

# 基于车辆振动响应间接识别桥梁频率的模型试验研究

吴晓生<sup>1</sup>, 林梓康<sup>2</sup>, 程俭廷<sup>1</sup>, 王身宁<sup>1</sup>, 周军勇<sup>2</sup>

(1. 广州诚安路桥检测有限公司, 广东 广州 510420; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**为证明采用过桥车辆振动信号可以识别桥梁多阶振动频率, 搭建了缩尺车桥耦合振动模型进行试验, 研究了各类影响因素下采用二轴试验车对桥梁频率的识别效果。首先, 介绍了缩尺车桥耦合振动的模型梁和试验车; 其次, 分析了传感器分别安装于模型梁、试验车底座和试验车顶座的振动信号, 并对比这 3 种振动信号对桥梁频率的识别效果; 最后, 研究了悬架刚度、车身质量、路面粗糙度和运营车流激励对试验车间接识别桥梁频率的影响。结果表明, 试验车底座的振动传感器可以识别得到桥梁前 3 阶竖向振动频率和前 2 阶扭转振动频率, 与安装于桥梁振动传感器的频谱大致相同, 说明该传感器不受车体振动影响; 试验车顶座的振动传感器可以准确识别桥梁第一阶竖向振动频率, 但是桥梁高阶频率受到车体自身振动频率干扰较难识别。各类影响因素主要影响试验车顶座振动传感器的桥梁频率识别效果, 对试验车底座振动传感器的桥梁频率识别效果影响很小, 证明了所设计试验车在间接测量桥梁动力特性的优越性。

**关键词:**桥梁工程; 间接测量; 频率; 二轴车; 模型试验; 快速傅里叶变换

**中图分类号:**U441.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2024)01-0016-08

## 0 引言

频率是表征结构动力特性的最基础指标, 结构状态的改变(例如性能退化、局部损伤、边界改变等)都直接影响频率, 因而准确识别结构频率一直以来都是桥梁检测与监测的重点内容。结构频率通常可以通过在桥梁上安装振动传感器、拾取结构振动响应、通过频域或时频信号处理方法进行识别, 既可以通过激振器、试验车辆等人为激励方式开展, 也可以完全借助环境激励实现。然而, 这种传统量测方法需要在桥梁上直接安装传感器和采集系统, 这势必会对运营交通产生影响, 也给测试人员带来工作安全隐患。基于过桥车辆振动信号识别桥梁动力特性的间接测量方法近年来受到广泛关注, 其力学原理是: 车辆行驶过桥过程中车辆振动与桥梁振动是相互耦合的, 桥梁振动信号通过轮胎传递到车体, 通过对车体振动信号分解可以识别桥梁动力信息, 该理论最早由杨永斌院士提出并通过有限元仿真和实桥试验进行验证<sup>[1]</sup>, 后来逐步定义为车辆扫描法(vehicle scanning method, VSM)。目前, 已经从理论上证明了车辆扫描法可以识别桥梁频率、模态振型、阻尼比、损伤等动力参数<sup>[2]</sup>, 其中桥梁频率识别已经在模型试验和实桥应用得到了大量验证, 而其他动力参数的间接识别距离实桥应用还有较大困难。因此, 对桥梁频率的精准识别仍然是车辆扫描法主要研究热点, 特别是对于损伤敏感的高阶桥梁频率识别。

LIN et al<sup>[1]</sup>最早在台湾一座多梁式简支梁桥上采用一辆单轴试验车测试得到了桥梁基础频率; SIR-INGORINGO et al<sup>[3]</sup>在日本一座 59 m 简支钢箱梁上采用一辆商务小轿车进行测试, 通过多组测试及数据分析成功识别了桥梁基础频率; MIYAMOTO et al<sup>[4]</sup>提出通过在公交车车轮上安装振动加速度传感器

收稿日期: 2023-11-14 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20230304

基金项目: 国家自然科学基金(52178280); 广州市市校联合资助项目(SL2023A03J00897)

作者简介: 吴晓生(1992—), 男, 高级工程师, 研究方向为桥梁监测与结构安全评估。E-mail: 23663610@qq.com

吴晓生, 林梓康, 程俭廷, 等. 基于车辆振动响应间接识别桥梁频率的模型试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 16-23.

定期采集路线桥梁的健康状况,并初步分析桥梁频率的间接识别效果,但是检测结果并不理想;YANG et al<sup>[5]</sup>设计了一辆单轴试验车通过人力拖拉间接测试几座桥梁的振动频率,并对比验证了聚氨酯轮胎比橡胶轮胎和充气轮胎测试效果更好;SHIRZAD-GHALEROUDKHANI et al<sup>[6]</sup>采用智能手机替代精密传感器用于桥梁频率间接测量,通过一个刚度比较柔的试验梁进行模型试验,验证了可以识别桥梁基础频率;LI et al<sup>[7]</sup>采用 6 m 钢梁作为模型进行试验,通过信号盲源分离方法识别得到了桥梁前 2 阶频率;CANTERO et al<sup>[8]</sup>采用一个严格按照实际桥梁结构特性缩比钢梁进行车辆扫描法频率识别研究,发现可以较好测试桥梁基础频率,但难以识别高阶频率;YANG et al<sup>[9]</sup>设计了一辆单轴试验车在重庆大学校园内一座连续梁桥开展试验,结果表明低速行车状态下也可以识别得到桥梁前 2 阶频率;阳洋等<sup>[10]</sup>采用一辆牵引车连接 2 辆单轴拖车的方法,在桥面上间歇性停车测量,可以很好地识别桥梁一阶频率和模态振型;ZHOU et al<sup>[11]</sup>设计了缩尺车桥耦合系统,成功从车体响应中同步识别了桥梁频率和模态振型。这些研究大部分只能识别桥梁基础频率,对于桥梁多阶频率的识别往往对试验车设计要求较高,这是因为行车条件下路面粗糙度和车辆自身振动都会显著降低 VSM 的效果。

尽管 VSM 关于桥梁频率的识别研究较多,但是国内相关研究文献较少,系统地从试验角度剖析 VSM 识别效果的研究还比较少见。因而,本研究从模型试验角度出发,详细阐述缩尺车桥系统的设计方法,重点介绍试验车的设计方法,以增强间接测量效果,并研究车辆质量、轮胎刚度、路面粗糙度、车流激励等因素影响,总结提高 VSM 对桥梁频率识别精度的试验测试方法,为 VSM 的实桥应用提供研究方向。

## 1 车桥耦合系统缩尺模型试验

### 1.1 缩尺车桥系统的设计

设计如图 1 所示的缩尺车桥系统,试验梁包含 2 个 3 m 等跨简支梁以及左右两侧各 1 m 的加速和减速段,整个试验梁采用等截面 I 型截面钢梁形成,试验梁中间设置 4 个轨道使得车辆在固定轨道行驶,横向可以布置 2 辆车并排行驶仿真多车道行驶。试验车通过细线连接卷扬机的滚轴,卷扬机可以通过变频运行实现对试验车不同车速的牵引,试验车通过加速减速段基本能够保证在试验梁上匀速行驶。为了实现试验梁的理想简支边界条件,每跨分别设置固定支座和滑动支座,固定支座通过上下 2 块有机玻璃分别连接钢梁和桥墩,2 块有机玻璃之间通过光圆钢筋连接实现自由转动,滑动支座则在有机玻璃和桥墩连接之间放置 1 块聚四氟乙烯板,实现试验梁与桥墩的滑动,桥墩通过工字钢梁和压重块实现。

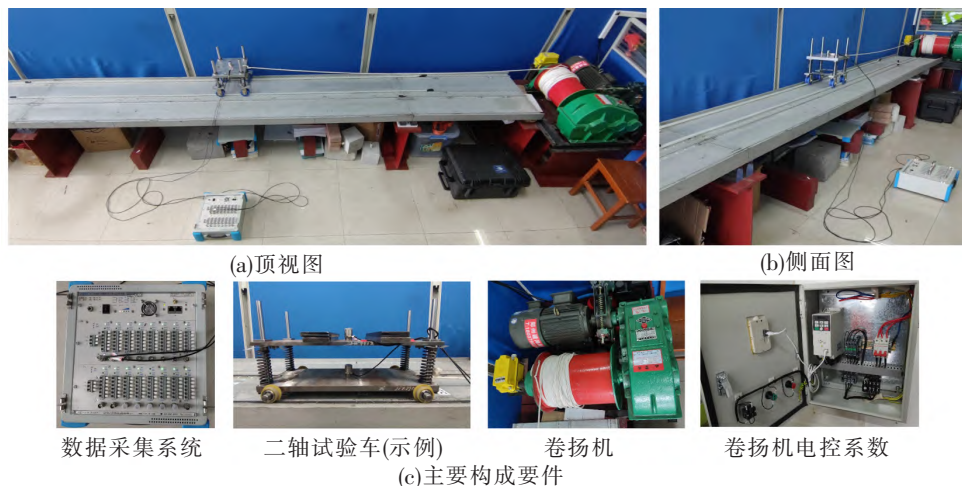


图 1 缩尺车桥系统的实景图

试验车设计为二轴对称车,设计车辆分为双层:底层通过钢板与车轴采用螺栓连接,车轴采用聚氨酯轮胎与轨道接触,质量为 11.25 kg;上层通过 4 个立柱及其上面弹簧与下层钢板连接,弹簧可以选择不同刚度,上层钢板与弹簧进行连接,质量为 8.75 kg。该二轴对称车既可以采用底层结构进行测试也可以采用上层结构进行测试,底层结构特点是测试车体与轨道梁直接通过轮胎连接,轮胎刚度大可以将桥梁振

动信号直接传递给车体;上层结构也可以进行间接测量,其优点是可以调节弹簧刚度与钢板质量使得车体振动与桥梁振动信号分离,更容易实现桥梁信号识别,也可以通过设置抑振装置或振动放大装置,更好识别桥梁振动信号。试验数据采集类型为振动加速度响应,布置在试验车上,在试验车过桥过程中提取过桥振动信号进行分析。

### 1.2 桥梁振动特性分析

采用 15 个加速度传感器布置于桥面上测量试验梁的模态特性。这些传感器沿纵向均匀地直接安装在桥面上。采用激振器对钢梁进行扫频激振,激振器位于距桥起点 0.2 m 处,如图 2 所示。在直接测量中,利用振动信号采集分析软件选择任意一个加速度传感器并对数据进行 FFT,即可得到如图 2 所示的频域信号。结果表明,频谱中峰值非常明显,在频谱中可以看到前 3 个竖向振动频率和前 2 个横向扭转频率,各阶频率的确定借助了建立的实验桥有限元模型。通过测试获得的桥梁前 3 阶竖向频率分别为  $f_{b1} = 7.81$  Hz、 $f_{b2} = 29.29$  Hz 和  $f_{b3} = 62.50$  Hz,1 阶竖弯叠加扭转频率为  $f_{br1} = 22.40$  Hz,2 阶竖弯叠加扭转频率为  $f_{br2} = 55.60$  Hz。

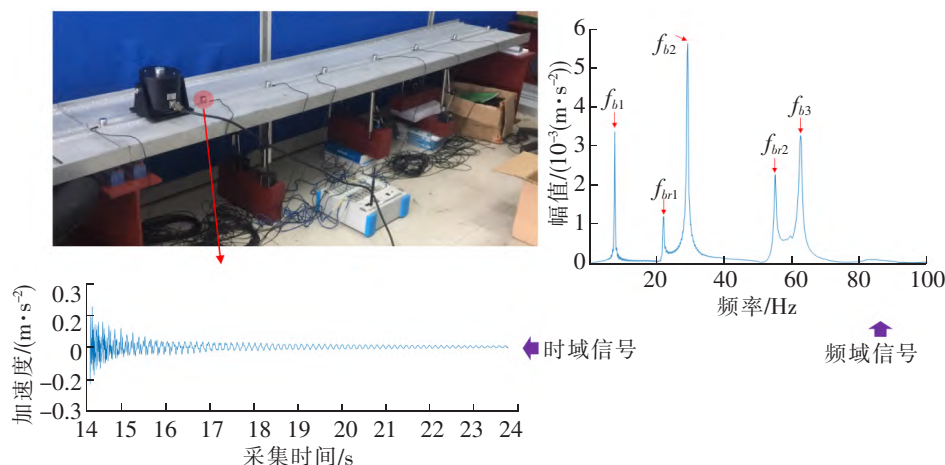


图 2 直接测量法对桥梁频率的识别结果

### 1.3 车辆振动特性分析

试验车包含上下 2 层结构,如图 3(a)所示,试验车立柱与底盘刚性连接,与弹簧组成试验车的竖向悬架系统,承座与底盘通过悬架系统连接。下层结构因为采用聚氨酯轮胎以及钢板连接车轴,整体刚度较大因而车体频率已经超过了所关注桥频范围,试验车上层结构则由弹簧类别及上层钢板配重所决定。试验车设计巧妙之处在于:刚性轮胎可以保证桥梁信号传递到车辆底座,车辆顶座通过调整顶座质量和弹簧刚度可以确保刚性轮胎始终与桥面保持接触,即便在车辆行驶速度较大以及桥面粗糙度较大等情况。为了较好地采集测试车承座和底盘的振动加速度信号,承座和底盘正中间放置本次试验的 1 号传感器和 2 号传感器,如图 3(a)所示。3 号传感器安装在桥梁上直接测试桥梁振动,作为间接测量效果的对比,如图 3(b)所示。在后续试验中需要用到试验激励车,研究选择采用 2 个试验激励车如图 3(c)和图 3(d)所示,激励车 A 质量为 8 88 kg,激励车 B 质量为 29.21 kg,分别模拟试验车过桥时其他车道伴随有轻型车和重型车的激励场景。

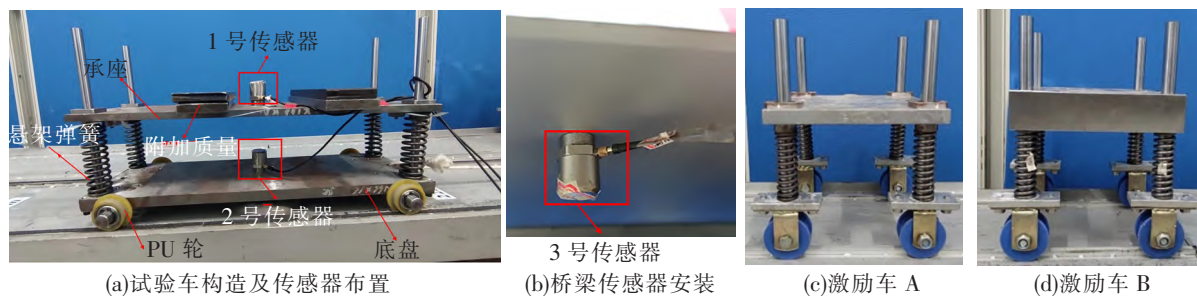


图 3 试验车照片以及传感器安装位置图



试验车悬架弹簧一共有 4 组,开展 VSM 测量之前,对车辆振动信号进行振动分析,以免车辆自身振动信号与桥梁振动频率相近而造成干扰。将试验车放置在平整的地面,在确保地面没有显著环境干扰情况下采集传感器 1 和 2 的信号,并进行快速傅里叶变换获得其频率,发现传感器 1 可以采集得到具有明显峰值的数据,而传感器 2 的频谱则没有明显峰值,说明试验车底盘的频率在关注频域范围之外,试验车承座(顶盘)的频率则是与弹簧刚度、承座质量相关,表 1 是不同弹簧组以及承座附加质量影响下识别的 1 号传感器频率。

表 1 试验车基础频率随着弹簧刚度与承座附加质量的变化

组别	线径/mm	承座附加质量			
		0 kg	2.5 kg	5.0 kg	8.0 kg
第①组	3.5	13.67	9.76	8.70	6.30
第②组	4.0	15.10	12.20	10.74	10.25
第③组	4.5	17.58	15.63	13.67	12.70

## 2 VSM 测试结果分析

采用表 1 所示的第①组弹簧线径,承座附加质量为 0 kg,试验车在光滑的轨道平面行驶,卷扬机驱动下车辆以较低速度  $v=0.07$  m/s 行驶,以上参数设置作为试验对照组,试验检测第 2 跨 3 m 简支梁,1 号和 2 号传感器按照图 3(a)所示布置,3 号传感器布置在桥梁  $L/4$  位置。提取试验车前轴进桥和后轴出桥的振动信号,3 个传感器的振动信号时程信息和频谱分析见图 4。

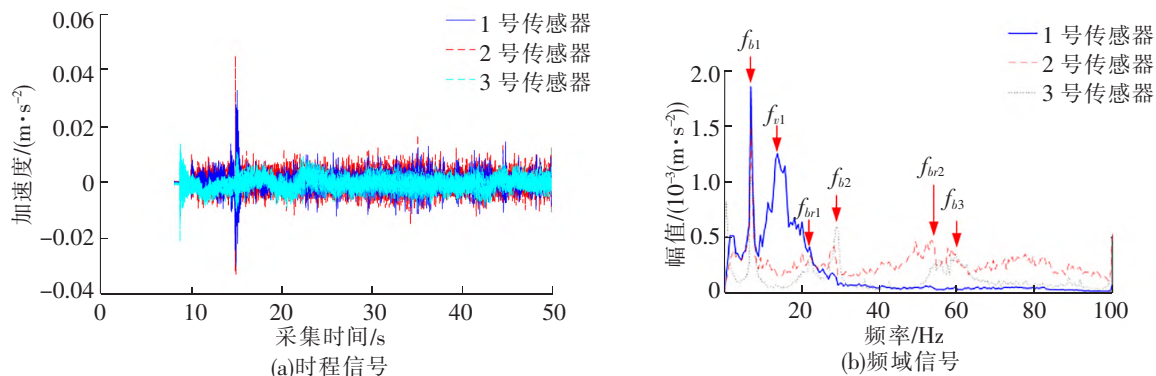


图 4 二轴试验车过桥过程中振动传感器的时程信号及其频谱分析

从时域结果分析,试验车底盘的振动在传递到承座时在一定程度上被削弱了,表现为 1 号传感器采集的时域振动幅值在整体上比 2 号传感器更小,说明车辆悬架系统起到了一定隔振消能作用。从频域结果分析,安装在桥梁上的 3 号传感器可以很好地识别桥梁前 3 阶竖向频率和前 2 阶扭转频率,但是由于试验车质量的影响,识别得到的桥梁前 3 阶竖向频率均有一定程度的降低,分别为  $f_{b1}=6.83$  Hz、 $f_{b2}=29.28$  Hz 和  $f_{b3}=55.40$  Hz,桥梁前 2 阶扭转频率也分别变为  $f_{br1}=22.13$  Hz 和  $f_{br2}=61.12$  Hz,车辆质量主要影响桥梁第 1 阶频率。安装在试验车底盘的 2 号传感器可以很准确地识别桥梁前 2 阶竖向频率,对于其他频率的识别效果比较差,但是需要注意的是其频谱中没有车体频率成分,说明没有明显受到车体自身振动影响。1 号传感器只能识别桥梁第 1 阶频率,其他频率都难以识别,且车体自身振动频率  $f_{v1}=13.60$  Hz 可以非常准确识别得到,说明车体振动信号也能识别桥梁频率信息,但是受到自身车辆振动影响,其他桥梁频率很难识别。

上述测试结果可知,过桥车辆振动信号中包含桥梁信息,通过对过桥车辆振动信号频谱分析可以识别桥梁频率。当车辆轮胎刚度较大时,桥梁振动信号可以比较完备地传递到车辆底盘,在车辆底盘可以很好地识别桥梁前几阶频率且不受车体振动影响;当车辆包含悬架系统时,悬架上车体采集的振动信号则受到车体自身振动干扰,导致对桥梁频率识别效果降低,但是仍然能够识别桥梁基础频率。

### 3 关键影响参数分析

参数化研究车辆悬架刚度、车辆质量、路面粗糙度和运营车流激励等因素对车辆扫描法的影响。此外,结构参数变化以及支座状态改变也会引起桥梁频率变化<sup>[12-13]</sup>,通过本试验方法也可以通过识别桥梁频率以及模态振型变化从而分析结构参数以及支座状态的可能改变,这将作为后续深入研究的方向。

#### 3.1 车辆悬架刚度影响

研究不同组车辆悬架刚度对于试验车承座识别桥梁频率的效果,如图 5 所示。随着悬架弹簧的线径增加,承座弹簧刚度增大,承座的振动频率也增加,产生的效果是车体频率能量更加宽对桥梁频率遮掩效应更强。车体内部悬架刚度的变化对于桥梁振动影响不大,因此从桥梁上安装的 3 号传感器均能识别桥梁各阶频率,但是安装在试验车底座的 2 号传感器受到悬架刚度变化的影响较小,仍然能够较好地识别桥梁多阶频率。车辆悬架刚度直接影响承座的频率识别效果,其频谱图主要由车体频率贡献,但是仍然能够识别桥梁第 1 阶频率。综上可知,如果采用车身传感器识别桥梁频率,需要调整车辆悬架刚度使得车身频率远离桥梁频率,例如第②组弹簧线径 4.0 mm。试验车底座因为刚度非常大,底座频率远高于桥梁频率,使得间接识别桥梁频率效果更好,实桥试验检测车可以借鉴该思路。

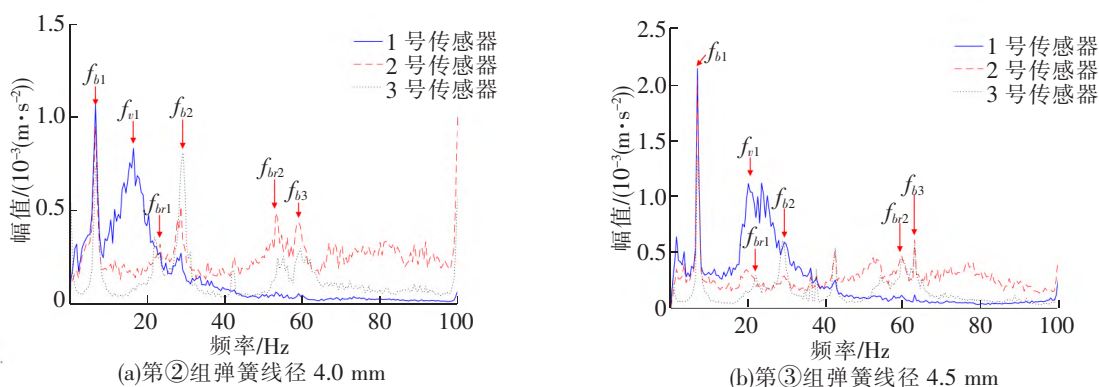


图 5 弹簧刚度对车载传感器移动检测桥梁频率的对比

#### 3.2 车辆质量的影响

车辆质量一方面降低车辆频率,另一方面增强车桥耦合效应,考虑试验车承座增加质量 5.0 kg 和 8.0 kg,3 个传感器的频谱识别结果如图 6 所示。试验车质量的增加,使得桥梁频率识别结果细微降低,例如附加质量 5.0 kg,使得第 1 阶桥梁频率变为 7.32 Hz,相对 7.83 Hz 降低 6.51%。随着附加质量增加,试验车顶座频率降低,当附加质量为 8.0 kg 时,试验车顶座频率与桥梁基频发生混叠,导致无法识别第 1 阶频率,其他桥梁高阶频率也无法识别出。相对于试验车顶座传感器,安装在试验车底座的传感器则还能很好地识别桥梁多阶频率。随着试验车顶座附加质量增加,试验车对桥梁激励更加明显,通过试验车底座传感器可以更好地识别桥梁频率。

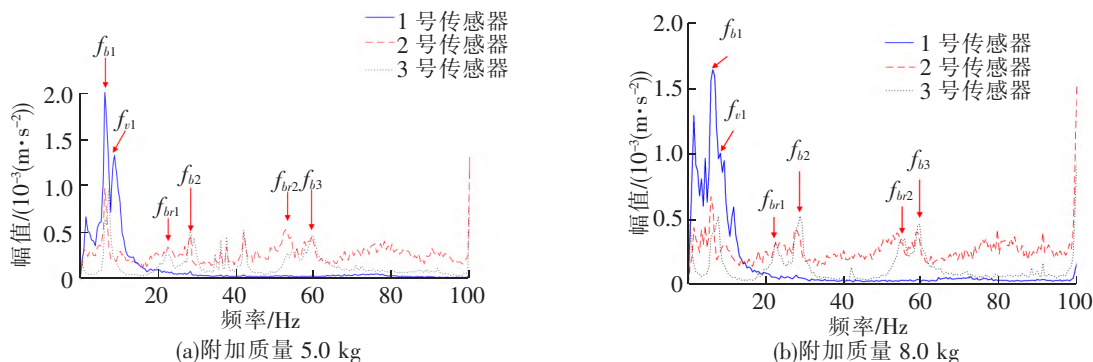


图 6 车身质量对车载传感器移动检测桥梁频率的对比

### 3.3 路面粗糙度的影响

为了模拟路面粗糙度影响,在轨道梁上贴一层砂纸,模拟路面粗糙情况,图 7 是路面粗糙度情况下以第③组弹簧为基础,试验车分别以 0.07 m/s 和 0.21 m/s 的速度行驶过桥获得的 3 个传感器的振动信号频谱图。由图 7 可知,当试验车以 0.07 m/s 的低速行驶时,虽然路面粗糙度更差,但是仍然能够从 2 号传感器识别桥梁 5 阶振动频率;当试验车行驶速度增加到 0.21 m/s 时,2 号传感器仅能识别桥梁前 2 阶频率。1 号传感器则仅能识别桥梁第 1 阶频率,说明路面粗糙度会显著增加具有悬架系统的车身振动,使得桥梁频率识别变得更加困难;但是路面粗糙度影响下,车轮刚度非常大的试验车底座仍然能够很好地识别桥梁频率,只是路面粗糙度会形成干扰。因此,采用试验车底座也能在路面粗糙度情况下识别桥梁多阶频率。

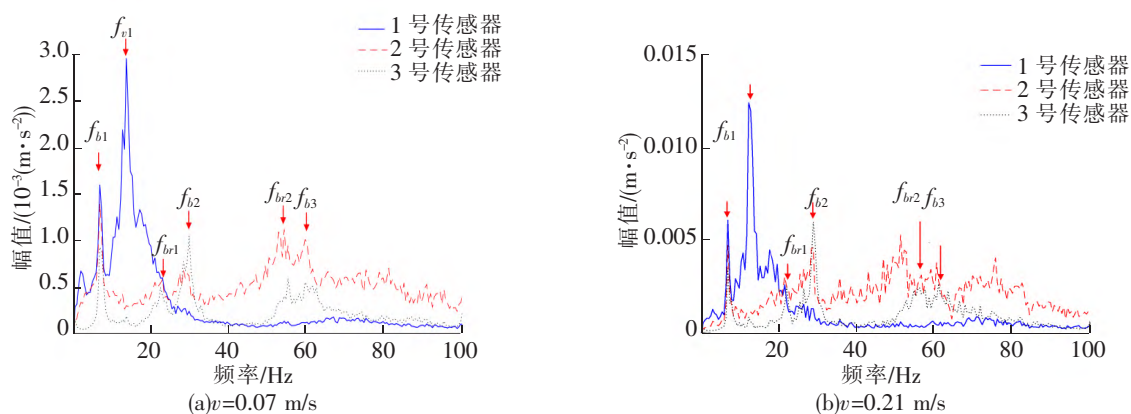


图 7 路面粗糙情况下试验车过桥振动传感器的频谱分析

### 3.4 运营车流激励的影响

实际检测过程中可能有环境运营车流影响,因此探索运营车流伴随激励下试验车的检测效果,如图 8 所示,是在 3.3 节的路面粗糙度工况基础上开展测试。试验中,激励车 A 伴随行驶是指激励车 A 与试验车分别在横向 2 个轨道上并排行驶,激励车 A 与 B 伴随行驶是指激励车 A 与 B 前后跟随行驶并与试验车横向并排行驶。仅有激励车 A 伴随行驶,可以发现试验车底座的 2 号传感器仅能识别桥梁第 1 阶和第 2 阶竖向频率,这可能是因为激励车行驶状态下并没有把桥梁振动完全激励,试验车顶座的 1 号传感器则仅能识别桥梁第 1 阶竖向频率。考虑伴随车辆激励同时有激励车 A 和激励车 B,说明环境运营车流激励比较明显,此时试验车底座 2 号传感器可以很好地识别桥梁前 5 阶频率,试验车顶座的 1 号传感器也能识别出前 2 阶竖向频率。说明如果环境车流激励比较小,对试验车检测可能存在一定程度的干扰效应,但是环境车流激励比较充分时,对于试验车的检测效果是显著增强的。

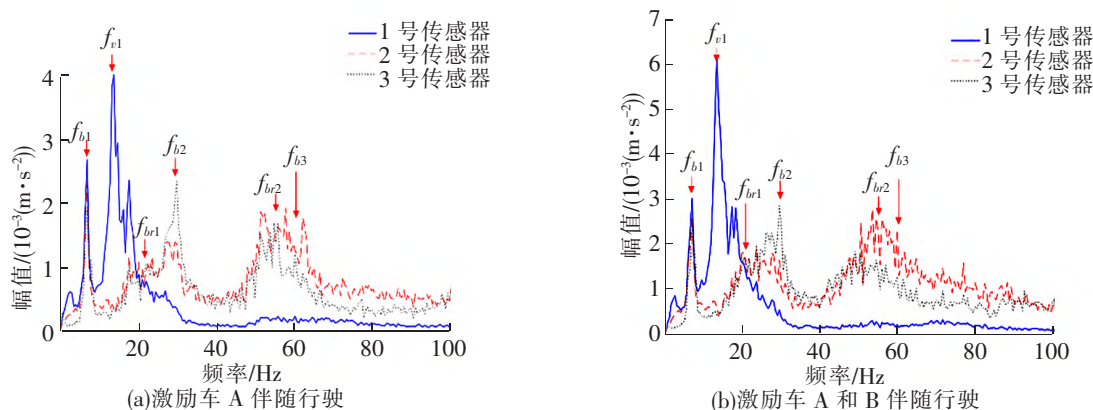


图 8 运营车流激励下试验车过桥振动传感器的频谱分析

## 4 结论与展望

从模型试验角度详细探索了车辆扫描法对于桥梁频率的间接识别效果,并分析了各种影响因素下试验车过桥振动信号识别桥梁频率的可能性。设计了包含刚度较大的聚氨酯试验车轮胎和立柱弹簧系统的双层试验车。过桥振动信号分析表明,试验车底座频率远高于关注桥频范围,因此可以很好地识别桥梁频率,试验车顶座受到悬架弹簧刚度影响,对桥梁频率识别效果显著降低。在悬架刚度、车身质量、路面粗糙度和运营车流激励等因素影响下,试验车底座仍然能够识别桥梁至少 3 阶频率,试验车顶座至少能够识别桥梁基础频率,悬架刚度和车身质量不影响试验车底座间接测试效果,但是显著影响试验车顶座间接识别效果。路面粗糙度对整体测试效果都有负面影响,运营车流激励显著情况下,可以极大提升间接识别效果。模型试验效果可以为实桥试验车设计提供参考方向,例如设计刚度较大的轮胎并将传感器布设在车轴位置,通过顶座和底座双层设计可以利用底座进行间接测量,利用顶座保障试验车的运行及其与路面接触。

## 参 考 文 献

- [1] LIN C W, YANG Y B. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies; An experimental verification [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(13): 1865-1878.
- [2] 杨永斌, 王志鲁, 史康, 等. 基于车辆响应的桥梁间接测量与监测研究综述[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(10): 1-12.
- [3] SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Estimating bridge fundamental frequency from vibration response of instrumented passing vehicle; Analytical and experimental study[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(3): 417-433.
- [4] MIYAMOTO A, YABE A. Development of practical health monitoring system for short-and medium-span bridges based on vibration responses of city bus[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2012, 2: 47-63.
- [5] YANG Y B, CHEN W F, YU H W, et al. Experimental study of a hand-drawn cart for measuring the bridge frequencies[J]. *Engineering Structures*, 2013, 57: 222-231.
- [6] SHIRZAD-GHALEROUDKHANI N, MEI Q, GUL M. Frequency identification of bridges using smartphones on vehicles with variable features[J/OL]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(7): 04020041 [2023-11-14]. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001565](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001565).
- [7] LI J T, ZHU X Q, LAW S S, et al. Drive-by blind modal identification with singular spectrum analysis[J/OL]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(4): 04019050 [2023-11-14]. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001030).
- [8] CANTERO D, MCGETRICK P, KIM C W, et al. Experimental monitoring of bridge frequency evolution during the passage of vehicles with different suspension properties[J]. *Engineering Structures*, 2019, 187: 209-219.
- [9] YANG Y B, XU H, ZHANG B, et al. Measuring bridge frequencies by a test vehicle in non-moving and moving states [J/OL]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 109859 [2023-11-14]. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109859>.
- [10] 阳洋, 梁晋秋, 袁爱鹏, 等. 基于桥梁单元刚度损伤识别的新型间接量测方法研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 188-198.
- [11] ZHOU J, LU Z, ZHOU Z, et al. Extraction of bridge mode shapes from the response of a two-axle passing vehicle using a two-peak spectrum idealized filter approach[J/OL]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 190: 110122 [2023-11-14]. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110122>.
- [12] 胡章亮, 魏标, 蒋丽忠, 等. 高速铁路梁桥建模参数敏感性分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(2): 393-404.
- [13] 魏标, 刘义伟, 蒋丽忠, 等. 地震作用下双曲面球型减隔震支座在铁路简支梁桥中的动力行为[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(6): 110-118.

## Study on Laboratory Tests of Indirect Bridge Frequencies Identification Based on Vibration Responses of a Passing Vehicle

WU Xiaosheng<sup>1</sup>, LIN Zikang<sup>2</sup>, CHENG Jianting<sup>1</sup>, WANG Shenning<sup>1</sup>, ZHOU Junyong<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Cheng'an Testing Co. Ltd. of Highway & Bridge, Guangzhou 510420, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** To demonstrate the ability of utilizing vehicle vibration signals to identify multiple bridge frequencies, a scaled vehicle-bridge interaction (VBI) laboratory test was constructed to scan bridge frequencies using a two-axle test vehicle under the impact of various factors. Firstly, descriptions were presented for the model beam and test vehicle in the scaled VBI lab test. Then, vibration signals acquired from sensors mounted on the model beam, bottom steel plate of the test vehicle, and the top steel plate of the test vehicle were compared to check their effectiveness in identifying bridge frequencies. Finally, the impact of suspension stiffness, vehicle mass, road surface roughness, and traffic-induced excitation on the indirect identification of bridge frequencies was investigated. The results show that the vibration sensor on the bottom plate of the test vehicle successfully identifies the first three vertical frequencies and the first two torsional frequencies of the bridge, which closely matched the spectrum obtained from a sensor installed on the bridge. This finding indicates that the vibration of the bottom plate of the test vehicle is not significantly affected by the vehicle suspension and additional mass. However, the vibration sensor on the top plate of the test vehicle could accurately identify the first vertical vibration frequency of the bridge but could struggle to identify higher-order bridge frequencies due to interference from the vehicle frequency itself. Various factors primarily influenced the identification performance of bridge frequencies by the sensor on the top plate of the test vehicle, while their impact on the sensor on the bottom plate of the test vehicle was minimal, thus verifying the superiority of the designed test vehicle for indirectly scanning bridge frequencies.

**Key words:** bridge engineering; indirect measurement; frequency; two-axle vehicle; laboratory test; fast Fourier transform

(上接第 15 页)

## Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics of a Rectangular-section Bridge Pylon with Corner Cuts and Slots

HAN Xiao<sup>1</sup>, GAO Chuang<sup>2</sup>, ZHENG Yitong<sup>1</sup>, LIU Xiaobing<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Zhengzhou Municipal Group Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;

3. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Based on the wind tunnel test method using a rigid model for measuring pressure, the change rule of aerodynamic characteristics of a rectangular cross-section bridge pylon with different corner cutting and slotting rates with the wind angle was investigated. The findings indicate that a rectangular cross-section bridge pylon with cut corners and slots displays varying aerodynamic characteristics depending on the wind angle, exhibiting two critical wind angles, namely  $\alpha_{cr1}$  and  $\alpha_{cr2}$ . Additionally, it was observed that the aerodynamic characteristics experience sudden changes when the wind angle approaches the critical values. When the wind angle increases within the range of  $0^\circ$  to  $\alpha_{cr1}$  and  $\alpha_{cr2}$  to  $90^\circ$ , there is a decrease followed by an increase in both the mean drag coefficient and the fluctuating lift coefficient, while the Strouhal number shows an increase followed by a decrease. When the wind angle is between  $\alpha_{cr1}$  and  $\alpha_{cr2}$ , there is little variation in the mean drag coefficient and fluctuating lift coefficient, and the Strouhal number disappears. The range between the two critical wind angles diminishes with rising corner-cutting rates, while it ascends with growing slotting rates. At the same wind angle, there is minimal influence on aerodynamic characteristics based on the slotting rate. As the corner-cutting rate increases, the mean drag coefficient decreases, the Strouhal number increases, and the fluctuating lift coefficient varies less.

**Key words:** bridge tower; corner cut; slot; wind tunnel test; aerodynamic characteristics