

双圈同轴式光纤传感器在叶尖间隙测量中的应用

贾丙辉 冯 勇 贾文华

南京工程学院机械工程学院, 江苏 南京 611167

摘要 为满足燃气轮机叶尖间隙测量需要,设计了一种双圈同轴式光纤位移传感器。根据光纤对光强耦合原理得到了传感器探头有无准直透镜时双圈同轴光纤束的光强调制特性函数,分析了透镜对反射式光纤位移传感器测量特性的影响,仿真评估了透镜透射效率及光的干涉对传感器测量结果的影响。进行了光纤束前端有无准直透镜情况下的静态测量实验及模拟烟雾干扰实验。结果表明,传感器线性测量范围约为2.6 mm,且具有较好的抗烟雾干扰能力。为反射式光纤位移传感器在燃气轮机叶尖间隙复杂环境下的测量应用提供了参考。

关键词 传感器; 叶尖间隙; 光纤位移传感器; 烟雾干扰; 抗污染

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.100603

Application of Optical Sensor with Two-Circle Reflective Coaxial Fiber in Tip Clearance Measurement

Jia Binghui Feng Yong Jia Wenhua

School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 611167, China

Abstract In order to meet the measurement requirements of gas turbine tip clearance, the displacement optical sensor with two-circle reflective coaxial fiber probe is designed. Output functions of the fiber sensor without and with collimating lens are gained based on light intensity coupling principle analysis. The effect of lens on reflective optical fiber displacement sensor characteristics is analyzed. Then, effect of transmission efficiency and interference on measurement results is evaluated. The static measurement and smog interference experiment of the sensor with and without collimating lens are completed. The results show that the linear measuring range of the sensor designed is 2.6 mm, and the antipollution ability is proved. It provides a reference for the application of reflective optical fiber displacement sensor in gas turbine tip clearance environment.

Key words sensors; tip clearance; optical fiber displacement sensor; smog interference; antipollution

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 080.3630

1 引言

发动机转子叶尖间隙的大小是影响发动机性能的重要参数之一。间隙过大会导致发动机性能降低,过小则易发生叶尖与机匣的碰磨,甚至引发严重的事故。使发动机在工作包线内的叶尖间隙均处于最佳状态对提高发动机性能、延长其工作寿命、降低油耗和有害气体的排放有重要意义。叶尖间隙精密测量是实现间隙主动控制和优化设计的重要保障。

反射式光强调制型光纤位移传感器因其结构简单、体积小、重量轻、设计灵活、带宽大、灵敏度高以及成本低等特点^[1-3],得到了越来越广泛的应用。胡新宁等^[4]将这种传感器应用于测量超导转子悬浮微位移;徐晓梅^[5]则将这种传感器与反射棱镜相结合用以孔内表面粗糙度的检测;陈启梦等^[6]将反射式光强调制型传感器用于液面高度的测量;韦宣等^[7]在微动工作台的位移检测中应用了这种传感器。为提高其测量可靠性,杨华勇等^[8-9]分别针对传感器探头将多模光纤和单模光纤作为传光光纤条件下,研究了反射面曲率半径对光强调制特性的影响;马惠萍等^[10-11]分别就平行光束、三层反射式结构的光纤束位移传感器的特性进行了研究;

收稿日期: 2015-03-20; 收到修改稿日期: 2015-06-01; 网络出版日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(51405222)、南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ201303)、江苏省自然科学基金(SBK201343507)

作者简介: 贾丙辉(1983—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感、测控技术方面的研究。E-mail: bhjia@njit.edu.cn

张平等^[12-13]则研究了双圈同轴式光强调制型光纤位移传感器的光强调制特性,并将这种传感器应用于润滑膜的测量中,取得了较大进展。金远强等^[14]则研究了光在介质表面的散射特性和介质表面轮廓的分布函数对传感器测试精度的影响。这些研究为推动反射式光纤位移传感器的实际应用奠定了理论基础,同时也解决了该类型传感在实际应用中所面临的部分困难。从国内外对反射式光纤位移传感器的应用研究看,双圈同轴式反射式光纤位移传感器因其具有结构简单、抗噪特性好等优点得到了广泛关注^[12-14]。

由于燃气轮机叶尖间隙测量环境复杂,将光纤端面直接暴露于环境中,对传感器的使用带来了不安全因素。在前人研究的基础上,设计双圈同轴式光纤位移传感器,通过分析光强调制特性及其引入透镜对传感器测量结果的影响,进行有无透镜条件下的传感器静态测量及烟雾模拟实验,通过实验结果的对比分析,探索反射式光纤位移传感器实际应用中抗污染能力的提高方法及其应用于燃气轮机叶尖间隙测量的可行性。

2 反射式光纤位移传感器调制原理

2.1 双圈同轴反射式光纤束

双圈同轴式光纤束排列方式如图1所示,中间为入射光纤,同轴紧密排列两圈接收光纤。第一组接收光纤束(接收光强记为 I_1)由6根多模光纤组成,第二组接收光纤束(接收光强记为 I_2)由12根多模光纤组成,根据与入射光纤的距离,将第二组接收光纤束分成两组,即6根多模光纤束a和6根多模光纤束b。

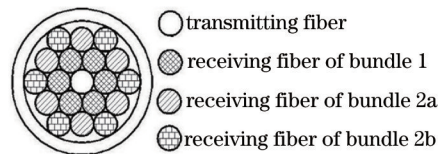


图1 光纤探头光纤束排列方式

Fig.1 Fiber probe bundle arrangement

2.2 双圈同轴式光纤束传感器的光耦合原理

双圈同轴式光纤束传感器的光耦合原理如图2所示,根据几何光学,光纤端面放置于距被测物体 z 的位置上,故在被测物体表面之后相距 z 处形成一个接收光纤的虚像。因此,确定调制器的响应等效于计算虚拟接收光纤与入射光纤之间的耦合。入射光纤端面射出的光成圆锥型,锥角的大小取决于光纤数值孔径角的大小。入射光纤发出的光束经过被测物体表面反射后,部分或全部进入接收光纤,当改变入射光纤和接收光纤相对于被测物体表面的间距时,接收光纤被反射光斑所覆盖的面积随之改变,接收光纤接收到反射光总量也将发生变化,即对所传输的光进行了调制。

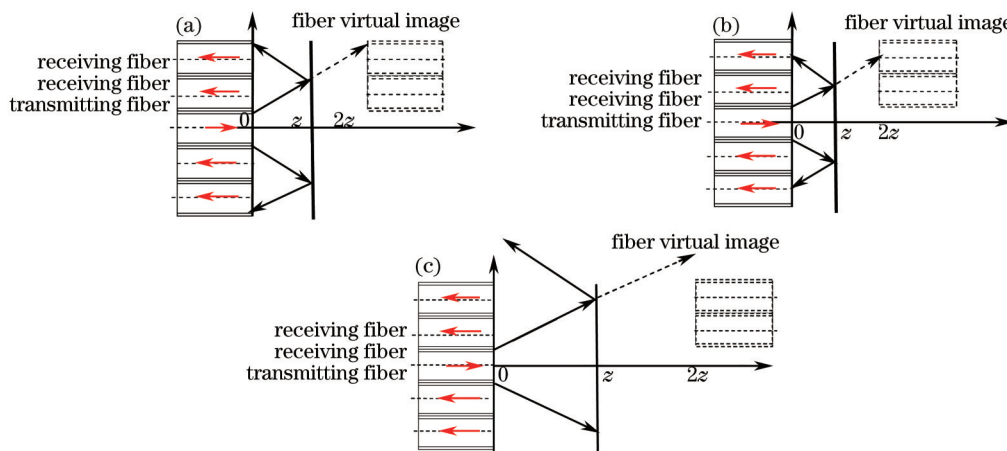


图2 双圈同轴式光纤传感器光耦合原理。(a) 初始距离; (b) 距离减小; (c) 距离增大

Fig.2 Optical coupling principle of two-circle coaxial fiber. (a) Initial position; (b) distance decrease; (c) distance increase

图1所示的双圈同轴式光纤传感器的探头结构,以入射光纤中心轴线为 Z 轴,以过双圈同轴光纤束的光纤端面5根光纤中心线为 R 轴建立坐标系(图2所示),假设反射面为光滑镜面,不考虑散射的影响,根据光纤端面光强分布假设及双圈同轴式光纤束结构,可以得到最终双圈同轴光纤位移传感器的输出特性调制函数为^[13-14]

$$M(z) = \exp\left\{\frac{-3d^2}{a_0^2[1 + \zeta(2z/a_0)^{3/2} \tan \theta_0]^2}\right\} + \exp\left\{\frac{-2d^2}{\sigma^2 a_0^2[1 + \zeta(2z/a_0)^{3/2} \tan \theta_0]^2}\right\}, \quad (1)$$

式中 $M(z)$ 为两组接收光纤束光强的比值, $d(\mu\text{m})$ 表示入射光纤与第一组接收光纤束的任意两根光纤对距离, z 为探头到被测平面的距离, a_0 为纤芯半径, θ_0 入身光纤数值孔径, ζ 为光强调制因子。

3 透镜对传感器调制输出特性的影响

3.1 带透镜光纤束调制特性

准直后的光照射在被测物表面后的光强分布,如图3所示,带准直透镜光纤出射端直接照射在平面上形成的光斑的光强分布均匀,光斑边缘光强与光斑中心区域光强差别不大。

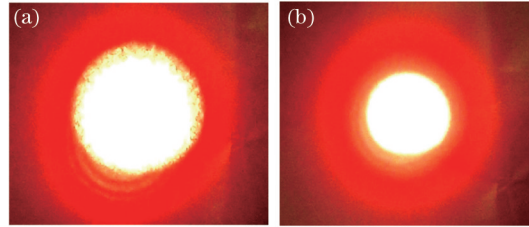


图3 光斑的光强分布。(a) 无准直透镜; (b) 有准直透镜

Fig.3 Facular intensity distribution on object surface. (a) No lens; (b) with lens

为此,可认为带准直透镜光纤出射端光强分布以几何分布为主,根据光强分布特点可引入一个大于1的无量纲调和参数 λ ,得到带透镜光纤探头出射端光强分布等效半径的计算式:

$$\omega(z) = \sigma a_0 \left[1 + \zeta' \left(\frac{z}{a_0} \right)^{3/2} \tan \theta_0 \right], \quad (2)$$

式中 $\zeta' = \zeta/\lambda$ 。

将(2)式代入(1)式得到带准直透镜传感器的光强调制函数如下

$$M(z) = \exp\left\{\frac{-3 \cdot d^2}{a_0^2[1 + \zeta'(2z/a_0)^{3/2} \tan \theta_0]^2}\right\} + \exp\left\{\frac{-2 \cdot d^2}{a_0^2[1 + \zeta'(2z/a_0)^{3/2} \tan \theta_0]^2}\right\}. \quad (3)$$

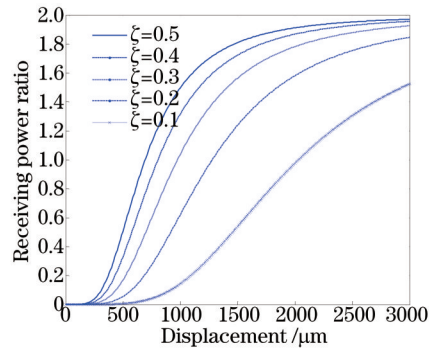


图4 无量纲调和参数 ζ' 对传感器调制输出特性的影响

Fig.4 Effects of ζ' on sensor output characteristics

对所研究的双圈同轴光强调制型反射式光纤传感器,按(3)式分别取参数 ζ' 为 0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 在 Matlab 环境下仿真,得到传感器调制输出特性如图4所示。随 ζ' 的减小,即光强分布越均匀,传感器调制输出线性度越好,可测量线性范围也得到较大的扩展。说明在光纤出射端加准直透镜对传感器输出特性有较好的改善,传感器的测量线性范围得到扩展并且传感器输出的线性度更好。

3.2 透镜透射率及光的干涉对接收光强的影响

3.2.1 透镜透射率对接收光纤光强的影响

导致透镜光学损失的原因大致可分为反射损失、吸收损失、工艺性损失及结构损失几类,其中,以反射损失最为重要。

对于固定折射率的透镜,其透射率随入射角度的变化规律如图5所示。由图5可知,对于入射角在一定范围内(小于 30°)的透镜,其透射率均高于96%。设计中选取光纤的出射角为 12.7° ,故由透镜表面反射所引起的光学损失很小,可忽略不计。

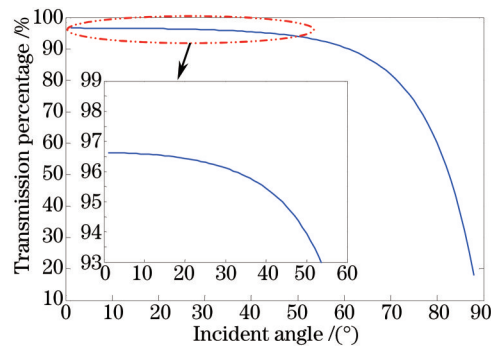


图5 透镜透射率随入射角度的变化规律

Fig.5 Transmittance of lens versus incident angle

3.2.2 干涉对接收光纤光强的影响

所设计传感器出射光经透镜传播照射在被测量对象表面的过程如图6所示。被测对象表面反射回的光与透镜表面反射回的光线满足干涉条件。考虑到准直透镜前后表面(图6所示表面1和表面2)、透镜后表面与蓝宝石窗前表面(图6所示表面2和表面3)及蓝宝石窗前后表面(图6所示表面3和表面4)反射光功率很小,忽略其干涉影响。只考虑传感器探头出射端面反射光与叶片叶尖端面反射光的干涉,根据研究条纹对比度定义,通过仿真分析,得到两列光强对比值对条纹对比度变化的影响如图7所示。由图7可知,随两列干涉光光强比值的增大,条纹对比度逐渐降低。

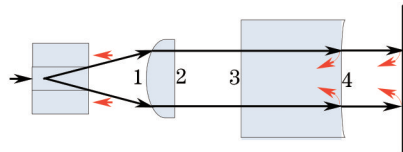


图6 传感器出射光经透镜照射在被测平面过程示意图

Fig.6 Sensor output light irradiation on measured plane process schematic diagram

所设计传感探头及准直透镜的透射率均大于入射光的96%。光纤探头出射光经过准直透镜和蓝宝石窗共4个平面,设每个面损失的光为入射光的4%,则从平面反射回的光强与蓝宝石窗表面反射回光强的比值约为24,故可认为干涉不影响反射光斑光强的分布。

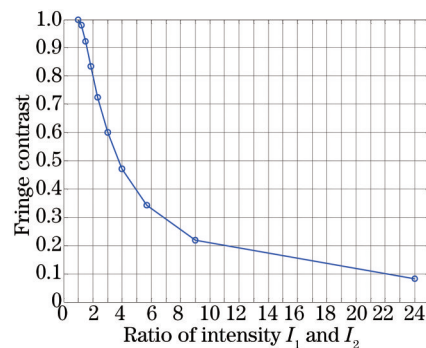


图7 两列干涉光光强的比值对条纹对比度变化影响

Fig.7 Effects of ratio of intensity I_1 and I_2 on fringe contrast

4 实验研究

4.1 双圈同轴式光纤位移传感器制作

根据前述分析设计双圈同轴反射式光纤位移传感器结构参数如表1所示。

表1 传感器探头设计参数

Table 1 Parameter of sensor fiber probe

Parameters		Data
Fiber distance		330 μm
Transmitting fiber	Fiber radius	150 μm
	NA	0.22
Receiving fiber	Fiber radius	150 μm
	NA	0.37

4.2 传感器静态标定

传感器静态测量台如图8所示。光纤位移传感器的光纤探头通过紧定螺钉固定在静态标定台支架的一端,标定金属平面作为反射体的反射面,反射面与接收光纤的轴线垂直,通过旋转微动调节器就可以改变反射面相对接收光纤入射端的轴向间距,螺旋测微器的读数即为光纤与反射体之间的位移值。图8(a)所示为光纤端不带透镜静态标定实验装置、图8(b)所示为光纤探头前端带准直透镜静态标定实验装置。

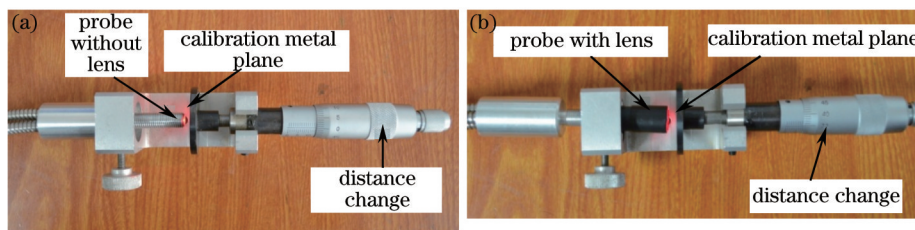


图8 光纤位移传感器静态测量。(a) 探头不带准直透镜; (b) 探头带准直透镜

Fig.8 Optical fiber displacement static calibration of sensor. (a) Without lens; (b) with lens

实验时,操纵螺旋测微仪,推动被测金属平面相对光纤传感探头在0~3.5 mm范围径向移动,每移动50 μm 获取一次数据。分别得到传感探头前无准直透镜和有准直透镜时双圈同轴型反射式光纤叶尖间隙传感器两组接收光纤进程和回程的比值与位移关系曲线。图9所示为无准直透镜时两组接收光纤进程和回程的比值与位移关系曲线;图10所示为带准直透镜时两组接收光纤进程和回程比值与位移关系曲线。

实验所得传感器特性曲线随着位移增大而上升,然后又趋于平缓,与传感器特性仿真曲线(图4)整体趋势一致。

传感器探头带准直透镜和无准直透镜两种状态下的实验结果(图9和图10所示)比较可知,光纤束探头装有准直透镜将无准直透镜情况下传感器测量范围由约为1.85 mm扩展到约为2.6 mm,传感器测量范围扩展了43.2%。但灵敏度略有损失。

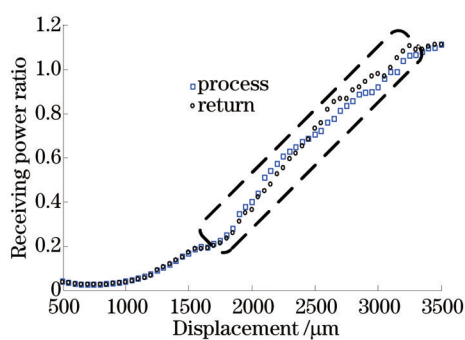


图9 两组接收光纤进回程的比值与位移关系曲线(无透镜)

Fig.9 Process and return ratio versus displacement of two receiving fiber (without lens)

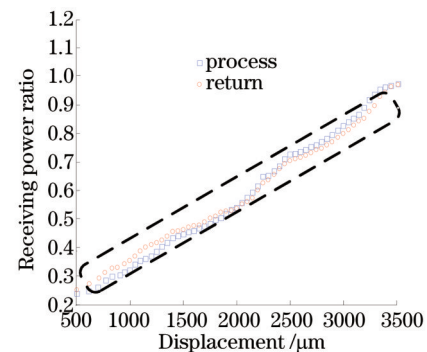


图10 两组接收光纤进回程的比值与位移关系曲线(带透镜)

Fig.10 Process and return ratio versus displacement of two receiving fiber (with lens)

4.3 烟雾对传感器测量特性的影响

为检验所设计传感器抗干扰能力,采用超声波加湿器产生烟雾模拟传感器在使用中可能面对的干扰。实验中,在水里加入一定量的精油,以提高所产生水雾的复杂度,将水雾化发生器雾化的烟雾喷在光纤叶尖间隙传感器探头与被测平面之间的区域,如图11(a)和(b)所示为模拟烟雾对传感器测量特性的影响实验。

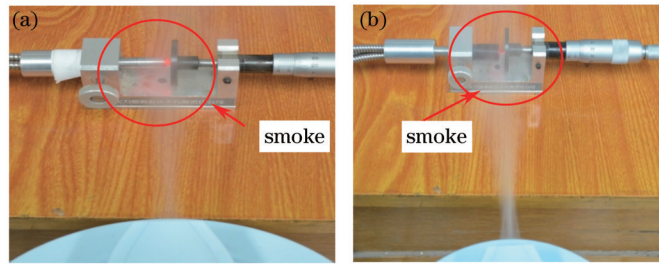


图11 模拟烟雾对传感器测量特性的影响实验。(a) 无透镜; (b) 有透镜

Fig.11 Experimental of simulation smoke effect on sensor characteristics. (a) Without lens; (b) with lens

实验所得模拟烟雾对接收光纤光强的比值的的影响结果分别如图12和图13所示。由图12可知,传感器探头无准直透镜情况下,随位移增大,烟雾对传感器测量结果影响越大;而由图13可以看出,对于传感器探头设计有准直透镜情况下,随位移增大,烟雾对传感器测量结果的影响变化较小。

在无准直透镜情况下,有烟雾干扰情况下接收光纤光强比值与无烟雾干扰情况下接收光纤光强比值的对比结果(图12)显示:探头不装准直透镜情况下,模拟烟雾干扰使得传感器测量结果产生较大偏差,其最大接收光强比值偏差约0.6,约为传感器测量范围的32.4%;在有准直透镜情况下,有烟雾干扰情况下接收光纤光强比值与无烟雾干扰情况下接收光纤光强比值的对比结果(图13)显示:烟雾干扰使得传感器测量结果产生较小偏差,其最大接收光强比值偏差仅为0.11,约为传感器测量范围的4.4%。表明带准直透镜情况下的传感器具有更好的抗干扰特性。

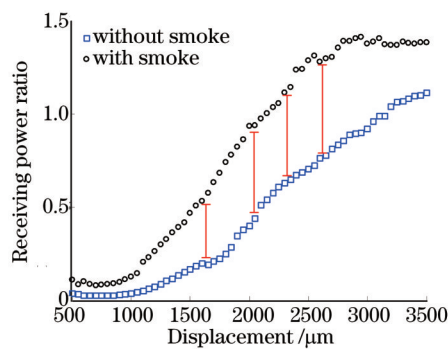


图12 模拟烟雾对接收光纤光强的比值的的影响(无透镜)

Fig.12 Effects of simulated smoke on ratio of receiving fiber intensity (no lens)

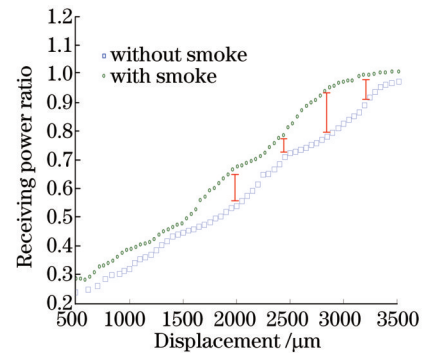


图13 模拟烟雾对接收光纤光强的比值的的影响(有透镜)

Fig.13 Effects of simulated smoke on ratio of receiving fiber intensity (with lens)

5 结 论

设计了用于燃气轮机叶尖间隙精密测量用双圈同轴式光纤束,在其光强耦合原理分析基础上,得到了光纤束前端装带准直透镜时的传感器光强调制模型及传感器测量特性。评估了引入透镜后透镜透射率及光的干涉因素对传感器测量结果的影响。为研究所设计传感器的性能,进行了有、无准直透镜下的静态标定实验、模拟烟雾干扰实验,结果表明所设计传感器测量范围约为2.6 mm,且具有较好的抗烟雾干扰能力。

参 考 文 献

- Zhu Shanying, Cao Huimin. Theoretical modeling and simulation implementation of reflective optical fiber bundle probe [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, (5): 75-78.
- 朱珊莹, 曹汇敏. 反射式光纤束探头理论建模和仿真实现[J]. 仪表技术与传感器, 2013, (5): 75-78.
- A Shimamoto, K Tanaka, F Suganuma. Development of a differential optical-fiber displacement sensor[J]. Appl Opt, 1999, 38(7): 1103-1109.
- J Zheng, S Albin. Self-referenced reflective intensity modulated fiber optic displacement sensor[J]. Opt Eng, 1999, 38 (2): 227-232.
- Hu Xinning, Cui Chunyan, Lei Yuanzhong, et al. Application of fiber optic displacement sensor to measuring suspension micro-displacement of superconducting rotor in cryogenic instrument[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(9):

- 1342-1345.
胡新宁, 崔春艳, 雷沅忠, 等. 光纤位移传感器在低温装置中测量超导转子悬浮微位移的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1342-1345.
- 5 Xu Xiaomei. Inner Surface Roughness Measurement of Holes Based on Reflective Intensity Modulation Fiber Optic Sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
徐晓梅. 反射式强度调制型光纤传感孔内表面粗糙度检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- 6 Chen Qinmeng, Ma Chenhao, Li Henan, *et al.*. Research on liquid level measurement based on optical fiber sensor[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(4): 547-549.
陈启梦, 马辰昊, 李赫男, 等. 基于光纤传感器的液面高度测量技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(4): 547-549.
- 7 Wei Xuan, Yue Jing, Shen Awei, *et al.*. Design of optical fiber displacement sensor for micro motion worktable[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(1): 115-117.
韦 宣, 乐 静, 申阿维, 等. 用于微动工作台的光纤位移传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(1): 115-117.
- 8 Yang Huayong, Lü Haibao. Influence on the intensity modulation of a reflective fiber optic displacement sensor induced by ref-lector shape[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(4): 379-382.
杨华勇, 吕海宝. 反射面形状对反射式光纤位移传感器理论特性的影响[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 379-382.
- 9 Shan Mingguang, Peng Huan, Zhong Zhi, *et al.*. Influence of reflector shape on the intensity modulation of fiber optical distance sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(12): 2204-2208.
单明广, 彭 欢, 钟 志, 等. 反射面形状对光纤位移传感器光强调制特性的影响[J]. 光子学报, 2010, 39(12): 2204-2208.
- 10 Ma Huiping, Liu Lihua, Yang Yueming, *et al.*. Fiber optic displacement sensors based on the principle of collimated beam reflective intensity modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 23(2): 176-181.
马惠萍, 刘丽华, 杨乐民, 等. 平行光束反射光强调制型光纤位移传感器研究[J]. 光学学报, 2003, 23(2): 176-181.
- 11 Liu Lihua, Che Rensheng, Li Jianxin, *et al.*. Design of reflective fiber displacement sensor with three-layer coaxial fiber bundle[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(z1): 25-29.
刘丽华, 车仁生, 李建新, 等. 三层反射式同轴光纤束位移传感器设计[J]. 光学精密工程, 2005, 13(z1): 25-29.
- 12 Zhang Ping, Zhang Xiaodong, Liu Chunxiang. Output characteristics of the displacement sensor with two-circle reflective coaxial fiber[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(3): 27-30.
张 平, 张小栋, 刘春翔. 双圈同轴式光纤位移传感器的输出特性[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(3): 27-30.
- 13 Yang Liang, Zhang Xiaodong. Research on sensor with two-circle reflective coaxial fiber[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 192-196.
杨 亮, 张小栋. 双圈同轴光纤束位移传感器研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 192-196.
- 14 Jin Yuanqiang, Zhou Yan, Hu Liguang, *et al.*. Research on measurement accuracy of intensity modulated fiber optic sensor [J]. Transducer and Micro-system Technologies, 2007, 26(6): 48-50.
金远强, 周 岩, 胡丽国, 等. 光强调制式光纤传感器测量精度的研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(6): 48-50.

栏目编辑: 宋梅梅