DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.05.039

超声法测量油膜厚度的系统设计

王波,马希直,张步高

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:为了测量机械设备中油膜的厚度,基于超声波反射系数法设计了一种超声膜厚测量系统。
在 μC/OS-II 操作系统基础上实现一定的人机交互功能以及上位机串口控制功能,完成了模拟静态
油膜结构的测量。测量结果的相对误差在 5%以内,证明了超声膜厚测量系统的可行性。
关键词:油膜厚度;测量;反射系数;μC/OS-II;人机交互;串口控制
中图分类号:TB551 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2020)05-0146-04

System Design of Oil Film Thickness Measurement by Ultrasonic Method

WANG Bo, MA Xizhi, ZHANG Bugao

(Electrical and Mechanical College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China) Abstract: To measure oil film thickness in mechanical equipment, an ultrasonic film thickness measurement system is designed based on ultrasonic reflection coefficient method. The certain human-computer interaction function on the basis of μ C/OS-II and serial port control function of the host computer are implemented in this system, and the measurement of the simulated static oil film structure is completed. The relative error of the measurement results is less than 5%, which proves the feasibility of the ultrasonic film thickness measurement system.

Keywords: oil film thickness; measurement; reflection coefficient; µC/OS-II; human-computer interaction; serial port control

0 引言

为了防止磨损,通常在齿轮、轴承等机械零件的接触 表面加注润滑油,它们的使用寿命依赖于润滑油膜的完整 性^[1]。油膜较厚时,会导致机械零件承载能力下降、工作 不稳定等现象;油膜较薄时,会加剧接触表面磨损,产生难 以预料的严重后果。因此,实现油膜厚度的测量具有重要 的研究意义。

目前的测量方法有电学法^[2]、光学法^[3]以及超声 法^[4]。超声波具有非入侵、穿透能力强、指向性好等特 点,使用超声波法测量油膜厚度能够避免电学法中需对接 触单元进行电隔离以及光学法中需要透光材料的不足。 因此,本文设计了一种超声法测量油膜厚度的系统,该系 统为单通道测量系统,对油膜厚度实现定点测量,可扩展 为超声阵列测量系统,实现油膜厚度分布的测量。

1 系统设计

系统结构框图如图 1 所示。由图可知,本系统由控制 子系统和数据采集及处理子系统组成。控制子系统主要 实现超声激励信号的启停控制、系统复位、串口通信、LCD 显示、按键调整超声激励信号参数等功能^[5]。数据采集 及处理子系统中的超声换能器接收超声激励信号,将电信 号转换成超声波,垂直入射模拟静态油膜结构,反射信号

基金项目:国家自然科学基金项目(51475229)

第一作者简介:王波(1995—),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为超声膜厚测量。

经数字示波器采集上传到上位机上,使用 Origin 软件对数 据进行分析,得出油膜厚度。



图1 系统结构框图

2 控制子系统

2.1 模块分析

该子系统由硬件电路板、电源模块和上位机串口控制 软件组成。其中硬件电路板设计包括 ARM 模块、驱动模 块、发射模块、字库模块、LCD 模块、按键模块以及串口通 信模块^[6]。

硬件电路板主要实现超声激励信号的产生,脉冲重复 率的调整和显示。超声激励信号是具有一定带宽的负尖 脉冲,可以激励超声换能器工作,其主要由发射模块产生, 发射模块电路图^[7]如图 2 所示。

当触发脉冲高电平到来前,场效应管截止,高压信号 HV 对电容 C28 充电。当触发脉冲为高电平时,场效应管



图 2 发射模块

导通,电容 C28 左端立即为低电平 0 V。由于电容两端电 压差不能发生突变,故电容 C28 右端即为负的高压信号, 该负高压信号通过二极管 D8 以及 J8 接口加在换能器上。 随后,C28 中存储的电荷开始放电,在 J8 接口处产生一个 负尖脉冲,这个负尖脉冲具有丰富的高频分量,对超声换 能器进行激励,使其发射超声波。

驱动模块采用 ICL7667 芯片,该芯片是 1 个双电源双路高速 MOS 管驱动器,专门用于将 TTL 电平信号转换成 15 V 电压的高电流输出信号。其正电源范围为 4.5 V~ 15 V,负电源范围为-15~0 V。在实际设计中,将负电源 与电源地短接,即设置成 0 V,采用单电源供电,供电范围 在 12 V 左右^[8]。

串口通信模块采用 CH340G 型号芯片和 1 个方口 USB 插座。CH340G 芯片实现 USB 转串口功能,承担 STM32F103RCT6 控制芯片和上位机串口通信任务。LCD 模块为晶联讯液晶 12864 模块,显示字符点阵取自字库模 块的汉字库芯片 GT20L16S1Y。按键模块由若干独立按 键组成,主要实现调节超声激励信号脉冲重复率等功能。

电源模块由 EM1715S 稳压电源和 IT6721 稳压电源 构成。EM1715S 具有 3 路线性可调电源, I 路和 II 路输出 电压范围为 0~32 V,电流范围为 0~3 A, III 路固定输出 5 V,最大输出电流 2 A。IT6721 具有 1 路线性可调电源,电 压在 0~60 V 连续可调,电流在 0~8 A 连续可调。 EM1715S 主要给硬件电路板上 ARM 模块和驱动模块等 供电,IT6721 给发射模块供电。

上位机串口控制软件的开发环境为 Visual Studio 2010,利用 VC++的 MFC(microsoft foundation classes)开发 完成,如图 3 所示。软件利用 VC++自带的 Mscomm 串行



图 3 上位机串口控制软件

通讯控件实现串口控制和通信,支持串口号1~16。系统 开始运行时,先打开硬件电路板串口进行连接,随后通过 控制按钮发送命令字符串,并将反馈信息在数据接收区进 行显示。该软件不仅可应用于本系统,还可用于一般的串 口调试。

2.2 软件设计

软件设计主要是在 μC/OS-II 操作系统上实现硬件 电路板上的相关驱动,程序流程图如图 4 所示。



图 4 程序流程图

程序运行指示灯任务表明 μC/OS-II 操作系统移植正确、程序能够正常运行等,独立于其他程序。其他任务和串 口中断间的通信与控制流程分为两个分支,如图 5 所示。



图 5 任务间的通信和控制流程

3 数据采集及处理子系统

数据采集及处理子系统由超声换能器、模拟静态油膜 结构、数字示波器和上位机 Origin 软件组成^[9]。

超声换能器为通用型测厚直探头,型号为 5P10,第 1 项表示中心谐振频率为 5 MHz,第 2 项表示压电材料为 PZT,第 3 项表示晶片直径为 10 mm。

模拟静态油膜结构由上不锈钢圆块、油膜和下不锈 钢圆块组成。上不锈钢圆块上表面通过超声波耦合剂与 超声换能器直接接触。不锈钢圆块表面粗糙度为 0.4 µm,厚度为 20 mm,直径为 80 mm,加工误差 4%左 右;下不锈钢圆块上表面结构通过不同的凹槽深度实现 不同厚度的油膜,下不锈钢圆块下表面和上不锈钢上、下 表面结构光滑。数字示波器型号为 ZDS2012,实时采样 频率为1 GSa/s,模拟带宽为100 MHz。实验中将U盘插 入,反射信号数据以 CSV 格式存到 U 盘内,上传到计算 机,用于数据分析。

Origin 软件对反射信号进行分析得出反射系数曲线, 进而利用反射系数曲线特征得出油膜厚度。

4 实验研究

机械设备中润滑结构一般为钢-油-钢 3 层结构,介质的声学物理量常数如表 1 所示。

介质	密度 ρ/(kg/m³)	纵波声速 c/(m/s)	特性阻抗 <i>pc</i> ×10 ⁶ /(N・s/m ³)
油	876	1 460	1.28
不锈钢	7 910	5 790	45.80

表1 介质的声学物理量常数

超声法测量油膜厚度有弹簧模型^[10]和谐振模型^[11] 两种测量模型,下面以谐振模型来验证本系统的性能。谐 振模型油膜厚度计算公式为:

$$h = \frac{cm}{2f_m} \tag{1}$$

式中:c为润滑油中入射波纵波声速;m为声波的谐振阶数;f_为m阶谐振频率。

当发生谐振时,油膜厚度为入射声波半波长的整数 倍,谐振点为超声波反射系数频域图中的极小值点。反射 系数为反射波声压与入射波声压之比,由于入射波无法直 接测量,一般通过参考反射系数间接得到不锈钢-油膜界 面的反射系数。空气-不锈钢界面的反射系数一般为 0.999 98,趋近于1,常用作参考反射系数 R_{ref}。则不锈钢-油膜界面的反射系数计算公式为:

$$R = \frac{A_m}{A_{\rm ref}} R_{\rm ref} \tag{2}$$

式中:A_{ref}为参考信号反射波幅值;A_m为不锈钢与油膜分界 面反射波幅值。

由公式(2)得到反射系数频域图后,可从图中得出一 阶谐振频率 f,结合表1代人公式(1)后可得油膜厚度。 当声波频率>60 MHz 时衰减严重,此时对应的油膜厚度约 为12 μm,故谐振模型一般应用于12 μm 以上油膜厚度的 测量。由公式(1)可知,油膜厚度分别为130 μm、140 μm、150 μm和160 μm 时的一阶谐振频率都在5 MHz 左 右,故加工4个凹槽深度分别为130 μm、140 μm、150 μm 和160 μm的下不锈钢圆块和1个上不锈钢圆块模拟固定 静态油膜。根据测量原理,首先应采集参考反射信号,如 图6所示。



图 6 不锈钢-空气界面的参考反射信号

下面以 150 μm 油膜厚度为例进行一次数据采集及 分析,采集的反射信号如图 7 所示。

由反射系数计算方法可得,将反射信号频域图曲线数 据除以参考信号频域图曲线数据,得本次150 μm 油膜厚 度的反射系数频域图,如图8所示。





反射信号

在实际信号处理中,由于参考信号频域图和反射信号 频域图的数据都是一些离散点,并不一一对应。为了方便 数据处理,以部分反射信号数据为基准,在 Origin 中对反 射信号数据和参考信号数据进行插值处理,最终绘制的曲 线经过平滑处理后如图 8 所示。图中仅有 1 个极小值点, 这表明只发生了一阶谐振,并没有发生二阶谐振,这主要 是由于 超 声 换 能 器 的 带 宽 限 制,一 阶 谐 振 频 率 为 4.72 MHz,结合表 1 数据代入公式(1)得本次测量结果为 154.66 μm,相对误差为 3.11%。



为了验证超声膜厚测量系统的测量精度,下面对每个 厚度的油膜进行3次测量,测量结果和相对误差如表2所 示。由表2可知,超声膜厚测量系统误差在5%以内,精度 较高,证明了该系统应用的可行性^[12]。

5 结语

本文设计的超声膜厚测量系统具有测量精度高、功能

扩展性强等特点。可通过串口通信模块在上位机串口软件上实现整个系统的控制,使整个系统更加智能化,也可 通过将数据采集卡替换数字示波器,扩展 PWM 通道以及 发射模块设计成超声阵列膜厚测量系统,实现油膜厚度分 布的测量。

表 2 油膜厚度为 130 μm、140 μm、150 μm、160 μm 的 3 次测量结果和相对误差

油膜厚 度∕μm	第1次		第2次		第3次	
	测量值/ μm	相对误 差/%	测量值/ μm	相对误 差/%	测量值/ μm	相对误 差/%
130	128.30	1.31	132.01	1.55	133.46	2.66
140	142.02	1.45	145.13	3.66	142.58	1.84
150	154.66	3.11	156.99	4.66	148.98	0.68
160	164.04	2.53	165.53	3.46	167.43	4.64

参考文献:

- [1] DRINKWATER B W, DWYER-Joyce R S. The on-line measurement of lubricant film thickness for condition monitoring[J]. Or Insight, 2003, 46(46):456-460.
- [2] ELSISI S I, SHAWKI G S A. Measurement of oil-film thickness between disks by electrical conductivity[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1):12.
- [3] FOORD C A. Evaluation of lubricants using optical elastohydrodynamics[J]. ALSE Transactions, 1968, 11(1):31-43.
- [4] DWYERJOYCE R S, DRINKWATER B W, DONOHOE C J. The measurement of lubricant – film thickness using ultrasound [J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2003, 459(2032):957-976.
- [5] 姚文祥. ARM Cortex-M3 权威指南[M]. 第2版. 北京:清华 大学出版社, 2014.
- [6] 顾明亮. 基于 FPGA 的便携式超声测厚仪设计[D]. 成都:西 南交通大学, 2012.
- [7] 郑君, 张冬泉, 张勇. 超声波探伤发射电路中电阻的影响 [J]. 无损检测, 2009, 31(3):229-232.
- [8] 王永成, 党源源, 徐抒岩,等. ICL7667 实现步进电机高频斩 波控制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2193-2198.
- [9] 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):19-24,33.
- [10] DRINKWATER B W, ZHANG Jie, KIRK K J, et al. Ultrasonic measurement of rolling bearing lubrication using piezoelectric thin films[J]. Journal of Tribology, 2009,131(1):888.
- [11] PIALUCHA T, CAWLEY P. The detection of thin embedded layers using normal incidence ultrasound [J]. Ultrasonics, 1994, 32(6):431-440.
- [12] 石勇,齐松博,赵建辉,等. 超声波测量油膜厚度方法误差 分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019,40(3):586-592.

收稿日期:2019-07-30