

文章编号:1006-7329(2003)04-0128-05

# 基于结构动力参数的 土木工程结构损伤识别方法\*

王志坚<sup>1</sup>, 韩西<sup>1,2</sup>, 钟厉<sup>1,2</sup>, 陈上均<sup>1</sup>

(1.重庆交通学院 桥梁及结构工程系,重庆 400074;2.重庆大学,重庆 400044)

**摘要:**简要综述了近几年基于结构动力参数的土木工程结构损伤识别的方法,对各结构损伤识别方法进行评论,讨论各种方法在理论和实际应用中的优点及存在的问题。最后,通过对一试验模型的模拟损伤试验说明动力参数检测方法的应用。

**关键词:**动力参数;损伤识别;模态参数;柔度曲率

中图分类号:TU441

文献标识码:A

## Review of Damage Identification of Civil Engineering Structures Based on Dynamic Parameters

WANG Zhi-jian<sup>1</sup>, HAN Xi<sup>1,2</sup>, ZHONG Li<sup>1,2</sup>, CHEN Shang-jun<sup>1</sup>

(1. Department of Bridge and Structure Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, some damage identification methods for engineering structures based on dynamic parameter over last few years are summarized. The theories, merits and problems in realistic application of these methods are discussed. At last, a simulated damage example is given to demonstrate the application of the dynamic-parameter-based method.

**Keywords:** dynamic parameters; damage identification; modal parameters; flexibility curvature

大型土木工程结构由于荷载作用、疲劳与腐蚀效应、材料的老化以及缺乏及时的维修,在使用期内将不可避免地产生损伤积累、抗力衰退而影响结构的使用寿命,甚至会导致突发事故。已建成的和在使用中的许多结构和设施急需采用有效手段进行检测及评估其安全状况,识别、修复和控制损伤以防止潜在灾难的发生。结构损伤被考虑为一种对结构承载力减弱的负面影响,也可以定义为由于结构原始几何或者材料的特性的偏差而导致我们不希望得到的诸如结构上的应力、位移和结构振动等等。传统的无损检测技术如超声波、声发射、X射线等均是目前使用的“局部”损伤诊断技术,这些检测方法检查时间长,或检测费用昂贵,不能实现在线检测。随着结构的大型化、复杂化要求,迫切需要发展新的结构整体的损伤检测方法。结构损伤的动态检测方法是基于对结构的动力学特性(质量、刚度、阻尼)的变化跟踪分析,由此来判断结构的损伤部位及程度。由于结构的动力特性是结构的整体性的集中反映,因此,结构损伤的动态检测方法是一种结构整体损伤检测方法,具有在线检测的优点,因而受到广泛的注意。

\* 收稿日期:2003-03-08

基金项目:交通部通达项目(95-04-03-40)

作者简介:王志坚(1977-),男,福建泉州人,硕士生,主要从事结构动力分析、振动控制及结构有限元分析方面的研究。

## 1 动力参数损伤识别法

在结构损伤检测中主要需解决以下问题:①结构是否存在损伤;②结构损伤位置的判断;③结构损伤的严重程度;④结构损伤对结构使用性能的影响,即结构剩余寿命的预估。典型的动力参数诊断法是将观察到的动力参数改变与基准的参数比较,并选择其中最有可能的改变来判断结构的真实状况。结构动力破损评估可大致分为四步:①选择振动观测信号;②提取与破损状态有联系的特征量;③识别结构有无损伤;④识别损伤位置、性质、程度。近几年来,出现了许多基于动力参数的结构损伤诊断方法,这些方法各有特点,对此本文将加以评述。

### 1.1 剩余模态力分析方法

基于剩余模态力分析方法是先建立有限元分析模型,利用在结构受损区上测试出的特征值(固有频率的平方)和响应的测试模态,代入未受损结构特征值问题方程式的左边,如果方程的右边等于零,则可以判断出结构未发生损伤,如果方程的右边不等于零,则可以根据非零值的位置判断出相应的受损的位置。再将从结构试验数据中得出受损区的模态参数变化与结构有限元模型分析模态参数的灵敏度进行比较,以此来评估结构受损伤的程度。基于剩余模态力分析方法不仅考虑了系统质量的变化对模态的影响,而且还考虑了固有频率和模态向量的摄动,并且计入了结构参数不确定性及测量误差,考虑的因素较为全面。

### 1.2 柔度变化的损伤识别方法

模态试验由于测试误差的影响,往往只能准确地获得前几阶模态参数,而且对于复杂多自由度系统,测试自由度往往小于结构本身的自由度,使损伤识别精度受到影响。利用柔度变化的损伤识别法进行损伤识别,在获得相同的试验模态参数条件下比刚度法更为精确。这是因为,在模态满足归一化的条件下,模态参数对柔度矩阵的贡献与自振频率的平方成反比。随着频率的增大,柔度矩阵中高频率的倒数影响可以忽略不计,这样只要测量前几个低阶模态参数和频率,就可以获得精度较好的矩阵。根据损伤前后的两个柔度矩阵的差值矩阵,求出差值矩阵中各列中的最大元素,通过检查每列中的最大元素就可以找出损伤的位置。柔度变化的损伤识别方法相对于刚度变化的损伤识别方法对结构损伤是比较敏感的,但是由于忽略高阶模态参数的影响,无法避免地存在着误差。

### 1.3 固有频率变化的损伤识别方法

固有频率是模态参数中最容易获得的一个参数,而且识别精度高。其特点是:认为结构发生损伤时,仅结构的刚度降低,而忽略结构质量的变化。但是结构在不同位置发生损伤都可能引起相同的频率变化,因此,该方法往往只能发现损伤,而不能确定损伤的位置。其中文献[7]提出:利用特征值(固有频率的平方)问题的一阶摄动,可以得到结构系统矩阵变化与特征值变化之间的关系,继而得到特征值变化与刚度矩阵变化之间的关系,通过一些假设、对振型的归一化归纳出系统特征值对刚度矩阵的灵敏度方程。根据实测数据对方程求优化解即可获得结构损伤的位置。其中文献[7]提到的方法只需结构频率变化(容易较精确地测量得到),而无需振型值(难以精确测量),同时避免了理论与实测自由度不一致的矛盾。但由于推导中忽略了结构模态特性和系统矩阵二阶以上的摄动量,因此该方法只适用于结构微小变化的场合。

### 1.4 刚度变化的损伤识别方法

利用刚度矩阵的变化进行损伤识别有很多人在研究<sup>[1,2]</sup>,因为结构发生较大的损伤时,其刚度矩阵将发生显著的变化。对于实际的土木工程结构,涉及的自由度数量和未知参数数目急剧增加,其难度和收敛的计算要求也跟着增加,而实际的情况是,结构的损伤可能只发生在结构的局部部位,结构的大部分部位没有出现损伤,大部分结构单元的刚度基本没有改变,此时采用子结构损伤识别方法对大型复杂结构系统的损伤检测和状态评估是一种有效的方法。在模型修正方法中,通常做法是修正选定子结构的刚度修正系数而不是单个结构构件,其目的使减少要修正刚度参数的

数量,使得病态和非惟一性保持在可以接受的程度。

### 1.5 振型变化的损伤识别方法

结构振型包含更多的损伤信息,振型变化的损伤识别方法有以位移类参数(位移、位移模态、柔度矩阵等)和以应变类参数(应变、应变模态、曲率模态等)为基础的损伤定位方法。这些方法均需要建立结构初始正常状态时的有限元模型作为识别基准,然后用当前结构振型实测数据修正结构模型,通过比较结构修正前后的模型物理参数来识别结构的损伤状况。研究发现振型曲率比振型对损伤更为敏感,可以用来检测损伤和进行损伤定位。如果结构出现损伤,则破损处的刚度会降低,而曲率便会增大。振型曲率的变化随着曲率的增大而增大。因此,可以根据振型曲率作为定位参数。但该方法的不足之处是需要非常密集的测点,以便使用中心差分法求取曲率模态,否则将增大曲率模态振型的误差。

由于在测试过程中实测振型往往是不完整的。有些学者建议直接采用不完整实测振型进行结构的损伤识别,比较典型是以灵敏度和数值为基础的方法。该方法以结构损伤前后的实测特征值和实测不完整振型以及假设结构某单元受损后引起的振型的理论差值为识别参数,建立多处损伤定位准则<sup>[19]</sup>(Multiple Damage Location Assurance Criterion)公式。根据所测得的识别参数,计算并找出 MDLAC 的最大值的位置来大致确定结构受损位置,再利用叠代数值方法计算出受损程度。该方法的优点是直接地利用结构实测不完整振型进行结构损伤识别;其缺点是计算量太大,这是因为每个假设受损单元都要计算出 MDLAC 值来;假设受损单元越多(结构受损位置越多)其计算 MDLAC 值的次数也就越大,相应的受损程度的叠代数值计算也多。

## 2 直接利用损伤结构的模态参数进行损伤识别

利用模态参数进行结构损伤识别,通常都需要用到结构损伤前的模态信息,这在实际工程中常常是难以做到的,因此,没有原始结构的模态参数的损伤识别技术就显得尤其重要。而从目前发表的文章看,仅仅用损伤结构的模态参数进行损伤识别的极少。近年来,一些研究者利用模态柔度的改变量对结构进行损伤识别,指出模态柔度比固有频率或振型对局部损伤更敏感,可以更好地识别结构损伤。虽然利用模态柔度进行结构损伤识别具有较高的灵敏度,但是还是要用到损伤前的结构模态参数,不利于实际应用。而文献[19]提出利用损伤结构模态柔度的曲率对损伤位置进行识别,既有高的灵敏度又避免了使用原始结构的模态参数。柔度曲率损伤识别法是直接利用损伤结构的柔度矩阵进行损伤识别的。由于柔度在结构的损伤点附近的改变量较大,而这个改变量使通过一阶导数和二阶导数的作用,将会变得更为明显,因此,对实测损伤结构的柔度矩阵取出每列中的最大值,并利用差分对其求一阶和二阶导数得出斜率和曲率,然后绘出斜率和曲率随单元号的变化曲线图,就能直接得出损伤位置得所在。利用柔度曲率法,只需损伤结构的模态参数就可以识别结构得损伤位置,而且仅需要低阶模态信息即可获得很好的识别精度,同时,该方法具有计算量小和简便易行的优点,其缺点是无法评估结构的损伤程度。

## 3 试验分析

本文对频率变化方法进行了试验验证,该试验梁是一长度为 200 cm、横截面高 16 cm 宽 10 cm 的等截面钢筋混凝土简支梁(见图 1)。全梁沿梁长度方向划分成 20 个等距单元,由于转动参数难以测量,又因只考虑梁的竖向位移而忽略梁的横向和纵向位移以及支撑处的影响,故全梁的有限元模型为 19 个自由度。利用在跨中施加竖直向下不同集中力荷载以获得不同损伤程度的试验模型。在跨中处即 10 号节点(略去两个支座处的节点号)处布置一个加速度传感器,采用脉冲力锤对 19 个节点依次进行脉冲激励,利用电荷放大器、A/D 转换存入 PC 微机(图 2)。通过测试获得该试验

梁损伤前后的模态参数,并对模态参数进行分析。

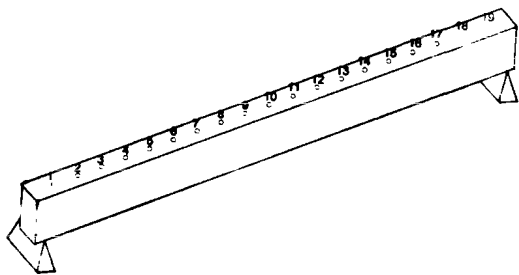


图1 试验梁外形及测点布置图

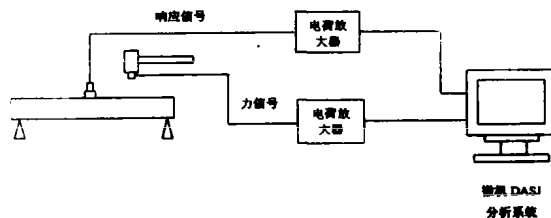


图2 测试系统框图

表1 损伤前后横向弯曲自振频率实测值(Hz)

振型阶次	未损伤工况	损伤工况 I	损伤工况 II	损伤工况 III
1	73.24	68.36	58.59	53.71
2	490.43	458.98	395.51	385.74
3	917.92	888.67	830.08	766.60
4	1 870.12	1 782.23	1 625.98	1 479.49

分析结果表明:结构损伤前和不同损伤程度的各工况所获得的模态参数都不一样。虽然结果损伤后模态参数都发生变化,但是从数值分析(表1)可知:固有频率比振型对结构损伤更为敏感,并且容易量测获得、精度高,但固有频率的改变无法直观地确定损伤的位置所在及评估损伤程度,只能直观地说明结构已经发生了损伤;振型是根据结构各节点在损伤前后位移变化准确地确定损伤位置,但对评估结构的损伤程度的精度不是很高;对于柔度曲率法,可以获得精度较高的损伤位置,且计算量小,可是也无法评估损伤程度;对损伤程度有较高精度的方法是利用结构损伤前后刚度矩阵的变化。该试验对各理论方法的校核发现:应用各种损伤识别方法所得出的结果大致相同,因此,在实际的应用中,可以综合地利用各种损伤识别方法,扬长避短,以便基于动力参数的结构损伤识别法在实际应用中获得置信度较高的结果。

## 4 结束语

本文阐述了土木结构基于动力参数损伤识别方法,并以实际试验加以说明。在结构损伤识别方面,目前还存在以下有待解决的问题:①缺少通用的损伤量化指标。在基于动力参数的结构损伤识别中,要求不论信号的来源和频段,经过信号处理后,原始状态(健康状态)的信号和损伤状态的信号应有明显的差异,即识别出信号特征能够准确地表示出健康状态和损伤状态<sup>[23]</sup>。因此,应该设计一种损伤尺度,将结构损伤与否和损伤的程度分级量化;②大型复杂结构特别是混凝土结构都是非线性的,这对提高损伤识别的精度加大了难度,因此,需要寻求其他算法如神经网络<sup>[23-25]</sup>数据处理方法如小波变换<sup>[26]</sup>;③对于真实的土木结构,只用一种损伤指标或许是不够的,直到现在,损伤类型和损伤指标之间的关系还不很清楚。现有的动力参数损伤识别法已被证明在数值模拟结构和实验室的梁、板、框架等简单模型结构中是成功的,然而,在实际工程结构中应用结果并不理想。一个不可忽略的基本事实是:结构频率实测较准,但它对局部损伤很不敏感,振型(尤其是较高阶振型)对局部刚度的变化很敏感,但却很难精确测量。动力参数损伤识别方法的成功应用或许要依赖于试验技术的发展、寻找新的敏感的动力参数和建立基准模型的新发现。

## 参考文献:

- [1] Wei-xin Ren and Guido De Roeck. Structural damage identification using modal data. I: Simulation verification[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 87-95.

- [2] Wei - xin Ren, Guido De Roeck. Structural damage identification using modal data. II : Test verification[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 96 - 104.
- [3] 李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估, 健康检测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82 - 91.
- [4] 周先雁, 沈蒲生. 用应变模态对混凝土结构进行损伤识别的研究[J]. 湖南大学学报, 1997, 24(5): 69 - 74.
- [5] 陈长征, 罗跃纲, 白秉三, 等. 结构损伤检测与智能诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 崔飞, 袁万城, 史家钧, 等. 基于静态应变及位移测量的结构损伤识别法[J]. 同济大学学报, 2000, 28(1): 5 - 8.
- [7] 张启伟, 史家钧, 项海帆, 等. 大型桥梁结构损伤识别方法研究[J]. 上海市政工程, 1998, (2): 1 - 8.
- [8] 张启伟, 范立础. 利用动静力测量数据的桥梁结构损伤识别[J]. 同济大学学报, 1998, 26(5): 528 - 533.
- [9] 王中东, 夏熙梅. 基于剩余模态力分析方法的结构损伤识别[J]. 吉林工业大学自然科学学报, 1999, 29(3): 61 - 66.
- [10] 蔡宝晖. 一种桁架结构损伤识别的柔度阵法[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 42 - 47.
- [11] 师本强. 基于动柔度变化的结构损伤检测[J]. 工程力学(增刊), 2001: 291 - 298.
- [12] 郑栋梁, 李中付, 华宏星, 等. 结构早期损伤识别技术的现状和发展趋势[J]. 振动与冲击, 2002, 21(2): 1 - 6.
- [13] 高芳清, 金建明, 高淑英, 等. 模态分析的结构损伤检测方法研究[J]. 西南交通大学学报, 1998, 33(1): 108 - 112.
- [14] 董聪, 丁辉, 高嵩, 等. 结构损伤识别和定位的基本原理与方法[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(3): 89 - 94.
- [15] A. Rytter, M. Krawczuk, P. H. Kirkegaard. Experimental and numerical study of damaged cantilever[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 126(1): 60 - 65.
- [16] S. S. Law, Z. Y. Shi, L. M. Zhang. Structural damage detection from incomplete and noisy modal test data[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(11): 1 280 - 1 288.
- [17] Z. Y. Shi, S. S. Law, L. M. Zhang. Structural damage detection from modal strain energy change[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1 216 - 1 223.
- [18] Hoon Sohn, Kincho H. Law. Damage diagnosis using experimental Ritz Vectors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(11): 1 184 - 1 193.
- [19] Z. Y. Shi, S. S. Law, L. M. Zhang. Damage localization by directly using incomplete mode shapes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 656 - 660.
- [20] 唐小兵, 沈成武, 陈定方. 结构损伤识别的柔度曲率法[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8): 18 - 26.
- [21] 朱四荣, 李卓球. 多处损伤结构的损伤诊断[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(7): 21 - 23.
- [22] 张景绘. 动力学系统建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [23] 耿进萍, 关新春. 土木工程智能结构体系的研究与发展[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 21 - 27.
- [24] Tshilidzi, Marwala. Damage identification using committee of neural networks[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(1): 43 - 50.
- [25] Chun - huei Tsai, Deh - Shiu Hsu. Diagnosis of reinforced concrete structural damage base on displacement time history using the back - propagation neural network technique[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 16(1): 49 - 58.
- [26] Z. Hou, M. Noori, R. St. Amand. Wavelet - based approach for structural damage detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(7): 677 - 683.