

基于布拉格光纤光栅的碳纤维壁板损伤监测研究

常 琦 袁慎芳 苗 苗 王长坤

南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京, 210016

摘要: 针对大型的碳纤维复合材料机翼盒段壁板结构, 提出使用光纤布拉格光栅测量结构应变场分布, 通过神经网络判别结构损伤的方法, 对典型的飞机碳纤维复合材料盒段壁板结构进行健康监测研究。研究了损伤对机翼盒段壁板结构应变场的影响, 研究表明, 光纤布拉格光栅作为传感器可以较好地应用于航空材料的结构健康监测中, 采用神经网络的判别方法可以较准确地判别出结构损伤的位置和程度。

关键词: 碳纤维; 复合材料; 光纤布拉格光栅; 神经网络; 机翼盒段结构

中图分类号: V224

文章编号: 1004-132X(2009)01-0064-05

Research on the Damage Monitoring of Carbon Fiber Composite Material Wing Box Wainscot Using Fiber Bragg Grating

Chang Qi Yuan Shenfang Miao Miao Wang Changkun

The Aeronautic Key Laboratory of Smart Material and Structure, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: For complex structure and anisotropy nature of the carbon fiber composite material wing box, a way of structure health monitoring (SHM) of wing box using fiber bragg grating was given by using artificial neural network, which can localize the damage. The effect of the damage on the strain field of the wainscot was also researched. The experimental results show that as sensors FBGs can be used well in SHM of aerospace materials, and as a method artificial neural network can localize the damage and get the severity as well.

Key words: carbon fiber; composite material; fiber Bragg grating (FBG); artificial neural network; wing box wainscot

0 引言

对于碳纤维复合材料结构的损伤监测, 以往大都以小试件来对其进行研究, 针对实际的大型碳纤维复合材料结构进行损伤监测的研究较少。飞行器复合材料结构往往形式较复杂, 带有加强用 T 字形桁条和紧固用螺钉孔, 材料具有不均匀性和多向异性, 使其内部的损伤特性复杂, 损伤形式更多表现为脱层, 在结构表面可能完全看不出损伤迹象。现有的各种无损检测方法很难对复合材料结构损伤进行准确的实时在线的损伤监测^[1-3]。光纤布拉格 (Bragg) 光栅作为传感器, 具有灵敏度高、带宽宽、尺寸小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰等优点, 集传感与数据传输于一体, 易于与结构结合, 可实现对结构应变场进行高精度的绝对、准分布式测量, 十分适用于对飞机典型结构应变场进行准分布式的在线监测。结构在受到外力作用时, 内部损伤会造成结构应变场分布发生变化, 通过对应变场变化进行分析, 可以及时发现

并确定结构损伤的位置和程度^[2,6-9]。本文针对大型碳纤维复合材料机翼盒段壁板结构, 研究基于光纤光栅传感阵列的结构损伤监测方法。采用神经网络方法对应变场整体模式进行辨识, 系统研究了大型壁板试件上结构损伤的定位及结构损伤程度评定方法。采用神经网络的方法对由光栅和应变花组成的碳纤维复合材料应变传感器网络信号进行处理, 对碳纤维复合材料的典型机翼盒段壁板结构进行在线监测, 通过加载集中载荷模拟损伤, 分析结构的应变场的变化, 及时发现并判别材料结构损伤的位置和程度。

1 光纤布拉格光栅应变传感原理

温度、应变的变化会引起光纤布拉格光栅的周期和折射率的变化, 从而使光纤布拉格光栅的反射谱和透射谱发生变化, 通过检测光纤布拉格光栅的反射谱和透射谱的变化, 就可以获得相应的温度和应变的信息^[6,9-11]。

假定外界温度恒定不变, 光纤受到轴向应力作用而产生轴向应变 ϵ , 光栅的有效弹光系数为 P_e , 可以得到光栅峰值反射波长 λ_B 与应变关系

收稿日期: 2007-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90305005); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-04-0513)

如下：

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon \tag{1}$$

因此，光纤布拉格光栅波长的漂移与应变成线性关系。

假定无外加应力的条件下，当温度变化 ΔT 时，可得到由热膨胀效应引起的光纤布拉格光栅波长与温度的关系：

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_T\Delta T \tag{2}$$

式中， K_T 为光栅温度影响系数。

在研究中，本文尝试采用光纤布拉格光栅的复用来实现对温度效应的补偿和消除。在同一温度场布置专门用于测量温度变化的光栅作为温度补偿器，补偿原理如下：

假设当温度变化 ΔT ，光栅 1 受到轴向应力作用而产生应变 ϵ 时，其光栅波长有如下关系：

$$\Delta\lambda_B^{(1)}/\lambda_B^{(1)} = (1 - P_e)\epsilon + K_T^{(1)}\Delta T \tag{3}$$

式中，上角标为光栅编号。

作为温度补偿器的光栅 2 由于只受到温度变化 ΔT 的作用，其光栅波长有如下关系：

$$\Delta\lambda_B^{(2)}/\lambda_B^{(2)} = K_T^{(2)}\Delta T \tag{4}$$

则可得光栅 1 受到轴向应力作用而产生波长变化 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_B^{(1)} - \Delta\lambda_B^{(2)} \frac{K_T^{(1)}\lambda_B^{(1)}}{K_T^{(2)}\lambda_B^{(2)}} = (1 - P_e)\epsilon \tag{5}$$

可见，经过温度补偿的光栅的波长变化只与应变成线性关系。

2 飞机碳纤维复合材料盒段结构

本研究选取实际飞机结构中常用的碳纤维复合材料壁板作为研究对象，壁板尺寸为 $1000\text{mm} \times 1800\text{mm}$ ，壁板一面粘贴有加强 T 字形桁条，板上有加强用螺丝通孔，其结构尺寸如图 1 所示，图中，1、2、3 分别代表应变花 0° 方向、 45° 方向和 90° 方向 3 个敏感栅。板厚为 2.84mm ，铺层共 22 层，单层厚度为 0.12mm ，按方向铺层顺序为 $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ]$ 。T 字形桁条铺层共 10 层，单层厚度 0.12mm ，按方向铺层顺序为 $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ]$ 。

由于此碳纤维复合材料壁板尺寸比较大，本文选取上中部由桁条和螺丝通孔组成的 $280\text{mm} \times 390\text{mm}$ 区域（图 1）作为研究对象。所选对象跨加强桁条，以螺丝通孔和加强桁条为边界，结构较复杂，比较有代表性。在所选区域粘贴 6 个光纤布拉格光栅，标号为 B1 ~ B6（图 1），另外在图 1 所示位置布置光栅 B7 作为温度补偿器，

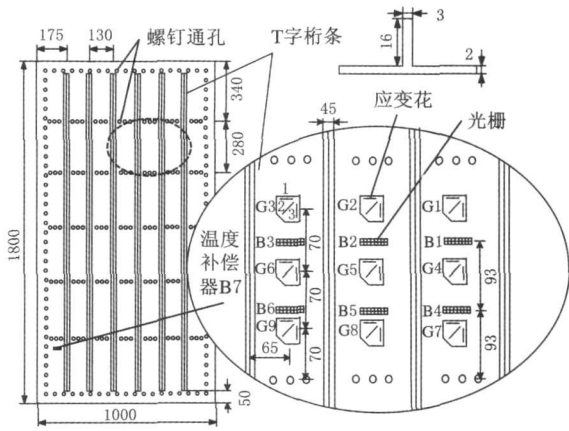


图 1 盒段壁板结构及传感器布置示意图

该光栅仅感受到结构的温度变化。

此外，还在所选区域布置了 9 片应变花，标号为 G1 ~ G9（图 1），作为与光栅作性能对比的应变传感器。

实验中，采用对整个平板四边固支，对所选对象区域施加载荷来模拟结构损伤对应变场的影响效果及其程度，实验系统如图 2 所示。

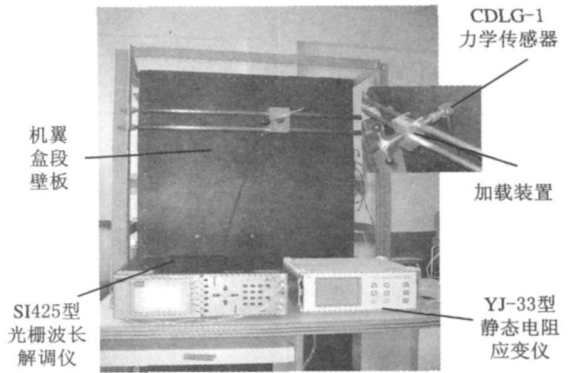


图 2 实验系统实物图

3 应变场监测研究

研究中使用美国 Micro Optics 公司的 SI-425 型光栅波长解调仪和上海华东电子仪器厂生产的 YJ-33 型静态电阻应变仪采集光栅和应变花传感器的数据，在研究对象区域均匀选取有代表性的 35 个点，如图 3 所示。建立图 3 所示坐标系，坐标单位 x 方向为 65mm ， y 方向为 70mm 。对图 3 中每个黑色圆点处按 $(0, 0) \rightarrow \dots \rightarrow (6, 0) \rightarrow (0, 1) \rightarrow \dots \rightarrow (6, 1) \rightarrow (0, 2) \rightarrow \dots \rightarrow (6, 2) \rightarrow (0, 3) \rightarrow \dots \rightarrow (6, 3) \rightarrow (0, 4) \rightarrow \dots \rightarrow (6, 4)$ 的顺序依次施加集中载荷来模拟该点的损伤，以每级 50N 逐级由零载荷加载到 400N ，再以反行程卸载（共 16 个载荷状态）来改变结构应变场，共得到 $35 \times 16 = 560$ 个应变场状态的数据，图 4 所示为典型加载点 $(3, 2)$ 、 $(0, 3)$ 在载荷 $F = 400\text{N}$ 下应变场的分布

情况,其中(3,2)点位于研究区域中央,(0,3)点位于研究区域的边界,处于加强桁条上,这两个点的应变场分布具有一定的代表性。

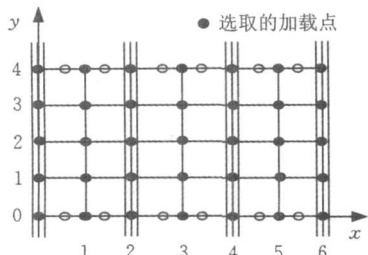


图 3 实验加载点选取示意图

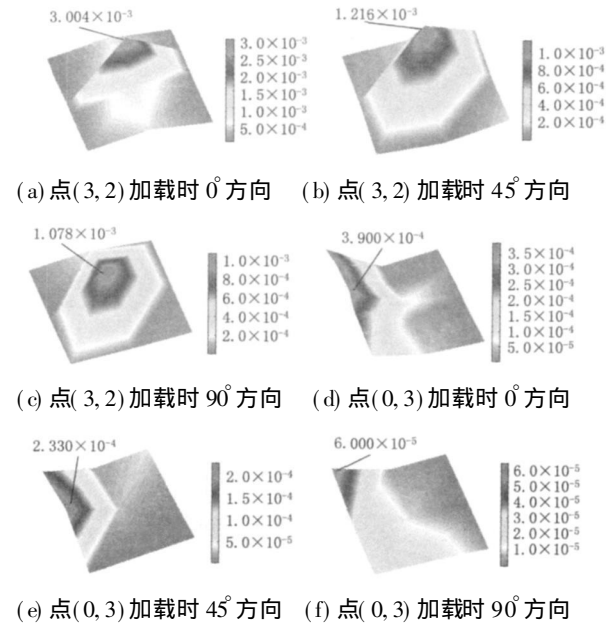


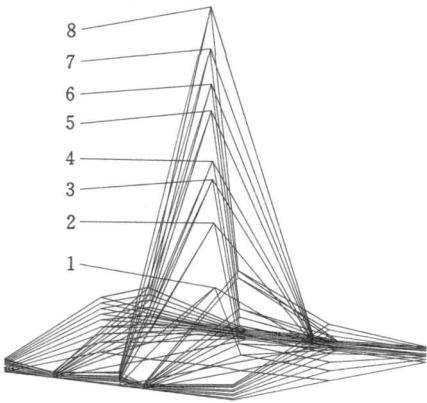
图 4 应变场分布图(F=400N)

由图 4a~图 4c 可知,该壁板在承受载荷时,由于其上加强桁条沿 y 轴方向布置,使沿 0° 方向的应变场变化最明显,场中最大值达到 3.004×10^{-3} ,沿 45° 方向的应变场最大值为 1.216×10^{-3} ,沿 90° 方向的应变场变化最小,最大值只有 1.078×10^{-3} 。由图 4a 还可以看出,应变场由于受到加强桁条的作用,应变场内沿 y 轴方向应变变化梯度大,桁条束缚作用明显,沿 x 轴方向由于加强桁条束缚作用不明显,应变变化梯度小。由于在 90° 和 45° 方向 9 个传感器布置为方阵,传感器数目有限,故应变场变化显示为菱形分布。

如图 4d~图 4f 可见,由于边界点(0,3)位于加强桁条上,结构强度大,使应变分布受到明显的抑制,在传感器区域得到的最大应变值只有 3.90×10^{-4} 。由图 4d 可以看出,由于加强桁条的作用,应变分布沿 x 方向变化显著,沿 y 方向的变化较缓慢,应变变化梯度在 y 方向较小,与(3,2)点的情况类似:0° 方向的应变场变化显著,90° 方向的应变场变化最不明显,由于加载点位于传

感器布置区域之外,所以最大值点出现的位置位于最靠近加载点处。

选取点(3,2)进行加载时 0° 方向应变场的变化情况来分析同一点加不同等级载荷时的应变场变化,图 5 为应变变化的透视图,图中,曲线 1~8 分别代表不同载荷时场内各点应变及其峰值的分布情况,显然,随载荷的增大,场内各点应变均增大,但同样由于受到沿 y 轴方向布置的加强桁条的作用,应变场内沿 x 轴方向的变化明显,沿 y 轴方向的变化被显著削弱。



- 1. $F=50\text{N}$, $\epsilon=6.650 \times 10^{-4}$ 2. $F=100\text{N}$, $\epsilon=1.196 \times 10^{-3}$
- 3. $F=150\text{N}$, $\epsilon=1.561 \times 10^{-3}$ 4. $F=200\text{N}$, $\epsilon=1.717 \times 10^{-3}$
- 5. $F=250\text{N}$, $\epsilon=2.141 \times 10^{-3}$ 6. $F=300\text{N}$, $\epsilon=2.360 \times 10^{-3}$
- 7. $F=350\text{N}$, $\epsilon=2.650 \times 10^{-3}$ 8. $F=400\text{N}$, $\epsilon=3.004 \times 10^{-3}$

图 5 点(3,2)加载不同载荷时 0° 方向的应变场变化透视图

通过以上分析可以看出,在区域内不同点施加载荷模拟损伤时对壁板结构的影响可以反应在传感器阵列所测到的不同的应变场分布上,损伤大小不同时,应变场分布情况也是不同的,因此,可以通过对应变场的监测来实现对壁板结构的损伤监测。

4 传感器性能比较

本文通过分析测量过程中传感器的重复性来比较应变花与光栅传感器的性能,采用在点(4,1)加载 350N 3 次正反行程测量的 6 组数据分别计算各个应变花 0° 方向敏感栅与光栅的重复性,结果见表 1。

表 1 传感器重复性

应变花	G11	G21	G31	G41	G51	G61	G71	G81	G91
重复性 (%)	41.5	7.71	1.46	31.1	5.45	2.35	15.5	4.08	2.14
光栅	B1		B2		B3		B4		B6
重复性 (%)	11.1		7.90		1.46		9.68		3.17

由表 1 可见,传感器由于布置位置的不同,相同测试条件下重复性相差较大,相对于应变花,光栅传感器重复性较好。对表 1 分别求重复性均值,得应变花和光栅传感器重复性均值分别为 12.36 和 7.41,可知光栅传感器明显具有比应变花更好的重复性能。

5 结构损伤的神经网络辨识

基于神经网络在模式识别和数据处理方面的突出能力,在本文的研究中使用径向基函数(RBF)神经网络来判别壁板结构的损伤位置及程度。为简化网络结构,在得到的 33 组传感器数据中选取有代表性的 24 组传感器数据作为神经网络的训练样本,训练一个 $24 \times P \times 3$ (P 为隐含层神经元个数) 的 RBF 网络,网络结构如图 6 所示,其中, $n = 24$ 。输入层 24 个神经元 (x_1, x_2, \cdots, x_{24}) 对应布置的 24 个应变传感器数据,作为神经网络的输入向量,组成一个 24×560 的矩阵作为网络的训练样本;输出层 3 个神经元 y_1, y_2, y_3 分别对应模拟损伤的坐标 (x, y) 和大小 3 个参数。将训练样本 ($\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_{24}$) 和训练目标 ($\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$) 进行归一化处理,输入 RBF 网络进行训练,如图 7 所示,设定网络的均方误差和 $e_{sse} = 0.005$,网络经过 366 次迭代后收敛, $e_{sse} = 0.00451448$,训练时间为 125s。最终生成一个 $24 \times 366 \times 3$ 的径向基网络,隐含层具有 $P = 366$ 个神经元。

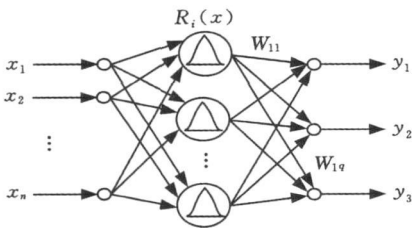


图 6 RBF 网络结构图

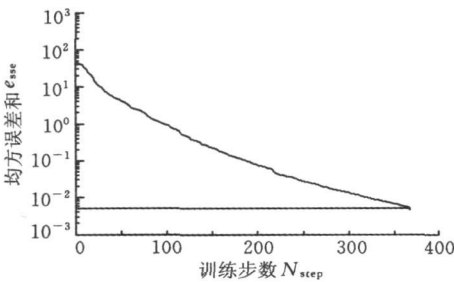


图 7 径向基网络训练收敛曲线

随机选取了一组加载数据来检验网络的判别性能,结果如表 2 所示。可以看出,使用神经网络的判别方法可以比较准确地判别出壁板结构所受到损伤的位置及其大小。

表 2 神经网络测试结果

传感器数据 (x_1, x_2, \cdots, x_{24})	训练目标 ($\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$)	RBF 网络判别 结果(y_1, y_2, y_3)
65, 254, 288, 103, 70, 40, 68, 58, 23, 290, — 9, 110, 66, 75, 34, 805, 106, 35, 212, 385, 48, 25, 336, 29	(0.467, 0.2, 0.726)	(0.477, 0.214, 0.702)
77, 291, 302, 124, 84, 51, 80, 74, 85, 346, — 2, 135, 80, 90, 42, 940, 131, 41, 242, 444, 53, 31, 387, 35	(0.467, 0.2, 0.881)	(0.479, 0.218, 0.885)
222, 130, 46, 23, 16, 24, 263, 195, 161, 159, 49, 29, 22, 242, 49, 137, 37, 218, 92, 123, 269, 0, 90, — 2	(0.7, 0.55, 0.576)	(0.713, 0.557, 0.618)
104, 64, 25, 13, 12, 16, 121, 88, 94, 117, 26, 13, 14, 115, 24, 70, 19, 66, 39, 48, 109, — 2, 37, — 3	(0.7, 0.55, 0.238)	(0.696, 0.555, 0.241)
260, 102, 18, 0, — 4, 3, 268, 171, — 210, — 84, 30, 5, 1, 204, 29, 116, 16, 209, 90, 127, 330, 0, 92, — 1	(0.717, 0.85, 0.619)	(0.708, 0.853, 0.652)
130, 51, 7, — 4, — 3, 1, 137, 79, — 238, — 174, 14, — 3, — 2, 106, 12, 57, 3, 118, 48, 71, 173, — 2, 51, — 2	(0.717, 0.85, 0.272)	(0.706, 0.845, 0.266)
224, 77, 63, 40, 27, 49, 336, 240, 139, 106, 69, 49, 35, 344, 181, 92, 55, 255, 30, 47, 262, — 4, 31, — 4	(0.933, 0.2, 0.801)	(0.915, 0.212, 0.792)
60, 15, 11, 2, 3, 8, 90, 59, — 32, 25, 13, 2, 3, 92, 35, 2, 5, 82, 9, 16, 79, — 3, 9, — 2	(0.933, 0.2, 0.208)	(0.958, 0.219, 0.214)
77, 51, 28, 13, 14, 17, 116, 66, 149, 43, 26, 15, 15, 166, 24, 56, 15, 103, 34, 45, 94, — 4, 33, — 2	(0.767, 0, 0.189)	(0.759, 0.038, 0.182)
223, 150, 54, 53, 37, 53, 340, 211, 245, 646, 89, 61, 45, 340, 86, 161, 66, 267, 91, 122, 259, — 2, 90, — 1	(0.767, 0, 0.8)	(0.763, 0.031, 0.831)

6 结论

本文针对实际的大型飞行器机翼碳纤维盒段壁板,使用光纤布拉格光栅和应变花组成传感器阵列测量壁板结构应变场,通过应变场变化来反映结构损伤信息,对壁板结构损伤监测进行了研究。研究表明,损伤对结构的应变场分布影响显著,对于结构复杂的机翼盒段壁板,由于受到 T 字桁条的影响,不同位置的损伤对应变场的影响不尽相同,通过对应变场的分析,可以获得结构的损伤信息,实现对机翼盒段壁板结构的在线损伤监测。通过比较传感器的重复性,得出光栅传感器较应变花具有更优良的性能。使用径向基神经网络的数据处理方法可以比较准确地判定结构损伤的位置和大小。采用此方法用于对飞行器机翼复合材料盒段壁板结构进行健康监测,可以得到较准确的结构损伤信息,实现在线监测。研究结果对健康监测方法在实际飞行器结构上的应用具有参考价值。

参考文献:

[1] Sundaram R, Kamath G M, Gupta N, et al. Structural Health Monitoring of Co-cured Composite Structures Using FBG Sensors[C]//Smart Structures and Materials 2005: Smart Structures and Integrated Systems. Proceedings of SPIE. Bellingham, WA: SPIE, 2005: 559-570.

[2] Güemes J A, Frovel M, Rodriguez L, et al. Embedded Fiber Bragg Grating as Local Damage Sensors for Composite Materials[C]//Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems. Proceedings of SPIE. San Diego, CA, 2002: 118-128.

[3] 彭鸽,袁慎芳. 复合材料结构损伤的小波神经网络辨识研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(5): 625-667.

[4] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.

[5] 王宏涛,刘利锋,周来水,等. 基于模态分析和 BP 神经网络的复合材料脱层损伤监测研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(3): 239-248.

[6] Hill K, Meltz G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview[J]. Journal of Light-wave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.

[7] Meltz G. Overview of Fiber Grating Based Sensors [C]//Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems. Proceedings of SPIE. Danver, CO, 1996: 2-22.

[8] Micheal N T, Wauer K, Betz D, et al. Smart Sensing of Aviation Structures with Fiber-optic Bragg Grating Sensors[C]//Smart Structures and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. Proceedings of SPIE. Newport Beach, CA, 2000: 134-143.

[9] Herszberg I, Li H C H, Dharmawan F, et al. Damage Assessment and Monitoring of Composite Ship Joints[J]. Composite Structures, 2005, 67: 205-216.

[10] Menendez J M, Munoz P, Pintado J M, et al. Damage Detection in Composite Materials by FBGs [C]//Second European Workshop on Optical Fiber Sensors. Proceedings of SPIE. Bellingham, WA, 2004: 451-454.

[11] 苗苗,袁慎芳,周国鹏,等. 一种 FBG 载荷定位的温度补偿方法[J]. 压电与声光, 2007, 29(4): 490-492.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 常琦,男,1979 年生。南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室博士研究生。研究方向为飞行器综合健康管理、结构健康监测、总线技术。袁慎芳,女,1968 年生。南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室教授、博士研究生导师。苗苗,男,1982 年生。南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室博士研究生。王长坤,男,1976 年生。南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室博士研究生。

《中国机械工程》第三届编委会

(同项之内按姓氏笔划排序)

荣誉委员:何光远 陆燕荪 周 济 谢友柏 路甬祥 潘际銮									
主 任:柳百成									
副主任:冯培恩 刘 飞 朱森第 宋天虎 李培根 郭东明									
委 员:丁 汉 丁培璠 马世宁 王 煜 王立鼎 王仲仁 王先逵 王庆丰 王国彪									
王益群 邓宗全 冯培恩 包起帆 卢志扬 卢秉恒 史铁林 宁汝新 艾 兴									
刘 飞 刘 强 孙林岩 朱 均 朱剑英 朱森第 祁国宁 齐二石 吴晓铃									
吴博达 宋天虎 张定华 李 杰 李大勇 李元元 李圣怡 李培根 杨叔子									
杨海成 汪劲松 邵新宇 邹增大 陆 辛 陈 新 陈万诚 陈子辰 陈文哲									
陈学东 陈定方 周佑启 周贤宾 周祖德 屈梁生 易 红 林尚扬 林忠钦									
郑 力 姜澄宇 柳百成 胡正寰 胡志勇 费仁元 钟 掘 钟约先 钟志华									
闻邦椿 倪 军 唐晓青 宾鸿赞 徐西鹏 徐滨士 秦大同 聂 宏 袁巨龙									
贾振元 郭孔辉 郭东明 郭重庆 高镇同 崔 崑 常恒毅 曹秉刚 梁天培									
黄 田 温诗铸 温熙森 鲁红兵 雷源忠 熊有伦 蔡鹤皋 颜永年									