

机械结构液体层厚度超声谐振的测量方法*

焦敬品¹, 张强², 何存富¹, 吴斌¹

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京, 100124) (2. 机械工业信息研究院 北京, 100037)

摘要 针对机械结构安全运行的需要, 进行机械结构液体层厚度超声谐振测量方法研究。基于垂直入射纵波在三层介质中传播的连续模型, 通过对不同厚度液体层超声反射系数分析, 提出一种基于超声反射系数谐振频率的液体层厚度测量方法。在对超声谐振测量系统进行标定的基础上, 进行机械结构液体层厚度超声谐振测量试验研究, 同时研究了3层介质的声学特性对液体层超声反射系数及厚度测量的影响。结果表明, 液体层反射系数的谐振频率能够表征其厚度。在对测量系统进行标定的基础上, 测量误差基本保持在5%以内。液体层两侧介质材料的变化对液体层的测量基本没有影响, 但液体层介质材料的变化将对测量系统产生影响, 需要重新对测量系统进行标定。

关键词 机械结构; 液体层; 厚度测量; 反射系数; 超声谐振法

中图分类号 TB55

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、机床导轨等)因接触摩擦而产生损耗, 通常在相对运动的零部件间引入液体层结构(微米级液体膜), 起到润滑和减少摩擦损耗的作用。研究发现, 该液体层对机械结构的动力性、经济性和安全可靠性等有着非常重要的影响^[1]。如果液体层厚度过小, 则机械结构的机械摩擦损失和零件磨损都会增大, 可能造成损伤和安全事故。如果液体层厚度过大, 将导致大量过剩润滑油的流失和排放, 造成环境污染和资源浪费。因此, 为保证机械设备的正常安全运行, 需要对机械结构关键零部件中液体层厚度进行监测。常用的间隙测量方法, 如电涡流法、电容法和激光法等^[2-4], 应用于机械结构液体层厚度测量有很大的局限性, 如测量精度低、对待检测结构要求高和受检测环境影响大等^[5]。

作为五大常规无损检测技术之一, 超声波技术也可用于介质厚度的测量。例如, 基于介质上、下表面反射回波的时间差以及介质中超声波速, 常规超声反射回波技术可以实现较大厚度的测量。由于液体层厚度较小(几微米到几百微米), 液体层上、下表面超声反射回波将会叠加在一起, 从时域波形无法获得超声波通过液体层两侧界面的传播时间, 因而无法直接利用常规超声回波时间差实现液体层厚度测量。

超声波在多层介质中传播时, 在不同介质的分界面处会发生反射、透射现象, 因而可以利用超声波在不同介质分界面的反射或透射系数来表征介质的几何(如厚度)和材料(如密度和弹性模量)特性。基于超声波在多层介质分界面处的传播特性, 国外学者在机械结构液体层厚度超声测量方面已开展了研究^[6-8]。文献[1]等对轴承润滑油膜厚度进行了超声测量研究, 并对超声无损技术在摩擦润滑中的应用进行了综述, 指出超声波在摩擦润滑机械构件检测中的广泛应用前景。文献[5]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。文献[9]对垂直纵波入射到两无限大介质间嵌入薄层界面处超声反射系数进行了理论研究, 重点研究了3种介质声学参数对反射系数谐振频率和半谐振频率的影响。文献[10]利用垂直入射纵波对轴承液体层厚度进行了试验研究。王和顺等^[11-12]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。赵春江等^[13]对轧机液体层轴承液体层厚度测量方法进行了综述, 重点比较了近期发展起来的光纤位移传感法和超声共振法。比较表明: 虽然光纤位移传感法测量精度高, 外界依赖性小, 但透光性的要求极大地限制了其在轧机液体层轴承上的应用; 超声共振法具有对材料的高穿透能力, 有较高的实用价值。

笔者研究了机械结构液体层厚度超声测量方法, 为解决工程结构液体层厚度测量问题提供方法支撑。

* 国家自然科学基金资助项目(编号: 51075012); 北京市自然科学基金资助项目(编号: 1122005)

收稿日期: 2010-06-20; 修改稿收到日期: 2010-10-10

1 厚度超声谐振测量模型

根据机械结构液体层厚度超声测量的实际情况,建立了超声波在3层介质中传播的理论模型,如图1所示。

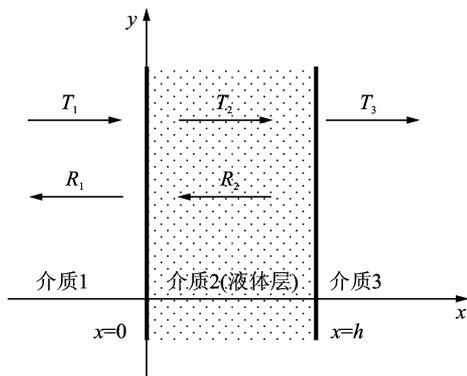


图1 垂直入射超声波在3层介质中的传播模型

根据位移和应力连续边界条件,得到介质1与液体层界面处超声波反射系数表达式

$$R = \frac{(z_2 + z_3)(z_1 - z_2)\exp^{-1}(ik_2h) + (z_2 - z_3)(z_1 + z_2)\exp(ik_2h)}{(z_1 + z_2)(z_2 + z_3)\exp^{-1}(ik_2h) + (z_1 - z_2)(z_2 - z_3)\exp^{-1}(ik_2h)} \quad (1)$$

其中: z_1, z_2, z_3 为3种介质声阻抗; k_2 为液体层中纵波波数; h 为液体层厚度。

由式(1)可以看出,超声波在液体层界面处的反射系数不仅与3种介质的声阻抗有关,而且与液体层厚度有关;因此,在3层介质声阻抗确定的条件下,可以利用超声波反射系数来反映液体层厚度变化。以不锈钢-水-不锈钢3层介质为例,研究不同厚度液体层超声反射系数特性,如图2所示。

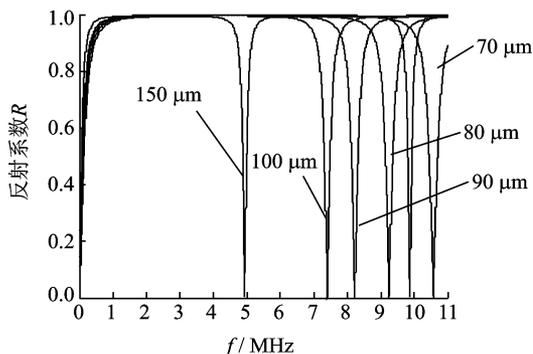


图2 不同厚度水层反射系数曲线

由图2可以看出,在0~11 MHz频率范围内,5种不同厚度水层的超声反射系数有很大不同。但各种厚度水层反射系数在其谐振频率处均出现极小值。根据谐振频率定义^[9],水层厚度可表示为

$$h_w = cm/2f_m \quad (2)$$

其中: c 为中间介质层中超声波波速; m 为谐振阶数; f_m 为 m 阶谐振频率。

由图2可知,通过研究液体层界面处超声反射系数的谐振频率,能够间接测量到液体层厚度。

2 超声谐振厚度测量试验

在实验室,建立了机械结构液体层厚度超声测量系统,如图3所示。

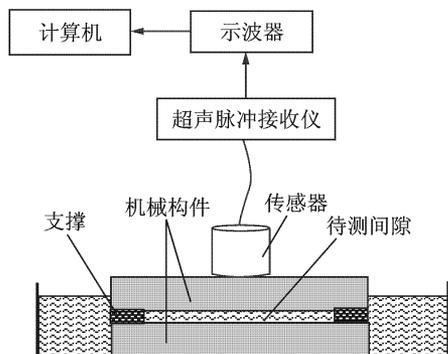


图3 机械结构液体层厚度超声测量试验系统

该系统主要包括超声脉冲激励接收仪、传感器、示波器、计算机以及待测间隙模拟机械结构。其中:超声脉冲激励接收仪采用美国泛美公司的5800超声脉冲发射接收仪;传感器采用Panasonic中心频率为10 MHz的V111-RM型宽带传感器;待测间隙模拟机械结构由置于液体(水或油)中的两块金属圆片构成,圆片厚度5 mm,材质包括钢、铝、石墨3种。在两圆片之间放置不同厚度的间隙调整试块,构造出厚度待测液体层结构。

在液体层厚度超声谐振测量试验中,需要利用反射声波与入射声波相比来计算超声反射系数。而超声检测试验中一般无法直接获得入射超声波。由于机械构件(钢、铝等)与空气的声阻抗相差很大,通常认为超声波在机械构件-空气界面处发生全反射。因此,可以将超声波在空气界面下的反射信号作为求解超声反射系数的参考信号。

在液体层厚度超声测量试验之前,利用厚度已知的塞尺作为液体层厚度调整试块,对液体层厚度超声谐振测量系统进行标定。图4为不同厚度塞尺测得的反射系数曲线。

图5为多次重复测量试验得到的标定曲线,标定方程为

$$h_c = 716.9f^{-0.9648} \quad (3)$$

其中: h_c 为厚度标定值; f 为试验测得的谐振频率。

在对声谐振测量系统标定基础上,进行不同厚

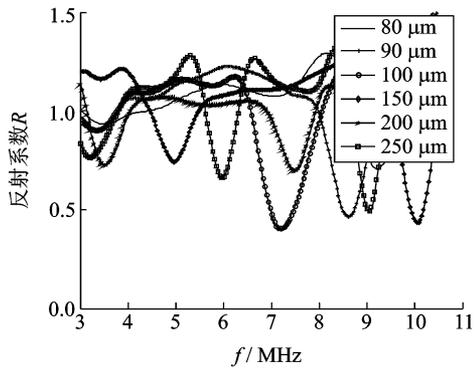


图4 不同水层厚度的反射系数

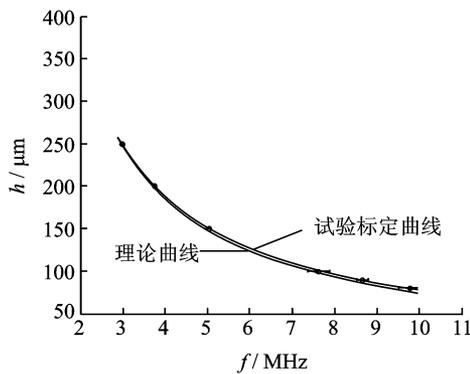


图5 声谐振水层厚度标定试验结果

度水层测量试验,结果见表1。可以看出,利用声谐振法进行水层厚度测量的精度一般在5%范围内。

表1 声谐振水层厚度测量试验结果

序号	设定值 $h_s/\mu\text{m}$	谐振频率 f/MHz	测量值 $h_m/\mu\text{m}$	误差 $e/\%$
1	100	7.490	102.74	2.74
2	110	6.475	118.24	7.49
3	120	6.020	126.85	5.71
4	130	5.985	127.57	1.87
5	140	5.530	137.68	1.66
6	150	5.110	148.58	0.95
7	160	4.445	169.98	6.24
8	170	4.515	167.43	1.51
9	180	4.235	178.10	1.06
10	190	3.990	188.64	0.72
11	200	7.490	200.54	0.27
12	210	7.035	213.01	1.43
13	220	6.475	230.75	4.89
14	230	6.650	224.92	2.21
15	240	6.055	246.17	2.57
16	250	5.985	248.95	0.42

根据超声谐振厚度测量原理,液体层的谐振频率与其厚度成反比。因此,超声检测系统频率范围越高,可以测量的薄液体层厚度就越小。但是,超声波频率越高,衰减也越大。实际测量中,需要根据材料

衰减及厚度分辨率综合确定传感器的频带范围。此外,超声测量系统的频带决定了超声谐振方法液体层厚度测量范围,而超声反射系数的频率间隔决定了液体层厚度测量的分辨率 Δh 。若测量中反射系数的频率间隔为 Δf (试验中 $\Delta f=0.035\text{ kHz}$),谐振阶次 $m=1$,根据式(2)液体层厚度与谐振频率的关系,得到液体层厚度分辨率为

$$\Delta h = \frac{c\Delta f}{2f(f + \Delta f)} \quad (4)$$

图6为液体层厚度分辨率与超声反射系数频率间隔的关系。由图6可以看出,随着频率的增加,厚度分辨率越来越小,测量精度也就越高。

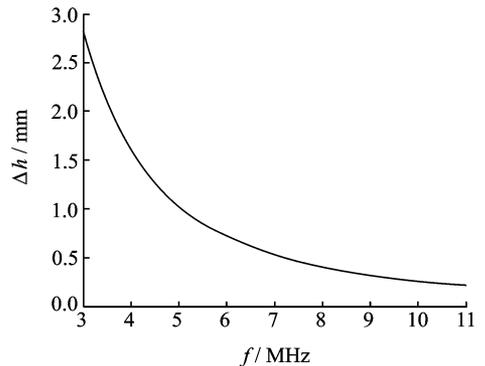


图6 厚度分辨率与频率的关系图

3 厚度超声谐振测量影响因素分析

由超声反射系数表达式(1)可知,液体层超声反射系数与液体层厚度以及3种介质的声学特性参数有关。下面研究3层介质声阻抗变化对液体层超声反射系数及厚度测量的影响。

3.1 液体层声阻抗变化影响

保持液体层厚度及两侧介质声阻抗等条件不变,研究液体层声阻抗变化对厚度测量的影响。图7为两侧介质均为不锈钢、中间液体层分别为水和硅油条件下,理论计算和试验测得的液体层超声反射系数曲线。

由图7(a)理论计算结果可以看出,在4~7.5 MHz范围内,当液体层为硅油时,会出现3阶谐振。当液体层为水时,会出现2阶谐振。图7(b)中试验测得谐振频率点与理论计算结果吻合很好。利用超声谐振法对液体层厚度进行测量,当液体层声学性能参数发生变化时,会影响其反射系数,使其谐振频率发生变化。因此利用超声谐振法对液体层厚度进行测量时,当液体层介质发生变化时(如材质改变,或外界环境因素变化导致液体层声阻抗发生变化),需要重新对超声谐振测量系统进行标定。

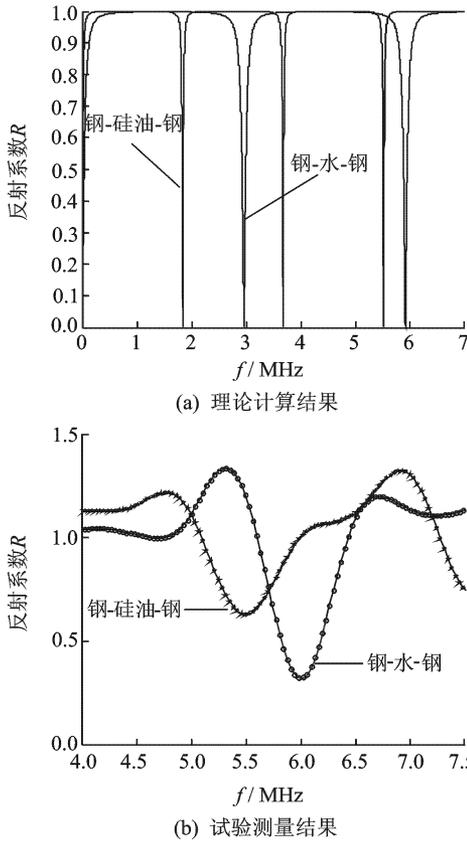


图7 液体层介质变化对超声反射系数影响

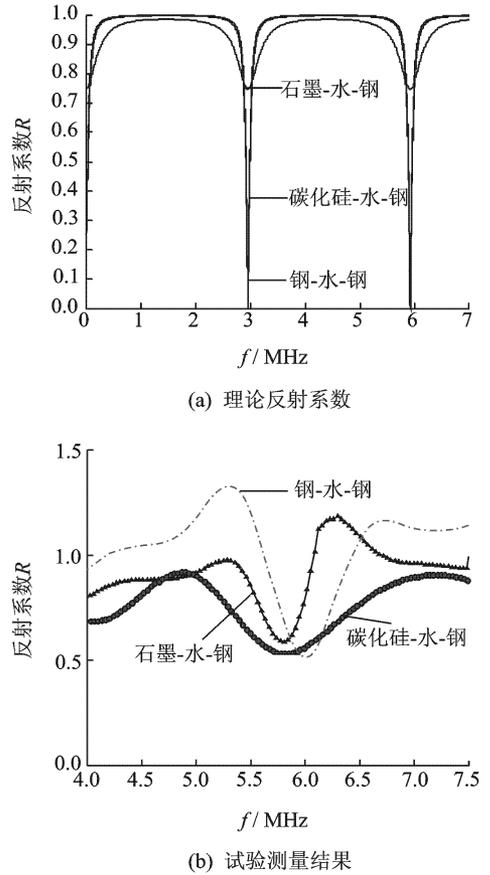


图8 土层介质材料变化对谐振模型测量影响

3.2 上层介质声阻抗变化影响

保持液体层厚度及液体层和下层介质声阻抗等条件不变,研究上层介质声阻抗变化对液体层厚度测量的影响。以石墨-水-不锈钢、碳化硅-水-不锈钢以及不锈钢-水-不锈钢3种系统为例进行研究,图8为3种系统的超声反射系数曲线。

由图8(a)所示理论计算反射系数曲线可以看出,上层介质材料性质对液体层反射系数的谐振频率无影响。但从图8(b)反射系数试验测量结果来看,上层介质材料性质变化导致液体层反射系数的谐振频率发生微小变动,但变动值在谐振模型厚度测量误差范围内。谐振频率波动可能是因为上层介质材料性能变化使反射回波时间发生改变,引起频谱分析时间窗口变动所造成。

3.3 下层介质声阻抗变化影响

保持液体层厚度及液体层和上层介质声阻抗等条件不变,研究下层介质声阻抗变化对液体层厚度测量的影响。以不锈钢-水-石墨、不锈钢-水-碳化硅和不锈钢-水-不锈钢3种系统为例进行研究,图9为3种系统的超声反射系数曲线。

由图9(a)理论反射系数曲线可以看出,当水层

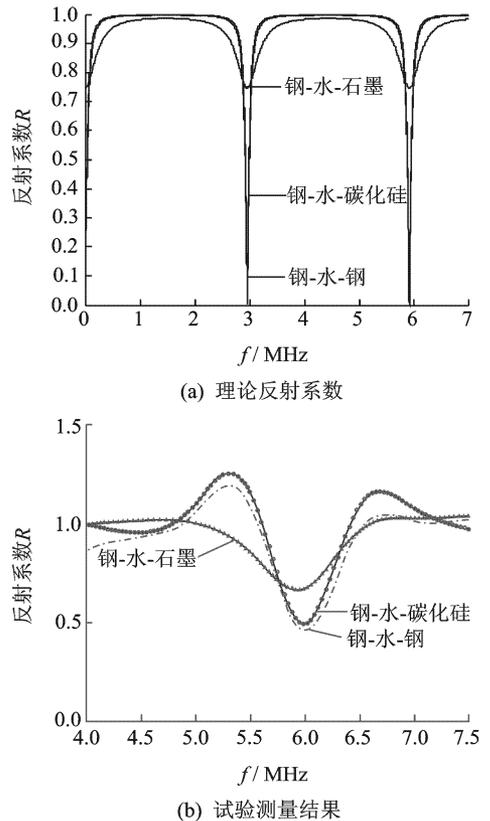


图9 下层介质材料变化对谐振模型厚度测量影响

厚度相同时,3种系统谐振频率相等。但在谐振频率处,反射系数的大小有所不同,其中不锈钢-水-石墨系统的反射系数最小。在超声谐振测量试验的频率范围内,图9(b)为试验测量反射系数曲线。可以看出,反射系数曲线的最小点,即液体层的谐振频率与理论值相吻合,而且3种系统中间水层,在谐振频率点的反射系数大小关系与理论计算同样相吻合。理论计算和试验结果表明,下层介质材料变化对液体层谐振频率测量无影响;因此,下层介质材料变化对超声谐振法测量液体层厚度无影响。

4 结 论

1) 基于垂直入射纵波在3层介质中液体层超声反射系数分析,利用液体层反射系数的谐振频率表征液体层厚度。

2) 在标定试验基础上,进行了液体层厚度测量试验研究。试验结果表明,利用超声谐振法测量的厚度结果与实际很好吻合,误差一般在5%范围内。

3) 研究了3层介质的声学特性对液体层厚度测量的影响。结果表明,采用声谐振法测量液体层厚度时,两侧介质材料变化对其厚度测量基本无影响。当液体层材质发生变化时,对其厚度测量产生影响。因此,在后续试验测量中,需要进一步开展环境因素改变,如温度对液体层厚度测量的影响。

参 考 文 献

- [1] Dwyer-Joyce R S. The application of ultrasonic NDT technique in tribology[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Journal of Engineering Part, 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]. 流体工程, 1985, 13(4): 14-17.
Gu Yongquan, Ma Jiubo. An approach for measurement of film thickness in liquid face seals[J]. Fluid Machinery, 1985, 13(4): 14-17. (in Chinese)
- [3] 陈铭, 张秋翔, 蔡纪宁. 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. Experimental equipment of dry gas seal[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(2): 14-16. (in Chinese)
- [4] Laaziz Y, Bennouna A, Chahboun N, et al. 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]. Atlanta: Georgia In-

stitute of Technology, 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]. Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1996 (452): 2613-2628.
- [7] Tattersall H G. The ultrasonic pulse-echo technique as applied to adhesion testing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1973(6): 819-832.
- [8] Reddyhoff T, Dwyer-Joyce R S, Harper P. A new approach for the measurement of film thickness in liquid face seals[J]. Tribology Transaction, 2008, 51(2): 88-92.
- [9] Pialucha T, Cawley P. The detection of thin embedded layers using normal incidence ultrasound[J]. Ultrasonics, 1994, 32(6): 431-440.
- [10] Zhang Jie, Drinkwater B W, Dwyer-Joyce R S. Calibration of ultrasonic film thickness measurement technique[J]. Measurement Science & Technology, 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 Heshun, Chen Cichang, Huang Zepei, et al. The use of sound wave monitoring technique in contact degree between mechanical seal faces[J]. Machinery and Electronics, 2004 (10): 68-72. (in Chinese)
- [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(3): 150-152.
Wang Heshun, Chen Cichang, Huang Zepei, et al. Monitoring technique of contact degree between mechanical seal faces[J]. Lubrication Engineering, 2005 (3): 150-152. (in Chinese)
- [13] 赵春江, 王建梅, 马立峰, 等. 轧机油膜轴承油膜厚度的测量方法[J]. 太原科技大学学报, 2006, 27(S1): 37-39.
Zhao Chunjiang, Wang Jianmei, Ma Lifeng, et al. Measurement on film thickness of oil-film bearing in rolling mill[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2006, 27 (S1): 37-39. (in Chinese)

第一作者简介: 焦敬品, 女, 1973年11月生, 教授。主要研究方向为传感器测试技术、超声无损检测新技术。曾发表《基于虚拟聚焦的板结构兰姆波换能器阵列检测方法研究》(《机械工程学报》2011年第47卷第8期)等论文。
E-mail: jiaojp@bjut.edu.cn