

文章编号: 0258-7025(2004)07-0843-05

干涉型保偏光纤微振动矢量传感器研究

熊水东, 罗 洪, 胡永明, 孟 洲

(国防科技大学理学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘要 报道了干涉型保偏光纤微振动矢量传感器的理论与实验结果。传感器采用全保偏光纤结构, 消除了偏振不稳定性, 系统采用光频调制相位载波 (PGC) 解调信号处理技术, 消除了干涉仪初始相差的影响, 从而实现了传感信号的稳定检测。对三轴正交芯轴式干涉型全保偏推挽结构的光纤微振动矢量传感器进行了理论和实验研究。由理论得到了简化公式, 并通过公式分析了各种参数对传感器谐振频率与灵敏度等特性的影响。由实验得到系统谐振频率约为 370 Hz, 与 375 Hz 的理论结果基本一致。在 5~200 Hz 频段系统灵敏度响应平坦, 约为 340 rad/g, 略低于 356 rad/g 的理论值。该传感器具有良好的矢量性, 在 45° 方向的灵敏度约为轴向灵敏度的 0.7 倍, 与理论结果一致, 正交方向串扰小于 -26 dB。系统最小可测相位为 10^{-5} rad, 最小可测加速度为 3×10^{-8} g。

关键词 光电子学; 光纤传感器; 振动测量; 加速度传感器

中图分类号 TN 253; TP 212.14 **文献标识码** A

Research on Interferometric Polarization Maintaining Fiber Optic Micro-Vibration Vector Sensor

XIONG Shui-dong, LUO Hong, HU Yong-ming, MENG Zhou

(Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The theoretic and experimental result of interferometric polarization-maintaining fiber micro-vibration vector sensor are represented. Because of polarization-maintaining fiber structure, the sensor avoided instability of polarization. With phase generated carrier (PGC) technology, the influence of initial phase of interferometer was eliminated. Based on these methods, the stable signal detect was realized by the fiber optic micro-vibration vector sensor. The measured natural frequency of the system was 370 Hz, which agrees with the theoretic result 375 Hz. The acceleration sensitivity in experimental results reached 340 rad/g in frequency band of 5~200 Hz, and it matched 356 rad/g predicted by theory. Vector character of the sensor was obtained too. The acceleration sensitivity in 45° was 0.7 times of that in 0° and the orthogonal crosstalk coupling was -26 dB below. In the system, minimum measurable phase was 10^{-5} rad and minimum measurable acceleration reached 3×10^{-8} g.

Key words optoelectronics; fibre optic sensor; vibration measurement; acceleration sensor

1 引 言

光纤微振动矢量传感器具有灵敏度高, 抗电磁干扰, 能在恶劣环境下工作, 易于远距离组网探测的特点, 因而具有极为广阔的应用前景, 特别在石油勘探、地震波检测和水声波矢量探测系统中有着极为重要的应用。国内外对此进行了大量的研究, 取得了一些成果^[1~7]。在光纤微振动矢量传感器的研究

中, 人们进行过强度型、干涉型等许多研究, 近年来光纤光栅又成为研究的热点。但强度型及光纤光栅检测灵敏度较低, 它们在微振动传感中受到较大限制。对于石油勘探和水声矢量检测, 较为理想的是干涉型方案。在已报道的干涉型光纤振动传感器中, 多采用单模光纤干涉仪, 系统的偏振稳定性是一个较难解决的问题。在我们的工作中, 通过全保偏光纤干涉系统^[8], 从根本上保证了系统相干性对偏

收稿日期: 2003-01-14; 收到修改稿日期: 2003-06-03

作者简介: 熊水东(1974—), 男, 国防科技大学博士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: nudtxsd@163.com

振态的要求。同时,在相干检测中,消除初始相差的影响也是保证检测稳定性的关键因素,本系统采用光频调制相位载波(PGC)解调信号处理技术^[9],消除了干涉仪初始相差的干扰。另外,系统还在传感结构上消除了其他误差因素,从而实现了微振动的稳定检测。本文还对光纤微振动矢量传感器进行了深入的理论分析,得出了其结构参数和系统性能

之间的一些重要关系。

2 系统结构及矢量探测原理

考虑到实际应用对光纤微振动矢量传感器的综合要求,采用三轴正交的芯轴式干涉型全保偏推挽结构,所用芯轴为实心弹性柱体,如图 1 所示。

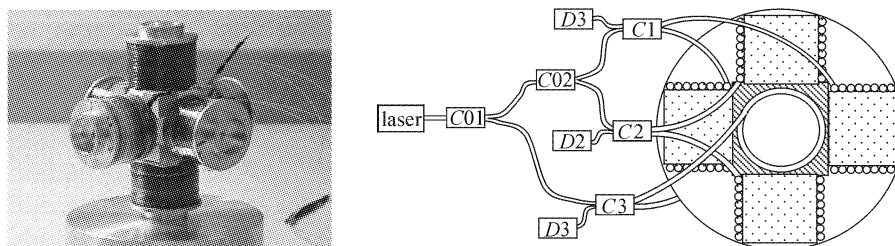


图 1 三轴正交的芯轴式全保偏光纤微振动矢量传感器实物及光学系统原理

Fig. 1 photo and principle diagram of three-dimensional mandrel polarization maintaining fiber optic micro-vibration vector sensor

三维结构实际上由三个分立的一维传感器共用一个质量块构成,可从一维结构开始对其特性进行分析。一维振动传感的工作原理示意图如图 2 所示,从激光器发出的光输入到保偏光纤耦合器 C 中,并且在耦合器的两出纤端镀有反射膜,构成 Michelson 光纤干涉仪,干涉仪的两光纤臂分别绕在两实心弹性柱体上,两弹性柱体间连接有重物块 M。在平行于柱体轴向的振动加速度作用下,重物块对两弹性柱体分别施加拉伸和压缩力,使弹性柱体的轴向和径向发生形变,引起所绕光纤的长度变化,进而在光纤干涉仪上产生相位差的变化。当振动垂直于柱体轴向时,两柱体产生相同的形变,从而相位差变化为零。传感器所敏感的只是加速度在柱体轴向上的分量,从而实现了矢量探测。对三轴正交结构,由于横向形变有较强的约束,测量的矢量性得到进一步改善。

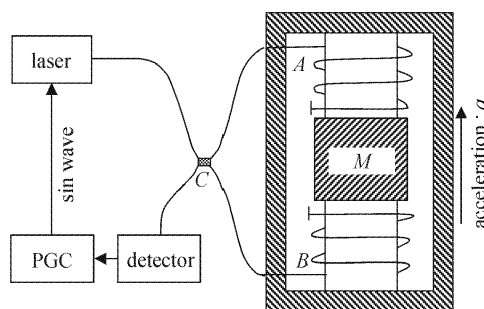


图 2 一维振动传感的工作原理示意图

Fig. 2 Operating principle of one-dimensional sensor

相关光纤振动传感研究给出的系统结构都如图 2 所示,这种示意性的结构是不稳定的。在图 2 所示的 Michelson 光纤干涉仪中,耦合器 C 的两端绕在弹性柱体上构成两个传感臂,在 C 和 A, B 之间的光纤也是干涉仪传感臂的一部分,在系统振动时,它将产生不确定形变,从而影响系统的稳定性,而且它对垂直于柱体轴向的加速度敏感,从而破坏系统探测的矢量性。实际系统中彻底消除 C 和 A, B 之间的敏感光纤有极大的难度,为此专门研制了可直接安装固定在重物块 M 上的微型保偏光纤耦合器,较好地解决了系统的结构稳定性问题。

在干涉仪中,消除偏振不稳定的影响是获得稳定干涉信号的基本物理要求。在以往的研究中,大多采用单模光纤系统,需要采用法拉第磁旋光技术来抑制偏振不稳定的影响,其关键技术是连接在光纤端头的准直旋光器。由于旋光器只能用分立元件粘合而成,在实际应用中,可靠性和成本都存在问题。在本系统中,实现了全保偏光纤结构,从根本上解决了系统的偏振稳定性问题。同时,直接将反射膜镀在光纤端头上,使系统结构大为简化,可靠性大大提高。

在相干检测中,消除初始相差的影响是保证检测稳定性的另一关键因素。在本系统中采用光频调制相位载波(Phase Generated Carrier, PGC)信号处理技术^[9],解决了干涉稳定性问题,同时也使探头实

现了全光化,这一点对深层石油井下地震波探测和水声矢量探测的应用有重要意义。

3 灵敏度和谐振频率的理论分析

对干涉型光纤振动传感器加速度相位灵敏度的理论分析建立在图 3 所示的弹性结构基础上。文献 [1]和 [6]分别采用重调和函数解法及应力求解

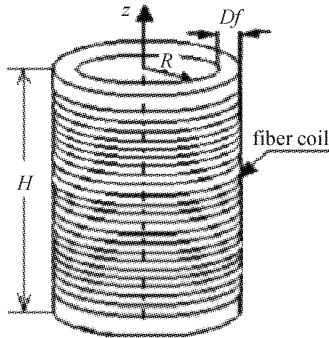


图 3 绕有光纤的实心弹性柱体

Fig. 3 Solid cylinder with fiber winded

法^[10]分析了这类问题。为了给出重要结构参数和系统性能之间的关系,采用位移矢量求解法得到绕有光纤的实心弹性柱体的等效杨氏模量 E' 和泊松比 μ' 为

$$\begin{cases} E' = \frac{1 - \mu - 2\mu^2/X}{1 - \mu - 2\mu^2} E \\ \mu' = \mu/X \end{cases} \quad (1)$$

式中 E 和 μ 分别为未绕光纤前弹性柱体的杨氏模量和泊松比,且有

$$X = 1 + \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E} \frac{E_f S_f N}{HR} \quad (2)$$

其中 E_f 和 S_f 分别为光纤杨氏模量和截面积, N 为光纤缠绕的圈数, H 和 R 分别为弹性柱体的高度和半径。

X 是一个反映光纤相对约束作用的重要参数。在 (2) 式中, $E_f S_f$ 典型值为 860 N, 实际系统中一般用聚氨酯材料制作弹性柱体, 取其 $E = 10$ MPa, $\mu = 0.45$, $R = 5$ mm, $H = 15$ mm, $N = 60$, 得到 $X = 9.3$ 。由于 X 通常是一个比较大的值, 因此 E' 主要由柱体材料参数 E, μ 决定; 而 μ' 除了与柱体材料本身的泊松比有关外, 主要取决于 X , 即光纤相对约束作用, 这对弹性材料的选择提供了很大的方便。特别需要指出的是, 由于 X 几乎与 N 成正比, 所以缠绕多层光纤在增加光纤传感长度的同时, 降低了泊松比, 因而并不能提高灵敏度, 图 4 是这一特征的直观结果。对于光纤振动传感器的这一重要结构, 通过增加光纤长度可提高系统灵敏度的结论只在光纤未绕满弹性体时成立。

对系统的推挽式双柱体结构, 虽然系统总相位差为干涉仪两臂相位变化之和, 但由于加速度 a 产生的作用力 $F = ma$ (m 为质量块质量) 平分到了两个弹性柱体上, 因此系统的灵敏度并不会因此而改变。

对推挽式双柱体结构, 其谐振频率 f_0 为单柱体的 $\sqrt{2}$ 倍

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2E'\pi R^2}{mH}} \quad (3)$$

这一点对应用非常重要。

当振动频率 f 远小于 f_0 时, 考虑光纤光弹效应^[1,6,11]和 Michelson 干涉仪两倍光程, 可得系统相应的加速度相位灵敏度

$$\frac{\partial \phi}{a} = \frac{4\pi\mu'}{\lambda_0} \frac{m}{\pi R^2 E} L \left\{ 1 - \frac{1}{2} n^2 [(1 - \mu_f) p_{12} - \mu_f p_{11}] \right\} \quad (4)$$

其中 n 为光纤纤芯折射率, p_{11}, p_{12} 为弹光系数, 等式右边乘积的最后一项为弹光效应的影响, 其值为 0.784。由 (3), (4) 式给出其谐振频率和灵敏度随相关系数的变化曲线如图 4~6 所示。

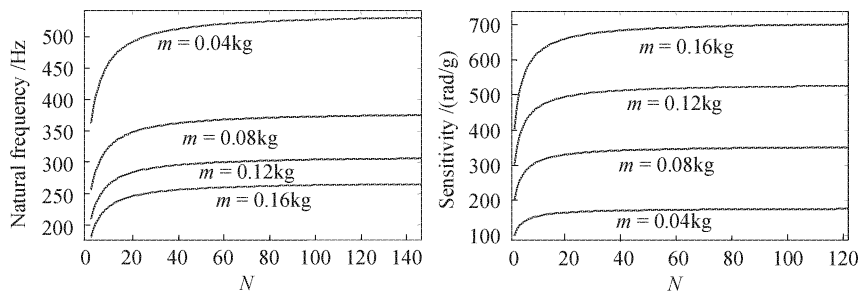


图 4 谐振频率和灵敏度随 m 和 N 变化的曲线

Fig. 4 Natural frequency and sensitivity varies with m and N

($E = 8$ MPa, $\mu = 0.45$, $R = 6$ mm, $H = 15$ mm)

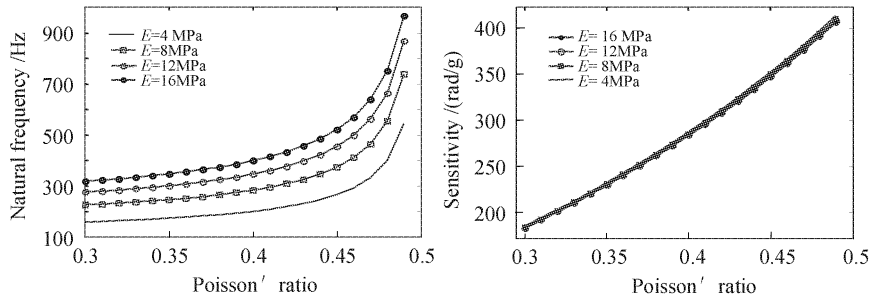


图 5 谐振频率和灵敏度随 E 和 μ 变化的曲线

Fig. 5 Natural frequency and sensitivity varies with E and μ

($N = 130, m = 0.08 \text{ kg}, R = 6 \text{ mm}, H = 15 \text{ mm}$)

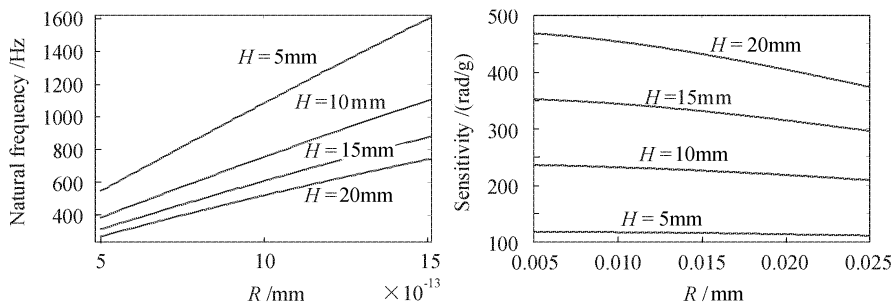


图 6 谐振频率和灵敏度随 R 和 H 变化的曲线

Fig. 6 Natural frequency and sensitivity varies with R and H

($E = 8 \text{ MPa}, \mu = 0.45, N = 130, m = 0.08 \text{ kg}$)

系统在全频段加速度灵敏度随频率变化由下式给出^[2]

$$\frac{\partial \phi}{a}(f) = \frac{\partial \phi}{a}(0) f_0^2 \sqrt{\frac{1}{(f^2 - f_0^2)^2 + \left(\frac{f f_0}{Q}\right)^2}} \quad (5)$$

式中 Q 为与阻尼有关的品质因子。

在实际应用中,一般要求传感器具有较高的灵敏度和较宽的工作频带,理论分析表明,在芯轴式光纤传感器中,这两者是互相制约的,提高灵敏度,将降低谐振频率,因而限制了工作频带。同理,拓宽工作频带必须以牺牲灵敏度为代价,在实际系统中,需根据实际的应用要求,进行各种参数的设计。另外,对于较有价值的芯轴式推挽结构,其几何尺寸、重物块质量是系统性能的关键技术参数,它决定了系统的体积和重量。通过对上述种种特性的分析,可能会改变关于干涉型光纤传感器工作频带宽、体积小、重量轻的观点,但它对正确地认识和设计芯轴式干涉型光纤微振动矢量传感器有着重要的意义。

对三轴正交的结构,当某一维弹性体产生轴向形变时,将受到另两维弹性体切变的约束,需对等效杨氏模量 E' 和泊松比 μ' 作进一步的修正,其灵敏度有所降低。但在这种结构中,由于横向形变得到较强的约束,可有效抑制由于制作工艺不完善产生

结构非对称的影响,使系统的矢量性得到进一步的改善。

4 实验结果

对所研制的光纤微振动矢量传感器进行了测量,弹性柱体材料为硅橡胶,其杨氏模量和泊松比分别为 $E = 8 \text{ MPa}, \mu = 0.45$,弹性柱体半径 $R = 6$

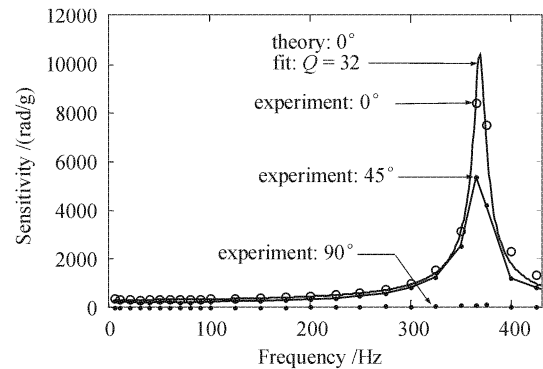


图 7 加速度灵敏度随频率变化的曲线

(图中角度为微振动矢量与柱体轴向的夹角)

Fig. 7 Sensitivity varies with frequency of vibration

(Angle in the figure is the angle between vibration vector and cylinder axial)

mm,高度 $H = 15$ mm,光纤长度 $l = 5$ m,缠绕圈数 $N = 130$,重物块的质量 $m = 0.08$ kg,光源波长 $\lambda_0 = 1.319$ μm ,光纤芯的折射率 $n = 1.456$,光纤玻璃层杨氏模量 $E_f = 70$ GPa,计算得到谐振频率为 375 Hz,静力加速度灵敏度为 356 rad/g。在 B&K4808 振动台上的频响测试结果如图 7。

由实验得到系统谐振频率为 370 Hz 左右,与 375 Hz 理论结果基本一致。在 5~200 Hz 频段系统响应平坦,灵敏度约为 340 rad/g,略低于 356 rad/g 理论值。进一步分析表明,灵敏度的降低是由于三维结构的约束引起的。

通过对实验所得数据的拟合,得到与系统阻尼有关的品质因子 $Q = 32$ 。

在 45° 方向的灵敏度约为 0° (轴向) 方向的 0.7 倍,与理论结果一致。在 5~450 Hz 频段内对 90° 方向的交叉响应进行了测量,得到正交响应为轴向响应的 0.5%。这些结果证实了该光纤微振动传感器具有良好的矢量性。

本检测系统最小可测相位为 10^{-5} rad,因此系统可测最小加速度达到 3×10^{-8} g。

参 考 文 献

- 1 R. D. Pechstedt, D. A. Jackson. Design of a compliant-cylinder-type fiber-optic accelerometer; theory and experiment [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(16):3009~3017
- 2 David A. Brown. Fiber optic accelerometers and seismometers [C]. *AIP Conference Proceedings*, **368**(1), April, 1996. 260~273
- 3 R. D. Pechstedt, D. A. Jackson. Performance analysis of fiber optic accelerometer based on a compliant cylinder design [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(1):207~213
- 4 S. T. Vohra, B. Danver, A. Tveten *et al.*. Fiber optic interferometric accelerometers [C]. *AIP Conference Proceedings*, **368**(1), April, 1996. 285~293
- 5 Carome. United States Patent [P]. Patent Number: US 4,799,752, Date of Patent: Jan. 24, 1989
- 6 Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Research on the phase sensitivity of mandrel type interferometric fiber-optic accelerometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, **21**(6):584~587
曹家年,张立昆,李绪友等. 心轴式干涉型光纤加速度传感器相位灵敏度特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2000, **21**(6):584~587
- 7 Ding Guilin, Liu Zhifu, Cui Yuming *et al.*. An all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinders [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3):340~343
丁桂兰,刘振富,崔宇明等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3):340~343
- 8 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):415~417
孟洲,胡永明,熊水东等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):415~417
- 9 A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10):1647~1653
- 10 Xu Zhiguan. Elastic Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990
徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,1990
- 11 Liao Yanbiao. Fibre Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000