

基于光纤光栅的一体式靶式流量传感技术

张正义

引用本文: 张正义. 基于光纤光栅的一体式靶式流量传感技术[J]. 发光学报, 2020, 41(2): 217-223. ZHANG Zheng-yi. One-piece Flow Target Type Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(2): 217-223.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/fgxb20204102.0217

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

级联光栅结合Sagnac环的可调谐光纤激光器

Tunable Fiber Laser Based on Cascaded Grating Combing with Sagnac Loop 发光学报. 2019, 40(3): 357-365 https://doi.org/10.3788/fgxb20194003.0357

一种新型高灵敏度光学微环湿度传感器

A Novel High Sensitivity Optical Microresonator Humidity Sensor 发光学报. 2014, 35(8): 1009–1013 https://doi.org/10.3788/fgxb20143508.1009

单端面长周期光栅透射模式测量技术

Transmission Mode Measurement Technique of Long Period Grating Based on A Single End Face 发光学报. 2017, 38(8): 1090–1096 https://doi.org/10.3788/fgxb20173808.1090

ICF微靶装配体图像清晰度评价方法

Image Definition Evaluation Method of ICF Micro-target Assembly 发光学报. 2014(12): 1506-1510 https://doi.org/10.3788/fgxb20143512.1506

多孔芯光子晶体光纤及其偏振特性

Polarization Properties of Multi-hole Core Photonic Crystal Fiber 发光学报. 2018, 39(5): 706-712 https://doi.org/10.3788/fgxb20183905.0706 文章编号:1000-7032(2020)02-0217-07

基于光纤光栅的一体式靶式流量传感技术

张正义*

(高新技术研究所教研室,山东青州 262500)

摘要:针对以往液压系统检测中存在的特点,如结构杂、体积大、精度低,设计了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的一体式靶式流量传感器。分析了FBG 及靶式流量传感原理,设计出一种组成紧凑、便于密封以及拆装的一体式靶片,将放在流体里的靶片受到的与流速成相关变化的冲击力变为FBG 波长的漂移,双FBG 对称分布,分别放在悬臂梁两表面中轴线处,这种差动形式可以很好地增加灵敏度,并且可以解决应变和温度的交叉敏感现象。通过 FLUENT 分析了流体形式,结果显示这种结构给流体造成的影响比一般结构小。实验测试过程中,双FBG 中心波长总变化数值和放置于靶片的质量呈现出明显的线性变化,并且灵敏度为一个FBG 灵敏度的双倍,可靠性以及稳定性较好。

关 键 词:等强度悬臂梁;光纤 Bragg 光栅;流量传感;靶式结构
 中图分类号: TP212; TN25
 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20204102.0217

One-piece Flow Target Type Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology

ZHANG Zheng-yi*

(Teaching and Research Section, High-tech Institute, Qingzhou 262500, China) * Corresponding Author, E-mail: 850949935@qq.com

Abstract: Aiming at the problems existing in traditional hydraulic system detection, such as low measuring accuracy, large size and complex structure, a kind of integrated target flow sensor based on fiber Bragg grating (FBG) was designed. This paper analyzed the principle of FBG and target type flow sensing, and designed an integrated target with a compact composition, which was easy to seal and disassemble. Double FBG symmetrical distribution was respectively placed on the central axis of the two surfaces of the cantilever beam. This differential form can increase the sensitivity well and solve the cross-sensitivity phenomenon of strain and temperature. Through the simulation analysis of fluid state by FLUENT software, it is concluded that the integrated target structure has less influence on fluid state than the traditional structure. In the hydraulic experiment, there is a good linear relationship between the change amount of the center wavelength of double FBG and the mass loaded on the target, and the sensitivity is twice as high as that of a single FBG, with good stability and reliability.

Key words: equal intensity cantilever beam; fiber Bragg grating; flow sensor; target type structure

基金项目: 国家自然科学基金(50408031,60736039)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (50408031,60736039)

收稿日期: 2019-07-05;修订日期: 2019-07-23

引 言 1

工业生产中常涉及流量检测,机械转子流量 传感器[1]的使用较频繁,可是其精度不高;声学 原理流量计^[2]、电磁原理流量计^[3]和多普勒流速 仪[4],精度很高,可是价格昂贵,还可能被电磁场 影响。最近 20 年以来, 光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg grating, FBG)流量传感技术迅速发展^[5-6]. 其原理是通过 Bragg 中心波长对于其他量的敏 感,利用特定构造达到测量多个物理量的目 的^[7-8]。和以往电学传感器比较,其具有灵敏度 高、质量轻、体型小、抗干扰、能够达到精准检测以 及安全可靠的优点^[9-10]。

近年来,禹大宽^[11]、王正方^[12]、Wang^[13]等把 FBG 和以往靶式流量传感结合起来,设计了圆靶 片以及悬臂梁,但其结构仍较为复杂,未能使光纤 光栅传感的优势充分发挥出来。据此,本文设计 了一种集阻流靶片和敏感元件于一体的等强度悬 臂梁结构,测试了该传感器的可靠性、可行性和灵 敏度。

2 基本原理

2.1 FBG 传感基本原理

依据耦合模原理,只有符合下列公式的光波 才被反射:

 $\lambda_{\rm B} = 2n_{\rm eff}\Lambda$, (1)其中, λ_{p} 表示中心波长, Λ 表示周期, n_{eff} 表示有效 折射率。则λ_B由于应变以及温度变化而造成的 偏移为[14]:

 $\Delta \lambda_{\rm B} = (\alpha + \zeta) \lambda_{\rm B} \Delta T + (1 - P_{\rm e}) \lambda_{\rm B} \varepsilon =$

$$K_T \Delta T + K_{\varepsilon} \varepsilon, \qquad (2)$$

其中, α , ζ 分别是热膨胀系数及热光系数, P_{α} 是有 效弹光系数, ε 是轴向应变, K_{τ} 、 K_{ε} 为灵敏度 系数。

2.2 FBG 靶式流量器传感原理

设计结构如图1所示,在轴线放置圆靶片,直 接连接等强度悬臂梁,将流量冲力变成悬臂梁的 变化。

令密度为 ρ ,靶片面积为 A_1 ,阻力系数为 ζ ,靶 前流体速度为 v_0 ,压力为 p_0 ,经靶片以及环隙的 速度为v,压力为p。通过伯努利方程可知^[15]:

$$A_1(p_0 - p) + A_1\left(\frac{pv_0^2}{2} - \frac{pv^2}{2}\right) = \frac{1}{2}\rho\zeta v^2 A_1, \quad (3)$$





Target type flow sensing principle diagram Fig. 1

 $A_1(p_0 - p)$ 表示靶片静压力,用 F_1 表示; $A_1(\rho v_0^2/2 - \rho v_0^2/2)$ $\rho v^2/2$)表示动压力,用 F₂表示;合力F = F₁ + F₂。 那么速度和冲击作用力的方程为:

$$F = \frac{1}{2}\rho\zeta v^2 A_1, \qquad (4)$$

流体流动形成的力使两个 FBG 发生相同形变,考 虑温度,则^[16]:

$$\Delta \lambda_{\rm B1} / \lambda_{\rm B} = (1 - P_{\rm e})\varepsilon + (\xi + \alpha)\Delta T, \quad (5)$$

 $\Delta \lambda_{\rm B2} / \lambda_{\rm B} = -(1 - P_{\rm e})\varepsilon + (\xi + \alpha)\Delta T, \ (6)$ 波长变化总量与轴向应变的关系为:

 $\Delta \lambda = \Delta \lambda_{\rm B1} - \Delta \lambda_{\rm B2} = 2\varepsilon (1 - P_{\varepsilon}) \lambda_{\rm B}, \quad (7)$ 公式(7)表示双 FBG 差动构造避免了温度应变交 叉敏感现象。根据材料力学原理^[6]:

$$\varepsilon = \frac{6FL}{Ebh^2},\tag{8}$$

其中, ε 是梁表面应变,b、h 是梁底宽度以及厚 度,E是杨氏模量,L为固定端长度,F为梁自由 端受力。结合公式(7)、(8),可得 $\Delta\lambda$ 与 F 的关 系为:

$$\Delta \lambda = \frac{12FL}{Ebh^2} (1 - P_e) \lambda_B, \qquad (9)$$

设液体不能压缩,令A,为内径D以及靶径d的环 隙面积,通过公式(4)、(8)、(9)能够计算出经A, 的流量为.

$$Q = A_2 v = (D^2 - d^2) \sqrt{\frac{\pi b h^2 E}{24(1 - P_{\varepsilon}) L\zeta \rho d^2}} \cdot \sqrt{\Delta \lambda} = K \cdot \sqrt{\Delta \lambda}, \qquad (10)$$

(10)

测得波长变化,就能检测流体参量。

结构设计 3

3.1 一体式靶式流量传感器的结构设计

如图2所示,传感器主要由阀体、凸台、端盖、一 体式靶片四部分组成,阀体与凸台、端盖与凸台之间 利用 O 型密封圈进行面密封,一对中心波长相等的 FBG 形成差动构造,贴在梁对称两边的轴线处。流 体冲击使悬臂和 FBG 应变,达到流量测量目的。





3.2 一体式靶片的结构设计

靶式流量传感器灵敏度的高低、性能的好坏, 关键取决于一体式靶片的结构设计是否得当,其 设计原则如下:

(1)管径比的选用要适中,要兼顾灵敏度和 压力损失;

(2)等强度悬臂梁的尺寸要考虑到传感器的 测量范围,并在量程范围内满足精度要求。

在管道直径一定时,随着靶片直径的增加,压 差逐渐增大,即流体通过一体式靶式传感器的压 力损失增大。这里结合实际应用,选用阀体管径 D=16 mm,选用靶片直径为10 mm。流量传感器 量程的设计范围为0~2 L/s,则得出流体流经管 道与靶片之间空隙的流速范围为0~16.3 m/s, 则可以计算出流体对一体式靶片冲击力的范围, 一体式靶片在设计过程中要在满足强度要求的前 提下,尽可能提高测量精度。设计的一体式靶片



Physical photos.

如图 3 所示,图 3(a)为加工图纸,图 3(b)为实物 照片。材质为 304#不锈钢,厚度为 1 mm,等强度 悬臂梁长 *l* = 40 mm,底部宽度 *b* = 5 mm,圆形靶 片直径*d* = 10 mm,靶心与悬臂梁顶点重合。靶片 上方长方形区域长 18 mm、宽 5 mm,在安装过程 中,其卡在凸台的细槽中,以实现一体式靶片的紧 固,并保证靶片平面与流向垂直。

4 FLUENT 仿真分析

选用 FLUENT 软件进行流体分析,通过仿真 实验,观察流体状态,并与传统靶式流量传感器的 流体状态进行对比研究,以确定一体式靶片结构 的设计是否可行。

在 GAMBIT 软件中建立三维几何模型,流量 传感器阀体部分设计为一个三通模型,管径皆为 16 mm,水平管道长 150 mm,垂直管道长 40 mm, 油液在水平管道中沿 X 轴正方向流动。方案一 为一体式靶式结构,方案二是传统靶式结构,除去 靶片结构不同外,两个方案中的其他条件皆一致。 网格划分采用 Tet/Hybrid(以四面体网格形式为 主,在适当位置上包括六面体、锥形和楔形网格) 和 Tgrid(将体划分为四面体网格单元,在适当的 位置可以包含锥体、六面体和楔形单元)类型,网 格大小设置为 0.5。靶片周围采用网格加密处 理,管壁划分边界网格。网格划分之后的模型图 如图 4 所示,图4(a)、(b)分别为一体式靶式结构



- 图 4 一体式靶式流量传感器结构模型图。(a)一体式靶 式结构;(b)传统靶式结构。
- Fig. 4 One-piece target type flow sensor structure model diagram. (a)One-piece target type. (b)Traditional target type.

和传统靶式结构的模型。

模型建立之后,从 GAMBIT 中将划分好的网格文件导出,打开 FLUENT 软件,选用三维单精度 解算体,导入网格文件,并检查网格划分情况。根 据实际情况对求解器的参数进行设定,求解器选 用分离式求解器和隐式求解器,黏性模型选用 *k*epsilion 模型,流体设置为油,边界条件设置入口 流速为 10 m/s,其他条件默认 FLUENT 的初始 设定。

在解算初始化(Solution initialization)中 Compute from 选择 inlet。设置收敛精度 k 和 epsilon 都为 0.001,然后开始求解,待求解完毕,设置 3 个截面 XOZ(主视图), XOY(俯视图), YOZ(左视图)。

图 5 显示了两种方案的动压力云图的俯视图 (平面 XOY)。得到两种方案流速等值线的主视 图(平面 XOZ),如图 6 所示。得到流线图的俯视 图(平面 XOY),如图 7 所示。

通过以上仿真结果可以看出,一体式靶式流 量传感器对流体状态的影响比传统靶式小,流体 通过靶片后,能够在较短的距离内恢复平稳状态。 由此可以看出,一体式靶式流量传感器的结构设 计是合理可行的。



- 图 5 动压力云图。(a)方案一:一体式靶式结构;(b)方 案二:传统靶式结构。
- Fig. 5 Dynamic stress nephogram. (a)Option 1:integrated target structure. (b)Option 2:traditional target structure.



- 图 6 流速等值线。(a)方案一:一体式靶式结构;(b)方 案二:传统靶式结构。
- Fig. 6 Velocity isoline. (a) Option 1: integrated target structure. (b) Option 2: traditional target structure.



- 图 7 流线图。(a)方案一:一体式靶式结构;(b)方案 二:传统靶式结构。
- Fig. 7 Motoin pattern. (a) Option 1:integrated target structure. (b) Option 2:traditional target structure.

5 FBG 流量传感实验

为了再一次检测光纤光栅一体式靶式流量传 感器的使用性能,设计了液压回路,如图 8 所示, 涡轮流量计只能单向通过,安装使用时油液流向 要正确。



图 8 流量测试系统油路图 Fig. 8 Flow test system circuit diagram



图 9 靶式流量传感器实物图 Fig. 9 Good one-piece flow sensor target type

图 9 为一体式靶式流量传感器, $\lambda_{\rm B}$ = 1 550 nm, 利用熔接机实现连接,光纤在夹板以及压力膜片中 伸出,通过熔接机连接 FC 插头。图 10 为实验照片, 光纤光栅解调设备可解调出中心波长。





实验中记录不同流量时中心波长的数值,如 表1所示。

通过最小二乘法分析,得到图11。

根据公式(10)可知 $\Delta \lambda$ 与 Q^2 成正比,对图 11 中曲线进行拟合,得到拟合曲线方程如下:

$$\begin{cases} \lambda_{\rm B1} = 1550.\ 087 + 0.\ 213\ Q^2 \\ \lambda_{\rm B2} = 1549.\ 938 + 0.\ 216\ Q^2 \,, \qquad (11) \\ \Delta\lambda_{\rm B} = 0.\ 1419 + 0.\ 423\ Q^2 \end{cases}$$

拟合曲线显示, $\Delta\lambda$ 与 Q^2 成正比, 双 FBG 中心波 长偏移总量为单个 FBG 偏移量的两倍, 与此同 时, 差动特殊结构将灵敏度提高到两倍。根据二 次项系数 0.423、解调分辨率 1 pm, 得出传感器分 辨率是 0.049 L/s。

Tab. 1 Flow Sensing experiment					
$Flow/(L \cdot s^{-1})$	$\lambda_{_{ m FBG1}}/ m nm$	$\Delta\lambda_{_{ m B1}}$	$\lambda_{_{ m FBG2}}/ m nm$	$\Delta\lambda_{_{ m B2}}$	$\Delta\lambda_{ m B}$
0	1 550.083	0.083	1 549.944	0.056	0.139
0.2	1 550.163	0.163	1 549.862	0.138	0.301
0.4	1 550.227	0.227	1 549.796	0.204	0.431
0.6	1 550.355	0.355	1 549.672	0.328	0.683
0.8	1 550.474	0.474	1 549.551	0.449	0.923
1	1 550.58	0.58	1 549.447	0.553	1.133
1.2	1 550.761	0.761	1 549.266	0.734	1.495
1.4	1 550.923	0.923	1 549.101	0.899	1.822
1.6	1 551.105	1.105	1 548.922	1.078	2.183
1.8	1 551.332	1.332	1 548.688	1.312	2.644
2	1 551.507	1.507	1 548.52	1.48	2.987
2.2	1 551.792	1.792	1 548.227	1.773	3.565

表1 流量传感实验 Tab 1 Flow sensing experiment



6 结 论

本文根据光纤光栅靶式流量计传感理论,构 建阻流靶片敏感元件一体化结构,简化传导装置, 将等强度悬臂梁当作承力机构,沿中心轴放置两 个中心波长一致的 FBG,用以感知应变量。通过 FLUENT 软件进行模拟,分析出一体式靶片结构 对流体状态影响比传统结构更小;流量实验验证 了该传感器设计方案的可行性、稳定性,很大程度 上增强了传感灵敏度,并且传感器可进行反复测 量。该 FBG 靶式流量传感器构造精巧、容易封 装,特别是可以实现强电磁、易燃爆、远程以及分 布检测,因而应用前景较好。

参考文献:

- [1] FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO C, MATÍAS I R, ARREGUI F J. Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material [J]. Sens. Actuators A: Phys., 2002, 101(1-2):107-116.
- [2] 杨秀峰,张春雨,童峥嵘,等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究 [J]. 中国激光, 2011,38(4):0405005-1-4.

YANG X F,ZHANG C Y,TONG Z R, *et al.*. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2011,38(4):0405005-1-4. (in Chinese)

- [3] 蒋奇,高芳芳. 一种新型光纤 Bragg 光栅流量传感器的仿真与实验研究 [J]. 光子学报, 2014,43(2):0228001-1-7. JIANG Q,GAO F F. Simulation and experimental research of a novel flow sensor based on fiber Bragg grating [J]. Acta Photon. Sinica, 2014,43(2):0228001-1-7. (in Chinese)
- [4] 李洪才, 刘春桐, 冯永保, 等. 一种内嵌喷嘴差压式 FBG 流量传感器 [J]. 光电子 ·激光, 2014, 25 (10): 1886-1891.

LI H C, LIU C T, FENG Y B, et al. An embedded nozzle differential pressure style flow sensor based on FBG [J]. J. Optoelectron. Laser, 2014,25(10):1886-1891. (in Chinese)

- [5] PACHAVA V R, KAMINENI S, MADHUVARASU S S, et al. Fiber Bragg grating-based hydraulic pressure sensor with enhanced resolution [J]. Opt. Eng., 2015,54(9):096104.
- [6] LEEUNGCULSATIEN T, LUCAS G P. Measurement of velocity profiles in multiphase flow using a multi-electrode electromagnetic flow meter [J]. Flow Meas. Instrum., 2013,31:86-95.
- [7]赵兵.光纤光栅传感技术研究及其在装备检测中的应用 [D].西安:第二炮兵工程学院, 2009.
 ZHAO B. Reasurch on FBG Sensing Technology and Its Application in Equipments Test [D]. Xi'an: Second Artillary Engineering College, 2009. (in Chinese)
- [8] JIANG M S, SUI Q M, JIA L, et al. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system
 [J]. Optoelectron. Lett., 2012,8(3):220-223.
- [9] ROBERTSON D, NIEWCZAS P, MCDONALD J R. Interrogation of a dual-fiber-Bragg-grating sensor using an arrayed waveguide grating [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2007,56(6):2641-2645.

- [10] CHEN Z, YUAN L, HEFFERMAN G, et al. Terahertz fiber Bragg grating for distributed sensing [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015,27(10):1084-1087.
- [11] 禹大宽, 贾振安, 乔学光, 等. 基于靶式和悬臂梁的 FBG 流量/温度同时测量研究 [J]. 光电子・激光, 2010, 21(5):710-713.

YU D K, JIA Z A, QIAO X G, *et al.*. FBG sensors combining target with cantilever beam for simultaneous measurement of flow-rate/temperature [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2010,21(5):710-713. (in Chinese)

- [12] 王正方,王静,隋青美,等. 靶式光纤 Bragg 光栅流速传感器的研制 [J]. 光电子・激光, 2012,23(1):1-8.
 WANG Z F, WANG J, SUI Q M, et al. A target-type fiber Bragg grating flow velocity sensor [J]. J. Optoelectron. Laser, 2012,23(1):1-8. (in Chinese)
- [13] WANG D S, WANG Y T, PAN W W. A circular target flow measurement system [J]. Appl. Mech. Mater., 2013,427-429:1233-1236.
- [14] 王玉宝,兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究 [J]. 光学学报, 2010,30(8):2196-2201.
 WANG Y B, LAN H J. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing [J]. Acta Opt. Sinica, 2010,30(8):2196-2201. (in Chinese)
- [15] MAJUMDER M, GANGOPADHYAY T K, CHAKRABORTY A K, et al. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—present status and applications [J]. Sens. Actuators A: Phys., 2008,147(1):150-164.
- [16] 何小燕. 多芯光纤光栅的特性及其在光纤传感方面应用的研究 [D]. 厦门:厦门大学, 2014.
 HE X Y. Study on The Characteristic of MC-FBG and Applications in Optical Fiber Sensors [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014. (in Chinese)



张正义(1993 -),男,安徽宿州人, 硕士,助教,2017 年于火箭军工程 大学获得硕士学位,主要从事光电 技术、光纤光栅传感技术及应用的 研究。 E-mail: 850949935@qq.com