

水润滑轴承水膜压力无线测试系统研究^{*}

王楠, 孟庆丰, 耿涛

(西安交通大学润滑理论与轴承研究所 西安, 710049)

摘要 为了深入研究水润滑轴承特性,需要了解轴承真实的水膜压力分布,而传统的滑动轴承润滑膜压力测试无法获得轴承全周水膜压力的连续分布,且采用集流环作为信号传输媒介,其成本较高、对输出信号干扰较大。针对以上不足,研究并设计了一种无线测试系统,可测量水润滑轴承全周水膜压力,并实时监测水润滑轴系的运转情况。介绍了测试系统组成,包括无线采集发射与接收装置、传感器与信号调理模块、测试软件及水润滑轴承试验台,最后应用此系统对八沟槽水润滑平面橡胶轴承的水膜压力进行测试,并与仿真结果对比分析。结果表明,该测试系统实用性良好,可用于测试其他材料和结构的水润滑轴承的水膜压力。

关键词 水润滑轴承; 水膜压力; 无线测试系统; 数值仿真
中图分类号 TH39

引言

水膜压力是水润滑轴承的基本参数之一,通常在水润滑轴承的性能计算中采用求解雷诺方程的方法获取水膜压力分布。由于在计算中必须进行物理和数学上的近似,故计算所得的压力分布以及由压力分布决定的其他重要参数(如润滑膜刚度和润滑膜阻尼等)不能完全反映实际情况。水润滑轴承材料和结构有多种形式,按材料可分为橡胶^[1-4]、塑料、陶瓷合金^[5]等;按结构可分为带沟槽(沟槽的数量和形式也有多种^[5])和一般的径向轴承。由于水的黏度较低,故与油润滑相比,水润滑轴承水膜形成较为困难,轴承特性复杂。因此,为了确定各种假设条件的影响、在新的运转工况和轴承结构下研究压力分布以及通过试验解决润滑理论其他方面存在的问题,需要研究并设计水润滑轴承水膜压力试验测试系统。

轴在轴承中回转时形成的动压力在轴承中的分布不是均匀的,且由于滑动轴承润滑膜空间的封闭性、轴承结构以及液膜形成机理等因素的制约,故滑动轴承旋转中的润滑膜压力测量和监测较为困难。传统的润滑膜压力测试通常有两种:a. 在轴承壳体上不同的位置处打孔,把压力水或油引出到压力表,或者在这些位置安装压力传感器测量^[6]。这种方法

的缺点是,由于轴承外壳上的测点不可能布置很多,因此只能测得有限点处的润滑膜压力,无法获得轴承整周润滑膜压力的连续分布。b. 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压力分布,传感器输出的测试数据则通过电刷式集流环或水银集流环引出^[7]。但由于集流环本身接触所产生的干扰信号对于传感器输出信号有较大干扰,并且在轴高速旋转中集流环存在动平衡和可靠性问题,以及集流环产品本身的型号限制和成本较高。因此,以上这些因素限制了其应用性。

为了克服传统测试的不足,获得水润滑轴承水膜压力的真实分布情况,结合无线测试技术优势(低成本、高精度、无需复杂连线和操作简易),笔者研究并设计了针对水润滑轴承水膜压力测试的无线测试系统,以实现在不同工况下对水润滑轴承水膜压力的实时测量。详细说明了测试系统的软、硬件及水润滑轴承试验台设计,给出了应用实例,将此系统用于八沟槽水润滑平面橡胶轴承的水膜压力测试,并将试验结果与仿真结果进行了对比分析。

1 无线测试系统

水润滑轴承水膜压力无线测试系统主要包括:无线采集发射与接收装置、传感器与信号调理模块、

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51275380,51175049,50875196)
收稿日期:2012-12-27;修回日期:2013-02-25

上位机测试软件及水润滑轴承试验台,如图 1 所示。

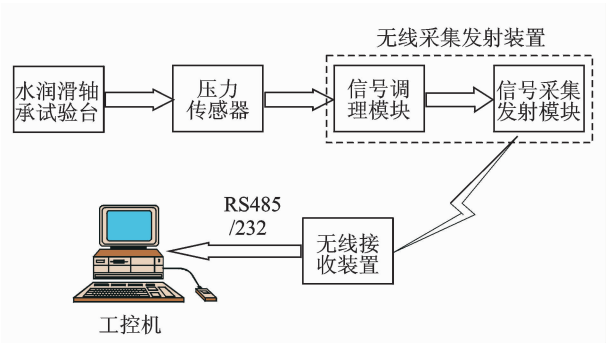


图 1 水润滑轴承无线测试系统

Fig. 1 Wireless measurement system of water-lubricated bearing

1.1 无线采集发射与接收装置

图 2 为无线采集发射装置结构图。无线采集发射装置包括给压力传感器供电的前置处理器恒流源模块、数字信号处理器 DSP2812 电路、单片机 MSP430 电路、CC1101 射频发射/接收模块、时间控制器和供电电源。无线接收装置的组成除了不包括恒流源模块、时间控制器和 DSP 电路之外,其余部分与无线采集发射装置相同。图 3 为将信号调理电路、数据采集和处理模块、发射模块及供电模块做成小部件加以集成并封装之后的无线采集发射装置实物图。由于各组成元器件价格较低,故无线设备整体造价不高。

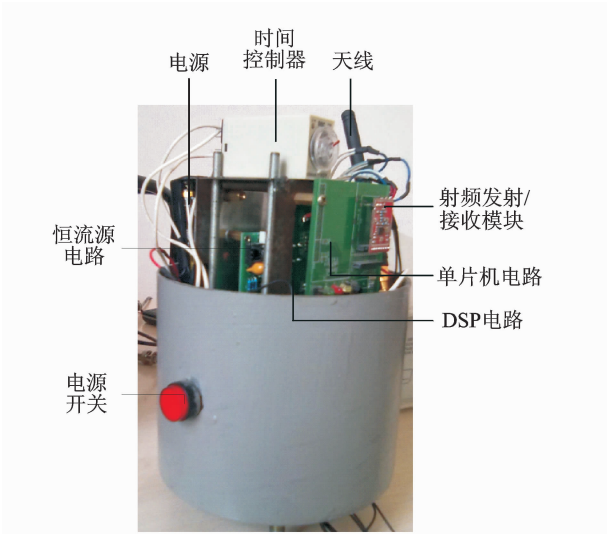


图 3 无线采集发射装置实物图

Fig. 3 Image of wireless acquisition and transmission equipment

进行设置)。为了减少数据传输量以节省无线发射和接收装置的能量,信号在 DSP2812 中还将被压缩和编码^[8-9]。

1.2 传感器与信号调理模块

测量水膜压力的传感器(型号:2200v1,美国Dytran)具有体积小、灵敏度高、响应快速的特点,非常适合水膜压力测试。此压力传感器为内置 IC 电路的压电式压力传感器,灵敏度为 7.25 V/MPa,最大可测压力为 6.90 MPa,谐振频率为 300 kHz,满足大部分工业压力动态测量的需要。内置 IC 电路的压电式压力传感器需要供电(直流 18~30 V, 4 mA)才能工作,为此笔者设计了恒流源供电电路,如图 4 所示。 V_{i1} 为传感器输出信号接入端,脚 f_L 内接 CR 高通滤波器, R_2 为 20 k Ω 。 f_L 脚接地与否,取决于用户要求的低频下限和测试仪器输入阻抗。一般来说, f_L 应比被测频率低 10 倍以上。若 f_L 脚不接地, R_2 为测试仪器输入电阻;若 f_L 脚接地, R_2 则为 20 k Ω 电阻与测试仪器输入电阻并联。 V_h 为给恒流源本身的供电电压,特征值为直流 24 V。无线采集发射装置采用 4 节 5 号充电电池供电(直流 1.2 V,1 800 mA·h),故为解决恒流源的供电问题,还需设计升压电路(直流 5~24 V),如图 5 所示。

ZXLD1615 升压芯片可将直流 2.5~5.5 V 升压至 28 V。稳压二极管选择 BAT85S(肖特基二极管),电容选择一般电解电容(标配陶瓷电容)。输出电压公式 $V_{out}=V_{FB}(1+R_2/R_1)$, $V_{FB}=1.025$ V(典

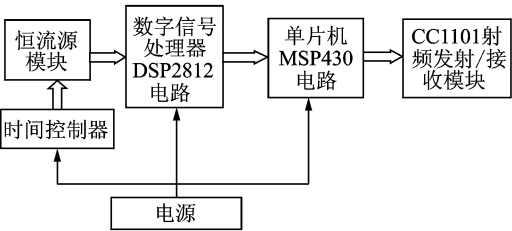


图 2 无线采集发射装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of wireless acquisition and transmission equipment

无线采集发射装置中,内置低通滤波电路的恒流源模块负责给压力传感器提供电源,时间控制器用于控制采样时间。传感器采集到的信号经过前置处理后,送至数字信号处理器 DSP2812。DSP2812 有 8 个采集通道,采样频率和采样点数均可在上位机软件中设置。由于无线设备能量有限,而能量大部分消耗在数据传输过程中,故设计的无线发射与接收装置是低功耗的(DSP2812 和单片机 MSP430 均有多种低功耗模式,可根据不同需求,在程序内部

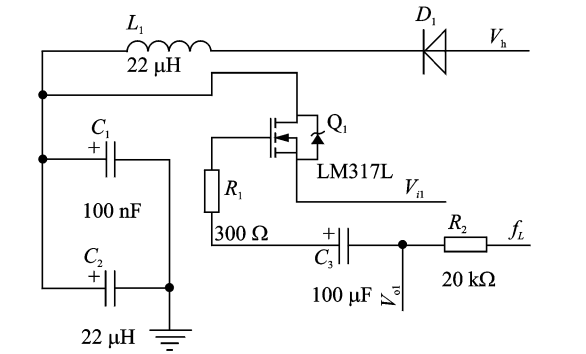


图 4 恒流源供电电路

Fig. 4 Power supply circuit of constant current source

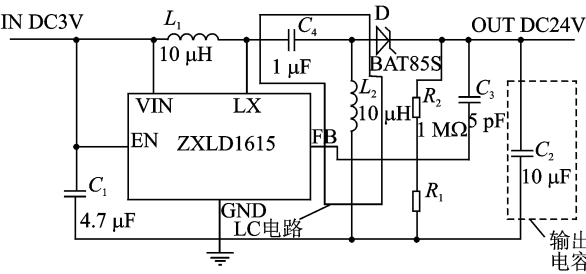


图 5 升压电路

Fig. 5 Booster circuit

型值)；选择不同的电阻可以得到不同的输出电压（由于元器件选择不是标配，故用公式计算出的电压值有偏差）。 $C_3=5\text{ pF}$ ， $R_2=947\text{ }\Omega$ 。

由于采样得到的压力信号是低频信号，为了有效地避免噪声及其他干扰，设计了低通滤波电路，如图 6 所示。滤波芯片采用 TI 的 MAX297，它提供上限为 50 kHz 的低通滤波，截止频率可通过软件编程设置。 V_{o1} 为图 3 输出信号接线端子，经过低通滤波后输出， OUT_1 为输出端子。

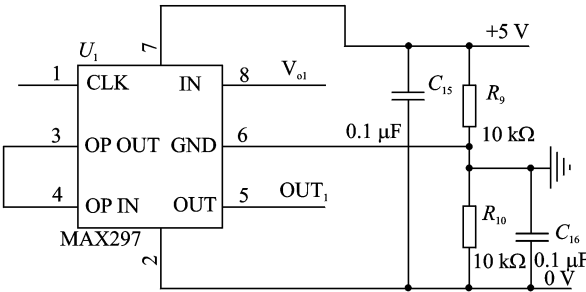


图 6 低通滤波电路

Fig. 6 Low-pass filter circuit

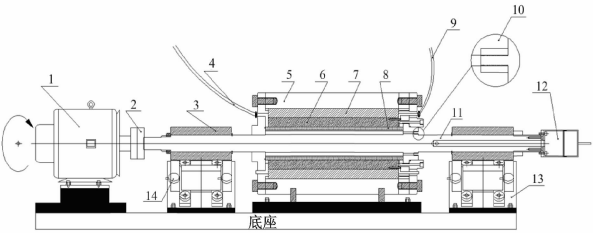
1.3 水膜压力测试软件

水膜压力测试软件采用 Labview8.6 专业版开发，界面友好，具有良好的操控性。软件内部集成了

对接收到压缩编码数据进行解压缩和解码的程序，对所有后台程序打包处理以后，软件可在任何电脑上运行。该软件可以以曲线实时显示采集数据并按相应格式保存，可对串口、数据传输波特率及数据位等进行设置。软件中的数据缓冲区可显示无线接收装置接收到的原始压缩编码后的 16 进制数据，而各曲线图显示的则是经过解码、解压缩与换算过后的压力数据。为了测试需要，还设计了键相信号及轴心轨迹测试软件，测试过程中与水膜压力测试软件对比显示，可实时监测轴系运转情况。

1.4 水润滑轴承试验台

图 7 为水润滑轴承试验台结构图，主要包括电动机、联轴器、加载装置、测试轴承及支撑、无线采集与发射装置、进/出水管、底座与端盖等部件；从无线发射端向电机远端看去，轴为顺时针旋转。为了得到水膜压力的周向连续分布，文中对转轴进行了如下设计：在轴的径向等距布置 6 个螺旋式径向导流孔，在轴的右轴肩位置沿周向均匀分布 6 个轴向导流孔，轴向导流孔与径向导流孔贯通，然后在轴端的轴向导流孔位置做配合压力传感器安装孔，如图 8 所示。



1-电动机；2-联轴器；3-硅钢片；4-出水管；5-轴承系统端盖及支撑；6-轴瓦；7-轴承外壳；8-铜轴套；9-进水管；10-压力传感器安装孔；11-转轴；12-无线采集与发射装置；13-加载装置；14-测力传感器

图 7 水润滑轴承试验台

Fig. 7 Test rig of water-lubricated bearing

无线采集发射装置安装在轴最右端并与压力传感器连接，轴系运转过程中，相应轴承截面上的全周水膜压力通过导流孔传递给轴端安装的压力传感器，然后无线采集发射装置对传感器输出数据进行采集、发射至系统外部，由无线接收装置进行数据接收后送至上位机软件进行分析处理。对转轴进行这样的特殊设计，可在不破坏轴瓦、对水膜形成影响不大的情况下，用较少的传感器获得轴承整周完整的水膜压力分布数据，而且据此也可得到水膜压力的轴向分布。

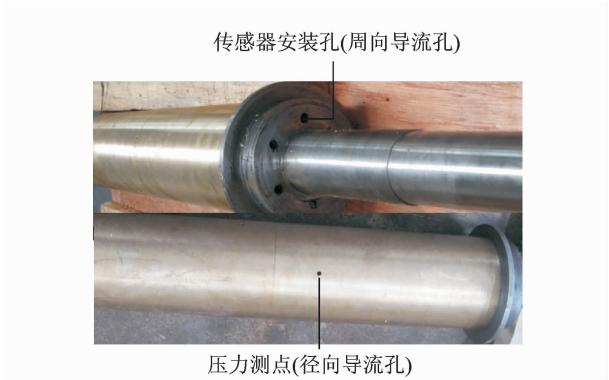


图 8 转轴实物图
Fig. 8 Image of shaft

由上述内容可知,水润滑轴承水膜压力无线测试系统具有下述特点:a. 无线设备成本低,且测试过程无需复杂连线,操作简易;b. 水膜压力信号用数字信号进行无线传输,不仅可避免应用集流环带来的一系列问题,也可克服传统模拟数据传送方式易带来的信号衰减、干扰和传送速度低的不足。

2 应用实例

2.1 测试工况与传感器布置

水膜压力测试试验在 1.4 节介绍的试验台上进行,测试对象为八沟槽水润滑平面橡胶轴承(长径比为 4 : 1),测试内容为不同工况下的轴承全周水膜压力分布,而在此之前,对平面轴承水膜压力的研究工作大多是数值计算和仿真^[1-5,10]。测试工况为,轴转速:0~1 000 r/min;加载力(载荷):0~2 000 N。无线传输波特率设置为 9 600 bits/s、每次传输数据量为 32 字节。为了确切了解轴承各个板条压力的分布状况,给各板条和传感器分别编号,并测取了传感器 1 的键相信号。为了解转轴偏转情况,并据此对转子系统做动平衡以尽量减少转子振动,还测取了转子轴心轨迹,通过安装水平及垂直电涡流传感器实现,传感器布置图如图 9 所示。由于实测水膜压力信号是周期重复信号,可能存在诸如设备振动、电磁等非周期或随机干扰,所以采用时域平均算法^[11]对其处理,利用数理统计规律以一定的周期间隔对原始信号进行截取、叠加平均,可以消除噪声,提高信噪比。运用时域平均算法需要时标脉冲(键相信号)可在轴旋转过程中用光电传感器获取。

一般的无线数据传输是“静态”的,即无线采集设备(节点)是静止不动的或移动速度较小;而文中设计的无线采集发射装置安装在轴尾端,随轴高速

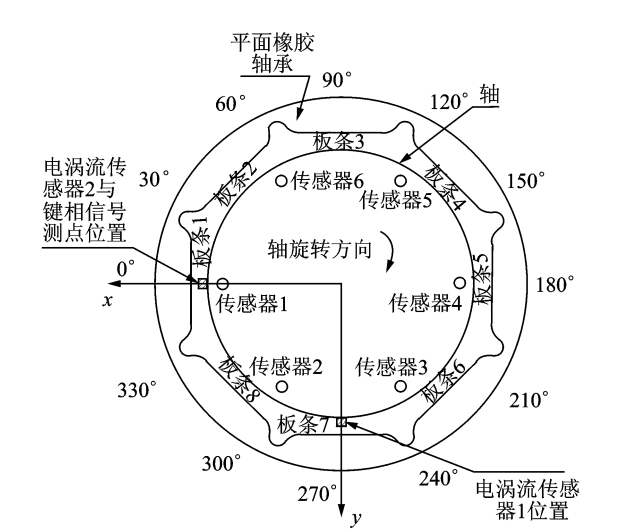


图 9 传感器布置图
Fig. 9 Layout drawing of sensors

旋转,无线接收装置位于轴承转子系统外部,与上位机连接,数据传输是“动态”的。实际测试时,对装置内部各组成元器件做了加固处理,试验中还对整个转子系统进行了数次动平衡,以降低轴系振动,保证系统可靠运行。数据无线传输还可能会受到现场的诸多电器设备的电磁干扰,因此要做好屏蔽措施,最大限度地降低干扰发生几率。

在测试过程中,发现有数据丢包和错误的现象出现,不过由于试验中轴转速不高,数据丢包率不超过 0.02。虽然无线采集发射装置采用 4 节 5 号电池供电,但处理芯片采用了低功耗模式,且数据经过压缩编码,经测试,可不断电连续运行 48 h;整个测试系统稳定性和可靠性较高。目前,笔者正在对整个测试系统进行优化,改进无线设备供电方式,采用环境能量收集技术(振动或旋转发电)以期实现测试系统长久可靠地运行。

2.2 测试结果与分析

图 10 为轴转速 480 r/min 时,传感器 6 测得的八沟槽平面橡胶轴承全周水膜压力分布及轴心轨迹。由图 10(a)可见,沟槽对水膜压力分布有很大影响,轴承几乎每个板条都形成了一定的流体压力,有清晰的压力峰值出现;随着载荷的增大,承载区(即轴下半部分,图上所示 180~360°区域)压力随之增大,最大压力位于板条 8 处。各个板条与沟槽间的压力变化较大,压力过渡不平缓;大部分板条与沟槽压力过渡区出现了负压力(见图中标示的负压区),表明轴承板条与沟槽处水膜破裂,轴承很难形成连续润滑膜。

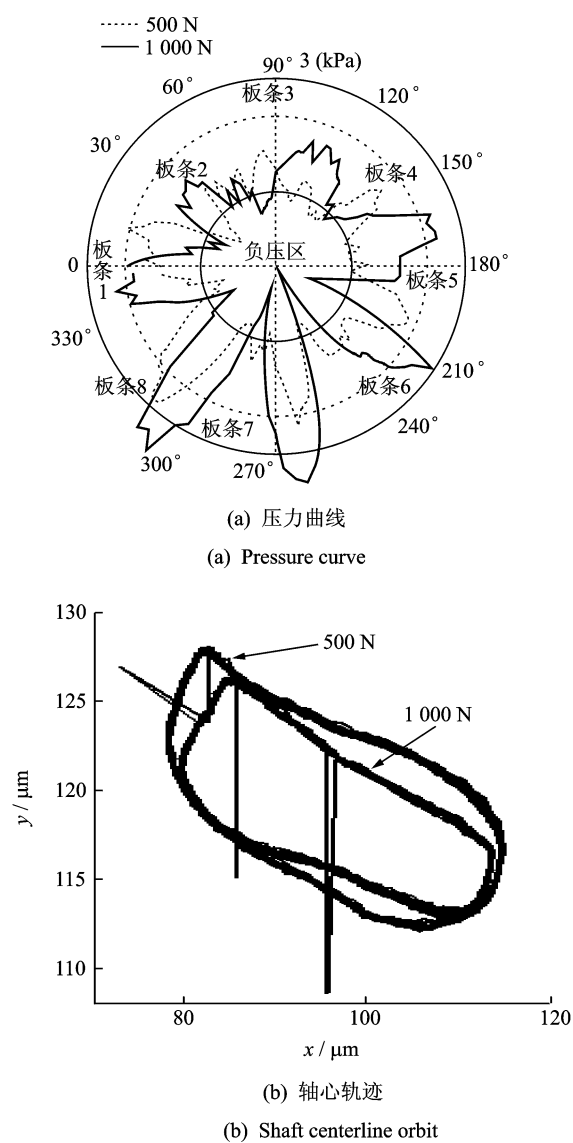


图 10 全周水膜压力分布实测结果

Fig. 10 Measurement results of circumferential water film pressure distribution

由图 10(b)还可以看出,随着载荷的增大,轴心轨迹向下移动,表明载荷方向向下,同时轴的偏心率增大。轴心轨迹出现了很多毛刺,说明轴与轴承在某些位置发生了碰撞,即有直接表面接触,此时平面轴承处于边界润滑状态;但轴承每个板条有独立压力峰,且随着载荷的变化而变化,表明板条上有部分流体动压润滑膜存在,属于流体动压润滑。故综合看来,平面板条轴承应为边界润滑和流体动压润滑混合状态。

为了预测及验证实测结果,笔者用 Pro/E 软件建立了水润滑轴和轴承之间区域的三维模型,并用 Gambit 软件进行网格划分,之后将划分好的网格导入 Fluent 软件,在近似试验条件下模拟了平面橡胶

轴承全周水膜压力的分布情况,仿真结果如图 11 所示。Fluent 中,采用修正了湍流黏度的 RNG $\kappa-\epsilon$ 模型,选择分离解算器隐式算法,壁面条件为无滑移边界条件,水膜内壁为动边界条件,外壁为静止边界条件;对离散格式均采用二阶迎风模式,选择 Simple 解法求解,并设置合理的松弛因子以保证结果的收敛速度和精度。

与图 10(a)比较,图 11 中承载区各板条上最大压力数值稍小于实测结果,沟槽对于压力分布的影响、承载区压力随载荷的变化趋势和最大压力位置都与实测结果相同。最大的区别在于仿真结果中轴承承载区的沟槽压力为正值,而实测结果沟槽压力为负值。

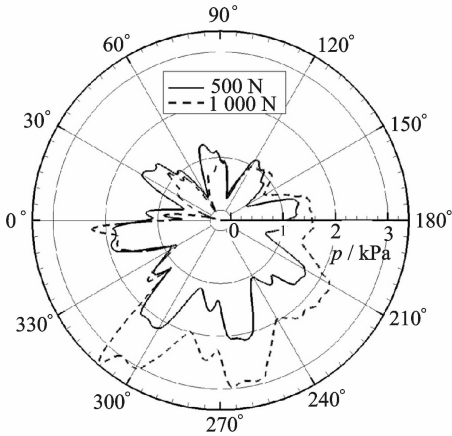


图 11 全周水膜压力分布仿真结果

Fig. 11 Simulation results of circumferential water film pressure distribution

根据对图 10 的分析可知,轴与轴承有直接表面接触,平面橡胶轴承不存在连续润滑膜,故仿真得到的轴承承载区沟槽压力不能准确描述实际情况。这是由于目前的仿真模型还不完善,且在仿真过程中转轴的偏心率设为与载荷相应的常量,又没有考虑试验中可能出现的诸如转子不平衡、不对中或其他干扰因素的影响。实际上,水润滑轴系运转过程中,转轴的偏心率是不断变化的,轴与轴承在某些位置会发生接触,这些现象都可以从图 10(b)的轴心轨迹中看到。下一步将采用流固耦合的方法进一步完善仿真模型,更加准确地模拟轴承真实运转工况,做到真实可靠地预测与验证试验结果。

由上述分析可知,应用无线测试系统对八沟槽水润滑橡胶平面板条轴承的水膜压力分布进行测试是可行的,实测数据可由仿真结果验证,也可为理论计算或仿真提供参考,测试系统的实用性良好。

3 结束语

笔者介绍了一种针对水润滑轴承水膜压力测试而研究设计的无线测试系统,并将其应用于对八沟槽水润滑平面橡胶轴承水膜压力分布的测试。测试系统无需复杂连线,成本低、操控简易;采用数字信号传输,精度高且可克服模拟信号传输带来的信号衰减、干扰及传输速度低的不足。经过对测试结果与仿真结果的对比分析,表明多沟槽平面橡胶轴承很难形成连续润滑膜,处于边界润滑与流体动压混合状态,此结论可为理论计算及仿真结果提供试验验证与参考,从而也说明了无线测试系统的可行性与良好的实用性。另外,本系统还可推广应用于对其他材料与结构的水润滑轴承水膜压力测试。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 段芳莉. 橡胶轴承的水润滑机理研究[D]. 重庆:重庆大学,2002.

[3] 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.

[4] 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.

[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] Litwin W. Influence of surface roughness topography on properties of water-lubricated polymer bearings[J]. Tribology Transactions, 2011, 54(3): 351-361.

[7] Cabrera D L, Woolley N H, Allanson D R. Film pressure distribution in water-lubricated rubber journal

Bearings[J]. Journal of Engineering Tribology, 2005, 219(2): 125-132.

[8] 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.

[9] 王楠,孟庆丰,郑斌. 振动信号无线传输的数据压缩编码算法[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(2):236-240.

Wang Nan, Meng Qingfeng, Zheng Bin. Data compression and coding algorithm used in wireless transmission of vibration signal[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 236-240. (in Chinese)

[10] Tanamal T K. Modeling of fluid flow in multiple axial groove water lubricated bearings using computational fluid dynamics[D]. Australia: Queensland University of Technology, 2007.

[11] 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.

[12] 孟庆丰,耿涛,王楠. 液体滑动轴承全周润滑压力无线监测方法:中国,ZL201010572585. 6[P]. 2012-11-28.



第一作者简介:王楠,男,1983 年 12 月生,博士研究生。主要研究方向为无线传感器网络测量技术及应用,机械设备状态监测和故障诊断。曾发表《振动信号无线传输的数据压缩编码算法》(《振动、测试与诊断》2013 年第 33 卷第 2 期)等论文。
E-mail:heroyoyu@126.com.