

用于航空发动机叶尖间隙测量的 光纤传感器

张 灿 杨 训

(西北工业大学动力与能源学院,西安 710072)

摘 要 设计了用于航空发动机叶尖间隙测量的光纤传感器。介绍了系统工作原理。研究了光纤传感器的输出特性。针对影响因素,采用补偿技术对测量信号进行处理。对传感器性能进行仿真分析,得到了线性的输出特性曲线,同时表明补偿技术能有效地消除各影响因素对输出特性的影响。

关键词 光纤传感器 叶尖间隙 航空发动机 补偿技术

中图法分类号 V232.4; **文献标志码** B

航空发动机的叶尖间隙是指航空发动机的各级转子叶片叶尖与发动机机匣之间的距离,它对航空发动机的性能有很大影响。间隙过大,会引起倒流和潜流,影响压气和涡轮效率,甚至造成喘振;间隙过小,有可能导致转子叶片叶尖与机匣碰撞,危及发动机的安全。所以,精确地测量叶尖间隙至关重要^[1]。

近几年,随着光纤技术的发展,将光纤应用到航空发动机叶尖间隙测量开始引人关注。与其他技术相比,光纤传感器有不可比拟的优点。光纤是非导体,适合电磁干扰严重的工作环境,同时测量不受叶片材料限制;其体积小,轻便,便于安装和使用,尤其在中间级测量时具有很大的优势;非接触测量,能够保证发动机的安全;光纤由耐高温石英制成,去掉涂敷层后用耐高温无机胶粘合,非常适合高温条件下工作。经过近年的发展,光纤位移传感器主要有光强调制式和光干涉式,其中强度调制型传感器原理简单、设计制造方便、灵敏度高,因此现采用了强度调制型光纤传感器。

1 传感器结构设计

强度调制型光纤叶尖间隙测量的原理图如图1

所示,激光发射器发出的光经发射光纤照射到叶尖顶端,反射回来的光由接收光纤接收。接收到的光信号经过光电设备转换成电信号,并被系统采集,经数据处理后,得到间隙值,参考转速传感器信号,即可得到对应叶片的叶尖间隙。

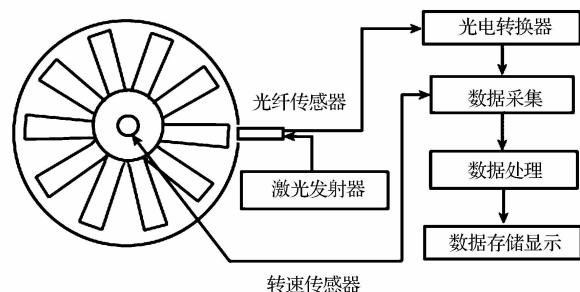


图1 强度调制型光纤叶尖间隙测量系统组成

由于航空发动机的转速高,叶尖间隙值小,要求传感器能够测量微小位移并且具有高灵敏度。传感器测量时,被测叶尖端面始终在变化,不同表面的反射特性会给测量结果带来误差。另外光源光强波动、光纤弯曲损耗等对测量结果也有很大影响。因此,在采用强度调制型传感器时,还应考虑补偿措施,以消除这些因素对测量结果的影响。为此,采用发射和接收光纤同轴排布,具体结构如图2所示。具有较小数值孔径和芯径的单模光纤作为发射照明光的发射光纤,具有较大数值孔径和芯径的多模光纤作为接收光纤。接收光纤两层呈同心

排列,提高了传感器接收光的能力,而且外层信号和内层信号经过适当的处理,还可以补偿表面反射特性变化等因素对测量结果的影响。

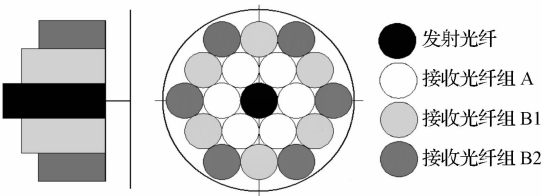


图2 光纤传感器端面排列

2 测量原理

叶尖端面是弱漫射面,因此光经过反射形成了光核与光带。光核是部分光按照几何关系反射出的像,按照几何关系求解;光带是另一部分光按照漫反射规律在空间形成的均匀斑纹分布,其功率在反射面一侧的半球面上均匀分布^[2]。

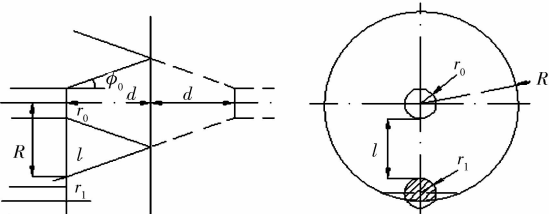


图3 单接收光纤接收光核功率示意图

对于单个接收光纤,设反射光纤纤心半径为 r_0 ,接收光纤纤心半径为 r_1 ,距离为 l ,数值孔径为 NA ,光纤端面与反射面距离为 d 。设发射光功率为 P_0 ,光核功率为 $P_d = P_0\beta^2$,光带功率为 $P_j = P_0(1 - \beta^2)$,其中 β 是与表面粗糙度有关的系数。光纤接收到的光核功率可以看成经平面镜反射的光。由图3可知,反射光斑的半径为 $R = 2d\tan\phi_0 + r_0 = 2d\tan(\arcsin NA) + r_0$,接收光强与接收端面被反射光斑所覆盖的面积有关。根据几何关系,可以得到覆盖面积 S_d ,接收光核功率

$$P_q = P_d \frac{S_d}{\pi R^2} \tag{1}$$

光纤接收的光带功率由接收光纤的立体角决定。接收光纤立体角为 Ω ,半球面立体角为 2π ,接收光带功率

$$P_s = P_j \frac{\Omega}{2\pi} \tag{2}$$

因此,接收总功率为:

$$P = P_q + P_s = P_0\beta^2 \frac{S_d}{\pi R^2} + P_0(1 - \beta^2) \frac{\Omega}{2\pi} \tag{3}$$

对于图2所示的传感器测头结构,相同颜色的接收光纤具有相同的接收功率,利用公式(3)可以求出每组单根光纤的接收功率,分别为 $P_1、P_2、P_3$ 。内层接收光纤组A、外层接收光纤组B1和B2的接收功率为 $P_A = 6P_1, P_B = 6P_2 + 6P_3$ 。利用Matlab进行仿真,发射光纤纤芯半径为 $40\text{ }\mu\text{m}$,接收光纤纤芯半径为 $50\text{ }\mu\text{m}$,数值孔径为0.22,光源发射功率为1 000 mW,则得到传感器的输出特性曲线如图4所示。

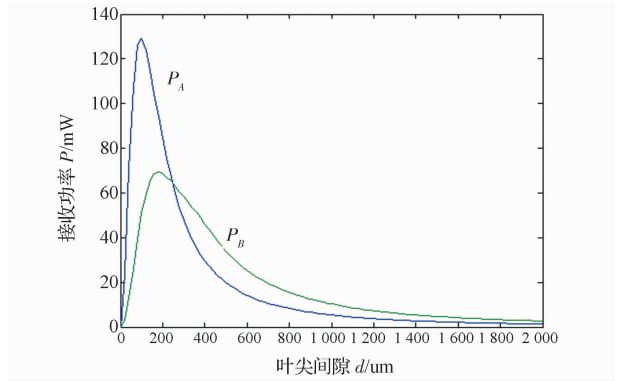


图4 传感器输出特性曲线

3 补偿

由图4可以看出,传感器特性并未呈现线性变化,对信号的处理带来不便。而且在实际的测量过程中,接收功率还要受到以下几个方面的影响:(1)叶尖表面反射特性的改变影响反射光分布带来误差;(2)光源发光功率不稳定直接导致测量误差;(3)光纤本身的弯曲损耗改变测量信号的大小;(4)传感器端面与叶尖端面不平时,其倾角也会对传感器的准确性产生很大影响。因此,还要考虑传感器的补偿技术。

将接收功率写成隐函数形式^[3-5]:

$$P_A = \rho_r \rho_p \rho_s f_A(d) \tag{4}$$

$$P_B = \rho_r \rho_p \rho_s f_B(d) \tag{5}$$

其中 ρ_r 是反射特性影响系数, ρ_p 是光源波动影响系数, ρ_s 是弯曲损耗影响系数。由于接收光纤扎在一起,相同的时间测量相同的叶片,接收同一时间的

光,因此不同的光纤具有相同的影响系数。对两组接收功率做除法运算,得到比值

$$X = \frac{P_A}{P_B} = \frac{f_A(d)}{f_B(d)} = f(d) \tag{6}$$

由公式(6)看出,比值 X 是只与间隙 d 有关的函数,与光源功率的大小与波动、被测叶尖表面反射特性和光纤的弯曲损耗无关。因此,它对光源波动,叶尖表面反射特性及光纤弯曲损耗的影响有很好的补偿作用。对数据进行处理,可以得到图 5 所示的特性曲线。可以看出,比值结果实现了单调性。

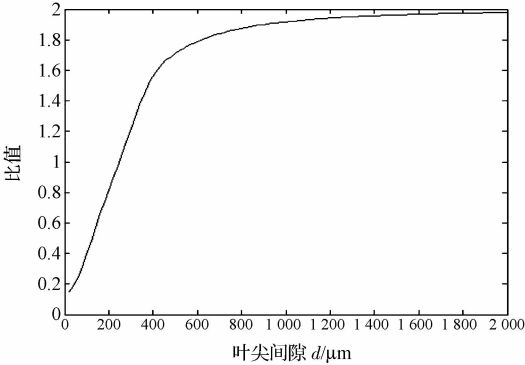


图 5 传感器信号比值特性曲线

对倾角的影响因素进行仿真分析,分别得到倾角为 0° 、 2° 、 4° 、 6° 时的特性曲线,如图 6 所示,可以看到,不同倾角的接收特性虽然存在差异,但是差值最大为总量的 4%,因此比值对倾角具有较好的补偿作用。

4 结论

本文设计了一种用于测量航空发动机叶尖间

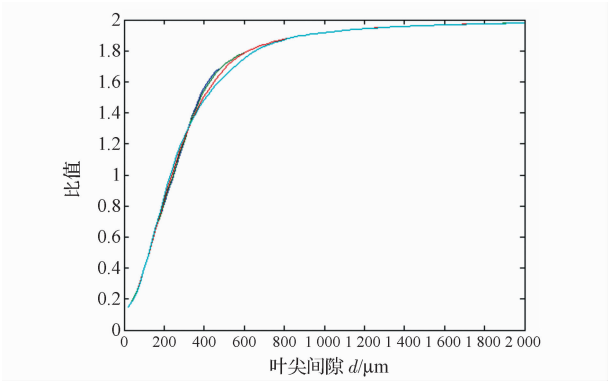


图 6 不同倾角下传感器信号比值特性曲线

隙的非接触式光纤传感器,该传感器的发射光纤为单模光纤,接收光纤为多模光纤,接收光纤采用双层同心排列。对内外层接收光纤组接收的信号经过处理,可以得到线性的输出特性,方便实际应用,同时也可以补偿由于光源波动、被测物体表面反射率不同及光纤的弯曲损耗等对测量结果造成的影响。可以用于航空发动机叶尖间隙的测量。

参 考 文 献

1 胡 骏,吴铁鹰,曹人靖. 航空叶片机原理. 北京:国防工业出版社, 2006

2 戚康南,秦克诚,程 路. 统计光学导论. 天津:南开大学出版社, 1988

3 刘丽华,孙正翔,刘玉智,等. 用于汽轮机动静间隙测量的光纤传感系统设计. 光电子激光, 2003;(14): 277—280

4 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. 光学精密工程, 2002;10(4): 379—382

5 段发阶,方志强,孙宇扬,等. 叶尖定时旋转叶片实时振动测量技术, 光电工程, 2005;32(3):28—31

Optical Fiber Sensor Used in Measurement of Aero-engine Blade Tip Clearance

ZHANG Can, YANG Xun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

[Abstract] Optical fiber sensor is designed to measure the blade tip clearance of aero-engine. The principle of measurement is introduced and the output characteristic is analyzed. The error compensation technique is used to process the signals. The linear output characteristic curves of fiber sensor are attained by simulation, and the results also indicate that the compensation technique is effective in eliminating the impact of factors on output characteristic.

[Key words] optical fiber sensor blade tip clearance aero-engine compensation technique