

文章编号:1673-9469(2010)02-0033-05

## 东江大桥模态试验与分析

危媛丞

(华南理工大学 土木与交通学院,广州 510640)

**摘要:**通过对主桥进行模态试验分析,识别出桥梁结构的固有频率、模态振型、模态阻尼等桥梁结构的动态特性参数,并运用有限元 Midas - Civil 软件,根据东江大桥设计书的具体参数,建立了主桥的理论计算模型;将模态试验结果与三维有限元模型计算结果进行了比较,二者吻合良好,从而对东江大桥主桥的抗扭、竖弯刚度及对称性等物理参数进行定性评定;测试结果可以为有限元模型修正及工程竣工验收提供依据,同时也为桥梁使用状态评估、健康监测提供较可靠的基准模型。

**关键词:**桥梁结构;动力试验;参数识别;模态分析;有限元分析

**中图分类号:**TU311

**文献标识码:**A

## Modal test and analysis of Dongjiang Great Bridge

WEI Yuan-cheng

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Dynamic characteristics of bridge structure are critical parameters in evaluating structural total performance. This paper aims to identify parameters of dynamic characteristic such as natural frequency, modal shape and modal damping, through modal - analyzing on the main bridge. According to design information, a theoretical model was built with the finite element analysis software Midas - Civil. A comparison shows that the both are in good agreement. It is carried out that qualitative evaluation of torsional and vertical curved rigidity, symmetry and more physical parameters for the main bridge of Dongjiang Great Bridge. The experimental results can provide basis and references for the rectification of finite element modal and final acceptance of construction, also for the evaluating service behavior and health monitoring of bridge.

**Key words:** bridge structure; dynamic test; parameter identification; modal analysis; finite element analysis.

桥梁结构的动态特性与桥梁的刚度、约束条件、质量及其分布有关,它是评估桥梁结构整体状态性能的重要参数。在桥梁抗震、抗风和状态监测等研究领域中,结构的固有模态是非常重要的参数之一<sup>[1]</sup>,因此对大跨径桥梁进行模态试验分析十分必要。模态试验是通过现场振动测量和分析得到结构的固有频率、模态振型、模态阻尼、模态质量、模态刚度等模态参数,通常用于校正计算模型,或由不同时间对比试验模态参数的变化推出物理参数的变化。模态试验可分为人工激振和

自然脉动两类方法,由于桥梁质量大人工激振困难,通常采用自然脉动方法进行。环境振动试验时真正的输入情况是没有测量的,模态参数识别过程时只知输出的识别<sup>[2]</sup>。环境振动法已成功地应用于一些大跨度桥梁的动力试验中<sup>[3-5]</sup>。模态试验是在常规动载试验的基础上沿顺、横桥布设多个测点,除了测取桥的各阶固有频率、振幅和阻尼外,还要测取桥的振型(即各阶固有频率各测点振幅的相对关系)。

收稿日期:2010-04-09

作者简介:危媛丞(1986-),女,江西宜春市人,硕士研究生,从事桥梁及地下结构的研究。

### 1 东江大桥概况

东莞东江特大桥是一座三桁刚性悬索钢桁梁双层公路特大桥,位于东莞市莞深高速公路与北五环路共线段上,跨越东江南支流。大桥上层为莞深高速公路,双向六车道加紧急停车带,设计行车速度 100km/h,设计荷载等级为公路 - I 级荷载,下层为北五环路城市快车道,双向八车道,设计行车速度 80km/h,设计荷载等级为城 - A 级荷载。东江特大桥主桥全长 432m,为刚性悬索加劲连续钢桁梁结构,跨度布置为 112m + 208m + 112m。主桁立面采用有竖杆的华伦式桁架,桁高 10m,节间长度 8m,中间支点处上加劲弦中心到上弦中心高度为 28m,上加劲弦采用二次抛物线,上弦杆与加劲弦杆之间用吊杆连接。主桁横向采用三桁结构,桁间距 2 × 18m。主桁三片桁间仅在中间支点上加劲弦与上弦间的大竖杆处设有横向联结系,其他位置将竖杆与横梁联结成横向框架。主桁杆件为箱型截面整体节点结构,杆件之间采用高强度螺栓连接。

### 2 模态试验测点布置

根据桥梁上部结构的形式,主要是要识别出结构的弯剪振动和扭转振动的固有频率与模态振型。为了能够较准确地识别出结构较高阶数的固有频率及对应的模态振型,必须布置足够多的测点。考虑桥梁的结构特点,测点的布置为:在主桥上下两层桥面的边跨中桁、两边桁的 L/4、L/2、3L/4 处,以及中跨中桁、两边桁的 L/6、2L/6、3L/6、4L/6、5L/6 处布置竖向振动的测点,共计有 66 个竖向测点,测点布置及测点编号见图 1;在主桥上层桥面的中桁两边跨的支座、跨中,以及中跨的 L/4、L/2、3L/4 处布置水平横桥向振动的测点,共计有 9 个横向测点。由于测点数量较多,故采用测点分组采样测量的方法,每组测点采样时都同时对固定的基准参考测点(竖向为 DR4 和 DR8 测点、水平横桥向为 H4 和 H6 测点)进行采样。

振动信号采集采用国家地震局工程力学研究所研制生产的 891 型速度传感器,信号放大、采样采用北京东方振动研究所生产的 DLF - 6 型电荷电压滤波积分放大器及 DASP20003 模态、信号处理分析软件系统。

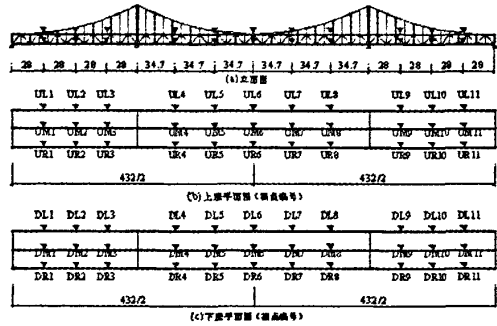


图1 模态试验竖向传感器布置图  
Fig.1 Vertical layout drawing of sensors in modal test

### 3 模态参数识别原理和步骤

东江大桥主桥是利用自然环境激励而引起的振动来识别结构的模态参数。假设激励力的功率谱密度矩阵为  $[S_f(\omega)]$ , 响应功率谱密度矩阵为  $[S_{xx}(\omega)]$ , 则根据理论分析<sup>[6]</sup>有

$$[S_{xx}(\omega)] = [H] * [S_f(\omega)][H]^T = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N H_{1k}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{1p} & \sum_{k=1}^N H_{1k}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{2p} & \dots & \sum_{k=1}^N H_{1k}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{Np} \\ \sum_{k=1}^N H_{2k}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{1p} & \sum_{k=1}^N H_{2k}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{2p} & \dots & \sum_{k=1}^N H_{2k}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{Np} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{k=1}^N H_{Nk}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{1p} & \sum_{k=1}^N H_{Nk}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{2p} & \dots & \sum_{k=1}^N H_{Nk}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{Np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $[H]$ —频率响应函数矩阵;  $[H]^*$ — $[H]$  的共轭;  $N$ —测点的数量。

将方程(1)中  $[S_{xx}(\omega)]$  的元素  $S_{x_r x_j}(\omega)$  表示为

$$S_{x_r x_j}(\omega) = \sum_{k=1}^N H_{rk}^* \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} H_{jp} \quad (2)$$

假定结构的固有频率相对分离且结构阻尼小、且激励频率  $\omega$  等于结构第  $r$  阶固有频率  $\Omega_r$  有

$$H_{ik} = \sum_{l=1}^h (H_{il})_i \approx (H_{ik})_r = \gamma_r \varphi_{ir} \varphi_{kr} \quad (3)$$

式中  $\gamma_r = (k_r - \omega^2 m_r + j\omega C_r)^{-1}$ ;  $\varphi_{ir}$ —第  $r$  阶振型的第  $i$  个元素,  $h$ —所考虑的振型的数量;  $k_r$ 、 $m_r$ 、 $C_r$ —对应的模态刚度、模态质量和模态阻尼。

将式(3)代入式(2),有

$$S_{x_i x_j}(\omega = \Omega_r) = \sum_{k=1}^N \gamma_r^* \varphi_{ik} \varphi_{jk} \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} \gamma_r \varphi_{ip} \varphi_{jp} =$$

$$\varphi_{ir} \gamma_r^* \left( \sum_{k=1}^N \varphi_{ik} \sum_{p=1}^N S_{f_{kp}} \varphi_{jp} \right) \gamma_r \varphi_{jr} =$$

$$|\gamma_r|^2 \varphi_{ir} \varphi_{jr} \left( \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^N \varphi_{ik} S_{f_{kp}} \varphi_{jp} \right) \quad (4)$$

由式(4),有

$$\frac{S_{x_i x_j}(\omega = \Omega_r)}{S_{x_j x_j}(\omega = \Omega_r)} =$$

$$\frac{|\gamma_r|^2 \varphi_{ir} \varphi_{jr} \left( \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^N \varphi_{ik} \varphi_{jp} S_{f_{kp}} \right)}{|\gamma_r|^2 \varphi_{jr} \varphi_{jr} \left( \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^N \varphi_{jk} \varphi_{jp} S_{f_{kp}} \right)} = \frac{\varphi_{ir}}{\varphi_{jr}} \quad (5)$$

其中  $S_{x_i x_j}$  是  $[S_{xx}(\omega)]$  中的第  $i, j$  位置上的元素,  $\varphi_{ir}$  是第  $r$  阶振型中的第  $i$  个元素。

从上式可见,结构对于环境脉动的响应,当  $\omega = \Omega_r$  时,  $[S_{xx}(\omega)]$  的任一列(或任一行)可以代表结构的第  $r$  阶振型。

试验模态分析步骤为:由功率谱密度曲线的峰值确定固有频率;根据式(5)计算得到振型。

### 4 模态分析结果与对比

#### 4.1 试验模态分析结果

按上述步骤分析可以得到东江大桥主桥前几阶固有频率及振型,具体见表 1。由于篇幅限制,仅列出典型模态振型图见图 2 至图 5。

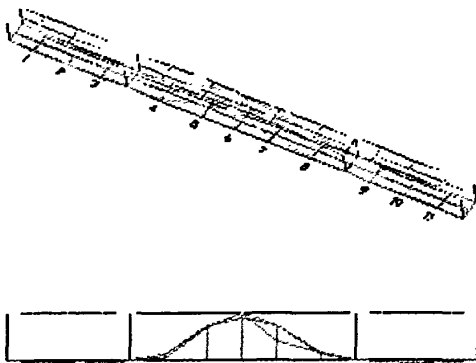


图2 第1阶竖弯(对称)振型图

Fig. 2 The first order shape of vertical curved vibration (symmetry)

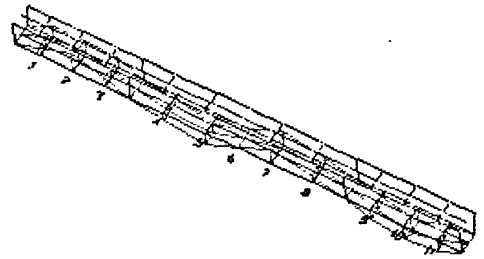


图3 第2阶竖弯(反对称)振型图

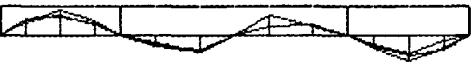


Fig. 3 The second order shape of vertical curved vibration (antisymmetry)

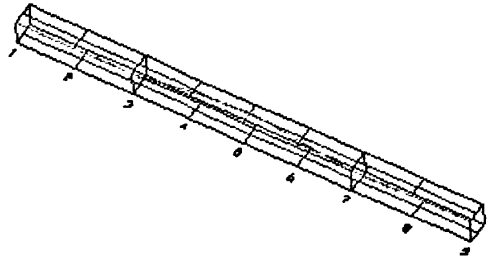


图4 第1阶横弯(对称)振型图

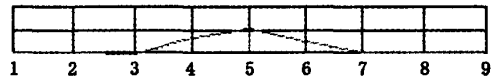


Fig. 4 The first order shape of lateral bending vibration (symmetry)

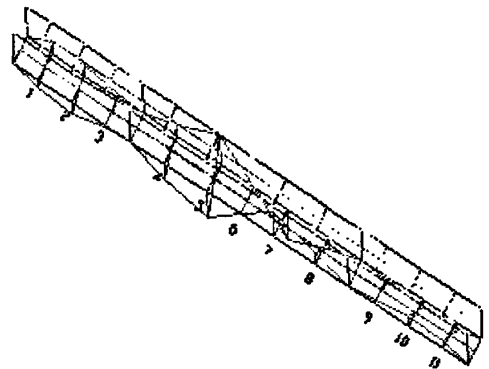


图5 第4阶扭转(反对称)振型图

Fig. 5 The fourth order shape of twisting vibration (antisymmetry)

由图2可以看出第一阶振型为竖向弯曲,主桥跨中6测点及两侧对称4、5、7、8测点均发生竖向的振动,且振幅相对较大,上下层桥面竖向弯曲一致且具有正对称特征经数据分析,其固有频率为0.781、模态阻尼为1.22;由图3可以看出第二阶振型为竖向弯曲,跨中测点6振幅较小,关于其对称的各测点均发生不同程度的方向相反的振动,以1、2、5、7、10、11测点振幅较大,上下层桥面竖向弯曲一致且具有反对称特征,其固有频率为1.289、模态阻尼为1.13;由表图4可以看出横弯第一阶振型为正对称横向弯曲,以3、5、7测点振幅较大,关于5测点对称的3、7测点与其振动方向相反;由图5可以看出该振型为横向扭转,跨中6测点振动不明显,关于其对称的1、2、3、4、5、7、8、9、10、11各测点振幅较大,1、2、3测点上下游桥幅测点振动方向相反,幅值相近,且9、10、11上下游各测点与其呈中心。

#### 4.2 有限元模态分析结果

考虑桥面铺装质量(利用Midas-Civil分析),得出主桥竖向弯曲前五阶,横向弯曲前三阶,扭转前四阶的振形及其对应的频率,如表1所示,典型振形图如图6至图9所示。

表1 各阶振型实测频率值与理论频率值比较表(单位:Hz)

Tab.1 The comparative statement on experimental and theoretic frequency in different modes of vibration

模态	实测值	理论值	模态振型
1	0.781 4	0.754 7	竖弯 1(对称)
2	1.289 3	1.273 4	竖弯 2(反对称)
3	1.719 0	1.842 1	竖弯 4(反对称)
4	2.480 9	2.174 5	竖弯 5(对称)
5	1.347 9	1.254 1	扭转 1
6	2.226 9	1.916 5	扭转 2
7	2.559 0	2.491 3	扭转 4
8	1.074 6	0.994 3	横弯 1
9	1.484 8	1.097 7	横弯 2
10	1.817 0	1.155 9	横弯 3

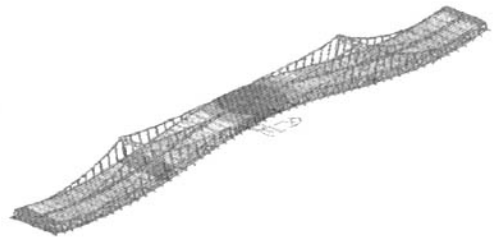


图6 第1阶竖弯(对称)振型图

Fig.6 The first order shape of vertical curved vibration (symmetry)

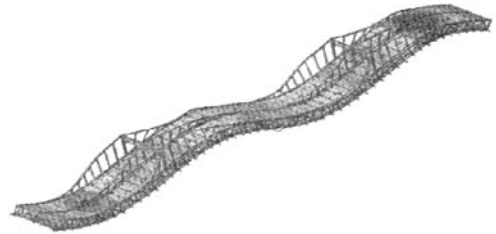


图7 第2阶竖弯(反对称)振型图

Fig.7 The second order shape of vertical curved vibration (antisymmetry)

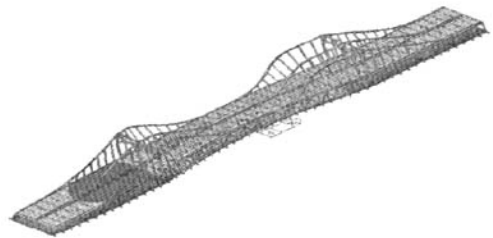


图8 第1阶横弯(对称)振型图

Fig.8 The first order shape of lateral bending vibration (symmetry)

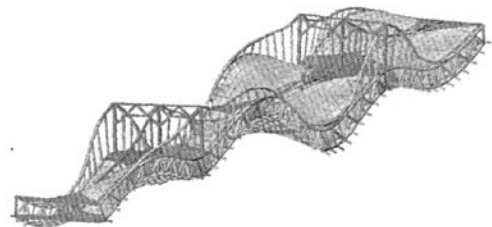


图9 第4阶扭转(反对称)振型图

Fig.9 The fourth order shape of twisting vibration (antisymmetry)

#### 4.3 对比分析

本次采用环境激励的自然脉动法对东江大桥

主桥结构进行试验模态分析,4.1和4.2部分分别列出了试验模态分析结果(包括模态较典型阶次的频率,阻尼和振型)和有限元模态分析结果,通过所列出的实验分析结果和有限元分析结果可知其吻合程度良好。模态试验中各阶振型实测频率值与理论频率值比较如表1所示。

## 5 结论

通过振动频率、振型、阻尼等模态参数的比较,可看出实测各振型频率比理论值稍大,说明了东江大桥主桥的抗扭刚度、竖弯刚度等物理参数良好;但从识别的结果来看,环境振动实验分析结果遗漏了一些模态,这也说明实际工作中这些模态没有被激励起来;有限元计算与模态试验的比较结果验证了东江特大桥有限元模型的有效性,为该桥建立结构健康监测系统和进行结构状态评估提供分析的基础。

## 参考文献:

- [1] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社, 1996.
- [2] REN W X, ZHONG Z H. Output - only modal parameter identification of civil engineering structures [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004, 17(3-4):429-444.
- [3] WILSON J C, LIU T. Ambient vibration measurements on a cable - stayed bridge [J]. Earthquake Engineering of Structural Dynamics, 1991(20): 723 - 747.
- [4] CHANG C C, CHANG T Y P, ZHANG Q W. Ambient vibration of long - span cable - stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2001, 6(1):46 - 53.
- [5] REN W X, PENG X L, LIN Y Q. Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable - stayed bridge [J]. Engineering Structures, 2005, 27(4): 535 - 548.
- [6] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社, 2004.

(责任编辑 刘存英)

(上接第32页)

## 4 结论

利用经典的 Mohr 准则,得到岩石微元强度新的表示方法,结合损伤力学理论和统计强度理论,建立了三轴压缩条件下的岩石损伤本构模型。模型曲线与试验曲线吻合良好,可以灵活地模拟各级围压下岩石破裂过程的全应力应变关系,尤其是应变软化特性。模型形式简单,应用方便,接近工程实际。

## 参考文献:

- [1] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1993.
- [2] 曹文贵,方祖烈,唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(16):628 - 633.
- [3] 曹文贵,张升. 基于 Mohr - Coulomb 准则的岩石损伤

统计分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1):43 - 47.

- [4] 友卿. 岩石强度的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 23 - 27.
- [5] 徐卫亚,韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 787 - 791.
- [6] 李杭州,廖红建,盛谦. 基于统一强度理论的软岩损伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1331 - 1336.
- [7] 余成学,刘杰. 基于 Mohr 强度理论的双参数抛物线型屈服准则[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(1):31 - 34.
- [8] 赵彭年. 松散介质力学[M]. 北京:地震出版社, 1995.
- [9] 张明,李仲奎,苏霞. 准脆性材料弹性损伤分析中的概率体元建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4282 - 4288.
- [10] 曾亚武,赵震英,朱以文. 岩石材料破坏形式的分叉分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7):4282 - 4288.

(责任编辑 刘存英)

作者: 危媛丞, WEI Yuan-cheng  
作者单位: 华南理工大学, 土木与交通学院, 广州, 510640  
刊名: 河北工程大学学报(自然科学版)   
英文刊名: JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING (NATURAL SCIENCE EDITION)  
年, 卷(期): 2010, 27(2)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(6条)

1. 李国豪 [桥梁结构稳定与振动](#) 1996
2. REN W X;ZHONG Z H [Output-only modal parameter identification of civil engineering structures](#) 2004(3-4)
3. WILSON J C;LIU T [Ambient vibration measurements on a cable-stayed bridge](#) 1991(20)
4. CHANG C C;CHANG T Y P;ZHANG Q W [Ambient vibration of long-span cable-stayed bridge](#)[外文期刊] 2001(01)
5. REN W X;PENG X L;LIN Y Q [Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge](#)[外文期刊] 2005(04)
6. 林家浩;张亚辉 [随机振动的虚拟激励法](#) 2004

## 本文读者也读过(10条)

1. 刘蕾蕾 [基于曲率模态分析的梁桥损伤识别研究](#)[会议论文]-2008
2. 马斌 [高拱坝及反拱水垫塘结构泄洪安全分析与模拟](#)[学位论文]2006
3. 张永强, 陈立, 王翠荣 [桥梁与大型建筑结构实验模态分析一体化系统的设计与实现](#)[会议论文]-2007
4. 郭家骅, 陈怀海, 贺旭东, Guo Jiahua, Chen Huaihai, He Xundong [纯模态试验中的作动器/传感器优化配置](#)[期刊论文]-[南京航空航天大学学报](#)2006, 38(2)
5. 张强, 施凤英, 刘建新, Zhang Qiang, Shi Fengying, Liu Jianxin [随机参数结构频率响应函数的分析](#)[期刊论文]-[振动与冲击](#)2006, 25(2)
6. 王太平, 李长皓, WANG Taiping, LI Changhao [著作权保护的双重限制——以死海古卷案引之为鉴](#)[期刊论文]-[知识产权](#)2007, 17(4)
7. 蔡东升, 刘荣桂, 许飞, 周士金, Cai Dong-sheng, Liu Rong-gui, Xu Fei, Zhou Shi-jin [CFRP索斜拉桥动态特性的有限元分析及动态试验](#)[期刊论文]-[中国工程科学](#)2010, 12(2)
8. 鞠洪海, JU Hong-hai [大跨度桥梁拉索端头的有限元分析](#)[期刊论文]-[煤炭技术](#)2010, 29(2)
9. 魏军, 冯咬齐, 樊世超, 邱汉平, Wei Jun, Feng Yaoqi, Fan Shichao, Qiu Hanping [多轴振动试验系统传递函数估计的数值仿真](#)[期刊论文]-[航天器环境工程](#)2009, 26(1)
10. 章献, ZHANG Xian [独塔斜拉桥动力特性的有限元分析及试验研究](#)[期刊论文]-[桥梁建设](#)2005(4)

## 引证文献(1条)

1. 文华斌, 郭毅, 李良, 刁砚, 陆春华 [大型箱形拱桥的静载试验研究](#)[期刊论文]-[四川理工学院学报: 自然科学版](#) 2012(4)