

文章编号 1004-924X(2015)10-2747-08

水膜厚度光纤检测系统

张小栋*, 郭琦, 牛杭

(西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:针对海水泵滑靴副水膜厚度测量需求,利用反射强度调制型位移光纤传感器工作原理设计并实现了一种水膜厚度检测系统。设计了与海水泵结构相对应的光纤探头,其采用具有较好补偿功能的三圈同轴型光纤束结构消除了由光源强度、反射表面性质以及光纤光强损耗和弯曲损耗等因素带来的影响;开发了由光源模块、电源模块、光电转换模块、低通滤波模块、信号比值模块等组成的前置器用于信号调理。对开发的水膜厚度光纤检测系统进行了静态性能和动态性能测试实验,结果表明:该检测系统的测量精度可达微米级,测量系统的量程为 1 000 μm ,灵敏度为 3.45 mV/ μm ,动态性能良好,满足了对海水泵水膜厚度的检测需求。

关键词:光纤位移传感器;水膜厚度;检测系统;海水泵滑靴副

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2747

Optical fiber measurement system for thickness of water film

ZHANG Xiao-dong*, GUO Qi, NIU Hang

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: acmt@mail.xjtu.edu.cn

Abstract: For the purpose to measure the water-film thickness of a sea water pump slipper pair, a measurement system based on a reflective modulated optical fiber displacement sensor was designed and implemented. A new optical fiber probe structure which matches the construction of sea water pump was designed, in which a three-circle coaxial fiber bundle with better compensation function was used to eliminate the influences caused by the intensity fluctuation of light source, the character of reflective surface, optical loss and the bending loss. The signal conditioning circuit consisting of a light source, a power supply, a photoelectric conversion circuit, a low pass filter and a dividing circuit was developed to adjust the signals. The experimental test for static property and dynamic property of the system was performed and the results demonstrate that the system offers a precision of micron-level and a good dynamic property. Its measuring range is 1 000 μm , and sensitivity is 3.45 mV/ μm . This results verify that the measurement system proposed in this paper meets the requirements of the measurement of water film thickness.

Key words: optical fiber displacement sensor; water-film thickness; measurement system; sea water pump slipper pair

收稿日期:2015-06-19;修订日期:2015-07-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51405366)

1 引言

传统的海水泵以矿物性液压油作为液压传动和润滑介质,但是液压油存在环境污染和易燃烧等问题。近年来,随着人们对安全卫生、节约能源、保护环境和海洋开发的日益重视,以水为介质的水压和水润滑海水泵受到了广泛关注。在水压海水泵中滑靴副是指滑靴与斜盘间的摩擦副,滑靴会相对于斜盘表面形成一定的楔形水膜,在水膜静压支撑力和水膜动压效应和挤压效应作用下,滑靴副楔形水膜压力场始终与滑靴所受的外力和外力矩处于动态平衡中。由于水的黏度比润滑油要小,所以水流动的惯性力与黏性力不可忽略,它们会直接影响润滑间隙流动的泄流量。为避免泄露功率有较大功率损失,要求水膜厚度较小,但过小的水膜厚度不能把运动副两表面分开,形成静压支承^[1-2]。因此,精确获各水膜厚度非常重要。

水膜厚度检测是避免摩擦和磨损、提高原件工作性能和使用寿命的重要手段。目前,国内对滑靴副的研究主要集中于水润滑的润滑特性、摩擦副结构、摩擦副材料选择等方面,而在水润滑水膜厚度检测方面的研究较少。浙江大学庄欠伟等人比较了滑靴副间油膜厚度的测量方法^[3]。四川工业学院李庆刚、周义兵以及天津大学杨燕罡、王仲等针对不同情况分别提出了利用电涡流传感器和电容传感器测量水膜厚度的方法^[4-5]。研究发现,水润滑情况下滑靴副的水膜厚度测量存在以下要点:(1)传感器置于斜盘时需进行多点测量,传感器结构尺寸要小;(2)滑靴副工作环境复杂,有腐蚀性的海水以及较高的水压,传感器结构强度要高;(3)由于水黏度较小,相比于油膜,水膜厚度值较小,传感器要具有更高的精度。由于电容和电涡流传感器都存在一定的缺陷,因此无法完全满足上述要求。

光纤位移传感器具有环境适应性强、抗电磁干扰、耐腐蚀、耐高压、灵敏度高、测量精度高等优点,其探头尺寸可以设计得较小,易于安装且对海水泵滑靴副性能的影响小^[6]。基于光纤位移传感器的优点,本课题组自 2003 年起展开了基于光纤位移传感器原理的滑动轴承润滑油膜厚度精密检测技术的研究,提出了一种双圈同轴式反射强度调制型光纤位移传感器检测方案^[7]。本文在此基

础上设计开发了适用于海水泵滑靴副水膜厚度测量的光纤检测系统。

2 水膜厚度光纤检测系统的构成及工作原理

2.1 水膜厚度测量需求分析

根据海水泵的工作环境以及结构尺寸,检测系统光纤探头的结构尺寸设计应该满足滑靴副处安装尺寸的要求,如图 1 所示。其中,滑靴的主要作用是连接柱塞与斜盘,使柱塞能够跟随斜盘运动。为了防止斜盘与滑靴的配合面产生磨损,利用滑靴中心的小孔将水注入滑靴与斜盘之间即滑靴副中完成润滑和支承。海水泵滑靴驱动电机的最大转速为 1 500 r/m,测量系统的工作带宽应覆盖最高工作转频。系统的测量范围应达到 1 000 μm ,测量精度为微米量级,传感器尾端信号线需要做防腐及抗压处理。

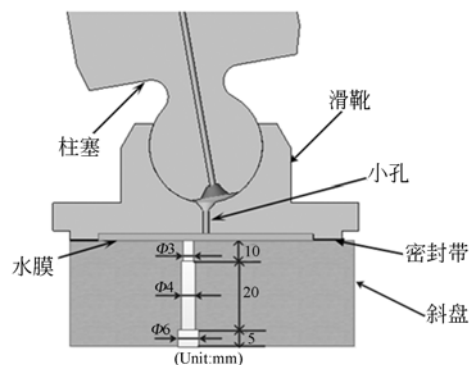


图 1 滑靴副安装尺寸要求

Fig. 1 Installation requirements of slipper pair

2.2 水膜厚度光纤检测系统的工作原理

滑靴副水膜厚度光纤测量原理如图 2 所示。入射光纤发射出圆锥型的光束,该光束经过水膜到达滑靴副滑靴表面,经其表面反射后,发射光部分或者全部进入接收光纤。当海水泵运行时,滑靴副间隙会发生变化进而水膜厚度发生变化,致使接收光纤被反射光斑所覆盖的面积发生变化,接收光纤接收到的反射光总量也将发生变化,即水膜厚度对接收光强进行了调制。所以通过检测接收光强值可以获得水膜厚度信息。

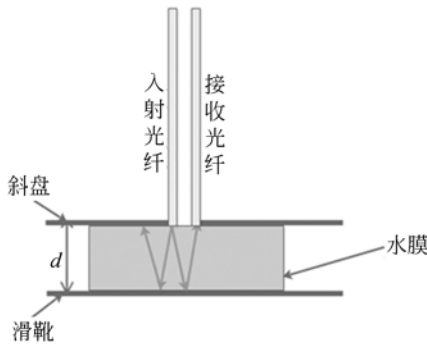


图 2 水膜厚度测量工作原理图

Fig. 2 Principle of water film thickness measurement

2.3 光纤检测系统的架构

根据上述水膜厚度光纤测量的需求和检测原理,本文设计的水膜厚度光纤检测系统构架如图 3 所示。该系统主要包括光纤探头、前置器、数据采集器和计算机。光纤探头包括一路入射光纤、两路接收光纤,可以实现双光路补偿以消除由光源功率波动、光纤自身以及其它系统元件的特性变化引起的测量误差^[8-9]。前置器包括:稳压电源模块,用于给其他电路模块提供电压;光源模块,向光纤提供特定波长且光强可调的光;光电转换模块,将光纤末端输出的光强信号转换为电信号以便于进一步处理;低通滤波模块,用于信号的抗混叠滤波;硬件比值模块,对两路接收光纤信号进行比值运算,以消除光源强度、反射表面性质等因

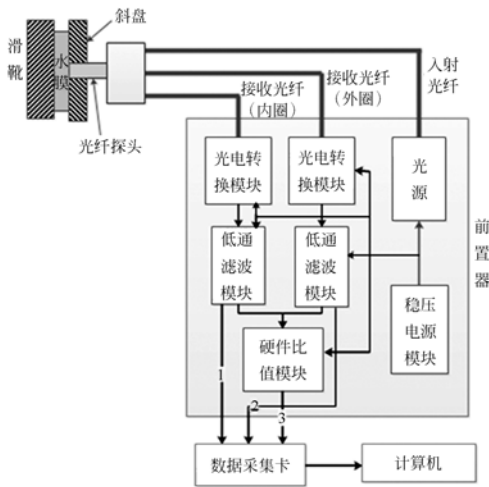


图 3 光纤检测系统的构成

Fig. 3 Components of optical fiber detecting system

素的影响。数据采集器用于采集前置器调理后的电信号。计算机用于信号的处理与显示。

3 光纤探头结构设计

3.1 光纤探头外形尺寸设计

为了满足滑靴副的安装尺寸要求,光纤探头的结构设计如图 4 所示。探头 0~10 mm 段的直径为 3 mm;10~30 mm 段设计了 M4 的螺纹,用于安装锁紧螺母;30~35 mm 段的直径为 6 mm,用于后部光纤封装。为了保证传感器能适应海水腐蚀和高压的环境,对光纤探头的传导部分进行铠装。为了提高光耦合效率以及连接的可靠性,入射光纤的连接端采用与光发射器配对的 ST 接口;为了与光电转换模块连接接收光纤采用 FC 接口。3 个接头处还采取了必要的保护措施,防止断纤。

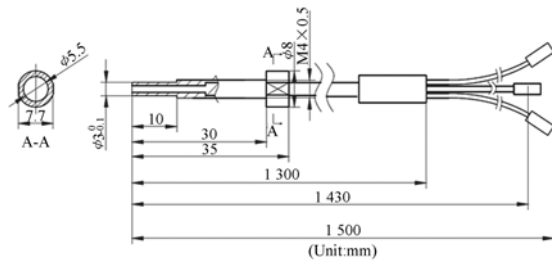


图 4 反射式光纤传感器整体结构

Fig. 4 Structure of reflective optical fiber sensor

3.2 光纤束排列方式设计

双光路补偿法有多种光纤束排列方式,这里采用双圈同轴式纤芯排列方式对利用光纤位移传感器测量的润滑油膜厚度进行补偿^[10]。但在这种排列方式下,两组接受光纤光强之比的线性区间较小,不满足本文所需的测量范围要求。其主要原因是第二组接受光纤所处位置的光强密度较小,导致第二组接收光纤的光强峰值较小,进而导致光强之比的线性区间较小。为了增加两组光纤比值的线性范围,这里采用了增加第二组接收光纤的数量来提高第二组接收光纤光强的方法,即在双圈同轴式纤芯排列方式外面再加一圈光纤作为第二组接收光纤,如图 5 所示。图中,中心为入射光纤,同轴紧密排列三圈接收光纤。入射光纤为 1 根,第一、二组接收光纤分别为 6,30 根,纤芯

的具体参数如表 1 所示。对三圈同轴式排列方式下两组接收光纤的光强之比进行仿真分析,得到的光强之比曲线如图 6 所示。由图 6 可知,这种纤芯排列方式能够满足测量范围要求。

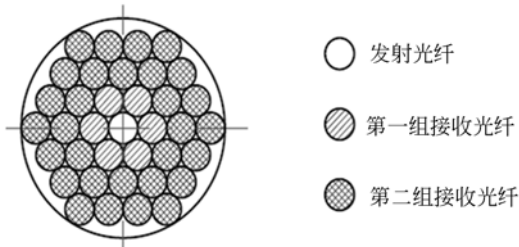


图 5 光纤束排列方式

Fig. 5 Arrangement of optical fiber bundles

表 1 纤芯参数

Tab. 1 Parameters of fiber

参数	芯径/ μm	数值孔径	包层厚度/ μm
值	200	0.22	8

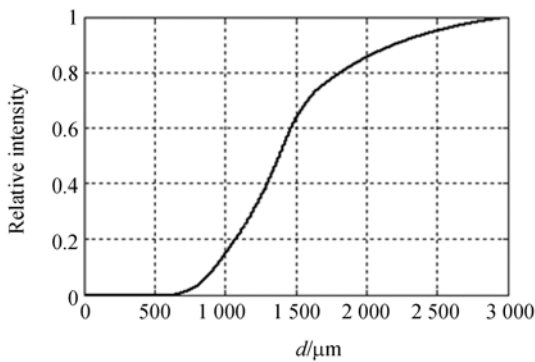


图 6 两组接收光纤接收的光强之比

Fig. 6 Intensity ratio between two groups of receiving optical fibers

4 系统的硬件电路设计

系统的硬件电路主要包括稳压电源模块、光源模块、光电转换模块、低通滤波模块、硬件比值模块。这些模块集成于电路板上构成系统的前置器。

4.1 电源模块设计和光源选择

由于本系统的各个模块都存在需要供电的芯片,如果通过外部电源供给各模块所需的电源,会

导致电源接口连线复杂,所以本文专门设计了一个由 2 个 LM2575 芯片分压得到 +12 V 和 -12 V 电压的电源模块。

光源选用波长为 820 nm 的 HFBR-1414 光纤发射器,它具有光耦合效率高、耗能少、工作稳定等优点^[11]。此外,该类型的光纤发射器还具有多种标准光纤接口,选用与入射光线接口相对应的 ST 接口可以避免因光入射角度不同造成的原始误差。

4.2 光电转换模块

光电转换模块的主要功能是将光纤位移传感器中得到的反映水膜厚度的光强信号转换为电压信号。它在整个动态检测系统中起着极其重要的作用,其灵敏度将很大程度上影响系统的测量精度。

本系统选用 Burr-Brown (B-B) 公司生产的 OPT101 芯片,该芯片响应速度快,频带为 14 kHz,输出电压为 0~10 V。随着光亮度的增加,OPT101 的输出电压近似线性增加,其响应度近似为 0.45 A/W。此芯片可用单电源或双电源驱动,工作电压范围较宽。应用片内 1 M Ω 电阻与 3 pF 电容组成反馈网络,即将引脚 4 和 5 连接,便构成其基本连接电路,如图 7 所示。

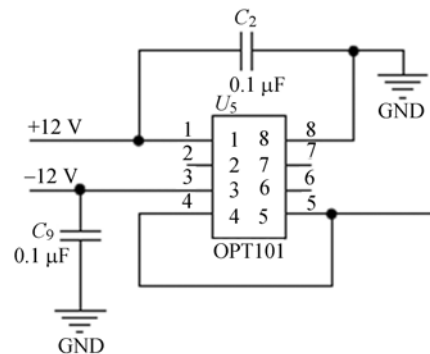


图 7 OPT101 的接线图

Fig. 7 Diagram of wiring connection on OPT101

4.3 低通滤波模块

低通滤波模块主要进行信号的抗混叠滤波设计。根据采样定理,信号的采样频率必须大于信号最高频率的 2 倍,否则会出现频率混叠现象。海水泵中滑靴驱动电机的最高转速为 1 500 r/m,这里将截止频率设置为最高转频的 10 倍 300 Hz,以提高采样信号的质量。为了保证滤波效

果,选用有源二阶低通滤波器,其结构如图 8 所示。

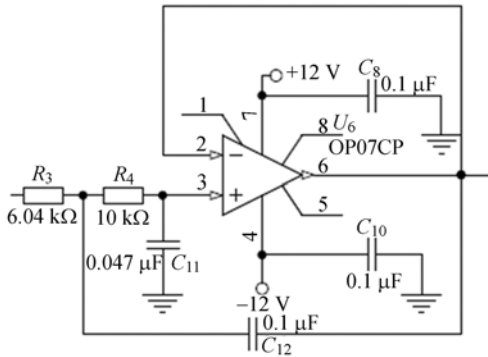


图 8 低通滤波器电路图

Fig. 8 Circuit diagram of low-pass filter

该滤波器的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{R_3 R_4} \frac{1}{\frac{1}{R_3 R_4} + C_{11} s \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + C_{12} s \right)}, \quad (1)$$

截止角频率为:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_{11} C_{12}}}. \quad (2)$$

经计算可得图示电路的截止频率为 298 Hz,所设计的滤波电路能够满足截止频率要求。

4.4 除法电路设计

根据三圈同轴纤芯排列方式的光纤传感器的补偿原理,本文采用除法电路对经光电转换后得到的内、外圈光纤电压信号进行比值处理。本文采用由乘法器 AD633 和运算放大器 AD711 构成的除法电路。图 9 为除法电路图,其原理为将乘法器 AD633 放在运放电路的反馈端,与电阻 R_8 和 R_9 构成反馈电路,设运放输出端为 W_1 。在除法电路中,乘法器 AD633 的传递函数为:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10V} + Z. \quad (3)$$

假设输入 AD633 的信号为内圈接收光纤光强转换后的电压信号 E_x ,输入运算放大器 AD711 的信号为外圈接收光纤光强转换后的电压信号 E ,由 AD633 的传递函数可以得到乘法器的输出端 W :

$$W = \frac{(E_x - 0)(Y_1 - 0)}{10V} + 0. \quad (4)$$

反馈回路中,放大器两相的输入端电流为 0,

电压相等,即:

$$\frac{E - 0}{R_9} = \frac{0 - W}{R_8}. \quad (5)$$

联立上述三式可以得到运放输出 W_1 为:

$$W_1 = -10 \times \frac{R_8}{R_9} \times \frac{E}{E_x}. \quad (6)$$

由此式可知,当反馈电阻 R_8, R_9 为定值时,除法器输出 M 只与两路接收光纤接收到的光功率比值有关。

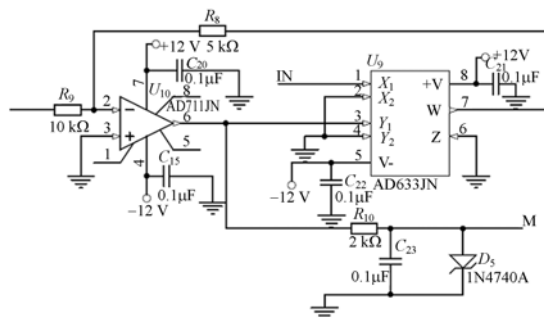


图 9 除法器电路

Fig. 9 Divider circuit

5 系统静态与动态性能测试

5.1 系统静态性能测试

为了验证水膜厚度光纤检测系统,包括光纤探头、后续检测电路的有效性,搭建了水膜厚度光纤检测的静态标定实验系统,用于测试系统的静态性能,如图 10 所示。静态标定实验系统主要包括静态标定台、信号调理电路(前置器)、数据采集装置、三圈同轴式反射光纤位移传感器。标定过

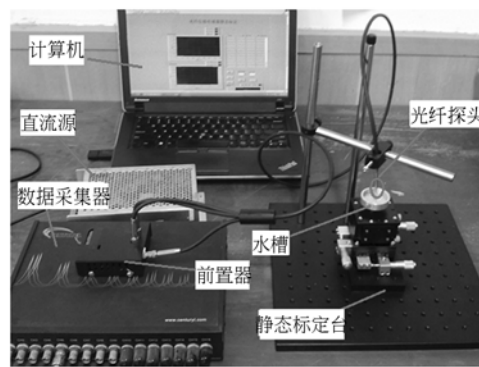


图 10 静态标定实验系统

Fig. 10 Experiment system of static calibration

程如下:以置于光学静态标定平台上的水槽底面模拟滑靴表面,固定光纤传感器探头,通过调整标定平台来改变探头与水槽底面的距离,在上位机上记录相应的距离及其输出电压值,完成检测系统的静态标定。其中,标定平台的移动依靠螺旋测微器完成,其精度为 0.01 mm。传感器探头采用双光路补偿的光纤束排列方式时,被测表面的材质、粗糙度不会影响测量结果,而传光介质的折射率会影响输出特性^[12],但是海水泵水润滑用水与自来水的折射率相差较小,所以此处可用自来水代替。

在位移 0~3 000 μm 对系统进行标定,以确定系统使用的线性区间,标定结果如图 11 所示。观察图像易发现在 1 500~2 500 μm 处,位移与电压近似呈线性关系,对此段反复标定并求均值,

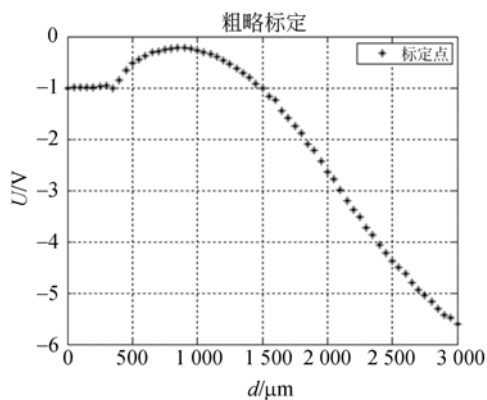


图 11 传感器标定结果

Fig. 11 Result of sensor calibration

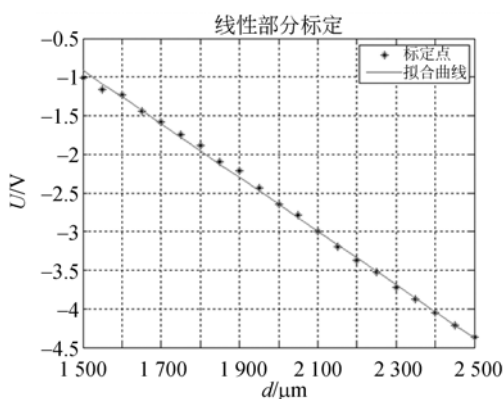


图 12 1 500~2 500 μm 传感器的线性拟合曲线

Fig. 12 Linear fitting of sensor calibration points in displacement range of 1 500—2 500 μm

可得其线性范围的标定曲线,如图 12 所示。根据测量需求选取此段线性部位作为检测系统的测量部分。通过标定实验可以得到此系统的测量精度为微米级,量程可达 1 000 μm ,灵敏度为 3.45 $\text{mV}/\mu\text{m}$ 。

5.2 系统动态性能测试

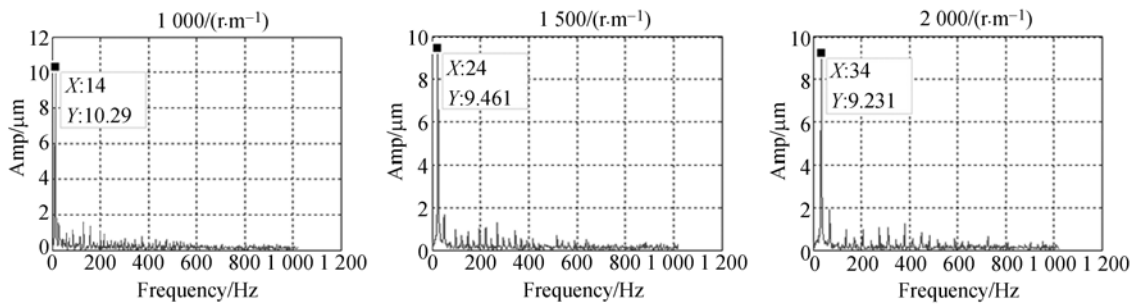
在进行滑靴副水膜厚度测量时,随着滑靴的转动,滑靴副间水膜厚度是变化的。为验证检测系统对动态水膜厚度的检测能力,采用实验室转子试验台对检测系统的动态性能进行验证,实验系统如图 13 所示。图中光纤以及电涡流传感器探头均安装于转子支架上,用于测量转子竖直方向的振动,并分别连接至自己的前置器,前置器通过数据采集器与计算机连接。直流源用于给两个传感器前置器提供电源。



图 13 动态测试实验系统

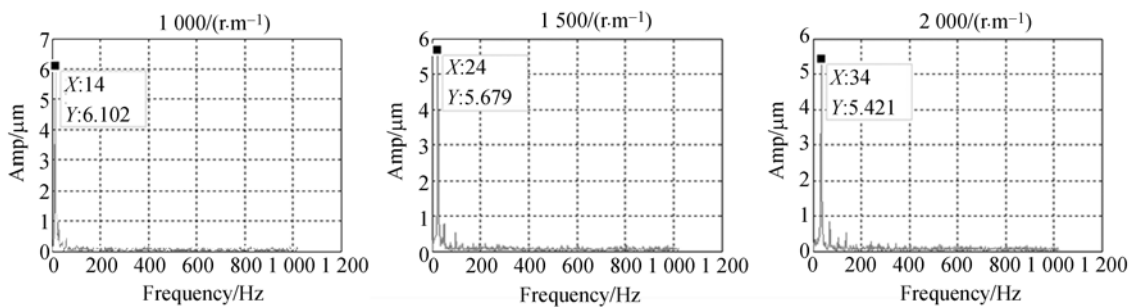
Fig. 13 Experimental system of dynamic test

由参考文献 6 可知,利用光纤传感器测量探头与转子间距离变化可以得到转子的振动信息,其原理与测水膜厚度相同。本文实验系统的反射表面形状以及传光介质与实际情况不同,其反射表面为圆柱,介质为空气;而实际情况中反射表面为平面,介质为海水。根据文献 12 可知,这两者仅影响检测系统的线性范围和灵敏度。因此,通过测量转子振动来检测系统动态性能具有一定的合理性。改变转子转速并测量振动信号,不同转速下振动信号的频谱如图 14 所示。由图可知,在转速为 1 000~2 000 r/m 的情况下,本文设计的检测系统得到的转子振动规律与电涡流传感器的相似,前文已知滑靴的最高转速为 1 500 r/m ,所以该检测系统可以满足滑靴副水膜厚度检测的带宽要求。



(a) 光纤传感器检测结果

(a) Test results from optical fiber sensor



(b) 电涡流传感器检测结果

(b) Test results from electrical vortex sensor

图14 动态测试结果

Fig. 14 Dynamic testing results

6 结 论

本文针对海水泵滑靴副水膜厚度的测量要求,基于反射强度调制型光纤传感器工作原理设计开发了一种水膜厚度检测系统。设计了三圈同

轴式光纤排列方式的光纤探头,并分析讨论了该探头对干扰的消除作用,进行了检测系统的硬件电路设计与开发,最后对所完成的检测系统进行了性能测试。测试结果表明:该系统的测量精度可以达到微米量级,量程为 $1\ 000\ \mu\text{m}$,灵敏度为 $3.45\ \text{mV}/\mu\text{m}$,动态性能良好,满足水膜厚度的测量需求。

参考文献:

- [1] 王国志,柯坚,王瑛,等. 水压轴向柱塞泵配流盘最小水膜厚度的理论分析—结构参数的影响[J]. 机床与液压,2002(9):102-104.
WANG G ZH, KE J, WANG Y, et al.. Analysis on the minimal water film thickness for valve plate of water hydraulic axial piston pump—the influence of the structural parameter [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2002(9):102-104. (in Chinese)
- [2] 刘桓龙. 水压柱塞泵的润滑基础研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
LIU H L. *Basic Research on the Lubrication Characteristics of Water Hydraulic Piston Pump* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [3] 庄欠伟,周华,艾青林. 轴向柱塞泵滑靴副润滑膜的测量方法比较[J]. 机床与液压, 2005(12):86-88.
ZHUANG Q W, ZHOU H, AI L Q. Comparison in measurements of lubricating film of slippery-pair in axial piston pumps [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2005(12):86-88. (in Chinese)
- [4] 李庆刚,周义光,张昌兵. 滑动轴承水膜厚度测试研究[J]. 四川工业学院学报, 1998,2(2):48-53.
LI Q G, ZHOU Y G, ZHANG CH B. Research on sliding bearing water film test [J]. *Journal of Sichuan University of Science and Technology*, 1998,2(2):48-53. (in Chinese)

- [5] 杨燕翌,王仲,宋丽梅,等. 虚拟仪器与电容实现水膜的自动测量与控制[J]. 计算机测量与控制, 2005(1):14-17.
YANG Y G, WANG ZH, SONG L M, *et al.*. Virtual instrument and capacitor applied in online measurement and control of water film [J]. *Computer Measurement & Control*, 2005(1):14-17. (in Chinese)
- [6] 金远强,刘丽华,马惠萍,等. 用于高速转轴径向震动检测的光纤传感技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1):95-99.
JIN Y Q, LIU L H, MA H P, *et al.*. Fiber sensor used in detecting radial vibration of high rotating speed shaft [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):95-99. (in Chinese)
- [7] 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(2):192-196,243.
YANG L, ZHANG X D. Research on two-circle coaxial optical fiber sensor[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2009(2):192-196,243. (in Chinese)
- [8] 付松年. 新型反射式光纤位移传感器的分析与设计[J]. 传感器技术, 2001,20(3):15-17,20.
FU S N. The analysis and design of the new type of reflective optical fiber displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors*, 2001,20(3):15-17,20. (in Chinese)
- [9] 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(增):25-29.
LIU L H, CHE R SH, LI J X, *et al.*. Design of reflective fiber displacement sensor with three layer coaxial fiber bundle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp.):25-29. (in Chinese)
- [10] ZHANG X D, YANG L. Influence analysis of reflector shape with respect to the fibre optic based dynamic measurement of lubricant film for slide bearing [C]. *14th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Xiamen University, Xiamen, China, December 3-5, 2007*:197-201.
- [11] 陈正涛. 光纤 HFBR-1414 发射器的驱动电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2010,5(5):79-81.
CHEN ZH T. Design of driving circuit of fiber-optical transmitter HFBR-1414 [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2010, 5(5):79-81. (in Chinese)
- [12] 张平,张小栋,刘春翔. 双圈同轴式光纤位移传感器输出特性[J]. 西安交通大学学报, 2012.
ZHANG P, ZHANG X D, LIU CH X. Output character of the displacement sensor with two-circle reflective coaxial fiber[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012. (in Chinese)

作者简介:



张小栋(1967—),男,陕西周至人,教授,博士生导师,1989年、1992年、1996年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事智能检测诊断与控制技术、智能机器人技术等方面的研究。E-mail: acmt@mail.xjtu.edu.cn



郭琦(1992—),男,山西运城人,硕士,2014年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事故障诊断方面的研究。E-mail: shgq0811@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)