling Vibration Model Considering Car-Body Flexibility Based on Euler Beam Hypothesis [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(6): 55-61.
- [6] 张楠, 夏禾. 基于全过程迭代的车桥耦合动力系统分析方法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 32-38.
ZHANG Nan, XIA He. A Vehicle-Bridge Interaction Dynamic System Analysis Method Based on Inter-System Iteration [J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 32-38.
- [7] 高建敏, 翟婉明, 王开云. 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 83-88.
GAO Jianmin, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Study on Sensitive Wavelengths of Track Irregularities in High-Speed Operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 83-88.
- [8] 徐金辉, 王平, 汪力, 等. 轨道高低不平顺敏感波长的分布特征及其影响因素的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 72-78.
XU Jinhui, WANG Ping, WANG Li, et al. Research on the Distribution Characteristics and Influence Factors of Sensitive Wavelength of Track Vertical Profile Irregularity [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 72-78.
- [9] LI Yongle, XU Xinyu, ZHOU Yu, et al. An Interactive Method for the Analysis of the Simulation of Vehicle-Bridge Coupling Vibration Using ANSYS and SIMPACK [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(3): 663-679.
- [10] 徐银光, 李艳. 成渝中线 400 km/h 轮轨动车组技术指标研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 7-11.
XU Yinguang, LI Yan. Research on Technical Indexes of 400 km/h Wheel-Rail EMU for Chengdu-Chongqing Middle Line [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 7-11.
- [11] 徐昕宇, 李永乐, 魏恩来, 等. 三线合一钢箱桁悬索桥颤振性能风洞试验研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 19-23.
XU Xinyu, LI Yongle, WEI Enlai, et al. Wind Tunnel Test Study of Flutter Performance of a Three-Line Steel Box and Truss Girder Suspension Bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(6): 19-23.