

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108165

# 基于光纤光栅的高速气流总温测量方法<sup>\*</sup>

周 震<sup>1</sup>, 刘显明<sup>1</sup>, 韩国庆<sup>1</sup>, 陈昱如<sup>1</sup>, 周 峰<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044;

2. 中国航发湖南动力机械研究所 株洲 412002)

**摘 要:**针对航空发动机高速气流总温测量的需求,结合光纤光栅尺寸小、无需回路的结构特点,本文提出一种采用光纤光栅作为感温元的滞止罩式微型总温探针设计与测量方法。通过数值模拟方法对光纤光栅总温探针进行了气动结构设计,分析了探针结构参数对总温测量结果的影响;在此基础上,制作了光纤光栅总温探针,搭建了总温测量数据处理系统,并通过亚音速风洞试验测试了光纤光栅总温探针的工作性能。结果表明,在马赫数为 0.3~0.8 亚音速气流冲击下,光纤光栅总温探针具有良好的滞止效果和稳定性,马赫数大于 0.5 时其复温系数达到 0.8 以上,在马赫数为 0.8 时达 0.99。所制作的微型光纤光栅总温探针直径低至 0.8 mm,结构尺寸远低于热电偶探针,在满足总温精准测量的同时,可有效降低对流场的干扰。

**关键词:**总温传感器;高速气流;航空发动机;光纤布拉格光栅;风洞试验

**中图分类号:** TH811 TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Total temperature measurement of high-speed air flow based on fiber Bragg grating

Zhou Zhen<sup>1</sup>, Liu Xianming<sup>1</sup>, Han Guoqing<sup>1</sup>, Chen Yuru<sup>1</sup>, Zhou Feng<sup>1,2</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, The Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education, Chongqing 400044, China; 2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** Aiming at measuring the total temperature of high-speed airflow of the aero-engine, a novel total temperature probe combined with the stagnation tube and fiber grating is proposed. Due to its small size and single-end sensing structure, the fiber grating is a competitive alternative for temperature sensing. A numerical simulation method is employed to design the aerodynamic structure of probe and analyze the influence of the structure parameters on the measurement results. Based on this, the fiber grating total temperature probe is fabricated, and the total temperature measurement system is established. And the working performance of the probe is tested under the subsonic wind tunnel. Results show that the probe has good stagnation effectiveness and stability with Mach numbers between 0.3 and 0.8. When the Mach number is larger than 0.5, the recovery factor is above 0.8. It is as high as 0.99 when the Mach number is 0.8. The diameter of the miniature fiber grating total temperature probe is 0.8 mm, and the overall size is much smaller than that of a thermocouple probe. It can effectively reduce the interference to the flow field while satisfying the precise measurement of the total temperature.

**Keywords:** total temperature transducer; high-speed air flow; aero engine; fiber Bragg grating; wind tunnel test

## 0 引 言

进气道、压气机、燃烧室和涡轮机内的气流总温参数

测量对评估航空发动机的工作效率和性能具有重要影响,对航空发动机的研制、试验、生产和使用维修有着重要意义<sup>[1-4]</sup>。总温是指当气流在绝热状态下完全静止,动能全部转化为内能时所反映出来的温度<sup>[5]</sup>。随着对测试

收稿日期:2021-06-28 Received Date: 2021-06-28

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(61875023,51975077)、国家重大专项(J2019-V-0002-0093)、重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0036)项目资助

要求越来越高,总温测量也越来越追求高空间分辨率和高精度,这就要求传感器的体积更小,稳定性更好。目前主要采用热电偶作为总温传感的感温元件,因电类传感的技术原理限制,存在探针尺寸较大、工艺较复杂、测温精度和响应速度难以再提升等问题,需要探索新的测量方法、开发新的传感器,以满足不断增长的总温测量需求<sup>[6-11]</sup>。

光纤类传感器具有尺寸小、易封装、传感器端不带电、长期应用性能稳定等光纤传感技术优点,在一些特殊场景应用时还具备高空间分辨率、高精度、抗电磁干扰等潜在优势<sup>[12-15]</sup>。近年来,光纤传感技术被广泛应用于航空发动机温度测试领域<sup>[16]</sup>,可有效解决电化学传感存在的部分问题。中北大学郝晓剑等<sup>[17]</sup>研制了基于普朗克黑体辐射定律的蓝宝石光纤黑体腔传感器,能在 900 ~ 2 000℃ 的高温环境中稳定工作,使用了高功率激光脉冲提供高达 1 500℃ 高温阶跃输入,测得时间常数为 10 ms 数量级,并成功地测量了某导弹发射箱前框的瞬态表面高温。西安交通大学林启敬等<sup>[18]</sup>针对航空发动机的高温工况,设计了一款光纤 F-P 传感器,其 F-P 腔是空气腔,在 30 ~ 1 000℃ 温度范围内,传感器的温度响应灵敏度为 0.012 nm/℃,线性度为 0.996。前期仅完成了静态性能测试,后续还需进行动态性能的测试,以验证其在航空发动机恶劣工况下的工作性能。目前,已报道的绝大部分光纤测温技术都是进行结构体表的温度测试<sup>[17-21]</sup>,并非针对高速运动气流的总温测试。

在高速气流总温测试的光纤传感技术方面,英国国防研究局、赫瑞瓦特大学和牛津大学最早在 1995 年报道了采用光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 结构的高速气流温度传感器<sup>[22]</sup>,该团队在 2002 年再次对此传感器进行了优化改进,20 ~ 180℃ 温区的动态频率达 30 kHz<sup>[23]</sup>。但该方法需在光纤端面形成微腔,目前只能采用镀膜技术实现,对膜层材料和工艺要求极高,材料需有高热光系数并易于沉积,还必须保障膜层和光纤端面具有极高的附着力,否则在高速气流冲击下端面的膜层物理属性易发生变化,且膜层容易脱落。所报道的使用时间通常不到一个小时,可靠性较差,该研究之后未见后续报道。中北大学王楠楠<sup>[24]</sup>设计了一种基于黑体辐射原理的光纤总温传感器,用于高速气流的总温测试。对总温传感器的滞止罩结构进行了完整设计,并利用有限元仿真软件对总温传感器滞止罩内部的流场和温度场分布进行了仿真,并对总温测量的误差进行了分析,但未开展进一步验证试验。

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 自出现以来,经过 30 多年的发展,随着研究的深入,制造技术的改进,种类不断增多,应用领域不断扩宽,逐渐成为最有发展前途、最具代表性和发展最为迅速的光纤无源器件之

一。德国 MTU Aero Engines 公司于 2016 年报道了采用 FBG 温度探针进行开放式发动机喷射试验机的气流总温测试<sup>[25]</sup>。他们使用 FBG 作为感温元件制作了总温探针,在马赫数为 0.3 ~ 0.8 的风洞下进行了温度测试试验,FBG 总温探针表现出良好的机械鲁棒性和恢复系数,证明了用 FBG 做感温元件测量高速气流总温是可行的,与热电偶方案相比可以有效减小探针体积。基于 FBG 的总温传感器研制是满足航空发动机总温测量需求的重要发展方向。但 MTU 只报道了 FBG 总温测量的初步试验结果,对基于 FBG 的总温探针设计方法缺乏理论分析,且所设计的探针还存在明显的结构不合理问题。比如,其 FBG 栅区位于探针中部,即感温区并未设置在光纤端部气流滞止的位置;此外,其采用传统涂覆层的光纤和光栅,增加了导热层厚度,这些都会导致测温速度和精度的降低。针对上述问题,本研究从理论建模仿真出发对光栅总温探针进行了气动结构设计和分析,采用无涂覆的裸光栅并进行光栅前置的结构设计,制作总温探针,并通过亚音速风洞试验来验证其工作性能。

## 1 FBG 高速气流总温测量原理

### 1.1 FBG 感温原理

光纤布拉格光栅是一种无源光器件,是对光纤纤芯折射率进行周期性调制而成,其折射率调制周期一般小于 1 μm。由于折射率调制存在周期性,如图 1 所示当宽带入射光进入 FBG 后,会形成反射和透射光谱<sup>[26]</sup>。

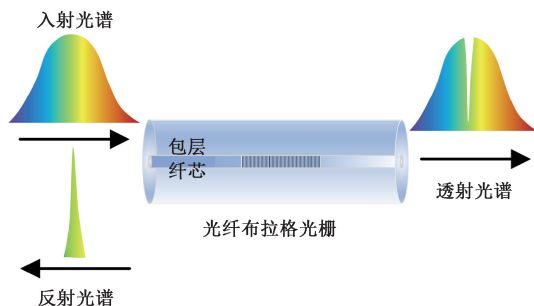


图 1 FBG 的反射透射光谱

Fig. 1 Reflection and transmission spectrum of FBG

FBG 的布拉格波长 (反射光谱的谐振波长)  $\lambda_B$  由光栅的周期  $\Lambda$  和纤芯的有效折射率  $n_{eff}$  决定。

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

当外界温度变化使得 FBG 的有效折射率  $n_{eff}$  和周期  $\Lambda$  发生变化时,  $\lambda_B$  亦发生相应的变化,通过探测反射光谱谐振波长  $\lambda_B$  的变化便可求出外界温度的变化,即:

$$\lambda_B = \lambda_{T_0} + \Delta\lambda_B = \lambda_{T_0} + K_T \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中:  $K_T$  为光纤光栅的温度灵敏系数。

## 1.2 总温测量原理

高速运动的气流具有极高的动能,动能可转换为内能并引起温度升高。因此,高速气流的温度有静温、动温和总温之分。静温是指感温元件与被测气流之间保持相对静止时所测得的温度,动温是指在感温元件与被测气流之间存在相对速度时,被测气流的动能转化为内能时使气体温度升高的部分。气流的总温是气流的静温和动温之和。一般静温用来计量气体分子无序运动的动能,动温用来计量气体分子定向运动的动能<sup>[27]</sup>。根据可压缩气流的伯努利方程,气流动温可以表示为:

$$T_v = \frac{v^2}{2c_p} \quad (3)$$

式中: $v$ 为气流速度, $c_p$ 为比定压热容。

根据等熵可压缩流的状态方程<sup>[5]</sup>,总温可进一步表示为:

$$T_0 = T_s + T_v = T_s + \frac{v^2}{2c_p} = \left(1 + \frac{k-1}{2}Ma^2\right) T_s \quad (4)$$

式中: $T_s$ 为气流静温(K); $T_0$ 为气流总温(K); $Ma$ 为马赫数,在流场中为某点的速度与当地声速的比值; $k$ 为气体比热比。

使用接触式传感器测温时,只有当传感器与气流以相同的速度一起运动时才能测量其静温,这在高速气流的温度测量中几乎是无法实现的。因此,气流的温度测量主要是指测量气流的总温,通过静温与总温的对应关系间接获取气流的静温。

总温包含静温和动温,想要获得动温需要将气流在测温点即感温元件的位置以绝热的状态完全静止,使气流分子定向运动的动能完全转化为热能才能获得,这就需要设计气流滞止装置来获取动温,从而获得气流总温。

由于现实中无法做到将气流以绝热状态完全滞止,因此引入复温系数来表征总温传感器将气流动能恢复为热能的程度。

$$r = \frac{T_g - T_s}{T_0 - T_s} \quad (5)$$

式中: $r$ 为复温系数, $T_g$ 为传感器测得温度值(K)。

由式(5)可以看出复温系数是一个介于0和1之间的数,越接近1证明对气流的滞止效果越好。在标准风洞下获得传感器的复温系数之后通过式(6)就能得到修正后的总温<sup>[27]</sup>。

$$T_0 = T_g \left(1 + \frac{k-1}{2}Ma^2\right) / \left(1 + \frac{k-1}{2}Ma^2 r\right) \quad (6)$$

## 2 FBG 总温探针的结构设计与仿真分析

由上节可知,要实现用FBG进行总温测量需要设计带有气流滞止结构的探针即总温探针来对高速气流进行

滞止,将其动能转化为热能。为了探究FBG总温探针的理论性能,本研究设计了FBG总温探针并对其进行了有限元仿真分析。

### 2.1 FBG 总温探针基本结构

基于FBG设计出如图2所示的探针结构。常规的FBG直径为0.125 mm,探针直径可以达到0.6 mm以下,但直径越小,加工难度也越大,综合考虑后,所设计的探针直径为0.8 mm,相比于热电偶总温探针(由于要进行双偶丝的绝缘处理,尺寸一般在3 mm以上),基于FBG的总温探针直径仅为热电偶探针的1/4。小尺寸的总温探针不仅可提高测试的空间分辨率,还可有效减小因测试对流场的干扰。本设计中,FBG位于光纤的最前端,靠近探针进气口,气流在光纤端部滞止,在此部分所测量的温度更接近总温;通过毛细钢管固定光纤,使其位于探针的中心位置;进气口内径为0.55 mm,依据热电偶总温探针设计经验,探针的出气口面积之和为进气口面积的35%左右。

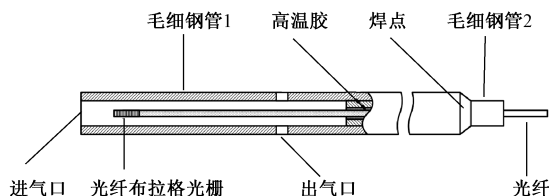


图2 FBG 总温探针结构

Fig. 2 FBG total temperature probe structure

### 2.2 结构设计与建模

设计的FBG探针结构与尺寸如图3所示,探针的一端固定在支架上,仿真时在FBG对应轴向位置根据其与其与光纤端面的距离等间距设置7个测温点,各测温点间隔为0.5 mm。

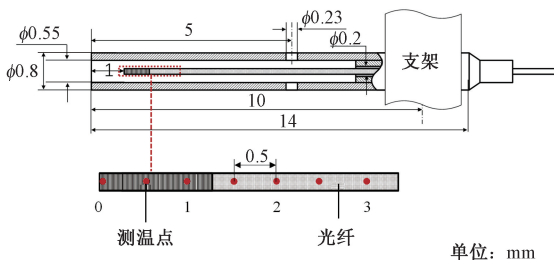


图3 FBG 总温探针结构尺寸

Fig. 3 Size of FBG total temperature probe structure

仿真结构模型如图4所示,为简化计算将FBG总温传感器简化为探针和支架两部分。流场为长度120 mm、直径100 mm的圆柱形空气域,用来模拟风洞出口的空气流场;3支FBG总温探针以10 mm等间距安装在支架上,中间探针(Z-2)位于空气流场域的轴心

线上;在入口边界设置气流的速度和温度,在出口边界设置外界空气压力。

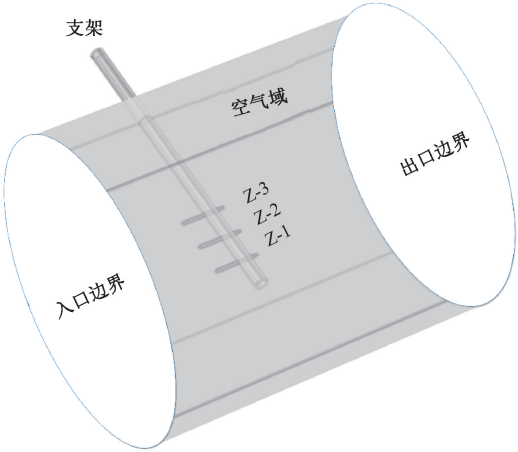


图 4 仿真结构模型  
Fig. 4 Simulation structure model

仿真的入口边界条件为气流静温 293.15 K、静压 1 个标准大气压并保持不变,马赫数从 0.3 开始以 0.1 为间隔递增,直至 0.8 结束。仿真出口边界保持出口压力为一个标准大气压。整个模型温度初始值以及外界环境温度值都为 293.15 K。每个马赫数下进行一次稳态仿真。

2.3 仿真结果与分析

仿真结果如图 5~10 所示。其中图 5、6 和 7 分别为入口边界马赫数为 0.5 时 FBG 总温探针轴心截面的压力分布云图、温度分布云图和速度分布云图。

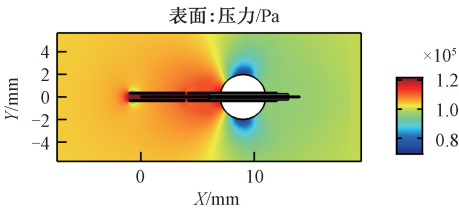


图 5 FBG 总温探针轴心截面压力云图  
Fig. 5 Central axis section pressure contour of FBG total temperature probe

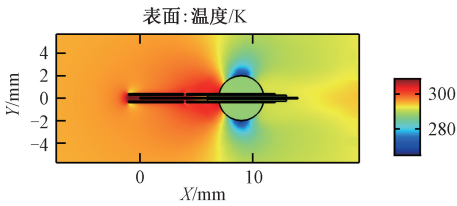


图 6 FBG 总温探针轴心截面温度云图  
Fig. 6 Central axis section temperature contour of FBG total temperature probe

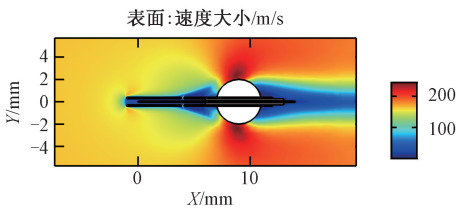


图 7 FBG 总温探针轴心截面速度云图  
Fig. 7 Central axis section velocity contour of FBG total temperature probe

从这 3 幅图可以看到气流在探针内被滞止,探针滞止罩内压力远高于探针外界压力,探针的端面即进气口处温度较高,沿光纤轴线温度逐渐降低。还可以看到支架会对气流产生一定的影响,支架迎风面会对气流产生滞止效果,使气流温度升高,这会使探针前端处于一个较高的温度场;支架上下两侧气流马赫数相对较高,使得气流静温降低,支架温度较低,通过热传导使探针后端温度较低;支架会对流场压力分布产生一定影响,而探针进气口与出气口的压差会影响探针内部的马赫数,进而影响滞止效果影响测温结果。因此探针设计的时候应考虑支架的大小、位置以及出气口的位置。

为进一步分析高速气流对 FBG 测温的影响,需要确定光栅与滞止罩的相对位置关系,并分析光纤上的温度分布。根据图 3 的测温点位置,对其仿真数据进行处理得到图 8~10 的结果。

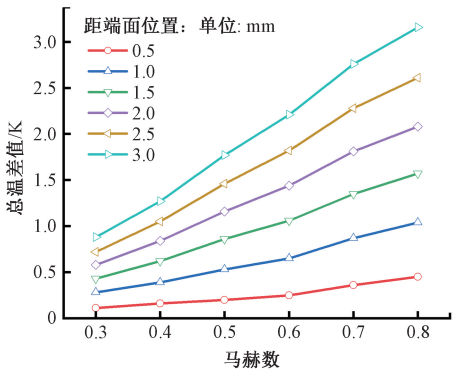
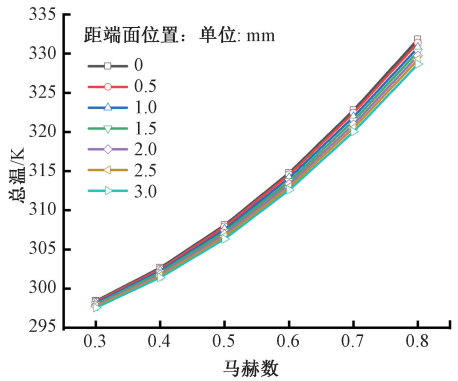


图 8 不同马赫数下总温探针 Z-2 感温光纤上不同位置处的测量总温,及各测点与端面处的总温差值  
Fig. 8 Total temperatures and relative errors at different positions of probe Z-2 at different Mach numbers



图 8 上图和下图分别表示不同马赫数下总温探针 Z-2 不同位置的测量总温与相对误差,其中相对差值为距离端面的位置 0 mm 处与其他位置处总温的差值。由图 8 可以看出探针 Z-2 内光纤上的温度随马赫数增加而增大,与式(4)的理论计算一致。在同一马赫数下,距离探针进气口越近的位置,其温度越高。因此,可将光栅放置于光纤端头靠近进气口的位置。

另外,可以发现光纤上的温度并不均匀,马赫数越高,非均匀性越剧烈,这将导致光栅栅区的折射率调制也非均匀,使 FBG 产生啁啾效应。FBG 栅区越短,其温度变化越小,啁啾效应的影响也越小。当光栅栅区长度为 2 mm 时,FBG 测得温度可近似为光栅栅区中间位置即距离光纤端面 1 mm 处的温度,可以在总温测量准确性和光栅加工难度上实现较好平衡。

将距离端面 1 mm 处的测温数据代入式(5)中便可得到探针 Z-2 的复温系数如图 9 所示,可以发现其复温系数在 0.95 以上,滞止效果非常明显,可以极大地降低速度误差,提高测温精度。

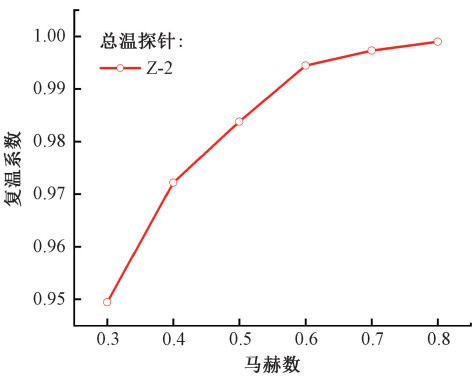


图 9 不同马赫数下总温探针 Z-2 的复温系数  
Fig. 9 Recovery factors of probe Z-2 at different Mach numbers

仿真的空气流场中放置有 3 支总温探针,由图 10 可以看到 3 支探针上的温度略有不同,但差值仅为 0.2℃ 左右,表明支架和探针组合体对空气流场的扰动一致,从而对 3 支探针测温结果的影响几乎相同。

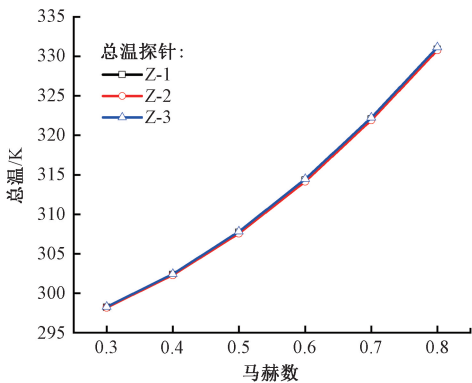


图 10 不同马赫数下三支总温探针的测量总温  
Fig. 10 Total temperatures of 3 probes at different Mach numbers

3 风洞测温试验

3.1 试验样品与系统

为进一步验证 FBG 总温探针的测温效果,通过高速风洞来模拟发动机内部的高速气流环境进行测试。针对风洞试验制作了如图 11 所示的 FBG 总温传感器,图 11(a)中 FBG 总温传感器的结构和尺寸与探针仿真模型相同。从图 11(b)可以看出 FBG 总温探针的出气口距进气口端面约为 5 mm。从图 11(c)可以看出 FBG 总温探针滞止罩(毛细钢管 1)外径约为 8 mm,出气口直径约为 0.2 mm,并且根据光纤与出气口的相对位置关系,可以发现其与滞止罩是同轴位置关系,未产生偏移。

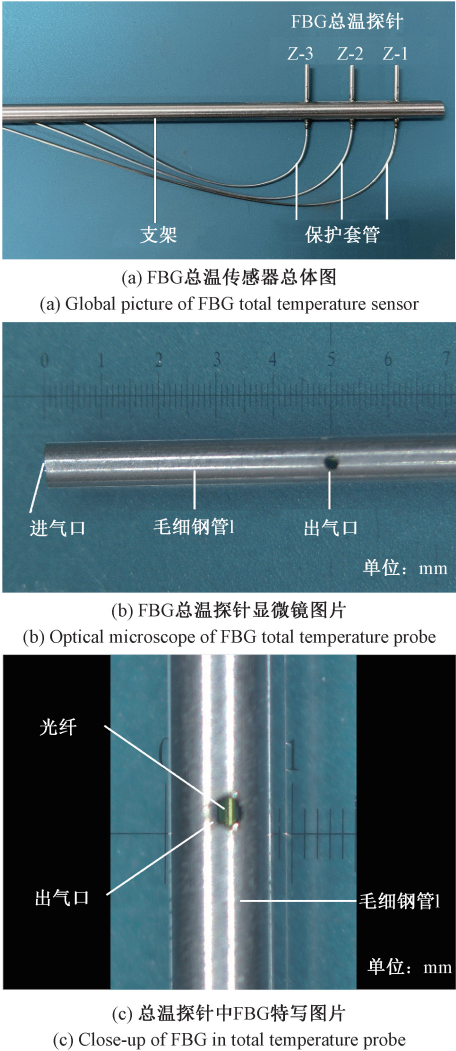


图 11 FBG 总温传感器实物图  
Fig. 11 Physical picture of FBG total temperature sensor

FBG 总温传感器所用 FBG 采用飞秒激光器在纯硅光纤上逐点刻写而来,原光栅长度为 2 mm,为非切趾的

均匀光栅。受限于加工方式,光栅刻写在光纤的中间段,而非在光纤端头。我们在光栅边缘进行截断,并进行端面研磨,其栅区位于光纤端面并且端面平整,从而更好地测量总温。本试验中,三支探针所用的感温光栅在室温下的初始峰值波长分别为 1 540.9 nm、1 547.2 nm 和 1 547.0 nm。

试验使用的 FBG 光谱解调仪器是本实验室设计并制作的 4 通道光谱解调仪,配套设计的上位机解调软件界面如图 12 所示。光谱解调仪的采集频率为 400 Hz,其光谱重复性可达  $\pm 2$  pm。上位机软件可以实现光谱采集、解调、显示、存储等功能。

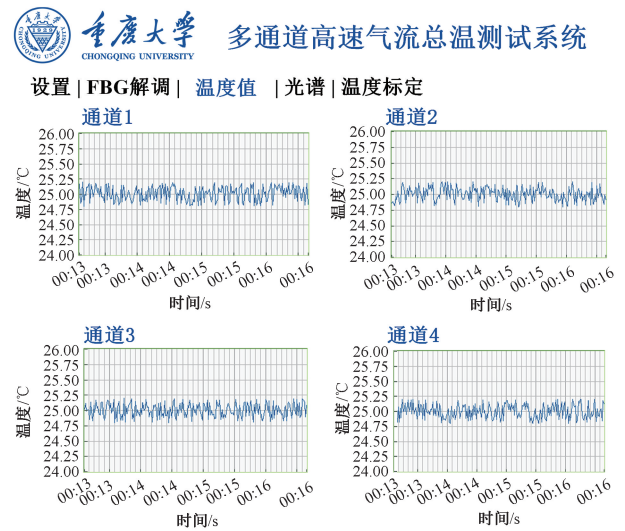


图 12 解调软件主界面

Fig. 12 Demodulation software main interface

试验在常温风洞中进行,测试不同马赫数下 FBG 总温探针的测温效果。FBG 总温传感器风洞试验系统如图 13 所示,风洞出风口直径为 100 mm,与仿真中的空气流场直径相同。总温探针上的 3 个 FBG 传感器均置于风洞出口中心的均匀流场区域,距风洞出口约 50 mm 处,且进气口正对来流方向。FBG 总温传感器由夹具固定在安装架上,通过光纤与光谱解调仪相连,解调仪获得

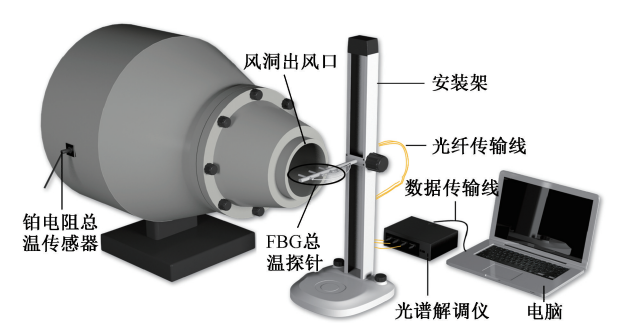


图 13 风洞试验系统示意图

Fig. 13 Diagram of the wind tunnel test system

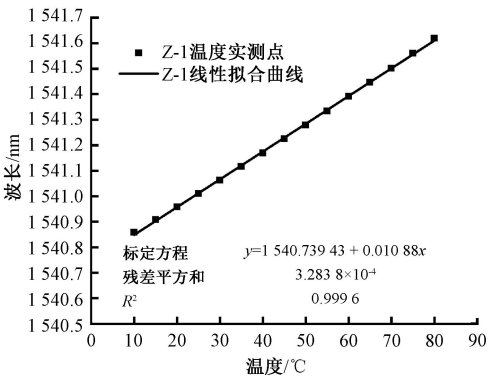
波长信息再将其传入计算机,由计算机获取 FBG 探针的温度测量值。

风洞内部装有铂电阻温度传感器。由于铂电阻温度传感器所处的腔体直径远大于风洞出风口直径,腔体内马赫数很小,可以认为铂电阻温度传感器所测温度为气流总温。在不同马赫数下分别获取气流总温和 FBG 总温传感器的测量温度即可计算 FBG 总温传感器的复温系数,进而分析传感器的滞止效果。通过对同一马赫数下传感器在一段时间内的温度数据进行分析,可以获得传感器的稳定性。

通过调控台控制出风口的马赫数,让其从 0.3 上升至 0.8,马赫数调整间隔为 0.1,马赫数调整时间为 5~10 min,马赫数稳定后记录风洞内总温传感器和 FBG 总温传感器的测温数据,连续记录 1 000 个 FBG 总温传感器的测量数据,同时记录铂电阻温度传感器的测量结果。

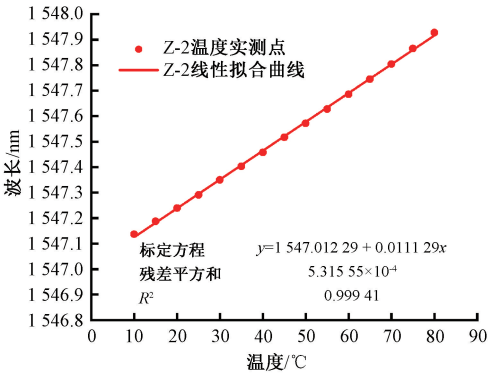
3.2 试验结果与分析

在风洞温度试验之前首先对传感器进行静态标定,标定结果图 14 所示,3 支 FBG 总温探针在标定温度范围内线性相关性都达到了 0.999 以上,证明传感器的线性度较好。



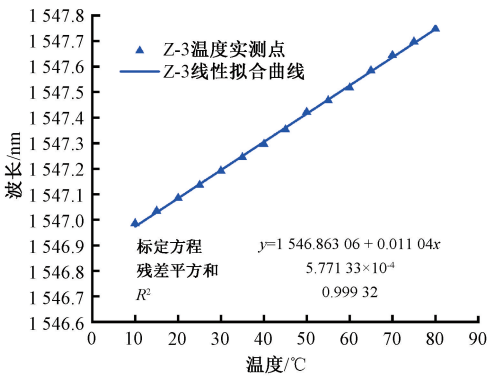
(a) Z-1的静态温度标定结果

(a) Static temperature calibration results of Z-1



(b) Z-2的静态温度标定结果

(b) Static temperature calibration results of Z-2



(c) Z-3的静态温度标定结果  
(c) Static temperature calibration results of Z-3

图 14 传感器静态标定结果  
Fig. 14 Sensor static calibration results

在高速气流的冲击下,滞止罩内的流场具有较为复杂的温度分布,从而导致光栅表面可能存在非均匀温度场。该温度场对光栅带来的测温影响目前只能从光栅的反射光谱的分析中获得。获取静态条件、马赫数为 0.5~0.8 范围内 5 种不同情况下总温探针 Z-2 的反射光谱如图 15 所示。从图中可知,反射光谱在不同马赫数下并不存在温度导致的明显畸变现象。一方面,可能由于探针选用的 FBG 长度较短,约为 2 mm,非均匀温度场对其影响较小;另一方面,现场所用光谱解调仪精度较低,可能导致对畸变光谱的识别力不足,从而不能分辨光谱的微小畸变。未来将从以上两方面深入开展理论研究和实验分析。

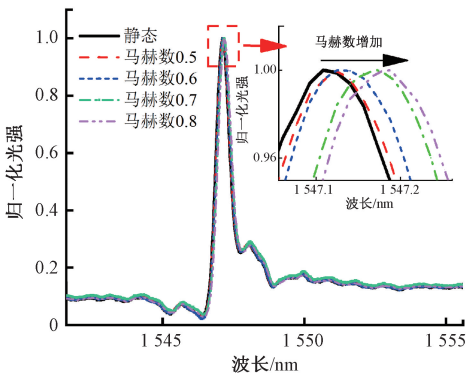


图 15 不同马赫数下总温探针 Z-2 的反射光谱  
Fig. 15 Reflection spectrum of probe Z-2 at different Mach numbers

对风洞测温试验数据求平均处理之后得到 3 支 FBG 总温探针和铂电阻温度传感器测得的温度数据如图 16 所示。由图 16 可以看出 FBG 总温传感器测得的温度和风洞内铂电阻温度传感器的温度变化趋势基本一致。由

于 FBG 总温传感器位于风洞口,铂电阻温度传感器位于风洞流道内部,其初始温度即所处的环境温度有所不同,导致在马赫数较小时,铂电阻温度传感器和 FBG 总温传感器测量值差别较大。此外,由于在探针的出气口加工过程中尺寸会存在偏差,对探针滞止效果带来影响,试验结果与仿真结果有一定出入。

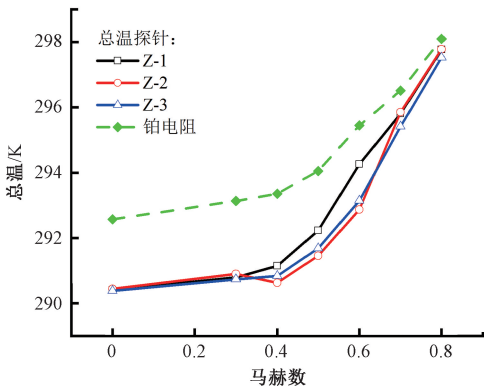


图 16 不同马赫数下总温探针的测量总温  
Fig. 16 Total temperatures of probes at different Mach numbers

通过计算获得的 FBG 总温传感器的复温系数如图 17 所示。从图 17 可以看到 3 支 FBG 总温探针的复温系数都随着马赫数增高而增大,在低马赫数下由于环境温度的影响复温系数较小,在马赫数为 0.5~0.8 时环境温度影响相对减小,复温系数达到 0.8 以上,在马赫数为 0.8 时高达 0.99,与仿真结果基本一致。3 支 FBG 总温探针之间复温系数略有差异,这是因为探针制作过程以及光纤光栅本身难以保证完全一致,从侧面反映了要获得性能一致的探针需要严格控制探针制作的各个环节,尽量保证探针的一致性。

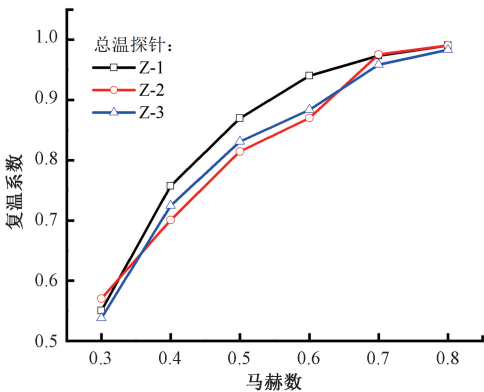


图 17 不同马赫数下总温探针的复温系数  
Fig. 17 Recovery factors of total temperature probe at different Mach numbers



3 支 FBG 总温探针在每个马赫数下均采集了 1 000 个点的数据,采集频率为 400 Hz。对采集数据进行处理得到 3 支 FBG 总温探针在不同马赫数下的温度标准差,如图 18 所示。可以看出温度标准差随马赫数变大呈增大的趋势,但均小于 0. 14 K,证明 FBG 总温传感器具有较好的稳定性,可以用于高速气流总温测量。

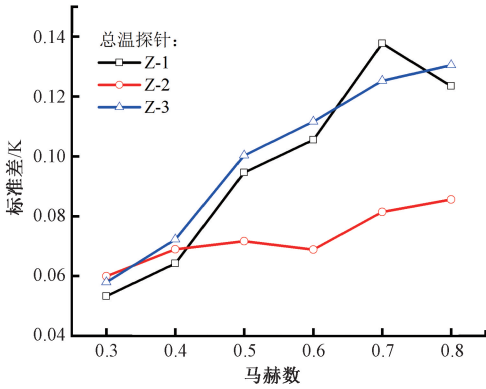


图 18 不同马赫数下总温探针的测量标准差  
Fig. 18 Temperature standard deviations of 3 probes at different Mach numbers

4 结 论

本文设计了一种基于 FBG 的总温传感器,仿真和试验结果证明所设计的 FBG 总温探针在马赫数为 0. 3 ~ 0. 8 条件下能够测量气流的总温,具有良好机械可靠性。风洞试验结果表明马赫数在 0. 5 以上时其复温系数在 0. 8 ~ 0. 99 之间,具备较高的总温恢复能力。在同一马赫数下,总温测量的标准差小于 0. 14 K,证明基于 FBG 的总温探针具有良好的测温稳定性。试验结果和仿真结果比较吻合,因此采用有限元仿真的方法分析 FBG 总温探针的复温系数及其它性质是可行的。采用 FBG 作为感温元件设计的探针横截面仅为传统的热电偶探针的 1/4 左右,通过进一步优化设计还可以将其尺寸做得更小,在对气流产生同等畸变的情况下,使用 FBG 总温探针可以大大提高测量的空间分辨力。这充分证明了以 FBG 为感温元件制作总温传感器是完全可行的,并且具有较为明显的体积优势。

参考文献

[ 1 ] TAHAN M, TSOUTSANIS E, MUHAMMAD M, et al. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review [ J ]. Applied Energy, 2017, 198: 122-144.

[ 2 ] MOLL A V, BEHBAHANI A R, FRALICK G C, et al. A review of exhaust gas temperature sensing techniques for modern turbine engine controls [ C ]. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.

[ 3 ] MOHAMMED I, ABU TALIB A R, SULTAN M T H, et al. Temperature and heat flux measurement techniques for aero-engine fire test: A review [ M ]. Aerotech Vi-Innovation in Aerospace Engineering and Technology. 2016, DOI:10. 1088/1757-899X/152/1/012036.

[ 4 ] 王小飞, 王元鑫, 曲建岭, 等. 面向大样本飞参数据的航空发动机性能监控方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7):175-184.

WANG X F, WANG Y X, QU J L, et al. An aero-engine performance monitoring method based on large scale flight data [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7):175-184.

[ 5 ] SARAVANAMUTTOO H I H. Recommended practices for measurement of gas path pressures and temperatures for performance assessment of aircraft turbine engines and components [ R ]. NATO, 1990.

[ 6 ] YEPIFANOV S V, LI Q. Analysis of the error in the gas temperature and the thermocouple time constant measuring through gas turbine engine tests [ C ]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020: 325-336.

[ 7 ] VINCENT T G, ROLFE E N, LOWE K T, et al. Aerodynamic analysis of total temperature probe thermal performance using conjugate heat transfer [ J ]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2019, 33 ( 3 ): 830-843.

[ 8 ] SZAKMANY G P, ORLOV A O, BERNSTEIN G H, et al. Single-metal nanoscale thermocouples [ J ]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2014, 13(6):1234.

[ 9 ] POWERS S W, SCHETZ J A, LOWE K T, et al. Analysis of stresses in metal sheathed thermocouples in high-temperature flows [ J ]. AIAA Journal, 2021:1-15.

[ 10 ] POROD, WOLFGANG, BERNSTEIN, et al. Nanoantenna arrays for infrared detection with single-metal nanothermocouples [ J ]. Infrared Physics & Technology, 2017,82:44-49.

[ 11 ] GLAWE G E, HOLANDA R, KRAUSE L N. Recovery and radiation corrections and time constants of several sizes of shielded and unshielded thermocouple probes for



- measuring gas temperature[R]. NASA, 1978.
- [12] ZHU C, GERALD R E, HUANG J. Progress toward sapphire optical fiber sensors for high-temperature applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11):8639-8655.
- [13] TYLER S W, BURAK S A, MCNAMARA J P, et al. Spatially distributed temperatures at the base of two mountain snowpacks measured with fiber-optic sensors[J]. Journal of Glaciology, 2008, 54(187):673-679.
- [14] MIKOLAJEK M, MARTINEK R, KOZIOREK J, et al. Temperature measurement using optical fiber methods: Overview and evaluation[J]. Journal of Sensors, 2020: 8831332.
- [15] JOE H E, YUN H, JO S H, et al. A review on optical fiber sensors for environmental monitoring [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018, 5(1):173-191.
- [16] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8):1681-1692.
- LIU T G, WANG SH, JIANG J F, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1681-1692.
- [17] 郝晓剑, 李科杰, 刘健, 等. 蓝宝石光纤黑体腔瞬态高温传感器测量系统特性参数研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10):2121-2125.
- HAO X J, LI K J, LIU J, et al. Research on characteristic parameter of sapphire fiber blackbody transient high temperature sensor measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(10):2121-2125.
- [18] 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 Q J, WU Z R, ZHAO N, 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.
- [19] WALKER R B, DING H, COULAS D, et al. Combustor deployments of femtosecond laser written fiber Bragg grating arrays for temperature measurements surpassing 1 000°C [C]. Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IX, 2017:101941Q.
- [20] TAO C, LEI X, DENG Y, et al. Optical fiber fabry-perot sensing system based on Blackbody radiation in high temperature applications [C]. Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2017.
- [21] HABISREUTHER T, ELSMANN T, PAN Z, et al. Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91:860-865.
- [22] KIDD S R, BARTON J S, MEREDITH P, et al. A fiber optic probe for gas total temperature measurement in turbomachinery[J]. Journal of Turbomachinery, 1995, 117(4):635-641.
- [23] KILPATRICK J M, MACPHERSON W N, BARTON J S, et al. Measurement of unsteady gas temperature with optical fibre Fabry-Perot microsensors[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(5):706-712.
- [24] 王楠楠. 光纤总温传感器的设计与仿真[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- WANG N N. Design and simulation on the fiber-optic sensor of total temperature [D]. Taiyuan: North University of China, 2012.
- [25] POLZ L, ZEISBERGER A, BARTELT H, et al. Total temperature measurement of fast air streams with fiber-optic Bragg grating sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17):6596-6603.
- [26] 张伟. 光纤布拉格光栅应变传感系统可靠性的关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- ZHANG W. Key technology for reliability of fiber Bragg grating strain sensing system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [27] 杨灿. 气流温度测量用热电偶的设计和校准技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2005.
- YANG C. The research of design and calibration of thermocouple probes for measuring flow temperature[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

## 作者简介



周震, 2017 年于合肥工业大学获得学士学位, 2021 年于重庆大学获得硕士学位, 主要研究方向为光纤传感。

E-mail: zhzhou0606@qq.com。

Zhou Zhen received his B. Sc. degree from

Hefei University of Technology in 2017 and received his M. Sc. degree from Chongqing University in 2021. His main research interest is optical fiber sensing.



**刘显明** (通信作者), 2005 年于山东大学获学士学位, 2010 年于中国科学院光电技术研究所获博士学位, 现为重庆大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为传感与测试技术。

E-mail: xianming65@163.com。

**Liu Xianming** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University in 2005 and received his Ph. D. degree from Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences in 2010. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Chongqing University. His main research

interest is sensing and testing technology.



**周峰**, 2004 年于武汉理工大学获得学士学位, 2007 年于武汉理工大学获得硕士学位, 现为中国航发湖南动力机械研究所高级工程师, 重庆大学在读博士研究生, 主要研究方向为发动机测试。

E-mail: 14380842@qq.com。

**Zhou Feng** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Wuhan University of Technology in 2004 and 2007. He is currently a senior engineer at AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute. He is a Ph. D. candidate at Chongqing University. His main research interest is engine test.