

基于光时域反射技术与缠绕式光纤传感阵列 的结构状态监测方法*

郁 可¹⁾ 张永胜²⁾ 管 立¹⁾ 姜德生³⁾

1), 山东工业大学数理系, 济南 250061

2), 武汉工业大学计算机科学系, 武汉 430070

3), 武汉工业大学光纤中心, 武汉 430070

摘 要 提出了一种新颖的、利用多模光纤缠绕钢绳式的传感阵列网络, 对智能材料与结构的受力、应变等状态参量进行了监测和估计, 并采用了光时域反射技术实时处理并行分布式传感信号, 给出了测试数据、识别结果。

关键词 光纤传感器, 智能材料与结构, 光时域反射技术。

1 引 言

近年来, 对迅速发展的光纤智能材料与结构的研究, 即在材料与结构的关键部位埋入光纤传感阵列, 探测其在使用、运行过程中内部应力、应变变化, 并对由于外部荷载、材料疲劳产生的变形、裂纹、层解等损伤进行实时监测^[1], 是集光纤传感技术、材料科学、电子与控制技术为一体的多学科综合性研究领域, 它在未来的航空航天、造船工业、土木建筑与水利工程等方面有着广阔的应用前景。其中光纤传感器的选择及光纤阵列输出信号的检测极为重要。目前, 主要是采用把光纤(单模或刻纹光纤)本身直接埋置于材料内部来探测其状态变化。这种方法的缺点在于当结构受载而发生较大形变时, 其中的光纤容易断裂, 输出端探测不到光信号, 故难以在工程上实际应用。为弥补这一不足, 本文提出了一种新颖的、利用多模光纤缠绕钢绳(或尼龙筋)式的传感阵列。它具有结构简单、实用可靠、强度调制、适宜大应变测量等优点, 既可测量材料与结构中的应力、应变, 又可准确标定外部加载位置和程度, 而信号的检测采用光时域反射技术, 有效、实时地处理传感阵列输出的并行信号, 真正实现了多点准分布测量。

2 多模光纤微弯损耗理论

根据模态理论, 当多模光纤受到微弯时, 就会产生模式或模式平均功率的耦合, 致使一部分纤芯模转化为包层泄漏模, 产生微弯损耗。通过测量包层泄漏模或纤芯传输模的能量变化, 就能测量外界物理参量。根据微弯原理可以构成各种光纤传感器。

* 水电部九五攻关项目(B951009)。

收稿日期: 1998-06-15; 收到修改稿日期: 1998-10-23

对于光纤折射率分布参数 $\alpha = 2$ 的梯度光纤, 如果只在平面内产生微弯, 可以证明, 其损耗为^[2]

$$L = (3.9/\Delta) \zeta(\Delta\beta) \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

其中, Δ 为纤芯与包层相对折射率差, $\Delta\beta$ 是两模式传输常数差, $\zeta(\Delta\beta)$ 为微弯曲率脉冲函数的功率谱密度。假设光纤轴与坐标系 z 轴重合, 并且其微弯的曲率脉冲形状为高斯型系列, 则曲率函数 $C_C(z)$ 可表为

$$C_C(z) = \sum_{n=1}^N C_n(z) = \sum_{n=1}^N A_n \exp \left[- \frac{2^2(z - u_n)^2}{w_n^2} \right] \quad (2)$$

其中 $C_n(z)$ 表示光纤第 n 个微弯, N 为光纤总微弯数, A_n 、 u_n 分别为曲率脉冲峰值及峰值坐标, w_n 为以曲率值降为峰值的 $1/e$ 处的脉冲宽度。功率谱密度可推得^[2]

$$\zeta(\Delta\beta) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} C_C(z) \exp(-j\Delta\beta z) dz \right|^2 \approx \frac{\pi}{4} N A_0^2 w_0^2 \exp[-(\Delta\beta)^2 w_0^2 / 8] \quad (3)$$

式中 A_0 、 w_0 分别为平均曲率脉冲峰值和宽度。将(3)式代入(1)式, 并利用关系式 $\Delta\beta = -2\sqrt{2\Delta/d}$, 可得高斯型曲率函数引起的微弯损耗为

$$L_C = (3.06/\Delta) N A_0^2 w_0^2 \exp(-\Delta w_0^2 / d^2) \quad (4)$$

其中 d 为光纤芯径。当选定某种光纤 (Δ 和 d 一定), 损耗对平均曲率脉宽的灵敏度为

$$S = dL_C/dw_0 = (6.12/\Delta) N A_0^2 w_0 (1 - w_0^2 \Delta / d^2) \exp(-\Delta w_0^2 / d^2) \quad (5)$$

可见利用微弯原理制作的传感器, 灵敏度与微弯数目 N 、平均曲率脉冲峰值的平方 A_0^2 成正比。另外, 在 $d/\sqrt{\Delta} < w_0 < \infty$ 范围, $dL_C/dw_0 < 0$, 表明微弯损耗 L_C 随着 w_0 的减小而增大。由(5)式还可证明随着光纤的 Δ 减小或 d 的增大, 灵敏度 S 也将增加, 因此通过调节 N 、 A_0 、 w_0 的值和选用不同类型的光纤可获得所需传感器的灵敏度及测量范围。

3 缠绕式光纤应变传感器原理与结构

缠绕式光纤应变传感器的结构^[3, 4], 如图 1 所示, 采用多模光纤缠绕在一钢丝绳索上,

两端用特种胶粘固形成。其应变传感机理主要是微弯原理: 当钢绳受轴向应力作用而被拉伸时, 光纤也一起跟着被拉紧, 并贴敷在绳索上, 从而光纤进一步产生侧向变形。另外随着钢绳的纵向拉长, 其直径将不断减小, 同时它对光纤产生的微弯曲率脉冲峰值、宽度将分别增大和减小, 这样就造成光纤的光功率损耗, 建立光损耗与应变的关系就可测量应变大小或外界其他物理量。这里钢绳相当于外部变形器, 它具有连续、柔韧、体积小、几何与材料参数(直径、纵弹性模量、泊松比、强度)可自由选择等优点。故可埋入于复合材料与结构中。

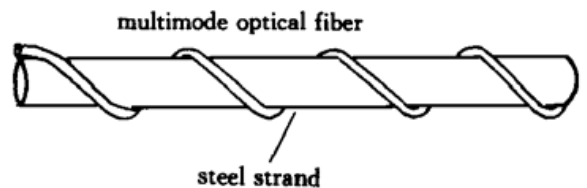


Fig. 1 Twisted type fiber optic sensor structure

缠绕式光纤应变传感器有以下优点: 1) 使用价格便宜的多模光纤可在大型网络中降低成本; 2) 光纤弯曲缠绕在钢丝绳索中能与绳索的大形变相匹配且不易断裂, 故它适于结构的大应变测量, 增加了工程上的实用性、可靠性; 3) 细钢绳(或尼龙筋)埋入材料内不但对其强度影响很小, 反而增加了材料刚度, 并提高传感器的灵敏度; 4) 对不同材料和结构, 调节光纤和钢绳的几何、特性参数, 可灵活改变传感器的灵敏度和初始光损耗。

缠绕式光纤应变传感器的初始光功率损耗是由钢绳直径、机械状态、光纤缠绕螺距和松紧程度、圈数以及光纤的种类所决定。当沿着钢绳纵向测量时,希望光功率的初始损耗尽可能小,以提高检测的信噪比。但从上述微弯损耗理论可知,要提高传感器的灵敏度必须增加微弯数目,采用相对折射率差 Δ 较小和芯径 d 较大的光纤,而这样又使初始光功率损耗增加,因此初始光损耗与灵敏度是一对矛盾体,在实际应用中应注意两者兼顾合理选择。

为了探测缠绕式光纤应变传感器的灵敏度,本工作分别对7种不同结构参数的情况进行了实验,其中2个钢绳直径为0.9 mm,长度为1 m,用62.5/125 μm 的多模光纤缠绕,缠绕螺距相同,一个光纤单向缠绕100圈,另一个来回往返缠绕100圈,实验结果见图2(a);3个钢绳直径分别为0.9 mm、1.1 mm、2.5 mm,长度均为1 m,均用62.5/125 μm 的多模光纤缠绕,螺距和圈数相同,结果见图2(b);两个钢绳直径为0.9 mm,长度为1 m,分别用50/125 μm 、62.5/125 μm 两种多模光纤(Δ 相同)缠绕,缠绕螺距和圈数相同,结果见图2(c)。

由图2(a)~图2(c)可见,在一定范围内光纤的光功率衰减率与应变基本成线性。另外,从应变特性实验曲线可知,传感器的灵敏度随微弯数目、光纤芯径的增加而增加;在一定范围内随钢绳直径的增大(钢绳对光纤产生微弯曲率脉冲峰值、宽度将分别减小和增大)而减小,这些都与理论相符。把这种传感器埋入玻璃纤维/环氧长条板中,通过光功率计、电阻应变仪和压力测量计进行了在板中央重复加载实验,结果如图2(d)所示。可见埋入材料中的缠绕式光纤应变传感器光功率衰减随试件应变和所受载荷的增加在一定范围内也线性增加,并且在存在一定恢复时间条件下传感器的重复性好、迟滞小。

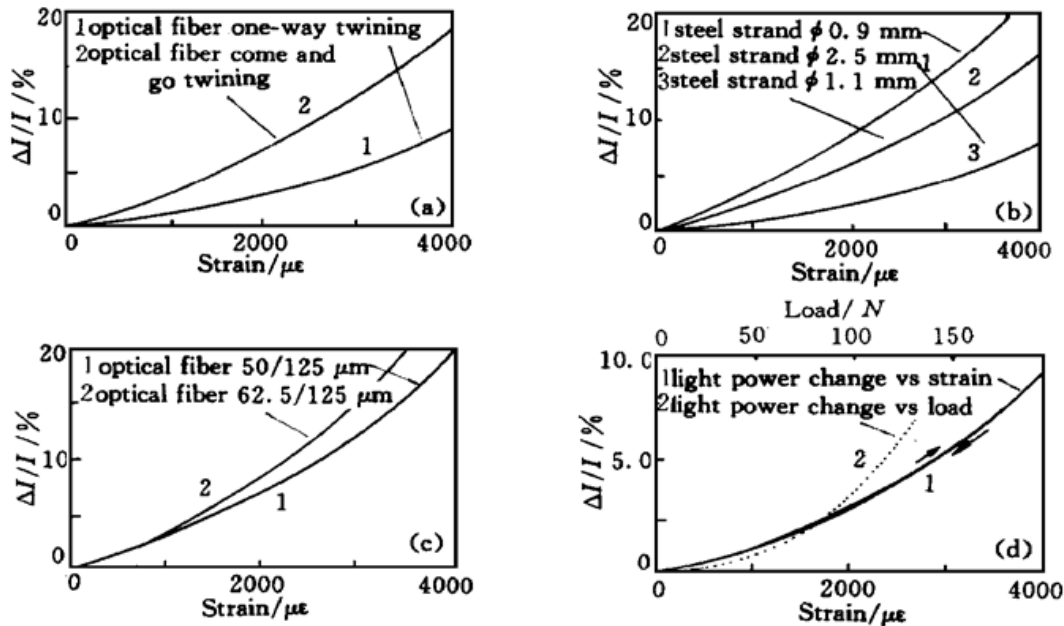


Fig. 2 The curve of fiber optic sensor light power change vs steel strand strain

根据前述理论与实验,用62.5/125 μm 、 Δ 为0.01的多模光纤和直径为0.9 mm的细钢绳制作了8根相同的缠绕式光纤传感器,组成正交的间距为100 mm的 4×4 二维传感阵列,并与20层玻璃纤维布胶合成边长为600 mm、厚为6 mm的复合方板试件。在缠绕光纤时,是把钢绳的一股螺旋钢丝拆下,然后把光纤嵌埋其中,这样既能保持缠绕光纤的螺距相同,又能避免光纤折断。

为了避免在同一层中两正交光纤产生交叉凸起使复合材料内造成树脂空洞,故使两正交方向的光纤网分别夹在相邻两层纤维布之间,且靠近最大张应力的后表面。由于传感器埋入

复合材料内, 光纤被完全胶合, 环氧对光纤有一定的固定、保护作用, 在实验中不能使其产生有效的变形。另外, 当材料受点载荷作用在某处产生形变时, 只能使此处附近光纤产生部分少数目的微弯, 从而造成埋入式传感器的灵敏度下降。为了解决此问题, 在制板过程中事先把各绕有光纤的钢绳通过可调节的刚性支架拉紧, 给其相同的预应力, 然后再胶盖玻璃纤维布。这样做的目的是: 1) 增强了钢绳的刚性, 且光纤更紧密地帖敷钢绳产生有效微弯; 2) 当材料变形时随着钢绳的径向拉伸, 其直径可产生更明显的变化, 提高传感器的灵敏度。

4 传感信号的光时域反射检测

已报道过的信号处理方法大都基于人工神经网络^{15, 6)}, 这里采用光时域反射(Optical Time-Domain Reflectometry, OTDR)技术, 检测沿光纤长度分布的背向散射光功率变化, 解决材料与结构中受力的定位与程度问题。光时域反射计是利用光学雷达原理把窄带光脉冲注入到光纤一端, 然后在同一输入端观察背向散射光强随时间变化关系来检测光纤的连续性及其衰减的仪器。当光纤传送某一波长的泵浦脉冲光波时, 由于纤芯折射率的微小涨落, 使在光纤各点产生瑞利散射, 其中一部分光束被约束在向后行进的传导模中, 形成背向散射脉冲光返回到光纤入射端。如果光纤某处存在缺陷(如焊接)或因外界扰动引起微弯, 则背向散射光强在该处就有一定的衰减, 故测出背向散射光脉冲的到达时间和功率损耗大小, 便可确定缺陷及扰动的位置和程度。

把光时域反射计(Hires OTDR, Model 4000)与复合长条板试件中的传感器的光纤一端相连, 探测试件受力时背散射光功率改变与试件应变及载荷的关系, 所得规律与图 2(d) 相同。

在复合方板实验中, 将方板试件的 8 根缠绕式光纤传感器进行串接, 形成连续的光纤网络, 并在光纤一端联入光时域反射计, 如图 3 所示。这样试件某处受力的具体位置和程度便可通过测量与分析正交两方向光纤传感器中的背散射光功率损耗的变化基本确定。由于本工作使用的时域计空间分辨力在分米量级范围, 为了准确定位, 在每两根光纤间接入了 10 m 长的延时光纤。

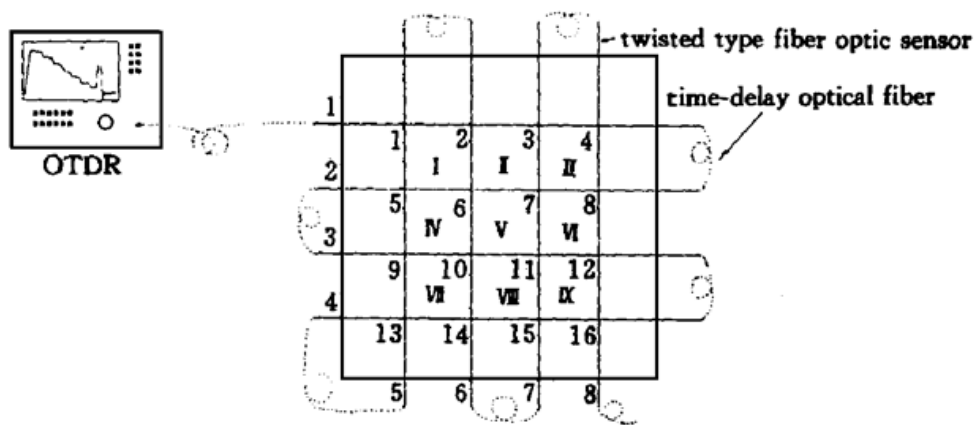


Fig. 3 OTDR test scheme

图 4 是经采样积分器对信号平均后, 在示波器上展示的沿光纤长度分布的实际背向散射光功率曲线, 曲线 a 是试件空载时的情况, 曲线 b 是试件中点 1 加载时的情况。因每根光纤之间焊接较好, 焊接损耗可忽略不计, 则背散射光功率曲线的每个损耗坎, 对应埋入方板中每根光纤传感器的损耗, 即损耗坎序号和传感器序号一一对应。由于复合材料试件中应力分

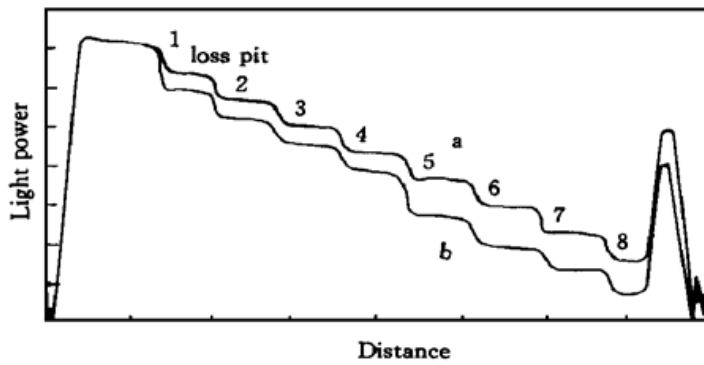


Fig. 4 The curve of OTDR back scattering light power. a: no-load, b: one-point load on point 1

可看出,当试件受到载荷作用时,作用点附近就会出现高应变区,从而使包围这一区域传感器的光功率损耗

布情况复杂,故埋入其中的各传感器初始光损耗略有不同。在光时域反射计上分别测量试件在空载和加载时各损耗坎的量值,并计算两者之差,其结果就表明了当试件受载时每根传感器的光功率损耗,由此可判定加载位置和程度。

本工作分别在试件的不同位置进行了单点、两点加载实验(试件 4 边由螺钉固支在刚性底架上,每个加载点加 80 N 的力)。部分测量数据和识别结果见表 1。从表中

Table 1. The back scattering light power loss of every fiber optic sensor and identification result

number	the back scattering light power loss of fiber optic sensor /dB								load site identification
	1	2	3	4	5	6	7	8	
no-load (A)	0.61	0.63	0.64	0.62	0.63	0.61	0.65	0.62	
one-point load on point 1(B ₁)	0.93	0.68	0.69	0.66	0.94	0.65	0.70	0.66	one-point load on point 1
B ₁ - A	0.32	0.05	0.05	0.04	0.31	0.04	0.05	0.04	
one-point load on point 3(B ₂)	0.91	0.67	0.67	0.67	0.68	0.64	0.94	0.66	
B ₂ - A	0.30	0.04	0.03	0.05	0.05	0.03	0.29	0.04	one-point load on point 3
one-point load on point 8(B ₃)	0.65	0.96	0.69	0.67	0.66	0.65	0.69	0.94	
B ₃ - A	0.04	0.33	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.32	one-point load on point 8
one-point load on point 11(B ₄)	0.64	0.68	0.94	0.67	0.66	0.65	0.97	0.66	
B ₄ - A	0.03	0.05	0.30	0.05	0.03	0.04	0.32	0.04	one-point load on point 11
two-point load on point 2, 14(C ₁)	0.86	0.67	0.69	0.89	0.66	0.93	0.68	0.65	
C ₁ - A	0.25	0.04	0.05	0.27	0.03	0.32	0.03	0.03	two-point load on point 2, 14
two-point load on point 6, 9(C ₂)	0.65	0.87	0.87	0.67	0.86	0.84	0.68	0.65	
C ₂ - A	0.04	0.24	0.23	0.05	0.23	0.23	0.03	0.03	two-point load on point 6, 9
two-point load on point 1, 11(C ₃)	0.85	0.69	0.89	0.66	0.86	0.66	0.89	0.66	
C ₃ - A	0.24	0.06	0.25	0.04	0.23	0.05	0.24	0.04	two-point load on point 1, 11
two-point load on point 3, 13(C ₄)	0.86	0.68	0.68	0.88	0.87	0.66	0.90	0.65	
C ₄ - A	0.25	0.05	0.04	0.26	0.24	0.05	0.25	0.03	two-point load on point 3, 13
one-point load between point 10, 14(D ₁)	0.64	0.67	0.87	0.85	0.67	0.91	0.70	0.66	
D ₁ - A	0.03	0.04	0.23	0.23	0.04	0.30	0.05	0.04	one-point load between point 10, 14
one-point load between point 6, 10(D ₂)	0.64	0.87	0.87	0.67	0.67	0.92	0.69	0.65	
D ₂ - A	0.03	0.24	0.23	0.05	0.04	0.31	0.04	0.03	one-point load between point 6, 10
one-point load between point 7, 8(D ₃)	0.66	0.93	0.69	0.66	0.66	0.66	0.88	0.85	
D ₃ - A	0.05	0.30	0.05	0.04	0.03	0.05	0.23	0.23	one-point load between point 7, 8
one-point load on area I(E ₁)	0.81	0.84	0.71	0.66	0.84	0.83	0.71	0.66	
E ₁ - A	0.20	0.21	0.07	0.04	0.21	0.22	0.06	0.04	one-point load on area I
one-point load on area V(E ₂)	0.69	0.85	0.85	0.69	0.70	0.83	0.86	0.69	
E ₂ - A	0.08	0.22	0.21	0.07	0.07	0.22	0.21	0.07	one-point load on area V
one-point load on area VI(E ₃)	0.68	0.84	0.84	0.70	0.67	0.68	0.85	0.84	
E ₃ - A	0.07	0.21	0.20	0.08	0.04	0.07	0.20	0.22	one-point load on area VI

变化较大, 而其它传感器的光功率损耗变化较小, 这样可以根据各光纤传感器光功率损耗的变化值准确判定施力点位置, 实现结构单点或多点受力的准分布监测, 效果令人满意。

需要指出的是这种用光时域反射计检测的缠绕式光纤传感网络, 测量范围和精度取决于缠绕式光纤传感器的初始光损耗及试件受力后光损耗变化大小, 为保证传感光纤尾部有足够的信噪比, 在制板和实验时应合理调节两者取值。

结束语 本文提出的 2 维材料与结构载荷、应变检测方法, 是以独特方式结合了光纤传感阵列和光时域反射计两种技术, 实现对材料与结构受力的实时、在线评价系统。它可以提供大量关于材料内部的各种特征信息, 而其中的缠绕钢绳式光纤传感器还可进一步发展成对结构温度、蠕变、裂缝、整体性等参数的分布监测的新型传感器。因此它在智能材料与结构中有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Measure R M. Advances toward fiber optic based smart structures. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(1) : 34~47
- [2] 叶培大. 光纤理论. 上海: 知识出版社, 1985, 78~ 119
- [3] Tardy A, Yang C C, Pan K *et al.*. High sensitivity transducer for fiber optic pressure sensing to dynamic mechanical testing and vehicle detection on roads. In: Arditty H J ed., *Springer Proc. in Physics, Vol. 44. Optical Fiber Sensors*. 1989. 215~ 221
- [4] Rossi P, Lemacu F. New mechod for detecting cracks in concrete using fiber optics. *Materials and Structures Research and Testing (RILEM)*, 1989, **22**(132) : 437~ 442
- [5] Grossman B, Gao X, Thursby M. Composite damage assessment employing an optical neural network processor and an embedded fiber optic sensorarray. *Proc. SPIE*, 1991, **1588** : 64~ 75
- [6] 杨建良, 向 清, 何竞翼等. 机敏材料中竹节型光纤传感阵列及其信号处理. *光学学报*, 1997, **17**(11) : 1491~ 1496

Structural State Detection with Twisted Type Fiber Optic Sensing Array and OTDR Technology

Yu Ke¹⁾ Zhang Yongsheng²⁾ Guan Li¹⁾ Jiang Desheng³⁾

- 1), Department of Mathematics and Physics, Shandong University of Technology, Jinan 250061
- 2), Department of computer Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070
- 3), Optical Fibre Sensing Research Center Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

(Received 15 June 1998; revised 23 October 1998)

Abstract A novel sensor array made of multimode optical fibers twisting steel strands is presented. It can be used to detect many state parameters such as load, strain of intelligent material and structure. Optical time-domain reflectometry (OTDR) technology is applied to process real-time parallel and distributing sensing signals. In this way, the measured datas are obtained and the identified results are proved.

Key words fiber optic sensor, intelligent material and structure, optical time-domain reflectometry technology.