

用于轴瓦温度监测的无线耦合光纤布拉格光栅传感器

何为, 张翠, 童杏林*, 邓承伟, 刘访, 陶渊, 冒燕

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 十字头轴瓦的磨损是压缩机无法正常使用的重要原因之一, 实时检测轴瓦处的温度进而来判断轴瓦的磨损情况是确保压缩机安全、高效生产的重要检测手段。针对石化行业复杂的工况环境, 提出并设计制备了一种无线耦合光纤布拉格光栅传感器, 并用其进行光信号的空间传输以实现轴瓦处温度信号的提取。针对动态测量过程中产生的 U 型中心波长信号引起的解调温度差值过大的问题, 利用插入损耗阈值, 将一次动态运行过程中的温度改变量从 4 °C 控制到 0.1 °C 以内, 提高了温度解调的准确度, 实现了温度的无线监测。

关键词 光纤光学; 十字头轴瓦; 光纤布拉格光栅; 温度监测; 准直器; 无线传输

中图分类号 TN209

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0906008

Wirelessly Coupled Fiber-Bragg-Grating Sensor for Bushing-Temperature Monitoring

He Wei, Zhang Cui, Tong Xinglin*, Deng Chengwei, Liu Fang, Tao Yuan, Mao Yan

National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology,

Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract The abrasion of a crosshead bushing is one of the important reasons for the failure of the compressor under normal circumstances. To ensure the safe and efficient operation of the compressor, it is necessary to monitor the temperature of the bushing in real time to determine the abrasion. For complex working conditions in petrochemical industry, a wirelessly coupled fiber-Bragg-grating (FBG) sensor is proposed and designed to wirelessly transmit optical signals, thereby realizing the extraction of bushing's temperature signals. However, in order to solve the problem of excessive demodulation temperature difference caused by the U-type signal at the center wavelength generated during a dynamic operation, the insertion-loss threshold is used to reduce the temperature change from 4 °C to less than 0.1 °C. This improves the accuracy of temperature demodulation and realizes the wireless monitoring of temperature.

Key words fiber optics; crosshead bushing; fiber Bragg grating; temperature monitoring; collimators; wireless transmission

OCIS codes 060.2310; 060.3735; 120.6780; 120.1680; 120.7000

1 引言

温度检测与人们的日常生活息息相关, 例如太阳能温度显示仪、温度计, 等等。尤其是对于工业领域而言, 温度检测有着更加重大的意义^[1-3]。压缩机是石化生产过程中的重要设备, 保证压缩机的正常运行是石化生产安全有效进行的重要基础保障, 而压缩机损坏的重要原因往往是轴瓦的磨损^[4-5]。轴瓦是滑动轴承和轴颈接触的部分, 与轴承之间采用

间隙配合, 一般不随轴转动。滑动轴承工作时, 轴瓦与转轴之间有一层很薄的油膜, 用于润滑和支撑^[6]。如果润滑不良, 轴瓦与转轴之间就会直接接触, 发生干摩擦, 严重时导致轴瓦温度升高, 甚至烧坏轴瓦^[7]。轴瓦磨损之后, 压缩机的效率会下降, 进而导致轴瓦磨损加剧, 并形成一种恶性循环, 最终导致压缩机无法正常使用。所以, 对轴瓦处的温度进行监测是保证压缩机安全生产的重要措施。

传统的温度传感器通常是将温度转换成电信

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-05-12; 录用日期: 2019-05-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA043505)、国家自然科学基金(61575148)、湖北技术创新重大项目(2017ACA167)

* E-mail: tongxinglin@whut.edu.cn

号,如热释电探测器、热电偶、热电阻等^[8-9],这些器件已经发展得十分成熟了。但对于石化这种易燃易爆的工作环境而言,传统的电类传感器仍存在组网困难、本征不防爆等问题^[10],从而使得传统的温度传感器在石化工业上的应用存在一定的局限性。在这种技术背景下,人们开始寻求新的解决方案。

自 20 世纪 70 年代以来,光纤传感技术发展迅速,光纤布拉格光栅(FBG)传感器因具有独特的优点而成为一些特殊环境下传统电类传感器的替代品。2014 年,武汉理工大学的南秋明^[11]将光纤光栅动态传感监测系统应用到石化设备中,实现了对轴承座振动、往复式压缩机气阀温度等情况的监测,实验结果验证了光纤光栅动态监测系统在石化设备中应用的可行性和优越性;2017 年,大连理工大学的王振^[12]利用光纤传感器设计石化企业油库火灾报警系统,并在现场对罐体上的光纤光栅温度传感器进行了测试,实验结果达到了设计预期的要求;2018 年,意大利 Sannio 大学的 Consales 等^[13]利用 FBG 研制了一种液位传感器,该装置能够执行实时和连续的液位测量,他们通过实验证明了该装置在 25 cm 范围内的灵敏度为 27 pm/cm,分辨率为 0.04 cm,重复性误差为满量程读数的 0.1%。

与传统的传感器相比,FBG 传感器结构简单,易于安装,且用于制作光纤的材料耐腐蚀、耐高温,还不受电磁干扰的影响,并能进行多点测量^[14],这些优点使得 FBG 传感器在石化环境中有着巨大的应用潜力。

光纤传感系统一般均采用有线连接进行光信号的传输^[11-13],但对于压缩机轴瓦处的温度监测而言,由于压缩机轴瓦处于压缩机机体内部,安装空间有限,且轴瓦会随着十字头进行高速往复运动,若采用传统的有线传输方式进行光信号的传输,有可能导致光栅在机体内部缠绕甚至断裂。为了解决光纤缠绕的问题,本文利用准直器进行光信号的空间耦合,实现了轴瓦温度的无线原位监测。针对由于轴瓦往复运动造成的 FBG 中心波长 U 型漂移的现象提出插入损耗阈值的概念,以实现精确的温度解调。

2 FBG 传感器测温原理

光纤光栅是利用光纤的光敏性,通过深紫外照射等方式在纤芯上制备出折射率呈周期性变化的光栅结构^[15],这相当于在光纤的纤芯内部制作了一个光学滤波器。这种结构使得 FBG 只会对满足特定反射条件的入射光进行反射,其余的将被透射过去。

FBG 的反射光是由在相位光栅不同位置反射的光发生相长干涉形成的,由耦合模理论可知,满足 FBG 特定反射条件的光的中心波长可表示为

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

式中: n_{eff} 为传感光纤纤芯的有效折射率, Λ 为空间相位光栅周期, λ_B 为 FBG 反射光的中心波长。 n_{eff} 和 Λ 等特征参数都会随着外部温度和应力等物理量的变化而变化,从而导致反射光的中心波长发生改变,通过检测中心波长的漂移量就可以实现对外部环境中各种相关参数的监测,这就是 FBG 传感器用于传感检测的基本原理^[16],见图 1。

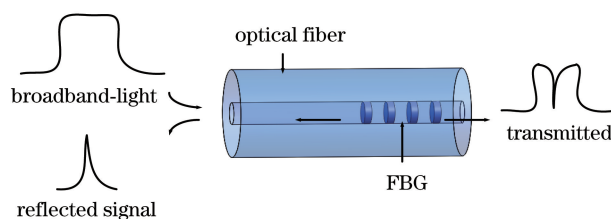


图 1 FBG 传感原理

Fig. 1 Principle diagram of FBG sensing

对(1)式进行微分,可得:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda. \quad (2)$$

由(2)式可知,FBG 的中心波长漂移量取决于光栅有效折射率的改变量 Δn_{eff} 和光栅周期改变量 $\Delta\Lambda$ 。对于 FBG 温度传感器而言,热光效应和热膨胀效应是引起 FBG 相关参数改变的根本原因。在应力变化不大或者应力恒定的情况下,热光效应引起的 FBG 有效折射率的变化^[17]可表示为

$$\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T}, \quad (3)$$

热膨胀效应引起的 FBG 光栅周期的变化可表示为

$$\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T}, \quad (4)$$

式中: ξ 为光纤材料的热光系数, α_f 为光纤材料的热膨胀系数。将(1)式、(3)式和(4)式分别代入(2)式中,可得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha_f)\Delta T. \quad (5)$$

对于特定的 FBG 而言,光纤的热光系数和热膨胀系数是一定的,由(5)式可知,在应力变化不大或者应力恒定的情况下,反射光的波长偏移量跟光栅所处温度场的温度变化成一定的线性关系,线性比例系数与光纤的热光系数、热膨胀系数有关。但当应变的影响无法忽略时,多参量(温度和应变)同时作用于 FBG 传感器就会引起温度和应变的交叉敏感,严重影响传感器的测量精度。因此,在实际应用

中,要尽量避免温度和应变的交叉敏感^[18]。

3 FBG 传感器的封装和标定

3.1 传感器的封装

为了解决在测温过程中温度和应变的交叉敏感,对光纤光栅进行封装处理,如图 2 所示。

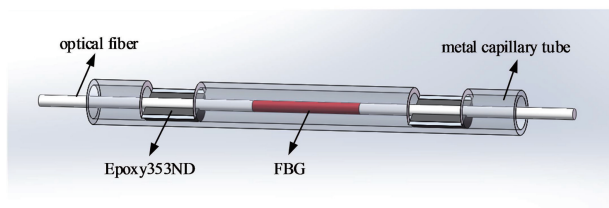


图 2 FBG 传感器封装结构图

Fig. 2 Encapsulation structure diagram of FBG sensor

将光纤光栅(裸光纤光栅的直径为 125 μm)放入金属套管内,使光栅处于套管的中间部位。采用美国 Epoxy353ND 双组分树脂胶将光纤的两端固定,并且使中间的光栅不受任何拉力的作用,即处于松弛状态。两端的胶水将光栅固定在套管的中间部位,避免因受到外界温度变化而导致金属套管拉伸变形以及金属套管扭转等带来的应力的影响,从而实现光栅对温度单变量的测量。

其中,套管采用不锈钢毛细金属管,其具有良好的柔软性、抗拉性、防水性,且耐腐蚀,耐高温,耐磨损^[19],非常适合在石化这种恶劣的环境下使用。另外,套管外径为 0.8 mm,内径为 0.4 mm。实验所用 FBG 传感器的有效光栅长度为 10 mm,为了不影响到光栅的结构,毛细管两凹槽之间的间距应该大于 10 mm,此处两凹槽之间的间距设为 28 mm,凹槽长度为 8 mm,套管总长度为 64 mm。这样的设计也使得 FBG 传感器自身的固有频率较低,避免了轴瓦高速往复运动时两者产生共振。

3.2 传感器的标定

封装后的传感器需要标定后才能投入实际应

用。将封装后的传感器放入恒温水箱(HH-420,智博瑞有限公司,中国,恒温精度为 0.1 °C)中,每次升高 5 °C,逐次记录下每次的中心波长,取三次测量的平均值,数据如图 3 所示,线性拟合曲线的参数如表 1 所示。

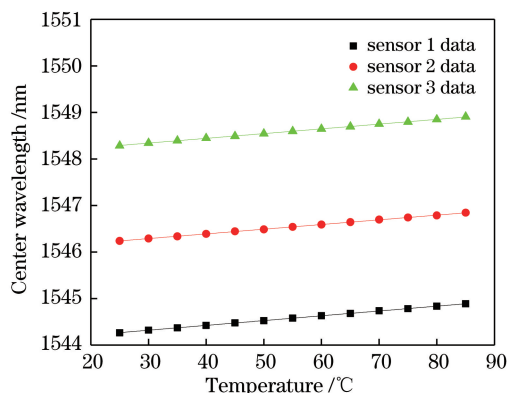


图 3 传感器标定拟合曲线图

Fig. 3 Calibration fitting curves of sensors

表 1 拟合曲线参数

Table 1 Parameters of fitting curves

Sensor	Fitting curve	Linear correlation coefficient	Mean-square error
1	$y = 1544.012 + 0.01034x$	0.9999	0.486
2	$y = 1545.988 + 0.01007x$	0.9997	0.461
3	$y = 1548.036 + 0.01019x$	0.9996	0.472

由拟合曲线参数表可以看到,传感器 1~3 均表现出比较好的线性度,曲线的斜率均在 0.01 左右,也就是说三者的中心波长改变量均为 10 pm/°C 左右。

4 无线耦合插入损耗分析

为了解决轴瓦往复运动过程中存在的光纤缠绕问题,本文采用两准直器进行光信号的空间耦合,以实现信号的无线传递,具体系统结构如图 4 所示。

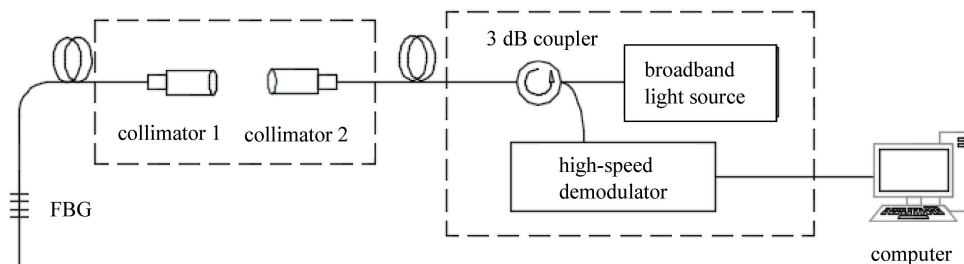


图 4 无线耦合解调示意图

Fig. 4 Diagram of wirelessly coupled demodulation

准直器在进行无线光耦合时的传输效率会影响 FBG 传感器能否监测到其中心波长值,因此需要对两准直器无线传输的效率进行分析。

在不计镜面反射等因素的影响下,若两光纤准直器之间仅存在轴向间距 d ,则其插入损耗为^[20]

$$L_{II_1} = -10\lg \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda d}{2\pi\omega_c^2} \right)^2} \right]; \quad (6)$$

若两光纤准直器仅存在横向间距 Δ 时,其插入损耗为

$$L_{II_2} = -10\lg \left[\exp \left(\frac{-\Delta^2}{\omega_c^2} \right) \right]; \quad (7)$$

若两光纤准直器仅存在角度偏差 θ ,其插入损耗为

$$L_{II_3} = -10\lg \left\{ \exp \left[\frac{-\theta^2}{\left(\frac{\lambda}{\pi\omega_c^2} \right)^2} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中 ω_c 为束腰半径。

实验所用激光光源功率为 $320 \mu\text{W}$,镜头为美国 Thorlabs 公司的 TC12APC-1550 系列准直器,属于球面透镜,设计波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,束腰半径 $\omega_c = 1.135 \text{ mm}$ 。将准直器的参数代入(2)~(4)式中进行插入损耗模拟,得到的仿真曲线如图 5~7 所示。

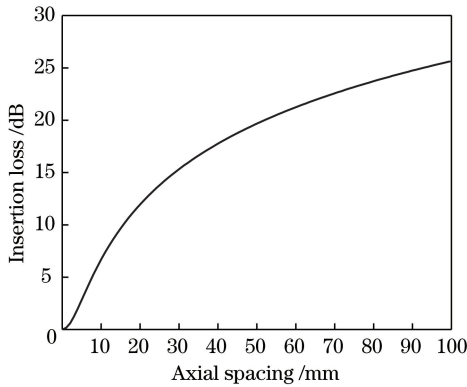


图 5 轴向间距与插入损耗关系曲线

Fig. 5 Axial spacing versus insertion loss

由图 6 可以看到,当横向间距大于 3.0 mm 时,插入损耗将大于 30 dB ,此时光功率为 $0.3 \mu\text{W}$,与噪声信号的功率在同一量级(噪声信号强度在 -40 dBm 左右,功率为 $0.1 \mu\text{W}$),此时寻峰算法将无法读取到 FBG 传感器的中心波长。另外,通过对比图 5~6 可以发现,该类准直器对角度偏差的变化是非常敏感的,所以在实际使用过程中要注意对角度偏差的控制。

进一步模拟往复式压缩机轴瓦运动过程中的对光情况。假设在轴瓦运动过程中,角度偏差为 0° ,

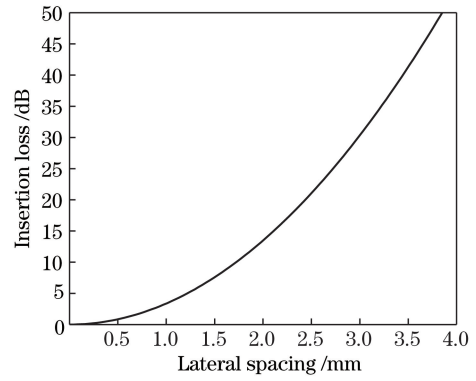


图 6 横向间距与插入损耗关系曲线

Fig. 6 Horizontal spacing versus insertion loss

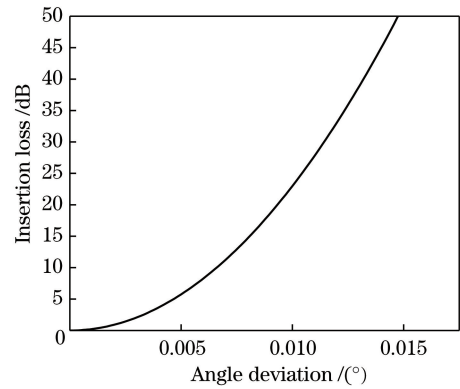


图 7 角度偏差与插入损耗关系曲线

Fig. 7 Angle deviation versus insertion loss

轴向间距默认为 7 mm 不变(根据现场安装的实际情况而定),仅改变两准直器间的横向间距。模拟横向间距由大逐渐减小直到为 0 的情况,实验得到的传感器 1 的中心波长如图 8 所示。

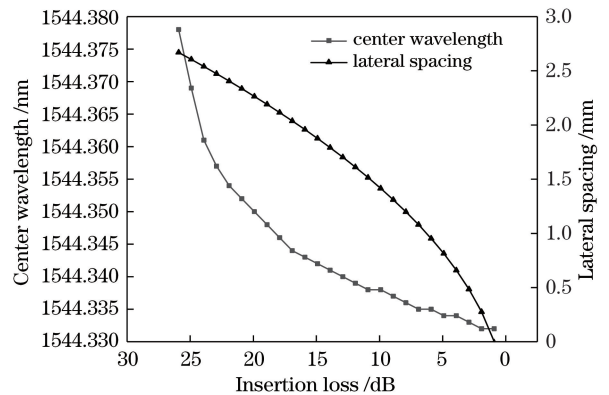


图 8 传感器 1 中心波长、横向间距与插入损耗关系图

Fig. 8 Center wavelength or lateral spacing versus insertion loss of sensor 1

由图 8 可以看到:当两准直器之间的插入损耗小于 26 dB 时,解调仪才开始有明显的中心波长信号;且随着两准直器之间横向间距的不断减小,插入损耗也在不断减小,这和(3)式的仿真变化趋势是一

样的。当两准直器之间的横向间距为 0 时,插入损耗为 1 dB,并没有达到理想的 0 dB,这是因为光路在传输的过程中,或多或少会在光学元件以及光路上有一定的损耗。从图 8 可以得到的另外一个重要的信息就是,在插入损耗不断变化的过程中,FBG 传感器的中心波长有着较大的变化,通过传感器 1 的标定曲线可以发现,利用波长最小值点和波长最大值点解调出来的温度的差值达到了 4 °C 以上,这对于一次温度测量过程而言误差过大,无法实现监测过程中准确的温度解调。

为了进一步确定采集过程中准确的中心波长,将传感器 1~3 均放置在 30 °C 的恒温水箱中,模拟一个完整的往复运动过程,观察光栅中心波长的变化。由传感器 1~3 的标定曲线可知,当温度为 30 °C 时,其中心波长分别为

$$\begin{cases} \lambda_{B1} = 1544.012 + 0.01034 \times 30 = 1544.322 \text{ nm} \\ \lambda_{B2} = 1545.988 + 0.01007 \times 30 = 1546.290 \text{ nm} \\ \lambda_{B3} = 1548.036 + 0.01019 \times 30 = 1548.342 \text{ nm} \end{cases} \quad (9)$$

将标定曲线求得的中心波长作为参考,在横向间距不断变化的过程中,求得 FBG 传感器检测到的中心波长和标定曲线下的中心波长的差值,得到传感器 1~3 的中心波长变化量-插入损耗的数据,如图 9 所示。

可以看到,插入损耗越大,两者中心波长之间的差值越大。当传感器的插入损耗为 15 dB 时,其中心波长的变化量均在 0.01 nm 左右,将其代入到表 1 所示的标定公式中可知,温度变化量在 1 °C 左右;

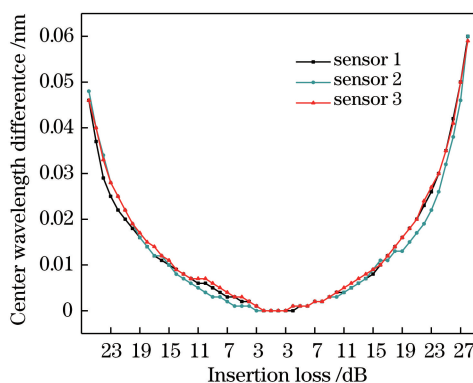


图 9 传感器中心波长-插入损耗关系图

Fig. 9 Center wavelength versus insertion loss of sensor

当插入损耗为 10 dB 时,传感器的中心波长变化量均在 0.004 nm 左右,温度变化量在 0.4 °C 左右;当插入损耗为 5 dB 时,传感器的中心波长变化量均在 0.001 nm 左右,温度变化在 0.1 °C 左右;当插入损耗为 3 dB 时,中心波长基本上不发生变化。

由此可见,光信号在无线耦合过程中存在一个临界插入损耗。当插入损耗大于临界插入损耗时,FBG 解调仪无法准确地读取 FBG 的中心波长,且插入损耗越大,读取的中心波长的误差越大。当插入损耗大于该值时,中心波长改变量呈指数函数增长,导致中心波长漂移异常。该方案中,插入损耗阈值在 5 dB 左右,此时的横向间距为 1.22 mm,即横向间距的有效位移为 2.44 mm。

5 现场实验

将无线耦合系统用于石化压缩机现场对轴瓦处的温度进行监测,现场实验方案如图 10 所示。

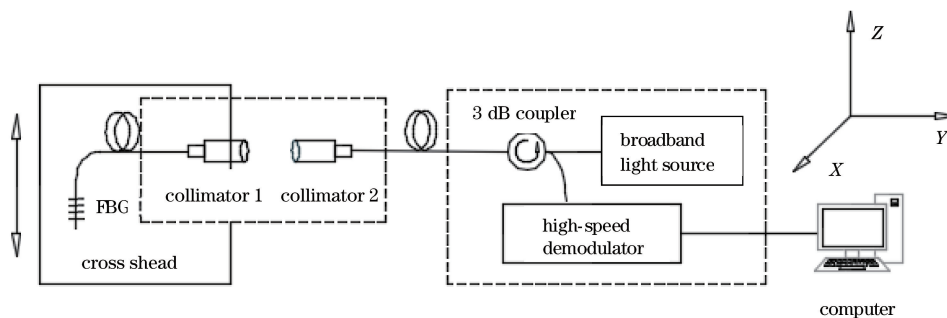


图 10 石化现场无线耦合系统图

Fig. 10 Wireless coupling system diagram of petrochemical site

其中,准直器 1 固定于机体内部的十字头部位,FBG 传感器嵌入十字头轴瓦部位,如图 11 所示,使光纤光栅跟着十字头进行 X 轴方向的来回往复运动。准直器 2(两准直器间的轴向间距为 7 mm)固定于基座的盖板上,通过光纤与解调仪连接,并在计

算机上实时显示轴瓦的温度,从而实现轴瓦温度的无线 FBG 测量。

用标定过的 FBG 传感器 1 进行现场实验数据的采集。因为现场实验时轴瓦处于运动状态,现场所使用的解调仪仅能获取到动态采集过程中的中心

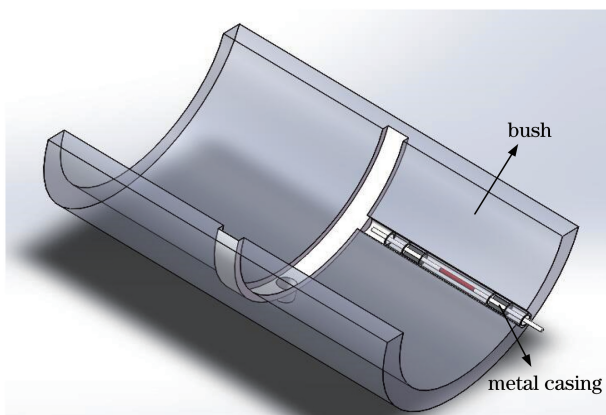


图 11 FBG 传感器安装布置图

Fig. 11 Installation layout diagram of FBG sensor

波长值,无法采集到动态过程中的插入损耗值,所以只能得到动态采集过程中的中心波长信息。采集到的一次往复运动过程中的具体实验数据如图 12 所示。

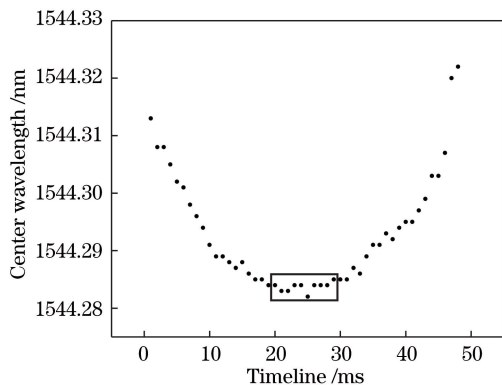


图 12 传感器 1 中心波长实验数据

Fig. 12 Center wavelength experimental data of sensor 1

根据压缩机十字头的运动速度以及 FBG 解调仪的采集速率可知,在准直器的有效位移内,FBG 解调仪采集到的有效数据点一般为一次采集过程中中间的 10 个点,即为图 12 中方框内的数据点。为了排除系统误差对中心波长的影响,将该 10 个有效测量点中的每个点与其他每个点进行求方差处理,求得的方差最小点的中心波长视为本次测量过程中的中心波长。通过计算可知,该次测量中的中心波长为 1544.284 nm,利用插值计算得到该次测量的温度值为 26.5 °C。在压缩机停止运行后,利用红外点温计对轴瓦处的温度进行测量,测得的温度数据为 26.3 °C。两种测量方法的温度差为 0.2 °C,可能是由检测上的时间延后造成的。

为了更加具体地反映出压缩机轴瓦在运行过程中的温度变化曲线,对压缩机轴瓦进行了 30 min 的温度监测,每 3 min 进行一次数据采集,采集到的实

验数据及误差棒如图 13 所示。

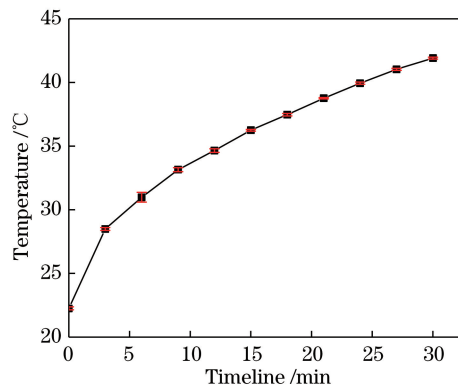


图 13 轴瓦的温度及温度误差棒图

Fig. 13 Temperature and its error bar diagram of bushing

从图 13 中可以看出,升温速率在慢慢变小,且温度越高,升温速率越小。其中,轴瓦测温过程中误差棒的标准差的最大值不超过 0.4 °C,最小仅为 0.05 °C。

由于轴瓦在运动过程中不便于拆卸,所以无法用红外点温计对轴瓦的温度进行实时测量。为了保证测量过程中的测量有效性,在压缩机停机状态下(压缩机开始运行和结束运行时)利用红外点温计对轴瓦的温度进行了 10 次测量,与传感器测量的温度进行差值计算,并记录下出现不同温度差值的次数,其差值分布如表 2 所示。

表 2 不同温度差值次数分布表

Table 2 Distribution table of different temperature differences

Temperature difference /°C	≤ -0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	≥ +0.1
Beginning	1	2	3	2	1	1
Ending	2	3	3	1	1	0

从表 2 可以看出,在起始时刻,传感器与红外点温计测量结果的差值分布在 -0.1 °C 左右,这是因为压缩机在开始运行时的温度较低,散热较慢,所以两者之间的差值不大;在结束时刻,传感器与红外点温计测量结果的差值分布在 -0.3 °C 左右,这是因为压缩机在结束运行时的温度较高,散热较快,所以两者之间的差值稍大一些。虽然因为时间上的延后导致红外点温计的测量值与传感器的测量值存在一定的差值,但差值的绝对值大多不超过 0.3 °C,表明了设定插入阈值来确定中心波长并准确解调出轴瓦温度的可行性。

6 结 论

采用准直器无线耦合的方案解决光纤传感系统

测量轴瓦温度时的光纤缠绕问题,并对光纤光栅传感器进行封装,使其能对温度进行单变量监测。封装后传感器的线性相关系数在 0.999 以上,方差在 0.5 以下,均表现出比较好的线性度。针对准直器空间耦合过程中产生的 U 型中心波长的现象,提出了插入损耗阈值的概念,通过限制插入损耗的大小来筛选出更加准确的中心波长值。实验结果表明,该方法将一次动态测量过程中的温度变化量从 4 °C 控制到了 0.1 °C 以内,大大提高了温度监测的准确性。

当然,上述现象不仅仅存在于温度解调系统中,利用光纤无线耦合的方法来测量运动部件物理参量的系统都可能会存在这样的问题。只是,对于不同的准直器而言,插入损耗的阈值可能不同,这还有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Thorat S, Thibodeau C, Collier B, *et al.* Leveraging control and monitoring technologies: reliability and lower costs for electrical trace-heating systems in petrochemical facilities[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2017, 23(2): 62-73.
- [2] Jiang J F, Wang S, Liu K, *et al.* Development of optical fiber temperature sensor for aviation industry [C]//2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2016: 16725572.
- [3] Guan P. Distributed temperature sensor system based on BOTDR[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
关鹏. 基于 BOTDR 的分布式温度监测系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [4] Zhang J, Dong Q B. Lubrication performance analysis of crankshaft bush in compressor[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 90: 277-289.
- [5] Mahato K K, Dutta K, Ray B C. High-temperature tensile behavior at different crosshead speeds during loading of glass fiber-reinforced polymer composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(16): 44715.
- [6] Ma H, Li H, Niu H Q, *et al.* Parametric influence analysis of oil-film instability in a sliding bearing-rotor system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(23): 100-104.
马辉, 李辉, 牛和强, 等. 滑动轴承-转子系统油膜失稳参数影响分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(23): 100-104.
- [7] Jiang Z N, Mao Z W, Zhang Y D, *et al.* A study on dynamic response and diagnosis method of the wear on connecting rod bush[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2017, 17(4): 812-822.
- [8] Kenney R, Oruganti V, Ortega A, *et al.* Experiments on the thermal resistance of deformable thermal interface materials under mechanical loading [C]//2017 33rd Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM), March 13-17, 2017, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2017: 252-260.
- [9] Xu B N. Nickel thermal resistance and its application [J]. Journal of Functional Materials, 1993, 24(3): 286-288.
徐蓓娜. 镍热电阻及其应用[J]. 功能材料, 1993, 24(3): 286-288.
- [10] Cheng Y Z. ROFDR optical fiber temperature sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
程亚洲. ROFDR 光纤温度传感器[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [11] Nan Q M. Study on dynamic sensing and monitoring methods for petrochemical facilities based on optical fiber grating[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
南秋明. 石化设备的光纤光栅动态传感监测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [12] Wang Z. Design of fire alarm system for oil depot of petrochemical enterprise based on fiber sensor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
王振. 基于光纤传感器的石化企业油库火灾报警系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [13] Consales M, Principe S, Iele A, *et al.* A fiber Bragg grating liquid level sensor based on the Archimedes' law of buoyancy[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(20): 4936-4941.
- [14] Lü G H, Shang S H, Jiang X, *et al.* FBG temperature and pressure sensing system for hot water pipeline of petrochemical factory[C]//2008 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference, November 7-9, 2008, Chengdu, China. New York: IEEE, 2008: 496-498.
- [15] Sirithawornsant S, Niyomgool A, Suksompong P, *et al.* Fiber Bragg grating FBG sensing temperature characteristic and application in water and air[C]//2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), June 27-30, 2017, Phuket. New York: IEEE, 2017: 691-693.
- [16] Tong X L, He W, Zhang C, *et al.* Research and

- application progress of fiber Bragg grating and Fabry-Perot sensors in the field of aeronautics and astronautics[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(7): 1-7.
- 童杏林, 何为, 张翠, 等. 光纤光栅与光纤法珀传感器在航空航天领域的研究与应用进展[J]. *激光杂志*, 2018, 39(7): 1-7.
- [17] Ding P, Dong X P, Ye X W. Research on measurement of fiber Bragg grating considering the cross-sensitivity of temperature and strain[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020605.
- 丁朋, 董小鹏, 叶肖伟. 考虑温度和应变交叉敏感的光纤布拉格光栅测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020605.
- [18] Tan Z, Liao C R, Liu S, *et al.* Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206007.
- 谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1206007.
- [19] Ma G C, Fu H M, Wang Z, *et al.* Study on fabrication and properties of 304 stainless steel capillary tubes/ $Zr_{53.5}Cu_{26.5}Ni_5Al_{12}Ag_3$ bulk metallic glass composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(9): 1087-1094.
- 马广财, 付华萌, 王峥, 等. 304 不锈钢毛细管/ $Zr_{53.5}Cu_{26.5}Ni_5Al_{12}Ag_3$ 块体非晶合金复合材料的制备与性能研究[J]. *金属学报*, 2014, 50(9): 1087-1094.
- [20] Guo R, Zhu C, Zhu B W. Study of the insertion loss of collimator[J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2004, 24(4): 324-327.
- 郭芮, 朱昌, 朱保文. 准直器插入损耗分析[J]. *西安工业学院学报*, 2004, 24(4): 324-327.