DOI: 10.3901/JME.2019.18.001

用于航空发动机的光纤 F-P 温度传感器及其 信号解调系统研究*

林启敬^{1,2,3,4} 伍子荣² 赵娜² 田边² 蒋庄德^{1,2}

(1. 西安交通大学高端制造装备协同创新中心 西安 710054;

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;

3. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074;

4. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 光纤 F-P 温度传感器具有结构稳定、精度高、体积小、抗电磁干扰、质量轻和成本低等优点, 在航空发动机高温测量领域具有重要的潜在应用。针对航空发动机的高温工况, 利用多光束干涉原理设计了光纤 F-P 传感器, 并通过端面检测、显微测量等手段完成了光纤 F-P 温度传感器的制备。针对传统光谱仪解调系统昂贵, 解调速度慢的不足, 以 F-P 滤波器和 DSP 为核心设计了传感器的信号解调系统, 克服了传统光谱仪解调的局限性; 进行了解调系统的硬件设计, 完成了光电转换放大电路的原理设计、仿真分析和电路制作, 实现了解调系统的初步搭建。在高温精度的高温炉中采用标准热电偶对制备完成的传感器进行标定, 结果表明: 在 30~1 000 °C 温度范围内, 传感器的温度响应灵敏度为 0.012 nm/°C, 线性度为 0.996。

关键词: 光纤传感器; 高温测量; 航空发动机; 信号解调; 性能测试

中图分类号: TG156

Research on Optical Fiber F-P Temperature Sensor and Its Signal Demodulation System Used in Aero-engine

LIN Qijing^{1,2,3,4} WU Zirong² ZHAO Na² TIAN Bian² JIANG Zhuangde^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054;

3. State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing Systems Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

3. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment & Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

4. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Optical fiber F-P temperature sensor with the advantages of stable structure, high precision, small volume, anti-electromagnetic interference, light weight and low cost has potential application in the high temperature measurement of aerial engine. According to the high temperature condition of aero-engine, the F-P temperature sensor is designed based on multi-beam interference principle. The fabrication of optical fiber F-P temperature sensor is completed by means of face detection and microscopic measurement. In order to overcome the shortcomings of the traditional spectrometer demodulation system which is expensive and slow demodulation speed, the signal demodulation system of the sensor is designed with F-P filter and DSP as the core, which overcomes the limitation of the demodulation with traditional spectrometer. The hardware design of the system is carried out, including the principle design, simulation analysis and circuit production of the photoelectric conversion amplifier

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2015CB057402)、中国博士后基金(2017M613114)、西安交通大学基本科研业务费(xjj2016011、syspz2017025)、数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)开放课题(DMETKF2016006)和流体动力与机电系统国家重点实验室(浙江大学)开放基金(GZKF-201617)资助项目。20180904 收到初稿, 20190325 收到修改稿

circuit. Then the sensor is calibrated by standard thermocouple in high temperature furnace with high control precision of temperature. The results show that the temperature response sensitivity of the sensor is $0.012 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, and the linearity is 0.996 from 30°C to $1\,000^{\circ}\text{C}$.

Key words: optical fiber sensor; high temperature measurement; aero-engine; signal demodulation; performance test

0 前言

作为飞机的心脏,航空发动机被誉为“工业之花”,是一个国家科技、工业和国防实力的重要体现。航空发动机的工作条件极为苛刻,通常包括高温、高压、高负荷、高转速和剧烈振动等^[1-2]。温度是高温流道件参数中最难测量的参数之一,随着高性能航空发动机的发展,其气流工作压力和温度都大大增加,运行时热端部件的工作温度亦越来越高,对超高温度的准确测量提出了更大的挑战。因而,作为航空发动机工作状态的重要过程参数,温度的有效测量对发动机的控制、状态监控、安全性、可靠性和可维护性具有重要意义。

目前,国内外对航空发动机温度的测量主要采用热电偶、示温漆等手段^[3-4]。西北工业大学杨训等^[5]利用 70 支热电偶分 4 次检查燃烧室出口气流温度场分布,采用数据网格化、数据插值等方法实现了可视化发动机温度场的直观显示。但热电偶在高温下容易氧化,通常需要铠装,这样就增大了其体积,使得其在航空发动机燃气测量中虽然应用最普遍但并非最理想^[6-7]。示温漆可以在动态大面积温度场进行测温,具有不破坏物体表面形状,不影响气流状态,使用方便等优点^[8]。但由于示温漆涂在壁面上,主要测量壁面温度而不是气流温度,且响应速度不够快,判读精度不够高。所以当热气流运动速度和温度的大幅提高时,示温漆测温法并不适合发动机温度的测量^[9]。

与传统温度传感器相比较,光纤高温传感器的优势更加明显,如精度高、线性好、响应温度范围广、耐腐蚀、安全、抗干扰等,适合在剧烈振动、易燃易爆、强磁场干扰及高温高压等恶劣环境下进行温度测量,在航空航天、材料、化工、能源、冶金和建材等高温测试领域得到广泛应用^[10-12]。作为光纤温度传感器的一种典型结构,光纤法布里-珀罗(F-P)温度传感器具有结构简单、精度高、体积小、抗电磁干扰、成本低和长期稳定性好等优点,在航空发动机温度测量方面具有明显优势。1897 年,物理学家 FABRY 和 PEROT^[13]首次发明了 F-P 干涉仪,其后,随着光纤传感技术的进步,F-P 传感器亦得到了快速发展。DING 等^[14]通过在单模光纤尾端熔

接一小段光子晶体光纤,制作了一种 F-P 传感器,其温度测量范围为 $25\sim 300^{\circ}\text{C}$; FANG 等^[15]用 MEMS 技术加工的 F-P 传感器测温范围为 $20\sim 300^{\circ}\text{C}$; LIU 等^[16]用空心光纤制作了一种 F-P 型传感器,能够测量温度和应力响应,温度测量范围为 $19\sim 600^{\circ}\text{C}$; WANG 等^[17]利用单模和多模光纤制作 F-P 传感器,对温压进行测量,测量温度范围为 $20\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。在传感器信号解调系统方面,RANADE 等^[18]提出一种基于光谱仪的强度解调系统,该系统要求单色光源,受光源影响较大,精度较低;王安波等^[19]提出自补偿式强度解调系统,降低了光源的影响,但需要限制传感器腔长变化在四分之一波长内,制作困难;MUSA 等^[20]提出基于离散腔长变换的相位解调系统,解决了腔长变化限制,但解调速度受算法限制;YANG 等^[21-22]提出了更优化的解调算法,但系统成本较高。

针对传感器结构制作复杂和信号解调系统存在的不足,提出并设计了一种 F-P 光纤温度传感器,探讨了其制备工艺,并基于 F-P 滤波器和 DSP 设计了传感器的信号解调系统,完成了其硬件设计,实现了解调系统的初步搭建。同时用标准热电偶对传感器进行了静态性能标定。

1 F-P 光纤传感器的结构设计制备

1.1 工作原理

F-P 光纤温度传感器的结构见图 1,将端面平整的光纤 1 和光纤 2 分别插入石英玻璃管并用高温胶粘结固定,形成空气腔即 F-P 腔。其工作过程为:光从光纤 1 入射,在光纤 1-空气界面发生第一次反射,透射光继续传播,在空气-光纤 2 界面发生第二次反射,两次反射光在光纤 1 中发生干涉,根据干涉波形可计算出腔长;而石英管长度随温度变化导致腔长变化,这样就可以由腔长值计算得到温度值。

图 1 F-P 光纤温度传感器结构示意图

假设入射光垂直入射, 即入射角 $\theta = 0$, 空气折射率 $n = 1$, 则根据多光束干涉原理, 可将干涉光的光强表示为

$$I_R = I_0 \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} \quad (1)$$

式中, I_R 为干涉光强, $\varphi = \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)$ 为反射光的相位差, L 为 F-P 腔腔长, λ 为入射光波长, I_0 为入射光强, R_1 和 R_2 分别为光纤 1 和光纤 2 的端面反射率。当 $R_1 = R_2 = R$ 时, 干涉光强可表示为

$$I_R = I_0 \frac{2R(1 - \cos \varphi)}{1 + R^2 - 2R \cos \varphi} \quad (2)$$

考虑半波损失, 根据式 (2) 可知, 当 $\varphi = (2m+1)\pi, (m=1, 2, \dots)$ 时, 干涉光强取极大值, 当 $\varphi = 2m\pi, (m=1, 2, \dots)$ 时, 干涉光强取极小值, 因此根据干涉波形即可计算出腔长。而石英管长度随温度变化导致腔长变化, 所以可以由腔长值得到温度值, 公式如下

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (3)$$

$$T = T_0 + \Delta T \quad (4)$$

式中, L 为温度 T 时的腔长, L_0 为初始腔长, α 为石英管线膨胀系数, T 为传感器工作温度, ΔT 为温度变化值, T_0 为初始温度。

1.2 制备工艺

传感器的制备工艺如图 2 所示。

图2 传感器制备工艺流程图

光纤端面的制备: 由于 F-P 温度传感器需在两光纤端面处形成反射光, 因而端面是否平整是传感结构性能优劣的先决条件。光纤端面的制备包括剥

覆、清洁和切割三个环节。首先采用剥纤钳剥除光纤涂覆层(即光纤包层); 然后用无水乙醇对裸纤进行清洁, 清除裸纤表面的杂质; 最后用光纤切割刀对清洗后的裸纤进行切割以得到平整的表面。利用光纤端面检测仪对光纤端面质量进行检测, 以确保光纤端面是否圆滑、有无凹陷或凸起等。如果端面质量不符合要求, 则重复上述过程, 直到获得最优端面质量。

光纤 F-P 腔的制备: 将定制的石英管固定于光学显微镜的载物台上, 并置于物镜视场的中央。显微镜配有 CCD, 能够将石英管像显示于显示器上。将一根端面平整的光纤从石英管的一端插入一定距离后固定, 将另一根端面平整的光纤从石英管的另一端插入, 形成 F-P 腔, 其腔长可以从已经用标尺校准过的显微图像中测量出, 如图 3 所示; 调节两光纤端面的距离, 使得腔长为设计值; 固定腔长, 用高温胶将光纤和石英管粘接, 并置于干燥箱中, 于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度中干燥固化 24 h, 使高温胶完全固化, 制作完成的传感器如图 4 所示。

图3 光学显微镜中的 F-P 腔

图4 光纤 F-P 温度传感器实物图

2 信号解调系统

F-P 光纤传感器的信号目前多采用光谱仪进行解调, 但由于自身的局限性, 只适合在实验室使用。其局限性在于: 目前市场上的光谱仪价格昂贵, 导致这种解调方法的成本高; 光谱仪体积大, 测量场所改变时搬移不方便; 光谱仪属于精密仪器, 某些环境因素(如振动、温度等)会对其工作性能产生影响; 数据采集速度极慢, 不适合实际工业应用。

为克服以上解调方法的局限性, 以 F-P 滤波器和 DSP 为核心设计解调系统如图 5 所示。其工作过

程如下：光源发出的光信号通过 1×2 光纤耦合器进入 F-P 温度传感器，传感器反射信号再经光纤耦合器进入 F-P 滤波器，此时信号处理器产生周期性的三角波电压信号驱动滤波器对波长进行扫描。光电探测器检测反射信号后进行光电转换，输出的电流信号经放大电路放大、滤波后，进入数字信号处理器进行处理，最终在计算机上进行显示、记录，获得温度参数。

图 5 解调系统示意图

根据所设计的解调系统,进行相关的硬件设计,包括光电转换放大电路设计、信号处理器选型和硬件模块连接等。其中,光电转换放大电路设计流程如图 6 所示。

图 6 电路设计流程

结合试验所使用的光源和 F-P 滤波器,进行电路参数计算和器件选型,选用 InGaAs PIN 光电二极管, ICL7650S 和 OP07 运放芯片。总体电路依次包含电流-电压转换电路、低通滤波电路和二级放大电路,其原理图如图 7 所示。用 Multisim 软件对电路进行仿真,仿真结果如图 8 所示。仿真结果显示当输入为 1 nA 时,输出为 2 V ,该电路实现了所设计的增益。因此,利用所设计的参数加工电路板并完成电路板焊接,焊接完成后的电路板如图 9 所示。

(a) 电流 - 电压转换电路

(b) 低通滤波电路

(c) 二级放大电路

图 7 电路原理图

图 8 电路仿真结果

图 9 焊接完成的电路板

利用加工完成的电路板, 初步搭建解调系统。用示波器代替图 5 中的信号处理器, 同时用信号发生器为 F-P 滤波器提供周期性的三角波电压驱动信号。光信号经放大电路后直接输入示波器, 利用示波器对数据进行采集, 然后用计算机对采集的数据进行处理分析。初步搭建完成的系统实物图如图 10 所示。

图 10 初步搭建解调系统

由图 10 可以看出, 示波器输出正弦电压信号, 且峰值为 2 V 左右, 实现了将 nA 级信号转换放大为 V 级信号, 符合最初的设计增益, 初步验证了解调系统的可行性。

3 静态性能测试

为了确定传感器的性能, 搭建了传感器的静态标定实验系统, 见图 11。将研制好的光纤 F-P 传感器和标准热电偶一同置于高温炉中对其进行加热, 采用 C+L 型宽带光源, 用光谱分析仪监测其干涉光谱。高温炉升温时, 同时记录标准热电偶的读数和光谱分析仪的温度响应曲线, 进而分析计算传感器的响应灵敏度等性能指标。

图 11 传感器的静态标定实验系统

高温炉中温度的变化, 将使得 F-P 腔腔长发生变化, 进而引起反射光谱波形发生变化, 通过监测干涉谱波谷中心波长实现对温度的测量。如图 12 所示, 随着温度的增加, 反射谱向波长较长的方向移动(红移)。对常温(30 °C)时中心波长在 1 544 nm 附近的波谷进行监测, 可以得到其随温度升高而发生变化。

图 12 反射光谱随温度的变化情况

常温时中心波长在 1 544 nm 附近的谷值波长在不同温度下的数值见图 13 实点。拟合实验数据, 发现谷值波长改变量与温度之间的具有良好的线性关系。在 30~1 000 °C 温度范围内, 传感器的温度响应灵敏度为 0.012 nm/°C, 其线性度为 0.996。

图 13 传感器的静态标定试验结果

4 结论

(1) 设计和制备了光纤 F-P 温度传感器, 即将端面平整的两根光纤插入石英玻璃管两端并在光学显微镜下测量初始腔长, 用高温胶粘结固定, 形成 F-P 腔。

(2) 以 F-P 滤波器和 DSP 为核心设计了传感器的信号解调系统, 克服了光谱仪解调的局限性; 进行了解调系统的硬件设计, 完成了光电转换放大电

路的原理设计、仿真分析和电路板制作, 实现了解调系统的初步搭建。

(3) 在高控温精度的高温炉中采用标准热电偶对传感器进行标定, 结果表明: 在 $30\sim 1\,000^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 传感器的温度响应灵敏度为 $0.012\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 具有良好的线性, 其线性度为 0.996。

(4) 传感器虽然完成了静态性能测试, 但为了实现其在航空发动机恶劣工况下的应用, 还需进行动态性能的测试; 信号解调系统实现了原理验证和硬件系统的设计, 还需实现部件的集成和软件系统的编制。

参 考 文 献

- [1] 张晗, 杜朝辉, 方作为, 等. 基于稀疏分解理论的航空发动机轴承故障诊断[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 97-105.
ZHANG Han, DU Zhaohui, FANG Zuowei, et al. Sparse decomposition based aero-engine's bearing fault diagnosis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 97-105.
- [2] 史修江, 王黎钦. 基于拟动力学的航空发动机主轴滚子轴承热弹流润滑分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 86-92.
SHI Xiujiang, WANG Liqin. TEHL analysis of aero-engine mainshaft roller bearing based on quasi-dynamics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 86-92.
- [3] 张志学, 刘忠奎, 张玉新, 等. 航空发动机壁温测量方法综述[C/CD]//航空试验测试技术学术交流会议论文集. 2015.
ZHANG Zhixue, LIU Zhongkui, ZHANG Yuxin, et al. Summary of aero-engine wall temperature measurement [C/CD]// 2015 Journal of Aeronautical Testing & Testing Technology Symposium, 2015.
- [4] 邓进军, 李凯, 王云龙, 等. 航空发动机内壁高温测试技术[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(3): 178-184.
DENG Jinjun, LI Kai, WANG Yunlong, et al. High temperature testing technology for aero engine inner wall[J]. Microelectronics Technology, 2015, 52(3): 178-184.
- [5] 杨训. 某型航空发动机温度场数据采集与处理系统[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(12): 980-982.
YANG Xun. Data acquisition and processing system for temperature field of a certain aeroengine [J]. Computer Measurement and Control, 2003, 11(12): 980-982.
- [6] 赵斌, 高峰. 热电偶测温在某型航空发动机上的应用[J]. 工程技术: 文摘版, 2016(9): 271.
ZHAO Bin, GAO Feng. Application of thermocouple temperature measurement in certain aeroengine[J]. Engineering Technology: Abstract Edition, 2016(9): 271.
- [7] 井彬, 陈英涛, 于艺. 热电偶测航空发动机燃气温度的误差分析[J]. 国防制造技术, 2015, 9(3): 48-49.
JING Bin, CHEN Yingtao, YU Yi. Error analysis of gas temperature in aeroengine based on thermocouple[J]. Defense Manufacturing Technology, 2015, 9(3): 48-49.
- [8] 张兴, 薛秀生, 陈斌, 等. 示温漆在发动机测试中的应用与研究[J]. 测控技术, 2008, 27(1): 21-23.
ZHANG Xing, XUE Xiusheng, CHEN Bin, et al. Application and research of thermostat paint in engine test[J]. Measurement and Control Technology, 2008, 27(1): 21-23.
- [9] 熊庆荣, 徐毅, 李华东, 等. 航空发动机试验峰值时间对示温漆测温的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(5): 30-34.
XIONG Qingrong, XU Yi, LI Donghua, et al. Effect of aeroengine test peak time on thermal paint for temperature measurement[J]. Gas Turbine Test and Research, 2016, 29(5): 30-34.
- [10] 李丽君, 高春亭, 王金勇, 等. 光纤高温传感器在石化行业安全监测中的应用研究[J]. 安全、健康和环境, 2016, 16(3): 66-69.
LI Lijun, GAO Chunting, WANG Jinyong, et al. Application of optical fiber high temperature sensor in safety monitoring of petrochemical industry[J]. Safety, Health and Environment, 2016, 16(3): 66-69.
- [11] 赵亚丽. 高温光纤传感器应用分析[J]. 无线互联科技, 2016(16): 25-26.
ZHAO Yali. Application analysis of high temperature optical fiber sensor[J]. Wireless Internet Technology, 2016(16): 25-26.
- [12] 周祖德, 谭跃刚, 刘明尧, 等. 机械系统光纤光栅分布动态监测与诊断的现状与发展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 55-69.
ZHOU Zude, TAN Yuegang, LIU Mingyao, et al. Actualities and development on dynamic monitoring and diagnosis with distributed fiber bragg grating in mechanical systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 55-69.
- [13] FABRY C, PEROT A. Sur les franges des lames minces argentées et leur application à la mesure de petites épaisseurs d'air [J]. Ann. Chim. Phys. 1897, 12: 459-501.
FABRY C, PEROT A. On the fringes of the thin silvery blades and their application to the measurement of small thicknesses of air[J]. Ann. Chim. Phys. 1897, 12: 459-501.
- [14] DING W H, JIANG Y. Miniature photonic crystal fiber sensor for high-temperature measurement [J]. IEEE

- Sensors Journal, 2014, 14(3): 786-789.
- [15] FANG G C, JIA P G, CAO Q, et al. MEMS fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high temperature application[J]. Proceedings of the Spie, 2016, 155: 101552H.
- [16] LIU H, YANG H Z, QIAO X G, et al. Strain measurement at high temperature environment based on Fabry-Perot interferometer cascaded fiber regeneration grating [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 248: 199-205.
- [17] WANG Ning, FU Jianbo, ZHU Huafeng, et al. Temperature and pressure response study of intrinsic fabry-perot optical fiber sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100604.
- [18] JAYDEEP R. Electronic signal processing in an optical fiber-based magnetometer[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [19] WANG A, XIAO H, WANG J, et al. Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(10): 1495-1501.
- [20] MUSA S M. Real-time signal processing and hardware development for a wavelength modulated optical fiber sensor system [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [21] YANG H, TONG X, HU P, et al. Discrete cavity length demodulation algorithm for optical fiber FP sensor based on variable step size mountain climbing search algorithm[C/CD]//Asia-Pacific Optical Sensors Conference. Optical Society of America, 2016.
- [22] ZHANG B, TONG X, HU P, et al. Wavelet phase extracting demodulation algorithm based on scale factor for optical fiber Fabry-Perot sensing[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29506-29511.

作者简介：林启敬，男，1983 年出生，博士，助理研究员。主要研究方向为微纳制造与光纤传感器。

E-mail: xjjingmi@163.com

蒋庄德(通信作者)，男，1955 年出生，博士，教授，中国工程院院士。主要研究方向为微纳制造、先进传感技术、精密超精密加工与测试技术及装备。

E-mail: zdjiang@xjtu.edu.cn