

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240058.

光纤光缆技术与应用

程嘉慧,傅海威,陈苗,等.基于弱反射光纤光栅的温度传感解调系统[J].光通信研究,2025(3):240058.

Cheng J H, Fu H W, Chen M, et al. A Temperature Sensing Demodulation System based on Weak Reflection Fiber Bragg Grating[J]. Study on Optical Communications, 2025(3): 240058.

## 基于弱反射光纤光栅的温度传感解调系统

程嘉慧,傅海威,陈苗,李根,肖家悦

(西安石油大学 a. 陕西省油气资源光纤探测工程研究中心; b. 陕西省油气井测控技术重点实验室,西安 710065)

**摘要:**【目的】文章旨在设计并搭建一种针对弱反射光纤布拉格光栅(WFBG)的温度传感解调系统,该系统通过创新的测量流程,实现了对微弱反射信号的高精度采集与处理,旨在提高温度传感的灵敏度和线性度,同时确保系统的稳定性和重复性。【方法】文章首先构建了一个基于光/电转换器的信号采集系统,将WFBG的微弱反射信号转换并放大为电压信号;随后,通过单片机实现了对放大后的电压信号的高效采集,引入误差理论并优化重复测量平均次数,有效降低了随机误差的影响。同时采取措施减少了测量带来的潜在延时,确保快速准确的数据处理;此外,还进行了温度响应特性的实验研究,评估系统在30~80℃范围内的性能。【结果】实验结果表明,文章所提传感解调系统在温度测量范围内表现出了优异的性能。系统的温度灵敏度高达11.55 pm/℃,线性度高达0.992 62,表明了其在温度测量上的高精度和良好的线性特性。系统的稳定性与重复性也经过严格测试,进一步证实了其在实际应用场景中的可靠性和有效性。【结论】综上所述,文章成功设计并实现了一种结构简单、成本效益高的WFBG温度传感解调系统,该系统不仅在温度传感方面表现出了高精度和高稳定性,且其创新的结构和优化的测量流程也使其适用于弱光栅传感阵列信号的解调。这一研究成果对于推动光纤传感技术的发展具有重要意义。

**关键词:**弱反射光纤布拉格光栅;单片机;解调;温度传感

中图分类号:TN929

文献标志码:A

## A Temperature Sensing Demodulation System based on Weak Reflection Fiber Bragg Grating

CHENG Jiahui, FU Haiwei, CHEN Miao, LI Gen, XIAO Jiayue

(a. Shanxi Provincial Fiber Optic Detection Engineering Research Center for Oil and Gas Resources; b. Shanxi Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Well Measurement and Control Technology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** 【Objective】The purpose of this study is to design and build a sensing demodulation system for Weak Reflection Fiber Bragg Gratings (WFBG). The system optimizes the measurement process through innovative methods to achieve high-precision acquisition and processing of weak reflection signals. The aim is to improve the sensitivity and linearity of temperature sensing, while ensuring the stability and repeatability of the system. 【Methods】In the research, we first constructed a signal acquisition system based on an optoelectronic converter, which can convert and amplify the weak reflection signal of WFBG into a voltage signal. Subsequently, efficient collection of amplified voltage signals was achieved through a microcontroller unit. Introducing error theory and optimizing the number of repeated measurements can effectively reduce the impact of random errors. At the same time, measures were taken to reduce the potential delay caused by measurement, ensuring fast and accurate data processing. In addition, experimental studies on temperature response characteristics were conducted to evaluate the performance of the system in the range of 30~80℃. 【Results】The experimental results show that the designed sensing demodulation system exhibits excellent performance within the temperature measurement range. Specifically, the system exhibits a high temperature sensitivity of 11.55 pm/℃ and a high linearity of 0.992 62, indicating its high accuracy and good linear characteristics in temperature measurement. In addition, the stability and repeatability of the system have been rigorously tested, further confirming its reliability and effectiveness in practical application scenarios. 【Conclusion】In summary, this study successfully designed and implemented a structurally simple and cost-effective WFBG sensing demodulation system. This system not only exhibits high accuracy and stability in temperature sensing, but also its innovative structure and optimized measurement process make it suitable for demodulating signals from weak grating sensor arrays. This research achievement is of great significance for promoting the development of fiber optic sensing technology.

**Key words:** WFBG; microcontroller; demodulation; temperature sensing

## 0 引言

近年来,弱反射光纤布拉格光栅(Weak-Reflec-

tion Fiber Bragg Grating, WFBG)因其较低的反射率和优异的阵列复用能力,在多个领域如航空航天、石油化工、结构健康监测及周界安全等得到了广泛

收稿日期:2024-03-08; 修回日期:2024-04-09; 纸质出版日期:2025-06-10

基金项目:陕西省重点研究计划资助项目(2019GY-176)

作者简介:程嘉慧(1999-),女,江苏盐城人。硕士,主要研究方向为光纤传感。

通信作者:程嘉慧,硕士。E-mail:chengjiahui990@163.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

应用<sup>[1-5]</sup>。与传统光纤光栅相比,WFBG的反射率显著降低,使其在单一光纤中可复用更多光栅,能实现对更广泛区域的监测,同时避免了因反射信号过强引起的信号干扰。此外,WFBG传感器保留了光纤光栅传感器的所有优点,如小体积、高灵敏度、固有的安全性、抗电磁干扰能力强以及稳定性好<sup>[6]</sup>,这些特性使其在构建复杂传感网络和提升传感器性能方面展现出了独特优势<sup>[7-10]</sup>。

传感信号的解调是WFBG温度传感的关键环节,通过监测WFBG的波长漂移量,可以准确检测出温度等物理量的变化。目前,常用的解调技术包括可调谐法布里-珀罗滤波器<sup>[11]</sup>(Tunable Fabry-Perot Filter,TFPF)、干涉仪解调法<sup>[12]</sup>和可调谐光源解调法<sup>[13]</sup>等。这些方法各有优劣,但高分辨率、低成本和测量稳定性是研究者追求的共同目标。相较于其他技术,可调谐光源解调法以其良好的测量稳定性和高分辨率的特点,成为了一个研究热点。本研究基于此技术开发了一套系统,通过单片机采集光电探测器(Photodetector,PD)输出的电压信号,实现对不同波长下电压数据的接收与采集,并传输至上位机,从而完成WFBG温度传感解调。该系统结构简单、测量精度高、稳定性和重复性优异,展现了良好的温度线性响应度,对于分布式和准分布式传感系统的研究具有重要意义。

## 1 光纤光栅温度传感原理及解调技术

WFBG作为一种具有较低反射率的光纤光栅,其温度传感原理与普通光纤光栅相同。当多个波长的光进入光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)时,仅特定波长的光被反射,其余光向后透射。该特定波长称为布拉格波长 $\lambda_{\text{Bragg}}$ ,由光纤光栅周期 $\Lambda$ 和有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 共同决定:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

FBG对外部环境敏感,外界环境温度的改变将使FBG产生热膨胀和热光效应,改变 $\Lambda$ 和 $n_{\text{eff}}$ ,进而导致 $\lambda_{\text{Bragg}}$ 的漂移,引起FBG反射谱的相应变化。考虑温度在纤芯中作用的情况,可得:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{B}}}{\lambda_{\text{B}}} = (\alpha + \xi)\Delta T = k_{\text{T}}\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{B}}$ 为波长变化量, $\lambda_{\text{B}}$ 为初始布拉格波长, $\alpha$ 为FBG的热膨胀系数; $\xi$ 为FBG的热光系数; $k_{\text{T}}$ 为温度传感灵敏度系数; $\Delta T$ 为温度变化量; $k_{\text{T}} = \alpha + \xi$ 。由式(2)可知,光纤光栅传感器的 $\Delta\lambda_{\text{B}}$ 与 $\Delta T$ 呈线性关系,可用于精确温度测量。通过监测

$\Delta\lambda_{\text{B}}$ ,可实现对 $\Delta T$ 的精确监测。

解调技术是实现这一过程的关键,涉及从FBG反射的光谱中提取温度信息的方法,解调过程通常包括以下步骤:①光源发射:系统通过可调谐光源发射包含多个波长的光信号,以确保能够覆盖FBG的反射波长;②信号反射与采集:特定的 $\lambda_{\text{Bragg}}$ 被反射,其余波长透过,反射的光信号由PD接收,并转换为电信号;③信号处理与解调:电信号经过放大和滤波处理后,通过高精度的光谱仪或其他解调设备进行分析,以精确测量 $\lambda_{\text{Bragg}}$ 的变化;④温度计算:根据 $\lambda_{\text{Bragg}}$ 的变化量和已知的 $k_{\text{T}}$ ,计算出实际的温度变化。这一计算基于温度变化与波长漂移之间的线性关系。基于WFBG的温度传感解调系统能够实现对环境温度的高精度监测。

## 2 实验系统搭建

### 2.1 系统整体设计

本文设计的WFBG温度传感解调系统如图1所示,系统包括可调谐激光器、环行器、WFBG、PD、STM32单片机和个人计算机(Personal Computer,PC)。可调谐激光器发出的光经过环行器,到达WFBG后再反射回来的光信号进入PD中将光信号转化为电信号,通过STM32单片机采集对应波长下的电压信号并将数据传输至PC中进行数据处理。

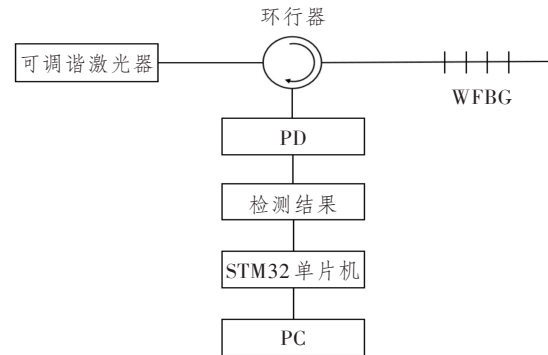


图1 WFBG解调系统设计

Figure 1 Design of a WFBG demodulation system

可调谐激光器维持稳定1 mW的光功率,根据固定步进步长0.01 nm来改变光源的波长,经过环行器后扫描反射率为-20 dB而3 dB带宽为0.1 nm的WFBG,不同波长对应不同的反射光功率,即对应PD放大并转化后的不同电压值,将电压信号送入检波电路后利用单片机采集电压数据至PC中进行数据处理,在中心波长处的反射功率达到峰值,检测的电压值也达到峰值,分析电压幅值与波长的数据完成对系统的解调,当环境温度发生改

变时,中心波长会发生一定量的偏移,可实现对WFBG传感器外界环境下的温度监测。

## 2.2 系统硬件设计

该解调系统的硬件部分由STM32单片机和检波电路组成。系统选用的单片机型号为STM32F407,中央处理器(Central Procressing Unit, CPU)主频最高可达168 MHz,拥有3个12位模拟数字转换器(Analog Digital Converter, ADC)和两路12位数字模拟转换器(Digital Analogue Converter, DAC),使得模数转换更为迅速和精确。此外,单片机还支持直接内存访问(Direct Memory Access, DMA),可直接在存储器与外设之间实现数据传输,节省CPU资源,提高系统整体效率。STM32F407单片机以其高性能、低功耗和高速度的特性为系统提供了强大的运行支持。

PD检测到经环行器反射回来的光信号,并将光信号转换为电压信号,传送至单片机中进行ADC采集,单片机读取电压时易出现电压波动较大的问题,因此在单片机采集电压数据之前接入一个基于锗管的峰值检波电路。该峰值检波电路的主要组成部分为1个锗管二极管和1个一阶低通滤波电路,检波电路工作的原理是通过电容的充电放电作用,保证输出端口检测到的信号始终在峰值附近,维持电压信号输入的稳定性<sup>[14]</sup>。

## 2.3 单片机程序设计

在电压信号的接收与采集部分,采用STM32单片机作为主控,利用其内部12位ADC资源进行模拟量的采集,本文设计了一种高效的数据采集策略,系统每采集一定次数的数据后求其平均值,并将这一平均值通过串口(USART)输出。串口作为一种全双工的异步通信方式,不仅使数据采集过程更加便捷,而且通过串口助手实现人机交互,极大地提高了操作的灵活性。用户若需连续采集 $n$ 组数据,只需在串口助手输入 $n$ (十六进制)并发送,单片机便根据接收到的命令执行相应的采集任务,并将结果通过串口回传至电脑端,便于数据的保存和进一步分析。

为了进一步提升响应速度和减少测量带来的潜在延时,我们在程序中设置了每次测量电压显示的时间间隔为5 ms。这一较快的采集速度不仅保证了数据采集的实时性,且有效缩短了数据处理和输出的总时间,使得系统即便在进行大量数据采集时也能保持高效运行。此外,通过优化程序代码和采集流程,即使在高速采集条件下,也能确保系统的稳

定性和数据准确性。

单片机的程序流程图如图2所示,设备上电后对串口和ADC进行初始化操作,初始化完成后进入死循环,当PC端通过串口向单片机发送数据时,触发串口中断,跳出死循环执行串口中断服务函数,判断接收到的数据是否正确,如果正确,将其数值赋值给ADC连续数据采集总次数 $V\_Max$ ,使能ADC进行数据采集,获取ADC的值,将所采集到的值进行数据转换,转换为实际电压值,将电压值通过串口输出,通过 $Counter++$ 操作判断已完成的ADC采集次数 $Counter$ 是否 $< V\_Max$ 次,如果是,则循环采集并通过串口向PC端输出实际电压值,否则便终止采集,失能ADC;如果接受到的数据不正确则结束中断,回到死循环继续执行之前的任务。

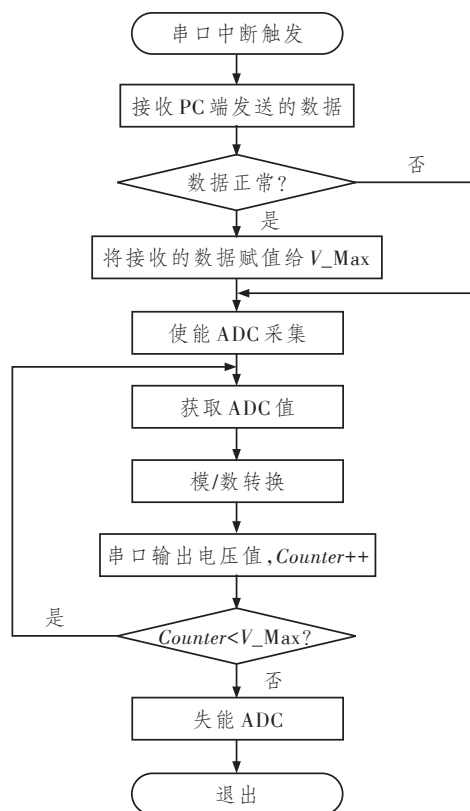


图2 单片机程序流程图

Figure 2 The flowchart of microcontroller unit program

## 3 实验结果与分析

实验中采用波长为1 544.92 nm、3 dB带宽为0.1 nm且反射率为1%的WFBG进行实验研究,可调谐激光器发出的光经过WFBG反射回来后进入PD中,光/电转换后的电信号由单片机进行接收与采集,传输至PC中进行数据处理。在光栅的中心波长附近1 544.8~1 545.1 nm的范围内间隔

0.01 nm 改变可调谐光源的波长,导致对应的反射光功率发生变化,即单片机采集到的电压值发生改变,即可获得光栅的反射谱。单片机采集工作过程中,设计不同的测量平均次数进行采集,得到的 Gaussian 拟合反射谱分别如图 3 和图 4 所示,在 1~50 次测量平均过程中,测量平均次数为 1 时,电压值波动较大,数据的随机误差较大;测量平均次数为 10 时,即可形成基本的反射谱;测量平均次数为 35 和 50 时,电压值基本稳定,其反射谱形状相似, Gaussian 拟合效果良好。不同测量平均次数结果对比如表 1 所示,由表知,在测量平均次数为 35 时,其 3 dB 带宽与真实值最接近,FWHM 误差最小,相比 50 次测量平均,大幅缩短了测量时间,系统的解调速度得到提升。通过多次实验,在 35 次测量平均下系统的稳定性良好,所以实验选取 35 次测量平均的

效果作为 WFBG 的反射谱进行研究,其具有良好的稳定性与准确性,提升了系统的解调速度。

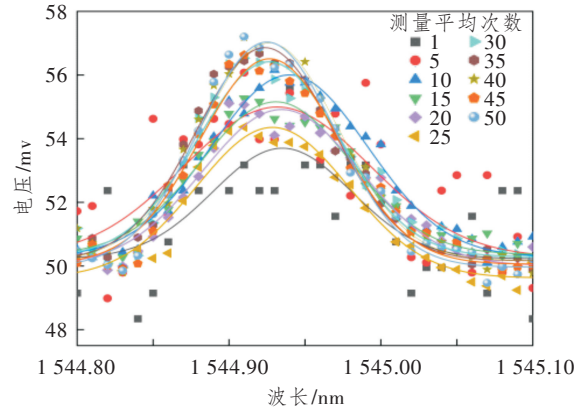


图 3 不同测量平均次数反射谱效果

Figure 3 Reflectance spectra effects with different measurement average counts

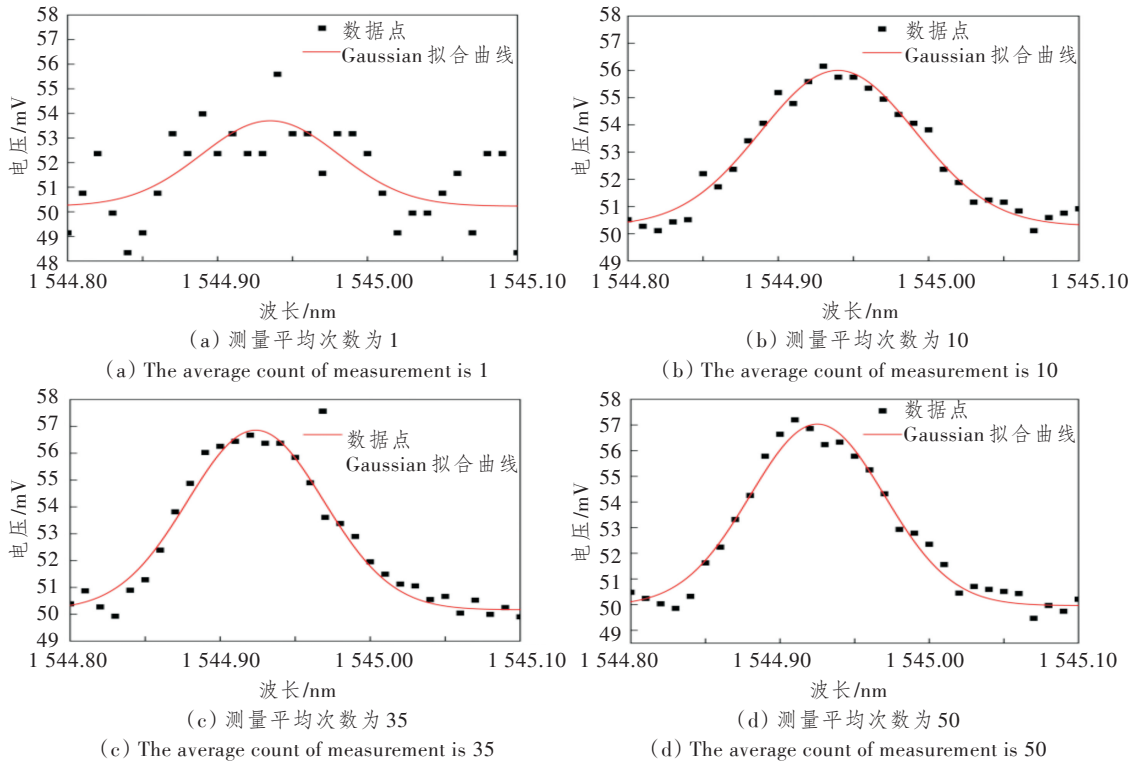


图 4 不同测量平均次数的 Gaussian 拟合对比

Figure 4 Comparison of Gaussian fitting for different measurement average counts

表 1 不同测量平均次数结果对比

Table 1 Comparison of results with different measurement average counts

测量平均次数	波长/nm	FWHM/nm	FWHM 误差值	测量平均次数	波长/nm	FWHM/nm	FWHM 误差值
1	1544.935 10	0.101 600	0.012 600	25	1544.928 64	0.118 010	0.023 010
5	1544.931 73	0.144 650	0.049 650	30	1544.926 37	0.110 020	0.015 020
10	1544.939 75	0.121 260	0.026 260	35	1544.923 65	0.106 780	0.011 780
15	1544.930 82	0.116 289	0.021 286	40	1544.926 60	0.107 130	0.012 130
20	1544.934 57	0.122 280	0.027 280	45	1544.926 80	0.107 720	0.012 720

注:FWHM 为半峰全宽。

多次测量平均后得到的反射谱效果良好,具有良好的稳定性和重复性,在该解调系统中对 WFBG 进行升温,升温设备使用恒温加热控制平台,可以精准控制温度,温度精度达到  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在  $30\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内进行加热,每间隔  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  采集一组数据,将得到的每一组数据进行 Gaussian 拟合,在该范围内得到的反射谱中心波长漂移如图 5 所示,温度每上升  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,中心波长平均增加约  $0.06\text{ nm}$ ,具有良好的线性关系。图 6 所示为中心波长漂移的线性拟合图,经过优化的测量平均次数不仅使得系统的温度灵敏度达到了  $11.55\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ,而且保证了在  $30\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  的广泛温度范围内温度测量的高线性度 ( $R^2:0.992\ 62$ ),这一成果与现有研究相比,展现了本系统在结构简单性、成本效益、稳定性和重复性方面的显著优势,同时实现了  $10\text{ pm}$  的波长分辨率和高温度灵敏度,为光纤传感技术的进一步发展奠定了坚实的基础。

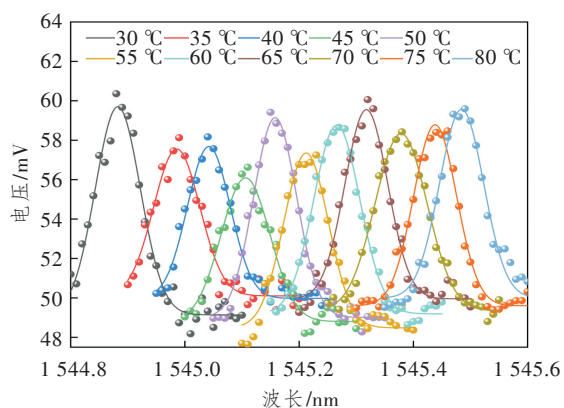


图 5 反射谱中心波长漂移

Figure 5 Drift of the central wavelength in the reflectance spectrum

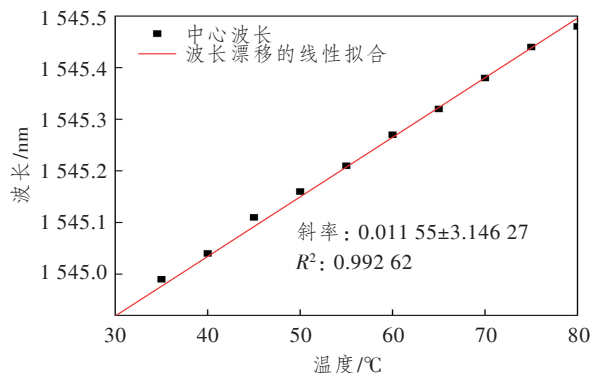


图 6 中心波长漂移的线性拟合

Figure 6 Linear fitting of central wavelength drift

## 4 结束语

本文设计了一种 WFBG 温度传感解调系统,该系统由 WFBG 的微弱反射信号经光/电转换并

放大后得到电压信号,再通过单片机采集电信号后,最终实现了对 WFBG 温度的解调。实验研究表明,该测量系统展现出了优异的稳定性和重复性。同时对 WFBG 进行了温度传感研究,其温度灵敏度达到  $11.55\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ,线性度达到  $0.992\ 62$ ,线性拟合度良好。本文设计的系统利用单片机进行解调,该研究结果对 WFBG 温度传感研究领域具有重要的参考意义。

## 参考文献:

- [1] Zhang X, Chen G, Jiang J, et al. Weak Fiber Bragg Grating based Sensing System for Cryogenic Static Test of Launch Vehicle Oxygen Tank [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 356–365.
- [2] 任杰. 基于光纤光栅的热式流量传感技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.  
Ren J. Research of Thermal Flow Sensing Technology based on Fiber Bragg Grating [D]. Xi'an, China: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [3] 寇汉鹏, 宁昭军, 陈学峰, 等. 基于弱反射光纤光栅的 OPGW 杆塔倾斜监测阵列[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(1): 46–51.  
Kou H P, Ning Z J, Chen X F, et al. Tilt Monitoring Array for OPGW Transmission Tower based on Ultra-weak Fiber Bragg Grating [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2024, 22(1): 46–51.
- [4] 顾磊, 张文轩, 秦正启. 基于弱光栅技术隧道深层围岩实时监测应用[J]. 土木工程, 2022, 11(9): 1046–1053.  
Gu L, Zhang W X, Qin Z Q. Application of Real-time Monitoring of Deep Surrounding Rock of Tunnel based on Weak Grating Technology [J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2022, 11(9): 1046–1053.
- [5] Wu J, Xu S, Qi L, et al. Life Cycle Monitoring of Off-shore Steel Pipe Piles via UWFBG Wireless Sensor Network [EB/OL]. (2023-07-24) [2024-03-08]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/2586728>.
- [6] 廖光萌, 何建新, 朱玉琴, 等. 光纤光栅传感器及其应用[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 142–149.  
Liao G M, He J X, Zhu Y Q, et al. Fiber Grating Sensor and Application [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 142–149.
- [7] 周上清. 用于超弱光纤光栅解调的光电检测系统的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.  
Zhou S Q. Research on Photoelectric Detection System for Ultra-weak Fiber Bragg Grating Demodulation [D].

- Changchun, China: Changchun University of Technology, 2020.
- [8] Zhong X, Yang M, Shi L, et al. Distributed Temperature Sensing Technology for Oil and Gas Wells based on Weak Reflection Fiber Bragg Grating[C]//2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP). Xi'an, China: IEEE, 2021: 312-316.
- [9] 邵伯成, 黄勇林. 少模光纤光栅温度和应变双参量传感研究[J]. 光通信研究, 2024(4): 230011.
- Shao B C, Huang Y L. Research on Temperature and Strain Dual Parameter Sensing of Few Mode Fiber Grating[J]. Study on Optical Communications, 2024(4): 230011.
- [10] 杨松岩, 何巍, 张钰民, 等. 镀金表面光子晶体光纤温度传感特性仿真分析[J]. 光通信研究, 2024(4): 230008.
- Yang S Y, He W, Zhang Y M, et al. Simulation Analysis of Temperature Sensing Characteristics of Photonic Crystal Fiber with Gold Plated Surface [J]. Study on Optical Communications, 2024(4): 230008.
- [11] 文丰, 张岩, 贾兴中. 基于F-P可调谐滤波器的光纤光栅解调系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 38-43.
- Wen F, Zhang Y, Jia X Z. Design of Fiber Grating Demodulation System based on F-P Tunable Filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(9): 38-43.
- [12] 徐焯, 刘涵洁, 潘震, 等. 基于PGC解调的弱光纤光栅阵列干涉式温度传感方法研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(5): 24-30.
- Xu Y, Liu H J, Pan Z, et al. Research on Interference Temperature Sensing Method of Weak Fiber Bragg Grating Array based on PGC Demodulation [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(5): 24-30.
- [13] 石彤. 快速可调谐激光光源的多点采样光纤光栅解调[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- Shi T. The Multi-point Sampling Demodulation of Fiber Grating based on Fast Tunable Laser Light [D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2021.
- [14] 赵子良, 傅海威. 基于单片机的白光干涉多点传感系统设计[J]. 光电技术应用, 2023, 38(2): 70-74.
- Zhao Z L, Fu H W. Design of White Light Interference Stress Sensing System based on Single Chip Microcomputer [J]. Electro-Optic Technology Application, 2023, 38(2): 70-74.