DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202502020

基于超声波的涂层活塞环油膜厚度仿真

罗佳美[1]，韩晓光[1,2]，单英春[1,2]，王静思[2]，徐久军[1,2]
（1. 大连海事大学船机修造工程交通行业重点实验室，大连 116026；
2. 大连市内燃机摩擦学与可靠性工程重点实验室，大连 116026）

摘要：针对超声波液相厚度测量技术在监测内燃机活塞环-气缸套摩擦副润滑状态时因回波叠加导致多界面中油膜厚度提取困难的问题，以涂层活塞环摩擦副润滑油膜为对象，提出了基于超声波 4 层介质油膜厚度测量的数学模型，并利用有限元仿真软件建立了相应的有限元模型. 模拟了在不同探头发射频率、不同涂层及油膜厚度下的声压场，分析了超声探头参数、涂层厚度以及预设油膜厚度对油膜厚度模拟检测结果的影响. 对不同发射频率下油膜厚度为 0.5 ~ 10.0 μm 的声压响应进行计算，根据计算结果所得油膜厚度与预设油膜厚度具有很好的一致性. 进一步的实际测量试验证实了该方法在测定含涂层活塞环油膜厚度上的准确性.

关键词：活塞环；油膜厚度；超声波测量；有限元模型
中图分类号：TK431　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909(2025)02-0164-09

Simulation of oil film thickness of coated piston ring based on ultrasonic

Luo Jiamei[1]，Han Xiaoguang[1,2]，Shan Yingchun[1,2]，Wang Jingsi[2]，Xu Jiujun[1,2]
(1. Key Laboratory of Shipbuilding Engineering and Transportation Industry，Dalian Maritime University，Dalian 116026，China；2. Dalian Key Laboratory of Internal Combustion Engine Tribology and Reliability Engineering，Dalian 116026，China)

Abstract：Aiming at the problem that it is difficult to extract the relative information of multi-interface oil film thickness with the ultrasonic liquid phase thickness measurement technology monitoring the lubricating state of the piston ring-cylinder liner friction pair of the internal combustion engine for the echo superposition，a mathematical model was proposed for measuring the oil film thickness of the four layer medium based on ultrasound，and a corresponding finite element model was established using the finite element simulation software，the sound pressure fields under different probe emission frequencies，coating thickness，and oil film thickness were simulated. The effects of ultrasonic probe parameters，coating thickness and preset oil film thickness on the simulation results of oil film thickness were analyzed. The sound pressure response with oil film thickness of 0.5—10.0 μm at different emission frequencies was calculated. Results show that the calculated oil film thickness is in good agreement with the preset oil film thickness. The accuracy of this method in determining the thickness of coated piston ring oil film is further confirmed by practical measurement experiments.

Keywords：piston ring；oil film thickness；ultrasonic measurement；finite element model

活塞环-气缸套接触处润滑油膜厚度反映了接触面间的润滑情况[1]. 油膜过薄时，表面冲击较大处油膜极易破损[2]，使接触面处于干摩擦状态，工件接触面温度升高，磨损加剧，导致内燃机不能正常工作；油膜过厚时，导致内燃机负载能力下降. 活塞环-气缸套接触处的油膜厚度通常为 0.1 ~ 100.0 μm，实际工况下测量困难. 已有学者基于油膜的电学[3]和光学[4-5]特性，对摩擦副表面油膜厚度进行了试验，电学法需要一个电绝缘的平面来安装传感器，光学法要求与油膜接触的材料是透明的，这两种方法的不足限制了其应用范围.

由于超声波具有强穿透性和无损特性，使其探测

收稿日期：2024-03-22；**修回日期**：2024-07-19.
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFB4300801)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132023515).
作者简介：罗佳美，硕士研究生，jmluo0024@163.com.
通信作者：韩晓光，副教授，硕士生导师，xghandl@163.com.

灵敏度高且对探测环境友好，因而采用超声方法测量润滑油膜厚度受到国内外学者的青睐.

基于超声波在 3 层介质中的传播过程和理论，Wu 等[6]建立了油膜厚度的超声识别模型，实现了 1 ~ 150 μm 范围内轴承油膜厚度分布全周向测量. Yao 等[7]建立了单脉冲水下超声回波的数学模型，通过记录浮油内超声回波发射的飞行时间，实现薄油膜厚度超声测量. 陈继明等[8]讨论了油膜厚度为 30 ~ 100 μm 情况，建立了共振测量理论模型，通过仿真得到不同频率、厚度下的声压，证明了有限元法计算油膜反射系数的准确性. 贺彦博等[9]解决了盲区油膜厚度直接求解的问题，实现柴油机气缸全尺度油膜厚度测量，还将固体层的影响考虑在内，提出了一种改进的超声反射系数相位模型[10]用于有效确定润滑油膜厚度. 李猛等[11]发现，在弹性水动力润滑接触中，分离膜的标称厚度接近表面粗糙度，此时微凸体和油膜共同承担界面总刚度. 将油膜刚度分离后得到更加准确的油膜厚度. Jia 等[12]将温度变化的热敏性集成到超声测量算法中，提出了综合考虑声速、材料密度和参考信号的温度补偿策略，实现了不同温度下润滑油膜厚度的准确计算.

此外，学者们对超声波测量系统也进行了深入研究. 付鑫等[13]提供了一种基于超声法测量油膜厚度的装置，利用该装置实现了曲轴联动装置内的油膜厚度测量. 杨晓等[14]以谐振模型和弹簧模型为理论依据，设计并制作了油膜厚度超声测量电路，完成了对油膜厚度的测量. Mills 等[15]开发了一种新型传感器系统，将该传感器安装在气缸壁外部，通过记录接触点处的反射信号实现对活塞组件和气缸壁之间油膜的监测. 可知，超声模型在模拟检测油膜厚度的过程中，均采用以 3 层介质结构作为主要的研究对象，然而在实际的内燃机活塞环-气缸套摩擦副中，为了减小摩擦，活塞环表面均制备有减摩涂层，实际形成了 4 层介质结构，采用超声波检测油膜厚度时，不同介质中的回波信号相互叠加，传统的 3 层结构模型无法提取涂层活塞环的油膜厚度信息.

针对活塞环-气缸套摩擦副的典型 4 层介质结构特征，笔者依据超声纵波在 4 层介质中的传播原理，提出了 4 层介质超声波传播的理论模型，并进行了活塞环-气缸套油膜厚度超声测量仿真分析，以期为活塞环-气缸套摩擦副润滑状态的有效判定提供参考.

1　超声测量基本原理

图 1 为典型 3 层介质模型，主要为铸铁-油膜-铸铁结构，材料分别对应介质 Ⅰ、Ⅱ 和 Ⅲ，其中介质 Ⅰ 和 Ⅲ 为半无限大介质. I_1 表示原始入射波，W_1、W_2 分别表示入射波 I_1 在介质 Ⅰ 和 Ⅱ 界面以及介质 Ⅱ 和 Ⅲ 界面处的反射波；T_1、T_2 分别表示入射波 I_1 在介质 Ⅰ 和 Ⅱ 界面以及介质 Ⅱ 和 Ⅲ 界面处的透射波. $x = 0$ 表示入射波由介质 Ⅰ 进入到介质 Ⅱ 的起始位置；h 为油膜厚度.

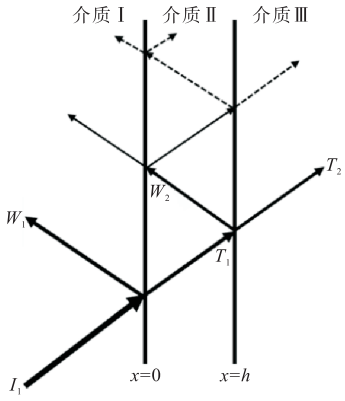


图 1　平面波在 3 层介质结构内的传播过程

Fig.1　Propagation process of plane wave in three-layer dielectric structure

由于超声波具有衰减特性，高频超声波在铸铁中衰减严重，机械设备在极端工况条件下工作时有效润滑油膜厚度难以测量，此时把油膜等效为轻质弹簧，润滑油膜质量可以被忽略[16]，如图 2 所示. 当油膜厚度非常小，远小于声波波长时，油膜厚度[17-19] h 可表示为

$$h=\frac{\rho c_2^2}{\omega z_1 z_2}\sqrt{\frac{R^2\left(z_1+z_2\right)^2-\left(z_1-z_2\right)^2}{1-R^2}} \tag{1}$$

式中：ρ 为油膜密度；c_2 为超声波在油膜中的传播速度；R 为反射系数；z_1、z_2 分别为油膜两侧弹性介质特性阻抗；ω 为超声波的角频率.

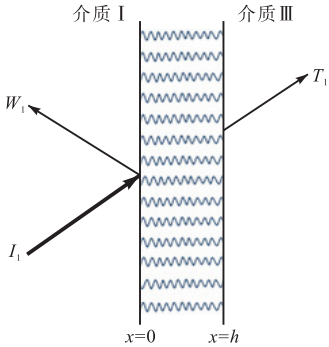


图 2　弹簧模型的声波传播过程

Fig.2　Propagation process of acoustic wave of spring model

2　活塞环-气缸套润滑油膜厚度测量方法

2.1　4 层结构的叠加信号

图 3 为 4 层模型中超声波脉冲传播原理. 4 层介

质为活塞环-涂层-润滑油-缸套，分别对应介质Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ. 可以看出，在不同介质界面处，声波发生多次反射，记录反射信号分别为 W_1、W_2、W_3 和 W_4，对应的反射系数分别为 R_1、R_2、R_3 和 R_4. 对于薄涂层，W_1 与 W_2、W_3、W_4 叠加，构成 W_m. 通过分析 W_m 中回波振幅的变化，可确定油膜厚度.

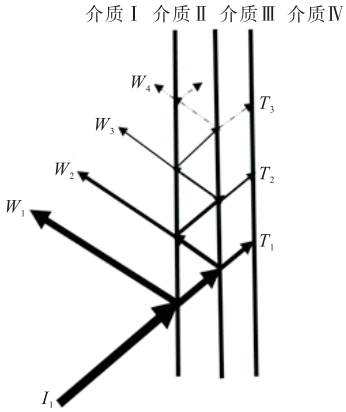


图 3 平面波在 4 层介质结构内的传播过程

Fig.3 Propagation process of plane wave in four-layer dielectric structure

2.2 油膜厚度提取

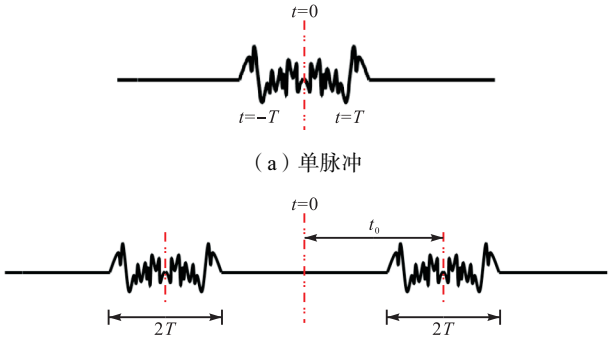
图 4 为超声波入射信号频谱分析. 假设时域信号为 $f(t)$，在频域内的傅里叶变换为 $F(\omega)$，由傅里叶变换基本定理可知

$$F(\omega)=\int_{-T}^{T}f(t)\exp(-\mathrm{j}\omega t)\mathrm{d}t=\mathcal{F}\left[f(t)\right] \tag{2}$$

式中：$\mathcal{F}$ 为傅里叶变换，$f(t)$ 以 $t=0$ 为中心，输入信号是持续时间为 $2T$ 的一个脉冲序列(图 4(a))，则 $f(t-t_0)$ 的傅里叶变换为

$$\mathcal{F}\left[f(t-t_0)\right]=\exp(\mathrm{j}\omega t_0)F(\omega) \tag{3}$$

式中 $f(t-t_0)$ 与 $f(t)$ 相同，其以 $t=t_0$ 为中心. 当利用回波信号来反映厚度信息时，能得到来自介质两侧界面的回波脉冲，假设两个脉冲之间的延迟时间为 $2t_0$ (图 4(b)).



(a) 单脉冲

(b) 两个相同脉冲

图 4 超声波入射信号频谱分析

Fig.4 Spectrum analysis of ultrasonic incident signal

设一个时域信号 $f_1(t)$ 在频域内的傅里叶变换为 $F_1(\omega)$. 当 $f_1(t)$ 通过界面发生反射时，超声脉冲由 $f_2(t)$ 表示，在频域内的傅里叶变换为 $F_2(\omega)$，则在频域内，$F_2(\omega)$ 与 $F_1(\omega)$ 的比值是一个与频率有关的确定函数，设为 $k(\omega)$，且 $0\leqslant k(\omega)\leqslant 1$，有

$$\frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)}=k(\omega) \tag{4}$$

假设声波穿过涂层材料厚度的时间为 t_1，由于回波信号相互叠加，合成的振幅谱[20]为

$$\left|\mathcal{F}\left[f_1(t+t_1)+f_2(t-t_1)\right]\right|=\left|F_1(\omega)\right|\sqrt{\left[1-k(\omega)\right]^2+4k(\omega)\cos^2(\omega t_1)} \tag{5}$$

对于薄涂层，可以忽略 W_3、W_4、……对 W_m 的影响，假设 W_m 由 W_1 和 W_2 组成，W_1、W_2 之间的延迟时间为 $2t_1$，$W_1(t)$ 的傅里叶变换为 $W_1(\omega)$，由式(5)得 $R_m(t)$ 的振幅谱为

$$\left|\mathcal{F}\left[W_m(t)\right]\right|=\left|\mathcal{F}\left[W_1(t+t_1)+W_2(t-t_1)\right]\right|=\left|W_1(\omega)\right|\sqrt{\left[1-k(\omega)\right]^2+4k(\omega)\cos^2(\omega t_1)} \tag{6}$$

$W_1(\omega)$ 由活塞环和涂层材料的声学参数决定，与超声传播过程无关. $W_m(\omega)$ 随油膜厚度变化而变化. 设 $\left|W_m(\omega)\right|$ 与 $\left|W_1(\omega)\right|$ 的比值为 $Q(\omega)$，则有

$$Q(\omega)=\sqrt{\left[1-k(\omega)\right]^2+4k(\omega)\cos^2(\omega t_1)} \tag{7}$$

若 $W_1(\omega)$ 已知，可得到 $Q(\omega)$，将式(7)简化为

$$k^2(\omega)+\left[4k(\omega)\cos^2(\omega t_1)-2\right]\cdot k(\omega)+\left[1-Q^2(\omega)\right]=0 \tag{8}$$

由式(8)得到 $Q(\omega)$ 为余弦模式波动. 假设 $Q(\omega)$ 在超声波系统中心频率附近的峰值频率为 ω_s (即 $\cos^2(\omega_s t_1)=1$)，有

$$k^2(\omega_s)+2k(\omega_s)+\left[1-Q^2(\omega)\right]=0 \tag{9}$$

$k(\omega_s)$ 为峰值频率 ω_s 处叠加信号 W_m 内的回波分量 W_2 与稳量 W_1 之间的振幅比. 在相同的求解过程中，以来自涂层-空气的回波信号作为参考信号，为方便理解，记为 $k_a(\omega_s)$，空气界面的声速为 340 m/s，密度为 1.29 kg/m^3，声阻抗为 438.6 kg/(m^2 · s)，得到油膜在峰值频率处的反射系数为

$$R(\omega_s)=\frac{k(\omega_s)}{k_a(\omega_s)} \tag{10}$$

联立式(3)和式(10)，可得 4 层结构油膜层的厚度为

$$h=\frac{\rho c_2^2}{\omega_s z_1 z_3}\sqrt{\frac{R(\omega_s)^2(z_1+z_3)^2-(z_1-z_3)^2}{1-R(\omega_s)^2}} \tag{11}$$

3　活塞环-气缸套油膜厚度超声测量仿真

3.1　超声传播的有限元模型

为避免仿真过程中声波多次反射影响结果并缩短计算时间，笔者采用 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元仿真软件搭建二维简化模型，各试样形状及尺寸如图 5 所示. 4 层结构自上而下依次为活塞环、Ni 层、油膜和气缸套. 整个模型由声-压电的交互作用产生，将电信号转化为声波的压力和位移信号发射出去，最后声波经一系列反射与透射又转化为电信号被探头接收. 为了提高电声与声电之间的耦合度，选择机械品质因数较低的压电材料 PZT-5H，各层结构材料的声学参数见表 1.

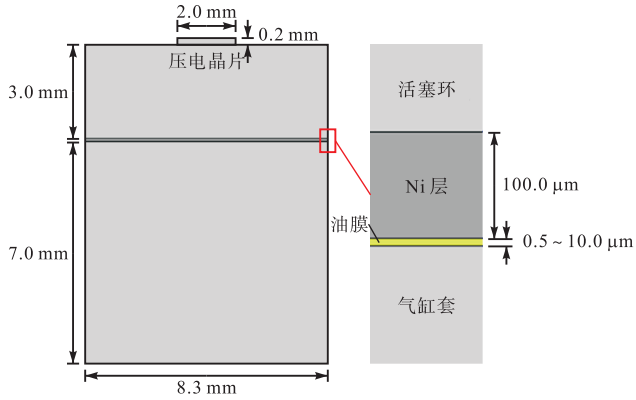


图 5　几何模型

Fig.5　Geometric model

表 1　各层结构材料的声学参数

Tab.1　Acoustic parameters of each layer structural material

参数	声速/ (10^3 m · s^{-1})	密度/ (10^3 kg · m^{-3})	声阻抗/ (10^6 kg · m^{-2} · s^{-1})
铸铁	4.60	7.00	32.200 0
油膜	1.46	0.86	1.255 6
Ni	5.70	8.90	50.730 0
PZT-5H	4.56	7.50	34.200 0

固体域和油域（空气域）的双向自动耦合在油域（空气域）的上、下边界处实现，边界条件为

$$-n\cdot\left[-\frac{1}{\rho c_2}(\nabla p_t - q_d)\right]=-n\cdot u_{tt} \tag{12}$$

$$F_A = p_t n \tag{13}$$

式中：n 为法线方向；p_t 为总声压；q_d 为偶极源；u_{tt} 为结构的加速度；F_A 为作用在结构上每单位面积的力. 边界条件的设定是为了确保求解的准确性与唯一性，因而将活塞环与气缸套左、右端口都设置为低反射边界，气缸套下端口设置为固定约束. 油层（空气层）左、右边界设置为平面波辐射. 对压电晶片下端施加电势，上端接地，达到检测的最佳效果.

网格划分的形式对计算精度和计算规模产生直接影响. 仿真网格设置类型采用用户控制网格，压电晶片、活塞环-气缸套和油膜（空气）的网格划分采用自由三角形网格，实体迭代次数为 4，油膜（空气）层采用常规细化方法，细化两次. 考虑到计算机的计算能力，设置最小单元为 2.06×10^{-4}mm，最大单元为 0.103 mm，最大单元增长率为 1.1，求解自由度数为 309 192，整体和局部网格划分如图 6 所示.

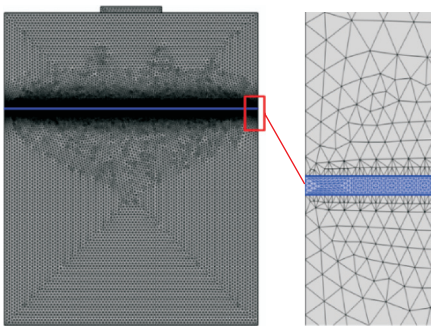


图 6　网格划分

Fig.6　Mesh generation

在物理场求解中，采用基于多线程集群（mumps）的瞬态直接求解器. 笔者将求解器中解的最大频率设为 $f_{max,sol}=f_0$.

时间步长的确定直接影响计算精确度. 在具体研究中，时间步长通过计算表面波经过最大单元格尺寸所用的时间来确定[21]. 仿真采用手动控制时间步长，为使求解过程及时、准确，网格尺寸要求小于最小波长的 1/10[22]，时间步长必须满足稳定性条件，即

$$t\leqslant\frac{\mathrm{CFL}}{10f} \tag{14}$$

式中：f 为激励信号的频率；CFL 为收敛条件判断数，其值为 0.2. 为了达到更高的计算精度，模型激励信号中心频率设为 15、20 和 25 MHz，因而计算时间步长分别为 0.001 3、0.001 0 和 0.000 8 μs.

3.2　仿真结果的分析

图 7 示出预设油膜（空气）厚度为 10 μm、Ni 层厚度为 100 μm 时声场中超声波在仿真模型中不同时刻的声压，计算周期为 0.066 7 μs，计算总时长设置为 5.333 μs，时间间隔为 0.001 333 μs. 图 7(a) ~ 7(c) 中，超声纵波在约 0.651 84 μs 到达涂层-油膜界面，一部分超声纵波通过油膜层透射进入气缸套，一部分超声纵波反射回涂层，在涂层内经过反射与透射最终返回到活塞环. 对比图 7(d) ~ 7(f) 中油膜层和空气层的位移场，可以发现超声纵波遇到油膜界面时出现明显的透射声波位移，在气缸套中可以清晰地看到超声

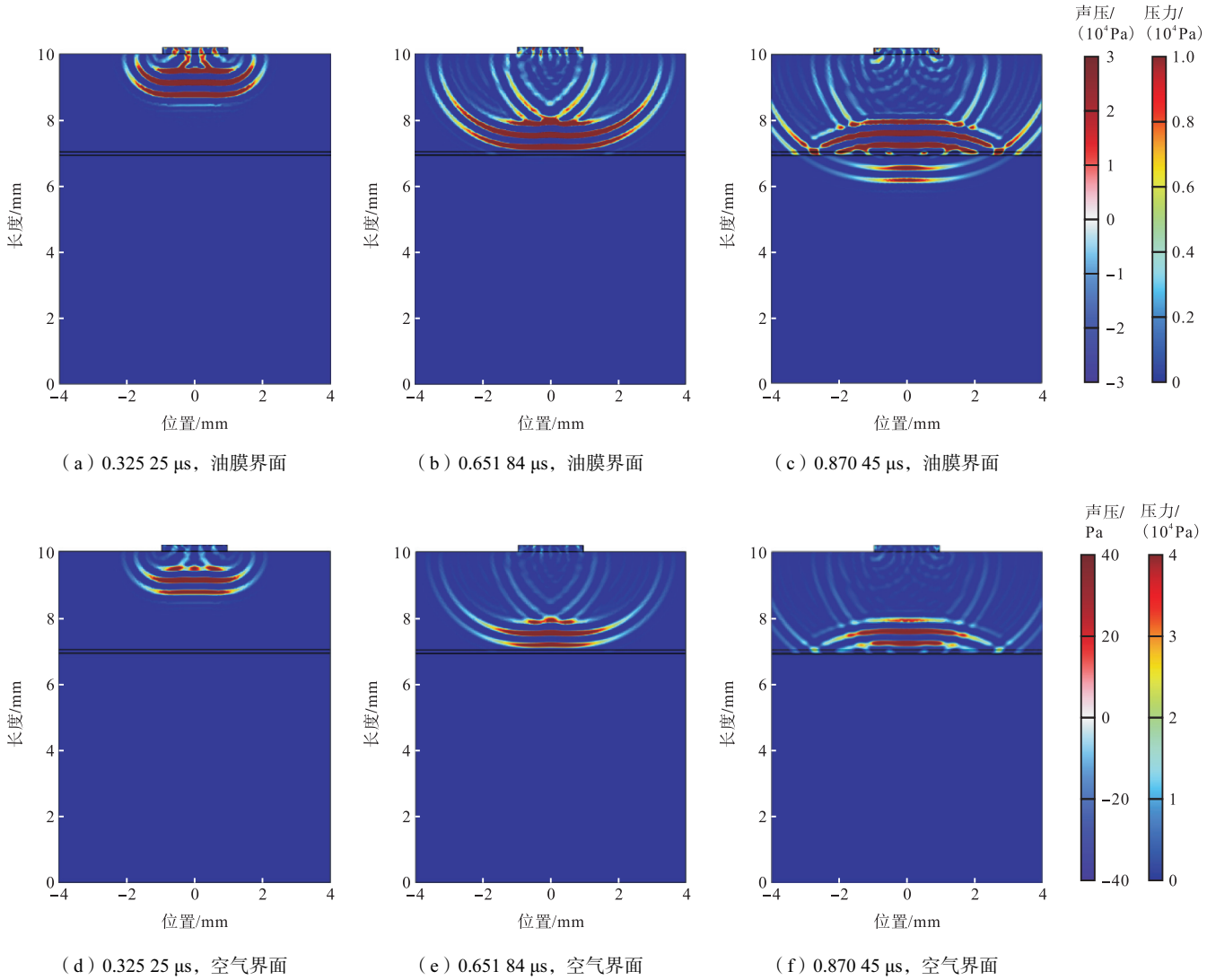


图 7　超声传播不同时刻的声压

Fig.7　Sound pressure at different time of ultrasonic propagation

纵波的存在，而超声纵波在遇到空气界面时几乎全部反射回活塞环，在气缸套中看不到超声纵波的存在，这与理论相符. 产生这种现象是由于空气的声阻抗远远小于 Ni 与铸铁的声阻抗，根据超声波在界面的反射规律，可以得到涂层-空气界面的反射波能量远远大于透射波能量[23].

3.3　油膜厚度测量精度验证

图 8 为超声法检测油膜厚度的测量系统示意，主要由油膜标定试验台、超声波换能器、数字超声探伤仪及计算机组成. 其油膜厚度标定试验台是由涂层钢、钢以及两者之间的油膜组成. 涂层钢以不锈钢为基体，尺寸为 50 mm × 50 mm × 8 mm，采用电镀的方法在基体表面电镀厚度为 50 μm 的镍铁合金涂层，通过调整垫片控制间隙油膜厚度分别为 5、10 和 15 μm. 标定试验台与超声波换能器之间采用水作为耦合介质，以确保换能器与钢的声学阻抗匹配. 超声波换能器采用型号为 V208-RM 的接触式换能器，中心频率为 20 MHz，探头直径为 5 mm. 数字超声探伤仪的型号为 Anyscan-30，工作频率的范围为 0.5 ~ 22.0 MHz.

笔者选定油膜厚度，在涂层钢背侧移动超声波换能器，发射脉冲信号，在不同位置对间隙油膜信息进行检测，共采集 18 个样本点，通过数字超声探伤仪

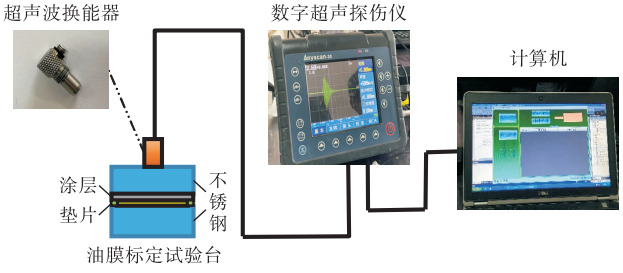


图 8　超声法测量油膜厚度的系统

Fig.8　Ultrasonic measurement system for oil film thickness

及计算机对超声波反射信号进行采集、存储和分析，得到与油膜厚度相关的反射系数，如表 2 所示.

表 3 为不同油膜厚度测量的平均值和相对误差. 可知，不同油膜厚度的测量结果均低于 8%，且随着油膜厚度的增加，相对误差也随之增大. 在油膜厚度为 5.0 μm 时，经过多次超声检测得到的平均油膜厚度为 5.1 μm，相对误差仅约为 2.1%. 试验结果与已有研究[24-25]有较好的一致性. 测量结果误差随油膜厚度的增加而增大，可能是因设备在测量较厚油膜时超声波的反射和衰减效应变得更加复杂，设备敏感度下降，信号幅值衰减及接收信号识别度可能随之降低，从而影响最终的测量结果精度. 综上可知，该 4 层结构模型在处理涂层活塞环-气缸套间油膜厚度时具有较好的准确性.

表 2　不同厚度油膜与反射系数测量结果

Tab.2　Different oil film thickness and reflection coefficient measurement results

样本	反射系数	油膜厚度/mm	反射系数	油膜厚度/mm	反射系数	油膜厚度/mm
	5 μm		10 μm		15 μm	
1	0.674 15	4.713	0.882 83	9.932	0.943 67	15.130
2	0.659 78	4.522	0.838 95	8.118	0.925 96	12.995
3	0.694 16	4.995	0.854 46	8.672	0.951 68	16.448
4	0.699 46	5.074	0.821 99	10.524	0.927 49	13.149
5	0.627 72	4.127	0.891 39	10.399	0.943 77	15.145
6	0.719 91	5.393	0.858 90	8.846	0.901 24	11.005
7	0.700 26	5.086	0.898 55	10.831	0.935 31	14.017
8	0.766 02	6.231	0.848 54	8.452	0.917 98	12.260
9	0.736 12	5.667	0.878 68	9.723	0.887 44	13.477
10	0.713 92	5.297	0.871 05	9.362	0.914 81	12.001
11	0.671 06	4.671	0.875 08	9.549	0.916 41	15.194
12	0.728 09	5.529	0.869 62	9.298	0.937 48	14.285
13	0.707 93	5.203	0.831 63	10.663	0.919 51	12.392
14	0.722 42	5.434	0.848 42	8.447	0.909 06	15.352
15	0.723 94	5.459	0.858 16	8.817	0.912 84	14.207
16	0.666 75	4.613	0.864 95	9.095	0.923 85	12.789
17	0.662 28	4.555	0.882 09	9.894	0.945 05	15.337
18	0.709 83	5.232	0.842 47	8.237	0.942 37	14.941

表 3　不同油膜厚度的测量值

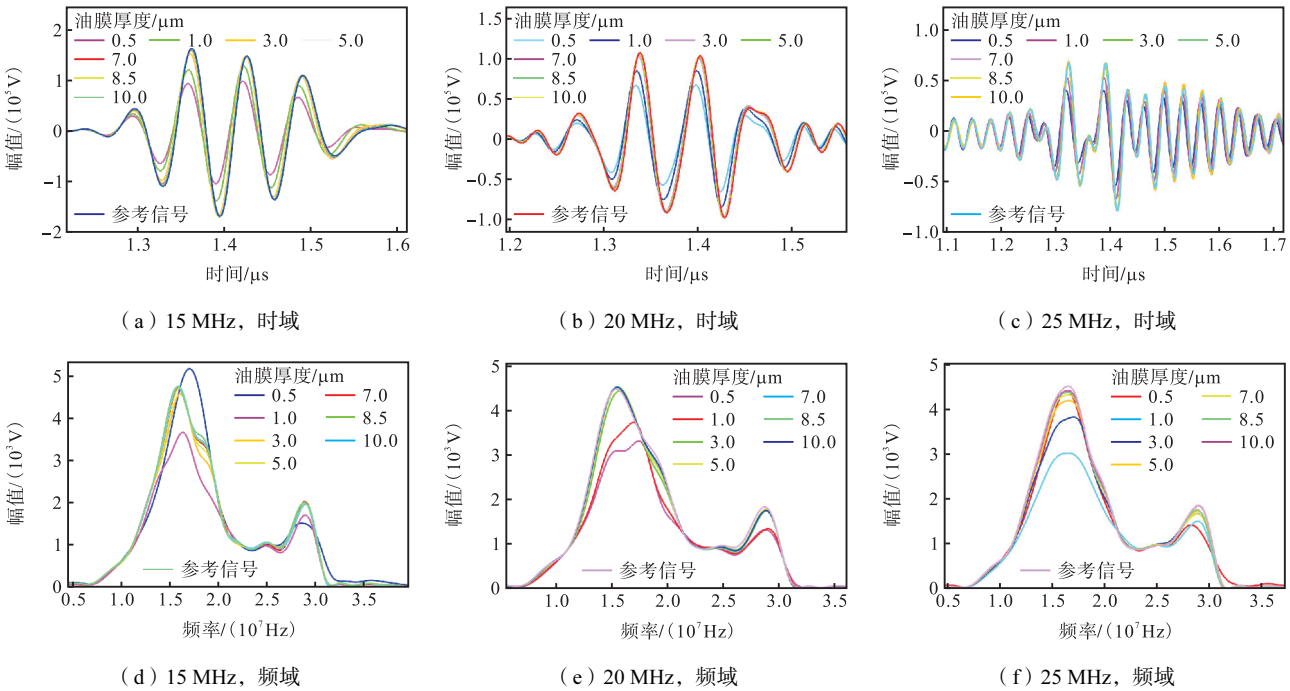
Tab.3　Measurement values of different oil films thicknesses

样本厚度/μm	平均油膜厚度/μm	相对误差/%
5.0	5.100	2.009
10.0	9.382	6.183
15.0	13.896	7.358

3.4　油膜厚度测量的影响因素

对仿真获取的油膜层（空气层）反射波进行快速傅里叶变换（FFT），得到中心频率分别为 15、20 和 25 MHz 时不同油膜厚度和参考信号的时域与频域，如图 9 所示. 将频谱振幅幅值代入到油膜厚度超声测量模型中计算油膜厚度，分析了预设油膜厚度和激励中心频率对油膜厚度模拟检测结果的影响.

图 10 为不同预设油膜厚度和中心频率对油膜厚度模拟检测结果的影响. 图 10（a）中，当中心频率为 20 MHz 和 25 MHz 时，仿真数据与预设油膜厚度具有较高的一致性；当中心频率为 15 MHz 时，随着油



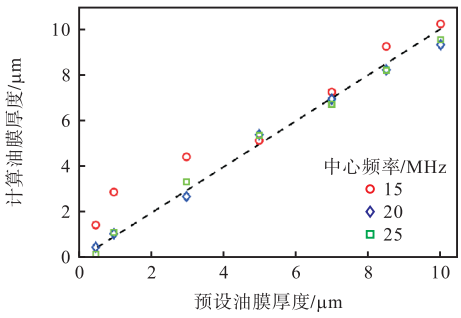
（a）15 MHz，时域　（b）20 MHz，时域　（c）25 MHz，时域

（d）15 MHz，频域　（e）20 MHz，频域　（f）25 MHz，频域

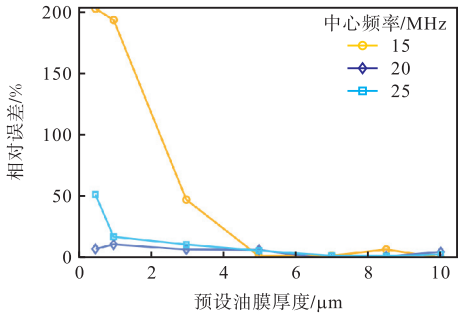
图 9　不同油膜厚度和参考信号的时域与频域

Fig.9　Time-domain and frequency-domain with different oil film thickness and reference signal

膜厚度的增大，由 4 层结构模型计算得到的结果与预设值之间的偏差先增大后减小，且偏差出现在油膜厚度为 1 ~ 3 μm 范围内. 这可能是由于模型本身的误差，还可能是由反射系数误差引起的. 图 10(b)为预设油膜厚度和中心频率对油膜厚度模拟检测结果的相对误差影响. 当中心频率为 15 MHz 和 25 MHz 时，随着油膜厚度的增加，油膜厚度计算的相对误差整体呈先下降后趋于稳定的趋势，且相对误差整体稳定为 2.15% 左右；当中心频率为 20 MHz 时，随着油膜厚度的增加，油膜厚度计算的相对误差整体呈先上升后下降的趋势，相对误差整体稳定为 3.79% 左右. 同一油膜厚度下，随着中心频率的增加，变化趋势各有不同. 当中心频率为 15 MHz 时，预设油膜厚度在 0.5 ~ 3.0 μm 区间相对误差较高，主要原因可能是中心频率越小，透射声波能量越小，通过较薄介质时分辨力不足；当中心频率为 20 MHz 时，对于不同厚度的油膜，其计算相对误差均低于 12.80%；当中心频率为 25 MHz 时，对较薄润滑油膜厚度测量相对误差较大，可能是由于油膜层位于声场近场区域，声场情况较为复杂，随着中心频率的增加，激励声源附近会产生干涉波影响声波的接收，影响了超声纵波的传播.



（a）预设油膜厚度对计算油膜厚度的影响

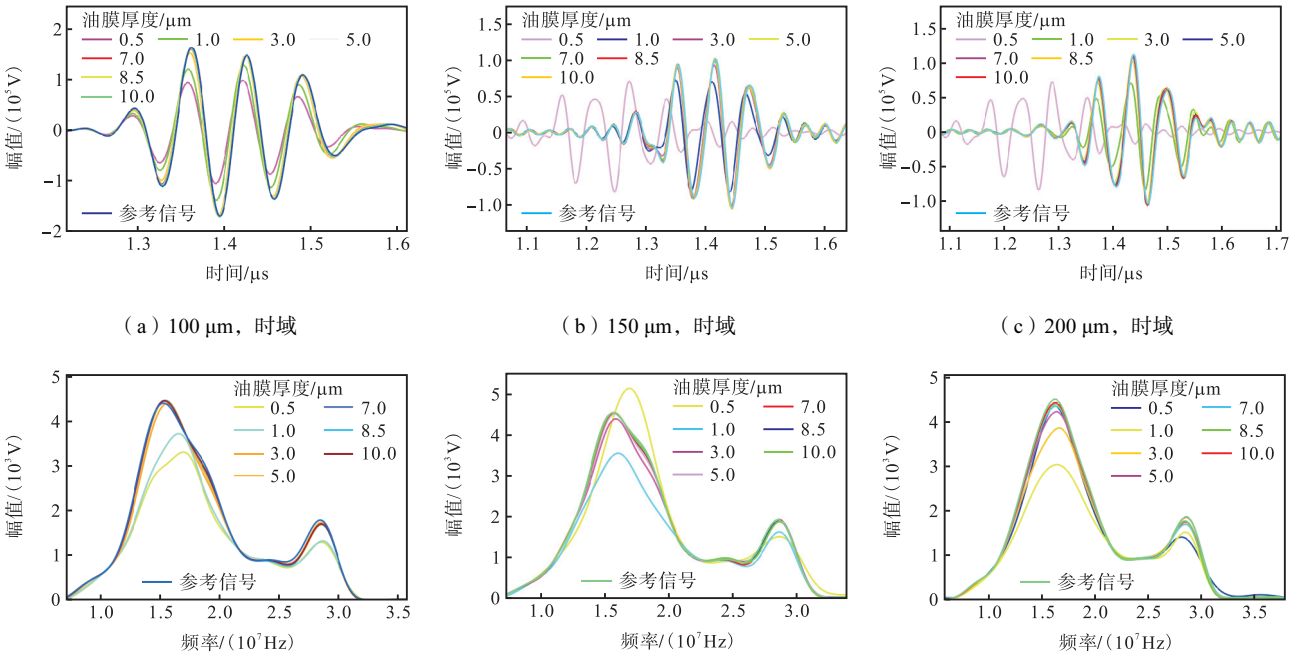


（b）相对误差

图 10　预设油膜厚度和中心频率对油膜厚度模拟检测结果的影响

Fig.10　Effect of preset oil film thickness and center frequency on simulation results of oil film thickness

根据中心频率对油膜厚度模拟检测结果的影响，在中心频率为 20 MHz 时研究涂层厚度对润滑油膜测量结果的影响. 将声场仿真中获取的油膜层(空气层)反射波进行快速傅里叶变换，图 11 示出涂层厚度分别为 100、150 和 200 μm 时不同油膜厚度和参考信号的时域与频域，将频谱振幅幅值代入到油膜厚度超声测量模型中计算油膜厚度.



（a）100 μm，时域　（b）150 μm，时域　（c）200 μm，时域

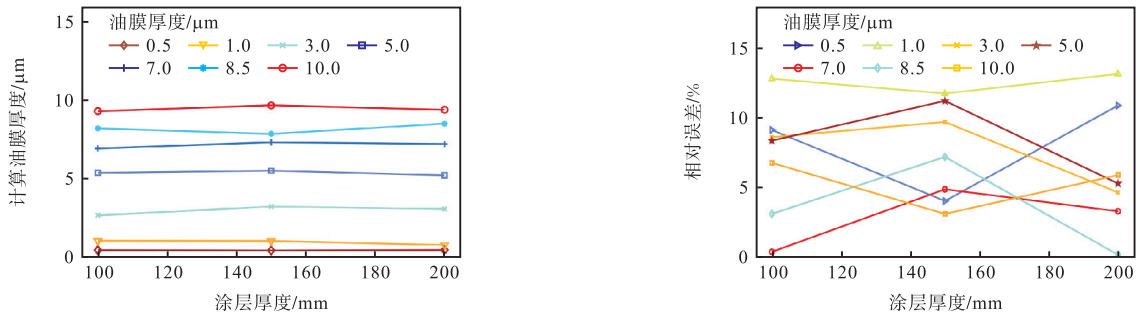
（d）100 μm，频域　（e）150 μm，频域　（f）200 μm，频域

图 11　不同涂层厚度时油膜厚度和参考信号的时域与频域

Fig.11　Time-domain and frequency-domain of oil film thickness and reference signal with different coating thicknesses

图 12 为不同涂层厚度对油膜厚度模拟检测结果的影响. 图 13 为不同激励宽度对油膜厚度模拟检测结果的影响. 由图 12(a)可知，涂层厚度对油膜厚度检测结果影响较小. 随着预设油膜厚度的增加，油膜厚度检测结果均在预设值附近波动. 图 12(b)中，随着预设油膜厚度的增加，不同涂层厚度的计算相对误差均呈先上升后下降、最后趋于平缓的趋势，相对误差整体稳定为 8.42% 左右，一方面，是由于模型本身的误差；另一方面，由于油膜厚度过薄，透射声波在通过较薄介质时，对介质的分辨力不足. 随着涂层厚度的增加，油膜厚度计算相对误差均低于 13.14%，整体趋势没有一定规律性.

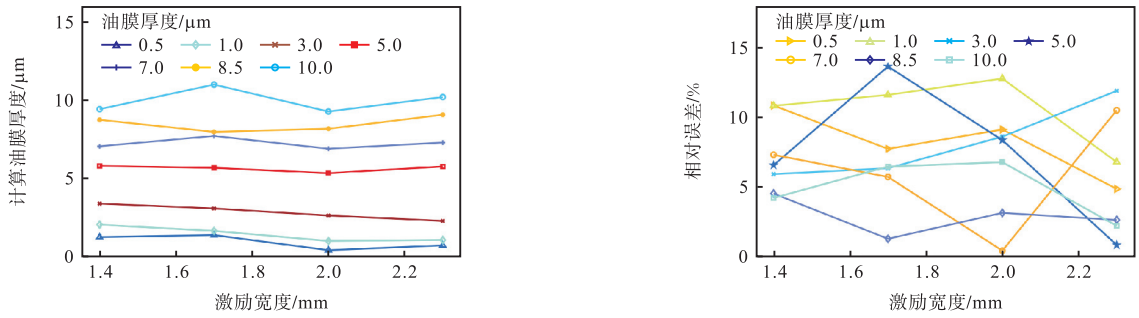
图 13(a)中，随着激励宽度的增加，由仿真计算得到的结果整体波动较小. 图 13(b)中，随着激励宽度的增加，相对误差变动范围为 0.54% ~ 12.81%，说明激励宽度对计算油膜厚度有一定影响，在针对不同工



（a）涂层厚度对计算油膜厚度的影响　　（b）相对误差

图 12　涂层厚度对油膜厚度模拟检测结果的影响

Fig.12　Effect of coating thickness on simulation results of oil film thickness



（a）激励宽度对计算油膜厚度的影响　　（b）相对误差

图 13　激励宽度对油膜厚度模拟检测结果的影响

Fig.13　Effect of excitation width on simulation results of oil film thickness

况油膜厚度进行检测时，应该选取恰当的激励宽度.

4　结　论

(1) 对涂层活塞环声波叠加信号进行分析，提出了一种数学模型，实现 4 层结构中润滑油膜厚度提取，对比仿真模拟数据与预设油膜厚度可知，计算模型准确性较高，并通过试验验证了油膜仿真模型的正确性.

(2) 建立了活塞环-气缸套超声传播有限元模型，对超声传播过程进行了分析，利用可视化方法展示了平面波反射和透射的位移场分布.

(3) 对 0.5 ~ 10.0 μm 的油膜厚度进行仿真计算，分析了超声探头参数、涂层厚度和预设膜厚对模拟检测结果的影响，激励中心频率越大，越易测量薄层油膜，但当激励中心频率过大，计算相对误差增大；涂层厚度和激励宽度几乎不影响油膜厚度的检测结果.

参考文献：

[1] 白敏丽，丁铁新，董卫军. 活塞环-气缸套润滑摩擦研究[J]. 内燃机学报，2005，23(1)：72-76.

[2] 唐伟坤，马希直. 利用反射系数测量油膜厚度的研究[J]. 润滑与密封，2010，35(12)：44-47.

[3] 贵忠东. 推力轴承油膜厚度测量方法概述[J]. 机电设备，2005(5)：10-12.

[4] 何旭，刘聪，李彦凯，等. 基于折射率匹配法 GDI 发动机附壁油膜特性[J]. 内燃机学报，2021，39(3)：233-240.

[5] 白清华，郭峰，姜培刚，等. 基于双色光干涉的面接

触润滑油膜在线测量[J]. 摩擦学学报，2017，37(3)：283-289.

[6] Ouyang W，Zhou Z J，Jin Y，et al. Ultrasonic measurement of lubricant film thickness distribution of journal bearing[J]. The Review of Scientific Instruments，2020，91(6)：065111.

[7] Yao D，Zhang Q F，Tian Q Y，et al. Ultrasonic measurement of the thin oil-slick thickness based on the compressed sensing method[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences，2023，106(7)：998-1001.

[8] 陈继明，马希直，李响. 轴承润滑油膜厚度测量理论及仿真研究[J]. 机械制造与自动化，2020，49(1)：68-70.

[9] 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.

[10] He Y B，Wang J Y，Gu L，et al. Ultrasonic measurement for lubricant film thickness with consideration to the effect of the solid materials[J]. Applied Acoustics，2023，211：109563.

[11] 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.

[12] Jia Y P，Wu T H，Dou P，et al. Temperature compensation strategy for ultrasonic-based measurement of oil film thickness[J]. Wear，2021，476：203640.

[13] 付鑫，张云，梁光顺，等. 基于超声法测量曲轴油膜厚度的装置：中国，CN217687127U[P]. 2022-10-28.

[14] 杨晓，马希直，王卫英. 油膜厚度超声测量电路及实验[J]. 机械制造与自动化，2015，44(3)：158-160，164.

[15] Mills R S，Avan E Y，Dwyer-Joyce R S. Piezoelectric sensors to monitor lubricant film thickness at piston-cylinder contacts in a fired engine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology，2013，227(2)：100-111.

[16] Wang X G，Wang J X，Shen G L，et al. Research on interface bonding characteristics of layered medium using ultrasonic oblique incidence[J]. Composite Structures，2022，295：115733.

[17] 石勇，齐松博，赵建辉，等. 超声波测量气缸油膜厚度方法的标定技术[J]. 内燃机学报，2018，36(6)：546-552.

[18] Honston B. Bulk heterogeneous plane-wave propagation through viscoelastic plates and stratified media with large values of frequency-domain[J]. Ultrasonics，1991，29(6)：445-450.

[19] 李响，马希直，张步高. 油膜厚度超声测量声反射系数理论及数值计算[J]. 润滑与密封，2018，43(9)：13-18，27.

[20] Simpson W A. Time-frequency-domain formulation of ultrasonic frequency analysis[J]. Metals and Ceramics Division，1974，56(6)：1776-1781.

[21] Cawley D A A P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. Journal of the Acoustical Society of America，1991，89(3)：1159-1163.

[22] Li P X，Wang X G，Li X G，et al. Evaluating interfacial bonding quality of multilayered structure based on ultrasonic testing technology[J]. Measurement Science and Technology，2023，34(9)：095117.

[23] 王兴国，刘红伟，李晓高，等. 双层黏接界面特性的空气耦合超声导波检测[J]. 振动、测试与诊断，2022，42(1)：16-22，191.

[24] 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.

[25] 钟冲，刘振侠，胡剑平，等. 轴承腔壁面油膜厚度超声测量实验研究[J]. 推进技术，2014，35(8)：1110-1115.