

# 不同流体介质流量测试技术与仪器研制

马来增<sup>1</sup>, 李力行<sup>1</sup>, 薄其利<sup>1</sup>, 丁涛<sup>1</sup>, 梁军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中石化胜利油田分公司东辛采油厂工艺所, 山东 东营

<sup>2</sup>荆州市明德科技有限公司 湖北 荆州

收稿日期: 2023年3月9日; 录用日期: 2023年4月21日; 发布日期: 2023年4月28日

## 摘要

由于油田酸化、防砂、调剖、注聚等流量检测工作环境复杂多变, 而现有各类型流量计都无法完全适应高压多介质流体测量。为此, 针对高压环境下强腐蚀性流体、含聚合物非均质流体和高含砂流体, 开展了不同流体介质流量测试技术研究, 并研制出一套能同时满足注水、酸化、调剖、防砂等油田现场施工所需的高精度流量测量装置。结果表明: 通过双通道超声流量计安装在管道上, 可实现对在作业的井的在线监测, 可实时测量流量, 为运行人员监测主变运行状态提供了可视、可靠的数据支撑, 提高了酸化等作业工作的可靠数据; 双通道超声流量计安装在固定直管段上, 简化了安装流程, 大大提高了工作效率, 有益于系统的安全平稳运行; 仪器安装简便, 为外贴式, 无需管道断流, 调整探头距离即可对不同介质进行测量, 也不会影响运行的稳定性, 具有一定的推广应用价值。

## 关键词

油田液体, 流量检测, 流量计, 测试技术, 测试仪器, 研制

# Technology and Instrument Development of Flow Measurement in Different Fluid Media

Laizeng Ma<sup>1</sup>, Lixing Li<sup>1</sup>, Qili Bo<sup>1</sup>, Tao Ding<sup>1</sup>, Jun Liang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Process Institute of Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying Shandong

<sup>2</sup>Jingzhou Mingde Technology Co., LTD., Jingzhou Hubei

Received: Mar. 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Due to the complex and varied working environment of flow detection, such as acidification, sand control, profile control and polymer injection, existing flowmeters are unable to fully adapt to

文章引用: 马来增, 李力行, 薄其利, 丁涛, 梁军. 不同流体介质流量测试技术与仪器研制[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(2): 152-162. DOI: 10.12677/met.2023.122018

high pressure multi-media fluid measurement. Therefore, the flow measurement technology of different fluid media was studied for highly corrosive fluid, heterogeneous fluid containing polymer and sand containing fluid under high pressure environment, and a set of high-precision flow measurement device was developed which can simultaneously meet the requirements of water injection, acidification, profile control and sand control field construction. The results show that the dual-channel ultrasonic flowmeter installed on the pipeline can realize the online monitoring of the well in operation, and can measure the flow rate in real time. It provides visual and reliable data support for the operator to monitor the running state of the main transformer, and improves the reliable data of acidizing operations and other work. The double channel ultrasonic flowmeter is installed on the fixed straight pipe section, which simplifies the installation process, greatly improves the working efficiency and is beneficial to the safe and stable operation of the system. The installation of the instrument is simple, external paste type, no need for pipeline disconnection; adjusting the probe distance can be measured on different media, and it will not affect the stability of operation and has a certain promotion and application value.

## Keywords

Oilfield Fluid, Flow Detection, Flowmeter, Test Technology, Testing Instruments, Research and Development

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前, 油田流体测量主要使用叶轮(涡轮)流量计、双转子流量计、质量流量计、涡街流量计、电磁流量计、超声波流量计这几种类型[1]-[18], 每种流量计都有自己的特点和适用范围。其中, 叶轮(涡轮)流量计可适用多种非均质介质且价格相对较低; 但测量精度较低, 另如介质含杂质或油污过多时, 易造成叶轮卡死。双转子流量计测量精度高, 较适用于纯净介质(如成品油等); 如流体黏度较高、含蜡较高或者含有杂质和固形物, 易造成转子卡死。质量流量计适用范围最广, 可测三相流体, 测量精度也较高; 但价格昂贵且普遍耐压不高, 现有少数厂家能生产高压型质量流量计, 但价格更是可观, 难以推广使用, 另外质量流量计普遍体积较大, 野外作业移动使用不太方便。涡街流量计测量精度适中, 价格相对不高, 较适用于干净导电介质(如注水); 但对非导电介质无能为力; 另如果介质含油过多糊住电极易造成测量误差偏大或失效; 需特别说明的是, 如介质含杂质过多卡在涡街流量计的旋涡发生体上, 易造成管道堵塞。电磁流量计测量精度较高, 可适用多种非均质介质甚至泥浆; 但如果介质含油过多糊住电极也易造成测量误差偏大或失效; 笔者曾研制过高压电磁流量计, 现场试验时也碰到过油污糊住电极造成测量不准的问题, 另外电磁流量计不能对非导电流体进行测量。超声波流量计为非接触式测量, 具有适用介质较广、测量精度极高、抗干扰性好、不堵塞等优点, 特别适合高压流体测量, 目前酸化监测仪就是采用的超声波测量技术; 但现存主要问题是对非均质介质和含固形物介质无法测量和测不准。

鉴于油田酸化、防砂、调剖、注聚等流量检测工作环境复杂多变, 现有各类型流量计都无法完全适应高压多介质流体测量, 在此背景下, 开展高压多介质流体测量及配套技术优化研究成为一项重要研究课题。为此, 笔者针对高压环境下强腐蚀性流体、含聚合物非均质流体和高含砂流体等复杂介质的测量技术展开研究, 以期研制出一套能同时满足注水、酸化、调剖、防砂等油田现场施工所需的高精度流量

测量装置及配套技术。

## 2. 研究方向

通过上面对各种流量计特性的综合分析比较,并结合酸化、防砂、调剖、注聚等非均质流体工况的特性进行研究,最终认为超声波流量计[6]最具有发展潜质。其高压、非接触、高精度、无堵塞、导电或不导电均可测量、仪器小巧轻便的特质无可替代,只需在非均质介质的基础上加以研究改进提高。

以往的酸化测试仪使用的测量原理是超声波时差法,其特点是当发射端探头发射出的超声波在传播路径上遇到微小固体颗粒或气泡时会被散射,接收端探头就收不到反射回来的信号,无法计算固定路径的发射和接收时差,故不适合非均质含固形物的流体测量。

而超声波多普勒法正是利用超声波被流体中的固体颗粒或气泡散射后,接收端探头接收到的散射超声波频率和流体的速度直接相关这一特点进行流量测量,因此比较适合用来测量非均质含固体颗粒或气泡的介质。

## 3. 不同流体介质流量测试技术

开展不同流体介质流量测试及配套技术研究,需要充分开展室内及现场评价试验,最终形成一套针对强腐蚀性流体、含聚合物非均质流体和含砂流体,开展流量测试及配套技术优化研究,以满足酸化、防砂、调剖、注聚等不同流体介质流量测试技术。

### 3.1. 含聚非均质流体测试技术

注聚类高黏度介质对超声波在其内部的传输影响并不大,测试原理还是以时差法为主。只是其特殊的黏度和密度,造成了不一样的传输特性。超声波在其内部的折射角和传播速度,和在水中相比会有比较大的变化,需要通过试验加以摸清。在获取相关的测试介质后,在流量标定装置上进行试验。

1) 通过试验,找出最佳的超声波参数测试仪探头间距范围。试验主要通过人为反复调整接收探头位置,用仪器显示观察,获取最强反射信号时对应的探头位置,以及最弱信号但仪器能正常工作的位置,以期确定探头测量范围。

2) 测量数值校准。为保证超声波流量计达到比较高的测量精度(0.2%以下),一般情况下,需准确的设定探头组间距。通过在不同流量数值下测得的瞬时和累积流量,跟标准罐反复比对,对仪器进行流量系数修正校准,以期达到高精度测量的目的。

3) 数据输入仪器数据库。以上试验获得的数据,通过软件写入仪器的数据库,以便现场使用时仪器能智能推荐探头间距参数和自动修正流量系数。

### 3.2. 含砂流体测试技术

对含砂液体,可采用多普勒式超声波流量测量技术,它是利用多普勒效应法工作的一种超声波流量计。多普勒效应是指一个发送声波的物件接受并反射另一个物件的声波。假如发送声波的物件相对于接受物件来说是移动的,那么接受物件将以它所发送的频率接受声波。假如两个物件之间的相对间距在降低,接受的频率将比原先强化。假如两个物件之间的相对间距在强化,接受的频率便会比原先降低。在超声多普勒流体测量方式中,超声发送器是一个固定的声源,随流体运动的固体颗粒物作为相对于声源运动的“观察者”,但只将射到固体颗粒物上的超声波反射到信号接收器。发送和接受的声波之间的频率差是由于流体中固体颗粒物的运动而造成的声波的多普勒频移。这个频率差与流体的流速成正比,因而可以通过测量频率差来明确流速。

## 4. 流量测试仪器设计

### 4.1. 设计要点

本文的设计要点就是研制一套同时拥有“双模式 + 双通道”功能的不同流体介质流量测试仪。其中，“双模式”是指时差法(模式)主要用于均质介质流量的测量，如注水，酸化等；多普勒法(模式)主要用于非均质含固型物的两相介质流量的测量，如注聚合物、调剖、防砂等。“双通道”是指多介质超声波参数测试仪探头间距的设定和被测介质的黏度、密度、雷诺数、温度密切相关，特性相差极大的介质，探头的间距设定值会相差较远；为保证较高的灵敏度和测量精度，一般情况下各项参数定好后，发射探头和接收间距只能在很小的范围内调整并且需精确定位校准，为满足所有需求，故此设计双通道(双探头)。其中一组探头用于测量黏度、密度、雷诺数和水比较接近的介质，如测水、含油污水、酸化液等；另一组探头用于测量黏度较高的介质，如注聚合物、凝胶等。两组探头均可使用多普勒模式对含砂量较高的介质进行测量。

以上设计期望达到互不干扰、相辅相成，一套仪器实现多介质流量测量的目的。

### 主机工作流程

主要采集超声波流量和压力 2 种数据。超声波流量分为 2 个通道一起显示，主机将数据整合后一起通过 2.4G 无线模块发送到上位机，后期如有需要可加 DTU 通过 4G 发送到服务器，也可本地存储数据。主机工作流程如图 1 所示。

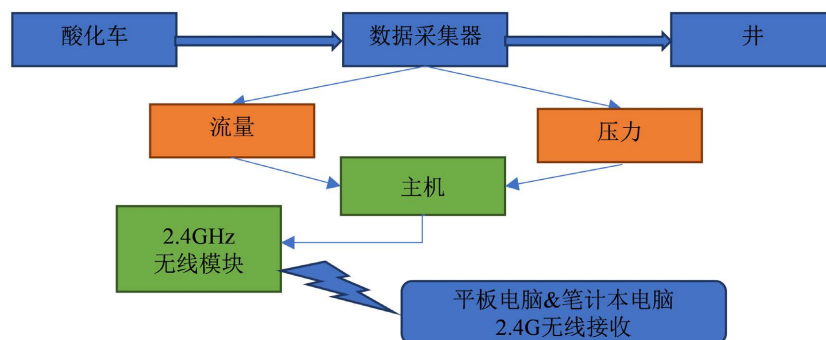


Figure 1. Work flow chart of the host  
图 1. 主机工作流程图

测试仪通过特制传感器测量油水井酸化注入液的瞬时量和酸化作业的实时压力，通过有/无线方式，将测试到的酸化数据传输至数据管理系统，由软件分析处理计量参数和作业时间，计算酸化作业表皮系数，并自动评估酸化作业效果，实现酸化作业过程工况的在线/远程评估和分析。

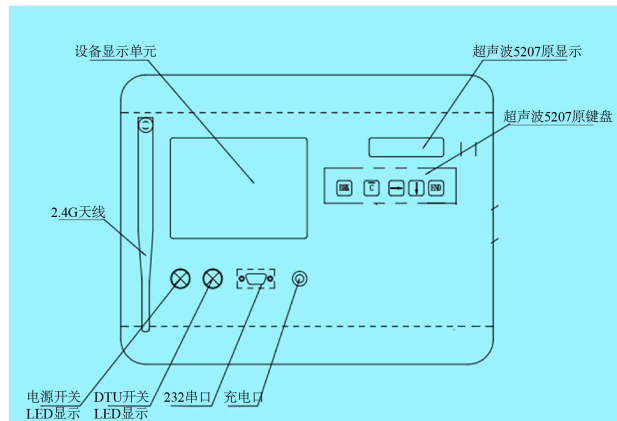
### 4.2. 主机功能

主机中集成了超声波流量计模块、主控模块、4~20 mA 压力采集模块和 2.4 GHz 无线收发模块。如图 2 所示。

图 3 为主要的显示数据。其中，压力采用 4~20 mA 变送器(已覆在管道上)；流量 1 可设为标准流量数据，用来接一个标准器，如叶轮流量计，是对聚合物或含砂等价质进行测量，来校验 2 组超声波通道数据；流量 2 为超声波流量计 A 通道数据；流量 3 为超声波流量计 B 通道数据。

超声波流量分为 2 个通道，即黏稠度低的和黏稠度高的，跟据现场具体的介质上在位机上设置采种

哪个通道的数据。



**Figure 2.** Schematic diagram of the host function module  
**图 2.** 主机功能模块示意图

井号: DX1166X178		2022.07.16 16:43	
压力		流量1:	0.3 m <sup>3</sup>
<b>26.77</b>	MPa	<b>04.52</b>	m <sup>3</sup> /h
流量2:	0.3 m <sup>3</sup>	流量3:	0.8 m <sup>3</sup>
<b>02.65</b>	m <sup>3</sup> /h	<b>03.92</b>	m <sup>3</sup> /h

**Figure 3.** Host display design  
**图 3.** 主机显示设计

仪器由采集箱和直管段构成，采集箱右侧是控制双通道超声波主要参数的设置。设置不同的介质，仪器会给出不同的参考声速有探头的距离。在出厂时已经用水和柴油等介质对 2 组探头及参数进行了调教。即 A 组用来测量水、酸液等均质介质；B 组用来测量聚合物，凝胶等非均质介质。

主机由双通道超声波模块、压力采集模块、主控模块和无线模块构成。主机面板如图 4 所示：



**Figure 4.** Host panel  
**图 4.** 主机面板

- 1) 上方是 2.4 GHz 无线收发天线，用来跟计算机发送和接收数据。
- 2) 左侧是压力和双通道超声波接口，用来采集压力和流量数据。
- 3) 中间部分是显示屏和控制键盘，用来显示当前的压力和流量数据，及压力的校验数据。
- 4) 右侧是双通道超声波的显示及控制区，用来设置双通道超声波的管径、壁厚、介质等参数，并给出探头距离声速等参考数据。

### 5. 上位机软件设计

上位机通过一个 2.4 GHz 无线模块接收压力和流量数据，再通过酸化模型(石油大学(华东)研制)计算出不同工况作业下的表皮系数。上位机工作流程如图 5 所示。软件结构如图 6 所示。

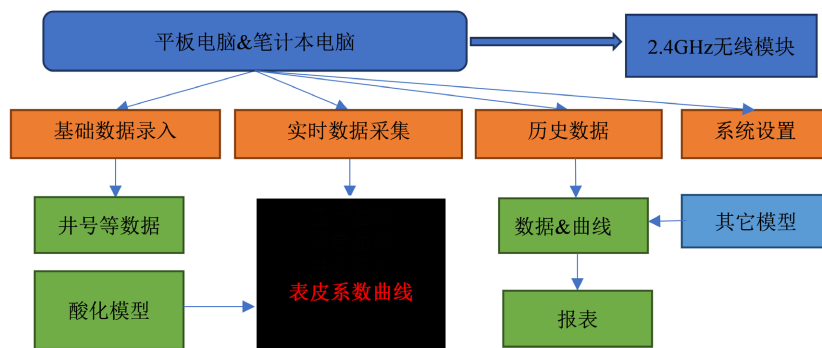


Figure 5. Work flow of upper computer  
图 5. 上位机工作流程

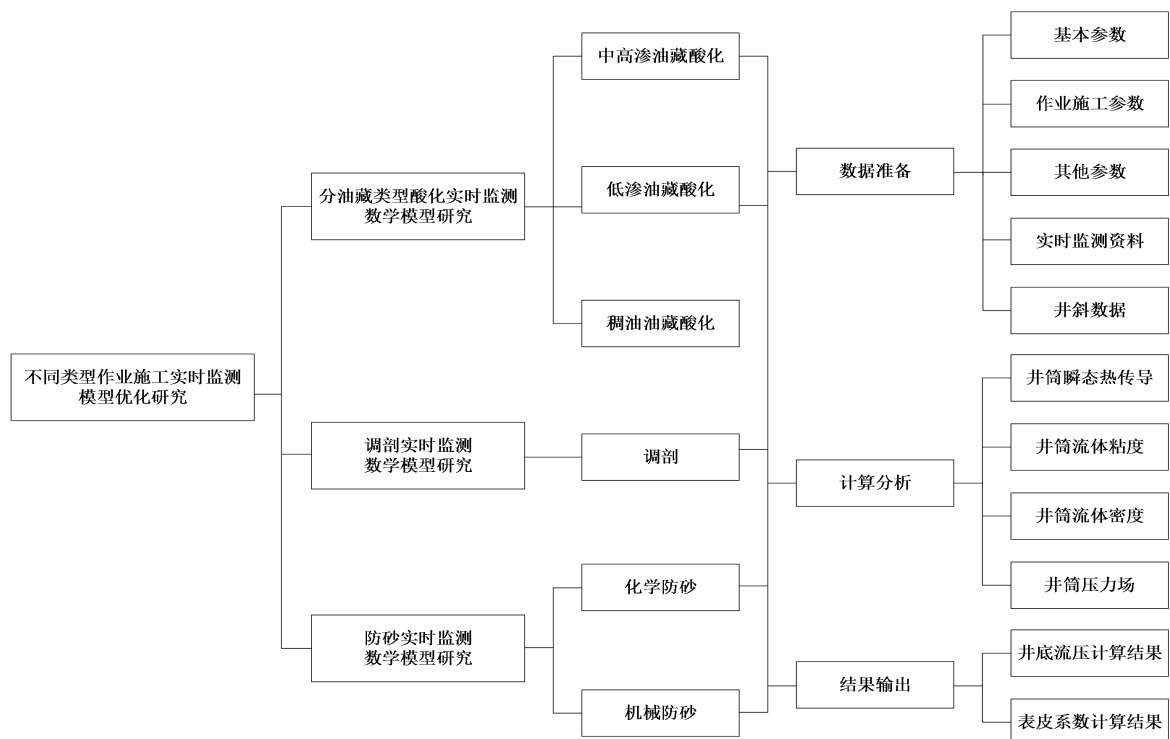


Figure 6. Software structure diagram  
图 6. 软件结构图

软件界面有基本信息数据录入、数据采集、历史数据、工况模型的选择、数据的导入导出等。如图 7 所示主界面。

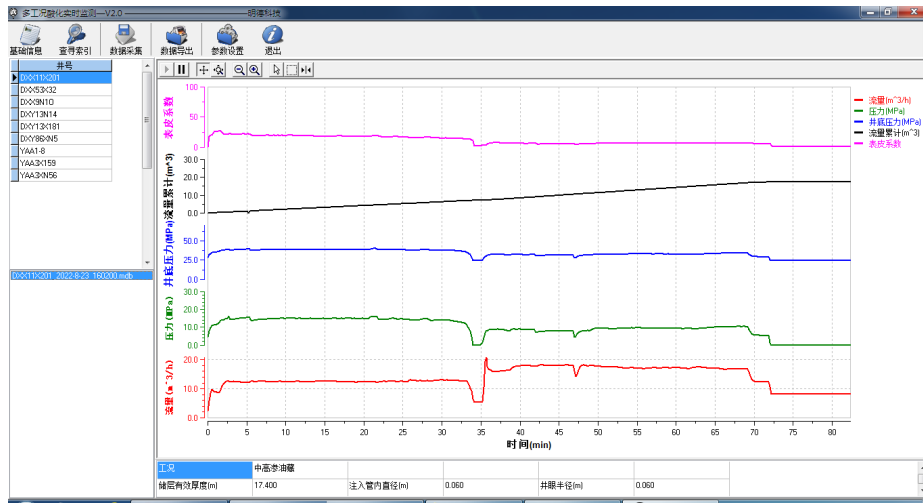


Figure 7. Main interface of the software  
图 7. 软件主界面

工况有以下几个模型可选择：中高渗油藏、低渗油藏、调剖、化学防砂、机械防砂、稠油油藏。每钟工况都对应不同的数学模型。如图 8 所示工况和基础数据。

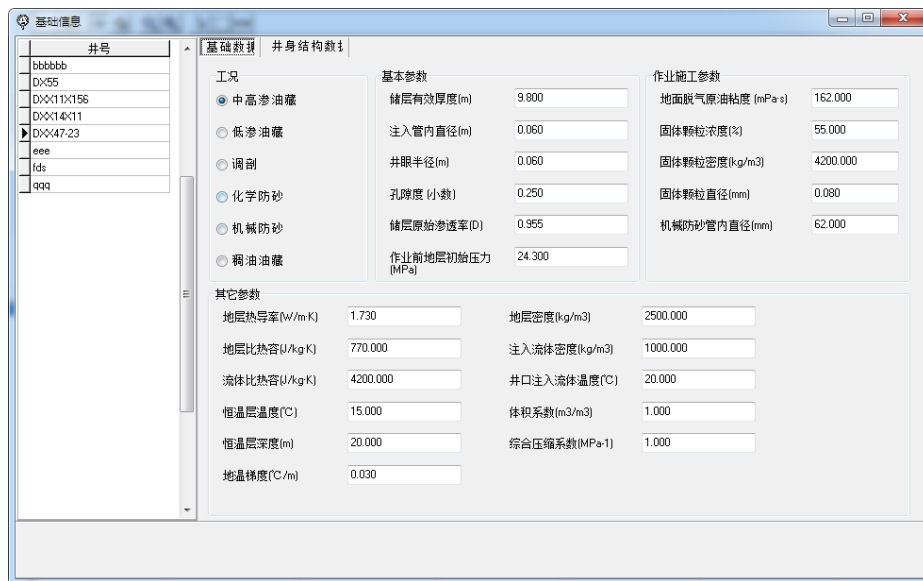


Figure 8. Working conditions and basic data  
图 8. 工况和基础数据

数据采集采用 2.4 G 无线模块(串口通讯)，传输距离在 50 m 左右，来跟主机通讯。可实时显示采集的压力、流量数据。实时计算出井底压力、表皮系数并绘制曲线。也可对施工过程中不同的阶段进行记录。如图 9 所示。

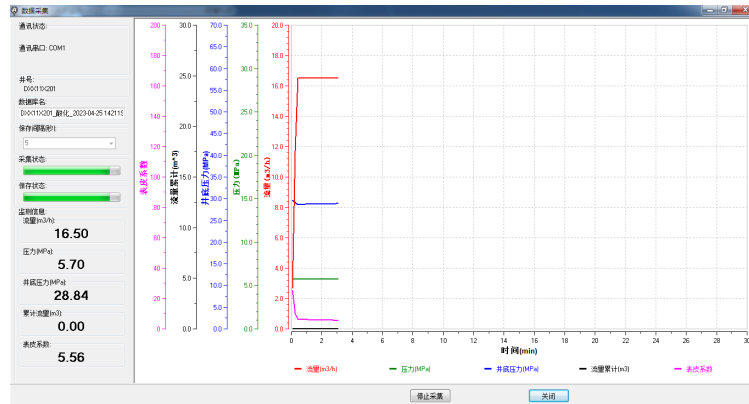


Figure 9. Data acquisition  
图 9. 数据采集

历史数据存储所有采集的数据，在后期也可改变工况和基础数据来重新计算。

参数设置，一是基本设置，针对的是主机通讯数据的设置(图 10)；二是曲线设置，针对的是主界面和采集界面的曲线参数数据设置(图 11)。

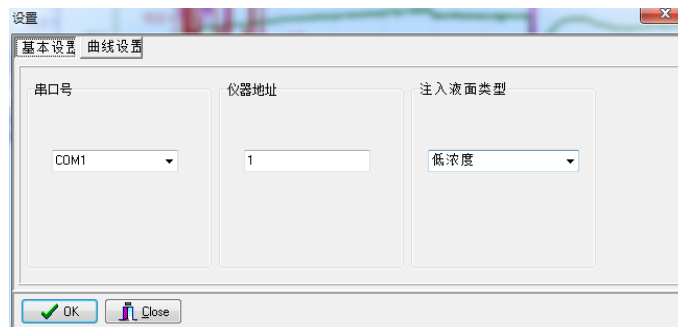


Figure 10. Basic Settings  
图 10. 基本设置



Figure 11. Curve setup  
图 11. 曲线设置

## 6. 技术测试

### 6.1. 时差法超声波流量测量技术在线使用

针对研制出的流量标定装置，在室内对该仪器做了初步的运行试验。图 12 是上位机的曲线走势，标



定台设置的流量为 15 m<sup>3</sup>/h。经过对探头距离及参数的调整，超声波采集的流量也为 15 m<sup>3</sup>/h 左右(红色曲线为采集的流量)。

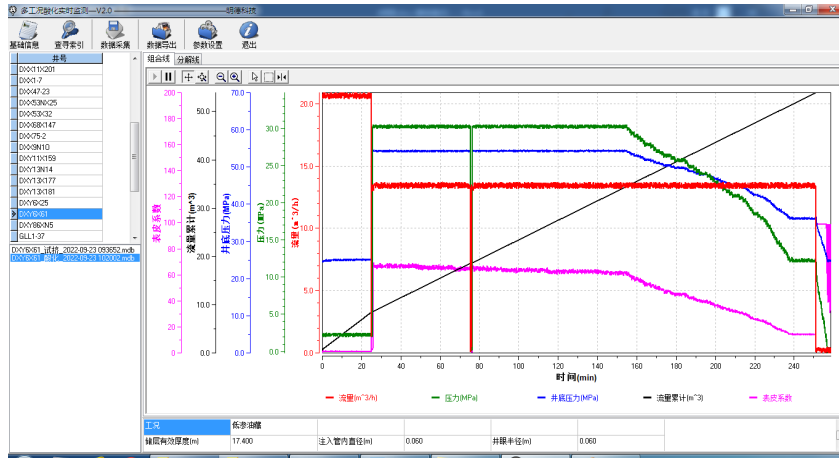


Figure 12. Flow curve of upper computer  
图 12. 上位机流量曲线

对(介质水)不同流量范围的检测，如表 1 所示。

Table 1. Test results of different flow ranges (medium water)  
表 1. 对(介质水)不同流量范围的检测结果

测试次数	标准表(m <sup>3</sup> /h)	超声波流量计(m <sup>3</sup> /h)
1	1	1.02
2	10	10.05
3	20	20.09
4	30	30.15
5	40	40.19
6	50	50.23
7	60	60.26

## 6.2. 多普勒法超声波流量测量技术在线使用

为了验证在非均匀高含固形物介质上应用超声波多普勒法测流量的可行性，用超声波流量计和电磁流量计在泥浆循环试验装置上进行流量对比校准试验，试验介质为固形物含量为 25% 的泥浆。其校准结果为两表均处在 1.0 水准。

为进一步验证可行性，随机抽取一块经鉴定合格的电磁流量计，安装到的管路中。再将超声波流量计安装在设计配套的标准直管段上，以 0 m/s 的速度开始，以 0.02 m/s 的流速上升至 2 m/s，选取 10 个测试点将两者的测量结果进行对比。测试结果如表 2 所示。

由表 2 可知，超声波流量计和电磁流量计的标值相同。通过试验，根据流量计的要求明确了超声波流量计的准确度级别并对其开展校准，验证了超声波流量计在线使用的可行性，为超声波流量计的线上应用提供了依据。

**Table 2.** Measurement data table of ultrasonic flowmeter and electromagnetic flowmeter  
**表 2.** 超声波流量计与电磁流量计测量数据表

序号	超声波流量计 所显示的流速(m/s)	电磁流量计 所显示的流速(m/s)	相对误差/%
1	0.625	0.632	1.11
2	0.722	0.718	0.56
3	0.804	0.814	1.24
4	0.986	0.98	0.61
5	1.014	1.028	1.37
6	1.096	1.088	0.73
7	1.102	1.11	0.72
8	1.306	1.322	1.22
9	1.508	1.514	0.40
10	2.036	2.024	0.59

## 7. 结语

针对目前不同流体介质流量测试技术,提出了基于双通道超声加多普勒方式的流量测试方法。通过双通道超声流量计安装在管道上,可实现对在作业的井的在线监测,可实时测量流量,为运行人员监测主变运行状态提供了可视、可靠的数据支撑,提高了酸化等作业工作的可靠数据。双通道超声流量计安装在固定直管段上,简化了安装流程,大大提升了工作效率,有益于系统的安全平稳运行。该方法安装简便,为外贴式,无需管道断流,调整探头距离即可对不同介质进行测量,也不会影响运行的稳定性,具有一定的推广应用价值。

## 参考文献

- [1] 关宏宇. 质量流量计在油田计量的应用前景[J]. 化学工程与装备, 2022(7): 88-89+97.
- [2] 龚云涛, 龚中伟. 质量流量计在油田矿场计量中的应用[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(6): 28-30.
- [3] 范秀梅. 油田电磁流量计检定工作中存在的问题及对策[J]. 化学工程与装备, 2021(4): 39+43.
- [4] 杨丽娟. 电磁流量计在油田注水计量中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2019(23): 204-205.
- [5] 李名强, 县中平, 吕渤洋. 海上油田注水流量计误差在线测试方法的研究[J]. 天津科技, 2019, 46(2): 48-50+53.
- [6] 孙冠男. 超声波流量计在油田测试中的应用分析[J]. 石化技术, 2018, 25(12): 268.
- [7] 付勇善. 溢气型涡轮流量计在大庆油田的应用[J]. 化工管理, 2018(14): 172.
- [8] 韩军伟, 徐明, 张军阳, 等. 电磁流量计在西北油田钻井现场应用试验[J]. 石化技术, 2017, 24(8): 184.
- [9] 侯方勇, 李直, 吴伟烽, 等. 油田注水井口流量计在线检定[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(3): 53-56.
- [10] 吴佳欢, 潘峰, 吴刚. 油田工业多相流量计技术适用性分析[J]. 化工自动化及仪表, 2016, 43(4): 341-346+445.
- [11] 张勇. 浅谈油田注水井流量计的发展与现状[J]. 价值工程, 2015, 34(4): 74-75.
- [12] 孙永泰. 质量流量计测量高粘度流体流量[J]. 福建分析测试, 2016, 25(2): 51-54.
- [13] 林惠春. 质量流量计在油田稠油区块产液计量中的应用探讨[J]. 价值工程, 2014, 33(17): 56-57.
- [14] 高立敏.  $\phi 28$  mm 内流电磁流量计研制及其在油田产出剖面测井中的应用[J]. 石油仪器, 2014, 28(3): 13-14+18.
- [15] 黄文民. 孔板流量计在油田天然气计量上的应用探讨[J]. 硅谷, 2014, 7(8): 94+95.

- [16] 王彬. 浅谈如何保证油田注水流量计的准确度[J]. 科技创新与应用, 2013(24): 90.
- [17] 闫俊峰. 金属刮板流量计在油田的应用及在线检定情况研究[J]. 硅谷, 2013, 6(6): 105+49.
- [18] 辛力, 吴斌, 门虎, 等. 智能流量计在油田精细注水中的应用[J]. 自动化应用, 2013(1): 67-68.