

# Dynamics Properties Study on the Typical Condition of the Large Span Assembly Type Steel Bridge during Bridge Span Pushing Process

Yingchang Duan, Xi Wang, Yinzhong Wan, Yi Liu

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

Received: Oct. 10<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 25<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 1<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

Natural frequencies, vibration modes and damping ratios of the typical condition of the large span assembly type steel bridge during bridge span pushing process are derived from modal tests by using the ambient excitation method. The dynamic test results are compared with the finite element calculation results. It is determined that the calculated results are in accordance with the experimental results, which verifies the correctness of the finite element model. Then, harmonic response analyses are addressed by employing the finite element model. The simplified dynamics model is proposed based on the equal principle of the overall vertical dynamic characteristics of the structure.

## Keywords

Bridge Span Pushing Process, Modal Test, Finite Element Analysis, Dynamics Model

---

# 大跨度拼装式钢桥桥跨推送过程典型工况动力学特性研究

段应昌, 王 昔, 万银忠, 刘 义

陆军工程大学训练基地, 江苏 徐州  
Email: duanyingchang@126.com

收稿日期: 2019年10月10日; 录用日期: 2019年10月25日; 发布日期: 2019年11月1日

## 摘要

采用环境激励法进行了大跨度拼装式钢桥桥跨推送过程典型工况结构的模态测试,得到了自振频率、振型和阻尼比等振动参数,将模态试验结果与有限元计算结果进行对比分析,结果表明计算结果与实测结果基本吻合,验证了有限元模型的正确性。利用有限元模型进行了结构谐响应分析,根据结构整体竖向动力特性相等的原则,提出了桥跨推送过程典型工况的简化动力学模型。

## 关键词

桥跨推送过程, 模态试验, 有限元分析, 动力学模型

Copyright © 2019 by author(s) 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架设过程主要包括桥节拼装、推送导梁和推送桥跨三个阶段[1],其中桥跨推送过程中结构跨径及倾斜度较大,导致该阶段中结构振动大。对桥跨推送过程典型工况的结构进行模态分析是研究结构的谐响应、动力响应和振动控制等的基础。结构模态研究方法较多,其中文献[2]-[7]采用了环境激励法进行了结构模态测试,确定了结构的动力特性。在模态分析的基础上,李东旭[8]对大型挠性空间桁架结构进行了谐响应分析,为桁架结构的设计和振动控制提供了理论指导。本文通过有限元分析通用软件 ANSYS 建立桥跨推送过程典型工况结构有限元模型;然后采用环境激励法对典型工况进行模态试验,将试验结果与有限元计算结果进行对比分析,验证有限元模型的正确性;最后进行桥跨推送过程典型工况结构的谐响应分析,研究该工况结构体系在竖向简谐荷载作用下的谐响应规律,由此提出桥跨推送过程动力响应研究的简化动力学模型。

## 2. 桥跨推送过程典型工况结构建模

### 2.1. 桥跨推送过程典型工况

大跨度拼装式钢桥桥跨推送过程种整体结构的最大跨度超过了 75 m,为减小模态试验过程中的安全风险,并使试验具有代表性,试验中以桥跨推送至距离终点位置 14.65 m 处的结构体系作为研究的典型工况,如图 1 所示。



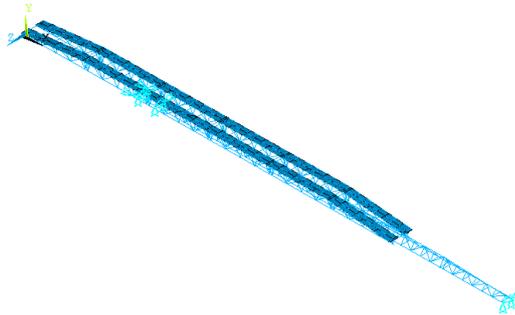
Figure 1. Typical condition of the bridge span pushing process

图 1. 桥跨推送过程典型工况

### 2.2. 有限元建模

有限元建模时对结构进行了合理简化,大跨度拼装式钢桥典型工况结构的所有梁杆采用 BEAM188

单元模拟, 桥面板采用 SHELL43 单元模拟; 有限元模型的边界条件为在结构与架设机构接触位置处约束 Y、Z 方向位移, 推送桥跨的齿轮位置处约束 X 方向位移, 导梁端部着地位置处按简支约束处理, 由此建立的桥跨推送过程典型工况有限元模型如图 2 所示。



**Figure 2.** Structural finite element model of the typical condition of the bridge span pushing process

**图 2.** 桥跨推送过程典型工况结构有限元模型

### 3. 桥跨推送过程典型工况结构模态分析

#### 3.1. 模态测试方法

采用环境激励法[2] [3] [4]对桥跨推送过程典型工况的结构进行模态测试, 试验仪器为 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, 如图 3 所示。



**Figure 3.** The wireless ambient excitation modal test system models for DH5907A

**图 3.** DH5907A 无线环境激励模态测试分析系统

为全面地采集桥跨推送过程典型工况的模态参数, 模态试验中共布置了 60 个测点, 测点布置如图 4 所示。试验中一共采用了图 3 中所示的采集器 6 个, 其中 1 个为固定参考点采集器, 所以试验分 12 组进行测试。固定参考点需避开主要低阶振型的驻点位置[5], 根据有限元模态计算结果, 选取图 4 中 C1 为固定参考点。现场试验时设置模态测试分析系统的采样频率为 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。

#### 3.2. 模态测试结果

模态试验过程中每组测点测试 5 分钟以上, 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 所示为桥跨推送典型工况测点 C12 的振动速度测试结果。由图 5 可知, 结构在一些时段内发生了共振, 这是因为典型工况结构体系的固有频率与环境激励频率接近, 说明试验检测到了良好的振动信号。

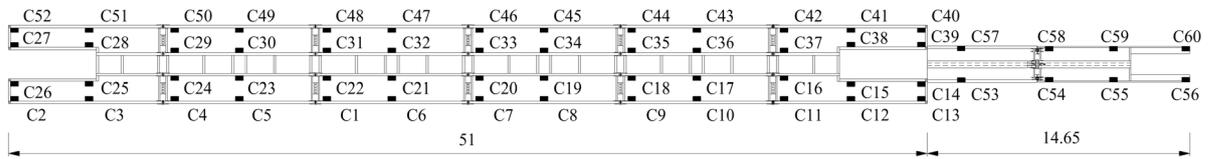


Figure 4. Distribution of the test points  
图 4. 测点布置图

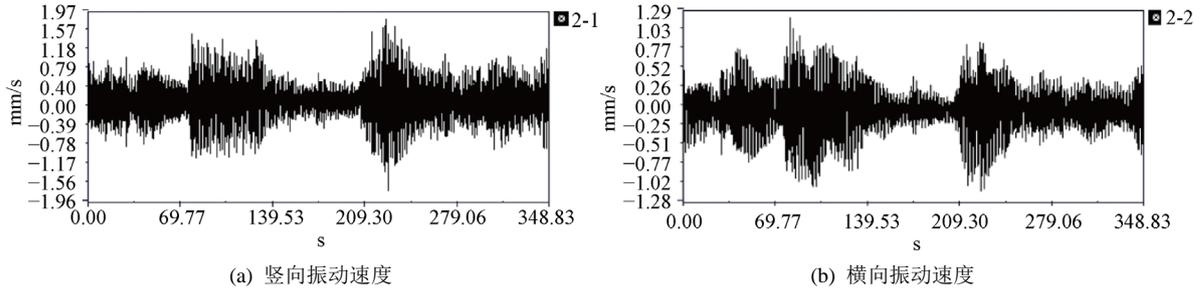


Figure 5. Vertical and horizontal vibration velocity time history curve of the test point C12  
图 5. 测点 C12 的竖向和横向振动速度时程曲线

图 6 为第三组测试时参考点 C1 和测点 C12 竖向和横向振动频谱图，图 6(a)中的实线(1-1)为参考点 C1 的竖向振动频谱图，图 6(a)中的虚线(2-1)为测点 C12 的竖向振动频谱图；图 6(b)中的实线(1-2)为参考点 C1 的横向振动频谱图，图 6(b)的虚线(2-2)为测点 C12 的横向振动频谱图。由图 6 可知，结构低频段的频谱峰值明显，说明试验较好的检测出了典型工况结构的低频模态。

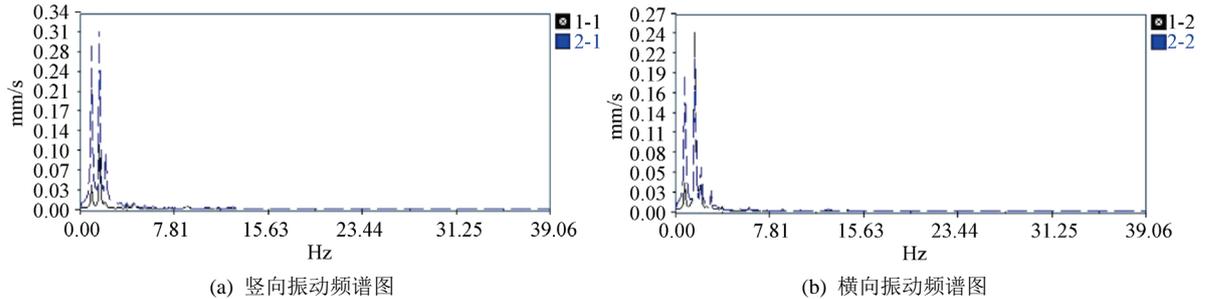


Figure 6. Vertical and horizontal spectrum of the reference point C1 and the test point C2  
图 6. 参考点 C1 和测点 C12 的竖向和横向振动频谱图

### 3.3. 模态计算结果与试验结果对比分析

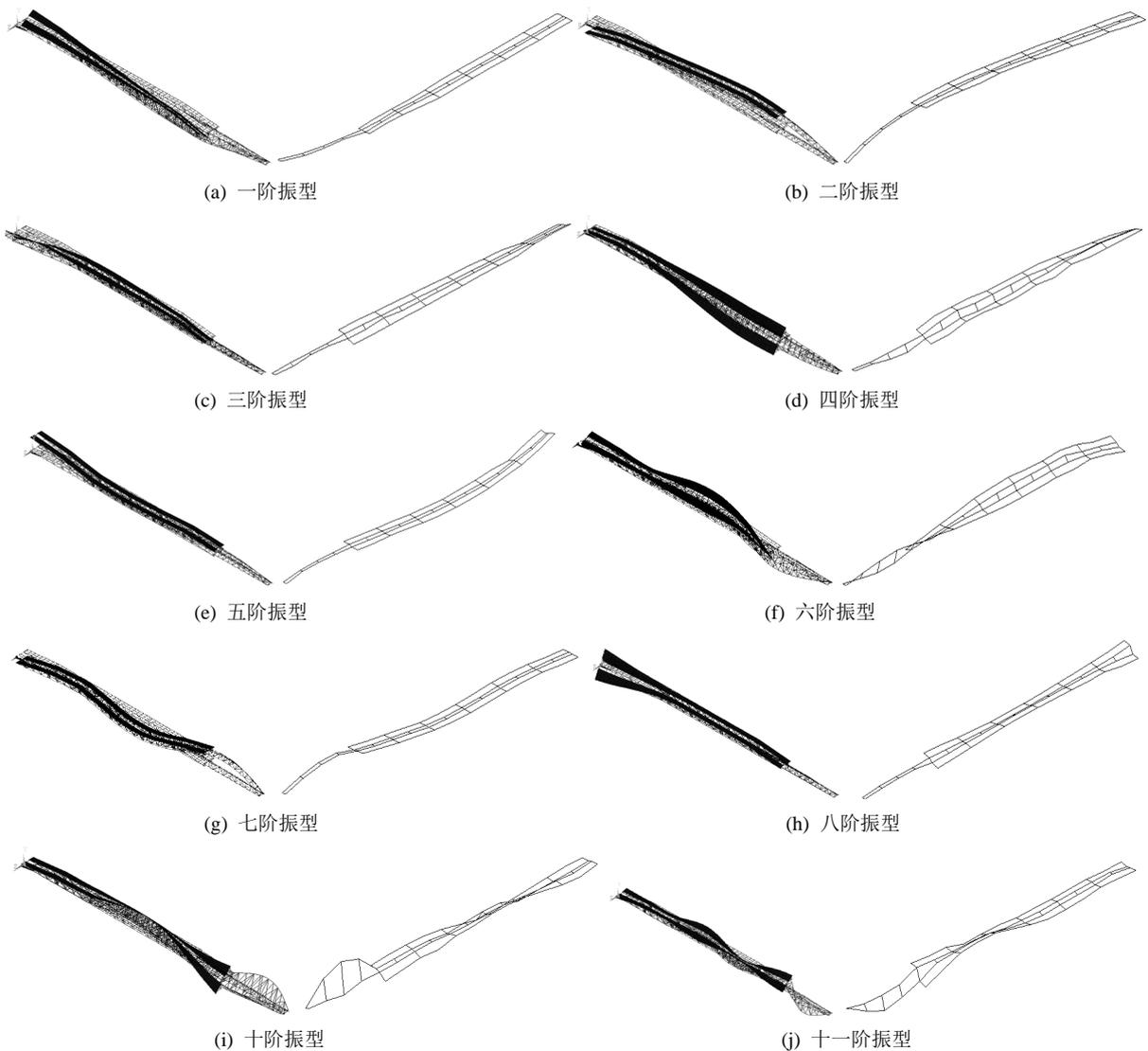
大跨度拼装式钢桥为插销连接的拼装桁架结构，本文研究的典型工况结构连接的接头较多，实测的自振特性包含部分局部振动，需与理论计算结果对比选取，两者相互校核。有限元模型计算得到了结构的前 11 阶振动频率和振型，模态试验中由于测点布置还不够全面，对应有限元计算的第 9 阶模态未测出来，但其他阶次的模态测试结果较好，桥跨推送过程典型工况结构动力特性计算结果与实测结果对比详见表 1 和图 7 所示，图 7 中振型的对比按有限元计算的阶次给出。

通过对比表 1 和图 7 可得桥跨推送过程典型工况结构模态的相关结论如下：

1) 由于对计算模型进行了简化，桥跨推送过程典型工况结构振动频率的计算值与试验值存在一定的误差，但最大误差的绝对值仅为 12.50%，满足工程结构设计计算的基本要求[6] [7]，因此本文建立的有限元模型可作为该结构谐响应、动力响应等分析的基本模型。

**Table 1.** Comparison between the computational and experimental results of the structure modal  
**表 1.** 结构模态有限元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	0.892	0.830	7.47	5.22	一阶横弯 + 扭转
2	1.072	1.026	4.48	3.93	一阶反对称竖弯
3	2.090	2.101	-0.52	2.64	局部横弯 + 扭转
4	2.821	2.980	-5.34	1.48	一阶横弯 + 扭转
5	2.836	3.241	-12.50	1.47	一阶对称竖弯
6	4.020	3.908	2.87	1.60	二阶横弯 + 扭转
7	5.285	4.843	9.13	0.99	二阶竖弯
8	5.804	6.106	-4.95	0.96	扭转
9	7.322	—	—	—	高阶横弯 + 扭转
10	7.886	7.426	6.19	1.35	扭转
11	9.411	8.842	6.44	1.46	高阶横弯 + 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

2) 实测振型与计算振型吻合良好,一阶振动频率实测值为 0.830 Hz,振型为横向弯曲与扭转的耦合;竖向振动的基频为 1.026 Hz,振型为反对称竖弯;该工况下,除结构各阶整体竖弯外,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。

3) 结构实测阻尼比最大值为 5.22%,实测的各阶阻尼比均处于正常范围内。

## 4. 桥跨推送过程典型工况结构谐响应分析

### 4.1. 结构受力分析

大跨度拼装式钢桥桥跨的推送是通过架设机构上的齿轮拨动桥跨上的销齿来完成的,由于制造工艺误差,产生了左右导轨不平、销齿不位于同一平面的现象,使得左右推桥齿轮不能同时作用于销齿而产生撞击,形成对结构的竖向激励作用,这种激励力可近似取为简谐力模型,即:

$$F = \bar{F} \sin(\tilde{\omega}t) \quad (1)$$

其中,  $\bar{F}$  为激励力的幅值,  $\tilde{\omega}$  为激励力的圆频率。

### 4.2. 结构谐响应计算结果及分析

谐响应分析是计算结构响应随频率变化的规律,由此分析结构的持续动力学特性,本文采用求解精度较高的完全法求解。

桥跨推送过程典型工况结构谐响应分析约束条件与荷载分布:结构体系的约束条件与有限元模态分析的约束条件一致;在桥跨推送齿轮作用位置处施加竖直向下的荷载,假定幅值为 10,000 N,激振频率变化范围为 0~10 Hz,分析过程中将激振频率划分为 100 等分。桥跨推送过程典型工况中桥跨前端位置处节点的谐响应曲线如图 8 所示。

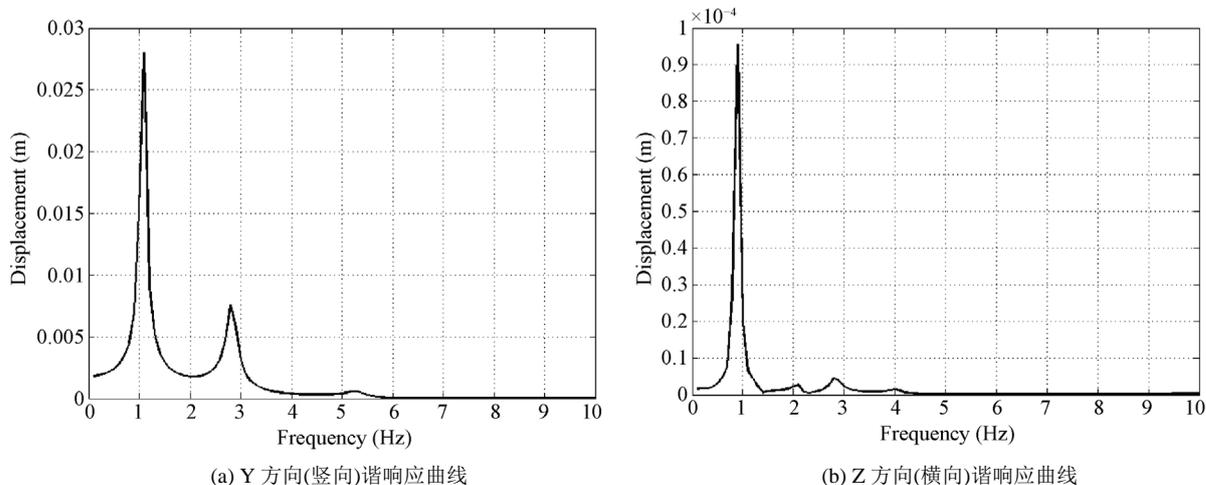


Figure 8. Structural harmonic response curve

图 8. 结构谐响应曲线

1) 从图 8(a)中可以看出,桥跨推送过程典型工况结构竖向振动的谐响应频率为 1.1 Hz、2.8 Hz 和 5.3 Hz,分别对应于表 1 中结构的二阶、五阶和七阶固有频率;外界激励的频率为 1.1 Hz 时,结构共振幅值最大,达到  $2.81 \times 10^{-4}$  m。

2) 从图 8(b)中可以看出,结构横向振动谐响应频率为 0.9 Hz、2.1 Hz、2.8 Hz 和 4.0 Hz,分别对应于表 1 中结构的一阶、三阶、四阶和六阶固有频率;外界激励为 0.9 Hz 时,结构共振幅值最大,达到  $9.57 \times 10^{-4}$  m。

m。对比图 8(a)和图 8(b)可知,在推桥齿轮的激励力作用下,结构体系 Y 方向的响应幅值远远大于 Z 方向。

3) 由于桥跨推送过程结构的振动主要由齿轮推力的竖向分力引起,由图 8 可知,结构在 Y 方向的动力响应为桥跨推送过程典型工况动力学研究的重点,当忽略架桥车的耦合振动作用,由结构整体竖向动力特性相等的原则,可将桥跨推送过程的结构体系简化为轴向运动嵌套固支-简支梁模型,如图 9 所示,利用该模型即可进行桥跨推送过程动力响应理论研究。图 9 中,任一瞬时嵌套固支-简支梁模型的主梁轴向运动速度为  $u(t)$ ,第一段梁的长度为  $l_1(t)$ ,第二段梁的长度为  $l_2(t)$ ,为主梁作轴向运动的驱动力,为结构的竖向激励力。

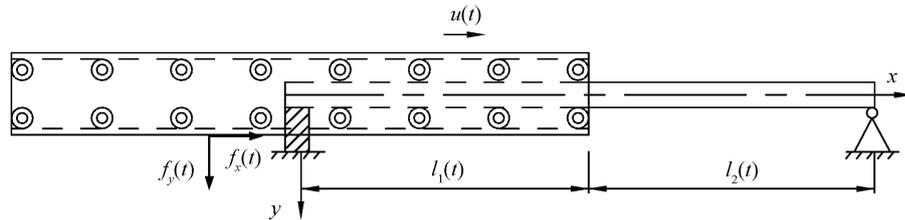


Figure 9. Axially moving nested clamped-hinged beam model  
图 9. 轴向运动嵌套固支-简支梁模型

## 5. 结论

1) 联合利用 BEAM188 单元和 SHELL43 单元建立各典型工况的有限元模型,进行动态特性计算,采用环境激励法进行各工况自振特性测试,得到了自振频率、振型和阻尼比等振动参数,模态试验结果与有限元计算结果基本吻合,验证了有限元模型的正确性。

2) 实测和计算的各工况结构的一阶振型均为横向弯曲或者横向弯曲与扭转的组合,符合大跨度拼装式钢桥的特征;模态出现了桥跨结构两车辙相互独立地成对称或反对称的扭转,明显体现出了车辙式桥跨的结构特点。

3) 结构的谐响应频率基本为各阶固有频率,当推桥齿轮激励频率接近或达到结构的竖向基频时,谐响应的稳态幅值最大,根据结构整体竖向动力特性相等的原则,可将桥跨推送过程的结构体系简化为简谐激励作用下的轴向运动嵌套固支-简支梁模型,进行动力学研究。

## 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] 段应昌, 王铮, 刘虎, 谭欣. 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[J]. 土木工程, 2018, 7(4): 613-619.
- [3] 陈浩, 崔杰, 王武斌, 彭康佑, 于北斗. 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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(3): 29-32.
- [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] 李东旭. 大型挠性空间桁架结构动力学分析与模糊振动控制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.