

一种适合中小跨径桥梁结构挠度快速测试方法

张爱品¹, 马林东¹, 常柱刚^{2*}, 范治豪³

(1. 中铁开发投资集团有限公司, 云南 昆明 650200; 2. 长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410007;
3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:桥梁挠度响应是用于桥梁结构状态评估最主要的指标之一, 目前关于挠度测量的方法及装置较多, 但在经济性、适用范围、测量精准性等方面无法较好同步。该文提出一种适合中小跨径桥梁的跨中挠度快速高精度测量方法, 依托位移传感器在直接接触式测量方面的高精度优势, 研发辅助测量装置将桥上测点挠度以刚性连接形式传递至位移传感器, 从而实现精准、动态测试目的。建立车-桥-吊杆系统耦合计算模型, 同步开展模型试验, 对比车辆荷载作用下桥上测点与监测点的位移偏差, 验证该文方法用于动力响应测试的可行性。模拟计算横向风荷载作用对该装置传递精度的影响, 结果表明: 对于12 m长传递杆, 横向风荷载作用引起的测量偏差小于5%, 证明该文提出的测试方法具有较高的精度和实用性。

关键词: 中小型桥梁; 挠度测量; 辅助测试装置; 传递精度

中图分类号: U446

文献标志码: A

A Rapid Test Method for Deflection of Small and Medium-Span Bridges

ZHANG Aipin¹, MA Lindong¹, CHANG Zhugang^{2*}, FAN Zhihao³

(1. China Railway Development and Investment Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China; 2. Changsha Planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410007, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: Bridge deflection response is one of the most important indicators used for structural condition assessment of bridges. There are currently many methods and devices for deflection measurement, but they are not satisfying in terms of economy, applicability, and measurement accuracy at the same time. This paper proposed a rapid and highly accurate method for measuring mid-span deflection of small and medium-span bridges. By using the high accuracy of displacement transducers in direct contact measurement, an auxiliary measurement device was developed to transfer the deflection of the measurement points on the bridge to the displacement transducer in the form of a rigid connection, thus achieving accurate and dynamic testing. A coupled vehicle-bridge-derrick system model was developed, and model tests were carried out simultaneously to compare the displacement deviation between the measurement points on the bridge and the monitoring point under vehicle loading and verify the feasibility of the proposed method for dynamic response testing. The effect of transverse wind load on the transfer accuracy of the device was simulated and calculated. The results show that the measurement deviation caused by the transverse wind load is less than 5% for the 12 m-long transfer rod, proving that the proposed test method has high accuracy and practicality.

Keywords: small and medium-sized bridges; deflection measurement; auxiliary test device; transfer accuracy

收稿日期: 2024-03-27(修改稿)

基金项目: 中铁开投科技研究开发计划项目(编号: 2021-B类-05); 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2021JJ30840)

作者简介: 张爱品, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 479057618@qq.com

*通信作者: 常柱刚, 男, 博士研究生, 高级工程师. E-mail: 405587061@qq.com

0 引言

桥梁是现代交通网络的关键节点和重要组成部分,其服役过程中安全性、可靠性与人类生命和社会经济息息相关。随着服役时间的延长,桥梁结构不可避免地发生性能退化和老化,由此带来的检测评估工作量巨大。结合桥梁在荷载作用下的变形量进行承载能力检测是目前广泛采用的方法^[1-3],对于中小跨径桥梁结构,其在荷载作用下的挠度变形是进行承载能力量化评估的主要参数^[4-6]。

根据参考点距离不同,现阶段挠度测试主要分为非接触式方法和接触式方法。非接触式方法包括水准仪/全站仪^[7-8]、机器视觉^[9]、激光/LED测试^[10-11]、雷达^[12]等,一般适合于大变形或长期变形监测,可实现远距离测试。涂伟等^[13]提出了基于机器视觉的桥梁挠度测量方法,利用高精度相机、基准靶标和若干红外测量靶标构建桥梁挠度测量系统,测量结果与千分尺测量法较为接近;熊琛等^[14]采用激光-位置传感器进行简支梁桥高精度挠度测量,通过激光反射偏转位移放大简支梁桥挠度,实现了微米级精度的桥梁挠度监测;贾岩等^[15]结合基于FMCW体制的地基毫米波雷达,开展了盐通高铁联调联试期间不同车速运行时24 m简支梁跨中竖向挠度监测,结果表明FMCW毫米波雷达能准确监测桥梁的复杂振动。目前,非接触式挠度测试方法在大变形测试方面具有一定的可行性,但其测试设备成本高,在结构小变形、高精度测试方面仍有待进一步研究。

接触式方法主要包括倾角仪^[16-17]、位移传感器^[18-19]等,往往具备较高的测试精度。其中位移传感器法是桥梁检测中采用较多的挠度测试方法,在进行相对位移测试时需要安装辅助设备拉近测点与传感器之间的距离,进一步可细分为悬锤法辅助测试^[20]和搭设支架法辅助测试^[21]。悬锤法通过对梁体进行膨胀螺栓打孔,用柔绳悬挂铅锤将梁上测点引至地面进行测量,该方法无法忽略柔绳及重锤晃动的影响,且仅仅限于静态测试。搭设支架法将地面参考点往上引,可有效避免悬锤法的系列问题,具备较高的测试精度且能同时进行动、静挠度的测试,但经济成本和时间成本较高。总体而言,现阶段桥梁挠度测试手段、方法丰富,但难以兼顾经济性、适用性和测量精准性,难以适用量大面广的中小跨径桥

梁变形监测问题。

鉴于此,本文提出一种适合中小跨径桥梁的挠度快速测量方法,研发挠度测试辅助装置,采用轻质刚性杆传递测点挠度信息,实现对桥梁静态、动态挠度的精准检测。开展车辆过桥动力响应模型试验及横向风荷载作用仿真计算,分析荷载作用下跨中测点与监测点的竖向挠度偏差及装置传递精度,验证本文方法的正确性及可行性。

1 桥梁挠度辅助测试装置及实施方法

1.1 挠度辅助测试装置设计

结合位移传感器进行接触式直接测试,是当前小变形测量的最精准可靠的方法,其主要局限在于被测点与固定参考点之间往往存在空间距离。本文针对挠度测试设计一种辅助测试装置,通过轻质杆将测点变形精准传递至固定参考点,再结合传感器实现快速准确测量。对于桥下具有良好工作环境的情况,可直接采用垂直传递模式;而对于桥底存在车流和水流的情况,可采用斜向传递的模式,如图1所示。需要说明的是,当车流和水流较宽时,本装置不具备适用性。

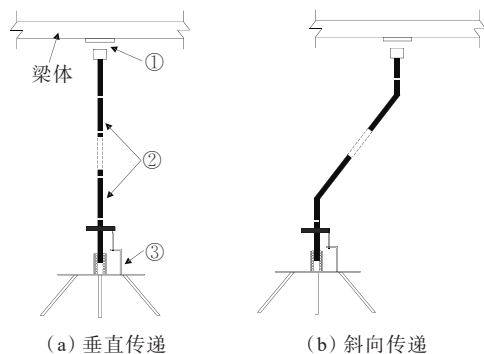


图1 挠度测试装置设计图

Figure 1 Design of deflection measurement device

挠度测试装置的主要组件分为3部分:①上部连接件;②中部轻质连接杆;③下部平台。具体如图2所示。其中:上部连接件作用在于实现装置与桥梁测点的固结,一般借助升降梯等临时设备快速实施结构胶粘贴、钻孔连接等;中部轻质连接杆为轴向刚性杆,起传递作用。可按需要在一定长度范围内延伸,其上端与上部连接件固结;对于下部平台,一方面,通过3个撑脚的伸缩机构适应复杂的桥底地形,并安装水准气泡来保证平台水平,为传感器固定安装提供支撑平台;另一方面,对轻质连接杆提供横

向约束作用,确保轻质杆件仅能传递单向位移。

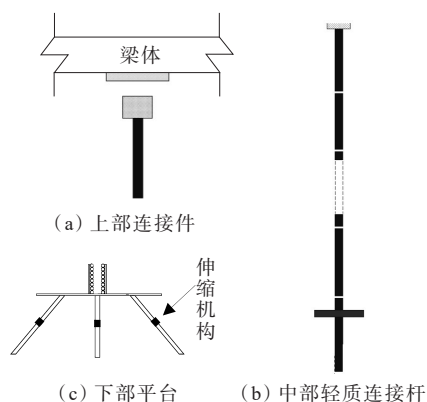


图2 挠度测试装置组件

Figure 2 Components of deflection measurement device

该辅助测试装置可将桥梁挠度准确地向下传递,便于采用精确测试手段进行测量。轻质杆件两端部均采用强约束形式,一端固结于梁体,一端实施滑动约束,确保运动方式的唯一性,如图3所示。相较同类测试手段或方法而言,它具有操作便捷、经济实用以及可行性等方面的明显优势。



图3 轻质杆约束示意图

Figure 3 Restraint of lightweight rod

1.2 使用实施步骤

挠度辅助测试装置主要针对中小型桥梁挠度变形快速测量,预期提高此类桥梁挠度测试实施的经济性、时效性及可行性。其主要实施步骤如下:

(1) 上部连接件安装,在桥梁底部设定的测点位置处,用高强度胶黏结或螺丝固结上部连接件。该测点设置还具备1次设置、多次(长期)使用的特点,便于实现对结构的比较监测或长期监测。

(2) 根据桥梁底部测点位置到地面监测站点距离方位,选定合适的传递装置模式(垂直传递、斜向传递),确定轻质传递杆杆长,并对轻质传递杆进行逐段连接。

(3) 安装下部平台,对轻质杆另一端形成约束,同时依托平台完成传感器和其他测试准备安装。下部平台采用三脚架支撑固定,可以在一定范围内调节平台高度,对固定场地环境具有较好的适应性。

2 车辆过桥动力响应仿真计算

2.1 车-桥-吊杆耦合模型

为分析本装置传递桥梁挠度的效果,开展数值模拟,建立车-桥-吊杆耦合系统模型,包含车辆模型、桥梁模型和吊杆模型,如图4所示。采用参考文献[22]中的桥梁模型,桥梁长 $L_b=20$ m,抗弯刚度 $E_b I_b=4.43 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$, E_b 为桥梁弹性模量, I_b 为惯性矩;线密度为 $1.07 \times 10^4 \text{ kg/m}$,各阶振型阻尼比为0.02;轻质连接杆采用M55碳纤维,考虑其与梁体刚结,吊杆为圆管截面,抗弯刚度为 $E_p I_p=1.09 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, E_p 为吊杆弹性模量, I_p 为吊杆惯性矩,线密度为 13.75 kg/m ;移动荷载车采用二轴车行驶过桥,轮胎刚度和阻尼参数采用 k_1, k_2 和 c_1, c_2 表示,悬挂系统刚度和阻尼参数采用 k_3, k_4 和 c_3, c_4 表示,参数具体取值参考文献[22]。

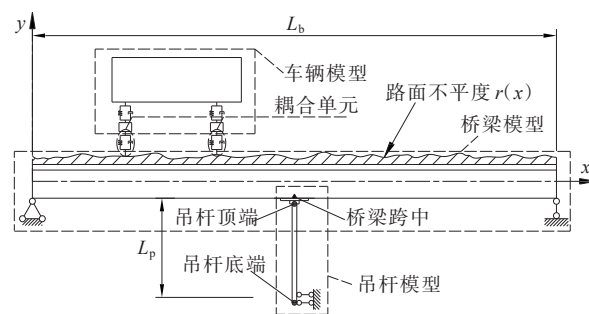


图4 车-桥-吊杆耦合模型

Figure 4 Coupled vehicle-bridge-derrick model

需要说明的是,在车-桥-吊杆时变系统建模时进行了以下基本假设:

(1) 车辆的转向架、轮对及车体全部看作刚体,弹簧是线性的,阻尼按黏性阻尼,车辆在桥面做匀变速运动。

(2) 桥梁模型和吊杆模型按照伯努利梁建模,不考虑横向及纵向振动。

(3) 车轮与桥梁保持接触,不会发生跳起。车-桥-吊杆耦合系统的控制方程可写为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为桥梁结构上各轴所施加荷载的组合荷载向量; u 为包含车辆、桥梁和吊杆的竖向位移和转动的变形向量; \dot{u} 和 \ddot{u} 分别为速度和加速度,即广义位移向量的一阶和二阶导数; M, C, K 分别为车-桥-吊杆耦合系统的质量、阻尼和刚度矩阵,可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_v & & \\ & \mathbf{M}_b & \\ & & \mathbf{M}_p \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{bp} + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Phi}_i \tilde{\mathbf{M}}_i \boldsymbol{\Phi}_i^T; \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_v & & \\ & \mathbf{C}_b & \\ & & \mathbf{C}_p \end{bmatrix} + \mathbf{C}_{bp} + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Phi}_i \tilde{\mathbf{C}}_i \boldsymbol{\Phi}_i^T; \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_v & & \\ & \mathbf{K}_b & \\ & & \mathbf{K}_p \end{bmatrix} + \mathbf{K}_{bp} + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Phi}_i \tilde{\mathbf{K}}_i \boldsymbol{\Phi}_i^T \quad (2) \end{aligned}$$

式中: \mathbf{M}_v 、 \mathbf{C}_v 和 \mathbf{K}_v 分别为车辆的质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{M}_b 、 \mathbf{C}_b 和 \mathbf{K}_b 分别为采用有限元方法构建的桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{M}_p 、 \mathbf{C}_p 和 \mathbf{K}_p 分别为吊杆的质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{M}_{bp} 、 \mathbf{C}_{bp} 和 \mathbf{K}_{bp} 分别为桥梁和吊杆连接部分的质量、阻尼和刚度矩阵; $\boldsymbol{\Phi}_i$ 为一个形状矩阵, 它将 $\tilde{\mathbf{M}}_i$ 、 $\tilde{\mathbf{C}}_i$ 和 $\tilde{\mathbf{K}}_i$ 的大小转换为时不变矩阵的大小, 并将第 i 个耦合元素集成到系统矩阵相对应的位置。将车辆矩阵、桥梁、吊杆以及桥梁和吊杆连接部分矩阵进行组装, 构成车桥耦合系统中的时不变分量。车辆与桥梁的耦合为时变部分, $\tilde{\mathbf{M}}_i$ 、 $\tilde{\mathbf{C}}_i$ 和 $\tilde{\mathbf{K}}_i$ 分别为第 i 个(本算例中, $i=1, 2$)耦合部分(即第 i 个轴)的质量、阻尼和刚度矩阵:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{M}}_i &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & N^T \tilde{m}_i N \end{bmatrix} \\ \tilde{\mathbf{C}}_i &= \begin{bmatrix} c_i & -c_i N \\ -N^T c_i & N^T c_i N \end{bmatrix} \\ \tilde{\mathbf{K}}_i &= \begin{bmatrix} k_i & -k_i N - c_i N' \\ -N^T k_i - N'^T k_i & N^T k_i N + N'^T c_i N' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \tilde{m}_i 为该模型中接触点的质量; c_i 和 k_i 分别为耦合单元的阻尼和刚度; N 为3次样条插值形函数。

与车辆和桥梁的矩阵相比, 由于接触位置随时间变化, 上述矩阵均为时变部分。对于第 i 个车轴, 施加在桥梁上的力可按式(4)计算:

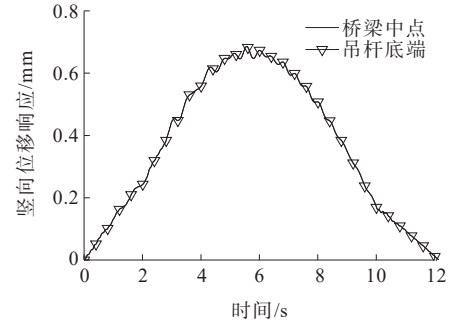
$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} k_i r(x_i) + c_i v r'(x_i) \\ [m_{ai} g + k_i r(x_i) + c_i v r'(x_i)] N^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: m_{ai} 为由第 i 个车轮重量和车体部分重量组成的轴重; v 为车速; g 为重力加速度; $r(x)$ 为随机的路面不平度。

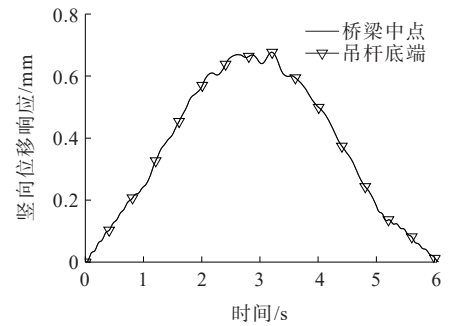
2.2 车致桥梁响应及传递位移计算

车-桥-吊杆时变系统运动方程充分考虑车辆、桥梁和吊杆的各个自由度, 是复杂的动力系统。采用 wilson- θ 法求解移动车辆作用下桥梁及吊杆测点的位移响应, 其中桥梁测点选取跨中位置, 吊杆选取

底端。采用时间步长为 0.001 s, 并对计算结果添加高斯噪声来模拟测量响应数据中噪声的影响。取杆长 $l_p=10$ m, 车速 $v=2$ m/s、4 m/s 的计算工况, 桥梁响应及吊杆响应如图 5 所示。



(a) 2 m/s 车速



(b) 4 m/s 车速

图 5 桥梁跨中和吊杆底端的位移响应曲线

Figure 5 Displacement response curve of bridge mid-span and derrick bottom

在车辆过桥作用下, 桥梁跨中挠度响应呈现两端小中间大的趋势, 同时包含了桥梁振动和测试噪声等影响。吊杆顶端与桥梁跨中部分采用了固结的连接方式, 其挠度响应值和桥梁响应一致。若不考虑风荷载影响, 吊杆不受弯矩影响, 始终保持竖直状态, 吊杆底端的竖向位移曲线与顶端完全重合, 也证明了在无风情况下, 该挠度吊杆装置可以比较准确地传递桥梁挠度响应, 通过百分表和数据采集仪可以得到桥梁完整的挠度响应曲线。

3 影响因素分析

本文桥梁挠度测试装置在实际测量中不可避免会受到风荷载的影响, 须针对脉冲风荷载作用对装置测试精度的影响开展数值分析。

当前研究表明: 风荷载时程曲线一般包含两部分: 一是长周期部分, 其作用时间较长; 二是短周期部分, 一般仅有几秒钟左右^[23]。其中, 短周期的脉冲风

是由风的不规则性引起的,其强度随时间随机变化,这种脉冲风荷载会使得结构不断发生振动。根据中国目前规范采用的不随高度变化的 Davenport 脉冲风速谱^[24],如式(5)所示:

$$S_v(f) = 4K\bar{v}_{10}^2 \frac{x^2}{f(1+x^2)^{4/3}} \quad (5)$$

式中: $x = \frac{1200f}{\bar{v}_{10}}$; f 为脉动风频率; \bar{v}_{10} 为离地面 10 m 高处的平均风速; K 为地面粗糙度系数。

采用谐波叠加法进行脉冲风荷载模拟。假设脉动风中 n 个具有零均值的平稳高斯过程,其互功率谱密度函数矩阵如式(6)所示:

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ \vdots & & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (6)$$

对 $S(\omega)$ 进行 Cholesky 分解:

$$S(\omega) = H(\omega)H^{*T}(\omega) \quad (7)$$

式中: $H^{*T}(\omega)$ 为 $H(\omega)$ 的转置共轭矩阵。

则模拟脉冲风速如式(8)所示:

$$v_i(t) = \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^N |H_{ik}(\omega_k)| \times \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\omega_k t + \Psi_{ik}(\omega_k) + \theta_{kl}] \quad (8)$$

式中: N 为充分大的正整数; $\Delta\omega = \omega/N$ 为频率增量; $|H_{jk}(\omega_k)|$ 为上述下三角矩阵的模; $\Psi_{ik}(\omega_k)$ 为两个不同作用点间的相位角; ω_k 为圆频率; t 为时间; θ_{kl} 为 $0 \sim 2\pi$ 范围内的均匀随机数。

当不考虑结构与风的耦合作用时,作用在结构上的脉动风荷载^[25]可以表示为:

$$F_i(t) = A_i \mu_s \gamma \bar{v}(z) v_i(t) = A_i \mu_s \gamma \bar{v}(z) \cdot \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^N |H_{ik}(\omega_k)| \times \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\omega_k t + \Psi_{ik}(\omega_k) + \theta_{kl}] \quad (9)$$

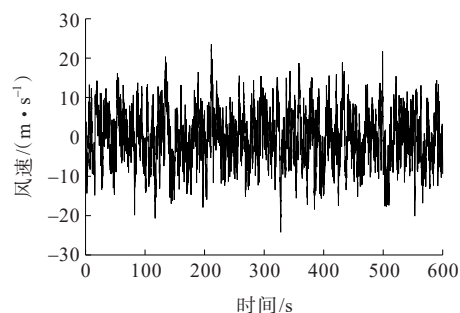
式中: A_i 为结构挡风面积; μ_s 为风荷载体型系数; $\bar{v}(z)$ 为 z 高度处的平均风速; v_i 为脉动风速。

结合 Matlab 程序开展脉冲风荷载时程曲线数值模拟,其中 10 m 处的平均风速 $\bar{v}_{10} = 20$ m/s,截止频率取为 4 Hz,模拟点数 $N=6000$,时间步长为 0.1 s。得到脉冲风荷载模拟结果如图 6 所示。

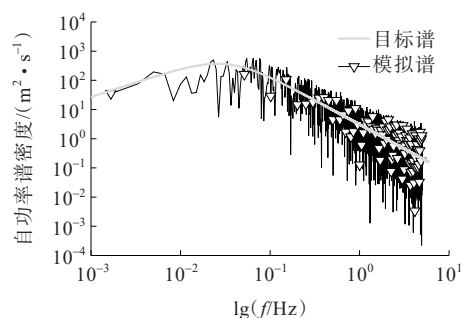
从图 6 可以看出:模拟的风速谱和原目标功率谱吻合较好,表明该方法很好地模拟了脉冲风荷载随时间的变化情况。

3.1 不同风速影响

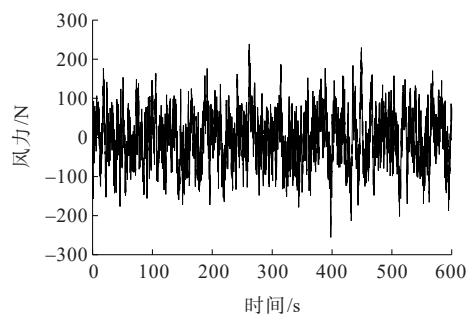
将计算所得的风荷载作为节点力施加至第二节的车-桥-吊杆耦合模型,分析车速 $v=2$ m/s,不同风速($\bar{v}_{10}=20$ m/s、30 m/s)下风荷载对装置测试精度的影响,计算所得桥梁跨中及吊杆底端的位移响应如图 7 所示。



(a) 风速时程曲线



(b) 模拟功率谱与目标谱对比



(c) 脉冲风荷载时程曲线

图 6 脉冲风荷载模拟

Figure 6 Simulation of impulsive wind load

由图 7 可知:吊杆在风荷载作用下横向振动,产生的横向挠曲变形会导致吊杆在竖向的位移减小,并具有单向波动的趋势。为进一步分析吊杆传递桥梁位移的效果,得到风速为 20 m/s 时吊杆中部的横向挠度曲线,以及吊杆两端的位移差,如图 8 所示。

从图 8(a)可以看出:吊杆会随着风荷载的变化而不断波动,最大可产生 5.9 mm 左右的挠曲变形。

吊杆两端竖向位移差如图 8(b)所示,由于杆件振动的影响,其表现出单向波动趋势。其两端位移差值的波动和吊杆跨中挠度存在相关性,挠度绝对值越大,说明杆件弯曲较大,表现出两端位移差值越大;

当挠度为 0 时,杆件为竖直状态,两端位移差值为 0。在一定风力作用下,吊杆依然可以较好地传递桥梁的挠度信息,计算的最大误差约为 0.011 mm,其传递桥梁挠度的效果和精度会受到吊杆弯曲的影响。

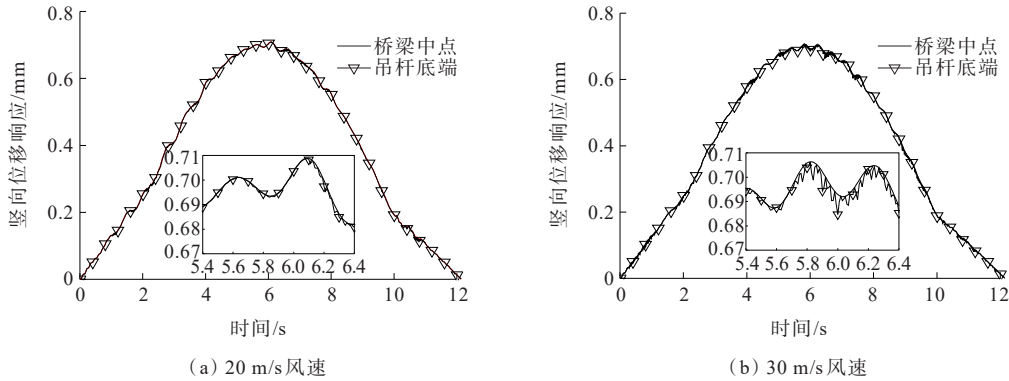


图 7 不同风速下桥梁跨中及吊杆底端位移响应曲线

Figure 7 Displacement response curve of bridge mid-span and derrick bottom under different wind speeds

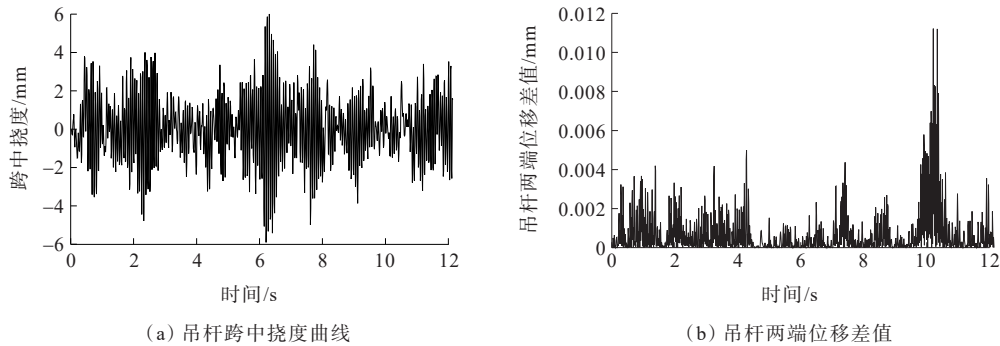


图 8 吊杆响应曲线

Figure 8 Response curve of derrick

3.2 桥梁高度(传递杆长)影响

由上述结论可知,装置测试精度与吊杆在风荷载作用下的跨中挠度呈正相关,同时吊杆长度对其挠度也存在较大影响。基于 3.1 节数值模型,选取不同杆长(l_p 分别取 8 m、10 m、12 m),风速 $\bar{v}_{10}=20$ m/s,桥梁跨中及吊杆底端的位移响应如图 9 所示。

从图 9 可以看出:8 m 长的吊杆底端响应与跨中响应保持较好一致性,当吊杆长度为 10 m 时,底端响应出现波动现象,而 12 m 时,表现出明显的波动形态。为了进一步判断风荷载作用下杆长对挠度测试装置测量精度的影响,计算不同吊杆长度下吊杆两端的位移差,并取位移差与吊杆顶端响应的比值作为吊杆测量偏差,结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出:桥梁跨中(吊杆顶端)竖向挠度变化与吊杆底端竖向位移差在不同时间表现出较为随机的特征,总体上呈现出杆长越大,其位移差的

波动程度越明显。进一步分析,由位移差计算每一时刻的偏差值,各个杆长的偏差列于表 1。

由表 1 可以明显看出:随着杆长的增加,其偏差值越大,最大误差为 4.81%,表明本文桥梁挠度测试装置可以在不同桥梁高度下均获取较高的测试精度。

4 试验验证

结合模型试验,验证本文方法及装置的可行性。试验室桥梁模型设计如图 11 所示。其中,钢梁长 5 m,采用一对槽钢和一对钢板焊接而成,梁模型两端采用实际桥梁小吨位支座简支支撑,梁体底端离地高度 2 m,桥梁跨中截面底端通过黏结以固结吊杆顶端,吊杆自然下垂,吊杆长度 1.8 m。采用电机牵引小车从桥梁左端行驶至桥梁右端,利用位移传感器测量小车在桥上行驶全过程中桥梁跨中挠度响应以及吊杆下端位移响应,位移传感器布置如图 11 所示,并

对二者位移响应作比较,结果见图12。

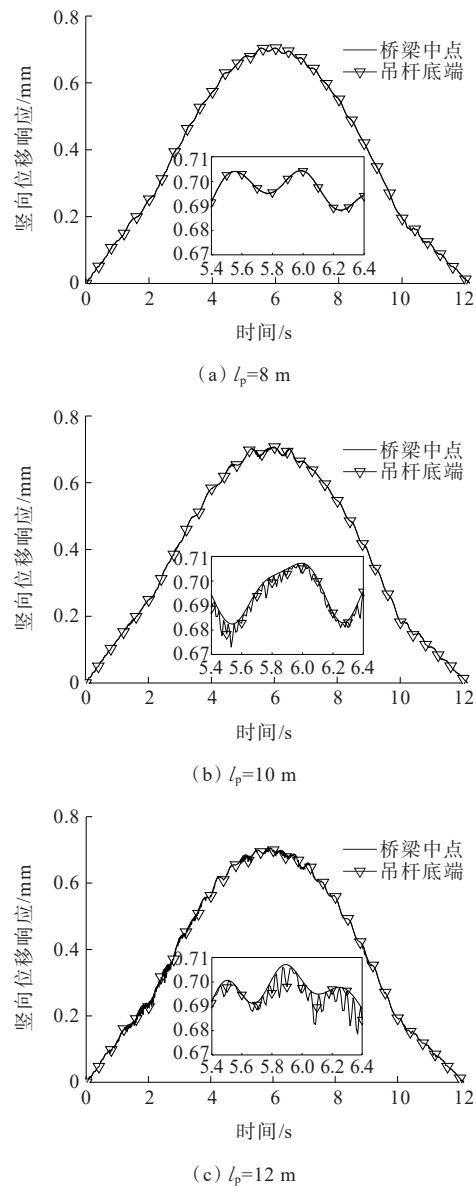


图9 不同杆长下桥梁跨中及吊杆底端位移响应曲线

Figure 9 Displacement response curve of bridge mid-span and derrick bottom under different rod lengths

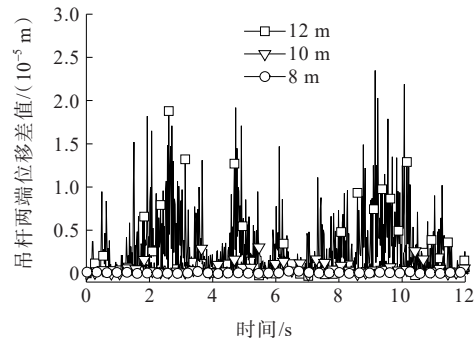


图10 不同长度吊杆两端位移差值

Figure 10 Displacement difference between two ends of derrick with different lengths

表1 不同长度吊杆位移幅值

Table 1 Displacement amplitude of derrick with different lengths

杆长/m	吊杆顶端响应幅值/mm	位移差/mm	偏差/%
8	0.712	0.001 1	0.15
10	0.708	0.009 1	1.29
12	0.715	0.034 4	4.81



(a) 模型试验布置图



(b) 位移传感器布置图

图11 桥梁模型试验

Figure 11 Bridge model test

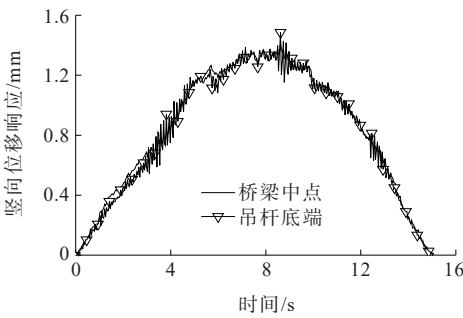


图12 桥梁跨中和吊杆底端的位移响应曲线

Figure 12 Displacement response curve of bridge mid-span and derrick bottom

由图12可知:跨中挠度响应时程曲线和吊杆下端位移响应时程曲线幅值及波动情况均较好吻合。因此,吊杆将桥梁跨中挠度高精度地传递至吊杆下端传感器处,实现了桥梁挠度精准便捷的动态测试,验证了本文方法及装置的可行性。

5 结论

本文提出一种适合中小型桥梁挠度测试的辅助

测试装置,用于将中小型桥梁上测点挠度向下传递至位移传感器。结合数值仿真和模型试验验证装置用于动力响应测试的可行性,并分析了风荷载及杆长对其传递精准性的影响。得出如下结论:

(1) 轻质杆件对桥梁挠度响应的传递精度较高,测点动态位移与杆端位移时程曲线吻合良好,可实现桥梁挠度精准的动态测试。

(2) 杆件传递桥梁挠度的效果和精度会受到吊杆挠曲的影响,选择较小的风速环境和合理的杆件长度,减小传递误差,增加测试精度。

(3) 本方法在保证测试精度的前提下,还具有安装方便、时间经济成本低、适用性强等优势,且能同时较好地进行静、动态测试,可为中小型桥梁快速量化检测提供新的方法和思路。

参考文献:

References:

- [1] 周宇,狄生奎,项长生,等.基于弹性约束支承梁转角影响线的梁结构损伤诊断[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(5):879-888.
ZHOU Yu, DI Shengkui, XIANG Changsheng, et al. Beam structure damage detection based on rotational-angle influence-lines of elastic-constrained-support beam [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(5): 879-888.
- [2] 黄侨,任远,许翔,等.大跨径缆索承重桥梁状态评估的研究现状与发展[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(9):1-9.
HUANG Qiao, REN Yuan, XU Xiang, et al. Research progress of condition evaluation for large span cable supported bridges[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 1-9.
- [3] 钟继卫,王波,王翔,等.桥梁智能检测技术研究与应[J].桥梁建设,2019,49(增刊1):1-6.
ZHONG Jiwei, WANG Bo, WANG Xiang, et al. Research and application of bridge intelligent detection technology [J]. Bridge Construction, 2019, 49(sup 1): 1-6.
- [4] 王翔,钟继卫,王波.桥梁动态挠度图像识别测试技术研究[J].世界桥梁,2015,43(3):59-62.
WANG Xiang, ZHONG Jiwei, WANG Bo. Study of bridge dynamic deflection identification and testing technique based on image processing[J]. World Bridges, 2015, 43(3): 59-62.
- [5] 李琦,齐东春,杨虎,等.基于联合静动力修正的混凝土斜拉桥主梁挠度变化规律研究[J].中外公路,2024,44(1):111-118.
LI Qi, QI Dongchun, YANG Hu, et al. Deflection variation rule of main girder for a concrete cable-stayed bridge based on combined static and dynamic modification[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 111-118.
- [6] 何佳,冉舵兵,梁波,等.某连续刚构桥荷载试验[J].中外公路,2020,40(5):149-152.
HE Jia, RAN Duobing, LIANG Bo, et al. Load test of a continuous rigid frame bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 149-152.
- [7] 邓海.桥梁结构挠度理论分析和健康监测研究[J].建筑技术,2016,47(11):1021-1023.
DENG Hai. Theoretical analysis and health monitoring of bridge structure deflection[J]. Architecture Technology, 2016, 47(11): 1021-1023.
- [8] 唐爱华,王尚伟,金凌志,等.光纤光栅静力水准仪对桥梁的挠度监测[J].公路工程,2014,39(5):31-35,67.
TANG Aihua, WANG Shangwei, JIN Lingzhi, et al. The fiber grating static force level on monitoring the bridge deflection measurement[J]. Highway Engineering, 2014, 39(5): 31-35, 67.
- [9] 邵新星,黄金珂,员方,等.基于视觉的桥梁挠度测量方法与研究进展[J].实验力学,2021,36(1):29-42.
SHAO Xinxing, HUANG Jinke, YUAN Fang, et al. Measurement method and recent progress of vision-based deflection measurement of bridges[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(1): 29-42.
- [10] CHEN Z S, ZHANG C, WANG X, et al. Wind tunnel measurements for flutter of a long-afterbody bridge deck [J]. Sensors, 2017, 17(2): 335.
- [11] TIAN L, PAN B. Remote bridge deflection measurement using an advanced video deflectometer and actively illuminated LED targets[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1344.
- [12] 刘春,程起军,李俊义,等.基于地基干涉雷达的大型桥梁动态挠度监测与分析[J].工程勘察,2017,45(1):53-58.
LIU Chun, CHENG Qijun, LI Junyi, et al. Monitoring dynamic deflection of large bridge by using ground-based interferometric radar[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(1): 53-58.
- [13] 涂伟,李清泉,高文武,等.基于机器视觉的桥梁挠度实时精密测量方法[J].测绘地理信息,2020,45(6):80-87.
TU Wei, LI Qingquan, GAO Wenwu, et al. Monitoring the dynamic deflection of bridges using computer vision[J]. Journal of Geomatics, 2020, 45(6): 80-87.

- [14] 熊琛,岑成昱,周海俊,等.基于激光-位置传感器的简支梁桥挠度测量方法研究[J/OL].工程力学:1-12[2023-04-10].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230410.1113.012.html>.
XIONG Chen,CEN Chengyu,ZHOU Haijun,et al.Study on deflection measurement of simply supported girder bridges based on laser-position sensitive detectors[J/OL]. Engineering Mechanics: 1-12[2023-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230410.1113.012.html>.
- [15] 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.
JIA Yan,GAO Zhuoyan,LIU Shuyi,et al.Application of FMCW MMW radar in dynamic deflection monitoring of high-speed railway bridge[J]. Modern Electronics Technique,2022,45(15):15-19.
- [16] 徐郁峰,李一鸣,柯宇.固定式倾角传感器在深层水平位移测量中应用关键技术研究[J].中外公路,2022,42(4):261-266.
XU Yufeng,LI Yiming,KE Yu.Research on key technology of fixed inclination sensor in deep horizontal displacement measurement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(4):261-266.
- [17] MAYUNGA S D,BAKAONE M. Dynamic deformation monitoring of lotsane bridge using global positioning systems (GPS) and linear variable differential transducers (LVDT) [J]. Journal of Data Analysis and Information Processing,2021,9(1):30-50.
- [18] 刘寒冰,罗国宝,吴春利.简支桥梁预应力损失计算方法[J].哈尔滨工程大学学报,2016,37(11):1510-1513.
LIU Hanbing, LUO Guobao, WU Chunli. Calculation method for the prestress loss of a simply-supported bridge [J].Journal of Harbin Engineering University,2016,37(11): 1510-1513.
- [19] 王磊,陈顺超,袁胜涛,等.基于悬挂吊锤的桥梁动挠度测试[J].科学技术与工程,2021,21(21):9108-9115.
WANG Lei,CHEN Shunchao,YUAN Shengtao,et al.Test of bridge dynamic deflection based on suspended hammer [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 9108-9115.
- [20] 王业路,周勇军,高徐军,等.基于预紧弹簧系统的桥梁挠度冲击系数测量方法[J].中国公路学报,2022,35(10):172-182.
WANG Yelu, ZHOU Yongjun, GAO Xujun, et al. Measurement method of the bridge deflection dynamic load allowance based on preloaded spring system[J].China Journal of Highway and Transport,2022,35(10):172-182.
- [21] 王巍,陈晓静,石梦笛,等.基于倾角仪的铁路桥梁挠度检测系统的开发与应用[J].铁道建筑,2021,61(2):40-44.
WANG Wei, CHEN Xiaojing, SHI Mengdi, et al. Development and application of railway bridge deflection detection system based on inclinometer[J]. Railway Engineering,2021,61(2):40-44.
- [22] WANG N B, HE L X, REN W X, et al. Extraction of influence line through a fitting method from bridge dynamic response induced by a passing vehicle[J]. Engineering Structures,2017,151:648-664.
- [23] 刘立卫,隋杰英,刘兆新.高层结构脉动风荷载模拟[C]//第16届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册).2007:98-101.
LIU Liwei, SUI Jieying, LIU Zhaoxin. Simulation of fluctuating wind load on high-rise buildings[C]// Proceedings of the 16th National Academic Conference on Structural Engineering (Volume Ⅲ).2007:98-101.
- [24] 蒋国庆,李道奎.基于Davenport风速谱的火箭及其发射平台风致响应分析[J].国防科技大学学报,2015,37(5):104-109.
JIANG Guoqing,LI Daokui.Wind-induced responses of a rocket and its launching platform based on Davenport wind speed spectrum[J].Journal of National University of Defense Technology,2015,37(5):104-109.
- [25] 鲁丽君,瞿伟廉,李明.桅杆结构脉动风速模拟与风荷载计算[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2010,34(5):1057-1060.
LU Lijun, QU Weilian, LI Ming. Simulation of wind velocity and calculation of wind load for guyed masts[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2010,34(5):1057-1060.