

# 基于随机车流的大跨度组合梁桥人非通道 车致振动舒适度研究

韦正敏<sup>1</sup>, 王玉玺<sup>2</sup>

(1. 长三角一体化示范区新发展建设有限公司, 上海市 201718; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海市 200092)

**摘要:** 为评估大跨度桥梁在随机车流作用下外挑人非通道的行人舒适度, 以一座主跨 180 m 的钢箱组合连续梁桥为背景, 开展了车致振动响应分析与舒适度评价。首先, 基于分离迭代法建立车桥耦合振动分析模型, 并依据相关标准确立以频率计权均方根加速度为核心的评价体系; 其次, 考虑路面粗糙度的随机性, 模拟 5 种交通流量下的随机车流过桥工况, 分析人非通道的振动响应分布规律, 并定量评价行人舒适度。结果表明: 车流引起的人非通道振动主要集中在主梁分离段, 远离主梁的区域振动响应存在放大效应; 在预测远期交通流量范围内, 人非通道各点的频率计权均方根加速度均小于  $0.06 \text{ m/s}^2$ , 行人舒适度评价均为“未感不适”。因此, 该桥型结构在设计交通流下能够满足行人舒适度要求。

**关键词:** 车致振动; 行人舒适度; 随机车流; 组合梁桥; 人非通道

中图分类号: U443.34

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0019-06

## Research on Comfort Level of Vehicle-induced Vibration in Pedestrian and Non-motored Vehicle Passages of Long-span Composite Beam Bridges Based on Random Traffic Flow

WEI Zhengmin<sup>1</sup>, WANG Yuxi<sup>2</sup>

(1. Yangtze River Delta Integrated Demonstration Area New Development Construction Co., Ltd., Shanghai 201718, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To evaluate the pedestrian comfort of the cantilevered pedestrian and non-motored vehicle passages of long-span bridge under random traffic flow, the vehicle-induced vibration response analysis and the comfort assessment are conducted on a steel-box composite continuous beam bridge with a main span of 180 m. A vehicle-bridge coupled vibration analysis model is established based on the separate iteration method, and an evaluation system centered on frequency-weighted root-mean-square acceleration is developed in accordance with relevant standards. Considering the randomness of pavement roughness, five traffic flow scenarios are simulated for vehicles crossing the bridge. The distribution patterns of vibration responses of the pedestrian and non-motored vehicle passage are analyzed, and the pedestrian comfort is quantitatively evaluated. The results show that the vehicle-induced vibration of the pedestrian and non-motored vehicle passage is mainly concentrated in the separated section of the girder, and the vibration response in the area far from the girder has an amplification effect. Within the predicted long-term traffic flow range, the frequency-weighted root-mean-square acceleration at all points of pedestrian and non-motored vehicle passage is all less than  $0.06 \text{ m/s}^2$ , and the pedestrian comfort is rated as “no discomfort”. Therefore, this type of bridge structure can meet the pedestrian comfort requirements under the design traffic flow.

**Keywords:** vehicle-induced vibration; pedestrian comfort; random traffic flow; composite beam bridge; pedestrian and non-motored vehicle passage

## 0 引言

随着城市交通的快速发展,大跨度桥梁越来越多地采用人车分行设计<sup>[1]</sup>,将人行道或非机动车道外挑于主梁之外,以实现功能分离、优化断面。然而,这种结构布置使得人非通道直接承受由主梁传递而来的车辆振动激励。由于外挑结构的悬臂效

收稿日期: 2026-04-13

作者简介: 韦正敏(1990—),男,硕士,工程师,从事工程管理工作。

通信作者: 王玉玺(2001—),男,硕士在读,研究方向为桥梁工程。电子邮箱: wyxwyx11@126.com

应,其动力响应可能被放大,从而影响行人行走的舒适性甚至安全感。因此,在设计阶段准确评估随机车流作用下的人非通道振动水平,并对其行人舒适度进行科学评价,具有重要的工程实际意义。

车桥耦合振动理论是研究车辆过桥时结构动力响应的重要理论基础。刘世忠等<sup>[2]</sup>提出了基于ANSYS的公路桥梁车桥耦合振动数值分析方法,利用约束方程实现车轮与桥面接触点的位移协调关系,在任意载荷步处不需要迭代求解,提高了分析效率。陈代海等<sup>[3]</sup>通过精细的模型试验,探讨了行车道位置、车桥质量比、桥梁支座形式等因素对车桥动力响应的影响规律,验证了数值模型的可靠性。陈建兵等<sup>[4]</sup>基于车桥耦合振动理论,采用规范标准对双层钢桁梁斜拉桥的行车舒适性进行了系统评价,研究了车速、车载质量、桥面不平顺度等因素对行车舒适度的影响。王胜斌等<sup>[5]</sup>、夏飞龙等<sup>[6]</sup>对组合梁桥和斜拉桥进行了车桥耦合振动实测与数值模拟,分析了路面等级、阻尼比等对冲击系数和舒适度的影响。马如进等<sup>[7-8]</sup>分别针对悬挂式人行桥和车辆激励下的大跨径桥梁人非系统开展了车致振动响应研究,指出车致振动可能显著影响行人舒适性,并提出了相应的基频估算与振动控制方法。蔡卫强等<sup>[9]</sup>采用元胞自动机模型模拟了随机人群步行荷载,揭示了人群密度与共振响应的非线性关系。屈俊童等<sup>[10]</sup>针对人行悬索桥开展了人致振动分析及舒适度评价,提出了融合烦恼率模型与均方根加速度的定量化评价方法。杨翔骞<sup>[11]</sup>以大跨度曲线人行桥为例,验证了TMD减振措施在改善行人舒适度方面的有效性。周俊<sup>[12]</sup>基于车致桥梁振动响应开展了桥梁损伤识别分析,为车桥耦合振动理论的应用拓展了思路。上述研究为本文提供了坚实理论与研究基础。然而,针对特定桥梁人非通道在真实随机车流下的振动响应与行人舒适度评估,尤其是结合现行国际标准<sup>[13-14]</sup>的精细化研究,仍有待深入。

本文以规划跨太浦河桥(106 m+180 m+106 m组合连续梁桥)为背景,基于车桥耦合振动理论和舒适度评价标准,通过数值模拟方法,研究不同交通流量下随机车流引起的人非通道振动响应,并对行人舒适度进行评价,以为同类桥梁的设计提供参考。

1 工程概况

本文依托工程为太浦河桥,其主桥采用106 m+180 m+106 m的变截面组合连续梁结构(见图1)。车

行道主梁为矩形钢箱梁,人非通道位于主梁腹板中部,采用外挑4.5 m的悬挑设计(见图2)。主跨跨中梁高5 m,墩顶梁高7.5 m,桥面总宽26.5 m;边跨采用分离式结构。这种外挑结构使得人非通道的振动响应可能会对车致激励较为敏感。

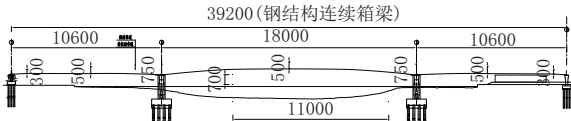


图1 主桥立面布置图(单位:cm)

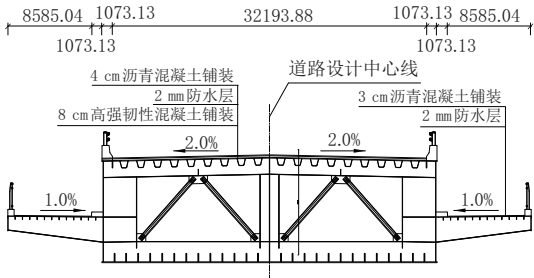


图2 主桥跨中布置图(单位:cm)

2 研究方法

2.1 车桥耦合振动分析模型

本研究采用分离迭代法进行车桥耦合振动分析。将车桥系统分为车辆与桥梁2个子系统,分别建立运动方程,两者之间通过车轮与桥面接触处的位移协调条件和相互作用力平衡关系相联系,在时域内迭代求解。

2.1.1 桥梁模型

全桥模型采用ANSYS软件建立有限元梁格模型(见图3),约束方案列于表1。主梁等构件采用空间梁单元模拟,人行道桥面板采用空间板单元模拟。结构阻尼比取0.004。

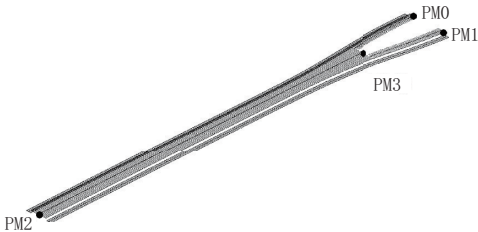


图3 全桥有限元计算模型

表1 模型约束方案

| 位置  | 纵桥向位移 | 横桥向位移 | 竖向位移 | 纵轴扭转 | 横轴扭转 | 竖轴扭转 |
|-----|-------|-------|------|------|------|------|
| PM0 | ○     | ●     | ●    | ●    | ○    | ○    |
| PM1 | ○     | ●     | ●    | ●    | ○    | ○    |
| PM2 | ●     | ●     | ●    | ●    | ○    | ○    |
| PM3 | ○     | ●     | ●    | ●    | ○    | ○    |

注:○表示无约束;●表示完全约束。

### 2.1.2 车辆模型

车辆采用多刚体动力学模型。以 2 轴 4 轮车辆为例(见图 4),每个车辆考虑车体的竖向、侧倾、俯仰自由度以及车轮的竖向自由度。根据交通量预测,本研究考虑的车型包括小轿车、小货车和公交车,相关车辆模型参数见表 2。

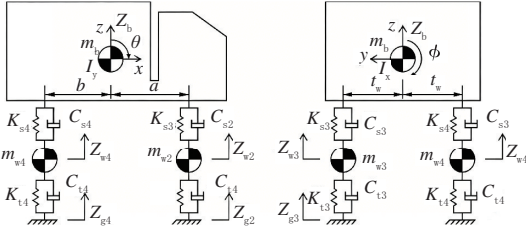


图 4 车辆模型示意图

图 4 中: $Z_b$ 、 $\phi$ 、 $\theta$  分别为车体竖向位移、侧倾转角及俯仰转角; $m_b$ 、 $I_x$ 、 $I_y$  分别为车体质量、侧倾转动惯性矩和俯仰转动惯性矩; $m_{wi}$ 、 $Z_{wi}$  分别为车轮的等效质量和竖向位移; $K_{si}$ 、 $C_{si}$  分别为悬架等效刚度和阻尼; $K_{ti}$ 、 $C_{ti}$  分别为车轮轮胎等效刚度和阻尼; $Z_{gi}$  为轮胎底部位移。

表 2 车辆模型参数

| 参数                               | 小轿车     | 小货车       | 公交车       |
|----------------------------------|---------|-----------|-----------|
| 总重/t                             | 1.6     | 4.8       | 16.0      |
| 车长/m                             | 5.0     | 6.0       | 10.5      |
| 轴数                               | 1       | 1         | 2         |
| 轮数(单轴)                           | 1       | 1         | 2         |
| $m_b$ /kg                        | 1 460   | 4 450     | 13 720    |
| $I_x$ /(kg·m <sup>2</sup> )      |         |           | 7 017     |
| $I_y$ /(kg·m <sup>2</sup> )      |         |           | 99 363    |
| $t_w$ /m                         |         |           | 1.8       |
| $m_{w1}$ /kg                     | 151     | 420       | 490       |
| $t_{s1}$ /m                      | 0       | 0         | 3.2       |
| $K_{s1}$ /(N·m <sup>-1</sup> )   | 434 920 | 500 000   | 245 000   |
| $C_{s1}$ /(N·s·m <sup>-1</sup> ) | 5 820   | 8 000     | 8 000     |
| $K_{t1}$ /(N·m <sup>-10</sup> )  | 702 000 | 1 950 000 | 875 000   |
| $C_{t1}$ /(N·s·m <sup>-1</sup> ) | 5 820   | 8 000     | 2 000     |
| $m_{w2}$ /kg                     |         |           | 650       |
| $t_{s2}$ /m                      |         |           | 1.8       |
| $K_{s2}$ /(N·m <sup>-1</sup> )   |         |           | 450 000   |
| $C_{s2}$ /(N·s·m <sup>-1</sup> ) |         |           | 7 000     |
| $K_{t2}$ /(N·m <sup>-10</sup> )  |         |           | 1 750 000 |
| $C_{t2}$ /(N·s·m <sup>-1</sup> ) |         |           | 2 000     |

### 2.1.3 路面粗糙度

路面粗糙度是指路面相对于基准平面的偏离,一般假定为零均值的平稳各态历经高斯随机过程。根据《机械振动 道路路面谱 测量数据报告》(GBT 7031—2005)<sup>[15]</sup>,模拟道路时路面粗糙度(路面竖向位移)功率谱密度函数  $G_d(\omega)$  为:

$$G_d(\omega) = G_d(\omega_0)(\omega/\omega_0)^{-w} \quad (1)$$

式中: $\omega$  为某一频带中心角空间频率,rad/m; $\omega_0$  为参考角空间频率,取 1 rad/m; $w$  为拟合指数,宜取 2.0; $G_d(\omega_0)$  为参考角空间频率处不平度功率谱密度,本文取  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$ 。

根据确定的路面粗糙度功率谱密度函数  $G_d(\omega)$ ,可通过下式拟合得到路面粗糙度  $r(x)$ :

$$r(x) = \text{real} \int_{\omega_1}^{\omega_u} \sqrt{2G_d(\omega)} d\omega \exp^{-i(\omega x + \varphi(\omega))} \quad (2)$$

式中: $x$  为拟合路径上任一点的位置; $\varphi(\omega)$  为任一频带对应的随机相位值; $\omega_1$  和  $\omega_u$  分别为计算角空间频率上限和下限;real 为取实部。

### 2.2 行人舒适度评价标准

本研究采用规范<sup>[13]</sup>振动响应标准,以频率计权均方根加速度  $a_{w,rms}$  作为主要评价指标。该指标定义如下:

$$a_{w,rms} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $T$  为振动持续时间,s; $a_w(t)$  为  $t$  时刻的频率计权振动加速度,m/s<sup>2</sup>。

$a_w$  由下式计算得到:

$$a_w = \left[ \int W(f) a(f) df \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: $W$  为频率权重系数; $a$  为振动加速度,m/s<sup>2</sup>; $f$  为频率,Hz。

规范<sup>[13]</sup>给出了环境振动下的行人舒适度评价参考标准。为便于定量评价,采用评价指标重叠区域的中间值作为评价等级划分标准,具体标准见表 3。

表 3 舒适度评价标准

| $a_{w,rms}$ /(m·s <sup>-2</sup> ) | 舒适度评价 |
|-----------------------------------|-------|
| 0.315                             | 未感不适  |
| 0.565                             | 略微不适  |
| 0.900                             | 比较不适  |
| 1.425                             | 不舒适   |
| 2.250                             | 非常不适  |
| >2.250                            | 极其不适  |

当振动信号的峰值因子  $k_{crest}$  大于 9 时,规范<sup>[13]</sup>建议引入附加的评价指标,包括最大瞬时振动值  $M_{TVV}$  和 4 次方振动剂量值  $V_{DV}/T^{1/4}$ 。

峰值因子定义为:

$$k_{crest} = \frac{\max(a_w(t))}{a_{w,rms}} \quad (5)$$

### 3 交通流参数与随机车流模拟

#### 3.1 交通流参数

根据交通量预测,本研究考虑了5种总交通流量水平:800、1 150、1 500、1 850、2 200 pcu/h。双向4车道通行,单向流量为总流量的一半。车型构成比例按小轿车65%、小货车25%、公交车10%考虑。所有工况下车辆行驶速度均按40 km/h考虑。加载车道示意图见图5。

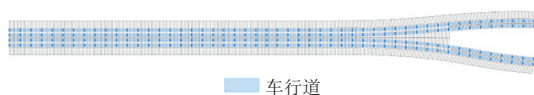


图5 加载车道示意图

#### 3.2 随机车流分布模拟

基于给定的交通流量、车速和车型比例,采用蒙特卡洛方法随机生成车辆进入桥头的初始时刻、车型和在车道上的分布<sup>[16-17]</sup>。各车道车辆到达服从泊松分布,车头时距服从对数正态分布<sup>[18]</sup>。为保证分析的统计意义,每种工况的模拟时长足以覆盖多辆车通过全桥的过程。各工况下随机车流的分布示意图见图6至图10。

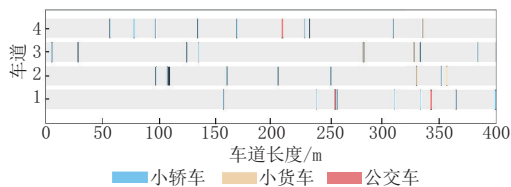


图6 随机车流车辆分布示意图 (40 km/h, 800 pcu/h)

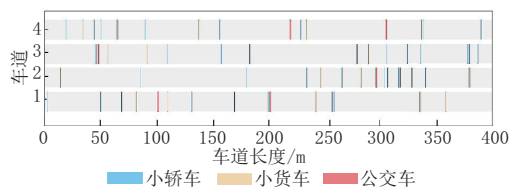


图7 随机车流车辆分布示意图 (40 km/h, 1 150 pcu/h)

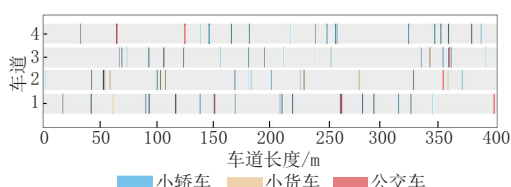


图8 随机车流车辆分布示意图 (40 km/h, 1 500 pcu/h)

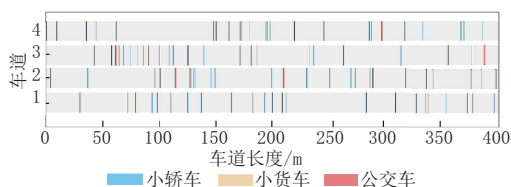


图9 随机车流车辆分布示意图 (40 km/h, 1 850 pcu/h)

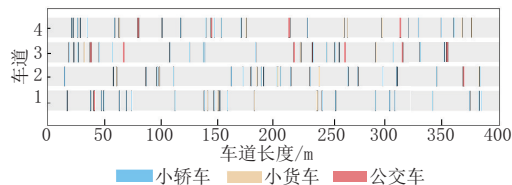


图10 随机车流车辆分布示意图 (40 km/h, 2 200 pcu/h)

#### 3.3 分析工况

本文分析工况见表4。为考虑随机车流的随机性,每种交通流量下分别进行3个随机样本的模拟,共计15个工况。

表4 分析工况表

| 序号      | 车速/(km·h <sup>-1</sup> ) | 总交通流量/(pcu·h <sup>-1</sup> ) | 路面等级 |
|---------|--------------------------|------------------------------|------|
| VF1-3   | 40                       | 800                          | A    |
| VF4-6   | 40                       | 1 150                        | A    |
| VF7-9   | 40                       | 1 500                        | A    |
| VF10-12 | 40                       | 1 850                        | A    |
| VF13-15 | 40                       | 2 200                        | A    |

### 4 结果分析与讨论

#### 4.1 结构振动响应特征

本节对15种不同交通流量工况下的车桥耦合振动响应进行了时程分析。图11至图17展示了典型工况(VF7, 1 500 pcu/h)下,人非道主跨相关分析结果。

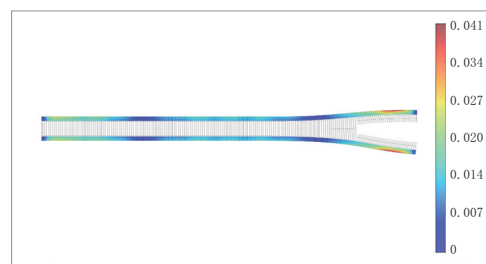


图11 人非道竖向频率计权均方根加速度  $a_{w,rms}$  分布图 (单位:  $m/s^2$ )

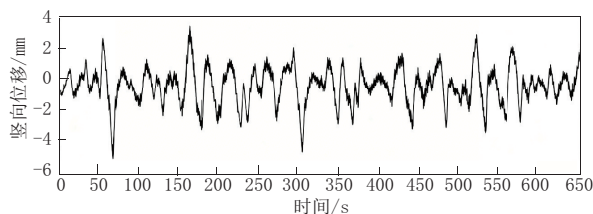


图12 人非道竖向  $a_{w,rms}$  最大值点竖向位移时程

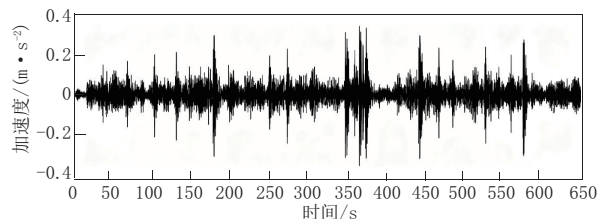


图13 人非道竖向  $a_{w,rms}$  最大值点竖向加速度时程

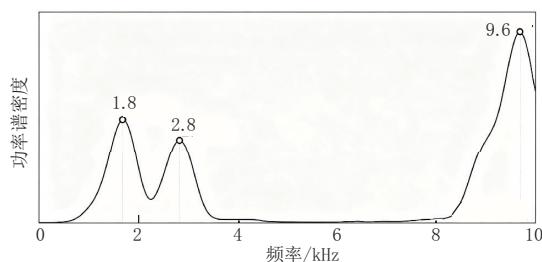


图14 人非道竖向 $a_{w,rms}$ 最值点竖向加速度功率谱密度

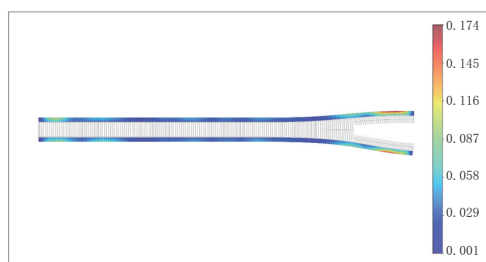


图15 人非道竖向最大瞬时振动加速度值 $M_{TV}$ 分布图(单位: $m/s^2$ )

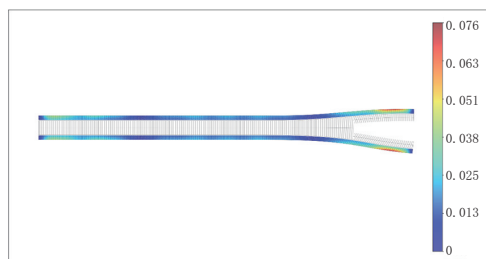


图16 人非道竖向4次方振动剂量值 $V_{DV}/T^{1/4}$ 分布图(单位: $m/s^2$ )

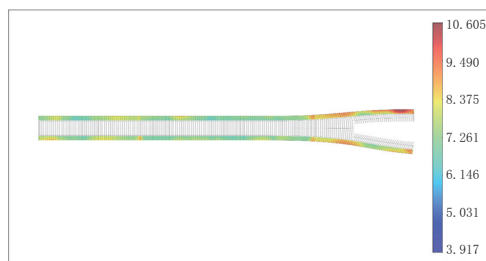


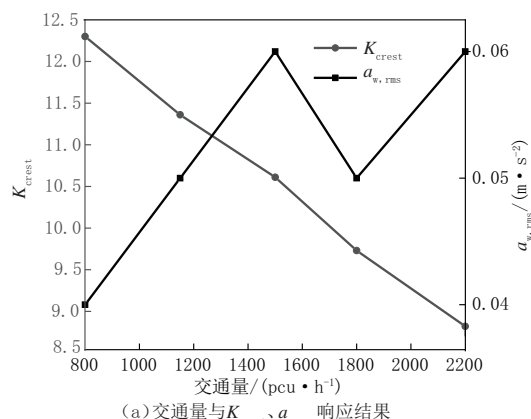
图17 人非道竖向峰值因子 $k_{crest}$ 分布图

对各工况下人非道全桥范围的频率计权均方根加速度等相关参数进行了分析,结果汇总于图18。

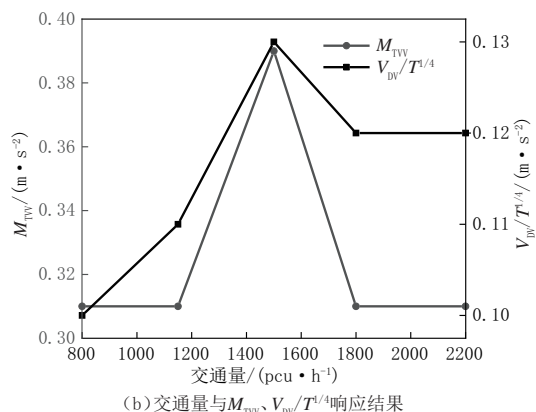
由图18可知,在A级路面、40 km/h车速下,即使交通流量达到远期预测的2 200 pcu/h,人非道各点的最大频率计权均方根加速度也仅为 $0.06 m/s^2$ ,远低于“未感不适”的上限值( $0.315 m/s^2$ )。

## 4.2 讨论

研究结果表明,在各个荷载工况下,人非道行人舒适度最低评价为“未感不适”。综合各项指标数值在人非道上的分布情况来看,车流通过桥梁导致的人非道振动影响主要集中在主梁分离段,并呈现远离主梁的区域振动响应放大的特点。因此,当行人经过该区域时,会更明显地感受到桥上行驶车辆的作用。根据行人舒适度的评价结果来看,在预期的



(a)交通流量与 $K_{crest}$ 、 $a_{w,rms}$ 响应结果



(b)交通流量与 $M_{TV}$ 、 $V_{DV}/T^{1/4}$ 响应结果

图18 舒适度响应结果图

车流状况下,这种影响较小,对行人来说是可以接受的。

但本研究的车型比例中,重车仅占10%。陈代海等<sup>[3]</sup>的模型试验研究表明,车桥质量比是车桥动力响应的重要影响因素,随着车桥质量比的增加,桥梁跨中动力响应增幅明显,重车更易激起桥梁的振动。若未来该路段重车比例显著升高,或者桥面平整度因长期运营而劣化(如降至B级或C级),车致振动响应可能会大幅增加。因此,建议在桥梁运营期对路面状况进行定期养护,并对重车比例的变化保持关注。

## 5 结 语

(1)本文考虑了40 km/h车速A级路面粗糙度状况下,800、1 150、1 500、1 850、2 200 pcu/h等包含近远期交通预测流量的多种状况,共设计了5种荷载工况。根据ISO2631-1:1997的环境振动下行人舒适度评价参考标准,在各个荷载工况下,人非道行人舒适度最低评价为“未感不适”。

(2)车流引起的人非通道振动响应在空间分布上具有明显的不均匀性,主要表现为振动影响主要集中在主梁分离段,且远离主梁的区域(悬挑端部)

振动响应显著放大。从频谱特征看,人非通道的振动以结构自身的高频局部振动为主。

(3)在当前研究方案及预测交通流条件下,该桥的车致振动对行人影响较小,人非通道的行人舒适度满足正常使用功能需求。但当重车比例显著升高或路面平整度劣化时,车致振动响应可能大幅增加,需重新评估。

#### 参考文献:

- [1] 李军心,刘志刚,李量.人车分行钢拱桥设计[J].公路,2020,65(5):111-115.
  - [2] 刘世忠,刘永健,程高,等.公路桥梁车桥耦合振动数值分析方法[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(1):94-98.
  - [3] 陈代海,李银鑫,李整,等.公路桥梁车桥耦合振动的模型试验研究[J].振动与冲击,2022,41(8):254-260.
  - [4] 陈建兵,徐同源,刘晨光,等.基于车桥耦合振动的双层钢桁梁斜拉桥行车舒适度分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2025,41(1):95-104.
  - [5] 王胜斌,吴肖波,唐国喜,等.双工字钢-混凝土板组合梁桥车桥耦合振动研究[J].世界桥梁,2019,47(3):38-43.
  - [6] 夏飞龙,吴肖波,王胜斌,等.新型钢板组合梁桥车桥耦合振动分析[J].西部交通科技,2019(2):110-114.
  - [7] 马如进,田雨,陈艾荣.悬挂式人行桥基频估算及考虑车致振动效应的行人舒适性评价[J].振动与冲击,2014,33(1):45-50.
  - [8] 马如进,崔传杰,胡晓红,等.车辆激励下大跨径桥梁人非系统振动特性[J].振动与冲击,2018,37(12):96-101.
  - [9] 蔡卫强,刘爱荣,黄友钦,等.基于元胞自动机的桥梁人致振动响应研究[J].广州大学学报(自然科学版),2025,24(3):42-51.
  - [10] 屈俊童,蒋德阳,时启壮,等.人行悬索桥人致振动分析及舒适度评价[J].交通科技,2025(3):51-56.
  - [11] 杨翔骞.大跨度曲线人行桥舒适度评估与减振研究[J].城市道桥与防洪,2026(2):96-100.
  - [12] 周俊.基于车致桥梁振动的桥梁损伤识别分析[J].工程与建设,2024,38(6):1404-1409.
  - [13] ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements[S].
  - [14] ISO 10137:2007 Bases for design of structures — Serviceability of buildings and walkways against vibrations[S].
  - [15] GB/T 7031—2005 机械振动 道路路面谱 测量数据报告[S].
  - [16] 赵辉,陈水生,梁维云.多种移动荷载联合激励的桥梁下挂式人非通行层振动舒适度研究[J].世界桥梁,2025,53(6):92-98.
  - [17] 杨志超,刘治,柏栋,等.随机车流作用下大跨拱桥下层慢行系统振动舒适度分析[J].工程建设,2025(5):28-35.
  - [18] Chen X, Li Z, Li L, et al. Characterising scattering features in flow-density plots using a stochastic platoon model[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2014, 10(9): 820-848.
- (上接第14页)
- 面长期性能观测与评价[J].公路交通科技(应用技术版),2013,9(12):153-156.
  - [3] 相阳,刘朝晖,周之路,等.高速公路长期性能观测体系研究[J].交通科技与管理,2025,6(23):16-18.
  - [4] 樊云龙,蒋龙松,朱宇杰,等.高速公路路面长期性能观测点建设及性能分析[J].中国交通信息化,2024(增刊1):489-492.
  - [5] 于明明,任仲山,于书恒.基于随机森林的高速公路路面使用性能预测模型[J].黑龙江交通科技,2025,48(10):1-7;12.
  - [6] 褚丽晶.高等级公路沥青路面性能预测模型及评价体系研究[J].四川水泥,2025(8):221-222;243.
  - [7] 胡鹏坤.实际服役条件下沥青路面平整度与车辙演变规律及预测模型[D].北京:北京建筑大学,2025.
  - [8] 肖佩,刘云腾,吕用洋,等.浅析自贡市气象观测站网的布局优化[J].农业灾害研究,2024,14(7):197-199.
  - [9] 任景飞,樊笑宇,朱辉,等.黑龙江省沥青路面长期性能观测体系分析[J].黑龙江交通科技,2024,47(7):48-51.
  - [10] 张昕冉,孙洪运,张立涛.智慧高速公路交通气象观测站布设探讨[J].公路,2022,67(1):248-254.
  - [11] 束景晓,李俊,张海,等.多场景下的高速公路路面性能预测及应用研究[J].公路,2026(4):378-385.
  - [12] 肖祁南,王硕.基于高速公路路面检测数据的路面性能衰变模型设计[J].市政技术,2026,44(3):42-50.
  - [13] 高兵.高速公路非饱和和软土地区路基沉降计算与预测[J].交通世界,2026(增刊2):117-119.
  - [14] 任泽.河北省高速公路路面使用性能衰变规律研究[J].交通科技与管理,2025,6(20):173-175.
  - [15] 林伟,林振华,艾小娟.高速公路沥青路面病害预测与性能衰减建模研究[J].交通节能与环保,2025,21(6):151-155.
  - [16] 邱金晶,陈锋,张珏,等.浙江省高速公路路面温度预报模型性能检验及应用[J].气象科技,2020,48(4):518-528.