

超声波动态液位检测仪

王涵青

浙江省杭州第十四中学

项目摘要:

动态液位是日常生活和工业生产中必需监测的重要参数。日常生活中自来水储罐、沸水锅炉、大型鲜活水产品运输罐的液位都需要准确的检测,工业生产中更是存在大量的液体危险品储罐、高温高压下发生化学反应的气液鼓泡塔,其液位的准确检测直接关系到运输的安全和生产的正常进行。然而气体、液体进出储罐/装置引起的气体鼓泡、气体射流、雾沫夹带等现象致使液面处于动态变化,最终导致常规的液位检测技术难以实现准确测量。受“水瓶琴”经典声学现象的启示,本项目将超声波阻尼衰减原理和动态液位检测技术相结合,分别选取液体储罐和鼓泡装置作为研究实例,实验考察了动态液位与声信号能量之间的定量关系,并关联了两者的数学计算公式。由此提出了一种面向气液混合体系的超声波动态液位检测方法,并制备了样机。超声波动态检测仪能够应用于沸水锅炉、大型鲜活水产品运输罐、液体储罐、鼓泡塔等装置动态液位的实时检测,具有实时在线、简易可靠、绿色环保的特点。

目录

超声波动态液位检测仪.....	1
一. 研究背景.....	3
二. 研究过程.....	6
三. 实验装置和方法.....	9
四. 实验结果.....	11
4.1 液体储罐动态液位的测量.....	11
4.2 鼓泡装置的液位测量.....	12
4.3 实际装置的验证.....	15
五. 超声波液位检测仪样机.....	18
六. 困难分析和创新点.....	19
七. 结论和展望.....	20
八. 致谢.....	21
参考文献.....	21
团队成员简历.....	22
指导老师简历.....	23

1. 研究背景

受家用蒸锅蒸馒头时因水剧烈沸腾不能确定剩余水位的困惑（图 1），我不由地陷入了沉思：类似这类剧烈沸腾的液体，譬如在我们科学实验中加热试管中的液体，当液体沸腾时，往往需要把试管从酒精灯上移开，让它冷却下来，才能准确判断试管内的液体量。如果实验过程不能冷却呢？如果是不透明的金属试管呢？如果液体的沸腾是在密闭的不透明容器内发生的呢？我想再锐利的视线也无法穿透这“层层迷雾”吧？！而随之带来的疑问是：这类混杂有大量气泡的液体的液量判断是不是一个普遍性的难题呢？现代科技又是如何解决的呢？带着这些疑问，通过走访调查、实地观察、文献查询和专家访谈，发现：液位是日常生活和工业生产中必需监控的重要参数；虽然静态液位（静止液位）的检测技术已经相对成熟，然而更多**动态液位的检测**，尤其是**气液混合体系（含气的液体）的动态液位检测**至今仍是计量检测领域的难题。



图 1 蒸锅中难以确定的沸水液位

经过调研发现（图 2），日常生活中动态液位广泛存在，常见的需要确定动态液位的有自来水储罐、沸水锅炉、鲜活水产品运输箱等等各种容器。以鲜活水产品运输箱为例（图 3），为了满足鱼类、虾蟹对氧气的需要，大型鲜活水产品运输箱或运输舱通常配备强制流动循环泵以保证整箱水的上下流动，并在箱底部不断鼓入氧气，同时鲜活水产品运输箱在长途运输过程中需要定时用泵更换水，而在换水过程中需要箱内水位保持在最为合适的位置，既要防止水位过低导致鱼类缺乏足够的活动空间且容易在运输过程因水的大幅度晃动而受伤死亡，也要防止水位过高、充满全封闭运输箱致使鼓入的氧气进出困难且致使运输箱容易因内压太高而受损。因此，若能自动监测鲜活水产品运输箱内液位的实时动态变化情

况（尤其是活鱼运输船上的活鱼舱），无疑将大大降低操作工人的劳动强度，并大幅提高鲜活水产品运输的安全性。



(a) 自来水厂净水塔



(b) “楼外楼”活鱼运输车

图 2 生活中动态液位装置调研



(a) 小型活鱼运输箱



(b) 大型活鱼运输箱

图 3 活鱼运输箱

通过对物流行业和化工行业的实地调研及网络查询，作者发现与日常生活中的液位监控相比，工业生产中需要实时准确监控液位的装置比比皆是，且需求更为迫切，如各种液体危险品储罐及运输槽车、生物发酵罐、以气体和液体为原料的鼓泡塔反应器等装置（图 4）。对于日常生活中的小型容器，大都采用简单的测量工具或根据人为经验进行液位测量，或借助液位开关进行液位控制；而在物流运输、工业生产等行业中，装置的动态液位直接关系到生产的正常运行，其准确、可靠的监测对于安全生产和自动控制至关重要。而更具挑战性的是，不同于常规的静态液位检测，对于前述提及的伴有雾沫夹带（液体危险品储罐及运输槽车的装料和卸料过程等）、气体鼓泡（沸水锅炉、鲜活水产品运输箱、生物发酵

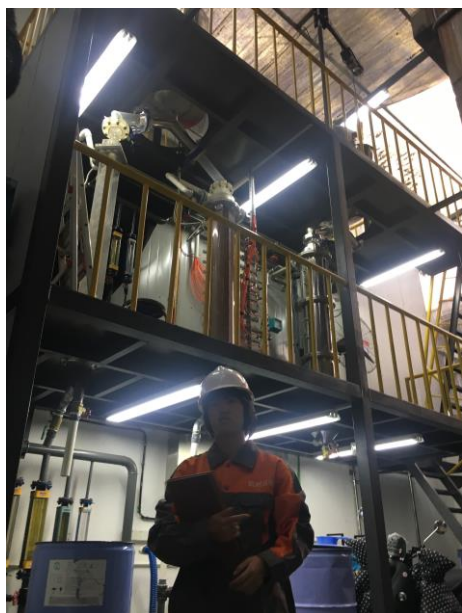
罐、大量的气液相鼓泡反应器等)、气体射流(醋酸射流反应器等)、或带有内构件(制备高标准清洁柴油的加氢反应器等)的连续或间歇操作的装置,其动态液位的准确测量至今仍然是多相流检测领域需要解决的难题之一^[1]。这一观点得到了中国计量测试学会多相流测试专业委员会委员、浙江大学黄志尧教授和中国石化集团公司专家杨宝柱教授的证实,专家们都热情鼓励作者尝试解决这一问题(图5)。



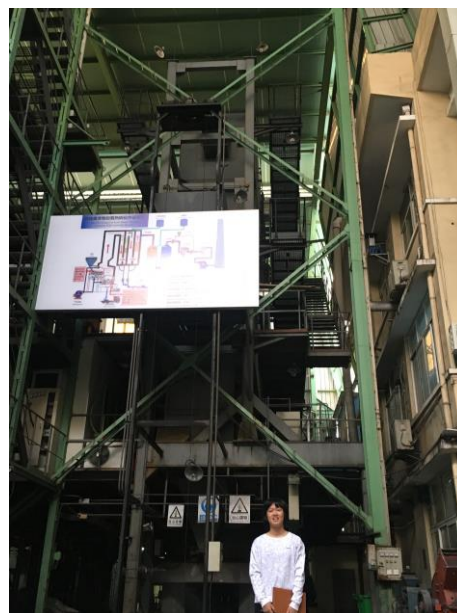
(a) 大型油罐



(b) 常规气液鼓泡塔



(c) 制备清洁柴油的加氢反应冷模装置
 (氢气鼓泡进入柴油)



(d) 制备醋酸的射流反应器
 (液体向下射流, 气体向上鼓泡)

图4 大型储罐和鼓泡装置的实地调研



(e) 与浙江大学教授交流



(f) 与中国石化专家交流

图 5 作者与检测领域的专家交流

本项目的研究目的是：寻找一种简单可靠、绿色环保的动态液位检测方法，能够用于气液混合体系动态液位的检测。

本项目的研究意义在于：提供一种动态液位检测方法，能够用于家用蒸锅、沸水锅炉、大型鲜活水产品运输罐、液体储罐、鼓泡塔等装置动态液位的实时检测，提高日常生活的便捷性和工业生产的安全性。

2. 研究过程

2.1 研究现状

通过在“百度学术”上进行文献检索和分析发现，常用的液位计有静压型液位计、雷达型液位计、超声波液位计、电容式液位计和核辐射液位计。静压型液位计适合液体物料的液位测量，是一种侵入式的液位测量方法，使用范围有限；电容式液位计受测量介质的影响较大；核辐射液位计不能连续地监测料位高度的变化，而且使用放射性元素可能存在放射性污染；雷达型液位计和超声波液位计对人与环境的影响很小，在工业生产中得到广泛地应用。其中，雷达型液位计对测量介质的要求较低，可以稳定准确地测量，但是雷达型液位计在测量波动液面时，尤其测量鼓泡液面、射流液面和雾沫液面时存在着有效回波减少、杂波增加等问题。此外，雷达型液位计电子电路相对复杂，产品成本较高。超声及其应用是近代声学发展最迅速的分支^[2]，与雷达液位计相似，超声波液位计采用声波的反射原理，以气体、液体或固体为传播介质，通过时差法进行物位测量^[3]，对于静止液位的测量具有广泛的应用。

虽然超声波液位计是一种对人体和环境安全无害的液位计, 具有结构简单、价格便宜的优点, 但是目前基于反射原理的超声波液位计的检测信号来自机械波, 而机械波的传播必须借助一定的介质, 因此其应用范围受测量介质的影响较大, 且在设备内部安装维护困难。例如, 测量结果受温度和压力的影响较大, 因而无法在高温高压操作的化学反应器上正常安装和准确测量液位^[4]。特别地, 当存在雾滴、鼓泡、蒸汽、粉尘、内构件等不均匀介质时, 超声波能量衰减较大, 液位计量程大幅减小、精度降低^[5]。因此, 常规的基于反射原理的超声波液位计无法准确测量带有雾沫夹带、气体鼓泡、气体射流和复杂内构件等动态液位, 如前述提及的连续进出料的液体储罐、沸水锅炉、鲜活水产品运输箱、生物发酵罐以及在化学工业中广泛存在的鼓泡塔反应器的液位。

由上述分析可知, 目前常用液位计尚不能应用于含有气泡/气流的动态液位测量, 亟需开发一种能够适应复杂环境、精度可靠、非侵入式、绿色环保的物位计, 以保障日常生活、物流运输、工业生产的安全性和可靠性。

2.2 研究思路

作为一种依赖介质传播的机械波, 在传播过程中声音的幅度和频率会受介质密度、材质、内部结构的影响。声音的衰减受到传播介质影响很大, 其在气体、液体和固体中的衰减幅度依次减小。例如心跳产生的声音(机械波)经过传播介质—空气到耳朵时, 其响度(即机械波的振幅)已经衰减到人自身无法听到, 而心跳声经过听诊器则可以清晰地传播到人的耳朵。声音在介质中的衰减特性说明利用固体传播测量液位的方法优于目前传统的基于反射原理和以气体作为传播介质的液位检测仪。因此, 当作者在学习《物理》课程的“声音”部分时, 面对经典的“水瓶琴”问题(图 6(a))——“用小棒敲击杯子时, 水位高的杯子因水的阻尼大, 在振动时受到阻力大, 杯子不易振动, 故振动的频率低、音调较低”, 受此启发: 我们能否可以通过所听到的敲击固体壁面的声音来反推出杯中液位的高低呢?

在科学老师的指导下, 通过检索文献资料^[6-7], 作者发现声音在介质中传播过程中的衰减归因于材料阻尼和辐射阻尼两部分, 如图 6(b)所示。材料阻尼造成的信号衰减程度由壁面材料决定, 而辐射阻尼造成的信号衰减由容器中的物料决定。由于材料阻尼在实验条件下恒定不变, 因此, 超声波信号衰减的程度主要由

容器中物料的性质决定, 在上述“水瓶琴”中即由杯中的液位决定, 液位越高、衰减越大, 从而可以实现液位的检测。由此说明, 我们能够通过所听到的声音来反推出杯中液位的高低!

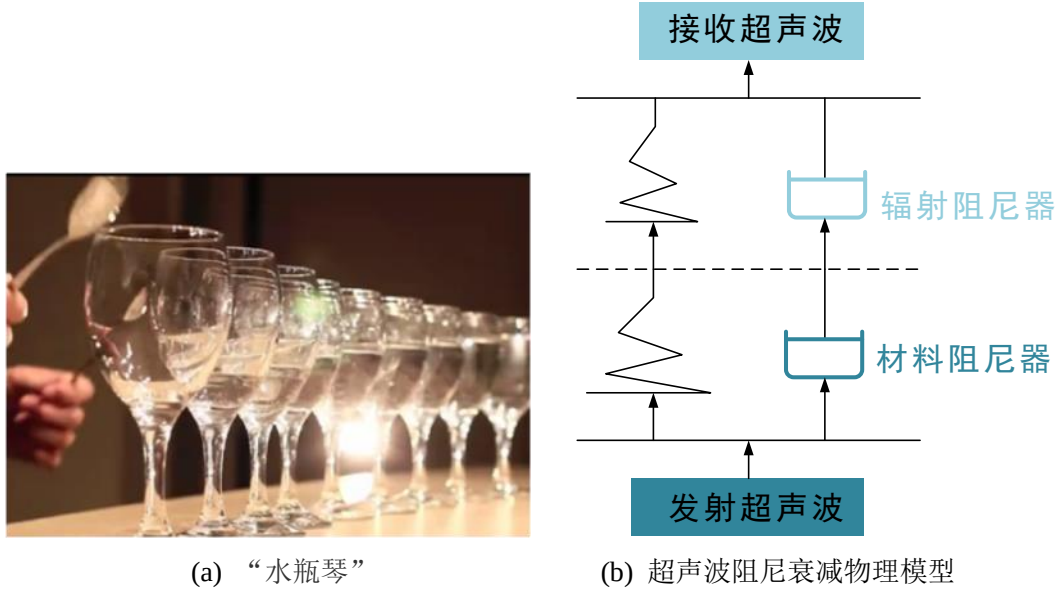


图 6 基于超声波阻尼衰减的液位检测原理

通过阅读文献资料发现, 声音在介质中传播过程中并不是简单地线性衰减, 而是呈**指数型衰减**。在科学老师的指导下, 由现有成熟的声学知识^[8] (声信号的振幅衰减理论) 经过整理得到了声信号随液位呈指数衰减的数学表达式, 即基于超声波阻尼衰减的液位检测模型, 简称**超声波液位检测计算公式**:

$$y = x \exp[C(1-x)] \quad (1)$$

其中:

$$y = (E_0 - E) / (E_0 - E_L), \quad x = H / L$$

式中, E_0 代表液位在发射传感器位置时, 接收传感器接收到的信号能量; E 代表液位高度为 H 时接收到的能量, E_L 代表液位高度为 L , 即液位在接收传感器位置时接收到的能量。由此, 根据超声波液位检测计算公式, 根据检测得到的声音信号, 计算得到液位 H 。本项目分别对液体储罐和鼓泡装置的液位进行测量, 并在实际装置上进行试验, 检验了超声波液位检测计算公式的实用性和可靠性。

综上所述, 受“水瓶琴”现象的启发, 在科学老师的指导下, 作者根据超声波衰减理论, 提出一种新型的动态液位测量方法, 即通过在容器外壁发射超声波 (“发声”), 随后对在容器外壁上接收到的声信号 (“听声”) 和液位之间建立起

数学关联式, 从而获取液位的信息; 在此基础上, 分别选取液体储罐和鼓泡装置作为两种典型的研究实例, 在实验室开展动态液位的测量研究, 建立动态液位的超声波测量方法; 最后, 在实验的基础上制作了超声波动态液位检测仪的样机, 并在实际装置上进行验证, 最终期望能够尝试解决气液混合体系动态液位的精确测量问题。

3. 实验装置和方法

3.1 实验装置

为了模拟气液混合体系的鼓泡装置, 我们将钻有一排小孔的管子作为气泡发生器, 插入到有机玻璃圆柱桶中, 气体由汽车维修店的气泵提供。液位检测装置如图 7 所示, 实验中采用的液体为水, 可以从上方注水口注入, 也可从下部带阀门的出水口流出, 从而调节装置内的液位。根据装置中物质的类型可以分为纯液体的单相体系和气、液两种物质共存的两相体系, 其中单相体系选取典型的液体储罐作为实验装置, 如图 7(a)所示; 气液两相体系选取鼓泡装置(在液体储罐中通入气体即为鼓泡装置)作为实验装置, 如图 7(b)和图 7(c)所示。



图 7 超声波液位检测实验装置实物图

实验中所使用的超声波液位检测示意图如图 8 所示, 由信号发生部分和信号采集部分组成。信号发生部分包括发射传感器和信号发生器, 信号采集部分为由接收传感器、信号放大器、信号采集卡和计算机组成。这些声波的常用配件与汽车的倒车雷达类似, 可以在淘宝网上购买, 具体清单见表 1。安装时, 发射传感器位于装置的下方, 距离装置底部 50 mm; 接收传感器置于装置的上方, 与发射传感器间的距离为 400 mm。超声波液位检测仪输出的接收信号电压通过采集卡

和计算机记录。超声波液位检测系统所测得的结果都与实际值（通过观察、钢尺测量）进行比较。

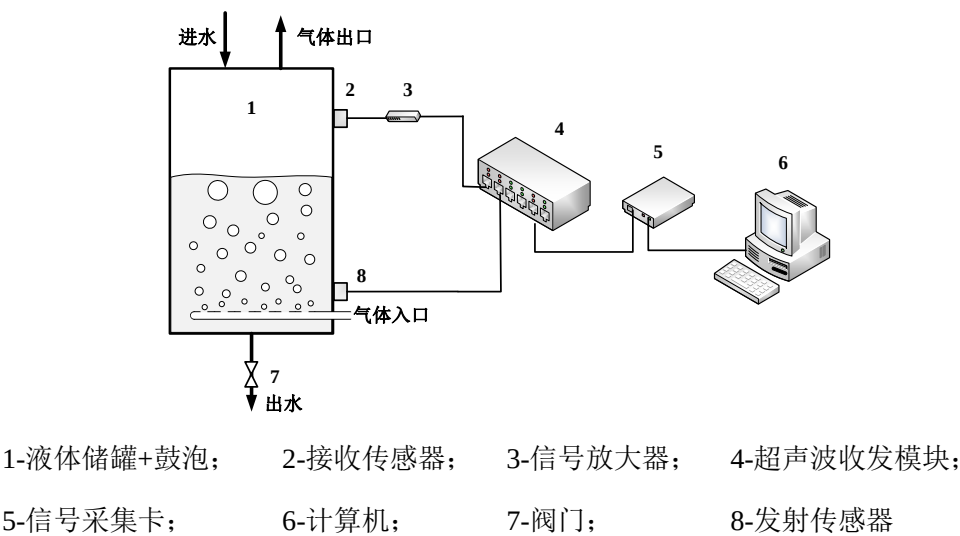


图 8 超声波液位检测示意图

表 1 设备型号和价格的清单

设备名称	生产厂家	规格型号	单价（元）	数量	总价（元）
超声波收发模块	长沙鹏翔电子科技有限公司	ULL-1050	1000	1	1000
信号放大器		PXPA	300	1	300
超声波发射传感器	金磁科技	NU40E60TR-1	180	1	180
超声波接收传感器	金磁科技	NU40E60TR-1	180	1	180
传感器电缆	深圳八靓电子	BNC 公头、L5 母头	18	2	36
专用耦合剂	南控仪表	TCA-1	35	1	35
合计（元）	1731				

3.2.2 实验方法

（1）储罐动态液位测量

在动态液位实验中，首先关闭出水阀门，液体从上部的液体注水口注入，液位从 0 开始不断增加至接收传感器处。实验过程通过摄像机进行记录，接收电压由采集卡和计算机记录。

(2) 鼓泡装置液位测量

鼓泡装置液位检测包括三类实验, 第一类实验为鼓泡装置中“拟稳态”液位的检测, 由于液体与气泡的相互作用导致鼓泡装置的液位处于不断波动之中, 因此取一段时间内液位的平均值作为“拟稳态”液位; 第二类实验为鼓泡塔中液位连续变化过程的检测, 其中气体进口位于发射传感器和接收传感器之间; 第三类实验为鼓泡塔中鼓泡区液位连续变化过程的检测, 其中气体进口位于发射传感器和接收传感器下方。

4. 实验结果

4.1 液体储罐动态液位的测量

采用超声波液位检测仪对储罐的动态液位进行测量, 储罐在连续加水、放水过程中接收信号随时间的变化如图 9 所示 (图 9 由检测仪上直接截屏得到)。图 9 中, 横坐标为时间, 纵坐标为超声波液位检测仪输出信号。由图 9 可知, 在加水过程中, 在 $H=0\sim 50\text{ mm}$, 液位位于发射传感器下方, 接收信号幅值变化较小; 在 $H=50\sim 100\text{ mm}$, 当液位逐渐上升经过下方发射传感器时, 接收信号迅速下降并趋于平稳, 证实了超声波液位检测仪作为液位开关的能力; 在 $H=200\sim 400\text{ mm}$, 当液位到达上方的接收传感器并停止加水后, 检测信号逐渐增大直至趋于平稳, 且最终平衡值大于加水前的初始值。而在放水过程中, 检测信号迅速下降, 当液位逐渐下降经过下方的发射传感器时, 检测信号又迅速回升并最终稳定在加水前的初始值。将发射传感器和接收传感器互换位置后进行重复实验, 也得到类似的变化规律。实验结果表明, 储罐中液位连续变化过程中, 液体的连续加入会持续对液面形成冲击, 并引起液位波动, 可能导致输出信号示数未能呈现出单调变化, 说明超声波液位检测仪不具备监测储罐中连续液位变化的能力; 但是, 液位连续增加或降低经过装置下方的传感器时, 超声波液位检测仪的示数均能有快速、明确的反应, 这充分表明超声波液位检测仪完全能够作为液位开关使用。

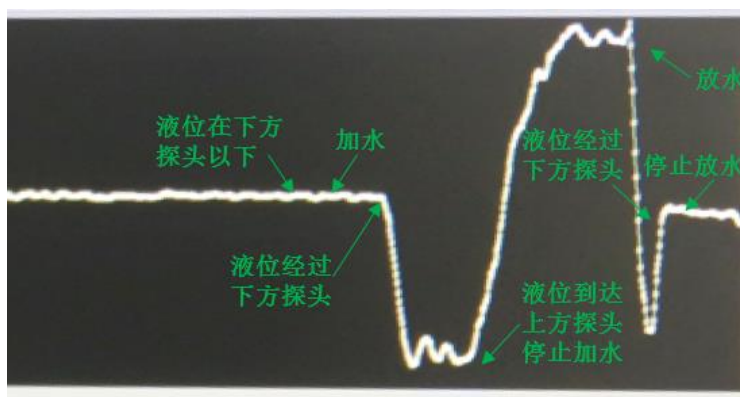


图 9 动态液位（加水、放水过程）测量时接收信号幅值随时间的变化（截屏图）

（图中：横坐标为时间，s；纵坐标为超声波液位检测仪输出信号，V）

4.2 鼓泡装置的液位测量

4.2.1 “拟稳态”液位的测量

“拟稳态”液位测量的实物图如图 10 所示，实验前向鼓泡塔装置中注入纯水，分别将水位控制为 22、25、28、31cm，然后开始鼓泡进行液位测量的实验。

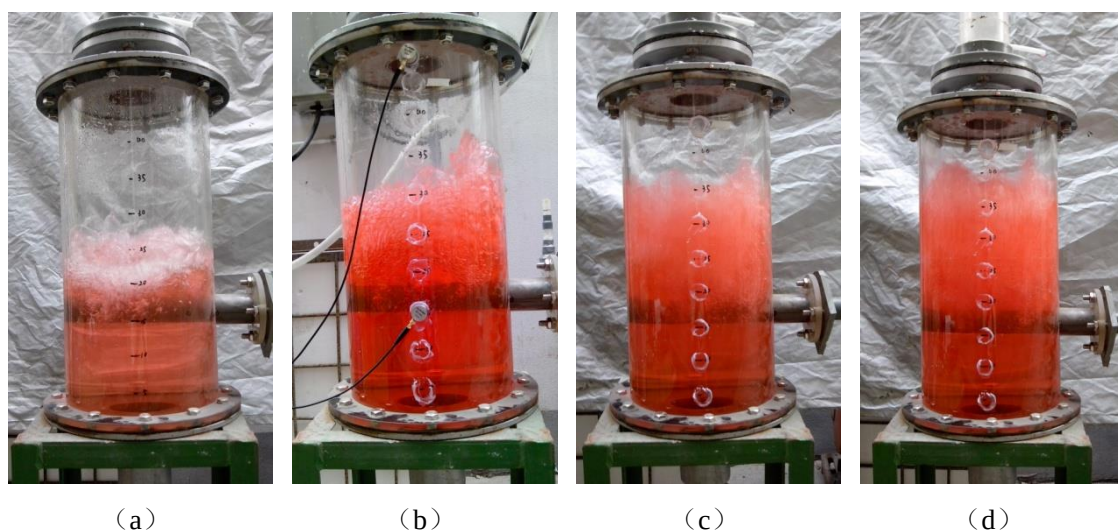


图 10 鼓泡塔“拟稳态”液位测量实物图

(a) 静液位为 22 cm 时鼓泡液位位于 25-30 cm；(b) 静液位为 25 cm 时鼓泡液位位于 30-35 cm；
(c) 静液位为 28 cm 时鼓泡液位位于 35-40 cm；(d) 静液位为 31 cm 时鼓泡液位位于 40 cm 附近。

液面之上的接收传感器所采集的声信号能量随液面高度的变化如图 11 所示。由图可见，声信号能量随着液位的升高而降低，且下降的速率在减小。因此，能够根据特定频率声信号衰减量与液位之间的数学关系式来预测鼓泡装置中的液位高低。采用超声波液位检测计算公式（式 1）对实验数据进行关联计算，如

图 12 所示。由图可见，计算值（超声波液位检测仪的测量值）和实际值的平均相对误差为 1.36%，表明超声波仪器测量值与实际值误差较小，超声波液位检测仪可以用于鼓泡塔“拟稳态”液位的测量。

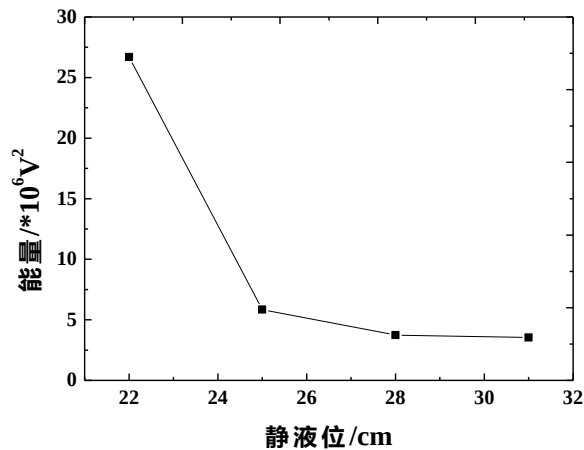


图 11 接收到的声信号能量与静液位之间的关系

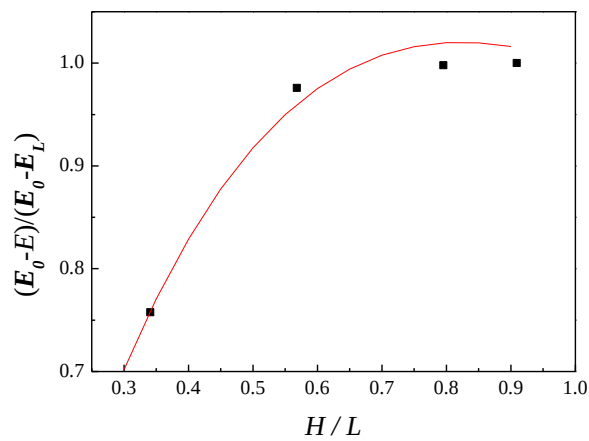


图 12 鼓泡装置无因次声能量随无因次液位高度的变化

4.2.2 动态液位的测量

鼓泡装置第二类实验——动态液位检测实验结果如图 13 所示。由图 13 可知，在加水过程中，当液位逐渐上升经过下方发射传感器时，检测信号迅速下降；当液位进一步升高进入鼓泡区后，由于气泡的存在，声信号的衰减程度大，检测信号一直维持在较低水平。在放水过程中，当液位处于鼓泡区时，检测信号仍然维持在较低水平；当液位离开鼓泡区时，检测信号有小幅波动，并呈现增长趋势；当液位经过下方发射传感器时，检测信号又迅速回升并最终稳定在加水前的初始值。将发射传感器和接收传感器互换位置前后进行多次重复实验，都得到相同的变化规律。实验结果表明，当鼓泡装置中液位连续变化时，超声波液位检测仪的示数未能呈现出单调变化，不具备监测鼓泡装置中连续液位变化的能力；但是，

当液位连续增加或降低经过下方传感器时，超声波液位检测仪的示数均能有快速、明确的反应，且重复性很好。这表明超声波液位检测仪完全可以用作鼓泡装置的液位开关。

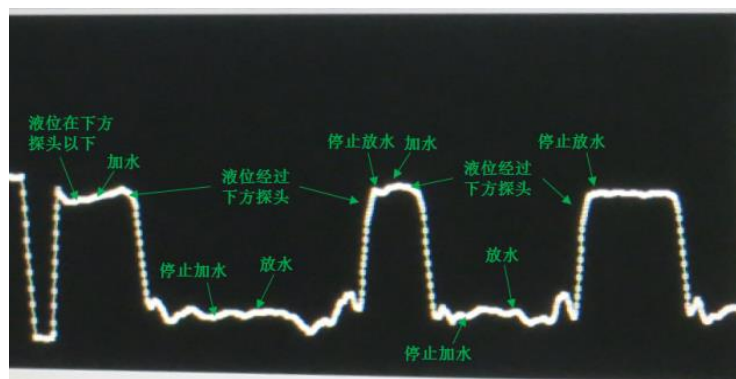


图 13 鼓泡装置动态液位测量时接收信号幅值随时间的变化（截屏图）

（图中：横坐标为时间，s；纵坐标为超声波液位检测仪输出信号，V）

鼓泡装置第三类实验——鼓泡区液位检测实验结果如图 14 所示。由图 14 可知，在加水过程中，当液位逐渐上升经过下方发射传感器时，检测信号迅速下降；当液位进一步升高时，检测信号随着液位的升高而线性降低；停止加水后，液位趋于平稳，检测信号也趋于平稳。在放水过程中，检测信号随着液位的降低而线性增大，当液位经过下方传感器时，检测信号迅速回升并最终稳定在加水前的初始值。实验结果充分表明，当鼓泡装置中鼓泡区液位连续变化时，超声波液位检测仪的示数呈现出较好的线性变化规律，说明其具备测量鼓泡装置中鼓泡区连续液位变化的能力；与此同时，当液位连续增加或降低经过下方传感器时，超声波液位检测仪的示数同样有快速、明确的反应。这进一步证明了超声波液位检测仪可以作为鼓泡装置中液位开关使用。

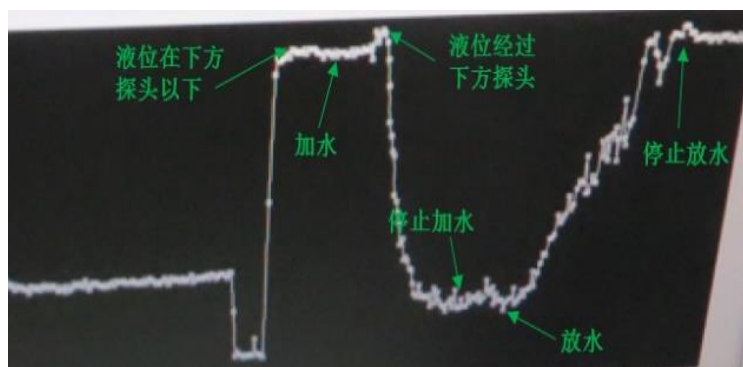


图 14 鼓泡装置中鼓泡区液位测量时接收信号幅值随时间的变化（截屏图）

（图中：横坐标为时间，s；纵坐标为超声波液位检测仪输出信号，V）

综上所述, 超声波液位检测仪虽然不能检测液体储罐液位的连续变化, 但能够作为具有较高灵敏性的液位开关功能; 超声波液位检测仪完全可以用作鼓泡装置的液位开关, 且同时具备检测鼓泡区连续液位变化的能力, 完全能够应用于气液混合体系动态液位的在线测量。

4.3 实际装置的验证

4.3.1 活鱼运输箱液位检测

为方便试验和对比分析, 本实验选取较为低矮的“楼外楼”活鱼运输箱, 实测液位采用常规的钢尺测量。活鱼运输箱液位检测的装置如图 15 所示。检测系统由信号发生系统和信号采集系统组成, 发射传感器距离底部 0.1 m, 发射的信号频率为 200 kHz, 接收传感器距离底部 0.8 m。



图 15 “楼外楼”活鱼运输箱液位检测实物图

超声波能量和实测液位随时间变化如图 16 所示, 采用超声波液位检测计算公式 (式 1) 进行计算关联, 结果如图 17 所示。实验结果表明, 计算值 (超声波液位检测仪的测量值) 和实际值的平均相对误差为 5.49%, 表明超声波液位检测仪可以较为准确预测活鱼运输箱的液位。目前广泛应用的高运输效率的大型鲜活水产品运输装置 (运输车或运输船), 如果选择超声波液位检测仪, 可以实现对动态液位的实时在线检测, 彻底改变运输装置液位监控的人为经验性, 保障运输的安全性和可靠性, 同时也大幅降低操作工人的劳动强度。

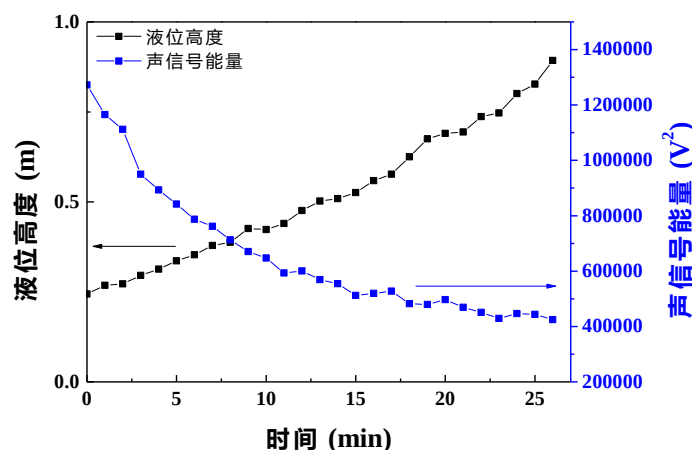


图 16 活鱼运输箱液位高度与超声波能量之间的关系

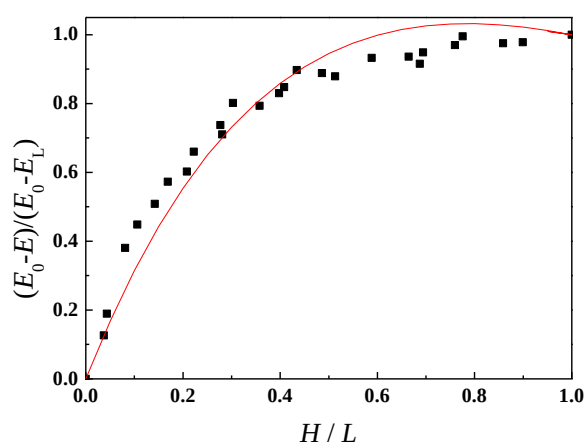


图 17 超声波液位检测仪和钢尺实测液位的对比

4.3.2 鼓泡塔液位检测

在某石化企业的柴油加氢反应制备高标准清洁柴油的鼓泡塔装置上,采用超声波液位检测仪对鼓泡塔液位进行测量,实验装置如图 18 所示。超声波动态液位检测仪的发射传感器距离装置安装地面 2.3 m,发射的声信号频率为 200 kHz,接收传感器距离安装地面 3.25 m。

鼓泡区液位实测值以一个刚启用的静压液位计的测量值作为实际液位高度,其和超声波能量随时间变化如图 19 所示。静压液位计为插入式测量仪器,刚刚启用时测量值较为准确,长期使用后因引压口经常被堵而难以准确测量。采用超声波液位检测计算公式(式 1)对模型参数进行计算关联,结果如图 20 所示,计算值(超声波液位检测仪的测量值)和实际值的平均相对误差为 5.78%。由图可知两者误差较小。工业试验结果表明,超声波液位检测仪可以较为准确地测量气液鼓泡装置鼓泡区的液位。下一步可以通过增加多个接收传感器,并降低环境噪声对信号的干扰,以进一步提高超声波液位检测仪的精度。



图 18 鼓泡塔液位检测工业装置实物图

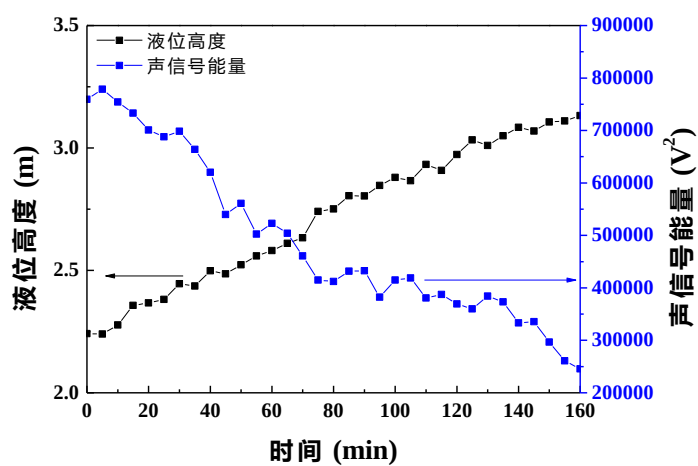


图 19 液位高度与超声波能量之间的关系

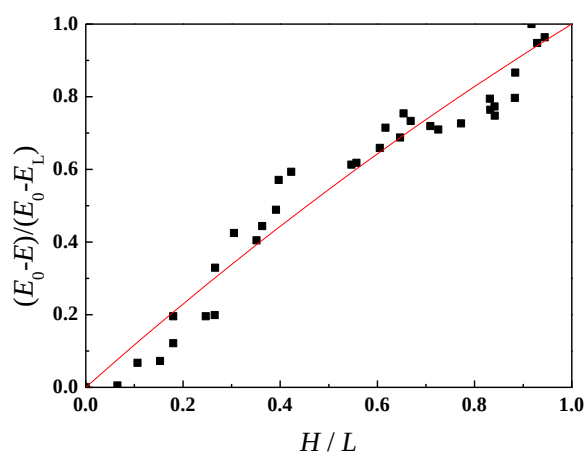


图 20 超声波液位检测仪和静压液位计测量液位的对比

此外, 超声波液位检测仪在小型容器鼓泡装置(沸水烧杯)中也得到验证(图 21), 和实际值的平均相对误差为 9.62%。在小型容器中, 如果要进一步提高检

测精度，在硬件上需要减少传感器的尺寸，如使用微型传感器（见图 22），这是下一步需要做的工作。



图 21 小型容器沸水液位测量实物图



图 22 微型超声波传感器实物

通过对实际活鱼运输箱和气液鼓泡反应器工业装置的动态液位检测试验，证明了本项目提出的超声波动态液位检测方法可以较为准确地测量气液混合体系的动态液位。

5. 超声波液位检测仪样机

根据建立的超声波液位检测系统示意图（图 8），结合工厂提出的信号传输和方便使用要求，委托某仪表制造厂家将接收传感器、发射传感器、信号放大器、信号采集卡等集成在一个圆形铸铁盒子中，完成了超声波液位检测仪样机的制备。实物照片如图 23 所示。

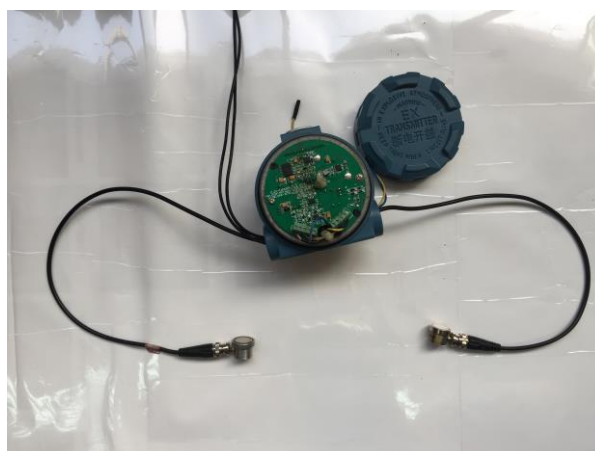


图 23 超声波液位检测仪样机实物照片

超声波液位检测仪的性能参数设置如下:

- (1) 发射端电压可调 (20~50 伏);
- (2) 发射端频率可调 (100 kHz~500 kHz);
- (3) 发射传感器和接收传感器的间距可调 (10~30 m);
- (4) 采用有线连接;
- (5) 供电: 24 伏直流电;
- (6) 输出: 4-20 毫安。

最后, 针对工业生产中广泛使用的大型气液鼓泡装置, 作者提出了一个简单的超声波液位检测示意图, 如图 24 所示。为提高测量精度, 测量过程中同时使用 2 台液位计进行检测, 其中 1 台同时发射超声波信号和接收超声波信号, 另外 1 台只接收超声波信号。根据工厂常规要求, 超声波液位检测仪的输出信号均送入现场控制器进行处理, 也可以用网线送到计算机进行存储、显示或进一步处理。

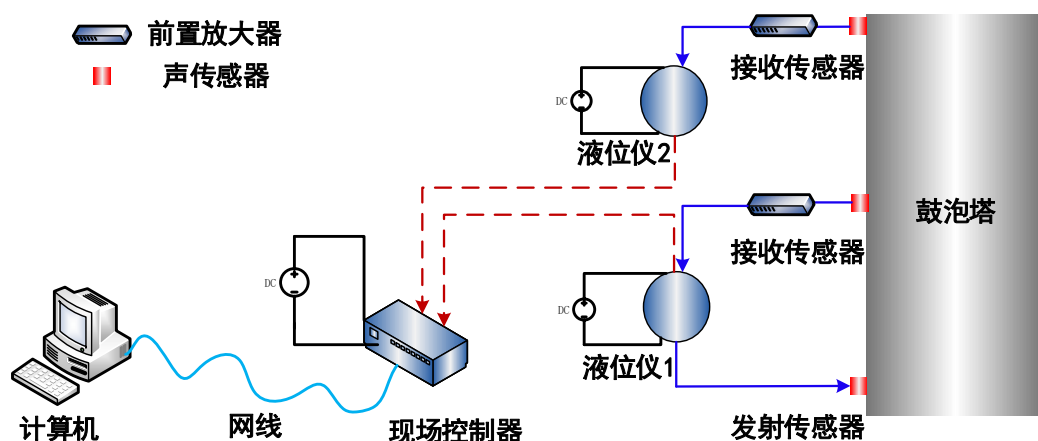


图 24 鼓泡塔超声波液位检测示意图

6. 困难分析和创新点

项目的困难分析:

(1) 根据作者已有的物理知识, 已经知道声音在介质中传播时成指数型衰减, 那如何用数学公式描述出来呢? 通过认真查询资料, 在科学老师的指导下, 最终获得了超声波液位检测的计算公式。

(2) 鼓泡装置的液位检测实验中, 刚开始时由于实验步骤的错误——先注水、

再通气，发生液体倒灌到气体管路中，最后制定了正确的实验步骤——先通气、再注水；同时，鼓泡装置中注入水的液位过高将产生很高的压降，如果空气压力过小，就无法鼓泡，所以必须选择高压气泵。

（3）在实际装置上试验时，工厂要求不能直接将发射传感器、接收传感器、信号发生器、信号放大器、信号采集卡等零散的配件简单连接后使用，必须集成在一起使用。因此，委托仪表厂家定做圆形铸铁盒子，将配件集成，方便使用。

项目的创新点：

（1）由“水瓶琴”得到启示，发现声能量的衰减随液位的升高而增加，由此提出了适用于气液混合体系动态液位的超声波检测方法，能够应用于家用蒸锅、沸水锅炉、大型鲜活水产品运输罐、液体储罐、鼓泡塔等装置动态液位的实时检测。

（2）检测仪在设计时，已充分考虑实际应用，将声波配件集成圆形铸铁盒子中，完成了超声波液位检测仪样机的制备，为其市场推广打下了较好的基础。

7. 结论和展望

本项目将超声波阻尼衰减原理和液位检测相结合，分别选取液体储罐和鼓泡装置作为研究实例，考察了动态液位与声信号之间的关系。由此提出了面向气液混合体系动态液位检测的新型超声动态液位检测方法，并开发简易实用、具有较高精度的超声动态液位检测仪样机，可应用于家用蒸锅、沸水锅炉、大型鲜活水产品运输罐、液体储罐、鼓泡塔等装置动态液位的实时测量，技术具有实时在线、简易可靠、绿色环保的特点。

目前，超声动态液位检测仪对液体储罐动态液位和鼓泡装置“拟稳态”液位的连续变化还不敏感。因此，在以后的工作中，我将继续分析声波信号，尤其是从气液交界面发出的声波信号入手进行研究，完善超声动态液位检测仪的功能。同时，声波信号的传输如果能够像 WIFI 上网一样无线传输，那么超声动态液位检测仪的使用将更加方便。

8. 致谢

在本项目的研究过程中,从以往提出“水质生物安全的声波监测方法”时的“听声者”到本项目的“发声者”和“听声者”组合,我认识了很多“发声”的器材和技术,也提高了包括调研问询、网络检索、自学探索等在内的研究性学习能力,也锻炼了实验动手能力和工厂实践能力。最后,我要感谢很多无私帮助过我的人,包括我的科学老师、检测领域的两位专家、在实地调研过程中给予我热情介绍的各位技术人员等,同时要感谢楼外楼活鱼运输车师傅、自来水厂、热电厂、石化厂给我提供试验的机会,向他们表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] 张总,王建莉,基于机器视觉的液位检测与控制系统设计,自动化与仪表,2017,32: 49-51.
- [2] 声学基础简介,中国科学院声学研究所网站, <http://www.ioa.ac.cn>
- [3] 高超,声波物位计的研制[D].电子科技大学,2010.
- [4] 马海珊,程江华,雷达和超声波物位计选型对比分析[J].科技创新与应用,2016,19: 12-13.
- [5] 张全兴,超声波非均匀介质传播衰减特性研究[D].沈阳工业大学,2015.
- [6] 周晓军,游红武,程耀东,含孔隙碳纤维复合材料的超声衰减模型[J].复合材料学报,1997,3: 100-107.
- [7] 刘飞,付建红,张智,许亮斌,超声波在钻井液中传播衰减理论研究[J].石油钻采工艺,2012,34: 57-59.
- [8] 何祚镛,赵玉芳.声学基础[M].南京大学出版社,2005.

团队成员简历

王涵青

一、学习经历

2018.06 至今 浙江省杭州第十四中学
2015.09-2018.06 杭州市大成岳家湾实验学校（初中）
2009.09-2015.06 杭州市大成岳家湾实验学校（小学）

二、曾经获得的奖励和发表论文专利

2019 年 2018-2019 环境马拉松中国赛区一等奖
2018 年 全国青少年科技创新大赛二等奖
 浙江省青少年科技创新大赛一等奖
2017 年 杭州市青少年科技创新大赛二等奖
2016 年 全国中学生水科技发明比赛暨斯德哥尔摩青少年水奖中国
 地区选拔总决赛三等奖
2015 年 杭州市青少年科技创新大赛三等奖
 撰写论文：基于声发射信号的水质生物安全监测
 申请专利：水质安全的生物声波监测方法
2014 年 剑桥杯全国学生能全历奇英语大赛杭州赛区二等奖

指导老师简历

杨遥, 男, 1989 年 9 月生。2011 年 7 月毕业于浙江大学化学工程与生物工程学院, 2016 年获工学博士学位, 随后继续在浙江大学从事博士后研究工作。研究方向为多相流检测与多相反应器, 在相关领域发表文章 10 余篇。