

文章编号: 1000-4750(2015)09-0174-09

基于应用程序交互访问技术的 桥梁有限元模型修正研究

蒋运忠, 周 云, 谢利民

(湖南大学土木工程学院, 湖南, 长沙 410082)

摘 要: 传统的有限元模型修正方法对于具有复杂多自由体系的大型桥梁结构显得束手无策, 其中一个重要的原因是大型桥梁结构体系很难用有限元编程精确地表达, 难以建立完整的或者缩聚的质量矩阵和刚度矩阵。该文开发了基于应用程序交互访问的有限元模型修正模式, 首先在 Strand7 软件中建立初始的有限元模型, 然后利用 MATLAB 建立迭代程序并调用 Strand7 软件, 通过读写 Strand7 中的物理参数来更新模型, 实现了大型桥梁结构有限元模型修正。该文对一座实桥进行多参考点脉冲锤击法模态试验和静载试验, 基于获得的静动力试验数据和 Strand7 有限元模型分析结果, 引入损伤函数的概念识别得到了该桥各梁的分段刚度, 成功地实现了单元层次的参数识别。

关键词: 有限元模型修正; 桥梁结构; 应用程序交互; 静动力实验; 损伤函数; 损伤识别

中图分类号: TU318 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.03.0177

RESEARCH ON UPDATING FINITE ELEMENT MODEL FOR BRIDGE BASED ON APPLICATION PROGRAMMING INTERFACE TECHNIQUE

JIANG Yun-zhong, ZHOU Yun, XIE Li-min

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: A traditional model-updating method can hardly deal with a large complex bridge structural system with multi-degrees of freedom. An important reason is that a structural system is difficult to be accurately represented by the finite element (FE) model coding, and that especially the complete or reduced mass matrix and stiffness matrix are difficult to be built. In this paper, a FE model-updating method based on an application programming interface (API) was developed. An initial FE model was built in Strand7 software, and the physical parameters in Strand7 was rewritten by using MATLAB interactive coding. Thusly, the model can be updated iteratively by MATLAB procedure, and the model updating of large bridge structures was realized. An in-situ bridge was tested by using a multi-reference hammer impact modal test and a truck-load test. The concept of a damage function was introduced to model identification. By comparing between the test data and finite element analysis results, the stiffness of each girder has been identified. Finally, the parameter identification in element level was successfully realized.

Key words: finite element model updating; bridge structure; application programming interface; static and dynamic test; damage function; damage detection

收稿日期: 2014-03-12; 修改日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51208190); 湖南省自然科学基金青年基金项目(12JJ4053); 高校博士点基金新教师基金项目(20120161120029); 湖南大学青年科研基金业务费项目

通讯作者: 蒋运忠(1990—), 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事结构损伤诊断和动力识别的研究(E-mail: jyzhong217@126.com).

作者简介: 周 云(1979—), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监控及动力识别的研究(E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn);

谢利民(1989—), 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事结构损伤诊断和动力识别的研究(E-mail: xielimin89@gmail.com).

随着国民经济的迅速发展和城市化进程的逐步加快,国家大力投资发展交通事业,建立了现代化的交通网络,而桥梁结构则是连接现代交通建设的“咽喉”。由于反复受到车轮的磨损冲击、暴雨洪水、风沙冰雪和日晒冻融等因素的侵蚀,部分建筑材料性质随着时间增长开始发生衰变,桥梁的安全性能也因此受到威胁^[1]。为了随时掌握桥梁的安全状况,应加强对桥梁的健康监测,同时通过有效的方法来核实桥梁的承载能力^[2]。钢筋混凝土桥面板容易受到外界的侵蚀,特别是雨水侵蚀以及冬季的氯盐侵蚀和冻融循环,出现性能的退化,因此在整个寿命期中通常需要修补和置换多次。同时混凝土桥面板自身也存在着施工过程中产生的空隙,性能退化表现出不同的结构缺陷(如开裂、剥落和分层等损伤)。我国的桥梁主要为建国以后所建且桥龄一般为40年左右,大部分均存在着一定程度的病害。与西方发达国家相同的是,我国当前的桥梁检测主要是以依靠视觉检查为主的方法,工程师逐渐意识到目前的桥梁结构检测评估决策方法不可靠,需要更快速、可靠的桥梁评估方法为桥梁管理部门提供有力的决策支持。

在对桥梁进行静动力试验的基础上,利用有限元模型修正的方法进行结构物理参数识别,从而进行损伤诊断。其基本的思想是建立目标函数使测试实验结果与理论计算结果相互匹配。而对于大型桥梁结构的有限元模型修正,其应用受到了很大的限制,这是由于各种方法和理论都局限于有限元动力方程,完整的或者缩聚的质量矩阵和刚度矩阵一般很难列出,且与理论模型有着一定的差距。因此,成功地应用模型修正理论仅仅停留在自由度较少的简单结构或实验室模型结构,而对于大型复杂桥梁结构如斜拉桥、悬索桥等的自动识别应用却十分困难。

修正有限元模型使其与测试结果相匹配可以通过手工调整数据或自动有限元模型修正的方法。Brownjohn等^[3]证明了手工调整技术可以成功地应用于模型修正。Wendy等^[4]使用系统的手动调整技术对一座三维斜拉桥进行了修正。Zhang等^[5]使用有限元模型修正技术对Kap Shui Mun桥进行了深入的灵敏度研究来证明不同结构参数对所关心模态的影响。面对这一技术障碍,有学者开始探索利用计算机编程来调用商业有限元程序以实现交互的桥梁结构有限元模型修正研究。许多商业计算软

件也有能力与其它分析软件交互使用,如Fortran、C++、MATLAB等。Wei等^[6]利用ABAQUS和C++软件的交互进行了有限元模型修正的优化研究。Hua等^[7]利用ANSYS和有限差分方法进行灵敏度分析。Deng等^[8]利用计算机辅助的模型修正系统(CAMUS)来进行高层结构的有限元模型修正。Scott^[9]利用有限元软件OpenSees来进行参数修正以及反应灵敏度识别以支持可靠度、优化和系统识别方面的研究。Jafarkhani等^[10]在NASTRAN有限元软件中建立初始模型,利用自回归滑动平均模型触发模型修正程序,并基于演化策略进行结构损伤识别研究。Ribeiro等^[11]利用ANSYS、MATLAB和OpliSlang三个软件的交互对模型参数进行修正,采用遗传算法得到其最优解,并基于模态应变能对模型参数进行配对。Sanayei等^[12]利用参数识别系统(PARIS)对SAP2000有限元模型参数进行自动修正。Song等^[13]利用MATLAB程序对钢筋混凝土剪力墙的OpenSee初始模型进行非线性模型修正研究。Yang等^[14-15]提出一种新的柔度分解公式,建立结构刚度扰动参数和柔度扰动参数之间的关系,采用快速的反演算法对结构损伤进行识别,该方法只需经过一次计算即可得到较好的结果。

以往学者在处理大型复杂结构的模型修正问题时,往往只能在有限元软件中建立有限元模型,用正问题试算的方法来获取参数的灵敏度,从而寻找敏感参数,其局限性在于修正的循环迭代不能直接在有限元商业软件中进行。本文将Strand7有限元分析软件与MATLAB数值计算软件相结合,以成功实现交互访问(如图1),进而对大型复杂结构快速而自动地进行有限元模型修正。本文将利用一座三跨简支钢筋混凝土T梁桥作为算例,基于静载试验和脉冲锤击测试量测的静力位移、应变和模态参数来识别该桥梁的刚度,一个目标优化策略被用来同时进行静力识别和动力识别。

1 Strand7 交互访问

在初始的有限元模型建立后,下一步就是进行模型校验即修正模型参数使计算结果与测试反应符合良好。模型修正(Model updating)是一种理论计算,是将模型中的一个或多个参数进行修正使得修正后的模型能够更好地预测结构的反应,通常这一过程又被称为模型校验(Model calibration)。灵敏度分析通常在模型修正之前进行,系统地从模型本身

及其物理参数考虑，以保证选择最灵敏的参数进行修正。利用人工的手段进行参数调整以减小实验数据和模型输出的误差是工程师最常用的方法，但是这种调整需要对桥梁结构具有先验的认识，而且该方法是相当费时且具有局限性。通常有两种途径被用来增加模型修正的有效性，第一种途径是使用分析包直接进行编程或者使用第三方的修正软件(如 FEMTool 或 Dakota)，这种方法的局限性是没有后处理的功能。第二种途径利用 MATLAB 程序代码对结构模型进行处理，利用 MATLAB 程序将结构需要的参数提取出来并进行循环迭代运算，但此种方法只适合于结构形式比较简单的结构。



图1 MATLAB 与 Strand7 交互访问
Fig.1 Strand7 API interacting with MATLAB

Strand7 是由澳大利亚研究开发的大型有限元仿真软件系统，集前处理、分析和后处理于一体，拥有强大的建模功能和丰富的分析求解功能，曾被用来进行国家游泳中心“水立方”有限元分析。Strand7 相对于 ANSYS、Sap2000 等大型有限元软件的优势主要在于两点，一是安装空间小、价格便宜、计算性能好。对于本研究所需用到的线性静力问题计算和模态分析计算两种情况，笔者团队曾进行过 Sap2000 和 Strand7 软件的对比计算，其结果误差微乎其微。另一点也是最具创新的一点是拥有可以和其他程序交互访问的 Strand7 API 模块，为使用者开拓了宽广的技术发挥空间。Strand7 API 具有动态链接库(DLL)文件 St7API.DLL，以及一系列的头文件和包含文件，DLL 文件的一些功能包括：读取 Strand7 有限元数据，修正和创造 Strand7 有限元数据，启动 Strand7 求解器以及读取 Strand7 分析结果数据。头文件的存在允许外部程序与 St7API.DLL 文件访问。它们定义所有使用的函数需要调用 ‘Stdcall’ 文件。在调用过程中，‘St7APICall.h’ 和 ‘St7APICConst.m’ 需要包含在程序运行目录中，而 ‘St7API.dll’ 必需位于一个能被访问程序找到的路径里。

MATLAB 软件是进行矩阵计算最好的工具，而且其中包含很多特有的模块化的命令，因此计算软件选择 MATLAB 进行交互是最好的选择。对于大型复杂结构，特别是由各种梁、板等构件组合而

成的结构，单元编号复杂难以在 MATLAB 软件中进行编程。Strand7 软件则能运用交互编程与 MATLAB 软件直接衔接，并能利用许多 MATLAB 自带的工具箱(统计、优化和遗传算法等)来修正合理的有限元模型。利用 MATLAB 程序能直接定义和修改 Strand7 模型中的各种参数并进行反复迭代，自动提取和列出结构的反应。在综合 MATLAB 编程和 Strand7 中的内部函数的前提下，模型修正的过程能简单自动运行。Strand7 API 交互访问的基本流程如图 2 所示。

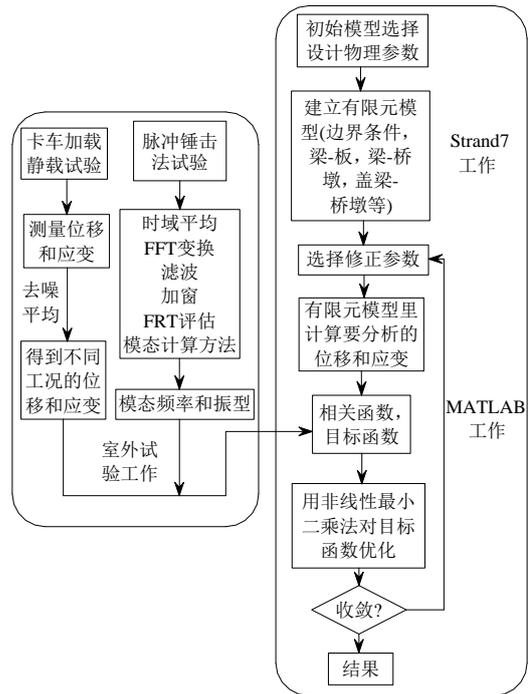


图2 利用 MATLAB 与 Strand7 交互访问的流程
Fig.2 Flowchart of the model updating based on interaction of Strand7 API with MATLAB

2 目标函数确定

在进行计算机自动交互访问研究中，可以利用目标函数来判断是否收敛。设定目的函数比较修正模型和实际结构的误差，并基于 MATLAB 自带的非线性最小二乘优化算法(Isqnonlin)进行优化求解。利用 optimest 程序设定目标函数和精度，经过有限次迭代后，当目标函数精度满足设定值要求时，程序就会发生收敛并得到最优解。对于具有位移数据、应变数据和模态数据的结构，同时进行三种数据的模型修正，定义的目标函数如式(1)~式(3)所示：

$$obj_{disp}(x) = \|d_E^j - d_A^j(x)\|^2 \tag{1}$$

$$obj_{strain}(x) = \|s_E^j - s_A^j(x)\|^2 \tag{2}$$

$$obj_{\text{modal}}(x) = \frac{1}{2} \left\| \frac{f_i(x)}{1 - MAC_i(x)} \right\|_2^2 \quad (3)$$

其中： $MAC_i(x) = \frac{|\varphi_{Ai}^T(x)\varphi_{Ei}|^2}{(\varphi_{Ai}^T(x)\varphi_{Ai}(x))(\varphi_{Ei}^T\varphi_{Ei})}$ ；

$$f_i = \frac{f_E^j - f_A^j(x)}{f_E^j}$$

在上式中，下标 E 表示实验测试数据，下标 A 表示有限元软件 Strand7 分析数据，其中 d 表示位移， s 表示应变， f 表示频率， φ 表示振型向量，其中 x 表示待识别的参数，如弹性模量等。

3 桥梁结构识别研究实例

3.1 桥梁结构介绍

研究的桥梁为一座 1930 年建造的三跨简支钢筋混凝土 T 梁桥，如图 3(a)~图 3(d)所示，每跨长、宽约 14.40 m 和 14.63 m，斜度为 18°。该桥桥面板系统共有 6 根 1.22 m×0.61 m 纵梁，并在跨中布置混凝土横隔梁，另外在桥一侧的 1/4 处和 3/4 处增加了半幅横隔梁如图 3(c)所示，因此增加了半幅桥面的质量和刚度。该桥的设计图纸缺失且无钢筋分布等详细资料，通过测量获取桥梁的截面参数如图 3(d)所示。该桥梁存在着一定的病害，包括柱子和盖梁的混凝土剥离，主梁的一些初始弯曲裂缝和剪切裂缝，以及路面沥青铺装层的表面裂缝，而其它上部结构状况良好。混凝土取样测试抗压强度为 $5.34 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ，混凝土弹性模量取值为 $3.46 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，钢筋的弹性模量取值为 $2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。

3.2 静载试验

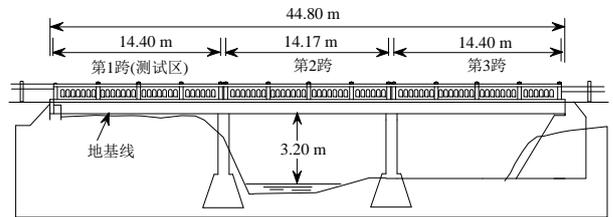
静载试验利用 6 台卡车进行加载，卡车加载位置和测点布置如图 4 所示，对第 1 跨进行应变、位移测试，由于安装位置不便对第 2 跨、3 跨的利用很少。桥梁从 3 台卡车开始加载直至加到 6 台车辆满载，平均每台约 44.5 t，总的最大荷载加到 267 t。在静载试验之前，卡车在桥面上来回跑车进行预加载，以便对测量仪器的好坏和安装位置进行相应的调整。静载试验的测量仪器包括钢筋应变传感器、垂直位移传感器以及加速度传感器。大部分的传感器元件都安装在第一跨上，其他两跨很难通过因此安装点很少。

静载试验中传感器的安装方式如图 5 所示。在第 1 跨中，12 个应变传感器被安装在钢筋上，安装点上的混凝土被凿掉，并在钢筋表面喷涂防锈漆。

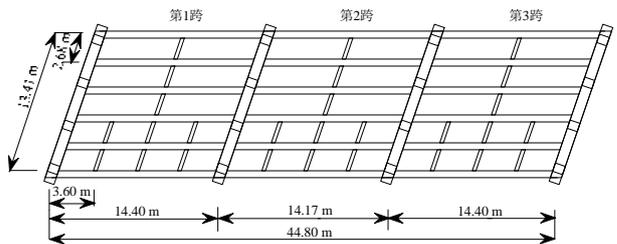
另外 14 个线性应变式位移传感器 (Texas Measurements Inc.) 用来进行位移测量。位移传感器的安装点需要安装固定支撑，其支撑点通常是在地面。在这些位移传感器中，3 个支座传感器用于测量梁对柱子的垂直变形，一个横向位移传感器用于量测盖梁的横向变形。



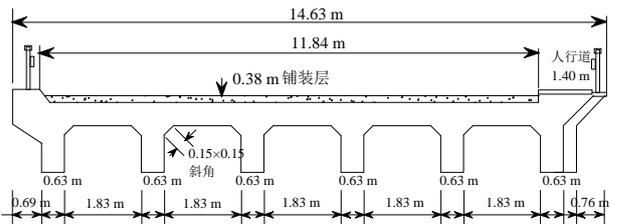
(a) 测试桥梁照片



(b) 桥梁立面图



(c) 桥梁平面梁结构布置图



(d) 桥梁截面尺寸

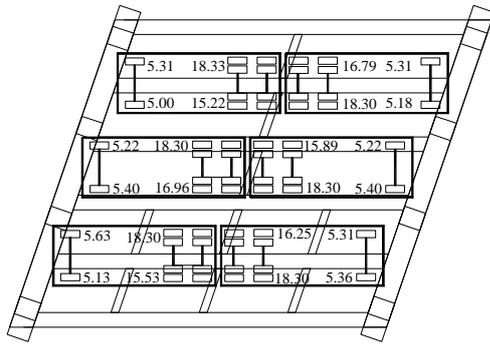
图 3 试验桥梁概况

Fig.3 Overview of the tested bridge

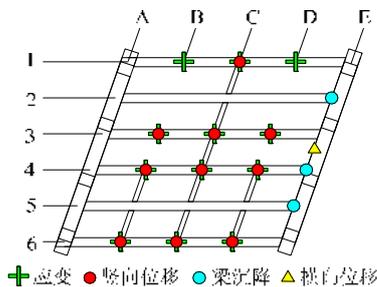
3.3 多参考点脉冲锤击法测试

脉冲锤击试验是用来测试结构的动态信号并识别结构的模态柔度，一个 PCB 手锤和两种型号的 PCB 加速度传感器(分别为 393C 地震型和 3701 电容型)被用来进行该桥的动力测试。采用 HBM 数据采集系统进行数据采集，处理信号输出时采用 24 位的模数转换。利用 11 kg 的 PCB 手锤(Model 086D50)并加设中等硬度聚氨酯红色锤头进行锤击

激励, 利用安装在梁底的 PCB393C 加速度传感器拾取加速度信号。对于脉冲锤击测试, 系统采集的是动态力信号和加速度信号, 为了获取一个小的脉冲需要有足够的时域分辨率, 需要采用尽量高的采样频率, 才能把脉冲峰值充分地描述完整而避免削波, 因此采样频率设置为 2400 Hz。用 PCB 力锤敲击桥面, 每个锤击点敲击 6 次并进行平均, 锤击点如图 6(a)所示, 每次锤击的峰值力平均约为 18 kN。动力传感器的布置主要集中在第 1 跨, 并在第 2 跨、第 3 跨的第 5 轴上布置稀疏几个动力传感器作为参考对比。



(a) 第 1 跨满载加载模式 /t



(b) 第 1 跨的静力载荷试验

图 4 静力测试工况布置

Fig.4 Case of static test

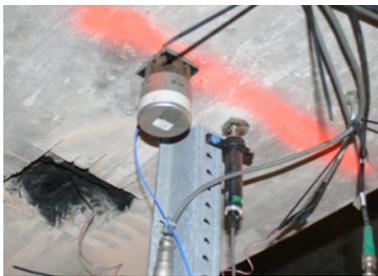
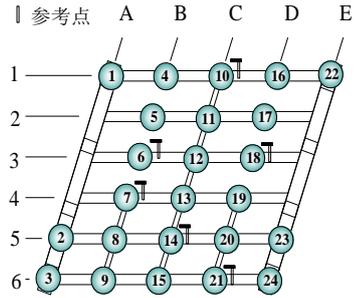
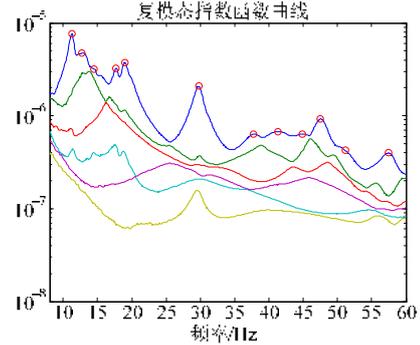


图 5 垂直位移传感器、应变传感器以及加速度传感器安装

Fig.5 Vertical displacement gage, strain gage and accelerometer mount



(a) 加速度传感器安装点



(b) CMIF 法提取模态参数

图 6 动力测试布点和参数识别

Fig.6 Instruction and parameter identification of dynamic test

采用复模态指示函数法(CMIF)进行结构模态识别。CMIF 方法是以频域模态模型为根据的一种多自由度方法。在某种整体意义下, 它先是在频率分辨率的精度之内估计阻尼固有频率, 并估计对应的未经换算的模态振型。然后再求得复数极点并进行模态比例换算。

将数据采集系统获取的加速度和脉冲力原始信号进行动力信号分析。首先是信号观察, 将错误的和有干扰的信号排除掉, 然后对力信号加矩形窗函数, 对响应信号加衰减为 1%指数窗函数, 再计算响应信号和力信号的自谱和互谱, 由于对同一个点敲击 6 次, 需要对自功率谱和互功率谱进行 6 次平均, 最终根据 H1 估计得到桥面的频响函数, H1 估计的公式如式(4)所示, 式中 $Y(f)$ 是测得的响应, $F(f)$ 是激振力。最后利用 CMIF 峰值(见图 6(b))提取前六阶模态如图 7 所示。

$$\hat{H}_1(f) = \frac{\sum_{k=1}^N Y_k(f) F_k^*(f)}{\sum_{k=1}^N F_k(f) F_k^*(f)} = \frac{\hat{G}_{fy}(f)}{\hat{G}_{ff}(f)} \quad (4)$$

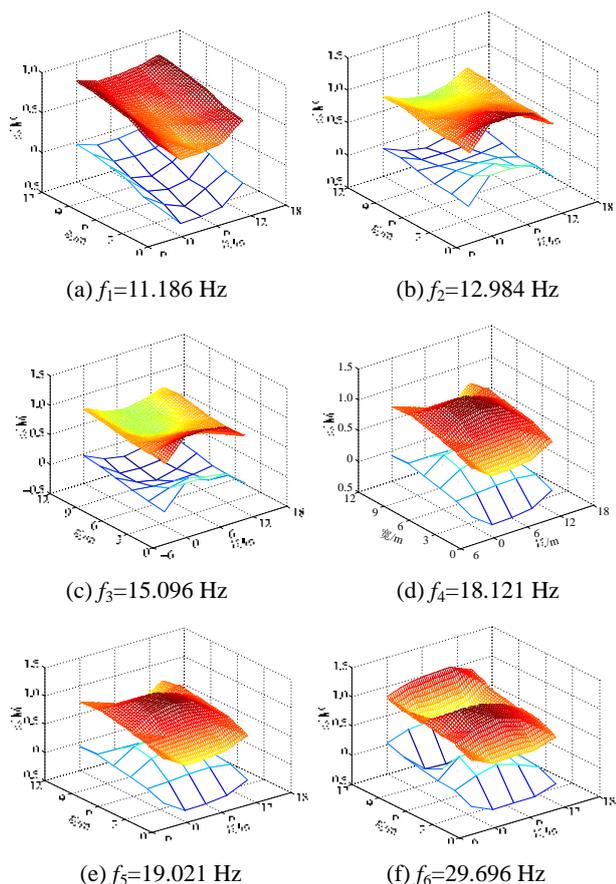


图7 利用 CMIF 方法进行模式识别

Fig.7 Identified mode shapes by CMIF method

3.4 Strand7 中的有限元模型

由于没有文献和图纸可供参考，只能根据前期调查和测量结果来建立一个有限元模型。如图 8 所示，该模型用梁单元(Beam)来表示主梁、横隔梁和柱，采用壳单元(Shell)表示桥面板，梁和板之间用刚性连接单元(Link)进行联系，以模拟梁板组合效应。主梁与盖梁相互连接使用竖向和垂直的弹簧，使梁端弯矩充分地释放，桥墩柱底部被固定。该模型由 1946 个梁单元、6068 个壳单元以及 2080 个连接单元组成，组建该模型的详细信息见图 8。

基于灵敏度分析，边界横向和纵向弹簧的刚度影响初始模型的结果。通过利用 3 个边界条件的测试位移和横向盖梁的水平位移确定边界横向弹簧刚度为 $4.553 \times 10^8 \text{ N/m}$ 和竖向弹簧刚度为 $1.92 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。其它边界位置选择了同样的弹簧刚度，柱底用固定边界条件。结构的初始弹性模量选择为 $3.46 \times 10^4 \text{ MPa}$ ，Strand7 建立的有限元模型被定义为初始模型。桥面板被进一步细分以使加载车轮位置正好能作用在划分节点上。

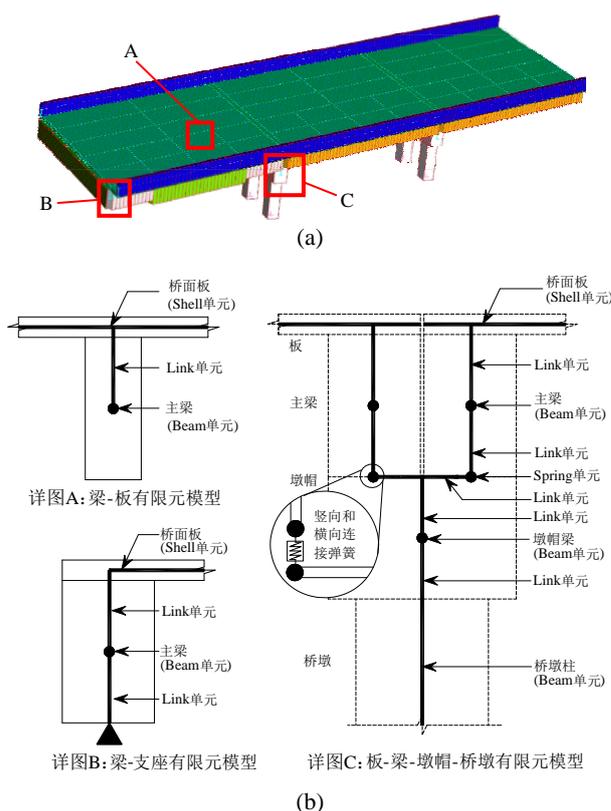


图 8 有限元模型的组成详图

Fig.8 Finite element model and the detailed configuration

3.5 模型修正过程

鉴于该桥没有基线数据，初始有限元模型和测量数据之间的误差主要由桥梁的损伤来进行判别。在进行静载试验后，在 6 根纵梁上发现明显的开裂，其中靠近双向跨中的位置开裂最大。通过静力载荷分析，第 1 跨的纤维应力分布如图 9 所示，最大应力呈现在中间部分的 6 根主要桁架。截面开裂导致其惯性矩减小，故使用弹性模量作为修正参数指标进行 6 根梁的识别。

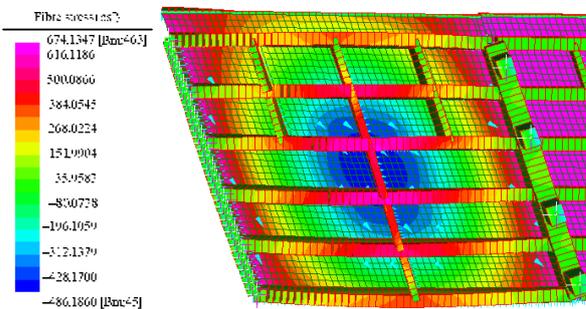


图 9 满载作用下第 1 跨的单元纤维应力(下方)

Fig.9 The fiber stress of the first span under the full truck load (downside)

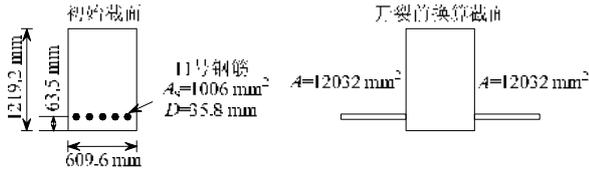


图 10 开裂前桥梁结构特性

Fig.10 The girder section properties of the bridge before crack appears

测试梁的截面尺寸为 1219.2 mm×609.6 mm，通过钢筋探测仪及凿开梁底显示具有 5 根美制 11 号钢筋如图 10 所示，梁的上边界至中性轴的距离为 626.7 mm，截面惯性矩与原始截面的比值为 1.0755。在参数识别过程中，6 根梁的弹性模量被设为待修正参数，如果所有的模型单元特性被分别修正，例如初始有限元模型的梁被划分为 48 个单元，则需要修正 288 个单元，这样不但耗费时间而且得到的各单元的物理参数之间无必然联系。因此本文将采用损伤函数的方法，将每根梁划分为 5 个区域(如图 11)，单元的划分保证每个测量点位置位于划分梁的中心位置。在参数识别过程中，该桥的弹性模量设置为 3.46×10^4 MPa，其它的结构参数维持常数，共有 30 个参数需要被修正。

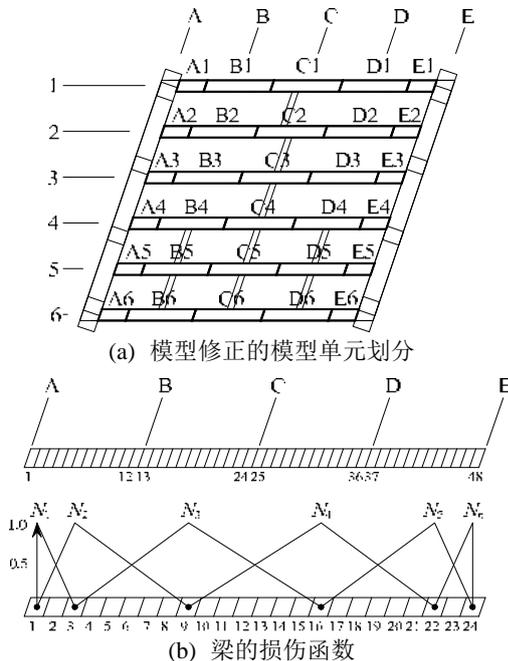


图 11 模型修正采用的损伤函数

Fig.11 Damage function of model updating

3.6 损伤函数

损伤函数采用 Teughels^[16]提出的表达式。它被用来产生一系列光滑分布的模型物理特性，修正参数为因子通过损伤函数与之相乘，可用一维形函数

来计算。

$$N_1^e(x_1) = \frac{1-x_1}{2}; N_2^e(x_1) = \frac{1+x_1}{2} \quad (5)$$

其中: $-1 \leq x_1 \leq 1$, $\max |N_1^e(x_1)| = 1$ 。

在损伤诊断中，它被后处理地映射到“损伤单元”上，被定义为一系列有限元模型的相邻单元，通过相邻节点连接。连接参数 a^e 对于每个有限单元被确定为整体损伤函数 N_i 的线性组合，

$$a^e = \sum_{i=1}^{n_i} p_i N_i(x^e) \quad (6)$$

其中: n_i 为损伤函数的数量; N_i 、 p_i 为它们之间的相乘因子; x_e 为单元 e 的中心点坐标; 每根梁被划分为 Strand7 中 48 个梁单元。该未损伤状态的初始参数为弹性模量 $E_0 = 3.46 \times 10^4$ MPa 表示，结构的惯性矩被选为原始截面特性，弹性模量为待修正参数，如式(6)所示，该值 a^e 位于 0 到 1 之间:

$$a^e = -\frac{E^e - E_0}{E_0} \quad (7)$$

该损伤函数基于 5 个损伤单元域被划分为如图 11(a)所划分的总单元，它们分别包括 3 个、7 个和 8 个子单元，每根梁共有 6 个参数值需要被识别，其损伤梁函数如图 11(b)所示。

3.7 基于位移测试结果的损伤诊断

在静载试验中，位移数据是作为损伤诊断最为可靠的信息，在第 1 跨中，沿着轴线 2 和 5 没有测量数据，该梁被划分为了 5 个区域，而且在 A 区和 E 区单元中没有数据信息。在本文中，利用数据插值方法将整个弯沉盆扩充为整个区域以包含未知测点位置给出未测试点的沉降估计位置。利用非线性最小二乘法和损伤函数，对于识别单元刚度的缩减因子如图 12 所示，从图上可看出最小值存在于第 4 和第 5 根梁上，最小刚度值存在于第 5 根梁上，而该梁边界单元基本没有改变，刚度梯度的缩减能

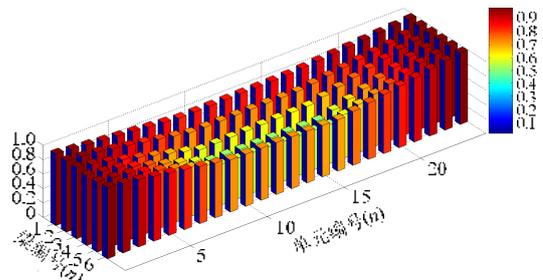


图 12 利用静力数据识别梁的刚度缩减系数

Fig.12 Identified stiffness reduced factor in different element along the girder by static data

与纤维应力分布(图 9 所示)呈现良好的对应关系。通过使用初始模型以及校验模型,计算位移数据如图 13 所示与测量数据符合较好,从中可看出经过静力模型修正,位移数据将更加接近于测量数据。

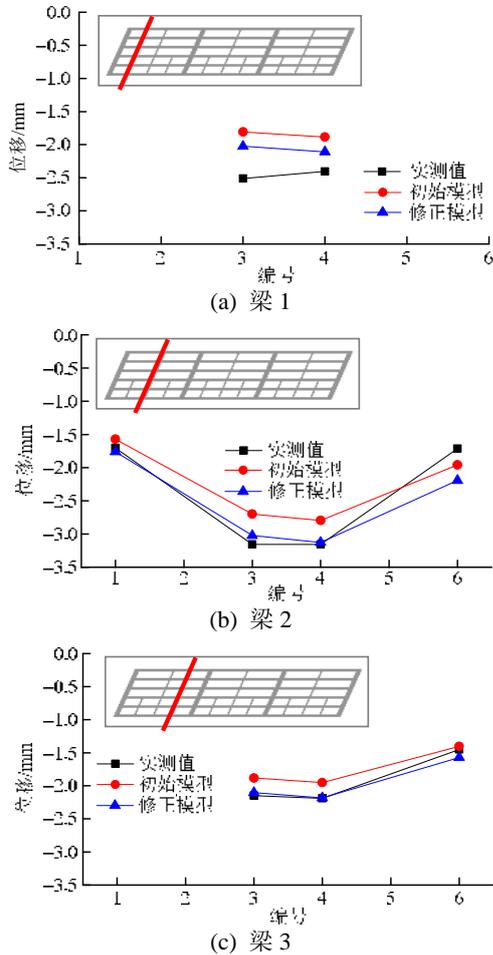


图 13 模型修正前后的位移比较
 Fig.13 Comparison of the displacement before and after model calibration

3.8 基于模态参数结果的损伤诊断

在脉冲锤击法试验中,模态数据是结构的杆件刚度和边界条件的体现。该桥梁的杆件单元刚度通过损伤函数划分方法进行识别。原始动力数据采用 CMIF 分析法进行动力信号分析,通过 Strand7 API 模型修正识别得到的刚度如图 14,显示的刚度分布与位移识别的刚度有着较大的区别,最大刚度识别结果主要位于第 5 号和第 6 号梁,而最小的结果位于第 2 号梁。这主要是由于横隔梁在第 4 号~6 号梁附近偏心布置,增大了区域刚度。通过使用识别单元刚度得到的有限元模型,重新计算其前 6 阶振型,与修正前的 6 阶振型的比较如表 1 所示,在模型修正中,6 阶模态被选择为目标函数,由于不同的模态对于不同单元的灵敏度不同,可见模态频率和

MAC 值基本获得了提高。

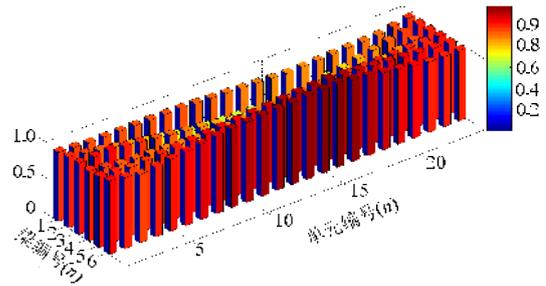


图 14 利用模态数据识别梁的刚度缩减系数
 Fig.14 Identified stiffness reduced factor in different elements along the girder by modal data

表 1 测试和计算模态对比

Table 1 Comparison of the measured and calculated modes

模态阶数	测试	未校验模型		校验的模型			
	频率/Hz	频率/Hz	误差/(%)	MAC	频率/Hz	误差/(%)	MAC
1	11.186	11.903	6.41	0.9817	11.856	5.99	0.9719
2	12.984	13.055	0.55	0.9373	13.484	3.85	0.9092
3	15.096	14.005	-7.23	0.8467	13.753	-8.89	0.8909
4	18.121	19.066	5.22	0.9576	19.004	4.87	0.9604
5	19.021	19.308	1.51	0.9701	19.281	1.36	0.9705
6	29.696	31.148	4.89	0.7361	31.228	5.16	0.7377

4 结论

针对在大型结构有限元模型修正过程中遇到的难题,主要是指因模型自由度过大和单元复杂而难以进行数值编程,使得有限元模型修正的迭代运算困难,常规做法是用正问题方法来进行试算。本文利用商业有限元软件 Strand7 与数值计算软件 MATLAB 的交互访问,通过调用 MATLAB 程序对 Strand7 软件进行操作,实现了在 Strand7 里面读取和写入数据,可以很好地对所建立的模型进行系统地识别,得到的主要结论如下:

(1) 利用 MATLAB 软件进行模型修正,其优点是利用 MATLAB 中的矩阵运算以及功能强大的各种内部函数进行计算,而 Strand7 的强大的建模能力提供待修正的模型。两者的交互访问自动完成,在设定目标函数的前提下,通过最小二乘法进行自动寻优,在不需要人为干预的情况下进行最优化结果的搜索。

(2) 对一座混凝土旧桥进行了系统的静力载荷试验和多参考点脉冲锤击法试验,基于获得的位移、应变以及模态参数结果,并考虑到在静载试验的过程中梁结构出现了损伤的情形,设定梁的弹性模量为待修正参数,成功地进行了单元层次的参数识别。

(3) 利用 MATLAB 和 Strand7 交互访问的工作特点, 将梁段总共划分为 5 个区域, 每根梁划分了 24 个有限元, 总共进行了 30 个参数的模型修正。利用损伤函数的概念, 将 30 个参数映射到 24×6 个待识别单元上。利用位移、应变和模态参数对桥梁结构进行了模型修正。修正后该桥的承载力与测试结果基本相符。

参考文献:

- [1] 吉伯海, 傅中秋. 近年国内桥梁倒塌事故原因分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊): 465—498.
Ji Bohai, Fu Zhongqiu. Analysis of Chinese bridge collapse accident causes in recent years [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Suppl): 465—498. (in Chinese)
- [2] 张宇峰, 徐宏, 倪一清. 大跨度桥梁结构健康监测及安全评价系统研究与应用进展[J]. 公路, 2005(11): 22—26.
Zhang Yufeng, Xu Hong, Ni Yiqing. Research and application prospect on structural health monitoring and safety condition assessment of large-span bridges [J]. China Highway Journal, 2005(11): 22—26. (in Chinese)
- [3] Brownjohn J M W, Xia P Q. Dynamic assessment of curved cable-stayed bridge by model updating [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 2000, 126(2): 252—260.
- [4] Daniell W E, John H G, Macdonald. Improved finite element modeling of a cable-stayed bridge through systematic manual tuning [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 358—371.
- [5] Zhang Q W, Chang T Y P, Chang C C. Finite-element model updating for the Kap-Shui Mun Cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(4): 285—293.
- [6] Song W, Dyke S, Yun G, Harmon T. Improved damage localization and quantification using subset selection [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(6): 548—560.
- [7] Hua X G, Ni Y Q, Chen Z Q, Ko J M. Structural damage detection of cable-stayed bridge using changes in cable forces and model updating [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2009, 135(9): 1093—1106.
- [8] Deng X Y, Brownjohn J M W. Development of a computer aided model updating system (CAMUS) [C]. ASCE Computing in Civil Engineering, 2005.
- [9] Scott M H, Haukaas T. Software framework for parameter updating and finite-element response sensitivity analysis [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2008, 22(5): 281—291.
- [10] Jafarkhani R, Masri S F. Finite element model updating using evolutionary strategy for damage detection [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011, 26: 207—224.
- [11] Ribeiro D, Calçada R, Delgado R, et al. Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters [J]. Engineering Structures, 2012, 40: 413—435.
- [12] Sanayei M, Rohela P. Automated finite element model updating of full-scale structures with Parameter Identification System (PARIS) [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 67: 99—110.
- [13] Song W, Dyke S, Harmon T. Application of nonlinear model updating for a reinforced concrete shear wall [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139: 634—649.
- [14] Yang Q W. A new damage identification method based on structural flexibility disassembly [J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(7): 1000—1008.
- [15] Yang Q W, Sun B X. Structural damage localization and quantification using static test data [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10: 381—389.
- [16] Teughels A, Maeck J, Roeck D G. Damage assessment by FE model updating using damage functions [J]. Journal of Computers & Structures, 2002, 80(25): 1869—1879.