

双圈同轴式光纤位移传感器的输出特性

张平, 张小栋, 刘春翔

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了利用双圈同轴式光纤位移传感器准确测得旋转机械中滑动轴承的润滑膜厚度, 分析了反射面形状以及润滑油折射率对双圈同轴式光纤位移传感器输出特性的影响. 利用几何光学分析方法, 建立了反射面为球面时的光纤传感器输出函数的数学模型, 分析了润滑油折射率对光纤入射角的影响. 结果表明: 当传播介质的折射率大于 1 时, 光纤最大入射角减小; 当反射面曲率半径减小时, 传感器的灵敏度会降低; 与光线在空气中传播相比, 传播介质为润滑油时, 随着传播介质折射率的增大, 传感器的灵敏度降低. 因此, 在利用双圈同轴位移传感器进行滑动轴承的润滑膜厚度监测时, 必须对传感器进行重新标定.

关键词: 旋转机械; 润滑膜厚度; 反射面形状; 润滑油折射率

中图分类号: TH117.2; TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0027-04

Output Characteristics of the Displacement Sensor with Two-Circle Reflective Coaxial Fiber

ZHANG Ping, ZHANG Xiaodong, LIU Chunxiang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effects of the reflective surface configuration and the refractive index of lubricating oil on the characteristics of the displacement sensor of two-circle reflective coaxial fiber, which is used to measure the thickness of the lubricating oil film, is analyzed. An output function of the fiber sensor with spherical reflective surface is gained and the effect of refractive index of lubricating oil on the maximum incidence angle is analyzed by geometrical optics. The refractive index of the lubricating oil decreases the maximum incidence angle of fibers. The simulation and the experiment indicate that the sensibility of sensors decreases when the reflector changed from flat to curved and in the propagation medium varying from gas into lubricating oil, which leads to the necessity of recalibration when the sensors are applied to monitoring the thickness of the lubricating oil film.

Keywords: rotating machinery; thickness of lubricating oil film; reflective surface configuration; refractive index of lubricating oil

滑动轴承已被广泛地用于高速机床、汽轮发电机组等大型机械设备中. 根据润滑理论, 转子在运行过程中, 滑动轴承会形成润滑膜, 而轴承和转子的分离主要依靠润滑膜. 由于滑动轴承润滑膜的状态在很大程度上反映了设备的运转状态, 而润滑膜厚度

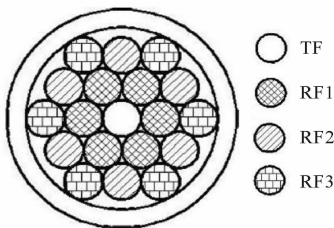
则是保证轴承可靠、稳定工作的主要参数. 因此, 对滑动轴承的润滑膜厚度进行监测具有重要的意义.

光纤位移传感器具有灵敏度高、体积小、结构简单、稳定性好、可以实现非接触测量等优点^[1]. 因此, 在微小位移检测方面已得到广泛的研究和应用.

Chowdhury 等人^[2]利用光纤位移传感器测量了薄膜变形量,求得薄膜残余应力,Perrone 等人^[3]则用光纤位移传感器实现了振动的监测.张小栋等人^[4]设计了一种双圈同轴式光纤位移传感器,这种传感器可消除光强变化以及表面反射率对测量结果的影响,因此可以将这种传感器用于润滑膜厚度的监测.由于双圈同轴式光纤位移传感器用于滑动轴承润滑膜厚度的监测时,反射面为轴颈表面,其形状不是平面,因此建立反射面为凸面的双圈同轴式光纤位移传感器的输出特性调制函数,研究反射面形状对双圈同轴式光纤位移传感器特性的影响,对准确测量润滑膜厚度具有非常重要的意义.此外,光纤中发出的光通过润滑油传播,而润滑油的折射率跟空气的折射率是不一样的,为了准确测得润滑膜的厚度,必须研究润滑油对该传感器输出特性的影响.

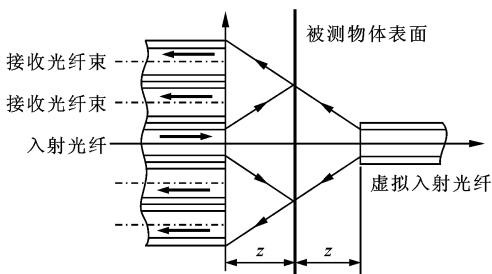
1 光纤位移传感器的调制原理

双圈同轴式光纤位移传感器的光纤束结构如图1所示,其由入射光纤(TF)、内圈接收光纤束(RF1)、外圈接收光纤束(RF2、RF3)组成,原理是利用接收光纤对反射光的耦合进行工作(见图2).将光纤端面置于距被测物体距离 z 的位置上,在被测物体表面之后(相距 z 处)形成一个入射光纤的虚像.因此,确定调制器的响应等效于计算虚拟入射光纤与接收光纤之间的耦合.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



RF1、RF2、RF3:分别为第1组、第2组、第3组的接收光纤

图1 传感器光纤束的排列方式



z :光纤端面至被测物体之间的距离

图2 双圈同轴式光纤传感器的光耦合原理图

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,接收光纤接收到的反射光总量也将发生变化,即对所传输的光进行了调制^[5].

2 传感器输出特性的数学模型

为了简化分析,将球面作为反射面,其曲率半径为 R_c ,假设入射光纤的入射光强是均匀分布的,入射光纤和接收光纤的半径是一样的,因此只需求得接收光纤的受光面积 S_r 与入射光纤的光经发射后的投射面积 S 之比,再乘以反射面的反射率 δ ,就可以得到单组接收光纤的光强调制函数^[6]

$$M_0 = \delta S_r / S \quad (1)$$

如图3所示,TF和RF1、RF2和RF3的半径都为 r ,TF、RF的轴间距分别为 p_1 、 p_2 、 p_3 .由图1、图3可知, $p_1 = 2r$, $p_2 = 2(3)^{1/2}r$, $p_3 = 4r$,光纤的最大入射角为 θ_c .

由图3通过如下几何关系

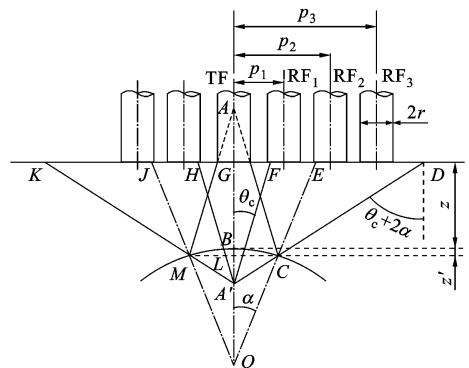
$$\left. \begin{aligned} (z + z') \tan \theta_c + r &= |LC| \\ |LC| &= R_c \sin \alpha \\ z' &= R_c - R_c \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

求得

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{z \sin \theta_c + r \cos \theta_c + R_c \sin \theta_c}{R_c} - \theta_c \quad (3)$$

对于入射角大于 θ_c 的光,RF是接收不到的^[6],设入射角的有效光斑半径为 r_q ,则图3得到的几何关系为

$$\left. \begin{aligned} |A'O| &= \frac{R_c \sin(\theta_c + \alpha)}{\sin(\theta_c + 2\alpha)} \\ |A'G| &= z + R_c - |A'O| \\ |A'G| \tan \theta_c &= |GF| = q \\ |GD| &= |A'G| \tan(\theta_c + 2\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



A:光锥顶点;A':虚拟光锥顶点;B:入射光纤中心线与反射面交点;C、M:出射角为 θ_c 的光线与反射面交点;D、K:反射光线与光纤端面交点;E、J:反射面法线与光纤端面交点;F、H:入射角为 θ_c 的反射光线与光纤端面交点;G:入射光纤端面中心点;L:直线CM与AA'交点; α :反射面法线与入射光线的夹角

图3 反射面为球面时的几何模型

由于 z 的变化会引起 r_q 的变化,因此导致 RF1 有效接收面积发生变化的情况如下.

(1) 当 $r_q < p_1 - r$ 时, RF1 接收不到光,此时 RF1 的有效接收面积

$$S_{r1} = 0 \quad (5)$$

(2) 当 $p_1 - r < r_q \leq (p_1^2 + r^2)^{1/2}$ 时, RF1 的有效接收面积

$$S_{r1} = 6 \left(\phi r_q^2 + \sin^{-1} \frac{r_q \sin \phi}{r} r^2 - p_1 r_q \sin \phi \right) \quad (6)$$

p_1 与 r_q 之间的夹角

$$\phi = \cos^{-1} \frac{p_1^2 + r_q^2 - r^2}{2 p_1 r_q} \quad (7)$$

(3) 当 $(p_1^2 + r^2)^{1/2} < r_q \leq p_1 + r$ 时, RF1 的有效接收面积

$$S_{r1} = 6 \left(\phi r_q^2 + \left(\pi - \sin^{-1} \frac{r_q \sin \phi}{r} \right) r^2 - p_1 r_q \sin \phi \right) \quad (8)$$

(4) 当 $r_q > p_1 + r$ 时,由于 RF1 完全处于有效光锥在光纤端面上的光斑内,此时

$$S_{r1} = 6 \pi r^2 \quad (9)$$

通过式(9)可计算 RF1 的接收光面积,RF2、RF3 的接收光面积计算过程与 RF1 相同. 设 RF2、RF3 的有效接收反射光的面积分别为 S_{r2} 、 S_{r3} ,根据双圈同轴式位移传感器光纤探头的光纤束排列方式,将内、外圈接收光纤接收到的光斑面积比值进行处理后,即可得到传感器的输出特性调制函数

$$M = \frac{S_{r2} + S_{r3}}{S_{r1}} \quad (10)$$

当 TF 的入射光在折射率为 n_1 的润滑油中传播时,根据折射定律得

$$n_0 \sin \theta_c = n_1 \sin \theta_{cl} \quad (11)$$

式中: n_0 为空气折射率; θ_{cl} 为光线在润滑油中传播时的光纤最大入射角. 由式(11)得到

$$\theta_{cl} = \sin^{-1} \frac{n_0 \sin \theta_c}{n_1} \quad (12)$$

因为 $n_0 = 1, n_1 > 1$, 可知 $\theta_{cl} < \theta_c$, 因此光纤的最大入射角受到传播介质折射率的影响.

3 光纤传感器特性的数值仿真

根据式(2)~式(10),可分别绘制出反射面曲率半径不同时双圈同轴式光纤位移传感器的特性曲线. 将式(12)计算的 θ_{cl} 代替式(10)中的 θ_c , 可绘制出传播介质为润滑油时光纤位移传感器的特性. 其中设定光纤数值孔径为 0.37, $r = 100 \mu\text{m}$, $n_1 =$

1.48. 图 4 是双圈同轴式光纤位移传感器入射光及反射光在不同介质中传播时的特性曲线. 从图 4 可以看出,光线在润滑油中传播时,传感器的灵敏度降低,死区会加大,但却增大了 z 的线性范围.

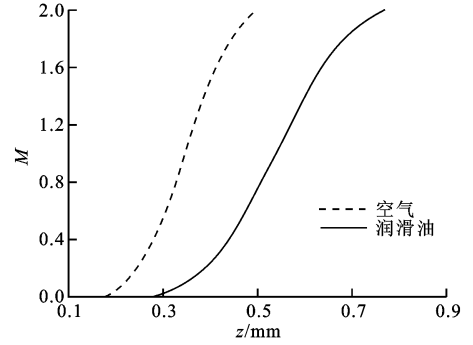


图 4 传播介质不同时的传感器特性曲线

图 5 是双圈同轴式光纤位移传感器在不同反射面曲率半径下所对应的特性曲线. 从图 5 可以看出,随着反射面曲率半径的增大,传感器的灵敏度相应增大,当曲率半径大到一定程度时,特性曲线几乎重合 ($R_c = 200 \text{ mm}$ 的曲线与 400 mm 时重合). 当曲率半径无限大时,则反射面为平面.

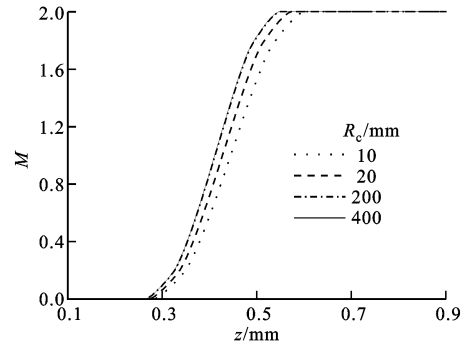


图 5 反射面曲率半径不同时的传感器特性曲线

4 传感器的实验

采用双圈同轴式光纤位移传感器进行实验,光纤束的排列方式如图 1 所示. 光纤为多模石英光纤,纤芯半径为 $100 \mu\text{m}$,光纤数值孔径为 0.37,调理电路中的光电转换芯片为 OPT101,其对可见光范围内的红光的灵敏度最高,因此激光源选择波长 650 nm 的半导体激光源. 调理电路通过低通滤波、接地方式消除了射频噪声的干扰和电力线噪声的干扰,通过选用 FC 接口提高了光的耦合效率. 为了消除自然光的影响,调理电路板采用封闭安装,为保证 RF1、RF2 和 RF3 的接收光,经过调理电路输出的电压峰值应小于 10 V ,以便数据采集卡进行采集,

并调整光源的输出光功率,最终确定入射光纤端的人射光功率为 0.166 mW,RF1 接收光经调理后的峰值电压为 9.76 V,RF2、RF3 接收光经调理后的峰值电压为 5.66 V.整个实验在图 6 所示的实验装置上完成.

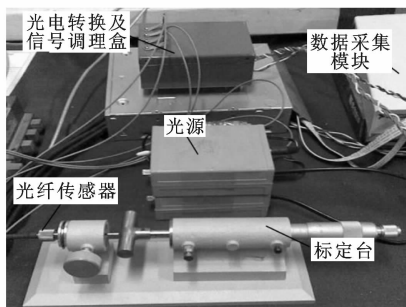


图6 传感器的实验装置

4.1 光线在不同介质中传播时的传感器特性实验

通过旋转静态标定台的微调旋钮,在反射面位移每隔 50 μm 的变化下,通过静态标定程序记录进程和回程的输出电压数值,对每种情况重复以上步骤,记录三组光纤传感器的进程、回程数据,作出光纤探头与标定圆柱反射表面的间距与电压输出的特性曲线.对得到的传播介质为空气、润滑油这 2 种状态下的三组进程、回程静态标定数据进行求和平均处理,画出的 2 种状态下的平均曲线如图 7 所示.

从图 7 可以看出,在相同位移、无润滑油状态下的 M 比有润滑油状态时大, z 为 700~1 250 μm 时,有润滑油比无润滑油状态下的传感器特性曲线的灵敏度降低了 27%.

4.2 反射面形状因素对传感器特性的影响

图 8 为反射面为平面和圆柱面时的传感器特性曲线,圆柱面为半径 6 mm 的短轴表面.从图 8 可以看出,当反射面为圆柱面时, z 为 700~1 250 μm 时的特性曲线灵敏度比反射面为平面时的灵敏度降低了 12%.

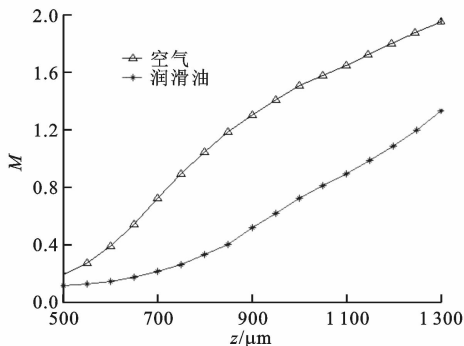


图7 传播介质不同时的传感器静态标定曲线

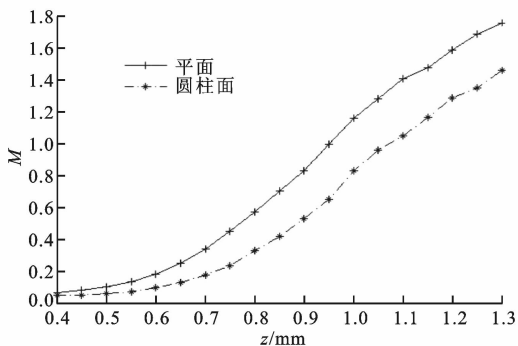


图8 反射面曲率半径不同时的传感器静态标定曲线

5 结 论

(1)本文利用光强均匀分布理论建立了反射面为球面的双圈同轴式光纤位移传感器光强调制函数的数学模型,定性地研究了反射面曲率半径对双圈同轴式光纤位移传感器特性的影响.

(2)当反射面为球面时,随着曲率半径的增大,双圈同轴式光纤位移传感器的灵敏度相应增大,当曲率半径增大到一定程度时,其输出特性近似不变.

(3)由于润滑油液的折射率与空气的折射率不同,导致了双圈同轴式光纤位移传感器的灵敏度降低,因此在测量润滑膜厚度时,必须重新标定相对应的双圈同轴光纤位移传感器.

参考文献:

- [1] 孙圣和,王廷云,徐颖. 光纤测量与传感技术 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000:15-40.
- [2] CHOWDHURY S, LAUGIER M T. Thin film stress measurement by instrumented optical fibre displacement sensor [J]. Applied Surface Science, 2007, 253 (9): 4289-4294.
- [3] PERRONE G, VALLAN A. A low-cost optical sensor for noncontact vibration measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5): 1650-1656.
- [4] 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.
YANG Liang, ZHANG Xiaodong. Displacement sensor of two-circle reflective coaxial fiber bundle [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 192-196.
- [5] YUAN L B. The analysis of the compensation mechanism of a fiber optic displacement sensor [J]. Sensors and Actuators, 1993, 36(3): 177-182.
- [6] 杨华勇. 反射式强度型光纤传感器强度调制特性的数学模型与关键技术的研究 [D]. 长沙:国防科技大学, 2002.

(编辑 管咏梅)