

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519006

# 基于声速补偿的井下超声流量计研制及应用

左凯

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司海洋完井重点实验室 天津 300450)

**摘要:** 本文针对井下复杂工况下油水两相的流量测量问题,开发了一种基于声速补偿的超声多普勒流量计。通过建立基于多普勒效应的一维流速剖面测量模型和基于脉冲回波强度的声速测量模型,并结合分层积分原理构建了声速补偿的流量测量模型,以实现流速剖面的自适应重构和流量的高精度测量。在此基础上,设计了适用于井下高温高压环境的超声波换能器及高速激励接收控制板,并利用数字信号处理技术实现了流量的在线解调。同时,为保障井下高温高压条件下的可靠工作,对测量管段进行了结构与密封设计。最终形成了井下流量测试样机。实验结果表明,该流量测量模块在实验室环境下的测量误差小于1%,且能够快速响应流体波动,能够在井下125℃和60 MPa的极端条件下稳定工作。该技术应用于渤海油田矿场油井,实测流量误差小于3%。未来智能油田井下测调场景,本技术可广泛接入智能化测控系统,为智能油田建设提供技术支持。

**关键词:** 超声脉冲多普勒;脉冲回波强度;流速剖面;声速补偿;流量测量;智能油田

**中图分类号:** TN98    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Development and testing of an underground ultrasonic flow meter with sound velocity compensation

Zuo Kai

(Engineering Technology Company, CNOOC Energy Technology &amp; Services Co., Ltd., Key Laboratory of Marine Completion, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** This paper addresses the issue of oil-water two-phase flow measurement under complex downhole conditions by developing an ultrasonic Doppler flow meter with sound velocity compensation. By establishing a one-dimensional velocity profile measurement model based on the Doppler effect and a sound velocity measurement model based on pulse echo intensity, and combining these with the principle of layered integration, a sound velocity compensated flow measurement model is constructed to achieve adaptive reconstruction of the velocity profile and high-precision flow measurement. On this basis, ultrasonic transducers and high-speed excitation and reception control boards suitable for high-temperature and high-pressure downhole environments are designed, and digital signal processing technology is used to achieve online demodulation of flow. Additionally, to ensure reliable operation under downhole high-temperature and high-pressure conditions, the measuring pipe section has been structurally and sealingly designed. A downhole flow test prototype has ultimately been developed. Experimental results indicate that the flow measurement module has a measurement error of less than 1% in the laboratory environment, can rapidly respond to fluid fluctuations, and can operate stably under extreme downhole conditions of 125°C and 60 MPa. This technology can be widely applied to downhole measurement and adjustment scenarios and can be integrated into intelligent measurement and control systems, providing technical support for the construction of smart oil fields.

**Keywords:** pulse wave ultrasonic Doppler; pulse echo intensity; velocity profile; sound velocity compensation; flow metering; smart oilfield

## 0 引言

井下流量测量是油气田开发与生产过程中的关键技术

之一,主要用于实时监测油、气、水等流体的产出或注入情况。在油田开发中,随着储层压力变化和含水率上升,井下流体往往呈现多相流动状态,流型复杂多变,使得准确测量

面临巨大挑战<sup>[1-2]</sup>。精确的流量数据对于优化生产制度、评估储层动态、调整注采方案至关重要,直接影响油田的开发效率和经济效益。此外,在智能油田和数字化管理的趋势下,实时、可靠的井下流量监测能够帮助工程师及时识别异常工况,减少无效生产,降低能耗,提高采收率。因此,发展高精度、高可靠性的井下流量测量技术对油气田高效开发和可持续发展具有重要意义<sup>[3]</sup>。

目前,众多国内外的研究学者依据不同传感器技术已开发出多种流量测量方法,包括差压式流量仪表、容积式流量仪表、涡轮式流量仪表、电磁式流量仪表、科里奥利流量仪表等。其中,差压式流量仪表通过测量流体流经节流装置(孔板、文丘里等)时产生的压力差来计算流量,具有结构简单、可靠性高、应用范围广等优势,已广泛用于单相流的流量测量中<sup>[4]</sup>。为扩展其在多相流中的适用性和准确度,一些研究学者依据不同测量对象的特点开发出与之相适应的测量模型或辅以特殊的测量手段<sup>[5-6]</sup>。例如,Tan等<sup>[7]</sup>通过建立均相测量模型,利用V锥流量计实现了油水两相流流量的准确测量;Li等<sup>[8]</sup>利用通过建立压力与分相流速之间的映射关系,实现了井筒下气水两相流4种不同流型下的流量测量;Jazirian等<sup>[9]</sup>通过V锥流量计进行不同相含率下的实验,修正了现有液相流量计算关系式,提升了流量的测量精度。差压式流量仪表虽然具有成熟的应用历史,但是存在永久性压损、安装条件严格(直管段)、量程比较窄等局限<sup>[10]</sup>。容积式流量仪表通过机械测量腔室内流体体积实现高精度流量计量,具有测量精度高、操作简单、对管道安装条件没有直管段等要求的特点,在多相流流量测量中具有较为广泛的应用,但多局限于洁净的流体<sup>[11]</sup>。此外,容积式流量计体积较大、存在活动部件易磨损、且不适用于高低温场景,这限制了其在井下的应用。电磁式流量仪表基于法拉第电磁感应原理,通过测量导电液体切割磁场所产生的感应电动势来计算流量,具有无阻流件、压力损失小,适用于腐蚀性和含颗粒介质,测量精度高、量程比宽,且不受流体密度、粘度影响的优势,但仅适用于导电液体、且受电磁干扰影响大、高温条件下衬里需特别考虑<sup>[12]</sup>。

超声波测试技术是近年来发展起来的一种无扰动测试技术。根据不同的测量原理,基于超声波测试技术的流量测量主要包括互相关法<sup>[13]</sup>、时差法与多普勒法<sup>[14]</sup>。其中,互相关法通过检测流动噪声从上游传感器到下游传感器的传输时间实现速度估计,通常要求进行相关运算的上、下游测量信号包含明显的流动特征。当流动状态过于平稳或测量噪声较大时,容易拉平互相关函数的峰值,甚至造成多峰的现象,导致测量精度受限<sup>[15]</sup>。此外,互相关速度的物理意义存在争议,多数学者认为互相关速度是运动波的传播速度,因此需要建立相关测量模型实现互相关速度到平均流速或流量之间的映射<sup>[16]</sup>。例如,Ton<sup>[17]</sup>提出了超声互相关流速模型并定义了输入输出参数,通过实验室与现场的测量结果验证了模型的有效性与准确性。Ren等<sup>[18]</sup>将可

编程阵列逻辑(field-programmable gate array,FPGA)与嵌入式微处理器结合,设计了一种基于互相关法的超声流量计,在高流速下实现了流量的高精度测量;史雪薇等<sup>[19]</sup>通过漂移模型建立了互相关速度和油水两相流表观流速之间的关系。时差法通过检测超声波在流体中顺流与逆流的传播时间差实现流量测量。时差法在实际应用时,需要足够的直管段以保证湍流充分发展,此外对流体纯净度要求较高,气泡、颗粒或杂质会散射超声波信号导致测量精度下降甚至失效<sup>[20]</sup>。此外,流场的不均匀性也是影响精度的重要因素。Smith等<sup>[21]</sup>提出了一种声束偏转模型用于补偿非理想流速场带来的测量误差。多普勒方法利用超声波作用于流体离散相时产生的频率偏移与流速成正比,即多普勒效应原理实现速度测量,具有物理意义明确、无需校准等优点,在流速测量中展现出极大的应用潜力<sup>[22]</sup>。

根据声源的工作方式,多普勒方法又可分为脉冲波超声多普勒法以及连续波超声多普勒方法。其中,连续波超声多普勒方法在测量时间内持续地激励和接收超声波,通常用于获取测量空间内散射体的平均流速。Dong等<sup>[23-24]</sup>基于连续波超声多普勒测量原理,分别利用边界层理论和双流体模型构建了异侧或同侧收发传感器结构下的油水、气水两相流分相流速测量模型,实现了分相表观流速的准确测量。Li等<sup>[25]</sup>基于连续波超声多普勒传感器与电导传感器实现了油气水多相流结构的联合表征,并在统一的多尺度框架下建立了低速测量数据机制双驱动模型。与连续波超声多普勒方法不同,脉冲波超声多普勒方法在测量时间内间断地发射超声波脉冲,并在脉冲间隔内对回波进行接收,通过与距离门技术相结合可实现流体一维流速剖面的获取<sup>[26-27]</sup>。利用脉冲波超声多普勒方法,Liu等<sup>[28]</sup>考虑相间滑差效应构建了漂移模型,实现了油水两相流分相表观流速的测量;Indimath<sup>[29]</sup>等研究了油井井壁裂缝泄露流体的流速估计问题,并讨论了不同超声参数对流速估计值的影响。

已有文献表明,超声多普勒方法已在多相流的流量测量中展现出较好的性能,但是研究多局限于实验室环境下。在油井的实际工程应用中,高温、高压的恶劣测量环境对超声多普勒方法的准确性、稳定性和可靠性提出了一系列严峻挑战,这些挑战一方面源于极端环境对传感器材料与电子系统的影响;另一方面源于井下复杂的流动状态对声学信号传播的影响。前者要求对传感器、测量电路和工具的密封形式进行仔细设计和选取;后者主要要求对声速参数(流量计算的关键参数)进行精确测量,以补偿环境温度和介质流动状态的影响。

为实现井下多相流量的准确计量,本文提出一种声速补偿的井下流量超声多普勒测量技术。研究中,利用多普勒原理建立基于声波频移的一维流速剖面测量模型、利用脉冲回波强度原理建立基于渡越时间的声速测量模型,并基于分层积分原理建立声速补偿的流量测量模型。在此基

基础上,优化超声传感器参数,设计井下测试管段结构与密封方式,并开发流量测试系统,形成井下流量测试样机,实现高温、高压、有限空间内流量的高精度实时监测。流量测量模块通过室内实验和矿场实验应用验证,流量测量精度满足 5% 设计要求。

## 1 测量原理

### 1.1 基于脉冲波超声多普勒的流速剖面测量原理

超声多普勒效应是指当超声波源或接收器与被测物体之间存在相对运动时,接收到的超声波频率会发生变化的现象。在油水两相流中,超声波由激励探头发出后在流体中传播,遇到离散液滴时会发生反射或散射现象;此时离散液滴即成为了次级声源,产生的反射或散射回波被探头接收。因为离散液滴相对于超声探头之间存在相对运动,导致接收声波与发射声波的频率之间存在频率偏移,称为多普勒频移<sup>[30]</sup>。通常,用多普勒频移表征离散相的流速信息。

基于脉冲波超声多普勒的流速剖面测量原理如图 1 所示。

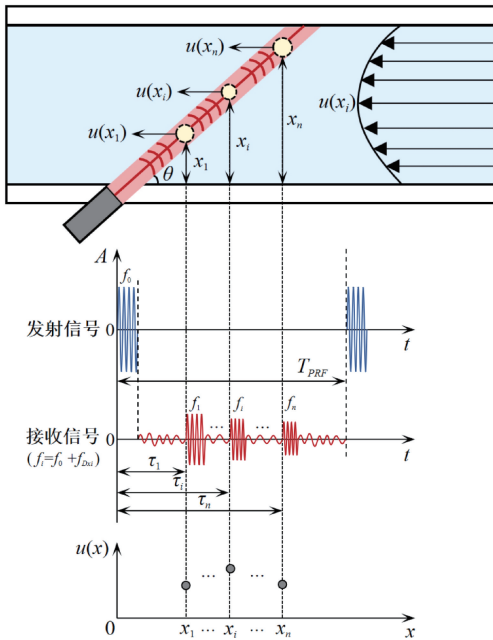


图 1 基于脉冲波超声多普勒的流速剖面测量原理

Fig. 1 The principle of velocity profile measurement based on pulsed wave ultrasonic Doppler

超声波换能器以一定的角度倾斜安装在管道侧壁上。工作时,超声波换能器以一定的脉冲重复频率向流体中发射固定频率的超声波脉冲,并在脉冲间隔内对回波进行接收。根据声传播走时特性,接收超声信号相对发射信号的时间延迟可确定测量空间中的特定位置,即:

$$x_i = \frac{c\tau_i}{2} \sin\theta \quad (1)$$

式中:  $\tau_i$  为位置  $i$  处对应的超声波时间延迟,  $x_i$  为位置  $i$  处的流速,  $c$  是为流体中的声速,  $\theta$  是入射声波与管壁之间的夹角。

根据多普勒效应,不同位置处的流速  $u(x_i)$ , 可以表示为:

$$u(x_i) = \frac{c \cdot f_{Dx_i}}{2f_0 \cos\theta} \quad (2)$$

式中:  $f_{Dx_i}$  表示  $x_i$  位置处的多普勒频移;  $f_0$  是探头发射超声波的中心频率。

### 1.2 基于脉冲回波强度的声速测量原理

根据式(1)和(2),流体中的声速  $c$  是流速剖面测量中的关键参数。然而,井下流体介质状态和温度等因素对声速的影响较大,如采用固定声速参数必然会带来较大的测量误差,因此应在考虑同步声速补偿。

通常,超声波在相界面上发射的反射和透射现象会引起声波能量在相界面两侧的重新分配。当垂直入射时,声波能量在相界面两侧的分配比例受到界面两侧声阻抗差异的影响。例如:油与水的声阻抗相近,声波在油水界面的透射能量比反射能量高;而水和钢的声阻抗差异很大,声波在管壁界面的反射能量远高于透射能量。脉冲回波强度测量是一种基于超声波反射信号幅值分析的检测方法,通过发射超声波脉冲并接收其回波,利用回波信号的强度(幅值)变化来评估介质特性或界面状态<sup>[31]</sup>,具体原理如图 2 所示。

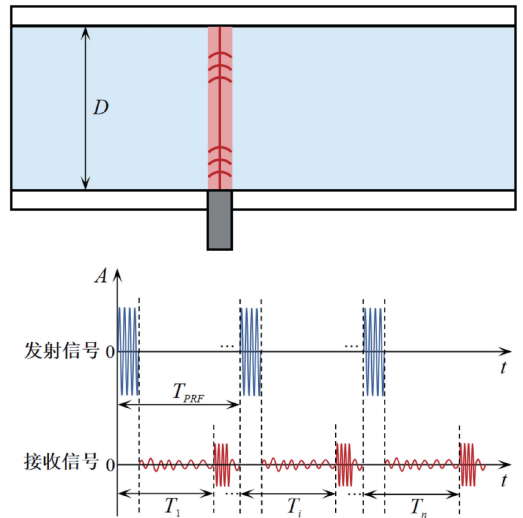


图 2 基于脉冲回波强度的声速测量原理

Fig. 2 The principle of sound velocity measurement based on pulse-echo intensity

垂直安装在管道侧壁的超声波换能器以一定的脉冲重复频率  $f_{PRF}$  (脉冲重复周期  $T_{PRF} = f_{PRF}$ ) 向流体中发射固定频率的超声波脉冲  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 并在脉冲间隔内对回波  $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$  进行接收。声发射面与管道内壁齐平。当声波在油水两相流中传播时,遇到对面管壁时会

发生强反射现象,因此回波中的峰值对应对面管壁的位置信息。当管径已知时,通过计算超声波激励信号与回波信号之间的时间偏移  $T_i (i=1,2,\dots,n)$ ,即渡越时间(time of flight, TOF),即可获取声波在流体中的传播速度。涉及的核心公式如下:

$$\begin{cases} c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \\ c_i = \frac{2D}{T_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D$  为管道直径, $c_i$  为第  $i$  次激励时所测量的声速值, $n$  为测量时间内的脉冲激励次数, $T_i$  为第  $i$  次激励时的声波渡越时间。

### 1.3 声速补偿的流量模型

忽略油水两相流中的相间速度滑脱,脉冲波超声多普勒方法测量的离散相流速与油水两相混合流速相同。此时,油水两相流的流量可由下式计算:

$$Q = u_s A \quad (4)$$

式中: $A$  为管道截面积, $u_s$  为流体的截面平均流速,可有流速剖面进行转换得到,常用的方法为分层积分法。分层积分法的原理如图 3 所示。

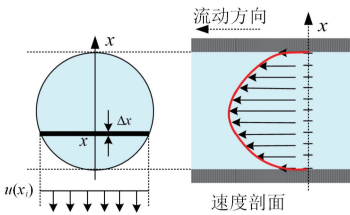


图 3 基于脉冲波超声多普勒方法的平均流速计算

Fig. 3 Average flow velocity calculation based on the pulsed wave ultrasonic Doppler method

该方法将测量空间沿  $x$  轴分成若干层等高的测量区域,每层中的流速值  $u_{layer}(x)$  对应流速剖面的流速测量值  $u(x_i)$ 。因此,流量可由式(5)计算:

$$Q = \int_0^D Q_{layer}(x) dx = \int_0^D A_{layer}(x) u_{layer}(x) dx \quad (5)$$

式中: $Q_{layer}$ 、 $A_{layer}$  和  $u_{layer}$  分别为不同层区域的流量、面积及对应的流速值, $D$  为管道直径。

针对式(5)的积分计算问题,可采用牛顿-柯特斯公式插值积分求解:

$$\int_0^D Q_{layer}(x) dx = D \sum_{k=0}^N C_k^{(N)} Q_{layer}(x_k) \quad (6)$$

$$l_s = D/N \quad (7)$$

$$x_k = kl_s \quad (8)$$

式中: $D$  为管道直径, $C_k^{(N)}$  为柯特斯系数 ( $k=1, 2, \dots, N$ ), $l_s$  为步长, $x_k$  为等距节点。

$$C_k^{(N)} = \frac{(-1)^{N-k}}{Nk! (N-k)!} \int_0^N \prod_{e=0, e \neq k}^N (t-e) dt \quad (9)$$

综上,基于声速补偿的油水两相流的流量的计算流程

如图 4 所示。所提测量模型具有较好的流体与环境适应性:一方面,流体的平均流速由流速剖面转换而来,当流体的流动状态发生变化时,能够通过重构流速剖面实现对平均流速的实时更新;另一方面,流速计算采用的声速能够随温度和相率动态调整。

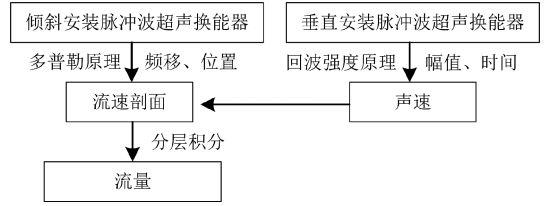


图 4 声速补偿的流量测量流程

Fig. 4 The flow measurement process of sound velocity compensation

## 2 测试系统开发

### 2.1 测试系统整体架构

基于现场可编程门阵列与数字信号处理技术,开发了超声波流量测试系统,测试系统的整体架构如图 5 所示。该测试系统采用模块化设计思想,包括激励信号产生模块、接收信号调理模块、解调模块、通讯模块、通道切换等。控制核心通过写入时序控制程序,能够实现不同换能器的激励与接收电路的协调工作,并通过编写数字解调程序基于乘法解调、低通滤波、傅里叶变换、峰值提取等算法实现多普勒频移与声速提取功能,最终实现流量计算。

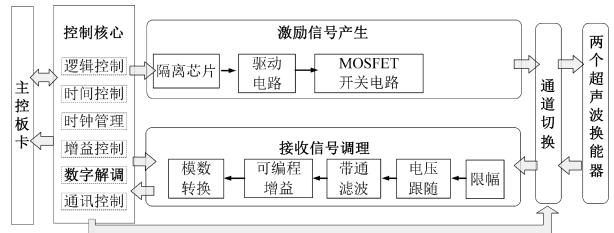


图 5 测试系统整体架构

Fig. 5 The overall architecture of the testing system

### 2.2 测试系统模块功能

系统采用 FPGA 为控制核心。激励信号产生模块采用 FPGA 控制两只金属-氧化物半导体场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 轮流导通和关断的方式形成高压脉冲激励。信号激励源模块的结构图如图 6 所示,包括 FPGA 提供的数字逻辑控制单元、数字隔离单元, MOSFET 驱动单元以及直流电压源构成的开关单元。工作时,首先由 FPGA 发出频率可调的脉冲式逻辑控制信号,数字隔离器将该逻辑控制信号的幅值由 3.3 V 转为 5 V,并实现前级电路的隔离和保护;之后,经过两路驱动器分别产生两只 MOSFET 管的驱动电压,通过两管的轮流导通和关断实现双极性矩形激励电压的发生,最大激励电压可达 200 V<sub>pp</sub>。

为提高接收信号质量,提高系统信噪比,需要对接受信

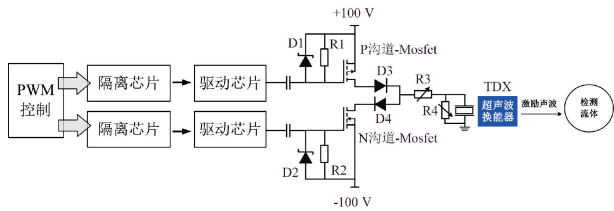


图 6 激励信号产生模块

Fig. 6 Excitation signal generation module

号进行调理。如图 5 所示,接收信号调理模块主要实现限幅、滤波、放大和高速模数转换等功能。由于超声波换能器均工作在自发自收模式,因此对回波信号进行采集时也会将高压激励信号采集回来。为了避免对电路产生损坏,需要对接收信号进行限幅处理,将电压限制在正负 2 V 以内。限幅后,采集信号经过电压跟随实现前后级电路的缓冲和隔离,并进行带通滤波以去除信号中的工频干扰及噪声。由于超声波在油水两相流中的衰减较大,有效回波较小。为提升信噪比,滤波后的信号需进一步经过级联式可编程运算放大器进行放大。最终,通过高速模数转换器将模拟量转换为数字量,送入 FPGA 内部进行数字解调。

数字解调模块主要实现流速剖面与声速的提取以及流量的计算功能。多普勒频移的提取原理如图 7(a) 所示,主要是在 FPGA 内部建立直接数字频率合成器 (direct digital synthesizer, DDS) 单元、乘法单元、低通滤波单元、快速傅里叶单元等实现。其基本流程是:首先通过 DDS 生成与激励同频的参考正弦信号,然后将其与接收信号进行相乘;根据积化和差原理,相乘后的信号同时包含高频成分和低频成分,其中低频成分是与流速相关的多普勒频移成分。因此,对相乘后的信号进行低通滤波即可保留多普勒频移成分。根据瞬时频率计算原理,通过对若干次接收信号相同位置上的测量信号进行重组后进行快速傅里叶变换,即可获得相应位置上的流速信息。声速的提取原理如图 7(b) 所示,主要是在 FPGA 内部建立 DDS 单元、乘法单元、累加单元、加法单元、数据转换单元、比较单元等实现。其基本流程是:首先通过 DDS 生成与激励同频的参考正弦与余弦信号,然后将其分别于接收信号进行相乘;对相乘后的结果分别按照整周期数进行累加;通过数据转换单元,对累加结果进行处理即可获得接收信号每点的幅值;通过比较器实现固定时间窗内每一点幅值的大小比较,搜寻管壁处的回波信号,同步累加器的计数值反映了该回波信号对应的渡越时间,可获取声速。最终,所提取的流速剖面 and 声速值可用于流量的计算。

此外,流量测试板卡中的通讯单元基于隔离式通用异步收发器设计,实现流量信号的安全、稳定传输。通道切换单元实现基于脉冲回波强度的声速测量与基于脉冲超声多普勒的流速剖面测量之间的交替工作,避免两个超声换能器之间的相互干扰。为了满足井下工具的安装空间要求,电路采用窄条形结构,尺寸设计为 240 mm×24 mm×10 mm。

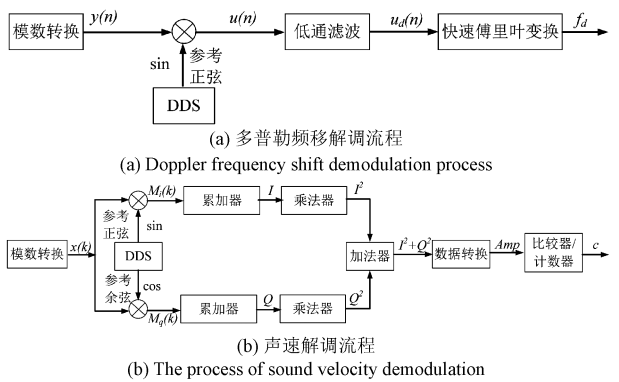


图 7 解调模块

Fig. 7 Demodulation module

此外,电路上元器件均选择为耐高温器件,满足井下 125℃ 高温工作需求。

### 3 井下测量工具结构设计

#### 3.1 整体结构

井下测量工具整体结构如图 8 所示,包括机械组成部分和电路组成部分。整体结构采用模块化结构设计思路,各功能组成相互独立又互为支撑,提高加工、装配和测试的可行性。机械部分包括上接头、下接头、外壳、电路护壳和中心管等关键部件。其中,上接头和下接头分别连接油管,与中心管组合建立井下流体中心过流通道,且上、下接头均设有电缆接头,与电缆连接后可为井下测量工具提供电能并传输控制信号或测试数据。电路部分包括流量测量探头、电源及驱动模块、主控电路及流量测量电路等主要功能单元。电源、电路等电器件被安装在电路护壳和中心管之间的环空内,可对电路部分形成二次密封保护,具有增强防水、防潮的效果,可进一步提高电路系统工作的可靠性,整体提高井下测量工具高温高压下工作寿命。

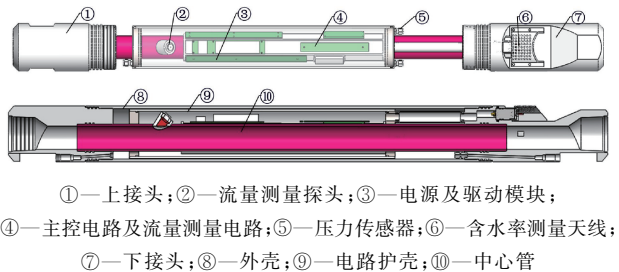


图 8 井下测量工具结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the structure of underground measuring tools

#### 3.2 关键部件及技术参数

##### 1) 超声波换能器设计

超声换能器的中心频率选择是至关重要的问题。选取主要取决于波长与离散相大小的相对关系,声波信号穿透性和接收信号质量等因素。地层开发的采出液存在大量非

连续相的微米级油包水或水包油型乳状液的液滴、微小气泡、细砂及杂质。根据文献信息,当超声波波长 $\lambda$ 小于离散相直径 $d$ 时,入射的超声波遇到离散相时主要发生反射和折射现象,信号的强度和方向性都受到很大影响,只能探测到有限小范围,无法达到流体内部,无法用于流速或声速的准确测量。而当超声波波长 $\lambda$ 大于离散相直径 $d$ 时,入射的超声波主要发生前向散射和背向散射,声波衰减较小,且背向散射的方向能够保证回波能够被有效接收,可以用于流速或声速的准确测量。因此,在选择超声换能器的中心频率时,既要确保超声波穿透力,又要获得较好的背向散射信号。据此,考虑在开采环境下,超声波换能器中心频率可在 1~2.5 MHz 范围区间进行选择。

此外,用于流速剖面测量的超声探头安装倾角,直接影响声波的入射波形式,同时关乎流量计的流速分辨率、最大可测流速和最大可测距离。根据脉冲波超声多普勒测量原理,流速分辨率 $\Delta u$ 、最大可测流速 $u_{\max}$ 和最大可测距离 $L_{\max}$ 可用下式来计算。

$$\Delta u = \frac{c f_{PRF}}{2 f_0 N_{pluse} \cos \theta} \quad (10)$$

$$u_{\max} = \frac{c f_{PRF}}{4 f_0 \cos \theta} \quad (11)$$

$$L_{\max} = \frac{c}{2 f_{PRF}} \sin \theta \quad (12)$$

式中: $f_{PRF}$ 为脉冲重复频率, $N_{pluse}$ 为计算多普勒频移时用到的脉冲回波次数。

根据上式,超声换能器的安装倾角越大,流速分辨率能力越差,但最大可测流速和最大可测距离越大。此外,安装倾角的选择还需要兼顾超声换能器的本体尺寸、安装空间及安装工艺。通常油管内径尺寸范围为 41.90~100.54 mm 左右,在满足换能器完整构造的情况下,内部器件占用空间可固定制作到极限尺寸,此时只能通过调整封装外壳以适应安装空间。油管 and 套管尺寸空间是固定的,换能器护管和油管之间的环形空间非常小。当角度小于 $30^\circ$ 时为了确保换能器出线方向密封固定,对径向空间占用大,很难实现。在综合考虑下,超声换能器的安装倾角推荐在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 范围区间进行选择。

## 2) 密封结构设计

井下测量工具长期处于井下高温、高压环境,需要保证 3 年,甚至 5 年以上工作寿命,密封结构直接决定了工具井下使用寿命。分析井下测量工具密封结构,有 3 处密封结构设计至关重要,如图 9 所示。如图 9(a)所示流量测量探头密封,采用“O 圈密封+车氏密封+端面密封”,高、低压组合密封结构,提供多级密封保护,最大限度降低密封渗漏风险。如图 9(b)所示电路器件封装保护,把电路器件安装在电路护壳和中心管的密封舱内,即使外壳密封失效进液,仍能保证电路器件被密封,保障电气正常功能。如图 9(c)所示电缆接头密封,采用“金属密封+橡胶密封”组合,保证

电缆缆芯和测量工具电连接绝缘,提高缆芯供电和载波通信可靠性。

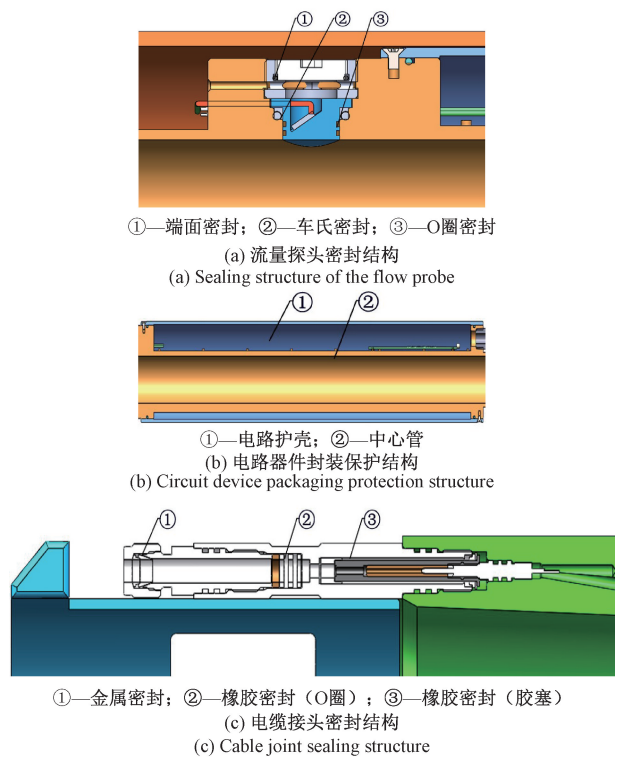
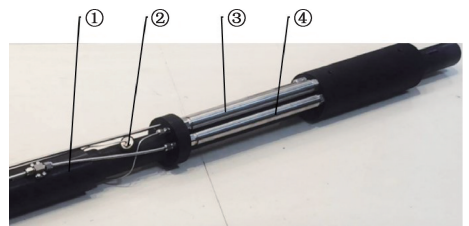


图 9 井下测量工具关键密封结构设计

Fig. 9 Key sealing structure design of downhole measuring tools

## 3.3 仪器样机

为适应井下使用要求,将超声多普勒传感器和电路进行一体化设计,样机以模块化工具形式可适配各种井下应用要求,并且可以接入各种智能化测控系统,工具样式如图 10 所示。该工具通过 $125^\circ\text{C}$ 、60 MPa 的高温压环境测试,信号稳定、重复性良好。



①—过流中心管;②—超声探头;③—流量电路模块;④—电源模块

图 10 井下多普勒流量测量样机

Fig. 10 Underground Doppler flow measurement prototype

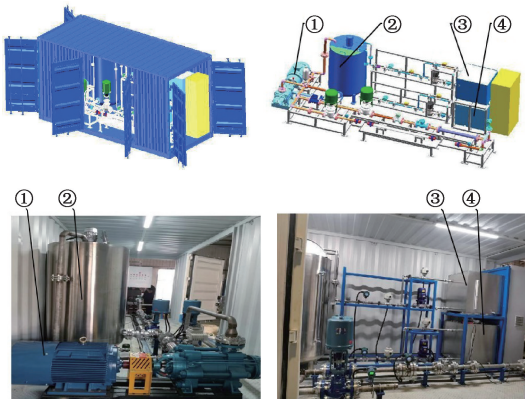
## 4 实验结果与分析

### 4.1 稳态工况测试

为验证所开发的井下多普勒流量测量计的测量准确性和稳定性,使用标定环路进行油水混相标定测试,实验测试环路如图 11 所示。流量测试装置包括油泵循环管线、水泵

循环管线和混合液(主泵)循环管线 3 部分。流量标定过程中,首先根据两相流油、水比例需求,分别通过油泵、水泵往混合罐里泵入一定量的油和水;油和水在混合罐里充分搅拌后,通过调整主泵频率使油水混合物以一定的流量进入混合液循环管线,并在测试管段处完成超声波测量;将流量测量值与标准流量计的结果进行对照,即可完成额定油水比例的两相流流量标定试验。实验工况参数:

- 1) 流程流量测量范围:  $10 \sim 1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ;
- 2) 非油相介质: 纯水;
- 3) 油相介质: 白油型号—90#;
- 4) 油相占比: 40%。



①—储水罐及水泵模块;②—储油罐及油泵模块;  
③—油水混合罐;④—主泵

图 11 油水两相流流量试验装置示意图及实物图  
Fig. 11 Schematic diagram and physical diagram of the oil-water two-phase flow test device

实验中,在  $0 \sim 800 \text{ m}^3/\text{d}$  范围内等间隔标定 9 个流量点。每次标定过程中,通过计量管排控制标准流量值,并同步记录高精度超声多普勒流量测量模块测量流量原始值并计算流量工程量。标定界面如图 12 所示。

本文对 14 套井下超声多普勒流量测量模块进行了标定,误差记录见表 1。标定结果显示最大流量误差值为  $2.959 \text{ m}^3/\text{d}$ ,换算百分比误差为  $\pm 0.59\%$ 。所有测量误差都小于  $\pm 1\%$ 。

#### 4.2 动态响应测试

为验证所开发井下超声多普勒流量测量计在动态环境下的响应情况,通过改变压力对环路施加动态波动流体。如图 13 所示,在周期波动范围中,所开发的井下多普勒流量测量计的测量结果和参照流量计(涡轮流量计,型号: LWGY-DN50,精度:  $\pm 1\%$ ,最小流量  $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,最大流量  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ )的测量结果都与压力变化有相同的整体波动趋势,但所开发井下多普勒流量测量计响应速度更快。从图中绿色框选区域可以发现,在压力局部波动时,所开发的井下多普勒流量测量计可以快速跟踪流体变化,而参照流量计响应滞后且几乎没有响应到局部波动,表明井下多普勒流量测量模块能够更真实快速的响应流体变化。

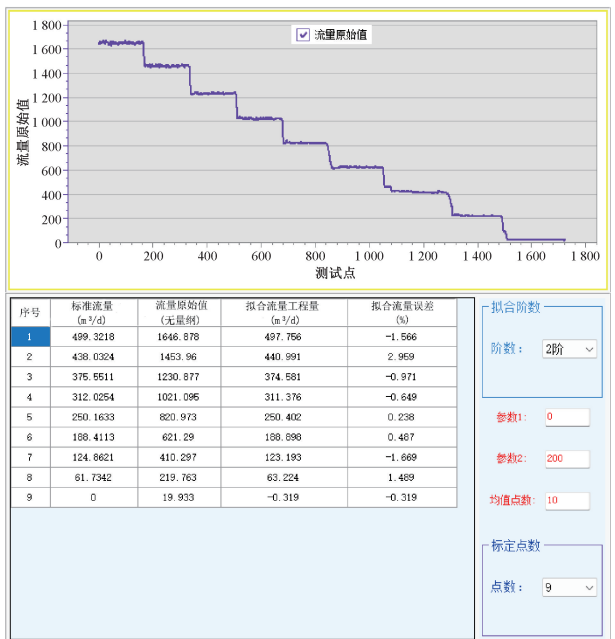


图 12 井下超声多普勒流量测量模块标定界面  
Fig. 12 Calibration interface of the underground ultrasonic Doppler flow measurement module

表 1 标定误差记录表

Table 1 Calibration error record sheet

编号	误差(F.S.)/%	编号	误差(F.S.)/%
01	$\pm 0.59$	08	$\pm 0.56$
02	$\pm 0.55$	09	$\pm 0.50$
03	$\pm 0.40$	10	$\pm 0.38$
04	$\pm 0.31$	11	$\pm 0.54$
05	$\pm 0.34$	12	$\pm 0.37$
06	$\pm 0.37$	13	$\pm 0.39$
07	$\pm 0.41$	14	$\pm 0.37$

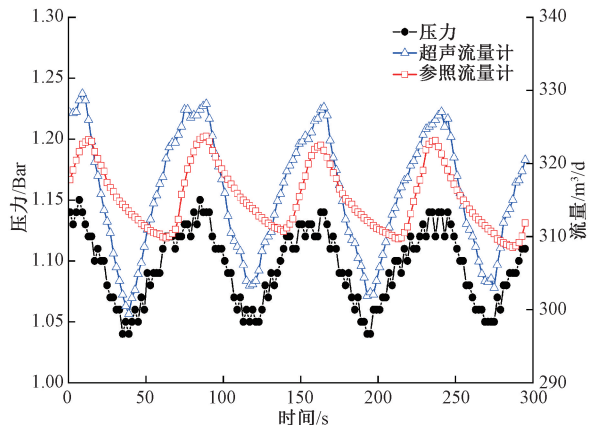


图 13 动态波动下井下超声多普勒流量计和参照流量计测试  
Fig. 13 Comparison of test results between underground ultrasonic Doppler flowmeters and reference flowmeters under dynamic fluctuations

通过对采样测试范围的数值对比可知,所开发的井下多普勒流量测量计的波动幅度比参照流量计略大,但两种传感器采集数据的均值相对误差非常小,均小于 1%,详见表 2。

表 2 动态波动下井下超声多普勒流量计和参照流量计的测试均值对比结果

Table 2 The comparison results of the test mean values of the downhole ultrasonic Doppler flowmeter and the reference flowmeter under dynamic fluctuations

压力 均值/ Bar	井下超声多普勒 流量计均值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	参照流量 计均值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	相对 误差/%
0.51	153.74	155.21	-0.95
0.84	263.44	261.02	0.93
1.06	315.78	315.30	0.15
1.22	374.23	377.32	-0.82
1.51	474.50	472.47	0.43
1.72	630.21	628.41	0.29
1.96	745.23	740.52	0.63

## 5 现场应用及效果

本文开发的超声流量计于 2024 年 10 月,在渤海 XX34-1 油田 E31 井施工应用,该油井最大井斜  $61.22^\circ$ ,井深 1 885 米,分 3 层段压裂砾石充填完井,各层段均下入流量测量工具进行流量测量,一共下入 3 套测量工具。测量工具下入井下后,测量功能正常,待油藏稳定生产后,分别连续两天进行各层流量测量,流量井下测量实测数据及误差如表 3 所示。

表 3 流量井下测量实测数据及误差

Table 3 The measured data and errors of underground flow measurement

测试 日期	井下工具测试数据	地面测量实际值			相对 误差/%
		单层 产液量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	总产 液量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	总产 液量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	
2024. 10.22	一层	51.10			
	二层	36.30	92.20	89.7	2.79
	三层	4.80			
2024. 10.23	一层	49.40			
	二层	35.70	89.20	90	-0.89
	三层	4.10			

通过对比井下各分层段实测流量值,得到单井总产液量,测量数值与地面测得实际值对比,测量相对误差在

2.79% 范围内。上述结果表明,所开发的超声多普勒流量计在井下实测误差值满足 5% 设计要求,参数指标满足矿场应用需求;然而现场应用实测值误差大于室内值约 2%,这是因为实际应用声场或电路受到的干扰因素更为复杂,未来需进一步挖掘系统抗干扰潜在提升方向。

## 6 结 论

本文基于超声波原理超声多普勒补偿修正模型,提出一种井下精确流量测量技术,基于该模型研发了井下多普勒流量测量模块,取得如下研究结论:通过建立基于多普勒效应的流速剖面测量模型和基于脉冲回波强度的声速测量模型,结合分层积分原理构建的声速补偿流量测量模型能够有效适应流体状态变化和环境温度波动。该模型实现了流速剖面的自适应重构,显著提高了流量测量的准确性和可靠性,即使在复杂的多相流条件下也能保持高精度测量;设计并制造了适用于井下高温高压环境的测试板卡、超声传感器参数、测试管段结构及密封方式,能够在  $125^\circ\text{C}$  和 60 MPa 的极端条件下稳定工作,满足井下复杂工况的要求;实验结果表明,该流量测量模块在实验室环境下稳态测量误差小于 1%。此外,在动态波动测试中,与参照流量计相比,所开发的模块能够更真实地反映流体变化,响应速度更快,表现出优异的动态响应性能;超声多普勒流量计在矿场取得实际应用,表明基于声速补偿的超声流量计,实测误差在 3% 以内,优于以往多普勒超声流量计误差 5% 数值,同时,验证了超声模块探头和电路核心组件耐高温高压性能。

## 参考文献

- [1] 郑新建,马勇新,曾桃,等. 井下多相流测量技术综述[J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(3): 31-34.  
ZHENG Y J, MA Y X, ZENG T, et al. A review of downhole multiphase flow measurement technologies[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2016, 32(3): 31-34.
- [2] 吕长达. 浅谈油气田常用流量计的分类及选型[J]. 中国仪器仪表, 2022(3): 53-56.  
LYU CH D. Brief discussion on the classification and selection of common flowmeters in oil and gas fields[J]. China Instrumentation, 2022(3): 53-56.
- [3] 郝虎,陈晓玉,孔德明,等. 一种永置式石油生产地面多井组单井轮巡三相流监测装置及应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 193-203.  
HAO H, CHEN X Y, KONG D M, et al. Research on a permanent surface multi-well group single-well patrol three-phase flow monitoring device for petroleum production and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 193-203.



- [4] 卢嘉敏, 张强, 张达远, 等. 差压式流量计综述[J]. 计量技术, 2018,(1): 9-12.  
LU J M, ZHANG Q, ZHANH D Y, et al. A review of differential pressure flowmeters[J]. Measurement Technique, 2018,(1): 9-12.
- [5] ZHAN M K, BIN RAZALI M A, MOITRA A, et al. Influence of design parameters of upstream Venturi pipeline on multiphase flow measurement [J]. Eniginneing Applications of Computational Fluid Mechanics, 2023,(17): 1-13.
- [6] 李霞, 黄志尧, 王保良, 等. 应用单相流量计测量油水两相流[J]. 工程热物理学报, 2008,(11): 1872-1874.  
LI X, HUANG ZH Y, WANG B L, et al. Measurement of oil-water two-phase flow using single-phase flowmeters [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008,(11): 1872-1874.
- [7] TAN CH, WU H, WEI C, et al. Experimental and numerical design of a long-waist cone flow meter[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 199(1): 9-17.
- [8] LI L, WANG M, WANG D H, et al. Development of differential pressure flowmeter and its application in coalbed methane wells[J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135(22): 124901-124913.
- [9] JAZIRIAN H, JAFARKAZEMI F, RABIEEFAR H. A modified correlation for calculating water & air mass flowrate in two-phase gassy liquid flow passing over a V-cone meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, 93, DOI: 10.1016/j. flowmeasinst. 2023. 102422.
- [10] 李小亭, 王小杰, 方立德, 等. 新型内外管差压流量计特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2371-2379.  
LI X T, WANG X J, FANG L D, et al. Study on characteristics of a new type of inner-outer tube differential pressure flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(10): 2371-2379.
- [11] 朱宇辉, 丁川, 阮健. 容积式流量计的研究现状及展望[J]. 液压与气动, 2019,(4): 1-14.  
ZHU Y H, DING CH, RUAN J. Research status and prospect of positive displacement flowmeters [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(4): 1-14.
- [12] ZHOU F, YANG Q F, LIN K. Evaluation index and performance structure optimization of magnetic field uniformity of complex multiphase flow electromagnetic flowmeter [J]. Measurement & Control, 2022, 55(12): 62-71.
- [13] 杨瑞峰, 朱义德, 郭晨霞, 等. 互相关渡越时间超声波流量计精度补偿[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 63-67.  
YANG R F, ZHU Y D, GUO CH X, et al. Accuracy compensation of cross-correlation transit time ultrasonic flowmeter [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5):63-67.
- [14] 王兴国, 张路鑫, 尧亮富, 等. 管道内流体流量的超声多普勒测量 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 96-103.  
WANG X G, ZHNAG L X, YAO L F, et al. Measurement of pipeline flow using ultrasonic Doppler method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 96-103.
- [15] SHI X W, TAN CH, DONG F, et al. Conductance sensors for Multiphase flow measurement: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, PP(99): 1-1.
- [16] ZHAI L SH, JIN N D, GAO ZH K, et al. Cross-correlation velocity measurement of horizontal oil-water two-phase flow by using parallel-wire capacitance probe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 53: 277-289.
- [17] TON V. Validation of a mathematical model of ultrasonic cross-correlation flow meters based on industrial experience [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, 93, DOI: 10.1016/j. flowmeasinst. 2023. 102438.
- [18] REN R, WANG H L, SUN X L, et al. Design and implementation of an ultrasonic flowmeter based on the cross-correlation method[J]. Sensors, 2022, 22(19): 21.
- [19] 史雪薇, 董虓霄, 谭超, 等. 油水分散流超声互相关流速测量方法 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(3): 562-567.  
SHI X W, DONG X X, TAN CH, et al. Ultrasonic cross-correlation velocity measurement method for oil-water dispersed flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3): 562-567.
- [20] 姚爽, 宿彬, 杨宗良, 等. 上游弯管对超声波流量计精度影响及整流设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 102-109.  
YAO SH, SU B, YANG Z L, et al. Influence of upstream elbow on ultrasonic flowmeter accuracy and rectification design[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 102-109.
- [21] SMITH L, DIXON S. A deflected ray model of the transit time difference in ultrasonic flow meters applied to non-ideal flow profiles[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2024, 97, DOI: 10.1016/j. flowmeasinst. 2024. 102628.

- [22] TAN CH, MURAI Y, LIU W L, et al. Ultrasonic doppler technique for application to multiphase flows: A review [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 144: 103811.
- [23] DONG X X, TAN CH, YUAN Y, et al. Measuring oil-water two-phase flow velocity with continuous-wave ultrasound Doppler sensor and drift-flux model [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(5): 1098-1107.
- [24] DONG X X, TAN CH, DONG F. Gas-liquid two-phase flow velocity measurement with continuous wave ultrasonic Doppler and conductance sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(11): 3064-3076.
- [25] LI ZH, TAN CH, ZHANG S M, et al. Global-local state analysis and monitoring-based velocity measurement of oil-gas-water three-phase flow [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497, DOI: 10.1016/j.cej.2024.154759.
- [26] IHARA T, KIKURA H, TAKEDA Y. Ultrasonic velocity profiler for very low velocity field [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2013, 34: 127-133.
- [27] SHI X W, DONG Y J, TAN CH. Flow rate measurement of oil-gas-water three-phase slug flow using pulse wave ultrasonic Doppler technique [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74, DOI:10.1109/TIM.2025.3561390.
- [28] LIU W L, TAN C, DONG X X, et al. Dispersed oil-water two-phase flow measurement based on pulse-wave ultrasonic Doppler coupled with electrical sensors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(9): 2129-2142.
- [29] INDIMATH S, FIORENTINI S, BOKELEPP BR, et al. Optimization of pulsed-wave Doppler ultrasound for estimation of influx/efflux in oil and gas boreholes while drilling using conventional LWD Transducers [J]. *SSRN Electronic Journal*, 2022, 218, DOI:10.1016/j.petrol.2022.111000.
- [30] SHI X W, TAN CH, DONG F, et al. Flow rate Measurement of oil-gas-water wavy flow through a combined electrical and ultrasonic sensor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427, DOI: 10.1016/j.cej.2021.131982.
- [31] SHI X W, DONG F, TAN CH. Horizontal oil-water two-phase flow characterization and identification with pulse-wave ultrasonic Doppler technique [J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 246, DOI: 10.1016/j.ces.2021.117015.

#### 作者简介

左凯(通信作者),博士,高级工程师,主要研究方向为海洋石油钻采工艺及工具和智能完井。

E-mail: zuokai@cnooc.com.cn