



## 随机车流作用下大跨拱桥下层慢行系统振动舒适度分析

杨志超<sup>1</sup>, 刘 治<sup>2</sup>, 柏 栋<sup>3</sup>, 王高雷<sup>2</sup>, 齐 骏<sup>2</sup>

(1. 中国铁建投资集团有限公司, 广东 珠海 519000; 2. 中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116021; 3. 南昌市政公用工程项目管理有限公司, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 过江大桥慢行系统对提升交通品质和交通安全有重要意义。上层设置车行道、下层布置慢行系统的大跨度中承式系杆拱桥是一种新颖的结构形式。为分析慢行系统车致振动舒适度, 以南昌市九龙湖大桥为背景, 基于多车道车流分布及 S 形速度密度模型生成随机车流, 采用模态叠加法和 Runge-Kutta 数值积分方法求解人行道位置的振动响应。依据 ISO 10137:2007 标准对振动响应进行评价, 结果表明: 在随机车流荷载作用下, 该桥慢行系统的振动以竖向为主; 在轻度拥堵工况下, 竖向振动加速度达到最大, 其峰值为  $0.34 \text{ m/s}^2$ , 对应三方向综合最大加速度 RMS 值为  $0.0982 \text{ m/s}^2$ , 符合 ISO 10137 规范所规定的“没有不舒适”标准, 但慢行系统的振动相较于行车道同一位置的振动有明显的放大效应; 所提出的分析方法和结果可供同类桥梁设计参考。

**关键词:** 拱桥; 舒适度分析; 随机车流; 慢行系统; 车致振动

中图分类号: U441; U448.22

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)05-0028-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.05.058

## Vibration comfort analysis of the slow traffic system on the lower floor of a large-span arch bridge under the action of random traffic flow

YANG Zhichao<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>2</sup>, BAI Dong<sup>3</sup>, WANG Gaolei<sup>2</sup>, QI Jun<sup>2</sup>

(1. China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Zhuhai 519000, Guangdong, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Dalian 116021, Liaoning, China;

3. Nanchang Municipal Public Works Project Management Co., Ltd., Nanchang 330000, Jiangxi, China)

**Abstract:** The slow traffic system of the bridge crossing the river is of great significance to improve traffic quality and traffic safety. The long-span medium-bearing tied arch bridge with roadway on the upper floor and the slow traffic system on the lower floor is a novel structural form. In order to analyze the vehicle-induced vibration comfort of the slow traffic system, taking the Jiulonghu bridge in Nanchang city as the background, the random traffic flow is generated based on the multi-lane traffic flow distribution and S-shaped speed density model, and the vibration response of the sidewalk position was solved by the modal superposition method and the Runge-Kutta numerical integration method. According to the ISO 10137:2007 standard, the vibration response is evaluated, and the results showed that the vibration of the slow traffic system of the bridge was mainly vertical under the action of random traffic load. Under the condition of mild congestion, the vertical vibration acceleration reaches the maximum, with a peak value of  $0.34 \text{ m/s}^2$ , and the corresponding three-direction comprehensive maximum acceleration RMS value is  $0.0982 \text{ m/s}^2$ , which meets the “no discomfort” standard stipulated in

收稿日期: 2024-10-28

基金项目: 中国铁建大桥工程局集团公司有限公司 2021 年度科技研究开发计划 (DQJ-2021-B03)。

作者简介: 杨志超 (1982—), 男, 高级工程师, 从事公路桥隧工程投资、建设、施工管理方面的工作。

通信作者: 刘 治 (1971—), 男, 高级工程师, 从事桥梁与隧道工程方面的研究工作。

the ISO 10137 code, but the vibration of the slow traffic system has a significant amplification effect compared with the vibration at the same position of the roadway. The proposed analysis methods and results can be used as a reference for the design of similar bridges.

**Key words:** arch bridge; comfort level analysis; random traffic flow; slow traffic system; vehicle-induced vibration

慢行交通在提升城市活力和品质方面的作用日益凸显,越来越多的城市大型过江桥梁加入了慢行交通功能,南昌市九龙湖大桥亦不例外。这样的设计既可满足行人和非机动车过江的需求,又能方便两侧工程接线设计。该桥为双层桥梁,慢行系统位于下层,通过吊杆悬吊方式与主梁连接。为使得悬吊体系域桥梁主体结构受力明确、相互耦合较小,悬吊体系的设计刚度相对较低,这可能导致行人过桥时的振动舒适度不良问题。

由于无法直接参考既有桥梁设计规范对复杂桥梁车致振动舒适度进行合理评价,因此常需借助动力仿真方法计算随机车流作用下桥梁的动力响应,在此基础上采取合适的振动舒适度评价标准对桥梁振动加速度进行分析。对桥梁车辆荷载模型的研究兴起于20世纪八九十年代,以Nowark法<sup>[1-2]</sup>和Rice公式法<sup>[3]</sup>为典型代表。近年来,国内的闫君媛<sup>[4]</sup>、林诗枫等<sup>[5]</sup>、杨晓艳<sup>[6]</sup>等基于若干特定场景的道路交通流实测数据,分别建立了相应的随机车流模型,其中闫君媛<sup>[4]</sup>和杨晓艳<sup>[6]</sup>还将所建立的随机车流模型应用在了结构荷载分析上。

对公路桥梁—汽车耦合振动问题的研究起步于上世纪六十年代。谭国辉<sup>[7]</sup>把桥梁和车辆视为一个相互作用的系统,模拟了公路桥梁在汽车行驶时的动力响应。盛国刚等<sup>[8]</sup>等利用振型叠加法,以简支梁桥为对象,开展了车桥耦合系统的振动特性分析,讨论了跨径和移动速度变化时对挠度冲击系数和弯矩冲击系数的影响。王元丰等<sup>[9]</sup>进行了桥梁在车辆作用下空间动力响应的研究,车辆采用三维汽车模型,建立车桥系统的动力方程。

本研究以南昌市九龙湖大桥为工程案例,参考相关既有研究成果生成随机车流样本,采用自编时域分析程序计算该桥慢行系统的动力响应,最终以《结构设计基础:建筑物和走道防震功能的适用性》(ISO 10137: 2007)<sup>[10]</sup>对其车致振动舒适度进行评价,以期可为类似工程提供参考。

## 1 随机车流及荷载模拟

### 1.1 随机车流模型

为准确计算九龙湖大桥的车致振动响应,需要生成符合实际情况的车流样本。而公路与城市道路上的车流,在各车道中车型与车重的随机分布、车头时距的分布等方面具有强烈的随机性,且车流速度及密度的特征在一天中的不同时段具有显著不同。为此,本研究按如下方法建立了随机车流模型。

(1) 车道车型分布: LIANG等<sup>[11]</sup>针对单向三车道公路车型分布的结论,依次取其第一、二、三车道的分布,得到符合本项目实际的四车道车型分布。

(2) 车流速度—密度关系: 采用文献[12]提出的S形速度密度模型[式(1)]描述,其中的3个参数 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 和 $k_1$ 采用文献[13]中北京交通发展研究院的数据,采用非线性约束优化方法拟合得到。由此得到适用于中国城市道路的车流速度与密度的定量关系。

$$v = v_b + \frac{v_f - v_b}{[1 + \exp(\frac{k - k_1}{\theta_1})]^{\theta_2}} \quad (1)$$

式中:  $v$  是城市道路的平流速度, km/h;  $v_b$  是阻塞下的车速, km/h;  $v_f$  是自由流速度, km/h。

(3) 车头时距分布: 车头时距遵循对数正态分布结论<sup>[14-15]</sup>, 如式(2)所示。

$$f(h = |u_h(v), \sigma_h(v), h_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_h(v)(h - h_0)}} \exp(-\frac{[\ln(h - h_0) - u_h(v)]^2}{2\sigma_h^2(v)}), h > h_0 \quad (2)$$

式中:  $h$  为车距, m;  $h_0$  为交通流中的最小车距, m, 与驾驶员反应时间、车长和车速有关, 具体参照文献[14]和[15];  $u_h(v)$  为位置参数, 与 $h_0$ 、车流密度有关, 具体参照文献[14]和[15];  $\sigma_h(v)$  为比例参数, 根据文献[16]的结论取其统计平均值。

在给定车流速度后，即可根据速度 - 密度关系得到车流密度，再根据车道分布得到各个车道中各种类型车辆的数量，最后结合车流中的车头时距分布，采用蒙特卡洛方法生成随机车流样本。

### 1.2 车辆动力学模型

将公路桥梁上行驶的汽车车辆分为 7 类：两轴小汽车( $V_1$ )、两轴客车( $V_2$ )、两轴整体式卡车( $V_3$ )、三轴整体式卡车( $V_4$ )、四轴牵引式卡车( $V_5$ )、五轴牵引式卡车( $V_6$ )和六轴牵引式卡车( $V_7$ )。参考王冰<sup>[17]</sup>列出的参数，借助通用有限元软件建立这 7 种车辆的三维有限元模型，如图 1 所示。

## 2 振动计算

### 2.1 桥梁模型

九龙湖大桥位于南昌市南部，主通航孔桥为

(80 + 268 + 80)m 中承式系杆拱桥，主梁采用钢 - 混凝土组合梁，边跨主梁采用纵、横梁形式，中跨主梁采用边纵梁 + 密横梁形式。截面中心处梁高为 3.5 m，横向设置 2% 的排水坡，主梁下方设置慢行系统，通过杆件悬吊在主梁下方。慢行系统主梁采用钢板梁，中心处梁高为 0.9 m，桥面采用正交异性钢板面板。慢行系统主梁通过刚性支撑框架吊杆与主梁的横梁连接，慢行系统主梁与刚性吊杆框架间设置板式橡胶支座。纵向按 7.0 m 左右间距布置吊杆框架，与主梁的横梁对应。

其典型横断面如图 2 所示。上层桥面宽度为 42.8 m，桥面布置：4.65 (吊杆系杆区) + 0.5 m (防撞护栏) + 16 m (行车道) + 0.5 m (中央分隔带) + 16 m (行车道) + 0.5 m (防撞护栏) + 4.65 (吊杆系杆区) = 42.8 m。下层慢行系统桥面净宽

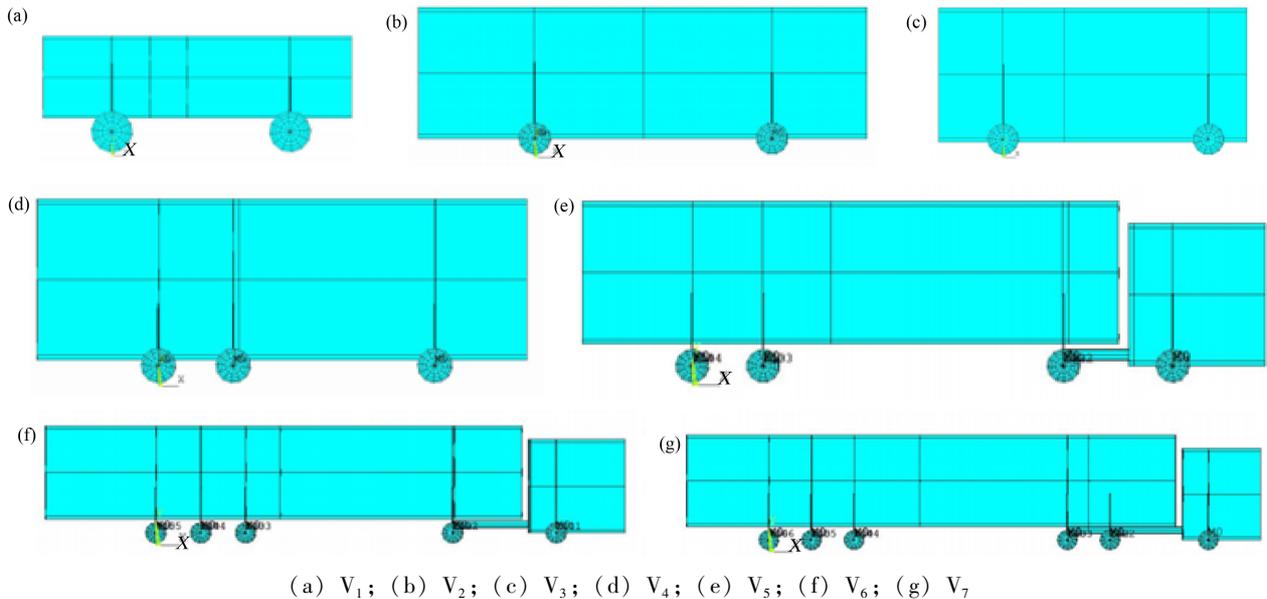


图 1 7 种类型汽车有限元模型

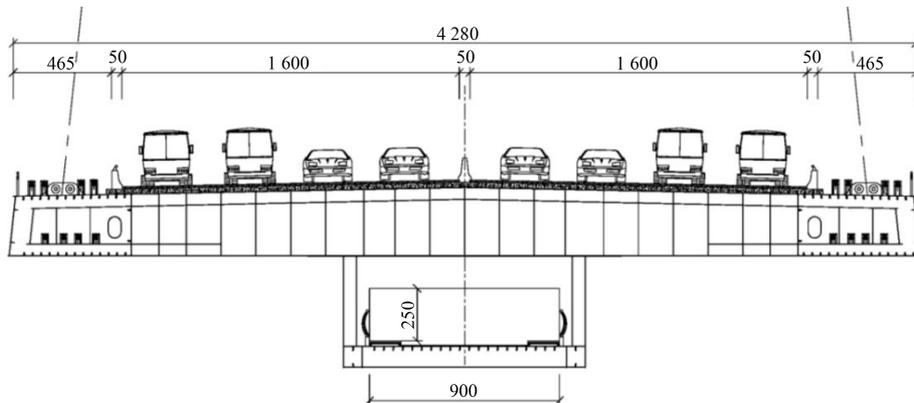


图 2 主桥典型横截面

cm

9 m, 桥面布置为: 1.5 m(人行) + 6 m(非机动车) + 1.5 m(人行) = 9 m。

采用 Midas 软件建立九龙湖大桥有限元模型, 如图 3 所示。模型中主梁、主拱圈采用梁单元, 吊杆、系杆为桁架单元, 桥面板为板单元。全桥共划分 4 182 个节点, 7 150 个单元。



图 3 九龙湖大桥有限元模型

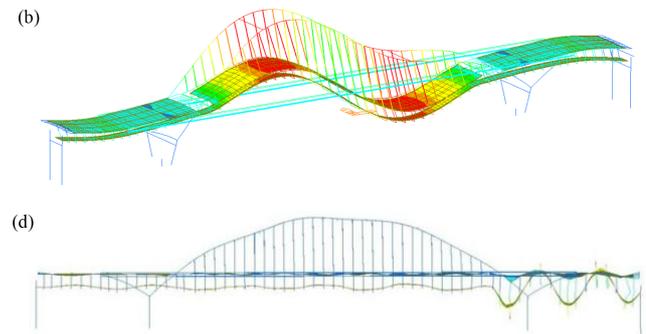
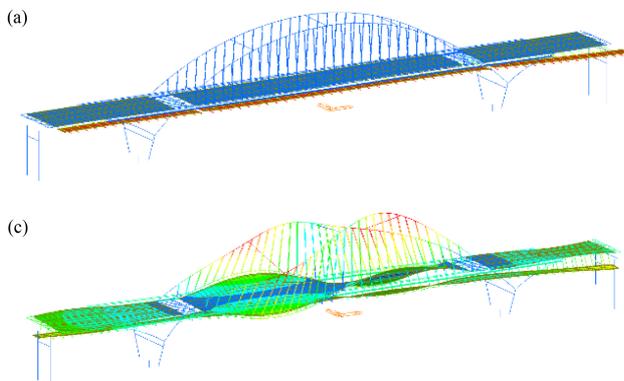
振动计算取其前 300 阶模态, 计算时各阶模态阻尼比均取 0.005。桥梁结构的典型模态信息如表 1 所列, 其中关键模态振型如图 4 所示。值得注意的是, 该桥部分模态中, 慢行系统的位移较为突出, 如图 4 所示的第 1、第 122 阶, 可以看出主桥结构对慢行系统的纵向约束较弱, 同时在较高频率下(9 Hz 以上)对慢行系统的竖向支承也较弱。

表 1 九龙湖大桥有限元模型典型模态

模态阶次	自振频率/Hz	振型特征
1	0.516	慢行系统整体纵漂
3	0.707	主跨拱梁反对称竖弯
9	1.200	主梁反对称扭转
152	9.625	慢行系统正对称竖弯

## 2.2 动力方程

车辆在模态坐标下的运动微分方程为



(a) 第 1 阶: 慢行系统整体纵漂; (b) 第 3 阶: 主跨拱梁反对称竖弯;  
(c) 第 9 阶: 主梁反对称扭转; (d) 第 122 阶: 慢行系统东边跨竖弯

图 4 关键模态振型

$$\{\ddot{q}_v\} + 2[\xi_v][\omega_v]\{\dot{q}_v\} + [\omega_v^2]\{q_v\} = [\Phi_v]^T\{f_v\} \quad (3)$$

式中:  $[\omega_v^2]$  为车辆参与运算的模态对应的特征值矩阵;  $[\Phi_v]$  为车辆对质量矩阵归一化的特征向量矩阵;  $\{f_v\}$  为车辆承受的外力及非线性内力向量;  $\{q_v\}$  为车辆模型在模态坐标下的位移向量;  $[\xi_v]$  为车辆模型的模态阻尼矩阵。

桥梁在模态坐标下的运动微分方程为

$$\{\ddot{q}_b\} + 2[\xi_b][\omega_b]\{\dot{q}_b\} + [\omega_b^2]\{q_b\} = [\Phi_b]^T\{f_b\} \quad (4)$$

式中: 各变量含义与车辆运动方程类似, 下标 b 代表桥梁。

车辆与桥梁的运动方程通过车轮与桥面之间的接触相耦合。采用 Runge-Kutta 数值积分方法求解该方程组, 即可得到桥梁结构的振动位移、速度和加速度响应时程。

采用幂函数形式描述路面不平顺的功率谱密度<sup>[18]</sup>:

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot (n/n_0)^{-w} \quad (5)$$

式中:  $G_d(n_0)$  为粗糙度系数, 其取值与路面粗糙等级有关;  $n_0$  为系数, 取 0.1 r/m;  $w$  为系数, 取 2;  $n$  为空间频率。

ISO 8608: 2016 根据路面不平顺功率谱密度将路面划分为 A ~ H 等级, 不同路面等级的差异体现于粗糙度系数  $G_d(n_0)$  的不同。考虑到九龙湖大桥为新建项目, 研究取平整度较好的 A 级粗糙度, 采用三角级数法生成车道的路面不平顺样本, 如图 5 所示。

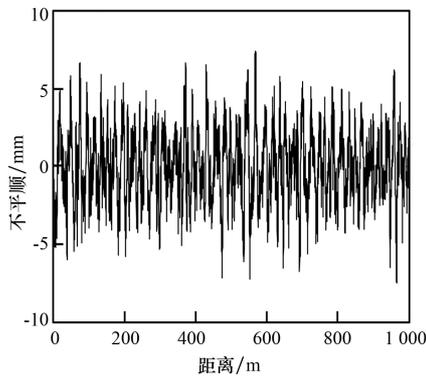


图 5 ISO-A 级路面不平顺样本

### 2.3 计算工况

参考文献 [19] 的做法, 以车流速度来区分不同的车流状态, 将 80 km/h 内可能的车流状态分为 5 种工况, 如表 2 所示。各工况的车流密度依据关系曲线计算得到。考虑到桥上行车道总长度有限, 生成各工况的车流时, 所有车辆均以相同的车速(所属工况的车流平均车速)行驶。

表 2 车流工况

工况	平均速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	车流密度/ (veh·km <sup>-1</sup> ·lane <sup>-1</sup> )	车流量/ (veh·h <sup>-1</sup> ·lane <sup>-1</sup> )
畅通	72.5	10.4	754
基本畅通	57.5	29.2	1 679
轻度拥堵	42.5	41.3	1 755
中度拥堵	27.5	53.8	1 479
严重拥堵	10.0	81.5	815

### 2.4 评价位置

为考虑不同位置的振动舒适度, 选择跨中、1/4 跨、梁端等位置进行振动响应分析与评价, 所选择的关键位置及对应编号如图 6 所示。

### 2.5 评价指标

ISO 10137: 2007 标准给出的评价方法是 3 个方向综合的, 并且同时评价了加速度的“常时均

值”与“偶发峰值”, 这样的评价方法适用于现场实测或仿真计算得到的振动加速度。

ISO 10137: 2007 采用计权均方根加速度 (Weighted r. m. s. Acceleration, RMS) 来评价振动加速度的“常时均值”。计权的均方根加速度计算式为

$$a_w = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $a_w(t)$  是计权的加速度;  $T$  是持续时间, 在 ISO 10137: 2007 中建议取 10 s;  $t$  为积分单位, s。

在分别算得 3 个方向的计权均方根加速度后, 按下式将其组合, 以考虑人体对振动感受的多方向综合效应:

$$a_w = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (7)$$

式中:  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  为系数, 均可取为 1;  $a_{wx}$ 、 $a_{wy}$ 、 $a_{wz}$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的计权加速度均方根值。

ISO 10137: 2007 推荐采用如表 3 所示的标准对上述 3 个方向综合计权均方根加速度进行评价。

表 3 计权的均方根加速度与主观感受的关系

计权的均方根加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	舒适程度
<0.315	没有不舒适
0.315~0.63	稍有不舒适
0.5~1.0	比较不舒适
0.8~1.6	不舒适
1.25~2.5	非常不舒适

对于振动加速度的“偶发峰值”, ISO 10137: 2007 标准采用峰值因数 (crest factors)、最大瞬时振动值 ( $A_{MTVV}$ ) 和四次方振动剂量值 ( $X_{VDV}$ ) 进行评价。

峰值因数定义为

$$\text{峰值因数} = \frac{\text{计权信号的峰值}}{\text{计权信号的均方根值}} \quad (8)$$

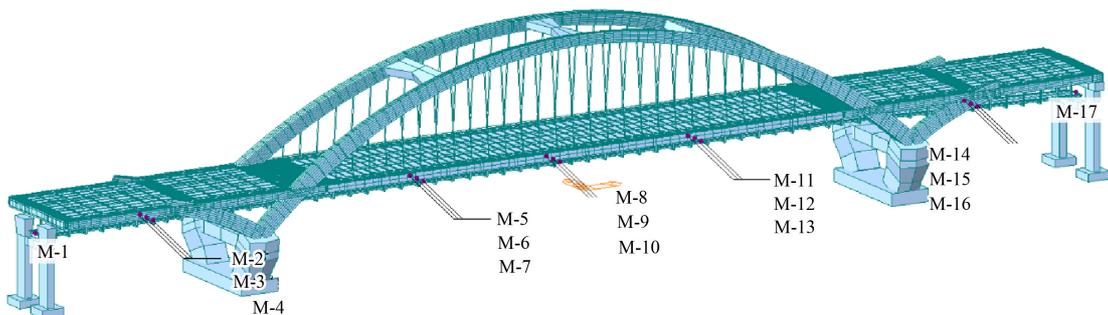


图 6 振动评价关键位置

最大瞬时振动值定义为

$$A_{MTVV} = \max \left\{ \left[ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \{a_w(t)\}^2 dt \right]^{1/2} \right\} \quad (9)$$

式中:  $t_0$  为某瞬时时刻;  $\tau$  为运行平均的积分段, 建议取 1 s。

振动剂量值表达式为

$$X_{VDV} = \left( \int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{1/4} \quad (10)$$

ISO 10137: 2007 建议当振动信号的峰值因数大于 6 时, 就应引入四次方振动剂量值进行舒适度评价, 并给出了振动剂量值与人主观感受的关系, 如表 4 所示。另外, 此时应同时列出  $A_{MTVV}$  指标的计算结果, 但 ISO 10137 规范并未给出该指标的明确限值。

表 4  $X_{VDV}$  与人主观感受的关系

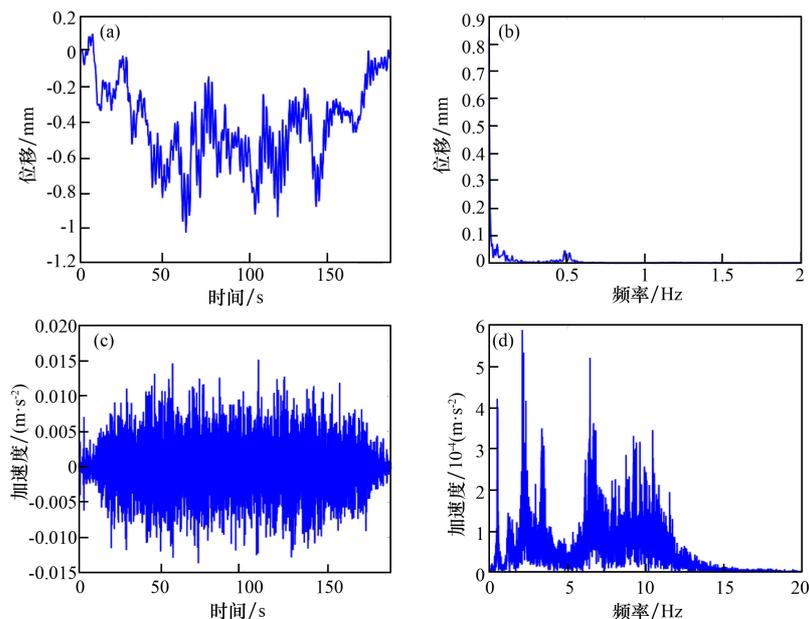
$X_{VDV}/(m \cdot s^{-1.75})$	主观感受
0.2 ~ 0.4	负面评价可能性小
0.4 ~ 0.8	负面评价可能性中
0.6 ~ 1.6	负面评价可能性大

### 3 舒适度分析与评价

对 5 种行人流工况下该桥慢行系统的各关键位置加速度时程进行分析, 可知加速度峰值在“轻度拥堵”工况下最大: 竖向  $0.34 \text{ m/s}^2$ , 纵向  $0.08 \text{ m/s}^2$ , 横向  $0.02 \text{ m/s}^2$ , 竖向振动为主导成分。

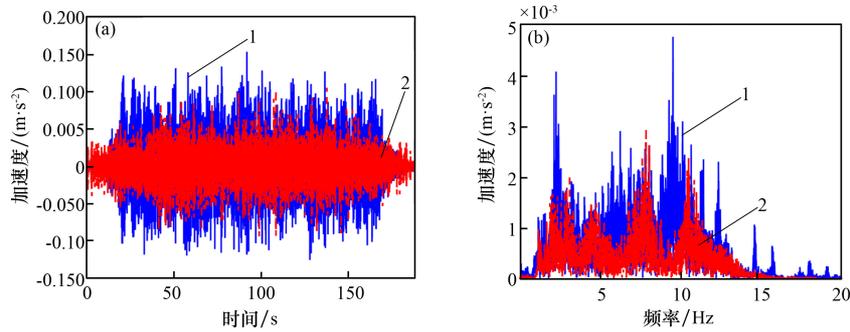
图 7 为“轻度拥堵”工况下, 慢行系统东边跨跨中位置 (M-15) 的位移及加速度时程曲线; 图 8 为同一工况下, 主跨跨中处行车道与慢行系统的加速度响应对比。从图中可以看出: 3 个方向的位移响应均以静荷载成分为主; 纵向加速度在  $0 \sim 15 \text{ Hz}$  范围内分布较为均匀, 横向加速度主要分布在  $2 \text{ Hz}$  附近, 竖向加速度主要分布在  $10 \text{ Hz}$  附近。另外, 即使车流荷载作用在上层行车道上, 下层慢行系统的振动响应仍大于行车道, 即存在一定的放大效应。频率分布上, 慢行系统的竖向加速度主要在  $2 \text{ Hz}$  附近大于行车道, 这与从 2.1 节分析得到的结构模态特性相吻合。

由各节点动力响应时程可计算得到在每个时间片段内的加速度 RMS 值, 其中各工况的最大 RMS 值列于表 5。可见轻度拥堵工况为最不利工况, 该工况下各个关心节点的振动加速度 RMS 分布情况, 如图 9 所示。在最不利工况下, 最大加速度 RMS 值为  $0.098 2 \text{ m/s}^2$ , 出现在东边跨跨中位置, 远小于 ISO10137 所规定的“没有不舒适”级别的上限  $0.315 \text{ m/s}^2$ , 故可认为随机车流荷载不会带来该桥慢行系统的舒适度问题。表 6 为随机行人流作用下桥梁竖向加速度  $X_{VDV}$  最大值。可见,  $X_{VDV}$  最大值也出现在东边跨跨中, 远小于“负面评价可能性小”对应的下限  $X_{VDV}$  值。



(a) 纵向位移; (b) 纵向位移幅值谱; (c) 纵向加速度; (d) 纵向加速度幅值谱

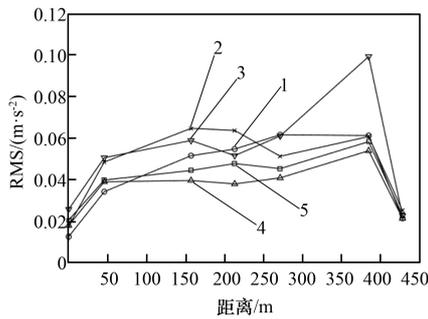
图 7 随机车流轻度拥堵工况下慢行系统东边跨跨中节点的加速度响应



(a) 时程; (b) 幅值谱

1—慢行主跨跨中; 2—行车道主跨跨中。

图 8 随机车流轻度拥堵工况下行车道与慢行系统主跨跨中位置竖向加速度响应对比



1—畅通; 2—基本畅通; 3—轻度拥堵; 4—中度拥堵; 5—重度拥堵。

图 9 各工况下慢行系统振动加速度 RMS 分布

表 5 随机车流作用下桥梁加速度 RMS 最大值

工况	最大 RMS	最大 RMS 位置	RMS 评价
通畅	0.071 8	M - 8	没有不舒适
基本通畅	0.072 8	M - 14	没有不舒适
轻度拥堵	0.098 2	M - 15	没有不舒适
中度拥堵	0.053 9	M - 15	没有不舒适
严重拥堵	0.058 2	M - 15	没有不舒适

表 6 随机车流作用下桥梁竖向加速度  $X_{VDV}$  最大值

工况	最大 $X_{VDV}$	最大 $X_{VDV}$ 位置	$X_{VDV}$ 评价
通畅	0.214	M - 11	负面评价可能性小
基本通畅	0.275	M - 11	负面评价可能性小
轻度拥堵	0.329	M - 15	负面评价可能性小
中度拥堵	0.228	M - 15	负面评价可能性小
严重拥堵	0.213	M - 15	负面评价可能性小

## 4 结 论

本分析研究针对布置慢行系统的大跨度中承式系杆拱桥的车致振动下行人舒适度问题,建立了基于 S 形车速—密度关系、车道分布及车头时

距正态分布的随机车流生成方法。基于车桥耦合振动理论,计算了随机车流作用下该桥的振动响应,再采用 ISO 10137 规范方法对慢行系统的舒适度进行了评价。得益于慢行系统与主桥结构之间的合理刚度设计,南昌市九龙湖大桥慢行系统在最不利工况下的舒适度可评价为“没有不舒适”和“负面评价可能性小”。

尽管舒适度评价结果较好,该桥慢行系统的振动响应放大效应仍值得注意,这一现象对同类带有慢行系统的城市道路桥梁有借鉴意义:由于这类桥梁承载了车道荷载,主桥结构支承刚度一般足够大,因此车道静荷载产生的慢行系统形态形变带来的影响可忽略。但在慢行系统一定的悬吊刚度及自身结构类型条件下,作用在车道上的随机车流动力荷载仍有可能在慢行系统上激发更剧烈的振动,进而引起行人不舒适,适当宜开展针对性的动力分析。

## 参考文献:

[1] KOZIKOWSKI M., NOWAK A. S. Live load models based on weigh-in-motion data[C]. Proceedings of the Sth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2010; 2874 - 2881.

[2] NOWAK AS, NASSIF H, DEFRAIN L. Effect of truck loads on bridges[J]. Journal of Transportation Engineering, 1993, 119(6): 853 - 867.

[3] CREMONA C. Probabilistic approach for cable residual strength assessment [J]. Engineering Structures, 2003, 25(3): 377 - 384.

[4] 闫君媛. 基于监测数据的特重车作用下装配式箱梁

- 桥响应分析及限载研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- [5] 林诗枫,黄侨,任远等. 基于南京长江三桥的车辆荷载模型[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(2):365-370.
- [6] 杨晓艳. 公路桥梁车辆荷载及可靠度研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [7] 谭国辉. 桥梁与车辆相互作用的系统模拟[J]. 土木工程学报,1996(3):34-42.
- [8] 盛国刚,彭献,李传习. 车-桥耦合系统的动力特性分析[J]. 长沙交通学院学报,2003(4):10-13.
- [9] 王元丰,许士杰. 桥梁在车辆作用下空间动力响应的研究[J]. 中国公路学报,2000(4):39-43.
- [10] Bases for design of structures-serviceability of buildings and walkways against vibrations; ISO 10137:2007 [S]. Switzerland; International Organization for Standardization,2007.
- [11] LIANG Y,XIONG F. Multi-parameter dynamic traffic flow simulation and vehicle load effect analysis based on probability and random theory. KSCE Journal of Civil Engineering. 2019;(23):3581-91.
- [12] WANG H,LI J,CHEN Q,et al. Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship [J]. Transportation Research Part A Policy & Practice,2011,45(1):126-150.
- [13] 2016 年北京交通发展年度报告[R]. 北京:北京交通发展研究中心,2016.
- [14] CHEN X,LI L,ZHANG Y. A markov model for headway/spacing distribution of road traffic[J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2010,11(4):773-785.
- [15] CHEN X,LI Z,LI L,SHI Q. Characterising scattering features in flow - density plots using a stochastic platoon model. Transportmetrica. 2014,10:820-48.
- [16] 公路桥梁车辆荷载研究课题组. 公路桥梁车辆荷载研究[J]. 公路,1997(3):8-12.
- [17] 王冰. 公轨合建桥梁冲击系数及影响因素的研究[D]. 上海:同济大学,2012.
- [18] Mechanical vibration-road Surface profiles-reporting of measured data[S]. Switzerland,International Organization for Standardization,2016.
- [19] 城市道路交通运行评价指标体系;DB11/T 785-2011 [S]. 2011. 北京:北京市质量技术监督局.