

轴对称壳体结构损伤识别方法研究¹⁾

刘乙君²⁾ 黄晨光³⁾

(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程实验室, 北京 100190)

摘要 在对结构健康监测中的损伤识别方法进行调研与总结的基础上, 针对某轴对称壳体结构开展损伤识别的动力识别方法研究. 作者利用数值模拟技术评估了常用的动力损伤识别方法的有效性, 选取出对研究对象损伤识别敏感量并实验验证指标识别有效性. 进而在标识量敏感性分析的基础上, 针对原有指标不足之处, 提出了新的敏感指标, 并与原有指标通过数值模拟对比验证其识别效果优越性.

关键词 损伤识别, 动力识别, 结构健康监测, 模态分析

中图分类号: TU317 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)05-050-05

DAMAGE DETECTION FOR AN AXIAL SYMMETRICAL SHELL STRUCTURE¹⁾

LIU Yijun²⁾ HUANG Chenguang³⁾

(Key Laboratory of Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In this paper, a structural health monitoring (SHM) system is developed for a special axial symmetrical shell structure, with the aim to study dynamical detection methods. Some classic damage detection methods are discussed and analyzed by using the finite element method. Their validity in damage detection for the axial symmetrical shell structure is judged via numerical simulations. Strain modal difference is selected as a sensitive index for damage detection and is applied for the axial symmetry shell. The experimental results show its validity for damage detection. New sensitive identification indices based on structural curvature mode and frequency are proposed, and the validity of the new indices is shown.

Key words damage detection, dynamical detection, SHM, modal analysis

引 言

结构健康监测技术研究的目的是利用探测到的结构响应信号(应变、位移、加速度等), 结合对结构力学特性的综合分析, 实现结构内部损伤与分布的实时在线评估, 为结构的使用和维修工作提供参考, 使传统的离线、静态、被动的损伤检测向在线、动态、实时的监测与控制方向发展, 结构的安全性得到更好保障的同时, 降低结构的安全成本^[1].

初用于航天航空领域, 20 世纪 80 年代广泛应用于土木工程、机械等领域, 开始主要在桥梁方面应用发展的较快; 20 世纪 90 年代中后期至今, 世界各国的土木工程师对建筑结构的健康监测开展了大量的研究. 结构健康监测的内容由最初的载荷识别逐渐过渡到结构损伤检测、损伤定位、损伤程度识别、结构剩余年限预计以及随之展开的结构维修等^[2]. 随着结构的大型化、复杂化、和老化使得 SHM 技术越来越重要.

结构健康监测 (SHM) 的技术起源于 1954 年, 最

Sohn 和 Farrer^[3] 在 Rytler^[4] 的研究基础上提出

2009-05-11 收到第 1 稿, 2009-10-15 收到修改稿.

1) 中国科学院重大创新方面项目, 中国科学院创新装备研制项目资助.

2) 刘乙君, 硕士, 研究方向为结构健康监测. E-mail: fernyijun1984@126.com

3) 黄晨光, 研究员, 博士, 博导, 从事冲击动力学、激光与物质的相互作用, 结构动力学等研究. E-mail: huangcg@imech.ac.cn

损伤检测的 5 个层次：(1) 识别出结构中是否有损伤产生；(2) 确定损伤的位置；(3) 识别出损伤类型；(4) 量化损伤的严重程度；(5) 确定结构的剩余寿命。其中，最根本、最基础的是结构损伤识别。损伤识别的方法分为静态识别、动力识别以及在动力识别基础上发展起来的智能识别方法。

静态识别^[5]技术是以结构的静态位移、应变等参数为核心的识别方法。基于静力试验的结构监测技术具有较高的精度及稳定性，但对试验和测试的要求较为复杂和苛刻。随着科技和实验水平的上升，静力识别也得到了较好的发展。

动力识别方法以结构动力特性的变化为依据进行损伤检测，在近 20 年来得到了长足的发展。其原理是结构模态参数(固有频率、模态振型)等是结构物理特性(质量、阻尼和刚度)的函数，因而物理特性的改变会引起系统动力响应的改变。常用的动力参数有：频率^[6]、振型^[7]、柔度^[8]、应变能^[9]、频响函数^[10]、应变模态^[11]、残余力向量^[12]等。也有人用功率谱、能量传递比和基于振型得到的曲率模态^[13]等作为识别参数。

智能识别方法分为神经网络方法^[14-15]、遗传算法^[16]以及小波分析法^[17]等。神经网络应用的最早和较多的是 BP 神经网络^[14-15]。遗传算法本身是一种高效并行优化搜索方法，追求搜索全局最优解。小波分析非常适合分析非平稳信号，因此可作为损伤识别中信号处理的理想工具，用它来构造损伤识别中所需要的特征因子，或直接提取对损伤有用的信息。

虽然现在已经提出了多种结构损伤识别方法，但是仍存在以下有待解决的问题：结构与环境的不确定性和非结构影响、测量信息不完备、测量信息不足和测量信号噪声影响以及测量信号对结构局部损伤不明显而且对小损伤不敏感等。本文主要是根据实际研究对象的需要，针对其中的第 4 个方面加以改进，即获得一种快速、高精度的损伤识别方法，使之对局部损伤和小损伤敏感。

1 数值模拟和实验验证

本文研究对象是一个轴对称壳体结构，壁厚 4 mm，总长为 2.8 m，由某结构钢和铝合金构成，如图 1 所示。钢的密度取 7850 kg/m³，弹性模量为 200 GPa，泊松比为 0.25；铝合金的密度取 2800 kg/m³，弹性模量为 70 GPa，泊松比为 0.33。

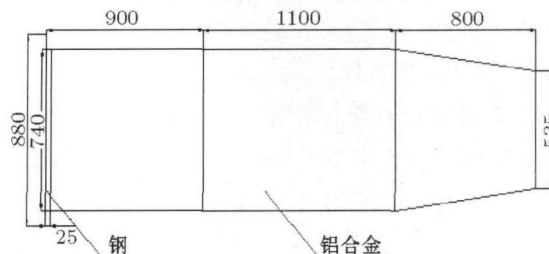


图 1 结构模型

研究目的是利用有限元方法，分析常用的动力识别指标对于该结构损伤的敏感性，并判断其进行损伤定位和损伤程度识别的能力。在此基础上构建新的敏感标量以更有效地用于该结构损伤识别。

本文在数值模拟中，采用了 ANSYS 商业软件，有限元分析模型如图 2 所示，其中采用 Shell 63 单元进行结构离散。损伤程度 D 是根据式 (1) 通过改变结构某个单元弹性模量 E 模拟实际工程中的损伤

$$D = \frac{(EI)_u - (EI)_d}{(EI)_u} \times 100\% \quad (1)$$

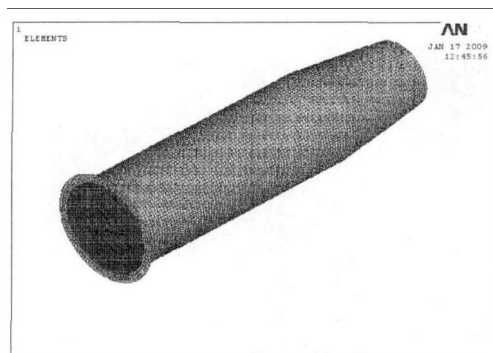


图 2 有限元模拟图

本文首先选取常用的动力标量来识别结构损伤状态，得到：

(1) 基于频率的识别方法无法识别对称结构的损伤和小损伤情况，不能单独作为敏感标量识别结构损伤。(2) 位移模态差值法在识别一处损伤时是敏感有效的，但是在识别多处损伤时，只能识别最大处损伤。(3) 结构损伤较大时，利用柔度矩阵差值法检测不符合实际损伤情况。(4) 应变类变量(应变模态、曲率模态等)能够定位和识别结构损伤程度，是敏感标量。(5) 单元应变能差值法能够很好地对损伤情况进行定位，但在识别多处损伤时，对损伤程度不敏感。

基于模拟结果，选取应变类变量应变模态差值作为敏感指标对轴对称壳体结构进行了实验验证，由实验结果得知应变模态差值能够非常好地识别结果

损伤. 取其中一例分析, 说明其在根部一处发生人工损伤时识别效果.

人工损伤处对应位置为测点 54. 如图 3 所示的损伤识别图, 实验重复性误差控制在 1% 以内. 由识别结果可以发现, 在测点 54 处差值最大且大于 0.01, 所以应变模态差值能够很好地识别此种损伤. 同时通过实验可以证明对于其他情况损伤应变模态差值也能够很好地识别结构损伤情况.

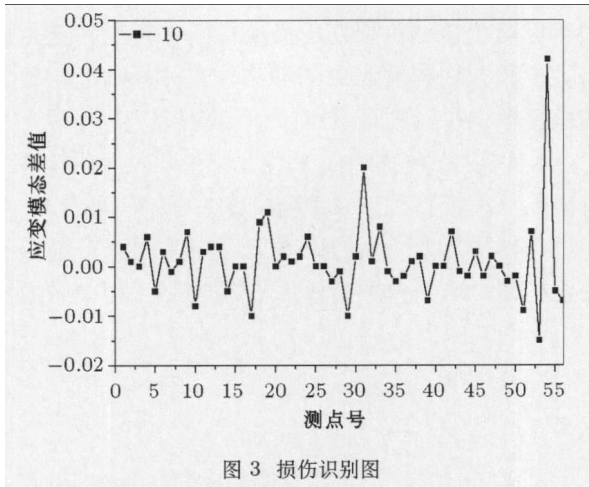


图 3 损伤识别图

2 构建新的敏感标识量

由上面数值模拟以及实验分析可知应变类指标

在识别结构损伤更为有效、敏感. 基于曲率模态损伤定位方法和基于应变模态损伤定位方法本质上是相同的 [18]. 其中曲率模态在工程上应用较多, 本文基于曲率模态识别方法展开分析. 一般常用的曲率指标形式有 $\alpha = (c^d - c^u)/c^u$ 和 $\beta = c^d/c^u$. 这两个指标识别结构的损伤不仅定位精确, 而且能够体现损伤程度的严重性. 由数值模拟和实验均可以发现, 曲率模态 (或应变模态) 差值在识别损伤时, 在损伤处附近会出现“虚假”损伤情况. 为尽量减小损伤附近的差值消除“虚假”损伤以及考虑全局量的影响, 引进全局量频率, 构建一个新的指标 $C_1: (\alpha_{ij}^2 \omega^u)/\omega^d$ 来识别损伤. 式中, $\alpha_{ij} = (c_{ij}^d - c_{ij}^u)/c_{ij}^u$, c_{ij} 代表结构第 j 振型在第 i 段的曲率, ω 是结构的频率, d 和 u 分别代表结构损伤后、损伤前. 如果结构没有损伤则 $(\alpha_{ij}^2 \omega^u)/\omega^d$ 值为 0, 若不为 0 则说明对应处有损伤发生, 而且值越大说明损伤程度越大.

利用新指标对轴对称壳体结构在一、二段连接处 ($X = 0.9 \sim 0.95$ m) 处发生单处损伤进行了数值模拟分析, 其损伤程度按照式 (1) 分别设定为 5%, 10%, 15%, 20%, 损伤位置所对应的节点为 25, 26, 27. 本文取前三阶进行模态分析. 新指标和曲率差值法对损伤识别效果的比较如图 4 所示.

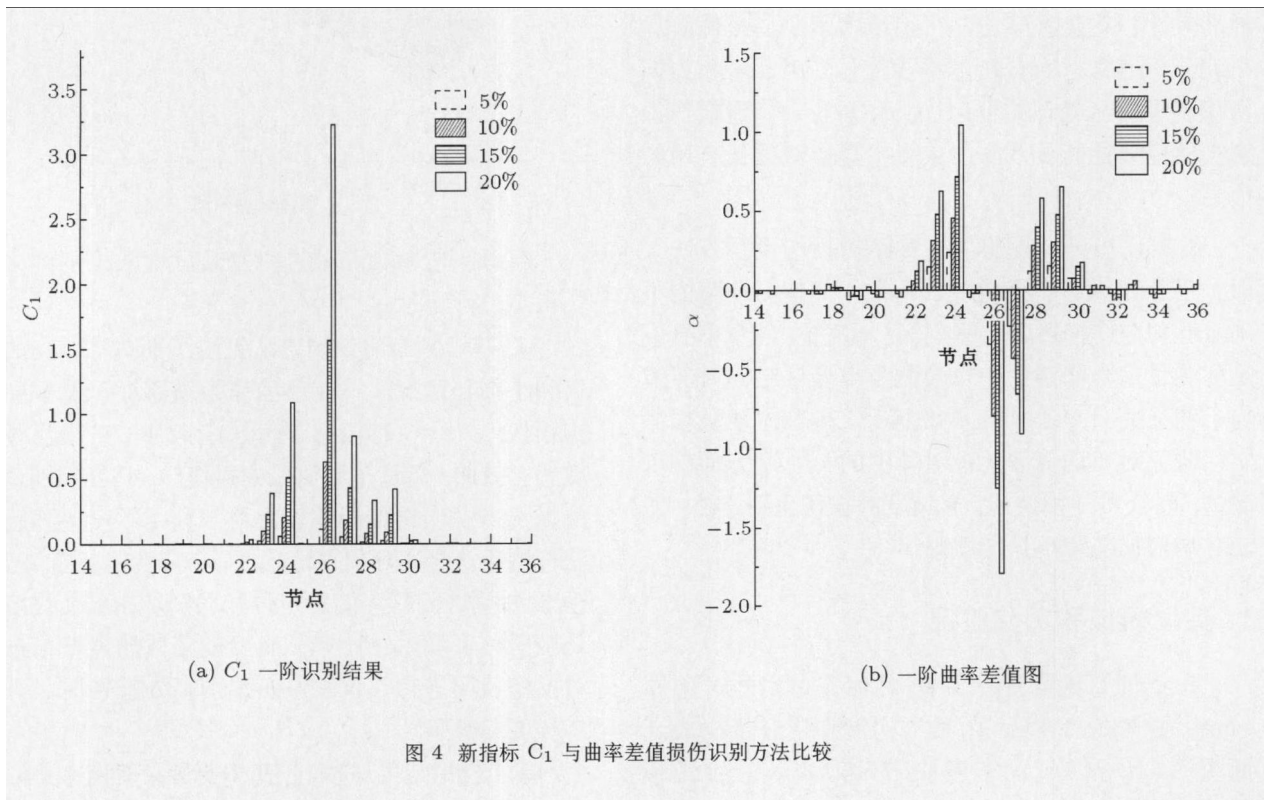
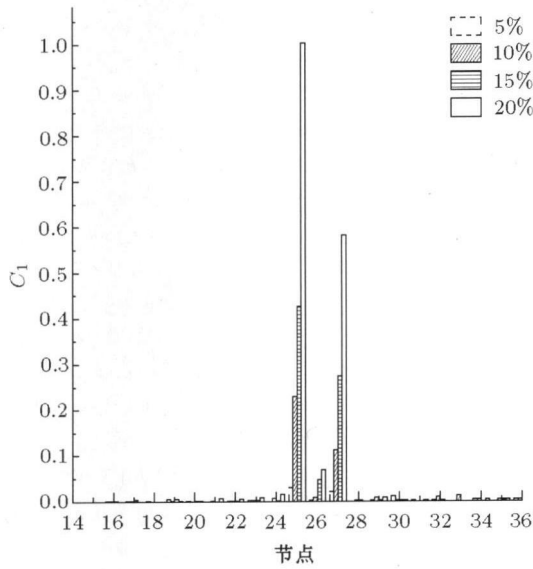
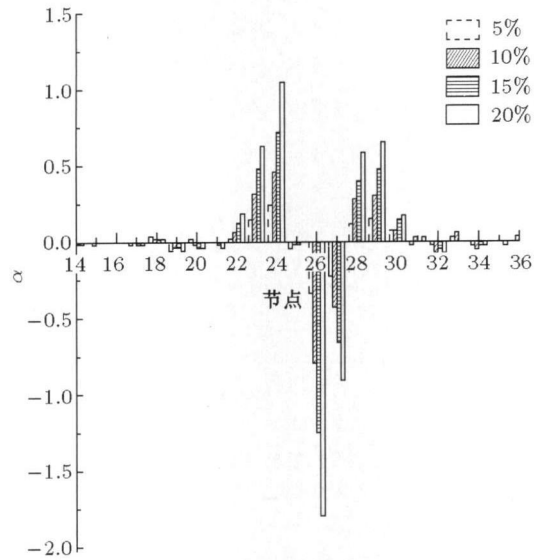


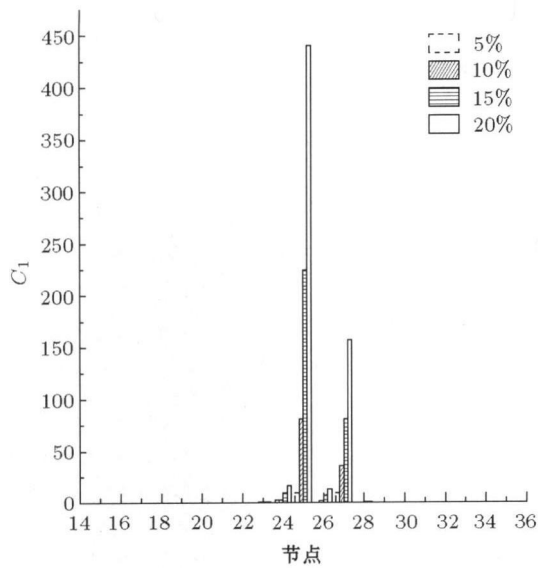
图 4 新指标 C1 与曲率差值损伤识别方法比较



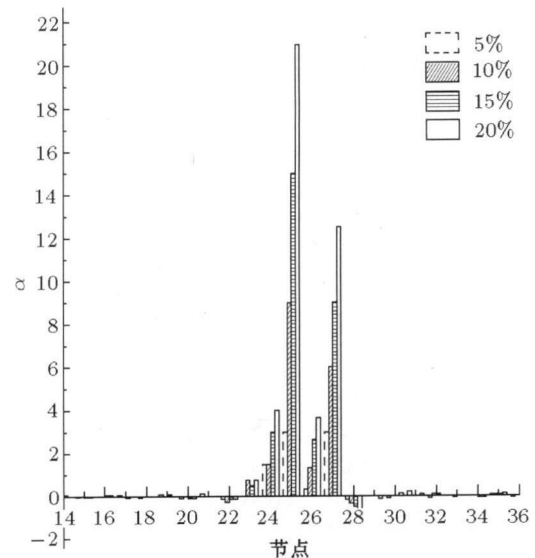
(c) C_1 二阶识别结果



(d) 二阶曲率差值图



(e) C_1 三阶识别结果



(f) 三阶曲率差值图

图 4 新指标 C_1 与曲率差值损伤识别方法比较 (续)

由计算结果综合前三阶模态分析可知:

(1) 在节点 25, 26, 27 处该指标的取值均不为 0, 说明结构发生损伤, 而且随着损伤程度的增大, 取值也增大. 所以 $\alpha_{ij}^2 \omega^u / \omega^d$ 指标能够较好地识别损伤, 而且定位准确, 同时能够反映损伤程度大小, 与实际损伤情况符合, 是损伤识别的敏感标量.

(2) 新指标方法和常用的差值法对比可以发现, 新指标剔除了周围非损伤处的差值, 而且损伤处新指标值也大于利用曲率差值方法识别时候的值, 有利于识别损伤.

如果测点分布不均匀, 可以用下式来判断结构是

否发生损伤

$$\beta = \alpha_{ij}^2 l_i / \sum_{k=1}^n \alpha_{kj}^2 l_k \quad (2)$$

其中, l_i 为结构第 i 测段的长度. 一般情况下是综合多阶模态信息, 进行损伤识别.

3 结 论

本文研究了某轴对称壳体结构的损伤识别方法, 选取出敏感指标. 同时在原有指标基础上, 构建新的敏感指标应用于结构损伤识别. 根据本文研究可以得到以下结论: (1) 实验验证所选取应变类

指标作为敏感标识量在识别轴对称壳体结构上非常有效; (2) $\alpha_{ij}^2 \omega^u / \omega^d$ 指标定位精确, 与损伤程度有确定的单调性关系, 能够反映出损伤程度, 作为敏感标识量识别结构损伤具有独特优势.

参 考 文 献

- 1 Chang FK. A summary report of the workshop on structural health monitoring. In: Chang Fu-Kuo, ed. Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring: The Demands and Challenges, Stanford, 2001-09-12-14. 21-23
- 2 杨智春, 于哲峰. 结构健康监测中的损伤检测技术研究进展. 力学进展, 2004, 34(2): 215-222 (Yang Zhichun, Yu Zhefeng. Progress of damage detection for structural health monitoring. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(2): 215-222 (in Chinese))
- 3 Sohn H, Farrar CR. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10: 446-451
- 4 Rytter A, Krawczuk M, Kirkegaard PH. Experimental and numerical study of damaged cantilever. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(1): 60-65
- 5 Sanayei M, Onipede O. Damage assessment of structures using Static test data. *AIAA Journal*, 1991, 29(7): 1174-1179
- 6 Cawley P, Adams RD. The location of defects in structures from measurements of the natural frequencies. *Journal of Strain Analysis*, 1979, 14(2): 49-57
- 7 Abdo MA-B, Hori M. A Numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, March, 2002, 251(2): 227-239
- 8 Pandey AK, Biswas M. Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 184(2): 311-328
- 9 唐小兵, 沈成武, 付军. 梁裂纹位置识别的模态能量法. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2002, 25(3): 241-243 (Tang Xiaobing, Shen Chengwu, Fu Jun. Modal energy method in application of detection of crack location in a beam. *Journal of Wuhan University of Technology* (Transportation Science & Engineering), 2002, 25(3): 241-243 (in Chinese))
- 10 Thyagarajan SK, Schulz MJ, Pai PF, et al. Detecting structural damage using frequency response function. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 210(1): 162-170
- 11 邓炎, 严普强. 梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法. 清华大学学报, 2000, 40(11): 123-127 (Deng Yan, Yan Puqiang. New approach for strain modal measurement and damage detection of bridges. *Journal of Tsinghua University*, 2000, 40(11): 123-127 (in Chinese))
- 12 袁颖, 林皋, 闰东明等. 基于残余力向量法和改进遗传算法的结构损伤识别研究. 计算力学学报, 2007, 24(2): 224-229 (Yuan Ying, Lin Gao, Yan Dongming, et al. Study on structural damage identification based on residual force method and improved genetic algorithm. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, 24(2): 224-229 (in Chinese))
- 13 郑明刚, 刘天雄, 朱继梅等. 曲率模态在桥梁状态监测中的应用. 振动与冲击, 2000, 19(2): 75-98 (Zheng Minggang, Liu Tianxiong, Zhu Jimei, et al. Bridge diagnosis using curvature mode shapes. *Journal of Vibration and Shock*, 2000, 19(2): 75-98 (in Chinese))
- 14 Cao X, et al. Application of artificial neural networks to load identification. *Computers and Structures*, 1998, 69: 63-78
- 15 Tsou P, Shen MH. Structural damage detection and identification using neural networks. *AIAA Journal*, 1994, 32(1): 176-183
- 16 朱宏平, 李斌. 利用动态特性测量值的结构损伤检测方法的比较研究. 华中科技大学学报, 2002, 19(1): 48-53 (Zhu Hongping, Li Bin. Comparison of analytical approaches to structural damage detection based on measured dynamic characteristics. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2002, 19(1): 48-53 (in Chinese))
- 17 杨晓楠, 唐和生, 陈榕等. 钢结构损伤识别中 Db 族小波函数选择. 同济大学学报 (自然科学版), 2006, 34(12): 1568-1572 (Yang Xiaonan, Tang Hesheng, Chen Rong, et al. Selection on Dbs family wavelet functions in steel structural damage identification. *Journal of Tongji University* (Natural Science), 2006, 34 (12): 1568-1572 (in Chinese))
- 18 董聪, 丁辉, 高嵩. 结构损伤识别和定位的基本原理与方法. 中国铁道科学, 1999, 20(3): 89-94 (Dong Cong, Ding Hui, Gao Song. The basic principle and method for recognition and location of structural damage. *China Railway Science*, 1999, 20(3): 89-94 (in Chinese))

(责任编辑: 刘俊丽)