

基于光纤瑞利散射的轴向微应变传感器

张晓青^{1,2} 贾豫东¹ 刘静妮¹

¹北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院,北京 100192

²光电测试技术北京市重点实验室,北京 100101

摘要 为了测量金属板材在拉伸作用下的微应变,设计了以中心波长为 1550 nm 的多模光纤宏弯损耗传感器为传感元件的轴向微应变测量系统。该传感器将多模光纤传感环垂直固定在被测板材上,当板材被拉伸时,光纤传感环的弯曲损耗效应明显增强,导致背向瑞利散射光强发生剧烈波动。搭建了轴向微应变测量系统,根据光时域反射原理获得了背向瑞利散射的光强变化,从而计算出金属材料应变值,可实现分布式实时测量。实验结果表明,该多模光纤宏弯损耗传感器的弯曲敏感区半径约为 3~6 mm,微应变测量范围约为 500~3000 $\mu\epsilon$,微应变测量精度约为 40 $\mu\epsilon$ 。

关键词 光纤光学;微应变;宏弯损耗;瑞利散射

中图分类号 TN252;TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s105005

Axial Micro Strain Sensor Based on Fiber Rayleigh Scattering

Zhang Xiaoqing^{1,2} Jia Yudong¹ Liu Jingwei¹

¹ School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

² Beijing Key Laboratory for Optoelectric Measurement Technology, Beijing 100101, China

Abstract For the purpose of measuring micro strain of a stretched metal panel, a measurement system including a fiber sensor is designed, which works at 1550nm central wavelength. The fiber sensor is actually a small circle of multimode fiber, fixed vertically on surface of the metal panel. When the metal panel is stretched, the sensing circle produces strenuous bending loss effect, leading to violent fluctuation of light intensity of back Rayleigh scattering. The measurement system of axial micro strain is set up according to the principle of optical time domain reflectometer and the light intensity of back Rayleigh scattering is acquired so that the strain of metal material is calculated. It can also realize distributed and real time measurement. The experimental results show that sensitive radius range of the bending loss multimode fiber sensor is within 3~6 mm, calibration measurement range of micro strain is about 500~3000 $\mu\epsilon$, measurement precision of micro strain is about 40 $\mu\epsilon$.

Key words fiber optics; micro strain; macro bending loss; Rayleigh scattering

OCIS codes 060.2370;060.2400;290.1350;290.5870

1 引 言

在光纤通信、光纤传感以及光纤器件等技术应用中,光纤弯曲损耗是非常重要的研究热点,基于弯曲损耗效应的光纤宏弯传感器应用范围正在不断扩大,应用前景十分广阔。光纤宏弯传感器不仅可用来测量温度^[1]、压力^[2]、液体折射率^[3]、心率^[4]、单模光纤截止波长^[5]等物理量,还可用来设计远距离输送管道入侵检测系统^[6]、埋入结构健康检测系统^[7]、人体姿态传感器以及机器人触角传感器^[8]等。在光纤宏弯应变传感器方面,Kuang等^[9]在2002年采用塑料光纤进行了轴向应变和弯曲损耗的原理性测量;张娟^[10]在2006年研究了利用多个弯曲损耗的叠加结果进行应变测量的单模缠绕式光纤应变传感系统原理,并做了部分验证性实验;狄海廷等^[11]利

收稿日期:2015-01-25;收到修改稿日期:2015-03-02

基金项目:北京市教委科技计划面上项目(KM201411232005)、光电测试技术北京市重点实验室开放项目(GDKF2013002)、北京市青年拔尖人才培育计划(CIT&TCD201404122)

作者简介:张晓青(1967—),女,博士,副教授,主要从事光电检测技术及先进信号处理等方面的研究。

E-mail:zxqbim@163.com

用光纤弯曲半径大于 60 mm 时的平缓损耗特性对光纤曲率半径进行测量从而达到间接测量橡胶块的轴向应变。从已有文献看,光纤宏弯传感器的研究大部分限于单模光纤。对于多模光纤宏弯损耗,其理论推导和特性分析已有一些文献^[12-15],而实际应用及系统组建方面鲜见报道。实际上,多模光纤的宏弯损耗效应比单模光纤显著,用于光纤传感能获得较高的测量灵敏度,具有更大的应用潜力。

本文选择 1550 nm 多模石英光纤制作弯曲损耗效应敏感的环状传感头,根据光时域反射原理,通过对背向瑞利散射光强进行高精度测量,实现被测物体的轴向拉伸微应变测量。由于背向瑞利散射光微弱,但对光强损耗敏感,因此可实现对微应变的高精度测量。

2 测量系统及传感原理

2.1 光纤宏弯损耗与光纤弯曲半径的数学关系

在光纤弯曲时,光纤中传输的光功率由于发生传导模辐射而损耗,影响因素有光纤结构、折射率分布、传输波长、数值孔径、模式耦合等,对光纤宏弯损耗进行分析的理论较为复杂,且必须采用近似分析方法。目前,国内外大多数研究人员仍然沿用美国人 Marcuse^[16]早在 1976 年采用平面波导原理和 1993 年采用夫琅和费衍射理论^[17]得出的经典公式,两种分析方法得出的结论一致,公式为

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\pi\gamma R}} \frac{a\kappa^2}{V^2} \exp^{(2\gamma a)} \exp\left[-\frac{2\gamma^3}{3\beta^2} R\right], \quad (1)$$

式中 α 为多模光纤弯曲损耗系数, a 为多模光纤的纤芯半径, R 为多模光纤的弯曲半径, β 为光纤的传播常数, γ 、 κ 、 V 则是在(1)式理论推导过程中为了计算方便而引入的参数。因此,为了配合(1)式的求解,还需要以下的一组计算公式

$$\begin{cases} n_2^2 k^2 < \beta < n_1^2 k^2 \\ \gamma^2 = \beta - n_2^2 k^2 \\ \kappa^2 = n_1^2 k^2 - \beta \\ V^2 = n_2^2 a^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率, k 为真空中的波数($k=2\pi/\lambda$)。

(1)式表明,与光纤宏弯损耗直接相关的物理参数主要是纤芯半径 a 、弯曲半径 R 、光源波长 λ 、纤芯折射率 n_1 和包层折射率 n_2 。对于某种多模阶跃折射率型光纤,设 $2a=62.5 \mu\text{m}$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, $n_1=1.490$, $n_2=1.460$,图 1 为参数定义,图 2 给出了多模光纤弯曲损耗系数 α 随弯曲半径 R 的变化关系。

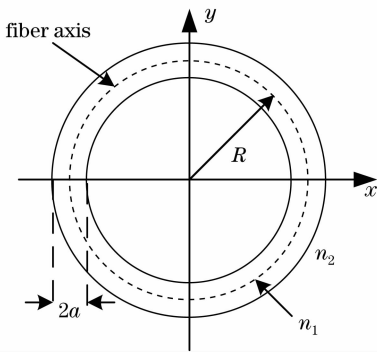


图 1 光纤传感环的参数定义

Fig. 1 Parameter definition of fiber sensing circle

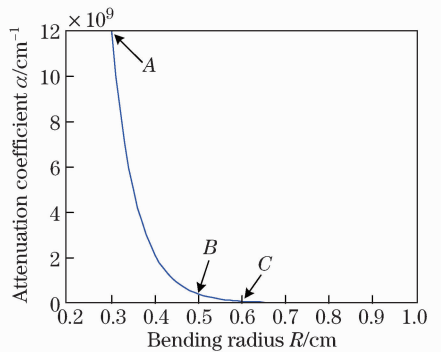


图 2 弯曲半径与损耗系数的关系

Fig. 2 Relationship between bending radius and attenuation coefficient

图 2 表明,当 $R \geq 0.6$ cm 时,光纤宏弯损耗可忽略不计;当 R 处在 C 点时,宏弯损耗开始出现一定程度的增加,此点半径称为临界半径 R_c ,图中的 $R_c=0.6$ cm;当 R 处在 B 点时,光纤宏弯小圈处于光强损耗的敏感区,如果弯曲半径有微小改变,则弯曲损耗有剧烈变化,且附加损耗呈指数规律增长;当 R 处在 A 点时,光纤接近断裂,光强损耗严重。这说明光纤弯曲会使光纤中传导模(特别是高次传导模)部分转变成泄漏模或辐射模,从而引起光强损耗,而且大的弯曲损耗只发生在小于或者等于临界弯曲半径处。这是设计光纤宏弯传感器的理论依据。

2.2 光纤宏弯损耗与轴向应变的关系

若将材料受到应力而发生的应变转换为光纤弯曲半径变化,即能建立起应变与光纤中背向瑞利散射光强损耗之间的关系,实现应变的远距离传感测量。如图3所示,将一小段光纤绕成一个活动小圈,小圈半径小于临界半径 R_c ,然后再将小圈垂直布置在待测材料表面,通过拉伸该材料,将光纤拉伸 ΔL 长度,即改变了光纤宏弯小圈半径, ΔR 变化将引起背向瑞利散射光强发生较剧烈的损耗。

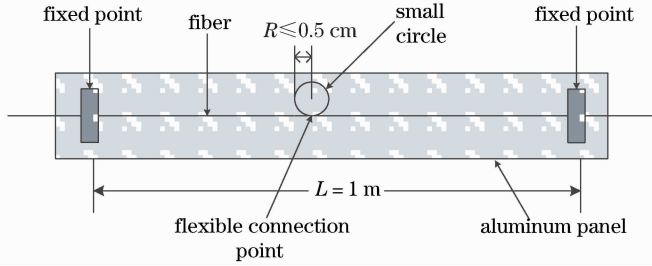


图3 光纤传感小圈的设置

Fig. 3 Fixing the small fiber sensing circle

此时应变 ΔS 与 ΔL 、 ΔR 之间的关系为

$$\Delta S = \frac{\Delta L}{L} \times 10^6 = \frac{2\pi\Delta R}{L} \times 10^6. \quad (3)$$

在改变物体应变的条件下,通过测量瑞利散射光强的损耗量 ΔP ,可以获得物体应变与瑞利光强损耗之间的关系曲线,依据此标定的关系曲线可实现物体轴向微应变的远距离高精度测量。

3 实验装置

3.1 测量系统

测量系统为多模光纤系统,采用光时域反射原理构建,如图4所示,以可调谐光纤脉冲激光器作为测量光源,其脉冲频率为纳秒级(实验中设置为10 ns),重复频率设为10 kHz,因此系统可测量10 km长光纤沿线的多处宏弯损耗。系统采用粗波分复用器(WDM)将背向散射光进行滤波,输出携带应变信息的瑞利散射光。再经过光电检测电路和信号调理电路的处理,由高速数据采集卡将测量信号转换为数字信号,输入计算机(PC)中,由自行设计的测量系统软件进行数据处理,得出最终的应变测量结果。采用多模光纤作为传感元件,比采用单模光纤可得到更高的测试灵敏度、测试精度和较高的信噪比。这是由于多模光纤芯径大,光耦合效率高,传播模式多,传光量大,在相同的外界扰动下,多模光纤比单模光纤的光强变化值要大。

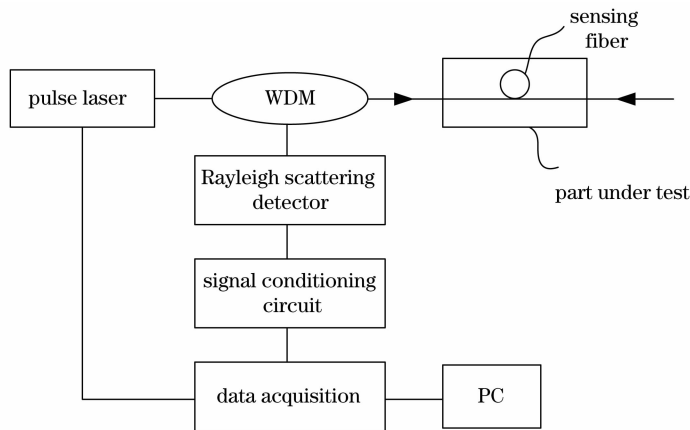


图4 测量系统的组成

Fig. 4 Configuration of experimental system

3.2 传感元件

测量系统中,光纤宏弯传感器的弯曲半径比光纤直径大很多,但小于临界半径值。通过测量背向瑞利散射

光强度的变化来检测宏弯传感环的半径变化。宏弯传感环将金属平板的微应变转换成弯曲半径的变化,并加以放大,以便通过光强来间接测量。光纤应变传感装置的设计如图 5 所示,62.5/125 μm 多模光纤的临界弯曲半径约为 $R_c=0.6\text{ cm}$,背向瑞利散射光强对光纤弯曲很敏感,当光纤弯曲半径 $R\leq 0.5\text{ cm}$ 时,光纤弯曲半径减小很小的尺度,附加的光强损耗会急剧增加,在背向瑞利散射光的附加损耗光强度上都能体现出来。

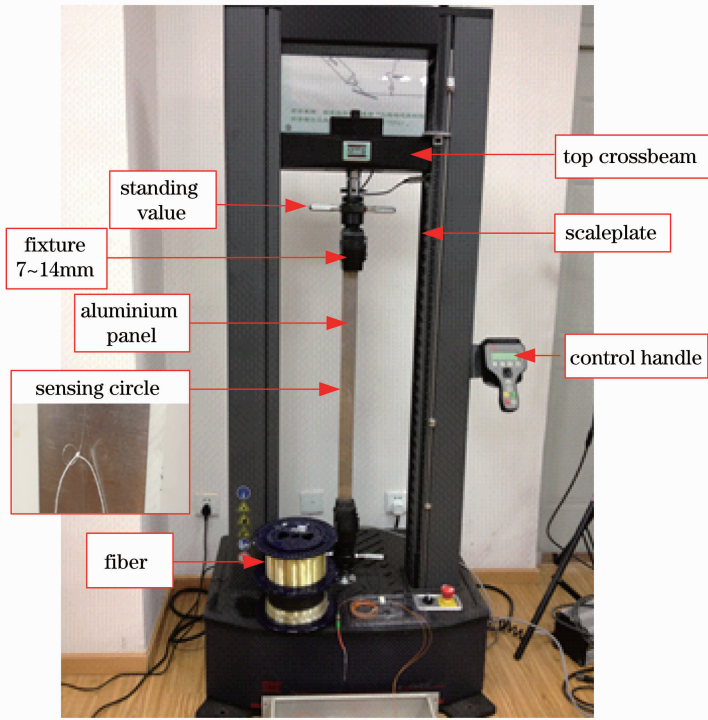


图 5 测量轴向微应变的实验装置

Fig. 5 Experimental setup of testing axial micro strain

实际操作中将 1 m 传感光纤中间绕一个小圈,并将小圈位置固定,其半径 $R\leq 0.5\text{ cm}$,小圈两端结合处是活动的,光纤两端用胶粘好,实验中将这段光纤两端固定在铝质板材(厚为 8 mm,宽为 40 mm,长为 1000 mm)表面,如图 5 所示。当该段材料发生拉伸应变 ΔL 时,则小圈半径 R 会减小 ΔR 。由于小圈的初始半径 R 已经小于临界半径,微小的半径变化都会对背向瑞利散射光产生一个明显的额外损耗。

4 实验结果处理与分析

4.1 瑞利散射光强测量

实验系统的传感光纤全长约 4 km。在应变传感装置处,背向瑞利光强度会有一个下降,根据光时域反射(OTDR)的方法可以确定应变在光纤中的位置。传感光纤环的初始半径设为 0.5 cm,拉伸后的瑞利散射光强测量曲线如图 6 所示,在背向散射瑞利光强曲线上出现了一个下降台阶,如图 6 箭头所示,说明应变传感装置处产生了损耗。

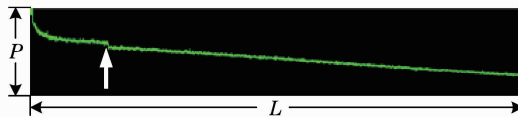


图 6 背向瑞利散射光强测量曲线

Fig. 6 Measurement curves of back Rayleigh scattering light intensity

4.2 瑞利散射光强弯曲损耗计算

在拉伸铝板伸长某一个 ΔL 的情况下,将系统采集到的背向瑞利散射光强信号进行叠加平均降噪处理,可得到如图 7 所示的清晰背向瑞利散射光强曲线,图中箭头所指位置是光纤传感环所在的位置。由于系统的分布式测量空间分辨率为 1 m,根据距离计算程序可得出弯曲损耗发生在光纤约 596 m 处。

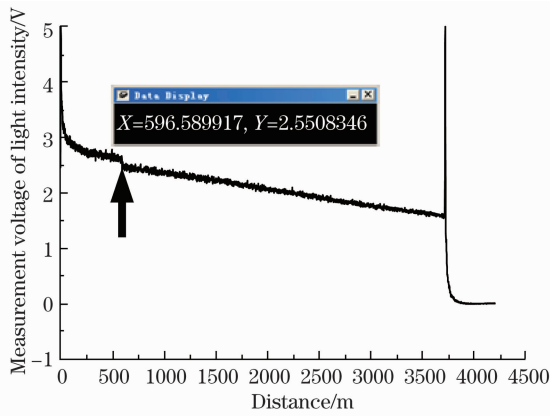


图 7 瑞利散射光强曲线的台阶位置

Fig. 7 Step location of Rayleigh scattering light intensity curve

光纤传感环的弯曲损耗在瑞利背向散射光强波形的曲线上形成了一个台阶,可设其中心位置为 O ,如图 8 所示。由于瑞利散射光强在光纤中极短距离时的散射变化很缓慢,在短距离内可视为直线,因此,以下降的位置 O 为中心,前后分别取 100 个点,用最小二乘法拟合两条直线。

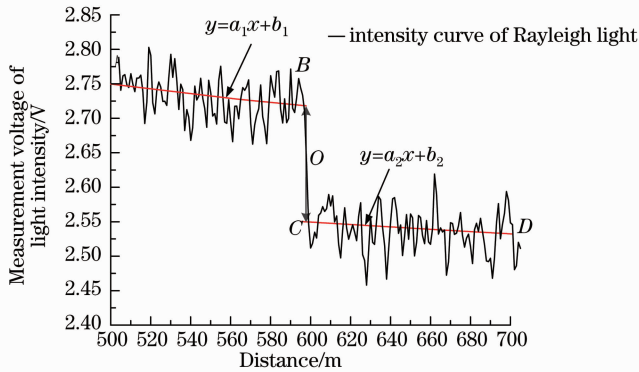


图 8 台阶损耗光强 ΔP 的近似计算

Fig. 8 Approximate calculation of step attenuating light intensity ΔP

设 O 点的坐标 $x = x_0$, 则台阶所代表的光强损耗值 ΔP 为

$$\Delta P = a_1 x_0 + b_1 - (a_2 x_0 + b_2), \quad (4)$$

经过以上处理和运算后,能比较准确地求出在传感位置由于拉伸引起的光纤弯曲所造成的背向瑞利散射光强的损耗值 ΔP 。

4.3 应变-损耗曲线的标定

在标定应变-损耗曲线时,设置不同的系统光源入射光功率,再由拉伸机设定不同的拉伸量,测量背向瑞利散射光强的损耗值,测量值如表 1 所示。

表 1 不同入射光强的瑞利光强损耗

Table 1 Attenuation of Rayleigh light intensity with different incident light intensities

$\Delta L/\text{mm}$	$\mu\epsilon$	$P_s = 1.99 \text{ mW}$	$P_s = 2.51 \text{ mW}$	$P_s = 2.99 \text{ mW}$
		$\Delta P/\text{mW}$	$\Delta P/\text{mW}$	$\Delta P/\text{mW}$
0.5	500	0.12074	0.13795	0.11951
1.0	1000	0.12912	0.12205	0.12361
1.5	1500	0.14364	0.13831	0.13308
2.0	2000	0.16150	0.16726	0.16332
2.5	2500	0.17013	0.17554	0.18313
3.0	3000	0.19488	0.19174	0.19484

对上述三种光源输入的拉伸量测量数据分别进行拟合,完成了线性拟合、二次多项式拟合、三次多项式拟合,拟合曲线如图 9 所示。

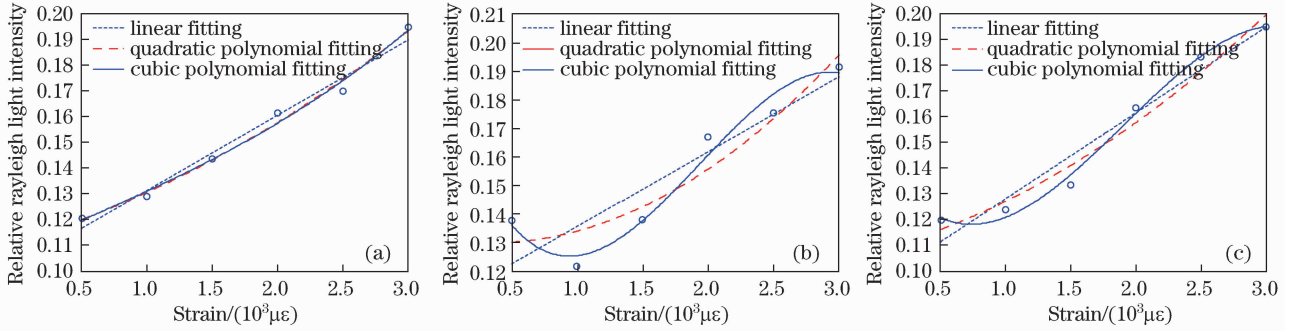


图 9 应变-损耗标定曲线。(a) $P_s=1.99$ mW; (b) $P_s=2.51$ mW; (c) $P_s=2.99$ mW

Fig. 9 Calibrating curves of strain and attenuating. (a) $P_s=1.99$ mW; (b) $P_s=2.51$ mW; (c) $P_s=2.99$ mW

由图 9 可知,背向瑞利散射的光强损耗规律不会随着入射光强度的变化而变化。上述三种标定测量情况下的误差计算如表 2~5 所示, ΔP_{C_1} 代表线性拟合光强损耗测量值, ΔP_{C_2} 代表二次多项式拟合光强损耗测量值, ΔP_{C_3} 代表三次多项式拟合光强损耗测量值, E_n 为对应的误差值, $n=1, 2, 3$ 。

表 2 $P_s=1.99$ mW 时瑞利散射光强损耗测量误差

Table 2 Measuring errors of Rayleigh attenuating light intensity with $P_s=1.99$ mW

$P_s=1.99$ mW						
ΔP	ΔP_{C_1}	E_1	ΔP_{C_2}	E_2	ΔP_{C_3}	E_3
0.12074	0.1168	-0.0039	0.1203	-0.0004	0.1199	-0.0009
0.12912	0.1314	0.0023	0.1308	0.0017	0.1311	0.0020
0.14364	0.1460	0.0024	0.1434	-0.0002	0.1434	-0.0003
0.16150	0.1606	-0.0009	0.1581	-0.0034	0.1574	-0.0041
0.17013	0.1752	0.0051	0.1749	0.0048	0.1738	0.0037
0.19488	0.1898	-0.0051	0.1938	-0.0011	0.1933	-0.0016

表 3 $P_s=2.51$ mW 时瑞利散射光强损耗测量误差

Table 3 Measuring errors of Rayleigh attenuating light intensity with $P_s=2.51$ mW

$P_s=2.51$ mW						
ΔP	ΔP_{C_1}	E_1	ΔP_{C_2}	E_2	ΔP_{C_3}	E_3
0.13795	0.1227	-0.0152	0.1304	-0.0076	0.1365	-0.0014
0.12205	0.1358	0.0137	0.1343	0.0122	0.1256	0.0036
0.13831	0.1489	0.0106	0.1428	0.0045	0.1377	-0.0006
0.16726	0.1620	-0.0053	0.1559	-0.0114	0.1605	-0.0068
0.17554	0.1751	-0.0004	0.1736	-0.0019	0.1817	0.0062
0.19174	0.1882	-0.0035	0.1959	0.0042	0.1890	-0.0027

表 4 $P_s=2.99$ mW 时瑞利散射光强损耗测量误差

Table 4 Measuring errors of Rayleigh attenuating light intensity with $P_s=2.99$ mW

$P_s=2.99$ mW						
ΔP	ΔP_{C_1}	E_1	ΔP_{C_2}	E_2	ΔP_{C_3}	E_3
0.11951	0.1112	-0.0084	0.1158	-0.0037	0.1203	0.0008
0.12361	0.1279	0.0043	0.1269	0.0033	0.1207	-0.0029
0.13308	0.1447	0.0116	0.1408	0.0077	0.1374	0.0043
0.16332	0.1614	-0.0019	0.1576	-0.0057	0.1614	-0.0019
0.18313	0.1782	-0.0050	0.1772	-0.0059	0.1839	0.0008
0.19484	0.1949	0.0001	0.1997	0.0049	0.1959	0.0011

表 5 平均拟合误差值的比较
Table 5 Comparison of average fitting errors

Order of fitting polynomial	Average fitting errors		
	$P_s=1.99\text{ mW}$	$P_s=2.51\text{ mW}$	$P_s=2.99\text{ mW}$
1	0.0033	0.0081	0.0052
2	0.0019	0.0070	0.0052
3	0.0021	0.0036	0.0020

从各项拟合平均误差值(表 5)来看,多数情况下对测量数据选用三次多项式拟合仍然是最佳的拟合阶次。如果采用 2.51 mW 入射光,则采用相应的标定曲线公式,即可根据测量的光强损耗值确定相应的应变值。一般情况下,都是在现场布置好了光纤传感装置后并在测量之前进行标定。

4.4 应变测量范围和精度估计

根据理论分析得出的结论,光纤传感环半径 R 的变化范围约为 3~6 mm。当 R 为 5~6 mm 时,光强衰减系数变化幅度并不大,因此,为可靠起见,系统设置光纤传感小圈的起始半径为 5 mm。在系统测量实验中,由于拉伸机及铝板材料的限制,铝板拉伸量最小为 0.5 mm,最大为 3.0 mm,相应的光纤传感环半径改变量为 7.96 μm 和 47.77 μm ,材料应变量分别是 500 $\mu\epsilon$ 和 3000 $\mu\epsilon$,因此应变测量范围是 500~3000 $\mu\epsilon$ 。

应变测量的精度主要是由系统能测量的背向瑞利光强度的最小精度决定,而背向瑞利光强度的最小精度由系统的信噪比决定。信噪比受叠加次数影响,另外考虑到计算时间的长短,不能无限制的增加叠加次数。综合考虑下,系统的叠加次数定为 8192 次。在该次数的叠加情况下,瑞利光强度可分辨的精度为 0.05 V,对应的 ΔL 为 0.04 mm,因此系统的应变测量精度约为 40 $\mu\epsilon$ 。

5 结 论

依据光时域反射原理建立了基于多模光纤弯曲损耗的金属平板轴向微应变传感测量系统,通过测量物体应变引起的背向瑞利散射光强的变化实现对物体微应变的远程测量。测量系统包括光纤脉冲激光源、粗波分复用器、应变传感装置、传感光纤、光电检测及信号调理电路、数据采集电路、计算机处理软件等部分。应变传感装置采用光纤宏弯小圈,其弯曲损耗敏感区可用于测量物体微应变导致的宏弯半径变化,计算机处理软件对获得的瑞利散射光强数据进行降噪及计算。从实验结果来看,系统能实现铝板材料应变的远距离传感测量,测量曲线的标定采用 3 次多项式拟合时效果好,测量结果的重复性较好。涉及到的损耗分析理论、传感器制作方法、实验结论为进一步开发分布式光纤传感多参数集成测量的实际系统提供了重要的研究基础。

参 考 文 献

- Li Xiaopei, Zou Yaqi, Ma Junshan. Theoretical analysis on temperature sensing and macrobend loss of fiber[J]. Optical Instruments, 2012, 34(2):44-49.
李晓沛, 邹亚琪, 马军山. 光纤宏弯损耗与温度传感的理论分析[J]. 光学仪器, 2012, 34(2):44-49.
- Li Chuan, Zhang Yimo, Liu Hui, *et al.*. Distributed fiber-optic bi-directional strain - displacement sensor modulated by fiber bending loss [J]. Sensors and Actuators A, 2004,111(2-3): 236-239.
- Peng Xingling, Zhang Hua, Li Yulong. The research advances of macrobending fiber based sensors [J]. Optical Communication Technology, 2012, (11): 42-45.
彭星玲, 张 华, 李玉龙. 光纤宏弯传感器研究进展[J]. 光通信技术, 2012, (11):42-45.
- J Witt, K Krebber, J Demuth, *et al.*. Fiber optic heart rate sensor for integration into personal protective equipment[C]. IEEE, 2011.
- K Nakajima, J Zhou, K. Tajima, *et al.*. Cutoff wavelength measurement in a fiber with improved bending loss[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(8): 1918-1920.
- Jianzhong Gao, Zhuangde Jiang, Yulong Zhao, *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. Chin Opt Lett, 2005, 3(11): 633-635.
- L A Ribeiro, J B Rosolem, D C Dini, *et al.*. Fiber optic bending loss sensor for application on monitoring of embankment dams[C]. IEEE, 2011, 637-641.
- Liu Renqiang, Liu Pinkuan, Fu Zhuang, *et al.*. Operation principle of a bend enhanced curvature optical fiber sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5):807-812.
刘仁强, 刘品宽, 付 庄, 等. 弯曲增强型光纤曲率传感器机理的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(5):807-812.

- 9 K S C Kuang, W J Cantwell, P J Scully. An evaluation of a novel plastic optical fibre sensor for axial strain and bend measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(10): 1523-1534.
- 10 Zhang Juan. Studying on Winding Fiber-Optic Strain Sensing Technology[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006: 43-45.
张 娟. 缠绕式光纤应变传感技术的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2006: 43-45.
- 11 Di Haiting, Yin Junhua, Zhang Junmin, *et al.*. Axial strain measurement based on curvature fiber optic sensor [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013,24(2):271-275.
狄海廷,尹军华,张军民,等. 利用光纤曲率传感器测量轴向应变[J]. 光电子·激光,2013,24(2): 271-275.
- 12 Liu Yexin, Yang Xiaoyun, Chen Xueqin, *et al.*. Analysis of multimode fiber bending loss[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2002, 41(5):25-27.
刘叶新, 杨晓云, 陈学琴,等. 多模光纤弯曲损耗的分析[J]. 中山大学学报,2002,41(5):25-27.
- 13 He Guangyu, Jiang Jiuxing, Liu Peng. Theory of losses in bending of multi-mode fibers[J]. Journal Harbin Univ Sci & Tech, 1997, 2(5):91-96.
贺光裕,姜久兴,刘 鹏. 多模光纤弯曲损耗的理论分析[J]. 哈尔滨理工大学学报,1997,2(5): 91-96.
- 14 Zhao Zheming, Sui Chenghua. Measurement and analysis of characteristic of bend loss in multi-mode fiber[J]. Optical Instruments, 2005, 27(5): 29-32.
赵浙明,隋成华. 多模光纤弯曲损耗特性的测量与分析[J]. 光学仪器,2005,27(5):29-32.
- 15 Xu Shixiang, Li Xishan, Zhang Guoxuan. The effects of bending on the transmission properties of pure silica optical fibers[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(7): 571-575.
徐世祥,李锡善,张国轩. 纯石英光纤的弯曲传输特性实验研究[J]. 中国激光, 1994, 21(7): 571-575.
- 16 D Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers[J]. J Opt Sci Am, 1976,66(3):216-220.
- 17 D Marcuse. Bend loss of slab and fiber modes computed with diffraction theory [J]. IEEE Quantum Electronics, 1993, 29(12): 2957-2961.

栏目编辑: 苏 岑