

文章编号: 1671-7449(2026)04-0531-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(4): 531-539.

基于超声脉冲反射法的薄涂层轴承 油膜厚度测量方法

师世博, 赵俊生*

(中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 薄涂层轴承润滑油膜厚度超声测量领域中, 存在因回波信号重叠导致入射波难以分离, 而造成油膜厚度无法准确测量的技术难题。通过引入伪反射系数, 在聚焦声场下建立四层结构油膜厚度测量模型, 利用总反射波和参考波的比值计算幅值与相位的信息, 进而计算油膜厚度, 规避了传统方法中必须分离入射波的难题。构建了该数学模型的有限元模型, 分析了不同油膜厚度和涂层厚度对测量结果的影响。搭建膜厚测量实验台, 开展了多方法对比实验, 用于证明该模型在计算精度与运算效率上的优势。实验结果表明该模型在油膜厚度5~120 μm 范围内相对误差均小于5%, 超过60 μm 时相对误差小于2%, 证明了该模型具备优异的鲁棒性, 可有效提高薄涂层轴承膜厚测量的准确性和稳定性。

关键词: 超声波; 油膜厚度; 反射系数; 四层结构; 叠加信号

中图分类号: TB24

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026057

引用格式: 师世博, 赵俊生. 基于超声脉冲反射法的薄涂层轴承油膜厚度测量方法[J]. 测试技术学报, 2026, 40(4): 531-539.

Shi Shibo, Zhao Junsheng. Measurement of oil film thickness of thin-coated bearings based on ultrasonic pulse reflection method[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(4): 531-539.

Measurement of Oil Film Thickness of Thin-coated Bearings Based on Ultrasonic Pulse Reflection Method

Shi Shibo, Zhao Junsheng*

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the issue of the technical challenge encountered in the ultrasonic measurement of lubricant film thickness on thin-coated bearings, where overlapping echo signals make it difficult to separate the incident wave and prevent accurate measurement, a measurement model for a four-layer lubricant film was established under a focused acoustic field by introducing a pseudo-reflection coefficient. The film thickness was determined by calculating amplitude and phase information from the ratio of the total reflected wave to the reference wave, which circumvented the difficulties inherent in traditional methods. A finite element model was constructed to analyse the influence of different oil films and coating thicknesses on the measurement results. Subsequently, a test bench was set up, and comparative experiments using multiple methods were conducted. Experimental results indicate that the relative error of this model

【收稿日期】2026-02-06

【修回日期】2026-04-03

【录用日期】2026-04-15

【基金项目】山西省基础研究计划资助项目(202203021212158, 20210302123039)

【作者简介】师世博(2002—), 男, 硕士生, 主要从事润滑油膜厚度超声测量研究。E-mail: shibo.shi@163.com。

*【通信作者】赵俊生(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事机电装备智能检测与控制研究。E-mail: zjs@nuc.edu.cn。

is less than 5% for oil film thicknesses ranging from 5 μm to 120 μm , and less than 2% for thicknesses exceeding 60 μm . These findings demonstrate the model's excellent robustness and its ability to effectively enhance the accuracy and stability of thin-film bearing thickness measurements.

Key words: ultrasonic wave; oil film thickness; reflection coefficient; four-layer structure; superimposed signal

0 引言

超声波测量技术发展日渐成熟,为实现高精度、非侵入式的工业测量提供了可靠的技术支撑^[1],目前已广泛应用于无损检测和油膜厚度检测等领域^[2-4]。该技术基于超声波在不同介质中的传播特性,通过分析反射波、透射波等信号来获取被检测界面的信息,进而推算出润滑油膜厚度^[5]。超声波测量技术具有非侵入性、检测速度快、对多种材料适用等优点,这些特性使其在油膜厚度测量方面具有潜在的应用价值^[6]。

目前,轴承润滑油膜厚度的超声测量多基于经典的三层结构模型进行理论推导,探究不同因素对油膜厚度测量结果的影响^[7]。然而,为减少摩擦磨损,轴承(如衬套轴承)表面常覆盖一层薄合金涂层,使得原本的三层结构变为更为复杂的四层结构。在此结构中,当涂层厚度小于超声波脉冲波长的1/2时,超声波在多个极近界面上发生的复杂反射会导致回波信号严重叠加。此时,依赖波分离的经典三层模型完全失效,也给四层结构下的油膜厚度测量带来了巨大挑战^[8-9]。

在面对薄涂层引起的超声回波重叠问题时,研究者多聚焦于信号处理手段,通过对超声信号进行降噪分离等处理方法来提取油膜的反射信号,将四层结构模型转化为三层模型,进而计算润滑油膜厚度。Wang等^[10]提出了一种新型多分辨率稀疏信号表示算法,以实现对重叠超声波信号的多分辨率分解。Zhang等^[11]提出了一种自适应方法解决超声测量油膜厚度时回波重叠问题,扩展了超声弹簧模型在多层结构油膜厚度测量中的应用。Li等^[12]提出基于匹配追踪算法的自干扰对消算法,用于多层复合材料超声检测信号处理,有效减少了噪声和干扰。Shpigler等^[13]提出了一种基于深度卷积神经网络的超声回波检测方法,为解决超声回波重叠问题提供了新的有效途径。尽管上述方法在一定程度上缓解了重叠波干扰,但仍普遍面临算法复杂度高、对先验信息依

赖性强,以及参数不确定性引发测量误差等问题,难以实现油膜厚度稳定、高效的测量。

为从根本上解决波形分离带来的计算难题,研究者们开始对四层结构模型进行了深入的研究,运用了多种模型用于对油膜厚度测量。罗佳美等^[14]提出了基于超声波的四层介质油膜厚度测量模型,通过有限元仿真和试验验证了该方法对含涂层活塞环油膜厚度测量的准确性。Dou等^[15]基于连续介质模型推导了四层结构的反射系数(Reflection Coefficient, RC),并开发了四层结构的反射系数模型RC模型,该模型放弃了分离油膜反射波的传统思路,直接建立整体反射系数与油膜厚度的数学关系。然而,在实际工程应用中,计算反射系数必须先将入射波与预先获取的参考波进行精确分离,而这一分离过程对涂层厚度非常敏感。由于薄涂层厚度在实际工况中难以精准获取,且极易受磨损等因素发生变化,导致传统RC模型极易因参数的不确定性而失效。

为了解决传统模型测量稳定性差和涂层厚度难以获取的问题,本文采用伪反射系数(Pseudo-Reflection Coefficient, PRC),建立聚焦声场下四层结构油膜厚度计算模型,避免了入射波分离的问题,极大减小了涂层厚度误差对模型的影响。通过聚焦声场声学仿真和实验测量证明了该方法能否有效克服重叠波干扰,显著提升了四层结构油膜厚度测量的准确性与稳定性。

1 基于超声波的膜厚测量模型

1.1 传统膜厚测量模型

超声波在四层结构模型中的传播原理如图1所示,四层结构从上到下依次为钢-涂层-润滑油膜-钢,分别对应层1、2、3和4。超声探头发射的入射波 $I(f)$ 依次穿过各层,在不同介质界面处,声波发生多次透射和反射,所有反射波被超声探头接收,记为总反射波 $O(f)$ 。通过对入射波 $I(f)$ 和总反射波 $O(f)$ 进行分析计算,就可以确定油膜厚度。

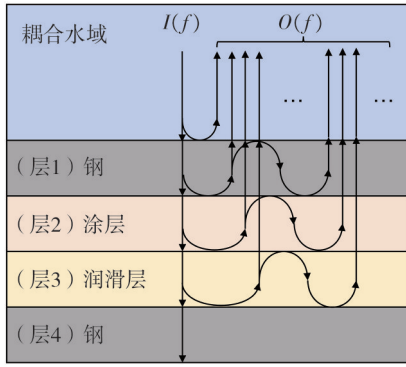


图 1 超声波在四层结构中的传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic wave propagation in a four-layer structure

当涂层厚度大于超声波信号的 $1/2$ 波长时, 来自油膜层的回波信号在时域中能被清晰区分, 此时仍可当作三层结构来计算。当涂层厚度小于超声波脉冲波长的 $1/2$ 时, 回波信号会发生重叠, 此时可以利用 $3c_c/2f_c$ 来判断是否采用四层结构模型, 其中 c_c 为涂层的声速, f_c 为探头的中心频率, 当涂层厚度小于 $3c_c/2f_c$ 时, 回波信号会发生混叠, 此时可以采用四层结构模型来计算油膜厚度。

模型中各层等效声阻抗 Z_j^{equ} 的通用公式为

$$Z_j^{\text{equ}} = z_j \cdot \frac{Z_l e^{-ik_j l} + z_j e^{ik_j l}}{z_j e^{-ik_j l} + Z_l e^{ik_j l}}, \quad (1)$$

式中: z_j 为该层本身的声阻抗; 波数 $k_j = \frac{2\pi f}{c_j}$; c_j 为该层声速; Z_l 为负载阻抗; l 为负载层的宽度。

在此四层结构中, 油膜层的等效阻抗为

$$Z_3^{\text{equ}} = z_3 \cdot \frac{Z_4 e^{-ik_3 h} + z_3 e^{ik_3 h}}{z_3 e^{-ik_3 h} + Z_4 e^{ik_3 h}}, \quad (2)$$

式中: h 为油膜厚度。进而推导到涂层的等效阻抗 Z_t 为

$$Z_t = z_2 \cdot \frac{Z_3^{\text{equ}} e^{-ik_2 d} + z_2 e^{ik_2 d}}{z_2 e^{-ik_2 d} + Z_3^{\text{equ}} e^{ik_2 d}}, \quad (3)$$

式中: d 为涂层厚度。

根据多层结构连续介质模型, 结合四层结构中超声波在各界面的反射和透射特性得到该结构的总反射系数 $V(f)$ 为

$$V(f) = \frac{Z_t - z_1}{Z_t + z_1} = \frac{O(f)}{I(f)}. \quad (4)$$

此时, 通过计算 $I(f)$ 即可解出总反射系数 $V(f)$, 进而算出油膜厚度 h 。实际上, 在图 1 的结构中无法直接获取入射波 $I(f)$ 。在此引入一个参考波, 将油膜层换成空气层, 如图 2 所示。

此时参考波四层结构中涂层的等效声阻抗 Z_r 为

$$Z_r = z_2 \cdot \frac{z_{\text{air}} e^{-ik_2 d} + z_2 e^{ik_2 d}}{z_2 e^{-ik_2 d} + z_{\text{air}} e^{ik_2 d}}. \quad (5)$$

Z_{air} 为空气层的阻抗参考波的反射系数为

$$W(f) = \frac{Z_r - z_1}{Z_r + z_1} = \frac{R(f)}{I(f)}. \quad (6)$$

此时参考波的反射系数 $W(f)$ 已知, 根据上述公式可以直接算得出射波 $I(f)$, 进而算出油膜厚度^[16]。

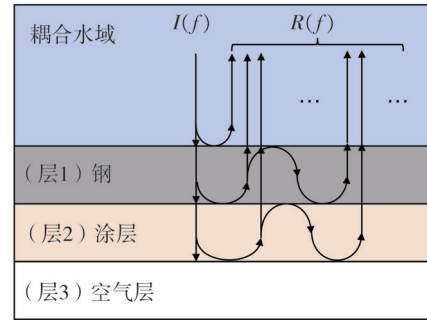


图 2 参考波的传播示意图

Fig. 2 Reference wave propagation diagram

1.2 伪反射系数模型

根据上述公式推导可知, 油膜厚度需要通过入射波 $I(f)$ 计算。这个过程中对涂层厚度 d 敏感, 导致模型稳定性差。本文引入伪反射系数

$$V_P(f) = \frac{O(f)}{R(f)}. \quad (7)$$

将式(4)和式(6)代入式(7)得到

$$V_P(f) = \frac{V(f)}{W(f)} = \frac{Z_t - z_1}{Z_t + z_1} \cdot \frac{Z_r + z_1}{Z_r - z_1}. \quad (8)$$

通过上述比值运算, 入射波 $I(f)$ 被消去, 其余各项均为已知的材料声学参数。其物理实质在于放弃了对入射波的推导计算, 而是采用较为稳定的涂层-空气界面作为对比基准。伪反射系数模型直接用总反射波 $O(f)$ 与参考波 $R(f)$ 的比值进行计算, 直接抵消了超声激励噪声和超声波在基体中的衰减等物理干扰。

在此物理基础之上, 后续通过数学推导, 建立伪反射系数 $V_P(f)$ 与油膜厚度 h 的公式联系, 从声阻抗公式中可以进一步推导得到油膜厚度 h , 得到包含涂层与油膜信息的四层结构总等效声阻抗为

$$Z_t = z_1 \cdot \frac{V_P(f)(Z_r - z_1) + (Z_r + z_1)}{-V_P(f)(Z_r - z_1) + (Z_r + z_1)}. \quad (9)$$

将式(3)代入式(9)可以解出超声波进入油膜层的输入阻抗公式为

$$Z_3^{\text{equ}} = z_2 \cdot \frac{Z_1 e^{-ik_2 d} - z_2 e^{ik_2 d}}{-Z_1 e^{ik_2 d} + z_2 e^{-ik_2 d}} \quad (10)$$

联立式(2)和式(10), 由于油膜厚度 h 包含在复指数项中, 所以对式子移项处理后, 提取复数的幅角信息, 最终得到四层结构的油膜厚度 h 为

$$h = \frac{c_3}{4\pi f} \cdot \arg \left(\frac{(z_3 + z_4)(z_3 - Z_3^{\text{equ}})}{(z_3 - z_4)(z_3 + Z_3^{\text{equ}})} \right) \quad (11)$$

通过联立上述式(9)和式(10), 通过伪反射系数 $V_P(f)$ 计算 Z_1 和 Z_3^{equ} , 代入油膜厚度公式(11)即可求解。

当超声波频率与油膜的谐振频率匹配时, 油膜发生共振, 此时可以将写谐振点的频率代入共振模型来计算润滑油膜厚度^[17], 为

$$h = \frac{c_3}{2f_r} \quad (12)$$

式中: c_3 为油膜中的声速; f_r 为共振频率, 也是极值点频率。

基于以上方法, 构建了测量油膜厚度的计算流程如图3所示。

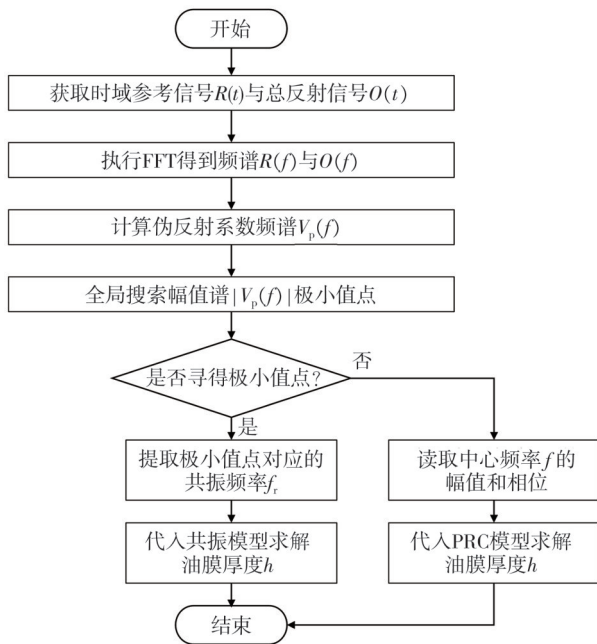


图3 油膜厚度计算流程图

Fig. 3 Oil film thickness calculation flowchart

在具体执行时, 首先分别获取总反射信号 $O(t)$ 与参考信号 $R(t)$, 经快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)提取频域谱 $R(f)$ 与 $O(f)$ 。随后, 将两个频谱直接相除来计算伪反射系数频谱 $V_P(f)$ 。最后, 在有效频带内全局搜索 $|V_P(f)|$ 的极小值点并进行判定: 若寻得极小值点, 则提取对应的共振频率 f_r 代入共振模型求解油膜厚度 h ; 若未寻得极小值

点, 则直接读取探头中心频率 f 处的复数幅值与相位信息, 代入本文模型求解油膜厚度 h 。

2 仿真分析

2.1 仿真模型建立与参数设置

本文利用COMSOL Multiphysics软件构建二维聚焦声场仿真模型如图4所示。模型采用四层结构设计, 从上往下依次为钢层、涂层、油膜层和钢层, 各层的材料属性根据表1中列出的参数进行设置。模型上方水层用作超声探头的耦合介质, 水层上方弧形部分模拟压电晶体。超声探头宽度10 mm, 焦距38 mm, 中心频率为10 MHz。

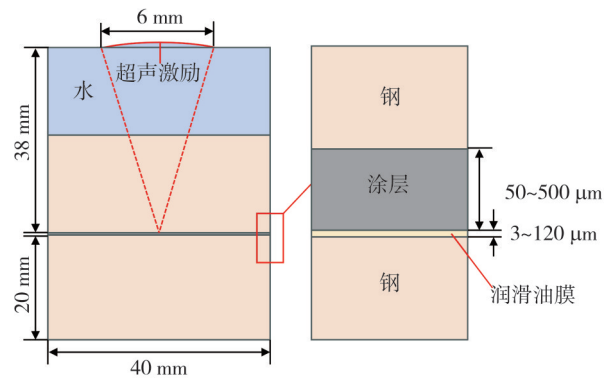


图4 二维声学仿真模型

Fig. 4 Two-dimensional acoustic simulation model

表1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料名称	声速/(m·s ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)
水	1 500	1 000
润滑油	1 400	800
结构钢	5 900	7 850
涂层	5 000	4 500

网格划分结果如图5所示。网格设置类型为用户控制网格, 采用自由三角形网格, 实体迭代次数为4, 两边的吸收层采用常规细化方法, 细化两次, 中间仿真模拟部分, 考虑到计算机的计算能力, 设置最小单元为0.017 4 mm, 最大单元为3.89 mm, 最大单元增长率为1.3, 时间步长设置为 $(0, T_0/15, 300 \cdot T_0)$, 其中 T_0 为高斯脉冲正弦波的周期, 求解自由度数为43 920。

本模型采用压力声学弹性波耦合多物理场, 所有边界均设置为聚焦波辐射, 固液接触界面设置一致边界对, 保证边界处超声波传递连续, 为模型边界设定硬声场边界条件, 两侧设置吸收层^[18]。在传感器位置设置激励源和接收探头, 用于波的激励和采样。激励采用高斯脉冲正

弦波,兼具窄频特性与脉冲聚焦能力,既能通过正弦波保证中心频率稳定,又能减少信号时域重叠,使能量集中,衰减可控。信号波形如图 6 所示,公式如下

$$x(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-2T_0}{T_0/2}\right)^2\right) \cdot \sin(2\pi f_0 t), \quad (13)$$

式中: $f_0=10$ MHz 为激励波的中心频率。

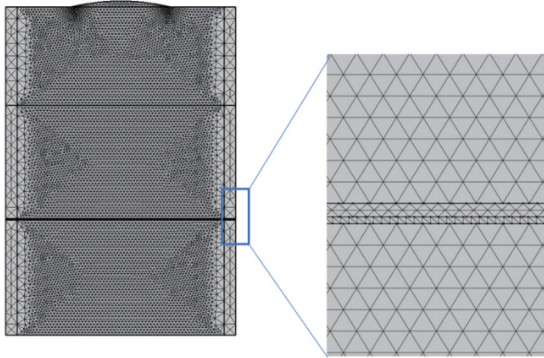


图 5 网格划分结果

Fig. 5 Corresponding mesh partitioning results

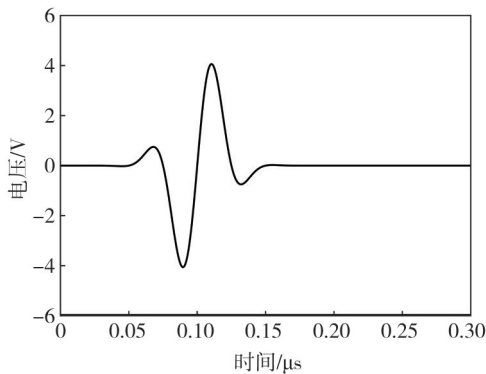


图 6 激励信号

Fig. 6 Incentive signal

2.2 仿真结果与分析

为探究涂层厚度这一关键结构参数对测量结果的影响规律,并验证本文所提四层结构模型在不同参数组合下的准确性,本节进行了仿真分析。采集到的回波信号如图 7 所示。对该信号进行快速傅里叶变换以提取频域内的幅值与相位信息,代入四层结构模型中,即可计算出不同涂层厚度条件下的润滑油膜厚度。为贴近实际工况,分别设置了 5 种涂层厚度和 7 种油膜厚度的仿真实验。计算结果如图 8 所示。

由图 8 可知,涂层厚度的变化对油膜厚度计算结果的影响很小,仿真计算所得的油膜厚度均在预设理论值附近极小范围内波动,这表明本文

方法能够有效、稳定地实现油膜厚度的计算。为进一步评估测量精度,将仿真计算值与预设理论值进行对比,其相对误差分析结果如图 9 所示。

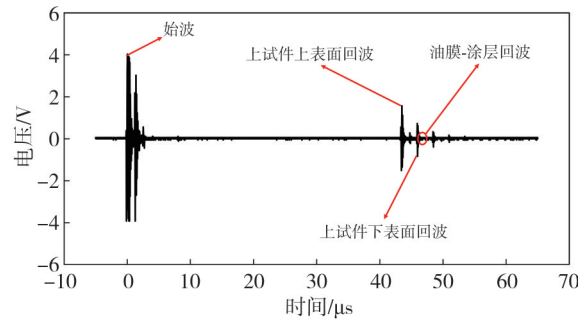


图 7 回波信号

Fig. 7 Echo signal

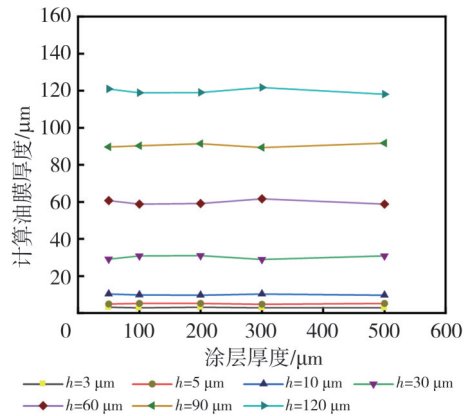


图 8 涂层厚度对油膜厚度计算的影响

Fig. 8 Effect of coating thickness on oil film thickness calculation

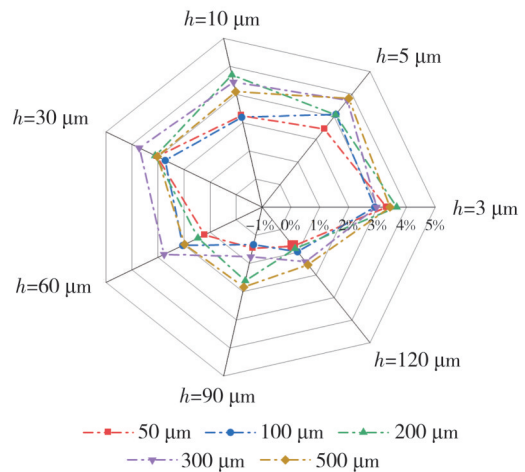


图 9 相对误差分析

Fig. 9 Relative error analysis

由图 9 可知,该四层结构模型计算的油膜厚度,在油膜厚度较薄时,其全局相对误差仍能控制在 3% 左右,表现出高稳定性和准确性,证明本文方法可以测量具有较宽范围的油膜厚度。此外,对于厚度超过 60 μm 的油膜,相对误差小于

2%。这是由于共振现象的发生,使伪反射系数幅值谱出现极小值点,代入共振法即可求得油膜厚度,大幅提升了测量的精度。

3 实验验证

3.1 实验装置组成

本文设计的静态标定系统如图 10 所示。膜厚度静态实验台主要由轴承钢、润滑油、塞尺、超声探头和水槽组成。实验中用水作为耦合剂,用厚度为 2 mm,长度和宽度为 9 mm×30 mm 的量块来作为摩擦副,轴承钢之间利用垫塞尺的方式来模拟机械运行时产生的缝隙。使用了 10 号 PAO 润滑油作为润滑油膜,涂层钢的一面喷涂二硫化钼干性润滑剂作为薄涂层,试块四周涂抹高真空硅脂作为防水处理。

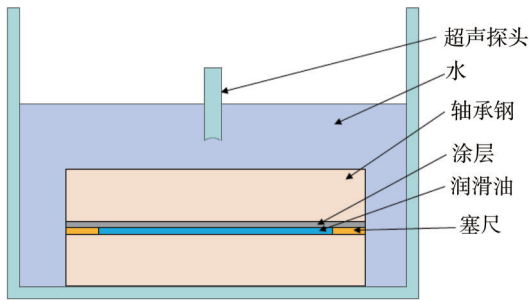


图 10 静态标定系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of static calibration system

为了测试所提出的四层结构模型的性能,搭建了油膜厚度测量实验台进行了实验,如图 11 所示。

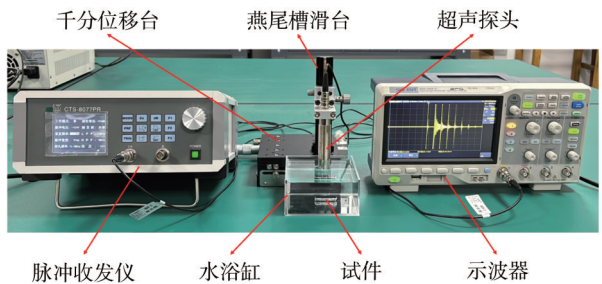


图 11 油膜厚度测量实验台

Fig. 11 Oil film thickness measurement bench

实验台主要由千分位移台、燕尾槽滑台、超声探头、脉冲收发器、水浴缸、试件和示波器组成,关键实验设备及参数如表 2 所示。其工作原理是控制超声脉冲收发器,使其按照与探头相应的频率和脉宽发射超声信号,信号在界面反射传递回超声探头,超声探头将反射回的超声信号收集,由示波器对信号进行采样。最后导出时域回

波信号数据,传输到 PC 机上对信号进行分析处理,经过一系列计算最终得到油膜厚度。

表 2 实验装置及其参数

Tab. 2 Experimental set-up and its parameters

实验装置	参数	规格
超声脉冲收发器	带宽	1 kHz~30 MHz
	脉冲宽度/ns	25~6 500
	信号频率/MHz	10
水浸式点聚焦超声探头	晶片尺寸/mm	6
	焦距/mm	38
示波器	采样率/GHz	1

3.2 测量结果分析

通过在下端量块上固定两组相同厚度的塞尺来精准控制量块之间的距离,从而创建出高度确定的间隙,在其中加入润滑油来模拟轴承中的润滑油膜,可以通过更换不同厚度的塞尺来精确控制油膜厚度的变化。

设置了不同厚度的润滑油膜进行标定,以涂层厚度为 100 μm 和油膜厚度为 10 μm 的测量过程为例,实验开始前先测量无油膜情况下的参考信号 $R(t)$,傅里叶变换后得到参考波 $R(f)$,之后将标定装置依次组装好,对不同位置间隙总计 15 个样本点的反射信号进行采集,将采集到的反射信号 $O(t)$ 傅里叶变换后得到 $O(f)$ 。两个频谱直接相除计算得到伪反射系数频谱,将其幅值与相位信息代入本文模型中,得到油膜厚度,如表 3 所示。

表 3 不同油膜厚度测量值

Tab. 3 Measurement values of different oil film thicknesses

样本点	PRC	中心频率/MHz	油膜厚度/μm
1	0.990+0.201j	9.659	10.182
2	0.895+0.285j	9.694	10.947
3	0.975+0.290j	9.820	9.382
4	0.888+0.212j	10.173	10.996
5	0.930+0.195j	9.632	10.819
6	0.965+0.280j	10.088	10.757
7	0.910+0.275j	10.291	10.587
8	0.980+0.220j	10.107	9.971
9	0.892+0.250j	9.943	10.787
10	0.955+0.200j	10.382	10.005
11	0.920+0.295j	10.235	10.893
12	0.970+0.245j	10.056	10.542
13	0.913+0.236j	10.469	10.165
14	0.952+0.273j	9.872	10.661
15	0.925+0.249j	10.418	10.359

对上表 15 个样本点计算的膜厚求取平均值,最终得到计算的膜厚为 10.470 μm。重复上述流程,分别对 5、30、60、90 和 120 μm 厚度油膜的各

样本点的测量值取平均值,并计算相对误差,结果如表 4 所示。

表 4 油膜厚度测量值及误差

Tab. 4 Oil film thickness measurements and errors

样本厚度/ μm	平均油膜厚度/ μm	相对误差/%
5	5.172	4.74
10	10.470	4.70
30	28.743	4.19
60	60.996	1.66
90	88.992	1.12
120	121.102	0.92

不考虑加工误差和表面粗糙度等因素造成的误差,测得油膜厚度最大相对误差为 4.74%。当油膜厚度小于 30 μm 时,相对误差在 5% 以内,当油膜厚度大于 60 μm 时,由于处于共振模型,测量的相对误差在 2% 以内,证明了该模型的准确性。

3.3 不同测厚方法的对比分析

为验证本文模型的优越性,选取油膜厚度为 5 μm ,涂层厚度为 100 μm 时的测量数据,对 RC 模型、四层弹簧模型及本文模型在计算精度和计算效率上进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 油膜厚度测量模型性能对比

Tab. 5 Comparison of performance of oil film thickness measurement models

模型	相对误差/%	单帧运算时长/ms
RC 模型	12.87	3.563 7
四层弹簧模型	5.12	16.468 2
本文模型	4.74	1.063 7

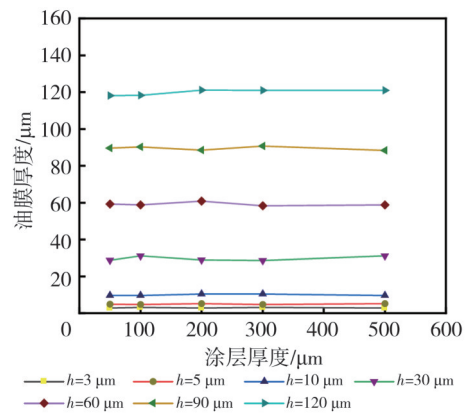
由表 5 可知,本文提出的伪反射系数模型相对误差仅为 4.74%,比 RC 模型和四层弹簧模型分别降低了 63.17% 和 7.42%。这是因为 RC 模型受涂层厚度误差影响较大,该误差对入射波传播的影响显著,导致最终计算结果误差较大。四层弹簧模型仅利用幅值信息,未考虑相位信息,因此对微小膜厚的测量精度低于本文模型。

在检测速度方面,本文模型的单帧运算时长只有 1.063 7 ms,耗时最短,比 RC 模型和四层弹簧模型分别降低了 70.15% 和 93.15%,在兼顾精度的同时维持了较高的检测效率。分析可知,四层弹簧模型因前置信号处理依赖高斯滤波去噪与极值点搜索,单帧耗时最高,达 16.468 2 ms。RC 模型虽免去滤波环节,但理论入射波的求解涉及大量高阶复数运算,单帧耗时为 3.563 7 ms。相比之下,本文模型通过频域比值规避了入射波的推导过程,只需提取已知中心频率处的幅值与相

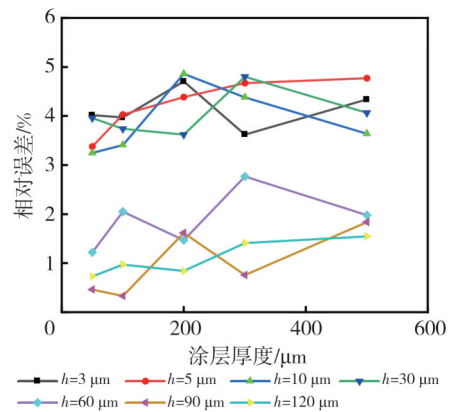
位信息就可以完成计算,从根本上省略了繁琐的信号预处理步骤,因此计算效率最高。

3.4 涂层厚度对测量结果的影响

在制备涂层过程中,不可避免地存在制造公差与测量误差。前文仿真实验中探讨了不同涂层厚度对测量结果的影响,基于理想化假设,将涂层厚度视为绝对精确的固定值。然而,实验中涂层厚度存在的不确定性,仅凭仿真难以全面评估测量模型的鲁棒性。为此,有必要进一步探究实验中涂层厚度对测量结果的影响。膜厚计算结果和相对误差如图 12 所示。



(a) 膜厚计算结果



(b) 膜厚测量相对误差

图 12 不同涂层厚度对检测结果的影响

Fig. 12 Effect of different coating thickness on test results

由图 12 可知,涂层厚度对膜厚测量结果的影响趋势与仿真一致。区别在于,实际工况中涂层厚度存在误差,因此在 3~30 μm 膜厚范围内,测量误差在 5% 左右。该误差水平表明,本文方法在涂层的影响下仍具有较高的测量准确性。

虽然上述结果证明了本文模型对克服涂层厚度测量误差有较好的鲁棒性,但是在极端测量条

件或复杂的实际工况下,本文模型仍存在若干不足。比如实际工况下轴承摩擦副表面的粗糙度会严重影响超声波的传播,造成较大散射,进而引发高频信号严重衰减和信噪比下降,导致测量误差增大。其次,本文当前实验多采用室温静态测量系统,而在实际运转环境中,摩擦造成的温度升高会使润滑油的密度和声速发生变化,从而影响超声信号传播的稳定性。未来可采用高频宽带超声探头、温度实时补偿和自适应降噪算法来增大油膜厚度测量范围,并提高其在复杂环境下的稳定性。

4 结 论

针对薄涂层轴承超声回波信号严重重叠、入射波难以分离的技术难题,本文采用伪反射系数,建立了聚焦声场下四层结构油膜厚度计算模型,避免了入射波分离的问题,极大减小了涂层厚度误差对模型的影响。本文构建了聚焦声场下四层结构的声学有限元仿真模型,探究了关键结构参数对检测结果的影响规律。仿真结果表明,涂层厚度变化对测量结果的影响很小;在5~120 μm 的油膜厚度范围内,该方法能够实现稳定测量,全局相对误差控制在3%左右,且当厚度大于60 μm 时易产生共振现象,相对误差可降至2%以下。搭建油膜厚度静态标定实验台,开展了多方法对比实验。实验结果表明,本研究所提出的模型比传统的RC模型、四层弹簧模型有更高的计算精度以及运算速度,在薄涂层的影响下仍然具有很好的鲁棒性,提高了薄涂层轴承膜厚测量的精度。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 刘燕云,秦磊,赵鹏,等. 基于压电超声传感器的水泥水化原位监测[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 148-154.
Liu Yanyun, Qin Lei, Zhao Peng, et al. *In situ* monitoring of cement hydration based on piezoelectric ultrasonic sensors [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 148-154. (in Chinese)
- [2] 李猛,田桂斌,刘意,等. 圆柱滚子轴承混合润滑状态下的超声法膜厚测量[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10): 279-284.
Li Meng, Tian Guibin, Liu Yi, et al. Ultrasonic measurement of oil film thickness in cylindrical roller bearings under mixed lubrication [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(10): 279-284. (in Chinese)
- [3] Dou P, Jia Y, Wu T, et al. High-accuracy incident signal reconstruction for *in-situ* ultrasonic measurement of oil film thickness [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 156: 107669.
- [4] Wang J, Li Y, Bao M, et al. An accurate measurement method for center oil film thickness in high-speed roller bearing using ultrasound [J]. Tribology International, 2024, 196: 109726.
- [5] 贺彦博,高天雯,郭奥,等. 基于超声波反射系数相移的油膜厚度测量方法研究[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(1): 1-8.
He Yanbo, Gao Tianwen, Guo Ao, et al. Lubricant film thickness measurement based on ultrasonic reflection coefficient phase shift [J]. Tribology, 2021, 41(1): 1-8. (in Chinese)
- [6] 孙兴宏,马弘章,李世伟,等. 基于超声波的活塞环油膜厚度动态测量[J]. 内燃机学报, 2023, 41(2): 150-157.
Sun Xinghong, Ma Hongzhang, Li Shiwei, et al. Dynamic measurement of piston ring oil film thickness based on ultrasonic [J]. Transactions of Csice, 2023, 41(2): 150-157. (in Chinese)
- [7] 姚志伟,魏永庚,石勇. 基于超声波测量油膜厚度方法的研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2021, 12(1): 54-61.
Yao Zhiwei, Wei Yonggeng, Shi Yong. Research on the method of measuring oil film thickness based on ultrasonic measurement [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2021, 12(1): 54-61. (in Chinese)
- [8] 王超,梁鹏,郭峰,等. 摩擦副材质对超声波测量膜厚的影响[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(2): 28-33.
Wang Chao, Ling Peng, Guo Feng, et al. Influence of friction pair material on film thickness measured by ultrasonic wave [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(2): 28-33. (in Chinese)
- [9] 王超,梁鹏,郭峰,等. 探头中心频率与摩擦副材质对超声膜厚测量范围的影响[J]. 润滑与密封, 2021, 46(10): 92-99.
Wang Chao, Ling Peng, Guo Feng, et al. Influence of probe center frequency and friction pair material on

- ultrasonic film thickness measurement range [J]. *Lubrication Engineering*, 2021, 46(10): 92-99. (in Chinese)
- [10] Wang H, Zhang G, Ma H, et al. A multiresolution sparse signal representation approach for the decomposition of overlapping echoes in complex ultrasonic signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 219: 111593.
- [11] Zhang K, Wu T, Duan Z, et al. An adaptive approach for recovering overlapping echoes in oil film thickness measurement by ultrasound [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2017, 69(5): 788-797.
- [12] Li Y, Yao K, Li X. An ultrasonic signal reconstruction algorithm of multilayer composites in non-destructive testing [J]. *Applied Acoustics*, 2022, 186: 108461.
- [13] Shpigler A, Mor E, Bar-Hillel A. Detection of overlapping ultrasonic echoes with deep neural networks [J]. *Ultrasonics*, 2022, 119: 106598.
- [14] 罗佳美, 韩晓光, 单英春, 等. 基于超声波的涂层活塞环油膜厚度仿真 [J]. *内燃机学报*, 2025, 43(2): 164-172.
- Luo Jiamei, Han Xiaoguang, Shan Yingchun, et al. Simulation of oil film thickness of coated piston ring based on ultrasonic [J]. *Transactions of Csice*, 2025, 43(2): 164-172. (in Chinese)
- [15] Dou P, Zheng P, Jia Y, et al. Ultrasonic measurement of oil film thickness in a four-layer structure for applications including sliding bearings with a thin coating [J]. *NDT & E International*, 2022, 131: 102684.
- [16] Lu M, Meng X, Huang R, et al. Thickness measurement of circular metallic film using single-frequency eddy current sensor [J]. *NDT & E International*, 2021, 119: 102420.
- [17] Piovesan A S, Schirru M, Tatzgern F, et al. Effect of oil acoustic properties on film thickness measurement by ultrasound using spring and resonance models [J]. *Lubricants*, 2024, 12(4): 108.
- [18] 丁春雄, 蒋晓菡, 俞燕萍, 等. 声阻抗可调节超声匹配层研究 [J]. *测试技术学报*, 2025, 39(5): 511-517.
- Ding Chunxiong, Jiang Xiaohan, Yu Yanping, et al. Study of acoustic impedance tunable ultrasonic matching based on piezoelectric shunt [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2025, 39(5): 511-517. (in Chinese)

(上接第 530 页)

- [12] Ding Y, Jia M. A convolutional transformer architecture for remaining useful life estimation [C]//2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing), 2021: 1-7.
- [13] 惠景明, 王健, 吴双, 等. 基于自注意力 CNN-BiLSTM 的滚动轴承剩余使用寿命预测 [J]. *轴承*, 2024(3): 92-98.
- Hui Jingming, Wang Jian, Wu Shuang, et al. Remaining useful life prediction for rolling bearings based on self-attention CNN-BiLSTM [J]. *Bearing*, 2024(3): 92-98. (in Chinese)
- [14] 刘路路. 基于特征融合和 LSTM 的滚动轴承剩余寿命预测 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 11.
- Liu Lulu. Remaining useful life prediction of rolling bearings based on feature fusion and LSTM [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 11. (in Chinese)
- [15] Nectoux P, Gouriveau R, Medjaher K, et al. PRONOSTIA: an experimental platform for bearings accelerated life test [C]//IEEE International Conference on Prognostics and Health Management. Colorado, United States, 2012: 1-8.
- [16] Soualhi A, Medjaher K, Zerhouni N. Bearing health monitoring based on Hilbert-Huang transform, support vector machine, and regression [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 64(1): 52-62.
- [17] Li X, Jiang H, Liu Y, et al. An integrated deep multi-scale feature fusion network for aeroengine remaining useful life prediction with multisensor data [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2022, 235: 107652.
- [18] Jiang F, Ding K, He G, et al. Dual-attention-based multiscale convolutional neural network with stage division for remaining useful life prediction of rolling bearings [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 3525410.
- [19] 李恒, 张氢, 秦仙蓉, 等. 基于短时傅里叶变换和卷积神经网络的轴承故障诊断方法 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(19): 124-131.
- Li Heng, Zhang Qing, Qin Xianrong, et al. Fault diagnosis method for rolling bearings based on short-time Fourier transform and convolution neural network [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(19): 124-131. (in Chinese)