

A Novel Fibre Bragg Grating Gas Leakage Detection Sensor^{*}

WU Xi-jun^{1*}, WANG Yur-tian¹, LIU Hai-long¹, TIAN Rui-ling²

1. Measurement technology and instrumentation key lab of hebei province, yanshan university, Qinghuangdao Hebei 066004, China;
2. School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China

Abstract: A novel gas leakage detection sensor based on self-heated effect of fibre optic is presented. It can be used to monitor the brittle juncture of pipeline in real-time, also it can provide quantitative data about gas leaking velocity. The optical energy leaking out from the fibre is absorbed by the metallic coating, which raise the temperature and alter the grating pitch of the fibre Bragg grating (FBG). When gas leaking out from the pipeline blow on the fibre grating, its temperature changes accordingly. The gas leaking velocity can be determined by monitoring the change of resonance wavelength. Based on the filter characteristic of long-period grating (LPG), the wavelength-change of sensing grating can be demodulated. The validity of this grating gas leakage detection sensor has been experimentally proved by means of controlling the velocity of CO₂.

Key words: fibre bragg grating sensor; gas leakage detection; linear demodulating; photoelectric detector
EEACC: 7230E

一种新型光纤布拉格光栅气体泄漏检测传感器^{*}

吴希军^{1*}, 王玉田¹, 刘海龙¹, 田瑞玲²

1. 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学理学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要: 提出了一种新颖的基于光纤自加热效应的气体泄漏检测用传感器, 不仅可对管道连接处等易发生泄漏的部位进行实时监测, 还可提供定量的有关管道泄漏速度的数据。泄露到光纤外部的泵浦光能被附着在光纤光栅外部的金属涂敷层吸收, 导致温度上升, 改变了光栅的栅格周期, 进而影响了光栅的谐振波长。当有气流通过光纤光栅时, 由于热量被带走, 导致光纤光栅温度变化, 通过监测谐振波长的改变即可求得气体的泄漏速度。为简化信号解调方法, 利用长周期光纤光栅的边沿滤波器特性, 实现光纤光栅传感波长的解调。实验通过控制 CO₂ 的流速, 证实了该方法的可行性。

关键词: 光纤布拉格光栅传感器; 气体泄漏检测; 线性解调; 光电探测器

中图分类号: TP21

文献标识码: A 文章编号: 1004-1699(2008)08-1348-04

管道运输在现代生活中起着越来越重要的作用, 然而由于各种自然或人为不可预料的因素, 管道运输泄漏事故却时有发生, 不仅浪费了资源, 污染了环境, 甚至还会危及人的生命安全。所以准确的泄漏检测及定位技术是管道运输可靠运行的关键, 而确定管道的泄漏速率对于分析泄漏扩散以及预测评价事故后果具有重要意义。

光纤传感器具有制造成本低、灵敏度高、抗电磁

干扰和使用周期长等优点, 所以适用于环境条件恶劣的场合。光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器可将被测信号直接表现为中心波长的变动情况^[1], 近年来受到人们广泛关注。然而作为分析波长移动情况的传统光谱仪方法因其造价和体积在现场应用时受到了很多限制。

本文设计了一个 FBG 气体泄漏检测用传感器, 不仅能对管道上易发生泄漏的部位进行实时监测,

还可提供定量的关于流体泄漏速度的数据。作为一种新型有源光纤传感器,它基于光纤自加热原理^[2],由光纤内传播的光束提供能量。为简化信号解调方法,用长周期光栅(LPG)作为边沿滤波器^[3],用光电探测器的功率变动来反映因流速变化造成的布拉格波长移动。实验中通过控制气瓶出口 CO₂ 的流速,验证了该方案的可行性。

1 实验装置和测量原理

图 1 给出了基于 FBG 传感器和 LPG 信号解调器的原理框图。其中 FBG 作为气体检测用传感器由两段光纤构成:刻有 FBG 的标准单模光纤(9/125)和一段阶跃折射率多模光纤(100/140)。单模光纤中光栅长度为 10 mm,谐振波长 1 550. 011 nm,3 dB 带宽为 0. 149 nm,其外部镀有一层银膜。由超强度发光二极管(SLED)发出的光束通过环形器耦合进 FBG。由 FBG 反射的光束再通过耦合器均分为两路光束。其中一束经线性滤波器 LPG 到达光电探测器。另一束被直接检测,以补偿光源输出功率波动对实验结果的影响。解调用 LPG 光栅长度为 23 mm,透射谱如图 2 所示,中心波长为 1 558. 4 nm,线性范围约为 1 546 ~ 1 554 nm。

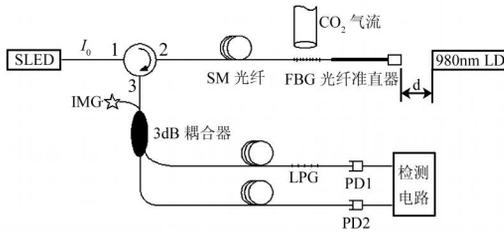


图 1 测量装置框图

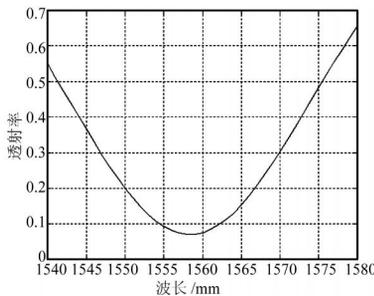


图 2 LPG透射谱

选用 SLED 作为光纤光栅的传感光源,中心波长 1543. 38 nm,峰值输出功率 - 36 dBm,波长从 1 546 nm 变化到 1 554 nm,功率变动约为 0. 5 dB,见图 3。选用中心波长为 980 nm 的高功率泵浦二极管激光器给 FBG 提供能量。通过调节驱动电流来控制泵浦激光器的发射功率。为传递功率较高的泵浦光束,提高光源到光纤的耦合效率,选用多模光纤准直器,其尾纤类型为阶跃折射率多模光纤

(100/ 140),直接将准直器尾纤与刻有光栅的单模光纤熔接到一起,熔接处距离 FBG 约 6 mm。适当调整泵浦光源与准直器间的距离 d,使耦合损耗最小。

选择金属银作为 FBG 外的金属涂敷层,厚度控制在 20 μm。银的热膨胀系数为 5. 5 × 10⁻⁶ / K,而硅为 0. 66 × 10⁻⁶ / K。准直器尾纤中传播的泵浦光能在熔接点处大都泄漏到了单模光纤的包层中,进而由包层泄漏到了光纤外部,而且这些泄漏到光纤外部的泵浦光能随着与熔接点距离的增加呈指数增长关系^[4]。

流速测量用 FBG 的中心波长位于解调用 LPG 的线性范围内。打开泵浦光源前后,由光谱仪对环形器 3 端的反射光谱进行观测,得到的谱线如图 4 所示。由图 4 可知,当打开泵浦光源时,因纤芯的失配导致部分泵浦光束由熔接处泄露到了 SM 光纤包层中,进而被金属涂敷层吸收,导致 FBG 栅格周期改变,FBG 反射中心波长红移了约 3 nm,泵浦激光器输出功率为 362 mw。

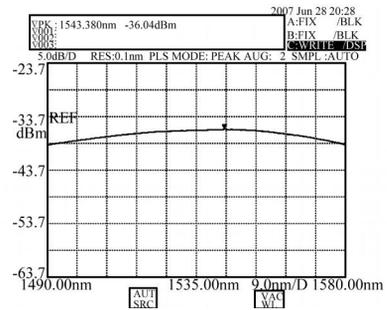


图 3 SLED 输出功率谱

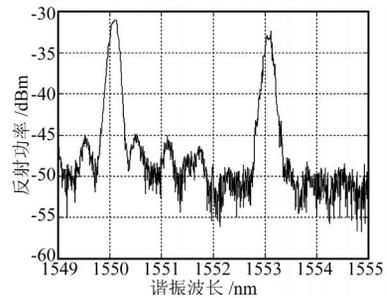


图 4 泵浦光源开启前后 FBG 反射谱线图

实验中选用 CO₂ 气源模仿泄漏的流体,通过调节减压表的流量阀来控制流速。为消除气流垂直冲击光纤造成的径向弯曲应变,我们在陶瓷基底上制作了一个图 5 所示的 V 形槽,将刻有光栅的 FBG 固定于其中。此时造成光栅栅格周期变动的主要原因便是因镀层温度改变引起的。打开泵浦光源,当气流速度由 0. 2 m/s 逐渐变化到 5 m/s 时,由光谱仪对环形器 3 端 FBG 的反射谱进行观察,得到 FBG 的谐振波长与气流速度的关系曲线如图 6 所示。

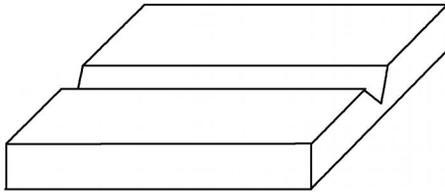


图5 固定 FBG用陶瓷基座

假设 FBG 的反射谱服从高斯分布^[5-6]：

$$R_F(\lambda) = R_F \cdot \exp[-4 \ln 2 \cdot (\frac{\lambda - \lambda_F}{\Delta\lambda_F})^2] \quad (1)$$

式中： R_F 为 FBG 的峰值反射率， λ_F 为中心波长， $\Delta\lambda_F$ 为 3 dB 带宽。

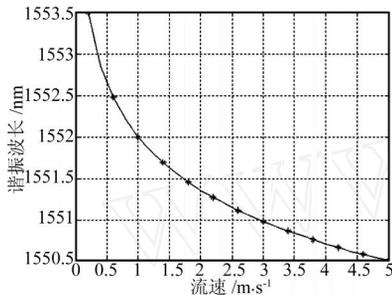


图6 气流速度与 FBG 谐振波长的关系图

由于宽带光源谱宽远大于谐振波长的移动范围,可将 FBG 的入射光强看作常数 I_0 ^[7-8]。由光电探测器 PD1 接收到的光功率与 FBG 反射谱和 LPG 透射谱之间的关系为：

$$P_1(\lambda) = I_0 \cdot T(\lambda) \cdot R_F(\lambda) \cdot d \quad (2)$$

式中： $T(\lambda)$ 为 LPG 的归一化光谱透射率函数曲线,在一定范围内它近似为线性函数。表示光能的衰减系数。

由光电探测器 PD2 接收到的光功率为：

$$P_2(\lambda) = I_0 \cdot R_F(\lambda) \cdot d \quad (3)$$

通过测量 $T(\lambda) = P_1(\lambda) / P_2(\lambda)$ 即可获得 FBG 谐振波长信息。

通过调节气流速度,改变金属涂敷层处 FBG 的温度,造成其中心波长的移动,由两光电探测器接收到的光强之比 $T(\lambda)$ 随之发生了变化。由 LPG 的透射谱线即可获得此时 FBG 中心波长的位置信息,进而可获得气流速度的变化情况。

2 实验结果及数据处理

为得到 LPG 透射率与气流速度的关系曲线,以光谱仪所测数据谱线图为基础,由图 6 拟合出波长与流速的函数关系式为：

$$\lambda = 1552 \cdot \lambda^{-0.0006} \quad (4)$$

式中： λ 代表 FBG 的谐振波长； λ 为气流速度,拟合曲

线的 R^2 值为 0.994 8。

在 LPG 线性范围内,其透射率 T 可表示成 的线性函数,由图 2 近似求得函数关系式为：

$$T(\lambda) = -0.0185 \cdot \lambda + 28.875 \quad (5)$$

综合上面两式得到 $T(\lambda)$ 的函数关系式为：

$$T(\lambda) = -28.712 \cdot \lambda^{-0.0006} + 28.875 \quad (6)$$

式(6)即为 LPG 透射率与泄漏气体流速的关系式。

按照图 1 连接实验系统,实验中控制气阀开度,使流速由 0.2 m/s 开始,以 0.4 m/s 为调节步长,逐渐变化到 5 m/s,由检测电路计算出 PD1 与 PD2 光功率的比值,即透射率。记录 12 个流速、透射率数据点,以菱形符号绘于图 7 中。同时在图 7 中根据式(6)绘出了拟合关系曲线。可见,本实验系统给出的测量结果和光谱仪分析得到的关系曲线一致性好。从而验证了 FBG 流速传感与 LPG 边沿解调系统的可行性。

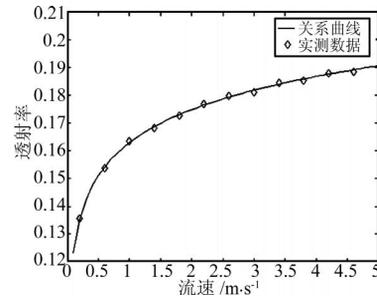


图7 实测 LPG 透射率与流速的对应关系图

3 结论

本文利用物理学中的热传导原理,基于光纤的自加热效应,设计了一个具有金属涂敷层的 FBG 气体检测传感器,并利用 LPG 的线性解调原理,简化了 FBG 波长变动信号的解调方法。由 LPG 透射谱线以及 FBG 谐振波长与流速的关系曲线推出了透射率和气流速度的函数关系式,并用实验验证了测量方案的可行性。采用适当的复用技术可将本文提到的单点测量方案扩展到管道沿线多个关键点的同时监测,更具实际应用价值。

参考文献：

- [1] Kersey Alan D, Davis Michael A, Patrick Heather J et al. Fibre Grating Sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8):1442-1463.
- [2] Michael Buric, Kevin P. Chen, Matrika Bhattarai et al. Active Fiber Bragg Grating Hydrogen Sensors for All-Temperature Operation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(5):255-257.
- [3] 刘波, 董峥嵘, 陈少华等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性

- 解调新方法[J]. 光学学报,2004,24(2):199-202.
- [4] Lucas J, Cashdollar, Kevin P. Chen. Fiber Bragg Grating Flow Sensors Powered by In-Fiber Light[J]. IEEE Sensors Journal, 2005,5(6):1327-1331.
- [5] Lobo Ribeiro A B, Ferreira L A, Santos J L et al. Analysis of the Reflective-Matched Fiber Bragg Grating Sensing Interrogation Scheme[J]. Applied Optics,1997,36(4):934-939.
- [6] 张东生,郭丹,罗裴等.基于匹配滤波解调的光纤光栅振动传感器研究[J].传感技术学报.2007,20(2):311-313.
- [7] Bao-Jin Peng, Yong Zhao, Yan Zhao et al. Tilt Sensor With FBG Technology and Matched FBG Demodulating Method[J]. IEEE Sensors Journal. 2006,6(1):63-66.
- [8] 夏秀兰,童峥嵘,盛秋琴等.光纤光栅应变传感的研究[J].天津大学学报.2002,35(4):473-476.



吴希军(1979-),男,汉族,河北邯郸人,燕山大学电气工程学院教师.2005年4月于燕山大学测试计量技术及仪器专业获硕士学位,研究方向为多传感器数据融合与故障诊断,同年9月考入燕山大学测试计量技术及仪器专业,攻读博士学位,研究方向为光纤传感与测试技术

及系统研究.目前发表科研与教学论文约十余篇,其中EI检索四篇. wuxijun@ysu.edu.cn



王玉田(1952-),男,汉族,燕山大学仪器科学系教授,博士生导师,曾先后主持并完成了十余项国家、省部级科研项目,近三年在仪器仪表学报、SPIE、计量学报等中外著名期刊发表文章二十余篇.研究方向为光纤多参数测量与测试系统构建.