

# 光纤布拉格光栅用于台钻固有频率测量

刘春晓 余有龙 洪俊 薛航

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要** 提出了一种利用光纤布拉格光栅(FBG)传感器测量复杂结构固有频率的新方法。将FBG粘贴在钻台上,通过检测钻台表面的应变变化并进行数据处理进而实现对台钻的固有频率的测量,测得台钻的一阶固有频率为23.9 Hz。将测量结果与ANSYS有限元仿真分析结果相比较,验证了此测量方法的可靠性。

**关键词** 光纤光学;光纤光栅传感器;台钻;ANSYS有限元分析;固有频率

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020601

## Measurement of the Natural Frequency of Bench Drill Based on Fiber Bragg Grating

Liu Chunxiao Yu Youlong Hong Jun Xue Hang

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract** A new method for measuring the natural frequency of a complex structure using fiber Bragg grating (FBG) sensor is introduced. The FBG strain sensor is stuck on the surface of the drill block. The natural frequency of the drill is measured to be 23.9 Hz by monitoring the strain change caused by mechanical vibration. It matches the result achieved by ANSYS finite element analysis very well.

**Key words** fiber optics; fiber grating sensor; bench drill; ANSYS finite element analysis; natural frequency

**OCIS codes** 060.3735; 060.4264; 130.7408

### 1 引言

台钻钻机工作过程中,转子的高速旋转易引起钻机的强烈振动,如果振动频率接近或达到钻机的固有频率,会使钻机发生共振,它不仅降低加工的精度,还可能导致钻机机组设备的损坏,甚至出现人身伤亡事故,因此,研究台钻结构的动态特性,了解结构的薄弱环节,对结构进行优化设计及提高台钻的性能具有重要的意义<sup>[1,2]</sup>。传统的测量结构动态特性的方法是采用压电式加速度传感器,其结构简单,灵敏度和信噪比高,在工程中得到了广泛的应用。但是其调频范围有限,不能进行高频、低频的转换,对于微弱信号来讲,其输出内阻较高,导致输出能量小,灵敏度下降,受环境影响大,抗干扰能力弱,尤其是对随机干扰缺乏很好的抑制或屏蔽效果,而且不能适用于不同振源<sup>[3,4]</sup>。

光纤布拉格光栅(FBG)振动传感器通过对传感信号的波长调制实现对振动信号的绝对测量<sup>[5~7]</sup>,具有抗电磁干扰能力强、易于同波分复用技术结合、质量轻和体积小等特点,因此在传感领域具有较高的研究价值和广泛的应用前景。本文将FBG粘贴在台钻的钻台上,用锤击法对结构的不同位置进行激振,通过分析应变的时间变化规律,实现对钻机固有频率的测量。本文工作为工程结构和机械系统的振动测量提供了一种新的方法。

**收稿日期**: 2012-10-26; **收到修改稿日期**: 2012-11-12; **网络出版日期**: 2013-01-07

**作者简介**: 刘春晓(1987—),女,硕士研究生,主要从事测试计量技术及仪器方面的研究。

E-mail: chunxiaofuhao@163.com

**导师简介**: 余有龙(1965—),男,博士,教授,主要从事光纤光电子方面的研究。E-mail: youlongyu@163.com

## 2 原理分析

台钻是一个具有多自由度的复杂结构。由动力学原理其振动微分方程为<sup>[8,9]</sup>

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t), \quad (1)$$

式中  $\mathbf{M}$  为质量矩阵,  $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵,  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵,  $\dot{\mathbf{X}}(t)$  为位移列向量,  $\mathbf{F}(t)$  为激振力列向量。

为了研究系统振动的固有频率和主振型, 不考虑阻尼和外力, 则其振动微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

根据微分方程组和模态分析理论, 假定台钻各个质体做简谐振动。所以任意一个质体的自由振动响应为

$$x_i = \phi_i \sin(\omega t + \theta), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中  $\phi_i$  为各质体的振幅,  $\omega$  为质体振动振幅,  $\theta$  为初相角。将(3)式代入(2)式得

$$[-\lambda\mathbf{M} + \mathbf{K}]\{\phi\} = \{\mathbf{0}\}, \quad (4)$$

式中  $\lambda = \omega^2$ 。(4)式是关于列向量  $\{\phi\}$  的齐次代数方程, 由此可得系统频率方程

$$|-\lambda\mathbf{M} + \mathbf{K}| = 0. \quad (5)$$

解之可得  $\omega^2$  的  $n$  个正实根, 从而求出  $n$  个频率  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 。如果把这些频率按由小到大的次序排列,  $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$  即构成所谓频率谱, 其中最小的频率  $\omega_1$  称为最低固有频率, 或基本频率。将特征值  $\lambda_i$  代入(4)式得相应的特征向量  $\{\phi_i\}$

$$[-\lambda_i\mathbf{M} + \mathbf{K}]\{\phi_i\} = \{\mathbf{0}\}.$$

特征向量在振动分析中就是系统的固有振型或主振型。假定(5)式没有重根, 存在  $n$  个特征值, 相应地有  $n$  个特征向量, 这  $n$  个特征向量可组成一个矩阵, 该矩阵称为振型矩阵, 即

$$\Phi = \Phi[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]. \quad (6)$$

根据(6)式, 锤击钻机时, 钻机的自振响应是由  $n$  个不同频率的振动叠加而成的, 即

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i).$$

对于任意一阶振动响应  $x_i = \lambda_i \phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i)$  所引起的台钻表面应变变化为

$$\epsilon_i = A\lambda_i \phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i), \quad (7)$$

式中  $A$  为常数。将 FBG 刚性粘贴在台钻结构表面, 台钻振动产生的应变将会传递给 FBG, 并引起布拉格反射波长的飘移, 其变化关系为<sup>[10,11]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (8)$$

式中  $P_e$  为 FBG 的有效弹光系数,  $\epsilon$  为 FBG 在轴上的应变,  $\lambda_B$  为 FBG 的布拉格波长,  $\Delta\lambda_B$  为布拉格波长的漂移量。将(8)式代入(7)式可得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_i = A\lambda_i \phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i). \quad (9)$$

由(9)式可以看出, 布拉格波长相对漂移量的变化反映了结构振型的变化, 因此观测布拉格波长的时间变化规律, 便可获得结构振动的频率信息。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 FBG 传感器频率测量实验

测量系统采用多点分步激励单点拾振多组数据平均的方法。图 1 所示为台钻的结构简图和测点布置图, 其中台钻下端固定在大工作台上。由于固有频率是结构固有的特性, 所以测量结果与粘贴位置无关, 为了方便可将测点布置在台钻的工作台上; 但为了给传感器提供足

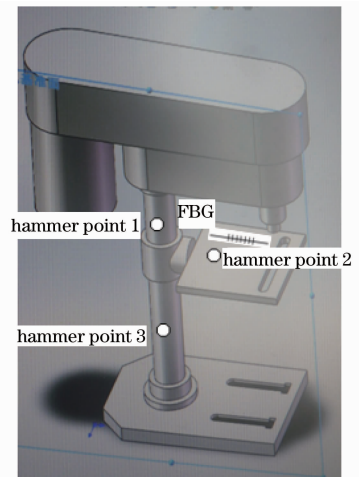


图 1 台钻结构简图

Fig. 1 Structure diagram of bench drill

够的应变,锤击点应尽可能靠近传感器,所以将锤击点分布在传感器周围。

测量系统装置示意图如图 2 所示,宽带光源的谱宽为 40 nm,其发出的光经耦合器和可调 Fabry-Pérot (F-P) 滤波器,变成光脉冲信号后传入传感光纤光栅,光栅布拉格波长附近的光波反射回来再经耦合器、探测器、放大器和信号采集处理转为电平信号,并经以太网(UDP-IP)通讯接口接入电脑。通过峰值移动检测,

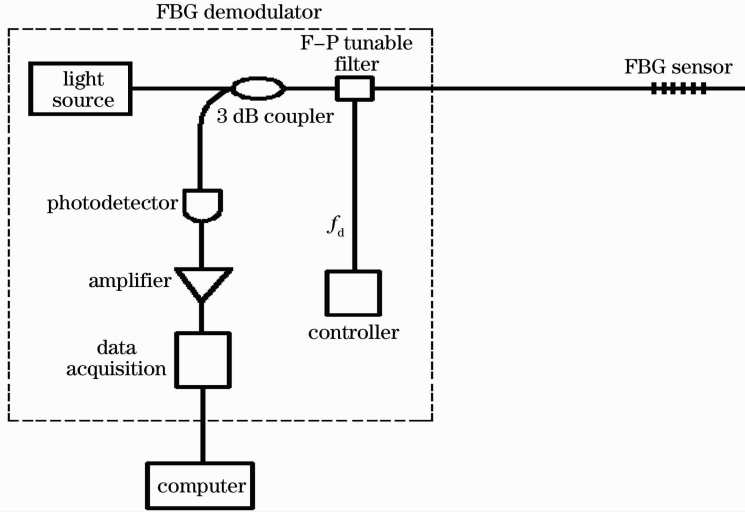


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup

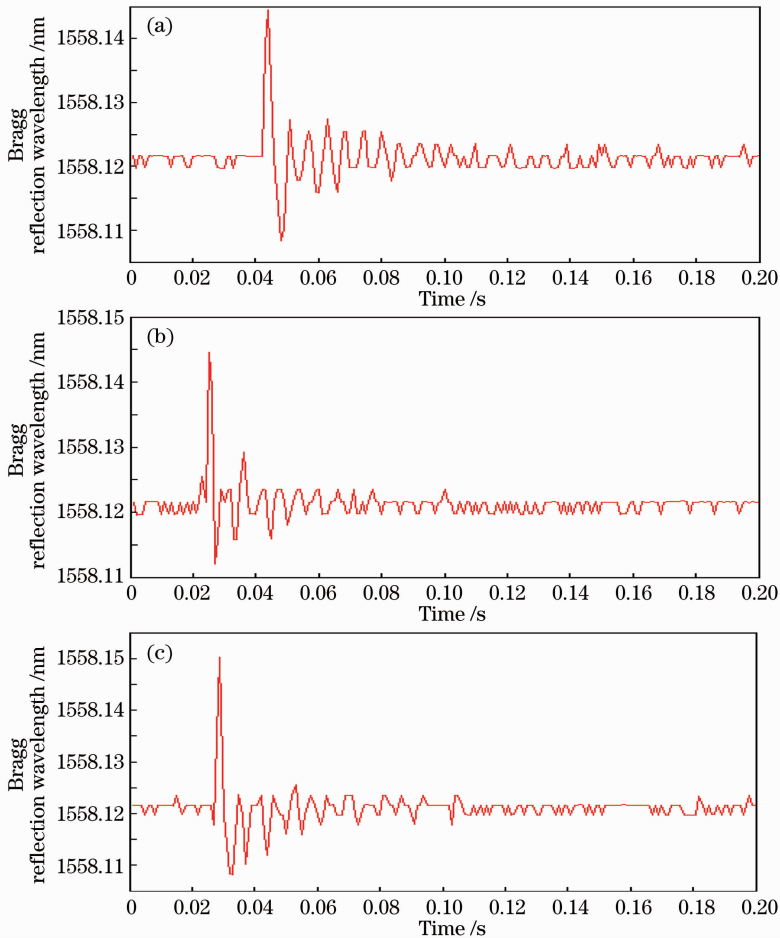


图 3 锤击不同位置时光纤布拉格波长变化曲线。(a)锤击点 1;(b)锤击点 2;(c)锤击点 3

Fig. 3 Bragg reflection wavelength curves when hammering different points. (a) Point 1; (b) point 2; (c) point 3

标定后即可对振动引起的应变的变化进行监测。

图2中虚线框部分集成后的装置为光纤光栅传感信号解调仪,测量系统实际上利用其检测布喇格波长漂移的时间变化规律,将检测结果提供给PC机,PC机对检测结果进行快速傅里叶变换(FFT)便得到系统的频域响应信息,从而实现对结构振动频率的测量。

实验过程中,当用锤子锤击不同的锤击点时,使用驱动频率 $f_d=1000$  Hz的锯齿波扫描电压驱动F-P滤波器,使F-P滤波器的透射波长可以周期性改变。用1000 Hz的采样频率采集数据记录光纤布拉格波长随时间的漂移。图3所示为不同锤击点时光纤布拉格波长的变化情况。

从图3中可以看出,锤击不同的位置时,粘贴在钻台上的FBG传感器的布拉格波长随时间呈现周期性递减变化。为了进一步得到台钻振动的频域信息,对光纤布拉格波长时域变化进行快速傅里叶变换,得到了如图4所示的台钻振动频谱图。

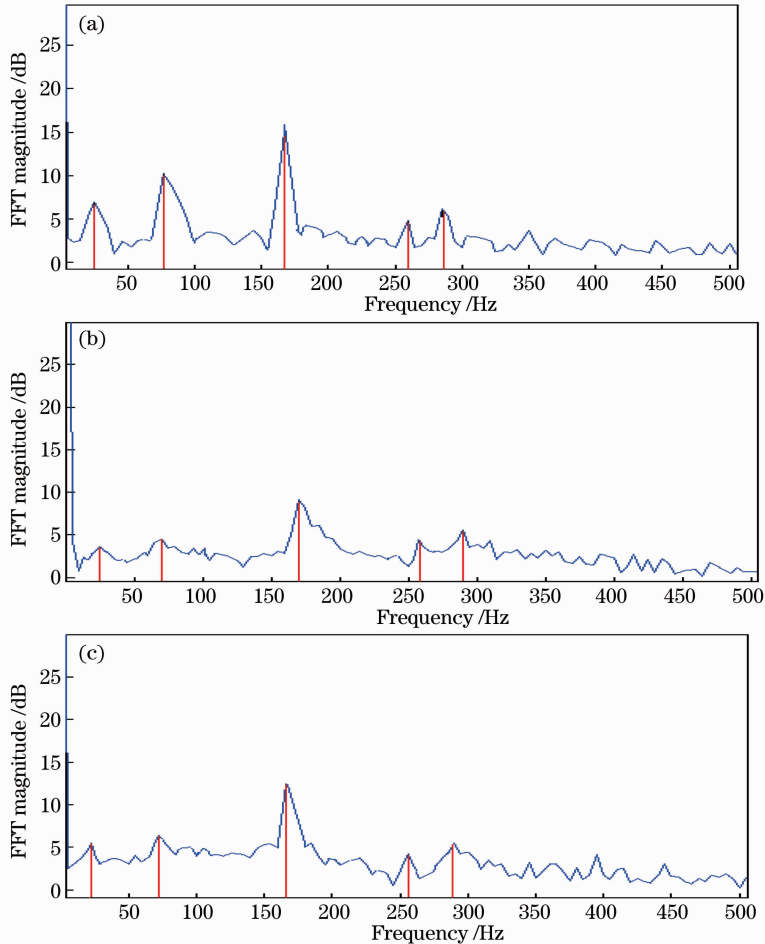


图4 锤击不同位置时钻机的频率曲线。(a)锤击点1;(b)锤击点2;(c)锤击点3

Fig. 4 Frequency domain curves of the drill when hammering different points. (a) Point 1; (b) point 2; (c) point 3

从图4中读出锤击不同位置时FBG传感器测得的台钻各阶固有频率如表1所示,可以看出每次测得的频率偏差在1 Hz范围内。对3组数据取平均值,得到台钻的各阶固有频率。

表1 锤击不同位置时台钻的各阶固有频率(单位:Hz)

Table 1 Natural frequency distribution of the drill when hammering different points (unit: Hz)

Natural frequency	Point 1	Point 2	Point 3	Average
1st order	23.902	24.390	23.414	23.902
2nd order	70.731	71.220	71.463	71.198
3rd order	168.292	168.292	167.073	167.886
4th order	256.098	257.317	256.585	256.664
5th order	286.585	286.408	286.475	286.489

### 3.2 ANSYS 有限元仿真分析

用 ANSYS 有限元仿真软件绘制了钻机的简化模型,设定模型的单元类型为 10 node 187 三维实体单元。台钻的材料为铸铁,由机械设计手册查得弹性模量为  $2 \times 10^{11} \text{ kg/m}^2$ ,密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比为 0.3,得出钻机的固有频率如表 2 所示。

表 2 台钻固有频率仿真结果

Table 2 Simulated natural frequency distribution of the drill

Natural frequency order	1st	2nd	3rd	4th	5th
Frequency /Hz	24.316	72.818	163.88	252.46	283.09

通过对比表 1 和表 2 可以看出,FBG 测得的实验结果与 ANSYS 仿真所得到的结果基本相符,从而验证了 FBG 传感器测量台钻固有频率方法的可靠性。造成结果存在差距的原因可能有:1) 台钻简化模型与实际结构的模态存在差别;2) 台钻装配和固定时由于预紧力等因素作用导致固有频率发生改变。

## 4 结 论

利用 FBG 传感器对钻机的固有频率进行了测量,得到了台钻前 5 阶的固有频率分别为 23.902、71.198、167.886、256.664、286.489 Hz,而 ANSYS 仿真结果为 24.316、72.818、163.88、252.46、283.09 Hz。在误差允许范围内,可认为两者基本一致,从而验证了 FBG 对固有频率测量方法的可靠性。它为工程结构和机械系统动力学参数的测量提供了一种新的方法。

### 参 考 文 献

- 1 许爱荣,薛继军,王正武等. ZJ30/1700CZ 钻机钻台固有振动特性分析[J]. 石油矿场机械, 2002, **31**(5): 43~45
- 2 陈永会,姜旭,李海虹等. 基于实验模态的台钻特性研究[J]. 制造技术与机床, 2011, (12): 101~103
- 3 胡玉勇,吕明,王时英. 关于敲击法测量材料固有频率及弹性模量的研究[J]. 机械工程与自动化, 2010, **5**(10): 88~89
- 4 Wang Shanli. Study on FBG vibration sensor[D]. Xi'an: Northwest University, 2010. 6~7  
王善鲤. FBG 振动传感器的研究[D]. 西安: 西北大学, 2010. 6~7
- 5 Zhu Hai, Li Zhizhong, Sun Rongguang *et al.*. Research on fiber grating under water pressure sensing with high sensitivity [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(5): 536~538  
朱海,李智忠,孙荣光等. 高灵敏度光纤光栅水下压力传感研究[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(5): 536~538
- 6 Song Jianfei, Shao Liyang, Zhang Aping *et al.*. A new FBG based dynamic-strain interrogation system [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(8): 924~925  
宋剑飞,邵理阳,张阿平等. 一种新型 FBG 动态应变解调系统[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(8): 924~925
- 7 Wang Yan, Liang Dakai, Zhou Bing. Vibration monitor of optical fiber grating smart structure using intensity demodulation method[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(3): 361~364  
王彦,梁大开,周兵. 强度解调的光纤光栅智能结构动态监测技术[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(3): 361~364
- 8 Zhang Ziming, Zhou Xingde, Jiang Dongju. Structural Dynamics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009. 52~61  
张子明,周星德,姜冬菊. 结构动力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009. 52~61
- 9 Liu Yanzhu, Chen Wenliang, Chen Liqun. Vibration Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. 2  
刘延柱,陈文良,陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 2
- 10 Gong Xianfeng, Yi Honggang, Zhou Xiaomin *et al.*. Low frequency fiber Bragg grating acceleration sensor [J]. *J. University of Science and Technology Beijing*, 2006, **28**(1): 75~77  
巩宪锋,衣红钢,周晓敏等. 低频光纤光栅加速度传感器[J]. 北京科技大学学报, 2006, **28**(1): 75~77
- 11 Qiao Xueguang, Ge Peng, Jia Zhen'an *et al.*. Study on demodulation technique for fiber grating vibration sensor [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(8): 1004~1007  
乔学光,葛鹏,贾振安等. 光纤光栅振动传感解调技术的研究[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(8): 1004~1007