

# Finite Element Analysis and Modal Test of Dynamic Properties of the Large Span Assembly Type Steel Bridge during the Guide Beam Pushing Process

Yingchang Duan, Zheng Wang, Hu Liu, Xin Tan

The Army Engineering University of PLA, Xuzhou Jiangsu  
Email: duanyingchang@126.com

Received: Jun. 25<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jul. 11<sup>th</sup>, 2018; published: Jul. 19<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Structure vibration of the large span assembly type steel bridge during the guide beam pushing process is obvious. The dynamic analysis model based on the spatial beam element and spatial shell element of the typical condition in the guide beam pushing process is established by the finite element software. The wireless ambient excitation modal test system is employed to test the natural vibration characteristics of the structure. Then the dynamic test results are compared with the finite element calculation results, which derives the dynamic properties of the structure and verifies the correctness of the finite element model. The study results of this paper could provide reference for dynamic modeling, dynamics analysis, vibration control, wind-resistance design etc. of this type of bridge.

## Keywords

Guide Beam Pushing Process, Dynamic Property, Finite Element Analysis, Ambient Excitation, Modal Test

---

# 大跨度拼装式钢桥导梁推送过程动力特性有限元分析及模态试验

段应昌, 王 铮, 刘 虎, 谭 欣

陆军工程大学, 江苏 徐州  
Email: duanyingchang@126.com

## 摘要

大跨度拼装式钢桥导梁推送过程中结构振动明显，通过有限元软件建立了导梁推送过程典型工况的空间梁壳动态分析模型，采用无线环境激励模态测试系统进行了结构自振特性测试，将动态试验结果与有限元计算结果进行对比分析，确定了结构的动力特性，并验证了有限元模型的正确性，可为进一步研究该类型桥梁的动态建模、动力学分析、振动控制、抗风设计等提供参考。

## 关键词

导梁推送过程，动力特性，有限元分析，环境激励，模态试验

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

某型大跨度拼装式钢桥采用内置导梁牵引架设，单桥跨度大，机械化作业程度高，架设速度快而在新一代军用桥梁中脱颖而出[1]。该桥架设过程步骤较多，其中导梁推送过程结构振动较大，肉眼能够明显看到，为提高架设的安全性和可靠性，急需对该过程进行动力学分析，对导梁推送过程的典型工况进行模态分析是研究该桥动力响应及振动控制的基础。桥梁结构的模态由其结构形式、材料等固有特性决定，与外荷载无关[2]，且该桥结构尺寸较大，因此可采用环境激励法对其典型工况进行现场模态试验，然后通过有限元法计算该工况的模态参数，再将模态试验结果与计算结果进行对比分析，由此确定结构的动力特性。

## 2. 导梁推送过程模态分析典型工况

由于大跨度拼装式钢桥导梁推送过程结构尺寸较大，为测得结构长度固定时的高阶模态参数，需布置较多测点，因此测试时间较长。为减小模态试验过程中的安全风险，试验时未将导梁推送到终点位置。

图1为导梁推送过程模态分析典型工况，其中导梁伸出桥跨的长度为20 m。

## 3. 有限元动态分析模型

### 3.1. 有限元动力学基本方程

根据有限元理论，结构系统的动力学基本方程为[3]：

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

其中， $y(t)$ ， $\dot{y}(t)$ 和 $\ddot{y}(t)$ 分别是结构系统的节点位移向量、速度向量和加速度向量； $M$ ， $C$ ， $K$ 和 $F(t)$ 分别是质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点荷载向量。

忽略阻尼的影响，采用有限元法计算结构的固有频率和振型的公式为：

$$(K - \omega_i^2 M)\varphi_i = 0 \quad (2)$$

其中,  $\omega_i$  为结构的第  $i$  阶固有频率,  $\varphi_i$  为结构的第  $i$  阶振型向量。

### 3.2. 有限元模型

有限元建模时对结构进行了合理简化, 大跨度拼装式钢桥的上弦杆、下弦杆、斜腹杆、竖杆和横梁用 BEAM188 单元模拟, 该单元可赋予杆件的实际截面形式; 采用 SHELL43 单元模拟桥面板; 小纵梁、销齿、滚轮和加宽板等以集中质量的形式均布施加于所作用的结构单元; 桥跨和导梁的接头则根据不同的约束形式采取相应的耦合方式进行模拟。导梁推送过程典型工况有限元模型如图 2 所示, 该模型的边界条件为在结构与滚轮组接触位置处约束 Y、Z 方向位移, 销齿轮位置处约束 X 方向位移。

## 4. 典型工况自振特性测试

### 4.1. 测试方法

环境激励是一种天然的激励方式, 它利用自然界各种因素所引起的微小而不规则的振动(脉动)来确定结构的自振特性[4] [5] [6] [7]。环境激励法无需贵重的激励设备, 能够避免人工激励可能造成的结构损伤, 不影响结构的正常使用; 而且环境激励包含较丰富的频率成分, 适用于测量大型钢结构桥梁的自振特性[8] [9] [10]。因此, 采用环境激励法能够较便利的测出导梁推送过程典型工况的自振特性。

### 4.2. 测试仪器及测试参数

大跨度拼装式钢桥导梁推送过程典型工况的结构悬臂较大, 只能少数试验员上桥, 且布线不便, 长时间试验存在一定的安全隐患。因此, 信号采集和分析系统采用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 DH5907A 无线环境激励实验模态测试分析系统, 该系统利用无线 WiFi 实时传输数据, 能够快速进行大型桥梁、建筑、机械设备等不易实现人工激励的结构的实验模态分析。

测试参数: 设置采样频率为 100 Hz, 分析频率即自动确定为 39.063 Hz; 平均方式为线性平均, 平均次数为 4 次; 时域点数取为 1024 点, 频域线数即为 400 条; 工程单位为 mm/s。试验中一共有 6 个采集器, 需分多批次进行测量, 图 3 为现场测试相关图片。



Figure 1. Typical condition of the guide beam pushing process

图 1. 导梁推送过程典型工况

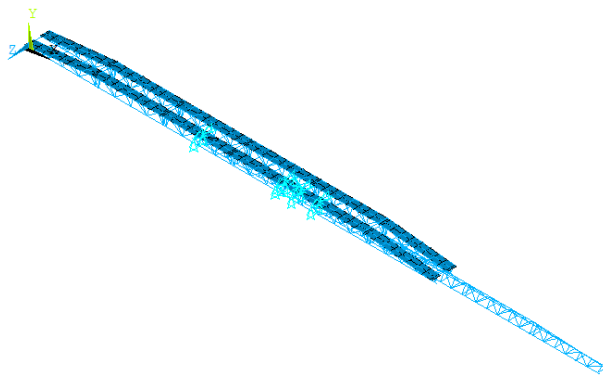


Figure 2. Finite element model of the typical condition of the guide beam pushing process

图 2. 导梁推送过程典型工况有限元模型

### 4.3. 测点布置

为准确获得导梁推送过程典型工况的竖向振动、扭转振动和横向振动的动力特性，并考虑测试方案操作的难易程度，测量中将采集器布置在桥跨两车辙的桥面板上，导梁伸出桥跨的部分则将采集器布置于下弦杆上；固定参考点应避开主要低阶振型的驻点位置[11] [12]。测点布置如图 4 所示，试验共布置 62 个测点，分 13 组进行测试，其中 C1 为固定参考点。

### 4.4. 测试结果

在上述环境激励测试方案下，可得到各测点竖向和横向振动速度的时域数据和频谱数据。图 5 为第一组测试时测点 C2 的竖向和横向振动速度时程曲线，由于导梁推送过程典型工况的结构属于小阻尼系统，当结构的固有频率  $\omega$  与环境激励频率  $\tilde{\omega}$  接近时将会出现“拍”的现象[13]，从图 5 中可明显看到这一现象，说明本文的测试方法能得到进行结构动态分析的良好测试信号。图 6 为第一组测试时参考点 C1 和测点 C2 竖向和横向振动频谱图，图中 1-1 和 2-1 为参考点 C1 和测点 C2 的竖向振动频谱图，1-2 和 2-2 为参考点 C1 和测点 C2 的横向振动频谱图。由图 6 可知，试验测试的结构在低频段频谱图中有明显的峰值，测试结果能够较好地反应出结构低频段的自振特性，试验结果是有效的。



Figure 3. Related pictures of the test scene  
图 3. 现场测试相关图片

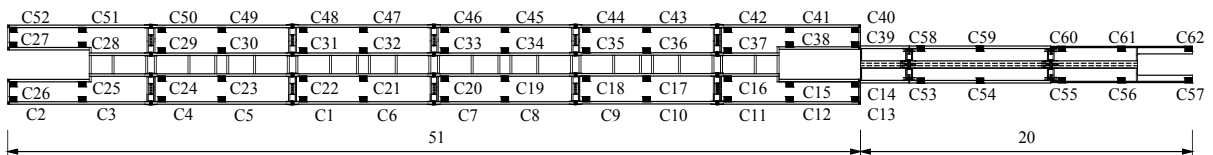


Figure 4. Distribution of test points  
图 4. 测点布置图

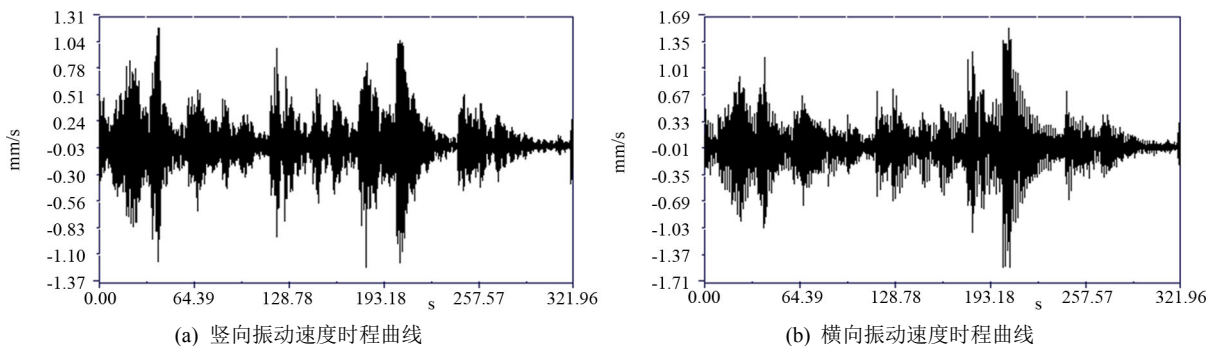


Figure 5. Vertical and horizontal vibration velocity time history curve of the test point C2 in the first set of tests  
图 5. 第一组测试时测点 C2 的竖向和横向振动速度时程曲线

将试验测试得到的所有数据导入 DHMA 模态分析软件, 由峰值法可识别出结构的振动频率、振型和阻尼比。

## 5. 有限元计算结果与试验结果对比分析

由于实际结构体系较为复杂, 接头较多, 实测的自振特性包含部分局部振动, 需与理论计算结果对比选取, 两者相互校核。导梁推送过程典型工况结构动力特性计算结果与实测结果对比详见表 1 和图 7, 其中几阶模态未从试验中测得, 主要与测点布置有关, 振型的对比按有限元计算的阶次给出。

分析表 1 和图 7 可得导梁推送过程典型工况结构动力特性的相关结论如下:

1) 通过试验测得的结构振动频率值与计算值比较接近, 最大误差的绝对值为 12.20%, 最小误差的绝对值为 1.66%。试验结果与计算结果存在误差主要有两方面的原因: 一是计算中对结构进行了简化; 二是由于试验条件限制, 布置的测点有限。但误差处于桥梁模态试验允许和工程可控的范围[4] [7], 说明有限元模型与实际结构的动态受力基本一致, 两者得到了相互验证。因此, 试验结果和有限元计算结果比

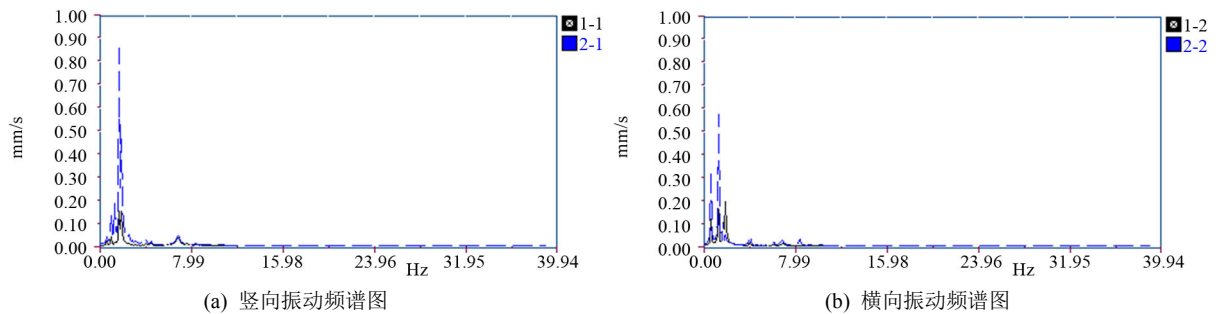


Figure 6. Vertical and horizontal spectrum of the reference point C1 and the test point C2 in the first set of tests

图 6. 第一组测试时参考点 C1 和测点 C2 的竖向和横向振动频谱图

Table 1. Comparison between the computational and experimental results of the structure dynamic properties

表 1. 结构动力特性计算结果与实测结果对比

阶数	计算值(Hz)	实测值(Hz)	误差(%)	阻尼比(%)	振型特征
1	0.632	0.586	7.85	5.59	一阶横弯 + 扭转
2	0.949	0.965	-1.66	3.72	一阶反对称竖弯
3	1.472	—	—	—	局部横弯 + 扭转
4	1.772	1.661	6.68	2.33	一阶正对称竖弯 + 扭转
5	2.243	2.369	-5.32	3.77	局部竖弯 + 扭转
6	2.686	2.394	12.20	2.14	二阶横弯 + 扭转
7	3.221	—	—	—	局部横弯 + 扭转
8	3.480	3.127	11.29	1.29	二阶竖弯 + 扭转
9	4.756	4.494	5.83	1.35	二阶竖弯 + 扭转
10	7.064	—	—	—	二阶横弯 + 扭转
11	7.218	6.889	4.78	1.91	高阶横弯 + 扭转
12	8.114	7.621	6.47	1.95	高阶竖弯 + 扭转
13	8.336	—	—	—	高阶横弯 + 扭转
14	8.764	8.354	4.91	1.60	高阶竖弯 + 扭转

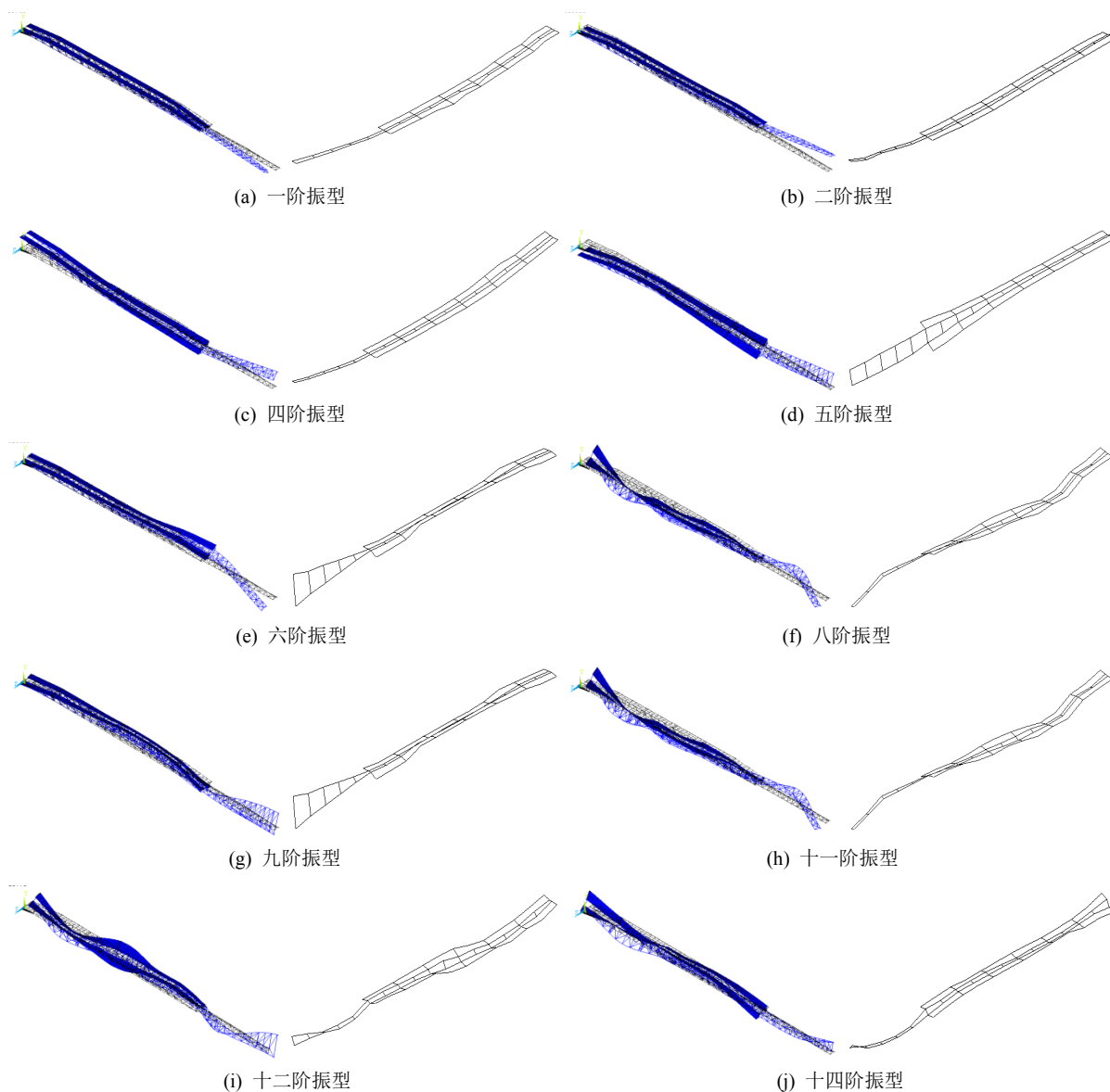


Figure 7. Comparison between the finite element computational vibration mode and measured mode

图 7. 有限元计算振型与实测振型比较

较可靠，建立的模型可作为“基准”动力有限元模型。

2) 结构呈明显的低频、密频特点。一阶振动频率实测值为 0.586 Hz，振型为横向弯曲与扭转的耦合；竖向振动的基频为 0.965 Hz，振型为反对称竖弯；除结构一阶整体竖弯外，其它振型均为横弯或竖弯与扭转的耦合，说明结构的抗扭能力较弱，这主要是因为桥跨与导梁间的所有自动销和手动销均已解除，结构的整体性相对较差。由图 7 可看出实测振型与计算振型吻合良好。

3) 对于不同的振型，结构有不同的阻尼比，结构的实测阻尼比没有明显的变化规律。第一阶振动的阻尼比最大，为 5.59%，结构的各阶实测阻尼比均处于正常范围内。

## 6. 结论

1) 无线环境激励测试系统能够快速有效地进行大跨度拼装式钢桥导梁推送过程典型工况的模式试



验, 识别出主要的模态参数。

2) 结构的一阶振型为横向弯曲与扭转的组合, 符合大跨度桁架桥的特征; 结构跨度较大, 呈现低频、密频的特点, 且抗扭能力较弱。

3) 结构振动频率的计算值与试验值比较接近, 最大误差的绝对值为 12.20%, 处于模态试验允许和工程可控范围内, 相应的振型出现的先后顺序以及形状吻合良好。

4) 本文研究结果可为拼装式桥梁结构架设过程的动态测试、动态建模、动态特性分析、抗震抗风设计等提供一定的参考依据。

## 参考文献

- [1] 罗安. 重型支援桥极限承载力分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [2] 殷祥超. 振动理论与测试技术[M]. 江苏: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [3] 王勳成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 刘荣桂, 周士金, 许飞, 蔡东升, 陈蓓. CFRP 拉索斜拉桥模态试验与分析[J]. 桥梁建设, 2009, 2009(3): 29-32.
- [5] 蔡东升, 刘容桂, 许飞, 周士金. CFRP 索斜拉桥的结构动态测试研究与分析[J]. 力学与实践, 2009, 31(5): 21-25.
- [6] 蔡东升, 刘荣桂, 许飞, 周士金. CFRP 索斜拉桥动态特性的有限元分析及动态试验[J]. 中国工程科学, 2010, 12(2): 16-21.
- [7] 周士金. CFRP 拉索斜拉桥的动力分析与地震响应控制研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [8] 陈洁, 崔杰, 王武斌, 彭康佑, 丁北斗. 基于环境激励单层柱面网壳结构的模态分析[J]. 土木工程, 2017, 6(3): 288-294.
- [9] 祝志文, 刘力, 向建军, 王甜, 石亚光, 喻鹏. 佛陈扩建桥钢-RPC 组合铺装钢箱梁桥振动测试与模态识别[J]. 钢结构, 2016, 11(31): 26-30.
- [10] 邓贤远, 黄国健, 江爱华, 何山. 门座起重机振动模态分析研究[J]. 自动化与信息工程, 2016, 4(37): 40-43.
- [11] 任伟新, 林友勤, 彭雪林. 大跨度斜拉桥环境振动试验与分析[J]. 实验力学, 2006, 21(4): 418-426.
- [12] 鞠彦忠, 郑维权, 周冠男. 独塔斜拉桥的环境振动试验与分析[J]. 实验力学, 2009, 24(1): 67-72.
- [13] Timoshenko, S. (1974) *Vibration Problems in Engineering*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 47-78.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)