

基于光纤光栅的结构健康监测技术及应用研究

黄国君* 黄晨光 江中华 刘乙君 伍敏

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要: 本文介绍了近几年来中国科学院力学研究所开展的结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 研究的进展。主要包括: 基于光纤光栅 (Fiber Bragg Gratings, FBG) 的 SHM 传感技术, 涉及到系列光纤传感器 (应变、温度、加速度、位移) 开发、应变分布测量算法和技术、低温应变和温度测量及 SHM 应用; 模态空间 SHM 理论和 FBG 应变模态测量技术; 状态空间 SHM 理论和技术, 如结构静载监测和非线性系统相空间损伤识别技术。此外还介绍了 SHM 系统的集成及在实际结构中的应用。最后对 SHM 的重要研究方向进行了展望。

关键词: 结构健康监测; 光纤光栅; 模态分析; 状态空间; 光纤传感器

Research on Technology and Application of Structural Health

Monitoring based on Fiber Bragg Gratings

Huang Guojun Huang Chenguang Jiang Zhonghua Liu Yijun Wu Ming

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 100190, Beijing)

Abstract: Some advances of the research on Structural Health Monitoring (SHM) carried out in the past years by Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, are presented. They mainly includes SHM sensing technology based on Fiber Bragg Gratings (FBG) that involves the development of a family of fiber sensors (strain, temperature, acceleration and displacement) and the algorithm and technology of strain distribution measurement, cryogenic strain and temperature sensing and its application to SHM, SHM theory in modal space and the measurement technology of modal strain based on FBGs, SHM theory and technology in state space, such as static load monitoring and the damage recognition in phase space for nonlinear systems. In addition, the integration of the SHM system and its application to the engineering structure in practice are demonstrated. Finally, prospects on some important issues of SHM are given.

Key Words: structural health monitoring; fiber Bragg gratings; modal analysis; state space; fiber sensors

1、前言

随着科学技术的不断进步, 现代结构正朝着大型化、复杂化和智能化的方向发展, 航天飞机、大型海洋平台、高层建筑、新型桥梁、大跨度网架结构等大型复杂结构不断出现。伴随而来的是对这些现代结构安全性的要求也越来越高, 这一方面是由于这些结构往往运行在复杂的工作环境如风、浪、流、地震和深冷 (太空) 使结构面临更严重的损伤积累和功能退化; 另一方面现代结构造价高, 任何突发性的失效都会造成巨大的经济损失甚至是严重的生态破坏和社会负面效应, 如最近的墨西哥湾海洋平台漏油事件等。因此现代结构要求安全管理模式和相关技术的创新。

* 通讯作者: ghuang@imech.ac.cn

结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 是通过结构中的 (力学) 传感器网络来自动化地获取结构的环境激励 (人为的或自然的) 和响应信息并从中判断结构的损伤和老化状况, 从而对结构的完整性和剩余寿命进行评估, 它是传统的结构健康检测的重要发展。从检测到监测, 虽只有一字之差, 但其内涵却有着深刻的变化。传统的结构健康检测一般是定期 (大、中、小修) 进行的, 无论结构是否已存在不可忽略的损伤, 这时结构往往需要停机或暂停使用, 然后进行无损检测, 大多为需要人工操作的物理探伤如超声波、涡流等。这一方面造成结构安全维护成本的提高; 另一方面对于空间飞行器、深水海洋平台下部、原子反应堆内部等大型结构一些人员无法到达的部位, 人工探伤无法操作, 形成了结构在空间上的安全盲区, 同时由于检修周期内结构安全状况的变化未知, 又形成了结构在时间上的安全盲区。SHM 的信号提取是自动化进行的, 因而对结构安全状况的把握可以是全方位和全天候的, 从而可实现对结构健康的在线或准在线监测, 这不仅可以降低结构安全管理成本 (只有监测到结构的安全隐患, 才安排结构检测维修), 而且可以大大提高结构的安全性。此外, 借助网络技术 SHM 还具有可远程操作、进行异地监测的优点, 这实际上是对物联网技术一个最好的诠释^[1]。

从检测向监测的发展面临着许多科学和技术方面的挑战。首先是传感技术, 它是 SHM 的技术基础。SHM 传感器应该具有高的测量精度、与结构相容性好、能适应复杂的环境、高的鲁棒性和长寿命等, 特别是对于嵌入到结构内部的 SHM 传感器, 其有效寿命至少不应低于结构的寿命, 否则将失去 SHM 应有的价值。目前, SHM 传感器正朝着集成化、智能化、微型化的方向发展, 光纤传感器和微机电传感器 (MEMS) 被认为是最有前途的适于 SHM 的传感器。

损伤识别理论和算法是 SHM 另一重要核心内容, 它是 SHM 的理论基础。相比物理探伤较为直接的损伤直接成像技术, SHM 中的损伤识别更为间接, 需要从测量的力学信号反演确定损伤的存在、程度和位置, 它实际上构成了一个固体力学的反问题。目前反问题是一个重要的科学前沿问题, 弹性力学反问题是其中的一个重要分支, 吸引了不少力学和应用数学工作者开展这方面的学术研究^[2]。基于模态参数 (固有频率、阻尼比、模态振型等) 的损伤识别是目前 SHM 应用最多的方法也是研究热点^[3], 但当结构自由度较多而测点有限时, 损伤反演较为困难, 损伤识别不确定较大。另一个研究较多的方法是应力波方法, 但目前只能用于简单构件^[4]。

本文将介绍中国科学院力学研究所结构健康监测实验室自 2002 年以来的 SHM 研究工作。第二章将介绍基于 Bragg 光纤光栅 (Fibre Bragg Grating, FBG) 的 SHM 传感技术, 包括 FBG 系列传感器研发和基于 FBG 的应变分布测量算法和技术; 第三章将介绍低温 FBG 传感技术的研发及在高温超导磁铁 SHM 中的应用; 第四章和第五章将分别介绍基于模态空间和状态空间 SHM 的理论及实验研究; 最后在第六章对 SHM 的发展进行展望。

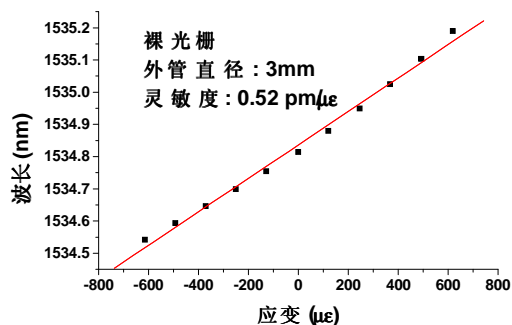
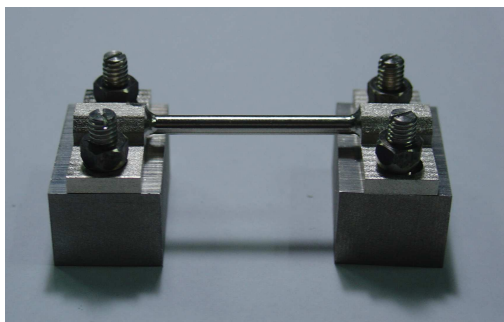
2、Bragg 光纤光栅传感技术

2.1 FBG 传感器研发

FBG 具有尺寸小、重量轻、波长调制、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀抗雷击、适用温度范围广等特点, 光栅非退化周期至少在二十年以上, 特别是可实现一根光纤上串联多个 FBG 的准分布测量, 使得测点数大大增加而不增加走线长度和通道数, 同时可利用 FBG 作为传感元件开发温度、应变、加速度、位移和压力等多种传感器, 从而实现同一传感系统多物理量的测量, 增加系统的集成性。此外在复合材料的制备过程中可直接将 FBG 嵌入于复合材料中, 而不会对复合材料及结构的完整性带来损害, 因为光纤本身就是 SiO_2 玻璃纤维, 因而与复合材料较好的相容性。FBG 也可方便地嵌入到混凝土等土木结构中。FBG 及光纤网络在结构中起着“神经网络”的作用, 感受结构的变形和损伤, 从而赋予结构一种智能特性。

FBG 的上述特性决定了它可作为一种较为理想的 SHM 传感元件, 所以也成为了我们重点研究的 SHM 传感技术。FBG 传感系统由光源、波长解调装置和 FBG 传感器及光纤组成, 2002 年力学所引进了美国 Micron Optics 公司的集扫频激光和波长解调于一体的四通道波长解调仪, 建立了 FBG 传感系统, 这也是国内首个多通道 FBG 传感系统。

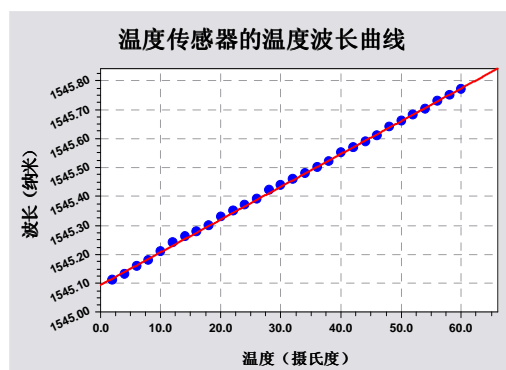
FBG 可以直接作为传感器使用, 在实验室条件下直接测量应变、温度和静水压力。但由于光纤较脆弱, 在工程环境下需要将 FBG 封装制成易于安装的传感器, 同时应用 FBG 可开发 FBG 加速度、位移等其它传感器, 此时 FBG 起着传感元件的作用。图 1-4 是我们开发的 FBG 应变、温度、加速度和位移传感器及其传感特性^[5-10], 可以看到它们具有良好的线性度和灵敏度。其中应变传感器是我们专为海洋平台监测开发的一种可拆卸式传感器, 便于安装和单独标定, 用不锈钢封装, 具有良好的疲劳可靠性; 加速度传感器的特点是 FBG 既作为传感元件, 又作为弹性元件, 使得传感器具有高灵敏度的同时, 具有高的固有频率及测量范围。



(a)

(b)

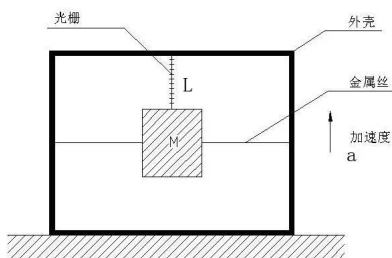
图 1 FBG 应变传感器 (a) 实物图; (b) 标定曲线



(a)

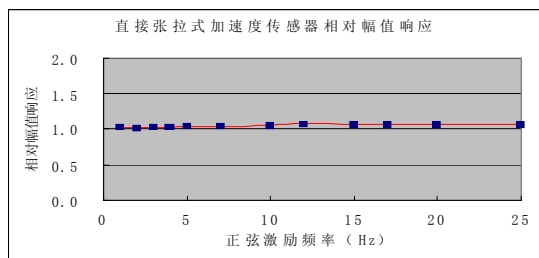
(b)

图 2 FBG 温度传感器 (a) 实物图; (b) 标定曲线



(a)

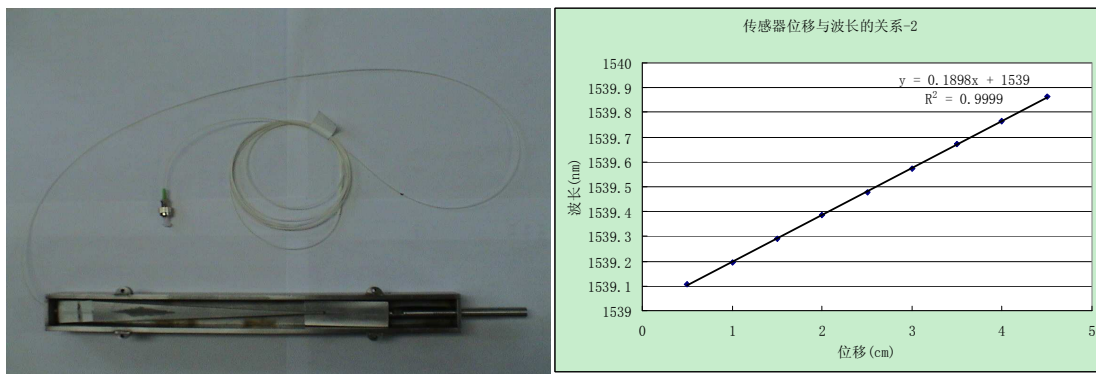
(b)



(c)

图3 张拉式FBG加速度标定装置

(a) 原理图; (b) 实物图; (c) 频响标定曲线



(a)

(b)

图4 FBG位移传感器 (a) 实物图; (b) 标定曲线

2.2 FBG 应变分布测量技术

目前的FBG应变测量的前提是光栅长度(10-15mm)上的应变均匀或接近均匀,此时FBG反射谱在变形前后将产生平移,从而可从反射谱峰的平移建立波长变化与应变的标定关系(一般为线性,如图1所示)。当光栅长度上的应变非均匀较强时,反射谱不仅有平移,而且有畸变和展宽,目前所采用的只记录反射谱峰平移的测量原理就不能适用。不过如果将变形前后反射谱全谱都记录下来,依据光纤光学理论,就有可能将光栅长度上的应变反演出来,从而实现应变分布测量,这在实验力学上具有重要意义,也可为SHM提供更丰富的测量信息。

根据光纤光学的传递矩阵理论,我们建立了一种从FBG反射全谱反演FBG长度内应变分布的传感算法,该算法将反演问题转化为一优化问题并采用遗传算法和共轭梯度算法相结合的组合优化算法求解,较国外现有算法显著提高了应变分布测量精度,并在变截面悬臂梁的实验中获得了验证^[11-12]。

对于给定的FBG,当温度不变时,反射强度谱取决于FBG长度上的应变分布,其理论分布 $R(\lambda)$ 可由传递矩阵求得^[13],比较光谱仪测得的反射强度谱 $G(\lambda)$,可构造如下泛函:

$$E(\varepsilon(z)) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ [G(\lambda) - R(\lambda)]^p \}^{\frac{1}{p}} d\lambda \quad (1)$$

式中 $E(\varepsilon(z))$ 为误差泛函、 $\varepsilon(z)$ 为FBG轴向应变、 p 为范数,该泛函取极小值(小于某一小量)所对应的 $\varepsilon(z)$ 即为所求应变分布。

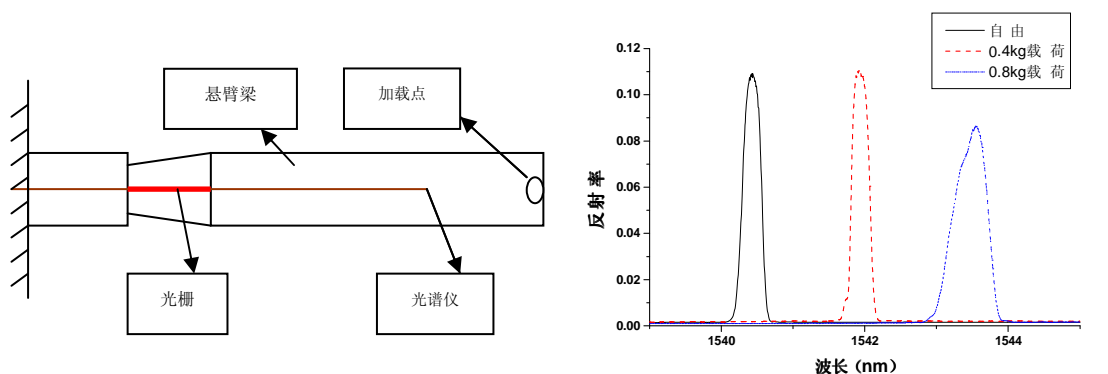
(1)式所示的优化问题可首先采用遗传算法寻优,该算法的优点是可搜寻全局最小值,避免收敛到局部极小值,但遗传算法具有一定的随机特性,容易在最优值附件震荡。为了提高反演精度,可将遗传算法最优值作为初值,进一步采用梯度算法寻优,所以本算法构成一组组合算法。图5(a)为变截面悬臂梁应变分布测量实验装置示意图;图5(b)表示悬臂梁未加载及加载0.4kg和0.8kg时测得的FBG反射光谱;图6(c)和(d)分别表示由测量反

射光谱应用本组合算法反演得到的 0.4kg 和 0.8kg 加载时 FBG 长度上悬臂梁的应变分布及其与理论值的比较, 该结果验证了本测量方法的有效性。

3、低温结构健康监测

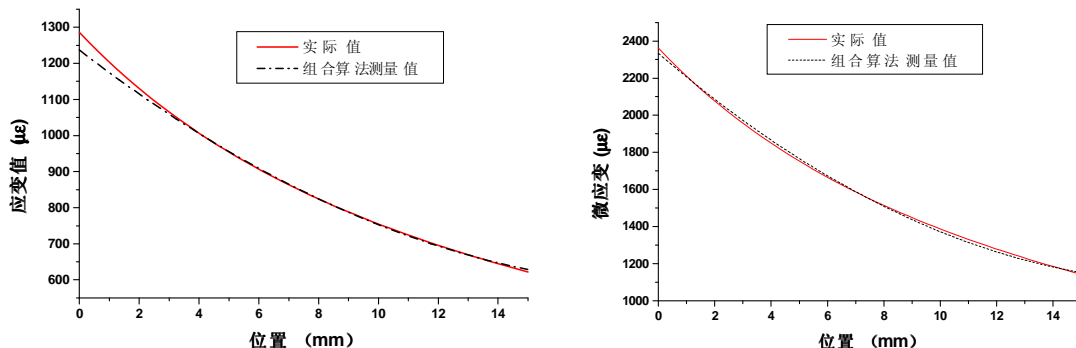
对于空间站、超导磁体、低温容器等一些低温工程结构的 SHM, 需要发展低温环境下的传感技术。超导磁体的应变监测对于磁体安全运行尤为重要, 因为当应变超过某一阈值时, 会出现“失超”现象, 即超导体变成导体, 磁体会在强大电流的作用下破坏, 这已成为超导磁体破坏的主要形式。由于超导磁体运行在低温和强磁场条件下, 电阻应变片难以准确测量磁体的应变, 所以我们开展了 FBG 测量超导磁体应变的研究。

研究初始阶段, 我们发现在液氮温度下 FBG 的反射峰会多峰和畸变, 这意味着常用的 FBG 应变测量原理在低温下不能适用, 美国宇航局研究机构也发现了这一现象, 并将它归因于光纤微观结构及光学性质在低温下发生了改变。我们从力学的角度对这一现象进行了探索, 有限元分析表明: 常温下安装在结构上的 FBG, 在进入低温环境后, 光栅长度上存在较为严重的非均匀残余应变, 由 2.2 节介绍的反射光谱形状对应变分布的依赖性可知: “多峰”现象有可能来源于这种非均匀的残余应变。经过 FBG 安装工艺的改善, 使得残余应变均匀化, 我们成功地消除了“多峰”现象, 并且发现 FBG 的应变传感特性不受温度的影响, 图 6 表示该实验结果^[14], 这也说明了 FBG 的光弹性对温度不敏感。应用 FBG 实测了液氮温度下超导磁体应变与电流的相关性, 与理论结果较为吻合如图 7 所示^[15]。此外, 我们还研究了低温下 FBG 的温度传感特性, 发现它与温度相关^[16]。



(a) 试验装置示意图

(b) 反射光谱测量图



(c) 应变分布反演结果 (0.4kg)

(d) 应变分布反演结果 (0.8kg)

图 5 变截面悬臂梁应变分布组合算法实测结果。

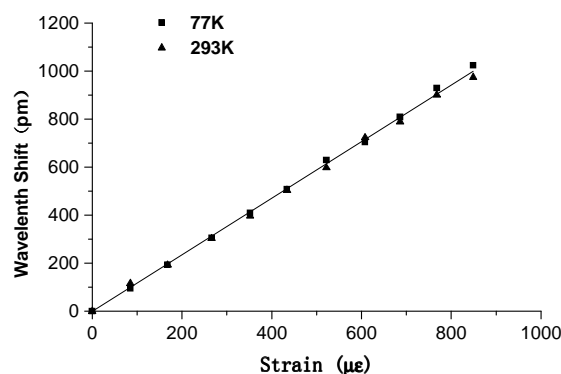


图 6 常温和液氮温度下 FBG 的应变响应

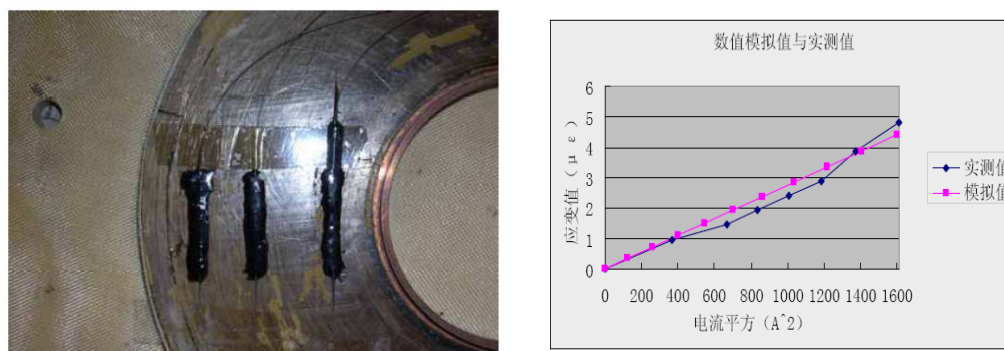


图 7 液氮温度下超导磁体应变与电流的相关性

4、模态空间结构健康监测

4.1 损伤因子敏感性分析

模态空间损伤识别方法是目前应用最多的方法，属于动态识别方法，也称振动识别方法，其优点是模态性质属于结构的固有动力学特性，只与结构的质量、刚度和阻尼分布有关，与外载无关。常用的作为损伤识别因子的模态指标有：基频、位移振型、应变振型、曲率振型、模态应变能。应用有限元方法分别以一个悬臂翼形板和轴对称壳体结构为对象对这些损伤因子进行了识别效果分析^[17]，图 8 (a) 和 (b) 分别表示悬臂翼形板一阶位移振型和应变振型损伤识别效果，其中 9 和 10 节点对应损伤单元，可看到损伤局部振型的变化，显然应变振型的变化更为显著。归纳上述分析结果，可得到以下结论：

- 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识量识别结构损伤；
- 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) 应变类因子(应变模态、曲率模态)能够很好地定位和识别结构损伤程度，是敏感标识量；
- 4) 模态应变能因子能够很好地识别结构损伤，而且对小损伤和局部损伤非常敏感，能够作为敏感标识量识别结构损伤，但在识别多处损伤时，对损伤程度不敏感。

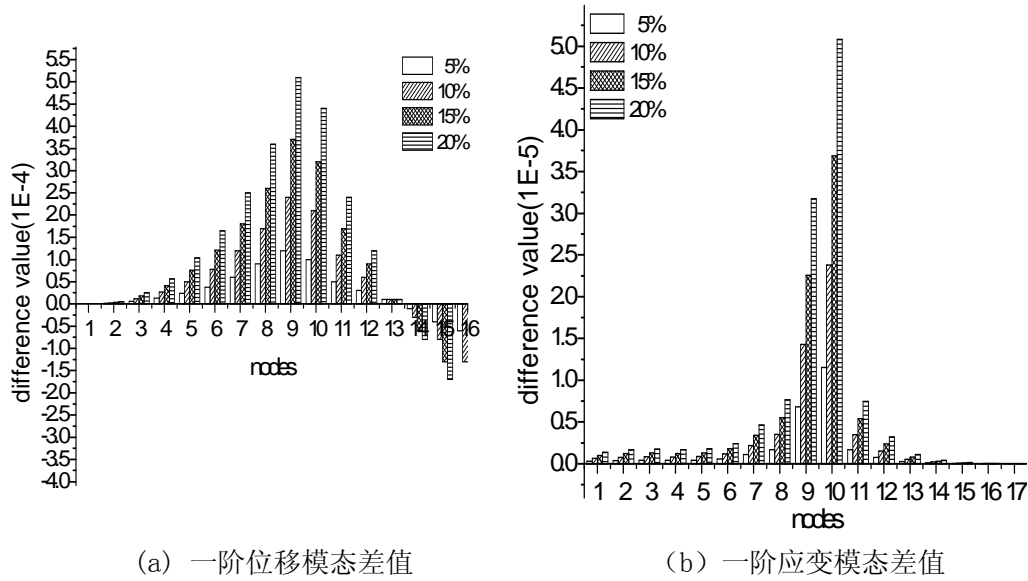


图 8 悬臂翼形板位移和应变模态因子损伤识别效果

4.2 FBG 应变模态分析在 SHM 中的应用

目前实验模态分析中常采用位移模态分析,这一方面是由于位移信号可直接应用位移传感器获取,另一方面是实验量远较应变模态分析低,同时由位移模态分析还可以得到模态应变能的信息。曲率信息还未有现成的传感器提取,需要从位移分布的差分得到,这要求布置足够密的位移传感器,实验上不太现实,也可从应变测量信息近似得到,但只适用于特殊构件。

SHM 实验模态分析损伤因子的选取既要考虑其敏感性,又要考虑是否可获得合适的传感器、实验可操作性及复杂性,不同的传感器对应不同的实验和分析程序,其复杂性截然不同。如前一小节所述,位移模态分析理论上不太适合 SHM,尽管可以从中得到损伤敏感的模态应变能,但由于大量布置位移传感器成本高、对结构动力学特性影响大,技术上位移模态分析也不适合 SHM。应变模态分析在理论上和技术上都适合 SHM,特别是采用 FBG 作为应变传感器,可大规模布置、对结构特性影响小。不过完整应变模态分析的问题是实验量远较位移模态分析大,这可从它们的传递矩阵看出:

$$H_{ij} = \sum_{r=1}^m \frac{\Phi_{ri} \Phi_{rj}}{k_r - \omega^2 m_r + j\omega c_r} \quad H_{ij}^\epsilon = \sum_{r=1}^m \frac{\Phi_{ri} \Phi_{rj}^\epsilon}{k_r - \omega^2 m_r + j\omega c_r} \quad (2)$$

式中: H_{ij} 和 H_{ij}^ϵ 分别为位移和应变传递矩阵分量; k_r, m_r, c_r 分别是第 r 阶模态刚度、模态

质量和模态阻尼; Φ_{ri} 和 Φ_{rj}^ϵ 分别为该阶位移模态向量和应变模态向量分量; m 为模态总数。

由于位移传递矩阵是对称的,要获得完整的模态信息只需测得一系列或一行的信息;而应变传递矩阵是非对称的,要获得完整的模态信息需要测得一系列加一行的信息,实验量和复杂度大幅增加,且要应用位移和应变两种传感器。然而,我们注意到 SHM 并不需要完整的模态信息,应变模态只是一个相对量,如果我们将归一化的应变模态(即形状)作为损伤因子,那么只需测量一系列,就可完成 SHM 所需的应变实验模态分析,这实际上与位移模态分析的工作量是一样的。

应用上述方法对一个翼形悬臂板进行了应变模态的实验分析,并基于应变模态结果进行了根部连接损伤识别^[18]。用该翼形悬臂板构件仿真飞机机翼,由根部的 9 组螺栓固定,分别

拆除部分螺栓模拟机翼的根部损伤，通过应变模态的变化损伤因子识别拆除螺栓的位置（损伤定位）和个数（损伤程度）。翼形悬臂板及 FBG 传感器布置如图 9 所示，其中根部附件横向布置了一条含 7 个 FBG 的光栅串，并在板中部沿纵向布置了一条含 14 个 FBG 的光栅串，FBG 总数为 21 个，形成应变传感器阵列。考虑到只用板的横向对称模态进行损伤识别，所以只在板中部沿纵向布置了传感器，而未在板的边部布置传感器，这可减少传感器数量，而不显著降低实验精度。

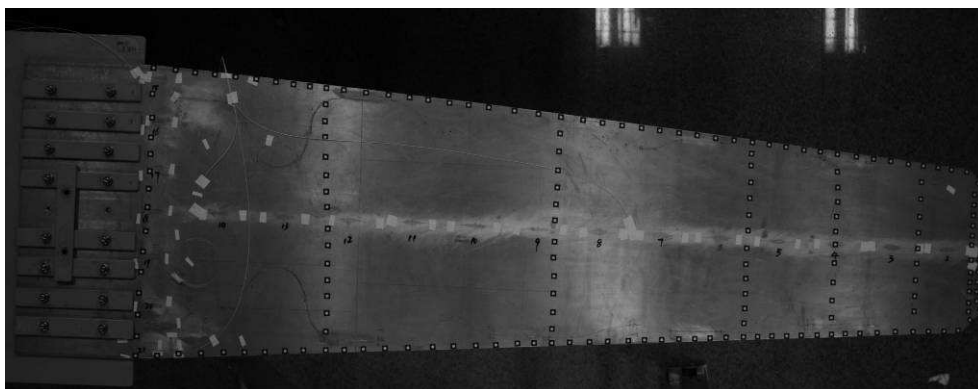


图 9 翼形悬臂板及 FBG 传感器布置

图 10 为本实验的系统框图，包含传感系统、激励系统和模态分析系统，其中激励系统采用的是锤击；模态分析系统采用的是北京东方振动和噪声技术研究所（下面简称东方所）研发的 Coinv DASP V10 工程版实验系统。表 1 为实验测得的完整结构前四阶固有频率及其与有限元模拟结果比较，其中 1、3、4 阶为对称模态。DASP 输出的各阶模态形状如图 11 所示。图 12 为对称模态有限元计算应变振型和实测应变振型的比较，其中左列为计算值，右列为实测值，二、三阶模态分别对应图 11 的 2、4 阶模态。综合表 1 和图 12 的结果可以看到无论是频率还是振型，实验结果与理论结果都较为符合，说明本应变模态实验方案和 FBG 应变传感器的采用可以达到较高精度。

图 13 为根部连接螺栓和附件测点位置的编号。图 14 和 15 分别为 1 至 3 号和 1 至 5 号螺栓拆除时模态应变相对变化的分布，从它们的大小及分布直观上就能判断螺栓拆除位置及个数。当然，这只是在损伤较大时能够实现，当损伤较小时（如单个螺栓拆除）需要借助神经网络进行精细识别。采用 BP 神经网络，利用单个螺栓拆除的实验模态数据或有限元数据对该网络进行训练，用于重复性实验的损伤识别，表 2 表示损伤效果，其中无损伤的目标值为零，含损伤部位的目标值为 5，可以看到能够有效地识别单个螺栓拆除的位置，高精度的 FBG 应变测量是达到这一效果的技术保障。

作为上述 SHM 方法的一个实际应用，我们对一个开口壳体结构进行了损伤识别分析。该结构如图 1 6 所示，由一个轴对称壳体在中间段开口而成；壳体分为三段由固定螺栓连接而成，长度分别为 0.9m、1.1m 和 0.8m，总长 2.8m，开口在第中间段；结构整体由固定螺栓固定在剪力墙上。FBG 传感器的布置如图 1 7 所示，由上下左右四个母线串和根部及中间段和底段连接部附近的两圈串组成，传感器总数为 57 个，分成四路。

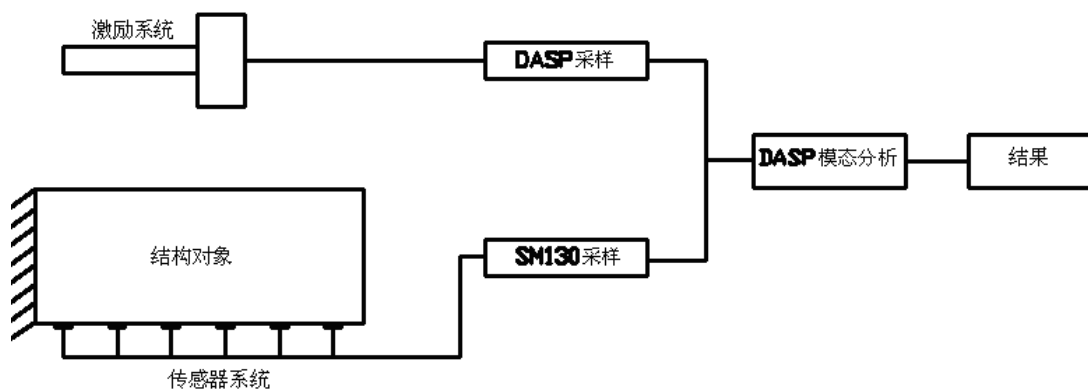


图 10 实验系统框架图

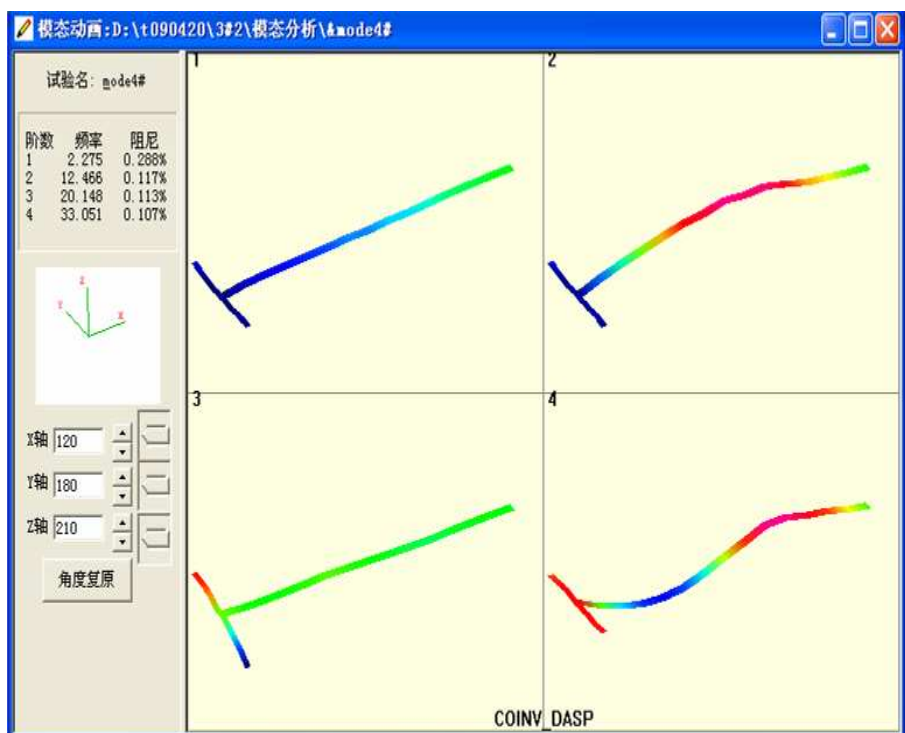


图 11 DASP 振型动画截屏

表 1 固有频率计算值和实测值的比较

计算值	实测值
频率 (Hz)	频率 (Hz)
2.3903	2.277
13.3221	12.477
20.232	20.148
36.0430	33.066

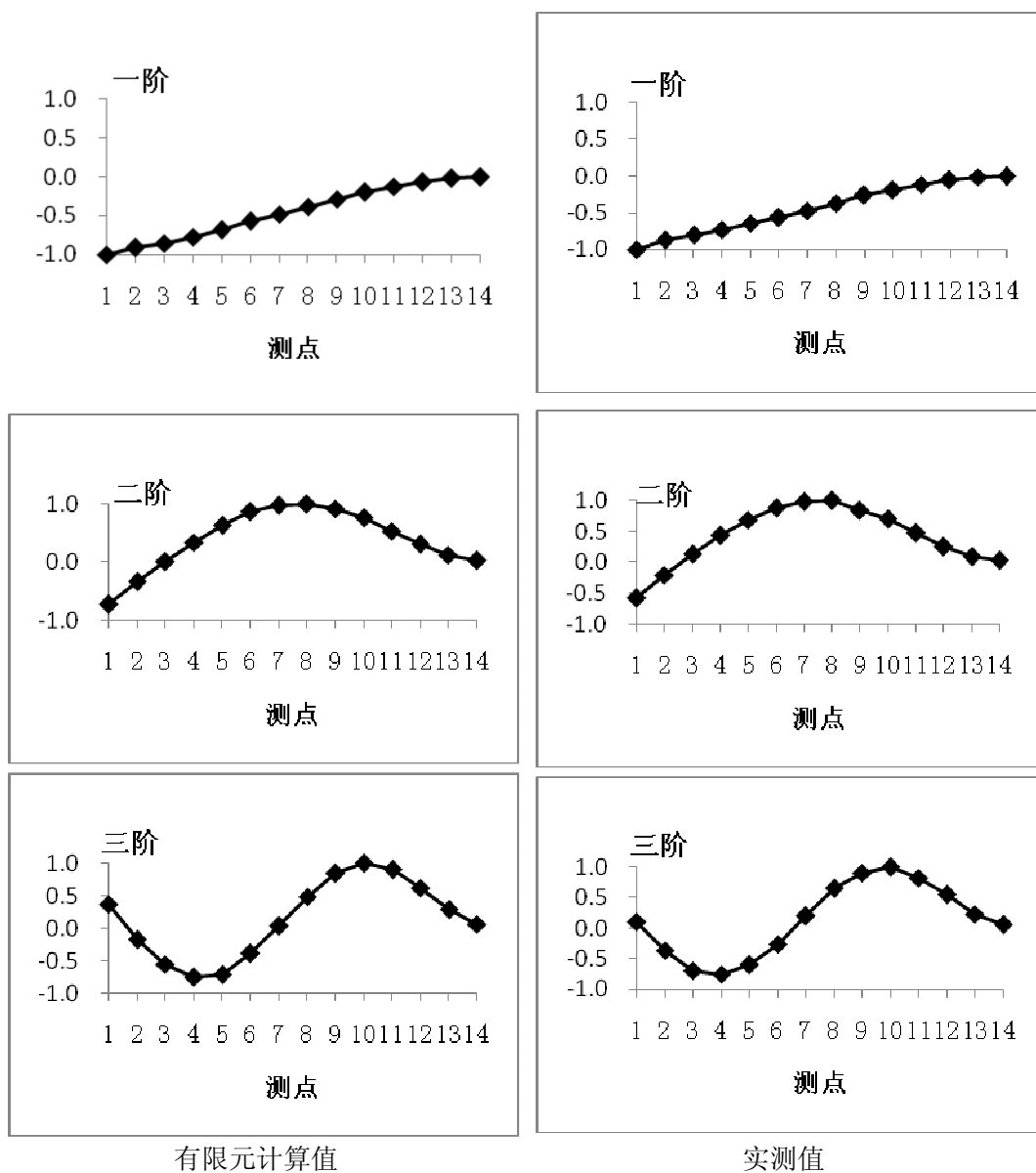


图 12 有限元计算应变振型和实测应变振型的比较

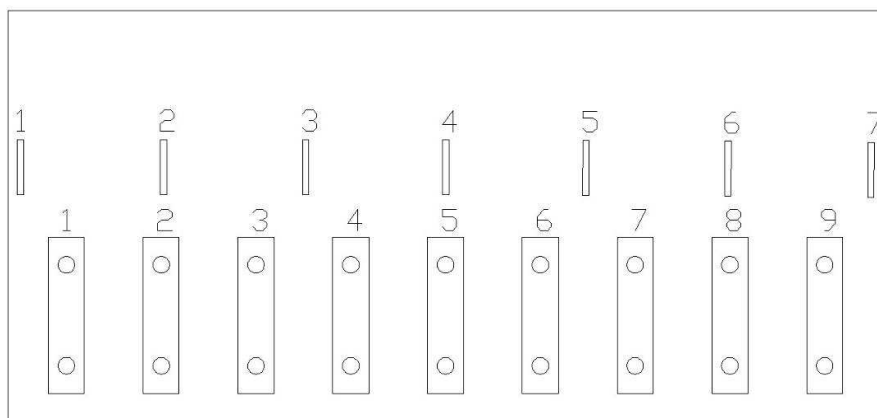


图 13 螺栓和测点的位置编号

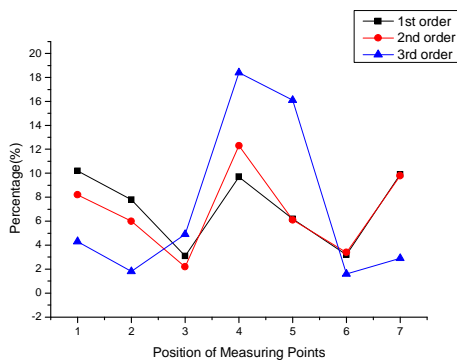


图 14 1 至 3 号螺栓拆除时模态应变变化百分比

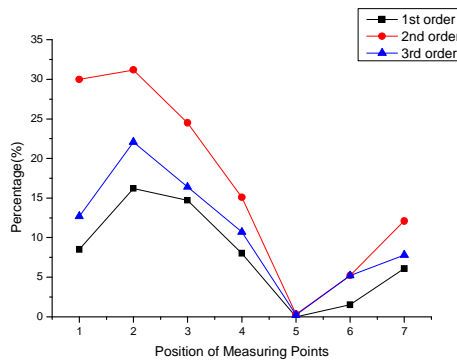


图 15 1 至 5 号螺栓拆除时模态应变变化百分比

表 2 单个螺栓拆除损伤的神经网络识别效果

各螺栓拆除对应的测试输出									
完整	拆 1#	拆 2#	拆 3#	拆 4#	拆 5#	拆 6#	拆 7#	拆 8#	拆 9#
0.09	5.26	-0.06	-0.24	-0.21	0.04	0.09	-0.09	-0.06	0.26
0.16	-0.04	4.82	-0.04	0.35	-0.18	0.92	-0.69	0.86	-0.20
0.10	0.07	-0.01	4.69	1.21	0.05	0.13	0.01	0.32	0.22
0.30	0.74	0.17	0.09	5.04	-0.13	-0.30	0.04	-0.21	1.08
0.72	0.56	0.66	0.72	1.29	4.78	0.98	-0.04	0.22	0.30
-0.34	0.41	-0.18	0.05	-0.59	0.91	5.15	0.70	-0.22	-0.15
-0.14	0.34	-0.34	-0.05	0.90	0.02	-0.20	4.64	1.10	-0.31
-0.56	-0.17	-0.44	0.24	-0.94	0.13	0.38	-0.21	4.47	-0.81
-0.40	-0.46	0.23	0.07	-0.03	0.18	0.74	0.31	0.53	5.13

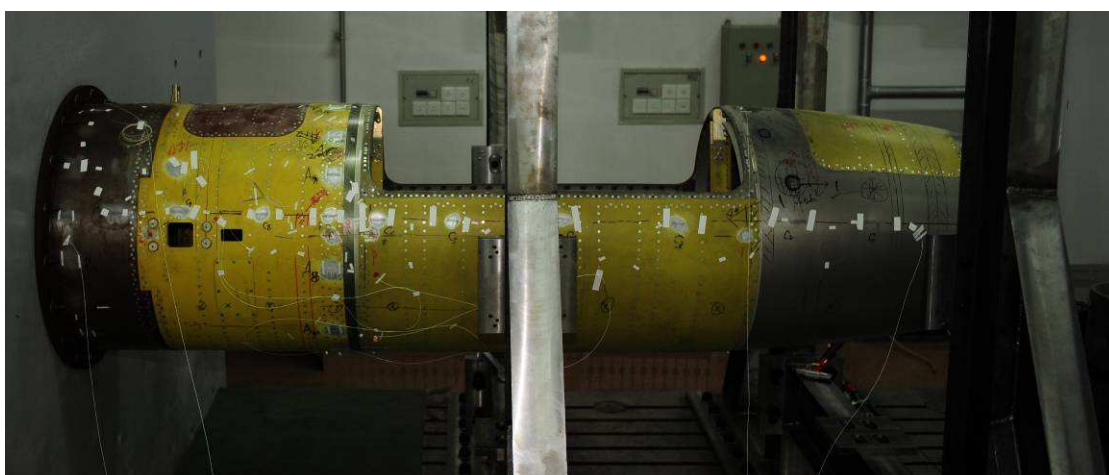


图 16 开口壳体结构

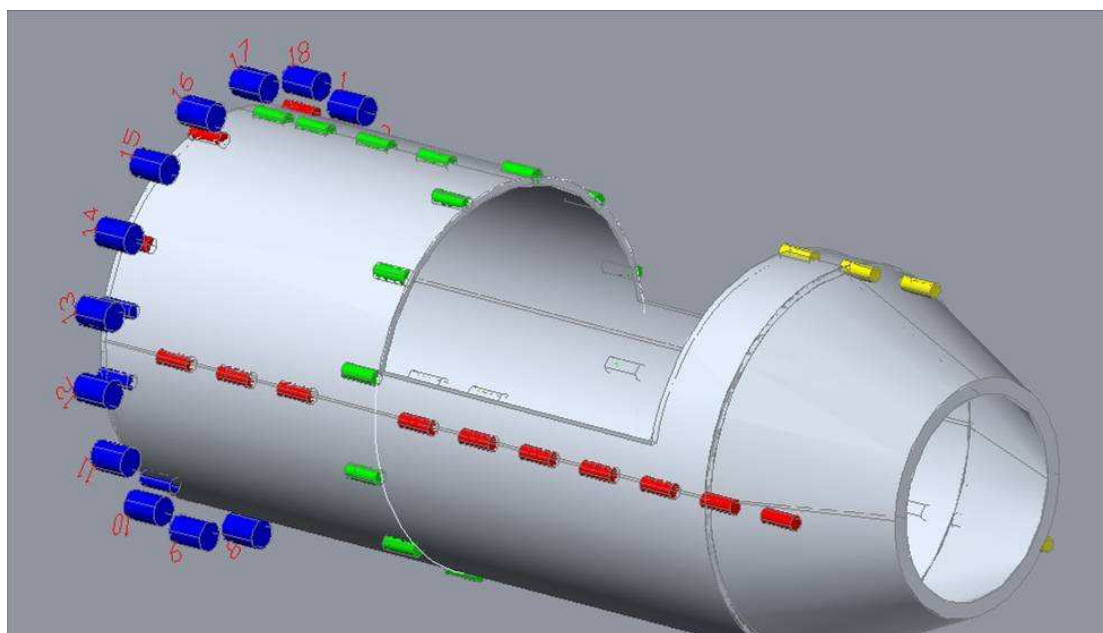


图 17 FBG 传感器布置示意图

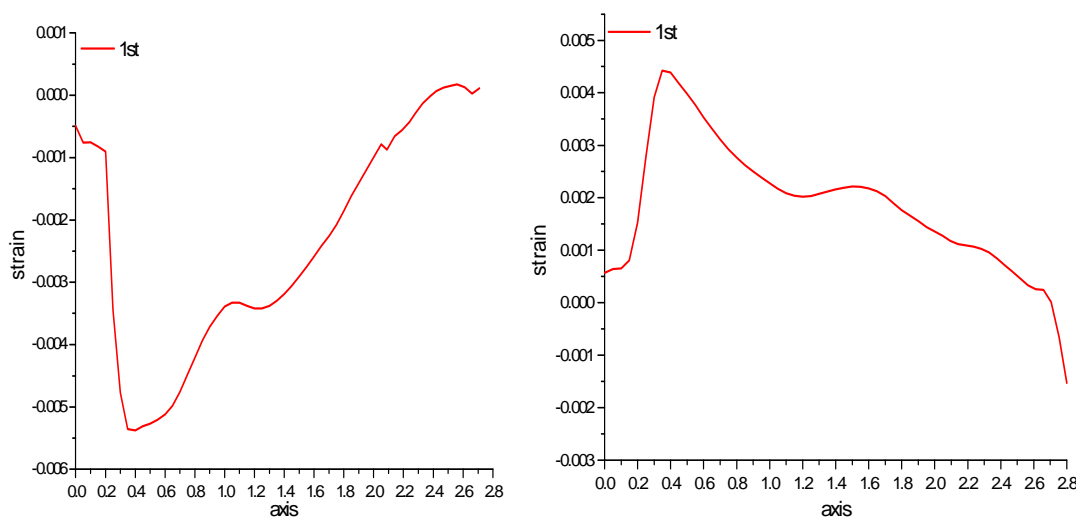


图 18 左右母线应变模态一阶图

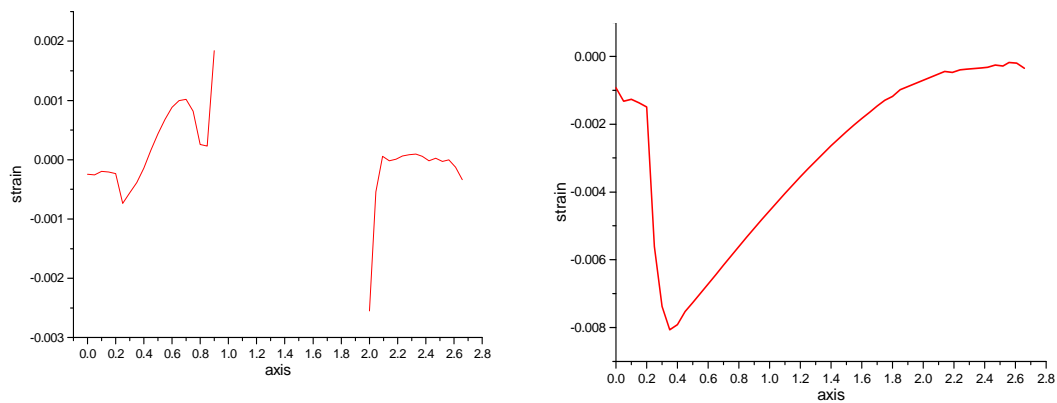


图 19 上下母线一阶应变模态图

表 3 神经网络有识别螺栓拆除结果统计

	螺栓编号						
	D10	D11	D13	D14	M10	M11	M12
成功识别次数	10	9	10	10	10	9	9
测试次数	10	10	10	10	10	10	10

通过拆除根部或连接部的螺栓来模拟结构损伤，这一方面是考虑到损伤可恢复以进行重复性试验；另一方面是考虑到结构的连接损伤是结构损伤最重要的形式之一。图 18 和 19 分别为左右和上下母线轴向应变模态的有限元分析结果^[17]，可看到在结合部应变变化较其它部位剧烈，这主要是由于各段的材料及壳体的厚度不同，理论分析结果可为试验设计提供参考。

采用与悬臂板相同的实验和分析步骤，对根部和连接部拆除螺栓的位置进行了识别，识别主要是依据根部和连接部附近的模态应变(母线上传感器的布置主要是为了结构整体模态分析的需要)。通过若干典型实验训练神经网络，然后将该神经网络用于拆除螺栓位置的识别，表 3 表示该试验结果的统计^[18]，其中 D 和 M 分别表示底部和段中结合部连接螺栓的编号，可看到识别结果较好，错判主要缘于实验中的噪声。

5、状态空间结构健康监测

模态空间损伤识别理论严格、精度高，不足之处是所需传感器较多、实验分析数据获得模态信息时耗时较长，不利于实时在线监测，一般用于准在线监测。状态空间监测是直接由测得的信号获取损伤识别所需的信息，有时只需在重点监测部位(热点)布置传感器即可，损伤识别反应快，适于实时在线监测。

5.1 结构静态载荷监测

结构健康监测最初实际上是从结构的载荷监测发展起来的。载荷监测一方面为设计的校核和完善提供第一手资料；另一方面，借助损伤力学、断裂力学等可从结构的受载状况分析结构可能的损伤，实现结构损伤的间接监测。载荷信息既可以直接采用力、力矩等传感器监测，也可间接地通过结构响应的监测反演得到，这构成了另一种固体力学反问题，因此，载荷监测在技术和理论上都为结构健康监测提供了一个重要基础

作为一个初步研究，我们对的结构集中荷载的位置和大小进行了在线识别研究，采用间接方法^[19]。实验对象为前面介绍过的悬臂翼形板，将板分成 5 个大区，每个大区又分成若干小区，要求能够识别任一集中荷载作用的小区位置和大小。板的分区和 FBG 布置如图 20 所示，FBG 网络由 3 条含 5 个 FBG 的光纤串组成，每个大区有 3 个传感器。

载荷识别采用向量相关法，即首先用标准砝码在每个小区中心加载，记录下每个 FBG 的应变响应，从而建立样本数据库，该数据库也可通过有限元分析建立；然后对任意重量和位置的加载，比较归一化后实测和样本应变向量的差模，取最小值做出判断，先判断大区，后判断小区。应用该方法可以实现实时在线载荷监测，图 21 (a) 和 (b) 分别表示载荷位置识别成功率和载荷大小识别误差，其中工况 (condition) 1 和 2 分别表示砝码整体作用在小区内和压边，可看到对于工况 1 位置识别成功率大于 90%、载荷大小识别误差小于 10%。

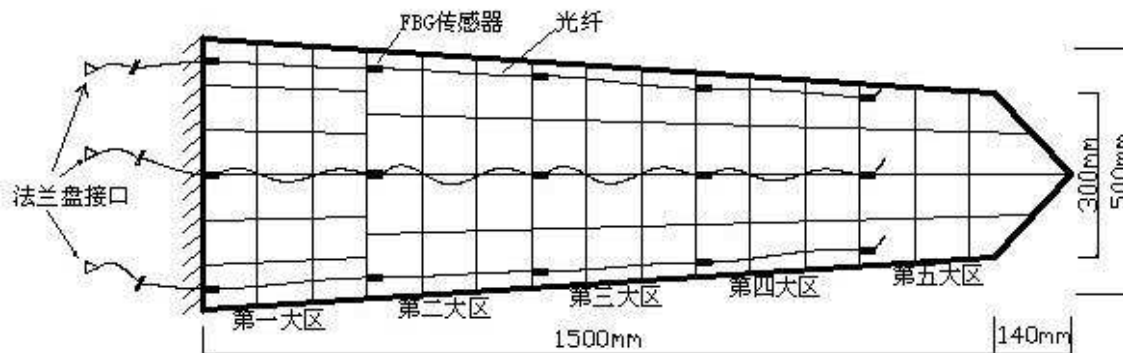


图 20 平板上的分区和 FBG 传感器布设

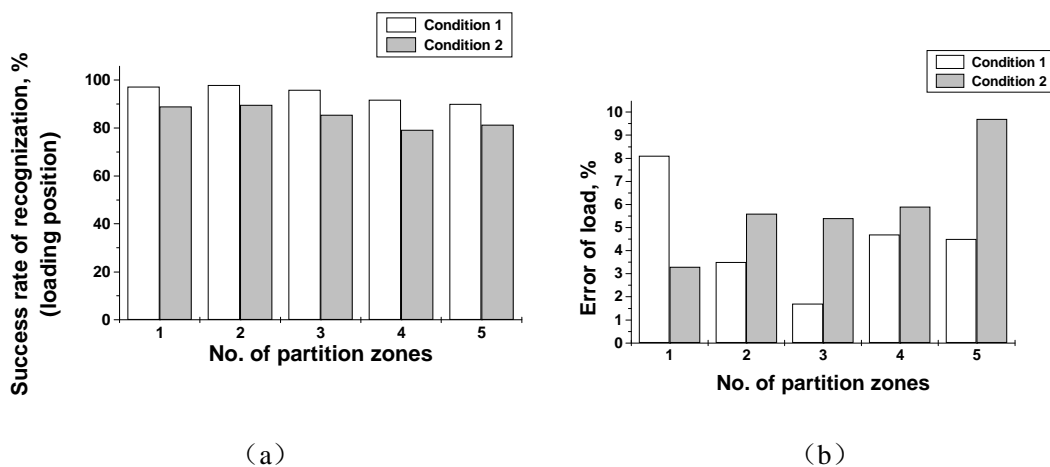


图 21 载荷监测效果。(a) 位置识别成功率; (b) 载荷大小识别误差

5.2 相空间法

模态分析方法要求系统是线性的, 且加载和结构响应都是已知的, 这些要求对于一些大型结构难以满足。首先大型结构人工加载难以实现, 只能借助环境载荷, 而环境载荷如风、浪、流载荷往往具有随机性, 人们只知道其随机特性; 其次这些结构如海洋平台、桥梁等的响应与环境载荷具有较强的非线性耦合(流固耦合), 导致系统为非线性, 因此需要发展随机、非线性的 SHM 方法。

相空间法是一种数据驱动的方法, 对模型是否线性没有要求, 对外载荷是否确定性也没有要求, 也不需要预先知道结构模型, 所以适用范围很广, 特别是工程应用。相空间法是基于 Takens 嵌入定理^[20]的在低维嵌入空间中研究原动力学系统渐进行为的一种非线性动力学研究方法, 在许多领域得到应用。Nichols 等^[21]将相空间法应用于结构损伤识别, 构造了一个预测误差作为反映损伤的参数, 实现了单自由度系统的损伤程度识别。我们将相空间法推广到三自由度系统的损伤识别, 结果表明: 该方法不仅能够识别损伤程度, 而且能够对损伤定位。

实验中测量得到的量往往是与系统性质有关的某一变量随时间变化的数据, 也称为时间序列或信号。这样被测得的变量可以是系统的状态变量之一, 如位移; 也可能并不是系统的状态变量而是与系统状态有关的某一变量, 如心电图。一个变量随时间的变化是由整个系统的运动规律支配的, 因此, 单一变量的时间序列隐含着整个系统的运动规律。由一个变量的

时间序列刻画整个系统的性质或特征，就是相空间重构。其方法如下：

对于单变量时间序列 $\{y(t)\}$ ，适当选取某一时间延迟量 τ ，取 $y(t)$ 、 $y(t+\tau)$ 、 $y(t+2\tau)$ 、 \dots 、 $y[t+(m-1)\tau]$ 为坐标，构造一个 m 维的空间。这样重构的相空间中轨线的分布或结构（吸引子）便可以反映系统的运动特征。Takens 定理表明重构的相空间和原动力系统的拓扑性质是等价的。

为了使重构的相空间能较充分地反映系统运动的特征，必须恰当地选取维数 m 和延迟时间 τ 。首先从单变量时间序列 $\{y(t)\}$ 中构造 Toeplitz 矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(q) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(q+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-q) & y(N-q+1) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 N 为单变量时间序列 $\{y(t)\}$ 的总长度， $\{y(t)\}$ 中任意相邻两点的时间间隔为 Δt ，样本频率 $f_s = 1/\Delta t$ 。 $q = f_s / f^*$ ， f^* 是响应信号做 FFT 变换后主频附近的频率，是个经验值。

对矩阵 A 进行奇异值分解 $SVD(A) = USV$ ，其中 $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ ， $\sigma_i > 0 (i = 1, 2, \dots, r)$ ， $r = \text{rank}(A)$ 。对奇异值进行归一化后，接近零的奇异值反映了系统的噪声，数值较大的奇异值在一定程度上反映了动力系统活跃的自由度。 τ 的选取可通过其自相关函数 $c(\tau)$ 获得，作 $c(\tau) - \tau$ 曲线，选择曲线第一次降至 0 处的 τ 值作为延迟时间的恰当值。因为对于这样的 τ 值，坐标 $y[t+(j+1)\tau]$ 与坐标 $y(t+j\tau)$ 既是相关性较小，又由于 τ 很小，他们不是完全相互独立的。

非线性预测误差损伤因子是从健康结构的响应信号中建立基准吸引子 (Baseline Attractor)，然后与损伤结构的响应建立的损伤吸引子 (Damaged Attractor) 作对比，寻找两者之间的背离程度作为损伤程度的标识。具体方法如图 22 所示，以二维吸引子为例。

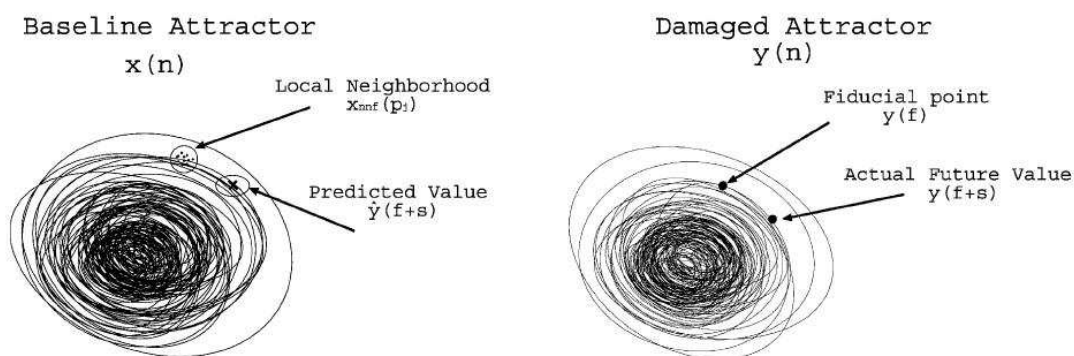


图 22 非线性预测误差原理简图

在嵌入空间中，无损结构的响应信号向量记为

$\mathbf{x}(n) = (x(n), x(n+\tau), \dots, x(n+(m-1)\tau))$ ，其中 $x(n)$ 为无损结构响应测量信号序列；相应地损伤结构的响应信号向量记为 $\mathbf{y}_k(n) = (y_k(n), y_k(n+\tau), \dots, y_k(n+(m-1)\tau))$ ，其中 k 代表损伤程度（以下省略）， $\mathbf{y}(n)$ 为损伤结构响应测量信号序列。由 $\mathbf{x}(n)$ 建立基准吸引子，并与 $\mathbf{y}(n)$ 建立的损伤吸引子进行比较，可得到预测误差损伤因子。

在损伤吸引子中随机选择一个时间点 f ，就得到与该时间点对应的基准点 $\mathbf{y}(f)$ (Fiducial point)。在基准吸引子中以 $\mathbf{y}(f)$ 为中心，寻找半径为 ε 的邻域 $\mathbf{x}_{mf}(p_j)$ 内包含的基准信号点 $\mathbf{x}(p_j)$ ：

$$\mathbf{x}_{mf}(p_j) : \|\mathbf{x}(p_j) - \mathbf{y}(f)\| < \varepsilon, \quad j=1, N_f \quad (4)$$

其中时间指标 p_j 和 f 没有任何必然联系，即 $\mathbf{x}(p_j)$ 的选择是纯几何的，由到基准点 $\mathbf{y}(f)$ 之间的欧几里德距离决定。这里的半径 ε 是可变的，以 $\mathbf{x}_{mf}(p_j)$ 领域内的基准信号点的数目 N_f 为标准，调整半径 ε 的大小。 N_f 由经验给出在 $(10^{-3}N, 6 \times 10^{-3}N)$ 范围内。在基准吸引子上考虑 s 时间步长后每个点的演化，把得到的均值 $\hat{\mathbf{y}}(f+s)$ 与真实的损伤吸引子上 s 时间步长后 $\mathbf{y}(f)$ 的演化 $\mathbf{y}(f+s)$ 作比较，得到关于 f 点的非线性预测误差 γ (Nonlinear Prediction Error, NPE)：

$$\hat{\mathbf{y}}(f+s) = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} \mathbf{x}_{mf}(p_j+s) \quad (5)$$

$$\gamma = \|\hat{\mathbf{y}}(f+s) - \mathbf{y}(f+s)\| \quad (6)$$

时间步长 s 的取值范围为 $1 \leq s \leq 0.5\tau$ 。求出的预测误差 γ 是关于随机时间点 f 的预测误差。对于某一个损伤吸引子，时间点 f 可以重复随机选取 N_p 次， N_p 约为响应时间序列总长度的 5%。把 N_p 个预测误差 γ 值再进行平均，就得到基准吸引子和第 k 程度损伤吸引子之间的非线性预测误差 $\bar{\gamma}$ 。绘制 $k - \bar{\gamma}$ 曲线，就可以建立非线性预测误差和损伤程度之间的相关性。

应用非线性预测误差损伤因子对一个三自由度弹簧振子模型进行了损伤识别分析^[22]，图 23 表示单一损伤时的非线性预测误差图 (NPE)，可以看到单一损伤时，相应位移自由度（相对位移）的 PDE 随损伤程度单调增加，其它自由度的 NPE 变化较小，说明损伤耦合较小。

图 24 表示六中工况下多损伤非线性预测误差图，如果由该 NPE 数据通过图 23 单一损伤 NPE 反推损伤分布，发现 15 个位置的损伤程度识别中，有 12 个与实际值符合，只有三个不一致，符合率达到 80%，但损伤程度识别误差小于 10%，说明 NPE 不仅能识别损伤程度，也可以损伤定位，是一种有效的 SHM 方法，可以用于实际工程结构。

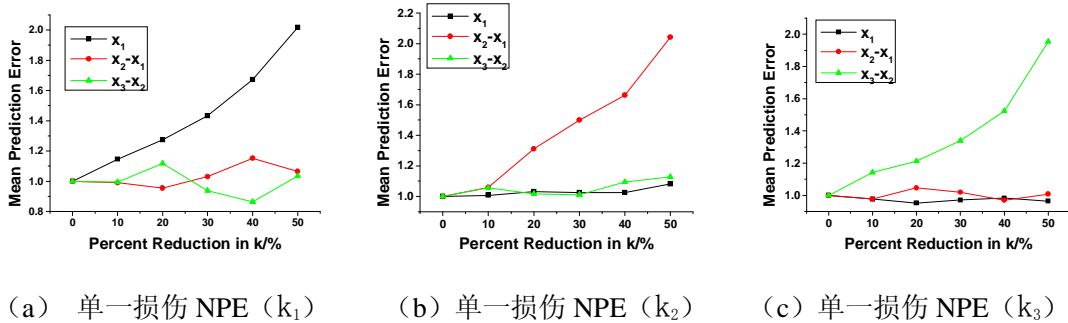


图 23 单一损伤非线性预测误差图

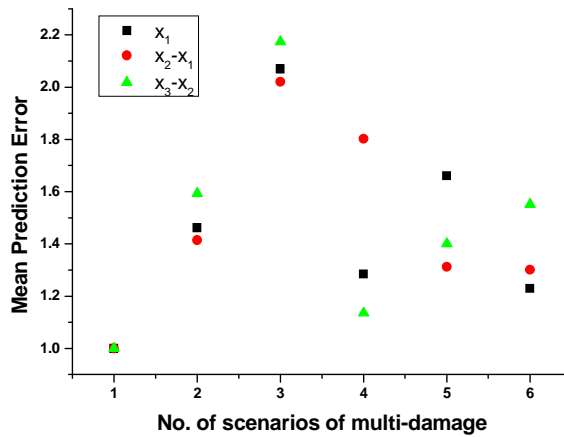


图 24 多损伤非线性预测误差图

6、结束语

SHM 是一项涉及多学科的研究领域和技术，固体力学和实验力学在其中扮演着核心角色。SHM 既需要依托高新技术，又需要力学基础理论的支撑。目前 SHM 的重要作用已经得到工程界的广泛认同，工程需求也日益增加，然而 SHM 的研究无论是技术上还是理论上离实际要求还有不小差距，需要力学工作者开展深入研究。损伤识别作为弹性力学的反问题已成为科学反问题的一个重要素材，涉及到力学提法和数学表述、解的存在性和唯一性等，这也吸引了不少应用数学工作者的研究兴趣，它们构成了 SHM 的基本理论，直接决定了监测方案的制定，如测量力学量和传感器种类、传感器数量及优化布置等决策。许多逆问题可以转化为优化问题来研究，反而亦之，所以需要发展高效的 SHM 算法，以满足在线或准在线监测的需求。当然 SHM 的理论研究不能脱离传感技术等条件，否则，无论多精巧的监测方案都会由于缺乏可操作性而变成空中楼阁。如果说损伤识别是为结构“看病”，那么通过传感技术获取结构信息就是为结构“把脉”，两者相辅相成，因此发展满足 SHM 的传感技术是技术上的关键。除了本文介绍的光纤传感技术，其它的电学或声学、接触或非接触及 MEMS 也是值得研究的 SHM 传感技术，不过，任何 SHM 传感器的选择除考虑精度以外，传感器本身的“健康”是需要特别重视的，需要针对不同的环境，研究传感器的封装、标定、安装及保护技术，提高传

传感器的可靠性。此外,考虑到结构服役环境的复杂性,应该研究 SHM 的人工智能技术,增强模糊识别能力以减少误判。

致谢: 本文研究工作得到 863 海洋技术领域海洋油气资源勘探专题和中国科学院力学研究所知识创新项目及中国科学院装备研制项目资助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 黄国君. 深海探索的光纤传感技术: FIBER NET — WEB+SENSING. 十二五深海技术发展方向战略研讨会报告, 2009.9.10~11, 北京
- [2] Bonnet M, Constantinescu A. Inverse problems in elasticity. *Inverse Problems*, 2005, 21: R1-R50.
- [3] 马宏伟, 杨贵通. 结构损伤探测的基本方法和研究进展. *力学进展*, 1999, 29(4): 513~527.
- [4] 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): 215~223.
- [5] 黄国君, 殷响毓, 戴锋, 阚常珍. 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究. *激光杂志*, 2003, 24(6): 45-47.
- [6] 戴锋, 黄国君. 一种布拉格光纤光栅加速度传感器. *激光杂志*, 2005, 26(1): 26-27.
- [7] 黄国君, 戴锋. 张拉式 Bragg 光纤光栅加速度传感器, 中国发明专利, 申请号: 201010034484.3
- [8] 黄国君, 海洋技术领域专项课题年度进展报告, 2009. 11
- [9] 邵进益. 光纤布拉格光栅应变传感理论及应用研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2007. 1
- [10] 封宇. 新型光纤位移传感器的研发, 北京青少年科技大赛一等奖获奖作品(指导教师: 黄国君), 2009
- [11] 邵进益和黄国君, 基于布拉格光纤光栅的应变分布测量理论, *核动力工程*, 2006, 增刊, Oct.: 279-281
- [12] 黄国君, 邵进益. 用光纤光栅测量应变分布的方法. 中国发明专利, 申请号: 200810101446.8
- [13] Othonos A. Fiber Bragg gratings. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, 68(12): 4309-4341.
- [14] 黄国君, 王秋良, 邵进益, 邓凡平, 戴锋, 冯遵安. 液氮温度 Bragg 光纤光栅的应变传感特性. *光电子·激光*, 2007, 18(7): 773-775.
- [15] Wang Q, Fen Z, Deng F, Huang G, Yan L, Dai Y. Fiber Bragg Gratings for Strain Sensing in High Temperature Superconducting Magnet. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, 17(2): 2377-2380 Part 2 JUNE.
- [16] 邓凡平, 邵进益, 黄国君, 许国兴, 王厚生, 王秋良. 光纤 Bragg 光栅在 77K 低温环境下的温度传感性能研究, *光电子·激光*, 2007, 18(4): 404-406.
- [17] 刘乙君. 结构健康监测的算法与软件研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2009. 5
- [18] 江中华. 基于光纤布拉格光栅的结构健康监测研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2010. 1
- [19] 江中华, 黄国君. 基于光纤布拉格光栅的翼型悬臂板荷载监测. *原子能科学技术*, 2008, 42 (suppl.): 721-725.
- [20] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand D, Young LS, editors. *Dynamical systems and turbulence*. Vol.898 of *Lecture Notes in Mathematics*. New York: Springer-Verlag, 1981, 366-81.
- [21] Nichols JM. Structural health monitoring of offshore structures using ambient excitation. *Applied Ocean Research*, 2003, 25(3): 101-114.
- [22] 伍敏, 黄国君. 基于相空间法的结构健康监测研究. 第十六届全国反应堆结构力学会议, 深圳, 2010. 10