

文章编号: 1674-8190(2021)03-137-07

一种新型结构非本征F-P传感器全应变 测量性能研究

王元生, 温志勋, 艾长胜, 杨柳

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710129)

摘要: 光纤传感器作为一种新的测量信息传输方式,在航空发动机部件材料高温测量领域具有重要的应用价值。基于多光束干涉原理,制作一种新型结构的非本征光纤Fabry-Perot(F-P)传感器,探索其在航空发动机部件材料室温/高温环境静力拉伸试验过程中的变形测量性能。采用平板和圆棒两种形状的试样,在不同表面粗糙度和两种加载速率下,分别对比高级视频引伸计(AVE)进行室温、高温环境下静力拉伸试验。结果表明:新型结构的非本征光纤F-P传感器具有测量范围大,测量精度高,测量结果不受外界因素影响等优势,可实现航空发动机部件材料的超量程全应变测量;此外,在测量精度和设备体积方面明显优于AVE。

关键词: 非本征光纤F-P传感器;航空发动机;高级视频引伸计;室温/高温环境;静力拉伸试验;全应变测量

中图分类号: V263.3; TH73

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.03.17

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Full Strain Measurement Performance of Non-intrinsic Optical Fiber F-P Sensor

WANG Yuansheng, WEN Zhixun, AI Changsheng, YANG Liu

(School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: As a new measurement information transmission method, optical fiber sensors have important potential applications in the field of high temperature measurement of aero-engine component materials. In this paper, based on the principle of multi-beam interference, a new structure of non-intrinsic optical fiber Fabry-Perot (F-P) sensor is made, and its deformation measurement performance in the process of static tensile test of aero-engine component materials at room temperature/high temperature is explored. Two types of specimens, flat plate and round bar, are used to perform static tensile tests at room temperature and high temperature under different surface roughness and two loading rates. The test results show that the non-intrinsic optical fiber F-P sensor with a new structure has the advantages of large measurement range, high measurement accuracy, and the measurement results are not affected by external factors, and can achieve over-range full-strain measurement of aero-engine component materials. In addition, it is significantly better than AVE in terms of measurement accuracy and equipment volume.

Key words: non-intrinsic optic fiber F-P sensor; aero-engine; advanced video extensometer; room temperature/high temperature environment; static tensile test; over-range full-strain measurement

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(51875462); “两机”专项基础研究(2017-V-0003-0052, 2017-IV-0003-0040)

通信作者: 温志勋, zwxw@nwpu.edu.cn

引用格式: 王元生, 温志勋, 艾长胜, 等. 一种新型结构非本征F-P传感器全应变测量性能研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 137-143.

WANG Yuansheng, WEN Zhixun, AI Changsheng, et al. Research on full strain measurement performance of non-intrinsic optical fiber F-P sensor[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 137-143. (in Chinese)

0 引言

航空发动机热端部件材料处于复杂的工作环境,实时准确的应变测量技术对热负载和机械负载共同作用下监测评估发动机部件材料的性能至关重要,这就对测量传感器和仪器技术的发展提出了较高要求^[1-3]。传统的基于压电、压阻、电容、磁感等原理的应变传感器能够满足测量范围、频率响应和其他大部分要求,但这些传感器仅能在常温测试环境中表现良好,无法满足航空发动机高温环境测试要求。

光纤传感与测量技术是仪器仪表领域重要的发展方向^[4-5],相对传统的传感器能起到扩展提高的作用,研究人员对其应用前景具有较高的期望。Tian Ye等^[6]介绍了一种基于非对称双侧孔光纤(DSHF)的高灵敏度液位传感器;巴德欣等^[7]阐述了分布式光纤传感技术及其在航空航天领域的应用情况;牛杭等^[8]开展了光纤传感器光栅波长解调系统性能分析;张中流等^[9]在现有分布式光纤传感技术研究成果的基础上,提出一种基于光纤传感技术的结构受力分布式测量方法;姚国珍等^[10]设计了具有温度补偿功能的光纤振动测量系统。

与传统传感器相比,光纤F-P传感器具有精度高、线性好、灵敏度高、响应温度范围广、质量轻、尺寸小、安装方便、抗干扰能力强等优点,适合在振动以及高温高压等恶劣环境下进行测量,因此非常适合安装在航空发动机高温部件等被测结构的内部或者表面,用来实时测量应力、应变、变形、振动、温度等物理量,并且可进行持续性检测。Wang Tingting等^[11]提出了一种基于混合式法布里—珀罗干涉仪的微型压力传感器设计,实现了对微小应变的测量。然而,为了准确评估材料的力学性能,必须实现对材料全应变的测量,因此要提高传感器的应变测量范围。李松等^[12]开展了基于双孔光纤并联双F-P干涉仪的传感器设计,主要用于温度与应力的同步测量;孟瑜^[13]提出并制成了由动态光栅与传统光栅构成的新型F-P结构,完成了对复合光谱变化规律的理论分析;Li Zhigang等^[14]设计并制作了一种用以检测空气压力和温度的复合腔体结构的光纤传感器,并验证了其测量精度。文献[12-14]的研究证明了解调光纤中复合信号的可行性。刘冬冬^[15]分析了多参数传感单元受外界变化的传感机理,设计了可同时

测量压力和温度变化的复合结构光纤传感器,证明了光纤F-P结构在50~200℃温度范围内的可靠性;陶珺等^[16]将稀疏快速傅里叶变换方法应用于光纤F-P传感器的改进分析,提高了信号解调速率,使得F-P传感器更适用于实时检测应变。

针对目前光纤光栅传感器应变测量量程受限等问题,本文根据其工作原理尝试制作一种超量程非本征光纤F-P传感器,探索其在常温、高温环境大变形静力拉伸试验过程中的应变测量性能,并与高级视频引伸计(AVE)的测量结果进行对比,验证非本征光纤F-P传感器的精确性、稳定性、响应温度范围等实际效果,以期为其应用于航空发动机部件材料微型试样的高温蠕变试验打下基础。

1 光纤F-P传感器的传感原理

光纤Fabry-Perot传感器通常简称为光纤F-P传感器,其结构主要分为两部分:敏感元件和信号解调装置。根据敏感元件是否为光纤本身,可将光纤F-P传感器分为两种:本征型和非本征型。本征光纤F-P传感器的敏感元件为光纤本身,工作时光纤内部的干涉结构随着外界待测物理量的影响发生变化,通过探测器获取光波的参量变化来得到外界待测物理量,是一种集测量和传输为一体的光纤传感器。非本征光纤F-P传感器的敏感元件不是光纤本身,其干涉结构在光纤外部,光纤只作为传光使用,这种结构使非本征光纤F-P传感器可以实现大范围的变形测量。

非本征光纤F-P传感器工作原理如下:光源打出的光波经光纤传输至玻璃管内部的空气腔,在空气腔两端的光纤端面先后发生反射,两束反射光发生干涉,并沿光纤返回,如图1所示。将非本征光纤F-P传感器固定在试样的标距段上,试样标距段发生的微小变形将会引起传感器空气腔长度变化,而两束反射光的相位差会受到空气腔长度的影响。

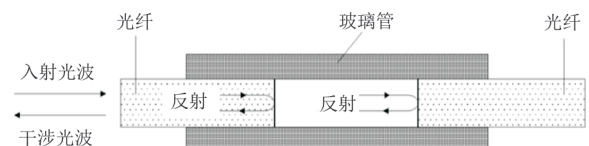


图1 非本征型光纤F-P传感器的结构原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the extrinsic optical fiber F-P sensor

假设入射光垂直入射,即入射角 $Q=0$,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

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

式中: I_R 为干涉光强; $\phi = \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)$ 为反射光的相位差,其中 L 为空气腔腔长, 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。

因此,根据干涉光谱中光强在时域上的分布变化即可计算出两束反射光相位差的变化,进而计算出非本征光纤F-P传感器的实时腔长。根据实时腔长较初始腔长的变化量和试样标距段的长度即可计算出试样标距段的应变。由于制成光纤纤芯和玻璃管的材料均为熔点大于 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 且热膨胀系数远小于金属的二氧化硅,故非本征型光纤传感器在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上航空发动机部件材料的超量程全应变测量中仍可稳定工作。

2 非本征光纤F-P传感器试验方法

2.1 试验准备

新型结构的非本征光纤F-P传感器制作需要光纤、带金属支撑的热缩管、光纤跳线、毛细玻璃管、AB胶等材料。主要制作过程如下:(1)截取一段长光纤A,剥掉两端涂覆层,进行端面切割;将光纤跳线接线端从热缩管中穿出,与光纤A的一端相对放置于光纤焊机中进行加热,使光纤跳线与光纤A熔接;再将热缩管加热以保护熔接位置。截取一段短光纤B,剥掉一端的涂覆层,并进行端面切割。(2)把粗细两个毛细玻璃管套在一起,将光纤A另一端的光纤端面从细毛细玻璃管中穿出并切出平整端面,再将光纤A进行回抽到细玻璃管内部,此时将粗玻璃管沿着细玻璃管向光纤A的裸光纤移动,把裸光纤置入管内进行固定。(3)光谱分析仪分别接光纤跳线和计算机。将光纤B的裸光纤由细玻璃管的另一侧缓慢插入,将光纤B的端面向光纤A的端面靠近,直到光谱仪上显示4~5个周期的正弦波时即可停止移动,光纤A和B分别与粗细玻璃管粘接,并将多余的光纤B截断,两根光纤的端面平行对立形成干涉结构。至此,

新型结构的非本征光纤F-P传感器制作完成,如图2所示。

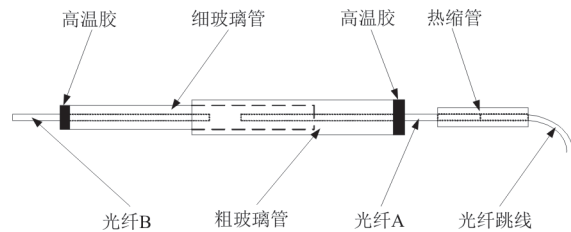


图2 新型结构的非本征光纤F-P传感器

Fig. 2 Extrinsic optical fiber F-P sensor with new structure

与传统型非本征光纤F-P结构(如图1所示)相比,新型结构的非本征光纤F-P传感器在装配过程中将两根玻璃管分别固定在试样的标距段上,将标距段上的应变经过玻璃管传递到传感结构中,实现对应变的测量。该结构一方面避免了传统型光纤传感器固定在航空发动机部件材料表面,在高温下光纤的涂覆层易受热熔化,使光纤滑脱导致传感器失效;另一方面,解决了在传统型光纤传感器装配过程中,玻璃管两端位置的光纤易弯折,而光纤纤芯的抗剪能力较弱,导致传感光路中断引起传感器失效。同时,通过粗细玻璃管嵌套的新型结构改善了在试样拉伸过程中两根光纤端面的对中性,使传感器在大量程甚至超量程的全应变测量试验中的稳定性显著增加。而传统非本征型光纤F-P传感器在试样拉伸过程中,随着应变的增加,玻璃管中的光纤长度减少,导致光纤纤芯的对中性变差,即测量的应变越大,传感器的精度越差。

总之,相较于传统型非本征F-P光纤传感器,本文提出的新型结构在高温环境和大范围的应变测量中更具优势,更加适用于航空发动机部件材料的超量程全应变测量。

2.2 试验材料及方法

为验证新型结构的非本征光纤F-P传感器的测量性能,将钢材加工成平板和圆棒小试样(国标),在静力拉伸试验机上进行拉伸过程全应力应变曲线测定,并对两种不同试样、两种不同加载速率(0.5 、 1 mm/min)、温度(室温和 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 高温)进行对比分析试验。

试验前需精确测量试样尺寸,校准高温炉温度。将光纤传感器装配在试样上,如图3所示。将

光纤跳线接入解调系统,如图4所示。调整夹具及拉杆确保试样对中性,加载预载荷。调整试验机镜头对准试样标距段并做标识。试验停止条件为试样断裂或者光纤传感器失去信号。其中,高温试验是在电子蠕变持久试验机上进行的,温度的控制误差小于 5°C ,待温度达到预设值以后,恒温保温10 min。

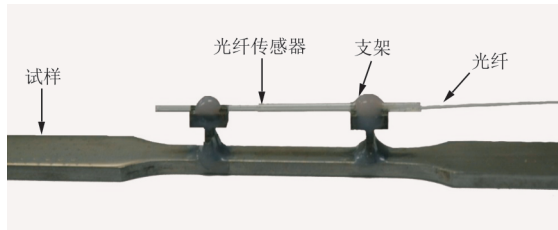


图3 非本征光纤F-P传感器装配图
Fig. 3 Assembly drawing of extrinsic optical fiber F-P sensor



图4 试验机测试件安装及解调系统图
Fig. 4 Installation and demodulation system diagram of test piece of testing machine

3 试验结果分析

在光纤解调仪的数据存储中设定时间参数,并将光纤传感器的变形和时间的对应关系拟合出曲线公式;由于试验数据的时间和应力一一对应,将试验数据的时间带入拟合曲线公式,得到与试验机同时刻相对应的光纤应变数据,继而可求出其应力应变关系。以 0.5 mm/min 加载速率的光滑平板试样试验结果为例,将光纤应变数值和时间参数进行拟合,拟合公式的确定系数为 0.9991 ,和方差为 0.03519 。拟合曲线的公式为

$$f(x) = 0.0425 \exp\left\{-\left[\frac{x-457.9}{286.6}\right]^2\right\} + 0.02943 \exp\left\{-\left[\frac{x-1079}{98.6}\right]^2\right\} + 0.2824 \exp\left\{-\left[\frac{x-1072}{447.4}\right]^2\right\} \quad (2)$$

式中: x 为试验过程中的时间; $f(x)$ 为时间 x 的计算应变。

将记录试验数据的时间点带入拟合曲线公式求得计算应变,拟合后的计算应变与原光纤应变的曲线对比结果如图5所示,可以看出:两组数据的误差很小,且在 600 s 以后,两组数据的误差稳定缩小在 0.4% 以内,证明了该拟合结果的准确性。

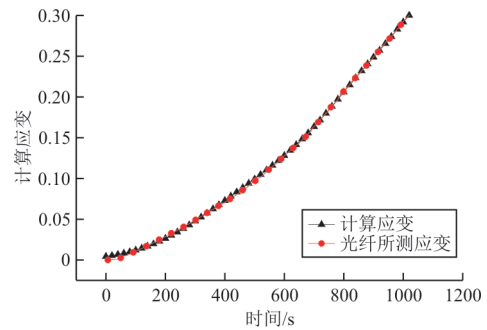


图5 平板试样计算应变与光纤应变结果对比
Fig. 5 Comparison results of calculated strain and fiber optic strain

将处理后的数据进行绘图,制作出应力应变曲线,统计不同条件下的试验结果,光纤F-P传感器和AVE的对比结果如表1所示。

表1 光纤传感器与AVE测量结果对比
Table 1 Comparison of optical fiber sensor and AVE measurement results

试样形式	拉伸速率/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	断裂时 间/s	应变		伸长 率/%	断面收 缩率/%
			AVE	光纤传 感器		
光滑 平板	0.5	1 020.800	0.249	0.300	6.098	30.400
	1	468.400	0.238	0.283	5.691	31.120
不光滑 平板	0.5	671.200	0.146	0.139	3.984	23.816
	1	413.200	0.205	0.208	5.041	27.760
光滑 圆棒	0.5	302.800	0.045	0.043	0.894	16.826
	1	246.000	0.117	0.119	2.195	23.962

光纤传感器和AVE不同速率、不同粗糙度平板静力拉伸的结果如图6~图7所示,可以看出:(1)光纤传感器和AVE的测量结果在弹性阶段基本重合,进入屈服阶段时,AVE曲线有明显转折,形成拐角,而光纤传感器曲线整体平滑过渡;(2)对于不光滑平板试样,光纤传感器和AVE的测试结果能保持基本重合;(3)对于光滑试样,光纤传感器测得的应变值明显大于AVE测得的应变值,其原因是AVE通过镜头锁定并实时测量试样上的标记点,而光滑试样表面过于光滑,在AVE进行红

外补光照射下试样表面形成反射光,导致 AVE 测量出现误差。

经对比同种条件下表面光滑试样断后的总应变要大于表面不光滑的试样。其中,在加载速率为 0.5 mm/min,光滑平板较不光滑平板试样的测量应变高出一倍;而在加载速率为 1 mm/min,光滑平板试样较不光滑平板试样的测量应变高出近 50%。由此可知表面粗糙度对拉伸结果影响较大,对 AVE 应变测量结果也有影响,但对光纤传感器的测量结果影响较小。

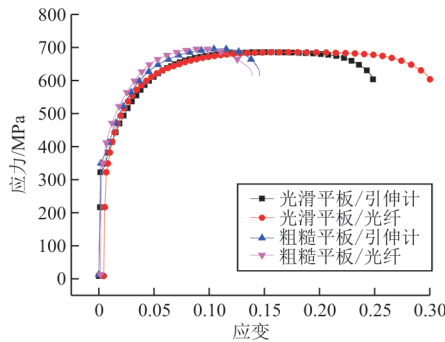


图 6 0.5 mm/min 加载速率两种测量方式对比结果
Fig. 6 Comparison results between optic F-P and AVE of 0.5 mm/min loading rate

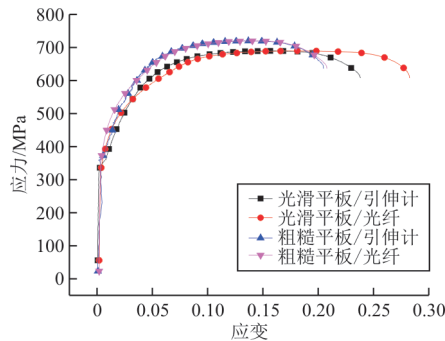


图 7 1 mm/min 加载速率两种测量方式对比结果
Fig. 7 Comparison results between optic F-P and AVE of 1 mm/min loading rate

光纤传感器和 AVE 在两种速率、不同试样形式下的静力拉伸结果如图 8~图 9 所示,可以看出:(1)相同加载速率作用下,不同试样形式的测量结果弹性阶段基本重合;(2)光滑平板试样测试中,光纤传感器的应变要明显大于 AVE,这是由于 AVE 测量光滑平板试样的过程中反光所引起的;(3)光滑圆棒试样测试中,光纤传感器和 AVE 的测量曲线大体上能保持重合,变化较小;(4)光滑平板试样与光滑圆棒试样的传感器应变值差距较大,这是由于试样装夹方式造成的:对于光滑平板

试样只能在未安装光纤传感器的一侧进行标识,而对于光滑圆棒试样,可选择在光纤传感器表面是粗糙结构的支架上进行标识,测量结果更好,由此展示出光纤传感器不受外界干扰的测量优势。

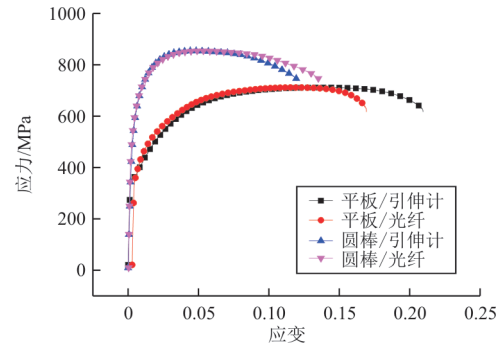


图 8 0.5 mm/min 加载速率的两种光滑试样对比结果
Fig. 8 Comparison results of two smooth samples with 0.5 mm/min loading rate

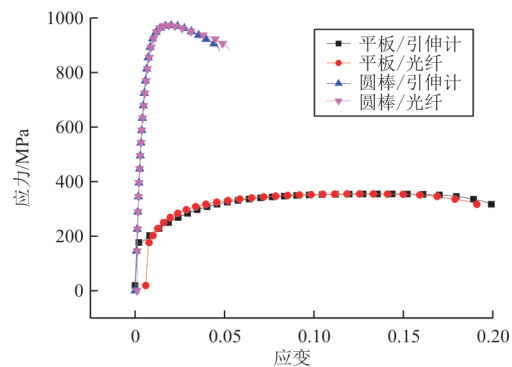


图 9 1 mm/min 加载速率的两种光滑试样对比结果
Fig. 9 Comparison results of two smooth samples with 1 mm/min loading rate

本文高温拉伸试验依旧采用两种加载速率,分析 200 °C 高温光纤传感器相对 AVE 的测量性能。

在 200 °C 高温环境,两种加载速率下光纤传感器和 AVE 全应力应变曲线测量结果对比如图 10~图 11 所示,可以看出:(1)两种测量方式在试样的弹性阶段内测量的曲线基本一致;(2)在屈服阶段以后差异逐渐变大,进入强化阶段后有细微差异,偏差约在 1% 应变以内;(3)在高温拉伸进入颈缩阶段直至断裂,引伸计测量得到的总应变偏小,最大差异约为 8% 应变,主要是由于辅助高温合金装置与试验机的拉杆摩擦引起的,而光纤传感器可直接装夹在试样表面无需借助任何辅助装置,不

存在与试验机之间的摩擦问题,结果更为精确。

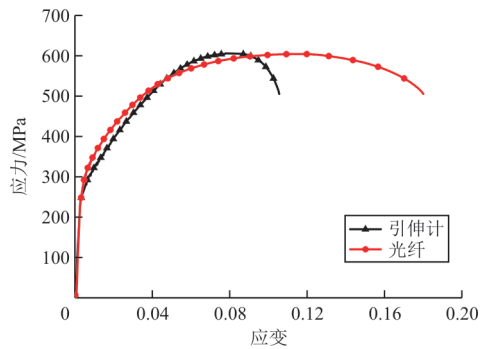


图 10 0.5 mm/min 加载速率下两种测量方式对比结果(高温)

Fig. 10 Comparison results between optic F-P and AVE of 0.5 mm/min loading rate (high temperature)

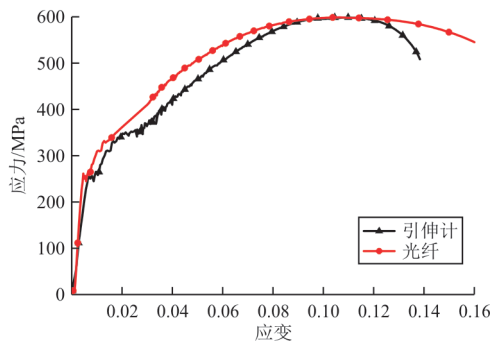


图 11 1 mm/min 加载速率下两种测量方式对比结果(高温)

Fig. 11 Comparison results between optic F-P and AVE of 1 mm/min loading rate (high temperature)

综上,本文制作的新型结构非本征 F-P 光纤传感器应变测量效果可达到目前实验室常用的引伸计测量水平,受外界因素影响极小,且其在测量变形的精度及设备体积上都表现出较大优势。

4 结 论

(1) 新型结构的非本征光纤 F-P 传感器较 AVE 测量结果稳定,不易受试样表面粗糙度和装夹方式等外界因素的影响,且其应变测量精度满足试验要求。

(2) 面对大变形试样时,AVE 受量程限制,无法实现超量程的全应变测量,而新型结构的非本征光纤 F-P 传感器可根据待测试样的变形范围进行定制,表现出更大的优势。

(3) 在高温环境下,光纤传感器的性能不受高

温的影响,依旧保持良好的测量精度,相比 AVE 引伸计,新型结构的非本征光纤 F-P 传感器体积小,可直接装夹在试样表面而不需要任何辅助装置,测量结果更为精确。

参 考 文 献

- [1] 慕琴琴,徐健. 航空发动机叶片-机匣碰摩试验技术研究综述[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 293-301.
MU Qinqin, XU Jian. A review of the research on the test technology of aircraft engine blade-casing rub-impact [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 293-301. (in Chinese)
- [2] 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 Qijing, WU Zirong, 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. (in Chinese)
- [3] 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. The analysis of aeroengine main shaft roller bearing based on quasi-dynamics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 86-92. (in Chinese)
- [4] LU Mengdi, LIANG Yuzhang, QIAN Siyu, et al. Optimization of surface plasmon resonance biosensor with Ag/Au multilayer structure and fiber-optic miniaturization [J]. Plasmonics, 2017, 12(3): 663-673.
- [5] LI Shiyu, XIA Li, ZHANG Houjin, et al. Inline integration of offset MMF-capillary-MMF structure as a portable and compact fiber-optic surface-enhanced Raman scattering microfluidic chip [J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 10548-10552.
- [6] TIAN Ye, TAN Tao, DUAN Chao, et al. High sensitivity liquid level sensor based on dual side-hole fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics Communications, 2019, 440: 194-200.
- [7] 巴德欣,董永康. 分布式光纤传感技术及其在航空航天领域的应用展望[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 730-738.
BA Dexin, DONG Yongkang. Distributed optical fiber sensor and its potential applications in health monitoring of aerospace structures [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 730-738. (in Chinese)
- [8] 牛杭,张小栋,邸发贵,等. 模型驱动的光纤光栅波长解调系统性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 51-59.
NIU Hang, ZHANG Xiaodong, DI Fagui, et al. Perfor-

- mance analysis of FBG wave length demodulation system based on mathematic model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 51-59. (in Chinese)
- [9] 张中流, 何宁, 何斌, 等. 基于分布式光纤传感技术的结构受力测量新方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 45-55. ZHANG Zhongliu, HE Ning, HE Bin, et al. New method to measure structure stress based on distributed optical fiber technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 45-55. (in Chinese)
- [10] 姚国珍, 李永倩, 尚秋峰, 等. 具有温度补偿功能的光纤振动测量系统[J]. 光子学报, 2016, 45(10): 1-6. YAO Guozhen, LI Yongqian, SHANG Qiufeng, et al. Optical fiber vibration measurement system with temperature compensation function[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(10): 1-6. (in Chinese)
- [11] WANG Tingting, GE Yixian, NI Haibin, et al. Miniature fiber pressure sensor based on an in-fiber confocal cavity[J]. Optik, 2018, 17: 869-875.
- [12] 李松, 张徐, 吕明阳, 等. 双孔光纤集成 F-P 干涉仪的高灵敏度温度传感器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 601-606. LI Song, ZHANG Xu, LYU Mingyang, et al. A high-sensitivity temperature sensor based on integrated dual-hole fiber Fabry-Perot Interferometer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 601-606. (in Chinese)
- [13] 孟瑜. 两种不同类型的光纤 Bragg 光栅构成的新型 F-P 干涉腔的特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018. MENG Yu. Characteristics of F-P interferometric cavity formed by two types of fiber Bragg gratings [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [14] LI Zhigang, TIAN Jiajun, JIAO Yuzhu, et al. Simultaneous measurement of air pressure and temperature using fiber-optic cascaded fabry-perot interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(7): 11-18.
- [15] 刘冬冬. 基于 EFPI-FBG 复合结构的光纤温压传感器关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. LIU Dongdong. Research on key technologies of optical fiber temperature and pressure sensor based on EFPI-FBG composite structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [16] 陶珺, 陈杨黎, 卢景琦. 基于稀疏快速傅里叶变换的光纤 F-P 传感器腔长解调方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 216-222. TAO Jun, CHEN Yangli, LU Jingqi. Method of the cavity length demodulation for optical fiber F-P sensors based on sparse fast fourier transform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 216-222. (in Chinese)

作者简介:

王元生(1983—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:航空发动机结构振动、信号处理。

温志勋(1982—),男,博士,教授。主要研究方向:航空发动机结构强度寿命与可靠性。

艾长胜(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:基于光纤传感的微型试样应变测量技术。

杨柳(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:镍基高温合金失效及光纤传感。

(编辑:马文静)