

# 多相流过程参数检测技术综述

谭超<sup>1</sup> 董峰<sup>1</sup>

**摘要** 多相流是现代流程工业及其相关科研领域内常见的控制与研究对象, 对其过程参数的检测是工业生产与科学研究中的一个研究热点问题. 本文针对工业过程中的多相流过程参数检测问题, 介绍了多相流的特点及其过程参数, 并分类介绍了多相流过程参数检测方法, 重点讨论了检测的难点及其未来发展趋势, 为更好地解决复杂工业过程多参数检测问题提供方法基础和借鉴.

**关键词** 工业过程参数, 检测技术, 多相流, 流型识别, 流量测量, 含率估计

**引用格式** 谭超, 董峰. 多相流过程参数检测技术综述. 自动化学报, 2013, 39(11): 1923–1932

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2013.01923

## Parameters Measurement for Multiphase Flow Process

TAN Chao<sup>1</sup> DONG Feng<sup>1</sup>

**Abstract** Multiphase flow, as a typical research and control object, is a frequently encountered phenomenon in modern process industries and related scientific research fields. Measurement on its process parameters has been a widely investigated topic in engineering and academic researches. This paper aims at the measurement of process parameters of multiphase flow in process industries, introduces the characteristics and process parameters of multiphase flow, along with related measurement techniques in different categories. The difficulty and future trend of multiphase flow process parameter measurement are specially discussed to provide a fundamental measuring method to the measurement on multi-parameter of other complex industrial processes.

**Key words** Industrial process parameters, measuring techniques, multiphase flow, flow pattern identification, flow rate measurement, phase fraction estimation

**Citation** Tan Chao, Dong Feng. Parameters measurement for multiphase flow process. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1923–1932

多相流现象广泛存在于能源、动力、石油、化工、冶金、医药等工业过程中, 在工业生产与科学研究中有着十分重要的作用, 并带来许多安全与经济问题, 对其流动过程机理及状态的解释和描述、以及对流动过程参数的准确检测也给工程师和科研人员提出挑战<sup>[1]</sup>. 近年来, 国际上对多相流的研究兴趣在持续增长, 其原因在于多相流不仅在一系列现代工程中得到广泛应用, 而且对促进这些工程设备的发展和革新也起到了重要作用<sup>[2]</sup>.

随着工业水平的不断提高, 对工业过程控制精度的要求也在不断提升, 而过程参数的检测是实现准确控制的重要基础. 现代工业过程正在向高精度、多变量的复杂系统控制方向发展, 因此如何解决复杂工业过程中多参数精确检测问题是促进过程控制发展的基础. 作为一种复杂的流动现象, 多相流过程参数的检测一直是工业界亟待解决的问题<sup>[3]</sup>. 例如在海洋石油工业中, 一般将多口离岸油井开采的混合物 (通常包括天然气、水与原油) 输送至平台集中, 经过分离等处理后装船或通过混输管道输送至其它地方. 因此需要得到各井的流动状态、流量、压力及各分相含率的变化等准确信息, 以避免危险情况与经济纠纷的发生. 传统的方法是在操作平台上完全或部分分离混合物, 并用常规测量手段分相测量. 然而, 平台的空间与能耗都是极其珍贵的, 因此大型分离器的经济性使其应用优势大打折扣<sup>[4]</sup>.

本文针对工业过程中常见的多相流过程参数检测问题, 从待测参数及其检测方法方面进行综述, 并阐述多相流过程参数检测的难点及发展趋势.

收稿日期 2013-07-02 录用日期 2013-08-28  
Manuscript received July 2, 2013; accepted August 28, 2013  
国家自然科学基金 (61227006, 61104207, 51176141), 国家重大科学仪器设备开发专项 (2011YQ120048) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61227006, 61104207, 51176141), National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects of China (2011YQ120048)  
庆祝《自动化学报》创刊 50 周年专刊约稿  
Invited Articles for the Special Issue for the 50th Anniversary of *Acta Automatica Sinica*  
1. 天津市过程检测与控制重点实验室 天津大学电气与自动化工程学院 天津 300072  
1. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072

## 1 多相流与多相流检测

### 1.1 多相流及其特点

多相流中的“相”定义为物质的存在形式,即气态、液态或固态,因此多相流即为两种或两种以上“相”的物质同时流动且具有明确分界面的流体.有时,多相流也被称为“多组分流”,然而两者是不同的,后者指流体中含有多种不同化学性质的物体同时流动.例如蒸汽与水的混合为单组分的双相流,而空气与水则称为两组分流;液/液两相流中的油水混合流,属于两组分流,但却是单一的“液相”.但随着研究的深入与连续相与离散相概念的引入,两种概念逐渐合为一种,即“多相流”<sup>[1]</sup>.

在工业生产过程中比较多见的是气液、气固、液固、液液两相流,气液固三相流和油气水三相流等;在某些工业过程(如石油工业)中,还有油气水沙同时流动的四相流.与单相流相比,多相流的待测参数多且流动过程十分复杂,难以用数学公式完全描述,因而给测量带来困难.以三相流为例,若想获得各分相流量,需要检测出三相流总流量,以及各分相含率,即至少四个待确定的参数.此外,不同的研究领域和工程应用对多相流参数的需求也是不同的,因此待测参数更加多种多样,如图1所示.多相流流动总是伴随着相间的质量、动量以及热量的同时和瞬时的传递,使得流动过程更加复杂<sup>[5]</sup>.多相流流动时所表现出的流体现象称作“流型”或“流态”,它决定着流体的动力特性以及相应的检测方法.尽管许多流体方程能用来解决流体流动问题,但大都局限于特定的假设和适用条件,因此难以直接使用建立准确的检测模型.

### 1.2 多相流研究与工程中的检测技术

对多相流的检测可以追溯到二十世纪初,其后在实验室和工业范围内发展出许多检测手段和模型<sup>[6]</sup>.多相流的检测技术从应用目的可以分为科学研究类测试技术与仪器,以及工业用多相流测量技术与仪表.科学研究类测试技术与仪器主要为多相流基础问题研究服务,目的多为流体局部参数的精细检测,如泡径、局部流速等,检测手段限制不大,且应用环境相对稳定,因此可广泛采用各种测试手段进行研究,小到光学探针,大到核磁共振等均可使用.工业用多相流检测技术与仪表主要用于工业过程中多相流动过程参数的检测,进而对工业过程实现状态监测与控制,因此对仪表的检测手段有一定的限制,如非侵入、耐腐蚀、无辐射等,且被测变量是过程平均值<sup>[3]</sup>.

随着科技的发展,工业界的要求也相应的提升,许多检测手段被应用在多相流测量中,例如传统方法中的文丘里、孔板等,以及新兴技术中的微波、射线以及层析成像等<sup>[7]</sup>.本文所讨论的多相流以石油工业过程中常见的油气水多相流为主,包括两相流(主要为气液、液液)与三相流(主要为油气水),所介绍的检测方法,发展自不同的应用场合.然而,由于多相流的变化范围很大,因此尚未有单一的检测技术可以完全适应各种多相流的应用.

## 2 多相流过程参数检测方法发展概况

多相流过程参数检测策略随着工况与对象属性的变化而变化,可以利用的物理现象与关系很多,因此检测手段也多种多样.检测方式可分为两大类:直接法与间接法.直接法指的是对象参数能够通过

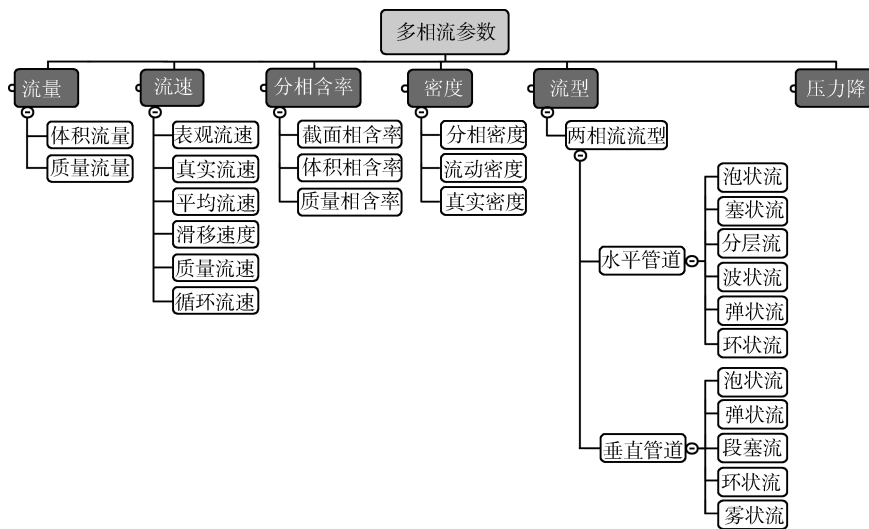


Fig. 1 多相流的过程参数

Fig. 1 Process parameters of multiphase flow

测量直接得到, 而间接法则需要在测量值(辅助测量值)与对象参数之间建立的关系式通过计算得到, 即“软测量”方法。在多相流测量领域内, 许多直接采用单相流仪表的检测方法属于直接法, 而新兴的检测技术则多采用软测量的方法。对于传统单相仪表在气水与油水两相流中的应用问题, Skea 和 Hall 指出这类仪表在检测混合流量时的性能良好, 但在检测含率时的误差很大<sup>[8-9]</sup>。

在工业过程中, 多相流流量是最主要的检测与控制参数, 特别是多相流中某一相的实时流量对工业过程监控是十分重要的。然而为了准确获得多相流流量, 另外两个重要的过程参数, 即流型与含率是必须要考虑的参数。

## 2.1 流型识别方法

### 2.1.1 多相流流型的多样性

管道中多相流呈现出的几何与动力特征不同的流动形态称为流型, 它可通过组分或相的形态来描述, 但难以实现定量描述, 因为流动的参数随着流型变化, 且作用在流体上的力与参数的关系也十分复杂<sup>[10]</sup>。这些作用包括流体力学分析中十分重要的浮力、湍流以及表面张力等, 均随着流速、管径、管道倾斜角度以及各分相流体性质等变化。作为多相流最直观的表现形式, 流型的变化可以直接影响工业过程的效率和安全。例如石油工业中要尽可能避免严重段塞流对油井井口的影响, 而在多相流输送过程中, 又需要某些特定的流型来减少压降与管道磨损, 提升输送效率<sup>[11]</sup>。此外, 尽管流体的基本方程十分接近, 但各流动参数在不同流型下的关系是不同的, 并且一种流型下的检测方法所能达到的精度, 在另一种流型下则很难达到。因此对多相流流型的准确识别不仅有助于工业生产与流动安全的保障, 也对多相流过程参数的准确检测有直接的作用。因此流型识别是实现流型控制的基础。

流型可根据管道角度分为垂直管流型与水平管流型, 以及介于二者之间的倾斜管流型。此外, 根据对象物性不同也可分为气液两相流、油水两相流、油气水三相流以及油气水固多相流流型等。

在气液两相流中, 受垂直作用在水平管道上的重力的影响, 管道内的流体会由于密度不同而逐渐分离, 使流态变得复杂。垂直管道中的两相流动则多呈对称性, 因此流型相对简单, 一般分为四或五类<sup>[12]</sup>: 泡状流、冒状泡状流、弹状流、搅拌流与环状流。尽管对不同物质的气液两相流流型的研究已经十分广泛, 其中一些模型也已在工业中获得应用, 但只有少量的气液模型能用在油水流动中。油水两相流间的动量传递与浮力作用是造成油水流动结构不同的根本原因, 而且油水界面处的自由能量容易形

成更短的界面波动和更小的离散相颗粒。因此通常将油水两相流分成两大类: 分相流和分散流。分相流一般存在于水平与近似水平的管道中, 分散流则在垂流运动中十分常见。此外, 根据油水两相的连续相性质, 又可将油水流型分为水基流型与油基流型。油水流型研究的另一个问题是油的特性变化范围极大, 以油与水的粘度比为例, 其变化范围在零点几到几百万之间, 而油的属性改变直接导致其流动的几何形态和流态发生变化, 如重油流型与轻油流型<sup>[13]</sup>。多相流流型的判断受观测者的主观影响很大, 不同的研究者对流型的定义自有其标准, 甚至会在同一实验条件下给出不同的观测结果。

对三相流的定义涵盖了多种组合, 比如气固液三相流、气液液三相流等。在石油工业中常研究的是油气水三相流, 也即气液液三相流的一种。由于油气水三相流在石油化工行业的广泛存在, 对其内在特性和机理的研究变得十分迫切。尽管对两相流的研究已经取得丰硕的成果, 但三相流的流动机理与两相流差别非常大, 现有的理论难以直接应用<sup>[14]</sup>。对三相流的流型研究一度将油相与水相混合物简化为单一液相考虑, 简化了分析和模型, 但仅局限于特定的应用环境<sup>[15]</sup>。为了更深入地研究三相流的流型机理, 需要将各相分别考虑, 目前已取得了很好的初步结论<sup>[16]</sup>。此外, 油相性质变化范围很广, 油气水混合物的性质也千差万别, 由此派生了许多不同的流型定义。其中一个广为认同的流型分类是由 Açıkgöz 在 1992 年提出, 与油水两相流流型分类类似, 将油气水三相流分为油基流型与水基流型两大类, 各子类别与气液两相流流型相同<sup>[17]</sup>。

### 2.1.2 流型识别技术

流型识别的方法多种多样, 其中视觉观测是最基本、最直观的流型识别方法, 因为流型就是通过其流动的几何形态定义的。视觉方法不仅仅局限于肉眼的直接观测, 粒子成像测速<sup>[18]</sup>与层析成像<sup>[19]</sup>等技术都能作为观测的辅助手段。然而, 该方法始终受到观测条件的影响, 其识别率也随着观测方法与观测者变化。

流型图是在实验数据与理论推导的基础上, 通过建立不同流动参数间的关系来直观反应流型分布的图形, 它可用来识别流型和预测流型变化。需要注意的是, 流型图是基于视觉观察基础上建立的, 并且流型图随着其建立条件的变化而改变。一般来讲, 对于气/水, 有水平管流型图, 垂直管流型图以及倾斜管流型图。此外, 管径的变化也影响流型图中的流型分布。通常, 流体混合表观速度(总流量与管道面积之比)或是混合流动通量(包含有量纲或无量纲形式)作为流型图的坐标。例如 Taitel 在 1976 年给出

的气水水平管流型图等<sup>[20]</sup>。

其他识别方法基于各种传感器的测量信号, 通过测量流体某些参数的变化, 如压力或电导率等识别流型. 此类的流型识别方法分为两步: 首先从测量数据中提取出能够反映流型变化的特征值, 然后利用分类/识别算法将不同流型下的特征值归类. 流型识别过程中涉及信号处理技术、分类技术、特征提取与模式识别技术等.

数据处理阶段采用各种信号处理和特征提取算法, 例如小波变换<sup>[21]</sup>、统计算法<sup>[22]</sup>、非线性时间序列分析<sup>[23]</sup>等. 这些算法可根据不同的检测方法来选择, 且只在特定的条件下才能达到理想的精度, 因此没有哪一种算法能完全优于其它的方法. 分类识别阶段采用的模式识别算法包括支持向量机<sup>[24]</sup>、神经网络<sup>[25]</sup>、动态聚类<sup>[22]</sup>等. 此外, 基于基本流体参数(压力等)的建模方法也能进行流型转换的预测<sup>[26]</sup>. 新兴的层析成像技术能提供测量截面的相分布信息, 因此可分别利用可视化方式和信息处理方法实现流型识别<sup>[27]</sup>. 大部分算法都能在特定的实验或工业条件下达到高于 85% 的平均识别率. 同时, 对流型的研究逐渐向流型的形成与过度机理方向发展, 以及对流型转换的预测等<sup>[28]</sup>. 此外, 气相与非牛顿流体的两相管流与小管径的气水两相流也是研究热点<sup>[29]</sup>.

## 2.2 流量检测方法

多相流流量(流速)检测的方法有很多种, 其中的一些发展自单相流检测仪表, 其他则来自于新兴的基于多相流特性的检测方法. 以下仅对一些常用仪表进行介绍.

### 2.2.1 差压流量计

差压流量计是基于伯努利方程, 通过测量流体流经节流组件时产生的压力差来计算流量的检测装置. 差压流量计发展自并主要应用于单相流体的检测, 对其在多相流检测中的应用也进行了大量研究, 并发展出许多适用于多相流测量的模型<sup>[30-31]</sup>. 在多相流检测中常用的差压流量计是文丘里流量计, 该种流量计基于文丘里效应设计<sup>[32]</sup>. 文丘里流量计经常与含率检测装置搭配使用, 可同时提供总流量与各分量流量信息, 并取得了良好的检测结果<sup>[33]</sup>. 目前较流行的差压流量计是内锥式流量计, 它在湿气检测中有不堆积液体等优势, 在多相流检测中的应用也是研究的热点之一<sup>[34-35]</sup>. 然而, 节流组件会干扰流动状况, 并带来压力损耗.

### 2.2.2 容积式流量计

容积式流量计的原理是被测流体流经一个固定容积容器, 通过计量流过的次数来计算流体的体积流量. 理论上, 容器的旋转速度与流速成正比, 然而在实际中这种线性对应关系仅存在于一定的范围之

内. 容积式流量计按测量组件结构分类可分为椭圆齿轮流量计、腰轮流量计、活塞式流量计、刮板式流量计等. 在多相流测量中, 容积式流量计可以测量流体的总流量, 其应用范围包括湿气、气液以及油水两相流<sup>[36]</sup>. 容积式流量测量技术的优点有: 精度高、调节比大、没有前置直管段要求并且信号输出与流量成比例. 但在使用时对管路有阻塞作用, 容易引起流体的脉动, 且结构复杂, 体积庞大, 在流体含有颗粒及脏污物时影响测量精度, 并易受流动对象腐蚀.

### 2.2.3 速度式流量计

速度式流量计指直接或间接通过检测流体流速来获得流量的一种检测仪表, 包括涡轮式流量计、涡街式流量计、电磁式流量计以及互相关测速法等.

涡轮式流量计利用流体流动推动叶轮转动, 此时流体流速与叶轮转速成正比, 通过测量叶轮转速即可得到流体的流速. 涡轮式流量计在测量油水两相流时会受到油相黏度与油相含率的影响, 因此在使用前需对仪表系数进行标定<sup>[37]</sup>. 但涡轮式流量计受流型影响较小, 因此也可与其他测量手段联用, 获得油气水多相流的分相流量<sup>[38]</sup>.

涡街式流量计利用管道中安装的钝体对流体形成扰动, 当流体流过该钝体时会在下游形成有规则的漩涡, 该漩涡的产生频率与流体的流速成正比. 在气液两相流检测中, 涡街发生的频率受相含率影响很大, 当相含率高于 18% 时, 难以从气液两相流的复杂界面波动中提取出有效的涡街频率信息<sup>[39]</sup>. 此外, 涡街流量计也可用于气液两相流流型的识别<sup>[40]</sup>.

电磁式流量计在被测管道两侧安装磁场发生器(如永磁铁或励磁线圈)并在管道中形成磁场, 根据法拉第电磁感应定律, 管道内流体切割磁力线时产生的感生电动势与流体流速成正比. 在多相流检测中, 需要连续相为导电时才能使用电磁式流量计, 且测量精度受多相流速度廓形以及流型影响. 为此, 提出一种用于多相流检测的多电极电磁流量计, 可以降低流型对检测精度的影响<sup>[41]</sup>, 也可在此基础上实现多相流流速分布的检测<sup>[42]</sup>.

相关流速测量技术是以随机过程的相关理论和信息论为基础发展起来的一种流动参数检测技术. 当多相流体在管道内流动时, 会产生与流动状况有关的波动信号, 这些波动包含了多相流局部浓度的随机变化, 具有随机性质. 在管道上沿轴线方向安装两个结构相同的传感器(例如, 光学、电学、声学等). 只要传感器间距  $L$  设计合理, 且两传感器和变送器的静态与动态性能完全一致, 根据 Taylor 的“凝固”流动图形假设, 被测流体在上游传感器处引起随机信号的调制机制在经过一定时间后, 会在下游传感器处重复出现, 并引起相似的作用, 也即在下游传感

器上获得的信号只是上游传感器信号滞后  $\tau_0$  时间的相同信号, 其中  $\tau_0$  称为渡越时间. 因此对互相关速度的检测就转化为对渡越时间的获得<sup>[43-44]</sup>. 互相关流速测量方法的优势之一在于可配合使用的检测技术十分广泛, 包括静电法<sup>[45]</sup>、阻抗法<sup>[46]</sup>、超声法<sup>[47]</sup>等, 均能利用互相关测速技术实现多相流流速检测. 虽然互相关流速检测方法在多相流内应用很广, 但仍受到测量值所代表的物理含义问题困扰. 为此, 研究人员提出过许多理论与模型, 但该问题仍未得到清晰的解答<sup>[48]</sup>.

### 2.2.4 质量流量检测

质量流量是石油化工等工业中的重要指标, 对其检测方法总体分为两大类: 直接检测法与间接检测法. 前者包括克里奥立流量计等直接获得质量流量的流量计, 后者则指提供过检测体积流量与密度来计算质量流量的流量计<sup>[33]</sup>. 在质量流量的各种检测手段中, 克里奥立流量计的发展备受关注<sup>[49]</sup>.

Li 和 Lee 在 1953 年率先利用克里奥立效应测量气水两相流的质量流量, 并发现振动/旋转管道中的克里奥立力与流经流体的质量流量呈线性关系. 然而克里奥立流量计在多相流的检测中仍存在一些问題, 例如气水两相流中, 只有当两者充分混合的情况下才能达到单相流的检测精度. 当气量过大时, 气体并不完全随着测量管振动, 因而达不到理想的检测精度. 如与含水率仪共同使用, 克里奥立流量计也可在含气率低于 50% 的条件下实现油气水三相流质量流量的检测<sup>[50]</sup>. 作为一种新兴的检测手段, 多相流克里奥立流量计仍需时日加以完善, 但无疑它将会在多相流的检测中得到更广泛的应用.

## 2.3 相含率检测方法

多相流的相分 (体积或质量) 含率是多相流的一项重要指标, 对其检测的难度也十分大, 涉及到的检测方法有电学法、射线法、快关阀法, 核磁共振法以及微波法等<sup>[3]</sup>.

### 2.3.1 射线法

当 X 射线或  $\gamma$  射线穿透流体时幅值会发生衰减, 且衰减程度与流体的性质有关<sup>[51]</sup>. 射线与被测物体的作用方式分为散射与吸收两类, 在考察射线衰减的作用时这两种效应均应考虑. 通常, 单束的  $\gamma$  射线可以检测气液等两相流体. 而对三相流动系统则需先检测其中两相的含率, 后通过三相含率之和为 1 的关系来计算第三相含率. 可以采用其他方法作为辅助的相含率检测手段, 如果仅采用单一射线法, 则可使用双能射线分别检测两相的相含率<sup>[52]</sup>.

由于射线源的固有特性, 测量精度越高耗时越长, 因此需要在检测时间与精度上做平衡. 射线强度高的射线源可以降低测量时间, 但需要更好的防

护手段防止对周围环境的破坏<sup>[28]</sup>. 尽管单束射线法 (包括双能射线系统<sup>[53]</sup>) 能达到  $\pm 5\%$  的检测精度, 但受流型影响很大. 只有当各相均匀混合时, 相含率的计算才准确. 为了克服这个问题, 发展出一种基于多射线束的技术, 该系统结构复杂, 造价高因此使用范围受限, 但其检测精度很高, 因此多用在多组分流动的檢測上<sup>[54]</sup>. 目前, 基于射线法的高速层析成像系统已经出现, 可以实现两相流的流动过程重建和过程参数检测<sup>[55]</sup>.

### 2.3.2 电学法

不同流体介质具有不同的电学特性, 因此可以通过检测多相流的电阻抗计算相含率. 一旦确定了介质电阻抗与相分布之间的关系, 便能计算出平均含率<sup>[53]</sup>. 该方法的主要特点是, 介质在不同频率的激励信号下表现出不同的电学特性: 对于低频电信号 (10 kHz ~ 100 kHz), 主要表现为电阻特性, 在更高的频率下则为电容特性. 因而电学法分为电导 (电阻) 法与电容法. 电导法与电容法均受流型的影响, 也仅局限于一定的含率范围. 例如用接触式电极的电容法检测气水两相流, 当水相成为连续相时 (水含率达到 50% 左右) 会发生短路现象, 此时的检测值不再对截面内的含率变化敏感而只是一个固定的检测值<sup>[56]</sup>. 电学法在均匀混合流动下的检测精度较高, 但精度会在“反相” (即占据主导的连续相由多相流中的一相变为其他相) 发生后恶化, 因此对反相或是流型转换的预测是十分必要的. 此外, 需要在与应用条件接近的条件下对仪表进行标定以获得理想的结果.

为了减少流型对检测的影响, 提出了一种基于“旋转场”传感器的电学方法. 该方法在被测管路的外围均匀安装多对测量电极, 并通过依次选通激励和测量电极来获得“旋转”的效果. 另一种螺旋状电极也有类似的空间平均作用, 尽管其结构复杂, 但它具有线性的标定性能且不受流型影响<sup>[57]</sup>. 对旋转场电阻抗检测方法的一种改进是电学过程层析成像, 它采用更多的电极来获得对象的介质分布信息, 并提供被测对象截面介质分布图像. 根据电学敏感性不同, 电学层析成像可分为电阻层析成像<sup>[58]</sup>、电容层析成像<sup>[19]</sup>以及电磁层析成像<sup>[59]</sup>.

### 2.3.3 微波法

微波法是基于不同物质吸收微波能量级别不同且能量不受密度变化的影响而发展起来的, 并逐渐应用在多相流检测中. 微波法传感器按照应用可分为透射传感器与层析成像传感器等类别<sup>[60]</sup>. 微波传感器具有非侵入、不破坏环境、无辐射以及稳定性高等优势, 但其造价相对昂贵且标定复杂, 此外微波传感器的适用性较弱, 也需要额外的传感器提供

测量的补偿. 基于微波传感器的特性, 可以制成微波含水率测量仪, 在水含率为 0~100% 的油水两相流内高频的微波可以避免水的含盐度对测量结果的影响<sup>[61]</sup>. 在油气水三相流条件下, 可利用微波多普勒效应实现含气率高达 99% 时的气液两相流流速检测<sup>[62]</sup>. 此外, 微波层析成像检测方法也可提供被测流体截面内的相分布特性<sup>[63]</sup>.

### 2.3.4 其他方法

超声法利用超声波在穿透介质时发生衰减, 且不同介质对超声波的吸收能力不同的原理设计. 可根据声波的不同性质, 如穿透性、衰减性、声纳与多普勒等设计不同的仪表<sup>[64]</sup>. 尽管超声仪表具有非侵入特性且能实现“即夹即用”的功能, 但超声波在多相流中的传播复杂给检测带来困难, 因此需要设置不同的工作模式来缓解<sup>[65-66]</sup>.

多相流中各相视觉清晰度很高的条件下, 可采用光学法检测, 但该方法仅在低组分浓度时精确. 光学吸收技术在多相流检测中得到过成功的应用, 其它的光学技术则多基于多角度散射法, 且结构复杂. 由于光学法需要使用探针 (或双探针), 因此属于侵入式流量计的一种, 并注意传感器的清洁<sup>[67]</sup>.

其他可用于多相流含率检测的技术包括核磁共振<sup>[68]</sup>、差压法以及密度法等<sup>[69]</sup>, 但均受限於某些特定的应用范围.

## 2.4 多相流综合检测仪表

工业多相流过程参数检测中, 分离法与混合法是常用的多相流测量方法, 前者利用各种分离手段将多相流中的各相分开, 然后用单相流仪表测量; 后者则将多相流均匀混合后当作单相流处理, 并用单相仪表测量. 然而这两种方法均受自身特性的限制. 虽然多相流过程参数检测仍存在精度与速度问题, 但在工业现场中已经有大量的多相流检测设备得到应用. 工业现场采用的多相流检测设备多为多参数综合检测仪表, 针对的对象通常包括石油工业中测量油气水三相流, 或油水 (气水) 两相流. 较早的多相流检测方法是将其分离后, 利用文丘里流量计与密度计的联用检测分离后的流体来实现的, 目前这种方法仍在使用中<sup>[70]</sup>. 此外, 涡轮流量计、克里奥立流量计与超声波流量计均在油田中得到应用. 为了简化设计改进检测手段, 在上世纪八十年代, 油田现场工程师提出了“多相流量计” (Multi-phase flow metering, MPFM) 的概念. 多相流量计可按照工作原理分为三大类: 基于预分离的流量计、基于预混合的流量计以及无需任何预处理的流量计.

### 2.4.1 基于预分离的流量计

基于分离的检测方法是一种传统的手段, 根据其工作原理, 三相流检测一般需要一个或多个分离

器以及至少三台单相流检测仪表. 其改进后的方法称为部分分离法, 即将多相流分离成某一相为主相其它相为辅相的混合物, 再用单相流检测仪表. 例如油气水三相流可以先分离成湿气与液液混合物, 再做处理. 部分分离法能快速准确的获得多相流的流动参数, 因此得到更广泛的应用. 大多数多相流量计采用传统计量方法, 例如用克里奥立或涡轮流量计等检测液相流量, 用微波或密度差等方法检测含水率, 采用涡街流量计与超声波方法检测气相等. Accuflow 公司开发的一款基于分离的多相流量计先将气相从三相流中分离, 并在测量完成后再将各相混合. 该流量计能达到 1% 的液相流量精度、1% 的液相含水率精度以及 5% 的气相流量精度. 另一种基于分离的多相流量计是由 AGAR 公司开发的 Agar400 系列流量计, 它们能在 0~100% 的气相含率和含水率条件下达到  $\pm 2\%$  的油相与水相流量精度以及  $\pm 5\%$  的气相流量精度.

### 2.4.2 基于预混合的流量计

当多相流均匀混合流动时, 各相流速相同, 在减少待测参数的同时摆脱流型的影响. 尽管混合过程会带来压损, 并给管道清洁带来麻烦, 但仍被多相流量计厂商广泛采用. 例如 Jiskoot 公司生产的混合流量计, 它的特殊混合装置能保证流体完全混合, 并通过检测混合器前后压力差计算流量. 相含率由一个铯 137 单射线源双能  $\gamma$  含率计测定. 该流量计结构紧凑, 不受流型和相间滑动的影响, 能在 0~100% 的含水率, 0~90% 的含气率以及 1 m/s~30 m/s 流速范围内达到含率检测  $\pm 5\%$ 、速度检测  $\pm 10\%$  的精度.

### 2.4.3 无需预处理的多相流量计

分离法与混合法各有适用范围, 因此研制一种无需任何预处理手段的多相流量计成为多相流检测领域的研究热点, 也是多相流量计量今后的发展方向. 目前已有多款此类流量计面世, 且根据不同的应用场合采用不同的测量技术. AGAR 公司设计的 MPFM 50 与 300 系列流量计属于此类, 其中 50 系列流量计采用克里奥立流量计检测混合质量流量与混合密度, 并采用基于微波技术的含水率检测仪测量含水率, 随后利用 AGAR 数据分析系统得到在线结果. 50 系列的工作范围为 0~25% 的含水率和 0~100% 的含水率, 300 系列的范围则为 0~97% 的含水率和 0~100% 的含水率. 两系列流量计均能以  $\pm 2\%$  的精度检测油水流量, 以  $\pm 5\%$  的精度检测气流量. Roxar 公司的 1900 VI 流量计利用电阻抗法检测相含率,  $\gamma$  射线法检测密度, 互相关法检测各组分的分相流速, 此外加装一个文丘里管以适应单相液体或气体流过时的检测. 该流量计无

需分离与混合, 能在全量程的气含率与水含率下工作. 但速度测量范围随着含率改变: 低气含率下的测速范围是  $1.5\text{ m/s} \sim 15\text{ m/s}$ , 高气含率下的速度范围是  $3.5\text{ m/s} \sim 35\text{ m/s}$ . 此外, 该流量计能以 4% 的不确定度检测水流量, 以 3% 和 8% 的精度分别检测含水率与含气率.

### 3 多相流过程参数检测问题的难点和展望

#### 3.1 多相流过程参数检测问题的难点及其应对方法

目前对多相流检测仪器的需求很大, 急需能够准确、可靠、实时的获取多相流过程参数以实现生产过程诊断、优化以及安全保障的检测方法与设备出现. 迄今为止, 英国、德国、美国等已发展了多种多相流检测方法, 但在实际流动检测中尚存在测量范围较小且误差较大等问题, 原因在于对多相流的流动机理与检测原理研究有待深入, 因此急需在该方面投入更多的研究精力. 目前, 油气水多相流参数检测存在的主要问题如下:

1) 多相流的动力学特性与多相流体力学理论体系有待完整, 对许多试验现象的理论解释方面尚存在不一致的结论和认识.

油气水多相流的流动现象十分复杂, 其结构及分布的不均匀性与流态的非平衡性和随机性造成相间界面形态不断变化, 难以准确描述. 大部分理论模型从典型流型或特殊相分布状态推导和发展而来, 因此在描述实际流动中的过渡性流态时难以保证精度. 例如描述油水分层流动时, 除均相流模型外, 有两层分离模型、三层分离模型、四层分离模型以及双分散流模型等, 均从观察到的实验现象通过理论假设简化得到; 又如在油气水三相流混合流动中, 由于油相和水相互不相溶, 在一定流动工况下会发生乳化现象, 二者单独的特性被乳化后的共性代替, 因此油气水混合物也常被当作特殊的气液两相流处理, 但在实际测量中却难以对三相流中的油水乳化做精确的描述.

随着数值仿真技术的日益提高, 对多相流的研究可采用数值模拟与实验结合的路线, 利用实验验证特定边界条件下的仿真结果, 并以此为基础利用仿真手段扩大研究范围, 探索基本流动规律, 从测量角度描述流动机理, 从根本上提高对流动现象理论解释的精确性和完整性. 因此, 如何提高对流动过程各种物理参数的精确检测是深入研究多相流理论体系的基础.

2) 用单一的检测手段难以实现多种流态完整信息的获取, 适用范围宽、精度高、便于使用的多相流检测方法还有待进一步研究.

多相流的流态复杂, 存在较强的界面效应并伴随着动量与质量传递, 且在流动过程中常发生反相,

其丰富的流动信息对检测手段提出了很高的要求. 大量研究表明, 现有的通常建立在单传感器基础上的各种检测手段只能实现对部分参数, 或者是对截面平均参数的测量, 而无法对多相流的整体特性进行实时观测描述, 在多相流流动特征的信息获取上难以得到满意效果.

为解决该问题, 可采用多种传感器组合的方式, 利用同类传感器的不同模式信息, 或非同类传感器的表征角度多样化、检测范围广等特点实现多种流态完整信息的获取, 因此多传感器方法逐渐成为多相流检测研究发展的热点. 该方法利用不同时间与空间的多传感器数据资源, 采用信息融合技术对按时间序列获得的多传感器观测数据在一定的准则下进行处理、分析与综合, 建立测量模型, 可更准确、更可靠的获取被测对象的信息, 以实现比单一信息源更完全更准确的检测. 目前, 国际上在该方向的研究十分普遍, 欧美等国的多相流研究领域在此项研究中处于领先地位, 其石油工程研究单位在此方向的研究中取得了一些突破, 国内针对多相流检测问题也相继开展了多传感器数据融合技术的研究.

3) 检测方法受流动介质物性与实际工况变化影响较大, 需要扩大测量模型的物性表征范围并对检测方法引入工况补偿.

在建立多相流测量模型时, 一般是从流动对象动力特性出发的简化建模, 因此对流体物性变化的考虑不多, 特别是油水两相同时流动时, 油的特性变化范围极大. 以油与水的粘度比为例, 其变化范围在零点几到几百万之间, 而油的属性改变直接导致油水流动形态发生变化, 进而影响压力法等常规检测方法的实际检测精度.

解决此问题的方法分为两个层次, 首先是针对物性变化建模, 研究物性参数变化对检测方法的影响, 修正基本测量模型, 提高检测精确度; 在此基础上, 研究对现有检测手段的改进, 探索并引入新型检测原理或模式, 消除对象物性变化给检测带来的影响.

#### 3.2 多相流过程参数检测方法展望

尽管在多相流过程参数检测领域内有难以计数的研究成果, 但对多相流精确检测的要求仍与日俱增. 从分离法到混合法, 再到无预处理的多相流量计, 新的方法层出不穷. 目前, 一种称为“即夹即用”的方法成为新兴的研究热点, 该方法要求流量计有足够的便携性, 安装简单且不需对象管道有特殊装置、无需标定、非侵入等特点, 能够在现场不同测量段处测量, 即以“夹装”的简单安装程度, 安装后即可使用.

以过程层析成像技术为代表的新型检测技术的涌现也为多相流检测带来新的发展方向, 过程层析

成像技术不仅能以非侵入的方式获取多相流的各种流动参数,还能提供实时的截面相分布图像,因此备受关注<sup>[71]</sup>.此外如核磁共振技术(Nuclear magnetic resonance, NMR)等医学技术也由于其穿透性与高精度等特点被移植到工业过程测量之中,并逐渐显示出其优势.

总之,已有的多相流过程参数检测技术在不断成熟的同时,逐渐发现和引入新兴技术,实现高精度(5%之内),实时在线,非侵入,低能耗的商用多相流量计是未来努力的方向.目前,工业现场对多相流检测设备的要求设计简单与紧凑,具备低能耗、无辐射、适用范围广、无需或仅需简单的初始标定等特点,可以帮助扩大工作范围,提升灵活性并降低成本<sup>[72]</sup>.此外,设计的多相流检测设备要对环境和人体友好,特别是某些国家或地区对放射性物质有很严格的限制.新式流量计除了能获得截面信息以外,还需能够获得近管壁信息以及空间交叉信息等,也因此能获得对流型更完整的描述.对此类过程参数检测系统的要求如下:

- 1) 非侵入,以避免传感器的腐蚀与压降;
- 2) 实时检测,以提供被测对象的瞬时信息;
- 3) 在线检测,不受流型变化影响;
- 4) 可靠性高,因为维护代价昂贵,并且短周期的维护难以实现,例如海底应用;

5) 标定方便,且标定后能维持长时间运行.

尽管不同应用条件下的要求不完全相同,但上述几点是一个理想多相流量计所期望拥有的特性.因此未来多相流检测方法将向以下几个方面发展:

1) 基于现代信息处理技术的多相流过程参数软测量方法;

2) 实现更高空间分辨率的微观图像以及流动结构信息,以及更高时间分辨率的瞬态流动参数的获取;

3) 基于不同敏感原理的多种传感器融合检测系统研究,实现更高灵敏度、可靠性和准确度的多传感器检测方法和装置,从多相流不同物性敏感角度实现流动过程参数的有效提取;

4) 更有效的多相流动模型,将各种未知的、无法直接获取的物理量与已知的、可简单测量的物理量之间建立直观、准确的联系,以实现多相流动态过程的描述与跟踪;

5) 多相流检测装置的简单标定以及维护,甚至是免维护等;

6) 多相流动过程参数的可视化检测,以及更有效的检测性能评价指标等.

#### 4 结束语

多相流是一个瞬态的、非线性的、多参数的复

杂过程,其过程参数的检测问题可以被认为是目前工业过程参数检测技术的最高挑战.正是由于其特有的复杂过程特征,使得对其研究变得更加广泛.多相流本身是一个广泛存在于工业过程中的流动状态,如能有效地解决其过程参数的检测问题,可以在石油、能源、核工业、化工等行业内起到提高监控效率、提高安全保障进而提升工业过程整体效率的作用,同时也可作为其他复杂工业过程的检测提供方法基础和借鉴.此外,多相流问题本身涉及到工程热物理、流体力学、化工反应、石油开采与混输、自动化、仪器仪表等专业知识,是一个典型的多学科交叉的科学问题.对多相流科学的深刻认识离不开有效的检测技术,而检测技术的发展又离不开对多相流自身流动机理的深刻理解,因此二者是相辅相成的关系.虽然经过几十年的发展,但多相流过程参数的准确、快速与可靠的检测仍然没有得到有效解决,因此对自动化与检测技术行业的科研与工程人员,以及前述各相关专业的研究人员而言是一个非常好的科研领域,尚有无尽的问题有待探索和揭示.

#### References

- 1 Chen Xue-Jun. Advance in research on multiphase flow. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1994, **28**(5): 1-8 (陈学俊. 多相流热物理研究的进展. 西安交通大学学报, 1994, **28**(5): 1-8)
- 2 Lin Zong-Hu, Wang Dong, Wang Shu-Zhong, Lin Yi. Recent trend towards engineering application of multiphase flow. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, **35**(9): 886-890 (林宗虎, 王栋, 王树众, 林益. 多相流的近期工程应用趋向. 西安交通大学学报, 2001, **35**(9): 886-890)
- 3 Thorn R, Johansen G A, Hjertaker B T. Three-phase flow measurement in the petroleum industry. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(1): 012003
- 4 Teniou S, Meribout M. Multiphase flow meters principles and applications: a review. *Canadian Journal on Scientific and Industrial Research*, 2011, **2**(8): 290-293
- 5 Xie C G, Atkinson I, Lenn C. *Multiphase Flow Measurement in Oil and Gas Production*. Bergen, Norway, 2006
- 6 Bertani C, De Salve M, Malandrone M, Monni G, Panella B. State of art and selection of techniques in multiphase flow measurement. *Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA*, 2010
- 7 Ahmed W H, Ismail B I. Innovative techniques for two-phase flow measurements. *Recent Patents on Electrical Engineering*, 2008, **1**(1): 1-13
- 8 Skea A F, Hall A R W. Effects of gas leaks in oil flow on single-phase flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1999, **10**(3): 145-150
- 9 Skea A F, Hall A W R. Effects of water in oil and oil in water on single-phase flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1999, **10**(3): 151-157
- 10 Wallis G B. *One-Dimensional Two-Phase Flow*. New York: McGraw-Hill, 1969. 408
- 11 Xing L C, Yeung H, Shen J, Cao Y. A new flow conditioner for mitigating severe slugging in pipeline/riser system. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, **51**: 65-72
- 12 Juliá J E, Liu Y, Paranjape S, Ishii M. Upward vertical two-phase flow local flow regime identification using neural network techniques. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, **238**(1): 156-169



- 13 Xu X X. Study on oil-water two-phase flow in horizontal pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, **59**(1–2): 43–58
- 14 Bannwart A C, Rodriguez O M H, Trevisan F E, Vieira F F, de Carvalho C H M. Experimental investigation on liquid-liquid-gas flow: flow patterns and pressure-gradient. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, **65**(1–2): 1–13
- 15 Taitel Y, Barnea D, Brill J P. Stratified three phase flow in pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, **21**(1): 53–60
- 16 Wegmann A, Melke J, von Rohr P R. Three phase liquid-liquid-gas flows in 5.6 mm and 7 mm inner diameter pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, **33**(5): 484–497
- 17 Açıkgöz M, França F, Lahey R T Jr. An experimental study of three-phase flow regimes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, **18**(3): 327–336
- 18 Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(1): 012001
- 19 Li Y, Yang W Q, Xie C G, Huang S M, Wu A P, Tsamakis D. Gas/oil/water flow measurement by electrical capacitance tomography. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(7): 074001
- 20 Taitel Y, Dukler A E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*, 1976, **22**(1): 47–55
- 21 Tan C, Dong F, Wu M M. Identification of gas/liquid two-phase flow regime through ERT-based measurement and feature extraction. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2007, **18**(5–6): 255–261
- 22 Ameel B, De Kerpel K, Canière H, TJoel C, Huisseune H, De Paepe M. Classification of two phase flows using linear discriminant analysis and expectation maximization clustering of video footage. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, **40**: 106–112
- 23 Du M, Jin N D, Gao Z K, Sun B. Analysis of total energy and time-frequency entropy of gas-liquid two-phase flow pattern. *Chemical Engineering Science*, 2012, **82**: 144–158
- 24 Wang L, Huang Z Y, Wang B L, Li H F, Li H Q. Flow pattern identification of gas-liquid two-phase flow based on capacitively coupled contactless conductivity detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, **61**(5): 1466–1475
- 25 Ghosh S, Pratihari D K, Maiti B, Das P K. Identification of flow regimes using conductivity probe signals and neural networks for counter-current gas-liquid two-phase flow. *Chemical Engineering Science*, 2012, **84**: 417–436
- 26 Dukler A E, Hubbard M G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1975, **14**(4): 337–347
- 27 Xu Y B, Wang H X, Cui Z Q, Dong F, Yan Y. Separation of gas-liquid two-phase flow through independent component analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, **59**(5): 1294–1302
- 28 Plaskowski A, Beck M S, Thorn P R, Dyakowski T. *Imaging Industrial Flows*. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995
- 29 Lin Zhong-Hu, Wang Dong, Wang Shu-Zhong, Lin Yi. Recent trend towards basic theory of multiphase flow. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, **35**(9): 881–885 (林宗虎, 王栋, 王树众, 林益. 近期多相流基础理论研究综述. 西安交通大学学报, 2001, **35**(9): 881–885)
- 30 Lin Z H. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices. *International Journal of Multiphase Flow*, 1982, **8**(6): 683–693
- 31 Xu L J, Zhou W L, Li X M. Wet gas flow modeling for a vertically mounted Venturi meter. *Measurement Science and Technology*, 2012, **23**(4): 045301
- 32 Lupeau A, Platet B, Gajan P, Strzelecki A, Escande J, Couput J P. Influence of the presence of an upstream annular liquid film on the wet gas flow measured by a Venturi in a downward vertical configuration. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2007, **18**(1): 1–11
- 33 Zhang H J, Yue W T, Huang Z Y. Investigation of oil-air two-phase mass flow rate measurement using Venturi and void fraction sensor. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2005, **6**(6): 601–606
- 34 Steven R. Horizontally installed cone differential pressure meter wet gas flow performance. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2009, **20**(4–5): 152–167
- 35 Tan C, Wu H, Wei C, Dong F. Experimental and numerical design of a long-waist cone flow meter. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, **199**: 9–17
- 36 García-Berrocal A, Montalvo C, Blázquez J, Balbás M. Flow measurement of liquid hydrocarbons with positive displacement meters: the correction for slippage. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(5): 055306
- 37 Li D H, Feng F F, Wu Y X, Xu J Y. Investigation of the mixture flow rates of oil-water two-phase flow using the turbine flow meter. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, **147**(1): 012062
- 38 Zheng G B, Jin N D, Jia X H, Lü P J, Liu X B. Gas-liquid two phase flow measurement method based on combination instrument of turbine flowmeter and conductance sensor. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, **34**(11): 1031–1047
- 39 Venugopal A, Agrawal A, Prabhu S V. Review on vortex flowmeter-designer perspective. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, **170**(1–2): 8–23
- 40 Sun Z Q, Chen Y P, Gong H. Classification of gas-liquid flow patterns by the norm entropy of wavelet decomposed pressure fluctuations across a bluff body. *Measurement Science and Technology*, 2012, **23**(12): 125301
- 41 Xu L J, Han J, Wang Y. Design of electrode array of inductance flowmeter. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(5): 929–933
- 42 Leeungculsatien T, Lucas G P. Measurement of velocity profiles in multiphase flow using a multi-electrode electromagnetic flow meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, **31**: 86–95
- 43 Beck M S. Correlation in instruments: cross correlation flowmeters. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1981, **14**(1): 7–19
- 44 Beck M S, Plaskowski A. *Cross Correlation Flowmeters: Their Design and Application*. Bristol England: IOP Publishing Ltd, 1987
- 45 Zhang W B, Wang C, Wang Y L. Parameter selection in cross-correlation-based Velocimetry using circular electrostatic sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, **59**(5): 1268–1275
- 46 Xue Q, Wang H X, Yang C Y, Cui Z Q. Dynamical lag correlation exponent based method for gas-solid flow velocity measurement using twin-plane electrical capacitance tomography. *Measurement Science and Technology*, 2012, **23**(8): 085301
- 47 Lysak P D, Jenkins D M, Capone D E, Brown W L. Analytical model of an ultrasonic cross-correlation flow meter, part 1: stochastic modeling of turbulence. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2008, **19**(1): 1–7

- 48 Lucas G P, Jin N D. A new kinematic wave model for interpreting cross correlation velocity measurements in vertically upward, bubbly oil-in-water flows. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(9): 1538–1545
- 49 Geng Y F, Yeung H, Cao Y, Xing L C, Zhu H, Drahm W. Using Coriolis mass flowmeter for wet gas metering. *Measurement & Control*, 2010, **43**(6): 183–185
- 50 Henry M, Tombs M, Zamora M, Zhou F B. Coriolis mass flow metering for three-phase flow: a case study. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, **30**: 112–122
- 51 Li Z B, Wu Y X, Li D H. Gamma-ray attenuation technique for measuring void fraction in horizontal gas-liquid two-phase flow. *Nuclear Science and Techniques*, 2007, **18**(2): 73–76
- 52 Arvoh B K, Hoffmann R, Halstensen M. Estimation of volume fractions and flow regime identification in multiphase flow based on gamma measurements and multivariate calibration. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, **23**(1): 56–65
- 53 Thorn R, Johansen G A, Hammer E A. Recent developments in three-phase flow measurement. *Measurement Science & Technology*, 1997, **8**(7): 691–701
- 54 Sætre C, Johansen G A, Tjugum S A. Tomographic multiphase flow measurement. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, **70**(7): 1080–1084
- 55 Fischer F, Hampel U. Ultra fast electron beam X-ray computed tomography for two-phase flow measurement. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, **240**(9): 2254–2259
- 56 Anaraki P A. Conductivity effect on the capacitance measurement of a parallel-plate capacitive sensor system. *Indonesian Journal of Physics*, 2011, **22**(4): 107–114
- 57 Ye J M, Peng L H, Wang W R, Zhou W X. Optimization of helical capacitance sensor for void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow in a small diameter tube. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(10): 2189–2196
- 58 Jia J B, Wang M, Schlaberg H I, Li H. A novel tomographic sensing system for high electrically conductive multiphase flow measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, **21**(3): 184–190
- 59 Fu Y, Dong F, Tan C. Response of the excitation condition to electromagnetic tomography. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, **31**: 10–18
- 60 Nyfors E. Industrial microwave sensors—a review. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2000, **1**(1): 23–43
- 61 Guo H M, Wu X, Jin Z, Zhao H M. Design and development of microwave holdup meter and application in production logging interpretation of multiphase flows. In: Proceedings of the 1993 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas: SPE, 1993. 355–364
- 62 Xie C G, Wu Z P. Microwave Doppler system for multiphase flow measurement. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Measurement Techniques of Multiphase Flows. Tianjin, China: AIP, 2012. 319–326
- 63 Bolomey J C, Pichot C. Microwave tomography: from theory to practical imaging systems. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1990, **2**(2): 144–156
- 64 Goncalves J L, Paiva T A, Carvalho R D M, Venturini O J. Application of the Ultrasonic Technique for Monitoring and Measuring the Phase Fractions of Liquid-Gas-Solid Mixtures. In: Proceedings of the 2011 Brasil Offshore Conference and Exhibition. Macaé, Brazil: SPE, 2011
- 65 Zheng Y, Zhang Q K. Simultaneous measurement of gas and solid holdups in multiphase systems using ultrasonic technique. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(17): 3505–3514
- 66 Murai Y, Ohta S, Shigetomi A, Tasaka Y, Takeda Y. Development of an ultrasonic void fraction profiler. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(11): 114003
- 67 Murzyn F, Mouaze D, Chaplin J R. Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps. *International Journal of Multiphase Flow*, 2005, **31**(1): 141–154
- 68 Appel M, Freeman J J, Pusiol D. Robust multi-phase flow measurement using magnetic resonance technology. In: Proceedings of the 2011 SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Manama, Bahrain: SPE, 2011. 932–951
- 69 Zhang J, Xu J Y, Wu Y X, Li D H, Li H. Experimental validation of the calculation of phase holdup for an oil-water two-phase vertical flow based on the measurement of pressure drops. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, **31**: 96–101
- 70 Pinguet B G, Roux G, Hopman N. Field experience in multiphase gas-well testing: the benefit of the combination of venturi and Gamma ray fraction meter. In: Proceedings of the 2006 SPE Annual Technical Conferences and Exhibition. San Antonio, USA: SPE, 2006
- 71 Tan Chao, Dong Feng. An overview on process tomography and its applications. *Instrumentation Customer*, 2010, **17**(1): 3–6  
(谭超, 董峰. 过程层析成像与多相流测量应用. 仪器仪表用户, 2010, **17**(1): 3–6)
- 72 Ismail I, Gamio J C. Review of multi-phase flow meters for oil industry. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows. Hangzhou, China: International Academic Publishers/World Publishing Corporation, 2004. 596–601



谭超 天津大学电气与自动化工程学院讲师。2003 年于天津大学自动化专业获得学士学位, 2006 年和 2009 年于天津大学控制科学与工程专业获得硕士和博士学位。过程检测与控制系统, 两相/多相流在线测试技术。

E-mail: tanchao@tju.edu.cn

(TAN Chao Lecturer at the School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University. He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in control science and engineering from Tianjin University in 2003, 2006 and 2009, respectively. His research interest covers process parameter detection and control systems, and multiphase flow measurement.)



董峰 天津大学电气与自动化工程学院教授。1988 年于天津大学工业自动化仪表专业获工学学士学位, 1996 年和 2002 年于天津大学控制科学与工程专业获得硕士和博士学位。主要研究方向为过程检测与控制系统, 多传感器融合与信息处理, 两相/多相流测试技术, 过程层析成像技术。本文通信作者。

E-mail: fdong@tju.edu.cn

(DONG Feng Professor at the School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University. He received B.S., M.S. and Ph.D. degrees in control science and engineering from Tianjin University in 1988, 1996, and 2002, respectively. His research interest covers process parameter detection and control system, multisensory fusion and information process, multiphase flow, and industrial process tomography. Corresponding author of this paper.)