

◇ 研究报告 ◇

超声波多次回波反射法测量油料密度技术研究*

周胜友¹ 熊刚^{1†} 史永刚²

(1 陆军勤务学院油料系 重庆 401331)

(2 陆军勤务学院大型仪器装备管理中心 重庆 401331)

摘要 该文通过同时测量油料的声阻抗和声速来测量油料的密度。通过对超声波在不锈钢壁内的多次反射回波信号作快速傅里叶变换,取各次回波信号中心频率下的幅值在对数坐标系下作数据拟合,由拟合曲线斜率并结合多次反射理论求得油料的声阻抗;测量由聚苯乙烯壁面反射回来的二次回波信号计算油料的声速。实验中将温度控制在 20 °C,测量了 8 种油料的声阻抗和声速,进而求出 8 种油料的密度。实验结果表明 8 种油料密度测量结果的最大误差为 1.2%。该方法适合油料密度在线、快速、准确测量。

关键词 超声波,声阻抗,油料,密度

中图法分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)03-0392-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.03.015

Technology research on oil density measurement based on ultrasonic multiple echo reflection method

ZHOU Shengyou¹ XIONG Gang¹ SHI Yonggang²

(1 Department of Oil, Army Logistic University of PLA, Chongqing 401331, China)

(2 Administration Center of Instruments & Equipment Army Logistic University of PLA, Chongqing 401331, China)

Abstract This paper presented an oil density measurement method by measuring the acoustic impedance and sound velocity of the oil. The amplitude at a certain frequency can be obtained by the fast Fourier transform of each echo. The velocity of sound in the oil was determined by the time-of-flight between the first echo reflected from the polystyrene-oil interface and the second echo which transmitted through the sample and reflected from the stainless steel-oil interface. In the experiment, the temperature was controlled at 20 °C, and the acoustic impedance and sound velocity of the eight oils were measured, and the density of the oil in the eight oils was obtained. The experimental results show that the maximum error in the measurement of density of gasoline, diesel and jet fuel does not exceed 1.2%. This method is suitable for the on-line, rapid, and accurate measurement of the oil density.

Key words Ultrasonic, Acoustic impedance, Oil, Density

2019-01-03 收稿; 2019-03-08 定稿

*军需能源局项目 (YX216J014)

作者简介: 周胜友 (1994-), 男, 四川盐源人, 硕士研究生, 研究方向: 精密测试与油品质量控制。

†通讯作者 E-mail: xg-gh@sina.com

0 引言

密度是油料重要的理化指标之一,密度的准确测量不仅与油料的生产、管道运输、雾化性能相关,而且在油料交易过程中,如果密度测量不准确将造成巨大的经济损失。油料的密度测量方法可以分为静态法和动态法^[1],其中静态法有比重瓶法和浮子式,动态法包括U形振动管法、射线法和超声波法等。静态法精度高,成本低,结构简单,但测量过程需要取样到实验室完成,容易受到人为因素的影响,对操作员提出了较高要求,使其应用环境受到制约。与静态法相比,动态法耗时短,操作方便,能够实时在线检测密度随时间及温度的变化关系,其中超声波液体密度测量具有无损检测、快速响应、在线实时和非侵入式等特点,与现有的密度测量方法相比操作简单,并能够检测高浓度和不透明液体的密度^[2-3]。从测量原理上,超声波检测液体密度分为声速法、声阻抗法和声衰减法^[4]。声速法主要应用于单一组分液体密度检测,需要预先知道密度随温度变化关系,测量不同类别的液体时需要重新标定和建立密度随温度变化关系^[5-6]。声衰减法测量误差大,在声速法和声阻抗法都不能满足应用要求的情况下使用。针对声速法和声衰减法的不足,本文采用声阻抗法,通过同时测量油料的声速和声阻抗,来测量油料密度。

1 测量原理

声阻抗法又称反射系数法,其原理是通过同时测量液体的声阻抗和声速,进而求出液体的密度,将介质声学特性阻抗定义为^[7]

$$Z = \rho c, \quad (1)$$

其中, Z 表示介质的声阻抗, c 表示超声波在介质中的传播速度, ρ 表示介质的密度。根据式(1)可以将油料密度测量原理表示为如图1所示,当超声纵波垂直入射到不锈钢和油料形成的界面2时,由于两种介质声阻抗的差异,超声波在界面2处发生反射和透射,反射和透射声波的能量由两种介质声阻抗的差异决定。将反射声波的大小用反射系数来表示,反射系数 R 由式(2)给出^[7]

$$R = \frac{Z_l - Z_s}{Z_l + Z_s}. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可将油料密度表示为

$$\rho = \frac{Z_s(1+R)}{c(1-R)}, \quad (3)$$

其中, R 表示分界面2处超声波反射系数, Z_l 表示油料的声阻抗, Z_s 表示不锈钢的声阻抗。 R 越大表示反射的声波越多,透射的声波越少。当 Z_l 和 Z_s 数值接近时,反射声波和透射声波一样多; Z_s 远大于 Z_l 时,大多数的声波反射回不锈钢中,并在不锈钢中多次往返传播^[8]。为了同时测量出油料的声速和声阻抗,既需要超声波透射过不锈钢在油料中传播后反射回超声探头B用来测声速,又需要在不锈钢中形成多次反射回波用来测声阻抗。但是在实际测量中,不锈钢的声阻抗为 $44.89 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,油料的声阻抗在 $1 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。由于不锈钢和油料声阻抗的差异,由式(2)可知界面2处的声波几乎全反射,透射到油料中的超声波在油料中传播反射回超声探头B的回波很难检测到。因此,需要寻找一种和油料声阻抗接近的介质用作探头的匹配层,使超声探头A发射的超声波透射大于反射,透射波经油料传播后反射回超声探头A。聚苯乙烯的声阻抗为 $1.5 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其声阻抗与油料声阻抗接近,是超声探头A的匹配层的理想选择。

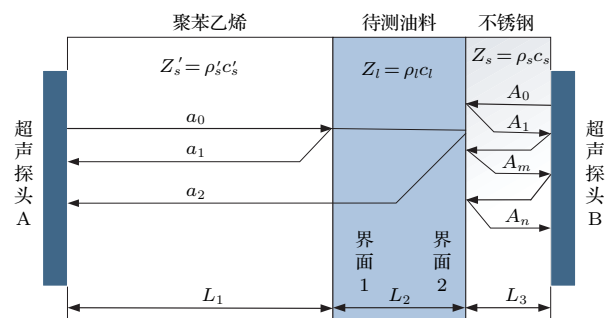


图1 油料密度测量原理

Fig. 1 Oil density measurement principle

1.1 检测系统组成

图2为油料密度测量实验装置示意图,测量装置主要包括CTS-8077PR脉冲发射接收仪、温控系统、超声探头及数字示波器。测量时CTS-8077PR以100 Hz的重复频率发射脉冲激发宽频超声探头(TOFD 5 MHz 6 mm)产生超声波,将CTS-8077PR脉冲发射接收仪输出端的信号接到数字示波器的输入端,超声回波信号经过数字示波器的显示、放大、滤波后上传给计算机数据处理系统;温度控制系统将检测到的油料温度上传给计算机,计算机根据预设的温度对温控系统的工作进行控制,以实现油料温度的精确控制,从而实现检测油料在不同

温度下的声学参数。数据处理系统根据采集到的油料温度,超声回波信号的幅值及传播时间等参数,计算出油料的声速和声阻抗,从而获得油料的密度。

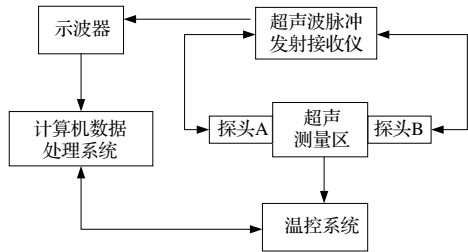


图2 检测系统示意图

Fig. 2 Detection system schematic

1.2 声速测量

如图1所示,当超声波垂直入射到聚苯乙烯和油料界面1时,由于聚苯乙烯和油料声阻抗的不同,入射声波 a_0 将在聚苯乙烯和油料界面处发生反射和透射现象;界面1处的反射回波由超声探头A接收,记为 a_1 ,透射声波在油料中传播到不锈钢界面2后反射回超声探头A,记为 a_2 。

图3为超声波在聚苯乙烯和油料界面1的反射回波 a_1 和在油料中传播到不锈钢界面2反射的回波 a_2 ,由图可知 a_1 和 a_2 的相位变化了 180° ,这是由于超声波从波密介质传播到波疏介质,再从波疏介质传播到波密介质导致的相位变化。由回波信号 a_1 、 a_2 可以计算出油料的声速:

$$c = \frac{2L_2}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

式(4)中, L_2 表示油料声程, t_1 表示 a_1 的传播时间, t_2 表示 a_2 的传播时间。超声传播时间估计的两种

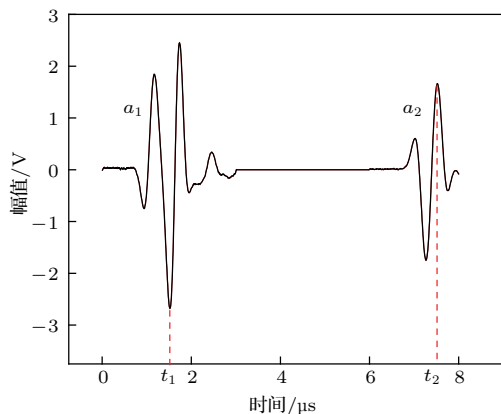


图3 声速测量示意图

Fig. 3 Sound velocity measurement diagram

最基本的方法是互相关法和相位法。其中互相关法可以很好地估计时间差。在数学上互相关函数被定义为

$$x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a_1(t) a_2(t - \tau) dt, \quad (5)$$

式(5)中, $x(\tau)$ 是互相关函数, $a_1(t)$ 和 $a_2(t)$ 分别表示两个时变信号。若两个信号的相关性程度越高,则求解后的相关函数最大值越大,其最大值对应的 τ 反映了两个信号的时间差^[9]。本文中超声传播时间差采用互相关函数来计算,其实现原理如图4所示。将两路信号 $a_1(t)$ 和 $a_2(t)$ 进行傅里叶变换,变换后在频域相乘,再将相乘后的信号进行傅里叶逆变换成时域信号。时域信号中幅值最大点对应的时间即为两路信号 $a_1(t)$ 和 $a_2(t)$ 的时间差。具体实现过程如图4所示。

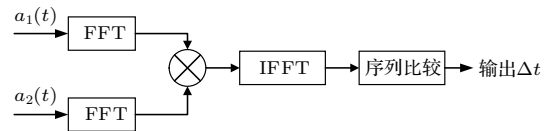


图4 相关器的实现原理

Fig. 4 Structure diagram of correlator

1.3 声阻抗测量

由式(3)得,不锈钢的声阻抗为已知值,只需求出不锈钢和油料界面2的反射系数,即可计算出油料的声阻抗。本文采用超声波在不锈钢内的多次反射回波来计算反射系数。由式(3)油料的声阻抗可表示为

$$Z_l = Z_s \left(\frac{1+R}{1-R} \right). \quad (6)$$

为了准确获得反射系数 R ,应避免超声波在不锈钢内多次传播造成的衰减。所以,不锈钢宽度 L_3 应小于测量池宽度 L_2 ,本文中 L_2 取20 mm, L_3 取9 mm。对第 m 个和第 n 个回波,其幅值可分别表示为^[10]

$$A_m = \exp(-2\alpha_P L_3 m) \cdot A_0 \cdot R^m, \quad (7)$$

$$A_n = \exp(-2\alpha_P L_3 n) \cdot A_0 \cdot R^n, \quad (8)$$

其中, A_0 表示不锈钢中起始声波的幅值, α_P 为不锈钢的声衰减系数。将各次回波的幅值取对数后作为因变量与回波次数做线性拟合,得此拟合直线的斜率 K 。将式(7)和式(8)取对数后相减并经整理,即可得到前述拟合直线的斜率 K 为

$$\begin{aligned} K &= (\ln A_n - \ln A_m) / (n - m) \\ &= \ln R - 2\alpha_P L_3. \end{aligned} \quad (9)$$

如以纯水作为参照,并记由纯水实验得到的拟合直线斜率为 K_w ,由式(9)可得

$$R/R_w = \exp(K - K_w), \quad (10)$$

其中, R_w 是不锈钢与纯水界面的反射系数,根据纯水和不锈钢的已知参数(声阻抗),再根据式(10),就可以确定 R_w ,因此油料的声反射系数可以表示为

$$R = R_w \cdot \exp(K - K_w). \quad (11)$$

式(11)表明,测出油料斜率 K 和纯水斜率 K_w 便可求出油料的反射系数 R 。再根据式(6)便可以求出油料的声阻抗^[11]。

超声波在不锈钢和油料界面2处的多次回波信号如图5所示。可以清楚地看到7次回波信号,并且各回波信号的幅值是逐渐减小的,选取前7次回波信号,对每个回波信号进行快速傅里叶变换,取探头中心频率下的幅值代入式(9)中。图6为回波次数与回波幅值对数值关系图,从图中可以看出拟合曲

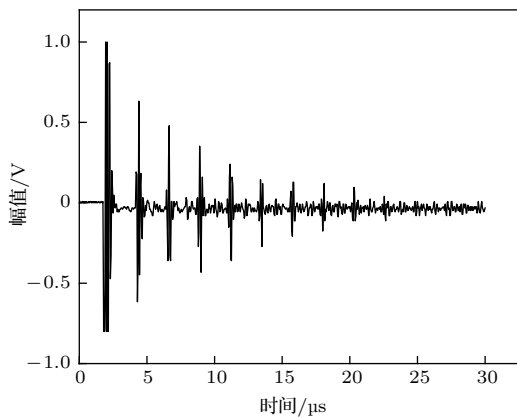


图5 界面2处超声多次回波信号

Fig. 5 Ultrasonic echo signals at two interfaces amplitude

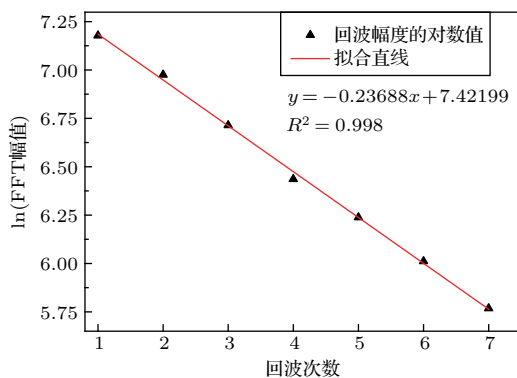


图6 回波次数与回波幅值对数值关系

Fig. 6 Logarithmic relationship diagram of echo number and echo

线的相关系数 $R^2 = 0.998$,表明多次回波拟合有利于减小随机误差。

2 数据处理与分析

选取来自不同厂家的8种油料作为实验样品,其中0#柴油4种,3#喷气燃料2种,90#汽油2种。实验研究了6种油料在不同温度下的声速变化规律,温度范围为15℃~60℃,温度测量间隔为5℃,对同一油料在每个温度下重复测量5次后取平均值作为实验结果。实验结果如图7所示,图中4号、5号为90#汽油,1号、6号为3#喷气燃料,2号、3号为0#柴油。由图7可知不同牌号油料随温度的升高,其声速近似线性下降;在同一温度下柴油的声速大于喷气燃料和汽油。

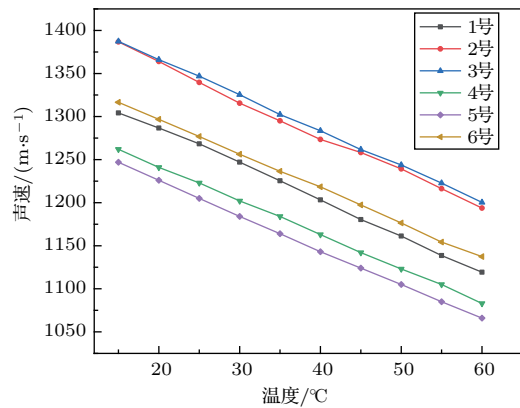


图7 不同温度下油料的声速曲线

Fig. 7 Sound velocity curve of oil at different temperatures

表1给出了20℃条件下,中心频率5MHz探头的实验测量结果。纯水声阻抗取 $1.478 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,每次实验均重复测量5次后取平均值。由实验结果可知,测量最大误差为1.2%;0#柴油的测量结果比90#汽油和3#喷气燃料准确度高,可能是由于不同牌号的物质组成成分不同;随着油料密度的增加,其声速和声阻抗相应的增大。在测量过程中发现,温度对声阻抗和声速的测量结果有明显的影 响。在式(2)中,把不锈钢声阻抗看成特定温度下的常数,但是当温度变化时不锈钢声阻抗也相应的改变,给测量结果带来了不确定的影响,所以测量过程中应减小测量单元温度的变化。8种不同密度的油料的超声测量结果如图8所示,由图可知超声密度测量结果与参考密度直线吻合较好,密度测量达到了较高的精度。

表1 不同密度的油料测量结果

Table 1 Oil measurement results of different density

油料名称	斜率 K	反射系数 R	声阻抗/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	测量密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	参考密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	绝对误差/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	相对误差/ %
90# 汽油	-0.2389	0.9549	0.929	1241	0.7489	0.7421	0.0068	0.92
90# 汽油	-0.2372	0.9608	0.897	1226	0.7314	0.7397	-0.0083	-1.12
3# 喷气燃料	-0.2420	0.9562	1.005	1287	0.7812	0.7874	-0.0062	-0.78
3# 喷气燃料	-0.2429	0.9553	1.026	1298	0.7901	0.7932	-0.0031	-0.39
0# 柴油	-0.2472	0.9513	1.120	1361	0.8235	0.8195	0.004	0.49
0# 柴油	-0.2472	0.9512	1.121	1365	0.8214	0.8225	-0.0011	-0.13
0# 柴油	-0.2479	0.9506	1.137	1372	0.8287	0.8230	0.0057	0.69
0# 柴油	-0.2483	0.9502	1.145	1390	0.8238	0.8274	-0.0036	-0.44

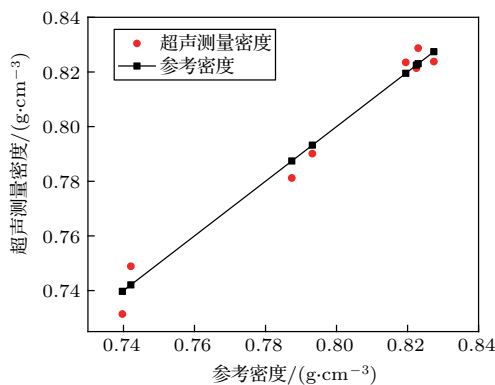


图8 超声测量结果与密度计结果比较

Fig. 8 Comparison of ultrasonic measurement results with densitometer results

3 结论

本文利用超声波在不锈钢内的多次反射回波计算出油料的声阻抗,并以超声波在聚苯乙烯和油料中传播的回波计算出油料的声速,通过对油料声阻抗和声速的测量计算出油料的密度。采用5 MHz的超声探头测量8种油料的声速和声阻抗,测量结果表明油料的声速随温度的增加近似线性的下降,密度测量结果最大误差为1.2%,该方法可用于测量油料的密度。该方法能够同时测量油料的声阻抗和声速,测量不同类别的液体时不需要重新标定,具有结构简单、在线实时、快速准确及非侵入式测量的特点,还可以动态监测油料的密度。

参 考 文 献

- [1] 唐得刚,王海峰. 浅析油品密度在线检测的几种方法[J]. 后勤工程学院学报, 2004(4): 42-45.
Tang Degang, Wang Haifeng. An analysis of some methods for oil density on-line measurement[J]. Journal of Logistics Engineering College, 2004(4): 42-45.
- [2] Rymantas Kazys, Reimondas Šlitteris, Liudas Mažeika, et al. Ultrasonic density measurement of polymer melts in extreme conditions[C]. 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013: 168-169.
- [3] Higtuti R T, Galindo B S, Marc L A P, et al. Thermal characterization of an ultrasonic measurement cell[C]. IMTC 2005-Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005: 1643-1646.
- [4] 薛明华, 苏明旭, 蔡小舒. 超声波多次回波反射法测量两相流密度实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1343-1346.
Xue Minghua, Su Mingxu, Cai Xiaoshu. The experimental study on measurement of density of two phase flow with ultrasonic multiple echo reflection method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(8): 1343-1346.
- [5] Liu J X, Li G F, Xiong W Q, et al. An ultrasonic approach to measure the density of battery electrolyte[C]. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010: 414-418.
- [6] 熊文强, 刘佳鑫, 王志强, 等. 铅酸蓄电池超声波电解液密度测量方法[J]. 仪表技术与传感器, 2011(5): 90-93.
Xiong Wenqiang, Liu Jiaxin, Wang Zhiqiang, et al. Lead-acid battery electrolyte density ultrasonic measurement[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(5): 90-93.
- [7] Margaret S. Greenwood J A B. Ultrasonic sensor to measure the density of a liquid or slurry during pipeline transport[J]. Ultrasonics, 2002, 40(8): 413-417.
- [8] Wang H Q, Cao Y, Zhang Y G, et al. The design of the ultrasonic liquid density measuring instrument[C]. 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011: 758-760.
- [9] Liu J X, Li G F. Frequency and temperature characteristics of an ultrasonic method for measuring the specific gravity of lead-acid battery electrolyte[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51(2): 1-6.
- [10] 李晓佳, 刘佳鑫, 李国锋. 超声波液体密度测量的一种声反射系数测定方法[J]. 传感技术学报, 2017, 30(7): 985-990.
Li Xiaojia, Liu Jiaxin, Li Guofeng. A method for measuring the acoustic reflection coefficient of liquid density measurement by ultrasonic wave[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(7): 985-990.
- [11] Hoche S, Hussen M A, Becker T. Density, ultrasound velocity, acoustic impedance, reflection and absorption coefficient determination of liquids via multiple reflection method[J]. Ultrasonics, 2015, 57: 65-71.