

微弯光纤气压传感器研究

吴丽双

泉州师范学院物理与信息工程学院, 福建 泉州 362000

摘要 研制了一种光纤微弯气压传感器,提出了一种利用梯形弹簧的压力非线性特性补偿光纤微弯传感器非线性的方法,并提出了利用差动检测克服光路损耗不稳定的方法。介绍了梯形弹簧光纤微弯传感器工作原理,对梯形弹簧变形量压力响应曲线进行非线性拟合,得到二次拟合曲线。实验测试了0~0.1 MPa范围的气压传感特性。结果表明,光纤气压传感器的输出电压信号与气压值具有良好的线性关系,得到气压测量灵敏度系数约为2000 mV/MPa,能够满足气象及飞行器高度监测中对气压测量的要求。

关键词 光纤光学; 气压传感器; 光纤微弯传感器; 非线性弹簧

中图分类号 TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.050601

Study on Micro-Bend Fiber Optic Pressure Sensor

Wu Lishuang

College of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China

Abstract A new fiber-optic pressure sensor is studied. A nonlinear compensation method for optical fiber micro bend sensor by using strain nonlinear characteristics of trapezoidal springs and a way to overcome the instability of optical path loss by using differential detection are proposed. The principles of the fiber micro-bend sensor with trapezoidal spring are introduced. Response curve of trapezoidal spring deformation at pressure of the aerodrome is nonlinear fitted, and the square curve is achieved. Atmospheric pressure from 0 to 0.1 MPa is experimentally tested to verify sensing characteristics. Results show that output voltages and gas pressures have good linearity in the fiber-optic pressure sensors, and pressure measurement sensitivity coefficient is about 2000 mV/MPa. It can meet the requirements of pressure measurement in monitoring of meteorology and aircraft height.

Key words fiber optics; pressure sensors; micro-bend fiber optic sensor; nonlinear springs

OCIS codes 060.2370; 060.2270; 060.2300

1 引言

大气压力不仅是气象遥测系统中重要的参数,同时也是现代飞行器描述飞行高度的重要参数之一。与采用传统的谐振筒式、电容式或电阻式盒膜气压传感器测量大气压力的方法相比,光纤气压传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、化学稳定性好、耐高温、可调参数多等优点,因而受到广泛关注。肖韶荣等^[1]研究了一种双通道光纤位移传感器,通过检测双膜盒的形变量,实现大气压力的测量,测量装置的精度不受探测光束强度变化和環境光干扰。但这种光纤位移传感器的输出特性参数 φ 与气压值存在非线性关系,需要适当选择光纤探头的几何结构参数才能获得较大的测量线性范围。朱佳利等^[2]研究了一种新型光纤法布里-珀罗压力传感器,通过光刻、硅片刻蚀、阳极键合等微机电系统技术制作而成,适合恶劣环境下狭小空间内环境压力的微压测量。但这种光纤位移传感器采用光谱仪解调,成本高难度大。倪敏等^[3]研究了一种激光微加工制作的光纤压力传感器,在0~60 MPa的压力范围内,输出相位具有很好的线性度,但这种传感器的相位解调成本昂贵。李智忠等^[4]提出了一种基于横向荷载压力增敏的新型边孔光纤光栅封装装置,使边孔光纤光栅双峰间距的压力灵敏度从5.6 pm/MPa增加到119.14 pm/MPa,这种传感器需要可调谐窄带激

收稿日期: 2014-08-18; 收到修改稿日期: 2014-11-24; 网络出版日期: 2015-04-23

基金项目: 福建省光传输与变换重点实验室开放课题(2014101)

作者简介: 吴丽双(1970—),女,副教授,主要从事激光技术与应用方面的研究。E-mail: lishuangw@126.com

光光源,用于大气测量的成本高、难度大。刘宏月等^[6]研究了基于盒膜结构的微弯式长周期光纤光栅气压传感器,其输出量(波长谐振峰幅值)与气压存在非线性关系,解调需要光谱仪,用于测量大气压同样存在成本高难度大问题。这表明,现有的光纤气压传感器还存在一定的缺陷。

光纤微弯传感器直接测量光的强度,具有结构简单、易于检测、成本低廉等优点。因此光纤微弯传感器一直是光纤传感器的研究热点之一。目前,光纤微弯传感已是较成熟的传感方法,但大量理论和实验结果表明,光纤微弯传感器输出损耗与位移变化量(或压力变化量)存在非线性关系^[6-7],包括带隙型光子晶体光纤的微弯损耗^[8],是目前光纤微弯传感器的主要问题之一。为此本文提出采用非线性弹簧结构,降低了光纤微弯压力传感器大动态范围内的非线性,从而获得了高灵敏度和良好的线性响应特性,能够更好地适用于大气压测量以及飞行器高度测定,具有良好的应用前景。

2 微弯光纤气压传感器原理

图1为光纤微弯气压传感器原理示意图,采用圆形膜片加梯形弹簧结构。圆形刚性膜片固定在弹性橡胶上,其作用是将膜片上下气压差产生的压力传递给梯形弹簧。梯形弹簧是气压变化的敏感元件,通过测量弹簧变形量而获得气压差值,而弹簧变形量是通过测量光纤的微弯衰减而获得的。光纤微弯变形器的活动板固定在膜片中心位置,气压变化时,由于膜片上下表面存在气压差,膜片会产生位移,从而带动变形器的活动板移动,进而转化为光纤微弯变形量,从而实现气压值到光纤微弯损耗的转化。

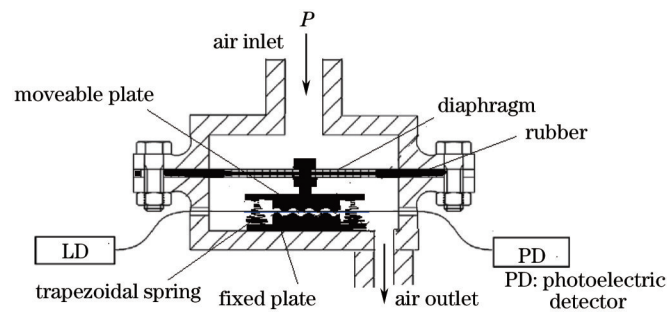


图1 光纤微弯气压传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber micro-bend pressure sensor

2.1 光纤微弯损耗特性

光纤微弯传感器由两块波形压板(变形器)和两只弹簧构成。其中一块波形压板是固定板,另一块是活动板,用两只弹簧将其连接到固定板上,并将一根多模光纤(阶跃型或渐变型)置于两块波形压板之间。当活动板受到膜片的压迫时,光纤就会发生周期性弯曲,其弯曲程度与活动板所受压力有关。光纤中传导模的一部分能量耦合到辐射模,形成模耦合损耗^[9-10]。当活动板所加的压力增加时,模耦合损耗也随之加大,使输出光强受到了调制。光纤微弯传感器通过检测光纤损耗的变化就能测出气压的变化量,因此它是一种强度调制型传感器。采用半导体激光器(LD)作为光源,其优点是耦合到光纤的光强度高,容易探测,缺点是光源光强度稳定性较差,但由于光纤微弯传感器的变量是光衰减量,所以只要测量光强度的相对变化量就能得到正确的光衰减量,即通过检测光纤出射光强与LD光源入射到光纤的光强的比值就能得到光衰减量。

光纤微弯损耗是光纤随机畸变而产生的高次模与辐射模之间的模耦合引起的光功率损失,根据光的波动理论可导出周期性微弯损耗 α_m 的一阶近似表达式^[11]:

$$\alpha_m = \frac{1}{4} Kh^2 L \left\{ \frac{\sin[(q - \Delta\beta)L/2]}{(q - \Delta\beta)L/2} \right\}^2, \quad (1)$$

式中 α_m 单位为 dB/m, K 为比例系数; h 为光纤波状弯曲幅度; L 为光纤产生微弯变形部位的长度; $\Delta\beta$ 为弯曲光纤中传导模和辐射模的传播常数差, $q = \frac{2\pi}{\Lambda}$, Λ 为微弯周期。由(1)式可见,微弯损耗 α_m 与光纤波状弯曲幅度 h 的平方成正比,即光纤微弯幅度越大,模式耦合越严重,光能辐射越多,损耗越大。当光纤和变形器参数确定后,(1)式可简化为

$$\alpha_m = A_m h^2, \quad (2)$$

式中 $A_m = \frac{1}{4}KL \left\{ \frac{\sin[(q - \Delta\beta)L/2]}{(q - \Delta\beta)L/2} \right\}^2$, 可看成为一个比例系数。图 2(a) 为光纤微弯光功率变化 $\Delta\Phi$ 随光纤微弯

幅度 h 的变化曲线^[6], 其中 ML 为普通多模光纤, SMSL 为普通单模-多模-单模光纤。由图 2(a) 可以看出, $\Delta\Phi - h$ 曲线具有明显的二次曲线特征, 普通多模光纤的二次拟合曲线如图 2(b) 所示, 拟合公式为

$$\Delta\Phi = 0.007h^2, \quad (3)$$

式中 $\Delta\Phi$ 单位为 mW, h 单位为 $10 \mu\text{m}$ 。

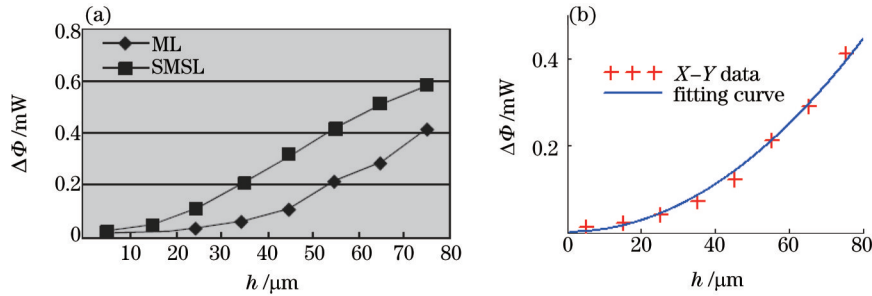


图 2 (a) 1.5 mm 齿距传感器微弯光功率随位移的变化实验曲线; (b) 普通多模光纤的二次拟合曲线

Fig.2 (a) Experimental curves of micro-bend optical power vary with the displacement of sensor of 1.5 mm pitch; (b) quadratic curve fitting of ordinary multimode fiber

2.2 梯形弹簧光纤微弯传感器原理

图 1 中, 圆形膜片的四周为橡胶, 具有很大的伸缩性, 因此当膜片两侧存在气压差时, 膜片只是整体移动, 不产生变形, 压力通过变形器活动板传递给梯形弹簧。梯形弹簧如图 3(a) 所示, 该弹簧承受的压力增加时, 弹簧圈从大端开始并死, 随着并死圈数的增多, 有效圈数相应的减少, 弹簧刚度也随之逐渐增大, 直到弹簧完全压并为止, 这一阶段压力与形变量呈非线性关系, 其形变量 h 与弹簧所受压力 p_s 的关系曲线如图 3(b) 所示。图 3(b) 实验曲线表明梯形弹簧形变量对气压值的响应呈现二次曲线非线性特性, 对图中的实验曲线进行拟合, 可得拟合方程为

$$p_s = 0.82h^2, \quad (4)$$

式中 p_s 单位为 N, h 单位为 mm。

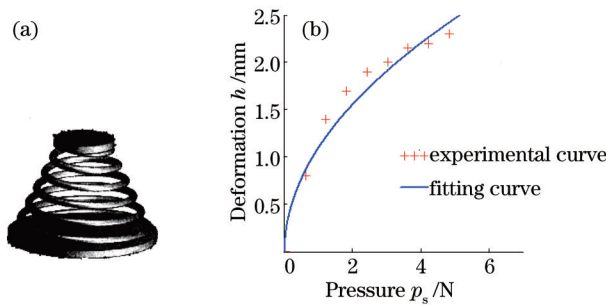


图 3 (a) 梯形弹簧; (b) 响应曲线

Fig.3 (a) Trapezoidal spring; (b) its response curves

图 1 中采用了 2 个梯形弹簧, 每个弹簧受到的压力为 $p_s = \frac{p}{2}$, 于是由 (2) 式和 (4) 式可得

$$\alpha_m = \frac{A_m}{1.64} p = \eta p, \quad (5)$$

式中 $\eta = \frac{A_m}{1.64}$ 为光纤微弯衰减比例系数, (5) 式表明采用梯形弹簧的光纤微弯气压传感器的光强度衰减输出与膜片两侧差压 p 具有线性传感特性。这是因为当施加在弹簧上的压力增加时, 弹簧形变量随着减小, 可抵消光纤变形器位移传感的非线性。

3 实验结果与分析

光纤微弯气压传感器实验装置如图4所示。实验装置中LD光源输出的连续光经过3 dB耦合器等量分解到传感光纤和参考光纤中,传感光纤和参考光纤的输出光由PIN光电探测器PD1和PD2探测。在参考光纤中插入了一个光衰减器,用于补偿传感光纤因微弯变形器引起的附加损耗。在传感光纤中连接了一个包层模消除器,用于去除光纤微弯时从纤芯耦合到包层的光。传感光纤和参考光纤均为多模光纤(其数值孔径 $NA=0.19$,纤芯半径 $a=25\ \mu\text{m}$),传感光纤输出光强随变形器位移变化而变化,变形器的位移变化量由膜片下方的参考气室和膜片上方的测量气室的气压差决定。PD1和PD2构成一个差动检测电路,将光纤输出光强度差转化为电压信号,送至输出显示。其中变形器总齿数为10齿,齿距为2.9 mm。

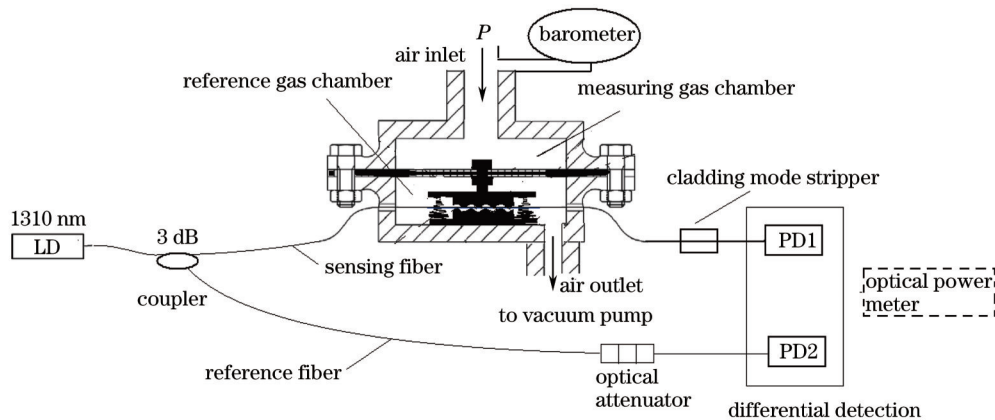


图4 光纤微弯气压传感器实验装置原理图

Fig.4 Schematic of experiment device of fiber micro-bend pressure sensor

3.1 测量光路损耗和光源波动影响的消除

实验将参考气室的出气口与大气相通,使测量气室和参考气室压力相同,此时膜片压差为0,即 $p=0$,光纤处于平直状态,可认为无微弯损耗。先用光纤功率计测量传感光纤输出端的光功率,此时测量到的光功率即为LD光源入射到传感光纤扣除光路损耗后的光功率 Φ_0 。然后,用同一台光纤功率计测量参考光纤输出端的光功率,通过调节光衰减器使参考光纤输出端的光功率也为 Φ_0 ,这样在任何时候测量气压时都能从参考光纤获得 Φ_0 ,基本可排除光路损耗和光源不稳定的影响。在不同压差条件下(在参考气室气压为0 MPa条件下,通过真空泵抽气改变测量气室的压力),实验通过改变LD驱动电流使入射到传感光纤的光功率在一定范围内波动,分别测量传感光纤和参考光纤输出端的光功率 Φ_p 和 Φ_0 ,并计算微弯损耗系数 $\alpha_m = -10 \lg(\Phi_p/\Phi_0)$,测量结果见表1。可见,当压差为0.04 MPa时,在光源光功率变化0.2 mW(光功率波动约 $\pm 15\%$)情况下,用功率计测量的光纤微弯损耗系数为2.09 dB~2.19 dB,约波动 $\pm 2.5\%$,当压力为0.08 MPa时,光纤微弯损耗系数为5.13 dB~5.28 dB,约波动 $\pm 1.5\%$,可见光源波动的影响得到明显的改善。

表1 光源光功率变化的损耗系数测量结果

Table 1 Measurement results of loss coefficient as light source power changes

Parameter	Value									
p/MPa	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Φ_0/mW	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Φ_p/mW	0.302	0.345	0.365	0.392	0.425	0.150	0.163	0.182	0.194	0.215
α_m/dB	2.19	2.09	2.16	2.19	2.17	5.23	5.28	5.18	5.25	5.13

3.2 测量系统的标定

当采用2个光电探测器PD1和PD2分别测量传感光纤和参考光纤输出端的光功率 Φ_p 和 Φ_0 时,由于光电探测器信号经放大器放大后的输出电信号为电压信号,需要对电压信号进行标定。光电探测器检测的光功率和输出电压的关系为 $\Phi_p = \frac{C_1}{S_1 K_1} V_1$, $\Phi_0 = \frac{C_2}{S_2 K_2} V_2$,这里 V_1 和 V_2 分别是光电探测器PD1和PD2的输出电压; S_1 、 S_2 是光探测器积分灵敏度; K_1 、 K_2 是放大器增益; C_1 和 C_2 为定标常数。

定标常数的确定与3.1节确定 Φ_0 的方法相同,首先用光功率计测量方法将光衰减器固定,使 $p=0$ 时传感光纤和参考光纤输出端的光功率相等,再将光电探测器PD1和PD2连接到传感光纤和参考光纤输出端,此时应有 $\Phi_0 = \frac{C_1}{S_1 K_1} V_{10} = \frac{C_2}{S_2 K_2} V_{20}$,以参考光纤输出电压为参考,令 $C_2=1$,可得 $C_1 = \frac{S_1 K_1 V_{20}}{S_2 K_2 V_{10}}$ 。根据 $\alpha_m = -10 \lg(\Phi_p / \Phi_0)$,则有

$$\alpha_m = -10 \lg\left(\frac{V_{20} V_1}{V_{10} V_2}\right). \quad (6)$$

(6)式说明,光纤微弯损耗的测量只需测量无压力(无微弯)时传感光纤和参考光纤的光电探测器输出电压 V_{10} 和 V_{20} ,以及有压力时传感光纤和参考光纤的光电探测器输出电压 V_1 和 V_2 ,而与探测器灵敏度等参数无关。

3.3 实验测量结果

测量系统标定后,采用如图4所示测量装置实际测量了不同气压下的PD1和PD2的输出电压值,并计算光纤微弯气压传感器气压测量灵敏度系数。

当压差 $p=0$ 时,光纤微弯衰减为0,测得PD1输出电压为 $V_{10}=205$ mV,PD2输出电压为 $V_{20}=232$ mV。

用真空泵将气压传感器膜片下方的参考气室抽成真空,再用真空泵抽气办法改变气压传感器膜片上方测量气室的气压值,模拟高空气压变化。得到测量气室和参考气室的气压差 p ,PD1输出电压测量曲线如图5所示,由于光源在测量期间没有波动,PD2输出电压为 $V_2=232$ mV基本不变,即 $V_2=V_{20}$,代入(6)式并作泰勒展开(只保留线性项)可得

$$\alpha_m = -10 \lg\left(\frac{V_1}{205}\right) \approx 4.34 \left(\frac{205 - V_1}{205}\right), \quad (7)$$

将(7)式代入(5)式即为

$$V_1 = 205 - 47.2\eta p = 205 - Gp, \quad (8)$$

式中 $G=47.2\eta$ 为传感器气压测量灵敏度系数。由图5实验数据可知当 $p=0.04$ MPa时, $V_1=125$ mV,可得灵敏度系数 $G=2000$ mV/MPa,若测量系统电压分辨率为1 mV[8 bit模数(A/D)转换精度],则气压分辨率可达 5×10^{-4} MPa。

图5曲线同时显示4次测量结果,具有良好的测量重复性。

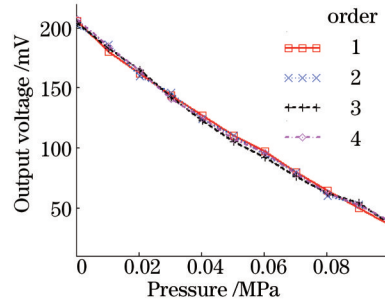


图5 梯形弹簧光纤微弯传感器的实验测试曲线

Fig.5 Experimental voltage-pressure curves of fiber micro-bend sensor with trapezoidal spring

4 结 论

提出了一种利用梯形弹簧的压力非线性特性补偿光纤微弯传感器非线性的方法,设计了一种结构简单、检测方便、成本低的光纤气压传感器。并采用差动检测的方法克服了强度型光纤传感器的光路损耗不稳定问题。实验结果表明,测量结果只与传感光纤和参考光纤的光电探测器输出电压有关,而与光源波动、探测器灵敏度、光路损耗等参数无关。实验测试了光纤气压传感器的电压-压力响应曲线,结果说明传感器具有较好的线性响应特性,得到气压测量灵敏度系数 $G=2000$ mV/MPa,能够满足气象及飞行器高度监测中对气压测量的要求。

参考文献

- 1 Xiao Shaorong, Zhu Ping, Ben Fulai. Analysis on characteristics of optical fiber sensor for atmospheric pressure[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 1042-1047.
肖韶荣, 朱平, 贲富来. 光纤气压传感器特性分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1042-1047.
- 2 Zhu Jiali, Wang Ming, Cai Dongyan, *et al.*. A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0428002.
朱佳利, 王鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里-珀罗微压传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0428002.
- 3 Ni Min, Ran Zengling, Lu En, *et al.*. Fiber-optic tip pressure sensor fabricated by 157 nm laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120606.
倪敏, 冉曾令, 鲁恩, 等. 157 nm 激光微加工制作的微光纤压力传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120606.
- 4 Li Zhizhong, Luo Hong, Yang Huayong, *et al.*. Side-hole fiber grating sensing characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1081-1086.
李智忠, 罗洪, 杨华勇, 等. 边孔光纤光栅的传感特性[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1081-1086.
- 5 Liu Hongyue, Zeng Jie, Liang Dakai, *et al.*. Long-period fiber grating atmospheric pressure sensor based on micro-bending characteristic[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8): 1692-1696.
刘宏月, 曾捷, 梁大开, 等. 基于盒膜结构的微弯式长周期光纤光栅气压传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1692-1696.
- 6 Zhao Shuai, Guo Jin. Experimental study of fiber micro-bend sensor[J]. Ome Information, 2010, 27(11): 66-69.
赵帅, 郭劲. 光纤微弯传感实验研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(11): 66-69.
- 7 Wu Mei. Design and Analyze of Optical Fiber Microbend Displacement Sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
吴媚. 光纤微弯位移传感器的设计和分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- 8 Guo Xiarui, Yang Dexing. Experimental investigation on microbending loss properties in air-guiding photonic bandgap fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2432-2436.
郭夏锐, 杨德兴. 带隙型光子晶体光纤微观弯曲传输损耗特性分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2432-2436.
- 9 Zhang Yulong, Jia Dagong, Li Shuai, *et al.*. Study of displacement sensor based on few-mode multi-core fiber[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905006.
张玉龙, 贾大功, 李帅, 等. 基于多芯少模光纤位移传感器的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905006.
- 10 Wu Lishuang. Experimental study of the characteristics of the light field of the laser output through the D-shaped multimode fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 090603.
吴丽双. 激光经D形多模光纤输出的光场特性实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090603.
- 11 Wang Huiwen, Jiang Xianjin, Zhao Changming, *et al.*. Applications of Optical Fiber Sensing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001: 37-38.
王惠文, 江先进, 赵长明, 等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 37-38.

栏目编辑: 王晓球