

多参量一体化光纤传感器及标校系统的研制与开发

杨 洋^{1,2}, 赵 勇³, 吕日清³, 刘 兵¹, 郑洪坤³, 杨 洋^{1,2}, 王孟军², 崔盟军¹, 杨华丽²

- (1. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000;
2. 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000;
3. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 提出一种集温度、压力和流量多参数同时测量的新型光纤传感器, 并对其原理和结构、工艺设计展开研究工作。采用靶式与悬臂梁结构相结合的机敏结构、薄壁压力应变筒结构等集成在同一传感器探头上, 并利用四只光纤光栅使得温度、压力和流量三个参数得以同时检测。利用光纤光栅两两之间波长移动量“相差”或“相和”, 使温度与流量、压力交叉敏感问题得以解决。同时开发了光纤传感器标校系统, 这一系统可以较准确实现对所研发的多参量一体化传感器的测试结果进行检测和标校。

关键词: 一体化光纤传感器; 交叉敏感; 标校系统

中图分类号: TN911.7; TH86 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1013006

Research and development of a multi-parameter integrated optical fiber sensor and calibration system

Yang Yang^{1,2}, Zhao Yong³, Lv Riqing³, Liu Bing¹, Zheng Hongkun³, Yang Yang^{1,2},
Wang Mengjun², Cui Mengjun¹, Yang Huali²

- (1. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China;
2. Hebei Instruments and Meters Engineering Technology Research Center, Chengde 067000, China;
3. Collge of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A new type optical fiber sensor which realized the simultaneous measurement of temperature, pressure and flow rate was proposed, and some research work on its principle, structure and process design was carried. The flow rate sensitization structure combined by target and cantilever, thin-walled cylinder pressure structure were integrated on a sensing probe, 4 fiber Bragg gratings (FBG) were adopted to measure the temperature, pressure and flow rate simultaneous. By making addition or difference between two pairs of FBG resonance wavelength shift, the cross sensitivity between temperature and flow rate, pressure was solved. Meanwhile, the calibration system was developed, this system can achieve relatively accurate calibration and measurement of the proposed multi-parameter sensor.

Key words: integrated optical fiber sensor; cross sensitivity; calibration system

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-07-15

基金项目: 科技部火炬计划(2014GH550108); 河北省创新能力提升计划(18961705H)

作者简介: 杨洋(1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤传感器与检测技术方面的研究。Email: yang1958@sohu.com

0 引言

管道在运送液体、气体、浆液等方面具有独特优势,随着成品油、供水、煤气等供给系统的扩展,管道运输中的安全、计量等方面也随之越来越受到人们的重视。温度、压力和流量等参数是管道运输中的安全、计量中的最重要基本参数,伴随着管道环境监测和计量所耗费的人力、物力的增大,亟需寻找一种高效、经济的实时监测和计量技术。在众多用于测量温度、压力、流量等过程控制量的传感器中光纤传感器是近些年发展起来的新技术应用的代表。光纤传感器由于具有本质安全,在易燃易爆的环境下安全可靠、抗电磁干扰和原子辐射干扰、耐高温和耐腐蚀等特点,因此近年来在各类测量仪表的研究中成为一个热点。由于巨大的商业前景,针对管道环境参数传感技术的实用性研究吸引了各个领域大批的研究人员积极参与,但是由于管道环境的复杂多变,以及传感参量间交叉敏感问题的存在,国内外已有报导的管道光纤传感器普遍存在测量参量单一,系统集成性差,难于适应复杂环境等关键问题,呈现的大量研究成果几乎都是利用光纤传感器针对过程控制中某单一参数,如温度测量、压力测量、流量测量的相关工作^[1-10],或者针对压力和温度、流量和温度等双参数测量的相关报道^[11-12]。由于在一些场合需要同时得到管道内流体的温度、压力、流量这三个过程控制量,因此提出一种基于光纤传感器技术的温度、压力和流量多参数同时测量的新型传感器,并对其原理和结构、工艺设计展开研究。传感器采用靶式与悬臂梁结构相结合的机敏结构,将流量大小转换为机敏结构的应变,从而引起光纤光栅中心反射波长的移动。通过设计特殊结构形式的薄壁压力应变筒,将压力转换为应变,作用到光纤光栅上,可以实现压力的测量。新型传感器可以实现温度、压力和流量三个参数的同时检测。这种新型传感器不仅可以有效减少传感器的体积,并能解决参量间的交叉敏感问题,从而提升光纤传感器的稳定性、可靠性。为了能够对所研发的多参量一体化的光纤传感器进行有效监测,课题组还同时开发了一款多参量一体化的标校系统,这一系统可以同时显示管道内流体的温度、压力、流量的准确数值,为所研发的传感器提供一个比较的标准。

1 一体化多参量光纤光栅传感器

基于光纤传感器技术的温度、压力和流量多参数同时测量的新型传感器的原理、结构、工艺设计等内容,课题组展开研究工作。提出一种靶式与悬臂梁结构相结合的机敏结构,将流量大小转换为机敏结构的应变,从而引起光纤光栅中心反射波长的移动,巧妙的结构设计还可以将温度的交叉敏感问题解决;通过设计特殊结构形式的薄壁压力应变筒,将压力转换为应变,作用到光纤光栅上,可以实现压力的测量。设计出一体化传感器探头的形式,使得温度、压力和流量三个参数得以同时检测。为了实现温度、压力、流量的同时测量,课题组设计的传感器一共需要 4 只光纤光栅。其中两只完成流量、温度测量(FBG1、FBG2),两只完成压力测量(FBG3、FBG4)。流量测量的传感器采用靶式结构,并先后在把杆上安装两只布拉格光纤光栅,安装位置如图 1 所示。

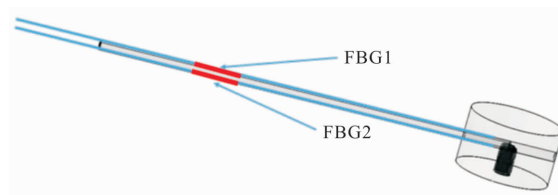


图 1 一体化传感器的温度与流量测量部分结构图

Fig.1 Structure chart of temperature and flow measurement part of integrated sensor

根据相关推导^[13],可以得到光纤光栅的中心反射波长 λ_B 的差值 $\Delta\lambda_B$ 与靶片应变 ε 和温度变化 ΔT 的关系可以表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中: α 为光纤材料的膨胀系数; ξ 为光纤的热光系数; P_e 为光纤的有效弹光系数。两根布拉格光纤光栅是放在空心圆柱悬臂梁内部,以管道截面作为对称面进行差分式结构分布,一个受拉伸作用,一个受挤压作用,其中心反射波长向相反的方向漂移近似相同的值,同时两根布拉格光纤光栅距离较近,温度的变化导致其中心反射波长向同一方向漂移相同的值,根据公式(1)及参考文献[13],并设定 FBG1、FBG2 基础波长 λ_B 近似相等。最终可以得到两根光纤光栅的中心反射波长的差值与流量的关系:

$$\frac{\Delta\lambda_{B12}}{\lambda_B} = \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_B} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B} = 2(1-P_e) \cdot \varepsilon = 2(1-P_e)kC_D A \frac{\rho V^2}{2} = (1-P_e)kC_D A \rho \frac{Q^2}{S^2}$$

由此得到:

$$\Delta\lambda_{B12} = \lambda_B(1-P_e)K C_D A \rho \frac{Q^2}{S^2} = K_Q Q^2 \quad (2)$$

式中: C_D 为流体阻力系数; k 为材料应变系数, 与材料的杨氏模量、泊松比等参数有关; A 为靶的面积; ρ 为液体密度; V 为流体流速; Q 为流量; S 为管道截面积; K_Q 为传感器的流量系数。上式即为两布拉格光纤光栅的中心反射波长的差值与流量的理论关系, 温度对测量结果的影响在“相差”时被抵消。

利用公式(1), 当两只光栅光栅(FBG1、FBG2)两式相加过程中, 流量引起的两布拉格光纤光栅的中心反射波长向相反的方向漂移相同的值, 因此流量对测量结果的影响在“相和”时被抵消, 从而可得热膨胀效应和热光效应共同引起的光纤光栅波长 $\Delta\lambda_{BT}$ 变化为:

$$\frac{\Delta\lambda_{BT}}{\lambda_B} = \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_B} + \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B} = 2(\alpha + \xi) \cdot \Delta T$$

由此得到:

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B 2(\alpha + \xi) \Delta T = K_T \Delta T \quad (3)$$

式中: K_T 为光纤光栅传感器的温度灵敏度, 当温度变化不大时, 光纤光栅的中心波长变化与温度变化之间有良好的线性关系。

上述推导可以看出: 利用公式(1)分别进行“相和”和“相差”就可以得到公式(2)和(3)。因此整个测试系统中温度和流量测量只需 2 只 FBG 即可。

由于光纤光栅对温度、应变都灵敏, 压力测量同样需要两根距离较近的布拉格光纤光栅 (FBG3 和 FBG4) 粘接在应变金属筒上, 安装位置如图 2 所示。其中 FBG3 粘接在薄壁应变筒的薄壁中间位置, 以实现压力测量, 而另外 FBG4 则粘接在应变筒顶部(应变忽略)实现温度补偿。由于两光纤光栅距离较近, 且金属是温度良导体, 温度的变化导致其中心反射波长向同一方向漂移相同的值, 而 FBG4 只感受温度的变化。并仍然设定 FBG3、FBG4 基础波长 λ_B 近似相等, 同样根据相关推导^[4]可得到如下公式:

$$\frac{\Delta\lambda_{B34}}{\lambda_B} = \frac{\Delta\lambda_{B3}}{\lambda_B} - \frac{\Delta\lambda_{B4}}{\lambda_B} = (1-P_e) \cdot \varepsilon = (1-P_e) \frac{D}{2EH} \left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) P$$

由此得到:

$$\Delta\lambda_{B34} = \lambda_B(1-P_e) \frac{D}{2EH} \left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) P = K_P P \quad (4)$$

式中: D 为薄壁圆筒内径; H 为壁厚; E 为圆筒材料的杨氏模量; μ 为圆筒材料的泊松比; P 为作用于圆筒内壁上的压力; K_P 为传感器的压力灵敏度。

公式(4)表明光纤光栅的中心波长变化与温度变化之间有良好的线性关系。

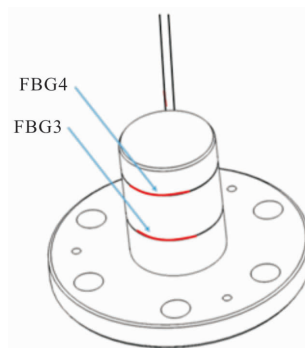


图 2 一体化光纤传感器的压力测量部分结构模型图

Fig.2 Structure model of pressure measurement part of integrated optical fiber sensor

通过将前面的压力、温度、流量等传感器进行一体化集成, 用四根光纤光栅实现的一体化传感器, 且能有效消除交叉敏感的难题, 同时通过公式(2)、(3)显示: 相对单一光纤光栅组成的传感器“相和”和“相差”还可以使温度灵敏度、流量灵敏度得到提升。空心圆柱悬臂梁的靶式流量计的尾部插入到压力的薄壁应变筒里的固定小孔, 并通过环氧树脂胶进行粘接, 同时传感器的靶面需要与流体流动方向相垂直, 并通过法兰把一体化传感器固定在管道法兰上, 最终制作出来的实物图如图 3 所示。



图 3 一体化光纤传感器实物照片

Fig.3 Physical photos of integrated optical fiber sensors

2 标校系统的研制与开发

新型一体化多参量光纤光栅传感器需要借助标校系统对传感器的精度进行标校和检测, 为此笔者研发了标校检测系统。这一系统包括: 流量计、压力

变送器、温度变送器、数字记录仪、高压水泵、变频控制器、自动电磁阀、循环水箱及加热系统等诸多部分。被测传感器的法兰接头被安放在标校系统的平直管部分。标校系统的结构图如图 4 所示。

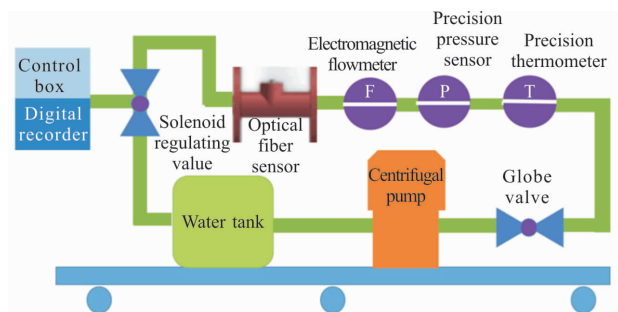


图 4 多参量光纤光栅传感器标校系统

Fig.4 Calibration system of multi-parameter fiber bragg grating sensors

标校系统的压力范围 0~1.8 MPa, 标准压力表的测试精度为 0.5 级; 流量范围 2.5~20 m³/h, 流量计的精度 0.5 级; 温度范围 0~80 °C, 温度计的分辨率为 0.1 °C。压力、温度、流量通过数字记录仪将测试结果同时显示出来。同时借助变频调控系统、电磁调节阀、离心泵、球阀和计算计算机软件系统, 可以使标校系统获得在压力、流量、温度范围内任何一个测试点的实验测试值。

3 实验测试结果与分析

3.1 利用解调仪对一体化光纤传感器进行标校

利用所研发的标校系统实现对一体化光纤传感

器中压力、温度、流量等物理量进行标校。标校采用自行开发的软件, 标定软件使用 LabView 图形化编程软件进行了软件设计, 通过 UDP 通信采集到解调仪的波长与光谱数据, 并对波长数据进行一系列处理, 最终建立了波长与各个物理参数的关系, 实现了物理参数的测量。通过光谱图可以很好地了解到光栅的波形情况。在标定软件中采用了滤波与中值方法使得在标定过程中的波长数据尽可能稳定, 以克服在标定过程中因管道内流体流动引入的振动。利用上述开发的系统软件与多通道光纤解调仪结合, 可以得到一体化光纤传感器中四只光纤光栅波长随温度、流量、压力的变化状况。其中温度、流量、压力的示值由标准表页面, 也就是标校系统中数字记录仪给出; 四只光纤光栅波长值则是由测试表页面, 也就是与自行开发的软件相连的电脑显示系统给出, 如图 5 所示。将两组实验测试结果分别读出, 可得到温度、流量、压力与波长移动量的不同测试曲线。



图 5 电脑所显示的测试表页面

Fig.5 Test table page displayed by computer

表 1 分别给出的是温度、流量、压力与波长移动

表 1 温度、流量、压力与波长移动测试数据

Tab.1 Temperature, flow, pressure and wavelength moving test data

Temperature /°C	Optical fiber 1 /nm	Optical fiber 2 /nm	Flow/m ³ ·h ⁻¹	Optical fiber 1 /nm	Optical fiber 2 /nm	Pressure/MPa	Optical fiber 3 /nm	Optical fiber 4 /nm
16.1	1 554.512	1 557.857	0	1 554.652	1 557.949	0	1 534.946	1 537.526
20.0	1 554.601	1 557.940	2.64	1 554.645	1 557.959	0.101	1 534.947	1 537.538
23.0	1 554.683	1 558.003	3.42	1 554.639	1 557.966	0.212	1 534.947	1 537.550
26.0	1 554.763	1 558.065	4.52	1 554.631	1 557.977	0.335	1 534.948	1 537.564
29.0	1 554.841	1 558.129	5.68	1 554.618	1 557.993	0.440	1 534.948	1 537.575
32.0	1 554.923	1 558.195	6.52	1 554.603	1 558.009	0.540	1 534.948	1 537.586
35.0	1 555.005	1 558.261	7.52	1 554.588	1 558.025	0.630	1 534.948	1 537.596
38.0	1 555.088	1 558.332	8.54	1 554.563	1 558.050	0.748	1 534.949	1 537.609
41.0	1 555.171	1 558.400	9.35	1 554.544	1 558.070	0.831	1 534.950	1 537.619
44.0	1 555.253	1 558.463	10.49	1 554.509	1 558.106	0.965	1 534.951	1 537.636
-	-	-	11.66	1 554.474	1 558.141	1.036	1 534.953	1 537.647
-	-	-	12.46	1 554.449	1 558.169	1.142	1 534.956	1 537.661
-	-	-	13.64	1 554.407	1 558.211	-	-	-
-	-	-	14.48	1 554.385	1 558.242	-	-	-

测试数据,其中压力和流量分别是在 15 °C 和 21 °C 时的测试数据,温度是在 3.48 m³/h 时的测试数据。

依据上述数据,并依据公式(2)~(4)得到校正曲线如图 6~图 8 所示。

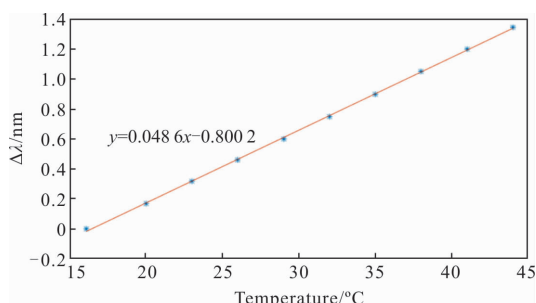


图 6 温度校正曲线

Fig.6 Temperature correction curve

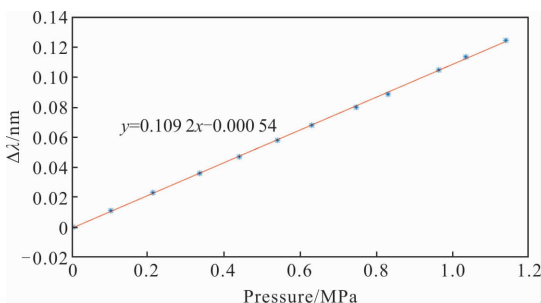


图 7 压力校正曲线

Fig.7 Pressure correction curve

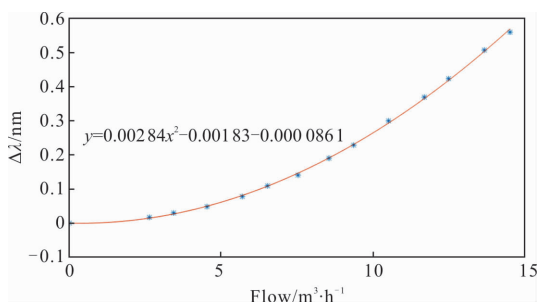


图 8 流量校正曲线

Fig.8 Flow correction curve

上述实验曲线表明:温度、压力与波长移动量的实验曲线具有良好的线性关系,流量与波长移动量则具有很好的二次函数关系。这里最大的疑问就是这种函数曲线是在一定温度下完成的,当温度发生变化时,函数曲线是否能基本保持不变?也就是交叉敏感可否通过两只光纤“相差”、“相和”的方法真正得到解决。为此,首先开展了不同温度下的测试工

作。图 9 给出 17、21、26 °C 不同温度下流量与波长移动量之间的关系;图 10 分别为 15、21、26 °C 不同温度下压力与波长移动量之间的关系。

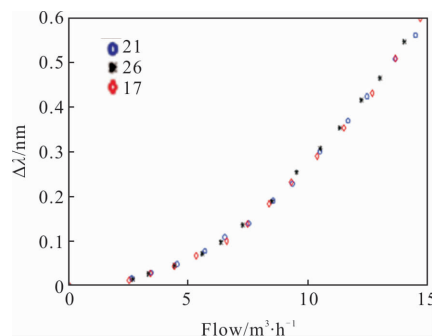


图 9 不同温度下流量校正曲线图

Fig.9 Flow correction curves at different temperatures

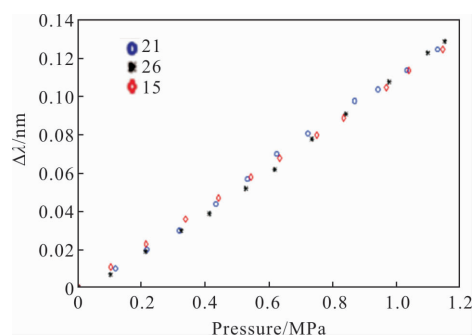


图 10 不同温度下压力校正曲线

Fig.10 Pressure correction curves at different temperatures

在此基础上,由于考虑到流量与温度使用相同的两根光纤,因此在测量温度时同样会出现流量与温度的交叉敏感,为此课题组还开展了不同流量下温度的测试工作。结果显示,在温度变化不超过 10 °C 的情况下,流量、压力实验曲线的线性度及形状基本保持不变,同样在流量变化不大的情况下温度与波长移动量具有较好的一致性。这说明这种情况下利用图 6~图 8 的温度、压力、流量的实验曲线对测量结果进行校正可行的。

3.2 传感器温度、压力、流量的测量与分析

为了有效读取实验测试结果,课题组还利用 LabView 编写了测试软件。在测试软件中添加了基值调整模块以适应不同环境下基值偏差的问题,添加了参数变化记录窗来方便了解一段时间内物理量的变化情况。通过解流量光栅的二次方程的解来获得流量的大小,通过解温度和压力方程的解来获得

压力和温度的大小, 同样考虑了流体流动对波长数据的影响, 在软件中使用了中值和滤波方法。利用标校曲线和测试软件对不同环境下温度、压力、流量进行了测量, 将安装在标校系统上标准表的显示(实际)

结果和利用所研发的光纤传感器测量结果做对比, 得到表 2。其中, 压力关系曲线是在 24 °C, 流量关系曲线是在 22 °C, 温度关系曲线是在 4 m³/h 条件下得到的。

表 2 一体化光纤传感器的温度、压力、流量测量结果

Tab.2 Temperature, pressure and flow measurement of integrated optical fiber sensor

Actual pressure/MPa	Measuring pressure/MPa	Remarks/°C	Actual flow /m ³ ·h ⁻¹	Measuring flow/m ³ ·h ⁻¹	Remarks/°C	Actual temperature/°C	Measuring temperature/°C	Remarks /m ³ ·h ⁻¹
0.102	0.112	24	2.71	2.283	22	15.7	15.63	4
0.225	0.228	-	3.50	3.143	-	18.7	18.62	-
0.323	0.322	-	4.68	4.477	-	21.7	21.60	-
0.439	0.454	-	5.94	5.753	-	24.7	24.60	-
0.556	0.586	-	6.76	6.550	-	27.7	27.62	-
0.646	0.683	-	7.65	7.588	-	30.7	30.60	-
0.741	0.779	-	8.66	8.509	-	33.7	33.62	-
0.844	0.881	-	9.53	9.490	-	36.7	36.69	-
0.934	0.958	-	10.40	10.334	-	39.7	39.82	-
1.051	1.070	-	11.60	11.599	-	42.7	42.75	-
1.148	1.165	-	12.34	12.314	-	45.7	45.73	-
-	-	-	13.10	13.018	-	-	-	-
-	-	-	14.29	14.215	-	-	-	-

根据表 2 的实验数据, 并以测量值为纵坐标, 以实际(标准)结果为横坐标, 得到测量值与实际值关系曲线, 并通过计算和分析后得到: 压力拟合方程 $y=1.020\ 35x+0.007\ 85$, 拟合优度 0.998 9, 流量拟合方程 $y=1.029\ 44x-0.396\ 80$, 拟合优度 0.999 7, 温度拟合方程 $y=1.005\ 63x-0.212\ 12$, 拟合优度 0.999 98。

上述关系曲线显示出良好的线性度。

通过表中测试结果表明: 上述测试结果的拟合优度显示出温度、流量、压力各测量量均具有较高的测量精度。课题组在整个测量过程中发现温度测量结果最优, 而压力、流量在少数测试点误差略大。

4 结 论

(1) 文中所采用的靶式与悬臂梁结构相结合的机敏结构同薄壁压力应变筒结构集成在同一传感器探头上, 并利用 4 只光纤光栅实现了温度、压力和流量三个参数的同时测量, 该光纤传感器具有体积小、质量轻、集成度高、安装便利等特点。

(2) 利用光纤光栅两两之间波长移动量“相差”或“相和”, 使温度与流量、压力交叉敏感问题得以解

决, 方法简便、原理清晰, 但同时也发现这种方法只能在一定环境范围内使用, 具有一定的局限性。当环境温度发生较大变化时, 流量、压力的测试结果会产生较大偏离, 在这种情况下需要采用不同温度分段标校的方法对传感器进行标校, 也可以通过在不同温度时段添加不同的基值的方法对测试结果进行修正, 或者在流量和压力的全程测量中增加温度补偿。

(3) 所开发的多参量一体化光纤传感器分别利用光纤光栅的温度效应及应变特性, 将温度、压力、流量的变化转换成波长的变化, 并借助靶式悬臂梁结构、薄壁压力应变筒结构、解调仪及信号处理软件实现温度、压力、流量等多参数的测量。该光纤光栅传感器的温度灵敏度系数为 $K_T=48.3\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, 压力灵敏系数为 $0.109\ \text{nm}/\text{MPa}$, 而由于流量与波长移动量之间是非线性的, 不是一个常数, 但可以得到该传感器最大流量处灵敏度, 也就是最高灵敏系数为 $0.080\ 4\ \text{nm}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。

(4) 所开发的光纤传感器标校系统, 可以准确实现对所研发的多参量一体化传感器的测试结果进行检验和标校, 系统轻便, 易于操作, 可靠性高。实验结果显示该传感器压力、温度、流量线性优度均达到或

超过 0.999。

参考文献：

- [1] Xu Chunjiao, Yang Yuanhong, Yang Mingwei. Optical fiber temperature sensor using wavelength detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1143–1146. (in Chinese)
徐春娇, 杨远洪, 杨明伟. 利用波长检测的光纤温度传感器[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1143–1146.
- [2] Gao Xiaodan, Peng Jiankun, Lu Dajuan. Fabry-Perot thin film interference optical fiber temperature sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0122002. (in Chinese)
高晓丹, 彭建坤, 吕大娟. 法布里-珀罗薄膜干涉的光纤温度传感器[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0122002.
- [3] Song Haifeng, Gong Huaping, Ni Kai, et al. Optical fiber temperature sensor based on wavelength and intensity double demodulation [J]. *Journal of Optoelectronic Laser*, 2013, 24(9): 1694–1697. (in Chinese)
宋海峰, 龚华平, 倪凯, 等. 基于波长与强度双解调的光纤温度传感器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(9): 1694–1697.
- [4] Zhao Mingfu, Wang Nian, Luo Binbin, et al. Composite fiber Bragg grating sensors for simultaneous measurement of sucrose concentration and temperature [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 476–482. (in Chinese)
赵明富, 王念, 罗彬彬, 等. 可同时测量蔗糖浓度和温度的组合光纤光栅传感器[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 476–482.
- [5] Yang Yang, Zheng Yibo, Yang Yang, et al. The effect of grating-substrate connection on FBG pressure sensor [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018, 33(1): 71–76. (in Chinese)
杨洋, 郑一博, 杨洋, 等. 光栅与基片的连接对光纤光栅压力传感器的影响[J]. 光电技术应用, 2018, 33(1): 71–76.
- [6] Zhao Yan, Zhang Jijun, Zou Hong, et al. Design and analysis of thin-plate flexible fiber Bragg grating earth pressure sensor [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(1): 145–149. (in Chinese)
赵艳, 张继军, 邹虹, 等. 薄板挠曲型光纤 Bragg 光栅土压力传感器设计与分析[J]. 应用光学, 2015, 36(1): 145–149.
- [7] Sun Qizhen, Wang Jingyi, Zhang Wei et al. Longitudinal microstructure optical fiber distributed pressure sensing system with polymer packaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0802003. (in Chinese)
孙琪真, 汪静逸, 张威, 等. 聚合物封装的纵向微结构光纤分布式压力传感系统 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0802003.
- [8] Shang Ying, Liu Xiaohui, Wang Chang, et al. Fiber optic flow non-immersion measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2001–2006. (in Chinese)
尚盈, 刘小会, 王昌, 等. 光纤流量非浸入式测试系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2001–2006.
- [9] Liu Xiaohui, Liu Suxiang, Shang Ying, et al. Optical fiber flow monitoring system based on frequency characteristics of tube wall vibration [J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(2): 103–106. (in Chinese)
刘小会, 刘素香, 尚盈, 等. 基于管壁振动频率特性的光纤流量监测系统[J]. 光学仪器, 2015, 37(2): 103–106.
- [10] Liu Jun, Li Yuze. Progress of fiber bragg grating flow sensors [J]. *Automation Technology and Applications*, 2016, 35(11): 98–101. (in Chinese)
刘均, 李雨泽. 光纤光栅流量传感器的进展 [J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(11): 98–101.
- [11] Jiang Shanchao, Sui Qingmei, Wang Jing, et al. Fiber Bragg grating turbine flow velocity sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2611–2616. (in Chinese)
蒋善超, 隋青美, 王静, 等. 流速/温度共采的光纤布拉格光栅涡轮流速传感器 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2611–2616.
- [12] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber temperature and pressure sensor [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 629–635. (in Chinese)
徐宁, 戴明. 分布式光纤温度压力传感器设计 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 629–635.
- [13] Zhao Y, Gu Y F, Lv R Q, et al. A Small Probe-Type flowmeter based on the differential fiber bragg grating measurement method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2017, 66(3): 502–507.
- [14] Gu Y F, Zhao Y, Lv R Q, et al. A practical FBG sensor based on a thin-walled cylinder for hydraulic pressure measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2569–2572.