

流动层析成像技术在多相流流型识别与 计量中的应用研究*

李清平¹ 吴应湘² 王密²

(1. 中海石油研究中心; 2. 中国科学院力学研究所)

摘要 多相流流型识别一直是多相流研究领域难度最大的课题之一,流动层析成像技术是进行多相流流型识别、显示及计量的一种新型检测手段。文中概述了国内外主要流动层析成像技术在应用研究方面的进展情况,并重点阐述了中国海洋石油总公司与中国科学院力学研究所在电阻流动层析成像技术方面和多相计量方面所开展的研究工作及取得的初步研究成果。虽然流动层析成像技术目前还未应用于工业现场,但相关研究工作的开展无疑为流动层析成像技术的深入研究及其在多相流可视化与计量技术方面的应用奠定了基础。

关键词 流动层析成像 流型识别 电阻层析成像 多相流 多相计量

在多相流中,由于各相的物性差异和相间的相互作用,存在一个形状与分布在时间和空间上都不确定的相界面,因此多相流的流型识别方法一直是油-气-水多相流研究领域最重要的研究方向之一,也是难度最大的课题之一。

作为近年来发展较快的一种新型检测手段,流动层析成像技术(Flow Imaging)可以通过实时图像的重构和分析,获得多相流流经管道某一截面上的各相分布的微观信息,从而为流型识别、显示和多相计量提供了一条有效的途径,因而具有广阔的工业应用前景。近10年来,这一技术取得了较大的发展,目前已提出了基于核辐射法、光学法、电学法、微波法、热学法、核磁共振法等多种原理的流动层析成像系统,但总的来说,目前的研究成果还不能满足工业应用的要求,实际应用的例子也很少,且绝大多数研究成果还局限于定性图像信息的获取,量化研究成果较少,因此这方面的研究工作仍有待进一步深入。

1 流动层析成像技术研究现状

流动层析成像技术是医学CT技术在多相流领

域的应用和延伸,以该技术开发的流动层析成像系统主要由传感器系统、图像重建、解释分析系统及图像显示系统等组成(图1)。其基本原理是通过各种图像重建的基本算法对传感器测得的数据进行处理分析,完成由投影数据到图像的逆问题求解,最后实现图像重建及显示,达到对所测流体截面内各组分

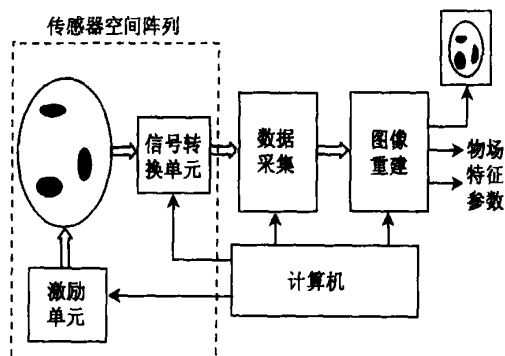


图1 流动层析成像技术结构图

与医学CT技术中相对静止的测量对象不同,流动层析成像系统的测量对象是处于流动状态的多相流体,所以流动层析成像系统所面临的最大挑战是其在大多数工业及医用场合所未曾遇到过的成

* 中国海洋石油总公司与中国科学院合作科技攻关项目“海上油气田油气水多相混输技术研究”(KJ CX2-SW-L03)部分研究成果。

第一作者简介:李清平,女,1969年生,博士,高级工程师,1994年取得西安交通大学硕士学位,1998年取得石油大学(北京)石油机械专业博士学位,现在中海石油研究中心技术研究部工作,主要从事油气水多相混输技术和水下生产技术方面的研究。地址:北京市朝阳区东三环北路甲2号京信大厦(邮编:100027)。电话:010-84522619。

像实时性问题。输送管道中液体的流速可以达到 10 m/s, 其相结构也在不断变化; 要想保证成像精度, 成像速度就要达到 1 000 帧/s 左右, 这就意味着流动层析成像系统必须具有快速采集和处理大量数据的能力。

按照信号获取方法的不同, 流动层析成像系统(简称成像系统)主要分为以下几类: 射线(X 射线、射线、中子射线)成像系统、电阻抗成像系统(电容成像系统、电阻成像系统、电磁成像系统的总称)、超声波成像系统等, 由于射线成像系统和电阻抗成像系统是这一领域具有代表性的研究成果, 下面简要介绍这两类系统的工作原理及研究进展情况。

1.1 射线流动层析成像系统

射线流动层析成像系统^[1]是 University of Bergen 和 Christian Michelsen Research AS 及 Norsk Hydro AS 合作研究的成果(图 2)。该系统由一套 8

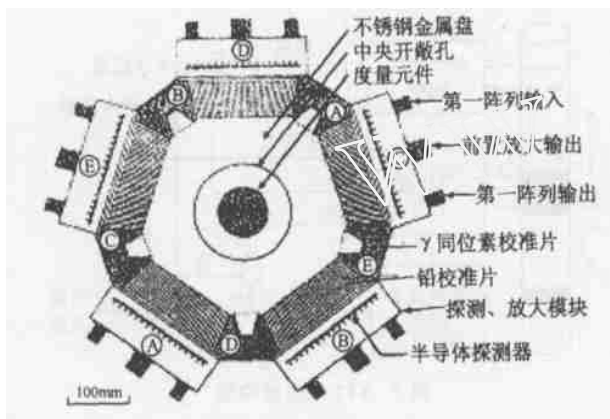


图 2 射线成像系统结构图

电极的电容流动层析成像系统(ECT 系统)和一套射线成像系统组成, 为典型的双模态层析成像系统。其中 射线成像系统用由 5 个放射源和 85 个小型射线探测器组成的敏感阵列进行气-液相分布图像的重建, ECT 系统用于进行油-水分布测量。该系统的数据传输速度为每秒数百帧, 因而可以实现较快的图像重建和流动可视化。静态成像测试表明, 该系统可以重建管截面的油-气-水三相流图像, 但总体精度受到 ECT 系统的影响; 此外, 对相迁移速

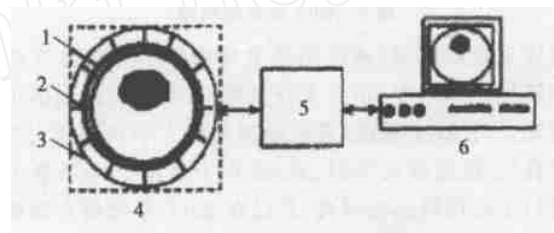
度的测量是这套系统尚需解决的一个重要问题。

射线流动层析成像系统的优点: (1) 适用范围广, 适用于各种类型和各种流型的多相流体; (2) 重建图像的质量好, 这主要是由于采用了多角度扫描技术(可获得足够多的投影数据)和医学 CT 技术中高精度的图像重建算法。

射线流动层析成像系统的主要缺点: (1) 成本高, 经济性差; (2) 实时性差, 这一方面是由于在投影数据获取过程中涉及到光子的计数、扫描机构的机械旋转等因素导致数据采集时间长, 另一方面是由于直接采用医学 CT 技术中的图像重建算法, 虽精度较高, 但数据量大, 计算时间长; (3) 安全性差, 整个系统相当复杂和精密, 对使用、维护、管理的要求都很严格。

1.2 电容流动层析成像系统

电容流动层析成像系统(ECT 系统, 图 3)^[2]的基本原理是在流动的管道上对称地安置若干个电容



1—电极; 2—环形电极; 3—壳体; 4—电容传感器; 5—数据采集系统; 6—计算机

图 3 ECT 系统结构图

传感器, 利用电容的变化来获得反映多相流各相浓度和分布信息的投影数据, 然后利用医学 CT 技术的原理得到反映管道内多相流各相分布、流动状态的断面图像。其显著的特点是, 可以在不干扰流场的情况下获得多相流体的微观信息, 且其系统构成简单, 信号获取及处理的实时性好, 安全可靠, 对环境无特殊要求。目前, 英国帝国理工大学研制的 6 电极 ECT 系统和我国浙江大学等研制的 12 电极 ECT 系统, 在气-水两相流型的识别和显示方面已取得阶段性研究成果, 流型重构结果如图 4 所示。

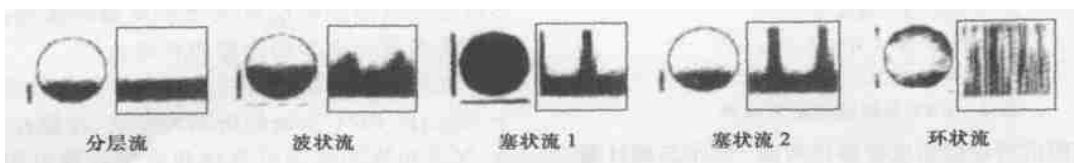


图 4 ECT 系统的试验结果

对于 N 个电极的 ECT 系统,考虑其对称性,可测量的独立电容数为 $n = N(N - 1) / 2$ 个。极板数越多,图像的空间分辨率越高,但由于极间杂散电容的影响加重,对电容测量灵敏度的要求也相应提高,故适宜的极板数为 8~16 个。ECT 系统适用于油为连续相、含水率为 0~40% 的介质。

1.3 电阻流动层析成像系统

电阻流动层析成像系统(ERT 系统,图 5)^[3]的基本原理是将处于敏感场中的流体电导率的分布情

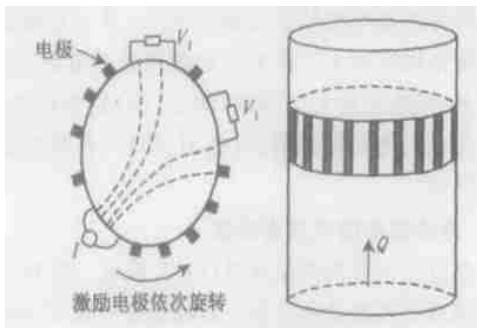
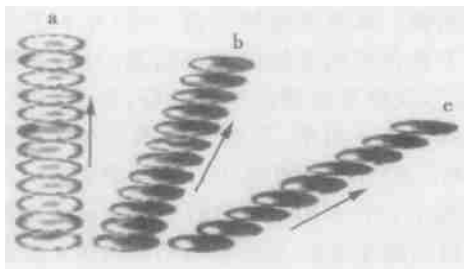


图 5 ERT 系统结构图

况作为投影数据,通过图像重建算法得到流体在多相流场中的浓度、相含率分布信息,实现其流动的可视化。对 ERT 系统,英国曼彻斯特大学和利兹大学已在气-液搅拌反应器、液-固水力旋流分离装置上进行了应用性试验研究,并已在 ERT 系统研究领域取得了一些成果;国内天津大学、清华大学等也在进行探索性研究,部分装置已经在气-液和油-水两相流试验装置上进行了试验研究,有关气-水两相倾斜管内流型识别与显示的试验研究结果见图 6^[4]。ERT 系统测量的是流体介质的电导率分布情况,它适用于水为连续相、含水率为 70%~100% 的介质。



a—垂直管(采样间隔 50 ms)
b—60° 倾斜管(采样间隔 27.5 ms)
c—30° 倾斜管(采样间隔 27.5 ms)

图 6 ERT 系统试验研究结果

1.4 电阻抗流动层析成像系统与油-气-水三相计量

电阻抗流动层析成像系统(EIT 系统)是 ERT

系统、ECT 系统和 EMT 系统(电磁成像系统)的总称。将 EIT 系统用于多相流测量有许多优越性,比如成本低、实时性好、无辐射、无运动部件等。

由于 ERT 系统和 EMT 系统只适用于测量水为连续相的情况,而 ECT 系统则适用于测量油为连续相的情况,因此有关研究显示:融合了 ERT 系统和 ECT 系统的 EIT 系统有望在较宽的工作范围内得到较好的测量结果。针对测量中存在的中间盲区,Wang Mi^[5]提出了一个基于 AC 激励的 ECT 系统。通过降低激励频率和调整激励相位,可以使 ECT 系统工作在含水率 0~70% 的范围内。在此基础上,Wang Mi 提出了基于 EIT 系统的油-气-水多相流量计研制方案(图 7),通过 ECT 系统测量水的浓度、超声波系统测量气相浓度、相关法测量相速度,从而实现油-气-水三相流量计量。该系统的使用情况和实际测量精度目前未见进一步的报道。

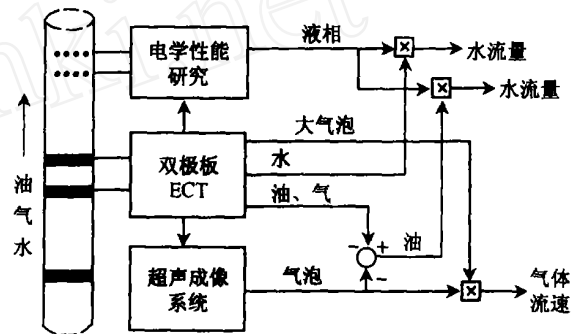


图 7 EIT 系统结构图

总之,目前基于各种原理的流动层析成像系统都取得了一些研究成果,但由于 EIT 等系统在测量过程中存在场传播的非线性,即所谓的“软场”效应,相对于射线成像和光学成像等直线传播的“硬场”系统,EIT 系统的测量精度和成像精度都较差,其基本的测量误差大约在 10%~20% 之间,因此其最大的优势是在实现流动可视化、流态识别及离散相的相关测速等方面。

从目前的研究成果看,各种流动层析成像系统都有其相应的使用范围,所以融合多种测量原理的多模态系统是流动层析成像系统最终实现高精度、多相流可视化和多相计量的有效途径。

在综合分析了主要的流动层析成像技术的基础上,我们以 ERT 系统的研制为起点,希望在轻质油-水-气多相流的流动可视化和多相计量方面取得一些实质性的研究成果。

2 电阻流动层析成像系统的建立和试验研究

2.1 试验环路

电阻流动层析成像系统(ERT 系统)的试验环路由液相环路、气相环路、混合装置和多相管流试验段组成(图 8),其水平管段长度为 40 m,管内径为 50 mm。整套装置采用透明材质制造,以方便对流

型进行观察。试验中,液相的最大表观速度为 1.2 m/s, Re 为 40 000;气相的最大表观速度为 30 m/s, Re 为 100 000。通过控制气相流量(0.5, 1.5, 4.0, 10.0 m^3/s 及小于 0.5 m^3/s 的流量),得到泡状流、段塞流、段塞流-环状流过渡流、环状流等各种流型^[6,7]。环路中装有摄像头,可以对流动形态进行实时拍摄。所有试验都是在中国科学院力学研究所进行的。

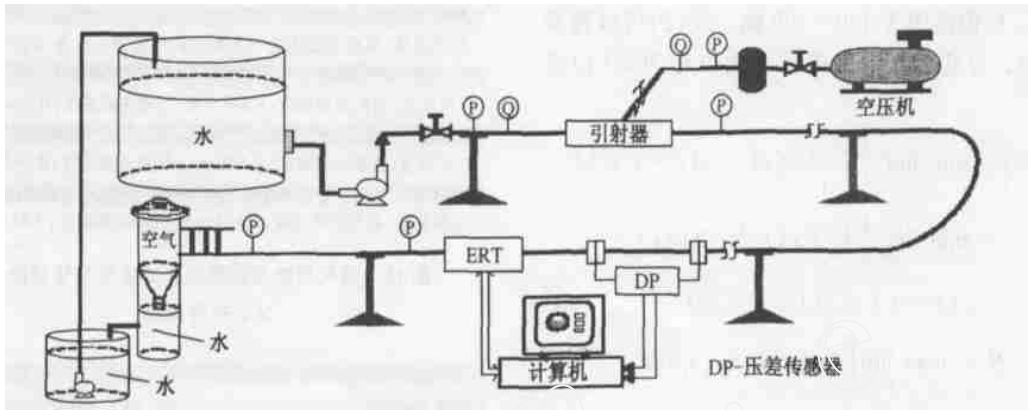


图 8 ERT 试验环路图

2.2 ERT 硬件系统

试验中对一套商用的双极板 P2000 ERT 数据测量系统和一套单极板 ERT 样机进行了空气-水两相流体层析成像及多相计量性能方面的试验研究。其中单极板 ERT 系统用于测量相浓度,双极板 ERT 系统用于测量两相的浓度和速度。每个极板

由 16 对 5 mm × 12 mm 的钛合金矩形电极组成。数据采集系统采用相邻电流激励、电压测量模式^[8],数据采集的激励电流为 15 mA,激励频率为 9.6 kHz。当激励频率为 9.6 kHz 时,图像采集速度为 50 ms/帧;当激励频率为 38.4 kHz 时,图像采集速度为 16 ms/帧。传感器安装示意图见图 9。

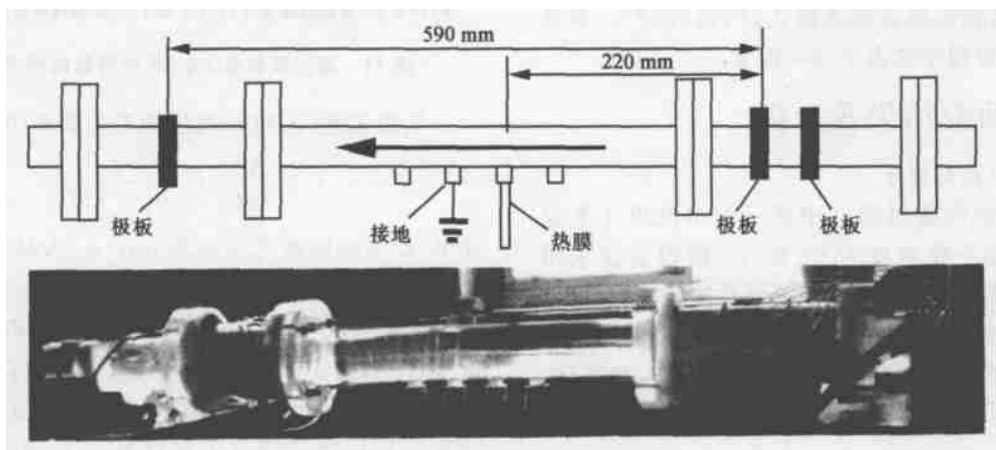


图 9 ERT 传感器试验装置

2.3 ERT 系统中的流型识别

轴向速度采用相关技术求解^[9],其核心是求解 2 个测量截面间出现的最大相似值,即相关量达到最小值时所需要的时间 t_i ,可通过式(1)计算

$${}_{xy}^2(t_i) = \min \lim_t \int_{t-t_i}^t [x(t) - y(t-t_i)]^2 dt \quad (1)$$

式中： t_i 为偏差量,当它达到最小值时可以得到时间

t_i ; x, y 分别为对应于测量截面处空泡率的基本信号。

式(1)可以离散为式(2)

$$r_k^2(n) = \sum_{m=0}^N [x_k(m) - y_k(m - n)]^2 \quad (2)$$

式中: N 为试样(图像)帧数; m 为其中某一幅图像; n 为偏移量数目; k 为相关截面中的像素数目。

在数据处理过程中, N 值根据双极板 ERT 系统选取, 取值范围为 100~700 帧。式(2)可以转换为式(3), 与其相对应的部分求和方程为式(4)或式(5)

$$\begin{aligned} r_{xy}(x_i) &= \min \lim_t \frac{1}{t} \int_{-t}^t [x(t) - y(t - t_i)]^2 dt \\ &= \min \lim_t \frac{1}{t} \int_{-t}^t [x(t)^2 - 2x(t) \times \\ &\quad y(t - t_i) + y(t - t_i)^2] dt \end{aligned} \quad (3)$$

$$R = \max \lim_t \int_{-t}^t x(t) y(t - t_i) dt \quad (4)$$

$$R_k(n) = \sum_{m=0}^N x_k(m) y_k(m - n) \quad (5)$$

式中: r_{xy} 为偏差量; R 为相关因子; R_k 为与某一像素对应的相关因子。

通常在数据处理中用式(4)、式(5)进行计算。在 ERT 系统数据处理过程中, 为了得到多相流的速度, 考虑到积分区域的有限性, 通常避免出现大的偏差, 但在实际处理过程中很难保证 $y(t - t_i)^2$ 维持不变, 这就需要直接求解式(1)或式(2)。本文在数据处理过程中考虑了这一因素。

3 试验研究结果及分析

3.1 流型识别与显示

流型的识别通过图 9 中所示的单极板 3 来完成, 所用数据采集速度为 62 帧/s。图像重建采用 SBP 算法, 将部分重建的截面图像叠加处理后, 可以得到气相和液相在试验管段内的相分布以及转换过程的图像。图 10 给出了随着气相表观速度的变化, 通过 ERT 系统重建得到的气-液两相流型的转化过程图像。

3.2 相速度测量

试验中采用双极板 ERT 系统和相关法进行了多相速度测量。图 11 给出了不同空气流量下相关截面的图像重建结果, 不同位置之间的相关关系十分明显。它表明双极板模式在采样速率为 31.3 双

帧/s 的情况下, 如果已知空气平均速度, 就可以得到相速度。



图 10 随气相表观速度变化的流型变化规律及试验研究结果

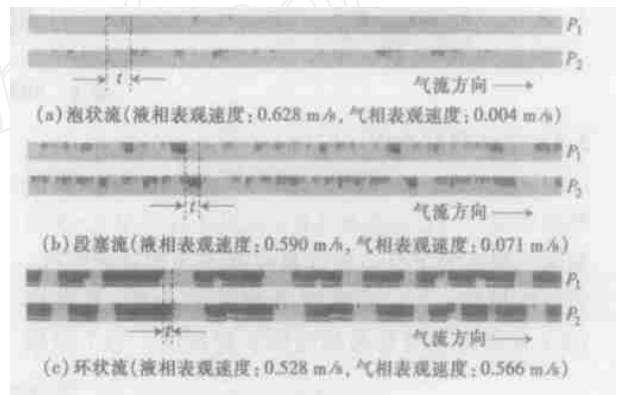


图 11 通过双极板 ERT 系统得到的相关图像

气相速度(v)可以通过相关关系式(6)得到。

$$v = \frac{S}{t} = \frac{L}{(n_k - 1)/f_s} \quad (6)$$

式中: L 为传感器之间距离, m; n_k 为最大电极数; f_s 为平均频率。

采集 1 000 帧气-液两相流流动层析成像的图像, 通过相关分析法, 可以发现像素之间具有一定的相似性。图 12 给出了利用相关分析法得到泡状流、段塞流和环状流情况下的气相平均速度(分别为 0.629、1.009、1.427 m/s)。试验中与流型对应的液相表观速度分别为 0.628、0.590 和 0.528 m/s, 气相表观速度分别为 0.004、0.071 和 0.566 m/s。

试验研究表明, ERT 系统可以用于一定条件下气-液多相流动中流型的识别、显示和多相计量, 但

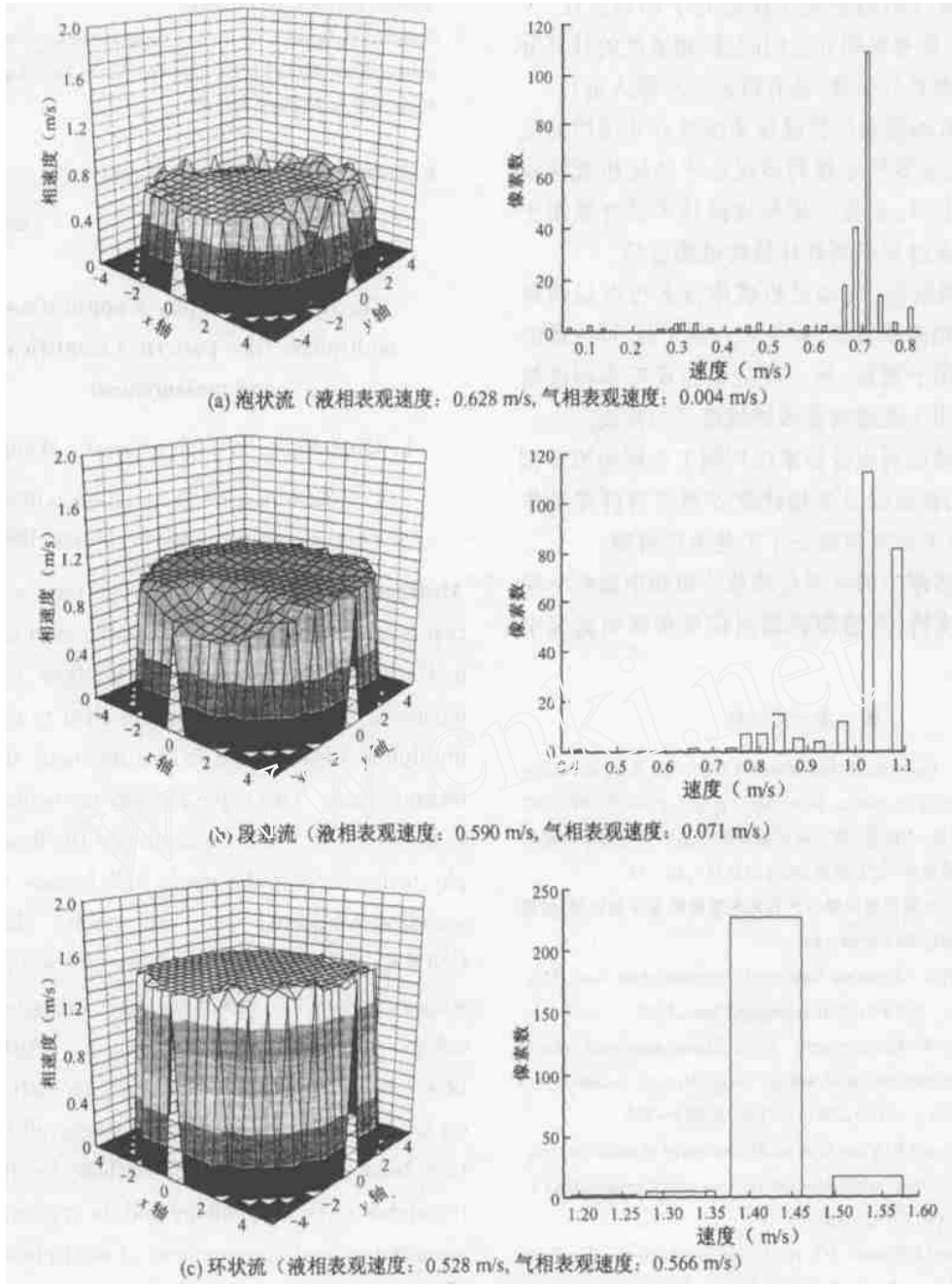


图 12 各种流型情况下的气相平均速度分布规律

从流动层析成像技术的发展情况看,要在此基础上开展更为深入的研究,通过软、硬场多种技术的融合实现高质量的流型识别、显示和多相准确计量,还有许多工作有待我们去做。

4 结论

介绍了流动层析成像技术的主要研究成果和进展,并在此基础上重点介绍了中国海洋石油总公司与中国科学院力学研究所在 ERT 流动层析成像技

术方面进行的研究工作和取得的初步试验研究成果。作为一种处于起步阶段的、新的测量技术,流动层析成像技术的现有研究成果为今后的研究工作奠定了良好的基础:

(1) 流动层析成像技术为多相流型的识别与实时在线显示提供了可能。

(2) 我们正在进行的 ERT 技术研究已经初步实现了水平管流型判别和相速度测量,为多相计量装置的研制提供了技术支持。

(3) 目前我们的研究工作还处于初始阶段,大量的工作,如流型识别方法的改进、相浓度的计算分析以及其他参数的估算,还有待进一步深入进行。

(4) 现有的流动层析成像系统各有其适用的范围和特点,集成多种原理的多模态流动层析成像系统的研究和开发,是流动层析成像技术最终能用于多相流流型全过程识别和计量的可能途径。

(5) 在现阶段,流动层析成像技术可以以两种形式用于多相流测量,一种是作为独立的、可成像的多相流量计用于测量,另一种是作为现有多相流量计的一部分用于改进现有多相流量计的性能。

在将流动层析成像技术应用到工业现场的多相流流型识别、显示以及多相计量方面还有许多工作要做,这一技术最终将服务于工业生产过程。

致谢 感谢中国海洋石油总公司和中国科学院对本课题的支持,并感谢课题组成员在课题研究中所做的贡献。

参 考 文 献

- 1 Johansen G A, Froystein T, Hjertanker B T *et al.* A dual sensor flow imaging tomographic system. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, 7: 297 ~ 307
- 2 黄志堯,王保良,李海青. 用于两相流计流型显示与空隙率测量的电容层析成像技术. *化工学报*, 2001, 52(11): 10 ~ 15
- 3 董峰,刘晓平. 电阻层析成像技术在两相管流测量中的应用. *仪器仪表学报*, 2001, 28(6): 50 ~ 54
- 4 Yang W Q. Role of process tomography in multiphase flow. *Measurement*, Proc. of 2th Int Symo, Beijing, China, 1998
- 5 Wang M, Yin W. Measurements of the concentration and velocity distribution in miscible liquid mixing using electrical resistance tomography. *Tras I Cheme*, 2001, 79, Part A: 883 ~ 886
- 6 Wang M, Dorward A, Vlaev D *et al.* Measurement of gas-liquid mixing in a stirred vessel using electrical resistance tomography (ERT). *Chem. Eng.* 2000, 77: 93 ~ 98
- 7 Mann R, Wang M, Forrest A E *et al.* Gas-liquid and miscible liquid mixing in a plant-scale vessel monitored using electrical resistance tomography. *Chem. Eng. Comm.*, 1999, 175: 39 ~ 48
- 8 Wang M. Inverse solutions for electrical impedance tomography based on conjugate gradients methods. *Measurement Science and*

Technology, 2002, 13: 101 ~ 117

- 9 Brown B H, Segar A D. Applied potential tomography: Data collection problems. *Proc IEE Int Conf on Electric and Magnetic Field in Medic and Biolo*, 1985, 79 ~ 82

收稿日期:2004-03-05 改回日期:2004-11-02

(编辑:张金棣)

The flow tomography 's application in multiphase flow pattern 's identification and measurement

Li Qingping¹ Wu Yingxiang² Wang Mi²

(1. CNOOC Research Center, Beijing, 100027;

2. Chinese Academy of Science, Beijing, 100080)

Abstract: The multiphase flow pattern 's identification is one of the most difficult subjects in the scope of multiphase flow researches. The flow tomography technology is a new detecting method to conduct the multiphase flow pattern 's identification, display and measurement. This paper reviews the major progresses in the research and application of the flow tomography technology in the world and focuses on the researches conducted and the results obtained by CNOOC and Chinese Academy of Science in the scopes of electrical resistance flow tomography technology and multiphase measurement. Although the flow tomography technology is not so mature to realize the industrial application at present, all these work have been undoubtedly laid the base for the further researches of the technology and its application in the visualization and measurement of multiphase flow.

Key words: flow tomography; flow pattern 's identification; resistance tomography; multiphase flow; multiphase measurement