

桥梁行车激励辨识的实验模态方法*

张欣¹, 杜修力²

(1. 郑州大学土木工程学院 郑州, 450001) (2. 北京工业大学建筑工程学院 北京, 100022)

摘要 提出了在运行状态下桥梁行车激励辨识的实验模态方法。在运行模态识别的基础上, 建立结构动刚度模型, 通过对运行状态下结构振动加速度时程的滤波分解, 求得各阶模态的瞬时振幅, 从而反演结构所受各阶模态力时程。运用随机振动基础理论, 计算桥梁各阶活跃振型所对应的等效静荷载大小, 并统计由于结构振动引起的荷载放大系数。结合某 120 m 跨径钢管混凝土系杆拱桥的原型实验说明该方法的有效性。结果表明, 所提方法能够克服荷载辨识过程中由于反分析奇异性所带来的不确定性问题, 使用简便, 适合应用于桥梁结构健康监测系统。

关键词 桥梁; 结构健康监测; 振动; 荷载识别; 实验模态

中图分类号 U446; U441; TU13

引言

桥梁受交通荷载激励, 易发生振动, 从而引起疲劳损伤甚至破坏, 缩短桥梁的使用寿命。然而, 桥梁运行期间的振动状况往往不能够在设计阶段进行准确地预测。虽然, 现行的桥梁结构设计规范已经通过冲击系数来计入车辆荷载的动力效应, 但是该做法主要假设结构振动以基频模态为主。在现实中, 由于受到桥梁结构形式各异、车流密度不均匀且不断变化及行车道的路面状况不可预测等因素的影响, 车辆动荷载的频谱成分以及空间分布均具有比较复杂的特征, 由此产生的结构动力响应成分也多种多样, 可能有别于设计时所采用的假设状态。因此, 有必要直接通过原型实验, 分析桥梁结构的动力响应特性, 并辨识交通动荷载的时域与频域特征, 来了解和评估桥梁的实际振动状况。

行车激励辨识属于随机荷载辨识问题。目前的研究多从板梁理论出发, 考虑车辆荷载的移动效应, 通过优化方法反演结构所受的荷载^[1-9]。此类方法着眼于车桥相互作用的具体过程, 利用有限元模型的精确性, 力求反演荷载的空间位置以及时程演化。分析过程明显受到反分析奇异性的影响。某些频域方法^[10]在辨识荷载具体作用位置时也不例外, 受到反分析奇异性的影响。

然而, 从结构设计角度来看, 影响结构健康寿命的并不是个别车辆的动力效应, 而是使用寿命周期内车辆荷载动力效应的统计规律。从结构健康监测角度来看, 不但车轮与路面的相互作用具有随机性, 车队的排列方式也同样具有随机性。因此, 在通过原型实验来评估结构振动对桥梁健康状况的影响时, 可以不必拘泥于车桥相互作用的具体过程, 而更多地着眼于结构响应与动力荷载的统计规律。

笔者提出桥梁行车激励辨识的实验模态方法。这一方法简单实用, 可以直接应用于桥梁结构的健康监测系统。

1 行车激励等效模态荷载的辨识方法

在实际运行工况下, 桥梁所受行车荷载可分为静力和脉动力两部分, 本文只进行脉动力部分的辨识。一般非比例阻尼情况下, 结构的状态空间控制方程中, 对于每阶模态都有一对共轭特征值 s_j, s_j^* 和特征向量 ϕ_j, ϕ_j^* 使得对应于 k 点输入 $f_k(t)$ 与该输入在 i 点引起的响应 $y_{ik}(t)$ 之间的传递函数为

$$h_{ik}(\omega) = \frac{y_{ik}(\omega)}{f_k(\omega)} = \sum_{j=1}^{2N} \frac{\phi_{ij}\phi_{kj}}{a_j(i\omega - s_j)} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\phi_{ij}\phi_{kj}}{(i\omega - s_j)} + \frac{\phi_{ij}^*\phi_{kj}^*}{(i\omega - s_j^*)} \right) \quad (1)$$

其中: $y_{ik}(\omega)$ 为 $y_{ik}(t)$ 的傅里叶变换; $f_k(\omega)$ 为 $f_k(t)$

* 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室、工程抗震与结构诊治北京市重点实验室开放基金资助项目(EE-SR2010-1); 河南省科技攻关项目(102102310059, 092102310056)

收稿日期: 2012-03-16; 修改稿收到日期: 2012-05-12

的傅里叶变换。

$$\begin{cases} \phi'_j = \frac{1}{\sqrt{a_j}} \psi'_j \\ \psi'_j = \begin{cases} \psi_j \\ \psi_j s_j \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_j = \psi'^T_j [\mathbf{A}] \psi'_j \\ s_j = -\omega_j \zeta_j + i\omega_r \sqrt{1 - \zeta_j^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中: ω_j 为第 j 阶模态圆频率, ζ_j 为相应的阻尼比, \mathbf{A} 为状态矩阵。

考虑到结构健康监测一般是在不间断交通的情况下进行的,而且监测仪器一般只设置在个别位置,因此只能获得较少几个测点的数据。所以在 i 点

$$y_i(\omega) = \sum_{k=1}^m y_{ik}(\omega) = \sum_{k=1}^m \left[\sum_{j=1}^{2N} \frac{\phi_{ij} \phi_{kj}}{a_j (i\omega - s_j)} f_k(\omega) \right] \quad (4)$$

其中: k 为桥上集中车辆荷载的个数。

如果在此时采用实模态留数 $\phi_{ij} \phi_{kj} / m_j$ 代替复模态留数 $\phi_{ij} \phi_{kj} / a_j$, 则有

$$y_i(\omega) = \sum_{j=1}^N \frac{\phi_{ij}}{m_j} \frac{F_j(\omega)}{\omega_j^2 - \omega^2 + i2\zeta_j \omega_j \omega} \quad (5)$$

其中: $F_j(\omega)$ 为第 j 阶模态力。

如果能够通过带通滤波算子 BPFILTER 将 $y_i(\omega)$ 围绕各阶模态的振动频率分解, 获得单模态响应

$$\text{BPFILTER}[y_i(\omega)] \approx y_{ij}(\omega) = \frac{\phi_{ij}}{m_j} \frac{F_j(\omega)}{\omega_j^2 - \omega^2 + i2\zeta_j \omega_j \omega} \quad (6)$$

可以得到模态荷载为

$$F_j(\omega) = \frac{y_{ij}(\omega)}{h'_{ij}(\omega)} \quad (7)$$

其中

$$h'_{ij}(s) = \frac{\phi_{ij}}{m_j} \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + i2\zeta_j \omega_j \omega} \quad (8)$$

在此基础上, i 点模态响应 $y_{ij}(\omega)$ 与相应模态荷载 $F_j(\omega)$ 的时程可以通过傅里叶逆变换求得。

根据随机振动理论, 结构上某一点 i 处动力响应 $y(t)$ 的根方差为

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_y(x_i, \omega) d\omega} = \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \sigma_{y_{ji}}^2} \quad (9)$$

其中: $S_y(x_i, \omega)$ 为结构上 i 点振动时程的功率谱密度函数; j 为振型阶数; $\sigma_{y_{ji}}$ 为结构上 i 处动力响应第 j 阶振型分量 y_j 的根方差。

笔者定义模态荷载的根方差为

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \sigma_{f_j}^2} \quad (10)$$

其中: σ_{f_j} 为第 j 阶振型分量对应模态荷载的根方差。

由于根方差只代表均方振幅, 必须引入峰值因子 μ 表征在一定保证率下的响应振幅。因此, 结构名义最大振幅和名义最大模态荷载为

$$y_{ji} = \mu \sigma_{y_{ji}}, f_j = \mu \sigma_{f_j} \quad (11)$$

如果定义 $y_{jm} = \mu \sigma_{y_{jm}}$ 为交通荷载脉动力引起的第 j 阶振型的名义最大振幅, 则等效惯性力为

$$f_{jm}^e = m_j \omega_j^2 \mu \sigma_{y_{jm}} = m_j \omega_j^2 y_{jm} \quad (12)$$

其中: m_j 为第 j 阶模态质量。

按照式(10)可得到交通荷载脉动力引起的第 j 阶振型的总等效惯性力。在此基础上, 考虑交通静荷载的名义最大值 f_s , 可以定义两个特征系数。

第 j 阶模态荷载的动力放大系数为

$$\beta_a = \frac{f_{jm}^e}{f_j} \quad (13)$$

第 j 阶模态荷载的动静力比

$$\beta_b = \frac{f_j}{f_s} \quad (14)$$

前者反应结构的整体动力学特性, 表明由结构振动引起的动荷载放大效应; 后者反应路面状况和车辆状况, 表明由于路面不平整或汽车减震不理想而产生动荷载的强弱。

2 原型实验

2.1 桥梁结构及交通状况

实验桥梁(图 1)为钢管混凝土系杆拱桥, 跨径 120 m。钢管混凝土主拱圈为 1400 * 24 钢管, 内部浇筑 C40 混凝土。系梁为开口钢箱梁, 内设预应力钢绞线, 并填充 C20 砂浆。两拱系梁间设置钢横梁, 横梁间距 5 m。横梁与系梁刚接。混凝土行车道板与横梁结合。两拱间距 16.4 m。拱间设 5 根风撑。行车道宽 14.0 m, 为双向 4 车道。拱外两侧各设 3.75 m 非机动车道。

该桥位于城市主要道路, 交通较为繁忙, 目前桥上通行车辆为小型货车和小型客车。

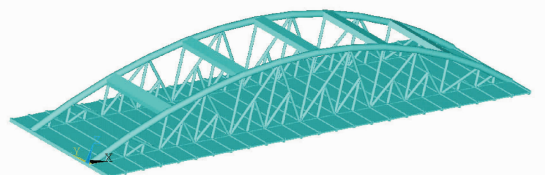


图 1 桥梁有限元模型

2.2 实验步骤

运行模态实验与荷载辨识实验为同一实验。实验中设置 14 个测点,分别位于两拱系梁的轴线处,从支点到支点等间距布置,即测量点位于 $0, 1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6L, L$ (L 为跨径)处。采用 4 枚 941B 超低频加速度传感器连接无线发射器,其中 2 枚设置于桥梁 $1/6L$ 处作为参考点,测量竖向加速度,其余两枚移动,测量系梁相应点位处的竖向和横桥向加速度。

2.3 实验数据处理

运行模态辨识方法采用频域方法:全局性有理分式多项式拟合方法^[11]。得到桥梁模态信息如表 1 所示。因篇幅关系,振型图未绘出,而只在表中说明振型类型。表中振型为拱的系梁振型,代表拱圈竖向振动形成的桥梁总体竖向和扭转振型。在有限元分析中知道,拱圈上部横桥向摆动的振动模态在系梁处也具有竖向和扭转成分。该部模态则通过实验与计算模态频率及振型信息比对予以滤除。

表 1 桥梁结构的实验模态结果

编号	f/Hz	阻尼比/%	振型类型
1	1.68	1.07	竖向 1 阶
2	1.85	0.76	扭转 1 阶
3	2.02	1	竖向 2 阶
4	2.29	0.57	扭转 2 阶
5	2.87	0.8	竖向 3 阶
6	3.16	0.78	扭转 3 阶
7	3.63	1	竖向 4 阶
8	4.08	0.67	扭转 4 阶

实验中测到有些系梁振型具有水平分量,但是幅值较小

下面以第 2 测点,即 $1/6L$ 处测点为例说明模态荷载辨识过程。

根据式(8),利用模态实验结果可以得到该点的动刚度。图 2 为第 2 测点处第 2 阶模态动刚度。

图 3(a)为第 2 测点处滤除扭转成分之后得到的纯竖向模态振动的加速度时程曲线,(b)图为其频谱图。从图中可以看出,桥梁 1 阶竖向模态振动幅度微弱,而第 2,3 阶模态为主要成分。

图 3 为通过 Butterworth 带通滤波得到的第 2 阶模态振动的加速度时程曲线,其频谱成分由图 4 给出。

通过换算,可以得到如图 4 所示的第 2 测点处第 2 阶模态的位移时程及其频谱。图 4(c)还给出

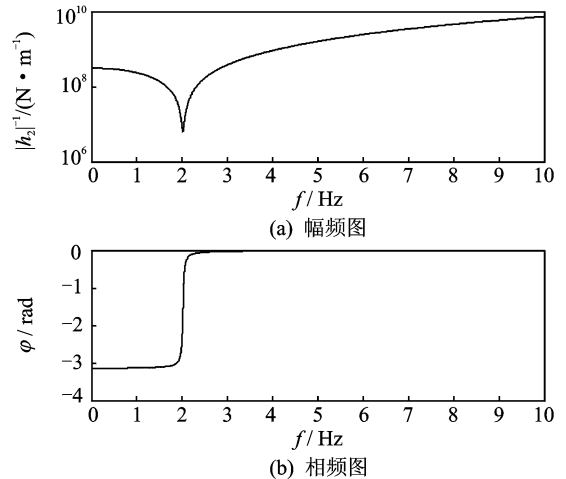


图 2 第 2 测点处第 2 阶模态动刚度

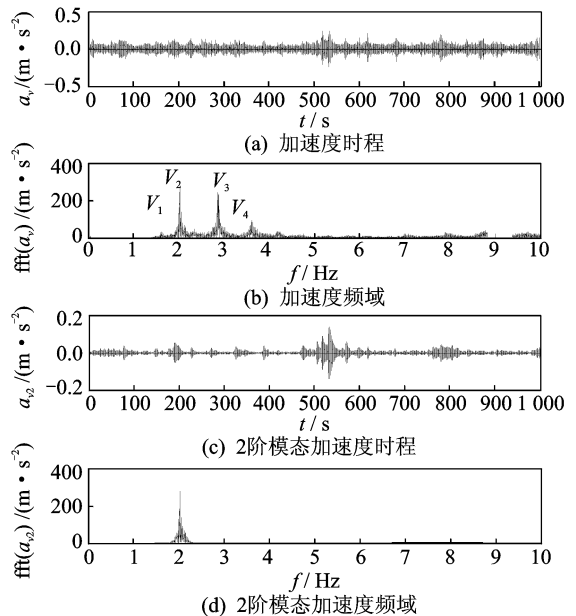


图 3 第 2 测点处竖向模态加速度

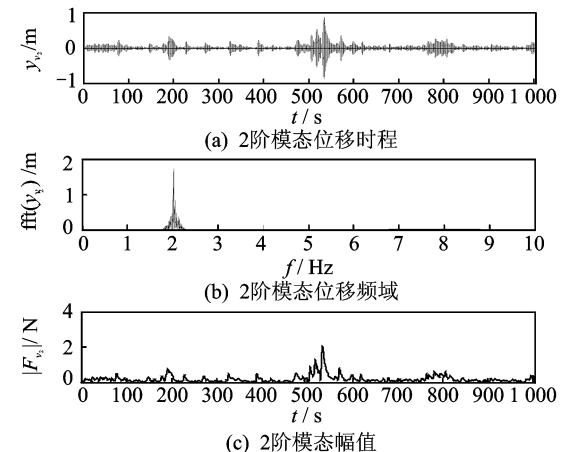


图 4 第 2 测点处第 2 阶竖向模态时程

了第 2 阶模态的振幅时程曲线。该曲线表示振型曲线峰值处的位移振幅值,即位移模态振幅。

利用图 4 中的结果以及式(7)可以得到引起第 2 阶竖向模态振动的模态荷载时程,如图 5(a)所示。图 5(b)给出该模态荷载的频谱成分。

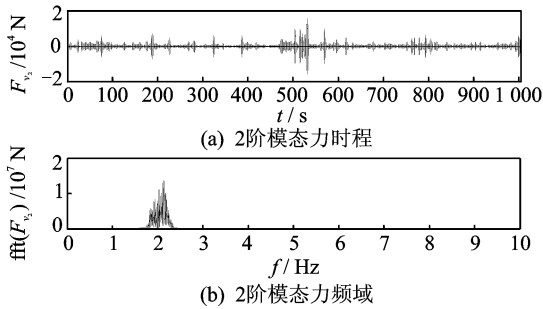


图 5 由第 2 测点信号得到的第 2 阶竖向模态荷载 (模态动荷载 5.37 kN,等效静荷载 63.0 kN)

2.4 实验结果及讨论

表 2 列出各测量断面处各阶模态的模态荷载。表中名义动荷载幅值与等效静荷载幅值均设式(11)中峰值因子为 2.2,对应保证率约为 99%。等效静荷载幅值按照式(12)计算,其结果为在结构振动的情况下等效惯性力的幅值大小。

由模态荷载的正交性,根据式(10)可得峰值因子 $\mu=2.2$ 时模态荷载的根方差如下:

$$\text{动荷载 } f = \mu\sigma_f = 5.1 \text{ kN}$$

$$\text{等效惯性力 } y = \mu\sigma_y = 71.4 \text{ kN}$$

该数值为测量时间段内 99%保证率时,动荷载

表 2 荷载辨识实验模态结果

模态	名义动荷载幅值(等效静荷载幅值)/kN					名义动荷载幅值平均值	等效静荷载幅值平均值	动力放大系数
	1/6L 断面	2/6L 断面	3/6L 断面	4/6L 断面	5/6L 断面			
V ₁	2.04(18.60)	1.45(11.77)	1.28(11.49)	1.37(9.96)	1.53(11.37)	1.534	12.638	8.2
R ₁	1.38(27.95)	0.77(15.65)	0.68(16.36)	0.57(14.68)	0.65(12.49)	0.810	17.426	21.5
V ₂	5.37(63.00)	3.00(32.05)		2.81(30.38)	2.36(27.10)	3.385	38.133	11.3
R ₂	2.66(49.59)	1.19(22.15)		1.33(24.41)	1.15(21.56)	1.583	29.428	18.6
V ₃	2.13(30.97)		2.24(34.49)		2.17(31.69)	2.170	32.383	14.9
R ₃	1.43(27.23)		0.93(15.38)		0.88(18.25)	1.080	20.287	18.8
V ₄	1.70(29.41)	1.71(30.44)		1.59(26.46)	1.49(22.43)	1.623	27.185	16.8
R ₄	0.65(11.84)	0.57(7.83)		0.50(7.76)	0.92(15.30)	0.66	10.683	16.2

表中 V 为竖向振型,R 为扭转振型;表中未标明数据位置为振型驻点处;由于分批实验,表中不同断面在不同时刻测量

与等效静荷载的最大幅值(表中不同断面在不同时刻测量)。由于未能同时测量瞬时交通静荷载,不能精确计算式(14)中模态荷载的动静力比 β_0 。

结构阻尼比较小,在持续交通荷载作用下,桥梁结构振动幅度较大,从而产生较大的动力放大效应。从表中可以看出,此桥竖向一阶模态的模态荷载较小,而竖向二阶模态的模态荷载最为显著,在测量时间段内模态等效静荷载名义幅值的均值为 38.1 kN;扭转一阶模态的动力放大倍数最大, $\beta_0=21.5$ 。

3 结束语

笔者提出的桥梁行车激励辨识的实验模态方法能够避免荷载辨识过程中的反分析奇异性问题,从而可以依据少量几个测点的振动监测时程数据来获得桥梁所受车辆动荷载的时域和频域特征,同时还能够得到桥梁自身的结构动力学特性,如动力放大系数,评估桥梁的车激振动状况,作为桥梁结构健康状况判别的备选手段。该方法使用简便,适合应用于桥梁健康监测系统。

参 考 文 献

[1] Yu L, Chan T H T. Recent research on identification of moving loads on bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305:3-21.

[2] Zhu X Q, Law S S. Practical aspects in moving load identification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 258(1):123-146.

[3] Pinkaew T, Asnachind P. Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicles from the bending moments of bridges [J]. Engineering Structures, 2007, 29:2282-2293.

[4] Ashebo D, Chan T H T, Yu L. Evaluation of dynamic loads on a skew box girder continuous bridge, part I: field test and modal analysis [J]. Engineering Structures, 2007, 29:1052-1063.

[5] 李忠献,陈锋,王波. 基于 BP 神经网络的桥上移动荷载分阶段识别方法[J]. 工程力学,2008, 25(9):85-92.

Li Zhongxian, Chen Feng, Wang Bo. A BP neural network-based stage identification method for moving

- loads on bridges[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(9):85-92. (in Chinese)
- [6] 姜增国,孙艳茹. 三次样条函数在桥梁移动荷载识别中的应用[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(6):124-126.
Jiang Zengguo, Sun Yanru. Application of cubic spline function to moving load identification on a bridge[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(6):124-126. (in Chinese)
- [7] 余岭,朱军华,陈敏中,等. 基于矩量法的桥梁移动车载识别试验研究[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(1):16-20.
Yu Ling, Zhu Junhua, Chen Minzhong, et al. Experimental study on identification of moving vehicle loads on a bridge based on moments method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(1):16-20. (in Chinese)
- [8] 侯秀慧,邓子辰,黄立新. 基于精细积分方法的桥梁结构移动荷载识别[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(9):142-154.
Hou Xiuhui, Deng Zichen, Huang Lixin. Dynamic moving load identification for bridge structures based on precise integration method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(9):142-154. (in Chinese)
- [9] 秦远田,陈国平,张方. 二维分布载荷识别的矩量方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(1):34-41.
Qin Yuantian, Chen Guoping, Zhang Fang. Moment method of two-dimension distributed load identification [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(1):34-41. (in Chinese)
- [10] Parloo E, Verboven P, Guillaume P, et al. Force identification by means of in-operation modal models[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 262:161-173.
- [11] Richardson M, Formenti D. Global curve fitting of frequency response measurements using the rational fraction polynomial method [C]// *The Third IMAC Conference*. Orlando, FL; [s. n.], 1985:1-5.



第一作者简介:张欣,男,1971年1月生,博士、副教授。主要研究方向为结构动力学。曾发表《Frequency modulated empirical mode decomposition method for the identification of instantaneous modal parameters of aeroelastic systems》(《*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*》2012, Vol. 101)等论文。

E-mail: zhangxin@zzu.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊入选 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,为双月刊,每逢双月末出版,每本定价 20 元,全年 120 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016

电话:(025)84893332

传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn

网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn

