

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307061

嵌入式水润滑轴承水膜压力无线传感监测方法^{*}

王楠^{1,2,3} 魏玉洁^{1,2,3} 张楠^{1,2,3} 王丹丹^{1,2,3} 王明武^{1,2,3} 张昌明^{1,2,3}
(1. 陕西理工大学机械工程学院 汉中 723001; 2. 陕西省工业自动化重点实验室 汉中 723001;
3. 起落架及飞机结构件加工检测陕西省高校工程研究中心 汉中 723001)

摘 要: 现有测试水润滑轴承特性重要表征参数水膜压力的诸多方法中, 由于传感器距离真实测点较远或对轴系创伤较大等原因, 导致准确的水膜压力实证数据难以获取, 制约了轴承进一步研究与发展。针对上述难题, 提出将薄膜传感器嵌入到轴承轴瓦中, 而压力数据通过无线传感传输的全新监测方法。首先, 建立轴瓦开槽轴承的物理模型, 通过对沟槽附近轴瓦变形的有限元分析确定开槽位置、结构与数量; 建立轴承流体域和固体域物理模型, 对水膜压力分布进行仿真分析; 然后, 提出薄膜传感器标定方法对其准确标定; 最后, 进行多工况轴承水膜压力测试试验并与仿真结果和现有方法进行对比分析。研究结果表明, 通过在轴承轴瓦开槽嵌入薄膜传感器并进行数据无线传输的方法可行, 水膜压力实测数据与仿真结果偏差低于 10%, 比现有方法实测数据更精确。水膜压力沿轴向递减, 轴承内部存在部分润滑膜, 处于混合润滑状态。

关键词: 水润滑轴承; 水膜压力; 嵌入式; 无线传感监测

中图分类号: TH133.3; TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Wireless sensor monitoring method for film pressure of embedded water-lubricated bearings

Wang Nan^{1,2,3} Wei Yujie^{1,2,3} Zhang Nan^{1,2,3} Wang Dandan^{1,2,3} Wang Mingwu^{1,2,3} Zhang Changming^{1,2,3}
(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, China; 3. Engineering Research Center of Manufacturing and Testing for Landing Gear and Aircraft Structural Parts, Universities of Shaanxi Province, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Existing test water lubrication bearing characteristics of the important characterisation parameter water film pressure of the many methods, because the sensor distance from the real measurement point is far away, or trauma to the shaft system is large and other reasons, the accurate water film pressure empirical data is difficult to obtain, restricting the bearings of further research and development. In response to these challenges, a new monitoring method is proposed in which thin-film sensors are embedded in bearing shingles, while pressure data are transmitted via wireless sensing. Firstly, the physical model of axial tile grooved bearing is established, and the location, structure and number of grooves are determined by finite element analysis of axial tile deformation near the grooves; A physical model of the bearing fluid domain and solid domain is established to simulate and analyse the water film pressure distribution; Then, a thin film sensor calibration method is proposed to calibrate it accurately; Finally, a multi-operating condition bearing water film pressure test experiment is carried out, it is compared and analysed with the simulation results and existing methods. The results of the study show that it is feasible to embed a thin film sensor in the groove of the bearing shaft tile and transmit the data wirelessly, and the measured data of water film pressure deviates less than 10% from the simulation results, which is more accurate than the measured data of existing methods. The water film pressure decreases along the axial direction, and there exists a part of lubrication film inside the bearing in a mixed lubrication state.

Keywords: water-lubricated bearings; water film pressure; embedded; wireless sensor monitoring

0 引言

水膜压力作为表征水润滑轴承特性的重要参数,对其深入分析可研究轴承性能与润滑状态,以及获得轴承其他服役信息,因此,通过试验获取准确可靠的水膜压力数据至关重要^[1]。然而,由于水润滑轴承结构复杂、润滑膜空间密闭以及水膜形成较难等原因,通过试验在线监测水膜压力并获取准确数据较为困难。

现有水膜压力监测方法有3种,1)将压力传感器安装在转轴上^[2],传感器在随轴旋转过程中可获取其所在截面上周向水膜压力的连续分布;但由于传感器尺寸大,破坏了轴与轴承润滑界面,导致数据误差较大且传感器安装不便。2)在轴上设计相互贯穿的轴向与径向导流孔^[3],将传感器安装于转轴端面,借助导流孔传递水膜压力,但存在一定压力衰减,影响测试精度。3)在轴承壳体上打孔并安装压力传感器^[4],但对轴系损伤较大,且只能得到轴承径向截面有限点处的水膜压力。

随着传感器与通信技术的发展进步,近年来国内外逐渐出现了将传感器直接嵌入到轴承内部以精准获取其运行状态的相关研究,甚至已有产品面世,但受限于轴承运行环境与结构等原因,目前还是以嵌入式滚动轴承研究为主,在滑动轴承特别是水润滑轴承上的研究较少。滚动轴承方面,戴含芳等^[5]将有缺陷的滚动轴承安装在驱动电机附近,再通过压电式加速度传感器采集振动信息,并对采集信号构建元素模型并进行故障分析;曹正等^[6]的试验由 ABLT-1A 实验机、4 个实验轴承、加速度传感器、监控系统和采集程序组成,可以采集不同径向载荷下轴承的振动加速度信号分析轴承磨损振动特性;张志鑫等^[7]设计振动、温度、转速、声音等多物理量信息高度集成的智能轴承单元,通过无线传输技术将监测数据传输至上位机,利用上位机的算法对监测系统采集的信号进行分析,实现轴承的状态监测和故障诊断;王方哲等^[8]提出嵌入式滚动轴承内圈温度无线测试方案,通过无线传感技术实现信号传输并应用无线电磁供电方式给系统供电;Chen 等^[9]提出将温度传感器嵌入到滚动轴承外圈监测轴承温度,基于有限元研究了嵌入式智能轴承结构设计问题;Safian 等^[10]研究了嵌入滚动轴承外壳的压电传感器用于轴承状态监测,测量了轴承在变速工况下的转速;董宝营等^[11]将电涡流传感器固定安装在导流罩上,静态获取尾轴停止时的下沉位移以测量磨损量。SKF 公司^[12]提出轴承状态管理技术 SKF Insight,集成多种传感器,具备无线信号传输、嵌入式组网与自发电功能;舍弗勒集团^[13]推出主轴位移测量系统 Spindle Sense,包含模块化的位移传感器,以高分辨率测量主轴在实际负载和转速下的径向和轴向位移及倾斜;NTN 公司^[14]在

轴承单元组件的隔圈中集成传感器进行轴承滚道面周围监测,开发了集成传感器的机床主轴轴承单元。滑动轴承方面,德国 Aufischer 等^[15]提出可支持发动机开发的智能滑动轴承,应用薄膜传感器可在轴承内表面直接测量相关参数;Brusa 等^[16]将光纤传感器嵌入轴承,对其应用环境下的热状态进行监测;俞晓丰等^[17]将光纤光栅传感器嵌入水润滑轴承橡胶轴瓦中并开发了监测系统,用弹性体试验机对橡胶轴瓦进行状态监测;但光纤质地脆、机械强度低,因此将其植入水润滑轴承轴瓦不仅连接比较困难,还存在受制造工艺影响受力不均、分路与耦合不便等问题。薛恩驰等^[18]提出船用水润滑轴承设计方法,并使用摩擦试验机对设计方案进行可行性验证,但对微型自供电监测装置如何植入及其对轴承性能的影响等未做详细表述,且密闭环境下在轴承径向打孔装入热电偶,其信号如何传出、如何布线是难点。王艳真等^[19]采用在轴承上打孔安装电涡流传感器的方法对真实轴承进行膜厚测量,但水膜厚度测试结果受到轴扰动影响较大,且传感器安装位置值得商榷。因此,目前滑动轴承嵌入传感器等相关研究还处在起步阶段,还存在开槽嵌入传感器对轴承特性影响、传感器与数据通信等难题需要解决。

综上所述,为了解决水膜压力难以准确测试的问题,本文提出将薄膜传感器嵌入到水润滑轴承轴瓦中并结合无线通信技术进行数据传输的新方法,以期实现对轴承水膜压力实时准确监测。

1 方法描述

嵌入式水润滑轴承结构如图 1 所示,由于轴承处在密闭空间,选择薄膜压力传感器,在轴瓦开槽嵌入,用聚四氟乙烯 (PTFE) 密封并作防水处理(图 1(b));另外,过多线缆开关将会导致安装调试不便,电路设计需满足功能集成化与结构小型化要求,选择双层 PCB 板以减少布线交错问题,为减小电路板尺寸,元件选择贴片式;将数据采集处理与通信电路集成在同一环形电路板上,将其同轴安装于轴承端盖处,并在端盖处设置径向孔用于穿接天线,天线附近预留足够安全距离,防止产生干扰;在轴瓦打轴向小孔穿传感器信号线并与集成化环形电路板连接。轴在旋转过程中将传感器将采集到的水膜压力数据传至转子系统外部,由无线传感设备接收并送至上位机软件处理分析,完成水膜压力实时监测。

2 轴瓦开槽与有限元仿真

2.1 开槽位置与结构分析

薄膜压力传感器结构与开槽位置如图 2 所示,为了测试轴承不同部位的水膜压力,沿着进水方向在轴瓦不

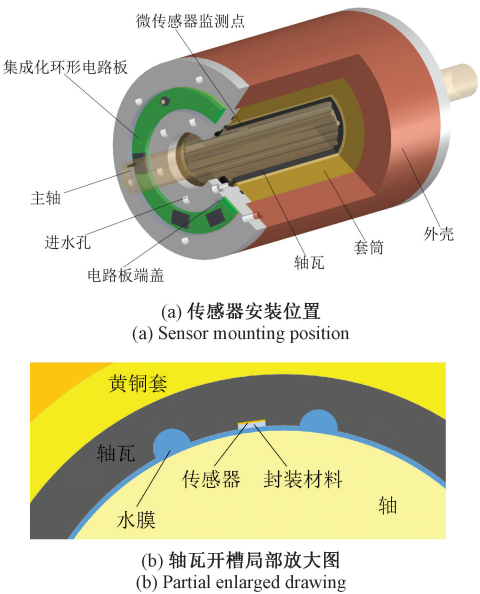


图 1 传感器嵌入式水润滑轴承
Fig. 1 Sensor-embedded water-lubricated bearing

同位置开 4 个槽。根据传感器外形特征,轴瓦开槽结构初步设计 3 种,分别是长方体结构(结构 1)、前槽面弧度面结构(结构 2)与前后槽面弧度面结构(结构 3),如图 3 所示。4 个开槽位置在轴瓦内部呈螺旋式、等间距分布。

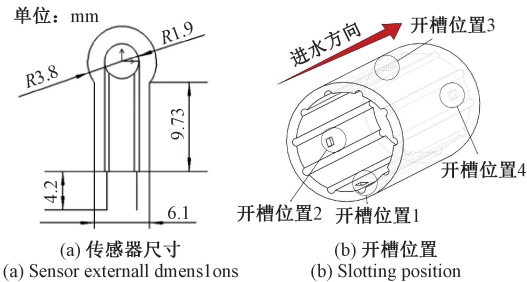


图 2 薄膜传感器与开槽位置
Fig. 2 Film sensor and slotting position

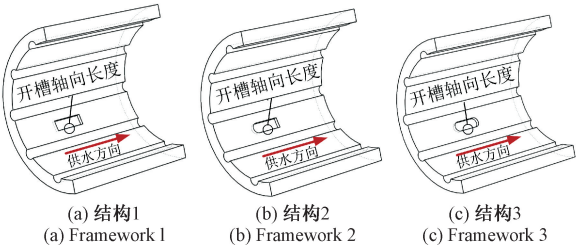


图 3 槽型结构
Fig. 3 Trough structure

以开槽位置 1 橡胶变形为研究对象,分别对 3 种开槽结构建立轴承三维物理模型,进行仿真并分析 3 种开

槽结构对橡胶变形的影响。仿真模型中,转速设置为 800 r/min、1 200 r/min,轴偏心率设置 0.6。

轴转速 800 r/min 与 1 200 r/min 下,不同槽型结构轴瓦变形仿真结果如图 4 所示,由图可见,3 种结构沟槽在同一转速下的形变趋势相同,最大变形量相差不大,转速 800 r/min 与 1 200 r/min 情况相比,轴瓦最大变形相差仅 2 μm ;考虑传感器外形、加工工艺等因素,选择结构 1 在轴瓦表面开槽。

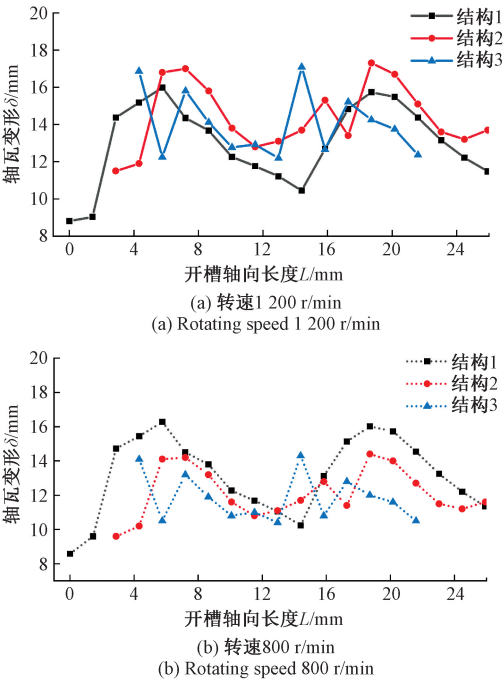


图 4 轴瓦变形
Fig. 4 Deformation of bearing bush

以结构 1 开槽槽型对轴承轴瓦进行分析并确定开槽尺寸,开槽深度分别为 1.5、2、2.5 与 3 mm,转速 800 r/min,偏心率 0.6 时,开槽表面轴瓦变形情况如图 5 所示,由图可见,随着开槽深度增加,轴瓦变形量增大。开槽 1.5 mm 处轴瓦变形量最小,但需考虑后续密封问题,因此选择开槽深度为 2 mm,两种情况下的最大轴瓦变形量为 8 μm 。根据上述分析,最终设计的开槽尺寸参数为: 26 mm×8 mm×2 mm(长宽深)。

2.2 水膜压力仿真与分析

在轴承轴瓦表面开槽会对轴承特性产生一定影响,因此建立轴承三维有限元模型并对其进行仿真分析,研究开槽后的水膜压力分布与轴瓦整体变形情况。以十沟槽橡胶轴承为研究对象,轴套材料为黄铜,凹面板条半圆形沟槽结构,仿真参数见表 1。

流体域模型网格划分采用扫掠法(sweep meshing),结构化网格,网格单元尺寸 0.3 mm;固体域分为轴瓦和合金外套,轴瓦网格划分采用自动网格划分(automatic

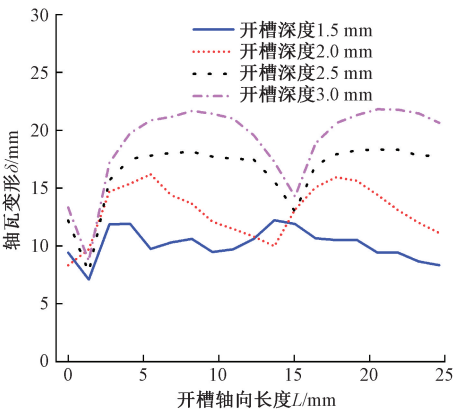


图5 轴瓦变形
Fig. 5 Deformation of bearing bush

meshing),合金外套网格划分用扫掠法,网格结构如图6所示。

表1 仿真参数			
Table 1 Simulation parameters			
几何结构及材料参数	值	几何结构及材料参数	值
轴颈直径/mm	99.2	轴套外径/mm	120
轴套内径/mm	100	轴承长度/mm	350
最大半径间隙/mm	0.4	橡胶密度/(kg/m ³)	1 500
沟槽半径/mm	4	橡胶弹性模量/MPa	7.84
沟槽数量	10	橡胶泊松比	0.47
黄铜密度/(kg/m ³)	8.5×10 ³	水的动力粘度/(Pa·s)	1.005×10 ⁻³
黄铜弹性模量/GPa	106	水的密度/(kg/m ³)	998.2
黄铜泊松比	0.324		

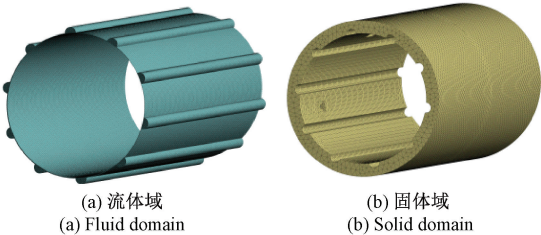


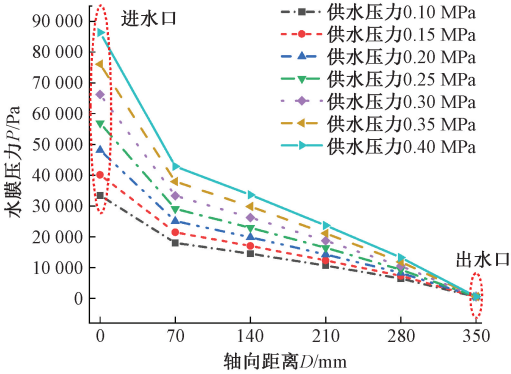
图6 网格结构图
Fig. 6 Grid structure diagram

对划分的流体域网格进行网格无关性验证,通过不断细化网格进行多次计算与对比,验证计算结果对于网格疏密变化的敏感性。当流体网格数量达到90万时,最大水膜压力值并未随网格数量的增大产生明显变化,此时认为达到网格无关性要求。最后,将上述物理模型导入ANSYS软件中进行有限元分析。流体域模型边界条件设置:1)入口压力设置为水泵压力,出口压力设置为0 Pa,参考压力设为标准大气压强101 325 Pa;2)接触固体壁面的区域采用标准壁面函数,设为无滑移旋转壁面;3)求解器采用压力速度耦合算法。固体域模型边界条件设置:轴承外表面设为固定约束,两个端面采用位移约

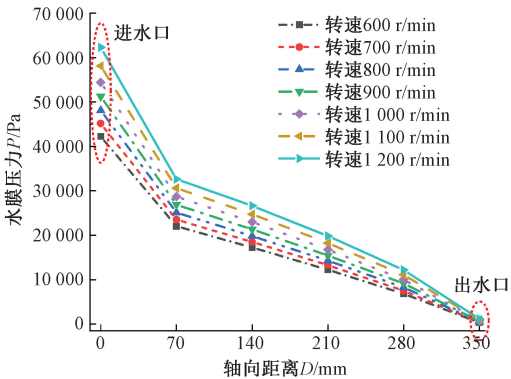
束,限制轴向位移为0,轴承与流体接触面为流固耦合交界面。

2.3 仿真结果与分析

水膜压力轴向分布仿真结果如图7所示,图7(a)是转速为800 r/min,供水压力为0.1~0.4 MPa时,4个薄膜压力传感器安装位置处水膜压力分布图。由图可见,不同供水压力下,开槽后轴承水膜压力沿轴向呈递减趋势,最大水膜压力出现在供水入口处。水从入口沿轴向方向流入,入口处水流冲击最大,轴旋转过程中,带动内部流体旋转,由于轴承表面粗糙度、轴承长度、流动阻力等因素的影响,产生一定压力损失,因此,水膜压力沿轴向递减。图7(a)中,当供水压力为0.1 MPa时,最大水膜压力为33.40 kPa;当供水压力为0.4 MPa时,最大水膜压力为86.34 kPa;同一转速下,供水压力增大,流体力域形成的压力效果增强,最大水膜压力增大。图7(b)是供水压力为0.2 MPa,转速为600~1 200 r/min时,不同开槽位置处水膜压力分布图。水膜压力沿轴向呈下降趋势;轴转速升高,轴承动压效应增强,同一位置处水膜压力逐渐增加。轴转速为600 r/min时,最大水膜压力为42.25 kPa;轴转速为1 200 r/min时,最大水膜压力为62.32 kPa。



(a) Different water supply pressures



(b) Different shaft speeds

图7 水膜压力轴向分布

Fig. 7 Axial distribution of water film pressure

3 水膜压力测试试验

3.1 试验台与测试方案

嵌入式水润滑轴承试验台如图 8 所示,试验台包括电机、电磁加载装置、测试轴承、无线监测系统以及上位机等。传感器在轴瓦上呈螺旋式、等间距布置,由于安装技术及传感器原因,实际上使用两个传感器进行水膜压力测试试验,薄膜压力传感器在轴瓦上的安装方式距离入口 70 mm, 140 mm。薄膜压力传感器通过信号线经轴瓦内部输出孔与环形电路板相连,再由板上集成的无线发送装置将压力信号传递给上位机;控制柜和微控制器用于控制水润滑轴承润滑系统压力流量以及主轴上的载荷和转速。

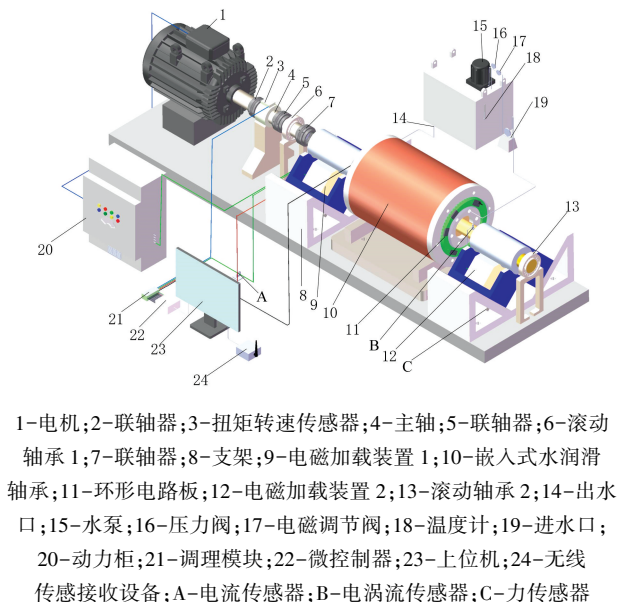


图 8 嵌入式水润滑轴承试验台

Fig. 8 Test bed of embedded water-lubricated bearing

无线监测系统如图 9 所示,包括水膜压力信息采集、数据无线传输和上位机显示 3 部分。薄膜压力传感器采集输出的水膜压力信号经过调理模块滤波与放大等初步处理后,通过 STM32 单片机 AD 采样后基于 XBee3 技术进行无线传输至上位机软件进行进一步处理与分析。

测试试验之前,需对薄膜压力传感器进行标定。薄膜压力传感器为 FlexiForceA101,材料为聚酯纤维,标准压阻式传感器,体积小、灵敏度高,响应快且高度集成,敏感区域直径仅为 3.8 mm。测量范围 0~4 MPa;线性度 $\pm 3\%$;工作温度 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$,满足轴承水膜压力测试要求。由于其体积很小,传统的标定装置如活塞压力计、霍普金森杆等,很难将传感器固定,极易造成测量误差,因此,采用 HLD 标定装置对薄膜压力传感器进行标定,标

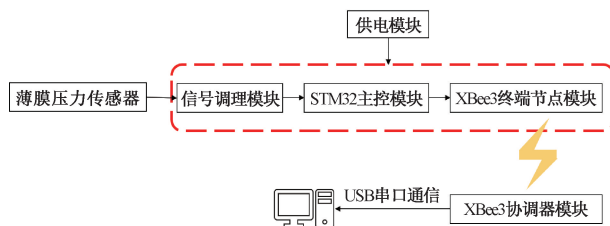
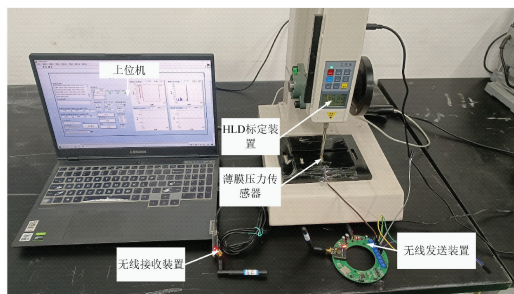


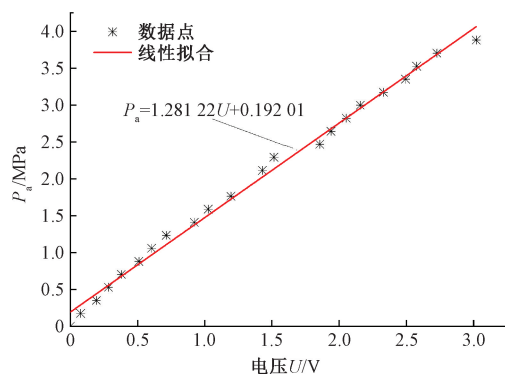
图 9 无线监测系统

Fig. 9 Wireless monitoring system

定系统与结果如图 10 所示。



(a) 标定系统
(a) Calibration system



(b) 标定结果
(b) Calibration results

图 10 薄膜压力传感器标定

Fig. 10 Calibration of thin film pressure sensor

图 10(a) 中,标定系统包括传感器、HLD 标定装置、无线发送与接收装置,以及上位机信号处理与分析软件。薄膜压力传感器标定过程符合静态标准条件,环境温度室温。标定中,选用圆柱形测头安装于在数显压力计上对传感器进行施压操作,测头直径为 6 mm。为减少漂移误差,先将测试重量的 1/3 放置传感器上,稳定一段时间后,递增至 2/3 直至全部载荷加载至传感器上,使敏感膜在小范围内产生线性变化,则引起电阻变化也为线性过程;薄膜压力传感器受压之后,输出电压信号与压力呈线性关系,因此对采集数据分别进行线性回归分析,运用相关算法拟合传感器压力与电压直线方程,即完成

传感器标定, 标定方程为 $P_a = 1.288\ 122U + 0.192\ 01$ (压力 P_a , 单位 MPa; 电压 U , 单位 V); 由图 10(b) 可以看出, 传感器线性度较好。

试验工况与过程如下: 轴颈转速 600~1 200 r/min, 供水压力 0.1~0.4 MPa, 加载力 207 N; 试验开始前, 检查试验台及各部分测试装置, 然后启动供水系统, 调节阀门开度、供水压力, 待供水系统启动并工作正常后, 开启主轴驱动电机, 调节电机转速, 转轴平稳转动后, 启动电磁加载装置为系统提供载荷; 最后待系统稳定运转后打开无线设备与上位机软件进行多工况水膜压力测试试验。

另外, 为了凸显本方法的优势, 除了进行试验与仿真结果对比之外, 还与其他方法进行了对比, 文献[20]方法采用沿轴向和径向分别等距均匀布置螺旋导流孔, 在轴旋转过程中, 通过导流孔的流体压力传递实现水膜压力测试, 但存在压力波动较大等不足。由于其测得的是轴承截面连续水膜压力, 因此和本文方法对比中, 采用同一工况下单点对比方式, 详见下文。

3.2 试验结果与分析

轴转速 800 r/min, 不同供水压力下两个传感器测得的水膜压力随时间变化如图 11 所示。可以看出, 由于传感器 1 距离供水入口近, 因此同等条件下, 水膜压力大于传感器 2 所测结果。供水压力较小时, 水膜压力随时间变化比较平稳; 供水压力较大时, 水膜压力呈现增长趋势且随时间变化波动较大, 波动范围 0~7 kPa, 水膜压力存在明显压力峰, 表明轴承板条上形成流体压力, 有部分润滑膜存在。与文献[20]试验方法进行对比, 下文中表述为方法 1, 表 2 与 3 分别对应图 11(a) 与 (b), 表 4 与 5 分别对应图 12(a) 与 (b)。

表 2 传感器 1 不同供水数据对比

Table 2 Sensor 1 comparison of data for different water supplies							
供水/MPa	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
本文/kPa	15.28	19.11	22.02	25.89	30.02	34.14	39.44
方法 1/kPa	14.41	18.24	21.28	24.71	28.77	32.88	36.41
误差/%	5.72	4.56	3.34	4.55	4.17	3.70	5.15

表 3 传感器 2 不同供水数据对比

Table 3 Sensor 2 comparison of data for different water supplies							
供水/MPa	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
本文/kPa	11.42	14.35	16.16	20.01	24.53	26.31	30.29
方法 1/kPa	11.05	13.56	15.44	19.31	23.77	24.76	28.05
误差/%	3.25	5.49	4.43	3.51	3.08	5.91	7.39

图 12 为不同转速下测得的水膜压力试验结果, 由图可见, 同一转速下, 水膜压力随时间变化有所波动, 波动范围 0~5 kPa, 但总体比较平稳; 随着转速增加, 动压

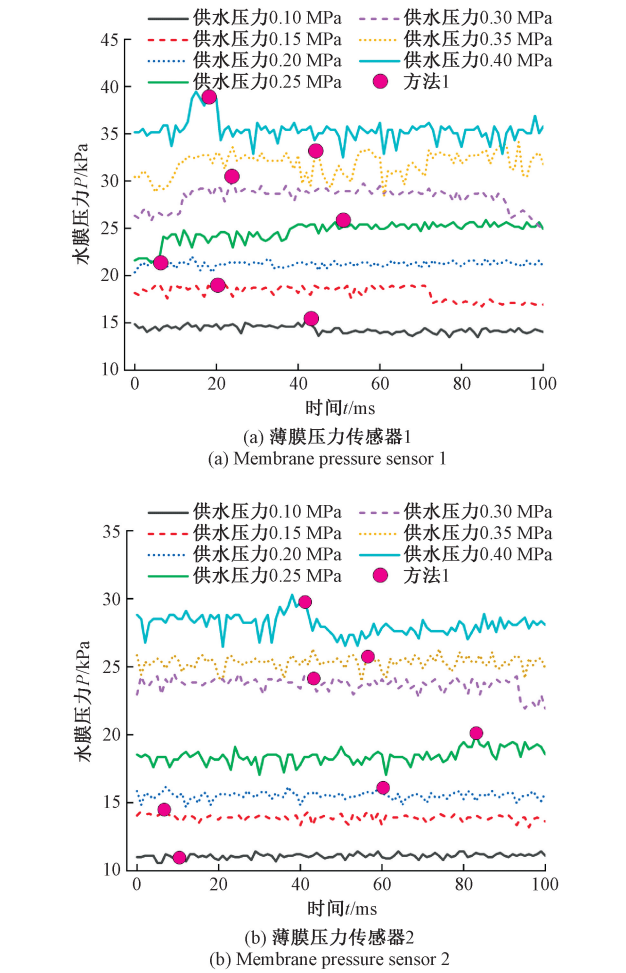


图 11 水膜压力测试结果
Fig. 11 Water film pressure test results

效应增强, 水膜压力升高, 当转速达到 1 200 r/min 时, 薄膜传感器 1 采集到的最大水膜压力为 30.16 kPa, 薄膜传感器 2 采集到的最大水膜压力为 24.58 kPa, 结果表明, 越远离入水口, 水膜压力越小。

表 4 传感器 1 不同转速数据对比

Table 4 Sensor 1 Comparison of data at different speeds							
转速/(r/min)	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
本文/kPa	19.85	21.63	22.02	24.17	25.27	27.16	30.16
方法 1/kPa	18.94	20.05	21.15	22.52	24.10	26.40	29.34
误差/%	4.60	7.27	3.93	6.82	4.62	2.79	2.73

表 5 传感器 2 不同转速数据对比

Table 5 Sensor 2 Comparison of data at different speeds							
转速/(r/min)	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
本文/kPa	13.52	14.96	16.16	18.26	20.16	22.37	24.58
方法 1/kPa	12.92	13.99	15.14	17.39	19.20	20.99	23.56
误差/%	4.45	6.51	6.28	4.75	4.76	6.17	4.16

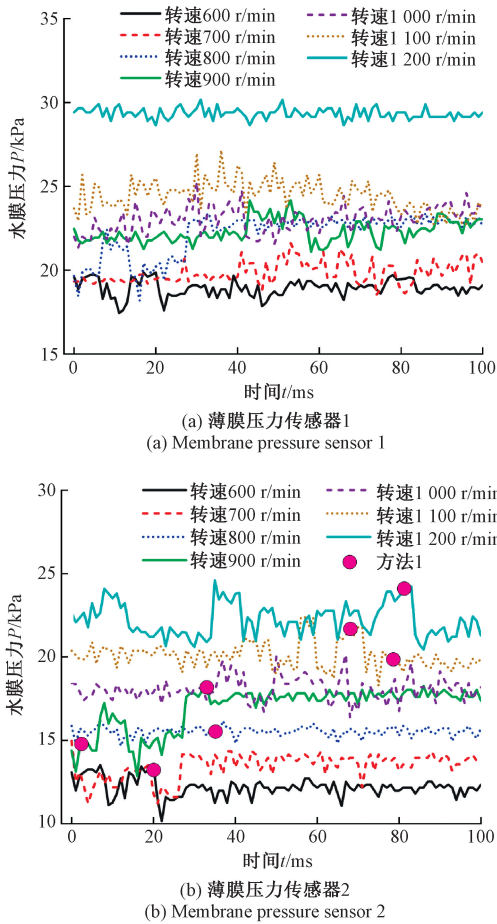


图 12 水膜压力测试结果

Fig. 12 Water film pressure test results

分别取薄膜传感器 1, 薄膜传感器 2 采集的最大水膜压力值与仿真结果进行比较, 如图 13 所示。由图 13 可见, 仿真与试验最大水膜压力变化趋势一致, 随着供水压力、轴转速的增大而增大。但由于仿真时进行了一定程度近似处理, 存在一定偏差。当供水压力为 0.1 MPa 时, 仿真与试验结果的最大偏差为 9.30%; 当转速为 600 r/min 时, 仿真与试验结果最大偏差为 9.66%。

由表 2~5 可以看出, 本文方法与方法 1 测试结果的最大误差为 7.27%; 由图 13 中可以看出, 本文方法与方法 1 的测试结果相比, 更接近仿真值, 由此表明应用本文方法获得的水膜压力实测数据更为精确。

4 结 论

本文应用嵌入式、无线传感等技术, 提出将薄膜压力传感器安装于轴承轴瓦内部, 而将无线环形电路板集成安装于轴承端盖处的全新水膜压力监测方法, 并构建系统对水膜压力进行在线监测, 最后与仿真结果和现有方法实测结果均进行了对比分析。轴瓦内部开槽并用无线

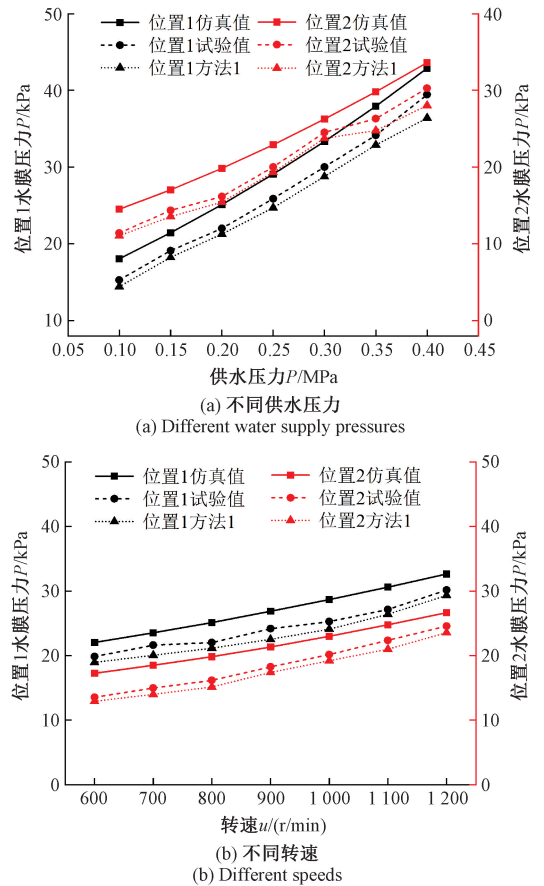


图 13 仿真与试验结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation and test results

传感监测的方法传输水膜压力数据可做到最大限度接近测点, 获得准确数据; 但需注意以下几点: 1) 轴瓦开槽位置、数量与尺寸至关重要, 应根据传感器尺寸与不同研究需求确定; 经过研究, 初步确定开槽尺寸长宽深为 26 mm×8 mm×2 mm; 2) 传感器的选择, 在满足测试条件的前提下, 尺寸尽量小, 因此选择薄膜传感器并对其进行了标定与线性拟合。通过与仿真结果和现有测试方法结果的对比分析表明, 运用文中方法获取的水膜压力实测数据比现有方法更为精确, 误差小于 8%; 试验轴承板条上有部分润滑膜存在, 随着供水压力、轴转速逐渐增大, 水膜压力呈现增长趋势, 轴承处于混合润滑状态。另外还需说明的是, 嵌入式无线传感监测方法是在水润滑轴承水膜压力测试中的初步尝试, 也可用于测试温度、轴瓦形变等, 并可推广至滑动轴承相关参数监测, 但还存在下述问题有待进一步深入研究, 主要包括: 轴瓦开槽对轴承润滑性能影响、传感器与线路密封、无线传感传输影响因素、轴系稳定性与改善、轴承润滑系统与运行参数控制等。

参考文献

[1] WANG N, YUAN Z, WANG P. Dynamic

- electromagnetic force variation mechanism and energy loss of a non-contact loading device for a water-lubricated bearing [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(6): 2645-2656.
- [2] OUYANG W, LIU Q, XIAO J, et al. Experimental study on the distributed lubrication characteristics of full-size water-lubricated stern bearings under hull deformation [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 267(2023): 113226.
- [3] 王伦, 王楠, 王鹏, 等. 水润滑轴承水膜压力损失机理研究[J]. *轴承*, 2020(5): 36-42.
WANG L, WANG N, WANG P, et al. Research on pressure loss mechanism of water film in water-lubricated bearings[J]. *Bearing*, 2020(5): 36-42.
- [4] 郑建波, 叶晓琰, 胡敬宁, 等. 不同进水压力下水润滑轴承润滑特性试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(7): 559-606.
ZHENG J B, YE X Y, HU J N, et al. Study on lubrication characteristics of water lubricated bearings under different inlet pressures[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(7): 559-606.
- [5] 戴含芳, 王衍学, 李志星. 基于元素分析的滚动轴承故障诊断[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(1): 157-165.
DAI H F, WANG Y X, LI ZH X. Fault diagnosis of rolling bearings based on elemental analysis[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(1): 157-165.
- [6] 曹正, 康梓秦, 樊中鼎, 等. 基于动力学模型的滚动轴承磨损特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8): 218-227.
CAO ZH, KANG Z Q, FAN ZH D, et al. Analysis of wear characteristics of rolling element bearings based on the dynamic model[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8): 218-227.
- [7] 张志鑫, 牛青波, 杨明奇, 等. 基于多物理量集成的智能轴承监测系统[J]. *轴承*, 2024(4): 55-63.
ZHANG ZH X, NIU Q B, YANG M Q, et al. Intelligent bearing monitoring system based on multi physical quantity integration[J]. *Bearing*, 2024(4): 55-63.
- [8] 王方哲, 朱永生, 闫柯, 等. 滚动轴承内圈温度无线监测技术[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(22): 8-14.
WANG F ZH, ZHU Y SH, YAN K, et al. Wireless monitoring technology of rolling bearing inner ring temperature[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(22): 8-14.
- [9] CHEN J H, ZHANG W Y, WANG H. Intelligent bearing structure and temperature field analysis based on finite element simulation for sustainable and green manufacturing[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, 32(5): 1-12.
- [10] SAFIAN A, LIANG X. Speed monitoring and fault detection in bearings using an embedded piezoelectric transducer under speed-varying condition [J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2023, 47(4): 459-466.
- [11] 董宝营, 戴全春, 俞翔. 基于电涡流传感器的水润滑轴承磨损监测系统[J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(1): 170-175.
DONG B Y, DAI Q CH, YU X. Water-lubricated bearing wear monitoring system based on eddy current sensor[J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(1): 170-175.
- [12] 张利斌, 金荃, 郭涛, 等. SKF 二代卡车轮毂轴承单元技术发展动态[J]. *轴承*, 2022(4): 1-4.
ZHANG L B, JIN Q, GUO T, et al. Technology development trend for SKF second-generation truck hub bearing units[J]. *Bearing*, 2022(4): 1-4.
- [13] 王作函. 舍弗勒: 持续创新, 为商用车新四化深度赋能[J]. *商用汽车*, 2023(6): 61-63.
WANG Z H. Schaeffler: Continuous innovation, deeply empowering the new four dimensions of commercial vehicles[J]. *Commercial Vehicle*, 2023(6): 61-63.
- [14] HASHIZUME S, FUKUSHIMA Y, SHIBUYA Y, et al. Development of sensor integrated bearing unit for machine tool spindles[J]. *NTN Technical Review*, 2018 (86): 50-55.
- [15] AUFISCHER R, SCHALLMEINER S, WIMMER A, 等. 支持发动机开发的智能滑动轴承[J]. *汽车与新动力*, 2020, 3(4): 36-39.
AUFISCHER R, SCHALLMEINER S, WIMMER A, et al. Intelligent plain bearings supporting engine development[J]. *Automobile and New Powertrain*, 2020, 3(4): 36-39.
- [16] BRUSA E, VEDOVA M D, GIORIO L, et al. Thermal condition monitoring of large smart bearing through fiber optic sensors[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021, 28(11): 1187-1193.
- [17] 俞晓丰, 帅长庚, 杨雪, 等. 基于光纤光栅的水润滑轴承磨损监测系统设计及研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(4): 566-573.
YU X F, SHUAI CH G, YANG X, et al. Design and research of water lubrication bearing wear monitoring system based on fiber grating [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(4): 566-573.

- [18] 薛恩驰, 郭智威, 袁成清. 具备温度感知的船用智能水润滑尾轴承设计及性能验证[J]. 中国机械工程, 2022, 33(14): 1639-1645.
- XUE EN CH, GUO ZH W, YUAN CH Q. Design and performance verification of marine intelligent water-lubricated stern bearings with temperature sensing[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33 (14): 1639-1645.
- [19] 王艳真, 王晔, 钟涛, 等. UHMWPE 复合材料水润滑轴承润滑状态转变性能研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(5): 98-104.
- WANG Y ZH, WANG Y, ZHONG T, et al. Study on lubrication state transition performance of water lubricated UHMWPE journal bearing [J]. Tribology Engineering, 2022, 47(5): 98-104.
- [20] 王楠, 杨利涛, 梁应选, 等. 非接触式电磁加载水润滑轴承监测系统[J]. 中国机械工程, 2019, 30(24): 3004-3009.
- WANG N, YANG L T, LIANG Y X, et al. Non-contact

electromagnetic loading monitoring system for water-lubricated bearings[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(24): 3004-3009.

作者简介



王楠(通信作者), 2005 年于陕西科技大学获得学士学位, 2009 年于西安建筑科技大学获得硕士学位, 2015 年于西安交通大学获得博士学位, 现为陕西理工大学副教授, 主要研究方向为机电设备智能监测与控制。

E-mail: heroyoyu@126.com

Wang Nan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Science & Technology in 2005, M. Sc. degree from Xi'an University of Architecture & Technology in 2009 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2015, respectively. Now he is an associate professor in Shaanxi University of Technology. His main research interests include intelligent monitoring and control of mechanical and electrical equipment.