

DWDM 技术在新型波长解调方法中的应用

杨洋^{1,2}, 刘兵^{1,2}, 赵勇², 杨洋^{1,2}, 王辉¹, 赵亚丽¹, 杜瑶²

(1. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000;

2. 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000)

摘要: 为实现光纤传感器的波长解调, 以 8 通道 50 GHz 密集型波分复用器作为光纤光栅压力传感器中的解调工具, 依据各个通道的中心波长作为波长的标定基准, 利用从各通道中获得的光功率输出值获得光纤光栅反射光谱分布曲线的包络, 并以高斯多项式拟合法作为光纤光栅波长寻峰算法, 最终获得光纤光栅反射光谱的中心波长的准确位置, 从而实现结构简洁、成本低廉、全光纤的波长解调系统, 系统压力与波长的线性拟合度为 0.996 5, 实验测得的波长分辨率可达 0.3 pm, 最大引用误差为 2.6%, 测量精度为 0.16 MPa。

关键词: DWDM; 寻峰算法; 波长解调; FBG 压力传感器; 标定基准

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0822007

Application of DWDM technology in new wavelength demodulation method

Yang Yang^{1,2}, Liu Bing^{1,2}, Zhao Yong², Yang Yang^{1,2}, Wang Hui¹, Zhao Yali¹, Du Yao²

(1. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China;

2. Instrumentation Engineering Technology Research Center of the Hebei Province, Chengde 067000, China)

Abstract: In order to realize the wavelength demodulation of the optical fiber sensor, a 8 channel 50 GHz dense wavelength division multiplexer was used as the demodulation tool of the fiber Bragg grating pressure sensor. Taking the center wavelength of each channel as the calibration standard, the optical power output obtained from each channel was utilized to acquire the envelope of the distribution curve of the fiber grating reflection spectrum. By using the Gauss polynomial fitting method as peak-peek algorithm of fiber grating wavelength, the accurate position of the center wavelength of the fiber grating reflection spectrum was obtained and a simple structure, low cost, all-fiber wavelength demodulation system was achieved. The experimental results show that the linear fitting degree of the system pressure and wavelength is 0.996 5, the measured wavelength resolution is 0.3 pm, the maximum reference error is 2.6%, and the measurement accuracy is 0.16 MPa.

Key words: DWDM; peak-peek algorithm; wavelength demodulation; FBG pressure sensor; datum calibration

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2016-01-23

基金项目: 科技部火炬计划(2014GH550108); 河北省高等学校科学研究计划(QN2015152, QN2016216)

作者简介: 杨洋(1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤测试技术方面的研究。Email: yangy1958@sohu.com

0 引言

光纤光栅压力传感器由于具有本质安全,在易燃易爆的环境下安全可靠、抗电磁干扰等特点,因此近年来在各类压力测量仪表的研究中光纤光栅压力传感器成为一个热点。一些研究成果已经在石油勘探等众多领域得到应用:例如火箭军工程大学张志利等、中国计量学院龚华平等、大连理工大学王花平等、海军工程大学吴晶等、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所许宁等分别将光栅压力传感器应用在阵地安全监测、强度梁上的振动监测、沥青路面检测、船舶结构检测、井下压力温度测量中^[1-5]。在开展上述光纤压力测试过程中,光纤光栅压力传感器的一项核心技术就是选择与这种传感器相适应的解调方式。为此国内外专家先后提出了包括可调法布里-珀罗(F-P)滤波器法、可调谐激光器波长扫描法、非平衡马赫-曾德尔干涉仪解调法、压电陶瓷(PZT)匹配光纤光栅滤波法等多种波长解调方法^[6-9]。这些解调方案有不同的优缺点,但整体来讲系统成本高、技术复杂是共性的问题,这在一定程度上制约了光纤光栅类仪表的发展。近年来作为结构简单、低成本解调方法的边缘解调技术被广泛加以采用,且根据解调手段的不同,衍生出多种边缘解调方式,研究人员先后提出利用长周期光纤光栅、带通滤波器、波分复用器(WDM)作为解调器,并进行了一些有意的尝试^[10-12]。这类解调方式具有操作简单和价格低廉等优点,但上述利用边缘解调的方法从本质上是一种强度解调,与真正意义上的波长解调相比,这种强度解调受外界环境及光源等测试系统影响较大,测量精度较低,其研究成果很难实现产品的工业化生产。为此,近些年广大科技工作者围绕寻求新的波长解调的方式方法进行了深入的研究与探索,希望能够找到一种结构相对简单、成本相对低廉且能实现波长解调的方法,并为此进行了一些有意的尝试。伴随着密集型波分复用器技术(DWDM)的不断发展与完善,笔者等将研究方向投向以 DWDM 作为基本解调工具,并以数学上高斯多项式拟合法作为光纤光栅波长寻峰算法,很好地解决了这一问题,使低成本、全光纤的波长解调成为现实。

1 新型解调技术方案提出与实现

1.1 技术方案的提出

文中这一新的技术方案的提出是基于对光纤光栅反射光谱的分析后获得的。实验显示,作为光纤光栅反射窄带光谱本身也有一定的谱宽度,当它对应密集波分复用器 DWDM 时,当窄带光谱的中心波长移动到 DWDM 某一个信道端口时,在这个信道端口上可以得到最大的光功率输出,因此 DWDM 对光纤光栅反射的窄带光谱的中心波长首先具有波长选择性探测器的作用;但当两个相邻信道的波长间隔较小时,就会出现图 1 给出的结果,即当某一信道出现主极大强度时,作为其相邻信道端口会出现次极大和再次极大强度,而那些远离的信道端口也会有一定的强度输出。因此借助 DWDM 可以得到各个信道中所出现的强度分布的作用。伴随着压力的改变,FBG 反射光谱中心波长会产生移动,DWDM 的各个信道强度分布会随着发生改变,此时所形成的新的包络中心应该与反射窄带光谱的中心是一致的。因此如果借助 DWDM 来获得 8 个信道中出现的反射光谱的强度分布,并能通过一定的方式来找到强度分布曲线的峰值位置就实现了反射光谱中心波长精确测量的目的。

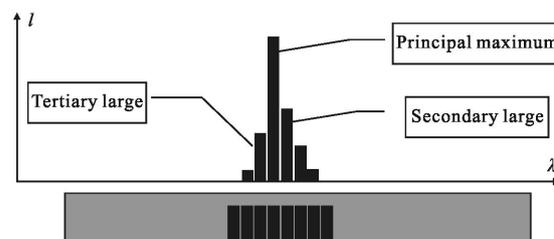


图 1 反射信号在不同信道上强度分布图

Fig.1 Figure of intensity distribution of the reflected signal on different channels

显然,要实现上述目的,一是波分复用器要信道间隔要尽量小,二是光纤光栅反射光谱宽度不能太窄。因此选择合理的 DWDM 参数及光纤光栅参数成为实现波长解调的关键因素。

1.2 DWDM 参数的确定

理论上讲 DWDM 的信道间隔越小所能够得到的数据越充分,但伴随着信道间隔变小,一方面

DWDM 的技术水平还难以实现,另一方面为了保障传感器具有一定的中心波长移动量,信道数量就会变多,这样无论对 DWDM 本身而言还是对于后续的信号处理都会增加大的技术难度和成本,因此 DWDM 技术参数的选则要适当。根据多次实践,认为目前采用八通道、信道间隔为 50 G(0.4 nm)的密集型波分复用器比较合理。为此,笔者等最终与相关企业共同开发了 8 通道 DWDM,其端口中心波长分别为:1 552.6、1 552.2、1 551.8、1 551.3、1 550.96、1 550.51、1 550.11、1 549.75 nm。

1.3 光纤光栅参数的选择

作为一般的反射光纤光栅(FBG),一般希望光谱宽度越窄越好,但为了能够使得反射光谱能在 DWDM 的多个信道同时出现有效实验数据,必须选择光谱宽度较宽的 FBG,但同时也注意到,并不是光谱宽度越宽越好,因为伴随着光谱宽度的增加,光谱顶端变缓,从而使得测试灵敏度下降。根据多次实践,认为针对所选择的八通道 50 G 的 DWDM,FBG 参数中的半宽度选用 0.2~0.3 nm 左右比较适宜。

1.4 寻峰原理与寻峰算法的确定

该次实验中寻峰方法采用的是高斯多项式拟合法。有关这种拟合方法,参考文献[13]中专门对质心法、三次样条插值法、最小二乘法、高斯多项式拟合法四种方法进行了深入研究,结果表明,在相同环境下,高斯多项式法最稳定,误差小且平稳,这从一个侧面证明了该方法的有效性和可靠性。

有关寻峰原理如下:LOBOAB 等人在 1997 年的研究表明^[14],具有高边模抑制比光纤光栅可以近似用高斯分布来描述。按照上述假设,设定光纤光栅的反射光功率密度谱曲线可以用高斯函数近似表示:

$$R(\lambda, \lambda_0)=R_0\exp[-\alpha(\lambda-\lambda_0)^2] \quad (1)$$

式中: R_0 为峰值反射率; $\alpha=4\ln 2/h^2$ 为 FBG 常数; h 为 FBG 半宽度; λ_0 为 FBG 中心波长。

对公式(1)两边取对数后有:

$$y=\ln R \quad (2)$$

并定义: $a=-4\ln 2/h^2$, $b=8\ln 2\lambda_0/h^2$, $c=\ln R_0-4\ln 2(\lambda_0/h^2)^2$ 。

则公式(1)可化为:

$$y=a\lambda^2+b\lambda+c \quad (3)$$

再利用多项式拟合法,得到:

$$\lambda_0=-\frac{b}{2a} \quad (4)$$

显然,通过对数变换,原来的对数分布变成了一个以波长为横坐标,光强度为纵坐标的一个二次多项式的抛物线方程,而这个抛物线方程的极值位置就是所要寻求的中心波长值。

有关寻峰算法,首先在 Matlab 软件中将实验数据导入,导入后,经过处理,获得一个以光功率为元素的矩阵 A ,该矩阵的行为每个压力值所对应的各个信道的功率值,列则为每个信道在不同压力下所对应的功率值。然后,在编写 Matlab 中编写程序,做循环,从以上导入的矩阵 A 中提取出每个压力值下所对应的有效功率值,并以行为单位存储在矩阵 B 中。最后,通过编程,提取出矩阵 B 中的每一行数据,分别以该行数据为纵坐标,以 8 个信道的中心波长为横坐标,做高斯多项式拟合,从而获得每个压力值下所对应的中心波长。

1.5 波长分辨率

在波长解调系统中波长分辨率是评价解调系统的一个重要的技术指标。为了减少问题的复杂性,由参考文献[15]分析可知:实验中波长测量分辨率 $\delta\lambda$ 可以由光功率变化实验曲线中波形两侧线性区域拟合直线斜率的平均值 $\Delta P_m/\text{div}$ 、测量系统的最小探测光功率 δP_m 和波长调谐灵敏度 $\Delta\lambda/\text{div}$ 三方面因素共同决定,即波长分辨率可表示为:

$$\delta\lambda=\frac{\text{div}}{\Delta P_m} \delta P_m \frac{\Delta\lambda}{\text{div}} \quad (5)$$

式中:div 为悬臂梁形变量调节器的刻度数。

根据参考文献[10]可知,由于文中所采用的光纤光栅弹簧管压力传感器中悬臂梁形变量调节器的刻度数 div 与压力改变量 ΔP 成正比,因此可以用 ΔP 代替 div,即公式(5)变为:

$$\delta\lambda=\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_m}\right) \delta P_m \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta P}\right) \quad (6)$$

2 实验测试结果与分析

2.1 测试系统组成

整个测试系统结构图如图 2 所示。

整个测试系统包括:压力校验台、悬臂梁式光纤光栅弹簧管压力传感器、8 通道 DWDM、光电探测与显示系统、数据处理系统等部分。FBG 安置在弹簧管压力传感器内,并构成悬臂梁式光纤光栅弹簧管压力传感器,这个光纤光栅弹簧管压力传感器安装在

一个微型压力校验台上(虚线部分),压力校验台上同时还安装着一个标准压力表,这个表与所研制的光纤光栅弹簧管压力测试系统的内部是连通的,可以根据实验需要得到加在光纤光栅压力传感器上的压力。当标准压力表中的压力从 0 开始,每次增加 0.3 MPa,直至 6 MPa 时,利用光电探测与显示系统可同时在 DWDM 的 8 个端口上获得相应的功率输出值,这里光电探测与显示系统用高精度多通道功率计代替,光源采用 ASE 宽带光源,光纤光栅反射谱半宽度 $h=0.26$ nm,压力从 0~6 MPa 时所对应的光纤光栅反射光谱中心波长从 1 552.37 nm 移动到 1 550.69 nm。光纤光谱分析仪(OSA)用来监测光纤光栅反射中心波长的移动情况。

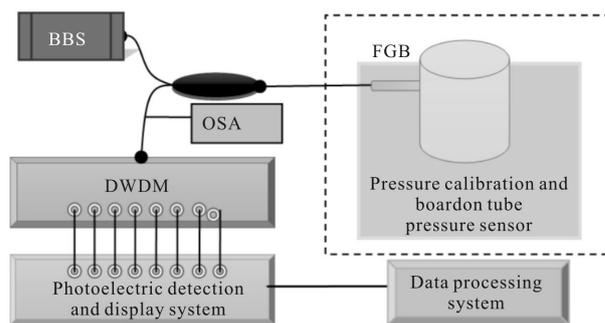


图 2 波长解调测试系统结构图

Fig.2 Test system structure diagram of the wavelength demodulation

2.2 实验数据与实验曲线

DWDM 8 个信道的测试实验数据见表 1。

表 1 DWDM 的 8 个端口功率测试数据

Tab.1 Test data of power about DWDM 8 port

Standard pressure gauge /MPa	Wave division 1 /nW	Wave division 2 /nW	Wave division 3 /nW	Wave division 4 /nW	Wave division 5 /nW	Wave division 6 /nW	Wave division 7 /nW	Wave division 8 /nW	a/nm^2	b/nm	Central wave-length/nm
6.0	0.12	0.13	0.15	4.71	1 120	1 590	11.82	0.19	-17.150 1	53 188.9	1 550.686
5.7	0.14	0.13	0.28	13.9	2 060	2 040	5.26	0.12	-18.013 1	55 867.01	1 550.729
5.4	0.13	0.342	0.423 7	61.65	2 620	680.7	0.325	0.10	-7.689 28	23 848.42	1 550.759
5.1	0.13	0.452	1.24	128.9	2 810	580.8	0.294	0.13	-7.634 48	23 679.45	1 550.823
4.8	0.13	0.452	3.24	579.7	4 180	201.5	0.338	0.12	-10.356 1	32 124.3	1 550.991
4.5	0.12	0.16	6.43	1 590	4 210	45.58	0.346	0.14	-12.841	39 835.1	1 551.091
4.2	0.12	0.15	11.28	2 610	2 930	3.78	0.25	0.11	-15.660 4	48 584.23	1 551.178
3.9	0.22	0.41	71.59	3 550	831.5	0.310 5	0.12	0.10	-9.558 74	29 655.86	1 551.242
3.6	0.320	0.827 7	150.4	4 810	658.9	0.27	0.15	0.14	-10.531 7	32 675.92	1 551.310
3.3	0.322	1.88	413.2	3 870	292.3	0.28	0.15	0.16	-11.958 2	37 104.09	1 551.403
3.0	0.14	4.81	949.5	3 480	49.35	0.353	0.17	0.16	-14.565 4	45 196.59	1 551.508
2.7	0.17	7.72	1 320	3 150	7.88	0.25	0.16	0.17	-17.130 4	53 158.06	1 551.568
2.4	0.303	22.31	2 360	2 660	1.13	0.21	0.14	0.14	-19.291	59 864.86	1 551.628
2.1	1.24	173.2	2 660	466.0	0.593	0.23	0.15	0.15	-9.4731 9	29 399.16	1 551.703
1.8	2.92	681.8	2 280	231.8	0.376	0.15	0.15	0.16	-10.539	32 708.66	1 551.796
1.5	7.06	1510	1 020	75.08	0.350	0.16	0.16	0.15	-10.493 1	32 567.94	1 551.879
1.2	17.00	3160	538.2	10.12	0.23	0.16	0.14	0.14	-11.728 5	36 405.01	1 551.986
0.9	34.24	4180	273.8	1.34	0.22	0.15	0.15	0.10	-12.646 9	39 257.55	1 552.068
0.6	106.3	4370	114.3	0.670 1	0.11	0.17	0.15	0.12	-10.748 8	33 367.73	1 552.157
0.3	385.0	4760	49.46	0.714	0.14	0.16	0.14	0.13	-7.791 92	24 190.82	1 552.302
0											1 552.37

上述表格里 0 MPa 为初始测试点,所对应的波长值 1 552.37 nm 是通过光谱仪中反射光谱中心波

长的位置所读取出来的。图 3~4 是依据表 1 中的实验数据得到压力在 5.7 MPa 和 2.7 MPa 时利用高斯

多项式拟合法所获得的拟合曲线。

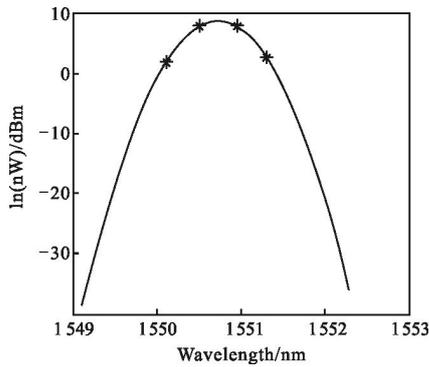


图 3 压力为 5.7 MPa 时所对应的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of the pressure which is 5.7 MPa

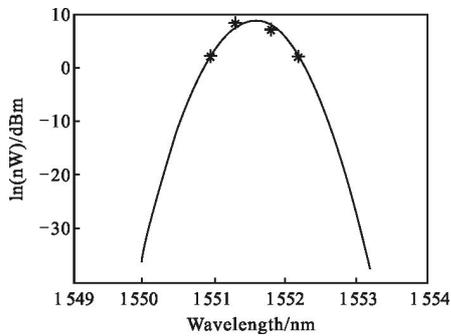


图 4 压力为 2.7 MPa 时所对应的拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of the pressure which is 2.7 MPa

为了考察波长随压力变化的整体关系，用图 5 分别给出波长随压力变化的关系曲线；同时为了获得波长分辨率，图 6 还给出了按照表 1 的实验数据并利用高斯分布函数拟合出的第 3 信道压力与输出功率的关系曲线。

图 5 中曲线的线性回归方程分别为：

$$y = -0.286x + 1552.327 \quad (7)$$

该实验曲线的线性拟合度为 0.996 5。

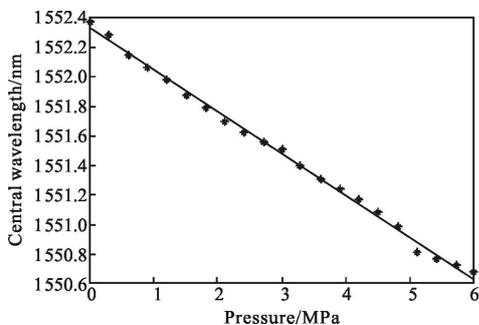


图 5 传感器的压力与波长变化关系曲线

Fig.5 Relation between pressure and wavelength of the sensor

图 6 的高斯拟合曲线函数为：

$$y = 2622e^{-\left(\frac{x-2.154}{0.7617}\right)^2} \quad (8)$$

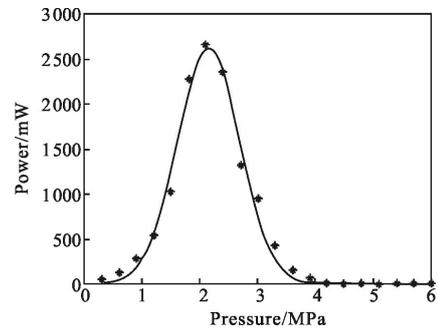


图 6 信道 3 压力与输出光功率的关系曲线

Fig.6 Curve of the relation between pressure and output power of the channel 3

为了定量检验这种解调方法的准确性和可靠性，这里通过表 2 的测试结果对其进行验证。表 2 给出了标准压力表上显示值和通过公式(7)得到的测试压力值。在选择压力测试点时，根据图 5 传感器的压力与波长变化关系曲线可以看出出现最大偏差在 5.1 MPa 附近，因此为了后面获得最大引用误差和测量精度，所选择实验测试点中将 5.1 MPa 包括在内。

表 2 实验测试结果

Tab.2 Results of the experimental test

Pressure gauge /MPa	Experimental wavelength/nm	Pressure test value /MPa	Pressure reference error
3.00	1551.508	2.864	2.3%
5.10	1550.823	5.259	2.6%
1.50	1551.879	1.567	1.1%

2.3 实验结果分析

实验研究表明，当选用的半宽度为 0.1~0.2 nm 光纤光栅时，8 个信道的输出功率值中一般只有 2~3 个是有效的(0.3 nW 以上)，而在本次实验中调整了光纤光栅的半宽度在 0.26 nm 后，使得 8 个信道的输出功率值中一般可以有 4 个以上是有效的，这对于利用高斯多项式进行曲线拟合从而获得极值位置，也就是光纤光栅反射中心波长是非常重要的。

由公式(6)可以得到实验中波长测量分辨率 $\delta\lambda$ 。由表 1 实验数据可知由于各信道插入损耗等因素的有所不同，信道出现的功率最大值有所不同，选取各

个信道拟合曲线两侧线性区域直线斜率较小的信道 3(图 5)的平均值=1/1 100(MPa/nW)、功率计可分辨的最小稳定显示值功率 δP_m 为 1 nW、波长调谐灵敏度 $\Delta\lambda/\Delta P=0.3(\text{nm}/\text{MPa})$,因此实验测得波长分辨率 $\delta\lambda$ 近似为 0.3 pm。

按照测量精度等于测量值与“真实值”之间的最大偏差的绝对值的定义,根据表 2 中实验结果可以得到压力试验系统的测量精度为 0.16 MPa。同时按照精度与最大引用误差的关系可以同时得到该压力测试系统的最大引用误差为 2.6%。

实验结果显示该实验测试系统的最大引用误差还比较大,分析误差原因主要受到 DWDM 技术本身的制约。实验采用信道间隔为 0.4 nm(50 G)的 DWDM,从而导致使得 8 个信道的输出功率值中一般只能有 4 个是有效的,由于有效数据偏少,导致利用有效数据实现高斯多项式进行曲线拟合从而获得极值位置(波长)会有偏差;除此之外,DWDM 中各信道中心波长值随温度的漂移、光电转换中非线性等因素也会给实验结果带来误差。

利用公式(6)来确定波长分辨率时, $\Delta P/\Delta P_m$ 的选取是利用每个信道拟合曲线两侧线性区域直线斜率的平均值得到的,但文中利用高斯多项式拟合法寻峰法获中心波长过程中,每一条寻峰曲线都是通过多个信道的实验数据所获得的。这里面二者在确定波长分辨率方面应该存在一定差异,但由于篇幅的限制这里没有进行深入的分析 and 探讨。

3 结 论

借助 DWDM 技术,并选用高斯多项式拟合法作为光纤光栅波长寻峰算法获得光纤光栅反射光谱的中心波长的准确位置,并实现波长解调的技术路线是科学有效的;与传统的可调法布里-珀罗(F-P)滤波器法、可调谐激光器波长扫描法、压电陶瓷(PZT)匹配光纤光栅滤波法等多种波长解调方法相比,这种新型解调方法的优势在于不需要通过电控扫描方式实现解调过程,从而使得解调部分完全不需要任何电信号,同时解调系统具有结构简单、成本低廉的特点;利用这种方式所研发的压力传感器,核心技术在于依据 DWDM 各个通道的中心波长作为波长的标定基准,而由于 DWDM 本身对温度不敏感,因此温度给这种解调系统带来的影响基本可以忽略;该

压力测试系统的测量范围为 0~6 MPa,测量精度为 0.16 MPa,最大引用误差为 2.6% 解调系统的波长分辨率可达 0.3 pm。

参考文献:

- [1] Zhang Zhili, Fu Zhulin, Zhao Bing, et al. FBG sensing technology application in detection of bastion safety [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 492-496. (in Chinese)
张志利,付祝林,赵兵,等. 光纤光栅传感技术在阵地安全监测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 492-496.
- [2] Gong Huaping, Yang Xiao, Tu Yumeng, et al. Vibration detection characteristics of FBG sensor and resistance strain gauge [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 810-813. (in Chinese)
龚华平,杨效,屠于梦,等. FBG 传感器和电阻应变仪的振动监测特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 810-813.
- [3] Wang Huaping, Zhou Zhi, Wang Qian, et al. Strain transfer errors of optical fiber sensors embedded in asphalt pavement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1499-1507. (in Chinese)
王花平,周智,王倩,等. 光纤传感器埋入沥青路面基体的应变传递误差[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1499-1507.
- [4] Wu Jing, Wu Hanpin, Huang Junbin, et al. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 311-317. (in Chinese)
吴晶,吴晗平,黄俊斌,等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 311-317.
- [5] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(8): 629-635. (in Chinese)
徐宁,戴明. 分布式光纤温度压力传感器设计 [J]. 中国光学, 2015, 8(8): 629-635.
- [6] Zhang Yi, Zhuang Zhi, Li Qisheng, et al. Temperature compensation type optical fiber hydrogen concentration measurement technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1573-1577. (in Chinese)
张毅,庄志,黎启胜,等. 一种温度补偿式光纤氢气检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1573-1577.
- [7] Zhang Hong. Research on interferometer demodulation method of fiber grating sensor systems [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008(11): 20-23. (in Chinese)
张虹. 光纤光栅传感系统干涉法信号解调技术研究[J]. 仪

- 表技术与传感器, 2008(11): 20-23.
- [8] Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun, et al. Nonlinear opto-mechanical transformation equation for FBG strain sensors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9): 1946-1950. (in Chinese)
吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的非线性方程[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1946-1950.
- [9] Jiang Xiaofeng, Lin Chun, Xie Haihe, et al. MEMS F-P interferometry pressure sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2257-2262. (in Chinese)
江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. MEMS F-P 干涉型压力传感器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2257-2262.
- [10] Qiao Wen, Li Gang. Design of a new style of fiber bragg grating demodulation system [J]. *Journal of Optoelectronicso Laser*, 2007, 18(10): 1188-1190. (in Chinese)
乔文, 李刚. 一种新型光纤光栅传感器解调系统 [J]. 光电子·激光, 2007, 18(10): 1188-1190.
- [11] Zhang Jian, Zhao Hong, Xiong Yanling. Study on FBG sensing demodulation with CWDM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(11): 1465-1467. (in Chinese)
张剑, 赵洪, 熊燕玲. 应用 CWDM 实现 FBG 传感解调的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1465-1467.
- [12] Yang Yang. Development of edge interrogation technology-based FBG Bourdon tube pressure sensor [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 53-55. (in Chinese)
杨洋. 基于边缘解调技术的光纤光栅波登管压力传感器的研制[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 53-55.
- [13] Cai Nenghong, Yan Lianshan, Chen Juanzi, et al. Peak-detection algorithm in tunable F-P filter based demodulation system for FBG sensors [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013, 101(3): 100-102. (in Chinese)
蔡能宏, 闫连山, 陈娟子, 等. 基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅传感解调系统寻峰算法对比分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2013, 101(3): 100-102.
- [14] Loboab, Ribeiro L, Ferreira L A, et al. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(4): 934-939.
- [15] Liu Yunqi, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun, et al. Theoretical and experimental researches on tunable filtering detection technique of fiber grating sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 88-92. (in Chinese)
刘云启, 刘志国, 郭转运, 等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 88-92.