

# 强度型损伤自诊断智能结构中四点法布置的研究

袁慎芳 陶宝祺 熊克 梁大开

(南京航空航天大学智能结构研究所, 南京, 210016)

RESEARCH ON STRENGTH DAMAGE SELF-DIAGNOSTIC  
SMART STRUCTURE USING FOUR SENSORS ARRANGEMENT

Yuan Shenfang, Tao Baoqi, Xiong Ke, Liang Dakai

(Smart Structure Institute of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

**摘要** 介绍了一种能够实时大面积地进行复合材料损伤或大应变位置自诊断的智能结构系统, 从理论及实验两方面对复合材料平板进行了应力分析, 讨论了作为传感元件的电阻应变丝阵列在结构中的布置方案, 提出了四点布置法的方案, 还介绍了按此方案实际实现的实时损伤自诊断智能结构系统, 该系统具有较高的自诊断成功率。

**关键词** 智能结构 自诊断系统 传感元件 应力分析

**中图分类号** V214.8, V216.8

**Abstract** This article introduces a kind of smart structure system which can in real time and in a large area self-diagnose the damage or large strain position in the composite material. From theory and experiment, the strain distribution in the composite material plate is analysed in this article and the arrangement of the strain resistant wires as sensors in the structure is discussed. A four sensors arrangement method is put forward. This article also introduces an actually realised real-time damage self-diagnosis smart structure system. This structure can work well.

**Key words** smart structure self-rdiagnosis system sensors strain analysis

研究的主要对象是强度型损伤自诊断智能复合材料结构。复合材料的强度重量比值大, 它的应用目前已经相当广泛, 但它在力学、破损及工艺等方面比金属材料复杂得多, 目前还没有能够大面积、实时检测其破损的有效办法。本文所研究的采用四点布置传感元件方案的损伤自诊断智能结构可以弥补这一不足, 可以实现大面积、实时地复合材料破损或大应变位置的监测。实际实现的自诊断系统具有较高的自诊断成功率。

## 1 系统组成及原理

系统主要采用电阻应变丝作为传感元件, 之所以采用电阻应变丝是因为它的性能稳定, 容易进行各种补偿, 而且电阻应变丝直径很小, 只有几微米, 很容易同环氧玻璃纤维复合材料复合, 而不会影响材料原有的强度等特性, 通电后温升很小, 仅 $2 \sim 3$ 。电阻应变丝埋设在复合材料中, 其输出经调理, 通过计算机数据采集系统进行采集, 经人工神经网络或模式识别系统进行处理, 以确定损伤或大应变出现的区域及损伤的类别。实际系统中, 针对的复合材料为环氧-玻璃纤维材料, 为平板形式, 电阻应变丝在其正、反两面都进行埋设, 组成阵列。电阻应变丝阵列可测量输出对应整个复合材料板的应力分布情况, 一旦板中出现破损, 其应力分布会发生相应变化, 导致电阻应变丝阵列的输出模式的变化, 经模式识别系统可确

定其位置及大小。

## 2 平板应力分析的研究

所介绍的智能复合材料主要为平板形式。为了确定传感元件的布置方案,对其进行了理论及实验的应力分析研究,首先进行了理论计算,将模型取为四边固支的平板,受集中载荷的作用,如图1示,图中标号为不同的加载区域。利用SAP软件,对其进行计算得到板上应变分布情况。为对理论计算的结果进行验证,也进行了实际平板应变分布的实验研究,实验中,采用600mm×600mm的正方形环氧-玻璃纤维平板,四周分别用两排各32个螺钉固定,以模拟四周固支的情况,在板的表面一共粘贴72个应变花,其布置情况如图2示,将平板划分成25个区域,在不同的区域进行加载,同时对各应变片的输出进行测量。将实验所测得的实际应变分布同理论计算所得的结果进行比较,由于实验支承并不是很好的固支,且实验中在板的边缘部分布片较少,因而实验所得结果与理论计算略有差别,但总体上是吻合的。图3所示分别为载荷作用在不同的3个区域时的45°方向的理论计算所得的应变分布情况,单位为微应变。如图3所示,当载荷作用在某些区域时,板的边缘部分会出现负应变。

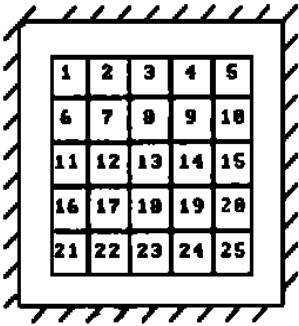
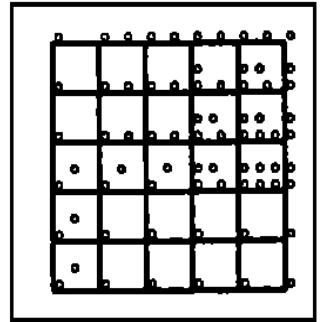
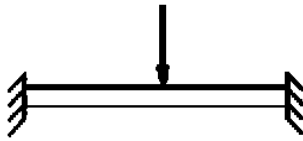
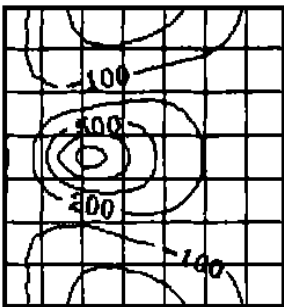


图1 理论计算模型

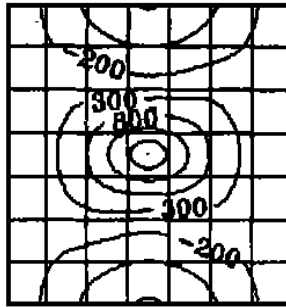


○ —应变花粘贴位置

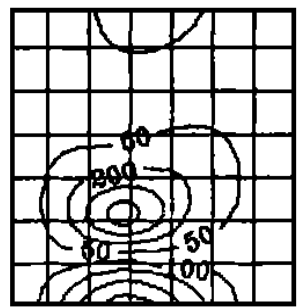
图2 被测试件中应变花的布置及加载区域的划分



(a)



(b)



(c)

图3 3种载荷作用不同区域时45°方向的应变分布图

(a) 载荷作用在区域12; (b) 载荷作用在区域13; (c) 载荷作用在区域17

### 3 传感元件阵列的布置

在了解了平板的应力分布情况以后, 就可以进行传感元件阵列布置方案的研究了。在此之前, 曾用纵横排列法布置过电阻应变丝, 如图4(a)所示, 这种方法简单易行, 各路应变丝的输出差异还不够明显, 诊断的分辨率及精度都较差, 出现了较多误判的情况, 而且由前面的应变分析情况看, 平板边缘存在着负应变, 而横穿平板布置电阻丝就会出现正、负应变抵消的情况, 特别是电阻应变丝采用电桥的形式进行测量, 其输出与应变丝的电阻的相对变化量成正比, 也即其测量具有全场的平均效应, 当被测平板尺寸较大时, 电阻应变丝较长, 因此如果局部出现破损, 电阻应变丝的输出因平均效应, 产生的变化可能不大, 这些都是导致误判的原因, 根据平板应变分布的情况, 提出了传感元件的另一种布置方法, 也即四点法布置方案, 如图4(b)示。利用这4个传感元件确定损伤的具体位置时, 损伤处于不同的区域, 传感元件的输出模式之间的差别是比较明显的, 如图3示。四点法中, 电阻应变丝的布置不象纵横法那样贯穿平板, 但又有一定长度, 因而既减少了平均效应, 又可避免对复合材料进行点测量可能存在的不稳定。

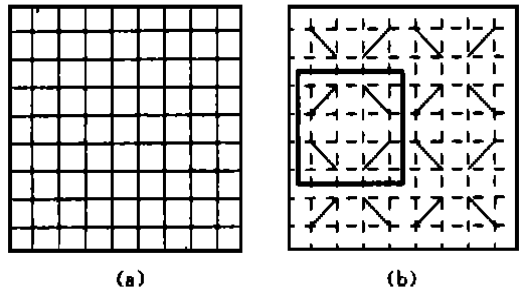


图4 电阻应变丝阵列的布置方案  
(a) 纵横法布置; (b) 四点法布置

针对纵横法及四点法进行了实验, 仍采用600mm × 600mm 的环氧- 玻璃纤维方板, 如图5示, 应变丝阵列布置在同一块板中, 纵横排列的应变丝各4根, 如板边所标, 四点布置的应变丝布置在板中, 标号为1', 2', 3', 4', 载荷按图中的标号顺序加载, 各传感元件的输出分别见表1, 表2, 四点法的输出模式差异要比纵横法明显得多。

表1 纵横法应变丝输出

丝号 \ 区域	1	2	3	4	5	6	7	8
1	92	127	125	62	116	150	125	64
2	1128	144	159	88	104	142	126	59
3	75	105	155	103	113	201	115	73
4	244	140	140	72	99	158	202	100
5	142	150	162	98	99	148	174	103
6	90	113	163	102	92	158	170	98
7	165	134	125	65	65	196	165	140
8	152	173	192	114	82	136	177	153
9	96	126	192	135	73	126	176	160

表2 四点法应变丝输出

丝号 \ 区域	1'	2'	3'	4'
1	412	50	74	5
2	123	127	55	50
3	78	369	19	25
4	148	40	203	25
5	100	97	95	90
6	45	178	25	215
7	42	202	515	50
8	46	55	112	125
9	22	81	73	357

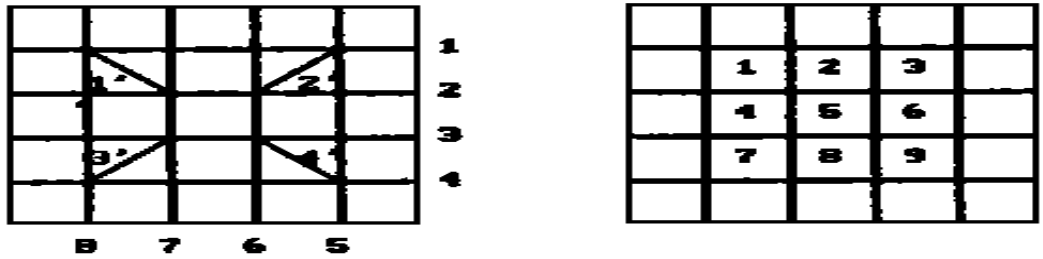


图5 环氧-玻璃纤维方板布丝及加载示意图

### 参 考 文 献

- 1 陶宝祺, 梁大开, 陶云刚等. 强度自适应智能复合材料结构. 航空学报, 1994, 15(3): 280 ~ 286
- 2 Tao Baoqi, Tao Yungang, Liang Dakai, et al. Smart composite structure of self-adaptive strength. In: ICAS-94, 1994
- 3 Joseph M L. Smart skin——a development roadmap. Fiber Optic Structures and Skin, SPIE, 1989, 1170: 19- 47

### 国际会议信息

#### 1997国际航空安全会议(Inter national Aviation Safety Conference 1977)

时 间: 1997年8月27 ~ 29日

地 点: 荷兰 鹿特丹

主办单位: SHM Research

内 容: 国际法规和航空安全规定; 安全机构和管理章程; 人的界面和组织安全效果; 安全研究体系与技术发展; 运行环境安全与保证方面; 安全维护与质量保证过程; 空中交通控制和安全设备; 安全经济与投资保险风险; 合作战略与公共安全关系。

征文日期: 1996年7月1日提交300字英文摘要; 1997年2月1日提交全文。

注册费: 1375荷兰盾, 作者975荷兰盾。

联系人: Organizing Committee, IASC- 97 Conference

c/o Mr Hans M Soekkha

Director SHM-Research

Science Heuristics Management

Iepelaan 25, 2803 SB Gouda,

The Netherlands

Fax: + 31- (0)182- 572046