

基于光纤滑环的旋转部件温度测量

王彦晓¹ 余有龙¹ 高灿辉¹ 段莹莹¹ 王贤虎²

(¹ 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)
(² 安徽水利水电职业技术学院机械工程系, 安徽 合肥 231603)

摘要 提出由两个准直镜构成用于实现离轴旋转连接的光纤滑环, 利用其与光纤布拉格光栅传感器结合, 获得轴心被占用或为空心轴时旋转部件上温度测量的新方法。分析了影响光纤滑环插入损耗的主要因素, 指出插入损耗对两准直镜间的横向错位和轴向夹角的变化很敏感, 而对轴向间距的变化略显迟钝。旋转部件匀速转动过程中, 光纤滑环的耦合信号为周期脉冲信号, 测得信号的占空比为 0.5%, 与理论值基本相符。并利用光纤滑环对光纤布拉格光栅传感光路的耦合, 实现旋转部件上待测温度场升温过程的实时观测, 从而验证了此测量方法的可行性。

关键词 测量; 光纤滑环; 温度; 离轴; 插入损耗; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN247; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0808004

Temperature Measurement for Rotating Parts Based on the Fiber-Optic Slip-Ring

Wang Yanxiao¹ Yu Youlong¹ Gao Canhui¹ Duan Yingying¹ Wang Xianhu²

¹ School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China
² Department of Mechanical Engineering, Anhui Water Conservancy Technical College, Hefei, Anhui 231603, China

Abstract The fiber-optic slip-ring, consisting of two collimator lenses and realizing the off-axis rotating connection, as a new passive device proposed and connects with the optical fiber Bragg grating sensor is used to detect the temperature on the rotating parts when its axis is occupied or the shaft is hollow. The main influence factors of the insertion loss of the device are analyzed, theoretically. Simulation results show that the insertion loss is highly sensitive both to the transversal dislocation and the axial angle between two collimator lenses, while it is slightly insensitive to the change of the axial distance. Experiments show that during the rotating parts uniformed, the received signals through fiber-optic slip-ring are the periodic pulse signals, and the duty cycle of which is 0.5%, corresponds with the result of simulation. Using fiber-optic slip-ring coupling for fiber Bragg grating sensing light path, to achieve the change of temperature on the rotating part real-timely during heating the temperature field, the feasibility of this measurement method is verifies.

Key words measurement; fiber-optic slip-ring; temperature; off-axis; insertion loss; fiber Bragg grating

OCIS codes 120.4630; 230.2285; 120.6780

1 引 言

旋转部件(如电机转子、钻机钻头等)转动过程中, 摩擦等因素将引起局部升温, 温度过高, 可导致

固体材料的力学性能劣化, 甚至导致结构原有功能的减弱和丧失^[1], 因此有必要了解旋转部件的局部温度变化信息, 以便及时修正。测量过程中为避免

收稿日期: 2014-02-18; **收到修改稿日期**: 2014-03-14

作者简介: 王彦晓(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光无源器件和光纤光栅传感技术等方面的研究。

E-mail: tianyahaijiao1065@163.com

导师简介: 余有龙(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤传感、传感器网络化以及在工程结构健康检测等方面的研究。

E-mail: youlongyu@163.com

旋转引起导线或传输光纤出现缠绕现象,已有的技术是利用传统型接触式温度传感器(如热电偶、热敏电阻温度传感器)与电滑环或光纤旋转连接器连接。而传统型温度传感器因其灵敏度低而无法准确捕获温度变化信息,另外电滑环传递信号的质量严重依赖触点的接触状况而无法得到保证,因而其逐渐被光纤旋转连接器所代替。光纤旋转连接器包括单通道^[2]、多通道^[3]、多路空间^[4]和中空光纤旋转连接器^[5]。其中,单通道光纤旋转连接器结构简单、体积小、成本低;多路空间光纤旋转连接器可同时传输多路光信号,两者均有被使用的记录^[6-7];多通道光纤旋转连接器因性价比不高、体积大、制作困难而不实用;当轴心被占用或为空心轴时,以上三者均不适用;中空光纤旋转连接器可实现光信号在旁轴条件下的空间动态耦合,从而解决了单通道、多通道和多路空间光纤旋转连接器在轴心被占用或为空心轴时无法使用的不足,但是目前研究的中空光纤旋转连接器均为有源器件,其结构较复杂、插入损耗大、制作成本高,不适合实际应用。

本文提出由两个准直镜构成、能实现离轴旋转连接的光纤滑环,考虑光纤传感器灵敏度高、体积小、质量轻和抗电磁干扰性强的优点,将光纤滑环与光纤布拉格光栅(FBG)传感技术结合,实现轴心被占用或为空心轴时旋转部件上局部温度变化的准确测量。

2 工作原理

如图1所示,半径分别为 r_1 和 r_2 的准直镜1和2构成光纤滑环的转子和定子。保持转子和定子同轴放置,并将其平行于转轴移至适当位置(如半径为 R 的旋转部件边缘)。其中,转子与FBG传感器相连,固定于以角速度 ω 顺时针匀速转动的旋转部件的边缘 O_1 处,用以测量并传递旋转部件上的温度信息;定子与光源和探测器连接固定于 O_2 处,用于向转子提供宽带光源和接收FBG的传感信息。

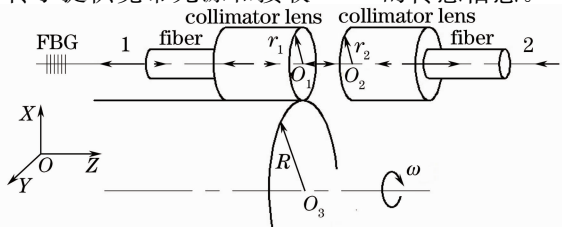


图1 与FBG连接的光纤滑环结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the fiber-optic slip-ring connects with the FBG

转动过程中,宽带光源的出射光束经准直镜2水平向左传输,当出射光束在准直镜1口径端面的投影面积不为零时,实现光路的贯通。光束经准直镜1耦合,然后经FBG传感器反射后沿光路逆向传输,在准直镜2处接收到FBG的传感信息。

FBG传感器受热光效应和热膨胀效应的影响,其布拉格波长 λ_B 的相对漂移量为^[8]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 为波长漂移值, α 为光纤材料的热膨胀系数, ξ 为热光系数。硅纤中 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $\xi = 6.67 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ^[9]。(1)式反映了FBG反射波长的相对漂移量与温度变化呈线性关系,1550 nm窗口处其灵敏度典型值为13 pm/ $^\circ\text{C}$ 。

综上所述,将FBG温度传感器置于旋转部件上的监测节点,光源与解调装置置于静止的实验台上,利用光纤滑环实现光信号在光源和解调装置与FBG传感器间的贯通,可对旋转部件的局部温度及其变化信息进行实时监测,且可避免旋转引起传输光纤缠绕的现象。插入损耗是衡量光纤滑环的重要指标之一,直接影响接收信号的信噪比,因此有必要对光纤滑环的插入损耗进行分析。

3 光纤滑环插入损耗

3.1 光纤滑环插入损耗的理论分析

若不计光束在空气中的传输损耗,且准直镜能将投射到其端面上的光波全部耦合至与其连接的传输光纤中,根据文献^[10],光场分布分别为 φ_1 和 φ_2 的高斯光束的耦合效率为

$$\eta = \frac{\left| \iint \varphi_1 \cdot \varphi_2^* ds \right|^2}{\iint |\varphi_1|^2 ds \cdot \iint |\varphi_2|^2 ds}. \quad (2)$$

光纤滑环的插入损耗为

$$I_L = -10 \lg \eta. \quad (3)$$

沿 z 轴传播的基模高斯光束可以表示为^[11]

$$\varphi(x, y, z) = \frac{C}{\omega(z)} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \cdot \exp\left\{-i\left\{k\left[\frac{r^2}{2R(z)} + z\right] - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right\}\right\}, \quad (4)$$

式中 C 为常数因子, $r^2 = x^2 + y^2$, x 和 y 为垂直于光传播方向的平面坐标, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为传播常数, λ 为波长, $f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 为高斯光束的共焦参数, ω_0 为基模高斯

光束的束腰半径, $R(z) = z \left[1 + \left(\frac{f}{z} \right)^2 \right]$ 为 z 点处的曲率半径, $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f} \right)^2}$ 为在 z 点处的光斑半径。

转动过程中, 两准直镜间可能会出现横向错位 Δ 、轴向夹角 θ 和轴向间距 d 的变化^[12-13]。设 Δ_x 、 Δ_y 分别为两准直镜间沿 X 轴、 Y 轴方向的横向错位, 并以 X 轴、 Y 轴的正方向为其正方向, θ_x 、 θ_y 为准直镜 1 分别以 X 轴、 Y 轴为转轴转动时与准直镜 2 形成的

轴向夹角, 其中准直镜 1 逆时针转动为正, 顺时针转动为负, 且轴向夹角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 则

$$\Delta^2 = \Delta_x^2 + \Delta_y^2, \quad (5)$$

$$\theta^2 = \theta_x^2 + \theta_y^2, \quad (6)$$

式中 $\theta \approx \sin \theta$, $\theta_i \approx \sin \theta_i$, ($i=x, y$)。

当两准直镜间存在 Δ 、 θ 和 d 时, 准直镜 1 和 2 的出射光束在 $z=d$ 处的光束分布分别为 φ_1 和 φ_2 , 则由(4)式可得

$$\varphi_1 = \frac{C}{\omega_1(z)} \cdot \exp \left[-\frac{(x + z\theta_y - a)^2 + (y - z\theta_x - b)^2}{\omega_1^2(z)} \right] \cdot \exp \left[-ik \frac{(x + z\theta_y - a)^2 + (y - z\theta_x - b)^2}{2R_1} \right] \cdot \exp[-ik(z + y\theta_x - x\theta_y)], \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \frac{C}{\omega_2(z)} \cdot \exp \left[-\frac{(x - c)^2 + (y - e)^2}{\omega_2^2(z)} \right] \cdot \exp \left[-ik \frac{(x - c)^2 + (y - e)^2}{2R_2} \right] \cdot \exp(-ikz), \quad (8)$$

式中 $h = R + r_1$ 为准直镜轴心到转轴轴线的距离, $a = h \cos(\omega t)$, $b = h \sin(\omega t)$, $c = h + \Delta_x$, $e = \Delta_y$, t 为转动时间, $\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{d}{f} \right)^2}$, $\omega_2 = \omega_0$, ω_1 、 ω_2 分别为准直镜 1、2 出射光束的光斑半径, $R_1 = d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]$, $R_2 \rightarrow \infty$, R_1 、 R_2 分别为准直镜 1、2 在 $z = d$ 处的曲率半径。

代入(2)式得到, 在转动过程中两准直镜间存在横向错位、轴向夹角和轴向间距时, 光纤滑环的耦合效率为

$$\eta = \frac{m}{n} \exp \left[-\frac{2}{n} \cdot (pg + qsR_1\theta^2 + 2qv\omega_1^2) \right], \quad (9)$$

式中 $m = 16R_1^2\omega_1^2\omega_2^2$, $n = 4R_1^2(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 + k^2\omega_1^4\omega_2^4$, $p = 4R_1^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + k^2\omega_1^4\omega_2^2$, $q = k^2R_1\omega_1^2\omega_2^2$, $g = (a - c)^2 + (b - e)^2 + z^2\theta^2 - 2(a - c)z\theta_y +$

$2(b - e)z\theta_x$, $s = \omega_1^2 + \omega_2^2$, $v = (a - c)\theta_y - (b - e)\theta_x - z\theta^2$ 。

从(2)~(9)式可得, 在转动过程中, 光纤滑环的插入损耗主要取决于两准直镜间的横向错位、轴向夹角、轴向间距和转动时间。

3.2 光纤滑环插入损耗的仿真结果分析

在(3)、(9)式中代入光纤滑环的相关参数, 利用 Matlab 仿真得到光纤滑环插入损耗与各影响因素间的关系曲线, 如图 2、3 所示。

由图 2(a)看出, 当 $d < 20$ mm 时, 随着 d 的增加, I_L 几乎不变; 当 $d > 40$ mm 时, I_L 随 d 几乎呈线性变化; 当 $d = 140$ mm 时, $I_L = 5.23$ dB, 从而轴向间距对插入损耗的影响不大。若 $d = 0$ mm, 则改变 Δ 、 θ 和 t 时两镜面会因为摩擦而受损, 考虑 d 值不大对 I_L 的影响可忽略不计, 不妨取 $d = 1$ mm 来分别研究 Δ 、 θ 和 t 对 I_L 的影响。由图 2(b)可得, I_L 对 θ 变化非常敏感, 改变很小的轴向夹角, 就会导致

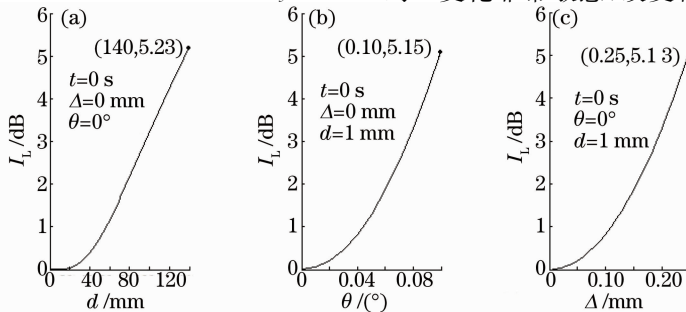


图 2 插入损耗与各影响因素的关系曲线图

Fig. 2 Plots of the insertion loss versus the influence factors

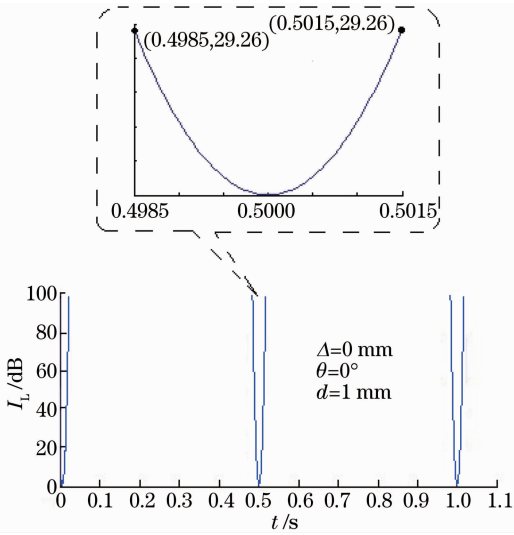


图 3 插入损耗与转动时间关系曲线图

Fig. 3 Plot of the insertion loss versus rotation time
插入损耗发生很大变化。如当 $\theta = 0.10^\circ$ 时, $I_L = 5.15$ dB。从图 2(c) 可以看出, 当 $\Delta < 0.25$ mm 时,

I_L 随 Δ 接近呈二次方变化; 当 $\Delta = 0.25$ mm 时, $I_L = 5.13$ dB; 与图 2(a)、(b) 比较, 横向错位对光纤滑环插入损耗的影响比较明显。

图 3 反映出插入损耗关于 $t = n_0 \cdot T_0$ 对称, 其中 $T_0 = 0.5$ s 为脉冲信号的周期, $n_0 = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。这意味着光信号透过光纤滑环后的耦合信号为周期脉冲信号。

4 实验验证与结果分析

4.1 信号耦合实验

将宽带光源[发光二极管(LED)]、光纤滑环、光电探测器和示波器按图 4 的实验装置示意图进行连接, 并将光纤滑环的转子安装在旋转部件上, 随旋转部件匀速转动, 在转子和光电探测器间预留一定距离的跳线来满足转动过程中两者的连接, 调节 LED 光源使光纤滑环的入射光功率为 $5 \mu\text{W}$, 示波器得到光纤滑环的耦合信号如图 5 所示。

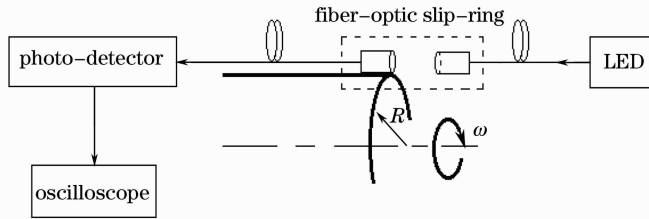


图 4 插入损耗与转动时间关系曲线图

Fig. 4 Schematic of experiment for coupling signals

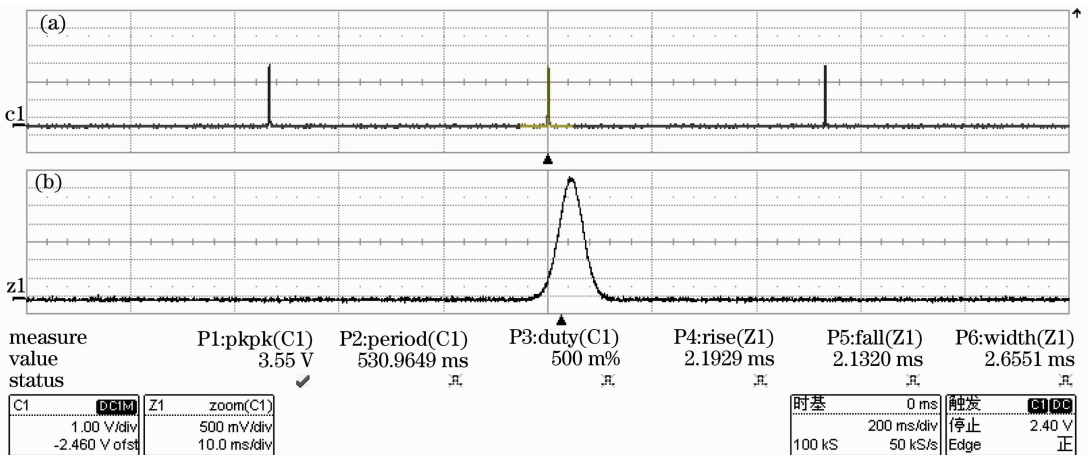


图 5 实验接收到的耦合信号

Fig. 5 Plot of the coupling signal of experiment

图 5 为实验接收到光纤滑环的耦合信号, 图 5 (a) 是 LED 的出射光束经光纤滑环耦合后, 示波器接收到的耦合信号, 图 5 (b) 是对图 5 (a) 中第二个脉冲信号的局部放大。由图 5 可得, 耦合信号为周期脉冲信号, 其占空比为 0.5%。若忽略光束在传输

过程中的损耗, 当 $I_L = 30$ dB 时, 光电探测器接收的光功率为 5 nW, 与光电探测器的最小接收光功率近似。因此, 取 $I_L < 30$ dB 的耦合光信号为幅值大于零的耦合信号, 由图 3 可得, 耦合信号的占空比很小, 约为 0.6%, 与图 5 得到的实验结果基本相符。

由图 3 和图 5 可知,耦合信号占空比的理论值比实际值大 0.1%,主要是因为信号正脉冲宽度的定义不同,其中示波器系统中默认正脉冲宽度为正斜率 50%电平处测得的时间宽度,而理论计算时指的是耦合信号幅值大于零的时间宽度。

4.2 旋转部件局部测温实验

图 6 为旋转部件局部测温的实验装置示意图,其中光纤滑环连接 FBG 解调仪和 FBG 传感器,用以实现转动过程中光信号在光路中的贯通。由分析可知,光纤滑环耦合信号中含有 FBG 的传感信息,只要 FBG 解调仪能够准确解调出耦合信号中的 FBG 反射波长,即可根据(1)式得出旋转部件上的温度及其变化。

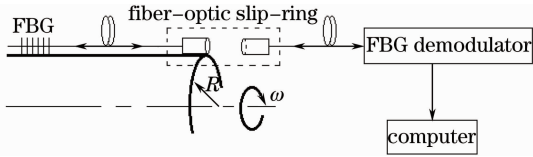


图 6 测温实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of experiment for temperature measurement

由于光纤滑环耦合信号为周期脉冲信号,对于已有解调方法(如:干涉解调法^[14-15]、可调窄带光源法^[16]和滤波法^[17-19]等)的研究大多数是对连续信号进行实时解调,而很少涉及到脉冲信号。针对上述情况,利用 F-P 腔滤波解调法对耦合信号中的 FBG 波长进行解调。分析知,若 FBG 波长变化范围为 $\lambda_{B1} \sim \lambda_{B2}$, F-P 腔波长的扫描范围为 $\lambda_a \sim \lambda_b$ (其中 $\lambda_a < \lambda_{B1} < \lambda_{B2} < \lambda_b$), F-P 腔扫描频率为 f_1 , 旋转部件的转速为 f_0 , 耦合信号占空比为 η_0 , 则当满足 $f_1 \geq \frac{f_0}{\eta_0}$ 时, 可实现耦合信号的波长解调; 当

$\frac{2(\lambda_{B2} - \lambda_{B1})}{\eta_0(\lambda_b - \lambda_a)} f_0 \leq f_1 < \frac{1}{\eta_0} f_0$ 时, 还需满足耦合信号

中每周期光脉冲刚出现时刻 F-P 腔扫描波长为 λ_{B1} 或 λ_{B2} , 这样才能使每周期光脉冲出现的时间段内 F-P 腔可以扫描 $\lambda_{B1} \sim \lambda_{B2}$ 的波长范围, 从而实现耦合信号中的波长解调。

实验所用的 FBG 传感器在自由状态下其中心波长为 1544.74 nm。为了减小应变对测温结果的影响并对光栅进行必要的保护, 对光栅进行封装。考虑传感器自身不能对温度场有过大的影响, 选用外径为 0.5 mm 的不锈钢管对光纤光栅进行封装。将封装后的 FBG 传感器放入热水中, 用水银温度计所测的水温作为准确值, 来对 FBG 传感器的温度灵

敏度进行标定。标定过程中, 尽可能保持水温恒定后再进行读数, 标定结果如图 7 所示。

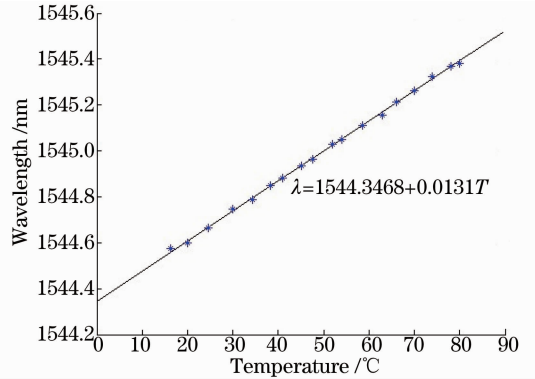


图 7 FBG 传感器温度灵敏度的标定

Fig. 7 Calibration for temperature sensitivity of FBG sensor

由图 7 可得, 封装后的 FBG 传感器反射波长随温度呈线性变化, 其温度灵敏度为 13.1 pm/°C。

实验所用的 FBG 解调仪内嵌光源波长扫描范围为 1528 ~ 1568 nm, 分辨率为 0.5 pm, 精度为 1 pm。将封装后的 FBG 传感器与解调仪连接使用, 得到整个测量系统的温度分辨率为 0.04 °C。

按图 6 所示的实验装置示意图进行连接, 并令旋转部件的转速为 2 r/s, 设置解调仪 F-P 腔的扫描频率和数据采集速率均为 25 kHz (此时满足 $f_1 \geq \frac{f_0}{\eta_0}$), 数据处理速率为 6.25 kHz, 每个转动周期内解调仪可测得 12 组温度值, 取其平均值作为该周期测得的温度值。测温过程中, 将 FBG 传感器和水密封在一起, 安装在旋转部件的待测部位, 室温下测得水的温度为 18.72 °C。旋转部件转动过程中, 对水加热至沸腾, 实验观测到水的温度逐渐上升, 最终稳定在 98.88 °C, 测试结果见图 8 所示。

图 8 显示了基于光纤滑环与 FBG 传感器测量

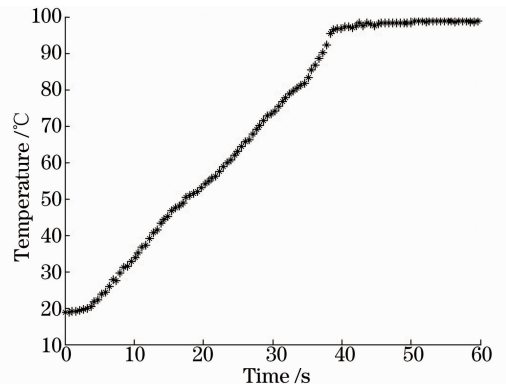


图 8 FBG 测量温度场的升温过程

Fig. 8 Plot of FBG detects the change of temperature

旋转部件局部温度场的升温过程,在相同条件下用水银温度计测量室温和水沸腾时的温度分别为 $18.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $98.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,与FBG传感器的测量结果基本一致,从而验证了基于光纤滑环和FBG传感技术测量旋转部件上温度变化的可行性。

5 结 论

提出了由两个准直镜组成、能够实现离轴旋转连接的光纤滑环。旋转部件匀速转动过程中,实验得到光纤滑环的耦合信号为周期脉冲信号,且信号占空比为 0.5% ,与理论值的 0.6% 基本相符,其中误差主要取决于实验仪器默认系统与理论仿真中信号正脉冲宽度的定义不同。并利用F-P腔滤波解调技术实现了周期脉冲光信号的波长解调。最后利用光纤滑环对FBG传感光路的耦合,实现旋转部件上温度场升温过程的实时测量,验证了基于光纤滑环测量旋转部件上温度变化的可行性。

参 考 文 献

- Alam A Q. Shot-Time Elevated Temperature Tests[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1963. 13-15.
Alam A Q. 短时高温实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 1963. 13-15.
- Mi Lei, Yao Shengli, Sun Chuandong, *et al.*. Development and military application of fiber optic rotary joint[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1138-1142.
米 磊, 姚胜利, 孙传东, 等. 光纤旋转连接器的发展及其军事应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1138-1142.
- Xu Ming, Li Chao. Development of a four-channel single-mode fiber optic rotary joint[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(1): 90-93.
徐 明, 李 超. 四通道单模光纤旋转连接器的研制[J]. 光电工程, 2013, 40(1): 90-93.
- He Zhengquan, Li Yulin, Hu Baowen, *et al.*. Recent development and applications of fiber optic rotary joints[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010007.
贺正权, 李育林, 胡宝文, 等. 光纤旋转连接器的最新发展及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010007.
- Jia Dagong, Chen Zhitong, Xu Qiang, *et al.*. Research progress on off-axis fiber optic rotary joint[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(11): 1454-1460.
贾大功, 陈志童, 许 强, 等. 中空光纤旋转连接器研究进展[J]. 兵工学报, 2013, 34(11): 1454-1460.
- Chen Tao, Li Peili, Zou Jianhua. Research on fiber-optic intensity-modulation acceleration sensors[J]. Study on Optical Communications, 2010, (12): 48-50.
陈 陶, 李培丽, 邹建华. 光纤强度调制加速度传感器的研究[J]. 光通信研究, 2010, (12): 48-50.
- Wang Yanbao, Luo Liqiang, Wang Xiaohui, *et al.*. Application of optical fiber rotating connector in radar system [J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(2): 22-24,46.
王岩暴, 罗利强, 王晓辉, 等. 光纤旋转连接器在雷达系统中的应用[J]. 控雷达技术, 2012, 41(2): 22-24,46.
- Yu Youlong. Fiber Bragg Grating Sensor and Network Technology[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2003. 112-115.
余有龙. 光纤光栅传感器及其网络化技术[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2003. 112-115.
- Wu Chaoxia, Wu Fei. Principles and Applications of Fiber Bragg Grating Sensor[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. 41-42.
吴朝霞, 吴 飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 41-42.
- Lin Xuehuang, Fang Luozhen, Yao Jian, *et al.*. Optical Fiber Passive Device[M]. Beijing: People's Posts and Telecom Press, 1998. 166-170.
林学煌, 方罗珍, 姚 建, 等. 光无源器件[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998. 166-170.
- Zhang Zhonghua, Lin Dianyong, Yu Xin, *et al.*. Optoelectronic Principle and Technology [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2009. 85-87.
张中华, 林殿阳, 于 欣, 等. 光电子学原理与技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009. 85-87.
- Sun Mingjie. Analysis of temperature effect on the angular shift of optic-fiber collimator[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(10): 1509-1513.
孙鸣捷. 温度对光纤准直器的角度偏移影响分析[J]. 光子学报, 2006, 35(10): 1509-1513.
- Hu Weisheng, Zeng Qingji. Misalignment-induced excess loss in gradient-index-rod lens collimating systems [J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(3): 221-224.
胡卫生, 曾庆济. 自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析[J]. 中国激光, 1999, 26(3): 221-224.
- Yu Youlong, Tan Huayao, Zhong Yongkang. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(8): 987-989.
余有龙, 谭华耀, 钟永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 987-989.
- A D Kersey, T A Berkoff, W W Morey. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. Electron Lett, 1992, 28(3): 236-238.
- Mei Jiawei, Xiao Xiaosheng, Xu Mingrui, *et al.*. Wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application on the demodulation of fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1114003.
梅佳伟, 肖晓晟, 许明睿, 等. 基于色散调谐宽带扫频光纤激光器及其在光纤光栅解调中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1114003.
- Ferreira L A, Santos J L, Farahi F. Pseudoheterodyne demodulation technique of fiber Bragg grating sensors using two matched gratings[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(4): 487-489.
- Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.*. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306007.
- Yu Youlong, Tan Huayao, Zhong Yongkang. Technique for fiber Bragg grating array interrogation with a tunable Fabry-Perot filter[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(12): 1103-1106.
余有龙, 谭华耀, 钟永康. 基于可调F-P滤波器的光纤光栅传感器阵列查询技术[J]. 中国激光, 2000, 27(12): 1103-1106.

栏目编辑:何卓铭