

DOI: 10.7652/xjtuxb201303001

多沟槽水润滑橡胶轴承水膜压力的无线测试方法

王楠¹, 孟庆丰¹, 张雪冰², 王朋朋¹

(1. 西安交通大学润滑理论与轴承研究所, 710049, 西安; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 430064, 武汉)

摘要: 为了得到多沟槽水润滑橡胶轴承水膜压力的全息(周向和轴向)分布, 针对目前滑动轴承润滑膜压力测试方法的不足, 提出了一种水润滑轴承水膜压力的无线测试方法。该方法采用在转轴上及轴肩的不同位置打孔(即径向导流孔和轴向导流孔, 它们之间相互贯通, 水膜压力通过各导流孔传递), 将压力传感器安装在轴肩轴向导流孔处、无线采集发射装置安装在轴尾端的设计方案, 从而避免了对轴承工作面润滑状态的破坏, 获得了相应轴承截面上整周水膜压力的连续分布, 且便于传感器的安装和调试。与传统测试方法相比, 由于该方法采集到的水膜压力数据是利用数字信号进行无线传输的, 因此具有无需复杂布线、易操作、测试精度高等优点, 并可用于对其他滑动轴承润滑膜压力的测试。

关键词: 多沟槽水润滑橡胶轴承; 水膜压力; 无线测试

中图分类号: TH39; TP271; TP274 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0001-06

Wireless Measurement for Film Pressure of Multi-Groove Water-Lubricated Rubber Bearing

WANG Nan¹, MENG Qingfeng¹, ZHANG Xuebing², WANG Pengpeng¹

(1. Theory of Lubrication and Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: To obtain the film pressure distribution of multi-groove water-lubricated rubber bearing and overcome the shortcomings in the existing measurements for lubrication film pressure of sliding bearing, a new wireless measurement method is introduced. The radial flow guiding holes and axial flow guiding holes are punched on shaft and shaft shoulder in different positions, through which the water film pressure is propagated. The pressure sensors are installed in the axial flow guiding holes, and the wireless data acquisition transmitter is installed in the end of the shaft, then the damage of lubrication state for bearing working face can be avoided, and the circumferential continuous distribution of water film pressure for corresponding bearing sections can be acquired. The collected data of water film pressure are transmitted by digital signal via wireless transmission. Compared with the traditional measurement schemes, here complex arrangements of wire are unnecessary, the operation is simple, and the measuring accuracy gets higher. The experimental measurements for multi-groove rubber bearings with concave staves and flat staves show the feasibility and effectiveness, and this measurement technique can also be used for measuring lubrication film pressure of other sliding bearings.

Keywords: multi-groove water-lubricated rubber bearing; film pressure; wireless measurement

收稿日期: 2012-07-27。 作者简介: 王楠(1983—),男,博士生;孟庆丰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875196);国家重点基础研究发展规划资助项目(2009CB724304)。

网络出版时间: 2012-12-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121218.0923.006.html>

水润滑橡胶轴承是水下最适宜使用的轴承之一,近年来在船舶、水轮机、水泵和农用机械等设备上得到了较为广泛的应用^[1]。本文研究的对象是8纵向沟槽水润滑橡胶轴承,它按结构的不同分为凹面及平面板条轴承。与油润滑轴承相比,由于水的黏度较低,加上轴承使用过程中橡胶的摩擦、磨损及其多沟槽的结构,因此润滑膜的形成较为困难,轴承的特性较为复杂。

水膜压力分布是水润滑橡胶轴承的基本参数,可以通过深入研究来获得轴承的重要特性,如:水膜厚度、橡胶变形、轴承承载能力等。目前,对水润滑橡胶轴承水膜压力的测试与分析大都停留在数值仿真和理论探讨阶段,特别是针对本文研究对象的试验测试及结果未见有文献报导。文献[1]利用数值计算得到了凹面型和平面型橡胶轴承的周向和轴向水膜压力分布。文献[2]利用 FLUENT 软件对水润滑橡胶轴承进行了 2D 模拟,并在不同偏心率下,将周向油膜压力和水膜压力做了对比分析。文献[3]利用 ADINA 软件对水润滑合金轴承进行 2D 有限元建模,求得了相似半 Sommerfeld 解的水膜压力周向分布。文献[4]利用影响系数法计算了水润滑轴承在不同压力与速度下的水膜压力分布,并比较了不同沟槽结构的轴承水膜压力分布的差异。文献[5]利用数值计算方法和 ANSYS 有限元分析比较了凹面型、平面型和凸面型水润滑轴承的水膜压力分布。文献[6]利用 FLUENT 软件对 0~3 沟槽水润滑轴承进行 2D 和 3D 模拟,得到了在不同偏心率和沟槽位置时,轴承的周向、轴向水膜压力分布与流场分布。文献[7]从理论上分析了 3 沟槽水润滑径向轴承的稳态和动态特性,认为水润滑轴承水膜内的最大压力并不是出现在轴承的中部,而是沿轴向逐步下降。文献[8]仅对凹面橡胶轴承单个板条在一定范围内的压力分布进行了仿真和试验。

由于在计算或仿真中做了物理和数学上的近似处理,水膜压力的理论结果不能完全反映实际情况,因此水膜压力的试验测量方法还需要再进行研究。目前,滑动轴承润滑膜压力的测试方法有:①在轴上打孔,将压力传感器安装到转轴中,轴在旋转过程中,压力传感器可测得所在截面上的润滑膜压力,然后通过电刷式集流环或水银集流环将信号引出^[8],但集流环成本较高,接触时会产生较大的干扰信号,且在轴高速旋转过程中,集流环还存在着动平衡和可靠性的问题;②在轴承壳体上的不同位置打孔,把压力水或油引入压力表进行测量,或者在这些位置

安装压力传感器^[9],但轴承外壳上的测点不可能布置很多,因此该方法只能得到有限点处的润滑膜压力,无法获取轴承整周润滑膜压力的连续分布。

本文在对已有润滑膜压力测试方法研究的基础上,结合目前应用较为成熟的无线传感技术,提出了一种针对多沟槽水润滑橡胶轴承水膜压力的无线测试方法。通过在不同工况下反复试验,获得了凹面及平面橡胶轴承完整的水膜压力全息(周向及轴向)分布,并详细比较和分析了试验结果。

1 水润滑轴承试验台与无线测试系统

1.1 水润滑轴承试验台与传感器的布置

试验台按 5:1 的缩放比例设计,如图 1 所示。试验台总体结构包括电动机、联轴器、双侧 E 型电磁加载装置、测试轴承、无线采集发射装置、水润滑供水系统、底座与端盖等部件,供水系统分别有 6 个进水管和出水管,用温度传感器实时监测水温变化。电磁加载装置可以实现对轴系的非接触加载,且通过控制系统可改变电磁加载力的大小及方向,以得到不同类型的载荷。加载力由安装在加载装置底座的传感器测量,电磁加载主轴部位采用了加粗轴套,用硅钢片制成,以增大受力面积。需注意的是,测量水膜压力的传感器内置 IC 电路且需要恒流源供电,而测量电磁力的传感器只是一般的力传感器。试验时,试验台的工作条件为:转速 0~1000 r/min;电磁加载力 0~2000 N;供水压力 0.1~0.6 MPa。

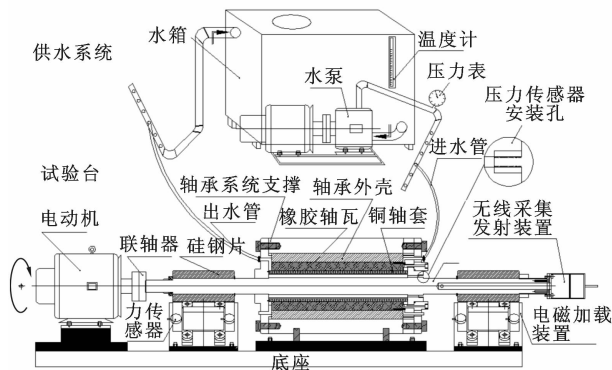
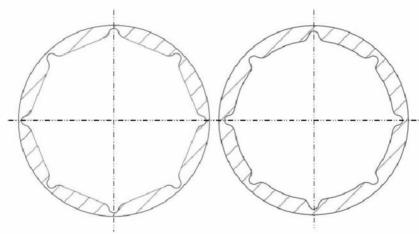


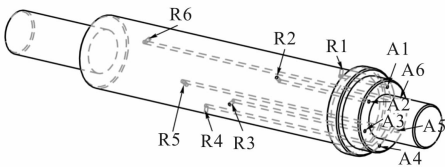
图1 水润滑轴承试验台与供水系统的结构图

由图 2 可见,试验用的凹面和平面橡胶轴承仅存在板条处的结构差异,沟槽及其他部分(尺寸)完全相同。测试轴承的长径比为 4:1,属于长轴承。转轴的设计充分考虑了打孔(导流和安装传感器)和试验中需要加载较大电磁力的要求,采用 45# 钢,经过调质处理和强度校核,完全可满足工作要求。



(a)平面轴承 (b)凹面轴承
图 2 橡胶轴承径向剖面图

由图 3 可以看出,沿轴向依次等距(75 mm)布置有 6 个径向导流孔,在右侧轴肩处,布置 6 个与径向导流孔相互贯通的轴向导流孔,且在轴向导流孔处有配合压力传感器的安装孔,这些孔沿径向是等角度(60°)分布的。在轴旋转过程中,通过导流孔的流体压力传递,可以测得对应 6 个轴承截面上的水膜压力。



R1~R6:径向导流孔;A1~A6:轴向导流孔
图 3 转轴的结构图

与测试方法②相比,采用上述的转轴设计方案可在不破坏轴承工作面润滑状态的情况下,获取轴承整周水膜压力的连续分布,并可借此得到轴向水膜压力的分布,而且便于传感器的安装、调试与更换。

凹面轴承传感器的布置如图 4 所示,平面轴承传感器的布置与此相同。为了确切地了解水膜压力

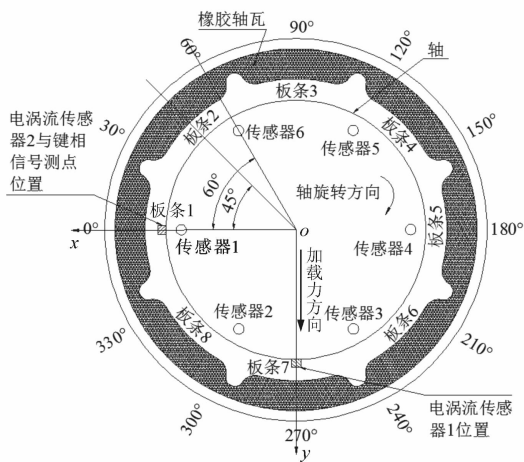


图 4 凹面轴承传感器的布置示意图

在轴承各个板条和沟槽的分布情况,对轴承的 8 个板条和传感器分别编号,将传感器 1 的初始位置位于水平方向,并测得了传感器 1 的键相信号。从无线采集发射装置到电动机远端,轴的旋转方向为顺时针。由于加载力的方向向下,因此承载区包括板条 6~板条 8,以及板条间的沟槽部分。当传感器 1 的位置确定之后,其他传感器的位置也随即确定。另外,为了获得轴在旋转中的偏转情况,在水平和垂直方向设置了电涡流传感器,用于测量转轴的轴心轨迹。

1.2 无线测试系统

水膜压力无线测试系统由压力传感器、无线采集发射与无线接收装置、上位机及处理与分析软件组成,如图 5 所示。无线采集发射装置包括恒流源、数字信号处理器 DSP2812、单片机 MSP430、CC1101 射频发射模块和供电电源。无线接收装置包括单片机 MSP430、CC1101 射频接收模块和供电电源。无线采集发射装置中,恒流源用于给压力传感器供电和对压力传感器输出的信号进行初步处理(滤波与放大),然后将信号送至数字信号处理器 DSP2812 进一步处理。数字信号处理器 DSP2812 有 8 个采集通道,采样频率和采样点数均可在上位机的处理与分析软件中设置。由于无线设备的能量有限,因此为了节能,采用下述方法:①减少传输数据量以减小能耗,传感器的输出信号在数字信号处理器 DSP2812 中被压缩和编码^[10];②无线采集发射与接收装置采用低功耗设计,数字信号处理器 DSP2812 和单片机 MSP430 均有多种低功耗模式,可在程序内部设置^[11]。

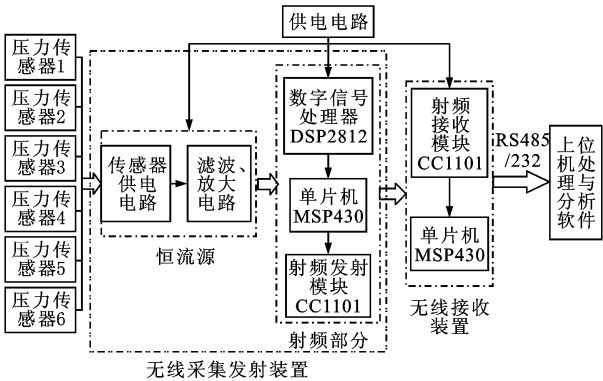


图 5 无线测试系统

与测试方法①相比,采用无线传感技术的优势为:①成本低,操作简单、方便,无需复杂布线;②无线传输的数据是数字信号,可避免传统模拟信号在

线路中传输带来的长距离衰减和噪声,因此精度高,可靠性好。

2 数据处理算法——时域平均

时域平均是利用随机统计原理,对长周期信号进行截断、叠加、平均,从而消除了随机干扰^[12]。实测机械振动往往是准周期、随机、非平稳或突变的,而在一般的回转或往复机械中,反映运行状态的各种信号又是周期性重复的,其频率是机械回转频率的整数倍,因此用数理统计规律以一定的周期为间隔去截取、叠加、平均,可以消除信号中的非周期分量和随机干扰。应用时域平均算法需要的时标脉冲(键相信号),可在轴旋转的过程中获取。由于试验台采用电磁加载方式,因此可能对数据的无线传输造成电磁干扰;从水润滑轴系中测得的水膜压力是周期、重复信号,可能存在诸如设备振动等非周期或随机干扰,因此采用时域平均算法对信号进行处理,可以较好地复现原始水膜压力,从而消除噪声。将算法编程内置于无线测试系统的上位机软件中,待测试过程结束后,可直接用于对测试结果进行数据处理。

设 $x(t)$ 为回转机械或往复机械运行中所产生的带有周期重复性的信号,以 Δt 为采样间隔对 $x(t)$ 进行采样,得到离散序列 $x(n)$, $n = 0, 1, 2, \dots, (t/\Delta t) - 1$ 。按机械回转频率 f_0 提取相应的周期信号,把 $x(n)$ 按等长度连续截取 N 段(每段长度设为 M ,每段对应的周期 $T = 1/f_0 = M\Delta t$),并将这 N 段数据求和平均,可以得到经过时域平均处理后的新序列

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x(n - rM)$$

$$n = (N-1)M, (N-1)M+1, \dots, NM-1$$

(1)

对式(1)做 z 变换后可以发现,对序列 $x(n)$ 的时域平均处理相当于用一个多带通滤波器(也称为梳状滤波器)对 $x(n)$ 进行滤波,多带通滤波器传递函数的幅频响应为

$$|H(f)| = |\sin(\pi N f / f_0) / \sin(\pi f / f_0)| / N$$

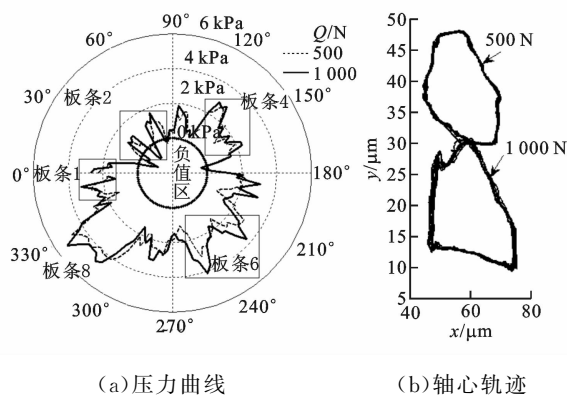
(2)

3 试验结果与分析

3.1 凹面橡胶轴承

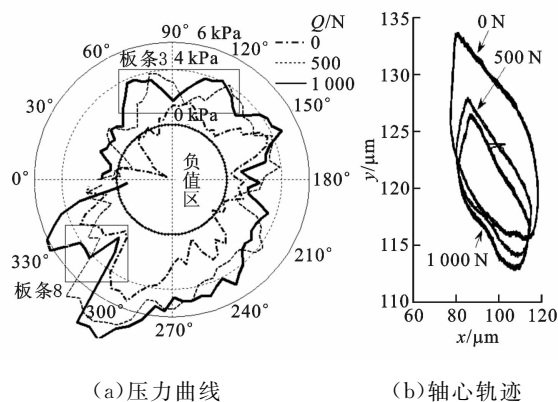
图 6~图 8 为 8 沟槽凹面橡胶轴承水膜压力的全息(周向及轴向)分布测试结果,为便于观察,采用极坐标图,用极径表示压力的大小。图 6、图 7 为传

感器 4 测得的在不同转速、不同载荷 Q 下的全周水膜压力的分布,以及轴心轨迹(用于辅助分析)。由图 6a、图 7a 可以看出,沟槽对水膜压力的分布影响较大,其导致各个板条出现数量不等的压力峰,但沟槽处的压力由于周向流动中的节流效应,所以并未显著改变水膜压力曲线的基本走势。在一定的转速下,随着载荷的增加,承载区的水膜压力随之增大。这是由于载荷越大,轴偏心越大,轴承的水膜压力梯度越大,使得水膜逐渐向一个区域聚合,轴承的承载能力增大。图 6b、图 7b 中的轴心轨迹随着载荷的增加向下移动,表明加载力方向是垂直向下的。不同工况下的轴承最大水膜压力均位于板条 8 的位置上,这和一般的油轴承径向油膜压力的分布是相似的。比较图 6a 和图 7a,在相同载荷下,随着轴转速的提高,轴承动压效应增强,水膜压力随之增大。



(a) 压力曲线 (b) 轴心轨迹

图 6 全周水膜压力的分布(480 r/min)



(a) 压力曲线 (b) 轴心轨迹

图 7 全周水膜压力的分布(720 r/min)

如图 6a、图 7a 所示,由于水囊的存在,在轴承的不同板条上形成了压力双峰(图中矩形框内所示),由于各个板条上的压力最大值出现在板条中心,使得板条中心区凹陷。橡胶具有不可压缩性,而板条两边的压力相对较小,这种相互独立的压力峰会使得板条两边的节点变形而隆起,形成水囊,促进流

体压力的形成,最终使板条两端出现了 2 个压力峰。在图 6a 中,压力双峰分别位于板条 1、板条 2、板条 4 和板条 6 上,而板条 8 上最大压力峰轻微凹陷,没有出现很明显的压力双峰。与图 6a 相比,图 7a 中压力双峰的数量由 4 个减为 2 个,分别位于板条 3 和板条 8 上,且板条 8 上最大压力的压力双峰非常明显,这是因为随着轴转速的提高,轴系运转逐渐平稳,轴承动压效应慢慢增强,水膜向承载区聚合,水膜压力逐渐增大,轴承的承载能力逐渐增强。由图 6a、图 7a 可见,过了轴承收敛区和发散区交界,即在轴与轴承的最小间隙处,水膜压力直接跳变到负值区。以大气压作为参考,认为在水膜压力变为负值时水膜开始破裂,可见,凹面橡胶轴承不存在全周完全连续水膜,只有部分水膜承担载荷。图 6b、图 7b 中的轴心轨迹形状不规则,图 7b 中 1 000 N 时轴心轨迹出现了尖峰,因此轴在运转过程中的某些位置与轴承直接接触,使凹面轴承内部流体处于混合润滑状态。

在不同载荷的情况下,多沟槽水润滑凹面橡胶轴承的轴向最大水膜压力 P 的分布如图 8 所示。由图 8 可见,水膜压力沿轴向总体呈下降趋势,轴向中间位置有压力波动,此结果与文献[8]的理论分析结果相同。从图 6~图 8 中还可以看出,水膜压力在 10^3 Pa 量级,由于供水、转速、加载方式及加载力的不同,因此水膜压力的值比文献[9]中的试验值小。

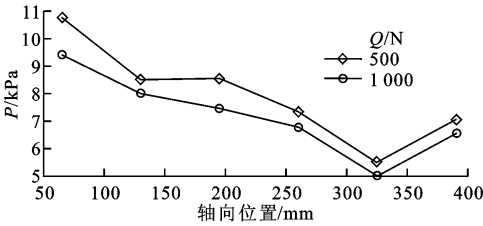
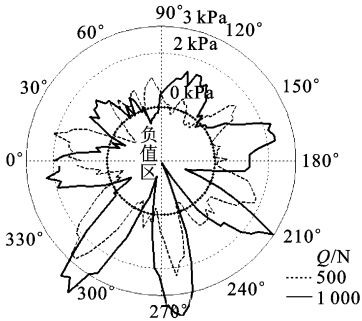


图 8 轴向最大水膜压力的分布 (480 r/min)

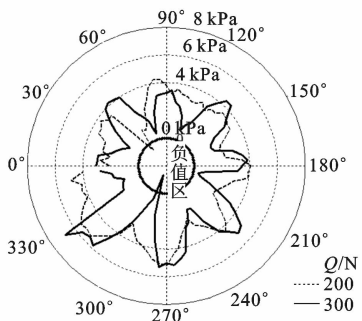
3.2 平面橡胶轴承

图 9a 与图 9b 分别为传感器 6 和传感器 1 测得的平面橡胶轴承全周水膜压力的分布,与凹面橡胶轴承水膜压力曲线(图 6a 与图 7a)相比,平面橡胶轴承每个板条上都有独立的压力峰,但压力值较小,板条压力和沟槽压力之间的过渡也不平缓。图 9 中多个板条和凹槽过渡时,水膜压力变为负值(负值区),水膜破裂,轴在很大程度上与轴承多处发生部分表面接触,这说明连续润滑膜很难形成,此时轴承为边界润滑,而轴承各板条上均有独立压力峰出现,

且随着载荷的变化而变化,此处存在部分具有动压效应的润滑膜,因此轴承应为流体动压润滑。综上所述,平面橡胶轴承整体应处于边界润滑和流体动压润滑的混合状态,只是与凹面橡胶轴承相比,边界润滑的范围扩大了。



(a) 压力曲线 (480 r/min)



(b) 压力曲线 (720 r/min)

图 9 平面橡胶轴承全周水膜压力的分布

由于凹面橡胶轴承和平面轴承的结构不同,因此导致轴承性能出现了差异。研究表明,当偏心率小于等于 1 时,平面橡胶轴承形成的流体压力及承载能力远小于凹面橡胶轴承^[1]。平面橡胶轴承的每个板条上都同时存在一个小的收敛楔形和一个小的扩散楔形,而凹面橡胶轴承板条收敛楔形较宽或等于板条宽度。另外,平面轴承收敛楔形的入口高度大于凹面橡胶轴承,即平面轴承收敛楔形在较窄范围内由较大入口高度很快减小到出口高度,而凹面橡胶轴承收敛楔形在较宽范围内由较小入口高度缓慢减小到出口高度,因此狭长的收敛楔形使凹面橡胶轴承更易于形成流体压力。

4 结 论

本文提出了一种多沟槽水润滑橡胶轴承水膜压力的无线测试方法,经过在各种不同工况下的试验,获取了 8 纵向沟槽凹面及平面橡胶轴承的周向及轴向水膜压力分布。试验证明,将无线测试技术用于

水润滑轴承的水膜压力测试是可行和有效的,与传统测试方法相比,具有成本低、易操作和准确性高等优势。本文的测试方法也可用于其他滑动轴承润滑膜压力的测试,由试验结果的对比分析,得到的结论如下。

(1)多沟槽凹面橡胶轴承不能形成整周完全连续的润滑膜,最大水膜压力位于轴承左下方板条(收敛区和发散区交界)处,此后水膜开始破裂。轴承的某些板条会出现水囊,板条上有明显的压力双峰,轴向水膜压力呈下降趋势,轴向中间位置有压力波动。轴在运转过程中的某些位置与轴承直接接触,且轴承处于混合润滑状态。

(2)多沟槽平面橡胶轴承很难形成连续润滑膜,各板条存在独立的压力峰,轴承处于边界润滑和流体动压混合润滑状态,且边界润滑的范围比凹面橡胶轴承大。

参考文献:

- [1] 段芳莉. 橡胶轴承的水润滑机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [2] 华细金. 基于 FLUENT 的纵向沟槽水润滑轴承流体润滑数值分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [3] 卢磊. 水润滑橡胶合金轴承接触及润滑特性分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [4] 刘琴华. 船舶尾轴承水润滑特性数值计算与试验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [5] 梁强. 船用水润滑轴承数值计算及结构优化 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [6] TANAMAL R. Modeling of fluid flow in multiple axial groove water lubricated bearings using computational fluid dynamics [D]. Brisbane, Australia: Queensland University of Technology, 2007.
- [7] MAJUMDAR B C, PAI R, HARGREAVES D J. Analysis of water-lubricated journal bearings with multiple axial grooves [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2004, 218(2): 135-146.
- [8] CABRERA D L, WOOLLEY N H, ALLANSON D R. Film pressure distribution in water-lubricated rubber journal bearings [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2005, 219(2): 125-132.
- [9] LITWIN W. Influence of surface roughness topogra-

phy on properties of water-lubricated polymer bearings [J]. Tribology Transactions, 2011, 54(3): 351-361.

- [10] ZHENG Bin, MENG Qingfeng, WANG Nan, et al. A compression algorithm in wireless sensor networks of bearing monitoring [C]//9th International Conference on Damage Assessment of Structures. Bristol, United Kingdom: IOP Publishing, 2011: 1-9.
- [11] WANG Nan, MENG Qingfeng, ZHENG Bin, et al. Research on linear wireless sensor networks used for online monitoring of rolling bearing in freight train [C]//9th International Conference on Damage Assessment of Structures. Bristol, United Kingdom: IOP Publishing, 2011: 1-10.
- [12] LIU Hongxing, ZUO Hongfu, JIANG Chengyu, et al. An improved algorithm for direct time-domain averaging [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(2): 279-285.

[本刊相关文献链接]

- 张锦龙,王彦伟,黄正东. 高速球轴承-转子系统动态性能的分析与优化. 2013,47(1):57-61.
- 王刚,吴建华,孙民. 滚动活塞压缩机供油系统计算流体动力学分析. 2012,46(11):23-29.
- 周权,侯予,陈汝刚. 应用于高速透平膨胀机的箔片动压气体止推轴承的试验研究. 2012,46(11):49-52.
- 方兵,张雷,赵继,曲兴田. 轴承结合部动态参数识别与等效分析模型的研究. 2012,46(11):69-74.
- 陈景龙,訾艳阳,何正嘉,袁静. 自适应冗余多小波及其在故障诊断中的应用. 2012,46(7):44-49.
- 付新哲,张优云,朱永生. 滚动轴承故障诊断的案例推理方法. 2011,45(11):79-84.
- 宋学宾,刘恒,易均,景敏卿. 推力轴承对柔性转子系统的非线性动力影响. 2011,45(9):108-113.
- 罗平,刘恒,景敏卿. 错位安装对多联轴配轴承转子系统动力学特性的影响. 2011,45(7):106-111.
- 马石磊,马求山,王琳,徐华,赵万华. 高速动静压轴承支承主轴系统动特性测试研究. 2011,45(5):52-58.
- 王福生,包钢. 新型静压气体球轴承的超声速现象研究. 2011,45(5):59-63.
- 刘显军,洪军,朱永生,刘志刚. 多支承轴系轴承受力与刚度的有限元迭代计算方法. 2010,44(11):41-45.
- 陈汝刚,周权,刘烨,侯予. 新型箔片动压止推气体轴承承载特性的试验研究. 2010,44(9):54-58.

(编辑 管咏梅)