

doi:10.3963/j.issn.1671-4431.2013.04.024

基于光纤传感技术的往复压缩机振动监测研究

朱晓明¹, 南秋明²

(1. 中国石油化工股份有限公司武汉分公司, 武汉 430082;
2. 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

摘 要: 基于光纤(Bragg)光栅传感技术的优点,提出了往复压缩机的光纤光栅振动监测方法。设计了一种“L”型结构的 FBG 振动传感器,并对传感器及其系统进行了实(试)验研究。结果表明,该传感器的工作频率范围为 3~60 Hz,灵敏度为 86 pm/(m·s⁻²),加速度测量范围大于 25 m/s²,其系统具有抗电磁干扰和本质安全防爆的特点,长期稳定性好,易于实现远程、在线测量,很好地满足了往复压缩机振动监测的需要。

关键词: 往复压缩机; 振动监测; FBG 振动传感器; 远程、在线测量

中图分类号: TP 212

文献标识码: A

文章编号: 1671-4431(2013)04-0116-04

Study on Vibration Monitoring of Reciprocate Compressor Based on FBG Sensing Technology

ZHU Xiao-ming¹, NAN Qiu-ming²

(1. Wuhan Company, SINOPEC, Wuhan 430082, China; 2. National Engineering Lab for Optic Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A new measuring method for vibration of reciprocate compressor based on fiber Bragg grating(FBG) sensing technology is brought forward for the first time. The author has schemed out FBG vibration sensor with “L” design structure and done some experiments to test the properties of the sensor and its system. The results show that the sensor’s operating frequency range is 3~60 Hz, sensitivity is 86 pm/(m·s⁻²), acceleration measuring range is greater than 25 m/s², and its system has such advantages as EMI, intrinsic security, good long-term stability, easy to be used for remote and on-line monitoring. So the system is capable of meeting the demand for vibration monitoring of reciprocate compressor.

Key words: reciprocate compressor; vibration monitoring; FBG vibration sensor; remote and on-line monitoring

往复压缩机作为现代石油化工工业中广泛使用的一种大型增压设备,由于其结构复杂且运行过程中激振源多,生产过程中故障发生率较高^[1]。振动监测是进行旋转机械故障诊断的基本方法^[2]。目前对于往复压缩机的在线监测大多采用电磁类传感器,如压电式传感器,而化工工业对于现场电的使用有着苛刻的要求,并且该类传感器存在温度稳定性差、信号无法进行长距离传输等诸多问题^[3]。光纤传感器是近年来发展迅速的一种检测手段,其具有频率响应范围大、本质安全、抗电磁干扰、信号传输距离远等优势。因此将光纤传感器用于压缩机的振动监测可以克服电磁类振动传感器的缺点。然而,现有的光纤振动传感器的频响范围不能很好地满足大型压缩机振动监测的需求。大型往复压缩机的转速一般在 180~360 r/min 范围内^[4],因此转动主频在 3~6 Hz 之间时,考虑压缩机的多级谐振频率,振动传感器的频响至少应包含 10 倍的

收稿日期:2013-03-27.

基金项目:国家自然科学基金(60537050)和中央高校基本科研业务费专项资金(2011-YB-07).

作者简介:朱晓明(1962-),男,高级工程师. E-mail:nqm0723@tom.com

转动频率,即振动传感器的频率一般应大于 60 Hz。基于悬臂梁结构研制的光纤振动传感器的工作频响一般都在 50 Hz 以下^[5],张东生等人基于推挽式结构研制的振动传感器虽然有很高的工作频响(可达到 1 000 Hz 以上),但低频(10 Hz 以下)灵敏度较低,且横向抗干扰能力较弱^[6]。作者对常用的悬臂梁结构进行了改进,设计了一种“L”型结构光纤光栅振动传感器,并通过实(试)验对传感器及其系统的性能进行了研究。

1 传感器原理及结构

光纤光栅传感技术使用的核心敏感元件是光纤 Bragg 光栅(下文简称 FBG),FBG 传感的基本原理是:当 FBG 周围的温度、应变、应力或其它待测物理量发生变化时,将导致光栅周期或纤芯折射率的变化,从而产生 FBG 信号的波长位移,通过监测波长位移情况,即可获得待测物理量的变化情况^[7]。图 1 为 FBG 的传感原理。

基于 FBG 的应变传感原理,在对悬臂梁结构改进的基础上,设计了一种“L”型结构的光纤光栅振动传感器,如图 2 所示,传感光栅一端直接固定在外壳上,另一端固定在“L”型杆上。同悬臂梁结构相比,这种结构设计的主要优点有两点:1)避免了栅区粘贴带来的光纤光栅反射波啁啾或多峰现象;2)振子产生相同振幅时带来栅区变形更大,使灵敏度提高。合理调整人工阻尼可以使传感器有较宽的频响范围,幅值和相位失真均较小,并且人工阻尼的存在延长了使用器件的寿命。

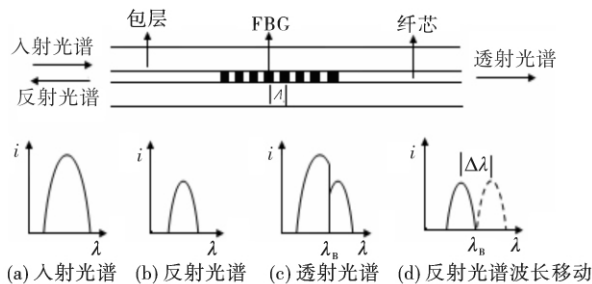


图1 FBG传感原理

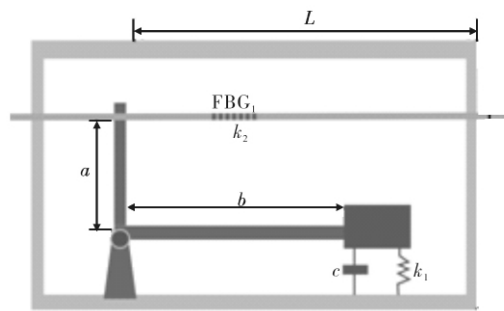


图2 “L”型振动传感器结构原理图

2 FBG 振动传感器实验

光纤光栅振动传感器的实验研究主要测试幅频特性和灵敏度两个参数,采用了丹麦 B&K 公司的振动激励和信号采集等设备。在试验中,采用 LAN-XI 振动分析系统自带的信号发生器来产生一定频率的加速度信号,通过标准加速度计来准确测量当前加速度值。将光纤光栅加速度传感器固定在振动台上,其波长变化通过 BGD-4M 型光纤光栅解调仪解调出来,并显示在计算机软件界面上。

2.1 传感器幅频特性

在传感器幅频特性测试中,通过调节振动台来输出 1 m/s^2 的恒定加速度值,输出频率从 3 Hz 开始,每递增 5 Hz 为一个步长。在测试过程中,不断观察光纤光栅解调系统输出波长的变化,以确定传感器的固有频率和测试范围。实验(图 3)显示,在 3~60 Hz 范围内, 1 m/s^2 的加速度引起的光纤光栅波长变化在 86 pm 左右;在 90 Hz 时,波长变化超过 270 pm;90 Hz 以后,随着频率的增加,光纤光栅波长变化开始下降。通过对多组传感器进行测试,结果基本符合上述测试情况。这表明,传感器的固有频率多维持在 90 Hz 左右,曲线平整段为 3~60 Hz 范围,即传感器的工作频率范围为 3~60 Hz。

2.2 灵敏度参数的标定

由于只采用了 1 个光纤光栅作为传感元件,因此该传感器用于振动测量时,必须考虑环境温度变化的影响。为了解决这个问题,在进行标定数据处理时,以光栅反射波峰与波谷的差值(峰-谷)作为输出信号,该方

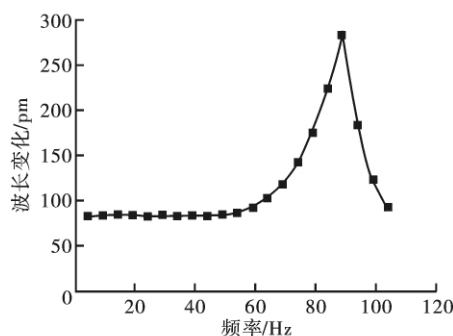


图3 FBG振动传感器的幅频特性曲线

法的优点在于:1)提高了传感器的灵敏度;2)实现了温度的自动补偿。当环境温度变化时,光栅反射峰将会整体移动,因此,峰谷与温度变化无关,从而达到温度自动补偿的效果。振动加速度传感器的灵敏度标定,选择了多个测试频率,在每个测试频率下,通过改变振动台的激励加速度,使光纤加速度传感器在不同的加速度下运行,通过提取波长变化量来求取传感器的灵敏度。其中 20 Hz 下的灵敏度曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,传感器的波长变化量与加速度值具有很好的线性关系,该传感器的灵敏度为 $81.9 \sim 87.4 \text{ pm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$,与幅频特性曲线测试结果基本一致。加速度测量范围大于 25 m/s^2 。

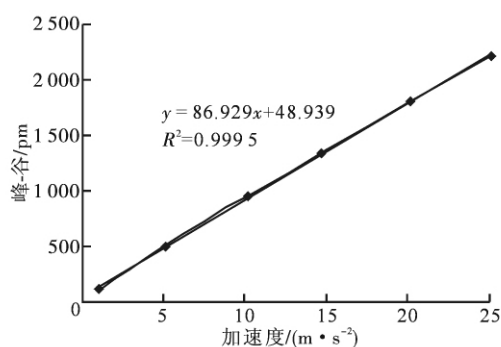


图4 标定曲线

3 FBG 振动测试系统工业性试验

3.1 传感器布点及安装

工业性试验的对象是对称平衡两缸往复式压缩机,监测参数是气缸表面振动和气阀表面温度,测点布置如图 5 所示,在两气缸的表面分别安装了垂直、水平和轴向的 FBG 振动传感器来监测气缸的工作状态,另外,在每个气阀的表面安装光纤温度传感器。传感器均采用磁铁吸附式安装,既保证了对测量结果无影响,也方便了传感器的安装、拆卸和移位,不影响设备的维修、保养,如图 6 所示。

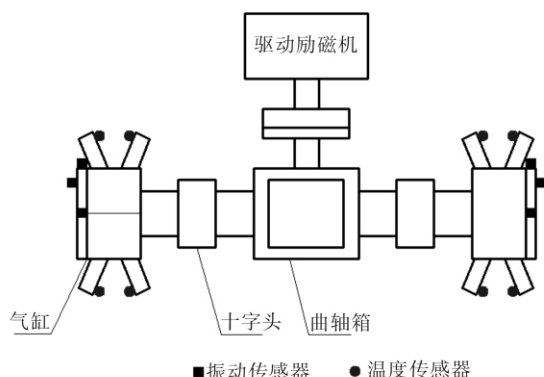


图5 氢气压缩机的光纤传感测点布置图



图6 光纤振动传感器安装照片

3.2 监测系统组成

如图 7 所示,往复式压缩机的光纤振动监测系统由硬件部分和软件部分构成。硬件部分由光纤传感器、光纤光栅解调仪、网络通信设备和计算机等构成;软件部分包括各种硬件设备驱动、控制、通信软件以及压缩机状态监测专家评估软件,同时还包含对所测量的数据进行处理的数据管理软件等。由软件和硬件系统密切配合实现往复式压缩机工作状态的长期健康监测及状况评估功能。该机组的基频为 $333/6 = 5.56 \text{ Hz}$,文中研制的“L”型 FBG 振动传感器的最高频响可达到 60 Hz ,信号解调选择 BGD-4M 波长解调仪,最高采样频率为 400 Hz ,均满足往复式压缩机振动监测的需要。

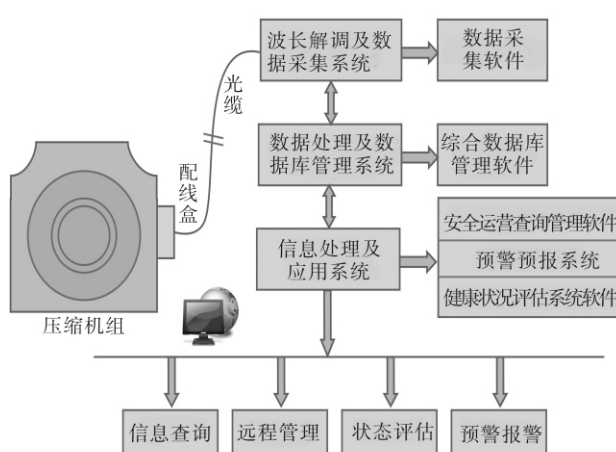


图7 FBG振动测试系统结构框图

图 8 为系统拓扑图,现场光纤振动和温度监测信号经光缆汇集传回监控室接入光纤光栅解调器,将采集、软件分析处理后的结果存入服务器,通过本地客户端计算机进行实时监控和查询,该系统留有互联网接口,通过互联网,还可实现远程访问和控制。

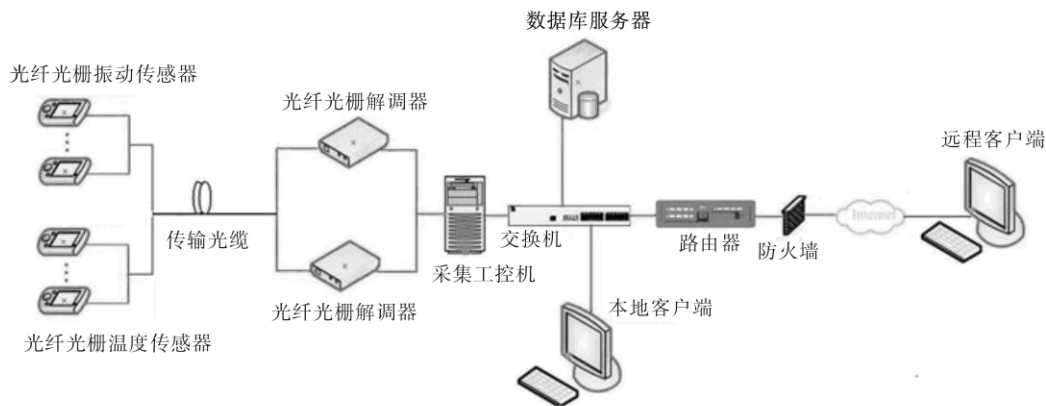


图8 压缩机组振动在线监测系统拓扑图

3.3 数据分析

为了检测光测法的测试效果,采用电测法与光测法进行对比测试分析。采用的“L”型光纤振动传感器输出量是加速度值,通过软件一次积分可输出振动速度值,采用频谱法分析。电测法采用地震局的 941B 速度档采集数据,用自功率谱法分析。图 9 为两种方法测得的压缩方向的振动速度谱。

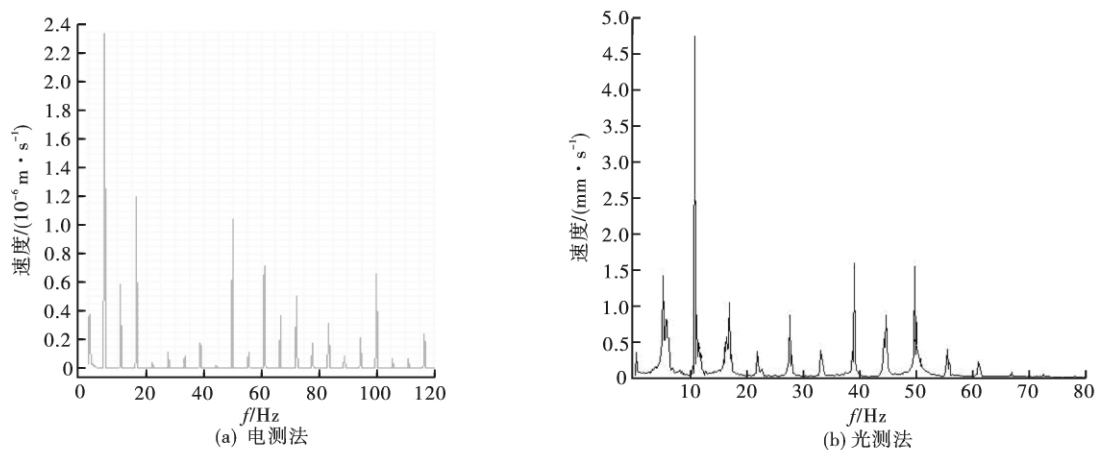


图9 压缩方向振动速度谱

比较图 9,可知两种方法测得的速度频谱分布基本一致,而且另外两个方向的对比结果与压缩方向相同。表 1 为两种方法测得的振动烈度值,根据 GB/T 7777—2003《容积式压缩机机械振动测量与评价》可知,上述振动量值均在正常允许范围内,因此压缩机的工作状态正常。

表 1 振动烈度比较 /(mm·s⁻¹)

监测时间	测试方法	A 端水平	A 端垂直	A 端往复	B 端水平	B 端垂直	B 端往复
2012-04-30	光测法	2.6	2.8	5.0	2.6	3.0	5.0
	电测法	2.5	2.7	5.1	2.5	2.9	4.9
2012-05-08	光测法	2.5	2.8	5.1	2.6	3.1	4.9
	电测法	2.4	2.7	5.1	2.5	3.0	5.0

分析上述测试数据,可得出:1)光纤振动在线监测结果显示,目前气缸端盖 3 个方向的振动烈度中,压缩方向最大,垂直方向次之,水平方向最小;2)压缩机组正常工作时,其振动频谱包含以基频(转动频率)为主的各阶谐波分量,振动能量主要集中在 60 Hz 以内;3)光纤振动在线监测系统试运行结果表明,压缩机端盖 3 个方向的振动烈度值和振动频谱稳定,按照压缩机的国家标准评价机组状态是正常的;4)该项目中采用的磁铁吸附式安装方式,使传感器的安装、移位和拆卸非常方便,且不会影响传感器的测量精度,非常适合大型机械的振动状态监测;5)虽然压缩机组的振动监测方法和手段多种,测量结果也基本接近,但适合长期、远程、在线监测的并不多,该系统近 1 年的运行情况证明了光纤振动监测系统很好地实现了上述功能,而且它的抗电磁干扰能力和本征安全的特点非常适合在石化行业中应用。

(下转第 125 页)

参考文献

- [1] 杨贵春,牛 军,陈 茜,等.基于现代设计方法的柴油机振动特性研究[J].车用发动机,2010(5):56-60.
- [2] 李国宾,关德林,李廷举.基于小波包变换和奇异值分解的柴油机振动信号特征提取[J].振动与冲击,2011,30(8):149-152.
- [3] 曾宪伟,赵卫明,盛菊琴.小波包分解树节点与信号子空间频带的对应关系及其应用[J].地震学报,2008,30(1):90-96.
- [4] 花汉兵.基于小波包的振动信号去噪应用与研究[J].噪声与振动控制,2007(6):19-21.
- [5] 时 岩,常思勤.基于小波包分析的声强计算方法[J].振动与冲击,2006,25(5):77-80,193.
- [6] 赵鹏亮,席泽敏,肖 欢.基于小波包变换和改进 SVD 的特征提取[J].舰船电子工程,2007,27(4):123-125.
- [7] 潘玉娜,陈 进.小波包-支持向量数据描述在轴承性能退化评估中的应用研究[J].振动与冲击,2009,28(4):164-167.
- [8] 张文斌,周晓军,林 勇,等.基于谐波小波包方法的旋转机械故障信号提取[J].振动与冲击,2009,28(3):87-89,97.
- [9] 郭智威.柴油机缸套-活塞环系统状态及其辨识模型[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [10] 申焱华,刘 立,杨文平.基于小波包重构的汽车发动机故障诊断[J].有色设备,2002(2):1-3.
- [11] 郭智威,袁成清,叶枫桦,等.不同缸套表面处理对柴油机振动的影响[J].武汉理工大学学报,2011,33(3):136-140.

(上接第 119 页)

4 结 语

针对往复式压缩机的振动监测需求,研制了一种“L”型结构的光纤光栅振动传感器。该传感器克服了电磁类振动传感器的缺点,具有抗电磁干扰能力强、本征安全、信号传输距离远、长期稳定性好的特点。通过实验对其性能进行了研究,结果表明:该振动传感器的频率响应范围是 $0 \sim 60 \text{ Hz}$,灵敏度为 $86 \text{ pm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$,加速度测量范围大于 25 m/s^2 。另外,将该传感器及其系统在往复式压缩机振动监测工业性试验中进行了应用,并将测试结果与电磁类传感器测试结果进行了对比,两者测得的结果基本一致。通过近 1 年时间的应用,初步证明了系统运行稳定,测试数据可靠,满足往复式压缩机振动监测的需要。

参考文献

- [1] 刘卫华,郁永章.往复式压缩机故障诊断方法的研究[J].压缩机技术,2008(1):3-5.
- [2] 郑月珍.旋转机械振动监测和分析[J].燃气轮机技术,2010,23(1):39-45.
- [3] 张 琳,朱瑞松.往复式压缩机监测与诊断技术研究现状与展望[J].化工进展,2004,23(10):1099-1102.
- [4] 吴庆魁.往复式压缩机振动分析技术[J].广东化工,2011,38(4):206-207.
- [5] 刘 波,牛文成,杨亦飞,等.新型光纤光栅加速度传感器的设计与实现[J].仪器仪表学报,2006,27(1):42-44.
- [6] 张东生,姚开方,罗 裴,等.一种新型的光纤光栅高频加速度传感器[J].仪器仪表学报,2009,30(7):1400-1403.
- [7] 廖延彪,黎 敏.光纤传感技术与应用[M].北京:清华大学出版社,2008.