

EFPI-FBG 复合光纤传感器高温大应变试验研究

陈 珊¹, 李政颖¹, 孙景国², 温志勋³

(1. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;
3. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 由于缺乏航空发动机/燃气轮机服役环境下叶片温度、应变有效性检测的技术与装置, 所以工作叶片的温度环境、载荷环境和应变分布等关键数据的缺失是故障检修工作中的最大困难之一。采用非本征型法布里-珀罗 (Extrinsic Farby-Perot Interferometric, EFPI) 与光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感技术, 研制了一种基于单模光纤的 EFPI-FBG 复合光纤传感器及其解调设备。通过搭建高温拉伸试验平台, 开展了基于 DZ125 材料试件的复合光纤传感器高温、大应变测量的性能测试。试验结果表明: 复合光纤传感器的工作温度范围为 $26\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度测量精度不超过全量程的 5%, 分辨率为 $0.066\text{ }^{\circ}\text{C}$; F-P 传感器的应变测量范围为 $0 \sim 19\,468\text{ }\mu\text{e}$, 在 $1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的相对误差为 1.96%, 分辨率为 $0.053\text{ }\mu\text{e}$ 。

关 键 词: 非本征型法布里-珀罗; 光纤光栅; 复合光纤传感器; 温度-应变测量

中图分类号: TK231.1 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.10.023

[引用本文格式] 陈 珊, 李政颖, 孙景国, 等. EFPI-FBG 复合光纤传感器高温大应变试验研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 179-186. CHEN Shan, LI Zheng-ying, SUN Jing-guo, et al. Experimental study on EFPI-FBG composite optic fiber sensor under high temperature and large strain[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 179-186.

Experimental Study on EFPI-FBG Composite Optic Fiber Sensor under High Temperature and Large Strain

CHEN Shan¹, LI Zheng-ying¹, SUN Jing-guo², WEN Zhi-xun³

(1. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, Post Code: 430072;
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078; 3. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072)

Abstract: Due to the lack of effective detection technology and devices for blade temperature and strain in the aero-engine or gas turbine service environment, the shortage of key data such as the temperature environment, load environment and strain distribution of the working blade was one of the biggest difficulties in troubleshooting. Using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber bragg grating sensing technologies, a single-mode fiber-based EFPI-FBG composite optic fiber sensor and its demodulation equipment were developed. By building a high temperature tensile test platform, the performance tests of composite fiber sensor based on a specimen with DZ125 material were carried out under high temperature and large strain. The test results show that the working temperature range of the composite optic fiber sensor is $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$, the accuracy of temperature measurement shall not exceed 5% of full scale and the resolution is $0.066\text{ }^{\circ}\text{C}$; the strain measurement range of F-P sensor is 0 to $19\,468\text{ }\mu\text{e}$, the relative error is 1.96% and the resolution is $0.053\text{ }\mu\text{e}$ at $1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-06-22

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-V-0003)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017-V-0003)

作者简介: 陈 珊 (1997-), 女, 湖北宜昌人, 武汉理工大学硕士研究生。

通讯作者: 李政颖 (1981-), 男, 湖北武汉人, 武汉理工大学教授。

Key words: extrinsic farby-perot interferometric(EFPI),fiber bragg grating(FBG),composite optic fiber sensor,measurement of temperature and strain

引 言

对现代航空发动机/燃气轮机而言,精准的传热分析技术、可靠的状态参数测试验证技术是满足高温条件下长寿命、高可靠性的基础^[1]。目前,我国在航空发动机/燃气轮机涡轮工作叶片研制方面,开展了大量的材料级、模拟件级强度寿命试验,但由于缺乏工作状态下叶片级的试验测试技术与装置,无法直接检测服役环境下涡轮工作叶片温度、应变水平等^[2],一旦涡轮工作叶片发生损伤,准确确定其失效模式就存在一定的困难。

燃气轮机的燃气初温约 1 600 K,转速高达 10 000 r/min,功率等级涵盖范围很广^[3],为了提高涡轮叶片的安全工作可靠性、延长其寿命,研究高温、恶劣环境下的温度与应变传感技术及其设备,对准确测量并分析涡轮叶片的温度分布、应变分布及其变化规律具有重要意义^[4]。基于压电、压阻、电容和磁感等原理的传统传感器无法在高温、复杂电磁干扰的航空环境下工作,而光纤传感器因其体积小、抗电磁干扰、灵敏度高等优点,在温度和应变领域受到了广泛的关注和应用^[5]。

本文采用了非本征型法布里 - 珀罗(Extrinsic Farby-Perot Interferometric, EFPI) 与光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG) 相结合的结构形式^[6-7],研究并制作了基于普通单模光纤的 EFPI-FBG 复合光纤传感器和解调仪,为实现在高温、大应变条件下同时测量温度与应变提供了有效方法和设备。通过设计并搭建高温拉伸试验平台,仿真分析 DZ125 材料,开展了高温、大应变条件下传感器性能测试与试验研究。

1 EFPI-FBG 复合光纤传感器

1.1 基本结构

EFPI-FBG 复合光纤传感器是由非本征型 F - P 传感器与飞秒 FBG 传感器两者串联形式复合^[8-9],其基本结构如图 1 所示。其中,非本征型 F - P 腔为应变传感单元,飞秒 FBG 则为温度传感单元,通

过两根玻璃管分别与光纤熔接,确保光纤入射端与反射端在同一水平线上,区别于传统 F - P 腔应变传感器结构,其在不增加结构复杂度的条件下,可同时进行温度、应变的双参数测量。



图 1 EFPI-FBG 复合光纤传感器基本结构
Fig.1 Basic structure of EFPI-FBG composite optic fiber sensor

1.2 传感原理

EFPI-FBG 复合传感器由其串联结构形式导致其反射光谱包含两部分^[10],分别是 FBG 反射光谱(红色)和非本征型 F - P 腔的干涉光谱(黑色),如图 2 所示。

1.2.1 FBG 温度传感原理

当温度产生变化时,FBG 反射光谱中心波长将向右发生漂移 $\Delta\lambda_B$,如图 2 所示。通过温度计算公式计算温度测量值:

$$t = t_0 + \Delta\lambda_B / S_t \tag{1}$$

式中: t —温度测量值,℃; t_0 —初始温度值,℃; $\Delta\lambda_B$ —FBG 中心波长漂移量,pm; S_t —复合光纤传感器的温度灵敏度,pm/℃。

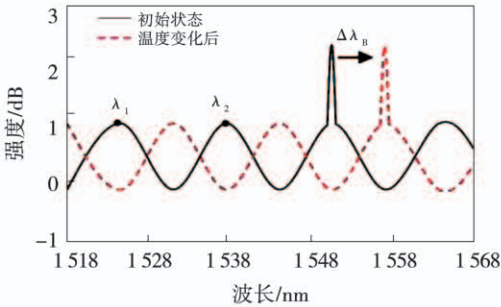


图 2 温度变化时复合光纤传感器反射光谱示意图
Fig.2 Schematic diagram of reflection spectrum of the composite optic fiber sensor when temperature changes

1.2.2 EFPI 应变传感原理

当应变产生变化时,F - P 腔的腔长产生相应变

化量 Δl , 非本征型 F-P 腔的干涉光谱则会发生相移和频移, 如图 3 所示。通过干涉光谱解调出腔长变化量 Δl , 根据应变计算公式计算应变测量值:

$$\sigma = (\Delta l / d) \times 10^6 \quad (2)$$

式中: σ —应变测量值, $\mu\epsilon$; Δl —F-P 腔长变化量, μm ; d —复合光纤传感器的初始标距, μm 。

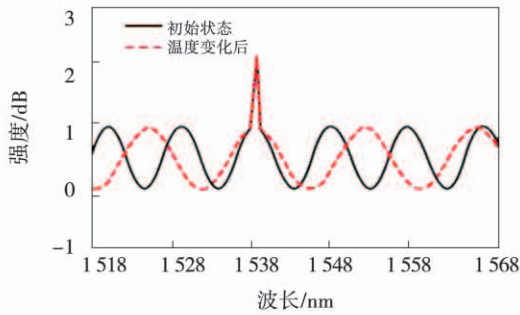


图 3 应变变化时复合光纤传感器反射光谱示意图
Fig. 3 Schematic diagram of reflection spectrum of the composite optic fiber sensor when strain changes

2 EFPI-FBG 复合光纤传感器的解调方法

利用解调系统完成 EFPI-FBG 复合光纤传感器的光谱重构^[11], 如图 4 所示。

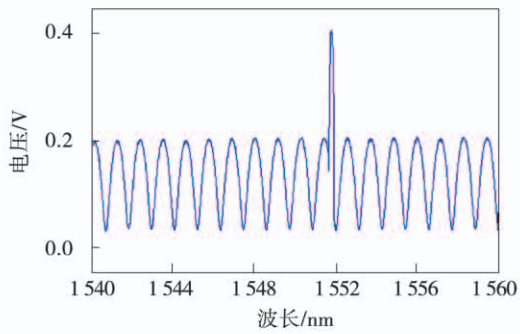


图 4 EFPI-FBG 复合光纤传感器的重构光谱图
Fig. 4 Reconstructed spectrum of EFPI-FBG composite optic fiber sensor

对重构后的复合光纤传感器设计解调方法, 针对 FBG 的峰值受 F-P 的余弦周期影响的特点, 在 3 dB 带宽处取其平均波长作为 FBG 的峰值, 完成 FBG 寻峰并通过线性分段解调方法完成 FBG 波长值的转换, 针对 F-P 腔长解调, 运用基于快速傅里叶变化(Fast Fourier Transform, FFT)与最小二乘法相结合的解调算法。

先将 F-P 反射光从光谱域转到波数域, 再通过插值法对信号进行等间隔采样^[12-13], 结果如图 5 所示。

采用基于 FFT 与最小二乘法相结合的解调算法计算出 F-P 的腔长值。首先, 通过计算相位值 ϕ_n , 其中, 光程差 L 和相位角 θ 为未知值, 这里可以运用最小二乘法, 即通过计算的数值与实际数值的平方和 S 达到最小^[14]:

$$\phi_n = knL + \theta \quad (3)$$

$$S = \sum [\phi_n - knL - \theta]^2 \quad (4)$$

式中: ϕ_n —相位, rad; k —波数, rad/m; n —常数; L —光程差, μm ; θ —相位角, rad; S —平方和, rad^2 。

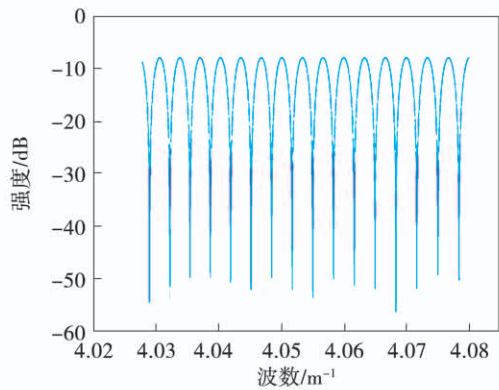


图 5 波数域下的 F-P 反射信号
Fig. 5 F-P reflected signal in wavenumber domain

当平方和 S 达到最小值时, 得到光程差 L , 再根据光程差 L 与 F-P 腔长 l 的关系 $L = 2nl$ 解调得到 F-P 的腔长值。

在该解调算法基础上, 设计并开发了一套适用于 EFPI-FBG 复合光纤传感器的解调系统^[15], 如图 6 所示。



图 6 EFPI-FBG 光纤解调系统
Fig. 6 Demodulation system for EFPI-FBG composite optic fiber sensor

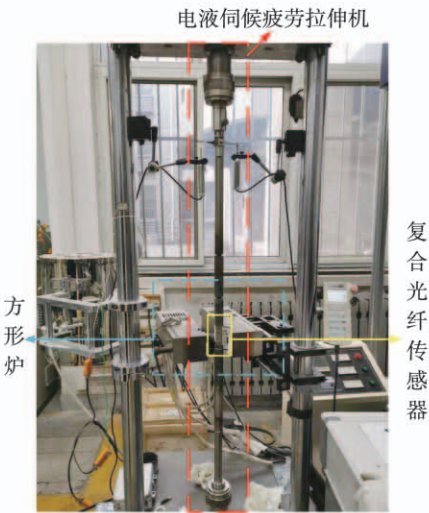


图 10 电液伺服疲劳拉伸机与方形炉

Fig. 10 Electro-hydraulic servo fatigue stretching machine and square furnace

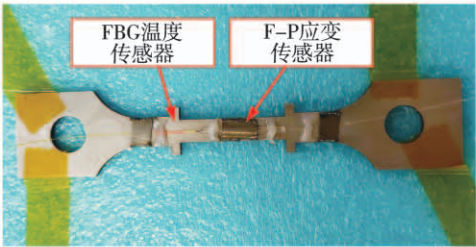


图 11 待测试件实物图

Fig. 11 Physical drawing of test pieces

4 传感器性能测试

EFPI-FBG 复合光纤传感器的性能测试分为温度测量性能测试和高温大应变双参考测量性能测试两部分。

4.1 温度测量性能试验

对 EFPI-FBG 复合光纤传感器的 FBG 温度传感特性进行考察,包括线性度、温度灵敏度、温度测量精度和温度测量分辨率等。

试验过程:试验以固定温差 100 ℃ 为间隔升温,在 26 ~ 1 100 ℃ 测试范围内进行测试。在各测试温度下,读取热电偶读数并计录数据,采用光纤解调仪对 EFPI-FBG 复合光纤传感器中 FBG 中心波长进行测量并记录结果。重复进行 3 次升温试验,以保证该温度性能测试试验的可靠性与重复性,FBG 温度

性能测试试验结果如表 3 所示。

表 3 FBG 温度性能测试试验结果比较

Tab. 3 Comparison of experimental results of FBG temperature performance tests

热电偶测量温度/℃	中心波长/nm		
	试验 1	试验 2	试验 3
26	1 534.983	1 534.945	1 530.708
100	1 536.222	1 535.841	1 531.899
200	1 537.895	1 537.053	1 533.509
300	1 539.569	1 538.264	1 535.119
400	1 540.784	1 539.705	1 536.350
500	1 542.115	1 541.214	1 537.105
600	1 543.839	1 542.700	1 538.335
700	1 545.213	1 544.416	1 539.969
800	1 546.702	1 546.044	1 541.118
900	1 548.146	1 547.347	1 542.639
1 000	1 550.203	1 549.179	1 544.317
1 100	1 552.404	1 551.624	1 547.005

对 EFPI-FBG 复合光纤传感器中 FBG 温度性能测试试验结果进行分析,将热电偶所测温度与复合光纤传感器 FBG 温度传感单元中心波长偏移量均值进行拟合,分析曲线如图 12 所示。

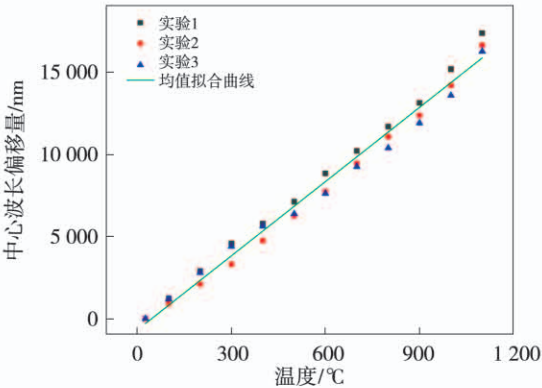


图 12 FBG 中心波长偏移量 - 温度试验曲线图

Fig. 12 Curve graph of FBG center wavelength offset vs. temperature test

根据图 12 分析曲线得出 EFPI-FBG 复合光纤传感器 FBG 温度传感器灵敏度为 15.079 pm/℃,解调仪波长分辨率为 1 pm,根据温度测量分辨率计算公式计算出该复合光纤传感器温度测量分辨率为

0.066 ℃,温度测量分辨率计算公式为:

$$R_t = \frac{R_\lambda}{S_t}$$

(6)

式中: R_t —温度测量分辨率,℃; R_λ —解调仪波长分辨率,pm; S_t —温度灵敏度,pm/℃。

解调仪波长重复精度为 5 pm,根据温度测量精度计算公式计算出该复合光纤传感器温度测量精度为 0.332 ℃ (不超过全量程的 5%),温度测量精度计算公式为:

$$A_t = \frac{A_\lambda}{S_t}$$

(7)

式中: A_t —温度测量精度,℃; A_λ —解调仪波长重复精度,pm。

由此可以得出,EFPI-FBG 复合光纤传感器 FBG 温度传感单元可以在 26~1 100 ℃的环境下进行测量工作,而且其温度测量精度为 0.332 ℃ (不超过全量程的 5%),分辨率为 0.066 ℃,复合光纤传感器中 FBG 温度传感器高温测量性能良好。

4.2 高温拉伸温度应变测量性能试验

对 EFPI-FBG 复合光纤传感器的温度应变测量性能进行性能测试,包括应变灵敏度,温度灵敏度,温度测量分辨率、温度测量精度和相对误差等。

试验过程为:将待测 EFPI-FBG 复合光纤传感器安装固定于试件上,置于图 10 所示的方形炉中,预紧力设为 200 N。以固定温差 100 ℃为间隔升温,在 26~1 100 ℃的温度范围内监控方形炉,采用热电偶作为参考传感器,待炉温到达 1 100 ℃稳定后,通过电液伺服疲劳拉伸机对试件以 10 N/s 的速度拉伸至 6.3 kN,测试高温拉伸条件下 EFPI-FBG 复合光纤传感器的高温大应变测量性能。在各个测试温度稳定下,采用解调仪对 EFPI-FBG 复合光纤传感器中 FBG 中心波长、F-P 腔腔长数据进行测量并记录结果,其高温拉伸温度应变测量性能试验结果如表 4 所示。

对 EFPI-FBG 复合光纤传感器高温拉伸性能试验结果进行分析,将热电偶所测温度与复合光纤传感器 FBG 温度传感单元中心波长偏移量进行拟合,分析曲线如图 13 所示。

表 4 高温拉伸温度应变性能测试试验结果

Tab.4 Experimental results of temperature strain performance test under high temperature tension

热电偶测量温度/℃	FBG 中心波长/nm	温度/℃	F-P 腔长/μm	应变/με
26	1 534.983	26.0	84.091	0.0
100	1 536.222	105.5	107.608	1 215.9
200	1 537.895	212.9	136.375	2 698.8
300	1 539.569	312.4	165.142	4 177.9
400	1 540.784	390.3	184.274	5 164.1
500	1 542.115	475.8	210.887	6 535.9
600	1 543.839	586.4	245.996	8 345.6
700	1 545.213	674.6	274.254	9 802.2
800	1 546.702	770.2	294.238	10 832.3
900	1 548.146	862.9	323.494	12 340.4
1 000	1 550.203	994.9	379.602	15 232.5
1 100	1 552.404	1 136.2	428.760(未拉伸)	17 713.0
			461.770(6.3 kN)	19 468.0

根据图 13 分析曲线得出复合光纤传感器的拟合式为 $y = 15.582x - 431.736$, $R = 0.997\ 88$,温度灵敏度为 15.58 pm/℃,根据公式(6)计算得出传感器温度测量分辨率为 0.064 ℃。根据公式(7)计算得出传感器温度测量精度为 0.321 ℃ (不超过全量程的 5%)。从图 13 可以看出,每个测量点误差均在全量程的 5% 以内。

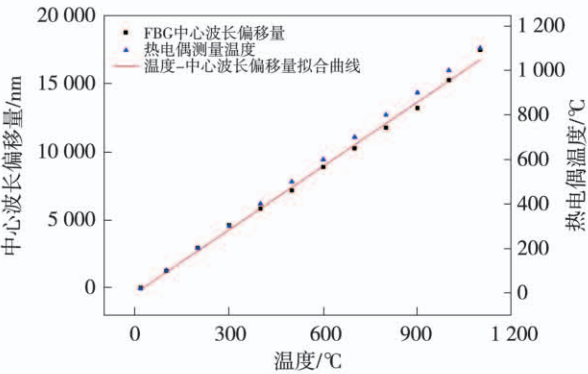


图 13 温度 - FBG 中心波长偏移量 - 热电偶温度曲线图
Fig.13 Curve graph of temperature and FBG center wavelength offset vs. thermocouple temperature

测试获得的复合光纤传感器的时间 - 应变 - 温度关系如图 14 所示。第 1 阶段为热应变阶段,从 26 ℃升温至 1 100 ℃,在 1 100 ℃下测量热应变为

17 713 $\mu\epsilon$;第二阶段是在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 下施加 6.3 kN 的拉力,测得的应变为 19 468 $\mu\epsilon$,此时拉伸应变为 1 755 $\mu\epsilon$ 。将复合光纤传感器 F-P 腔长值进行拟合,拟合式为 $y = 0.019x + 94.699$, $R = 0.998\ 22$,分析曲线如图 15 所示。

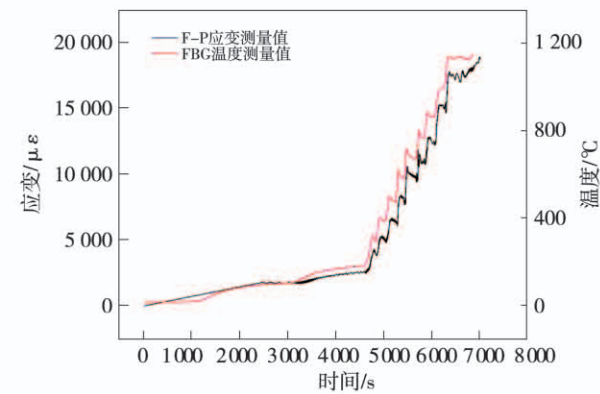


图 14 复合光纤传感器在高温拉伸下的时间 - 应变 - 温度曲线

Fig. 14 Relation curves of the strain and temperature with time for the composite optic sensor under high temperature tension

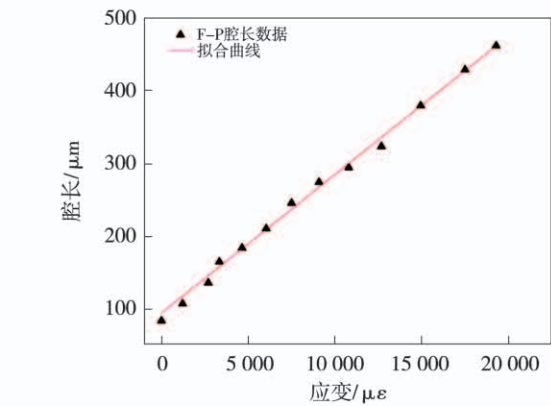


图 15 F-P 腔长值拟合曲线

Fig. 15 Fitting curves of F-P cavity length values

图 16 为仿真应变值与试验测量应变值的对比结果,在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 下测量热应变为 17 713 $\mu\epsilon$,与理论计算仿真值 17 500 $\mu\epsilon$ 相比较,根据应变测量相对误差计算公式计算出复合光纤传感器的应变测量相对误差为 1.22%,应变测量相对误差计算公式为:

$$E_{\sigma} = \frac{|\sigma - \sigma_e|}{\sigma_e} \times 100\% \tag{8}$$

式中: E_{σ} —应变测量相对误差; σ —应变测量值, $\mu\epsilon$;

σ_e —仿真应变值, $\mu\epsilon$ 。

拉伸阶段在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 下施加 6.3 kN 的拉力,测得的拉伸应变为 1 755 $\mu\epsilon$,依据拉伸机和待测试件的参数,理论计算的拉伸应变为 1 790 $\mu\epsilon$,根据公式(8)计算得出拉伸应变的相对误差为 1.96%。由图 16 拟合结果得出 EFPI-FBG 复合光纤传感器应变测量灵敏度为 0.019 $\mu\text{m}/\mu\epsilon$,解调仪腔长分辨率为 0.001 $\mu\epsilon$ 。

根据应变测量分辨率计算公式计算得出复合光纤传感器的应变测量分辨率为 0.053 $\mu\epsilon$,应变测量分辨率计算公式为:

$$R_{\sigma} = \frac{R_l}{S_{\sigma}} \tag{9}$$

式中: R_{σ} —应变测量分辨率, $\mu\epsilon$; R_l —解调仪腔长分辨率, μm ; S_{σ} —应变灵敏度, $\mu\text{m}/\mu\epsilon$ 。

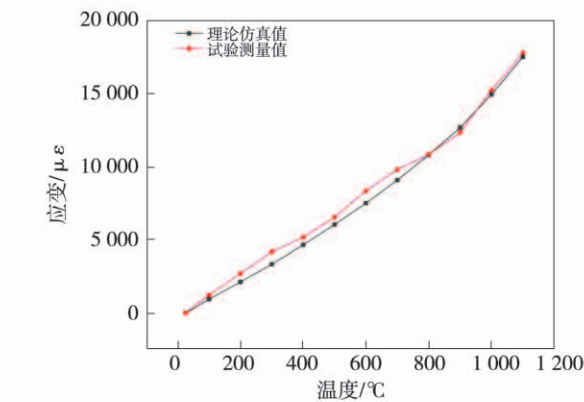


图 16 仿真与试验结果对比曲线

Fig. 16 Comparison curves of simulation and test results

5 结 论

为进行航空发动机/燃气轮服役环境下叶片温度、应变有效检测技术与装置的研究,通过高温拉伸试验平台,测试研制了 EFPI-FBG 复合光纤传感器及解调设备。试验结果表明:

(1) FBG 温度测量范围为:26 ~ 1 100 $^{\circ}\text{C}$,温度测量精度为 0.332 $^{\circ}\text{C}$ (不超过全量程的 5%),分辨率为 0.066 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) F-P 应变测量范围为:0 ~ 19 468 $\mu\epsilon$,在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 下的相对误差为 1.96%,分辨率为 0.053 $\mu\epsilon$ 。

相比于文献[6,8,10]的 EFPI-FBG 复合光纤传感器双参数测量结果(最高温度为 100 $^{\circ}\text{C}$,最大应变

为 $500\ \mu\epsilon$), 本文的 EFPI-FBG 复合光纤传感器能够在 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 下同时测量温度与应变, 其温度测量灵敏度及精度高, 应变在 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 的高温下误差可控制在 2% 范围内。但目前对于高温大应变测量的复合光纤传感器研制还处于试验阶段, 仅采用理论计算仿真值在高温段进行对比分析和获取传感器相对测量精度。下一阶段将采用高精度非接触式间接测量方法, 对传感器安装工艺和测量误差进行改进。

参考文献:

- [1] 吉桂明. 燃气轮机温度测量的新系统[J]. 热能动力工程, 2003, 18(6): 599.
JI Gui-Ming. A new system for gas turbine temperature measurement[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(6): 599.
- [2] 李洪伟, 于晓琳. 军用航空发动机储运过程监测系统设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(10): 140 - 142, 151.
LI Hong-wei, YU Xiao-lin. Design and realization of military aero-engine storage and transportation process monitoring system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2018, 37(10): 140 - 142, 151.
- [3] WEI Lin, HE Li-qing, WAN Yang, et al. Design and research of a aero engine operating status monitoring system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1187(3): 032027 - 032032.
- [4] 黄 伟, 常 俊, 孙智滨. 重型发电燃气轮机的建模与状态监测研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 81 - 86.
HUANG Wei, CHANG Jun, SUN Zhi-bin. Modeling and condition monitoring of heavy-duty power generation gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 81 - 86.
- [5] 杨东亮, 张 波. 航空发动机涡轮后燃气温度检测系统设计与关键技术研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2018, 31(2): 55 - 58, 62.
YANG Dong-liang, ZHANG Bo. Design for detection system of gas temperature after aero-engine turbine and key technology research [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2018, 31(2): 55 - 58, 62.
- [6] 申佳鑫, 王 伟, 赵 琼, 等. 光纤光栅与法珀微腔温度应变双参量传感器[J]. 激光杂志, 2021, 42(2): 16 - 20.
SHEN Jia-xin, WANG Wei, ZHAO Qiong, et al. A fiber grating and Fabry-Perot microcavity sensor for temperature and strain measurement[J]. Laser Journal, 2021, 42(2): 16 - 20.
- [7] XIA Ping, TAN Yue-gang, LI Tian-liang, et al. A high-temperature resistant photonic crystal fiber sensor with single-side sliding Fabry-Perot cavity for super-large strain measurement[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2021, 318: 112492 - 112499.
- [8] YANG Dan-qing, LIU Ying-gang, WANG Yu-xi, et al. Integrated optic-fiber sensor based on enclosed EFPI and structural phase-shift for discriminating measurement of temperature, pressure and RI [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 126: 106112 - 106119.
- [9] 巨亚堂, 王则力, 乔 通, 等. 光纤法布里 - 珀罗高温应变传感器技术进展[J]. 强度与环境, 2018, 45(5): 58 - 64.
JU Ya-tang, WANG Ze-li, QIAO Tong, et al. Progress of fiber optic-Fabry-Perot high temperature strain sensor[J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 45(5): 58 - 64.
- [10] 刘明尧, 杜常饶, 武育斌. 环氧树脂封装的 EFPI-FBG 复合压力温度传感器 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2080 - 2088.
LIU Ming-yao, DU Chang-rao, WU Yu-bin. EFPI-FBG composite pressure and temperature sensor embedded in epoxy resin[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(10): 2080 - 2088.
- [11] 冯嘉双, 王 伟, 张雄星, 等. 光纤法布里 - 珀罗传感器幅值归一化 - 最小均方差联合解调算法[J]. 光子学报, 2020, 49(9): 99 - 106.
FENG Jia-shuang, WANG Wei, ZHANG Xiong-xing, et al. Combined interrogation algorithm of amplitude normalization and minimum mean square error for fiber-optic Fabry-Perot sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 99 - 106.
- [12] 何文涛, 赵光再, 宁佳晨, 等. 基于 FFT 和复域相关的光纤 EFPI 压力传感器多腔长解调方法[J]. 遥测遥控, 2019, 40(3): 17 - 21.
HE Wen-tao, ZHAO Guang-zai, NING Jia-chen, et al. Multi-cavities demodulation algorithm of EFPI pressure based on FFT and complex domain correlation [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(3): 17 - 21.
- [13] HE Liang, ZHANG A-mei, YAN Hong-lai, et al. Self-correlation algorithm in optical frequency domain for cavity length interrogation of fiber-optic Fabry-Perot sensors [J]. Optik, 2021, 225: 165822 - 165830.
- [14] GIZATULIN A, MESHKOV I, VINOGRADOVA I, et al. Generation of vortex optical beams based on chiral fiber-optic periodic structures[J]. Sensors, 2020, 20(18): 5345 - 5361.
- [15] 林启敬, 伍子荣, 赵 娜, 等. 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[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 1 - 7.
LIN Qi-jing, WU Zi-rong, ZHAO Na, et al. Research on optical fiber F - P temperature sensor and its signal demodulation system used in aero-engine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 1 - 7.