

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.020

基于移动荷载试验的桥梁快速测试与评定方法

熊亮¹, 黎骏飞², 程华才³, 李子兵³, 贺文宇²

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要:文章提出一种基于移动荷载试验的桥梁快速测试与评定方法,并成功应用于一座实际运营的大跨径变截面连续梁桥。首先简单介绍基于移动车辆激励下桥梁动力响应的桥梁柔度矩阵识别方法;其次提出基于柔度矩阵的桥梁挠度校验系数计算的方法和流程,实现对桥梁状况的评定;最后通过数值算例和实桥试验验证所提出的桥梁评定方法的有效性和高效性。

关键词:桥梁评定;移动车辆;快速测试;柔度矩阵;校验系数

中图分类号:U446.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)06-0849-07

Rapid testing and evaluation of bridges based on moving load test

XIONG Liang¹, LI Junfei², CHENG Huacai³, LI Zibing³, HE Wenyu²

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Expressway Engineering Test and Research Center Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: This paper proposes a rapid testing and evaluation method based on moving load test for bridges, and applies it to a long-span continuous girder bridge with variable cross section successfully. Firstly, the bridge flexibility matrix identification method based on the moving vehicle induced dynamic response is briefly introduced. Then, the approach and procedure for calculating the deflection verification coefficient based on flexibility matrix are proposed to evaluate bridge conditions. Finally, the effectiveness and efficiency of the proposed bridge evaluation method are verified by numerical example and field test.

Key words: bridge evaluation; moving vehicle; rapid testing; flexibility matrix; verification coefficient

桥梁评定是保障其运营安全的关键,目前荷载试验被认为是最有效的评定方法^[1-2]。静载试验通常需要较长的测试时间、较高的测试费用,具有较大的测试风险,不适合大规模和高频率使用。相比而言,动载试验具有简便、快捷和高效的特点,然而目前还缺乏有效的评估理论与方法,难以获得如静载试验类似的评定结果,因此亟需发展基于动力测试的桥梁快速测试与评定方法。文献[3]利用频率评定混凝土桥梁承载能力,频率测试精度高且操作方便,但通常只能粗略反映桥梁的

刚度,且容易受环境因素的影响;文献[4-6]提出车辆动力响应快速识别桥梁频率和振型的方法,但其精度易受路面粗糙度的影响;文献[7]提出一种基于准静态荷载试验的桥梁快速评定方法,但实施过程中需较为复杂的模型校准过程;文献[8-9]提出基于冲击振动的桥梁快速测试方法并开发了相应的一体化装置,但实施过程中需要将检测车辆逐步停放多次,影响测试效率;结合工程实例,文献[10]提出基于动力测试的梁式桥综合评定方法,但并未评定桥梁的承载能力;以基于静

收稿日期:2022-10-26;修回日期:2022-12-14

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085J20);安徽省交通控股集团有限公司科技资助项目(JKKJ-2021-01)

作者简介:熊亮(1976—),男,安徽六安人,安徽省交通控股集团有限公司高级工程师;

贺文宇(1986—),男,江西萍乡人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: wyhe@hfut.edu.cn.

载试验的挠度校验系数为参照对象,文献[11]提出基于动测频率和振型,计算柔度校验系数来评估桥梁承载能力的方法,实现动载评估方法和静载评估方法的有效衔接,然而振型识别精度在实际测试中难以保证,且由于评估过程中需要采用质量归一化振型构建柔度矩阵,因此需要将识别的振型进行质量归一化,将引入较大的误差。

移动荷载试验相对静载试验简单、快捷,通过移动荷载试验结果来估计桥梁的静挠度,可以克服静载试验的弊端,实现桥梁的快速测试与评定。鉴于此,本文提出一种基于移动车辆激励的桥梁快速测试与评定方法。首先采用移动车辆激励下的动力响应识别桥梁柔度矩阵;然后利用柔度矩阵估计桥梁的静载挠度,进而计算桥梁挠度校验系数并评定状况;最后通过数值算例和实桥试验予以验证。

1 柔度矩阵识别

传统柔度矩阵的识别需要具有高空间分辨率特性的桥梁质量归一化振型,实施过程中存在振型识别精度偏低、振型质量归一化难和传感器数量多等问题。桥梁柔度矩阵是基于桥梁所有截面挠度影响线的集合的原理^[12],文献[13]提出一种基于移动车辆激励下动力响应的桥梁柔度矩阵识别方法,该方法只需少量的位移传感器便能快速获得高精度的桥梁柔度矩阵。本文将采用该方法进行柔度矩阵识别,并进一步用于桥梁静载挠度估计。

桥梁挠度影响线如图 1 所示。

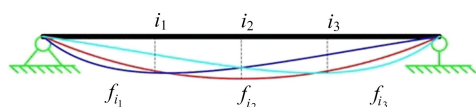


图 1 桥梁挠度影响线

桥梁柔度矩阵是桥梁各点的挠度影响线的集合,即

$$\mathbf{F} = (f_i | i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

其中: f_i 为 i 点的挠度影响线; N 为自由度数。

将桥梁简化为一个多自由度系统时,其柔度矩阵计算公式为:

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^R \frac{1}{\omega_i^2} \boldsymbol{\varphi}^{(i)} \boldsymbol{\varphi}^{(i)T} \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{\varphi}^{(i)} = [\varphi_1^{(i)} \quad \varphi_2^{(i)} \quad \dots \quad \varphi_N^{(i)}]^T$ 为第 i 阶质量归一化振型; R 为振型阶数,为简便起见,只考虑

第一阶振动模态。

综合式(1)、式(2)构建柔度矩阵的变换矩阵 \mathbf{F}^* , 计算公式为:

$$\mathbf{F}^* = \mathbf{F}^T \mathbf{F} \quad (3)$$

在桥梁中选取 G 个点的挠度影响线组成新的矩阵 \mathbf{F}^* , 计算公式为:

$$\mathbf{F}^* = (f_i^* | i = 1, 2, \dots, G) \quad (4)$$

用矩阵 \mathbf{F}^* 构建的柔度矩阵变换形式为 $\mathbf{F}^* \mathbf{F}^* = \mathbf{F}^* \mathbf{F}^* \mathbf{F}^*$ 。因同一位置 $f_k^* = f_i$, 可推导得式(5), 具体过程参见文献[13]。

$$\mathbf{F}^T \mathbf{F} = \frac{KN}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{I_{k,n}}{d_{k,n}}} \mathbf{F}^* \mathbf{F}^* \mathbf{F}^* \quad (5)$$

其中: $I_{k,n}$ 为桥梁第 k 条挠度影响线上第 n 点的值; $d_{k,n}$ 为矩阵 \mathbf{F}^* 中第 k 条挠度影响线上第 n 点的值; K 为挠度影响线的条数。

根据式(5)可求得 $\mathbf{F}^T \mathbf{F}$, $\mathbf{F}^* \mathbf{F}^* \mathbf{F}^*$ 的平方根即为柔度矩阵 \mathbf{F} 。

2 桥梁评定方法与流程

文献[1]规定挠度校验系数为桥梁静载试验中某一测点挠度的实测值与相应的理论模型计算值的比值。常规的挠度校验系数需静载试验,存在费时费力、阻断交通、成本大等问题。本文提出一种基于柔度矩阵的桥梁挠度校验系数的计算方法和流程,实现对桥梁状况的评定。

基于柔度矩阵与荷载向量可以计算桥梁任意点的静载挠度^[14-15], 计算公式为:

$$y_x = \sum_{i=1}^m D_i F(x, i) \quad (6)$$

其中: D_i 为第 i 个荷载值; $F(x, i)$ 为桥梁 x 处挠度影响线上第 i 处的幅值; y_x 为桥梁 x 处挠度; m 为加载的总荷载数。

实际测试中,可根据设计图纸建立有限元模型,计算桥梁在对应静载下的理论挠度 y_s 。结合 y_x 、 y_s , 桥梁的挠度校验系数 ξ 的计算公式为:

$$\xi = \frac{y_x}{y_s} \quad (7)$$

根据挠度校验系数 ξ 可评定桥梁承载能力, 标准如下: ① 当 $\xi < 1$, 表明桥梁的实际承载能力符合设计要求; ② 当 $\xi > 1$, 表明桥梁的实际承载能力不符合设计要求; ③ 当 $\xi = 1$, 表明桥梁的实际承载能力符合设计要求, 但没有富余的承载能力。

基于移动车辆试验的桥梁快速评定流程如

图 2所示。具体步骤如下:① 基于移动车辆的桥梁挠度响应提取桥梁挠度影响线;② 根据识别的桥梁挠度影响线,计算桥梁柔度矩阵;③ 通过柔度矩阵和设定的静荷载列阵,估计桥梁的静载挠度;④ 采用估计的桥梁静载挠度和理论模型获取的静载挠度,计算桥梁的挠度校验系数,评定桥梁状况。本文提出的方法仅需少量位移传感器,通

过移动车辆试验获得桥梁的柔度矩阵,实现对桥梁快速测试与评定,解决了传统静载试验周期长、成本高、工作量大和阻断交通等难题。

3 数值算例

采用移动车辆-简支梁模型如图 3 所示,验证本文提出方法的有效性和优越性。

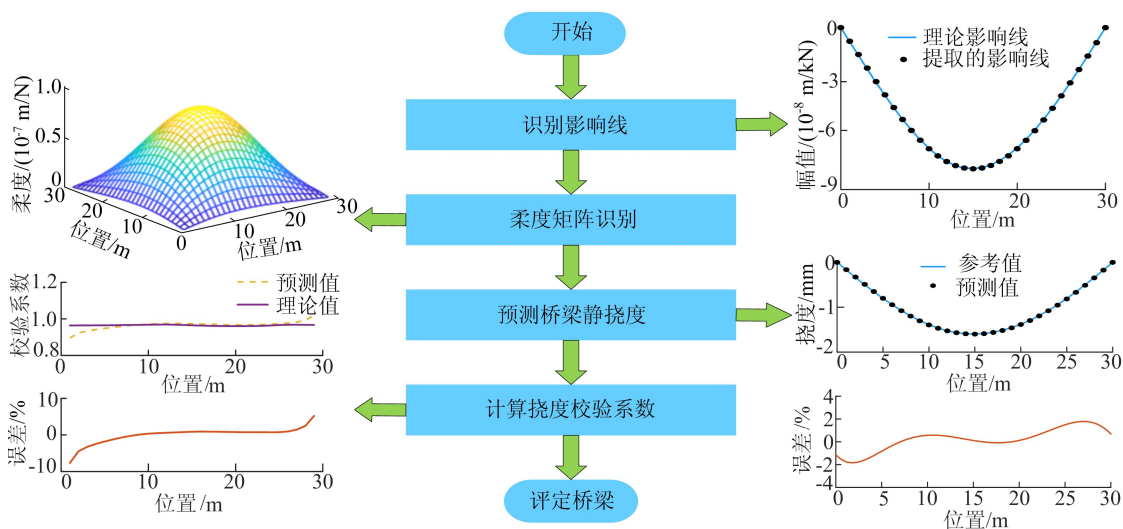


图 2 桥梁承载能力快速评定流程

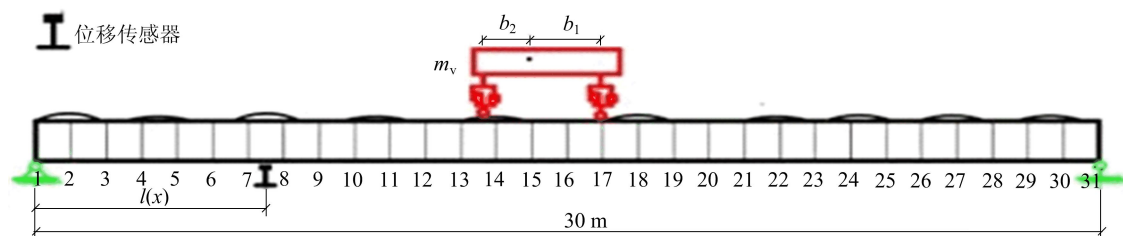


图 3 数值简支梁模型

简支梁参数为:梁长 $L_1=30\text{ m}$,单位长度质量 $m=2\ 000\text{ kg/m}$,设计状态的弹性模量 $E_1=3.2\times 10^{10}\text{ N/m}^2$,服役状态的弹性模量 $E_2=3.5\times 10^{10}\text{ N/m}^2$,惯性矩 $I=0.2\text{ m}^4$,通过调整梁刚度模拟桥梁服役后性能下降的状况,梁 12~14 m、25~27 m 区域内的抗弯刚度降低 15%,其他区域的抗弯刚度随机降低 0~5%,阻尼参数 $a_1=0.002$ 、 $a_2=0.002$,桥面粗糙度参照文献[16]计算,等级取“A 级”。两轴车辆参数为:车质量 $m_v=3\ 000\text{ kg}$,转动惯量 $J_v=2\ 300\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,前轴刚度 $k_1=230\text{ kN/m}$,后轴刚度 $k_2=180\text{ kN/m}$,前后轴阻尼 $c_1=c_2=1.0\times 10^3\text{ N}\cdot\text{s/m}$,车长 $b=3\text{ m}$,前轴长 $b_1=2\text{ m}$,后轴长 $b_2=1\text{ m}$,移动速度 $v=10\text{ m/s}$ 。将梁均匀划分成 30 个梁单元,建立有限元模型计算动力响应。考虑到实际桥梁试验

中噪声不可避免,对响应添加 5%的高斯白噪声,采样频率取 $f=1\ 000\text{ Hz}$ 。根据文献[13],对于简支梁,当传感器数量等于(或大于)3 时,识别出的桥梁柔度矩阵总体误差小于 1%,能满足工程要求。综合考虑测试成本和识别精度,本节选择 3 个位移传感器,等间距布置。采用本文提出的方法对该简支梁进行快速测试和快速评定,具体流程如下。

1) 影响线识别。首先通过 Newmark- β 逐步积分法求解简支梁动力响应,并利用快速傅里叶变换作用于跨中挠度响应识别简支梁频率,如图 4 所示。从图 4 可以看出,准静态分量所在的频率范围为 0~1.703 Hz,与梁的一阶频率不重叠,选取移动荷载频率的最大值作为截断频率,即 $\omega_s=1.703\text{ Hz}$;然后通过解析模式分解 (asyn-

chronous module definition, AMD)^[17-18]提取跨中挠度响应准静态分量,如图 5 所示,提取的准静态曲线和理论静载曲线基本重合,靠近边界处的识别误差大于其他区域,这主要是由于 AMD 的边界效应造成的;最后利用挠度影响线和挠曲线的关系,得到计算公式为:

$$y_1 = \begin{cases} 1\ 000I(x), & 0 < x \leq 3; \\ 1\ 000I(x) + 2\ 000I(x-3), & 3 < x \leq 30; \\ 2\ 000I(x-3), & 30 < x \leq 33 \end{cases} \quad (8)$$

通过多项式拟合提取桥梁跨中的挠度影响线,如图 6 所示,由图 6 可知,与参考值吻合良好。

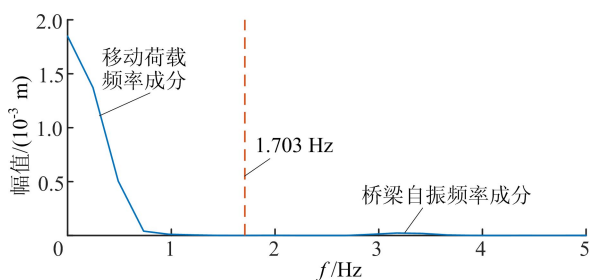


图 4 数值梁跨中响应的谱分析

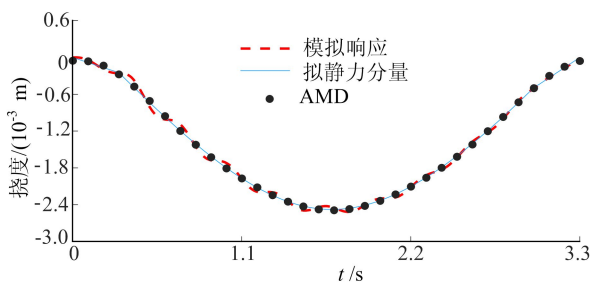


图 5 数值梁拟静力响应成分提取

2) 柔度矩阵计算。对 3 个位移传感器采集的动力响应重复上述步骤,分别提取挠度影响线,组成挠度影响线矩阵 F^* ,再结合式(5)求解桥梁的柔度矩阵 F 。

3) 静挠度估计。基于柔度矩阵 F ,可估计任意荷载作用下的简支梁静挠度剖面^[14-15]。为了验证静挠度估计的准确性,对简支梁进行模拟静力分析。设计如下 2 种静载工况:① NS-S1 所有单元结点施加 1 000 N 的集中荷载;② NS-S2 节点 11~节点 21 施加 3 000 N 的集中荷载。估计值与参考值的误差计算公式为:

$$\eta = \frac{y_{\text{估计值}} - y_{\text{参考值}}}{y_{\text{估计值}}} \quad (9)$$

估计值与参考值对比结果如图 7 所示、图 8 所示,从图 7、图 8 可以看出,估计值与参考值之

间的误差呈现出“两端大、中间小”的特点,最大误差不超过 2%,验证了本文所提出的桥梁柔度矩阵识别方法的可行性和准确性。

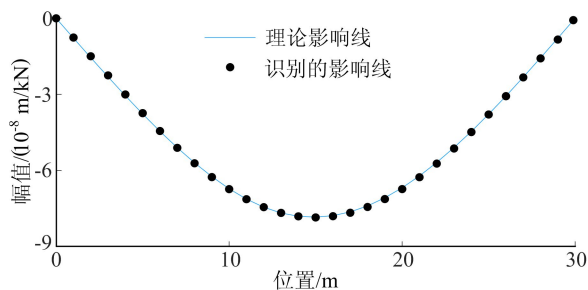


图 6 数值梁跨中挠度影响线

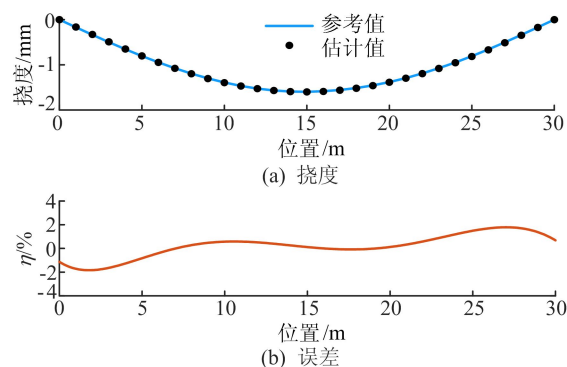


图 7 NS-S1 静挠度估计结果及误差

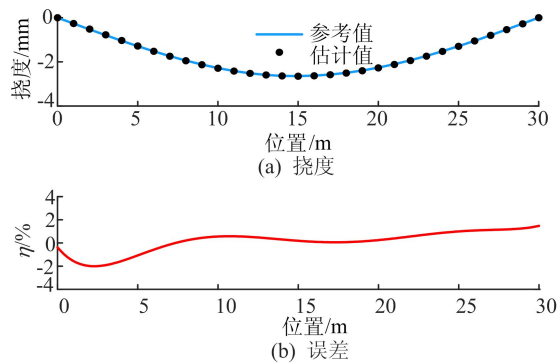


图 8 NS-S2 静挠度估计结果及误差

4) 挠度校验系数计算。为验证基于柔度矩阵计算挠度校验系数的可行性,设计如下 4 种工况:① NS-C1 节点 8、节点 9 施加 15 kN 的竖向集中力;② NS-C2 节点 16 施加 30 kN 的竖向集中力;③ NS-C3 节点 22、节点 23 施加 15 kN 的竖向集中力;④ NS-C4 节点 6~节点 24 施加 2 kN 的竖向集中力。首先采用有限元模型进行静力分析,计算各荷载工况下的静挠度;然后通过识别的柔度矩阵估计与有限元静载分析相对应工况下梁各测点的挠度;最后根据式(7)计算挠度校验系数。各荷载工况下简支梁的估计挠度校验系数与理论静载挠度校验系数对比见表 1 所列,

表 1 中,测点 1~测点 3 表示简支梁的四等分点。从表 1 可以看出,两者之间的误差均不超过 2%,表明本文所提的方法能够有效评定简支梁的状况。

表 1 数值梁挠度校验系数

工况	测点	挠度/mm			校验系数		误差/%
		静载	估计值	理论值	静载	估计值	
NS-C1	1	1.422	1.438	1.472	0.966	0.977	-1.116
	2	1.759	1.767	1.813	0.971	0.975	-0.428
	3	2.225	2.211	2.301	0.967	0.961	0.623
NS-C2	1	1.759	1.767	1.813	0.971	0.975	-0.428
	2	2.553	2.545	2.631	0.971	0.967	0.334
	3	3.500	3.516	3.625	0.965	0.970	-0.467
NS-C3	1	1.112	1.106	1.151	0.967	0.961	0.623
	2	1.750	1.758	1.813	0.965	0.970	-0.467
	3	2.834	2.820	2.944	0.962	0.958	0.490
NS-C4	1	1.898	1.905	1.959	0.969	0.972	-0.344
	2	2.694	2.695	2.778	0.970	0.970	-0.048
	3	3.780	3.779	3.918	0.965	0.965	0.037

4 实桥验证

某实际运营的五跨连续梁桥全长 666 m,跨径布置左幅为(96+3×160+90) m,跨径布置右幅为(90+3×160+96) m,本次试验选取左、右幅中跨进行静载试验和移动荷载试验,研究本文方法在实际运营环境下的可行性与有效性。

4.1 静载试验

静载测试按照常规方法进行,由于桥梁宽度较小,本试验按照中载工况进行加载。根据桥梁现场情况和理论分析,确定左、右幅桥梁中跨跨中截面为控制断面,试验加载效率为 1.05。根据控制弯矩布置车辆荷载,采用 9 台四轴(轴间距分别为 1.35、3.80、1.80 m)重车等效布载,前双轴轴质量、后双轴轴质量和总质量见表 2 所列。

表 2 静载测试车辆参数 单位:t

车辆序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
前双轴轴质量	7.1	7.0	7.1	7.0	7.3	7.2	7.1	7.2	7.1
后双轴轴质量	28.1	28.0	28.3	28.1	27.9	28.1	32.8	32.6	32.7
总质量	35.2	35.0	35.4	35.1	35.2	35.3	39.9	39.8	39.8

试验分如下 3 级加载:第 1 级加载车辆为 1、2、3 号车;第 2 级加载车辆为 4、5、6 号车;第 3 级为 7、8、9 号车。左、右幅桥梁的车辆加载位置布置相同,布置方式如图 9 所示,3 个挠度测点布置如图 10 所示,采用精密水准仪对 1#、2#、3# 点各测点进行静挠度测试,左、右幅中跨在中载作用下的实测挠度值见表 3 所列,表 3 中,选取同一断面的 3 个测点挠度的平均值作为该截面的挠度值。

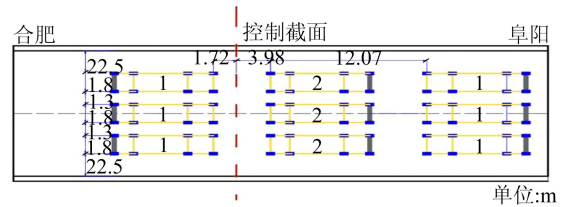


图 9 加载车辆平面布置

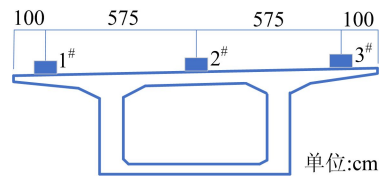


图 10 挠度测点布置

表 3 实测静挠度

桥跨位置	测点编号	实测值/mm	计算值/mm	残余/mm	校验系数	相对残余变形/%
左幅	1#	41.28		4.32	0.37	10.47
	2#	40.09	100.81	3.81	0.36	9.50
	3#	40.42		4.79	0.34	11.85
右幅	1#	61.20		2.62	0.57	4.28
	2#	61.10	102.04	2.01	0.58	3.29
	3#	59.90		2.47	0.56	4.12

4.2 移动荷载试验

移动荷载试验选择中跨的四等分点 3 个测试截面,在测试截面右侧布置靶标,如图 11 所示。采用激光挠度仪测量动挠度,如图 12 所示。



图 11 动挠度测点



图 12 激光挠度仪

采样频率为 80 Hz,车辆参数见表 4 所列,研究车辆速度与质量对本文提出方法的影响。

表 4 移动荷载试验车辆参数

试验工况	F1	F2	F3	F4	F5	F6
车辆质量/t	35	35	35	40	40	40
车辆速度/(km/h)	10	30	50	10	30	50

以工况 F5 下的跨中挠度响应数据为例,识别桥梁中跨区域的挠度影响线;采用快速傅里叶变换处理动力响应,获取相应的频谱图;根据频谱图确定截断频率为 0.085 Hz;采用 AMD 法提取桥梁动力响应的准静态分量;截取准静态分量中车辆行驶在中跨内的响应,并通过多项式拟合识别桥梁挠度影响线,如图 13 所示。采用同样的流程,处理各工况下各截面的挠度响应,提取相应的挠度影响线,并计算桥梁的柔度矩阵。

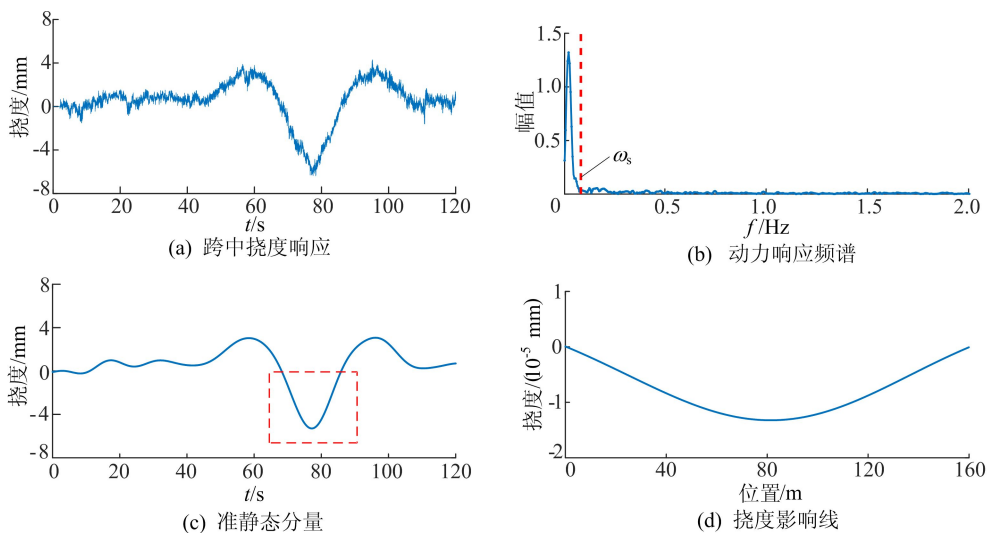


图 13 试验桥典型跨中挠度响应、动力响应频谱、准静态分量、挠度影响线

4.3 结果分析

采用 4.2 节识别的桥梁柔度矩阵,估计桥梁跨中截面处的静载挠度,并计算挠度校验系数,实

测静载挠度校验系数与通过柔度矩阵估计的挠度校验系数。

试验桥挠度校验系数对比结果见表 5 所列。

表 5 试验桥挠度校验系数

桥跨位置	项目	F1	F2	F3	F4	F5	F6
左幅	动载估计校验系数	0.419 9	0.421 8	0.423 0	0.419 2	0.420 7	0.424 1
	校验系数误差/%	4.26	4.73	5.02	4.09	4.46	5.30
	静载校验系数	0.402 7					
右幅	动载估计校验系数	0.616 3	0.615 7	0.621 4	0.616 1	0.614 5	0.624 8
	校验系数误差/%	3.56	3.46	4.41	3.52	3.24	4.97
	静载校验系数	0.595 2					

从表 5 可以看出,不同工况下的桥梁评定结

果与静载结果一致,左幅桥梁中跨和右幅桥梁中

跨的承载能力符合设计要求,其中左幅桥梁的承载能力有较多的富余。各种工况下挠度校验系数的误差大多小于5%,工况F3、F6下的识别误差略高于5%。比较相同车速、不同质量的工况,可以发现车辆质量对识别精度影响甚微;比较相同质量、不同车速的工况,可以发现车辆速度对识别精度有轻微影响,车速越低识别精度越高。计算的挠度校验系数误差比数值算例相对偏大,这是由于本文方法没有考虑实际桥梁残余变形的影响。综上所述,本文提出的基于移动车辆的桥梁快速测试与评定研究在实际运营环境下具有较好的适应性和有效性。

5 结 论

本文针对现有用于桥梁评定的静载试验和动载试验的不足,提出一种基于移动荷载测试的桥梁快速检测和评估方法,主要步骤如下:①通过移动车辆激励下的桥梁挠度响应提取桥梁挠度影响线;②根据挠度影响线计算桥梁的柔度矩阵;③采用柔度矩阵估计桥梁静载挠度;④依据静载挠度计算挠度校验系数并评定桥梁状况。数值简支梁算例和连续梁实桥试验表明:本文提出的方法仅需少量位移传感器,通过移动车辆试验获得桥梁的高质量柔度矩阵,基于柔度矩阵估计的静载挠度可以代替实测静载挠度来计算挠度校验系数,实现对桥梁快速测试与评定,解决了传统静载试验周期长、成本高、工作量大和阻断交通等难题。本文提出的方法限于梁式桥,后续需进一步推广到更多的桥型。

[参 考 文 献]

- [1] 交通运输部公路科学研究院. 公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011:1-300.
- [2] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程:JTG-T J21-01—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2016:1-255.
- [3] 邵旭东. 钢筋混凝土和预应力混凝土桥梁承载能力的系统识别和计算[J]. 中国公路学报,1997,10(3):66-71.
- [4] YANG Y B, LIN C W, YAU J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272 (3/4/5): 471-493.
- [5] YANG Y B, LIN C W. Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 284(1/2):205-226.
- [6] YANG Y B, XU H, ZHANG B, et al. Measuring bridge frequencies by a test vehicle in non-moving and moving states [J]. Engineering Structures, 2020, 203:109859.
- [7] 张宇峰,段鸿杰,马志国. 基于准静态荷载试验的梁式桥梁状态快速评定[J]. 现代交通技术,2009,6(5):21-24.
- [8] TIAN Y D, ZHANG J, XIA Q, et al. Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data [J]. Engineering Structures, 2017, 146:158-169.
- [9] TIAN Y D, ZHANG J, HAN Y X. Structural scaling factor identification from output-only data by a moving mass technique[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2019, 115:45-49.
- [10] 李伟钊. 基于动力测试的公路混凝土梁式桥工作性能评定方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [11] 刘东海. 基于动测的桥梁承载力评估方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [12] CHEN Z W, ZHU S Y, XU Y L, et al. Damage detection in long suspension bridges using stress influence lines [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(3):05014013.
- [13] HE W Y, LI J F, CHENG H C, et al. Flexibility matrix identification using the moving vehicle induced responses for beam type bridge [J]. Engineering Structures, 2022, 261:114277.
- [14] REZAEI D. Damage identification in beams using empirical mode decomposition [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(3):261-274.
- [15] HE Z, SHEN Y, WANG Q. Boundary extension for Hilbert-Huang transform inspired by gray prediction model [J]. Signal Processing, 2011, 92(3):685-697.
- [16] 严志刚,盛洪飞,陈彦江. 桥面平整度对大跨度钢管混凝土拱桥车辆振动的影响[J]. 中国公路学报,2004,17(4):41-44.
- [17] CHEN G, WANG Z. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrowband time series with closely spaced frequency components [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28:258-279.
- [18] WANG Z C, GE B, REN W X, et al. Discrete analytical mode decomposition with automatic bisecting frequency selection for structural dynamic response analysis and modal identification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 484:115520.

(责任编辑 张 镗)