

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.020

车桥耦合振动的车轮多点接触模型与试验验证

龙金喜¹, 朱尚清¹, 荚瑞馨¹, 董方^{1,2}, 蔡刚³

(1. 北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124; 2. 深圳市城市公共安全技术有限公司, 广东 深圳 518046; 3. 重庆桥安物联科技有限公司, 重庆 401120)

摘要:针对现有车桥耦合数值模拟方法精度不足和计算效率偏低的问题,文章以某简支 T 梁桥为研究对象,提出一种考虑实际路面不平整度的车桥耦合数值模拟方法,通过 ABAQUS 建立多点接触模型,基于毫米波雷达测试数据验证模型的准确性;分析了在实测桥面不平整度以及规范中 4 种等级的桥面不平整度条件下,多点接触模型与传统单点接触模型的接触作用效应,并利用某简支空心板桥的测试结果验证了所述模型的有效性 with 通用性。结果表明:毫米波雷达不仅具有非接触式测量的便利性,而且能够实现高精度的动态测试;多点接触模型比单点接触模型能更精确地预测车辆与桥梁的相互作用,随着桥面不平整度的变差,多点接触模型的计算精度更显著,在 D 级路面下 2 种模型的最大动挠度误差可达 9.59%。某简支空心板桥的测试结果验证了多点接触模型的适应性,证明了多点接触模型较高的精度和可行性。

关键词:车桥耦合;车轮接触模型;试验验证;毫米波雷达;桥面不平整度

中图分类号:U466.1;U461

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)04-0555-08

Multi-point wheel contact model and test verification of vehicle-bridge coupling vibration

LONG Jinxi¹, ZHU Shangqing¹, JIA Ruixin¹, DONG Fang^{1,2}, CAI Gang³

(1. National Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Shenzhen Urban Public Safety Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518046, China; 3. Chongqing Qiaoan IoT Technology Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: To address the inaccuracies and inefficiencies in current vehicle-bridge coupling simulation methods, this study focuses on a simply-supported T-beam bridge and introduces a numerical simulation approach that considers real pavement roughness. A multi-point contact model is developed by utilizing ABAQUS and its accuracy is validated through comparison with millimeter-wave radar data. The impact of contact of the multi-point and traditional single-point contact models is investigated using the measured deck roughness and four levels of deck roughness in the code. Testing on a simply-supported hollow slab bridge confirms the effectiveness and applicability of the multi-point contact model. The findings demonstrate that millimeter-wave radar enables precise and convenient non-contact measurements and that the multi-point contact model outperforms the single-point model in predicting vehicle-bridge interaction. Particularly, the multi-point model shows enhanced accuracy in the presence of severe deck roughness, with a maximum dynamic deflection error of 9.59% lower than that of the single-point model under class D pavement conditions. The results from the hollow slab bridge test support the feasibility and utility of the multi-point contact model in accurately modeling vehicle-bridge dynamics.

Key words: vehicle-bridge coupling; wheel contact model; experimental verification; millimeter-wave radar; bridge deck roughness

收稿日期:2024-04-15; **修回日期:**2024-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908012); 深圳市科技计划资助项目(ZDSYS20210929115800001)

作者简介:龙金喜(1998—),男,广西梧州人,北京工业大学硕士生;

朱尚清(1976—),男,安徽宿州人,北京工业大学教授级高工,通信作者,E-mail:szhu_BMBMMG@163.com.

在车辆与桥梁相互作用的研究领域中,随着科技的不断进步,先进的检测手段^[1]和精确的数值模拟方法^[2]日益受到重视。因此,众多研究者正致力于采用先进的检测和更为精确的数值模拟,以提升桥梁评估的可靠性和有效性。

目前桥梁检测的主要手段涵盖了光学类设备、激光挠度仪、桥梁图像式挠度仪及全球定位系统(global positioning system, GPS)技术等。这些传统的接触式测量方法尽管在技术层面已经相当成熟,但在实际应用中,面临着测试过程复杂、成本高昂及工作效率低下等问题。毫米波雷达在桥梁微小振动测试方面相较于传统动挠度检测方法展现出了显著的优势。通过运用雷达信号调制技术和雷达干涉测量等关键技术,毫米波雷达能够在其波束角范围内实现对桥梁结构多个目标的动态精确测试。文献[3]利用毫米波雷达对地基变形和斜拉索振动进行精确测量,验证其在实际应用中的有效性;文献[4]将雷达与干涉测量相结合,对武汉阳逻大桥的动挠度进行检测,并与传统的 GPS 测量结果进行对比,结果表明,毫米波雷达测量方法相较于 GPS 测量能够更准确地捕捉桥梁的动挠度变化;文献[5]通过毫米波雷达对铁路简支梁桥的挠度进行测试,并观察不同车速通过时的挠度变化,实验结果表明,毫米波雷达作为一种新型的桥梁检测手段,具有精度高和检测快等优点。

与此同时,精确的数值模拟方法提供了一种预测和分析车辆与桥梁相互作用的新思路,然而在车辆模型的开发中,单点接触模型的准确性受到一些研究者的质疑。文献[6]发现在桥面不平整度恶劣的条件下,单点接触模型高估了桥梁的动态响应;文献[7]得出单点接触模型在模拟桥梁动力响应时,往往会产生不符合实际的高频响应。为考虑桥面与车轮的接触作用效应,众多研究者提出 3 种车辆模型,分别为圆盘模型^[6-7]、气囊模型^[8]和多点接触模型^[9-10]。文献[6-7]分别提出圆盘模型,通过将单点接触模型与圆盘模型对比,发现桥面不平整度越差,圆盘模型比单点接触模型能更精确地模拟车辆与桥梁的相互作用。相比于圆盘模型,文献[8]建立气囊模型并与实测结果对比,结果表明,模型计算数据与实测数据较为匹配,但难以考虑桥面不平整度和建模难度大。为解决上述问题,文献[9]提出多点接触模型,分析多点接触模型和桥梁铺装层厚度对车辆与桥梁相互作用的影响,结果表明,多点接触模型比单点接

触模型更精确地预测了车辆与桥梁的相互作用,并且可以提高计算效率。虽然多点接触模型在理论上相较于单点接触模型和圆盘模型展现出更高的精度和计算效率^[10],但是缺乏先进的检测方法验证。

针对以上研究现状,本文以某简支 T 梁桥为研究对象,通过毫米波雷达对实桥的振动响应进行测试,并利用有限元软件分析在实测桥面不平整度和规范 4 种等级桥面不平整度下,单点接触模型和多点接触模型与桥面的接触作用效应。最后通过毫米波雷达对某简支空心板桥进行振动响应测试,验证了多点接触模型计算结果与毫米波雷达测试结果有很好的 consistency。

1 毫米波雷达测试原理

近年来,雷达技术在桥梁挠度测量、损伤检测及变形监测中广泛应用。地基微波雷达采用线性调频连续波雷达(linear frequency modulated continuous wave, LFM CW)技术,结合相位干涉和位移投影实现精准测量,具有低截获概率、强抗干扰能力,实现多目标精准识别和远距离测量。毫米波雷达测试原理如图 1 所示。LFMCW 雷达发射线性锯齿扫频信号,其表达式^[11]为:

$$S(t) = \cos \left| 2\pi \left(f_0 - \frac{B}{2} \right) (t - t_d) + \frac{2\pi B(t - t_d)^2}{2} + \varphi_R \right| \quad (1)$$

其中: f_0 为发射信号的中心频率; B 为信号带宽; t 为周期; φ_R 为反射信号的相位。

根据式(1),可以观察到频率与目标距离 r 成正比,表现为单频信号。在频谱分析中,这一特定频点处会出现峰值 $f = 4Br/(ct)$ 。通过确定这一峰值频点,可以计算出目标距离。因此,利用这一原理可准确地求得目标距离为:

$$r = fct/(4B) \quad (2)$$

图 1b 展示了毫米波雷达相位干涉测量技术,其通过测量物体表面反射信号间的相位差异 $\Delta\varphi$,实现高精度动态位移测量。毫米波发射方向上的位移 d_r 计算公式^[12]为:

$$d_r = (\lambda/4\pi)\Delta\varphi \quad (3)$$

图 1c 为位移投影技术,结合雷达测得的距离变化量 d_r 和仰角 α ,可通过几何计算得出垂向 d_\perp 和水平 d 位移,全面掌握被测物体位移情况。

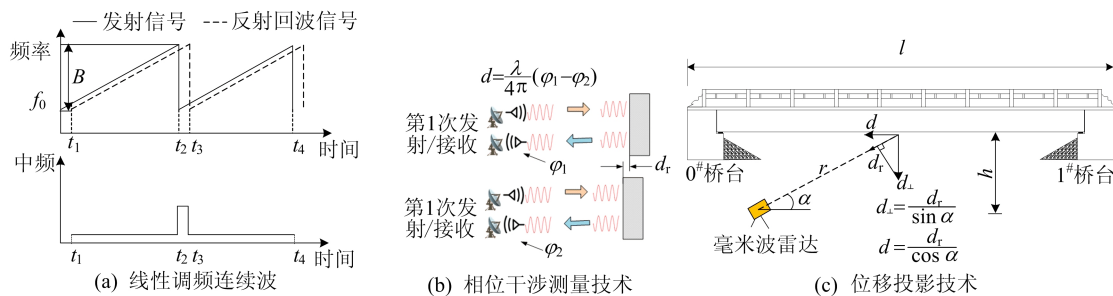


图 1 毫米波雷达测试原理

2 有限元模型

2.1 简支桥梁模型

2.1.1 工程概况

某简支 T 梁桥结构示意图如图 2 所示。该桥位于延庆区沈家营镇曹杨路,桥梁上部结构是由一跨预应力钢筋混凝土简支 T 梁组成,下部结构是埋置式桥台。桥梁总长为 29.0 m,跨度组合为 1×25.0 m,全宽为 9.8 m,车道宽度为 7.0 m,桥下净空为 2.3 m。

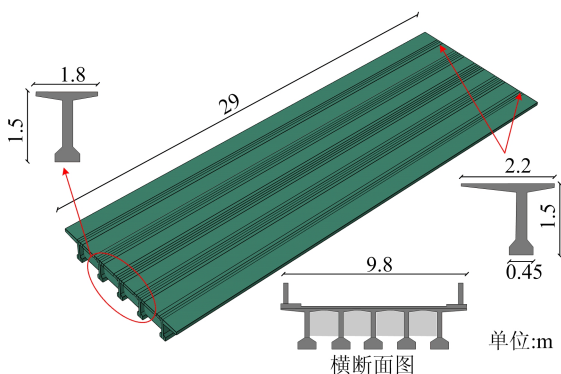


图 2 简支 T 梁桥结构示意图

2.1.2 简支桥梁模型建立

基于 ABAQUS 构建桥梁结构的有限元数值模型。主梁及桥面板采用八节点线性缩减积分实体单元(C3D8R)进行离散化处理,并假定主梁与桥面板之间为刚性连接,忽略界面相对滑移效应。为确保连接区域的力学传递性能,采用 Tie 约束方法实现主梁与桥面板之间的位移协调。

在边界条件设置方面,桥梁一端施加固定铰支座,限制其竖向、横向及纵向位移自由度;另一端设置活动铰支座,仅约束竖向与横向位移。通过模态分析获取桥梁结构的动力特性参数,计算结果表明其一阶竖弯振型频率为 5.33 Hz。与现场实测数据(5.42 Hz)对比,相对误差为 1.66%,满足工程精度要求。该结果证实了所建立有限元

模型能够有效反映实际桥梁结构的力学行为,验证了模型的合理性和可靠性。

2.2 车辆模型

2.2.1 车辆模型概述

本文采用整车重力为 340 kN 的质量-弹簧-阻尼车辆模型进行模拟^[13],考虑车体在垂向位移、侧倾转动及俯仰转动 3 个自由度运动特性。车辆模型通过离散刚体单元与弹簧-阻尼系统耦合的空间简化方法构建,将车辆抽象为多自由度体系。

2.2.2 单点接触模型

传统车桥耦合模型采用单点接触力模拟车轮与桥梁的相互作用,难以准确反映荷载通过接触面积均匀传递的力学行为。单点接触模型通过单个接触力点模拟车轮与桥面的接触效应,计算效率较高,但在桥面不平整度恶劣条件下,易高估桥梁的动态响应。单点接触力车轮模型如图 3 所示。

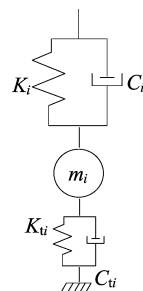


图 3 单点接触力车轮模型

2.2.3 多点接触模型

为更精确地模拟实际接触效应,本研究提出一种基于多点接触力的改进模型。根据 JTG D60—2015 规范,单个车轮与桥面的接触面(纵桥向尺寸×横桥向尺寸)大小为 20 cm×30 cm 的矩形区域。基于此,采用多个弹簧阻尼系统构建多点接触力车轮模型,通过离散刚体面模拟车轮,赋予其与实际车轮相同的质量属性。离散刚体面仅具有平动自由度而无转动自由度,从而实现车轮接触力均匀传递至桥面。

每个车轮配置 12 个等间距接触力作用点,按 10 cm 间隔分布,以反映轮胎接地压力的空间分布特征。多点接触模型如图 4 所示。为实现传统单点接触模型与分布式接触模型的力学等效性,采用通用接触算法消除车轮与桥面的穿透现象。法向设置为硬接触,切向采用摩擦系数 0.6 的罚函数法,确保接触力学行为的准确模拟与计算稳定性。

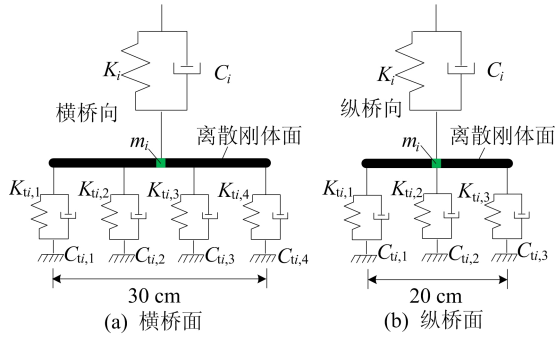


图 4 多点接触力车轮模型

2.2.4 车辆模型参数化定义

车辆模型的具体参数^[14]见表 1 所列。

表 1 车辆模型参数

参数	符号	数值
车身质量/kg	M_v	31 542
俯仰转动惯量/(kg·m ²)	I_{hb}	57 068
侧倾转动惯量/(kg·m ²)	I_r	7 119
前轴悬架质量/kg	m_1, m_2	297
中/后轴悬架质量/kg	$m_3 \sim m_6$	466
前轴悬架阻尼系数/(N·s/m)	C_1, C_2	2 730
中/后轴悬架阻尼系数/(N·s/m)	$C_3 \sim C_6$	3 800
前轴悬架刚度/(N/m)	K_1/K_2	630 000
中/后轴悬架刚度/(N/m)	$K_3 \sim K_6$	790 000
车轮阻尼系数/(N·s/m)	$C_{ti,1} \sim C_{ti,12}$	167
车轮刚度/(N/m)	$K_{ti,1} \sim K_{ti,12}$	233 333
前轴至车体行心距离/m	a	3.4
中轴至车体行心距离/m	b	0.2
后轴至车体行心距离/m	c	1.2
左右车轮间距/m	B	1.8

2.3 桥面不平度模型

2.3.1 桥面不平度数值模拟方法

车辆在行驶过程中受到的主要激励源自桥面的不平度。不平桥面会导致车辆振动增加,影响车辆稳定性。现有研究使用三角级数方法将桥面的不平度建模为拥有各种历程态的平滑高斯随机过程^[15]。考虑左右车轮的桥面不平度存在差异,通过函数 $r(n)$ 分析左右车轮相位角的桥面横向相关性,模拟车轮与桥面相互作用^[16],得到桥面不平度函数 $r_L(x)$ 和 $r_R(x)$ 为:

$$\theta_L = \theta_R + \text{sgn} \theta_1 \arccos(e^{-pB}), n \in (n_h, n_l)$$

$$r_L(x) = \sum_{n=1}^N \sqrt{A(n_k)} \cos(2\pi nx + \theta_L),$$

$$r_R(x) = \sum_{n=1}^N \sqrt{A(n_k)} \cos(2\pi nx + \theta_R) \quad (5)$$

其中: B 为车轮轮距; p 为经验值,一般为 1; θ_1 为在 L 的随机数; θ_L, θ_R 为在 $[0, 2\pi]$ 内服从均匀分布的随机数; x 为纵桥向上某不平整点纵坐标(小于或等于桥长); $r(x)$ 为桥面不平度值; $A(n_k) = 4G_d(n_k)\Delta n, G_d(n_k)$ 为路面功率普密度函数, $n_k = n_1 + (k - 1/2)\Delta n, k = 1, 2, \dots, N$ 为空间频率, $\Delta n = (n_h - n_l)/N, n_h, n_l$ 为空间频率的上、下限。根据 GB/T 7031—2005 规定,把桥面按不平度分为 A~H 级。中国目前的道路状况显示绝大多数桥面不平度处于 A~D 这 4 个等级,因此需要建立相应的桥面不平度模型,如图 5 所示。

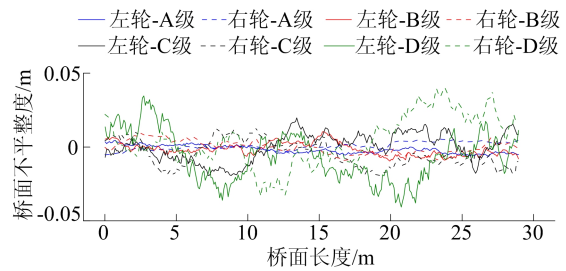


图 5 桥面不平度模型

2.3.2 桥面不平度有限元实现方法

通过脚本提取桥面铺装层节点坐标,同时利用 MATLAB 生成不同等级的路面谱数据并替换至桥面节点,构建不同粗糙度等级的桥面模型。最后,将更新后的模型导入 ABAQUS 进行动力学分析^[17]。为提高计算效率,基于车辆直线行驶假设,仅对轮胎接触带区域(宽度与轮胎接地宽度一致)的桥面节点纵坐标进行修正,桥面不平度有限元模型如图 6 所示。

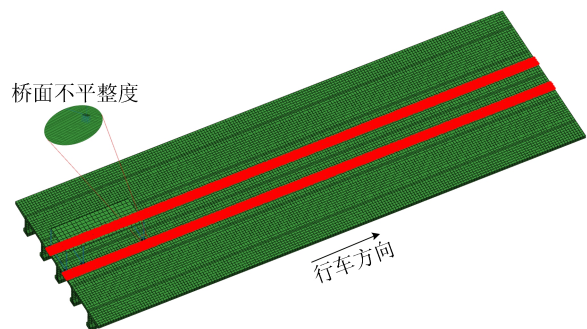


图 6 桥面不平度有限元模型

3 实测试验与有限元对比验证

3.1 桥梁动挠度试验方案

通过课题组自研的毫米波雷达测试系统对该桥进行动挠度测量,该系统由毫米波雷达、无线模块、数据线、无线路由和采集终端组成。毫米波雷达在测试时,通过三脚架安放在主梁正下方的地面,将雷达发射、接收天线对准主梁底面,主梁不需要安装角反射器,利用电磁波的直达波来确定测点的位置。

挠度测试是为了测量桥梁在最不利位置即不同梁跨中位置的挠度,在断面上设置3个挠度测点,测点布置示意图如图7所示。为改善一维向距离分辨率的影响,可以尝试通过改变雷达位置并获取角度向分辨率来识别不同径向距离点位的变形情况。在调平后安装好的毫米波雷达可以通过控制采集终端进行现场组网调试,待系统调试完成后即可进行多点动挠度的同步测试。由于动挠度时程曲线需要动态采集(采样频率不应低于结构基频的2.56倍),毫米波雷达采样频率可以达到50 Hz,能满足动挠度测试的要求,测量精度可达0.01 mm。

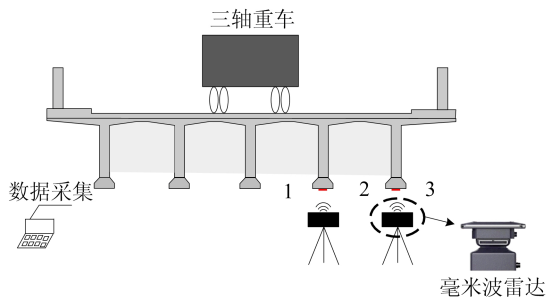


图7 测点布置图

3.2 实测桥面不平整度和功率谱估算

桥面不平整度是引起车桥耦合振动的主要原因之一。为定量评价桥面粗糙度对车桥系统动力响应的影响,需要对实测桥面不平整度进行功率谱估计和分类。本试验采用精密水准仪测试桥面不平整度,采样间隔为15 cm,获得沿着车轮轨迹的纵向二维桥面不平整度曲线。车辆在桥面上实际行进路线的左右两轮桥面不平整度曲线如图8所示。

从图8可以看出,左右两轮实测的桥面不平整度值大小位于 $-6.74 \sim 7.64$ mm的区间。根据傅里叶变换,将实际左轮的桥面不平整度实测曲线计算得到实测桥面不平整度的功率谱,并把

反算的功率谱曲线与GB/T 7031—2005中的A级路面目标功率谱和B级路面目标功率谱进行对比,结果如图9所示。

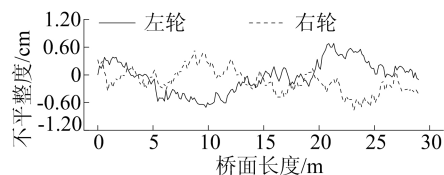


图8 车辆在桥面实际行进过程中两轮桥面不平整度

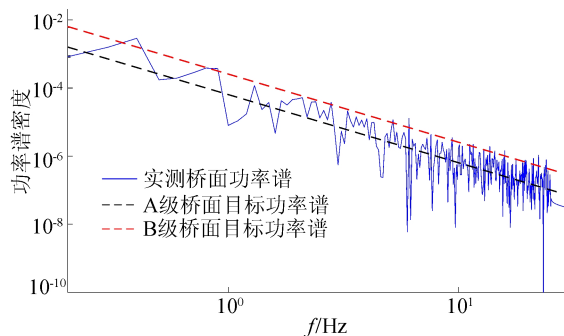


图9 功率谱曲线

从图9可以看出,实测桥面不平整度的功率谱曲线随频率变化的峰值位于A级路面目标功率谱与B级路面目标功率谱之间,可以判断实际桥面等级为B级。

3.3 有限元结果与试验结果对比

根据实桥试验数据分别建立考虑实测桥面不平整度的单点接触车桥耦合模型和多点接触车桥耦合模型,采用与试验车相同重力的340 kN三维空间重车模型,分别模拟20、30 km/h车速的匀速动载试验,同时计算中梁、次边梁、边梁跨中截面(控制截面1、控制截面2和控制截面3)的动挠度位移曲线,并与毫米波雷达测试结果进行对比,结果见表2所列。从表2可以看出,控制截面的挠度最大1,控制截面次之2,控制截面的挠度最小3。该差异反映了桥梁结构在承受荷载时的受力特点,即控制截面1为桥梁最不利截面。其次2种有限元模拟方法计算的不同测点的动挠度峰值与实测峰值接近,且校验系数均大于0.90,这表明有限元计算结果较准确,且与实际情况相符。此外,单点接触模型的计算结果均大于多点接触模型,两者的计算差异不超过5%。

控制截面的动挠度-位移曲线如图10所示。从图10可以看出,采用2种不同有限元模型模拟所得到截面动挠度的变化趋势与实测动挠度曲线高度一致。

表 2 不同控制截面实测结果与有限元结果对比

车速/ (km/h)	控制 截面	实测最大 动挠度/mm	单点接触最大 动挠度/mm	单点接触 校验系数	多点接触最大 动挠度/mm	多点接触 校验系数	系数误差/ %
20	1	3.928	4.171	0.942	4.085	0.962	2.1
	2	3.373	3.768	0.922	3.674	0.945	2.6
	3	2.120	2.327	0.911	2.289	0.926	1.7
30	1	3.473	3.730	0.931	3.651	0.951	2.2
	2	2.974	3.272	0.909	3.225	0.922	1.5
	3	1.959	2.123	0.923	2.059	0.951	3.1

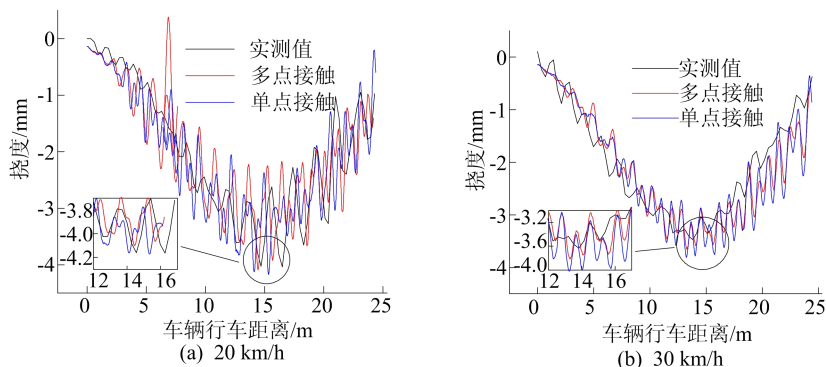


图 10 动挠度-位移曲线

此外,无论是单点接触模型还是多点接触模型,其计算结果均与毫米波雷达测试的结果相接近。但多点接触模型的计算结果总的来说多点接触模型模拟效果与实际更吻合。两者误差对比结果如图 11 所示。

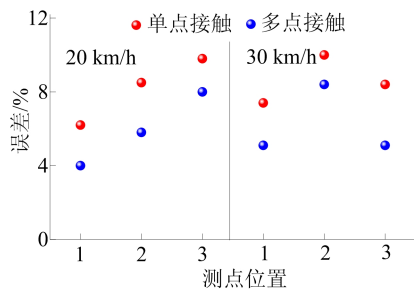


图 11 单点、多点接触模型的误差对比

3.4 桥面不平整度对车轮接触响应影响

相较于单点接触模型,多点接触模型考虑了更复杂的接触作用效应,能更精确地模拟车辆对桥梁的动力响应,为桥梁性能评估提供可靠依据。为了研究多点接触模型与单点接触模型在不同等级的桥面不平整度下对桥梁振动响应差别,考虑 A~D 这 4 种等级的桥面不平整度影响,在每一种桥面不平整度影响下,讨论 20、30 km/h 的车速对桥最不利控制截面 1 的桥梁振动响应,结果如图 12 所示。

从图 12 可以看出,多点接触模型的桥梁最大动挠度相较于单点接触模型会略小,且这种差异

在不同桥面不平整度下均存在。

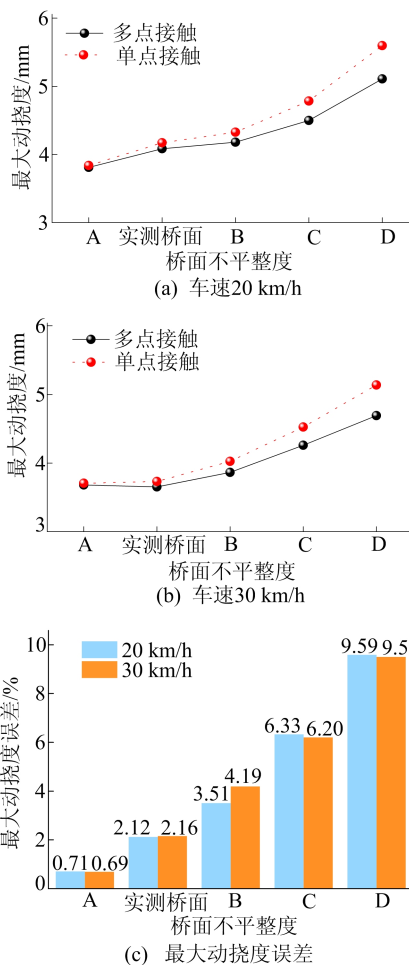


图 12 单点接触与多点接触最大动挠度对比

对于 A~D 级桥面和实测桥面,20 km/h 车速的多点接触模型最大动挠度分别比单点接触模型低 0.71%、3.51%、6.33%、9.59%、2.12%,这主要是由于多点接触模型根据轮胎实际接触长度分解车轮接触力,削弱了车辆对桥梁的接触作用效应,尤其在桥面不平整度较差时,其优势更为明显。此外在不同车速下,对于相同的桥面不平整度,单点接触模型与多点接触模型的差异不显著,表明桥面不平整度是影响这 2 种模拟方法精度的主要因素。

4 多点接触模型通用性分析

4.1 工程概况

某预应力混凝土简支空心板桥的跨径组合为 3×13.0 m,桥梁长 44.0 m,宽 6.2 m,单向行车道宽 5.2 m,上部结构采用 C40 混凝土,桥梁抗弯刚度为 $1.04 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。第 3 跨测点布置如图 13 所示,现场照片如图 14 所示。通过毫米波雷达测试桥梁第 3 跨的四片空心板梁跨中挠度时程曲线。

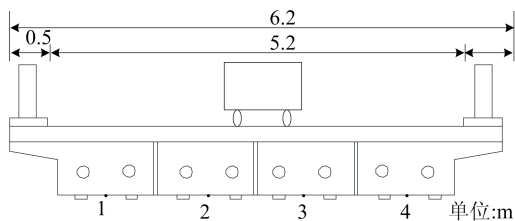


图 13 测点布置图



图 14 现场加载照片

4.2 多点接触模型有限元结果与试验结果对比

采用与试验车重力匹配的 340 kN 三维空间重车模型,进行 20、30 km/h 恒定车速下的动态载荷试验模拟。在此过程中,重点分析桥梁第 3 跨的四片空心板梁跨中(控制截面 1~4) 动态挠度特性。

为了验证有限元的精确性和可靠性,利用毫米波雷达的测试数据进行对比,结果见表 3 所列。从表 3 可以看出,由于桥梁具备较高的横向刚度,其 4 个测点的最大动挠度表现出极高的相似。针对不同车速工况下,单点接触模型与多点接触模型在计算结果上存在一定差异,误差均控制在 5% 以内,表明尽管 2 种模型在细节处理上有所不同,但总体上都能够较好地反映桥梁的动态响应特性。

表 3 第 3 跨不同测点实测结果与有限元对比

车速/ (km/h)	测点	实测最大 动挠度/mm	单点接触模型		多点接触模型		系数误差/ %
			动挠度/mm	校验系数	动挠度/mm	校验系数	
20	1	1.015	1.068	0.950	1.031	0.984	3.6
	2	1.011	1.080	0.936	1.037	0.975	4.1
	3	0.983	1.072	0.917	1.031	0.953	4.0
	4	0.962	1.066	0.902	1.028	0.936	3.7
30	1	0.983	1.033	0.952	0.997	0.986	3.6
	2	0.980	1.041	0.941	1.000	0.980	4.1
	3	0.999	1.055	0.947	1.015	0.984	3.9
	4	0.942	1.028	0.916	0.991	0.951	3.7

4.3 多点接触模型可行性分析

简支 T 梁桥与简支空心板桥在不同车速下单点接触模型与多点接触模型计算结果的误差见表 4 所列。由表 4 可知:① 简支 T 梁桥的单点接触模型与多点接触模型计算结果误差平均值为 2.2%,且简支空心板桥的误差平均值为 3.8%,

结果表明,多点接触模型在模拟桥梁的动态响应方面展现出更高的准确性;② 简支空心板桥的单点接触模型与多点接触模型计算结果误差大于简支 T 梁桥的计算结果误差,这与桥梁的抗弯刚度有关,抗弯刚度更小的简支空心板桥的单点接触模型与多点接触模型计算结果误差更大。这验证

了多点接触模型在桥梁动力学分析中的有效性和优越性,为后续的桥梁设计和优化提供了更为可靠的理论依据。

表 4 单点接触模型与多点接触模型最大动挠度误差 %

车速/(km/h)	测点	简支 T 梁桥	简支空心板桥
20	1	2.1	3.6
	2	2.6	4.1
	3	1.7	4.0
	4		3.7
30	1	2.2	3.6
	2	1.5	4.1
	3	3.1	3.9
	4		3.7

5 结 论

本文以某简支 T 梁桥为研究对象,提出一种新型车桥耦合数值模拟方法,该方法充分考虑了实际路面不平整度的影响。通过运用 ABAQUS 软件建立多点接触模型,结合毫米波雷达测试数据对模型进行验证,并通过某简支空心板桥进一步验证多点接触模型的精度和可行性。得出以下主要结论:

1) 本文采用实际接触面积的多点接触车轮模型,并建立与轮胎宽度一致的桥面不平整度模型,以更真实地模拟车桥相互作用,所得的校验系数均在 0.92 以上。

2) 基于实测桥面不平整度的功率谱估计方法可以定量分析实测桥面粗糙度对桥梁动力响应的影响,具有较高的精度。

3) 利用有限元模拟与毫米波雷达相结合,能够精确且可靠地检测桥梁的动态挠度数据,该方法可为桥梁结构的安全评估提供有力支持。

4) 本文通过对比分析 2 座桥梁的单个与多点接触模型发现,多点接触模型比单点接触模型可更加准确地模拟车辆与桥梁的耦合作用。随着桥面不平整度的变差,多点接触模型的优势更为显著,在 D 级路面下多点接触模型精度比单点接触模型最大动挠度高 9.59%。

[参 考 文 献]

[1] 刘志平,罗翔,何秀凤.利用毫米波雷达测量系统的高铁车

桥振动检测[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(4):561-568.

[2] 蒋培文,贺拴海,宋一凡,等.重载车辆-简支梁桥耦合振动影响参数分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(2):205-210.

[3] 江剑锋,黄其欢,王一安,等.地基雷达振动变形测量新方法及应用[J].噪声与振动控制,2020,40(2):236-242.

[4] 黄声享,罗力,何超.地面微波干涉雷达与 GPS 测定桥梁挠度的对比试验分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(10):1173-1176.

[5] 贾岩,高卓妍,刘淑一,等.FMCW 毫米波雷达在高铁桥梁动挠度监测的应用[J].现代电子技术,2022,45(15):15-19.

[6] YIN X,CAI C S,FANG Z,et al. Bridge vibration under vehicular loads:tire patch contact versus point contact[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2010,10(3):529-554.

[7] CHANG K C,WU F B,YANG Y B. Disk model for wheels moving over highway bridges with rough surfaces[J]. Journal of Sound and Vibration,2011,330(20):4930-4944.

[8] KWASNIEWSKI L,LI H,WEKEZER J,et al. Finite element analysis of vehicle-bridge interaction[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2006,42(11):950-959.

[9] 张龙威,尹诗定,曹君辉,等.考虑车轮接触面效应的车桥耦合振动分析方法研究[J].中国公路学报,2024,37(11):152-163.

[10] DENG L,WANG W,CAI C S. Effect of pavement maintenance cycle on the fatigue reliability of simply-supported steel I-girder bridges under dynamic vehicle loading[J]. Engineering Structures,2017,133:124-132.

[11] 糜江,王辉.基于调频连续波雷达的桥梁微形变监测系统研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015,11(12):43-46.

[12] 朱志辉,罗思慧,张磊,等.车桥耦合振动的拱桥吊杆应力冲击系数分析[J].振动、测试与诊断,2019,39(6):1169-1176.

[13] 张凡,李雪峰,肖润生.连续梁桥跳车冲击下车桥耦合振动响应分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(2):226-232.

[14] 陈水生,付仇,桂水荣.富山赣江特大桥车桥耦合振动响应及冲击系数研究[J].华东交通大学学报,2018,35(5):27-34.

[15] 段虎明,石峰,张开斌,等.中国典型汽车道路谱研究的构建及应用[J].中国测试,2009,35(4):76-79.

[16] 任宏斌.阻尼连续可调油气悬架及其控制技术[D].北京:北京理工大学,2016.

[17] 蒋冬启,刘善权.一种基于 ABAQUS 平台的考虑路面不平顺的车桥耦合分析方法:CN114201804A[P].2022-03-18.

(责任编辑 吴 亮)