

李海青 乔贺堂 主编

多相流检测技术进展



石油工业出版社

TB136

23

多相流检测技术进展

李海青 乔贺堂 主编

石油工业出版社

赠书

内 容 提 要

本书收集了与多相流检测技术有关的学术论文 63 篇。其中包括多相流检测的理论研究、试验研究和仪器仪表、油井油、气、水三相流、气固、气液和液固两相流等。从不同的侧面介绍了体系中的多相流参数的检测方法,反映了我国近年来在多相流测试领域中的现状以及所取得的成就。

本书可作为化工、石油、能源、冶金等工业部门从事多相流测试人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

多相流检测技术进展/李海青, 乔贺堂主编
北京: 石油工业出版社, 1996. 10
ISBN 7-5021-1887-X

I. 多…

II. ①李…②乔…

III. 多相流动-检测-测试技术-进展

IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 19459 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
地矿部河北测绘印制中心印刷厂

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开 1/2 印张 350 千字 印 1—1100

1996 年 10 月北京第 1 版 1996 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1887-X/TE·1587

定价: 48.00 元

多相流检测技术进展编委会

主 编：李海青 乔贺堂

副主编：张宏建 刘兴斌

委员（以姓氏笔划为序）：

陈伯川 吕鹏举 周泽魁 郑 华

金宁德 黄志尧 钟兴福

前 言

全国多相流检测技术研究会于1986年10月在浙江大学成立。经过全体委员6年的努力,研究会正式编入中国计量测试学会,成立多相流测试专业委员会。成立大会于1992年10月在天津召开。

从多相流检测技术研究会成立至今,已召开过四届全国多相流检测技术学术会议和一届国际多相流检测技术会议。历届会议情况如下:

首届全国多相流检测技术学术会议于1986年10月在杭州召开,由浙江大学筹办并负责论文集的编辑和出版工作。

第二届全国多相流检测技术学术会议于1988年10月在南京召开,由东南大学筹办并负责论文集的编辑和出版工作。

第三届全国多相流检测技术学术会议于1990年10月在上海召开,由华东工业大学筹办并负责论文集的编辑和出版工作。

第四届全国多相流检测技术学术会议于1992年10月在天津召开,由天津大学筹办并负责论文集的编辑和出版工作。

首届国际多相流检测技术会议于1995年4月在南京召开,由东南大学筹办并负责论文集的编辑和出版工作。

本次会议,即第五届多相流检测技术学术会议定于1996年10月31日至11月2日在杭州召开。由浙江大学和大庆石油管理局生产测井研究所共同筹办。本次会议共收到论文摘要75篇,经审定后论文集集中共收集论文63篇。

本次会议召开之际正是全国多相流检测技术研究会成立10周年。为此大会筹委会安排了部分大会报告,它们集中反映了近年来国内外在多相流测试领域中所取得的成就和进展。论文集中收录的其它论文更是代表了我国多相流检测技术的水平和现状。

本书为第五次全国多相流检测技术会议论文集

中国计量测试学会多相流测试专业委员会
1996年10月

目 录

多相流检测技术评述及展望

海洋高技术与多相流检测技术	郑之初	(1)
关于过程层析成像技术的评述	徐苓安	(7)
弥散型两相流的光学测量	王乃宁	(13)
现代锅炉火焰检测技术的新进展	徐益谦 王式民	(16)
油井多相流测量技术	乔贺堂 王宝春 刘兴斌	(25)
多相流测试技术现状及趋势	李海青	(33)

多相流检测理论及仪表

电容层析成象系统仿真研究	彭黎辉 张宝芬 姚丹亚	熊志杰	(43)
基于感应原理的电磁成象系统的初步研究	董琰婷 洪 艺	徐苓安	(50)
电阻层析成象技术应用于两相流检测的仿真研究	马艺馨 王 浩 姜常珍	徐苓安	(57)
流动成象在两相流流型辨识中的应用	黄志尧 陈 珙 王保良	李海青	(65)
波形法与相关法在气固两相流速度测量中的比较	蔡鸿宇 邹铁鹏 陆增喜	王 师	(70)
温度噪声相关测速系统的标定	田 虹 仲朔平	佟允宪	(75)
两相流的非线性动力特性及混沌时间序列分析方法的研究	王 经	蒋安众	(79)
油、气、水三相流流型的分形及混沌特征分析	金宁德	钟兴福	(85)
基于人工神经网络的管道泄漏检测方法及其仪器	唐秀家	颜大椿	(94)
BP 网络改进算法及其在两相流检测中的应用	欧 景 周泽魁 王保良	李海青	(100)
应用信号处理技术实现两相流参数检测	劳力云 张宏建	张 鸣	(103)
利用压力脉动信号诊断流化床分布板故障的研究	张东明 沈晓清 陈伯川	陈丰秋	(110)
电导传感器测量油、水两相流含水率	刘兴斌	史志才	(114)
一种新型的油井多相流产出剖面测井仪	王金钟	李振芳	(117)
实用 PIV 系统的发展		张 杰	(124)
多功能多相流测量仪的研制	王保良 周泽魁 欧 景	李海青	(130)

油田多相流检测技术

汽、水两相流测量技术研究及其在稠油热采过程中的应用	仲朔平 佟允宪 王文然 俞美英 宫卓立 孙 勇	刘 丽	(134)
电容含水率计测油、水两相流含水率	刘兴斌 熊江红 吴世旗	庄海军	(143)
GFC 高分辨率持水率计电缆速度校正方法研究	郭海敏 赵宏敏	李炬儒	(148)
电磁波传播原油含水分析仪的实验研究	王进旗	柳建涛	(153)
垂直管中油、气、水三相流分相含率测量模型研究	金宁德 乔贺堂	张淑英	(156)

油井三相流检测信息处理方法研究	钟兴福	乔贺堂	吴世祺	(162)	
用生产测井资料确定地层参数	周堤	蔡激扬		(169)	
井筒有积液的多相流条件下气井试井分析理论	李笑萍	翟云芳	沙白坚	(174)	
垂直管中油、气、水三相流测井解释滑动比模型研究	谷宁	金宁德	李占诚	(179)	
有界油藏条件下多相流试井分析方法研究	尹洪军	卓兴家	翟云芳	(184)	
独具特色的生产测井三相流模拟试验装置	丁志敏	黄盈才	李启迪	(190)	
一种流动模拟回路中全自动液相流量计量装置	赵宝成	佟广新	孙成林	杨素秋	(196)
过环空三相流测井仪的几个技术问题	郑华	阙源	陈景霞	(202)	

气固两相流检测技术

气、固两相流对钢板冲刷磨损的实验研究	李玉麟	林建中	章本照	于斌宏	(207)			
煤粉燃烧火焰温度脉动的动态测量及频谱分析	周末	周俊虎	姚强	寿伟义	曹欣玉	岑可法	(210)	
图象处理技术在全炉膛火焰监测中的应用	王式民	吕震中	麻庭光	吴国兴	李大骥	徐益谦	(214)	
湍流气体火焰热图象特性研究	杨宏旻	唐晓军	刘勇	顾璠	徐益谦		(219)	
频谱分析法检测荷电气、固两相流 LDV 信号的探讨	周浩生	王泽	罗惕乾	杨诗通			(225)	
应用激光多普勒测速仪对低负荷稳燃燃烧器稳燃机理的研究	潘卫国	廖永进	李凤瑞	池作和			(230)	
气、固两相绕流特性的 PDA 测试	邱坤赞	梁绍荣	严建华	李晓东	沈耀良	倪明江	岑可法	(234)
粉尘浓度在线检测研究	陆勇	叶茂	徐伟	王式民			(240)	
用光散射方法在线测量除尘器效率	卫敬明		李凌云				(245)	
模拟流化床颗粒结块故障诊断研究	陈伯川	张东明	何震	沈晓清	陈丰秋		(251)	
瞬态热流计及桥式电路检测技术在气、固多相流传热中的应用	高翔	陈亚非	骆仲泱	周劲松	马增益	倪明江	岑可法	(257)
热扩散技术在循环流化床固体颗粒再循环量测量中的应用	陈冠益	方梦祥	骆仲泱	李绚天	倪明江	岑可法	(265)	
循环流化床内转折角磨损规律研究	马增益	严建华	相纪宏	潘国清	倪明江	岑可法	(269)	
气、固相流化床中压力脉动信号的 Wigner-Ville 谱分析	何震	陈伯川	张卫东				(273)	
用高频感应探头测量燃煤等离子体电导率	徐一元	蔡崧	李大骥				(280)	

气液、液固两相流检测技术

超净介质中杂质的光学检测技术	王乃宁	王建华			(284)
----------------------	-----	-----	--	--	-------

利用液滴自身带电测量其粒度分布的研究	吕砚山	张进明	杨丽华	(290)
环状两相流和液体薄膜流参数的实时在线测量	蒋章焰	陶正文		(295)
高压天然气中液滴直径和含液量测量系统的研制	毛靖儒	陈庆祝	郎凤荣	张学明
			王健海	杨得湖 (301)
用高速摄影技术进行液体雾化机理的研究	毛靖儒	姚秀平	孔琼香	(306)
液滴在多曲折流道内运动轨迹的计算和实验验证	张天野	孔海欧	郑洪涛	魏舟浩
			程元龙	(311)
超声成像用于气、液两相流流型识别及截面含气率的测量	徐立军	韩泳涛	徐苓安	(317)
气、液两相涡街流量和组分测量装置研制方法的探索性研究	李永光	蔡祖恢	李美岭	林宗虎 (325)
基于小波分析的流型辨识	陈珙	黄志尧	慎大刚	李海青 (329)
一种用于瞬态颗粒测量的衍射式激光测粒仪	张志伟	王乃宁	虞先煌	(334)
激光测粒仪中寻优计算的初值选择对于测量结果的影响			徐贯东	(338)
激光衍射光散射技术在水煤浆喷嘴雾化特性测量中的应用				
周俊虎 姚强 黄镇宇 曹欣玉 刘建忠 赵翔 吴晓蓉 岑可法 任建新 (344)				
在线检测技术在植物细胞培养中的应用	傅旭庆	吕德伟	张兵	孟琴 (349)

海洋高技术 with 多相流检测技术

郑之初

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 海洋石油开采技术是海洋高技术的重要内容之一, 根据我国当前技术和经济发展的状况, 海洋油气开采必须发展油气混输技术。其中混相增压和混相计量技术是关键。本文指出在发展多相管流流态的流动显示技术, 测定各种流态下管线压降、多相泵的增压效果, 研究适用于海底管线油气混相输运的流量计三方面。

多相流检测技术已充分地显示了在发展我国海洋高技术中的重要地位。

关键词 多相流 混相输运 检测技术

引 言

12年前, 曾经根据航天、原子能、石油、化工、环境、运输、机械、新材料等方面的情况为我国2000年多相流学科展望写过一个概述^[1]。两年后第一届全国多相流检测技术研讨会在杭州开幕。10年来我国的多相流检测技术经历了一个起步、发展、面向社会、壮大和深化的成长道路。今天再想用有限的篇幅来综述发展到目前的多相流技术, 即使是多相流检测技术既做到照顾方方面面又切中问题的要害, 这似乎已经变成不太可能的事实了, 细想起来不外乎下述几个原因:

(1) 多相流是个新兴的、潜力巨大的涉及到国民经济各领域而且又是与工农业生产密切相关的学科;

(2) 它的主体研究已经结束了起步阶段, 正在不断发展、壮大、逐步深化, 面向社会;

(3) 理论和实验研究已经展开。深入的研究发现, 常规的不断综合因素的考虑方法, 已经不能确切地描述问题的本质, 大量新的处理方法及技术路线不断涌现;

(4) 在改革深化和市场经济的条件下, 环境、能源、材料工艺等一些有经济实力的系统, 促进了多相流检测技术的广泛和深入的发展。

但是, 10年后的今天为了聚焦和再展望, 综述又是必须的, 简单的方法是化整支为分支, 再汇百川而成大海, 这就是我写我国海洋高技术 with 多相流检测一文的目的。

概 述

面向21世纪, 人类在面临全球人口、资源、环境三大热点问题的挑战中, 不可避免地越来越重视海洋并依赖海洋, 而谁在未来世界经济发展中拥有海洋高技术, 谁将在发展和占有海洋的竞争中取得主动。因此, 到本世纪末人们进军海洋和开发海洋的技术力量, 将与研究宇宙和发展宇航技术并驾齐驱, 上述观点而今已成为许多海洋国家的共识。

在海洋高技术方面,世界各国的成就主要体现在海洋环境探测技术、海洋油气开发技术、深潜技术、海洋资源和生物技术等领域^[2]。众所周知,石油是世界能源之一,它的消耗量占全球能源的25%以上。1975年Moody估计全球的剩余石油资源为 $1240 \times 10^8 \text{t}$,其中海上可发现为 $500 \times 10^8 \text{t}$,因此,海上石油开采是近期能源的主要来源之一。我国海岸线总长为32000多公里,水深200m以内的大陆架上已探明的石油储量为 $150 \sim 200 \times 10^8 \text{t}$,天然气储量为 $6.3 \times 10^{12} \text{m}^3$,因此我国海洋石油工业应提高效率,加快发展。海洋油气开发技术是发展我国海洋高技术重点课题之一。

经过“六五”“七五”的10年努力,我国海洋油气开发已基本掌握近海油田的开采技术。“八五”以后,为满足开放城市和特区经济发展的要求,把海上开采的石油和天然气用最经济的手段输送到岸上是迫切需要解决的关键问题。由于输油管道其运输方式不受限制,可维持油气连续生产,运输费用也低,因此它是海上石油最主要的一种运输方法。为适应“八五”以后我国经济发展的特点,长距离油气混相管道输送技术特别受人关注。

另一方面,从20世纪70年代起,国际上为了开发边际和深水油田,开始构思水下生产系统。由于不用建造永久浮式平台,整个系统投资成本会减少很多,也避免了海上风暴引起的损失和节省停工、停产费用,并实现全天候的采油技术。经历了十多年来的努力,水下生产系统已逐步由实验性研究转向海上实质性开采。从1992年起,我国有关部门曾对我国海洋石油水下生产系统的可行性进行探讨,初步认定在我国实现上述方案也是可行的。图1是我国可能实现的水下生产系统方案示意图。由图可见,长距离油气混相运输的压降和传热性能以及增压计量技术的研究,其中包括水下混输泵和水下混相流量计的产品研制是从“九五”起一直延长到21世纪初这段时期内海洋油气开发高技术中的主要关键问题。

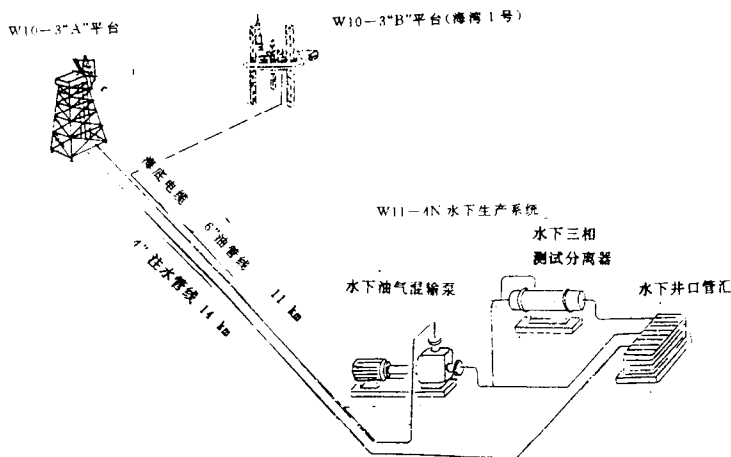


图1 我国可能实现的水下生产系统方案示意图

相关的多相流检测技术

油气长距离混相运输面临的首要问题是依靠产出油气的自身能量不能运输到目的地而必须增压。图2是根据地形地貌选定增压站数量的原理示意图。由于海底管线增压的安装困难、

费用昂贵以及安装后要经受最恶劣的自然袭击,并在一段时期内无法维修等原因,所以选定增压站的必须数目是十分重要的。当地形、地貌条件确定后它直接依赖于管道的压降。因此对管线油、气、水混相输送的压降计算显得十分重要。加上油气管输时温度降到某一值时将会有固体或液体沉降物析出,所以温降的测定也是十分重要的,而上述两个参数的变化十分依赖于管内的流态,因此首先提出了下列问题。

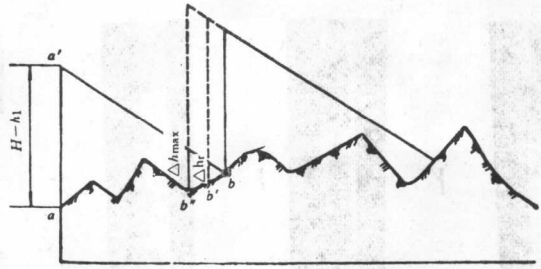


图2 增压站设定简图

1. 多相管流流态的流场显示技术

自本世纪60年代以来,国外建造了各种水平、垂直、弯管等气、液两相的流态模拟实验设备,并开展了各种流态随各种流动参数变化的转换关系研究^[3]。国内在80年代中期到90年代初期,从石油、化工、原子能研究等需要出发,在西安交通大学、浙江大学、大庆油田、南阳油田等单位也纷纷建立了相应的装置。中国科学院力学研究所基于发展油气运输的海洋高技术目的,认定流态显示与流态转换关系是必须解决的关键问题,也建造了管子内径为50mm、管长为40m左右,全透明、水平、垂直、倾斜、弯曲管的流态模拟装置。在全流水情况下最大流速可达1.2m/s,相应的 $Re=6 \times 10^4$,全气



图3 多相管流流态模拟实验装置全貌

流情况下最大气速可达5m/s,其相应 Re 为 1.71×10^4 。在气、水两相并存的情况下可进行(1)层流与层流;(2)紊流与层流;(3)层流与紊流;(4)紊流与紊流四种状态下的管流试验,图3是该多相管流流态模拟实验装置全貌的照片。

伴随管流流态模拟设备的建立,如何实现水平、垂直管中的各种流态是首要问题。常用方法有直接混合、孔板法及引射控制法等,图4是作者用引射器控制气、液两相压比和流量比实现的一些水平、垂直、弯曲管的典型流态并用窄缝聚光,1/500~1/2000s曝光时间的快速摄影的方法得到的各种流态照片,同时在模拟装置上用24EI型的压力传感器实现了截面上不同对应位置的压降测量。图5给出了一些典型流态的压降时间曲线,它是一条其振幅大小随流态的不同有较大的差异的脉动曲线。

2. 混相流量计量

混相输送是油气管输的发展方向,而采用与否取决于混相计量与混相增压两项关键技术。目前这两方面都在开展相应的研究,在我国海洋高技术一条混相输送的研究管线上增压泵决定采用进口的混相增压泵,由于没有合适的混相计量仪不得不配以分相的计量方案来进行运行试验。尽管分相计量有速度慢、结构复杂、造价昂贵等缺点,但还是被采用的事实进一步

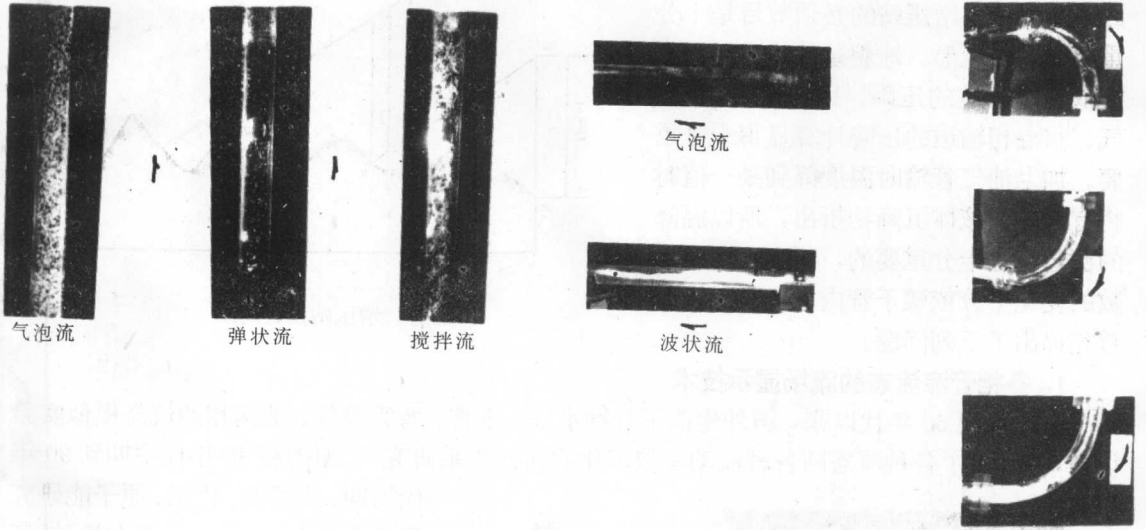


图4 水平、垂直、弯管的典型流态照片

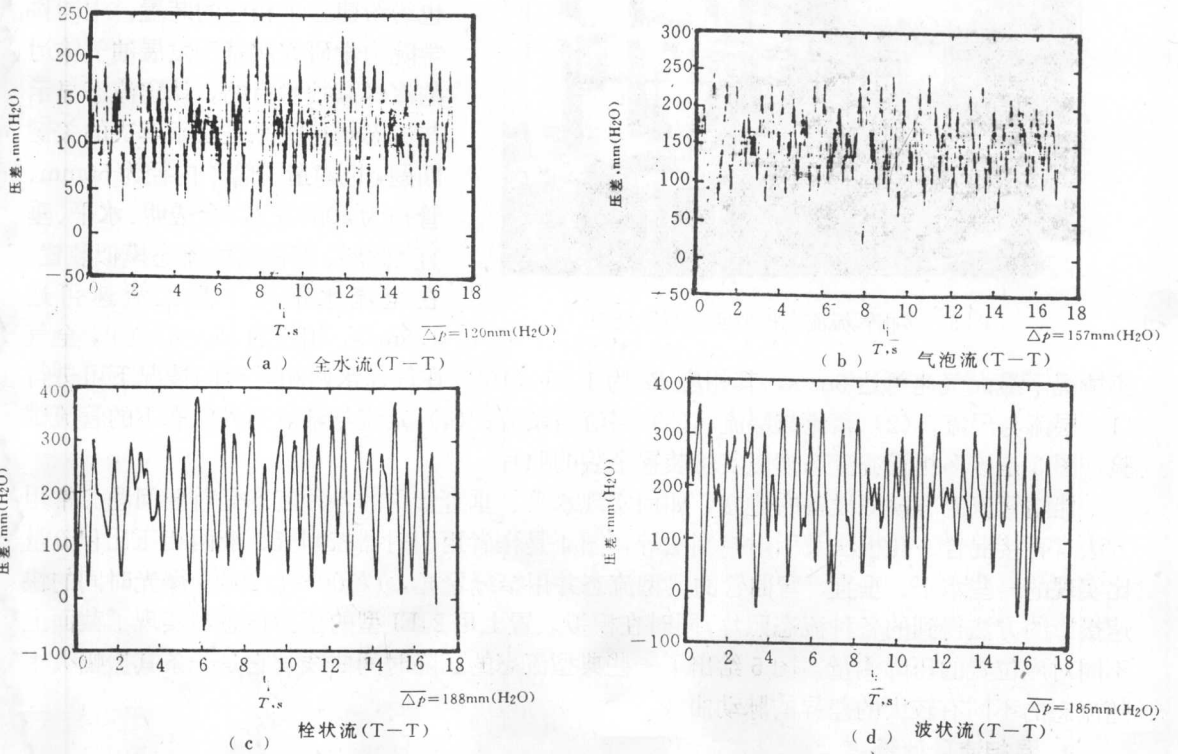


图5 典型流态的压降时间曲线

说明了混相流量计量技术的重要性。

总结国内发展起来的混相计量技术大致有二种方式。一种为测量元件放置在管道中的例

如涡轮流量计或孔板计量总流量,再配以射线或压力测量以确定其油、气、水的分相组分^(4,5),也有利用油、气、水介电常数的差异在管道中利用旁路分别计量油、气各组分的情况⁽⁶⁾。这种方式由于元件本身要破坏管内的流态,而且一旦探测元件出现故障,维修就显得特别困难。另一种为测量元件设置在管道外,如反射式超声层析成像系统⁽⁷⁾,这实际是用成像方法确定气、液界面的技术,通过两个站之间同步成像的时间控制得到其液相、气相的迁移速度即可得到流量随时间的关系曲线。如果要把数据传输到石油平台或岸上还需要解决长距离的讯号传输及抗干扰等一系列问题,然而这种设想似乎在海底管线上实施有一定可能性。应当指出:某种流态其气液界面很难清晰地判定,如垂直管中的气泡流,搅拌流等,这就需要混相计量时的辅助计量方法,即根据输运油气的典型流动参数或参数组成的相似准则数来判定管流的流态,而在选定的流态情况下采用有效的计量方法⁽⁸⁾。对于海底管线油气混相计量技术尚不成熟的今天,快速油气分离装置的研究仍是输运技术重要的研究内容之一,因此研究气、液分离装置中的流态以及测定气、液的组成和它们的分相流量也应当是今后多相流检测技术的一个重要方面。

结 论

综上所述,我们对海洋高技术中多相流检测技术提出如下建议:

(1) 本世纪末到下世纪初,开发海洋与发展海洋高技术已取得了许多海洋国家的共识,而海洋油气开发技术是发展海洋高技术的重要内容之一。根据我国目前经济与技术发展的状况,海上油气输运技术将成为“八五”以后的主要关注项目,其中混相输运是主要研究方向。因此为多相流检测技术在油气混输中的应用研究提供了广阔的前景。

(2) 在油、气混相输运中,水平、垂直、倾斜,与弯曲管中气、液两相或多相流态的再现以及流态转换与流动参数组合的关系研究,它是关系到管流压降与温降的重要基础,尤其弯曲流道中的流态更是增压效率与叶片磨损机理研究的关键。

(3) 混相流量计量是实施海底管线重要关键技术之一,由于海上结构物安全、可靠和维修的特殊要求,发展管外非接触式检测手段如——界面成像与迁移速度匹配技术,并辅以抗干扰远距离讯号传输技术,不失为有希望技术之一。

(4) 快速分离装置的研制是分相输运的重要手段也是混相输运实施困难的弥补,因此对装置内气、液两相流态及组分的测量也是多相流检测技术关注方向之一。

(5) 通常情况下长线油、气混输都需要管道保温,因此各种流态下传热系数的计量及相关参数的研究这是热物理技术方面的一个重要课题。

参 考 文 献

- [1] 郑之初. 多相流概述. 二〇〇〇年的中国研究资料, 第65集, 力学基础科学部分国外发展水平和差距, 中国科协二〇〇〇年的中国研究办公室, 1985年10月北京 p45—50, 1985
- [2] 奕学志、李国强. 论海洋高技术的发展. 第七届全国海洋工程学术会议论文集, 1994, p41—43
- [3] 化学工程手册编委会编. 化学工程手册. 液体流动. 北京: 化学工业出版社. 1989, 10

- [4] 张淑梅、金宁德、张淑英. 油井中油、气、水三相流总流量检测. 第四届全国多相流检测技术学术讨论会论文集, 1992
- [5] 陈之航、罗国雄、郁鸿凌. 油气两相流体的流量双参数测量. 上海机械学院学报, 1991, 第13卷, 第1期, p45—51
- [6] 周芳德、陈学俊、王家纯. 油、气、水三相流流量测量的研究. 工程热物理学报, 1992, 第13卷, 第4期, P384—388
- [7] L. A. Xu, L. J. Xu, Y. T. Dong & Y. T. Han, process tomography technique and its application to two-phase flow measurement, Proceedings of the International Symposium on Measuring Techniques for Multiphase Flows, April 10—13, 1995, Nanjing, China. p213—221
- [8] 郑之初、雷晓晓、李东辉. 海底管线中多相流动的实验研究. 第七届全国海洋工程学术会议论文集, 1994, p164—170

关于过程层析成象技术的评述

徐苓安

(天津大学自动化系, 天津 300072)

摘要 在过去的10年中,过程层析成象技术(Process Tomography——PT)正式形成并得到了迅速的发展。人们预言,基于知识工程的新一代智能化在线检测仪器将随着该技术的发展、完善而产生。

在本文中,作者首先叙述了过程层析成象技术的内容和特点,并简要地总结了迄今为止欧美等国研究工作者所取得的研究成果,然后介绍了该技术在解决两相或多相流检测问题、过程模型证实及优化过程工艺、设备设计等方面所能起到的作用。最后,作者肯定了过程层析成象技术的发展前景,并指出今后一个时期该技术发展的几个具体方面。

关键词:层析成象 多相流 在线检测技术

过程层析成象技术(Process Tomography,缩写为PT)是本世纪80年代中期正式形成和发展起来的,一种以两相流或多相流为主要对象的过程参数二维或三维分布状况的在线实时检测技术。虽然它的基本原理与医学工程中的计算机层析成象诊断技术(Computerized Tomography——CT)是相同的,但是,由于测量对象、测量目的以及运行环境条件的不同,使得PT技术相对于CT技术来说,无论是在信息的获取方式和信息的处理方法上,还是在测量结果的解释和应用上都有显著的不同之处。目前,PT技术的研究,在国外已经从高等院校中原理性研究阶段,向有工业界支持和参与的应用研究阶段过渡;在我国,天津大学和清华大学于80年代后期率先开展了PT技术的研究,已开发出几种敏感方法的PT系统原理性样机,浙江工学院、浙江大学、东北大学等也相继开展研究,并取得了令人鼓舞的成果。最近,个别工业部门还将PT技术的应用研究列入了“九五”期间高科技应用发展规划。

如何正确评价PT技术在解决两相流或多相流过程参数在线检测问题中的作用?它的发展前景如何?作者在综合分析国内外文献的基础上,结合本人多年来从事PT技术研究的经验,以及与国外同行进行学术合作交流的体会,提出了一些看法和建议。

过程层析成象技术的内涵

过程层析成象技术的数学基础与医学工程中的计算机层析成象技术的数学基础相同。它们都是基于雷登(Radon)变换与雷登逆变换^[1]。

如图1所示,定义在 Ω 域上的连续有界函数 $f(r, \varphi)$ 沿直线 g 的线积分:

$$F(l, \theta) = \int_g f(r, \varphi) ds = \int_g f(\sqrt{l^2 + s^2}, \theta + \tan^{-1}(s/l)) ds \quad (1)$$

被称为函数 $f(r, \varphi)$ 的雷登变换。

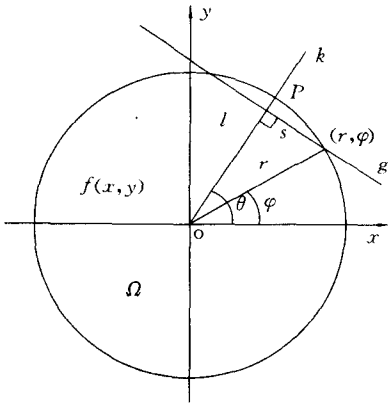


图1 雷登变换的几何表示

而函数 $f(r, \varphi)$ 在定义域 Ω 中任一点 (r, φ) 处的值可以由 $f(r, \varphi)$ 沿通过该点的线簇积分 $F(l, \theta)$ 按下式唯一地确定:

$$f(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r \cos(\theta - \varphi)} - l F'(l, \theta) dl d\theta \quad (2)$$

公式(2)就是雷登逆变换。式中, $F'(l, \theta)$ 是 $F(l, \theta)$ 相对于 l 的一阶偏导数。

过程层析成像技术的实质就是运用一个物理可实现系统完成对被测物场某种物场特性分布 $f(r, \varphi)$ 的雷登变换与雷登逆变换。它的基本内容是,采用特殊设计的敏感器空间阵列,以非接触或非侵入方式获取被测物场的信息;运用并行处理技术及定性或定量的图象重建算法,在线实时地重建出被测物场的图象;通过对重建图象信息的分析以及不同时刻下重建图象信息的比较,获得被测物场的分布状态及其运动变化特征(例如,两相流体在管道内或反应容器内某一横截面上的分布状况,两相管流的流动形态等等);有时,还要根据从重建图象信息中提取出的特征参数,按照有关的理论模型,发出相应的控制信号,以实现对被观测过程的调节,保证生产过程高效、安全地运行。

一个典型的过程层析成像系统的构成可用图2所示的方框图予以说明。

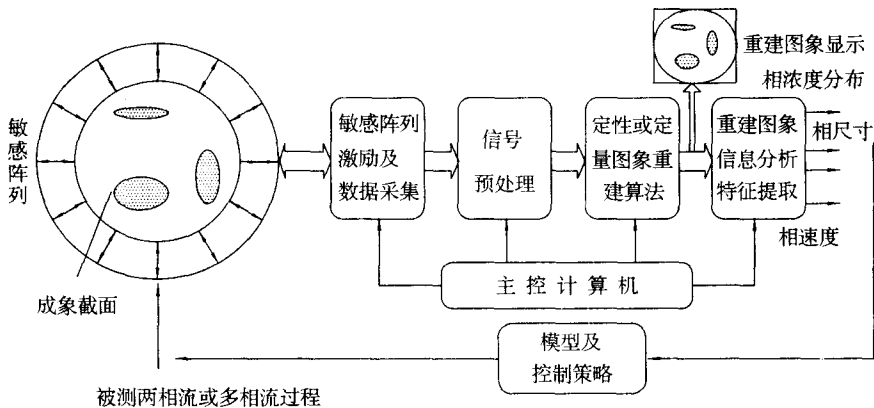


图2 过程层析成像系统

与CT技术相比较,PT技术具有以下特点:

(1) 被测物场始终处于剧烈运动、变化的状态,要求PT系统不仅应具备非接触或非侵入方式的在线获取物场信息的能力,还应具备良好的信息实时处理功能;

(2) 被测物场往往具有很强的非均匀性,造成物场与获取物场信息用的敏感场之间相互作用的非线性特性严重。这将造成图象重建的困难;

(3) 环境适应性是系统必须满足的基本要求。敏感空间阵列及相应的信号处理单元不仅要考虑与被测管道或反应管道的几何形状、机械、物理特性实现“匹配”,还要适应被测对象的物理、化学特性(例如腐蚀性、磨蚀性等)及其工作参数(如压力、温度等)。此外,对周

围恶劣环境（如电磁干扰、振动等）的适应性和信号的远距离传输能力也是必须具备的；

（4）被测物场的图象重建及显示并不是 PT 系统的主要目的，或者说，不是最终的目的。重建图象的物理意义阐明；从重建图象信息中提取与被测物场及其运动变化有关的特征参数；对被测物场作出定性和定量的评估，并输出对相应的过程实行调节、控制的信号，等等，应是 PT 系统的一个重要功能。

研究现状

（1）基于电学敏感方法 PT 技术的研究有了长足的发展。这表现在以下几个方面：

①先后开发了电容层析成象系统 (ECT)^[2,3]、电阻抗层析成象系统 (ERT)^[4]和电磁感应层析成象系统 (EMT)^[5]。其中，ECT 和 ERT 已在实验研究用流化床、气/液搅拌反应器、液、固水力旋流分离器、固体粉料的气力输送系统以及较大规模的两相流实验装置上成功地运行，获得了以往采用传统的检测方法和仪器所不能得到的、对过程机理研究极为有用的信息^[6~9]；

②电阻层析成象技术在环境监测中的应用也取得了成功；例如，用 ERT 系统监测大容积烃类储罐的泄漏对土壤和地下水造成的污染程度^[10]；

③已有小型仪器公司在生产、销售电容层析成象系统^[11]。该系统可在实验室中应用，在线辨识两相管流流型和检测相含率及其分布。

（2）人们对那些成功应用于医学诊断的计算机层析成象技术，例如，基于电磁辐射方法的 X—CT、 γ —CT 和核磁共振成象技术 (NMR)、基于声学方法的超声层析成象技术等等，再次进行了“移植”于工业过程参数在线检测的应用研究，并在实时性和小型化等方面取得了较好的进展^[12~18]。

（3）与过程层析成象技术的发展与应用有关的理论问题的研究日益深入。例如，将敏感器阵列所形成的空间敏感场的非均匀性的影响考虑在内的实时、定量的图象重建算法的研究^[4]；适用于金属管道或金属容器的 ERT 系统敏感阵列的设计及相应的信号获取方式的研究^[19,20]等等；

（4）从事 PT 技术研究的小组和人员迅速增加，而且，在国外，PT 技术的研究已不再是高等院校独自进行的原理性探索，一些大的工矿企业的研究机构（如美国杜邦公司、斯仑贝谢剑桥研究中心）积极的支持和参加 PT 技术的应用研究。鉴于 PT 技术的潜在应用前景，欧洲联盟的科学技术委员会拨款支持了一项为期 4 年（1992~1995）的“欧洲过程层析成象技术联合行动 (ECAPT)”，大大地促进了欧洲地区基于电学敏感方法 PT 技术的发展。为了促进整个 PT 技术的研究和应用，美国工程基金会 (Engineering Foundation) 于 1995 年 11 月在美国加利福尼亚组织了一次国际性学术会议（工业过程层析成象技术的前沿），有美洲、欧洲和亚洲的十几个国家来自高校和工业界的近 60 名代表出席，鉴于此次会议的成功，美国工程基金会已决定于 1997 年在荷兰召开第二次国际会议。

基本估计

过程层析成象技术的产生和发展是与科学研究及工程实践中对两相流或多相流过程内部信息的迫切需求密切相关。研究人员和过程工程师之所以对这种技术极感兴趣，这是由于：

（1）它可以在不破坏，干扰流体流动的情况下，获得管道或设备内部两相/多相流体的二