

基于频响函数扩展修正的 Benchmark 结构损伤识别

胡焕 洪嘉振 刘铸永

(上海交通大学工程力学系, 上海 200240)

摘要 提出了一种基于频响函数扩展的模型修正方法,利用该方法对 IASC-ASCE SHM Benchmark 结构进行了损伤识别. 结果表明,该方法能够有效消除模态分析误差,保证修正过程中矩阵物理意义明确,降低测量噪声对修正的影响. 在模型误差、测量噪声以及质量刚度分布不确定等因素的影响下,该方法共有较高的损伤识别精度.

关键词 损伤识别, 模型修正, 扩展, 频响函数

引言

近几十年以来,随着经济科技的快速发展,大跨度桥梁、高楼、航天器和船舶等大型建筑结构不断建成并投入使用,随之而来的是结构使用寿命监测以及结构损伤识别方面不容忽视的问题,这为提前进行灾害预警以及对结构维修都提供了宝贵的依据. 广大研究者们在这些方面也发展并提出了大量的结构健康监测的方法,有些方法也已在工程实际中应用.

结构健康监测主要问题是对结构损伤进行识别,目前的识别技术大体可分为局部法和整体法两种^[1]. 局部法是依靠无损检测技术对构件局部部位进行检查,而整体法则是对整体结构的动态输出特性,在线实时或离线间断的对结构健康情况进行评估. 损伤识别一般都需要确定损伤是否存在、存在的位置和损伤程度,以及进一步对结构剩余使用寿命进行预估. 损伤识别方法大致可分为模型修正法、动力指纹识别法、神经网络法、遗传算法以及小波分析法等等方法.

以上各种方法都有各自的优缺点,本文对模型修正-结构损伤识别方法进行研究. 模型修正方法的基本思想是建立足够精度的未损有限元结构模型,然后利用真实结构损伤后的结构动力特性数据,一般为加速度时域响应、模态参数或频响函数数据等,通过条件优化处理不断修正模型中的刚度矩阵或内部的参数,使未损有限元模型与真实损伤

模型的结构特性近似,通过监测刚度矩阵变化来判断损伤的位置和程度. 国际国内利用各自提出的损伤识别方法针对结构健康监测 Benchmark (ASCE SHM Benchmark) 结构进行了大量的验证研究.

Ka-Veng Yuen^[2] 使用结构健康监测的两步法分析了 Benchmark 数据,第一步,由未损伤与损伤结构的响应识别结构损伤前后的模态参数. 第二步,利用贝叶斯模型修正方法确定结构刚度参数的可能值和损伤概率. 该方法的局限性是,如果结构损伤程度很小,分析模型和测试量不确定的情况下,模态对损伤不很敏感,该方法不能识别. H. F. Lam^[3] 提出统计模型修改法,该方法基于贝叶斯谱密度方法处理了模型误差和测量噪声的不确定性,给出了刚度参数的估计值的偏差范围,结果表明如果结构刚度损伤量与计算偏差在同一量级上,损伤不能识别. Caicedo^[4] 等通过环境激励技术和特征值实现算法 (Eigenvalue Realization Algorithm) 获得结构固有频率和模态振型,使用特征值问题的最小二乘解得到构件的杨氏模量,然后通过构件损伤前后杨氏模量的变化识别构件的损伤位置和损伤程度. 李学平^[5] 介绍了一种基于结构动力学特性变化的损伤识别方法,通过引入一个损伤分布函数,讨论了均质等截面 Bernoulli Euler 梁的动力响应,构造出“损伤影响矩阵”. 该矩阵反映了结构由于损伤所引起的振型耦合,最后介绍了基于损伤影响矩阵的结构损伤定位和评估方法. 裴强^[6] 建立了基于对称原则的结构健康诊断基准,根据对称位置构件

在完好状态下应该具有对称动力特性的特点,对可能损伤位置进行判断.张立涛等人^[7]针对结构损伤识别计算中由于矩阵奇异带来的识别结果不稳定,提出利用列主元QR分解、截断奇异值分解这两种正则技术研究识别计算中的迭代问题.徐龙河等^[8]提出了一种两阶段损伤诊断方法,先利用柔度矩阵差对可能损伤单元位置进行确定,然后采用基于二阶特征灵敏度方法确定这些可能损伤单元的损伤程度,该方法基本能达到识别目的.杜思义^[9]则提出基于频率变化和单元矩阵摄动理论的损伤识别方法,该方法仅用频率作为输入量,受测量噪声的影响较小,模型误差为二阶小量,该方法对中小程度的损伤识别精度很高.

本文研究通过模型修正方法进行结构损伤识别,目前大多数采用的基于模态振型的依赖特征灵敏度的方法,此类方法的问题在于模态识别和分析会带来误差,对于高阶密集模态的分析还有一定困难,而且根据灵敏度分析结果确定的待修正参数未必是有限元真正存在建模误差的参数,这也会影响模型修正的物理意义,甚至是结构损伤识别的准确性.基于以上几点考虑,故采用实验数据更丰富的频响函数数据,这样可以避免模态分析误差,通过对较少自由度的实验频响进行扩展,为未损有限元模型修正提供全自由度实验数据,通过修正后刚度矩阵的变化量来确定结构损伤位置和损伤程度.

1 基于实验频响函数扩展的修正方法

一般情况下,有限元模型修正前提是实验与分析模型数据自由度相同,而实际情况是,有限元由于单元节点的细化产生大量自由度数,而实验实测自由度数数目较少,解决此类问题一般采用模型缩聚或模态或扩展,而模型缩聚可能会改变原分析模型的带状稀疏性,或者说矩阵物理意义不明确,若要得到较好的损伤识别效果,必然要始终保证修正过程中的结构矩阵无意义明确,故采用实验模态或频响扩展的方式解决自由度匹配的问题.

从最有代表性的扩展方法来看,迭代插值法是建立以修正质量、刚度阵为目标函数的修正方法,虽然它的运算相对简单,但是它改变了原矩阵的带状和稀疏性,而且物理意义不明确,有时主对角元素还会出现虚元和负刚度质量的情况,这与实际情况不符;而最优拟合法是建立以实验和分析振型的

误差为目标函数的修正方法,虽然它会增加一定的计算量,但在对实验模态插值的过程中,可以在一定程度上对实验模态数据进行降噪和平滑,有助于提高实验数据的精确性^[10],综合考虑选取最优拟合法作为频响函数的扩展方法.尽管最优拟合法最初提出是针对实验模态振型扩展的,但从其扩展原理以及模态振型和频响函数的一些相似性质不难看出,该扩展方法同样适用于对实验频响函数的扩展.

假设实验模型和有限元模型某单点激励多点响应的频响函数分别为:

$$H_t = \begin{bmatrix} H_{tb} \\ H_{te} \end{bmatrix}_{n \times p}, H_a = \begin{bmatrix} H_{ab} \\ H_{ae} \end{bmatrix}_{n \times p} \quad (1)$$

其中 H_{tb} 是初始实际测量到的频响函数, H_{te} 是初始需要插值给出的未测量分量,有限元频响函数 H_a 也对应写成两部分, p 是实验测得的频响函数的阶数.

参照文献^[10]的推导,容易得到迭代插值的实验频响函数公式为:

$$\bar{H}_t = H_a Q \quad (2)$$

其中,插值因子 Q 为:

$$Q = [H_{ab}^T(I+W)H_{ab}]^{-1}H_{ab}^T(H_{tb}+WH_{ab}) \quad (3)$$

W 为加权对角阵,其对角元素全部大于或等于零.如果认为测试精度与分析精度差不多,则可取 $W=I$;如果认为测试精度较分析精度更高,则取 $W<I$;反之取 $W>I$.

再结合频响函数型修正公式,易得实验频响函数扩展-频响函数型的模型修正公式,由于本文只需针对Benchmark结构刚度进行修正,故修正公式可写为:

$$\begin{aligned} & [\bar{H}_t^l]^H (K_a - \omega_l^2 M_a - j\omega_l C_a) - I^l = \\ & [\bar{H}_t^l]^H \sum_{j=1}^m K_j \Delta \alpha_j \end{aligned} \quad (4)$$

其中: H 表示共轭转置,在工程中,对 H_t 通常只测量某一行,即 l 点单点激励、各点响应的第 l 列 H_t^l . m 为有限元单元个数, K_j 为第 j 个单元的单元刚度阵、质量阵和阻尼阵. $\Delta \alpha_j$ 为各单元刚度阵参数修正系数.其中瑞利阻尼阵 C_a 根据质量刚度阵的线性组合表示,选取合适的粘性比例阻尼系数确定阻尼.

令 $a_r = [\bar{H}_t^r]^H \sum_{j=1}^m K_j$, $X = \Delta \alpha_j$, $b_r = [\bar{H}_t^r]^H (K_a - \omega_r^2 M_a - j\omega_r C_a) - I^r$, r 表示第 r 阶频率和频响函数

数据.故可以将式(4)简写为:

$$a_r X = b_r \quad (5)$$

在工程中,我们通常可以测得前 r 阶的频率和频响函数数据,则可以得到 r 个形如式(5)的线性代数方程,联立可得线性方程组:

$$AX = B \quad (6)$$

式中

$$A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_r]^H, B = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_r]^H.$$

由于未知数 X 维数小于方程个数,故采用解超定性方程组的带约束的线性最小二乘法进行求解,得到修正量为:

$$X = (A^H A)^{-1} A^H B \quad (7)$$

代入有限元模型修正公式,即可得到修正后的有限元刚度:

$$\bar{K}_a = K_a - \sum_{j=1}^m \Delta \alpha_j K_j \quad (8)$$

2 IASC-ASCE SHM Benchmark 结构损伤识别

2.1 Benchmark 结构概述及建模

IASC - ASCE SHM Benchmark 结构健康监测基准算例于上世纪 90 年代提出,并于 2000 年在 UBC 地震工程实验室建造了实验 Benchmark 结构,之后 SHM 工作组进行了一系列的工程实验和程序仿真实验,并且公布了一些实验数据和仿真程序等信息,广大研究者们也运用各自提出的损伤识别方法对该问题中的样本算例进行试验,通过损伤识别效果验证或认识各自方法的适用性.

为了便于实验,将结构置于大型实验振动台上,但这个振动台只用于固定结构,而不对结构进行激励.该结构为 4 层、2×2 跨的钢结构框架缩尺模型,该模型平面尺寸为 2.5m×2.5m,高 3.6m.梁与柱之间固结,每层的 8 根支撑与结构之间灵活连接,可以根据研究人员的需要自由拆卸与安装.为了使质量分布更加符合实际的情况,第一层附加四块质量为 800kg 板,第二层和第三层各附加四块质量为 600kg 板,顶层附加四块质量为 400kg 板(不对称分布时为三块 400kg 和一块 550kg).结构如图 1 所示.

SHM 工作组还提出了统一的有限元模型,层板作刚体假设,将实际结构离散成由三维杆单元、梁单元组成的结构,离散之后的结构如图 2 所示.该有限元模型包括 116 个单元,单元编号分别为第

一层:柱(1~9),梁(10~21),支架(22~29);第二层:柱(30~38),梁(39~50),支架(51~58);第三层:柱(59~67),梁(68~79),支架(80~87);第四层:柱(88~96),梁(97~108),支架(109~116).图中支架作杆单元处理,梁和柱均当作梁单元处理,模型中共有 45 个节点,若每个节点有 6 个自由度(3 个平动和 3 个转动),全部结构共有 270 个自由度,考虑到最下层单元与地面是刚性连接,所以边界约束后的自由度为 216 个.

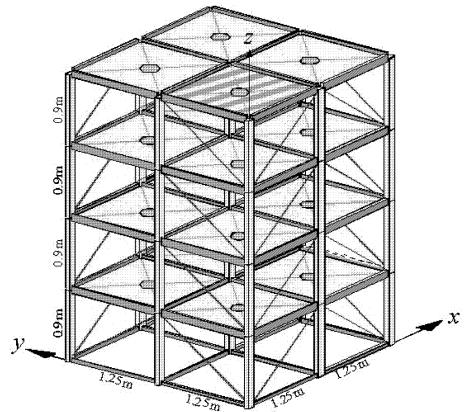


图1 ASCE Benchmark 结构

Fig.1 ASCE Benchmark model structure

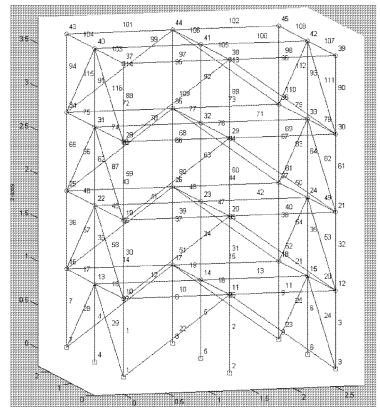


图2 ASCE Benchmark 有限元模型

Fig.2 FE model of ASCE Benchmark Structure

为了考查模型的精度对识别效果的影响,SHM 小组提供了两种不同规模的分析模型,分别为 12 和 120 个自由度.当采用 12 个自由度时,保留每层中心节点的两个平动自由度(x, y)和一个转动自由度 θ_z 做主自由度;当采用 120 个自由度时,保留每层中心节点的三个自由度(x, y, θ_z)和其他所有节点的自由度(z, θ_x, θ_y).本文采用 12 自由度模型进行研究.

SHM 工作组在文献[11]中提出了 6 种由易到

难的模拟损伤模式进行实验,对损伤模式的详细描述如表 1.

表 1 模拟的 6 种损伤模式

Table 1 6 cases of simulated damage patterns

Number of damage patterns	Damage description
1	all braces of 1st story are broken
2	all braces of 1st and 3rd story are broken
3	1 braces on 1 side of 1st story is broken
4	1 braces on 1 side of 1st and 3rd story are broken
5	pattern 4 + uncrowded the left end of element 18
6	area of 1 brace on 1 side of 1st story is reduced to 2/3

该文献针对 12 自由度模型,为考察在不同质量分布(顶层)、不同激励方式(环境激励和激振器激励)对损伤识别的影响,文中还提出了 3 种样本算例对损伤识别结果进行比较,样本算例如表 2 所示.

表 2 SHM 工作组样本算例

Table 2 sample example of SHM Task Group

Example number	Incentive mode	Model type	Damage pattern	Mass disposal
1	environment(Y)	12DOF	1,2	symmetric
2	shaker(XY)	12DOF	1,2	symmetric
3	shaker(XY)	12DOF	1,2,3,4,6	unsymmetric

SHM 工作组在进行工程实验同时,还公布了 Benchmark 钢架结构仿真实验程序数据包 Datagen,此数据包的优点是可以对测量噪声等参数预先设定并进行仿真实验,这样既可以避免由于传感器布置带来的结构变化和测量误差,又可以为研究者们充分理解各自方法带来便利,故大多数研究者们广泛采用仿真实验数据验证,在文献[11]中给出了仿真实验钢架各阶固有频率和水平层刚度的理论损伤程度,用以检验损伤识别效果.

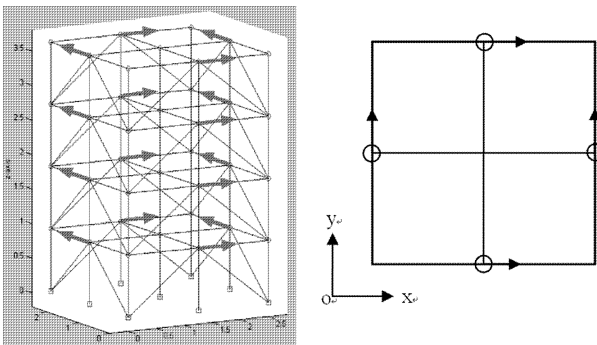


图 3 仿真实验传感器布置

Fig. 3 disposal of simulated experiment sensors

仿真实验中模拟加速度传感器布置如图 3 所示,图中可以看出 z 方向转动加速度响应无法测得,这就需要用到扩展方法得到全自由度的响应数据.从而通过傅立叶变换和积分变换得到全自由度的频响函数数据用到有限元模型修正.

2.2 Benchmark 结构损伤识别

下面针对表 2 中的第 2 和第 3 种情形进行识别方法的验证.由于损伤模式均为单元刚度的损失,即通过对水平层刚度损伤百分比的监测来识别损伤位置和程度,并和文献[11]中提供的理论精确值进行比较.

表 3 算例 2 水平层刚度修正识别情况

Table 3 story stiffness updating identified of case 2

Story	DOF	Damage pattern 1		Damage pattern 2	
		Theory Loss(%)	Identification Loss(%)	Theory Loss(%)	Identification Loss(%)
1	x	45.24	48.48	45.24	46.74
1	y	71.03	71.94	71.03	72.27
2	x	0	0.69	0	0.63
2	y	0	0.09	0	0.09
3	x	0	0.25	45.24	46.05
3	y	0	0.09	71.03	71.13
4	x	0	0.13	0	0.11
4	y	0	0.09	0	0.10

算例 2 为激振器激励作用与顶层 x 和 y 方向,对第 1 和 2 种损伤模式进行模型修正识别,识别结果如表 3 所示;算例 3 为激振器激励作用与顶层 x 和 y 方向,对第 1、2、3、4 和 6 种损伤模式进行模型修正识别,识别结果如表 4 和表 5 所示;其中算例 2 中结构顶层楼板质量对称分布,而算例 3 中结构顶层楼板质量非对称分布.

表 4 算例 3 水平层刚度修正识别情况

Table 4 Story stiffness updating identified of case 3

Story	DOF	Damage pattern 1		Damage pattern 2	
		Theory Loss(%)	Identification Loss(%)	Theory Loss(%)	Identification Loss(%)
1	x	45.24	46.10	45.24	46.02
1	y	71.03	71.96	71.03	71.13
2	x	0	0.10	0	0.10
2	y	0	0.09	0	0.10
3	x	0	0.10	45.24	45.51
3	y	0	0.09	71.03	71.79
4	x	0	0.10	0	0.10
4	y	0	0.09	0	0.12

表5 算例3 水平层刚度修正识别情况

Table 5 Story stiffness updating identified of case 3

Element		Pattern 3		Pattern 4		Pattern 6	
Story	DOF	Theory Loss(%)	Identification Loss(%)	Theory Loss(%)	Identification Loss(%)	Theory Loss(%)	Identification Loss(%)
1	x	0	0.27	0	0.19	0	0.27
1	y	17.76	17.65	17.76	17.83	5.92	5.99
2	x	0	0.10	0	0.10	0	0.10
2	y	0	0.10	0	0.10	0	0.10
3	x	0	0.10	11.31	11.43	0	0.10
3	y	0	0.10	0	0.10	0	0.10
4	x	0	0.10	0	0.10	0	0.10
4	y	0	0.11	0	0.11	0	0.11

由表3、4和5可以看出,在未损伤有限元模型与实验相接近的前提下,利用本文中的基于实验频响函数扩展的模型修正方法,对不同程度损伤模型进行有限元模型修正,可以通过修正改变量得到比较好的损伤识别效果,同时对未损伤部位的误识别程度较低,这也符合工程实际的要求.分析其主要原因是本文方法能够保证修正过程中矩阵的物理意义不变,为根据改变量来识别损伤提供了更可靠的数据,同时该扩展方法由于修正数据的增多,对修正结果也具有降噪和平滑的效果.

3 总结

本文总结提出了一种新的模型修正方法,即基于实验频响函数扩展的修正方法,并将该方法应用于 IASC-ASCE SHM Benchmark 结构损伤识别,对该结构不同损伤模式和不同实验条件都分别进行了损伤识别试验,得出了该方法对于在模型误差、测量噪声以及质量刚度分布不确定等因素的影响下都具有较高的损伤识别精度,从而也间接证明了此方法在有限元模型修正的良好精度和适用性.

但是由于本文方法公式是基于单点激励多点响应的前提下,所以对与环境激励这种多点激励的情况还需进一步拓展.本文以12自由度有限元模型为例进行试验,对与一些连接部位损伤无法识别,故可以对120自由度模型进行进一步验证,可对连接部位损伤(如损伤模式5)或是更加复杂的损伤情况进行试验.

参 考 文 献

1 于阿涛,赵鸣,基于振动的土木工程结构健康监测研究

进展,福州大学学报,2005,33(增刊):233~239 (Yu A T, Zhao M, Advance of research on vibration-based structural health monitoring in civil engineering. *Journal of Fuzhou University*, 2005, 33(Supplement):233~239 (in Chinese))

- 2 Ka-Veng Yuen, Siu Kui Au, and James L. Beck. Two-stage structure health monitoring approach for phase I benchmark studies. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1), 16~33
- 3 H F Lam, L S Katafygiotis, and N C Mickleborough. Application of a statistical model updating approach on phase I of the IASC-ASCE structural health monitoring benchmark study. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1), 34~48
- 4 Juan Martin Caicedo, Shirly J. Dyke, Erik A. Johnson. Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem; simulated data. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1), 49~60
- 5 李学平,余志武.基于动力特性的结构损伤识别方法.动力学与控制学报,2006,4(1):84~87 (Li X P, Yu Z W. Structural damage identification method based on dynamic properties. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, 4(1):84~87 (in Chinese))
- 6 裴强.结构健康诊断新方法[博士论文].中国地震局工程力学研究所,2005 (Pei Q. A new method and its application on structural health monitoring [Dissertation of Doctor degree]. *Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau*, 2005 (in Chinese))
- 7 张立涛,李兆霞,费庆国等.结构损伤识别中的若干正则化问题研究.工程力学,2008,25(5):45~52 (Zhang T, Li Z X, Fei Q G and so on, Studies on some of regularization problems in structural damage identification. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(5):45~52 (in Chinese))

- 8 徐龙河,钱稼茹,纪晓东. 基于特征灵敏度的 Benchmark 结构损伤诊断. 天津大学学报, 2005, 28(10): 931 ~ 935 (Xu L H, Qian J R, Ji X D, Damage diagnosis of a benchmark structure based on the eigen-sensitivity analysis. *Journal of Tianjin University*, 2005, 28(10): 931 ~ 935 (in Chinese))
- 9 杜思义. 基于频率变化与单元矩阵摄动理论的结构损伤识别方法研究[博士论文]. 重庆:重庆大学, 2005 (Du S Y. Based on the frequency change and cell matrix perturbation theory of structural damage identification method [Dissertation of Doctor degree]. Chongqing: Chongqing University, 2005 (in Chinese))
- 10 曾庆华. 结构动力修改技术若干问题研究[博士论文]. 南京:南京航空航天大学, 1989 (Zeng Q H. Study on damage identification method based on the frequency change and element matrix perturbation theory [Dissertation of Doctor degree]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1989 (in Chinese))
- 11 Johnson E A, Lam H F, Katafygiotis L S et al. Phase I IASC-ASCE structural monitoring problem using simulated data. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 2004, 130(1): 3 ~ 15

DAMAGE IDENTIFICATION FOR BENCHMARK STRUCTURE WITH MODEL UPDATING METHOD BASED ON FRF EXPANSION

Hu Huan Hong Jiazhen Liu Zhuyong

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract A kind of modified model method based on FRF is presented in this paper. By the method, the damage identification for the structure of IASC – ASCE SHM Benchmark is conducted. The result reveals that the error of model analysis and the influence of measurement noise on the modification can be reduced significantly, and the physical meaning of matrix can be ensured to be clear and definite during modifying. Under the effect of model error, measurement noise and the uncertainty of mass and stiffness, the method displays good accuracy of identification.

Key words damage identification, model updating, expansion, FRF