

## 公路简支转连续 T 梁桥车桥耦合振动响应研究

刘 律

武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430023

**[摘要]** 针对某一高速公路三跨简支转连续 T 梁桥, 采用弹簧质量阻尼器模拟整车荷载, 建立了车桥耦合振动模型, 并用板单元和实体单元建立了桥梁有限元模型; 通过现场实测试验、数值模拟和模型试验测试, 分析计算了该桥的模式特征和最不利偏载工况下的动力响应及冲击系数; 将冲击系数的实测值、理论值及模型试验测试值与公路桥涵设计通用规范的计算结果进行了对比分析。研究表明: 冲击系数的实测值、理论值及模型试验值均小于规范计算, 04《桥规》对连续 T 梁桥冲击系数的规定偏保守; 因路面不平顺的随机性, 汽车荷载对桥梁的冲击系数是一个随机统计过程。

**[关键词]** T 梁桥; 车桥耦合; 实测; 冲击系数; 对比分析

DOI: 10.33142/aem.v5i9.9716

中图分类号: U441.3

文献标识码: A

## Research on Vehicle Bridge Coupled Vibration Response of Highway Simply Supported to Continuous T-beam Bridges

LIU Lv

Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430023, China

**Abstract:** For a three span simply supported to continuous T-beam bridges on a certain highway, a spring mass damper was used to simulate the vehicle load, a vehicle bridge coupled vibration model was established, and a bridge finite element model was established using plate and solid elements; Through on-site measurement, numerical simulation, and model testing, the modal characteristics, dynamic response, and impact coefficient of the bridge under the most unfavorable eccentric load conditions were analyzed and calculated; The measured values, theoretical values, and model test values of the impact coefficient were compared and analyzed with the calculation results of the general specifications for highway bridge and culvert design. The research results indicate that the measured values, theoretical values, and model test values of the impact coefficient are all smaller than those calculated by the specifications, and the provisions of the 04 Bridge Regulations on the impact coefficient of continuous T-beam bridges are conservative; Due to the randomness of uneven road surfaces, the impact coefficient of vehicle loads on bridges is a random statistical process.

**Keywords:** T-beam bridges; vehicle axle coupling; actual measurement; impact coefficient; comparative analysis

### 1 车桥耦合振动分析模型

车桥耦合振动分析模型是车辆振动模型、桥梁模型, 并考虑桥面不平顺激励组成的一个时变耦合系统。

#### 1.1 车辆振动模型

根据桥涵检测试验技术要求, 一般采用三轴 300KN 的载重汽车作为试验车辆。本文根据试验所采用车辆, 选取三轴自卸汽车作为研究对象。根据载重汽车结构特性, 车辆模型简化为车体、钢板弹簧悬架支撑系统、车轴和轮胎。车辆模型为 9 自由度振动体系, 其中, 悬架支撑系统由线弹性弹簧和阻尼器来模拟; 轮胎质量集中在车轴上, 其用线性弹簧和阻尼器来模拟; 车身质量集中在车体重心上, 振动模型如图 1 所示。其中,  $k_{s1}, \dots, k_{s6}$  表示前、中、后轴悬架的弹簧刚度,  $k_{t1}, \dots, k_{t6}$  表示前、中、后轴的车轮刚度,  $C_{s1}, \dots, C_{s6}$  表示前、中、后轴悬架的阻尼系数,  $C_{t1}, \dots, C_{t6}$  表示前、中、后轴车轮的阻尼系数;  $m_1, \dots, m_6$  表示前、中、后轴悬架质量,  $m_{hb}$  车辆质量;  $I_{hb}$  车辆俯仰转动惯量,  $I_r$  车辆侧翻转动惯量;  $\theta_b$  俯仰角,  $\phi$  侧倾角;  $Z_b$  车辆竖向位移,  $Z_1, \dots, Z_6$  车辆悬架位移坐标。

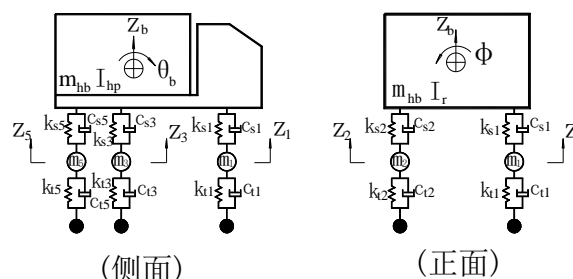


图 1 车辆模型

车辆振动方程, 依据达朗贝尔原理来建立:

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{Z} = \bar{\mathbf{F}}_v^{int} \quad (1)$$

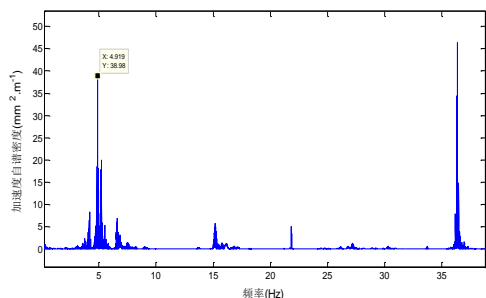
其中:  $\mathbf{Z} = \{z_1 \dots z_6 \ z_b \ \theta_b \ \phi\}^T$  为车辆模型各自由度向量,  $\bar{\mathbf{F}}_v^{int}$  为车辆模型各自由度荷载列向量;  $\mathbf{M}_v$ 、 $\mathbf{C}_v$ 、 $\mathbf{K}_v$  分别为车辆的质量、阻尼和刚度矩阵。

#### 1.2 桥梁模型

对桥梁模型进行有限元分析, 模型节点运动方程为:

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_b \mathbf{U} = -\mathbf{F}_{bv}^{int} - \mathbf{F}_g \quad (2)$$





(b) 1号点加速度自谱密度曲线  
图4 现场试验1号点环境振动响应图

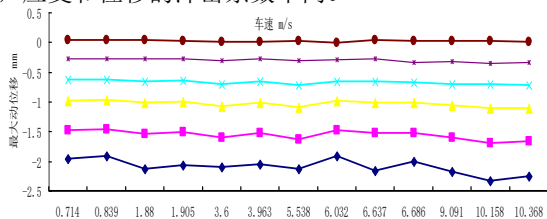
表1 实桥振动特性实测值与理论值对比

阶数	实测自振频率	理论自振频率(Hz)	理论/实测	阻尼比
1	4.919	4.175	0.848	2.126
2	5.218	4.879	0.935	2.311

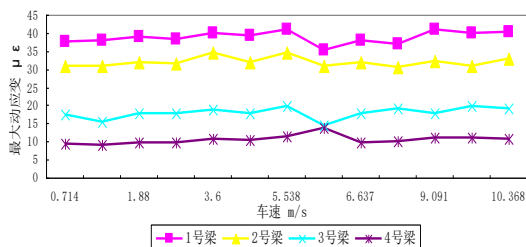
### 2.2.2 实测动力响应

对该连续梁桥进行现场动载试验时,汽车按偏载工况一分别以 0.714 m/s、0.839 m/s、1.88 m/s、1.905 m/s、3.6 m/s、5.538 m/s、6.032 m/s、6.637 m/s、6.686 m/s、9.091 m/s 的速度分上、下行运行,为测试桥梁最大静位移、最大动位移及最大动应变,车辆以尽可能慢的速度行驶,车辆行驶速度依据桥梁的动态挠度曲线计算。

图5为车辆按偏载工况一行驶时,各片梁边跨跨中最大动位移和最大动应变随速度变化曲线;从图中可以看出,1号梁(边梁)跨中最大动位移和最大动应变随速度变化幅值较大,其他各片梁变化幅度相对较小;应变和位移有相同的变化趋势,但是两者变化幅值不同,这导致同一测点,应变和位移的冲击系数不同。



(a) 最大动位移



(b) 最大动应变

图5 各片梁边跨跨中动力响应

### 2.3 数值模拟分析

图6为汽车按偏载工况一行驶时,数值模拟各片梁边

跨跨中最大动位移随速度变化关系曲线。从图6中可以看出,进行数值模拟分析时,各片梁梁底并不具有线性或明显的曲线关系,这说明由汽车荷载引起的冲击系数随车速变化是一个离散的随机过程,对汽车荷载冲击系数需做进一步的统计随机分析。此外,边跨跨中各片梁梁底最大动位移随速度变化幅值较小,但当车辆行驶速度在 6m/s 至 8m/s 时,位移振动响应比其他速度波动幅度更大,此时是车桥耦合由速度引起的一个共振节拍,这一结果与实测一致。

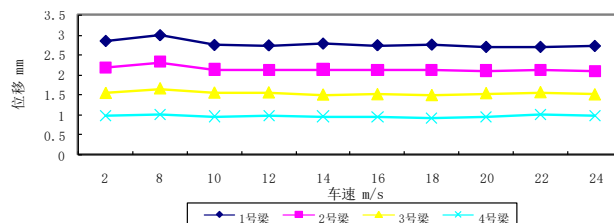
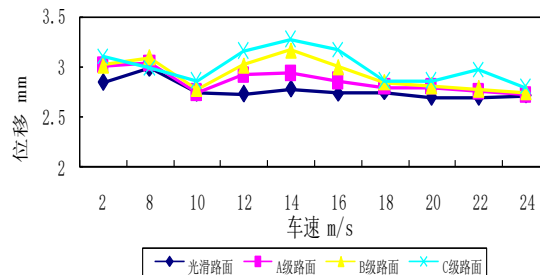
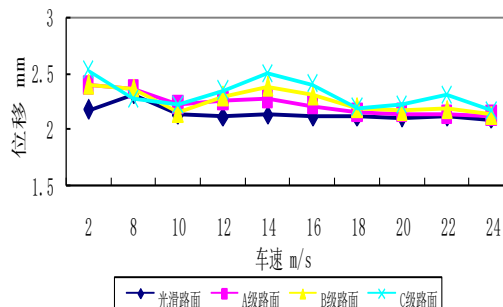


图6 各片梁边跨跨中最大动位移随速度变化关系图

图7为车辆按偏载工况一行驶在光滑路面、A级路面、B级路面、C级路面时,1、2号梁边跨跨中最大动位移随速度变化关系图。从图中可以看出,同一车速作用下,随路面恶化,竖向振动响应随之增加,但2号梁变化幅值较1号梁小,这说明路面不平顺幅值大小决定桥梁振动响应的大小;随路面等级变化,同一片梁最大动位移随速度变化而增加的幅值也没有确定性的变化关系。



(a) 1号梁



(b) 2号梁

图7 边跨跨中最大动位移随路面等级变化图

### 2.4 模型试验分析

根据结构动力模型试验的相似原理,采用文献[11]中车桥耦合振动模型体系,模型桥和模型试验小车满足动

力相似律的要求。模型桥与实桥几何相似比尺为 10，模型试验小车速与实际车速相似比尺为 3.162。试验时模型试验小车按最不利偏载工况下以不同车速通过模型桥，测试模型桥的动力响应。图 8 为最不利偏载工况各片梁模型试验实测冲击系数离散图。

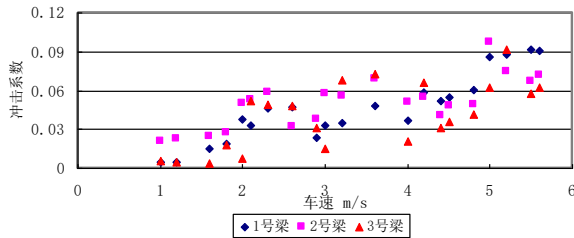


图 8 模型试验偏载测试冲击系数

### 3 冲击系数实测、理论、模型试验及规范计算对比分析

#### 3.1 实测、理论及模型试验冲击系数对比

图 9 为该连续梁桥边跨跨中 1 号梁和 2 号梁实测和理论最大动位移对比图，表 2 为各片梁边跨跨中最大动位移及冲击系数的实测值与理论值对比分析表。从图 9 和表 2 中可以看出，实测最大冲击系数为 0.1803，最小冲击系数接近于 0；理论最大冲击系数 0.1679，最小冲击系数 0.011；实测冲击系数变化幅度范围大于理论值。实测冲击系数总体略大于按 A 级路面模拟的路面不平顺的冲击系数，与 B 级路面不平顺的冲击系数接近，且会出现个别冲击系数突增的现象。

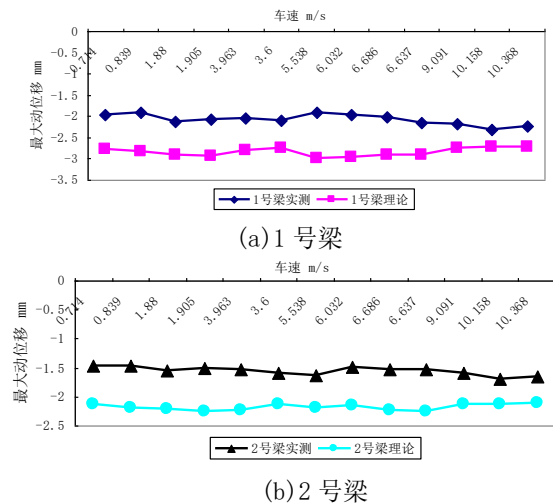


图 9 边跨跨中实测最大动位移与理论值对比

注：MaxDS——边跨跨中最大静态位移，MaxDD——边跨跨中最大动态位移，DAF——冲击系数

由图 8 可知模型试验实测冲击系数最大为 0.097，最小冲击系数接近于 0。模型试验实测冲击系数小于现场实测与数值模拟冲击系数，这主要是因为模型试验的桥面为光滑桥面，而实桥桥面并非完全光滑，数值模拟对应的路

面不平顺为 B 级。

从图 9 可以看出，该简支转连续 T 梁桥现场实测值与理论值的校验系数在 0.75 左右，数值模拟能体现该桥车桥耦合振动响应随速度的变化关系，但并不能完全对应，这是由于道路表面的不平顺是一个非平稳随机高斯过程。

#### 3.2 实测、理论、模型试验冲击系数与规范对比

我国 04《桥规》按照桥梁结构基频来计算其冲击系数，由表 1 可知该桥的实测基频为 4.919 Hz，理论基频为 4.175 Hz。按《桥规》规定，当  $1.5\text{Hz} \leq f \leq 14\text{Hz}$  时， $\mu = 0.1767 \ln f - 0.0157$ ，因此该桥按实测基频计算的冲击系数为 0.266，按理论基频计算的冲击系数为 0.237。

表 3 为最大冲击系数实测值、理论值、模型试验值与规范值的对比，从表中可以看出，数值模拟冲击系数、实测冲击系数与模型试验冲击系数均小于规范计算的冲击系数，说明现行规范对简支转连续 T 梁桥冲击系数的规定偏保守。

表 3 最大冲击系数对比

实测值	理论值	模型试验值	规范值
0.1803	0.1679	0.097	0.266
			0.237

### 4 结论

本文针对某一典型高速公路三跨先简支后连续 T 梁桥，建立桥梁有限元模型，进行现场试验、数值模拟和模型试验动力响应分析，比较了三种方法计算得出的冲击系数，并与公路桥涵设计通用规范的计算结果进行对比分析，可以得出如下结论：

- (1) 路面不平顺是一个非平稳随机高斯过程，其幅值大小决定桥梁振动响应的大小，但并没有确定的关系。
- (2) 实测动位移和动应变有相同的变化趋势，但是两者变化幅值不同，同一测点，应变和位移的冲击系数不同，两者之间的区别有待进一步探究。
- (3) 车桥耦合振动因路面不平顺的随机性，汽车荷载对桥梁的冲击系数是一个随机统计过程。
- (4) 我国 04《桥规》对公路简支转连续 T 梁桥的冲击系数的规定偏保守，通过现场实测和数值模拟来确定冲击系数较为准确。

#### [参考文献]

[1] 袁明, 余钱华, 颜东煌. 基于车-桥系统耦合振动理论的大跨 PC 连续刚构桥冲击系数研究 [J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 72-76.  
[2] 桂水荣, 陈水生. 多片梁组成的简支梁桥车桥耦合振动响应研究 [J]. 中外公路, 2008, 28(4): 173-177.  
[3] 吴铭汉, 桂水荣, 陈水生. 四种车辆模型作用下 T 型刚构桥冲击系数对比研究 [J]. 中外公路, 2008, 28(6): 130-133.  
[4] 桂水荣, 陈水生. 单车荷载作用下 T 型刚构桥车致振动

响应研究[J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(4): 43-49.

[5] P. KCHATTERJEE, T. K. DATTA and C. S. SURRANA. Vibration of Continuous Bridges Under Moving Vehicles [J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96(1): 45-53.

[6] Mario Farard, Martin Laflamme, Marc Savard. Dynamic Analysis of Existing Continuous Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(1): 28-37.

[7] Dongzhou Hang. Dynamic and Impact Behavior of Half-Trough Arch Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 133-141.

[8] 桂水荣, 陈水生等. 基于 Fourier 逆变换法的桥面不平度模拟及测试分析 [J]. 公路工程, 2007, 32(6): 39-43.

[9] 桂水荣, 陈水生, 任永明. 先简支后连续梁桥车辆冲击系数影响因素研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 54-60.

[10] 桂水荣, 陈水生, 万水. 公路梁桥车桥耦合振动模型试验设计及校验 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2014, 35(4): 463-469.

作者简介: 刘律 (1988.10—), 男, 华东交通大学, 建筑与土木工程, 武汉市市政建设集团有限公司, 工程师。