

高稳定光纤布拉格光栅波长标准器的研究



樊其明, 许宁, 吴婷艳, 刘志伟, 张志新

中国计量科学研究院, 北京 100029

【摘要】 依据 JJF 1804-2020《布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范》, 应使用稳定的参考标准光纤光栅对光纤光栅解调仪的波长解调示值进行校准。采用特殊设计的应力释放结构并利用智能控制算法及半导体制冷技术, 实现高精度的温度控制, 研制了一组高稳定的光纤光栅波长标准器。通过重复性考核并与商用光纤光栅测量比对, 证明研制的光纤光栅波长标准器性能远优于校准规范要求, 从而极大地提高了光纤光栅解调仪的校准不确定度。

【关键词】 光纤光栅; 标准器; 温度控制; 半导体制冷技术; 校准

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2022.0218

【引用本文】 樊其明, 许宁, 吴婷艳, 等. 高稳定光纤布拉格光栅波长标准器的研究 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(1): 50-54.

Research on High Stability Fiber Bragg Grating Wavelength Standard

FAN Qiming, XU Ning, WU Tingyan, LIU Zhiwei, ZHANG Zhixin

National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

【 Abstract】 Fiber Bragg grating (FBG) demodulators are widely used in various fields, including civil engineering, aviation, healthcare, and national defense. To comply with the *Calibration Specification for Optical Fiber Bragg Grating Sensor Network Analyzers* (JJF 1804-2020), it is crucial to calibrate the wavelength demodulation values of the FBG demodulator using a stable reference standard FBG. In this study, we developed a set of high stability FBG wavelength reference standards by utilizing a specially designed stress relief structure, intelligent control algorithm, and semiconductor refrigeration technology to achieve high precision temperature control. Through repeatability testing and comparison to commercial FBG measurements, we demonstrate that the performance of our developed FBG wavelength standards far exceeds the requirements of the calibration specification. Our results show that our FBG demodulator calibration procedure significantly improves the calibration uncertainty of the instrument.

【Key words】 fiber Bragg grating, standard, temperature control, semiconductor refrigeration technology, calibration

0 引言

光纤布拉格光栅解调仪广泛应用于民用、航空、卫生等领域。光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, 简称 FBG) 是一种新型传感器件, 它利用波长调制传感机理, 对应变和温度等变量进行测量, 将监测到的物理信息变化通过解调转化成光信号的波长变化, 从而适应大多数复杂的应用环境。光纤光栅的中心波长由光栅处的有效折射率和光栅周期决定。这两个参数受外界环境 (如应变和温度) 变化影响时, 光纤光栅的中心波长将发生改变。因此, 为保证光栅中心波长的稳定, 需尽量维持光栅所处环境

温度及应变的恒定。

光纤光栅传感信号解调 (或传感网络分析) 是光纤光栅传感器应用的关键技术之一。目前光纤光栅传感解调方法主要包括边缘滤波法、匹配滤波法、可调谐滤波法、光源波长可调谐扫描法、射频探测法、光栅啁啾法、CCD 分光仪法、干涉法等^[1], 而对光纤光栅解调仪或布拉格光纤光栅传感网络分析仪 (以下简称解调仪) 的校准, 是确保光纤光栅传感测量准确可靠的重要工作。

依据 JJF 1804-2020《布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范》, 通过标准波长计定标参考光栅,

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFF0217803)。

作者简介: 樊其明 (1970-), 中国计量科学研究院高级工程师, 研究方向: 光通信计量, 邮箱: qmfan@nim.ac.cn。

再用已知量值的参考光栅校准解调仪^[2]。由于光纤光栅对压力与环境温度非常敏感,因此参考光纤光栅结构与性能的稳定性是决定校准结果不确定度的主要因素。由于校准方法中使用的参考光栅为普通商用光栅,受环境温度与应力影响,中心波长波动较大(在校准过程中可明显看到波长示值的波动)。为此,基于特殊设计的应力释放结构研制了一组高稳定的光纤光栅波长标准器作为参考光栅,获得了更加稳定的中心波长,并搭建了测试装置对标准器特性进行了测量;同时与商用光纤光栅进行了对比,证明了该波长标准器的高稳定性,最后对整个校准过程进行了测量不确定度评定。

1 光纤光栅标准器的研制

1.1 光纤光栅标准器的结构与加工

光纤光栅标准器采用的加工方法是相位掩模法,工作原理如图 1 所示。相位掩模法具有制作简单、稳定、重复性好的特点,并且对光源的相干性没有要求。利用这种方法制作的光纤光栅的中心波长不依赖于入射波长,只与相位掩模板的周期有关。

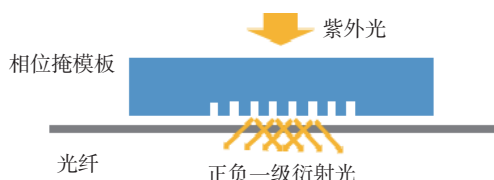


图 1 相位掩模法原理示意图
Fig.1 Principle of phase mask method

研制的光纤光栅标准器的结构外形图及封装保护结构设计如图 2 所示。标准器采用金属基片封装结构,光纤光栅固定在金属封装基片上,封装基片主要起到保护光纤和隔离应变的作用。隔离应变主要通过基片两侧的安装耳实现,该安装耳采用独特的应力释放结构设计,能够将安装表面施加的应变通过结构进行释放,避免安装表面应变对光栅产生影响。光纤光栅传感器采用胶接方式安装在温控板的上表面。当环境温度发生变化时,温控模块将温控板上表面温度控制在恒定水平,并通过封装片传递热量至光纤光栅以保证其所处的温度场恒定不变^[3-12]。

光纤光栅标准器主要技术指标如表 1 所示。

1.2 光纤光栅标准器的控温技术

半导体制冷技术又称为热电制冷技术,其制冷技术是在热电效应的理论基础之上发展起来的。由

于其快速响应和连续制冷等特性,被广泛应用于探测器和激光器的制冷等场合^[13-17]。半导体制冷器是利用半导体材料的帕尔贴效应制作而成的。帕尔贴热与电流成正比,可用式 (1) 表示。

$$Q_p = (\alpha_p - \alpha_n) T_c I_0 \quad (1)$$

其中, Q_p 为帕尔贴热; α_p 和 α_n 分别是 P 型半导体和 N 型半导体的温差电动势率; T_c 为冷面温度; I_0 为电流。

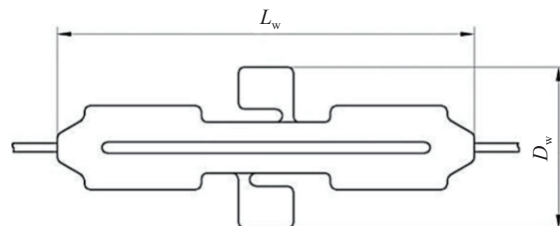


图 2 光纤光栅传感器结构外形
Fig.2 Fiber Bragg grating sensor structure

表 1 光纤光栅传感器的主要技术指标
Tab.1 Main technical specifications of fiber Bragg grating sensor

主要特性	技术指标
使用温度范围	-20℃ ~ 60℃
温度灵敏度	≤ 3 pm/℃
安装方式	胶接
温度传感器尺寸	$L_w \leq 40 \text{ mm}$, $D_w \leq 15 \text{ mm}$, 厚度不大于 3 mm
光纤直径	≤ 1 mm
光纤耐温	-40℃ ~ 100℃
光纤连接器类型	FC/APC

半导体制冷器(以下简称 TEC)是由一个 N 型半导体与 P 型半导体结合构成的 P-N 结热电偶,并通过绝缘且导热良好的陶瓷片封装。当有电流通过时,TEC 的热面散热、冷面吸热。

在传统的半导体制冷器温控系统中,若半导体制冷器的制冷功率与被控模块的散热功率不匹配,容易造成控温失败或者功率消耗大^[18]。因此,在研制中引入了精度高、可靠性强的 PID 控制算法,并设计相应电路,实现电流信号的高精度输出与温度信号的实时反馈,进而精确地控制流经 TEC 的电流。

PID 算法是控制算法的核心,是目前大多数的温度控制系统采用的算法。PID 由比例单元 P、积分单元 I、微分单元 D 组成,是基于系统输出和输入信号的偏差进行调节的一种控制方式,算法一般依

靠经验去调整 P、I、D 三个参数来达到理想的控制效果,而且控制系统越复杂,参数越难整定。常规 PID 参数的调整方法主要有临界比例度法、Ziegler-Nichols 法和衰减曲线法等。本文采用了最新的智能控制算法,即将模糊算法、神经网络算法等算法与 PID 算法相结合,不仅实现了 P、I、D 三个参数的自动整定,还能实现更快的响应速度、更小的超调量,极大地缩短了温度稳定的时间^[18-25]。测温系统采用测量范围广、精度高的热敏电阻,通过阻值的变化反映外界温度的变化。热敏电阻发出的模拟信号,经过模数转换器后,发送至单片机,实现对温度的实时监测。

1.3 光纤光栅标准器温控软硬件系统

系统硬件部分温控结构如图 3 所示。恒流驱动单元控制流经 TEC 的电流,双向温控单元控制温控对象的工作温度,温度值由单片机软件设定,同时单片机通过 RS232 接口与上位机通信,即可设置温度参数。双向温控单元主要包括温控芯片、热敏电阻、TEC 几个部分。具有负温度系数的热敏电阻 (NTC) 在 25 ℃ 时阻值为 10 kΩ,将热敏电阻接入电桥,即可测出电阻值,进而得到热敏电阻位置的工作温度。

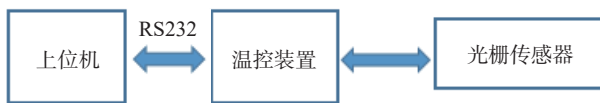


图 3 温控结构示意图
Fig.3 Temperature control structure

控制 TEC 温度有很多种方法,本文使用了专用 TEC 驱动芯片 MAX1978。它可以为 TEC 提供最大±3A 的 TEC 驱动电流,输出电流无死区,由电压控制驱动电流的方向和大小。MAX1978 片内集成了功率 MOSFET 以及高性能热控制环电路,可维持±0.01 ℃ 的温度稳定性。

单片机为 STM8S105 系列,最高 CPU 频率可达 24 MHz 并支持单线接口模块 (SWIM) 和调试模块 (DM),方便进行在线编程和非侵入式调试。

软件主要工作是控制 TEC 的开启,完成标准器的电流与温度控制、初始化设定驱动电流和工作温度等。将热敏电阻测量得到的温度值与设定的温度值进行比较,若未达到控温要求,将进行 PID 控制,根据比较结果给出脉冲宽度,通过向 TEC 提供相应的电流来达到设定状态。

2 光纤光栅标准器特性测量

针对光纤光栅标准器的特性测试装置如图 4 所示,利用宽带光源输出覆盖所测光纤光栅波长范围的光信号,经过环形器之后,光信号进入不同中心波长的光纤光栅标准器中,光纤光栅标准器反射的光信号返回环形器之后到达光波长计,由经校准的光波长计测量不同光纤光栅的中心波长值。此测试装置可通过测量标准光波长计所测波长的变化来监测光纤光栅标准器中心波长的稳定性。

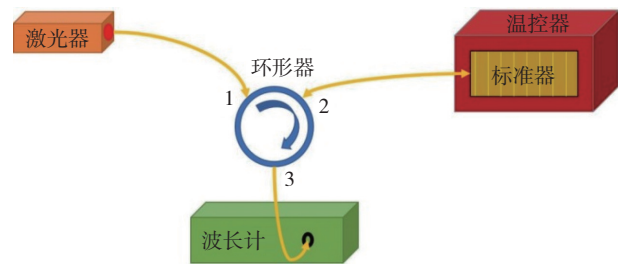


图 4 测试设备连接图
Fig.4 Calibration system setup

2.1 高稳定光纤光栅标准器重复性测量

在温度 23 ℃、湿度 49%RH 的测试环境下对中心波长在 1531 nm、1541 nm、1546 nm、1556 nm、1562 nm 附近波段 (C 波段) 的光纤光栅标准器进行重复性测试实验,在校准过程中重复 10 次断开与接入光纤光栅标准器,利用光波长计读取中心波长的测量数据。测试结果如表 2。

重复性测试实验数据表明,5 个不同波长的高稳定光纤光栅标准器中心波长的重复性最大为 0.14 pm,此重复性甚至优于标准波长计的波长测量不确定度 0.3 pm,证明所研制的光纤光栅标准器具备非常好的重复性。

2.2 与常用光纤光栅标准器特性比较测量

为了进一步验证所研制的高稳定光纤光栅标准器的性能,选取常用的 4 个波长的商用光纤光栅制作的标准器,在温度 23 ℃、湿度 49%RH 的测试环境下考察其重复性作为比对。测试结果如表 3。

重复性测试实验数据表明,4 个不同波长的商用光纤光栅标准器中,中心波长重复性最好的标准器为 2.3 pm,比本文研制的高稳定光纤光栅标准器重复性差了 1 个量级。测试结果验证了本文所研制的光纤光栅标准器的重复性良好。

3 光纤光栅解调仪校准不确定度评定

基于商用光纤光栅标准器对某型号的光纤光栅

解调仪进行解调波长的校准,其校准不确定度评定 如表 4 所示。

表 2 高稳定光纤光栅标准器中心波长测试结果

Tab.2 Central wavelength test results for high stability fiber Bragg grating standard /nm

序号	标准器1	标准器2	标准器3	标准器4	标准器5
1	1531.8438	1542.0080	1547.1997	1556.6941	1563.0583
2	1531.8439	1542.0080	1547.1997	1556.6942	1563.0585
3	1531.8438	1542.0078	1547.1998	1556.6942	1563.0583
4	1531.8438	1542.0078	1547.1999	1556.6942	1563.0584
5	1531.8439	1542.0079	1547.1996	1556.6941	1563.0583
6	1531.8437	1542.0079	1547.1998	1556.6943	1563.0583
7	1531.8437	1542.0079	1547.1996	1556.6942	1563.0583
8	1531.8437	1542.0079	1547.1994	1556.6941	1563.0584
9	1531.8438	1542.0078	1547.1996	1556.6942	1563.0584
10	1531.8438	1542.0079	1547.1998	1556.6941	1563.0584
平均值	1531.8438	1542.0079	1547.1997	1556.6942	1563.0584
实验标准偏差	0.00007	0.00007	0.00014	0.00007	0.00007

表 3 常用光纤光栅标准器中心波长测试结果

Tab.3 Central wavelength test results for commonly used fiber Bragg grating standards /nm

序号	标准器1	标准器2	标准器3	标准器4
1	1535.502	1544.662	1557.526	1562.261
2	1535.508	1544.664	1557.528	1562.255
3	1535.506	1544.662	1557.523	1562.254
4	1535.502	1544.664	1557.525	1562.258
5	1535.502	1544.658	1557.525	1562.262
6	1535.502	1544.663	1557.516	1562.262
7	1535.503	1544.663	1557.525	1562.266
8	1535.504	1544.664	1557.528	1562.263
9	1535.503	1544.655	1557.530	1562.256
10	1535.507	1544.657	1557.525	1562.261
平均值	1535.504	1544.661	1557.525	1562.260
实验标准偏差	0.0023	0.0033	0.0038	0.0039

表 4 光纤光栅解调仪的校准不确定度评定

Tab.4 Evaluation of calibration uncertainty for fiber Bragg grating demodulator

序号	不确定度来源	标准不确定度	概率分布	灵敏系数	不确定度分量
1	参考光纤光栅引入的不确定度	2.3 pm	正态	1	2.3 pm
2	标准光波长计的不确定度	0.3 pm	正态	1	0.3 pm
3	测量重复性引入的不确定度	0.3 pm	正态	1	0.3 pm
4	被校仪器波长分辨率引入的不确定度	0.3 pm	正态	1	0.3 pm
5	其它影响因素的不确定度	1 pm		1	0.3 pm
合成测量不确定度					2.4 pm

由表 4 可知,光纤光栅解调仪的测量不确定度分量中,最大的分量就是参考光纤光栅引入的测量不确定度,将本文研制的参考光纤光栅代替商用光纤光栅后,所校准的解调仪波长测量不确定度将从 2.4×10^{-12} m 降为 0.7×10^{-12} m,极大地提高了校准能力。

4 结论

基于特殊设计的应力释放结构,利用智能控制算法及半导体制冷技术实现了高精度的温度控制,从而研制了一组高稳定的光纤光栅标准器。通过与商用光纤光栅的测量重复性对比,结果表明研制的光纤光栅标准器的重复性提高了一个数量级。因此,极大地提高了光纤光栅解调仪的校准不确定度水平。由于研制的光纤光栅波长标准器性能远优于校准规范要求,可为今后更高精度解调仪的设计研制提供参考依据与量值保障。

参考文献

- [1] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 519-531.
- [2] 国家市场监督管理总局. 布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范: JJF 1804-2020[S]. 北京: 中国计量出版社, 2020.
- [3] Yoffe G W, Krug P A, Ouellette F, et al. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6859-6861.
- [4] 黄勇林, 李杰, 开桂云, 等. 光纤光栅的温度补偿 [J]. *光学学报*, 2003(6): 677-679.

- [5] Dyer S D, Williams P A, Espejo R J, *et al.* Fundamental limits in fiber Bragg grating peak wavelength measurements[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 5855: 1-6.
- [6] Hsu Y S, Wang L, Liu W F, *et al.* Temperature Compensation of Optical Fiber Bragg Grating Pressure Sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(7): 874-876.
- [7] Rowe M A, Swann W C, Gilbert S L. Multiple-wavelength reference based on interleaved, sampled fiber Bragg gratings and molecular absorption[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(17): 3530-3534.
- [8] 郭永兴, 匡毅, 熊丽, 等. 不同封装方式的光纤光栅传感与温补特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 99-106.
- [9] 周锋, 李永倩, 王劲龙. 光纤布拉格光栅传感器及其封装研究进展 [J]. 光通信技术, 2017, 41(11): 8-11.
- [10] Y Zhang, L Zhu, F Luo, *et al.* Comparison of Metal-Packaged and Adhesive-Packaged Fiber Bragg Grating Sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(15): 5958-5963.
- [11] Y Guo, L Xiong, H Liu. Research on the Durability of Metal-Packaged Fiber Bragg Grating Sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(7): 525-528.
- [12] Bessie A Ribeiro, Marcelo Martins Werneck, Regina Celia da Silva Barros Allil. Calibration and operation of a fibre Bragg grating temperature sensing system in a grid-connected hydrogenerator[J]. *IET science, measurement & technology*, 2013, 7(1): 59-68.
- [13] 庞丹丹. 新型光纤光栅传感技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [14] 何进. 基于半导体制冷技术的温度控制系统研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- [15] 谢文华. 基于 FLOTherm 软件的双极功率晶体管热分布研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [16] 李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [17] 吴俊, 李长俊. 基于 TEC 的高精度温控系统设计 [J]. *电子设计工程*, 2017, 25(20): 75-79.
- [18] S Wang, X Niu, L Zhang. Research on the Environment Temperature of 3D Printing Methacrylate based on Adaptive Fuzzy PID Algorithm[C]. 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), IEEE, 2019: 264-268.
- [19] R Raj, P M Pathak, G Bhandari, *et al.* Two- and Three-Input Fuzzy PID Controller Structure of Takagi-Sugeno Type[C]. 2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, 2019: 1605-1609.
- [20] 王玉德, 韩秀庆, 韩秀勇, 等. PID 参数调整仿真比较研究 [J]. *电气自动化*, 2011, 33(6): 1-3, 6.
- [21] 苏卫东, 任思聪, 刘升才. 温控箱数学模型的建立及其自适应 PID 控制 [J]. 中国惯性技术学报, 1995(4): 34-38.
- [22] 王生成. 基于模糊控制温控系统的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [23] 林子超, 姚玉林, 周通, 等. 基于四维协变量的光栅干涉系统频移理论研究 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(11): 3-11, 26.
- [24] 崔磊, 刘佳畅, 贾亚青, 等. 小型光通量计校准方法研究 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(1): 19-21, 31.
- [25] 李卓然, 李雨霄, 蒋依芹, 等. 光学测量系统信噪比优化方法研究 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(2): 50-54.

本文编辑: 石亚楠

~~~~~

(上接第 59 页)

- [3] 国家烟草专卖局. 烟草专用透气度流量盘检定规程: JJG(烟草)18—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [4] 吴晓松, 刘勇, 张龙, 等. 烟用纸张透气度检测技术 [J]. 中国造纸, 2006, 24(11): 34-37.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 纸和纸板—透气度测定 (中等范围) 第 2 部分: 肖伯尔法: GB/T 458-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. 纸和纸板—透气度测定 (中等范围) 第 5 部分: 葛莱尔法: GB/T 5402-2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [7] 国家技术监督局. 纸和纸板—透气度测定 (中等范围) 第 3 部分: 本特生法: GB/T 2679.13-1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [8] 胡群, 顾波, 马静, 等. 卷烟纸自然透气度对卷烟物理性能及烟气量的影响 [J]. 烟草科技, 2002(8): 7-10.
- [9] 许淑红. 接装纸和滤棒成型纸透气度与卷烟通风率的关联性研究 [J]. 中国包装工业, 2012(9): 52.
- [10] 李翔, 尚平平, 赵乐, 等. 接装纸透气度和滤棒吸阻对卷烟烟气细胞毒性的影响 [J]. 烟草科技, 2010(11): 32-35.
- [11] 邵霖. 卷烟纸对卷烟降低焦油的作用和影响 [J]. 浙江造纸, 2007, 31(1): 13-15.
- [12] 江威, 李斌, 于川芳, 等. 卷烟纸透气度对卷烟燃烧锥温度分布的影响 [J]. 烟草工艺, 2007(9): 5-9, 40.
- [13] 刘立全. 卷烟纸的作用 [J]. 烟草科技, 2002(4): 27-28.
- [14] 潘海波. 卷烟纸透气度指标在卷烟真伪鉴别中的应用 [J]. 广西轻工业, 2011(1): 24.
- [15] 杨荣超, 苗芊, 张勃, 等. 透气度流量盘测量结果的修正 [J]. 烟草工艺, 2014(1): 16-20.
- [16] 靳浩元, 刘军. 测量不确定度的评定方法及应用研究 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(5): 124-131.
- [17] 黎荣发, 凌光盛, 赵豪, 等. 低压大流量热式气体质量流量计分流测试方法研究 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(8): 3-6, 12.

本文编辑: 霍伟炜