

基于锤击法的弯连续刚构模型桥动力试验

周勇军 贺拴海 宋一凡 赵小星 杨 昀

(长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室 西安, 710064) (交通部公路科学研究所 北京, 100088)

摘要 利用力锤冲击激励对室内弯连续刚构模型桥进行了模态试验,研究了基于锤击激励法模态试验的一些关键技术,采用模态分离技术进行了传感器的优化布置,同时建立了空间有限元模型进行了理论计算。理论计算值与试验值对比分析表明,两者结果最大相差不超过 8%。这说明锤击法的模态试验是成功的,研究结果可为同类空间结构的模态试验分析提供参考。

关键词 桥梁工程 连续刚构 锤击法 模态试验
中图分类号 U 446. 1

引 言

试验模态参数识别可分为时域模态参数识别法和频域模态参数识别法。目前,在桥梁工程上应用较多的是频域法,根据不同激振方式,它又分为环境激励法^[1]、力锤^[2]或者火箭激励法。基于环境激励的试验模态分析技术是通过结构在自然环境下的振动响应来进行信号处理,在此条件下虽然能得到共振频率下的振型,却并没有获得系统输出对输入的传递函数,所以该试验方法并不是严格意义下的频域模态参数识别方法,因此不能建立结构严格的动力学模型,但对于大型的实桥结构物,在很难进行人工激励的情况下采用这种试验还是比较有意义的。在试验数据处理上,目前常用的动态数据分析软件有北京东方振动和噪声技术研究所的 INV306 分析软件^[2]、英国的 CDS 模态分析软件^[3]、桥梁模态试验专用程序 QISYM T^[1]以及 LMS 公司生产的 CADA-PC 模态分析软件等^[4]。

结构的动力特性,通常可通过有限元计算和试验模态分析两种方法获得。对于重要结构一般要经过试验对理论分析进行验证。通过试验模态参数修正有限元计算模型或进行结构的动力修改是目前研究的热点问题之一^[5-8]。本文结合某室内弯连续刚构模型桥的动力试验,针对锤击法模态试验技术在大型土木结构中的应用特点,利用模态分离技术对弯桥结构的空

1 锤击试验原理

模态试验最简单的激励方式是采用装有力传感器的敲击锤对试验件进行冲击激励,其传递函数的表达式为^[4]

$$H_{ij}(j^k) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{r_{ijk}}{j^k - \lambda_k} + \frac{r_{ijk}^*}{j^k - \lambda_k^*} \right] \tag{1}$$

其中: $H_{ij}(j^k)$ 为响应自由度 i 和参考自由度 j 之间的传递函数; N 为在考虑的频率范围内提供给结构的动态响应的振动模态数; r_{ijk} 为模态 k 的留数值; λ_k 为模态 k 的极点值; * 表示复共轭

极点值为

$$\lambda_k = W_k + jk_{dk} \text{ 或 } \lambda_k = -\gamma_k k_{nk} + jk_{nk} \sqrt{1 - \gamma_k^2} \tag{2}$$

其中: k_{dk} 为模态 k 的有阻尼固有频率; W_k 为模态 k 的阻尼因子; k_{nk} 为模态 k 的无阻尼固有频率; γ_k 为模态的阻尼比

极点、固有频率(有阻尼的和无阻尼的)、阻尼因子或阻尼比、模态振型以及留数通常被称为模态参数。模态参数一旦估计出来,可以通过软件的动画显示功能形象地显示模态振型,以此来描述结构的振动特性。

2 试验模型

图 1 为某高墩大跨径弯桥的缩尺模型,其跨径布置为 3.5m+ 6.5m+ 3.5m,单箱单室截面,平面曲

* 国家西部交通建设科技资助项目 (编号: 2002 318 223 29)。
收稿日期: 2006-03-22; 修改稿收到日期: 2006-07-17
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率半径为 20m,模型墩顶处梁高 37cm,跨中和支点处梁高 17cm,两主墩高均为 3m,上下部混凝土标号均为 C40,采用悬臂拼装方法施工。



图 1 模型总体布置

3 测试仪器及测点布置

3.1 测试仪器

信号采集系统采用美国生产的 DEW E 系列动态仪,分析系统为 LMS 公司生产的 CADA-PC 模态分析软件。传感器为配套的 K-BEAM 电容式加速度传感器,其特点是重量轻、灵敏度高,谐振频率为 1.4 kHz,测量范围为 ± 2 g,灵敏度为 1 005 mV /g,横向敏感性为 0.8%,冲击力锤测量范围为 250 kN,灵敏度为 2.24 pC /N,线性度为 ± 2.0% F.S,脉冲激振力为 0~ 227 kg。其测试框图如图 2 所示。

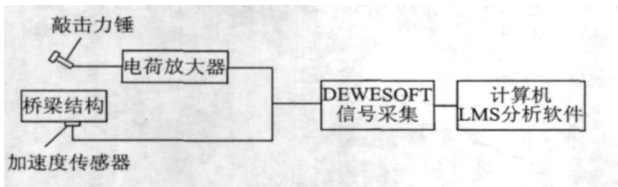


图 2 测试流程图

3.2 测点布置

动态测点布置前应根据理论计算的振型图而选择在振型曲线峰值较大处,避免将测点布置在振型曲线上的“节点”处(为此试验前首先采用有限元方法进行了结构动力特性分析),同时测点在平面上布置时,尽量设置在结构各段的刚度中心处。本次试验在边跨四等分点、中跨六等分点以及桥墩的三等分点处布置了传感器,其测点布置如图 3 所示。

试验时受到传感器数量及配套设备的限制,本模型试验没有采用复杂结构模态试验中先进的多参考点法(MIMO),这里利用单点激励多点拾振的模式分离法^[8]的思想,充分利用激振点和测量点的选择来孤立和分离模态,使复杂的多模态(包括密集模态)桥梁结构表现出简单模态的性态。具体实施

时,在主梁上的 7 号点竖向激励(距离主桥墩 101 cm),在主梁上竖向拾振,在桥墩上纵向拾振就可以得到桥梁的竖向振动特性,在主梁上的 9 号点(距离主桥墩 217 cm)横向激励在其他部位横向拾振就可以得到全桥横向振动特性,在主桥墩的 11 点(主桥桥墩)进行纵向激励,其他部位纵向拾振就可以得到桥梁的纵向振动特性。试验证明在以上地点激励结构的响应较大,可以获得较好的模态。

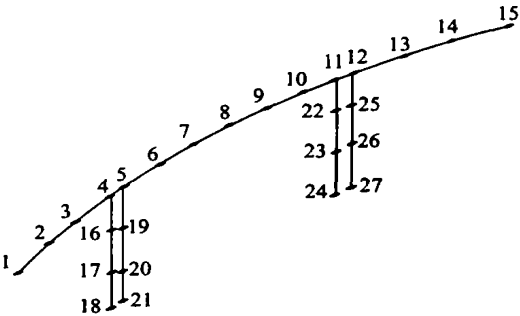


图 3 测点布置示意

4 试验主要技术

4.1 采样频率^[9]

为避免产生频率叠混现象,由 shannon 定理可知,采样频率必须大于最大分析频率的 2 倍,即

$$f_s \geq 2f_{\max} \tag{3}$$

其中: f_s 为采样频率; f_{\max} 为结构振动的最大频率(分析频率)。

但简单地按分析频率的 2 倍确定采样频率,则有可能导致力信号采样精度很低,甚至会采样不到力信号,同时,采样频率的设置对频率分辨率有较大影响。频率分辨率可表示为

$$\Delta f = \frac{1}{T_c} = \frac{f_s}{N_s} \tag{4}$$

其中: T_c 为力锤脉冲持续时间; N_s 为采样点数。

由式(4)可知,对一定的采样点数而言,过高的采样频率会导致频率分辨率降低,其结果一方面对某些密集模态的频率识别会产生“淹没”效应,另一方面会对模态阻尼的分析精度产生很大影响。合理地设置采样频率,就是找到一个合理的切入点,来满足时域和频域分析的需要。综合以上各项指标并结合试验需求的前 3 阶模态,本试验选取的采样频率为 100 Hz。

4.2 分块数及分析点数的选取

在数据处理过程中,需要对数据的平稳性进行检验,而平稳数据与非平稳数据的分析方法是完全

不同的。在谱分析中分析点数的选取是比较重要的，采用较高的分析点数对提高频率和阻尼的分析精度都是有利的。分析点数的选取主要考虑两方面的因素：一是系统的采样频率；二是结构的各振动模态分布的密集性，这一点也需要事先进行结构的有限元模态分析。根据以上特性，本次试验采用 1 024 点分块作谱，多块平均（三次线性平均）的方法作出谱分析图，以此来分析桥梁强迫振动响应的频率^[10]。

4.3 力锤及力窗的选取

力锤锤头的材料硬度决定了力脉冲宽度及其频谱宽度。锤头越坚硬，质量越轻，冲击时间越短，脉冲宽度越窄，频谱就越宽。本次试验因为频率范围比较宽（6 Hz~ 40 Hz）而采用了软质橡胶头。冲击能量大的力锤。另外，力窗的选取对测试结果也有一定的影响。加力窗的目的是为了增强信噪比，在脉冲能量较低的情况下加力窗尤为必要。本次试验采用了力窗函数进行处理。

5 试验结果分析

将 DEW ESO FT 收集到的传递函数输入到模态分析软件中，进行模态分析，其竖向测试时频响应函数如图 4 所示，结构 3 个方向的前几阶实测振型如图 5 ~ 7 所示。

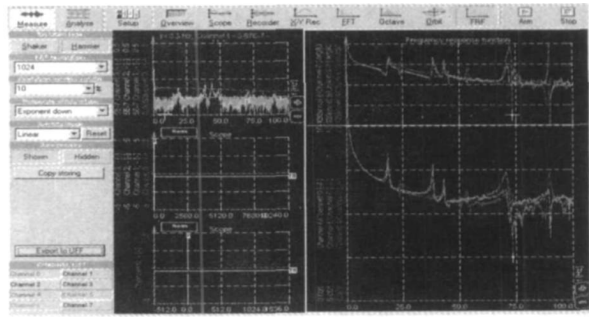
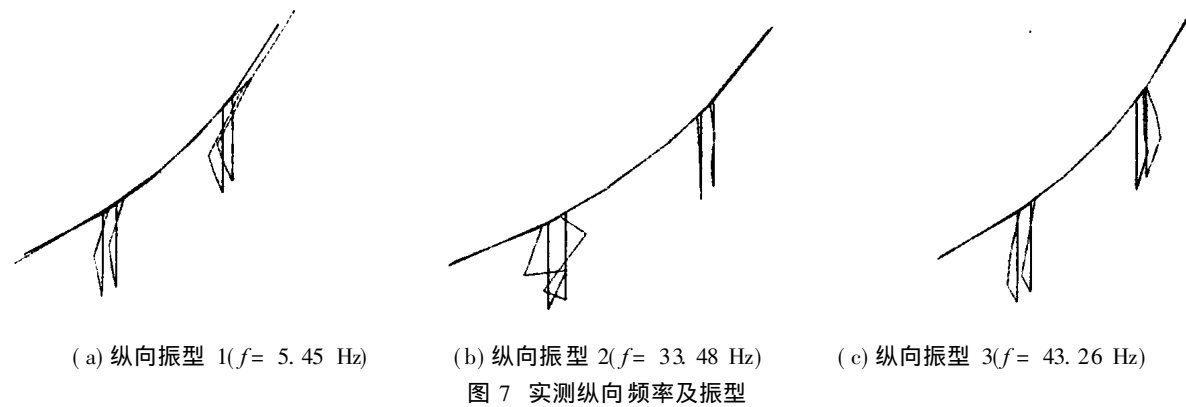
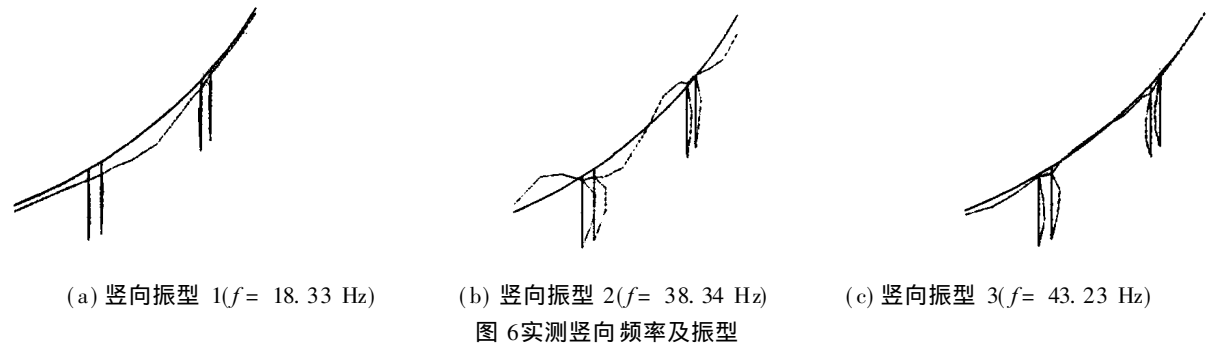
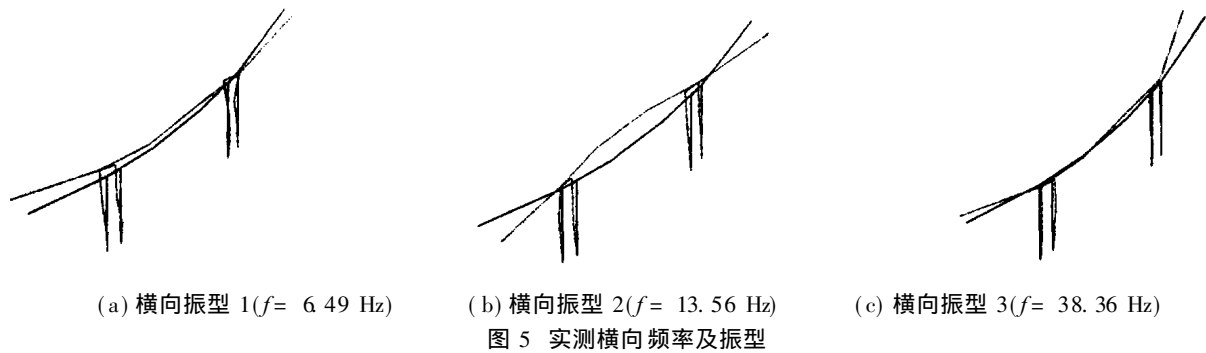


图 4 竖向测试的频响函数



采用有限元法计算结构动力特性时,主梁和桥墩均采用空间梁单元模拟并考虑剪切效应的影响,上部结构每梁段的质量和惯矩取其相邻两截面的平均值,并忽略钢筋和管道的影响,主梁 0号块横隔板计入其刚度和质量。主梁和桥墩连接处用刚臂耦合处理,两个桥墩墩底固接,两边墩仅限制其竖向位移,其他方向不作约束。其计算结果及试验结果对比值如表 1所示。

表 1 理论值与实测值对比

阶次	理论值 /Hz	实测值 /Hz	误差 /%	振型特点
1	4. 40	5. 45	24	桥墩纵弯,主梁纵飘
2	7. 06	6. 49	8	桥墩反对称横弯
3	8. 03	/	/	桥墩对称横弯
4	14. 59	13. 56	7	主梁对称横弯
5	18. 23	18. 33	1	主梁对称竖弯
6	33. 14	33. 48	1	主梁反对称竖弯,桥墩同向纵弯
7	36. 19	38. 36	6	主梁反对称横弯,桥墩反向侧弯
8	37. 51	38. 46	3	桥墩对称纵弯,主梁对称竖弯
9	39. 78	/	/	桥墩双臂对称纵弯,主梁对称竖弯
10	44. 20	43. 26	2	桥墩对称纵弯,主梁对称竖弯

从表中可以看出,在采样频率为 100 Hz的条件下,得到了较理想的频率范围,即 4~ 40 Hz

对比锤击法的模态试验结果和有限元分析结果,除了纵向第 1阶频率有较大的误差(可能是由于边墩支座的纵向约束对低频的影响要比高频的影响大的缘故)外,其余实测值与理论值相差最大为 8%,而且振型图与理论计算也是一致的。分析表明,采用力锤激励对弯连续刚构模型桥进行模态试验是成功的。

6 结 论

(1) 利用力锤激励对复杂桥梁结构模型进行了单点激励、多点拾振的模态试验,该方法是成功的。锤击法模态试验操作简单,不需要激振器和功率放大器,具有较好的信噪比,只要解决了力锤的问题,

在工程中具有重要的应用价值。
(2) 本文为空间弯连续刚构桥的模态信号采集提供了一套成功的、简便可行的移动传感器量测方法。模态分离技术法可推广到具有空间振动特性的结构模态信号采集和量测中去。
(3) 本文未作理论模型参数修正,有限元计算结果与测试结果间就具有较好的吻合程度,不仅证实了这种试验方法的可行性,也说明了理论计算仿真模型以及设计参数取值的正确性。

参 考 文 献

[1] 田仲初,陈常松,郑万汭. 钢箱提蓝拱桥整桥模态试验研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23(2): 44-49.
[2] 沈松,应怀樵,雷速华,等. 用锤击法和变时基技术进行黄河铁路桥的模态试验分析[J]. 振动工程学报, 2000, 13(3): 492-495.
[3] 黄怀德,郎德民,黄卫瑜,等. 多点激振系统的模态试验技术[J]. 导弹与航天运载技术, 1999, (6): 23-31.
[4] 刘兵. LMS模态分析软件在齿轮组件模态试验中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(2): 43-51.
[5] 刘文峰,宿健,何玉珊,等. 32m简支铁路桥横向振动的研究分析[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 57-60.
[6] 周勇军,赵小星,宋一凡,等. 连续梁桥模态分析与试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(3): 57-60.
[7] 周勇军,赵小星,贺拴海,等. 弯钢箱梁桥的动力分析及模态试验[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2005, 26(4): 20-24.
[8] 张宏斌,宋广君,张哲,等. 模态分离法在拱桥动载试验中的应用[J]. 公路交通科技, 2005, 22(1): 66-68.
[9] 黄晓峰. 脉冲锤击法中采样频率设置探讨[J]. 常德师范学院学报: 自然科学版, 2003, 15(2): 43-45.
[10] 刘汉夫,柯在田. 桥梁动态测试与数据分析中的关键技术[J]. 铁道工程学报, 2000(3): 33-35.



第一作者简介: 周勇军 男, 1978年 6 月生,博士、讲师。主要研究方向为桥梁结构动力及抗震分析。曾发表“在役桥梁结构延性系数的动力评价方法”(《长安大学学报: 自然科学版》2005年第 4 期)等论文。
E-mail yongjunzhou@ 126.com

Dynamic Test of Curved Continuous Rigid Frame Bridge Model Using Hammer Excitation Method

Zhou Yongjun He Shuanhai Song Yifan Zhao Xiaoxing Yang Yun

(¹ Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University Xi'an, 710064, China)

(² Research Institute of Highway, Ministry of Communication Beijing, 100088, China)

Abstract In this paper the modal test using hammer excitation method was carried out for an indoor curved continuous rigid frame model. Some key techniques was discussed and optimal sensor placement was presented. Simultaneously, space finite element model was set up to calculate the theoretical modals, the results of which were compared with the experiments ones. They had an error of no more than 8% . It showed that the modal test using hammer excitation method was successful. The method presented can give reference to the similar spatial structure's modal test.

Keywords bridge engineering continuous rigid frame hammer exciting method modal test

Modal Testing Method for Frequency-Intensive Structures

Wang Zhuo Yan Weiming He Haoxiang Yu Ruifang

(Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing

University of Technology Beijing, 100022, China)

Abstract Based on the free response of structures, the algorithm for the optimal position of the single-point impulsive exciting is presented. The physical meaning of the position optimization is intensifying the participation of the identified mode and inhibiting the participation of its adjacent modes. The ITD modal testing method based on the position optimization of the single-point impulsive excitation is presented, and its block diagram is established. A numerical example shows that the method is effectively and has high engineering value. It can identify the parameters for frequency-intensive structures. The exciting situation is easily realized in the practical engineering.

Keywords intensive frequencies modal testing exciting position optimization ITD method

Vibration Isolation Study on SSRF Storage Ring Magnet Support

Bu Lingshan^{1,2} Zhao Zhentang¹ Yin Lixin¹ Liu Guimin¹ Du Hanwen¹

(¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences Shanghai, 201800, China)

(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing, 100089, China)

Abstract A vibration isolation support system using spring-damper isolators were designed. Its performance was measured on the magnet support prototype. The test results show that compared with stiff support system, this one can effectively isolate the ground motion over 7Hz (vertical) and 4Hz (lateral). Because the ground motion in low frequency range is amplified, the total vibration in 1-100Hz was not attenuated. This implies further active vibration control system should be used to control the amplification in low frequency before the system could be practically used.

Keywords storage ring magnets supports vibration isolation vibration measurement analysis