

# 基于电—声联合的液膜厚度测量方法研究

张新铭, 邢兰昌, 牛佳乐, 张树立

(中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 为了拓宽液膜厚度的测量范围, 提出了一种联合应用电阻法与超声渡越时间法的液膜厚度测量新方法; 设计了新型的电—声复合传感器, 建立了用于优化传感器电极结构参数的数值模型, 以灵敏度和线性度为优化目标确定了最优电极参数, 通过开展液膜厚度测量实验验证了联合测量方法的有效性; 研究表明: 同轴金属电极适合于测量较薄液膜, 在 2.4~4.4 mm 厚度范围内的相对误差为 -4.93% 至 5.35%; 超声探头更适用于测量较厚液膜, 在 3.4~10.0 mm 厚度范围内的相对误差为 -3.68% 至 2.20%; 通过联合应用电阻法和超声法可以拓展两种方法各自的测量范围并且提高测量结果的可靠性; 所提出的电—声学联合测量方法具有测量范围宽、非侵入、响应快、精度和灵敏度高、安全性好等优点, 能够广泛适用于工业生产和实验室研究等场合。

**关键词:** 液膜厚度; 电—声联合测量; 电—声复合传感器; 电阻法; 超声法

## Measurement of Liquid Film Thickness Based on an Electrical—acoustic Joint Approach

Zhang Xinming, Xing Lanchang, Niu Jiale, Zhang Shuli

(College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** To widen the measuring range of liquid film thickness, a new approach combining resistance-based method and ultrasound-based method is proposed. A new type of electrical—acoustic composite sensor was designed, and a numerical model was established to optimize the electrode structure parameters. The optimal electrode parameters were determined with the sensitivity and linearity as optimization specifications. The validity of the joint measurement approach was verified by the liquid film thickness measurement experiment. It has been demonstrated that: the coaxial metal electrode is suitable for measuring a thinner liquid film, and the relative error ranges from -4.93% to 5.35% in the thickness range of 2.4 mm to 4.4 mm; the ultrasonic probe is more suitable for measuring a thicker liquid film, and the relative error ranges from -3.68% to 2.20% in the thickness range of 3.4 mm to 10.0 mm. The measurement range of the two methods can be expanded and the reliability of the measurement results can be improved through the combination of the resistance—/ultrasound—based methods. The proposed method has the advantages of wide measurement range, non-intrusive, fast response, high accuracy and sensitivity, and good safety, which can be widely used in industrial production and laboratory research applications.

**Keywords:** liquid film thickness; electrical—acoustic joint measurement; electrical—acoustic composite sensor; resistance-based method; ultrasound-based method

## 0 引言

液膜是以液体为材料的薄层, 在工业生产以及科学研究领域, 尤其是石油天然气运输管道以及化工设备中广泛存在。液膜厚度是表征液膜的关键参数, 准确可靠的测量液膜厚度对于研究管道及化工系统中的液体流动状态及其

发展规律、保障系统的安全有效运行至关重要。

按照测量原理对液膜厚度测量方法进行划分, 主要包括: 电学法<sup>[1-16]</sup>、超声法<sup>[17-23]</sup>、光学法<sup>[24-29]</sup>以及射线法<sup>[30-31]</sup>等。电学法和超声法具有测量设备简单、准确度较高、对人体和环境无害等优点, 被实验室和工业现场广泛接纳。光学法利用光在不同介质中的传播性质与液膜厚度之间的关系进行测量, 但是光学测量设备使用环境要求严格、价格高, 性价比较低。射线法利用射线穿过不同介质时其强度的衰减程度来计算液膜厚度, 由于其受管壁厚度和管径的限制、测量设备昂贵, 而且射线具有放射性, 对人体和环境有害, 故其应用受到限制。

电学法主要包括电阻法和电容法, 电阻法通过测量给定电极间的电阻值来确定液膜厚度, 电容法利用介质的电容值与液膜厚度之间的关系对液膜厚度进行测量。Asali等<sup>[3]</sup>采用一对平行环形电极测量了竖直管道中环状流的平

**收稿日期:** 2019-08-22; **修回日期:** 2019-09-03。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51306212); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE095); 中国石油科技创新基金项目(2018D-5007-0214); 山东省重点研发计划项目(2017GGX40109); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(16CX05021A)。

**作者简介:** 张新铭(1994-), 硕士研究生, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

**通讯作者:** 邢兰昌(1983-), 副教授, 主要从事检测技术与自动化装置、计算机测控系统、天然气水合物与多相流相关检测理论与方法、多物理场耦合数值模拟方法等方向的研究。

均液膜厚度; Fukano 等<sup>[4]</sup>开发了用于测量电导的恒定电流法,针对管道内平均液膜厚度和局部液膜厚度的测量需求分别设计了平行环形电极和同心圆环形电极;李广军等<sup>[5]</sup>利用双平行电导探针对水平矩形管和圆管内气液两相流的液膜高度进行了测量;崔洁等<sup>[6]</sup>采用双平行电导探针测量了新型旋风分离器内的液膜厚度分布;许松林等<sup>[7]</sup>应用双平行电极测量了蒸发壁上平均厚度 0.01 mm 数量级的液膜;Almabrok 等<sup>[8]</sup>采用四组同心圆环形电极研究了竖直上升/下降管道内气液两相流的液膜厚度沿周向的分布;许伟伟等<sup>[9]</sup>研制了一套模拟测试湿天然气输送管道内液膜的实验装置,采用电导探针与螺旋测微器相结合来测量液膜厚度;Geraci 等<sup>[10]</sup>和 Setyawan 等<sup>[11]</sup>为了获取液膜在管道周向的分布信息,在管壁周向等距离布置多对点电极;王超等<sup>[12]</sup>在管道周向布置多对双平行电导探针形成一组阵列以测量周向液膜厚度分布,并且沿管道周向布置两组,从而结合相关测速法实现对液膜波动速度分布的测量。Wang 等<sup>[13]</sup>设计了插入深度可调的电导探针,并提出了时均液膜厚度的计算方法,该测量方法消除了液相电导率变化的影响。Thorncroft 等<sup>[14]</sup>设计了方形截面电容传感器,对分层流和环状流中的液膜厚度进行了测量;杨燕罡等<sup>[15]</sup>采用高精度电容测微仪对水膜厚度进行了在线测量;梁法春等<sup>[16]</sup>采用单丝电容探针对环状流液膜厚度进行了测量,结果表明测量结果受到液体性质和温度影响较小。

超声法主要利用对超声回波参数的分析,如脉冲反射法中的渡越时间判读和频域傅里叶分析。Lu 等<sup>[17]</sup>基于脉冲反射法并利用 20 MHz 频率的超声换能器,对水平面上冷凝液膜厚度进行了测量;Chen 等<sup>[18-19]</sup>采用超声脉冲反射法,以液膜厚度 1 mm 为界,分别应用渡越时间判读和傅里叶变换方法对回波信号进行分析获得了冷凝/非冷凝液膜厚度;苏明旭等<sup>[20]</sup>结合超声脉冲反射法和激光吸收光谱法对低速/中速/高速流动的液膜厚度进行了测量,表明通过两种方法得到的水平表面流动液膜的平均厚度吻合度较好。王晶等<sup>[21]</sup>和伍子玮等<sup>[22]</sup>采用超声多普勒测速仪对冷却管内垂直降膜的厚度和速度进行了无接触式的测量;Liang 等<sup>[23]</sup>利用超声多普勒测速仪测量了水平管内气液环状流液膜厚度和速度分布,进而得到液相流量。

电阻法在测量极薄液膜时具有优势,测量灵敏度随液膜厚度的增加而显著降低,因此不适用于液膜较厚的情况;与之相反,超声渡越时间法由于受到回波混叠等因素的影响而使得其液膜厚度测量下限较高,该方法更适用于测量较厚的液膜。因此,本文提出将电阻法和超声渡越时间法相融合的测量思路,实现两种方法的优缺点互补,扩展液膜厚度测量范围,并且能够在两者测量范围重叠区域实现相互验证,提高测量的可靠性。首先设计了电-声复合传感器的基本结构,然后建立了电-声复合传感器数值模型,对传感器的结构参数进行了优化设计,最后制作了电-声复合传感器并开展了液膜厚度测量的实验,验证了电-声联合测量方法的有效性。

## 1 电-声复合传感器与测量原理

### 1.1 传感器结构及参数

所设计的电-声复合传感器结构以及结构参数如图 1 (a) 所示,传感器包括两部分,即电学部分和声学部分。电-声复合传感器的安装方式如图 1 (b) 所示,传感器安装在容器底部,传感器上表面与容器底部保持齐平,以避免对液膜厚度测量产生影响。

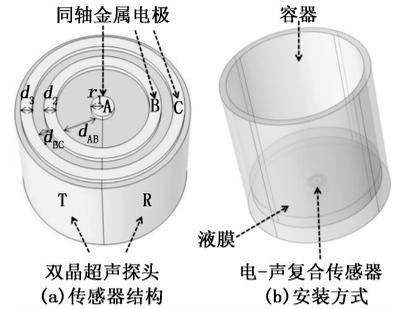


图 1 传感器结构及安装方式图

参照图 1 (a),电-声复合传感器的电学部分为同轴金属电极,由一个圆形电极 A、内环电极 B 和外环电极 C 构成,并且相邻电极间以绝缘材料填充。采用电极 A、C 构成激励电极,电极 A、B 构成测量电极,通过测量 A、B 两电极之间的电势差  $U_{AB}$  得到电极间的液膜的电阻值。声学部分为双晶超声探头,由发射端 T 和接收端 R 构成。圆形电极 A 的半径为  $r_1$ ,内环电极 B 的环宽为  $d_2$ ,外环电极 C 的环宽为  $d_3$ ,A、B 两电极的间距为  $d_{AB}$ ,B、C 两电极间的间距为  $d_{BC}$ 。

### 1.2 液膜厚度测量原理

向同轴金属电极的激励电极 A 和 C 供以恒定电流(或施加恒定电压),同时测量电极 A 和 B 之间的电压(或电流),进而计算得到电极 A/B 间液膜的电阻值。

假定液膜中的电流沿圆周方向分布均匀且液膜内的电流方向为径向对称,则通过理论推导可得液膜的电阻为  $R_0$ <sup>[32]</sup>:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\sigma h_L} \ln \frac{r_1 + d_{AB}}{r_1} \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 为液体的电导率, $h_L$ 为液膜厚度。

令同轴金属电极的结构参数  $C_E$  和电极环 B 内径与圆形电极 A 外径之比  $d_E$  如下:

$$CE = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_1 + d_{AB}}{r_1} \quad (2)$$

$$dE = \frac{r_1 + d_{AB}}{r_1} \quad (3)$$

则为:

$$CE = \frac{1}{2\pi} \ln(dE) \quad (4)$$

由式(1)~(3)可得液膜电阻值  $R_0$  为:

$$R_0 = \frac{C_E}{\sigma} \frac{1}{h_L} \quad (5)$$

理论推导液膜电阻  $R_0$  忽略了电极 A 上的液膜电阻和电

极—液相界面之间的接触电阻,故理论推导值应小于实际电阻值,该结论已得到实验数据的验证。因此,引入修正系数  $K$  对理论电阻值进行修正,修正后的液膜电阻  $R$  的计算式为:

$$R = \frac{C_E K}{\sigma hL} \quad (6)$$

超声波脉冲信号从容器底部的超声探头发射,继而在液相中传播,当超声波到达气液相界面时发生发射,反射回波被超声探头所接收。设超声脉冲在液膜中的传播时间为  $\Delta t$ 、传播速度为  $C$ ,则液膜厚度  $h_L$  与传播时间  $\Delta t$  的关系为:

$$hL = \frac{C\Delta t}{2} \quad (7)$$

基于渡越时间法对回波信号进行分析来获得液膜厚度时,要求超声脉冲激励信号与反射回波信号不能产生混叠,否则无法精确获取渡越时间,因此液膜厚度必须满足<sup>[33]</sup>:

$$hL > \frac{nC}{2f} \quad (8)$$

其中: $n$ 为超声波脉冲包含的超声波波数, $f$ 为超声波的频率。

## 2 传感器结构参数优化

### 2.1 数值模型的建立

基于有限元数值模拟方法,建立了三维电—声复合传感器及容器模型,模型的几何结构如图 2 (a) 所示,同轴金属电极的电极环 C 外直径为 14 mm、超声探头的直径为 15 mm,容器内部直径和高度均为 0.1 m。

将模型边界条件设定如下:向激励电极 A 和 C 供以 1 mA 恒定电流。金属电极材料设定为铜,电导率为  $5.998 \times 10^7$  S/m,容器中液相材料设置为水,电导率设定为 0.025 S/m,相对介电常数设定为 81。

采用自由四面体网格对容器中的液膜的三维模型进行划分,所划分的网格最大和最小特征长度分别为  $3.87 \times 10^{-3}$  m 和  $1.66 \times 10^{-4}$  m,如图 2 (b) 所示。

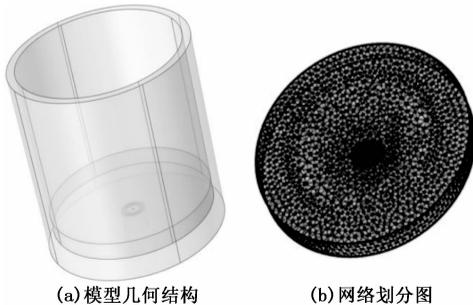


图 2 模型的几何结构及网格划分图

根据场内电导率及边界条件,求解电场微分方程 (9),获得电势、电流、电阻等电场参数。

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = 0 \\ J = \sigma E \\ E = -\nabla \varphi \end{cases} \quad (9)$$

式中, $J$ 为传导电流密度, $\sigma$ 为介质电导率, $E$ 为电场强

度, $\varphi$ 为电势。

### 2.2 结构参数的影响

利用上述所建立的数值模型考察了同轴金属电极的结构参数 ( $r_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_{AB}$  和  $d_{BC}$ ) 对金属电极性能的影响。通过分析仿真数据可知,当液膜厚度处于 0.4 mm 至 4 mm 区间内时,电阻值主要受到圆形电极 A 的半径  $r_1$  以及 A 和 B 两电极的间距  $d_{AB}$  的影响,这与理论分析中结构参数  $C_E$  的主要影响因素为  $r_1$  和  $d_{AB}$  相符(参见式 (2))。基于此,将内环电极 B 的环宽  $d_2$ 、外环电极 C 的环宽  $d_3$ 、B 和 C 两电极的间距  $d_{BC}$  均设为固定值(此处为 1 mm),考虑到本研究中超声波探头的外径已经确定为 15 mm,故将同轴金属电极电极环 C 的外直径设为 14 mm,则  $r_1 + d_{AB} = 4$  mm(参见图 1)。

先后选取  $(r_1, d_{AB}) = (1 \text{ mm}, 3 \text{ mm})$ 、 $(1.5 \text{ mm}, 2.5 \text{ mm})$ 、 $(2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$ 、 $(2.5 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm})$ 、 $(3 \text{ mm}, 1 \text{ mm})$  等五组电极结构参数进行仿真研究,参照式 (1) 和 (3) 可知五组电极的电极环 B 内径与圆形电极 A 外径之比  $d_E$  分别为 4.0、2.7、2.0、1.6、1.3。利用仿真数据计算出相对灵敏度和非线性误差,通过分析结构参数对相对灵敏度和非线性误差的影响来选取出最优的结构参数。

同轴金属电极的灵敏度由式 (10) 计算:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (10)$$

式中, $S$ 为灵敏度, $\Delta X$ 为液膜厚度变化值, $\Delta Y$ 为液膜厚度变化所引起的电阻值变化。

同轴金属电极的相对灵敏度  $S^*$  定义为:

$$S^* = \frac{S}{S_{\max}} \quad (11)$$

式中, $S_{\max}$ 为五组结构参数的参数下的最大灵敏度。

非线性误差由式 (12) 计算:

$$\delta = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (12)$$

其中: $\delta$ 为非线性误差, $\Delta Y_{\max}$ 为液膜电阻值/液膜厚度曲线与其拟合直线之间的最大偏差, $Y_{FS}$ 为所测量的液膜厚度范围内电阻最大值与最小值之差。

相对灵敏度  $S^*$  随液膜厚度变化的曲线如图 3 所示,同轴金属电极对于极薄液膜更加敏感,而当液膜厚度大于一定值时,电极的灵敏度大大降低。对比五组不同电极结构参数下的相对灵敏度可知,当电极 A 半径  $r_1$  为 1 mm、A 和 B 两电极的间距  $d_{AB}$  为 3 mm 时,传感器的相对灵敏度最高。分析其原因在于:当  $r_1$  越小、 $d_{AB}$  越大时,探头结构参数  $C_E$  也就越大,则液膜电阻对液膜厚度的变化反应更加灵敏。

液膜厚度在 0.4~0.6 mm、2.4~2.6 mm、3.4~3.6 mm 三个测量区间内的非线性误差如表 1 所示。对比五组不同电极结构参数下的非线性误差,则当电极 A 半径  $r_1$  为 1 mm、A 和 B 两电极的间距  $d_{AB}$  为 3 mm 时,非线性误差最小。分析其原因:当圆形电极 A 的半径  $r_1$  越小、A 和 B 两电极的间距  $d_{AB}$  越大时,激励电极与测量电极间的距离越

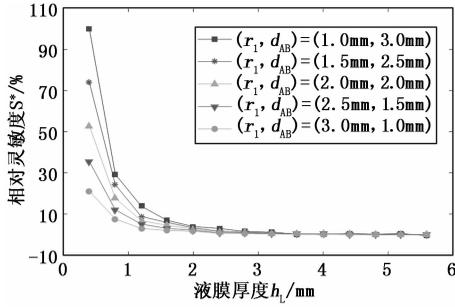


图3 不同电极结构参数下的相对灵敏度

大, 则液膜中电流密度空间分布更加均匀<sup>[4]</sup>。

表1 不同电极结构参数下的非线性误差

非线性误差 结构参数	液膜厚度		
	0.4~ 0.6mm	2.4~ 2.6mm	3.4~ 3.6mm
$(r_1, d_{AB}) = (1.0\text{mm}, 3.0\text{mm})$	3.86%	2.34%	1.83%
$(r_1, d_{AB}) = (1.5\text{mm}, 2.5\text{mm})$	7.29%	5.12%	3.89%
$(r_1, d_{AB}) = (2.0\text{mm}, 2.0\text{mm})$	8.65%	6.51%	5.44%
$(r_1, d_{AB}) = (2.5\text{mm}, 1.5\text{mm})$	12.32%	9.37%	7.81%
$(r_1, d_{AB}) = (3.0\text{mm}, 1.0\text{mm})$	17.14%	13.82%	10.78%

综合考虑相对灵敏度和非线性误差, 最终确定最优的电极结构参数为: 电极 A 半径  $r_1 = 1\text{ mm}$ 、A 和 B 两电极的间距  $d_{AB} = 3\text{ mm}$ 、内环电极 B 的环宽  $d_2 = 1\text{ mm}$ 、外环电极 C 的环宽  $d_3 = 1\text{ mm}$ 、B 和 C 两电极的间距  $d_{BC} = 1\text{ mm}$ 。

### 3 液膜厚度测量实验

#### 3.1 实验系统

图4为基于电-声复合传感器的液膜厚度测量系统组成示意图。系统主要由信号发生模块、电-声复合传感器、超声波数据采集模块、电学测量模块、测控软件组成。信号发生模块为高压脉冲发生/接收器 DPR300, 用以为超声波探头(谐振频率 1 MHz)产生高压激励信号(波数  $n = 5$ )。超声数据采集模块采用 PCIE-1840 板卡, 将超声反射回波信号转换成的电信号进行高速采集。电学测量模块采用 TH2828A 精密 LCR 数字电桥, 用来测量液膜的电阻值, 采用的测试频率为 1 kHz。测控软件包括基于 LabVIEW 的程序和 JSP Control Panel (控制 DPR300), 实现对测量系统硬件的控制、参数的设置以及对采集数据预处理、波形实时显示、保存等功能。

采用透明的有机玻璃制作容器以便于观察液膜的状态, 容器内壁标有刻度, 作为液膜厚度值的参考。将电-声复合传感器安装在容器的最底部, 并使得传感器上表面与容器底面平齐。通过向容器中注入已知质量的水来获得待测量的液膜, 由注入水的质量计算液膜厚度的实际值。由于受到实验条件的限制, 在容器底部形成均匀的极薄液膜比较困难, 本实验中所测试的液膜厚度下限为 2.4 mm。

#### 3.2 实验结果分析

图5所示为液膜电阻值与实际液膜厚度之间的关系,

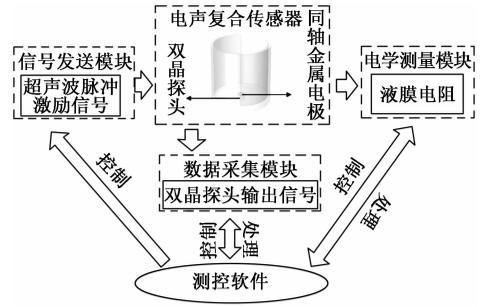


图4 液膜厚度测量系统组成示意图

其中电阻值包括实验测量值、修正前的理论值以及修正后的理论值。分析图5可知: 修正前的理论电阻值低于实际测量值, 这与2.2节中的理论分析相符。参照式(6), 将实验测量值除以理论值, 通过非线性回归得到修正系数 K 的计算式:

$$K = \frac{0.2058}{2.1485 - hL0/hL} + 1.1088hL/hL0 \quad (13)$$

式中,  $h_{L0}$  为本实验中测量液膜厚度的上限, 此处取为 4.4 mm。

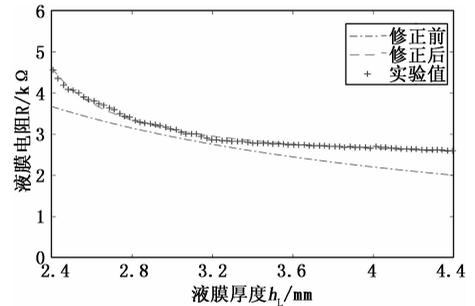


图5 液膜电阻值与液膜厚度的关系曲线

经系数 K 修正后的液膜电阻值与实际液膜厚度之间的关系模型为:

$$R = \frac{0.8455}{hL - 2.2240} + 2.0480 \quad (14)$$

图6对比了经式(14)计算得到的液膜厚度值  $h_{LE}$  与液膜厚度实际值。分析图6可知, 当液膜厚度在 2.4 mm 至 4.4 mm 之间变化时, 其相对误差范围为 -4.93% 至 5.35%, 均方根误差为 0.0834 mm, 平均绝对误差为 0.065 5 mm。

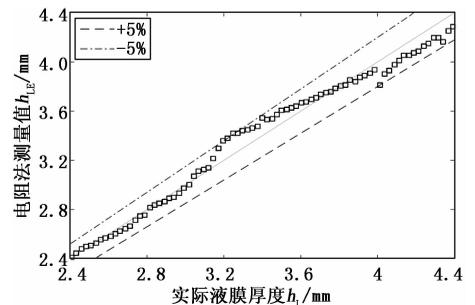


图6 液膜厚度实际值与电阻法测量值对比

参见式(7)和(8), 超声波渡越时间法不适用于液膜厚度较小的情况。图7所示为两种液膜厚度条件下测量得

到的超声波信号。由图可见：当液膜厚度为 2.4 mm 时，界面反射超声波信号产生堆叠，无法从信号中提取出反射回波；当液膜厚度为 4.3 mm 时，通过分析反射回波的到达时刻能够获得其传播时间。本实验中，当液膜厚度大于 3.4 mm 时，该超声探头可以实现液膜厚度的测量。

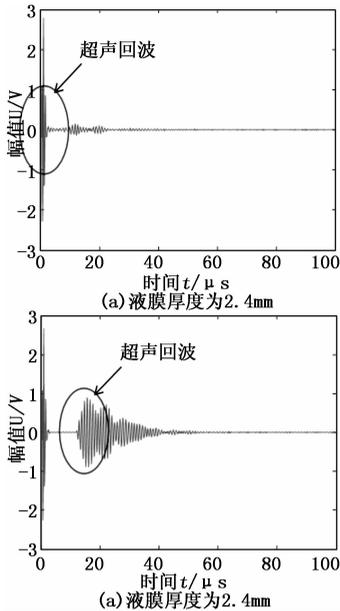


图 7 实际测量的超声波信号波形

图 8 对比了渡越时间法液膜厚度测量值  $h_{LU}$  与实际液膜厚度值。本实验对液膜厚度在 3.4 mm 至 10.0 mm 范围的液膜进行了测量，相对误差的范围为 -3.68% 至 2.20%，均在  $\pm 5\%$  的相对误差范围内，均方根误差为 0.0834 mm，平均绝对误差为 0.0465 mm。

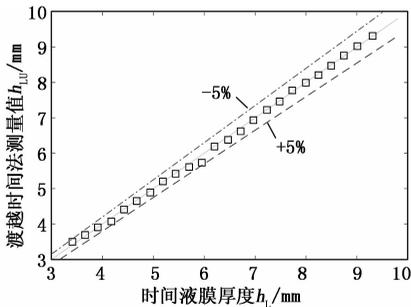


图 8 液膜厚度实际值与渡越时间法测量值对比

### 4 讨论

电学法的误差影响因素主要包括液体电导率、电场频率等。温度影响液体的电导率值，电导率直接影响电极间的电阻值，电场频率影响电极与液体之间的作用，从而对电极间的电阻测量值产生影响。在超声渡越时间法中，液体的声速、传播时间等因素直接影响液膜厚度测量结果。液体的声速受到温度、压力、盐度等的影响。超声回波往往受到噪声干扰而导致传播时间的判读误差。

综合分析上述电学和声学测量方法，电学法适合于测

量较薄液膜，但是由于本文实验条件的限制，目前仅测量了 2.4 mm 以上的液膜，测量上限约为 4.4 mm。基于声学法测量的液膜厚度下限约为 3.4 mm，与式 (8) 的理论计算结果相符，更适用于测量较厚液膜。

### 5 结论

针对宽范围液膜厚度测量的问题，提出联合应用电学和声学测量方法，即电阻法与超声渡越时间法。设计了新型的电一声复合传感器的基本结构，其中电学部分采用同轴金属电极、声学部分采用双晶超声探头。建立了用于优化传感器电极结构参数的数值模型，以灵敏度和线性度为优化目标确定了最优电极参数。制作了电一声复合传感器并开展了液膜厚度测量的实验，验证了联合测量方法的有效性。

研究表明：同轴金属电极适合于测量较薄液膜，在 2.4~4.4 mm 厚度范围内的相对误差为 -4.93% 至 5.35%；超声探头更适用于测量较厚液膜，在 3.4~10.0 mm 厚度范围内的相对误差为 -3.68% 至 2.20%。通过联合应用电阻法和超声法可以拓展两种方法各自的测量范围，在两者重叠的测量区域（如 3.4~4.4 mm）内，可以实现对两种测量结果的相互验证，从而提高测量结果的可靠性。

所提出的电学—声学联合测量方法具有测量范围宽、非侵入、响应快、精度和灵敏度高、安全性好等优点，能够广泛适用于工业生产和实验室研究等场合。为了发展所提出的电一声联合测量方法，下一步将在改善实验条件和信号处理方法的基础上探索液膜测量下限，并且研究含有固体颗粒（如沙粒、水合物颗粒）的液膜厚度测量方法。

### 参考文献:

- [1] Coney E M W. The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1973, 6 (9): 903-911.
- [2] Thwaites G R, Kulov N N, Nedderman R M. Liquid film properties in two-phase annular flow [J]. Chemical Engineering Science, 1976, 31 (6): 481-486.
- [3] Asali J C, Hanratty T J, Andreussi P. Interfacial drag and film height for vertical annular flow [J]. AIChE Journal, 1985, 31 (6): 895-902.
- [4] Fukano T. Measurement of time varying thickness of liquid film flowing with high speed gas flow by a constant electric current method (CECM) [J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 184 (2-3): 363-377.
- [5] 李广军, 郭烈锦, 陈学俊. 气液两相分层流界面液膜高度的测量与预测 [J]. 西安交通大学学报, 1998 (5): 44-48.
- [6] 崔洁, 陈雪莉, 王清立, 等. 电导法测量新型旋风分离器内液膜的分布规律 [J]. 化工学报, 2009, 60 (6): 1487-1493.
- [7] 许松林, 郭凯. 刮膜式分子蒸馏装置中的液膜状态实验 [J]. 天津大学学报, 2010, 43 (6): 544-548.
- [8] Almbrok A A, Aliyu A M, Lao L, et al. Gas/liquid flow behaviours in a downward section of large diameter vertical serpentine pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow,

2016, 78: 25-43.

- [9] 许伟伟, 王建军, 金有海, 等. 湿天然气输气管道内液膜测试的实验装置开发 [J]. 实验室研究与探索, 2016, 35 (12): 51-53.
- [10] Geraci G, Azzopardi B J, Maanen H R E V. Effect of inclination on circumferential film thickness variation in annular gas/liquid flow [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (11): 3032-3042.
- [11] Setyawan A, Indarto, Deendarlianto. Experimental investigations of the circumferential liquid film distribution of air-water annular two-phase flow in a horizontal pipe [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 85: 95-118.
- [12] 王超, 陈超, 赵宁, 等. 用于水平环状流周向液膜特性测量的电导探针阵列 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (9): 1408-1413.
- [13] Wang C, Zhao N, Chen C, et al. A method for direct thickness measurement of wavy liquid film in gas-liquid two-phase annular flow using conductance probes [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2018, 62: 66-75.
- [14] Thorncroft G E, Klausner J F. A capacitance sensor for two-phase liquid film thickness measurements in a square duct [J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119 (1): 164-169.
- [15] 杨燕翌, 王仲, 宋丽梅, 等. 虚拟仪器与电容实现水膜的自动测量与控制 [J]. 计算机测量与控制, 2005 (1): 14-17.
- [16] 梁法春, 陈婧, 曹学文. 截面含气率的单丝电容探针测量 [J]. 石油化工高等学校学报, 2009, 22 (2): 70-72.
- [17] Lu Q, Suryanarayana N V, Christodoulou C. Film thickness measurement with an ultrasonic transducer [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1993, 7 (4): 354-361.
- [18] Pedersen P C, Cakareski Z, Hermanson J C. Ultrasonic monitoring of film condensation for applications in reduced gravity [J]. Ultrasonics, 2000, 38 (1): 486-490.
- [19] Chen Z Q, Hermanson J C, Shear M A, et al. Ultrasonic monitoring of interfacial motion of condensing and non-condensing liquid films [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16 (6): 353-364.
- [20] 苏明旭, Muhammad Abdul Ahad, 蒋永, 等. 超声脉冲反射法和激光吸收光谱法同步测量流动液膜厚度 [J]. 化工学报, 2018, 69 (7): 2972-2978.
- [21] 王晶, 王亦飞, 颜留成, 等. 管内垂直下降液膜速度与厚度分布特性 [J]. 化工学报, 2016, 67 (6): 2239-2245.
- [22] 伍子玮, 王亦飞, 彭昕, 等. 气液降膜流动厚度及流速分布特性 [J]. 高校化学工程学报, 2018, 32 (2): 302-311.
- [23] Liang F, Fang Z, Chen J, et al. Investigating the liquid film characteristics of gas-liquid swirling flow using ultrasound Doppler velocimetry [J]. AIChE Journal, 2017, 63 (6): 2348-2357.
- [24] Mouza A A, Vlachos N A, Paras S V, et al. Measurement of liquid film thickness using a laser light absorption method [J]. Experiments in Fluids, 2000, 28 (4): 355-359.
- [25] Schubring D, Ashwood A C, Shedd T A, et al. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part I: Methods and data [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36 (10): 815-824.
- [26] Han Y, Shikazono N, Kasagi N. Measurement of liquid film thickness in a micro parallel channel with interferometer and laser focus displacement meter [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37: 36-45.
- [27] Zadrazil I, Matar O K, Markides C N. An experimental characterization of downwards gas-liquid annular flow by laser-induced fluorescence: Flow regimes and film statistics [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 60: 87-102.
- [28] Xue T, Ge P, Qu L. Error analysis and liquid film thickness measurement in gas-liquid annular flow [J]. Optik, 2015, 126 (20): 2674-2678.
- [29] Vernay C, Ramos L, Ligoure C. Free radially expanding liquid sheet in air: time- and space-resolved measurement of the thickness field [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 764: 428-444.
- [30] Petrick M, Swanson B S. Radiation attenuation method of measuring density of a two-phase fluid [J]. Review of Scientific Instruments, 1958, 29 (12): 1079-1085.
- [31] Stahl P, Rohr P R V. On the accuracy of void fraction measurements by single-beam gamma-densitometry for gas-liquid two-phase flows in pipes [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2004, 28 (6): 533-544.
- [32] 王文武, 李春国, 王新军, 等. 金属表面流动液膜厚度的电导法测量技术研究 [J]. 东方汽轮机, 2010 (1): 21-25.
- [33] 苑朝凯, 李进平, 陈宏, 等. 高超声速条件下溢液液膜厚度测量方法 [J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48 (6): 629-638.

(上接第37页)

#### 参考文献:

- [1] 林玉池, 于建. 光电自准直仪现状与展望 [J]. 宇航计测技术, 1999, 12 (6): 30-32.
- [2] 张玲玲, 王建中, 石磊. 无线温度传感器设计 [J]. 电子与封装, 2011, 11 (7): 39-43.
- [3] 李行善, 左翼, 孙杰. 自动测试系统集成技术 [M]. 北京: 电子工业出版社.
- [4] 杨州, 景博, 等. 机载系统故障预测与健康管理经验与评估方法 [J]. 测控技术, 2012 (3): 101-104.
- [5] Elmar S chrufer. 电测技术 (第八版) [M]. 北京: 电子工业出版社.
- [6] 瑚琦, 杨园园, 高鹏飞, 等. 基于面阵图像传感器的自动读值光电自准直仪 [J]. 仪表技术与传感器, 2011 (9): 20-22.
- [7] 王晔, 张忠波, 唐胜武. 一种新型角度传感器的设计 [J]. 传感器技术, 2005 (24): 45-47.
- [8] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社.
- [9] 赵继勇, 彭飞. 高度ADC的低抖动时钟设计 [J]. 电子设计应用, 2005, 4 (2): 79-83.
- [10] 黄任. AVR单片机与CPLD/FPGA综合应用入门 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [11] 肖鹏, 肖文, 孙茂一. 基于FPGA+MCU的数字电桥的研制 [J]. 电测与仪表, 2009, 46 (526): 63-66.