

燃气轮机叶片叶尖间隙光纤测量系统设计

贾丙辉, 闫国栋, 林晓华

(南京工程学院 机械工程学院, 南京 611167)

摘要: 燃气轮机转子叶尖间隙对发动机性能有重要影响, 为实现其精密测量, 首先, 根据光纤对光强耦合原理得到了双圈同轴光纤束的光强调制特性函数; 接着, 分析了倾角变化对反射式光纤位移传感器测量特性的影响; 然后, 完成了间隙测量系统设计; 最后, 通过静态测量实验和不同转速下的动态测量实验验证了所设计系统的性能; 实验结果表明: 所设计传感器线性测量范围为 2 mm, 测量系统动态性能较好。

关键词: 光纤位移传感器; 叶尖间隙; 测量系统

Design of Gas Blade Tip Clearance Measurement System Based on Optical Fiber Sensor

Jia Binghui, Yan Guodong, Lin Xiaohua

(School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 611167, China)

Abstract: In order to meet the measurement requirements of gas turbine tip clearance, the two-circle reflective coaxial fiber probe was designed. First, an output function of the fiber sensor was gained based on light intensity coupling principle analysis. Second, the effect of angle of inclination on reflective optical fiber displacement sensor characteristics is analyzed. Then, the tip clearance measurement system was designed. Finally, the static and dynamic measurement experiments were completed. The results show: sensor designed linear measurement range is 2mm, and the dynamic performance of measurement system designed meet the requirements well.

Keywords: optical fiber displacement sensor; tip clearance; measurement system

0 引言

国外一些先进的航空企业较早致力于发动机的间隙测量研究, 并将间隙测量的研究成果广泛应用于航空发动机研制中, 并开发出各种叶尖间隙监测系统^[1]: 如基于电涡流传感器的转子叶片测振仪、电容探测器、基于光学三角传感器测量原理的光学间隙检测仪等。国内学者, 就叶尖间隙的测量技术也进行了许多有益的探索, 如张娜, 黄春峰等就叶尖间隙的测量技术多年来的发展情况进行了综述^[2]; 马坚刚^[3], 龙成^[4]等就电容法叶尖间隙测量技术进行了探索, 但在应用中还有许多问题需要解决, 如电容传感器的校正, 非线性补偿等。

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^[5], 得到了越来越广泛的应用。胡新宁^[6]等将这种传感器应用于测量超导转子悬浮微位移, 徐晓梅^[7]则比较新颖的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^[8]等将反射式光强调制型传感器用于液面高度的测量。刘晓华等则用以氢气浓度监测^[9]。

为实现燃气轮机叶尖间隙的动态测量, 在叶尖间隙变化特点基础上, 设计双圈同轴式光纤位移传感器, 建立其光强调制特性, 进行倾角变化对传感器性能影响的分析, 最终确定传感器设计参数, 并建立测量系统。

1 反射式光纤位移传感器调制原理

1.1 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。

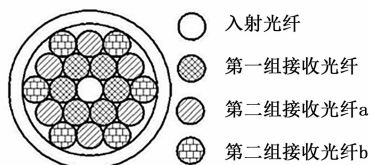


图 1 光纤探头光纤束排列方式

1.2 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。

收稿日期:2014-04-18; 修回日期:2014-05-19。

基金项目:南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ201303)。

作者简介:贾丙辉(1983-),男,山东菏泽人,博士,讲师,主要从事传感器及测控技术方向的研究。

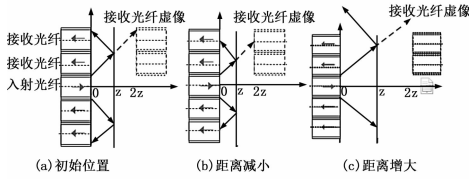


图 2 双圈同轴式光纤传感器光耦合原理

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五根光纤中心线为 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，根据光纤纤端光强分布假设及双圈同轴式光纤束结构^[10-11]，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^[10-11]：

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

$M(z)$ 为两组接收光纤束光强的比值； d 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，为 μm ； 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。

2 叶尖表面倾斜度对传感器理论特性的影响分析

为使问题简化，一般设发射光纤和接收光纤的参数完全相同，即 $r_1 = r_2 = r$, $\theta_{N1} = \theta_{N2} = \theta_0$ 。假设两光纤的轴互相平行且与反射面的有一个很小的夹角 α ，称为反射面的倾斜角。当反射面向着远离接收光纤的方向倾斜时，记 α 为负，反之为正。对于本文中所设计的光纤同轴式传感器探头结构，当叶片叶尖端面发生 α 角的倾斜时，反射面将有部分远离接收光纤，同时有部分端面靠近接收光纤端面。

注意到由于探头端面是当 α 为负时，反射回的光线的入射方向与接收光纤端面法线的夹角 $\theta_0 + |2\alpha| > \theta_0$ ，光在接收光纤端面发生全反射，不能在接收光纤中传播；由于光纤端场光强分布是不同程度均匀分布和高斯分布的结合，使得该情况下的问题比较复杂，通过几何光纤的分析和计算很难得到准确的光学特性，此处只研究 α 为正的部分。

如图 3 所示，根据几何光学相关理论，光纤端面放置于距被测物体 z 的位置上，在被测物体表面之后相距 z 处形成一个接收光纤的虚像。假设叶片叶尖端面有一个微小的倾斜度 α ，接收光纤（端面 PT ）在倾斜面 MN 后形成的虚像（端面 $P'T'$ ）；由 A 点发出的某条光线的出射角为 θ ，经倾斜面 MN 折射后入射到接收光纤端面。设 $|FB| = d$ ，由几何关系可知：

$$|AF| = r \cdot \cot\theta \quad (2)$$

$$|AB| = |AF| + d \quad (3)$$

可以得到，

$$|AB| = d + r \cdot \cot\theta \quad (4)$$

光被倾斜的叶片端面反射后，在光纤的公共端面上将形成一个椭圆形光斑。所形成的椭圆光斑可以用椭圆方程来表示，即，

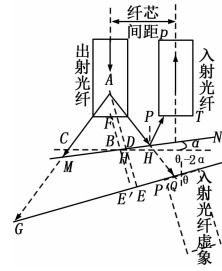


图 3 光纤轴与反射面不垂直且 α 为正

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

式中， $a = |GQ|/2$, $b \approx 2d \tan\theta_0 + r$, $x_0 = |GE| - a$ 。由图 4 所示几何关系，可得，

$$|AE| = |AB| \cdot \tan^2\alpha + 2|FB|/\cos\alpha = (d + r\cos\theta) \cdot \tan^2\alpha + 2d/\cos\alpha \quad (6)$$

$$|GE| = |AE| \cdot \tan(\theta + \alpha) \quad (7)$$

$$|GQ| = |AE| \cdot (\tan(\theta + \alpha) + \tan(\theta - \alpha)) = (d + r\cos\theta) \cdot \tan^2\alpha + 2d/\cos\alpha(\tan(\theta + \alpha) + \tan(\theta - \alpha)) \quad (8)$$

由上述分析可见，叶片叶尖端面的倾斜角会对反射光斑产生影响，从而导致接收光纤与反射光斑之间面积的交迭变化。当 α 沿正方向增大时，随光纤对端面与反射面的距离的增大，反射椭圆光斑与接收光纤端面的交迭面积减小，入射光线与接收光纤端面法线夹角减小。对于接收光纤数值孔径大于发射光纤数值孔径的光纤对，当 α 沿负方向增大时，随光纤对端面与反射面的距离的增大，反射椭圆光斑与接收光纤端面的交迭面积增大。故 α 沿负方向增大数值应满足 $\theta + 2\alpha < \theta_0$ 。

3 测量系统构建

3.1 光纤传感器参数选择

基于上述的传感器工作原理，经分析选择传感器参数如表 1 所示。

表 1 传感器探头设计参数

参数名称		数值
纤芯间距		330 μm
发射光纤	光纤半径	150 μm
	数值孔径	0.22
接收光纤	光纤半径	150 μm
	数值孔径	0.37

所设计双圈同轴式光纤探头等间距紧密排列，不考虑附加弯曲损耗，并将其系数进行归一化处理：

$$\begin{aligned} \rho_1 K_0 K_1 \cdot \exp(-\sum_j \eta_j r_j) &= \\ \rho_2 K_0 K_2 \cdot \exp(-\sum_j \eta_j r_j) &= \\ \rho_3 K_0 K_3 \cdot \exp(-\sum_j \eta_j r_j) &= 1 \end{aligned} \quad (9)$$

根据所选择的光纤探头参数，取 $\zeta = 0.5$ 则可得参数确定之后双圈同轴反射式光纤位移传感器的输出特性仿真曲线，如图 4。

3.2 叶尖间隙测量系统组成及电路设计

叶尖间隙测量系统包括激光源、光纤探头、光电转换器、

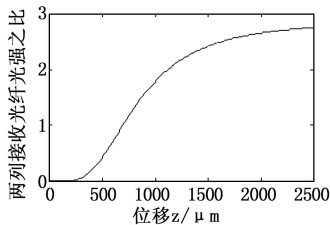


图 4 传感器输出特性仿真曲线

信号放大与调理电路、数据采集卡、计算机。系统采用的是半导体激光器, 输出功率为 30 mW, 激光波长约为 650 nm 红光。光电转换器选用 OPT101, OPT101 芯片在一个单片上集成了跨阻抗放大器和光电二极管, 可消除分开设计中经常出现的如漏电流误差、噪声交叉干扰以及杂散电容引起的增益峰化等问题。此外, 为了消除该芯片所产生的暗电流, 在应用中增加了外围补偿电路。信号放大电路中, 采用了精密放大器 AD620。由调理电路所输出的叶片扫过传感器探头的信号经 PCI 数据采集卡采集, 进入计算机进一步处理, 得到叶尖间隙变化信息。数据的采集与处理程序在 Labview 软件环境下编写实现。

4 实验研究

4.1 传感器静态测量

根据前述传感器及系统结构设计制作传感器系统, 以螺旋测微器为传感器静态测量台。静态测量时, 将光纤位移传感器的光纤探头通过紧定螺钉固定在静态测量台支架的一端, 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, 通过旋动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。

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。得到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 5 所示为两组接收光纤进程和回程的比值一位移曲线。

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。

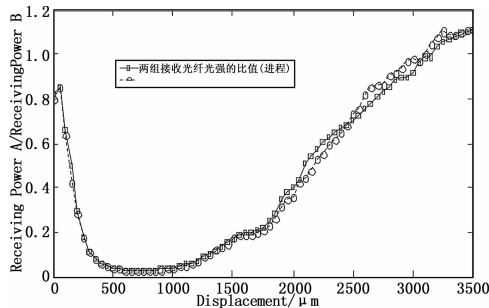


图 5 两组接收光纤进回程的比值一位移曲线

4.2 测量系统动态测量

旋转叶片叶尖间隙的动态测量在模拟转子实验台上进行。被测带叶片模拟实验转子盘上有叶片 32 个, 每个叶片高约为

1.2 cm。转子实验台可调速范围为 0~6 000 r/min; 实验中, 通过调节转子转速分别为 1 000 r/min, 2 000 r/min, 3 000 r/min, 4 000 r/min。通过测取在不同转速下的叶尖间隙变化, 用于验证测量系统的动态性能。实验结果如图 6。由图 6 可以看出, 不同转速下所测得叶尖间隙变化可知, 由于转速变化, 使得转子振动发生变化, 当转子转速达到 4 000 r/min 时, 由于趋近于转子临界转速, 导致叶尖间隙变大。

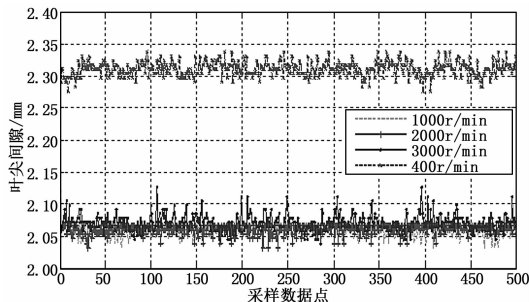


图 6 不同转速下叶尖间隙的变化

5 结论

针对燃气轮机转子叶尖间隙测量需求, 设计了双圈同轴反射式光纤位移传感器, 在对其光强耦合原理分析基础上, 得到了其光强调制模型并分析了叶片倾角变化对传感器测量性能的影响。最后, 通过对测量系统静、动态测量实验验证了系统的可行性。

参考文献:

- [1] Andreas von Flotow, Mathieu Mercadal and Peter Tappert. Health Monitoring and Prognostics of Blades and Disks with Blade Tip Sensor [A]. Aerospace Conference Proceedings IEEE [C]. 2000.
- [2] 张娜, 黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术 [J]. 航空制造技术, 2010, (13): 41-45.
- [3] 马坚刚, 张天宏, 朱理化. 基于 AD7746 的电容法间隙测量应用系统研究 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27 (2): 65-70.
- [4] 龙成, 段发阶, 欧阳涛. 超外差变频接收技术在叶尖间隙测量中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (3): 108-110.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘晓华, 刘晓军, 宋志章. 基于光纤束反射驱动的氢气浓度监测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (6): 1449-1451.
- [10] 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.
- [11] 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.