

# 桂湾河桥车致振动对行人舒适性的影响分析

黄自杰

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

**摘要:** 桂湾河桥为两跨下承式钢结构梁拱组合体系桥梁, 跨径布置为 $(124.65+86.84)\text{m}=211.49\text{m}$ , 中墩固结, 边墩设置活动支座。采用MIDAS节点动力荷载的方式进行车辆模拟, 进行车桥耦合振动响应分析, 将特定工况下的计算结果和该工况的实测数据进行对比, 验证计算模型的正确性。分析在车辆行驶速度、车辆轴重、偏载和桥梁阻尼等参数不同取值下测点的位移和加速度变化规律, 并据此分析车桥耦合振动对行人舒适性的影响, 为同类型桥梁的设计及运营维护提供参考。

**关键词:** 梁拱组合桥梁; 车桥耦合; 动力响应; 行人舒适性

**中图分类号:** U441<sup>+</sup>.3; TU997

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2025)12-0095-06

## Analysis on Impact of Vehicle-induced Vibration on Pedestrian Comfort at Guiwan River Bridge

Huang Zijie

[Shanghai Urban Construction Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

**Abstract:** The Guiwan River Bridge is a two-span through steel structure beam-arch composite system bridge. Its span layout is  $(124.65 + 86.84)\text{m}=211.49\text{m}$ . The middle pier is concreted, and the movable bearings are set at the side piers. Vehicles are simulated by means of MIDAS nodal dynamic loads to analyze the vehicle-bridge coupled vibration response. The calculation results under specific working conditions are compared with the measured data under the same conditions to verify the correctness of the calculation model. The variation laws of displacements and accelerations at key measuring points are analyzed under different values of parameters such as vehicle driving speed, vehicle axle load, eccentric load and bridge damping. Based on these findings, the impact of vehicle bridge coupled vibration on the pedestrian comfort is analyzed, providing references for the design, operation and maintenance of similar bridges.

**Keywords:** beam-arch composite bridge; vehicle-bridge coupling; dynamic response; pedestrian comfort

## 0 引言

车桥耦合振动是指车辆行驶于桥梁之上时, 车辆与桥梁相互作用所产生的振动现象。这种振动不仅会对桥梁的结构安全造成影响, 还会对车辆的行驶性能以及行人的舒适性产生不良影响<sup>[1]</sup>。随着桥梁结构逐渐轻柔化、车辆速度和载重不断加大, 特别是在桥面不平整度、车辆加速度等复杂因素影响下, 车桥耦合振动问题愈加突出。

鉴于车桥耦合振动的机理较为复杂, 其研究分析面临较大挑战, 早期主要依赖实桥试验来进行探索。实桥试验在车桥耦合振动研究中能够提供直观且可靠的实测数据, 但由于试验条件和技术的限制,

仍存在不少局限性<sup>[2]</sup>: 试验期间需要控制交通流量甚至封闭交通, 避免其他车辆的干扰, 这在实际操作中往往难以实现, 尤其是在繁忙的交通路段; 试验需要在实际桥梁上进行, 场地条件可能受到限制, 难以布置足够的传感器和测量设备; 实桥试验通常只能在有限的工况下进行, 难以覆盖所有可能的工况。

理论研究和数值模拟可以有效弥补实桥试验的不足, 为车桥耦合振动问题提供更全面、经济和灵活的解决方案。数值模拟不需要在实际桥梁上进行, 避免了现场试验的安全风险; 数值模拟成本较低, 不需要大量的设备和人力投入; 可以快速调整模型参数, 进行多次验证和优化; 可以通过数值模拟覆盖多种工况和参数变化, 全面分析车桥耦合振动特性。

在实际工程应用中, 通常将实桥试验与数值模拟相结合, 以充分发挥各自的优势。以深圳前海一座下承式钢结构拱桥为例, 进行车桥耦合振动分析

收稿日期: 2025-04-01

作者简介: 黄自杰(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

并就其对行人舒适性的影响进行评价。

1 工程概况

桂湾河桥跨径布置为 $(124.65+86.84)\text{m}=211.49\text{ m}$ ,采用下承式钢结构梁拱组合体系桥梁,见图1。结构体系采用中墩固结,边墩设置活动支座。双片拱肋设计,主拱圈位于侧分带中。标准桥面布置为:6 m(人行道与非机动车道)+2 m(边采光带)+2.5 m(纵梁及拉索区)+15.5 m(机动车道)+2 m(中央采光带)+17.7 m(机动车道)+2.5 m(纵梁及拉索区)+2 m(边采光带)+6 m(人行道与非机动车道)=56.2 m,见图2。中央采光带处的梁高为2.2 m。



图1 桂湾河桥最终方案效果图

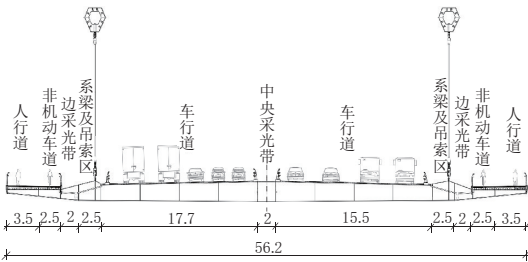


图2 主梁标准横断面(单位:m)

横向布置两片拱肋,拱轴线为异型拱轴线,除顶部设置曲线外其余均为直线。拉索采用扇形布置,其中大拱跨一共16对拉索,小拱跨一共11对拉索。由于桥梁桩基布置受限,采用骑跨式转换梁跨过地下构筑物,桥梁上部全部荷载由骑跨式转换梁传递到下部的承台桩基。大拱侧边墩横断面见图3。

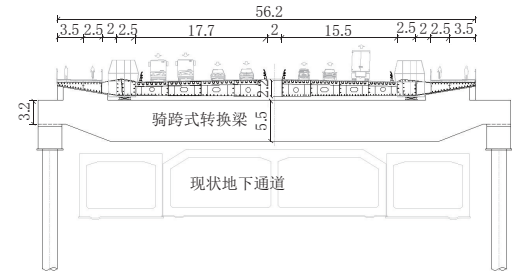


图3 大拱侧边墩横断面(单位:m)

2 实桥试验与数据分析

为监测前海桂湾河桥的桥面振动情况,检测公

司于2024年5月11日在现场进行了桥面振动检测,测试时间为下午1:00—3:30。测试断面为右幅大拱跨中和小拱跨中,共2个截面。测点分别布置在人行道内、外侧,吊杆位置处、行车道两侧共5个测点(见图4)。检测分两个工况:一是没有车行的情况;二是重车行走的情况(重车为一辆载梁挂车,重约35 t,车速20 km/h 匀速行驶)。

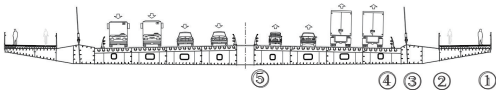


图4 断面测点布置示意图

由于桥梁所处环境复杂,监测过程中受许多其他因素的影响(风荷载、周边场地振动等),导致监测数据中包含许多干扰、噪音以及不合理的记录,通过对原始采集数据的去除毛刺、消除趋势项和信号降噪等处理和分析,确定由风荷载引起的频率范围,然后使用带阻滤波器抑制这些频率成分,从而近似得到车辆运行引起的振动数据。根据记录的监测数据,选取了位移最大时相邻多个振动衰减周期的位移峰值,通过对数衰减法计算结构阻尼比均值约为0.04。

3 车桥耦合振动分析

3.1 结构模型

采用有限元软件MIDAS Civil建立全桥三维有限元模型。纵向主梁、横隔板、拱肋、中央采光带的联系梁、两侧采光带和人非道的悬挑梁采用梁单元模拟,车行道板采用板壳单元模拟,吊索采用索单元模拟,下部结构转换梁和桩基采用=单元模拟,用土弹簧考虑桩土约束效应。建立全桥空间计算模型,全桥共1 756个节点,2 711个单元(见图5)。

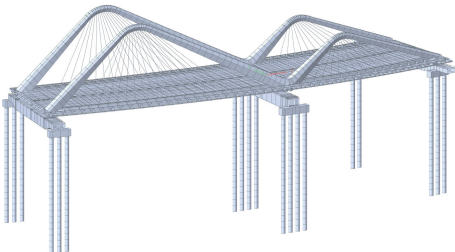


图5 全桥三维计算模型

3.2 车辆模型

在车桥耦合振动分析中,车辆模型的精确模拟是一项极具挑战性的任务,通常在工程实践中需要对其进行简化处理。常用的有两种车辆模型:一种是将车辆整体视为刚体,考虑刚体惯性力影响的移

动质量模型,其假定车辆移动过程中车轮与桥梁不分离;另一种是考虑了车辆各部件惯性力和相互作用的弹簧振动模型,利用弹簧和阻力器将车辆各部件进行连接,可以使用弹簧刚度和阻尼系数来模拟车辆本身的振动并可以根据车轮压力来判断车桥是否分离。

对于车辆自重比桥梁自重小很多的情况,可以不用考虑车辆各部件之间的复杂动力学相互作用。为了简化计算过程,本文采用 MIDAS 软件中的节点动力荷载方法来模拟车辆<sup>[3]</sup>。当车辆荷载作用于节点时,表现为一种瞬时作用后立即消失的冲击荷载(见图 6),并将车辆模拟为最大值为 1 kN 的三角形荷载(通过后续定义节点动力荷载的系数来对应不同的轴重)。其中时间  $t_1$  和  $t_2$  由车辆的速度和所建模型单元长度来确定。

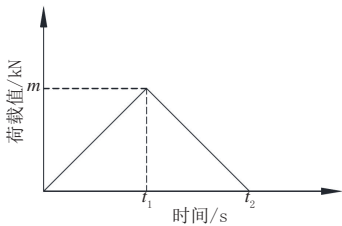


图 6 车辆三角形荷载

3.3 模型有效性验证

为验证 MIDAS 车桥耦合模型的有效性,在模型上施加和实桥试验完全等同的车辆荷载、通行速度和行车路线。车辆荷载模拟成最大值为 35 t 的节点动力荷载,通行速度为 20 km/h,加载在右幅外侧车道,车辆过桥时间约 40 s。模型中将结构自重和荷载转换为节点质量,分析时间步长取 0.01 s。阻尼比取根据监测数据计算出来的均值 0.04。

图 7 给出了车桥耦合模型计算的大拱跨中断面车行道外侧测点(4 号点)的位移和加速度的时程曲线。图 8 给出了小拱跨中断面车行道外侧测点(4 号点)的位移和加速度的时程曲线。

从上图可知,在车辆驶入和驶出桥梁的瞬间,4 号点均出现一个加速度峰值,当车辆行驶到 4 号点附近时加速度和位移均达到最大值。车辆位于大拱范围时,小拱跨中断面 4 号点轻微上拱,车辆位于小拱范围时,大拱跨中断面 4 号点轻微上拱,车辆驶出桥梁后,速度和加速度幅值逐渐衰减到 0。

为了将计算值和实测值进行对比,表 1 给出了大拱跨中和小拱跨中两个断面的 4 号点位移峰值和加

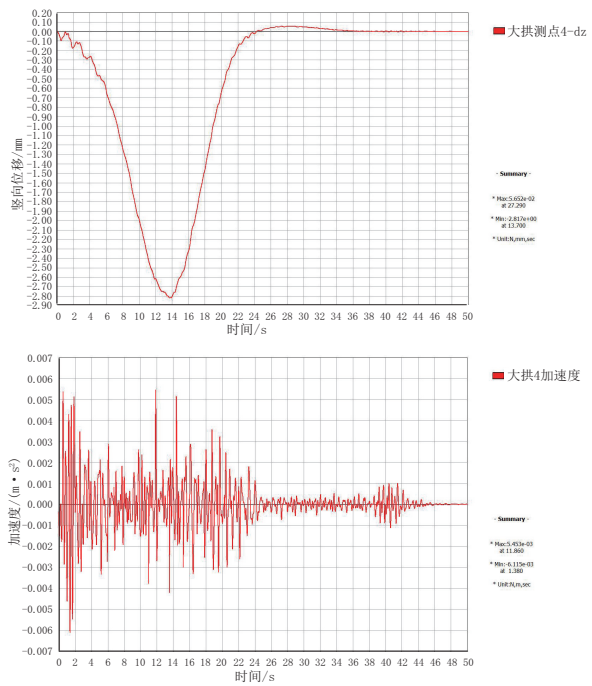


图 7 大拱跨中断面 4 号测点位移和加速度时程曲线

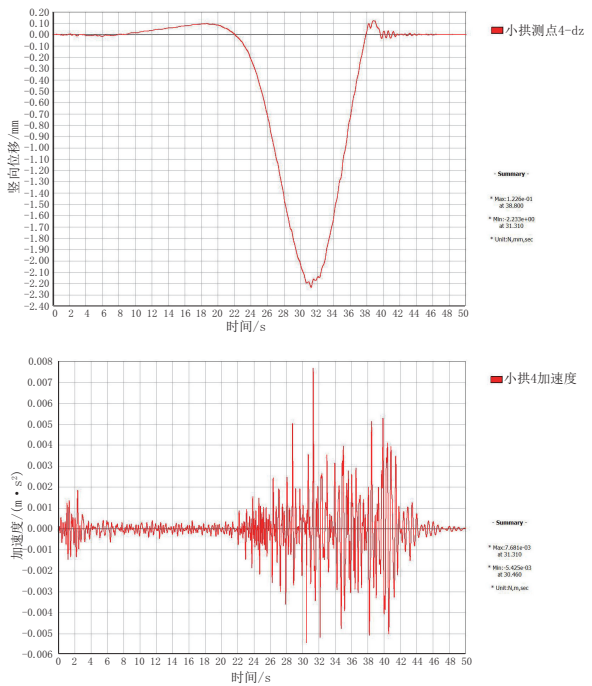


图 8 小拱跨中断面 4 号测点位移和加速度时程曲线

速度峰值的绝对值的对比。

|    | 最大位移/mm |         | 最大加速度/(m·s <sup>-2</sup> ) |         |
|----|---------|---------|----------------------------|---------|
|    | 大拱 4 号点 | 小拱 4 号点 | 大拱 4 号点                    | 小拱 4 号点 |
| 实测 | 3.09    | 2.56    | 0.006 1                    | 0.007 9 |
| 模型 | 2.82    | 2.23    | 0.005 5                    | 0.007 7 |
| 误差 | 8.7%    | 12.9%   | 9.8%                       | 2.5%    |

从对比结果可以看出,模型计算值与监测数据接近,表明计算模型能较好反映桥梁在车桥耦合作用下的位移变化特性,模型较好的反映了桥梁结构

的刚度、质量和阻尼等结构特性,模型对实桥的模拟是可靠、有效的。

4 敏感因素分析

车桥耦合分析结果不仅受结构刚度、固有频率、结构阻尼等结构特性的影响,还和行驶速度、车辆重量、车辆位置等因素密切相关。深入研究车桥耦合振动的敏感因素,对于优化桥梁设计、保障车辆安全行驶以及延长桥梁使用寿命具有重要的现实意义。

4.1 车辆速度

车辆行驶速度是影响车桥耦合振动的关键因素之一。随着车速的增加,车轮对桥梁的冲击力和振动频率也会相应增大。当车辆行驶速度接近桥梁某一阶固有频率对应的速度(即临界速度)时,会引发共振现象,导致桥梁的振动响应显著增大。分别对 20、40、60、80、100、120 km/h 六种速度进行分析,5 个测点在不同速度下的位移和加速度时程响应最大值的绝对值见图 9。

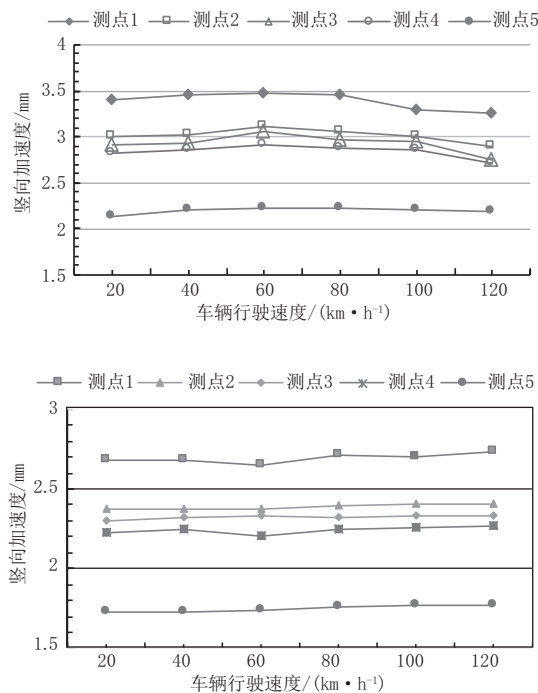


图 9 不同车速下各测点竖向位移最大值的绝对值对比

由图 10 可知,六种速度下在同一测点引起的位移基本一致,没有出现位移突然增大的情况。这是因为采用的车辆模型无法模拟车辆本身的振动,所以结果无法显示车辆自身和桥梁是否产生了共振。加速度随着行驶速度的增加而不断增大,说明车速越高对桥梁的动力冲击作用越明显。大拱跨中断面和小拱跨中断面增长趋势基本相同,但是和大拱跨中断面相比,小拱由于跨度较小,刚度较大,所以同

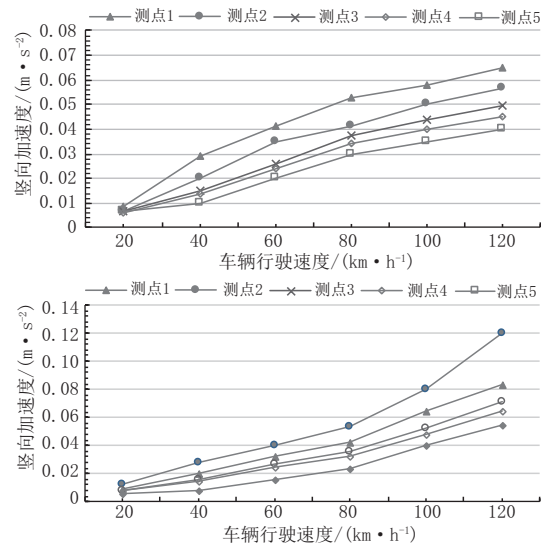


图 10 不同车速下各测点竖向加速度最大值的绝对值对比

样的行驶速度在小拱跨中断面引起的位移小加速度大。速度越大小拱侧加速度增加的越明显。从图中还可以看出,越靠外侧的测点,位移和加速度响应越大。

4.2 轴重

为了研究不同载重的车辆对桥梁振动响应的影响,分别对 20、35、55、70 t 四种轴重进行分析(车速取 60 km/h,结构阻尼比 0.04,加载在右幅外侧车道),5 个测点在不同轴重下的位移和加速度时程响应最大值的绝对值见图 11。

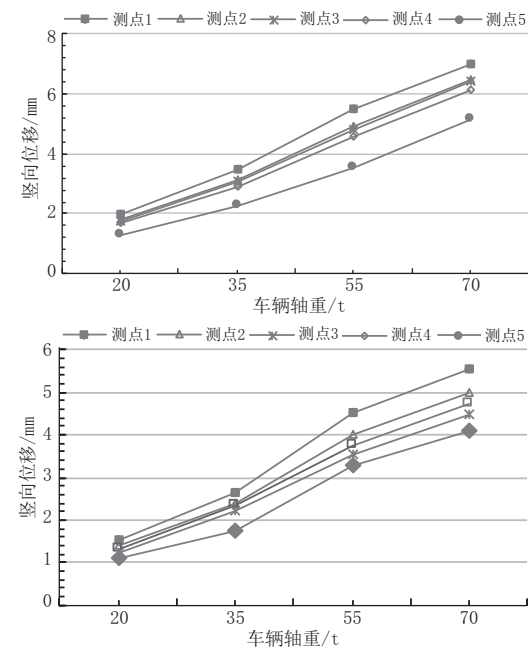


图 11 不同轴重下各测点竖向位移最大值的绝对值对比

由图 12 可知,位移和加速度都随着车辆轴重的增加而增加。相同的轴重下,大拱侧的位移要明显大于小拱侧,大拱侧的加速度略小于小拱侧。

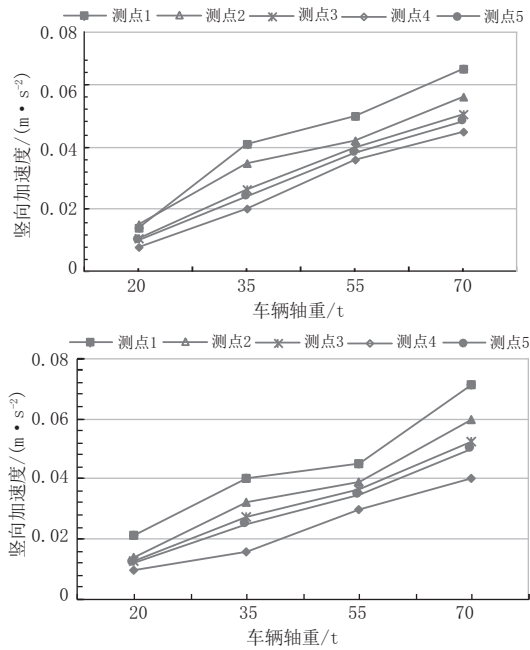


图 12 不同轴重下各测点竖向加速度最大值的绝对值对比

4.3 偏载

当车辆沿桥梁横向加载位置不同时(偏载),桥梁的振动响应会存在不同。为了研究偏载对桥梁结构振动响应的影响,分别按车辆横向位置不同设置了4种不同的工况(见图 13),

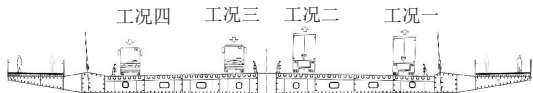


图 13 偏载工况车辆加载位置示意图

对 4 种工况进行分析(车速取 60 km/h,结构阻尼比 0.04,轴重 35 t),5 个测点在不同加载位置下的位移和加速度时程响应最大值的绝对值见图 14。

由图 15 可知,随着加载车辆朝桥梁中心线方向移动,5 号测点的位移和加速度增加明显,其余测点因为距离车辆加载位置越来越远,位移和加速度响应也越来越小,当加载车辆移动到对向车道后,各测点特别是人行道上的测点,位移和加速度响应均呈明显下降趋势。

4.4 桥梁阻尼

除了考察车辆参数变化对车桥耦合振动的影响外,桥梁结构本身的特性也会随着使用年限的增长而发生变化,进而影响车桥耦合振动的结果。分别对 0.02、0.04、0.06、0.08 四种结构阻尼比进行分析(车速取 60 km/h,轴重 35 t,加载在右幅外侧车道),5 个测点在不同阻尼比下的位移和加速度时程响应最大值的绝对值见图 16。

从图 17 中可以看出,其他因素不变的情况下,增加阻尼比,测点的竖向位移基本没有变化,测点的竖

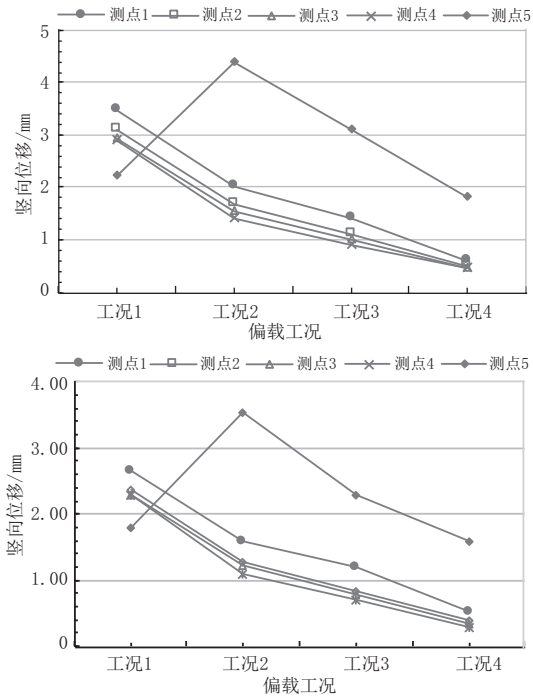


图 14 偏载下各测点竖向位移最大值的绝对值对比

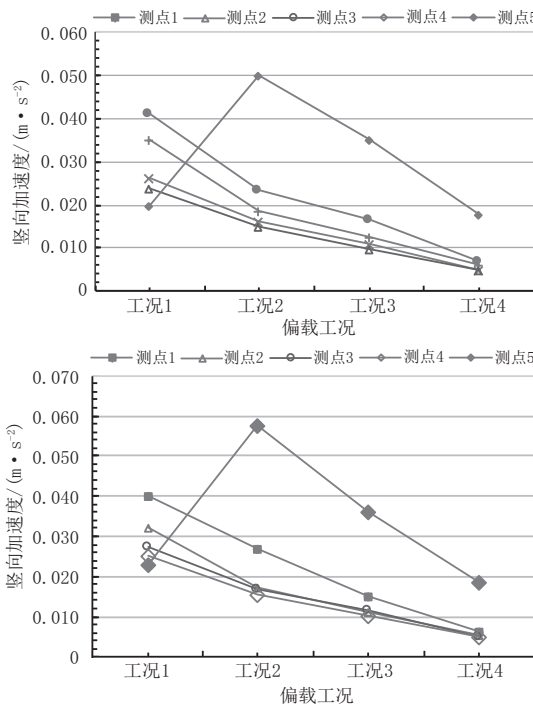


图 15 偏载下各测点竖向加速度最大值的绝对值对比

向加速度减小的幅度也非常有限。

5 舒适性评价

实际运营中,桥梁上作用的是随机车流,情况比单辆车加载复杂很多。要准确模拟现实中的车桥耦合振动,需要对多辆车进行建模分析。为简化计算,根据前述敏感因素分析结果,结构阻尼比对桥梁位移和加速度影响很小,对向车道加载对人行道位移和加速度影响也很小。鉴于此按半幅最不利的加载

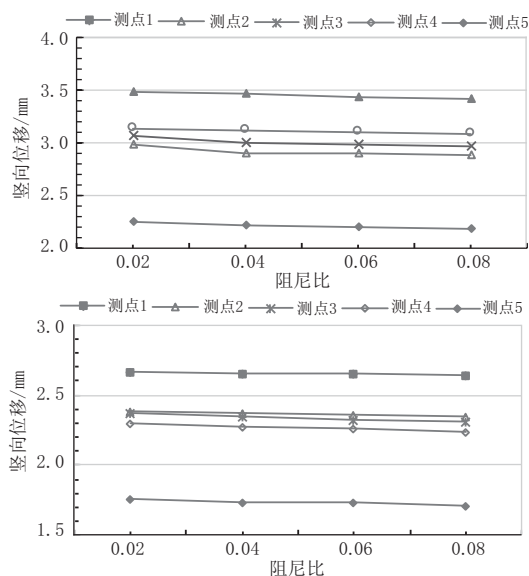


图 16 不同阻尼比下各测点竖向位移最大值的绝对值对比

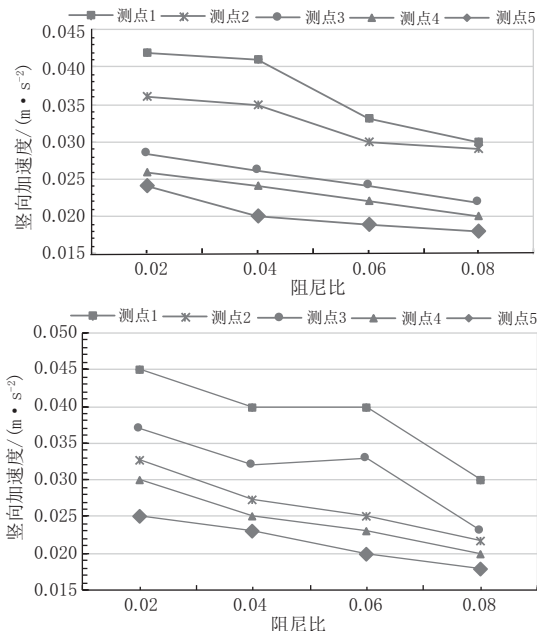


图 17 不同阻尼比下各测点竖向加速度最大值的绝对值对比

方式,右半幅 4 个车道布满车辆,相邻两车纵向间距 16 m,车速 60 km/h,轴重 35 t,阻尼比取 0.04。5 个测点在右幅满载工况下的加速度时程响应最大值的绝对值见图 18。

桥上行人感知的桥梁振动主要是对结构竖向加速度的感觉<sup>[4]</sup>,参考《德国人行桥设计指南》EN 03 (2007),人行舒适性指标见表 2<sup>[5]</sup>。

根据前文的计算结果,右幅车道满载的工况,竖向加速度最大值约为 0.44 m/s<sup>2</sup>,位于小拱跨中断面。根据德国人行桥设计指南中人行舒适性指标,属于很舒适程度。由于该桥两端均靠近路口,运营中半幅桥满载重车且以较快的速度通行的情况基本不会出现,因此实际中最大加速度要远小于 0.44 m/s<sup>2</sup>,行

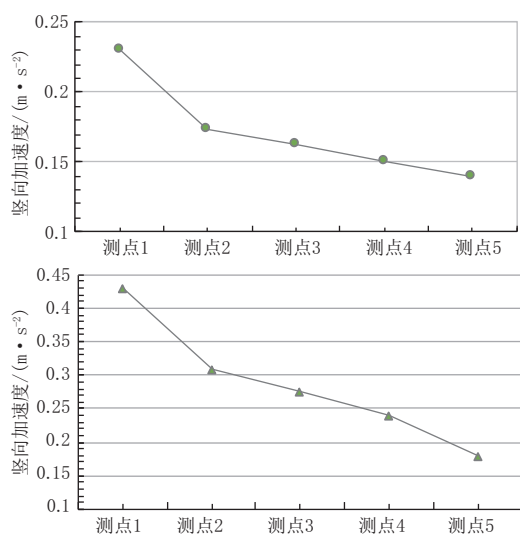


图 18 右幅满载工况下各测点竖向加速度最大值的绝对值

表 2 人行桥人行舒适性指标

| 等级 | 舒适性  | 竖向加速度/(m·s <sup>-2</sup> ) |
|----|------|----------------------------|
| 1  | 很舒适  | 小于 0.50                    |
| 2  | 中度舒适 | 0.50~1.00                  |
| 3  | 不舒适  | 1.00~2.00                  |
| 4  | 不可忍受 | 大于 2.50                    |

人舒适性也会好很多,这与现场的实际感受是吻合的。

6 结 语

本文以深圳前海一座下承式钢结构拱桥为例,利用 MIDAS Civil 有限元软件建立车桥耦合模型,分析在车速、轴重、偏载和阻尼比等参数取不同值时的振动响应,并研究了车桥耦合振动对行人舒适性的影响,得出以下结论:

(1)采用 MIDAS Civil 节点动力荷载模型对复杂大跨度桥梁进行车桥耦合振动分析时,该计算模型能够较好地体现桥梁结构的刚度、质量和阻尼等特性,对实际桥梁的模拟结果是可靠且有效的。

(2)车桥耦合振动响应和行驶速度、车辆重量、车辆位置、阻尼比等因素密切相关:加速度随着行驶速度的增加而不断增大;位移和加速度随着车辆轴重的增加而不断增大;当车辆加载位置远离测点时,位移和加速度响应均越来越小;增加阻尼,测点的竖向位移基本没有变化,测点的竖向加速度减小的幅度也非常有限。

(3)右幅车道满载的工况,竖向加速度最大值为 0.44 m/s<sup>2</sup>,参考德国人行桥设计指南中人行舒适性指标,本桥舒适性评价等级属于很舒适。

(下转第 110 页)