

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205580

基于 FBG 改进泄压阀的旋叶式压缩机 排气压力感知研究*

孙世政¹ 雷远俊¹ 何泽银¹ 陶平安² 胡立志² 曹昱坤²

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074; 2. 重庆建设汽车系统股份有限公司重庆市
汽车热管理系统工程技术研究中心 重庆 400052)

摘 要:针对旋叶式压缩机排气压力精准监测难问题,提出了基于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)改进泄压阀的旋叶式压缩机排气压力感知方法。首先,依据旋叶式压缩机泄压阀结构特点,结合 FBG 传感理论,建立了膜片式压力传感器模型,揭示了压力与中心波长的映射关系;其次,设计了基于泄压阀的三段式 FBG 压力温度复合传感器,理论分析表明该传感器灵敏度为 304.26 pm/MPa;最后通过仿真实验分析,研究了膜片半径、厚度对传感器灵敏度的影响,得到了最优半径与厚度组合($R=5\text{ mm}$, $h=0.6\text{ mm}$),实验灵敏度为 330.78 pm/MPa,研究对旋叶式压缩机状态监测及功耗控制具有重要的理论和实际工程价值。

关键词: 光纤布拉格光栅;压缩机检测;压力传感器;旋叶式压缩机

中图分类号: TN253;TH45 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on exhaust pressure sensing of rotary vane compressor based on FBG improved pressure relief valve

Sun Shizheng¹ Lei Yuanjun¹ He Zeyin¹ Tao Ping'an² Hu Lizhi² Cao Yukun²

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Construction Automotive Systems Co., Ltd., Chongqing 400052, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of accurate monitoring of the discharge pressure of rotary vane compressor, a method of sensing the discharge pressure of rotary vane compressor based on fiber Bragg grating (FBG) improved relief valve was proposed. Firstly, according to the structural characteristics of the pressure relief valve of the rotary vane compressor and the FBG sensing theory, the model of the diaphragm pressure sensor was established, and the mapping relationship between the pressure and the central wavelength was revealed. Secondly, a three-stage FBG pressure temperature composite sensor based on pressure relief valve was designed. Theoretical analysis shows that the sensitivity of the sensor is 304.26 pm/MPa. Finally, through simulation experiment analysis, the influence of diaphragm radius and thickness on sensor sensitivity was studied, and the optimal combination of radius and thickness ($R=5\text{ mm}$, $h=0.6\text{ mm}$) was obtained. The experimental sensitivity is 330.78 pm/MPa. The research has important theoretical and practical engineering value for rotary vane compressor condition monitoring and power consumption control.

Keywords: fiber Bragg gratings; compressor detection; pressure sensors; rotary vane compressors

0 引 言

旋叶式压缩机因其尺寸小、结构紧凑被广泛应用于汽车工业,通过安装在汽车发动机旁完成整车制冷工作,

但现有旋叶式压缩机因其工作特点普遍存在排气波动问题,严重影响了压缩机生产安全性和功耗控制^[1]。因此对旋叶式压缩机排气压力进行实时精准监测并研究其排气波动影响因素,对实现压缩机行业功耗精细化控制具有重要意义。

收稿日期: 2022-06-13 Received Date: 2022-06-13

* 基金项目: 国家自然科学基金(52105542)、“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020032)、重庆市九龙坡区科技计划(2020-02-001-Z)项目资助

目前针对旋叶式压缩机状态监测大多采用电类传感器^[2-5],用于检测排气压力的电类传感器通过安装在排气管路上实现测量,这不仅远离了监测点,影响检测准确性,还破坏了管路结构,并且旋叶式压缩机工作环境存在强电磁干扰、机械振动、压力脉冲等外部激励,限制了电类传感器在旋叶式压缩机上的应用,也限制了压缩机行业功耗精细化控制技术的发展。而泄压阀作为旋叶式压缩机系统的安全装置,安装在每台压缩机壳体上,直接与内部高压气体接触,对泄压阀结构进行重新设计,使其具有压力检测功能,可避免破坏管路结构和实现排气压力原位测量。以光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)为传感元件研制的各类传感器具有本质安全、体积小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高、可靠性高等特点^[6-9],此类传感器可满足旋叶式压缩机测试环境要求。基于此,本文开展基于 FBG 改进泄压阀的旋叶式压缩机排气压力感知研究。

何为等^[10]利用准直器无线耦合实现了 FBG 传感系统对压缩机轴瓦温度的检测,这种方法可以解决光纤缠绕问题,但是对准直器的角度偏差十分敏感,安装精度要求很高。薛兆康等^[11]通过自主设计编织碳纤维管作为弹性体,实现了 FBG 传感器在 0~150 ℃ 和 0~80 MPa 环境下稳定工作,灵敏度最大可达 -50.02 pm/MPa。Rosolem 等^[12]将 FBG 用于内燃机的压力检测,研究了动态温度对压力测量的影响,并对单端和双端两种不同的封装方式进行了比较,但由于管路过长,远离测量点,影响测量精度。Her 等^[13]设计了一种集成环氧膜片的 FBG 压力传感器,实现了对水压力和水位的测量,但环氧膜片易老化也不适用于具有腐蚀性环境。Hegde 等^[14]设计了一种用于高压测量的温度补偿膜片型 FBG 传感器,在 0~70 MPa 范围内,压力灵敏度为 36.4 pm/MPa。Vorathin 等^[15]通过把一根 FBG 粘在橡胶和铝板上实现了压力和温度同时测量,在恒温变压下,压力灵敏度为 0.1007 nm/kPa,但橡胶膜片相对容易老化。洪成雨等^[16]将增材制造技术用于 FBG 压力传感器,通过改变封装材料的密度、尺寸等来改变传感器性能,证实了增材制造与 FBG 传感技术的可行性。Fan 等^[17]设计了一种高灵敏度的 FBG 方形膜片压力传感器,在 0~200 kPa 范围内,灵敏度可达 3.402 pm/kPa,可适用于低压气体或液体测量。Zhao 等^[18]提出了一种膜片-悬臂梁结构的 FBG 压力传感器,在 0~2 MPa 范围内,灵敏度可达 258.28 pm/MPa。Ren 等^[19]设计了一种用于测量三维土压力的 FBG 传感器,能够有效抵抗振动干扰,以及在土壤中的长期腐蚀和耐磨性,在 0~3 MPa 内,压力灵敏度最低可达 318.46154 pm/MPa。以上研究表明,以 FBG 为传感元件,合理设计传感结构能够较好的实现压力测量,但以上 FBG 压力传感器均不适用于旋叶式压缩机排

气压力感知,因此,本文开展基于 FBG 改进泄压阀的旋叶式压缩机排气压力感知研究具有一定的研究意义。

本文基于 FBG 传感原理,以实现旋叶式压缩机排气压力精准检测为目的,根据旋叶式压缩机结构特点,将 FBG 传感结构与压缩机泄压阀结合,设计了一种基于 FBG 改进泄压阀的旋叶式压缩机排气压力传感器,实现了在不影响压缩机正常工作的情况下对旋叶式压缩机排气压力的检测。该传感器可以实现对旋叶式压缩机排气压力的分布式长期在线监测,对实现全行业功耗精细化控制具有重要意义。

1 感知原理及传感器结构

1.1 FBG 传感原理

FBG 传感原理如图 1 所示。根据耦合模理论,宽带光源发出的光经过栅区时会发生透射和反射,只有波长满足布拉格条件的光波才会发生反射,FBG 的布拉格条件为^[20]:

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

式中: λ_B 为 FBG 的中心波长, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。

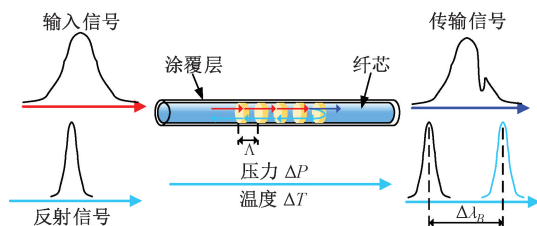


图 1 FBG 传感原理

Fig. 1 FBG sensing principle

FBG 对应变和温度都敏感,波长变化对应变变化 $\Delta\varepsilon$ 和温度变化 ΔT 的响应:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + [\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)]\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为 FBG 波长变化量, P_e 为弹光系数, α 为光纤热膨胀系数, ξ 为光纤热光系数, α_s 为基底材料热膨胀系数。

两根 FBG 粘贴位置如图 2(c) 所示,两根 FBG 中心波长相等。由 FBG1 受应变和温度同时作用,FBG2 仅受温度作用可得:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + [\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)]\Delta T \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B} = [\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)]\Delta T \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda_{B1}$ 、 $\Delta\lambda_{B2}$ 分别为 FBG1 与 FBG2 的波长漂移量。

将式(4)改写为:

$$\Delta\lambda_{B2} = k_T \Delta T \quad (5)$$

式中: $k_T = \lambda_B [\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha)]$ 为温度灵敏度,对于任意给定的材料都是常数,由式(5)可知,温度与 FBG2 中心波长漂移量呈线性关系,通过测量 FBG2 波长漂移量可实现温度测量。

式(3)减去式(4)可得:

$$\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = \lambda_B (1 - P_e) \Delta \varepsilon \quad (6)$$

由式(6)可知,应变与 FBG 中心波长漂移量呈线性关系,通过测量波长漂移量可实现应变测量。

1.2 传感器结构及力学分析

针对裸 FBG 压力灵敏度低问题,设计了膜片式传感结构进行压力灵敏,基于 FBG 改进泄压阀的压力传感器结构示意如图 2 所示,该传感器为三段式,第 1 段可实现原有泄压阀功能,防止压缩机过压;第 2 段为传感器敏感元件,实现压力检测功能;第 3 段可保护光栅和防止膜片意外破裂时压力外泄。传感器通过螺纹安装在压缩机壳体上,高压气体通过主流道进入传感器,在第 1 段泄压部分分流,一部分流向次流道,当压力过大时完成泄压功能,另一部分向右(针对图示方向)作用于敏感元件,如敏感元件意外破裂,第 3 段保护装置可以防止高压气体外泄。本文主要对第 2 段中的膜片进行设计,需要确定膜片的半径和厚度参数。

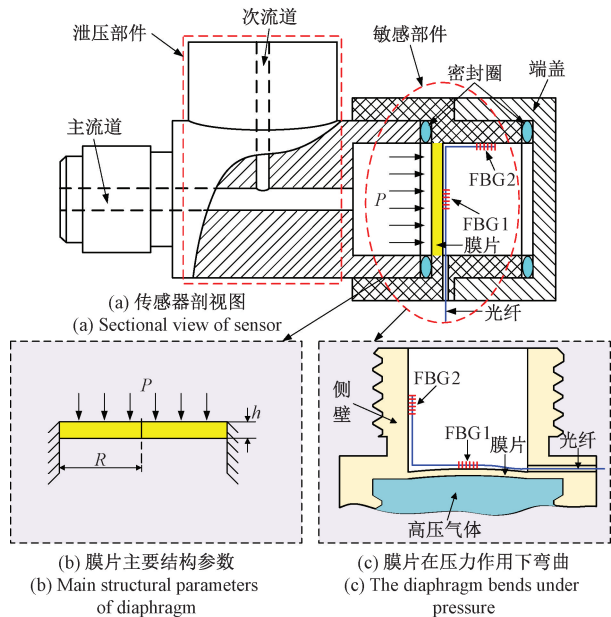


图 2 传感器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sensor structure

传感器的敏感元件为圆形膜片,当被测气体作用于圆形膜片,膜片向内弯曲产生应变,粘贴在膜片上的

FBG1 通过感应应变实现压力测量,如图 2(c) 所示。根据小变形理论,膜片表面的径向应变和切向应变分别为^[14]:

$$\varepsilon_r = \frac{3(1 - \mu^2)(R^2 - 3r^2)}{8Eh^2} P \quad (7)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3(1 - \mu^2)(R^2 - r^2)}{8Eh^2} P \quad (8)$$

式中: P 为被测压力, E 为杨氏模量, μ 为泊松比, h 为膜片厚度, R 为膜片半径, r 为被测点到膜片中心的距离。

由式(7)和(8)可得膜片中心的总应变为:

$$\varepsilon = \frac{3\sqrt{2}(1 - \mu^2)R^2}{8Eh^2} P \quad (9)$$

将式(9)代入式(6),可得两个波长漂移的差值和被测压力之间的关系:

$$\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = \lambda_B (1 - P_e) \times \frac{3\sqrt{2}(1 - \mu^2)R^2}{8Eh^2} \Delta P \quad (10)$$

将式(10)改写为:

$$\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = k_P \Delta P \quad (11)$$

式中: $k_P = [3 \cdot 2^{1/2} \lambda_B (1 - P_e) (1 - \mu^2) R^2] / (8Eh^2)$ 为压力灵敏度,对于任意给定的 r 值都是常数。

由式(11)可知,压力与 FBG 中心波长漂移量呈线性关系,通过测量波长漂移量可实现压力测量,并可有效避免 FBG 应变温度交叉敏感。

2 实验研究

2.1 传感器结构参数仿真分析

由式(11)可知,圆形膜片直径和厚度会影响传感器灵敏度,为确定膜片直径和厚度参数,本文利用 Ansys Workbench 对膜片结构进行仿真实验,以得到最优的膜片结构尺寸。实际应用中旋叶式压缩机泄压阀最大压力为 2.8 MPa,考虑到压力波动,仿真过程中施加 3 MPa 的均布压力。在测量过程中,圆形膜片会受到周期性载荷,这要求膜片材料有良好的疲劳极限、耐磨性、强度等,铍青铜除上述优点外还具有低滞后性,被广泛用于弹性元件,因此本文选取铍青铜(QBe2.0)作为膜片材料,其弹性模量 $E = 128$ GPa、泊松比 $\mu = 0.35$ 、密度 $\rho = 8.3$ g/cm³。

考虑设计的 FBG 传感器结构与实际泄压阀空间尺寸一致性,因此膜片直径取在原泄压阀 10 mm 附近的 8、10、12 mm,根据加工难易程度、成本以及对传感器灵敏度的要求膜片厚度分别取 0.4、0.5、0.6 mm,分别对各膜片直径和厚度的组合进行仿真实验。

根据传感器理论设计要求,膜片必须满足小变形理论,即膜片产生的最大挠度小于厚度的 1/3,因此进行仿

真验证膜片结构参数是否满足设计要求。挠度沿径向变化趋势如图 3 所示,每条曲线都在膜片中心位置取得最大值,最大值随膜片半径增大而增大,随膜片厚度增加而

减小,应力与应变的最大值除位置不同外也有相同的变化规律。如表 1 仿真结果所示,所有膜片产生的最大挠度都小于其厚度的 1/3,满足小变形理论设计要求。

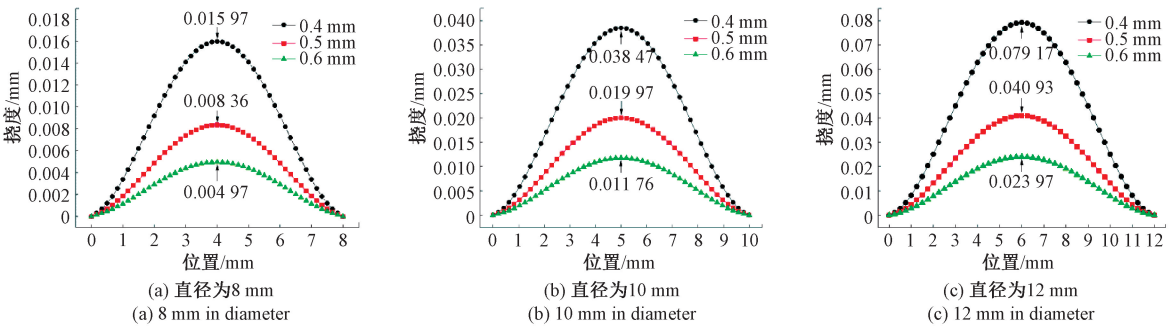


图 3 挠度沿径向变化趋势
Fig. 3 Deflection changes along the diameter

表 1 不同膜片产生的最大挠度

Table 1 Maximum deflection due to different diaphragms (mm)			
	R=4	R=5	R=6
h=0.4	0.015 97	0.038 47	0.079 17
h=0.5	0.008 36	0.019 97	0.040 93
h=0.6	0.004 97	0.011 76	0.023 97

力不应超过铍青铜许用应力(1 000~1 200 MPa),应力沿径向变化趋势如图 4 所示,应力在膜片固定边缘取得最大值,即膜片固定位置最容易损坏,为满足实际生产环境中安全系数不小于 7,满足条件的只有 (R=5 mm, h=0.6 mm)、(R=4 mm, h=0.5 mm)、(R=4 mm, h=0.6 mm) 3 种情况,后续小节将对每种情况下传感器灵敏度进行分析。不同膜片产生的最大应力如表 2 所示。

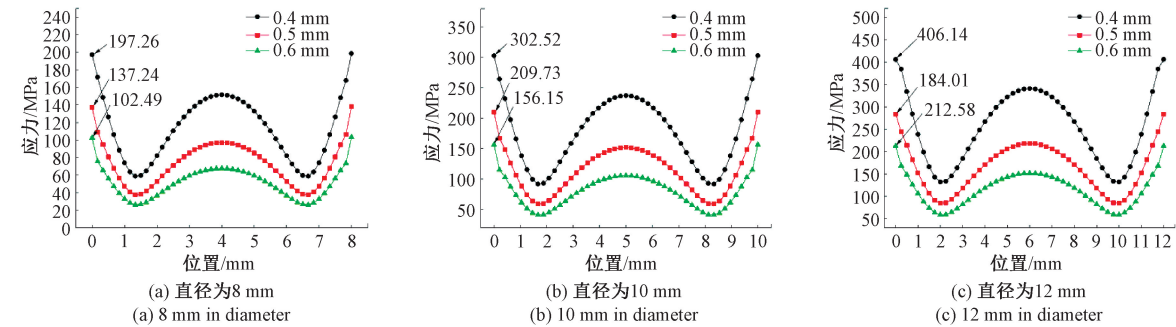


图 4 应力沿径向变化趋势
Fig. 4 Stress changes along the diameter

表 2 不同膜片产生的最大应力

Table 2 Maximum stress generated by different diaphragms (MPa)			
	R=4	R=5	R=6
h=0.4	197.26	302.52	406.14
h=0.5	137.24	209.73	184.01
h=0.6	102.49	156.15	212.58

为使传感器有较好的压力灵敏度,FBG 应粘贴在膜片应变最大位置,应变沿膜片径向变化趋势如图 5 所示,膜片边缘处应变最大,但膜片边缘不利于粘贴 FBG,所以选择另一应变较大且便于 FBG 粘贴的位置,因此本文将 FBG 粘贴在膜片中心。

2.2 传感器灵敏度分析

为进一步确定传感器膜片最优尺寸,将满足设计要求的 3 种膜片结构参数代入理论公式计算,其他参数设置如下: $P_e=0.22$, $\lambda_B=1\ 545\text{ nm}$, $E=128\text{ GPa}$, $\mu=0.35$ 。利用 MATLAB 分别对 3 种不同的结构参数进行数值计算,压力范围取 0~3 MPa,FBG 粘贴在膜片中心 ($r=0\text{ mm}$),结果如图 6 所示。

在 0~3 MPa 范围内,3 种膜片结构参数计算得到的波长漂移量均与压力呈良好线性关系,曲线斜率表示传感器灵敏度,尺寸参数与压力灵敏度对应关系如表 3 所示,因此得到最优的膜片结构尺寸为 $R=5\text{ mm}$ 、 $h=$

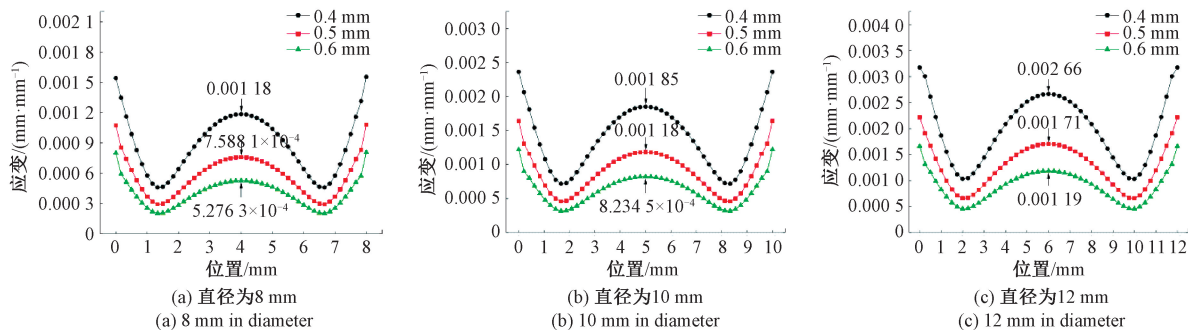


图 5 应变沿径向变化趋势

Fig. 5 Strain change along diameter

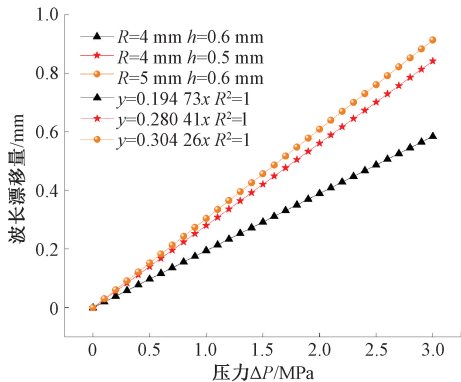


图 6 不同尺寸参数波长漂移曲线

Fig. 6 Wavelength shift curve of different size parameters

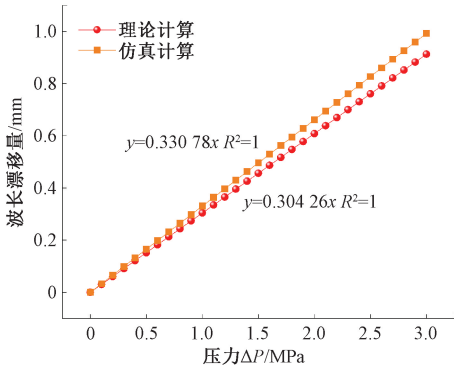


图 7 理论和仿真波长漂移曲线

Fig. 7 Theoretical and simulated wavelength shift curves

0.6 mm。

表 3 不同参数的灵敏度

Table 3 Sensitivity of different parameters

半径 R/mm	厚度 h/mm	灵敏度 $/(\text{pm}\cdot\text{MPa}^{-1})$
4	0.6	194.73
4	0.5	280.41
5	0.6	304.26

为进一步验证理论可行性,将最优膜片结构参数进行理论与仿真灵敏度分析,结果如图 7 所示,在 0~3 MPa 范围内,理论压力灵敏度为 304.26 pm/MPa,仿真压力灵敏度为 330.78 pm/MPa,理论与仿真结果相近,证明该传感器理论可行。旋叶式压缩机的常见进气压力为 0.196 MPa,排气压力为 1.47 MPa,在此范围内,该传感器拥有良好的性能。因此本文基于 FBG 改进泄压阀的旋叶式压缩机排气压力传感器是可行的。

3 结 论

本文根据旋叶式压缩机泄压阀结构特点设计了一种新型基于泄压阀的三段式 FBG 压力传感器,基于 FBG 传感原理建立了传感理论模型,并通过仿真实验研究了膜片结构参数对压力灵敏度的影响。计算结果表明,在 0~

3 MPa 范围内,该传感器理论压力灵敏度可达 304 pm/MPa,仿真压力灵敏度可达 330.78 pm/MPa,可以实现旋叶式压缩机工作压力范围内测量。该传感器与传统泄压阀相比,不仅实现了泄压阀原有的功能,还能够实现压缩机排气压力原位测量;与传统电类传感器相比,该传感器直接安装在原泄压阀的位置,无需破坏管路即可实现排气压力测量,同时更容易实现分布式测量,对压缩机状态监测及功耗精细化控制具有重要的理论指导意义和实际的应用价值。

参考文献

[1] 胡立志,何泽银,彭艳蓉,等. 滑片式压缩机动态功耗测试及影响因素研究[J]. 流体机械, 2020, 48(8): 1-5.
HU L ZH, HE Z Y, PENG Y R, et al. Dynamic power consumption test and influence factor analysis of rotary vane compressor[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(8): 1-5.
[2] 何泽银,杨金明,范爱军,等. 旋叶式压缩机叶片动态接触激励机理[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 78-86.
HE Z Y, YANG J M, FAN AI J, et al. Characterization of dynamic contact excitation of rotary vane compressor

- blade[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 78-86.
- [3] 刘世杰, 尹应德, 朱冬生, 等. 双缸转子压缩机变频空气源热泵制冷性能测试[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 19-25.
- LIU SH J, YIN Y D, ZHU D SH, et al. Test of refrigeration performance for inverter air source heat pumps based on double-cylinder rotary compressor[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(9): 19-25.
- [4] 李卓玛, 黄剑川, 李永珍, 等. 量热器法压缩机性能测试实验台的性能评估[J]. 流体机械, 2019, 47(10): 38-41.
- LI ZH M, HUANG J CH, LI Y ZH, et al. Performance evaluation of compressor performance test bench by calorimeter method [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(10): 38-41.
- [5] 韦为, 耿葵花, 耿爱农, 等. 基于 LuGre 模型的转子压缩机滑片-滑槽运动副摩擦力测试[J]. 中国机械工程, 2019, 30(8): 932-938.
- WEI W, GENG K H, GENG AI N, et al. Friction force test of rotor compressor slides-chute movement deputy based on LuGre model [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(8): 932-938.
- [6] 刘文敏, 戴玉堂, 魏禹. 基于双光纤光栅的高灵敏度低频加速度传感器[J]. 光电子·激光, 2021, 32(9): 911-918.
- LIU W M, DAI Y T, WEI Y. High-sensitivity and low-frequency accelerometer sensor based on double fiber Bragg ratings [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2021, 32(9): 911-918.
- [7] 彭晖, 徐小来, 鄢书跃. 基于斯托克斯参量的光纤光栅微压力传感方法研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(10): 1018-1024.
- PENG H, XU X L, WU SH Y. Anovel fiber Bragg grating sensor for weak pressure measurement based on the Stokes parameter [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2020, 31(10): 1018-1024.
- [8] 王彦, 金萍, 赵慧, 等. 基于 FBG 柔性传感器的形状重构[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 83-91.
- WANG Y, JIN P, ZHAO H, et al. Shape reconstruction based on the FBG flexible sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 83-91.
- [9] 孙世政, 向洋, 党晓圆, 等. 基于粒子群解耦算法的 FBG 流量温度复合传感研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 2-10.
- SUN SH ZH, XIANG Y, DANG X Y, et al. Research on FBG flow and temperature composite sensor based on the PSO decoupling algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 2-10.
- [10] 何为, 张翠, 童杏林, 等. 用于轴瓦温度监测的无线耦合光纤布拉格光栅传感器[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 110-117.
- HE W, ZHANG C, TONG X L, et al. Wirelessly coupled fiber-Bragg-grating sensor for bushing-temperature monitoring [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 110-117.
- [11] 薛兆康, 国旗, 刘善仁, 等. 油气井下光纤光栅温度压力传感器 [J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1224-1230.
- XUE ZH K, GUO Q, LIU SH R, et al. Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1224-1230.
- [12] ROSOLEM J B, PENZE R S, FLORIDIA C, et al. Dynamic effects of temperature on FBG pressure sensors used in combustion engines[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 3020-3027.
- [13] HER SH CH, WENG SH ZH. Fiber Bragg grating pressure sensor integrated with epoxy diaphragm [J]. Sensors, 2021, 21(9): 3199.
- [14] HEGDE G, PRASAD M V N, ASOKAN S. Temperature compensated diaphragm based fiber Bragg grating (FBG) sensor for high pressure measurement for space applications [J]. Microelectronic Engineering, 2021, 248: 111615.
- [15] VORATHIN E, HAFIZA Z M, AIZZUDDIN A M, et al. A natural rubber diaphragm based transducer for simultaneous pressure and temperature measurement by using a single FBG [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 8-13.
- [16] 洪成雨, 鲍成志, 武亚军, 等. 增材制造制备性能可控的 FBG 压力传感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 30-38.
- HONG CH Y, BAO CH ZH, WU Y J, et al. Study on fabrication of FBG pressure sensors with controllable measurement performance using additive manufacturing technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 30-38.
- [17] FAN Q G, JIA ZH A, FENG D Q, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on square diaphragm [J]. Optik, 2021, 225: 165559.
- [18] ZHAO Y, ZHENG H K, LV R Q, et al. A practical FBG pressure sensor based on diaphragm-cantilever[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 101-106.
- [19] REN G F, LI T Y, HU ZH CH, et al. Research on new FBG soil pressure sensor and its application in

engineering[J]. Optik, 2019, 185: 759-771.

- [20] 刘钦朋, 刘望飞, 王春芳, 等. 光纤光栅加速度传感器高灵敏理论模型研究[J]. 光电子·激光, 2022, 33(3): 225-229.

LIU Q P, LIU W F, WANG CH F, et al. Research on high sensitivity theoretical model of fiber Bragg grating acceleration sensor[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2022, 33(3): 225-229.

作者简介



孙世政, 2015 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为重庆交通大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为精密仪器与机械、智能传感技术。

E-mail: ssz091011@163.com

Sun Shizheng received his Ph. D. degree

from Hefei University of Technology in 2015. Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor at Chongqing Jiaotong University. His main research interests include precision instruments and machinery and smart sensor technology.



雷远俊 (通信作者), 2020 年于重庆交通大学获得学士学位, 现为重庆交通大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术。

E-mail: raymaarten@163.com

Lei Yuanjun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing Jiaotong University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Chongqing Jiaotong University. His main research interest includes fiber grating sensing technology.