

DOI: 10.11973/wsje201810005

密闭容器内低阻抗液体侧壁式超声液位测量

莫润阳^{1,2}, 刘中林¹

(1. 陕西师范大学 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119;

2. 秦皇岛和平无损检测有限公司, 秦皇岛 066000)

摘要: 超声侧向贴壁式液位测量一般是基于声脉冲对液体在有和无的状态下, 界面反射回波信号的差异来判断液面位置的, 常采用的实施方法是纵波垂直入射技术。但当容器内为低阻抗液体时, 固/液、固/气两种界面反射回波信号值的差异很小, 界面识别判定困难。基于界面声波理论, 提出一种小角度斜入射技术以增强声波在两种界面反射系数间的差异, 提高液位检测灵敏度。使用该技术, 对多种容器与多种液体组合界面进行了计算与试验, 结果表明, 最佳入射角与界面性质相关; 在最佳入射角条件下, 有、无液体状态下界面反射系数差异为垂直入射时的数倍, 大大提高了声波对界面的识别能力; 此时, 采用面积正方形法进行液位测量, 精度在零点几个厘米。

关键词: 液位测量; 斜入射; 超声; 侧壁

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2018)10-0022-04

Measurement of Low Impedance Liquid Level in Sealed Container by Oblique Incidence Ultrasound from Sidewall

MO Runyang^{1,2}, LIU Zhonglin¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Qinhuangdao Heping NDT Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Measurement of liquid level in sealed container from side wall is generally based on the difference of echo signal in solid-gas and solid-liquid interface. The technique of longitudinal wave vertical incidence was always used this method. However, it is unsuitable for the low impedance liquid because of small differences in the echoes amplitude. A new technique for measuring liquid-level utilizing angle wave is presented and demonstrated through simulation. Using this technique, the calculation and experiment of the composite interface of various containers and liquids are carried out. Results have shown that the optimum angle is related to the character of interface-material of container and the character of inner liquid. The difference of reflection coefficient at the best angle is higher than vertical incidence. The oblique incident wave is easier to detect and identify targets. The level measurement accuracy can reach a few tenths of centimeters while using the squared area method.

Key words: liquid level measurement; oblique incidence; ultrasound; sidewall

密闭容器内低阻抗液体液位测量是富有挑战性的课题。侧壁液位检测是很多在役容器内超声液位测量的常见方式, 其原理是基于声脉冲

对液体在有和无的状态下, 反射回波信号的差异来判断液面位置的^[1-2]。超声从容器外侧壁垂直入射至固-液或固-气界面, 在界面形成多次反射回波, 可基于界面首次反射回波幅度差异^[3-4]、多次反射回波信号的衰减规律^[5]、回波信号能量圈或包络面积^[6]等变化来评判气液界面位置。但当容器内液体的特性声阻抗较小时, 超声垂直入射技术却因固液阻抗严重不匹配、灵敏度低难以奏

收稿日期: 2018-07-05

作者简介: 莫润阳(1968—), 女, 博士, 副教授, 主要从事超声工程及检测研究

通信作者: 莫润阳, 601268771@qq.com

效。为了提高超声检测灵敏度, GREENWOOD^[7]提出可采用界面多次反射回波波列进行检测, 由此发展而来的, 基于多次回波幅度衰减规律及能量特点的方法^[6]还被用于检测多种液体的浓度和液体鉴别中^[8], 但随着被测液体介质阻抗的减小, 其测量误差迅速增大^[9], 即多次回波法在对具有低声阻抗的液体测量中依然无法获得理想的效果, 原因是界面首次反射回波对液体阻抗值变化具有其他高次回波都无法相比的敏感性^[3], 提高两种界面首次反射回波幅度的差异是提高反射回波技术检测灵敏度的根本。笔者基于对倾斜入射在固-气、固-液界面纵波声压反射规律的理论分析, 通过选择合适的人射角度使两种界面声压反射率差异达到最大, 从根本上提高了基于单界面脉冲反射回波法的密闭容器内低阻抗液位检测的灵敏度。

$$R_{pp}^{(2)} = \frac{2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \sin \beta_L \cos \alpha_L \cos \alpha'_s + 2 \sin^2 2\alpha'_s \sin \alpha'_s \cos \beta_L \cos \alpha_L - \eta \cos^2 2\alpha'_s \sin 2\alpha'_s \cos \beta_L}{2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \sin \beta_L \cos \alpha_L \cos \alpha'_s + 2 \sin^2 2\alpha'_s \sin \alpha'_s \cos \beta_L \cos \alpha_L + \eta \cos^2 2\alpha'_s \sin 2\alpha'_s \cos \beta_L} \quad (2)$$

式中: $\eta^2 = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$; ν 为固体材料泊松比; ρ_1, ρ_2 分别为固体、液体的密度。

由式(1),(2)可见, 声波倾斜入射到 SL、SA 界面, 纵波反射系数除了与入射角 α_L 有关外, 还与界面两侧介质特性声阻抗及固体材料的泊松比等有关。为了增大声波在 SL、SA 界面反射系数之差, 提高识别 SL、SA 界面的能力, 将 SA、SL 界面纵波声压反射系数之差 $|\Delta R_{pp}| = |R_{pp}^{(1)} - R_{pp}^{(2)}|$ 最大时对应的声波入射角度作为最佳入射角。下面从理论和试验两方面分别对容器与液体不同组合条件下的最佳入射角进行研究。

1.2 瓷套容器最佳入射角的数值计算

常见容器材料有钢、铝合金、陶瓷等, 液体介质选择汽油、硅油、水玻璃、水银, 以表 1 所示材料的基本参数^[13]计算界面的 $|R_{pp}| - \alpha$ 曲线。

表 1 数值计算所用材料相关参数

参数	材料							
	陶瓷	铝	钢	硅油	汽油	水玻璃	水银	
泊松比	0.30	0.34	0.28	—	—	—	—	
密度/(g·cm ⁻³)	7.7	2.7	7.8	0.86	0.70	1.70	13.6	
声速/(m·s ⁻¹)	7 000	6 260	5 900	1 059	1 250	2 350	1 450	

以输变电站常用的充油瓷套为例, 计算其最佳

1 理论与数值分析

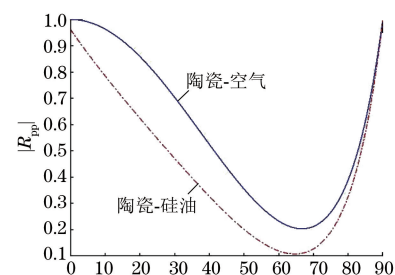
1.1 基本理论

超声纵波从容器外侧壁以 α_L 角斜入射至容器内壁与液体或气体介质形成的界面, 即固液(SL)或固气(SA)界面上, 其不仅产生波的反射和透射, 还伴随着波型模式转换。若用 P、S 分别表示纵波和横波, 固体、液体及气体的特性声阻抗分别为 Z_s, Z_l 和 Z_a , 当 P 波以入射角入射到 SA 界面时无折射波, 只有反射 P 波和 SV 波, 且对应反射角分别为 α'_L, α'_s 。据斯涅耳定理可得, SA 界面纵波反射系数 $R_{pp}^{(1)}$ 为

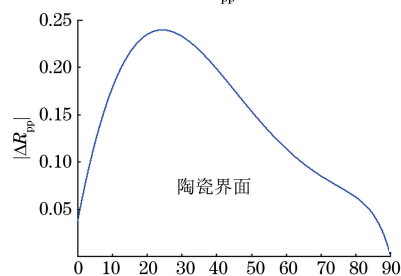
$$R_{pp}^{(1)} = \frac{\sin 2\alpha_L \sin 2\alpha'_s - \eta^2 \cos^2 2\alpha'_s}{\sin 2\alpha_L \sin 2\alpha'_s + \eta^2 \cos^2 2\alpha'_s} \quad (1)$$

同理, 当 P 波以 α_L 角从固体侧倾斜入射到 SL 界面时, 不仅有反射 P 波和 SV 波, 还有折射角为 β_L 的折射 P 波, 且纵波反射系数 R_{pp} 为

入射角, 并将此时的反射系数之差与垂直入射时的结果相比较。此时容器材料为电工陶瓷, 容器内充填低阻抗液体绝缘硅油(型号: TSF 451)。陶瓷-空气、陶瓷-硅油界面声压反射率 R_{pp} 均为负值, 为方便描述, 取其绝对值 $|R_{pp}|$, 其随入射角 α 变化的理论关系见图 1, 可见 $|\Delta R_{pp}|$ 在 $\alpha = 24.4^\circ$ 时取得最大值



(a) $R_{pp} - \alpha$ 曲线



(b) 液位检测最佳入射角

图 1 陶瓷-空气、陶瓷-硅油界面的 $R_{pp} - \alpha$ 曲线及液位检测最佳入射角

且 $|\Delta R_{pp}|_{\max} = 0.24$, 相比垂直入射时的 $|\Delta R_{pp}|_{\alpha=0} = 0.14$, 斜入射的值约为垂直入射时的近 2 倍。可见, 适当倾斜入射声波可大幅度扩大界面反射系数间的差异, 有效提高界面性质分辨的能力。

2 试验结果与讨论

使用可变角探头[见图 2(a)], 通过蜂蜜与容器壁耦合进行测试, 每隔 2.5° 记录反射波的首次回波声压峰值, 将数据拟合为曲线[见图 2(b)], 得到 $|\Delta R_{pp}|$ 与入射角的关系[见图 2(c)]。陶瓷/硅油界面最佳入射角理论值为 24.4° , 实测充油瓷套容器最佳入射角度为 18.6° , 造成误差的原因主要有理论模型的近似性及数值计算中所用材料参数与实际参数存在差异。试验中, 声波垂直入射至陶瓷/硅油与陶瓷/空气界面时, 两界面回波幅值差异为 2.0 dB; 而当声波以 18.6° 倾斜入射时, 两界面回波幅值差异高达 26.1 dB, 后者高于前者约 10 倍。

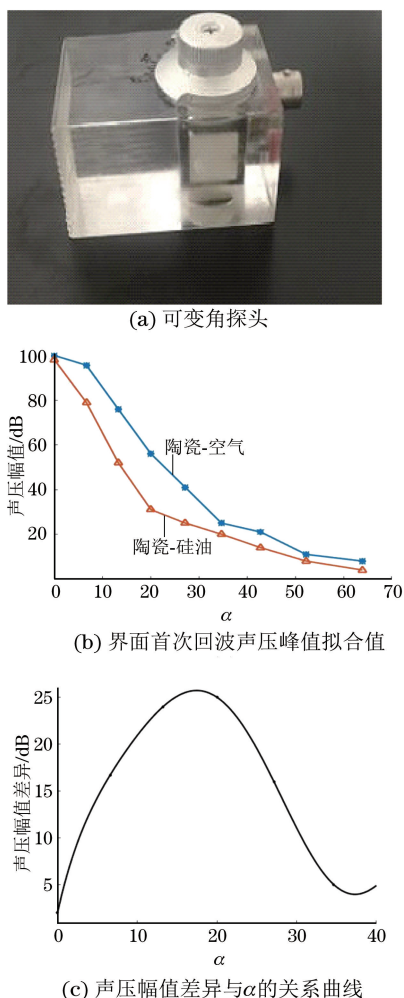


图2 探头图片与陶瓷与空气、硅油的界面最佳入射角试验测试结果

下面研究以最佳角度入射时液位的确定方法。若探头晶片为边长为 d 的方晶片, 在容器壁厚范围内不考虑声束扩散, 则超声垂直入射将在容器内壁处形成一边长为 d 的能量正方形, 该正方形集中了超声波束的主要能量, 如图 3(a) 所示。检测过程中, 超声探头沿着容器外壁自下而上移动, 当能量正方形的上缘低于液位时, 固液界面回波波形、幅度保持不变。同理, 当能量正方形的最下缘高于液位时, 得到固体与气体的波形且波形保持不变。波形开始变化的位置为固液界面能量正方形的最上端, 这个位置称为第一临界位置, 此时正方形中心距离容器底端高度为 H_{\min} ; 波形停止变化的位置为固气界面能量正方形的最上端, 这个位置称为第二临界位置, 此时正方形中心距离容器底端的高度为 H_{\max} , 则实际液位 H_r 为

$$H_r = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{2} \quad (3)$$

改变超声波入射角度, 将探头仍从下往上移动, 也会出现两个临界位置, 如图 3(b) 所示, 此时液位表达式(3)修正为

$$H_r = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{2} + \Delta h \quad (4)$$

式中: Δh 为探头晶片中心与能量正方形中心的距离。

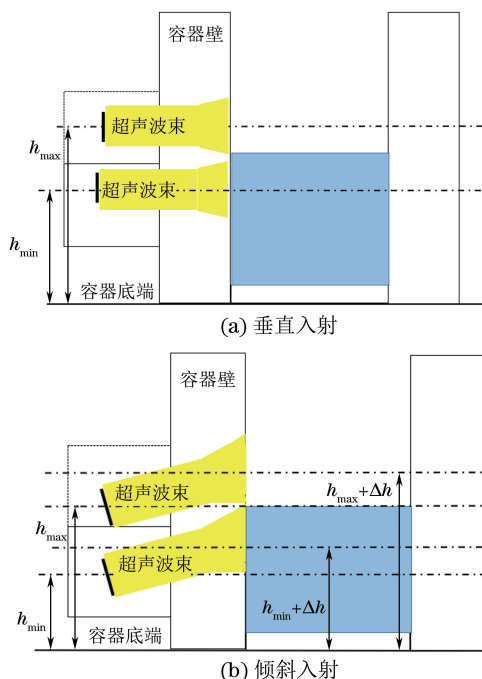


图3 垂直、倾斜入射液位评价原理示意

为对该测量方法的有效性、准确性进行评价, 以水为介质, 透明有机玻璃槽为容器, 将超声测试结果

与实际液位进行比较。实测有机玻璃/水界面最佳入射角为 8° , 记录此时的 H_{\min} 、 H_{\max} 位置, 对 Δh 修正值的计算结果为 0.28 cm, 液位测量结果见表 2。测量结果与实际值比较, 该法的测量精度在零点几个厘米。

表 2 有机玻璃/水液位测量结果 cm

第一临界位置	第二临界位置	测量液位	实际液位
9.30	11.50	10.68	10.40
9.50	11.70	10.88	10.40
9.50	11.75	10.90	10.40

3 结论

提出了一种小角度斜入射侧壁液位检测技术, 通过选择最佳入射角度、增大声波在固液与固气界面反射系数的差, 提高气液界面的识别灵敏度。结果表明, 最佳入射角条件下, 可使固液与固气界面反射系数的差值提高数倍, 提高的程度与界面性质有关; 不同的固、液组合最佳入射角不同; 该方法增强了容器内低阻抗液体液位的检测灵敏度, 但精度提高程度有限。

参考文献:

- [1] ZAKARIA Z, IDROAS M, SAMSURI A, et al. Ultrasonic instrumentation system for liquefied petroleum gas level monitoring[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2017, 45: 428-435.
- [2] 张芑, 章天需, 胡安伦. 侧壁式超声波液位计校准装置[J]. 上海计量测试, 2015(2): 17-19.
- [3] JOSHI D, KUMAR A, GUPTA R, et al. Sensitivity enhancement of concurrent technique of acoustic impedance measurement[J]. Journal of Metrology Society of India, 2013, 28(2): 79-83.
- [4] 祁宏昌, 梁双龙, 莫润阳. 脉冲回波对比法非介入测量液体声阻抗的灵敏度[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 122-127.
- [5] 翟灵慧, 苏明旭, 蔡小舒, 等. 超声多次回波反射法测量硅油粘度实验研究[J]. 计测技术, 2016, 33(2): 12-15.
- [6] BIN Z, WEI Y J, LIU W Y, et al. A liquid level measurement technique outside a sealed metal container based on ultrasonic impedance and echo energy[J]. Sensors, 2017, 17: 185.
- [7] ELVIRA L, VERA P, CAÑADAS F J, et al. Concentration measurement of yeast suspensions using high frequency ultrasound backscattering[J]. Ultrasonics, 2016, 64: 151-161.
- [8] 孟瑞锋, 刘振锋, 钟建军, 等. 基于超声多重反射法测量高衰减流体媒质声阻抗及浓度[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 156-160.
- [9] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012: 131-134.
- [10] 陈云雀, 何蕴龙. P 波倾斜入射时河谷地震动响应研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(6): 702-710.
- [11] 马宏伟, 陈文化, 宗琦, 等. P 波入射引起的水下输水隧洞地震响应研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(4): 194-202.
- [12] 刘应和, 卢盛华. 超声波检测实用技术[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2017: 10-26.

摘要 撰写

摘要应该开门见山, 直接给出研究目的。摘要不应简单地重复题名中已出现过的信息, 不要把引言和结论中叙述性的内容写入摘要, 在学科领域内专家和学者共知的内容不要写入摘要。对于科学实验类论文, 具体研究(实验)方法要包括实验用的主要设备和材料, 具体研究结果要包括关键的实验数据; 对于研究方法类论文, 可将研究方法的主要过程作为具体结果, 然后再加一个结

论; 对于研究观点类论文, 要把文章最主要的观点作为具体结果, 并给出结论; 对于综述类论文, 作者要表明自己的观点, 还应当给出对该学科领域发展具有指导性或前瞻性的意见。摘要的内容应在正文中出现, 不能有作者未来的研究计划, 不能出现图、表、参考文献序号和缩写词, 尽量不要出现数学公式。为保证摘要的客观真实性, 摘要应采取第三人称写法。