

# 基于应变极值坐标的板状结构静载辨识研究

穆昊,曾捷,梁大开,周雅斌,孙晓明

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏南京 210016)

**摘要:**针对航空典型板状结构静载监测的需求,选取铝合金板与碳纤维复合材料板为对象,提出了一种基于约束边应变极值坐标辨识原理的静载判位方法。根据此原理,分别构建了基于光纤布喇格光栅传感网络与电阻应变片阵列的静态载荷判位监测系统,并给出了传感器沿板结构约束边线性布局的优化配置规则。研究表明,该判位方法对铝合金板与碳纤维复合材料板具有较好适用性,且静载判位结果不受板结构参数变化影响。实验结果显示,该方法在 1 200 mm×1 200 mm 铝合金板上的静载判位误差小于 20 mm,而在 540 mm×540 mm 碳纤维板上的静载判位误差小于 11 mm。数值仿真与实验结果相吻合。

**关键词:**航空板状结构;静载监测;应变极值坐标;优化布局;光纤布喇格光栅

**中图分类号:**TM253;V19 **文献标识码:**A

## Research on Static Load Monitoring Based on Extreme Strain Value Coordinates Identification

MU Hao, ZENG Jie, LIANG Dakai, ZHOU Yabin, SUN Xiaoming

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Targeting the demands of structure health monitoring in aviation field, the static load identification method of static load was proposed based on the location of extreme strain value at the constraint edge. Aluminum alloy plate and carbon fiber plate were selected as the aviation typical materials. Moreover, static load identification and monitoring system based on fiber Bragg grating sensor network and resistance strain gauge array was built up respectively. The result demonstrated good applicability to isotropic material and orthotropic material, and showed same results upon structure parameters change. Experimental results showed the error was less than 20 mm at the 1 200 mm×1 200 mm aluminum alloy plate and the error was less than 11 mm at the 540 mm×540 mm carbon fiber plate. This method was reasonable in the practical static load identification.

**Key words:** aviation plate structure; static load monitoring; extreme strain value coordinates; optimal layout; fiber Bragg grating

### 0 引言

板壳类结构是飞机中一种重要的典型结构,飞机在工作环境中因承受了各种形式载荷的共同作用,则板壳类结构会产生不可预见的损伤<sup>[1]</sup>。由于飞行任务模式中强过载和加载形式日趋复杂化,易造成结构强度失效,如复合材料板会造成板结构内部纤维断裂,金属结构会造成局部屈服变形,使飞机的机体、机翼力学性能等典型承载部件大幅下降,直接危及飞行安全。因此必须及时获取载荷加载信息,从而为结构健康状态准确评估和维修提供可靠依据。

结构损伤识别的方法主要有模式匹配法、敏感因子法、模型修正法和参数识别法<sup>[2-3]</sup>。由于基于结构静力响应的损伤识别具有稳定性高,数据处理简单的优点,使目前针对结构静力响应特性的研究逐渐增加<sup>[4]</sup>。Smartec SA 大学 Posenato<sup>[5]</sup>针对复杂结构,结合自适应补偿法分析静态响应,在钢结构桥上搭建了光纤光栅监测系统,实现对加载位置识别。Assiut 大学 Abdel-Basset<sup>[6]</sup>研究了板结构与桁架结构中节点静态响应与载荷位置关系,对桁架结构外载荷定位准确。潘晓文等<sup>[7]</sup>研究了板结构静载损伤识别方法,将结构中的损伤等效成结构中附加载荷,

收稿日期:2013-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60907038,51275239);航空科学基金资助项目(20125652055)

作者简介:穆昊(1986-),男,江苏南京人,硕士生,主要从事结构健康监测的研究。E-mail:muhaohn@vip.qq.com。曾捷(1976-),男,硕士生导师,主要从事结构健康监测、多主体、表面等离子波及光纤传感器等方面的研究。E-mail:zj2007@nuaa.edu.cn。

把损伤识别问题转换成板结构上多载荷识别问题。赵保平研究了飞机尾部集中载荷位置识别问题,利用聚类算法分析板结构位移数据和振动响应,实现对飞行过程中外部撞击力的模拟。

由于损伤判位通常需要针对实际目标结构获取基于样本加载节点的先验结构响应数据作为静载判位的参考基准,但随着实际监测场合和承载形式日趋复杂多变,不仅难以直接获取这些实测数据,且还会使相关传感器网络配置形式难以确定。因此,需要研究能适于不同板结构材料属性和实际受载工况的静载判位方法与具有通用性特点传感器布局规则。

综上所述可知,本文选择将静载作用下板结构约束边应变极值位置(称为应变极值坐标)作为监测参数,提出了一种基于约束边应变极值坐标辨识原理的静载判位方法。通过有限元仿真分析,并结合静载判位系统实验,研究了该方法的适用性与可行性。此外,文中还对基于约束边应变极值坐标偏移量监测的板结构损伤定位方法进行了初步研究。

### 1 板状结构静载荷识别原理

基于参数识别的静力分析通常以结构静力响应,如应变、应力作为研究对象。Bert<sup>[8]</sup>在计算非线性载荷作用下四边固支薄板解析解时,该方法虽然没有完全满足边界条件,但文中指出薄板弯曲时结构  $x$  方向应力  $\sigma_x$  与  $y$  方向坐标存在确定联系。因此,本文提出以约束边应变极大值对应的坐标作为辨识参数,来反演计算出加载点位置的坐标。

#### 1.1 应变极值坐标定义

四边固支板结构静载荷实验中分析节点应变在弹性力学里属于四边固支薄板集中力的问题。文献[9]根据弹性力学最小势能原理推导得到集中载荷作用在板结构边长为  $l$  的四边固支板  $(x_i, y_i)$  处扰度和应力为

$$A = \frac{1}{D\pi^4} \{ 2qa^2 [\cos(\pi x_i/2a)\cos(\pi y_i/2a)]^2 \} \quad (1)$$

$$w = A [\cos(\pi x_i/2a)\cos(\pi y_i/2a)] \quad (2)$$

$$\sigma_x = \frac{-12D(\partial^2 w/\partial x^2 + \mu \partial^2 w/\partial y^2)}{h^3} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{-12D(\partial^2 w/\partial y^2 + \mu \partial^2 w/\partial x^2)}{h^3} \quad (4)$$

式中:  $A$  为扰度算子;  $h$  为板厚;  $D$  为抗弯强度;  $w$  为板结构  $(x_i, y_i)$  点处扰度。令  $x_i = l/2$  代入式(2),求底边扰度  $w_0$ 。

$$w_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} A \cos(\pi y/2l) \quad y \in (-l/2, l/2) \quad (5)$$

在区间内  $w_0$  先增加后减小,存在单峰性。

根据式(3)、(4)可得应变表达式为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{-12D}{Eh^3} (\partial^2 w/\partial x^2 + \mu \partial^2 w/\partial y^2) \\ \epsilon_y = \frac{-12D}{Eh^3} (\partial^2 w/\partial y^2 + \mu \partial^2 w/\partial x^2) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)易知底边位置应变  $\epsilon_x, \epsilon_y$  的单调性由  $\partial^2 w/\partial x^2$  决定,考察  $\partial w/\partial x$  可得

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{2qa^2 [\cos(\pi x_i/2l)\cos(\pi y_i/2l)]}{D\pi^4} \cdot \frac{\partial}{\partial x} [\cos^2(\pi x/2l)\cos^2(\pi y/2l)] \quad (7)$$

最后微分结果是4个  $\cos$  函数相乘的形式,根据三角函数对称性,该函数在  $y \in (-l/2, l/2)$  内成先增后减的单峰特点。再对其求一次微分  $\partial^2 w/\partial x^2$ , 当  $y \in (-l/2, l/2)$  时,增减性不改变。因此可推导出静载作用下约束边应变存在峰值,且峰值唯一。

有限元分析中选取板结构上表面作为分析面,对四边固支结构施加单个载荷,可得到板结构  $x, y$  方向的应变云图,如图1所示。

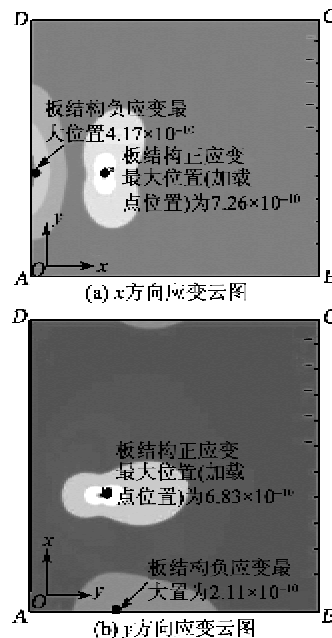


图1 板结构应变图

文中分别以图1中  $AB$  边、 $AD$  边负应变最大位置处所对应的  $x, y$  方向坐标,共同组成与该加载点对应的应变极值坐标。以板结构  $A$  点为原点建立直角坐标系,给出加载点应变极值坐标与实际加

载坐标间的关系,如图 2 所示。

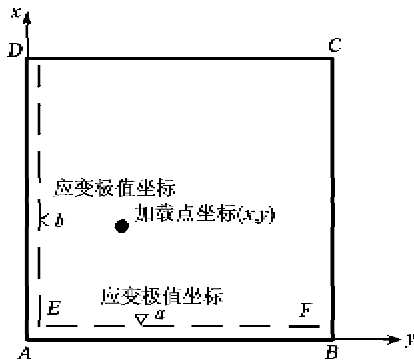


图 2 四边固支板示意图

图 2 中静载荷实际加载位置为图中  $(x, y)$  处,称为加载坐标。 $a$  为加载后,板 AB 边负应变极值处对应的  $x$  方向坐标,但实际测量时,传感器无法布置在约束边上,因此以图中 EF 线上应变数值代替 AB 边应变数值作为实际测量数据。同理, $b$  为 AD 边负应变极值处的  $y$  方向坐标。由此可组合构成新的坐标  $(a, b)$ ,该坐标表示加载点  $(x, y)$  所对应的应变极值坐标。

### 1.2 板状结构静载荷判位方法

文中选择航空典型结构件铝合金板与复合材料板作为研究对象。四边固支板结构如图 2 所示。

基于约束边应变极值坐标辨识原理的静载判位方法具体实现步骤如下:

1) 在板结构上取  $n$  个样本加载节点,在每一个样本加载节点上加载。根据有限元仿真结果得到每一个加载节点对应的应变极值坐标。

2) 根据仿真计算结果,构建由每个样本加载节点的加载坐标及其相应应变极值坐标组成的矩阵,并建立两者间映射关系  $f$ 。

3) 通过沿约束边配置适当数量与朝向的应变传感器,实现对约束边应变响应分布的监测。

4) 通过传感器应变响应数据计算应变极值坐标,并根据第 3) 步得出的  $f$  反演出其对应的加载坐标。整个静载判位流程,如图 3 所示。

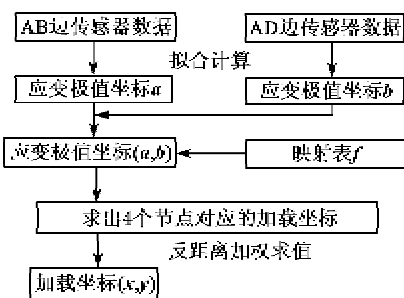


图 3 四边固支板结构示意图

应变极值坐标与加载坐标的映射如表 1 所示。

表 1 映射表

节点数据	应变的极值坐标	加载坐标
1	$(a_1, b_1)$	$(x_1, y_1)$
2	$(a_2, b_2)$	$(x_2, y_2)$
.....	.....	.....
$n$	$(a_n, b_n)$	$(x_n, y_n)$

文中建立的应变极值坐标与加载坐标的  $f$  是一个离散的数据集合,判位精度取决于样本加载节点个数。为进一步提高判位精度,可采用反距离加权法对数据进一步处理。如图 4 所示。

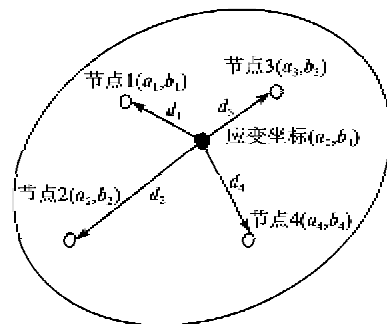


图 4 反距离加权示意图

图 4 中,实心点为加载后根据传感器数据计算出的应变极值坐标  $(a_0, b_0)$ ,4 个空心点为实心点周边的样本加载节点所对应的应变极值坐标。每个空心点与实心点的应变极值坐标间距为

$$d_i = \sqrt{(a_0 - a_i)^2 + (b_0 - b_i)^2} \quad (8)$$

式中: $d_i$  为加载点的应变极值坐标  $(a_0, b_0)$  与第  $i$  个样本加载节点的应变极值坐标  $(a_i, b_i)$  间的距离,其中  $d_1$  表示第 1 个样本加载节点的应变极值坐标  $(a_1, b_1)$  与应变极值坐标  $(a_0, b_0)$  的距离。距离越小表示实际加载点的应变极值坐标与样本加载节点的应变极值坐标距离越近。选取距离最近的 4 个样本加载节点,按应变极值坐标间距的倒数分配权重,根据下式可计算实际加载坐标  $(x_0, y_0)$ ,则

$$(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i} (x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}} \quad (9)$$

式中: $(x_0, y_0)$  为判位算法计算出的加载坐标; $(x_i, y_i)$  为 4 个样本节点坐标系中对应坐标; $\frac{1}{d_i}$  为一个样本节点分配的权重。

### 2 传感器网络优化配置研究

为考察本判位方法的有效性和适用性,针对不同航空板结构典型材料如铝合金与碳纤维复合材

料,文中分别采用电阻应变片与光纤布喇格光栅传感器作为监测器件,并结合板结构静载作用下应变特性与监测器件的响应特性,对传感器配置位置与传感器粘贴方向进行了研究。

$$\begin{cases} R = \rho L / A \\ \epsilon = \frac{dR}{R \cdot K_s} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为电阻率;  $L/A$  为栅区体积变化率;  $K_s$  为材料单位应变的电阻变化率;  $\epsilon$  为测点处应变。

根据光栅理论<sup>[10]</sup>,当一束光传入光纤布喇格光栅(FBG)时,会对满足布喇格条件的光波产生反射,该反射波长称为光纤布喇格光栅的中心波长  $\lambda_B$ ,即

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (11)$$

式中:  $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率;  $\Lambda$  为光栅周期。

光纤布喇格光栅是一种对外界温度、应力变化敏感的光学传感器,根据式(8)可知温度与应变扰动导致光纤光栅波长出现偏移,即

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K\epsilon = (\alpha + \xi)\lambda_B\Delta T + (1 - P_e)\lambda_B\epsilon \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  为光纤的热膨胀系数;  $\xi$  为光纤的热光系数;  $P_e$  为光纤有效光弹系数。

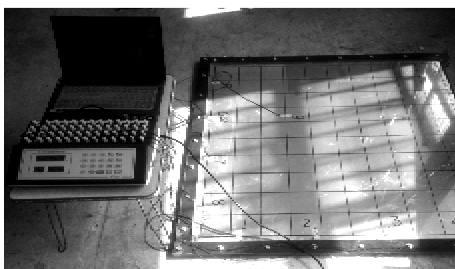
与电阻应变片相比,FBG 传感器具有无电化测量系统,抗电磁干扰能力强,易于实现分布式测量和远程遥测等独特优点。

由图 1 可知,板结构左右两边的  $x$  方向应变响应较明显,结构上、下两边  $y$  方向应变响应较明显。根据式(6),并考虑到电阻应变片与光纤布喇格光栅的方向敏感性,传感器在板状结构布局应遵循如下规则:首先,传感器粘贴方向应与约束边保持垂直关系;其次,传感器粘贴位置应沿约束边呈线性排布。

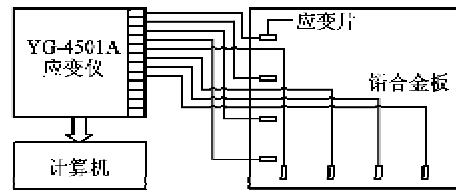
### 3 铝合金四边固支板静载识别实验

#### 3.1 铝合金板结构应变仿真分析

铝合金板静载荷判位系统由数字静态应变仪(YG-4501A)、四边固支铝合金板、箔式电阻应变片、计算机构成,判位系统如图 5 所示。



(a) 实验装置图



(b) 系统结构图

图 5 基于电阻应变阵列的铝合金板静载判位系统

#### 3.2 铝合金板应变极值仿真分析

铝合金板有限元模型的边长为 1 200 mm,厚为 2 mm,弹性模量  $E=7 \times 10^{10}$  Pa,泊松比  $\mu=0.31$ ,按单元边长 20 mm 划分网格。

根据四边固支板对称性,仅需对 1/4 区域中的加载分析。取  $10 \times 10$  共 100 个样本加载节点,施加 100 N 的  $z$  方向载荷(垂直板面方向)。建立节点应变极值坐标与加载坐标对应关系的映射  $f$ 。

由应变极值坐标可根据映射  $f$  计算出加载点的坐标,由于实验中无法直接测出约束边应变的连续分布,因此需研究如何优化配置合理数量的传感器以便测得有效应变极值坐标。文中通过有限元分析在板结构上取一系列样本加载节点,分别施加相同大小的  $z$  方向载荷。以加载点(300 mm, 480 mm)为例,分析 AB 边的  $y$  方向应变  $\epsilon_y$  响应规律,如图 6 所示。

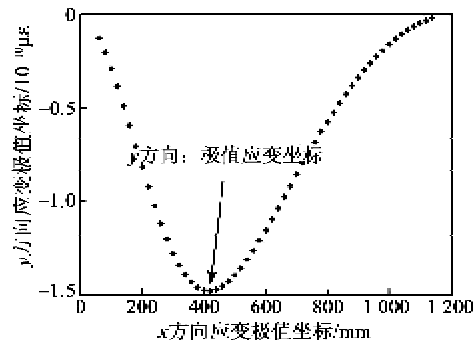


图 6 AB 边应变曲线

由图 6 可知,该曲线的特点为单峰性、存在 2 个拐点、两端点上应变值为 0。因此在约束边等距布置传感器,对得到数据进行多项式拟合,以拟合曲线峰谷坐标作为该点  $x$  方向应变极值坐标。同理,可计算出  $y$  方向应变极值坐标。

图 7 为基于不同传感器配置数量的应变仿真数据对应的 3 次拟合曲线。由图可知,以曲线峰谷坐标作为该点  $x$  方向应变极值坐标。该加载点实际坐标在映射中对应的应变极值坐标是(420 mm, 500 mm),其中  $x$  方向应变极值坐标为 420 mm。分析基于不同应变监测点数对应的 3 次拟合曲线的

峰谷坐标,如表 2 所示。

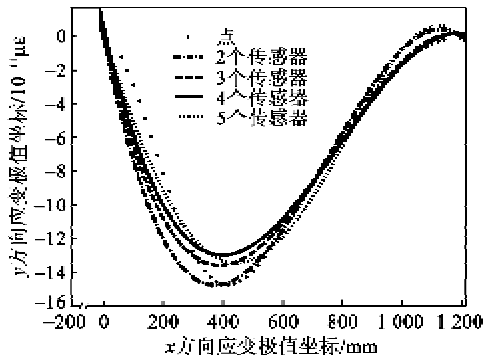


图 7 传感器数量对应变极值坐标拟合精度影响

表 2 拟合结果

传感器数量	多项式的次数	应变极值坐标/mm	相对误差/%
2	3	378	-9.77
3	3	387	-7.90
4	3	422	0.40
5	3	411	-2.25

对表 2 中结果分析,可知配置 2 个传感器时,误差较大,而当传感器数量超过 4 个,对判位精度提高无显著效果。随着板状结构尺寸逐渐增大时,为保证测量精度应布置更多的传感器数目。

根据仿真结果得出如下规律:当配置传感器数量超过 4 个时,采用  $N-1$  次多项式拟合算出的应变极值坐标准确度较高( $N$  为传感器数量)。考虑到本试验中具体结构尺寸,每边配置 4 个传感器即可满足要求,且传感器粘贴方向应与约束边垂直。

### 3.3 实验结果与讨论

为比较仿真模型与实验结果间的差异,在铝合金板  $y=480\text{ mm}$ 、 $180\text{ mm}$  的两条直线上均匀选取 10 个加载点,加载点间隔  $60\text{ mm}$ 。图 8 为实验测得的  $x$  方向应变极值坐标与通过仿真得到的应变极值坐标。

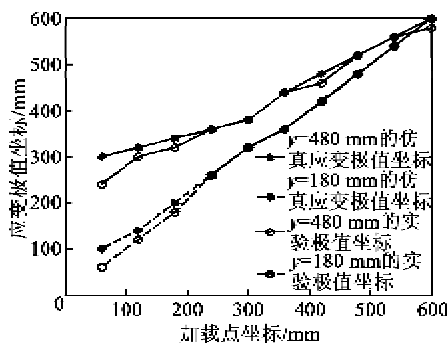


图 8 沿板  $y=180\text{ mm}$ 、 $480\text{ mm}$  的  $x$  方向应变极值坐标的实验与仿真结果对比

有限元模型中网格长度为  $20\text{ mm}$ ,以此作为系统辨识结果的分辨率。根据实验数据计算得出的加载坐标与实际坐标的距离小于模型网格距离时认为该判位结果属于有效辨识。而当根据实验测量数据计算出的加载坐标与实际坐标的偏差距离超过 2 个模型网格长度时,则认为此次判位结果存在错误数据。

由图 8 可知,仿真得到各点应变极值坐标与传感器测出的应变极值坐标重合度较高。但当加载点靠近板结构  $AD$  边时, $x$  方向应变极值坐标误差显著增加。此外,当加载点位于  $y=180\text{ mm}$  沿线时,系统对应辨识误差小于加载点位于  $y=480\text{ mm}$  的辨识误差,也即加载点靠近板结构  $AB$  边时, $x$  方向应变极值坐标测量精度较高。

考虑到实际板结构在制作与使用过程中可能存在一定程度的损伤,进而导致测量结果与仿真结果存在偏差,因此需对测量数据进行修正。根据实验测量结果与仿真结果对比,18 个加载点累计误差为  $120\text{ mm}$ ,因此在数据处理中设定该结构  $x$  方向各应变极值坐标的修正值为  $7\text{ mm}$  ( $y$  方向各应变极值坐标的修正值为  $2\text{ mm}$ )。

实验过程中应变片漂移较大,随机选取 10 个加载点,对每组加载做 4 次重复加载求取平均,静载判位结果如表 3 所示。

表 3 静载判位结果

加载点坐标/mm	应变极值坐标/mm	静载坐标/mm	误差距离/mm
(300,300)	(357,347)	(314,304)	14.7
(300,100)	(316,188)	(309,105)	10.4
(450,150)	(468,174)	(441,165)	17.6
(450,300)	(480,456)	(459,308)	11.8
(600,200)	(602,437)	(611,398)	11.1
(600,400)	(612,545)	(606,398)	6.2
(600,600)	(603,607)	(603,607)	7.6
(150,100)	(154,147)	(153,104)	5.0
(100,50)	(104,66)	(105,70)	26.6
(50,50)	(67,64)	(66,63)	13.0

判位实验结果表明,在  $1200\text{ mm}\times 1200\text{ mm}$  的铝合金板结构上判位误差小于  $20\text{ mm}$ ,但当加载靠近板结构 4 个角时,判位误差相对较大。

### 3.4 各向同性材料结构参数对位置判定的影响

为考察板结构参数对应变极值坐标辨识精度的影响,在仿真中改变结构参数,对同一位置重复加

载,得出当  $x$  方向泊松比  $\mu_x$  与弹性模量  $E$  分别改变时,约束边应变极值坐标变化情况。选取 (300 mm, 480 mm) 作为加载点,  $x$  方向应变极值坐标仿真结果,如图 9 所示。 $y$  方向结果与之类似。

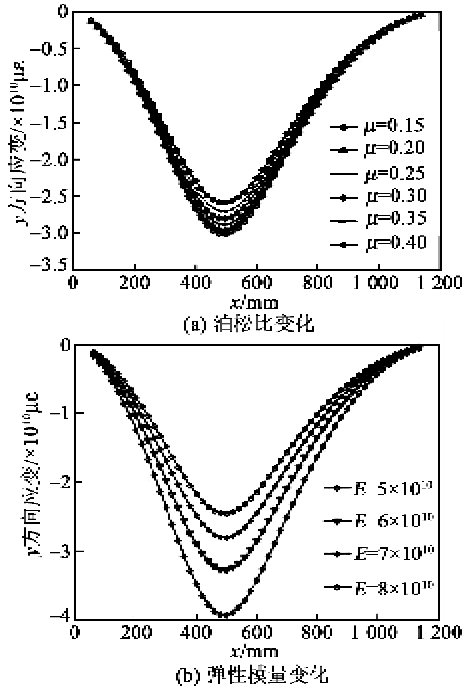


图 9 各向同性板参数改变对应变极值坐标的影响

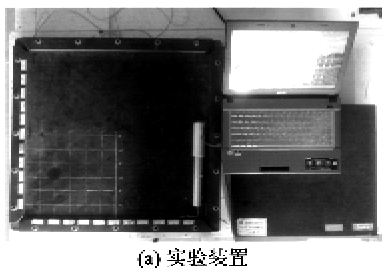
从图 9 可看出,结构参数变化对  $x$  方向应变极值坐标偏移无明显影响。因此,对各向同性板结构而言,当板形状相同且约束形式固定时,采用该判位算法,应变极值坐标与加载坐标的映射是  $f$  确定的,不会随材料属性改变。

此外,当弹性模量与泊松比变化时,约束边处应变幅值大小会随之改变,由此也可为进一步研究根据约束边应变极值数据反演板结构参数属性提供有益参考。

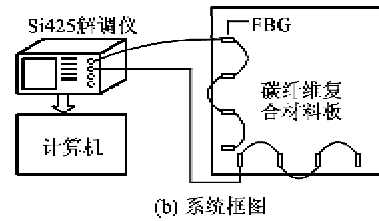
#### 4 复合材料四边固支板静载识别实验

##### 4.1 复合材料板结构应变仿真分析

复合材料板静载荷判位系统由光纤光栅解调仪 Si425、碳纤维复合材料板、光线布喇格光栅传感器、电脑构成。判位系统如图 10 所示。



(a) 实验装置



(b) 系统框图

图 10 基于光纤光栅传感网络的复合材料板静载判位系统

##### 4.2 复合材料板应变极值仿真分析

碳纤维复合材料板有限元模型的边长为 540 mm, 厚为 2.54 mm, 材料属性  $x$  方向弹性模量  $E_x = 14 \times 10^{10}$  Pa,  $y$  方向弹性模量  $E_y$  与  $z$  方向弹性模量  $E_z$  相等, 均为  $0.9 \times 10^{10}$  Pa,  $x$  方向泊松比  $\mu_x = 0.325$ ,  $y$  方向泊松比  $\mu_y$  与  $z$  方向泊松比  $\mu_z$  相等, 均为 0.3,  $G_x = G_y = G_z$  3 个方向剪切弹性模量均相等, 为  $0.495$ 。按单元边长 9 mm 划分网格。

根据四边固支板对称性, 仅需对 1/4 区域中的加载分析。取  $6 \times 6$  共 36 个样本加载点, 施加 70 N 的  $z$  方向载荷。建立节点应变极值坐标与加载坐标对应关系的映射  $f$ 。

对复合材料板结构某样本点加载, 以其中一点为例, 其约束边 AB 处  $y$  方向的应变  $\epsilon_y$  曲线, 如图 11 所示。由图可知, 该曲线特点为单峰性、峰两侧斜率基本相同。考虑到复合材料板结构尺寸, 每边各均布 4 个 FBG 传感器。采用直接插值拟合, 根据 FBG 传感器应变响应数值求出的  $x$  方向应变极值坐标与该点仿真得出的应变极值坐标重合度较高。

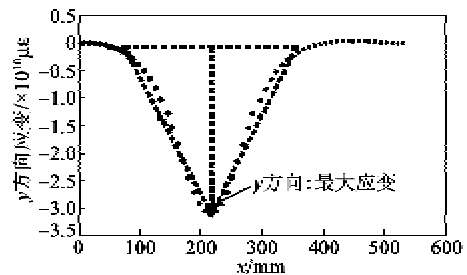


图 11 AB 边  $y$  方向应变分布

##### 4.3 实验结果与讨论

为比较仿真模型与实验结果间的差异, 沿复合材料碳纤维板  $y=90$  mm、225 mm 的两条直线上均匀选取 6 个加载点, 加载点间隔 45 mm。图 12 为实际测量所得  $x$  方向应变极值坐标与仿真得到的应变极值坐标。

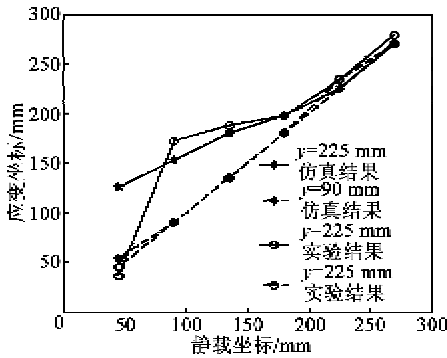


图 12 沿板  $y=90\text{ mm}, 225\text{ mm}$  的  $x$  方向应变极值坐标实验与仿真结果对比

实际板结构可能存在某种形式的已有损伤,使静载判位结果与仿真结果可能存在误差。为研究实测应变极值坐标与仿真结果间的偏差,需对测量结果进行修正。(45 mm, 225 mm)位于约束边 AD 附近,属于本方法监测范围的受限区域,而其余 10 个点  $x$  方向应变极值坐标累积误差为 36 mm,因此在数据处理中设定该结构  $x$  方向各应变极值坐标的修正值为 4 mm( $y$  方向各应变极值坐标的修正值为 3 mm)。

实验中光纤光栅传感器应变测量的重复性能良好,采用单次测量数据作为检测数据,静载判位结果如表 4 所示。

表 4 静载判位结果

加载点坐标/mm	应变坐标/mm	静载坐标/mm	误差距离/mm
(45, 45)	(26, 21)	(27, 20)	31.0
(135, 45)	(139, 68)	(131, 41)	5.6
(135, 90)	(145, 108)	(131, 97)	8.1
(225, 135)	(225, 177)	(225, 134)	1.0
(225, 180)	(228, 206)	(225, 189)	9.0
(270, 225)	(271, 240)	(271, 222)	3.3
(100, 150)	(131, 163)	(105, 158)	9.4
(200, 200)	(210, 209)	(203, 202)	3.6
(150, 200)	(177, 212)	(156, 207)	10.6
(250, 150)	(258, 173)	(253, 155)	5.8

由表 4 分析可知,光纤光栅传感器对复合材料板静载位置辨识精度在  $540\text{ mm} \times 540\text{ mm}$  的复合材料板结构上判位误差小于 10 mm。而当加载靠近板结构 4 个角时,判位误差相对较大。

#### 4.4 各向异性材料结构参数对判位结果的影响

为考察板结构参数属性对本方法所得应变极值坐标精度的影响,在仿真中改变结构参数,对同一位置重复加载,得出当  $\mu$  与  $x$  方向  $E_x$  分别改变时,约束边应变极值坐标变化情况。选取 (135 mm,

225 mm)作为加载点,  $x$  方向应变极值坐标仿真结果,如图 13 所示。

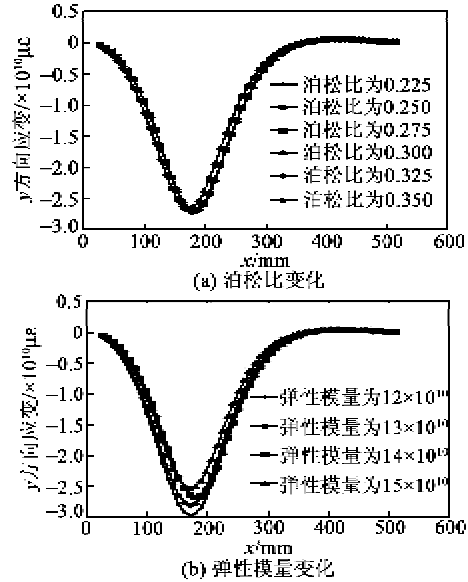


图 13 各向异性板结构参数改变对载荷辨识精度的影响

从图 13 可看出,当弹性模量与泊松比变化时,  $x$  方向应变极值坐标无明显偏移,仿真结果显示最大偏移量为 9 mm,仅为 1 个网格长度,偏移量相对较小。因此可认为本文所提静载载荷判位也同样适用于具有不同结构参数的各向异性材料板状结构。

#### 5 结论

针对航空典型板状结构静载监测的需求,选取铝合金板与碳纤维复合材料板为对象,提出了一种基于约束边应变极值坐标交叉定位原理的静载判位方法,分别构建了基于电阻应变片与光纤布喇格光栅传感网络的静态载荷判位监测系统。该检测方法特点为:

1) 电类传感器一般每个传感节点需引出两条导线,而光纤类传感器可实现多点分布式组网监测,更适用于航空结构件载荷静态场合。

2) 该方法静载判位精度:  $1\ 200\text{ mm} \times 1\ 200\text{ mm}$  铝合金板上识别精度在 17 mm 以内,  $540\text{ mm} \times 540\text{ mm}$  碳纤维板上识别精度在 11 mm 以内。但靠近板结构四个角处加载识别误差较大。

3) 各向同性板结构与各向异性板结构均可根据该算法实现加载位置判定。采用该方法对同形状不同材料属性(如泊松比、弹性模量不同)板静载判位时,识别结果相同。不同大小加载力作用下,识别结果仍相同。

(下转第 123 页)