

# 基于静动力试验的大跨度拱桥结构识别与状况评估

周云, 张军凯, 陈松柏

(湖南大学土木工程学院)

5

10

15

20

**摘要:** 大跨度拱桥是连接相邻交通的枢纽, 在公路桥梁现代化建设事业中占据重要地位。结构识别是在现场观测、先验模型、静动力试验和模型校验的基础上进行的结构评估与预测工作, 通过静动力试验校验过的有限元模型能够真实可靠地反映大型结构的工作状况。本文以一座大跨度拱桥为研究对象, 通过静动力试验获得了桥梁结构的随机振动信号和静载控制试验的竖向挠曲变形。由于有限元建模过程中不确定性因素的影响, 初始设计模型的理论分析结果与静动力试验数据的结果存在一定差异。对比设计模型与校验模型的校验系数以及静载变形曲线, 基于模态频率与振型匹配的模型校验可以有效地减小有限元模型计算结果与测试结果之间的误差, 从而减小模型中的不确定性因素的影响。经过精确建模和参数校验的有限元模型能够提供可靠的工作状况评估与响应预测。最后对两种模型进行了反应谱分析。根据对比结果, 对于大跨度拱桥结构, 使用未经校验的设计模型往往高估结构在地震作用下的能量耗散能力, 使抗震评估工作偏于不安全。

**关键词:** 结构工程; 静动力试验; 工作模态分析; 结构识别; 模型校验

**中图分类号:** TU399

## Structural identification and condition assessment of a long-span arch bridge based on static and dynamic experiments

ZHOU Yun, ZHANG Junkai, CHEN Songbai

(School of civil engineering, Hunan University, Changsha, 410082)

25

30

35

40

**Abstract:** Long-span arch bridge plays a critical role in connecting adjacent traffic area and is an essential component in modern highway bridge construction. Structural Identification (St-Id) was defined as condition assessment and response prediction based on field investigation, priori modeling, controlled load tests and model calibration. Finite element (FE) models calibrated by static and dynamic tests can be used for reliable condition assessment of large-scale structures. In this paper, a long-span bridge was taken for example. The ambient vibration signals in time domain as well as vertical deflections were obtained by ambient vibration tests and static loading tests. However, various uncertainties existing in the FE modeling may have significant impact on the structural response prediction. By comparing calibration coefficients and deflection shapes, discrepancies between FE model and test results can be mitigated by precise modeling and model calibration. FE model calibrated by modal frequencies can provide reliable response prediction. Finally, spectral analysis results of FE model before and after calibration are compared. It is demonstrated that energy dissipation may be over-estimated by uncalibrated model, which may lead to unsafe seismic evaluation.

**Key words:** Structural engineering; Long-span arch bridge; Static and dynamic test; Operational modal analysis; Structural identification;

## 0 引言

随着新型建筑材料、结构形式的选用和施工技术的进步, 大跨度拱桥将在现代交通运输中发挥越来越重要的作用。然而随着使用时间的推移, 桥梁的交通量和车辆荷载等级都大幅

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(51208190); 湖南省自然科学基金青年基金(12JJ4053); 高校博士点基金新教师基金项目资助(20120161120028); 湖南大学青年教师成长基金资助; 湖南省优秀青年骨干教师培养计划;

**作者简介:** 周云, 副教授、博士生导师、结构识别. E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn

增加。由于受到荷载的反复作用以及环境侵蚀的影响，桥梁的性能退化严重，其状况评估和  
45 寿命预测工作的重要性日益突出。结构性能评估是指依据检测和监测数据，对结构的当前状  
况和未来服役期内的性能做出评估和预测。评估工作可以分为现场观测、破损检测、非破损  
检测和卡车静载试验等。成桥试验综合使用了以上方法，它是在桥梁投入运营前的控制试验，  
反映了结构最初的工作状态，并可以作为长期健康监测的基准。

动力试验通常可分为冲击测试和环境振动测试，相应的模态参数识别的方法可分为实验  
50 模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)和工作模态分析<sup>[1]</sup>(Operational Modal Analysis;  
OMA)。前者是基于输入和输出数据的识别方法；后者是仅基于输出数据的识别方法。由  
于环境振动测试相比于传统的冲击振动测试具备诸多优点，现代大跨度拱桥的动力测试大多  
依靠环境振动（包括风、水流、行人、地脉动等）激励。随着结构识别理论的发展，国内外  
许多学者对大跨度拱桥的静动力试验和结构识别进行了大量研究。

55 1997 年，Nazmy A S 等<sup>[2]</sup>探讨了不同设计参数的变化对拱桥的强度和稳定性的影响，并  
提出了拱桥的设计优化建议。2004 年，Ren Weixin 等<sup>[3]</sup>对田纳西河桥进行了环境振动测试，  
并分别使用峰值提取法（PP）和随机子空间识别法（SSI）进行了参数识别，指出 SSI 方法  
识别出的模态振型更为准确。2005 年，Ko J M.等<sup>[4]</sup>统计出当时世界上大概有 40 座大跨度桥  
梁装配有健康监测系统，能够对桥梁的整体工作状态提供比较可靠的数据。2006 年，Karoumi  
60 R 等<sup>[5]</sup>对挪威 New Svinesund Bridge 进行了环境振动测试，分析了结构内力、温度和风速对  
模态参数的影响。2008 年，Filipe M<sup>[6]</sup>研究了一种“多通道动态监测系统”，该系统能够实现  
桥梁的固有频率与频率域分解方法的在线自动识别，并跟踪桥的前 12 阶固有频率。2008 年，  
Song Yu 等<sup>[7]</sup>使用无线传感器对五缘大桥进行了模态试验，并使用 SSI 方法完成模态分析。  
2010 年，Bayraktar A 等<sup>[8]</sup>对土耳其一座双跨拱桥进行了环境振动测试，并对比了 PP 和 SSI  
65 进行工作模态分析的结果。2011 年，Wei L 等<sup>[9]</sup>对一座 5 跨连续拱桥进行了环境振动测试，  
结合车桥耦合振动试验以及静载测试的结果，对桥梁健康状况进行了评估。2011 年，Qin Pan  
等<sup>[10]</sup>研究了结构识别中不确定性因素的来源，通过对 Henry Hudson 桥的结构识别和模型校  
验说明了如何减小不确定性因素的影响。2012 年，Álvarez J J 等<sup>[11]</sup>研究了在地震时程分析中  
大跨度桥梁的承载力和拱肋的延性，指出桥墩的两端为大跨度拱桥具有显著延性需求的部  
70 位，轴向力的波动对拱桥地震评估有较大的影响。2013 年，李晰等<sup>[12]</sup>利用设置在一座钢管  
混凝土拱桥上的健康监测系统，依据工作模态识别结果采用零阶近似法对初始模型进行了修  
正。2014 年，胡志坚等<sup>[13]</sup>针对九江长江大桥主桥开展大缩尺比的静动力模型试验研究，通  
过各类构件的不同损伤模拟研究了结构的动力特性变化。2014 年，Costa B 等<sup>[14]</sup>对比了路易  
斯一世桥加固前后随机振动试验的模态分析结果，论证了桥梁刚度、模态参数和边界条件之  
75 间的关系。

本文以一座新建的大跨度拱桥为研究对象，依据桥梁的模态试验的分析结果和有限元模  
态分析结果之间的误差建立目标函数。通过精细化建模和目标函数的最优化完成模型校验工  
作，最终得到一个能够真实准确反映结构状况的有限元校验模型。结构识别和反应谱分析的  
结果表明，经过现场观测、结构试验和模型校验，校验模型能够更准确地模拟实际结构，其  
80 变形预测结果和抗震性能的评估更为准确可靠。

## 1 结构识别

结构识别理论的提出始于上世纪 60 年代末, 发展至今已有 50 多年的历史。结构识别的范式最早于 1977 年被 Hart G C 和 Yao J T P<sup>[15]</sup>提出。自 1978 年, Liu S C 和 Yao J T P<sup>[16]</sup>将其引入到土木工程领域后, 结构识别成为了工程力学界和土木工程界的一个富有活力的研究方向。2005 年, 结构识别的概念被 ASCE St-Id of Constructed Systems Committee 所接受, 其范式被描述为“理论-试验-决策”的六步综合圆<sup>[17]</sup>, 如图 1 所示。

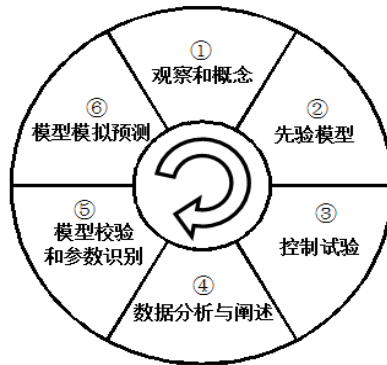


图 1 结构识别六步圆

Fig.1 Six steps of Structural Identification circle

在大跨度桥梁结构的识别过程中, 为保证研究工作的缜密和完善, 应当严格按照六步圆的顺序开展。具体工作内容划分如下:

(1) 观察和概念。详细查阅结构的图纸记录, 并结合现场观测结果确定结构的建筑材料、结构形式和荷载传递路径等。明确结构当前状况和可能出现的损伤。

(2) 先验模型。基于已知信息建立初始的有限元模型。先验模型相对于实际结构的准确程度可以通过对比其预测结果和现场测试数据来判定。通常可取用设计单位出具的设计模型作为先验模型。

(3) 控制试验。根据校验目标选定合适的测试方案。对于初始建成的大跨度拱桥, 在通车之前对其进行静载试验和随机振动模态试验是有效评定其工作状况的方法之一。静载卡车试验按照预先设定的加载工况使用卡车施加荷载, 待加载稳定, 观测桥面和拱肋控制截面的应力与变形来判断桥梁结构的受力性能是否满足要求。随机振动试验以环境振动作为激励, 通过安放于结构上的单轴加速度传感器拾取结构振动的时域信号。试验测点分为参考点与移动测点, 并假定参考点输入信号为高斯白噪声。

(4) 数据分析与阐述。静载试验<sup>[18]</sup>主要测试桥梁控制截面的应变、应力和挠度, 通过结构在外荷载作用下的反应来评估结构能否达到正常使用的要求。模态试验中, 根据各测点的加速度时程信号, 经由快速傅立叶变换转换为频域信号。分别计算参考点的自功率谱以及参考点关于各移动测点的互功率谱, 最终由 Poly-Max 方法求解结构的模态频率、阻尼与振型。

(5) 模型校验与参数识别, 也称模型—试验匹配。模型校验前首先要判断有限元模型的准确性, 在精确建模的基础上进行参数识别。

基于灵敏度分析的结构参数修正有助于明确对目标函数较为敏感的建模不确定参数。通过目标函数迭代寻优的方法实现后续的模型校验工作<sup>[19]</sup>。目标函数和不确定参数的选取决

定了修正的方向,对于以模态测试为基础的模型校验,本文选取了基于模态频率误差的目标函数:

$$F(x,i) = \sum_{i=1}^n \frac{f_{ai}(x) - f_{ei}(x)}{f_{ai}(x)} \times 100\% \quad (1-1)$$

- 115  $f_a$ : 有限元模型计算所得到的模态频率;  
 $f_e$ : 实际测试分析得到的模态频率;  
 $x$ : 有限元模型中的建模不确定参数;  
 $i$ : 所选取的参与目标函数的第  $i$  阶模态。

其中, 试验模态分析与理论模态分析通过模态置信准则(MAC)匹配(如公式(1-2)所示)。

- 120 MAC 值接近于 1 说明两种振型匹配良好。

$$MAC = \frac{\varphi^T \phi + \phi^T \varphi}{\varphi^T \phi \phi \varphi^T} \quad (1-2)$$

$\varphi$ : 环境振动试验工作模态分析的振型向量

$\phi$ : 有限元软件理论模态分析的振型向量

- 125 (6) 结构响应预测, 也称易损性评估或校验模型性能评估。通过校验后的模型预测结构未来响应可用于对相关决策提供依据。

- 130 校验系数  $\eta$ <sup>[18]</sup> 是评定结构工作状态和变形性能的一个重要指标。在结构识别问题中, 可以由校验系数判定有限元模型的准确程度。 $\eta$  由静载控制试验所得数据(应力、挠度)与有限元模型的响应预测值(应力、挠度)的比值得到。如公式(3)所示。通常,  $\eta \leq 1$  说明有限元计算结果偏于安全, 实际结构工作状况良好并尚有一定的安全储备;  $\eta$  值越小, 表明结构的安全储备越充足。 $\eta=1$  则说明有限元模型计算结果与试验结果十分接近, 模型与实际结构之间的误差最小。

$$\eta = \frac{\text{实际挠度值}}{\text{理论挠度值}} \quad (1-3)$$

## 2 桥梁反应谱分析方法

- 135 桥梁结构地震反应分析方法经历了从静力法、反应谱法到时程分析方法的演变历程<sup>[20]</sup>。相较于前两种方法, 反应谱分析法不仅考虑了结构的动力特性, 并且直观地反映了地震对结构的影响, 因此获得了广泛认可和应用。反应谱方法具备概念简明、计算简便等优点。目前国内外的桥梁抗震设计规范只适用于跨度 150m 以下的梁桥和拱桥, 单跨跨径超过 150m 的梁桥和拱桥则属于特殊桥梁的抗震设计范畴<sup>[21]</sup>。大跨度桥梁抗震设计中反应谱方法的应用主要考虑合理的地震反应谱输入<sup>[22]</sup>和恰当的振型组合两方面问题。地震反应谱输入需要根据桥梁所处地区的勘察资料选取恰当的参数确定。此外, 由于大跨度拱桥的模态频率往往在一个较宽的频带内密布, 而地震波的激励范围较广, 因此反应谱方法在大跨度拱桥的应用中必须选取足够的振型, 使结构的总体质量参与系数达到 90%。
- 140

### 3 来华大桥的结构识别研究

#### 3.1 桥梁概况

145 广西来华大桥位于广西省来宾市，是一座中承式钢管混凝土拱桥。大桥全长 465m，桥  
面板宽 36m，主跨拱肋为双肋悬链线无铰拱，计算跨径为 210m，计算拱高 60m，矢跨比为  
1/3.5。每片拱肋由 4 根 B750×20 的 Q345C 钢管组成，内部灌注 C50 微膨胀混凝土。拱肋  
之间由水平联通钢管和斜腹钢管连接，整体结构形成桁架式拱肋。桥面板与钢管混凝土拱由  
立柱和吊杆连接，桥面上下游方向各有 8 根立柱，21 根吊杆，实际结构的照片见图 2。湖南  
150 大学土木工程结构健康监测研究团队(www.hnutest.com)于 2013 年 6 月对该桥进行了系统的  
静动力试验。



图 2 来华大桥照片

Fig.2 Picture of Laihua Bridge

#### 155 3.2 有限元建模

根据来华大桥在设计 and 成桥试验的两个阶段的研究目的，笔者分别使用有限元软件  
Midas Civil 和 Strand7 建立了来华大桥的空间有限元模型（后文分别以设计模型和校验模型  
指代）。从模型校验前后所得到的不同结果可以预测实际结构和设计模型在性能上的差异。

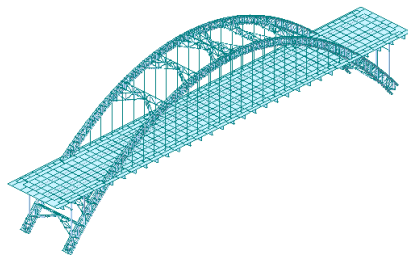


图 3 来华大桥设计模型

Fig.3 Design model of Laihua Bridge

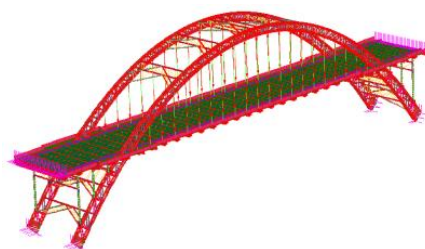


图 4 来华大桥校验模型

Fig.4 Calibrated model of Laihua Bridge

160 来华大桥在设计阶段采用了 Midas 建立的设计模型（见图 3），施工过程中通过其进行  
全桥施工控制。各个施工阶段的线型和应力都在合理的范围内，主要控制参数能直观地反映  
结构的工作状况。设计模型的有限元计算结果可以作为成桥静动力试验参数有力的参考。

165 在成桥试验阶段，笔者使用 Strand7 建立了来华大桥校验模型（见图 4），所有单元的几何特  
征和物理参数都按照现场勘查结果确定。拱单元、纵梁和横梁单元、K 型横撑和立柱单元使  
用两节点的 beam 单元模拟；拉索单元的模拟使用的是仅承受拉力的三维 cable 单元；桥面  
板、人行道板和人行道扶手由 plate 单元模拟。桥面板两端与引桥部分通过伸缩缝隔开，桥  
面板的边界条件在有限元模型中模拟为铰支座（限制相应节点的纵、横向和竖向平动位移）。  
170 钢拱的两端边界条件假定为固定约束（限制相应位置处节点的全部平动和转动位移）。

### 3.3 环境振动测试

本文中环境振动测试使用 LMS Cadax-8 采集系统进行数据采集。测试过程中，设置 3 个固定位置的参考点（第 4#、11#和 16#，可见图 5）和 5 个移动测点。每次测试首先将传感器垂直放置完成垂直方向的加速度时程响应数据采集，然后将传感器水平放置测试全桥横向弯曲模态。测试时间为 10~20 分钟，采样频率为 512Hz。竖向模态的测试中，第 5 个测试工况中 2 号测点的加速度时程信号如图 6 所示。由随机子空间识别法获取的桥面振动稳态图如图 7。

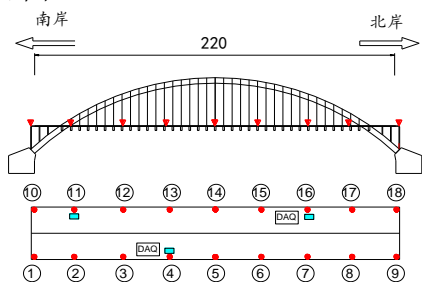


图 5 来华大桥模态测试测点布置图

Fig.5 Layout of sensors in the ambient vibration test

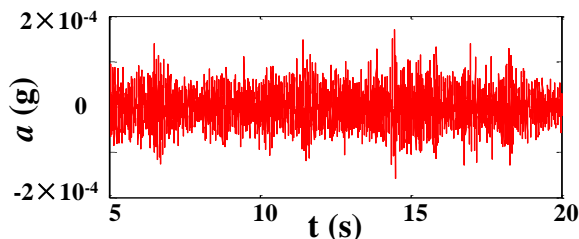


图 6 测点 2 加速度时程响应信号

Fig.6 Acceleration time series of point 2

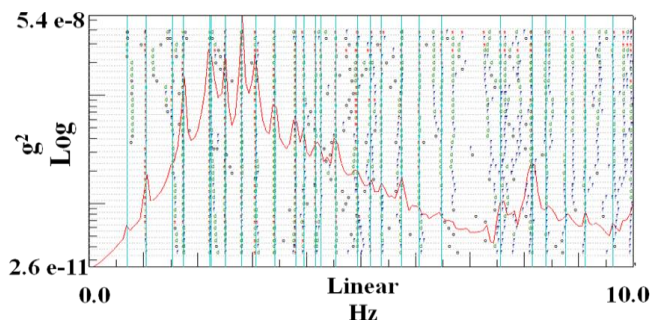


图 7 基于 SSI 方法获得桥面振动的稳态图

Fig.7 SSI Stabilization diagram for the deck

### 3.4 静载控制试验

在各种不同的荷载组合作用下，钢管混凝土拱和主跨桥面竖向变形及应变是静载控制试验的主要内容。加载的位置分为主跨跨中和 1/4 位置。按照不同的车辆数分别设置沿桥梁纵轴对称加载和偏心加载的两种加载形式，每台加载车辆的重量均为 300kN。静载试验共预设了 20 个加载工况，其中主跨 1/4 位置对称加载 10 台车的试验工况如图 8 所示。

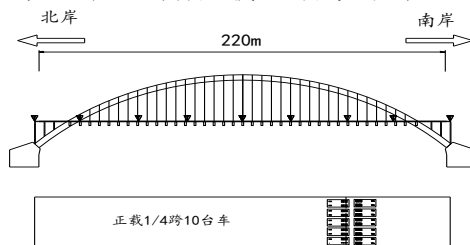


图 8 静载试验加载布置图

Fig.8 Overview of static loading test

桥面测点布置在沿桥面均匀分布的 8 等分点上，具体设置于桥面防撞栏内侧平坦处。测试过程采用电子水准仪和光学人工水准仪分别进行测量读数，并相互校核测试结果。在进行钢管拱的竖向位移测试前，预先将全站仪棱镜安放在钢管拱上各个 8 等分点位置，分别在上下游

195 河滩安置全站仪测量各个测点的位移变形。

### 3.5 不确定参数校验

200 为了研究模型的输出对于各建模参数的敏感程度,对结构进行灵敏度分析。分析过程中,选取模型中各主要单元的密度、弹性模量等不确定性参数作为分析对象。基于模态频率的目标函数可见于前文公式(1-1),不确定参数的上下限及其校验结果可见于表1。其中,参数的校验结果根据灵敏度分析曲线中目标函数的极小值确定。

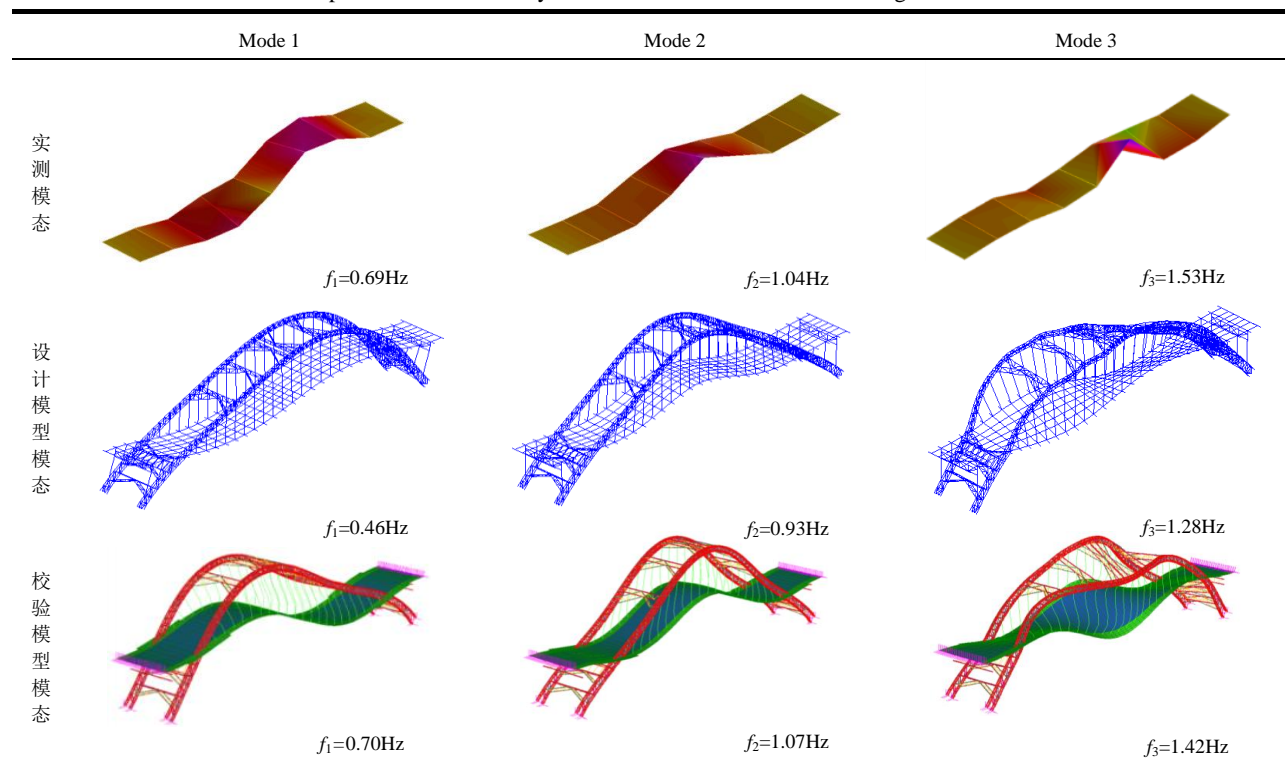
表.1 基于模态频率的灵敏度分析所选取参数及其校验结果  
Tab.1 Sensitivity analysis and parameters selections based on modal frequency

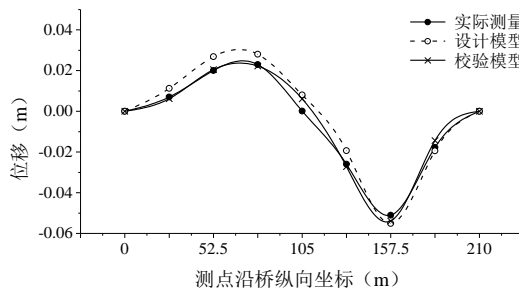
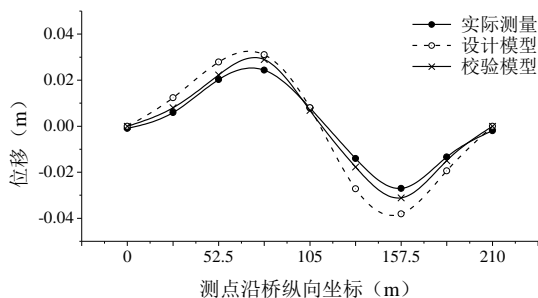
参数	参数设计值	变量下界	变量上界	校验结果
混凝土拱弹性模量/(MPa)	$4.40 \times 10^4$	$0.60E_0$	$1.50E_0$	$3.96 \times 10^4$
钢拱弹性模量/(MPa)	$2.06 \times 10^5$	$0.60E_0$	$1.50E_0$	$2.06 \times 10^5$
人行道板密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$2.40 \times 10^3$	$1.80 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$	$2.10 \times 10^3$
支座竖向刚度/(N/mm)	$+\infty$	$10^4$	$10^{12}$	$10^{12}$

### 3.6 模型对比与结构评估

205 根据现场实测数据、设计模型和校验模型的有限元分析。两种模型的理论模态分析结果以及环境振动工作模态分析结果的对比可见表2。在1/4跨加载10台车的荷载工况下,钢拱和桥面板的竖向变形可见于图9、10。为了清楚地表现结构在加载时的工作状况,本文选取了部分关键位置测点的校验系数列于表3。

表2 前三阶有限元软件计算模态振型与实测结果对比  
Tab.2 Comparison of modal analysis between ambient vibration testing and 3D FE model





210

图 9 1/4 跨加载 10 台车作用下的钢拱变形 图 10 1/4 跨加载 10 台车作用下的桥面变形

Fig.9 Displacement shape of steel arch under 10 cars loaded on the 1/4 span

Fig.10 Displacement shape of deck under 10 cars loaded on the 1/4 span

215

表.3 挠度校验系数对比

Tab.3 Comparison of deflection calibration coefficients

位置	拱肋		桥面	
	主跨 1/4	主跨 3/4	主跨 1/4	主跨 3/4
实测挠度 (mm)	20.00	-27.00	20.00	-51.00
设计模型挠度 (mm)	27.00	-38.00	26.00	-55.00
校验模型挠度 (mm)	22.00	-30.00	20.00	-53.00
校验前 $\eta$	0.74	0.71	0.77	0.92
校验后 $\eta$	0.91	0.90	1.00	0.96

220

从静载变形曲线可以看出，两种模型均正确反映大跨度拱桥在荷载作用下的变形状况，都能预测结构的变形，相较于设计模型，校验模型的变形结果与试验测试结果更为一致。设计模型中各个测点的校验系数值较小，其结果说明结构具有较高的安全储备，而校验模型的结果分布则较为集中，校验系数的值均稳定在 0.9-1.0 之间，结构仍然处于安全的范围内，评估结果较为可靠。此外，对比两种模型的模态分析结果，来华大桥校验模型的理论模态分析与工作模态分析结果的误差相较于设计模型大幅减小。

### 3.7 反应谱分析

225

根据国家质量技术监督局发布的《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)<sup>[23]</sup>，来华大桥处于 6 度抗震设防烈度区域。其所处地区的地震动峰值加速度为 0.05g，反应谱特征周期为 0.35s，场地类别为 I 类，属于抗震不利地段。来华大桥的主跨为 210m，属于特殊桥梁，因此参照规范给出特殊桥梁的设计原则进行 E1 阶段的抗震分析。反应谱分析中选用的地震影响系数曲线如图 11 所示。对来华大桥的设计模型和校验模型分别选取足够的振型按照完整二次项的方法(CQC 法)进行组合，确保反应谱分析每个方向的质量参与系数均达到 90%。根据反应谱分析结果，几个控制截面在 X (顺桥向)、Y (横桥向) 方向地震作用下的截面内力和位移列于表 4、表 5。

230

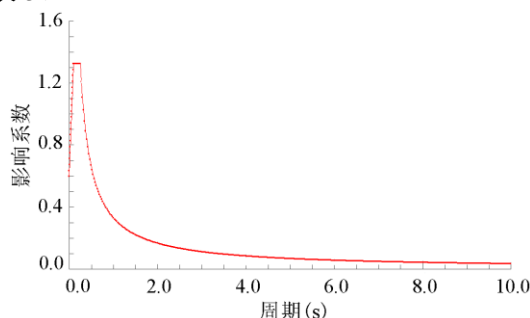




图 11 地震影响系数曲线

Fig.11 Seismic influence coefficient curve

235

表 4 地震作用下控制截面的内力

Tab.4 Internal force of key section under seismic action

模型分类	顺桥向 X: $M_x$ /(kN·m)		横桥向 Y: $M_y$ /(kN·m)	
	主跨拱脚	拱顶	主跨拱脚	拱顶
设计模型	56.80	23.75	286.50	5.46
校验模型	52.39	22.86	243.20	7.90

表 5 地震作用下控制截面的位移

Tab.5 Displacement of key section under seismic action

模型分类	顺桥向 X: $D_x$ /mm		横桥向 Y: $D_y$ /mm	
	桥面最大位移	拱圈最大位移	桥面最大位移	拱圈最大位移
设计模型	4.20	3.60	10.90	31.70
校验模型	4.32	3.83	4.25	27.83

240

245

按 CQC 方法进行振型组合的过程中, 校验模型模态频率均大于相应的设计模型。说明经过精确建模和校验后, 校验模型的结构刚度略大于初始设计模型。根据反应谱分析的结果, 校验前后, 两种模型在顺桥向地震的作用下, 结构控制截面的内力与位移无明显差别。然而在横桥方向地震作用下, 两种模型中钢拱的内力分布与桥面板和钢拱的最大位移结果均存在差异。横向地震作用下, 校验模型中的最大位移小于设计模型的相应结果。反映出横向地震作用时, 校验模型的能量耗散能力小于最初设计模型, 使用设计模型进行结构抗震评估将偏于不安全。

## 4 结论

250

大跨度拱桥因构型复杂且施工技术难度大, 实际结构中存在着众多不确定性因素。本文针对大跨度拱桥的结构识别工作主要借助于现场静载试验和随机振动测试。结合工作模态分析以及有限元理论模态分析, 通过对比理论分析和试验的结果, 消除不确定性因素。本文以团队测试过的一座大跨度拱桥为研究对象, 基于初始设计模型、模态分析、模型校验等工作完成了结构识别和工作状况评估。并在识别的基础上进行了地震作用下桥梁的反应谱分析和控制截面的响应预测。

255

(1) 大跨度拱桥结构中构件与材料性质复杂, 使用有限元设计模型模拟实际结构的过程通常会引入大量的不确定性因素。通过对比两座大桥的设计模型和工作模态分析的结果, 设计模型的理论结果和工作模态分析结果之间存在较大误差, 设计模型仅能作为实际结构的先验与近似。

260

(2) 综合考虑大跨度拱桥模态频率与模态振型匹配的目标函数可以有效减小有限元模型与实际结构的模态参数误差。其中, 灵敏度分析工作可以快速筛选重要不确定性参数。通过对比两种模型的校验系数, 设计模型中各个控制截面校验系数的分布较为离散, 而校验模型的校验系数则大多收敛于 1。经过精确建模和不确定参数校验的模型能够更准确地进行大跨度拱桥的工作状况评估。

(3) 对比设计模型和校验模型的静载变形曲线, 两种模型均正确地反映了实际大跨度

265 拱桥在荷载作用下的挠曲变形,都可以作为结构响应预测的参考。然而经过精确建模和参数  
校验后,校验模型的变形曲线和静载试验得到的结构变形更为一致。使用校验模型可以更可  
靠地进行结构响应预测。

(4) 根据反应谱分析结果。来华大桥两种模型在横向地震作用下,钢拱的内力分布以  
及结构最大位移均存在较大差异。利用未经精确建模和参数校验的设计模型进行的反应谱分  
270 析将高估结构在横向地震作用下的能量耗散能力。由于不确定参数的影响,使用设计模型进  
行大跨度拱桥结构的抗震性能评估往往偏于不安全。

#### [参考文献] (References)

- [1] 曹树谦, 张文德. 振动结构模态分析理论、实践与应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- 275 [2] Nazmy A S. Stability and load-carrying capacity of three-dimensional long-span steel arch bridges[J].  
Computers and Structures, 1997, 65(6):857-868.
- [3] Ren W, Zhao t, Harik I. Experimental and analytical modal analysis of steel arch bridge[J]. Structural  
Engineering, 2004, 130(7): 1022-1037.
- [4] Ko J M and Ni Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges[J]. Bridge  
Engineering Structure, 2005, 27: 1715:1725.
- 280 [5] Zanardo G, Hao H, Xia Y, Andrew J D. Stiffness assessment through modal analysis of an RC slab bridge  
before and after strengthening[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 590-601.
- [6] Filipe M, Alvaro C, Elsa C. Dynamic monitoring of a long span arch bridge[J]. Engineering Structures, 2008,  
30: 3034-3044.
- 285 [7] Song Y, Lei Y. Applcation of wireless sensing system for the wuyuan steel arch bridge[J]. Earth and Space,  
2008: 1-6.
- [8] Bayraktar A, Altunisik A, Birinci F, Sevim B, Turker T. Finite-element analysis and vibration testing of a  
two-span masonry arch bridge[J]. Perform Constr Facil, 2010, 24(1):46-52.
- [9] Wei L, He Q. Health state evaluation for multi-span double-curvature arch bridge based on static-dynamic load  
testing[J]. Condition, Reliability and Resilience Assessment of Tunnels and Bridges, 2011:17-24.
- 290 [10] Qin P, Grimmelsman K, Franklin M, Aktan E. Mitigating epistemic uncertainty in structural identification:  
case study for a long-span steel arch bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(1):1-13.
- [11] Alvarez J J, Aparicio A C, Jara J M, Jara M. Seismic assessment of a long-span steel arch bridge considering  
the variation in axial forces induced by earthquakes[J]. Engineering Structures, 2012, 34:69-80.
- 295 [12] 李晰, 张德义, 闫维明, 陈彦江. 基于环境激励的钢管混凝土拱桥工作模态识别及修正[J]. 工程力学,  
2013, 30 (9) : 81-94.
- [13] 胡志坚, 张明辉, 孔祥韶, 吴大健. 大跨度钢桁架拱桥静动力相似模型[J]. 中国公路学报, 2014, 9(27) :  
82-89.
- [14] Costa B, Magalhaes F, Cunha A, Figuriras J. Modal analysis for the rehabilitation assessment of the Luiz 1  
bridge[J]. Bridge Engineering, 2014, 19(12).
- 300 [15] Hart G C, Yao J T P. System identification in structural dynamics[J]. Journal of the Engineering Mechanics  
Division, 1977, 103(6):1089-1104.
- [16] Liu S C, Yao J T P. Structural identification concept[J]. Journal of Structural Division, 1978,  
104(10):1840-1858.
- 305 [17] Catbas F N, Kijewski C T, Aktan A E. Structural identification of constructed facilities: approaches, methods  
and technologies for effective practice of St-Id[R]. A State-of-the-Art Report by ASCE SEI Committee on  
Structural Identification of Constructed Systems, 2011.
- [18] 湛润水, 胡钊芳. 公路桥梁荷载试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [19] Bijaya J, Ren W X. Structural finite element model updating using ambient vibration test results[J]. Journal  
of Structural Engineering, 2005:617-628.
- 310 [20] 赵大亮, 李爱群, 丁幼亮, 王浩. 大跨度桥梁地震反应谱的发展[J]. 公路交通科技, 2006, 23 (2) :  
79-85.
- [21] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].北京: 人民交通出版社, 2008.
- [22] 韦晓, 袁万城, 王志强, 范立础. 关于桥梁抗震设计规范反应谱若干问题[J]. 同济大学学报, 1999,  
27 (2) : 224-229.
- 315 [23] 中国地震标准化技术委员会. 中国地震动参数区划图[Z]. 全国地震标准化技术委员会, 2012.