

# 智能复合材料结构中偏振式光纤传感器系统的研究

梁大开 陶宝祺

(南京航空航天大学智能材料与结构研究所, 南京, 210016)

## RESEARCH OF POLARIZED OPTIC FIBER SENSORS EMBEDDED IN SMART COMPOSITE STRUCTURE

Liang Dakai, Tao Baoqi

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

**摘 要** 从光的传输方程及光纤的模式耦合特性出发对偏振式光纤传感器在受到拉伸和弯曲变形时的特性进行了探讨,进行了初步的试验,并将它应用于智能复合材料结构进行了试验,取得了较好的结果。

**关键词** 光纤传感器 智能结构 复合材料

**中图分类号** V214.8, V216.8

**Abstract** The output characteristic of a polarized optic fiber sensor under the external influence of bending and stretching is discussed using the means of light s transfer equation and characteristic of modes coupling in optic fibers, and some experiments are done. The polarized optic fiber sensors have been used in smart composite structures, and the location of loading on the structure has been detected successfully.

**Key words** optic fiber sensors, smart structures, composites

智能结构是利用埋入复合材料中的传感元件来感受信息的。目前,可以制作智能结构中传感器网络的元件很多,常用的有压电陶瓷、电阻应变丝及光纤等。其中,光纤以其柔软、可挠曲、电绝缘、耐腐蚀、工作中不发热、无辐射、抗电磁干扰及和复合材料具有良好的耦合性等独特的优点成为人们关注的热点。当光纤传感器被埋入结构时将随物体一起变形,引起光学量的变化,从而可以连续检测物体内部应变、应力等物理量的变化。用它制作飞机的智能蒙皮,不但能完成各项功能,而且十分有利于飞机的隐身。在预警飞机的大圆盘天线上,也只有采用光纤传感器,才能保证不降低天线原有的各项性能指标。因此,采用光纤传感器的智能结构越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>。

### 1 光纤传感器系统的选择及其构造

偏振型光纤传感器具有结构简单、埋置方便、灵敏度适中等优点,并且它可以检测敏感区域传感量的积分信息。因此,在本文的研究中,采用了偏振型光纤应变传感器。

图 1 为偏振式光纤传感系统的原理图。其中,半导体激光器(LD)发出的光分为两路:一路由光敏管 PIN1 接收,通过功率监控电路控制半导体激光器的电源,使 LD 输出的光功率保持稳定;另一路经 P1 起偏,然后由 O1, O2 两显微物镜组成的透镜系统,将激光器发出的光聚焦耦合入光纤。光纤输出的光通过检偏镜 P2 检偏,然后经光敏管 PIN2 将光信号转化为电信号,最后由数据采集和处理系统进行分析、处理,得到敏感光纤所受的扰动。在试验

中,我们曾取消 P1 而直接将 LD 输出的偏振光耦合进光纤。虽然使偏振度有所下降,但减小了光的损耗,这样有利于提高系统的输出。

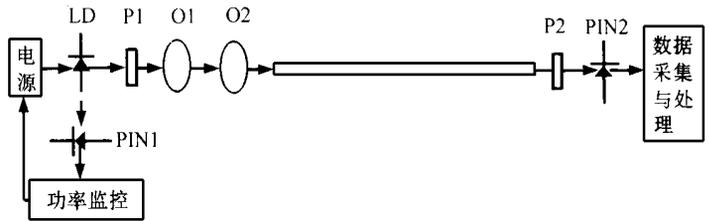


图1 偏振式光纤应变传感系统原理图

当偏振光耦合入光纤后,如光纤上没有扰动作用,则在

光纤中传输的光应保持它原有的偏振态不变。但如光纤上有扰动存在时,这种偏振模式将发生分裂,产生模态耦合。此时,光敏管 PIN2 的输出将发生变化,这样就得到光纤上感受的扰动。

## 2 扰动对偏振式光纤传感器系统输出的影响

光纤传感器工作时,受到的扰动主要为拉伸和弯曲。当光纤传感器受到拉伸扰动时,我们可以得到偏振式光纤传感器的输出光强和光纤所受应变之间的关系为<sup>[2]</sup>

$$I = \frac{I_0}{2} (\cos(NLE) + 1) \quad (1)$$

式中:  $I$  为光纤的输出光强;  $I_0$  为光纤中传输光光强的最大值;  $L$  为光纤的物理长度;  $N$  为与光在光纤中的传播系数及光纤芯的折射率、光弹系数、泊松比等有关的常量。显然  $I$  随光纤所受应变  $E$  作余弦变化。

现在从光纤的模式耦合特性出发讨论弯曲扰动对传感器输出的影响。在单模光纤中可以传输两个相互正交的线偏振模  $HE_{11}$  模和  $HE_{11}$  模。当光纤受到扰动时,这两个模之间将产生耦合,从而改变在光纤中传输的光的偏振特性<sup>[3]</sup>。设  $HE_{11}$  模和  $HE_{11}$  模所携带的功率分别为  $P_x$ ,  $P_y$ , 并令两模态之间的能量耦合系数为  $h^2$ , 则

$$h^2 = \frac{P_y}{P_x + P_y} \quad (2)$$

由光波导理论,并结合对于高双折射光纤弯曲时的应力分布,可得到

$$h^2 = \sin^2 H \cos^2 \frac{DB}{2} z + \frac{k_0^2}{(DB)^2} \sin^2 \frac{DB}{2} z \left[ \sinh \left[ B - \frac{F}{R^2} \cos 2\langle \right] - \frac{F}{R^2} \cos H \sin 2\langle \right]^2 \quad (3)$$

其中:  $z$  为光纤受扰部分的长度;  $H$  为入射光偏振方向和光纤主轴间的夹角;  $B$  为光在光纤中的传播系数;  $k_0 = X(L_0 \epsilon)^{1/2}$ ;  $X$  为光波的角频率;  $B$  为光纤的双折射率;  $L_0$ ,  $\epsilon$  为真空中的磁导率和介电系数; 系数  $F = n^3(D/2)^2 [P_{12} - P_{11}(1 + 2L)]$ ;  $n$  为纤芯的折射率;  $L$ ,  $P_{11}$ ,  $P_{22}$  分别为光纤芯的泊松比和光弹系数;  $R$  为光纤的弯曲半径;  $\langle$  为输入偏振光矢量和  $x$  轴的夹角。由上式可知,当  $\langle \leq 45^\circ$  时弯曲扰动产生最大的模式耦合。

用光纤的典型参数:  $n = 1.46$ ,  $D = 125 \mu\text{m}$ ,  $P_{11} = 0.121$ ,  $P_{12} = 0.27$ ,  $L = 0.164$  及半导体激光管波长  $670 \text{ nm}$  代入上式,并取扰动范围  $z = RP$ , 令  $\langle \leq 45^\circ$  得到  $h$  和  $R$  之间的关系如图2所示。通过以上的讨论,可知:当敏感光纤受到拉伸时,偏振式光纤传感器的输出将按余弦变化。当敏感光纤受到弯曲时,偏振式光纤传感器的输出可近似认为是按正弦变化。

### 3 试验结果及结论

为了验证上节所得结果, 首先将光纤传感器粘贴在一根纯弯梁上进行了试验, 光纤的粘贴长度为 800mm。试验结果如图 3 所示, 近似为正弦曲线, 符合上节的分析结果。

为了检测智能复合材料结构中的应变分布, 我们制作了按正交排布的玻璃纤维环氧树脂复合材料板作为试件, 它是准各向同性的。试件为四边固支。在对其采用结构分析软件 SAP91 进行分析及电测法进行全场压力分布试验的基础上, 将 8 路光纤传感器按正交均布方式埋入试件构成传感器网络。结合测控系统和数据处理系统就组成了智能结构系统。

当复合材料板受到载荷作用时, 各路传感器就会产生一定的输出, 图 4 所示为在板上不同点加载时一路传感器的输出。从图中可以看出, 当加载点靠近传感器时, 传感器的输出变化很大, 而当加载点远离传感器时, 传感器的输出几乎不变, 和计算及电测试验结果一致。这样, 可以从传感器网络的输出判断出载荷的位置。

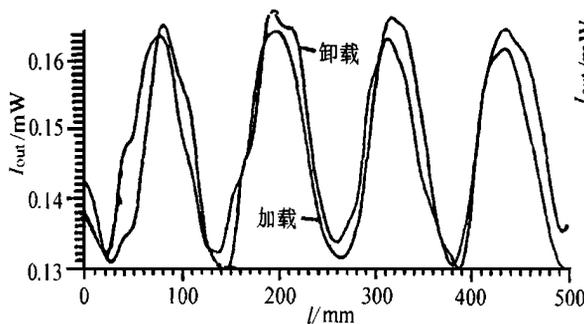


图 3 原理性试验结果

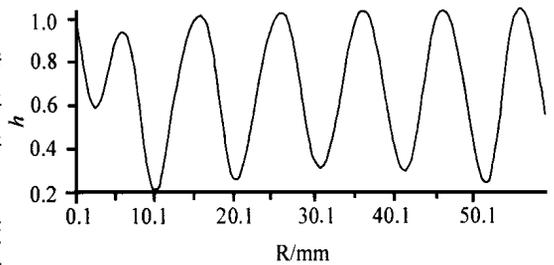


图 2 高双折射光纤弯曲变形时 R 与 h 的关系

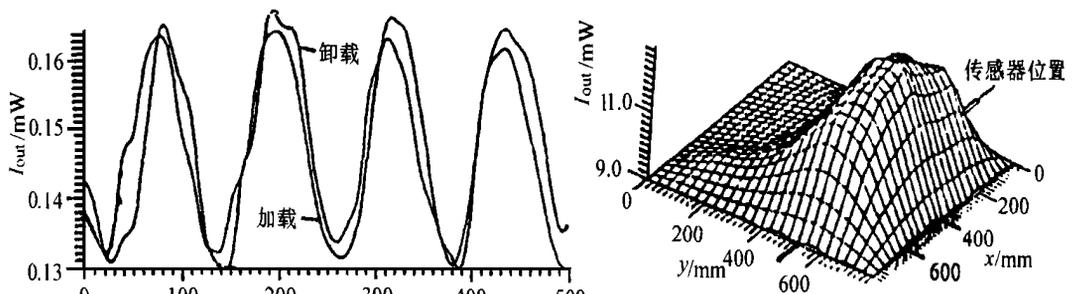


图 4 在板上不同点加载时传感器的输出

为了从这些传感器的输出得到复合材料板上所加载荷的位置, 必须对这些信号进行数据采集、处理及模式识别。当所需判别的模式数量不多, 光纤传感器的数目较少, 并都能正常稳定地工作时, 采用简单的方法就可对受载位置做出判别。但在实际应用时, 需判别的区域往往较大, 并且在实际工作中, 很可能有几路传感器受到损坏或工作不正常。这样, 将使模式识别的速度、准确性都大受影响, 甚至根本不能实时、准确地工作。所以采用了 B-P 人工神经网络进行数据处理, 得到了较好的结果。

智能结构是正在发展中的高新技术, 它具有广阔的应用前景。它的发展随着各项新技术的出现和发展而不断发展, 并将引起结构设计上的革命。本文只是我们在这方面所作的一些工作, 还有许多问题需要进一步研究。

### 参 考 文 献

- Joseph M L. Smart skins-a development roadmap. SPIE, Fiber Optic Smart Structures and Skins, 1989, 1170: 19~47
- Butter C D, Hoher G B. Fiber optics strain gauge. Applied Optics, 1978, 17(8): 2867~2869
- 骆飞, 黄尚廉. 高双折射光纤受横向压力作用下的模式耦合特性. 南京航空航天大学学报, 1993, 25(6): 753~756