

DOI: 10.7652/xjtuxb201605007

滑动轴承润滑油膜厚度光纤动态精密检测模型

张平^{1,2}, 张小栋², 董晓妮², 赵妮¹, 凌寒¹
(1. 西安建筑科技大学机电工程学院, 710055, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了实现滑动轴承关键参数润滑油膜厚度的精密动态检测,构建了基于双路光纤的油膜厚度动态精密检测模型,以对光纤传感器的非线性特性进行补偿并对油膜厚度动态信号中的噪声进行滤除。该模型系统集成强度调制式光纤检测技术、光强补偿技术、非线性校正与滤噪技术,由光纤传感器调制函数、调理电路、上位机处理 3 个模块组成,其原理与优势在于:基于光强调制原理实现了油膜厚度对接收光功率信号的调制;采用光强补偿技术有效消除了光功率波动及反射率变化对检测结果的影响;利用非线性校正与滤噪技术实现了光电信号与油膜厚度信号的精确映射。静态标定实验和滑动轴承油膜厚度动态检测实验结果证明了该模型的正确性。

关键词: 滑动轴承;油膜厚度;光纤传感器;检测模型

中图分类号: TH113.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0045-06

Optical Fiber Dynamic Precision Measuring Model for Lubricating Oil Film Thickness of Journal Bearings

ZHANG Ping^{1,2}, ZHANG Xiaodong², DONG Xiaoni², ZHAO Ni¹, LING Han¹
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To realize dynamic precision measurement for lubricating film thickness of journal bearings, a double-receiving optical fiber dynamic precision measuring model for oil film thickness was built. The model can compensate the nonlinearity of optical fiber sensor and filter the noise in the dynamic oil film thickness signal. The model was built through integrating intensity-modulated optical fiber measuring technology, light intensity compensation, nonlinear correction and filtering technology. The model consists of optical intensity modulation function module, and conditioning circuit module, and master computer module. The principle and advantages of the model are as follows: the received optical power is modulated by the oil film thickness using the light intensity modulation function; the effects of changing optical power and reflectivity on the measuring results are eliminated by light intensity compensation; and the accurate mapping between photoelectric signal and oil film thickness signal is finished by nonlinear correction and filtering technology. The correctness of the measuring model was verified by calibration experiment and dynamic measuring experiment on the oil film thickness of journal bearing.

Keywords: journal bearing; oil film thickness; optical fiber sensor; measuring model

滑动轴承作为支承核电机组、现代大型轧机等
领域大型重载转子的核心部件,其润滑性能和动力

学性能随润滑油膜厚度变化最为敏感,因此润滑油
膜厚度的准确检测对于评价这些设备的工作状态具

有重大的工程意义。同时,动态检测获取的油膜厚度数据还能丰富旋转机械的监测诊断信息,是现有监测方法及技术的重要补充。

对润滑油膜厚度的检测方法有电阻、电容、光干涉、激光诱导荧光等方法,这些测量方法容易受到机组转子轴电压、荧光添加剂、安装条件、测量范围、设备成本等因素的影响^[1-3]。此外,国内外学者将超声波法用于膜厚的检测^[4-7]。根据测量原理不同,超声波方法分为脉冲反射法和反射系数法,其中脉冲反射法的检测结果容易受到传播材料、结构缺陷、传播方向等因素的影响,而反射系数法则存在计算复杂、测量范围受限的问题。同时,超声检测过程中需要声波发射、声波接收并进行相关计算,因此超声波法不适合动态检测。

反射式光纤传感器具有抗电磁干扰的特性,频带宽适合动态测量,同时还具有体积小、成本低、测量范围大、标定容易等特点,已经实现振动、叶尖间隙、应变等多个物理量的检测,也为润滑油膜厚度的检测提供了手段^[8-12]。然而,目前还未提出一种适合滑动轴承润滑油膜厚度精密动态检测的模型以实现光电信号与油膜厚度动态信号的精确映射。因此,在分析光纤检测结果影响因素的基础上,构建润滑油膜厚度精密检测模型,并对光纤传感器输出特性的非线性补偿方法、动态检测过程中油膜空穴和油液杂质对传输光的干扰噪声的滤除方法做进一步研究,具有重要的意义。

1 润滑油膜厚度光纤检测原理

滑动轴承润滑油膜厚度检测,其实质是进行间隙距离检测,其中的介质是润滑油。润滑油具有透光性,当发射光纤发射具有一定功率的光后,经润滑油和发射面,接收光纤的接收光功率会随着油膜厚度的变化而变化,即油膜厚度对接收光功率进行了调制,通过对接收光纤的接收光进行处理就可以实现油膜厚度的检测。

如图1所示,将光纤传感器布置在与 y 轴夹角为 φ 的方向上,安装初始间距为 w 。转子未工作时,轴颈处于轴承最下端,光纤传感器测得光纤探头至轴颈表面的油膜厚度为 z_0 。根据轴承、轴颈的几何参数,此时测点处油膜厚度为

$$h_0 = R - \frac{r_j}{\sin\varphi} \sin\left[\varphi + \arcsin\left(\frac{c}{r_j} \sin\varphi\right)\right] \quad (1)$$

由式(1)可知,转子未工作时的油膜厚度只与传感器安装位置、轴承和轴颈的几何参数有关,因此对

于确定的转子-轴承系统及传感器安装位置,转子未工作时测点处的油膜厚度为确定值。

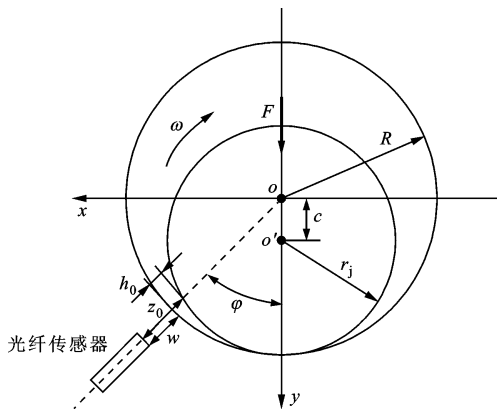


图1 传感器安装初始间距

根据图1可知,传感器的安装初始间距为

$$w = z_0 - h_0 =$$

$$z_0 - R + \frac{r_j}{\sin\varphi} \sin\left[\varphi + \arcsin\left(\frac{c}{r_j} \sin\varphi\right)\right] \quad (2)$$

如图2所示,转子工作时,光纤传感器所检测的油膜厚度为 z ,其安装初始间距为 w ,则测点处的油膜厚度为

$$h = z - w \quad (3)$$

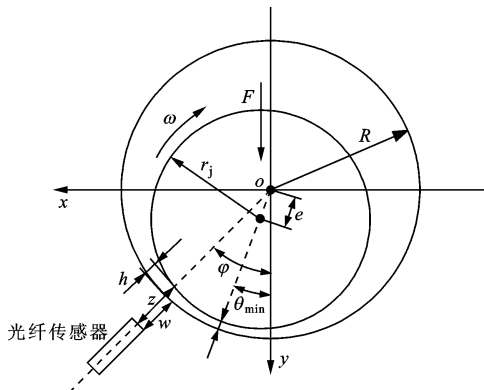


图2 测点处油膜厚度的几何关系

2 光纤动态精密检测模型构建

2.1 模型构建

由式(3)可知,实现测点处油膜厚度检测的关键在于对光纤探头至轴颈表面距离的检测。采用单光纤对光纤传感器时,接收光功率会受到光源功率及反射面反射率的影响,因此单光纤对光纤传感器要实现油膜厚度的精确测量,需要发光功率稳定的光源和确定的反射面反射率。然而实际上,轴颈处于运动状态时,表面反射率是实时变化的,对于光源,需要设计复杂的电路来保证光源发光功率稳定。

接收光功率需通过调理电路转换成电压信号,以供采集系统进行采集,通过上位机将采集的电压信号进行反变换,得到探头至反射面的距离,再减去初始安装距离,便获得测点处油膜厚度。在此过程中,需对光纤传感器的非线性特性进行补偿,以提高检测的精度。

在实际的油膜厚度光纤检测过程中,除了入射光功率、润滑介质及轴颈表面对检测结果有影响之外,环境光的干扰、油膜中的空穴及杂质对油膜厚度检测结果也有较大的影响^[13]。环境光会改变光电转换中的光功率,可以通过对检测电路进行屏蔽及提高入射光功率增加接收光纤的光功率进行补偿,以减小环境光对检测结果的影响。油膜中的空穴及杂质会改变光传播的角度,并使得光纤最大入射角及光强调制函数发生改变,导致油膜检测信号中存在噪声干扰。对于此种干扰无法通过硬件方法进行补偿,需在上位机中设置相应的滤波环节对油膜厚度信号进行滤波处理,以得到准确的油膜厚度信号。

通过上述分析,本文构建如图3所示的带软件滤波环节的油膜厚度双路接收光纤动态检测模型。在此模型中,光纤传感器采用双路接收光纤,对于环境光的干扰可采取屏蔽及适当提高入射光功率降低前置放大系数来进行消除,通过非线性补偿环节,对光纤传感器的非线性进行校正。对测量过程中的空穴和噪声干扰,通过设置相应的滤波环节 $F(h'(n))$ 进行消除。

双路接收光纤检测模型采用双路接收光纤,其调制函数分别为 f_1 和 f_2 ,通过对两路接收光的光功率转换成的电压信号进行比值处理,在光纤参数、润滑油、反射面形状都确定的情况下,调理电路输出的电压信号仅与油膜厚度有关。因此,根据上述双路接收光纤检测模型,此时油膜厚度测量的一般表达式为

$$U_{of} = c \frac{[\delta P_i T_o f_2(z, r_o, \theta_{cl}, r_j, p) + P_E] k R}{[\delta P_i T_o f_1(z, r_o, \theta_{cl}, r_j, p) + P_E] k R} = c \frac{f_2(z, r_o, \theta_{cl}, r_j, p)}{f_1(z, r_o, \theta_{cl}, r_j, p)} \quad (4)$$

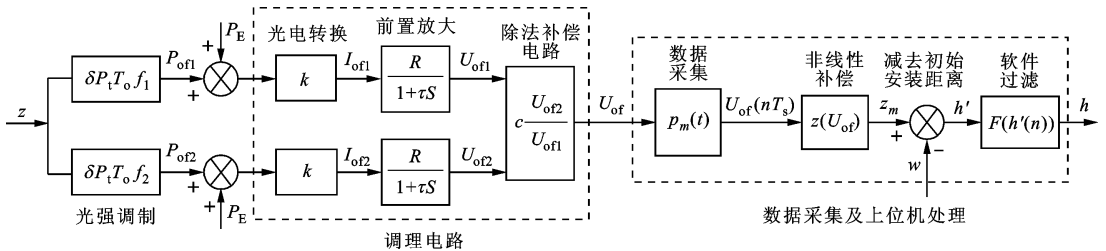


图3 双路接收光纤精密检测模型

式中: U_{of} 为调理电路输出的电压信号; δ 为反射面反射系数; P_i 为发射光功率; T_o 为润滑油影响系数; θ_{cl} 为润滑油环境下的光纤最大入射角; k 为光电转换系数; R 为放大系数; c 为除法电路放大转换系数; P_E 为环境光的光功率; f_1 为第1路接收光纤的调制函数; f_2 为第2路接收光纤的调制函数。

由式(4)可以看出,经过双路接收光纤的接收光功率进行比值处理,输出值仅与除法补偿电路的放大系数和调制函数输出比值有关,从理论上可以消除光功率波动、润滑油影响系数及反射面反射率对油膜厚度测量结果的影响。

获得的油膜厚度电压信号经采集器采集后,为了提高检测精度,通过软补偿方法对检测结果进行非线性校正,即

$$z_i(U_{ofi}) = a_0 + a_1 U_{ofi} + a_2 U_{ofi}^2 + \dots + a_n U_{ofi}^n \quad (5)$$

式中: $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为反变换系数组,数值可根据传感器静态标定结果利用最小二乘法得到,对应的阶次可根据拟合精度进行选择。

获得的油膜厚度为探头至反射面之间的油膜厚度 z_m ,根据式(3),用 z_m 减去初始距离 w 即为测点处轴承油膜厚度。对于环境光的干扰,通过双路接收光纤并不能很好地消除,因此在设计后续检测系统时,可通过屏蔽环境光和增大发射光功率 P_i 以消除环境光对测量结果的影响。对于检测过程中油膜内空穴及杂质的干扰,在上位机中设置相应的滤波环节进行滤除。设对应的滤波器的滤波算法为 $F(h'(n))$,则最终的油膜厚度为

$$h = F(h'(n)) \quad (6)$$

2.2 双段曲线拟合的非线性补偿方法

光纤传感器在测量滑动轴承润滑油膜厚度前,必须在润滑油环境下和相同曲率半径的反射面条件下对其标定,以确定反射面曲率半径、润滑油折射率以及传感器输出特性的非线性对光纤检测系统检测精度的影响^[13]。在此基础上,需根据标定结果对传感器进行非线性补偿并得到相应的反变换系数,最终在上位机软件中进行处理,以提高光纤传感器的

检测精度。

本文采用双段曲线拟合法对传感器非线性特性进行补偿以提高测量精度,拟合算法采用最小二乘法,过程如下:

(1)假设 z 为标定的输入(位移), U_{of} 为输出(输出电压),则标定点的数据为

输入 $z = [z_1, z_2, \cdots, z_N]$

输出 $U_{of} = [U_{of1}, U_{of2}, \cdots, U_{ofN}]$

(7)

(2)为减小测量误差,提高测量精度,将测量范围划分为两段分别进行拟合;

(3)假设每段测量范围对应的反非线性特性拟合方程为

$$z_i(U_{ofi}) = a_0 + a_1 U_{ofi} + a_2 U_{ofi}^2$$

(8)

(4)利用最小二乘法分别求解不同测量范围对应的 a_0 、 a_1 和 a_2 ;

(5)根据每段测量范围对应的采样值 U_{of} ,确定 U_{of} 所在的测量范围,再将 U_{of} 代入对应的反非线性特性拟合方程得到被测位移 z 。

2.3 滤波算法

对于检测过程中油膜内空穴、杂质的干扰,模型采用具有保相功能、运算速度快的形态滤波算法。根据光纤传感器在润滑油中的传输特性,空穴对传感器检测的影响主要是造成信号中出现脉冲噪声,而杂质的影响则是随机的。形态滤波算法中结构元素的形式对噪声滤除有显著影响,研究表明,选择三角结构元素可有效滤除信号中的脉冲噪声,选择半圆结构元素可有效滤除信号中的随机噪声^[14-15]。根据油膜厚度信号噪声特点,形态滤波环节采用三角结构元素和半圆形结构元素进行复合级联的方式,复合级联的方法为

$$y_s(n) = \frac{1}{2}[(h' \circ g_s \cdot g_s)(n) + (h' \cdot g_s \circ g_s)(n)]$$

(9)

$$h(n) = \frac{1}{2}[(y_s \circ g_b \cdot g_b)(n) + (y_s \cdot g_b \circ g_b)(n)]$$

(10)

选择三角结构元素 g_s ,通过式(9)对采集到的原始油膜厚度信号 $h'(n)$ 进行滤波,得到滤波信号 $y_s(n)$;再选择半圆结构元素 g_b ,通过式(10)对 $y_s(n)$ 进行处理,得到最终的油膜厚度信号 $h(n)$ 。

3 静态标定实验

本文所采用的光纤传感器的光纤排列方式为双圈同轴式,光纤为多模石英光纤,纤芯半径为 96 μm ,

数值孔径为 0.22 μm ,包层厚度为 4 μm 。搭建的静态标定实验装置如图 4 所示。将油槽放置在微位移平台上,光纤传感器固定在位移平台上,将光纤传感器垂直对准反射面,通过微位移传感器的控制器调整反射面距光纤探头的距离,并通过上位机的标定程序进行显示和记录数据,标定结果如表 1 所示,双段曲线拟合的反变换系数如表 2 所示。

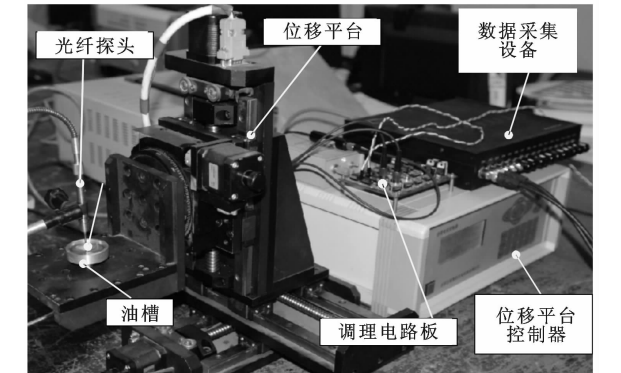


图 4 静态标定实验装置

表 1 标定结果

厚度/ μm	电压/V	厚度/ μm	电压/V	厚度/ μm	电压/V
1 800	-1.996	2 150	-3.413	2 500	-4.957
1 850	-2.206	2 200	-3.643	2 550	-5.183
1 900	-2.418	2 250	-3.869	2 600	-5.393
1 950	-2.601	2 300	-4.075	2 650	-5.575
2 000	-2.818	2 350	-4.305	2 700	-5.812
2 050	-3.001	2 400	-4.538	2 750	-6.005
2 100	-3.200	2 450	-4.744	2 800	-6.204

表 2 双段曲线拟合反变换系数表

线性 范围/ μm	反变换系数		
	a_0	a_1	a_2
1 800~2 300	1 250.1	-289.5	-7.8
2 300~2 800	1 522.5	-161.3	7.2

采用一次线性拟合和双段曲线的非线性补偿方法的结果对比如表 3 所示。由表 3 可知,采用双段曲线拟合方法可提高检测精度,减小测量误差。

表 3 拟合结果对比

拟合方法	线性 范围/ μm	测量最大 误差/ μm	相对 误差/%
一次线性	1 800~2 800	9.73	9.7
双段曲线	1 800~2 300	4.40	4.8
	2 300~2 800	4.80	

4 油膜厚度动态检测实验

在图 5 所示的单跨滑动轴承支承的实验台上测取油膜厚度动态信号,转子实验台参数如表 4 所示。该实验台转子两端由圆柱形滑动轴承支承,转子由可调速电机驱动,传感器采用双圈同轴式光纤传感器。实验中,在转子静止的情况下测点传感器探头距轴颈表面的距离为 $2\,011.5\,\mu\text{m}$,传感器安装角 φ 为 45° 。通过调速器将转子的转速调整到 $1\,800\,\text{r/min}$,同时通过数据采集器 CBOOK2000E 的上位机程序将采样频率设置为 $1\,024\,\text{Hz}$,采样点数设置为 $1\,024$ 个。通过数据采集,最终获得油膜厚度动态信号。

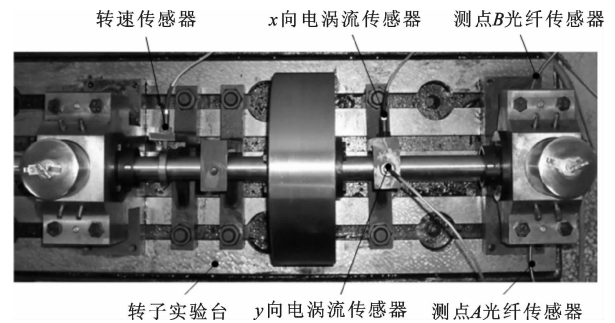


图 5 油膜厚度动态检测实验台

表 4 转子实验台参数

名称	参数	名称	参数
转子跨度/mm	600	轴承宽度/mm	45
转子直径/mm	29.918	半径间隙/ μm	46
圆盘质量/kg	30.21	相对间隙/%	0.3

模型中复合级联形态滤波器的两种结构元素的结构高度取值为 5,结构宽度取值为 8。图 6 为未处理的 A 测点油膜厚度动态信号波形,图 7 为经模型滤波环节后的信号波形。从图 6 可以看出,转子转速为 $1\,800\,\text{r/min}$ 时,因轴心轨迹随时间在静态工作点附近变化,为此测点油膜厚度信号为波动信号,其

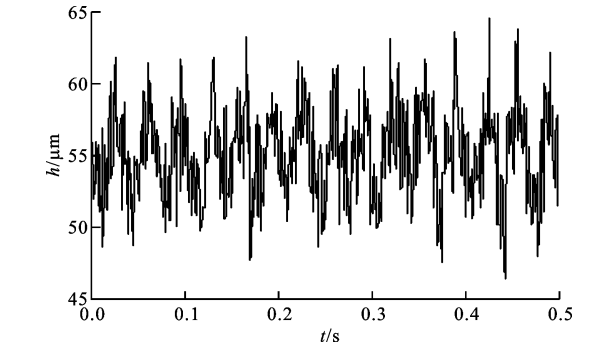


图 6 转速 $1\,800\,\text{r/min}$ 时测点 A 油膜厚度信号时域波形

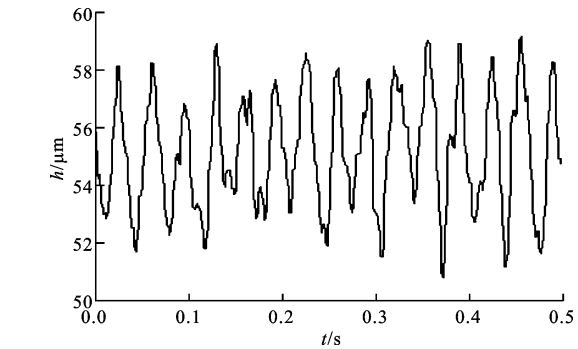


图 7 经滤波后测点 A 油膜厚度信号时域波形

中含有明显的噪声。从图 7 可以看出,滤波后油膜厚度信号的噪声得到很好抑制,测点处的油膜厚度基本在其平均值附近波动,且幅值不超过 $5\,\mu\text{m}$ 。

5 结 论

在分析油膜厚度光纤检测原理的基础上,构建了具有补偿和抗干扰功能的油膜厚度光纤动态精密检测模型。双路接收光纤光强调制方式和调理电路比值处理可消除发射光功率波动、反射率变化对测量结果的影响;双曲线拟合法的非线性补偿可减小传感器测量误差,提高测量精度;复合级联形态滤波算法可有效滤除油膜厚度动态信号中的噪声干扰。静态标定实验和油膜厚度动态检测实验结果证明了本文所构建模型的正确性。

参考文献:

[1] 姜彤,周春阳,徐永金,等. 汽轮发电机中静止励磁轴电压的分析与抑制 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 142-146.
JIANG Tong, ZHOU Chunyang, XU Yongjin, et al. Analysis and suppression of shaft voltage in turbonator with static excitation system [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 142-146.

[2] 陆霄露,邓康耀. 采用激光诱导荧光法测量油膜厚度的研究 [J]. 内燃机学报, 2008, 26(1): 92-95.
LU Xiaolu, DENG Kangyao. The study of film thickness measurement by laser induced fluorescence [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(1): 92-95.

[3] 王学锋,郭峰,杨沛然. 纳/微米弹流油膜厚度测量系统 [J]. 摩擦学报, 2006, 26(2): 150-154.
WANG Xuefeng, GUO Feng, YANG Peiran. A film measuring system for elastohydrodynamic lubrication from nano to micro thickness [J]. Tribology, 2006, 26(2): 150-154.

[4] DWYER-JOYCE R S, HARPER P, DRINKWATER B W. A method for the measurement of hydrodynamic

- oil films using ultrasonic reflection [J]. Tribology Letters, 2004, 17(2): 337-348.
- [5] 耿涛, 孟庆丰, 贾谦, 等. 薄衬层结构滑动轴承润滑膜厚度的超声检测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(8): 80-85.
GENG Tao, MENG Qingfeng, JIA Qian, et al. A method to measure thickness of lubricant film in thin-liner sliding bearings using ultrasonic reflection [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(8): 80-85.
 - [6] 卢黎明. 基于超声波的液体滑动轴承润滑油厚度的测定 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(5): 165-168.
LU Liming. The measurement of shaft locus of liquid sliding bearing [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(5): 165-168.
 - [7] ZHANG J, DRINKWATER B, DWYER-JOYCE R S. Thin oil-film thickness distribution measurement using ultrasonic arrays [J]. NDT&E International, 2008, 41(8): 596-601.
 - [8] 孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 等. 推力轴承油膜厚度测量系统的研制 [J]. 计量学报, 2003, 24(2): 38-39.
SUN Xiaogang, DAI Jingmin, CONG Dacheng, et al. Development of oil film thickness measuring system for thrust bearing [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 24(2): 38-39.
 - [9] BINU S, MAHADEVAN P, CHANDRASEKARAN N. Fibre optic displacement sensor for the measurement of amplitude and frequency of vibration [J]. Optics and Laser Technology, 2007, 39(8): 1537-1543.
 - [10] 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.
 - [11] CHOWDHURY S, LAUGIER M. Thin film stress measurement by instrumented optical fibre displacement sensor [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(9): 4289-4294.
 - [12] 张小栋, 谢思莹, 牛杭, 等. 光纤动态检测技术的研究与进展 [J]. 振动、测试与诊断, 2015(3): 409-416.
ZHANG Xiaodong, XIE Siying, NIU Hang, et al. Research on dynamic measurement technology of fiber optic sensors and their developments [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015(3): 409-416.
 - [13] 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.
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.
 - [14] 沈路. 数学形态学在机械故障诊断中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
 - [15] 王晶, 徐光华, 张四聪, 等. 基于形态学滤波器的棘波提取技术 [J]. 中国生物医学工程学报, 2007, 26(1): 69-73.
WANG Jing, XU Guanghua, ZHANG Sicong, et al. A spike detection method based on morphological filter [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2007, 26(1): 69-73.

[本刊相关文献链接]

- 巨刚, 袁亮, 姜道伟, 等. 微型电机人字沟轴承润滑特性分析. 2016, 50(1): 59-66. [doi: 10.7652/xjtuxb201601010]
- 蒲伟, 王家序, 杨荣松, 等. 重载下准双曲面齿面齿轮传动界面润滑机理分析. 2015, 49(11): 55-61. [doi: 10.7652/xjtuxb201511010]
- 张俊红, 马梁, 鲁鑫, 等. 机动飞行下挤压油膜阻尼器对碰摩故障转子系统的影响. 2015, 49(11): 62-70. [doi: 10.7652/xjtuxb201511011]
- 张琦, 贲宇宁, 王聚存, 等. 花键轴振动挤压成形试验研究. 2015, 49(11): 110-115. [doi: 10.7652/xjtuxb201511018]
- 王建梅, 苗克军, 徐俊良, 等. 非均匀载荷下厚壁圆筒稳态蠕变应力的计算. 2015, 49(9): 8-13. [doi: 10.7652/xjtuxb201509002]
- 吴建华, 雷源, 王刚, 等. 往复式冰箱压缩机曲轴动态特性与轴承润滑计算分析. 2015, 49(2): 55-61. [doi: 10.7652/xjtuxb201502010]
- 尹必峰, 钱晏强, 卢振涛, 等. 缸套表面复合织构润滑性能理论及试验研究. 2014, 48(9): 74-80. [doi: 10.7652/xjtuxb201409013]
- 耿涛, 孟庆丰, 贾谦, 等. 薄衬层结构滑动轴承润滑膜厚度的超声检测方法. 2014, 48(8): 80-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201408014]
- 张帆, 钟海权, 孙丽军, 等. 大型重载滑动轴承润滑特性的理论与试验研究. 2014, 48(5): 15-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201405003]
- 王琳, 裴世源, 徐华. 表面织构对转子轴承系统稳定性影响的实验研究. 2014, 48(3): 84-88. [doi: 10.7652/xjtuxb201403016]
- 欧阳武, 陈润霖, 彭林, 等. 考虑局部固体接触的滑动轴承主刚度和主阻尼研究. 2014, 48(1): 112-117. [doi: 10.7652/xjtuxb201401019]

(编辑 赵炜 荆树蓉)