

一种光纤光栅阵列波长解调系统

娄辛灿^{1,2}, 郝凤欢^{1,2*}, 刘鹏飞^{1,2}, 李博^{1,2}

¹中国船舶重工集团公司第七一五研究所, 浙江 杭州 310023;

²杭州应用声学研究所声呐技术重点实验室, 浙江 杭州 310023

摘要 提出了一种波长扫描与时分复用相结合的光纤光栅阵列波长解调系统,通过对波长扫描光信号的脉冲调制,实现了对树状拓扑结构式大容量光纤光栅阵列的波长解调。搭建了光纤光栅阵列波长解调系统,验证了其具有高复用度光纤光栅阵列的波长解调能力,测试了光纤光栅阵列波长解调性能。结果表明,该系统实现了传感器阵列各阵段光纤光栅的波长识别与解调,波长测量精度为 2.5 pm,短时间内测量波动在 ± 2 pm 之间。

关键词 光纤光学; 时分复用; 波分复用; 波长解调; 波长扫描

中图分类号 TN247; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.030604

A Wavelength Demodulation System for Fiber Bragg Grating Array

Lou Xincan^{1,2}, Hao Fenghuan^{1,2*}, Liu Pengfei^{1,2}, Li Bo^{1,2}

¹715th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

²Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A wavelength demodulation system combined wavelength scanning with time division multiplexing for fiber Bragg grating (FBG) array is proposed. Wavelength demodulation for a large capacity FBG array with a tree topology structure is realized by the pulse modulation of the optical signal with a wavelength scanning. The FBG array wavelength demodulation system is built and the ability of wavelength demodulation for FBG arrays with a high degree of reusability is verified. The permanence of the wavelength demodulation for FBG array is tested. The experimental results show that this system can achieve the identification and demodulation of the wavelength for the FBG in each subarray with the wavelength accuracy of 2.5 pm and the fluctuation range is within ± 2 pm.

Key words fiber optics; time division multiplexing; wavelength division multiplexing; wavelength demodulation; wavelength scanning

OCIS codes 060.3735; 060.4258; 280.4788

1 引言

光纤光栅传感器作为一种重要的传感与检测手段已被广泛应用于多个领域,特别是在桥梁、船舶等大型结构体的健康监测方面,对光纤光栅传感器的数目与复用度的要求越来越高。因此,研究大容量、高复用度光纤光栅传感器阵列以及相应的波长解调技术不仅具有重大的现实意义,还具有很高的学术价值^[1-5]。

近几十年来,国内外在高复用度光纤光栅传感

器阵列及波长解调技术方面开展了大量、深入的探索,并提出了多种光纤光栅传感器阵列解调方案^[6-8]。姜德生等^[9]提出的一种编码式光纤光栅传感检测系统,其利用光谱仪解调,阵列采用串联拓扑结构,实现了光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器的高复用与解调,但由于光谱仪存在分辨率低、扫描速度慢、体积大等问题,且串联的光纤光栅阵列结构易受光纤光栅“多反射”和“光谱阴影”的影响^[10-11],从而降低了光纤光栅反射光波长的测量准确性和精确性。李鸿强等^[12-13]提出了一种基于阵列波导光栅

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-08-20; 录用日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(11504335)

* E-mail: hfh05@mails.tsinghua.edu.cn

(AWG)的多通道光纤光栅传感系统,其采用光强法解调技术,实现了4通道32个FBG传感器的同时解调,但该方法对FBG的反射波长有严格要求,可解调的波长范围较小,且需较稳定的光源和较多的光电探测器,不利于工业化应用。

本文提出了一种波长扫描与时分复用(TDM)相结合的光纤光栅传感器阵列波长解调系统,其通过对波长扫描光信号的脉冲调制,实现了对一种树状拓扑结构式大容量光纤光栅阵列的波长解调。实验搭建了光纤光栅阵列波长解调系统,并对其在高复用度光纤光栅阵列的波长解调性能方面开展了实验验证与测试。

2 系统构成与解调原理

提出的光纤光栅阵列波长解调系统如图1所示,由光源(ASE),可调谐滤波器(FFP)、声光调制器(AOM)、光纤耦合器、Fabry-Perot(F-P)标准具、光探测器,以及控制与信号处理电路等构成。其

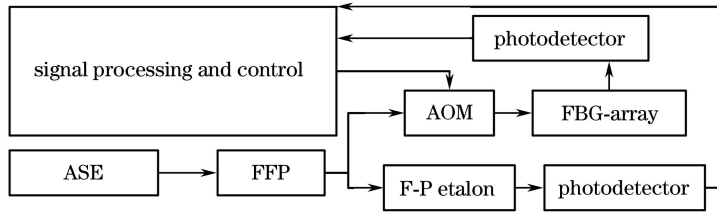


图1 光纤光栅阵列解调系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic of FBG array demodulation system

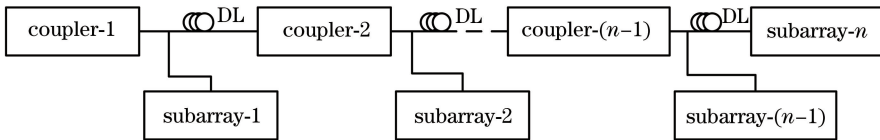


图2 光纤光栅阵列结构示意图

Fig. 2 Schematic of FBG array

设计的光纤光栅传感器阵列波长解调系统针对图2所示类型的阵列结构,采用波长扫描与时分相结合的解调方案,在实验验证环节,针对4时分阵列,使用宽带光源与可调谐滤波器波长扫描输出。但对于更大的阵列情况,其损耗大,存在信号强度不够的可能,此时可采用扫频激光器来代替宽带光源与可调谐滤波器波长扫描输出。控制与信号处理电路向可调谐滤波器输出由阶梯台阶电压构成的控制信号,以实现可调谐滤波器的波长扫描功能,扫描步长为 2 pm ,如图3所示。声光调制器输出脉冲信号,该脉冲信号和控制与信号

中宽谱光源与可调谐滤波器用于实现波长的扫描;光纤耦合器将可调谐滤波器的出射光路分成参考光路与传感光路两个支路;F-P标准具位于参考光路,其输出产生的标准梳状光谱用于传感波长的标定;声光调制器将进入传感光路的连续光调制成脉冲光;光探测器将参考光路与传感光路的光信号转换成电信号;控制与信号处理电路用于控制信号的产生、探测信号的采集以及数据的处理与运算。

如图2所示,光纤光栅阵列解调系统的传感器阵列由 n 个相同的光纤光栅传感器阵段通过 $n-1$ 个光纤耦合器与连有光纤延时线(DL)的主干光纤连接构成,从光纤光栅传感器阵列首端至尾端各光纤耦合器的分光比依次为 $(n-1):1, (n-2):1, \dots, 1:1$,从而使得进入光纤光栅传感器阵段的光强相近,其中光纤光栅传感阵段是由波长不同的光纤光栅传感器串联而成。各光纤延时线具有相同的长度,且长度大于光纤光栅传感器阵列长度。

处理电路与可调谐滤波器输出的阶梯台阶电压保持同步输出,从而实现了每个扫描波长光信号的脉冲调制。调制输出的脉冲信号为 λ ,因可调谐滤波器扫描步长为 2 pm ,故而相邻 λ 之间间隔为 2 pm 。脉冲信号经光纤耦合器与延时线圈依次到达各光纤光栅传感阵段的光纤光栅传感器反射回光探测器,经传感阵列后采集到的4个信号分别属于阵段1(2,3,4),而每一台阶下第1(2,3,4)个采集到的信号重新组合即为阵段1(2,3,4)的信号,通过将不同台阶下相应顺序的信号提取就构成了该阵段的扫描光谱。

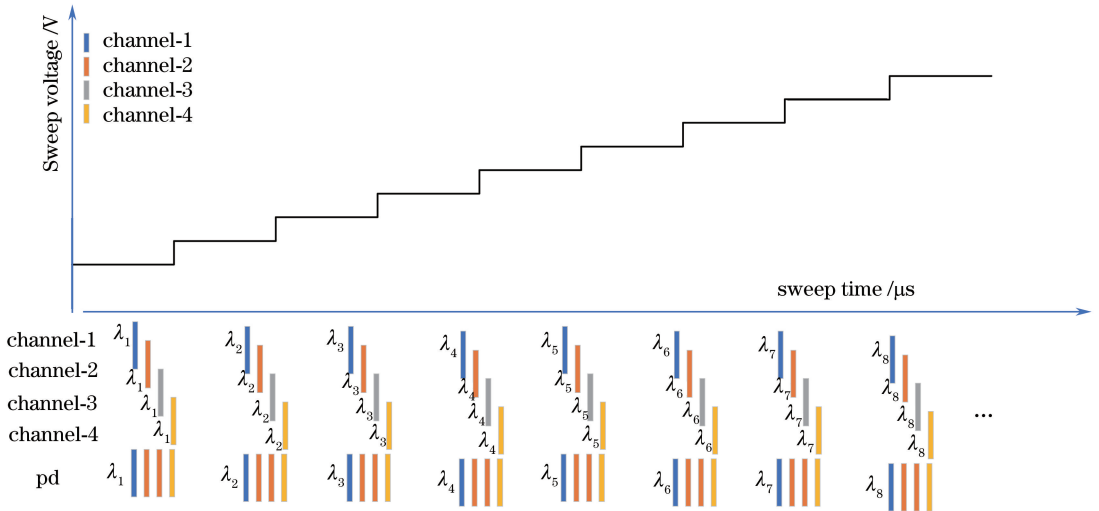


图3 时分与波长扫描的理论模型

Fig. 3 Theoretical model of time division and wavelength scanning

控制与信号处理电路根据各光纤光栅传感器阵列返回光信号的时间顺序与采样关系,将连续采集的光纤光栅传感器阵列信号划分成各光纤光栅传感器阵列的传感信号。F-P标准具所在参考通道采用和传感通道采样率相同的设置,进行同步采样,此时,参考通道每个扫描台阶将有4个采样点,分别对应传感通道的4个阵列。对各光纤光栅传感器阵列的数据和参考通道的数据寻峰运算结果进行插值、拟合等运算,进而获得各光纤光栅传感器阵列中光纤光栅传感器的波长值。

3 实验测试与结果分析

为了验证解调系统的性能,实验搭建了一个具有四阵列的光纤光栅传感器阵列,分束器的分光比依次为3:1,2:1,1:1,光通过光纤耦合器和延时线圈均分到4个光纤光栅传感器阵列,每个阵列长100 m,并在首端、中部、尾端分别串联3个光纤光栅传感器,阵列首端和中部串联1540 nm与1560 nm的裸光栅,阵列尾端串联1535 nm的光纤光栅温度传感器,其中各阵列间的延时线长度为150 m。光纤光栅阵列解调系统的波长扫描范围为1525~1565 nm,以2 pm步长进行台阶扫描,根据光纤光栅传感器阵列的结构特点设定扫描台阶宽度为6 μs,AOM的调制脉宽 $t=1.3\ \mu\text{s}$,FFP的扫描波形为三角波,扫描频率为4 Hz。控制与信号处理电路的采样频率为666 kHz,AD位数为16位。此时在一个扫描台阶下,控制信号与处理电路能采集4个点,而相邻阵列间,延时线圈长度为150 m,对应延时时间为1.5 μs,在采样频率为666 kHz下,若以

时钟计数值为标准,即相邻阵列相隔一个时钟计数值。

3.1 阵列波长解调测试与验证

将搭建的光纤光栅传感器阵列与波长解调系统连接,运行波长解调系统,其输出结果如图4所示,图4(a)~(d)分别为波长解调系统输出的光纤光栅传感器阵列中阵列1至阵列4的扫描光谱结果,由图可知,解调系统输出的各光纤光栅传感器阵列的扫描光谱均具有3个特征波峰,波峰数目与传感器数目相同,且波长解调系统对特征波峰的波长解算结果与各传感器的波长值一致,测试结果进一步验证了波长解调系统对光纤光栅传感器各阵列的同时解调以及对各阵列相同波长传感器的波长识别与区分。

为了进一步验证波长解调的正确性,确认所解调出的波长与各阵列的光纤光栅传感器的对应关系,开展了光纤光栅传感器阵列的动态温度测试。将各光纤光栅传感器阵列尾部波长为1535 nm的温度传感器(标记为FBG-1,FBG-2,FBG-3,FBG-4)依次从空气中放置于45℃恒温水槽中10 s,再取出放置于空气中,观测波长解调系统的输出,结果如图5所示。可以看出,某一阵段的温度传感器放入水中后,由于温度快速升高,波长迅速增大,传感器达到水温后波长保持不变,从水中拿出,温度逐渐降低,波长也缓慢减小;同时也可发现,某一阵段的传感器放入水中时,仅有解调系统中与该阵列相对应的通道的波长发生变化,而其他通道的波长不变,该测试验证了解调系统波长解调结果与光纤光栅传感器阵列各光纤光栅传感器的对应关系。

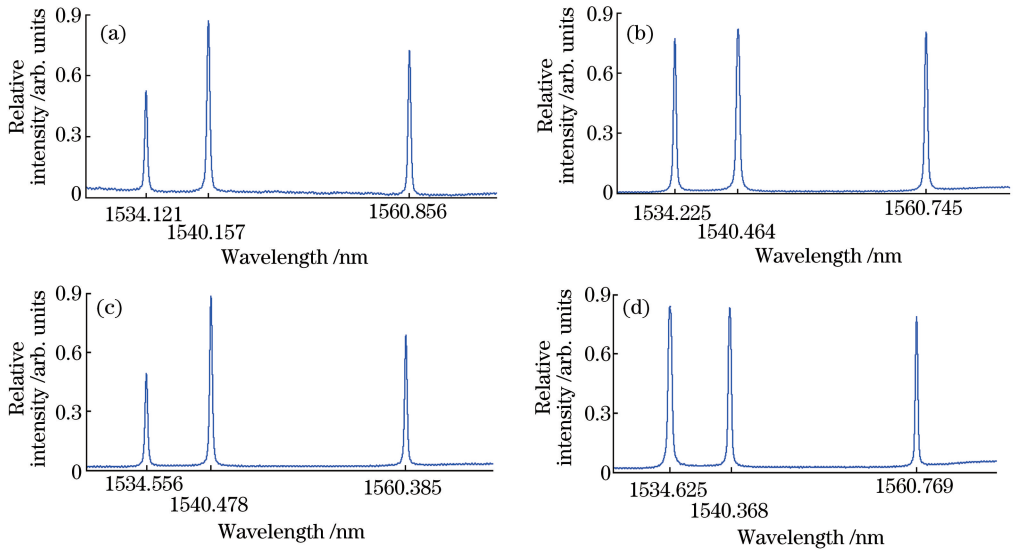


图 4 光谱。(a)阵段 1;(b)阵段 2;(c)阵段 3;(d)阵段 4

Fig. 4 Spectra. (a) Subarray-1; (b) subarray-2; (c) subarray-3; (d) subarray-4

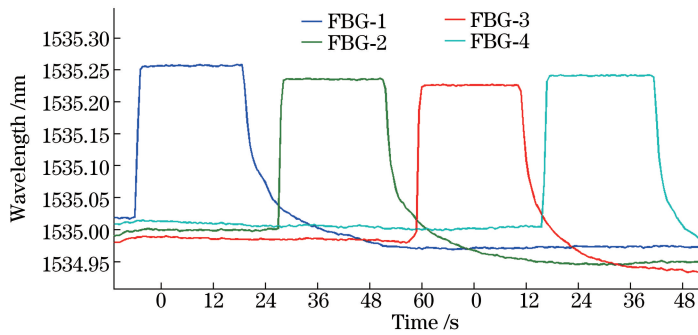


图 5 各阵段光纤光栅温度传感器的温度响应曲线

Fig. 5 Temperature response of FBG temperature sensors in each subarray

3.2 解调精度测试

通过光纤光栅温度传感器的温度测量精度测试实验对解调仪的解调精度进行确认,实验中将各光纤光栅传感器阵段尾端的 1535 nm 的光纤光栅温度传感器放置于恒温水箱中,选取 5, 10, 20, 30, 40, 45 °C 作为实验温度,标定温度与波长的关系曲线,以 8, 18, 28, 38 °C 作为温度测量点,通过

测量温度精度实现光纤光栅阵列波长解调系统解调精度的测定,各阵段解调所得波长与温度拟合曲线如图 6 所示,根据标定的温度-波长的关系计算各阵段的温度如表 1 所示,可以看出,各阵段的温度测量精度为 0.25 °C,根据实验测得的温度传感器的温度系数计算得到波长测量精度为 2.5 pm。

表 1 光纤光栅阵列波长解调系统的温度测量结果

Table 1 Temperature measurement results of FBG array demodulation system

°C

Standard temperature	FBG-1 measured temperature	FBG-2 measured temperature	FBG-3 measured temperature	FBG-4 measured temperature
7.94	8.02	8.09	7.99	7.98
17.94	17.93	17.85	18.04	17.91
27.97	27.73	27.75	27.83	27.74
37.98	37.94	38.15	37.95	38.09

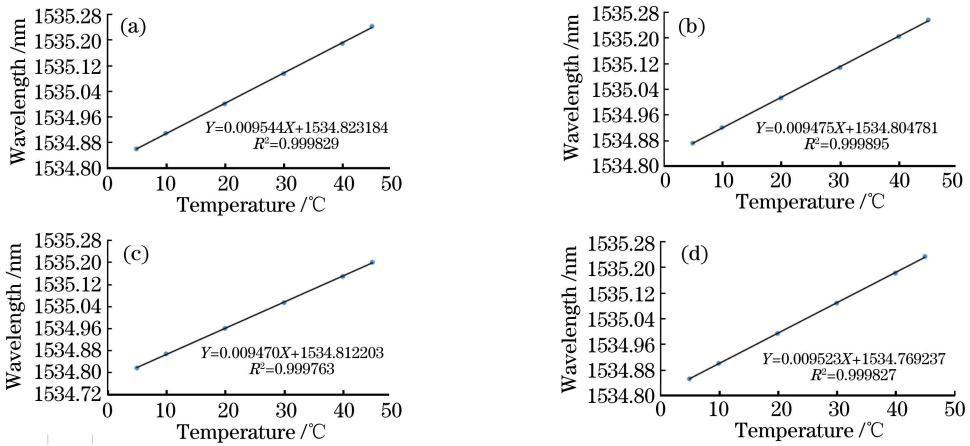


图6 光纤光栅温度传感器的波长解调结果。(a) FBG-1;(b) FBG-2;(c) FBG-3;(d) FBG-4

Fig. 6 Demodulated wavelength of FBG temperature sensor. (a) FBG-1; (b) FBG-2; (c) FBG-3; (d) FBG-4

3.3 解调波动性测试

在解调系统波动测试实验中,将光纤光栅传感器阵列各阵段尾端的光纤光栅温度传感器放置于45 °C的恒温水槽中,连续记录约35 min各阵段尾

端光纤光栅温度传感器的波长数值,如图7所示。测量结果表明,在短时间内,光纤光栅阵列波长解调系统的波长波动范围为 ± 2 pm。

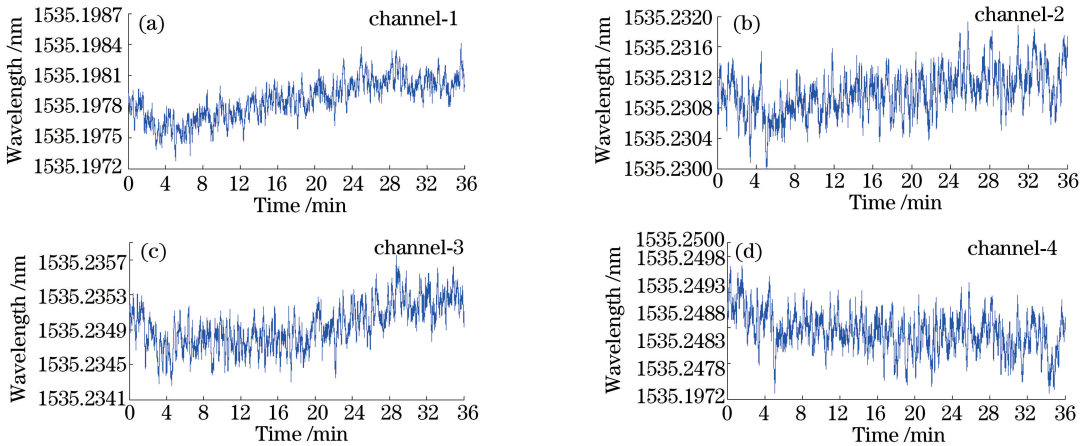


图7 45 °C时的解调波长结果。(a) FBG-1;(b) FBG-2;(c) FBG-3;(d) FBG-4

Fig. 7 Wavelength demodulation results at 45 °C. (a) FBG-1; (b) FBG-2; (c) FBG-3; (d) FBG-4

4 结 论

提出了一种波长扫描与时分复用相结合的光纤光栅传感器阵列波长解调方案,实验搭建了一套利用可调谐滤波器实现波长扫描,声光调制器实现波长扫描光信号的脉冲调制,标准具实现波长标定的光纤光栅阵列波长解调系统,并选定具有四阵段结构特征的光纤光栅传感器阵列为测试对象,开展了阵列波长解调系统的性能测试研究。实验结果表明,搭建的波长解调系统能够实现对光纤光栅传感器阵列各阵段中光纤光栅波长的精准识别与精确解调,波长解调系统的波长解调精度为2.5 pm,测量波动范围为 ± 2 pm,满足实际应用要求。

参 考 文 献

- [1] Liu P F, Hao F H, He S L, *et al.* Wavelength demodulation for distributed feedback active fiber grating sensor based on wavelength scanning [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010002. 刘鹏飞, 郝凤欢, 何少灵, 等. 基于波长扫描的分布反馈有源光纤光栅传感器波长解调[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1010002.
- [2] Wang Y B, Lan H J. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2196-2201. 王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用

- 传感网络研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2196-2201.
- [3] He S L, Hao F H, Liu P F, *et al.* High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0605003.
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605003.
- [4] Wang J, Feng D J, Sui Q M, *et al.* Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 686-691.
王静, 冯德军, 隋青美, 等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 686-691.
- [5] Cranch G, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Efficient fiber Bragg grating and fiber Fabry-Pérot sensor multiplexing scheme using a broadband pulsed mode-locked laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3798-3807.
- [6] Wang L X, Bai J J. Parallel demodulation for the multichannel distributed sensing system of fiber Bragg grating with F-P filter [J]. Optical Communication Technology, 2005, 29(12): 28-29.
王立新, 柏俊杰. 用 F-P 滤波器实现多通道分布式光纤光栅传感系统并行解调[J]. 光通信技术, 2005, 29(12): 28-29.
- [7] Wang Y H, Jian S S, Ren W H, *et al.* A train locating system based on WDM and TDM FBG series [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(8): 1084-1087.
王燕花, 简水生, 任文华, 等. 基于 WDM 和 TDM 的串联 FBG 高速列车定位系统[J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(8): 1084-1087.
- [8] Wu W, Liu X, Chen T. Research on large capacity fiber grating sensor demodulation system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(1): 143-145.
吴薇, 刘辛, 陈婷. 新型大容量光纤光栅传感解调系统研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(1): 143-145.
- [9] Jiang D S, Mei J C, Chen H B, *et al.* Study on the measurement system of temperature sensing based on encoding optic fiber gratings [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(10): 21-23.
姜德生, 梅加纯, 陈宏波, 等. 一种编码式光纤光栅温度传感检测系统的研制[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(10): 21-23.
- [10] Qi Y B, Wu G F, Wang H X. Development of fiber Bragg grating sensing multiplexing mode [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(8): 3058-3072.
祁耀斌, 吴敢锋, 王汉熙. 光纤布拉格光栅传感复用模式发展方向[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(8): 3058-3072.
- [11] Lan H J. Study of fiber Bragg grating sensor system based on WDM/TDM [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010: 15-41.
兰海军. 基于光纤光栅波/时分复用传感网络研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010: 15-41.
- [12] Li H Q, Sun J, Zhang C, *et al.* Multi-channel FBG sensor demodulation system based on arrayed waveguide grating (AWG) [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2016, 35(2): 65-71.
李鸿强, 孙杰, 张诚, 等. 基于 AWG 的多通道光纤光栅传感解调系统[J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(2): 65-71.
- [13] Zou F, Wang Y B, Feng Y K. Study on WDM/TDM distributed FBG sensor networks based on AWG [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(9): 55-57, 60.
邹芳, 王玉宝, 冯元凯. 基于 AWG 的波分/时分复用 FBG 传感器网络研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 55-57, 60.