

机械结构流体层厚度超声测量方法理论研究

焦敬品, 张强, 吴斌, 何存富

(北京工业大学机电学院, 北京 100124)

摘要: 针对机械设备运行状态监控需要, 对机械结构流体层厚度超声测量方法进行了理论研究。根据流体层厚度超声测量的实际情况, 建立了超声波在三层介质中传播的理论模型, 并由边界连续条件, 得到流体层超声波反射系数的连续模型。通过对不同厚度流体层反射系数曲线的理论分析, 得到流体层厚度超声反射系数测量的谐振模型和弹簧模型, 即通过流体层的谐振频率和刚度系数来表征其厚度。同时, 研究了三层介质的声学特性对流体层超声反射系数及厚度测量的影响。

关键词: 超声波; 厚度测量; 反射系数; 谐振模型; 弹簧模型

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-03-0240-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.03.009

Theoretical research on thickness measurement of fluid layer in mechanical structure by using ultrasonic technique

JIAO Jing-pin, ZHANG Qiang, WU Bin, HE Cun-fu

(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: For the necessity of monitoring mechanical structure operation, the thickness measurement of thin fluid layer in mechanical structure by using ultrasonic technique is theoretically studied. A model of three layers of media is constructed to simulate the propagation of normal incidence ultrasound. Considered the continuous boundary conditions, the reflection coefficient of thin fluid layer to normal incidence longitudinal waves is obtained from the continuous model. By study the reflection coefficients of different thicknesses of fluid layers, two models, resonant model and spring model, are developed to characterize the thickness of fluid layer respectively by the resonant frequency and stiffness coefficient. Meanwhile, the influence of acoustic properties of three layers on the reflection coefficient and the measurement of thickness is studied.

Key words: ultrasonic; thickness measurement; reflection coefficient; resonant model; spring mode

1 引言

在现代工业中, 为减少机械设备关键零部件(如机械密封、轴承、导轨等)因接触摩擦而产生损耗, 通常在相对运动的零部件间引入薄流体层结构(微米级厚的液体或气体薄层), 起到润滑和减少摩擦损耗的作用。研究发现, 该流体层结构是机械设备的薄弱环节, 它的失效是造成机械设备故障的重要因素之一^[1]。因此, 为保证机械设备的正常运行, 需要对该流体层运行状态进行监测。

流体层厚度是表征流体层运行状态的最直接参量。常用的厚度测量方法有电涡流法、电容法、

激光法等^[2-4]。但将这些方法应用于机械结构流体层厚度测量还有很大的局限性, 如测量精度低、对待检测结构要求高、受检测环境影响大等^[5]。作为常规无损检测技术之一, 超声波技术是一种重要的厚度测量方法。例如, 基于介质中超声波传播时间和传播速度, 常规超声反射回波技术可以实现较大尺寸厚度的测量。此外, 在多层介质中超声波传播特性研究基础上, 国外学者在厚度较小的机械结构流体层的超声测量方法方面已开展了大量研究^[6-8]。Pialucha 利用垂直入射超声波反射系数对两无限大介质间的嵌入薄层超声检测和识别方法进行了理论研究, 重点研究了三种介质声学参数对谐振频率和半谐振频率处薄层反射系数的影响^[9]。Dwyer-Joyer 对超声波反射测量技术在干摩擦和润滑摩擦接触界面测量方面的应用进行了综述^[11]。Anderson 利用超声反射和透射方法对机械密封端面接触状况进行了检测试验研究^[5]。Jie Zhang 将超声反射技术应用于轴承润滑油膜厚度测量^[10]。在国内, 王和

收稿日期: 2008-05-26; 修回日期: 2008-08-26

基金资助: 国家自然科学基金(10772008), 北京市科技新星计划资助项目(2007B012), 北京市教委资助项目

作者简介: 焦敬品(1973-), 女, 副教授, 研究方向为声-超声无损检测新技术。

通讯作者: 张强, E-mail: qianghd@emails.bjut.edu.cn

顺对机械密封超声测量研究现状进行了综述, 指出超声波技术在机械密封端面测量中的应用前景^[11-12]。

本文主要进行机械结构流体层厚度超声测量方法的理论研究。寻找能够表征流体层厚度的声学特征参数, 为机械结构流体层厚度超声测量试验奠定理论基础。

2 流体层界面处超声波传播特性理论

2.1 连续模型

超声波垂直入射到两种介质的界面时会同时发生反射和透射, 一部分能量透过界面, 另一部分能量被反射回去。根据流体层厚度远小于构件厚度的特点, 建立如图 1 所示超声波在三层介质中传播的简化模型。

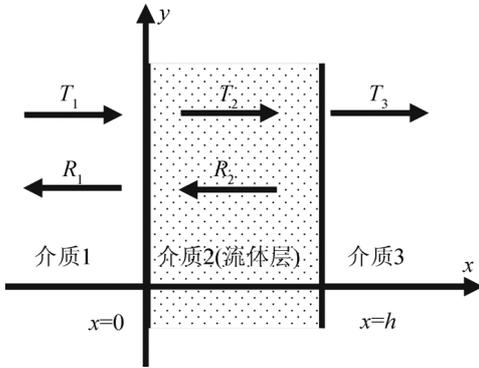


图 1 垂直入射超声波在三层介质中传播模型
Fig.1 Propagation model of normal incidence from three-layer medium

图 1 中介质 1 和介质 3 为空间半无限大体, 流体层厚度为 h 。下面考虑超声波由介质 1 垂直入射情况。其中 T_1 和 R_1 为介质 1 中入射波和反射波幅值, T_2 和 R_2 为介质 2 中入射波和反射波幅值, T_3 为介质 3 中入射波幅值。沿 x 方向入射的纵波可表示为:

$$u(x,t) = Ie^{i(k_1x - \omega t)} \quad (1)$$

其中 u 为 x 轴方向上的位移, I 为纵波幅值, ω 为角频率, k_1 为纵波波数, 且 $k_1 = \omega/c_1$, c_1 为纵波波速。为简便起见, 可以将超声波应力场和位移场中的时间传播项省略。因此, 介质 1 中超声波的位移场和应力场可以表示为:

$$u_1(x) = T_1 e^{i\omega x/c_1} + R_1 e^{-i\omega x/c_1} \quad (2)$$

$$\sigma_1(x) = i\omega z_1 (T_1 e^{i\omega x/c_1} - R_1 e^{-i\omega x/c_1}) \quad (3)$$

其中 z_1 是介质 1 的声阻抗。同理, 得到介质 2、3 中(流体层)超声波应力场和位移场表达式为:

$$u_2(x) = T_2 e^{i\omega x/c_2} + R_2 e^{-i\omega x/c_2} \quad (4)$$

$$\sigma_2(x) = i\omega z_2 (T_2 e^{i\omega x/c_2} - R_2 e^{-i\omega x/c_2}) \quad (5)$$

$$u_3(x) = T_3 e^{i\omega x/c_3} \quad (6)$$

$$\sigma_3 = i\omega z_3 T_3 e^{i\omega x/c_3} \quad (7)$$

其中 z_2 是介质 2 的声阻抗, z_3 是介质 3 的声阻抗。根据超声波应力场和位移场的连续条件, 得两种介质界面处超声波的位移和应力连续边界条件为:

$$u_1|_{x=0} = u_2|_{x=0} \quad u_2|_{x=h} = u_3|_{x=h} \quad (8)$$

$$\sigma_1|_{x=0} = \sigma_2|_{x=0} \quad \sigma_2|_{x=h} = \sigma_3|_{x=h} \quad (9)$$

假设入射波强度 $T_1=1$, 由式(8)、(9)可得

$$R_1 = \frac{z_b z_c j_p + z_d z_a g_p}{z_a z_b j_p + z_c z_d g_p} \quad (10)$$

其中 $z_a = z_1 + z_2$, $z_b = z_2 + z_3$, $z_c = z_1 - z_2$, $z_d = z_2 - z_3$, $j_p = \exp^{-1}(i2\pi fh/\alpha_2)$, $g_p = \exp(i2\pi fh/\alpha_2)$ 。由于反射系数等于反射波强度与入射波强度的比值, 因此流体层超声波反射系数 R 在数值上等于反射波幅值 R_1 。下面以石墨-水-石墨三层介质为例, 研究垂直入射纵波下中间流体层超声反射系数特性。表 1 给出了三种介质的声学特性参数。按照公式(10), 可以计算出垂直纵波入射下石墨-水-石墨三层介质中水层的超声反射系数。图 2 给出了在 110MHz 范围内, 不同厚度水层的超声反射系数。

表 1 常见介质声学特性参数
Table 1 Sound characteristic parameters of common media

材料	密度/ (10^3kg/m^3)	纵波速度/ (10^3m/s)	声阻抗/ ($10^6 \text{kg/m}^2 \text{s}$)
石墨	2.16	3.08	6.65
水	1.00	1.48	1.48
不锈钢(0Cr18Ni9)	7.91	5.79	45.80
润滑油	0.876	1.46	1.27
氧化铝	1.17	10.4	12.17

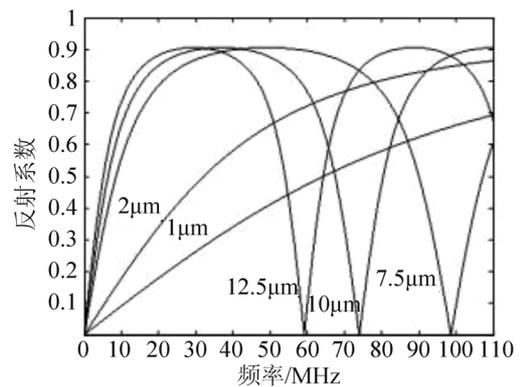


图 2 石墨-水-石墨三层介质中不同厚度水层下垂直入射纵波的反射系数曲线
Fig.2 Normal incidence longitudinal reflection coefficients from the carbon-water-carbon medium with different thicknesses of water layer

从图 2 中可以看出, 不同厚度水层下超声反射系数有很大的不同。在 110MHz 频率范围内, 厚度为 $7.5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 和 $12.5\mu\text{m}$ 水层的反射系数均出现极小值。由谐振频率定义^[6,7]:

$$f_{res} = \frac{cm}{2h} \tag{11}$$

其中， c 为中间层中超声波波速， m 为谐振阶数， h 为中间层厚度。因此，中间层厚度可以利用其反射系数的谐振频率来表征。当中间水层厚度为 $1\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 时，其一阶谐振频率大于 110MHz 。因此，图 2 中这两种厚度水层的反射系数曲线未出现谐振频率点，无法用谐振频率表征其厚度。在分析的频率范围内，两种厚度水层的反射系数随频率增加呈单调增加趋势；同时，在同一频率处，反射系数随厚度增加呈单调增加趋势。因此，可以用同一频率下反射系数的变化来表征其厚度。根据以上不同厚度超声反射系数分布的对比分析，得到中间流体层厚度测量的谐振模型和弹簧模型。

2.2 谐振模型

根据流体层反射系数中谐振频率的定义式(11)，得到中间流体层厚度测量的谐振模型表达式：

$$h = \frac{cm}{2f_{res}} \tag{12}$$

即通过测量中间流体层超声反射系数的谐振频率，可以计算出中间流体层厚度。图 3 给出了石墨-水-石墨三层介质中，中间层厚度分别为 $7.5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $12.5\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 和 $17.5\mu\text{m}$ 时反射系数谐振频率的变化。显然，在分析频率范围内，可以利用反射系数的谐振频率进行中间流体层厚度测量。

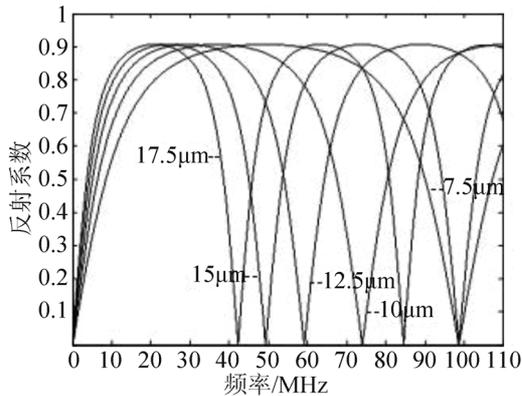


图 3 石墨-水-石墨三层介质中不同厚度水层下反射系数谐振频率变化比较

Fig.3 Variation of reflection coefficient with resonant frequency for the carbon-water-carbon medium with different thicknesses of water layer

2.3 弹簧模型

当中间流体层厚度远小于超声波的波长时，其一阶谐振频率将会超出所研究的频率范围。由于中间流体层很薄，同时考虑到相邻介质边界处的位移和应力连续条件，可以将中间流体层(介质 2)简化为弹簧层^[6-7]，如图 4 所示。

根据弹簧刚度系数的定义，可得 $x=0$ 处应力 σ

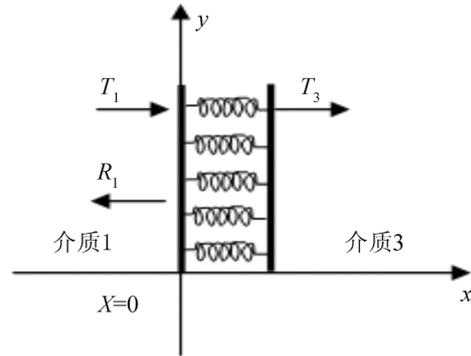


图 4 弹簧模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of spring model

表示为：

$$\sigma = K(T_3 - R_1 - 1) \tag{13}$$

此时，应力连续边界条件可表示为：

$$\sigma_1|_{x=0} = \sigma_3|_{x=0} = \sigma|_{x=0} \tag{14}$$

由式(14)和式(8)边界条件，可求得弹簧模型下，流体层反射系数表达式为：

$$R = R_1 = \frac{z_1 - z_3 + i2\pi f(z_1 z_3 / K)}{z_1 + z_3 + i2\pi f(z_1 z_3 / K)} \tag{15}$$

弹簧刚度可表示为：

$$K = \frac{\rho c^2}{h} \tag{16}$$

其中 ρ 是中间层的密度。从式(15)和式(16)可知，在流体层厚度较小情况下，可以通过反射系数中的刚度系数获得流体层厚度信息。

以石墨-水-石墨三层介质为例。图 5 给出了中间水层厚度较小时，纵波垂直入射下不同厚度中间层反射系数曲线变化规律。可以看出，同一频率下，随着中间层厚度的变化反射系数有明显的变化。根据式(15)，得到中间层刚度系数曲线，如图 6 所示。从图中可以看出，在一定频率范围内，中间层刚度系数基本保持不变，因此可以用中间层刚度系数来表征其厚度变化。

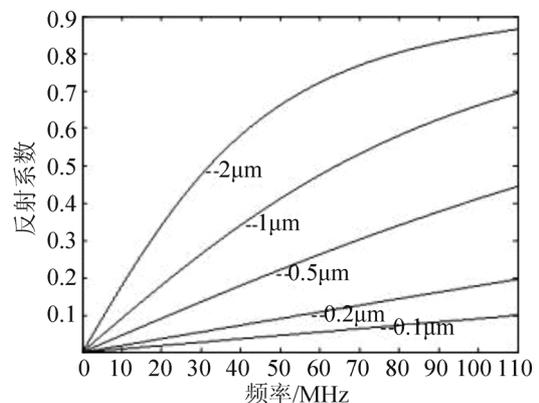


图 5 石墨-水-石墨三层介质中不同厚度层反射系数比较

Fig.5 Variation of reflection coefficient with resonant frequency for the carbon-water-carbon medium with different thicknesses of water layer

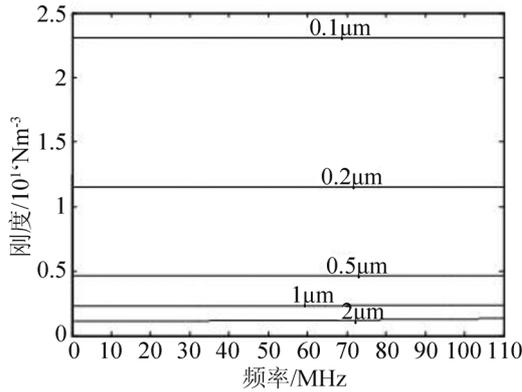


图 6 石墨-水-石墨三层介质中不同厚度水层下刚度系数对比
Fig.6 Stiffness of the carbon-water-carbon medium with different thicknesses of water layer

3 三层介质中超声波反射系数影响因素分析

以上进行中间流体层厚度测量时, 需要依据其超声反射系数进行。而由超声反射系数表达式(10)可知, 流体层超声反射系数与流体层厚度以及三种介质的声学特性参数有关。下面研究这些参数对流体层反射系数以及厚度测量的影响。

3.1 流体层厚度的影响

仍以石墨-水-石墨三层介质中超声反射系数为例(图 2 所示), 研究流体层厚度对超声反射系数的影响。从图 2 可以看出, 随着中间水层厚度的减小, 其谐振频率将增大。例如, 当水层厚度为 10 μm 时, 谐振频率为 74MHz, 此时反射系数为极小值, 在半谐振频率处(37MHz), 反射系数出现极大值。当水层厚度为 2 μm 时, 其谐振频率大于 110MHz, 在图上无法显示其谐振频率。与 2 μm 水层相比, 同一频率下 1 μm 水层厚度的超声反射系数明显减小。

3.2 流体层声学特性的影响

中间流体层声学特性对其反射系数有很大的影响。图 7 给出了石墨-氧化铝-石墨三层介质中不同厚度氧化铝下的反射系数对比图。与图 5 石墨-水-石墨三层介质反射系数相比, 其反射系数对厚度变化的灵敏度显著降低。以中间层厚度分别为 0.1 μm 和 2 μm 时的反射系数为例, 进行对比分析。当中间层介质为水时, 两种厚度层在 110MHz 处反射系数之差约为 0.8; 当中间层介质为氧化铝时, 两种厚度层在 110MHz 处反射系数之差约为 0.035。在相同厚度变化条件下, 反射系数变化越大, 超声厚度测量的灵敏度就越高, 也就可实现更小厚度流体层的测量。因此, 中间流体层的声学特性参数对其厚度测量的灵敏度和范围有很大的影响。同时表明,

在超声厚度测量试验前, 有必要对多层介质中超声反射系数进行必要的理论分析, 以预测该测量方法是否适用于该种介质厚度的测量以及可能的灵敏度及测量范围。

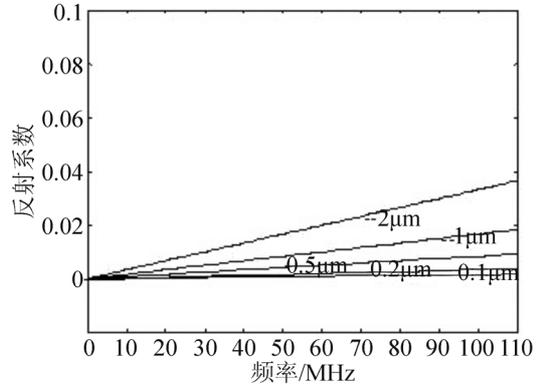


图 7 石墨-氧化铝-石墨三层介质中不同厚度中间层反射系数比较
Fig.7 Variation of reflection coefficient with resonant frequency for the carbon-aluminium oxide-carbon medium with different thicknesses of water layer

3.3 流体层两侧介质声学特性的影响

在中间流体层厚度和声学参数不变的情况下, 研究两侧介质声学特性参数对流体层反射系数的影响。以水作为中间层, 其厚度保持 10 μm 不变。图 8 给出了两侧介质分别为石墨-石墨、石墨-不锈钢和润滑油-石墨情况下, 水层的反射系数曲线。

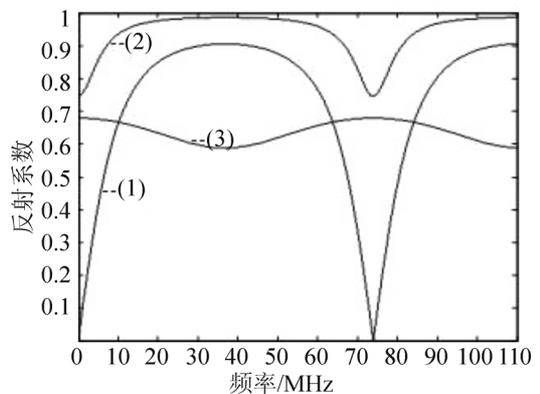


图 8 两侧介质声学参数对中间水层(10 微米厚度)反射系数影响
Fig.8 Effect of two side media on the reflection coefficient of the middle water layer (10 μm)

由于中间层介质和厚度相同, 因此三种情况下的谐振频率均为 74MHz, 半谐振频率为 37MHz。但两侧介质分别为石墨-石墨和石墨-不锈钢情况下, 谐振频率处的反射系数为极小值, 半谐振频率处的反射系数为极大值; 而两侧介质为润滑油-石墨情况下, 谐振频率处的反射系数为极大值, 半谐振频率处的反射系数为极小值。此外, 对两侧介质为石墨-石墨和石墨-不锈钢下反射系数比较还可以发现, 两侧介质声学参数对谐振频率处的反射系数的数值大小也有很大的影响。前者谐振频率处的反射

系数为 0, 后者谐振频率处反射系数约为 0.78。因此, 两侧介质的声学参数对中间流体层反射系数有着很大的影响, 特别是对谐振频率和半谐振频率处反射系数的影响尤为突出。

3.4 三种介质声学参数关系的影响

以上分析表明, 三种介质声学参数对中间层反射系数均有很大影响。下面从实用角度出发, 研究三种介质声学特性参数在几种特定情况下, 中间层反射系数特点。为简单起见, 以不锈钢和石墨为两侧介质, 中间层厚度保持 $10\mu\text{m}$ 不变, 研究中间层介质声学参数变化对反射系数的影响。图 9 给出了三层介质分别为不锈钢-水-石墨、不锈钢-石墨-石墨和不锈钢-氧化铝-石墨情况下, 垂直入射纵波在中间层的反射系数。其中, 三种介质的声学特性满足以下三种情况。

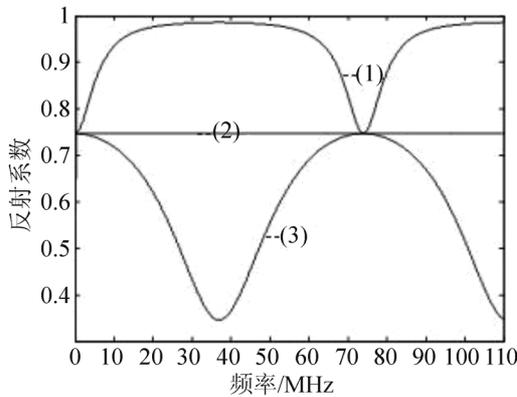


图 9 不同声学特性参数下中间流体层(10 微米厚度)反射系数对比
Fig.9 Reflection coefficients of the middle fluid layer ($10\mu\text{m}$) for different three layer media

(1) $z_2 < z_3 < z_1$, 当中间层介质声阻抗小于两侧介质的声阻抗时, 谐振频率处的反射系数小于半谐振频率处的反射系数。图 9 中曲线 1, 即三层介质为不锈钢-水-石墨情况符合该关系。此时, 谐振频率处的反射系数为极小值, 半谐振频率处的反射系数为极大值。

(2) $z_2 = z_3 < z_1$, 当中间介质的声阻抗等于介质 3 的声阻抗时, 三层介质结构就简化成两层介质。此时反射系数表达式(10)可简化为: $R = \frac{z_1 - z_3}{z_1 + z_3}$ 。因此, 反射系数为与频率无关的常数。图 9 中曲线 2, 即三层介质为不锈钢-石墨-石墨情况符合该关系。

(3) $z_3 < z_2 < z_1$, 且 $z_2^2 < z_1 z_3$, 当中间层介质的声阻抗介于两侧介质声阻抗之间, 且满足 $z_2^2 < z_1 z_3$ 时, 谐振频率处的反射系数大于半谐振频率处的反射系数。图 9 中曲线 3, 即三层介质为不锈钢-氧化铝-石墨的情况符合该关系。此时, 谐振频率处的反射系数为极大值, 半谐振频率处的反射系数为极小值。

4 结 论

针对机械结构流体层测量问题, 建立了三层介质中超声波传播模型, 根据边界条件, 得到中间流体层反射系数的连续模型表达式。通过对不同厚度反射系数理论分析, 发展了流体层厚度测量的弹簧模型和谐振模型。当流体层厚度较小情况下, 可以利用弹簧刚度系数表征其厚度; 当流体层厚度较大时, 可利用反射系数的谐振频率表征其厚度。同时, 研究了三种介质声学参数和中间流体层厚度对反射系数以及厚度测量的影响。本文工作可为后续机械结构流体层厚度测量试验起到很好的指导作用。

参 考 文 献

- [1] R. S. Dwyer-Joyce. The application of ultrasonic NDT technique in tribology[J]. Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology, 2005, **219**(J5): 347-366.
- [2] 顾永泉, 马久波. 机械密封端面流体膜厚的测试技术[J]. 流体机械, 1985, **13**(4): 14-17.
GU Yongquan, MA Jiubo. Measurement of fluid layer thickness between mechanical seal face[J]. Fluid Machinery, 1985, **13**(4): 14-17.
- [3] 陈铭, 张秋翔, 蔡纪宁, 等. 气体端面密封试验设备[J]. 流体机械, 2005, **33**(2): 14-16.
CHEN Ming, ZHANG Qiuxiang, CAI Jining, et al. Experimental equipment of dry gas seal[J]. Fluid Machinery, 2005, **33**(2): 14-16.
- [4] Laaziz Y. Optical characterization of low optical thickness thin films from transmittance and back reflectance measurements[J]. Thin Solid Film, 2000, **372**(1-2): 149-155.
- [5] Anderson W. B. Development of condition monitoring system for mechanical seals[D]. Ph. D. Dissertation Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2001.
- [6] Drinkwater B. W, Dwyer-Joyce R. S, Cawley P. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface[J]. Proc. R. Soc. Lond. A, 1996, **452**(1995): 2613-2628.
- [7] Tattersall H. G. The ultrasonic pulse-echo technique as applied to adhesion testing[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1973, **6**: 819-832.
- [8] Reddyoff T, Dwyer-Joyce R. S, Harper P. A new approach for the measurement of film thickness in liquid faces seals[J]. Tribology Transaction, 2008, **51**(2): 140-149.
- [9] Pialucha T, Cawley P. The detection of thin embedded layers using normal incidence ultrasound[J]. Ultrasonics, 1994, **32**(6): 431-440.
- [10] Jie Zhang, Drinkwater B. W, Dwyer-Joyce R. S. Calibration of ultrasonic film thickness measurement technique[J]. Meas. Sci. Technol, 2005, **16**(9): 1784-1791.
- [11] 王和顺, 陈次昌, 黄泽沛, 等. 声波检测技术在机械密封端面接触测量中的应用[J]. 机械与电子, 2004, (10): 68-72.
WANG Hesun, CHEN Cichang, HUANG Zhepei, et al. The use of sound wave monitoring technique in contact degree between mechanical seal faces[J]. Machinery & Electronics, 2004, (10): 68-72.
- [12] 王和顺, 陈次昌, 黄泽沛, 等. 机械密封端面接触状态测控技术[J]. 润滑与密封, 2005, **169**(3): 149-151.
WANG Hesun, CHEN Cichang, HUANG Zhepei, et al. Monitoring technique of contact degree between mechanical seal face [J]. Lubrication Engineering, 2005, **169**(3): 149-151.