

# 气液两相管流模拟实验新技术

郑之初 吴应湘 李东晖

赖英旭 劳力云 马艺馨

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

**摘要** 本文介绍在中国科学院力学研究所气液两相管流模拟实验装置上,为开展海底管线油气混输关键技术研究,发展起来的一些实验新技术。如:管流流态的显示技术、不同流态下的压降测量,通过实验观察揭示了一些流态的成因和转换机理结果。在管流流态识别方面发展了特征函数如压力时间曲线分析方法、不同流态下信号传播速度和利用 ERT(电阻层析成像技术)技术进行管流气液界面成像动态试验的一些新成果。最后,介绍了不同流态下增压泵的增压效率试验和复合式油气水分离装置的分离试验。上述成果对海底混输管线的设计、长线输送增压站的选取、混相计量技术以及进行工业流动控制和管线在线实时测量有重要意义,由此说明:发展的多功能气液两相管流模拟试验装置在多相流学科研究中的先进性。

**关键词** 气液两相管流,流场显示,压降测量,管流模拟实验装置

## 1 引言

开发边际油田和深水油田是海上油气开采的发展方向,近年来,水下生产系统由于它毋需建造固定或永久浮式平台,节省工程投资;避免恶劣海洋气候影响;系统无现场操作人员、灵活的开采方式;高采收率、低采油成本等优点,已经受到不少海洋石油公司的关注。我国 1992 年对海洋石油水下生产系统进行了方案可行性研究,“九五”期间,海底管线长距离输送中的关键技术和装备如:多相增压泵、混相计量仪、油气水快速分离装置及管内流态识别技术等都已列入我国海洋“863”高新技术的预研项目。基于上述研究背景,中国科学院力学研究所在总结 60 年代以来国内外有关方面研究工作的基础上,建设了用于管线油气混输多相管流研究的专用模拟设备,设备有效长约 40m,管子内径 50mm,由全透明有机玻璃制成。在全气流情况下,气速可达 5m/s,相应  $Re = 1.7 \times 10^4$ ;全水流情况下,最大流速可达 1.2m/s,相应  $Re = 6 \times 10^4$ ;气水并存时,短时气速可达 50m/s,相应的  $Re = 1.7 \times 10^5$ ,可以进行层流与层流;湍流与层流;层流与湍流;湍流与湍流四种状态下的管流实验<sup>[1]</sup>,图 1 给出了设备布置图及建成后设备的照片。本文介绍了利用上述模拟实验装置,在油气混输增压、计量、分离和流态识别方面开展的一些应用基础研究工作和得到的一些相应进展和结果。

① 中国科学院“九五”重大项目(KZ951-A1-405)及国家海洋领域高技术青年基金项目(820-Q-013)资助。

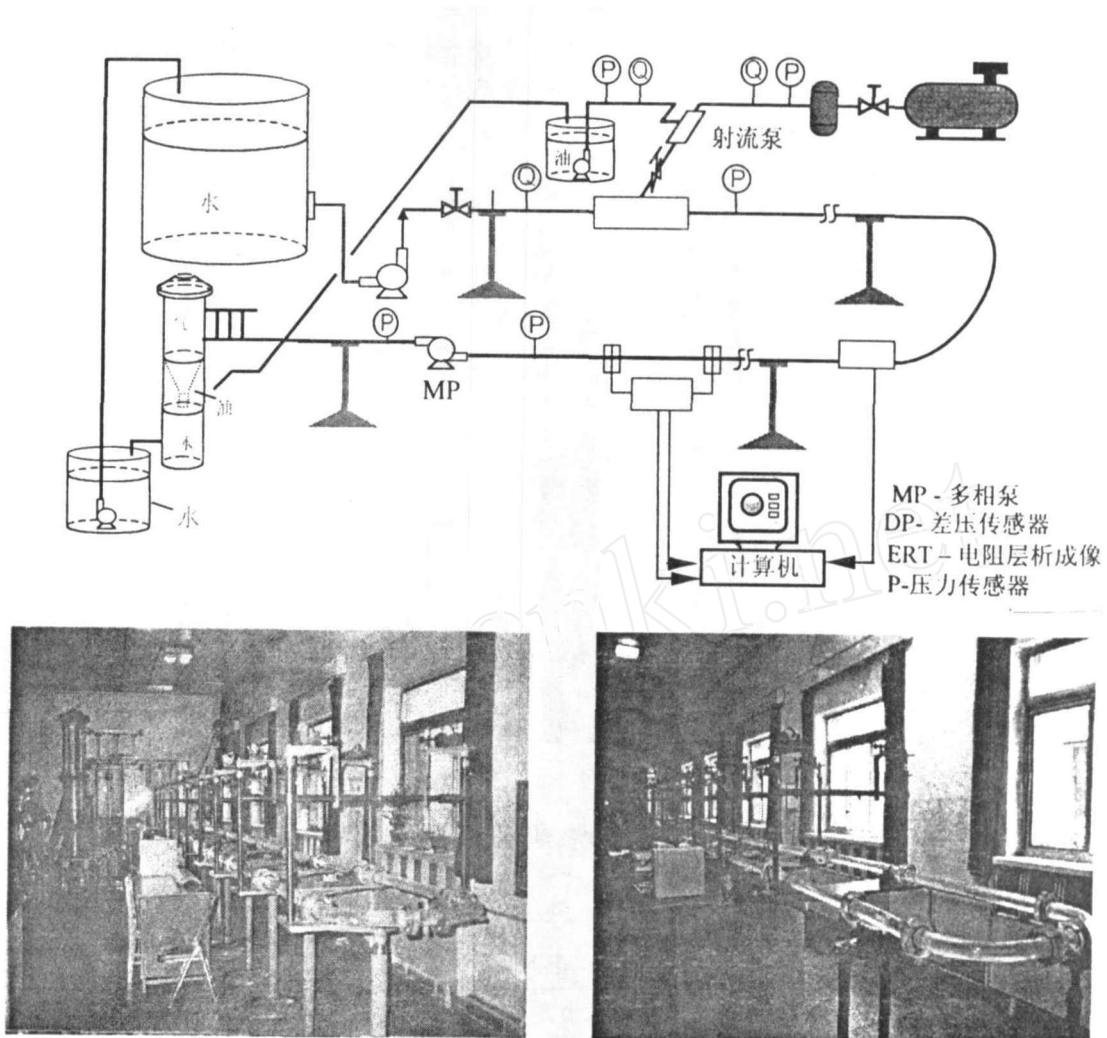


图 1 油气混输管道模拟实验装置示意图及照片

## 2 管流流态的流场显示和压降实验

本模拟实验装置采用自行设计的两相引射器,在控制气液两相流量比和流动参数(如压力)的配比条件下,利用气水或水气相互引射分别实现了水平和垂直管内的各种流态。由于使用了上述技术,可以在流体表观速度相同的条件下,通过含气率的变化来实现气泡流、弹状流、栓状流、水平流、波状流等各种流态的变化,为研究流态转换规律创造了良好的条件,表 1 给出了相应流态下的表观流速。在成功实现了水平垂直管各种流态的情况下,在全暗实验环境中,用一定宽度的狭缝聚光在  $1/500 \sim 1/2000s$  曝光时间内快速摄影方法,削弱了圆形透明管的光反射,避免了气泡和气团快速移动形成的界面模糊,得到了各种流态下的清晰照片<sup>[2]</sup>。图 2 给出了几种气泡流和弹状流的照片,从照片中可见单纯增加含气率,气泡流中气泡的密度加密,但不会改变流态。如果突然降低液体的迁移速度,气泡就会聚并形成弹状

流动,而在弹状流中由于气液两相的浮力不同会有弹状流中的两弹聚并,继续增大气量会使流动向搅拌流态发展。因此我们认为:长距离的水平和垂直管中迁移速度和含气率变化的联合作用是造成流态转换的重要因素之一。当然与上述各参数相关的流动特征参数也是控制和造成流态转换的重要因素,这一发现对工业上实现反应和流态控制以及流动参数(如压降)计算有重要意义。



图2 气泡流及弹状流的照片

表1 相应各流态下的表现流速

流型	气相尺寸 cm		水流速 m/s	水压 MPa	气流量 m <sup>3</sup> /h
	长度	高度			
全水流			0.606 0.615	0.122	0
气泡流	30	1.5	0.600 0.597	0.122	1.6
弹状流	100	2~2.5	0.600	0.128	1.75
栓状流	150	3	0.623	0.130	
	200	3.5	0.589	0.139	3.9
长栓流	300	4	0.583	0.140	7.5
	400	4.5	0.596	0.141	12.2

为避免测量两截面压力值用两个大量相减求取管子不同对应位置压降方法带来较大的误差,我们用 24EI 型硅阻式差压传感器实现了不同对应位置的压降测量,信号处理部分由

差压传感器、压力传感器(HoneyWell 24PC)、自制的 6 通道信号放大器、模数转换及接口单元(ADC)和微型计算机组成。分析所得的压差时间曲线发现:不同流态下压降幅值、频率和平均压降有较大差异,图 3 给出了一些典型流态下的压差曲线。这是长线混输中造成压降计算不准的重要原因,这一在国际上已引起广泛关注的现象,我们从流态转换和差压计量两个方面揭示了它们内在的物理本质。此外,截面上不同的位置(如管顶、管底和两侧)其压降平均值也不相同,所以精确计算管线的压降和管线受力应考虑沿管线周向和轴向的积分。

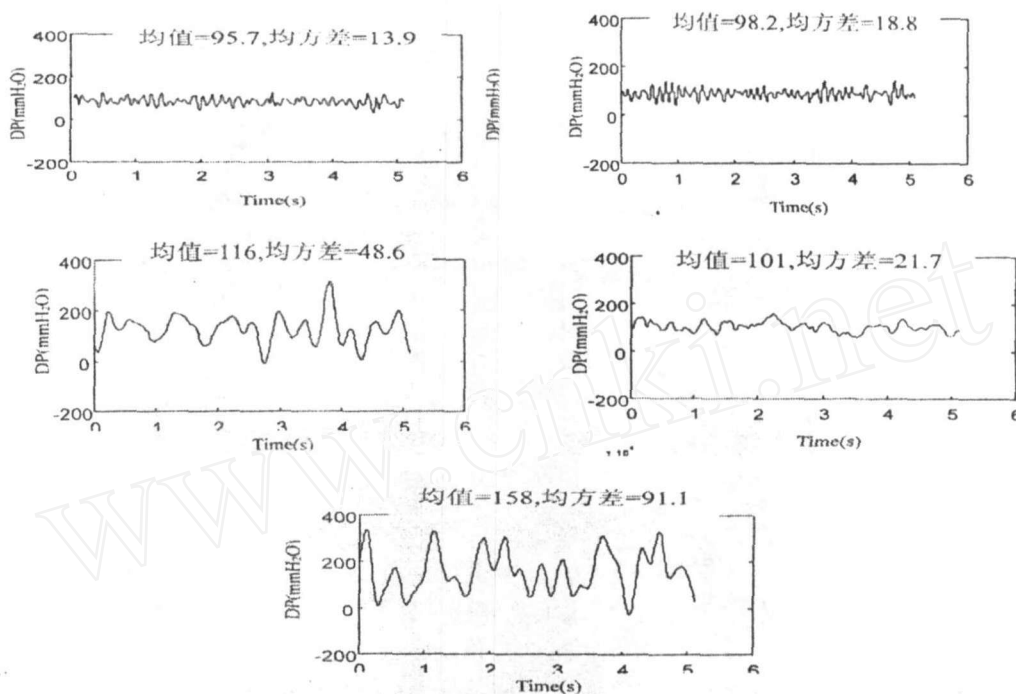


图 3 典型流态下的压差曲线

### 3 流态识别研究

两相管流流态对于流动控制和参数计算有着决定性的意义。因此,在两相流出现的同时就引人关注。早期的流态识别从直接在透明管中观察和由各种物理、力学参数组成的相似准则画成的流态识别图开始<sup>[3]</sup>,随着工业控制和信息技术的发展,人们需要从常用反映流动特征的测量参数的信号分析中来识别流态,即流态的在线识别、信号的频域处理、时间-频率域、幅值域处理、混沌处理及各种界面成像(电阻、电容、超声等)识别方法<sup>[4][5]</sup>。差压的变化紧密依赖于两相管流的流态,而流态的产生又起源于相的增加。基于上述原因,我们提出选用两相的平均压降与单相平均压降之比 ( $\frac{\Delta P_T}{\Delta P_S}$ ) 和两相最大能幅与单相最大能幅之比

$\frac{(\epsilon_{max})_T}{(\epsilon_{max})_S}$  两个无量纲参数为纵横坐标来构筑流态识别图。图 4 给出了不同载流速度下的流态关系图。由图可见不同流态只占曲线的一段,而且沿着曲线的不同分段对应管中不同的流态。对于不同的载流速度,连接各流态分界点可以划出规则的不同流态区,它不像以往的流

态划分图上有交叉的奇点。所用的流动特征参数压降是油井和输送管线上必须测量的基本参数之一,在获取该参数随时间变化的结果中又判别了管中的流态,这对于管线的设计和实现流动的在线实时控制都具有极其重要的意义。

在实验过程中,压差时间曲线受气源、水源、阀门及出口条件的不同形成不同的扰动,我们在某一载流速度下对三种出口条件的压差时间曲线进行分析,详见图 5,得出的流态识别图在同一曲线上,由此证明上述结论可信,它所取信号反映流动的本质而不受干扰信号的影响。

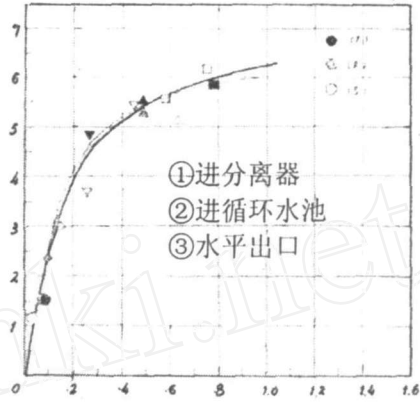
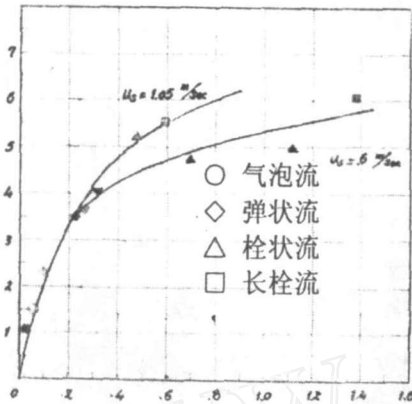


图 4 不同载流速度下的流态关系图

图 5 三种出口条件下的流态识别图

基于信号在介质中以扰动速度传播原理,对应不同的流态有不同的传播速度,对一固定的差压测量站,我们发现两个压力信号之间具有相似特征(见图 6),而其相似性的强弱与流态相关,我们对两种液相表观流速  $u = 1\text{m/s}$  和  $u = 0.61\text{m/s}$  条件下的五种流态,总计 45 次实验测得的两个压力信号间标准化互相关的值表明:不同流态其互相关值不同,详见图 7。这也可作为一种辅助流态识别的方法。

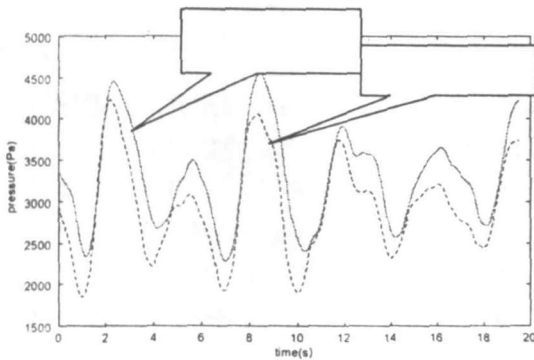


图 6 两个压力信号之间的相似特征

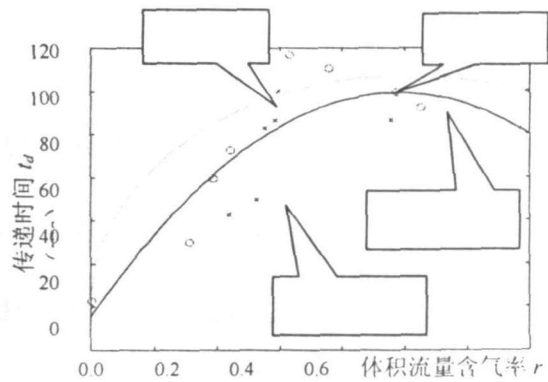


图 7 差压流态识别图

综上所述,流动参数的信号分析和不同处理方法,在流态识别工业应用中有越来越重要

的位置,而本文提供的选择无量纲参数构筑流态识别图的方法,有望形成一种有效的识别途径。

## 4 界面成像技术

在工业管道中运行的两相或多相介质,利用介质的物理性质差异、采用电学、超声、微波、射线成像方法在计算机屏幕上直接得到被测截面上的相分布图像,这种可视化过程的检测技术近年来深受多相流研究者的青睐。根据相界面随时间的变化,它能应用于管流的流态识别,如果相界面分布配以气相和液相的迁移速度,就能进行混相流量计量。所以对发展工业上在线实时测量技术有重要意义<sup>[6]</sup>。

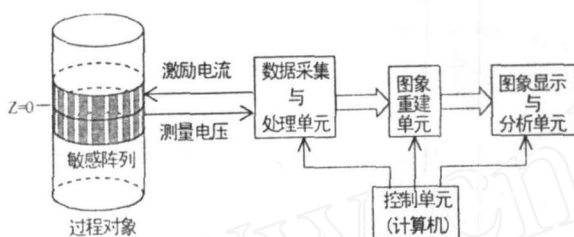


图8 典型的ERT系统



图9 电极阵列传感器

本文介绍了ERT系统(电阻层析成像系统)在我们模拟实验设备上气/水界面辨识的模拟实验结果。典型的ERT系统如图8所示,包括用于激励和测量的电极阵列、数据采集与处理单元、图像重建单元、图像显示与分析单元。本文实验中自行设计了单圈、双圈电极阵列传感器(详见图9),可进行双截面上相分布测量及离散相流速的测试。传感器内壁上精铣了等间隔凹槽,可保证电极定位精度、与流动轴线平行及对内部流动无干扰。在气液两相水平管流的某些流态如弹状流、栓状流、层状流、波状流情况下,由于浮力作用管道上部会短时或一直被气相占据,这使上部管子测量到的电压中有零值,使得传统的ERT图像重建算法不能正常工作。针对上述问题并结合静态试验,我们提出了液位监测方法及液面监测模式,并提出了新的ERT系统建像算法,设计了与新系统运行的主程序流程图<sup>[7]</sup>。利用这种新模式,我们用天津大学的ERT-1电阻层析成像仪进行了水平管流几种流态的动态模拟实验,电极阵列安装在A-A截面上,我们选择2m长的透明有机玻璃管作为显示管段,在液相表观速度为0.84m/s下进行了实验,实际流态可由照片观察到,实验测量到的横截面图像在计算机屏幕上显示,根据图像随时间的变化配以水相中的表观流速可以画出轴向的截面图像,详见图10(a)。结合横截面图像的组合可重构气液相的实际图像,图10(b)给出了照片及测量结果的比较图,测量结果与实际结果吻合较好。在国际合作项目资助下,我们用英国Leeds大学的IT2000电阻层析成像系统也在我所实验室中进行上述气水两相水平管流动态实验,图10(c)给出了他们轴向截面的结果,在界面清晰与图像真实性方面我们有独特的优点,而且我们的系统无论是数据采集速度还是建立图像速度都远远高于传统的ERT系统。

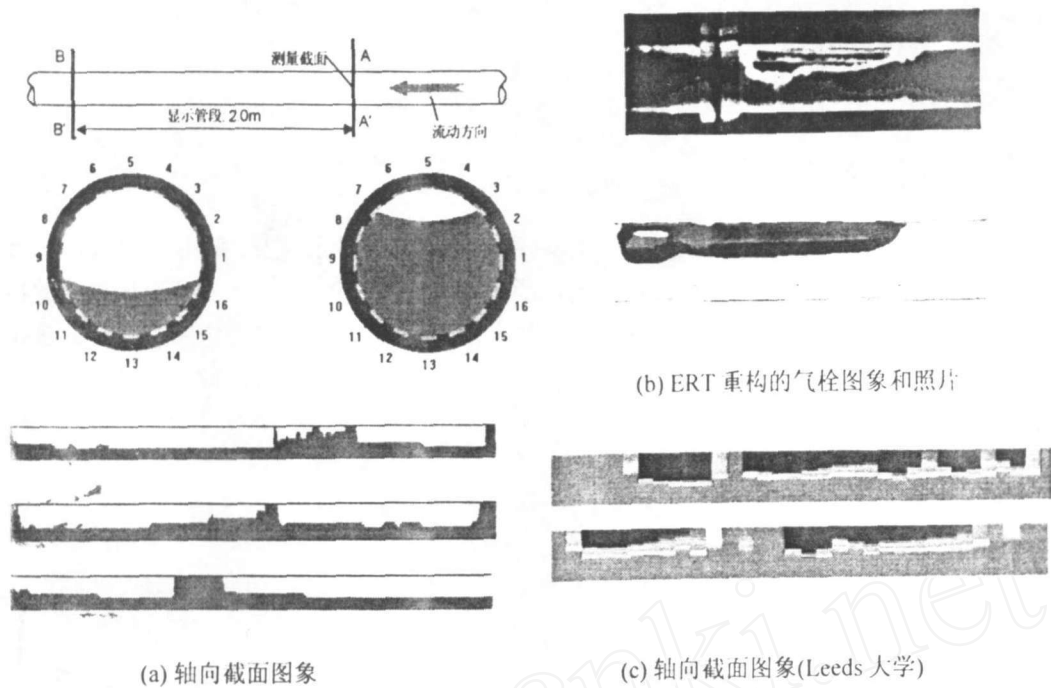


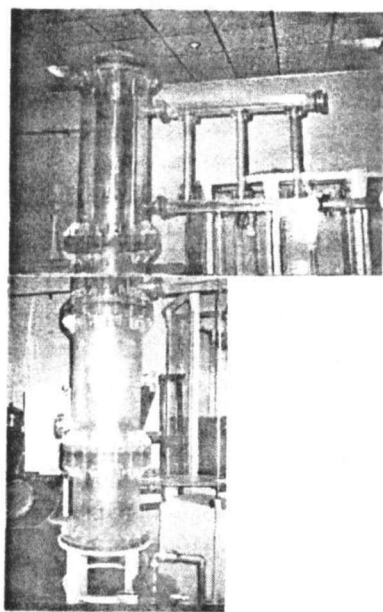
图 10 ERT 测量结果

这里提到的液面监测测量法、系统控制程序连同 ERT 硬件系统已申请发明专利, 本文提出的电极阵列传感器也已获得实用新型专利。

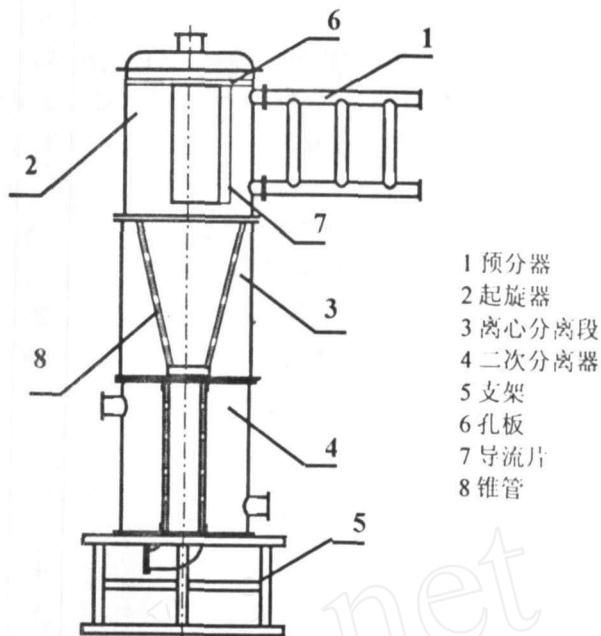
## 5 新颖气液分离装置的研究

水下生产系统目前在国际上尚有单相和多相输送两种形式, 在系统经济性、可靠性、复杂性、遥控可行性方面他们各自具有优缺点, 最终的取舍取决于两种运输方式中关键装置的研究进展。单相输送的关键在于高效、快速、结构简单的水下油气分离器, 这是一种把天然气和水从原油分离出来的装置。按分离原理可分为重力式、膨胀式、旋转式等几种<sup>[8]</sup>。本文提出了一种结构上采用重力、膨胀与离心三种形式结合的油气水三相分离装置(详见图 11(a)), 它在气液入口处设置了双管预分器, 以解决长线输送时由于气相和液相迁移速度差别引起的气液流量不稳定带来分离器效率不稳定的困难。在分离器上仍采用静态导流片以保证气液介质进入分离器后先起旋, 达到利用离心力使气液分离的目的, 我们可以调节导流片的位置控制进出口的面积比以达到调节起旋速度, 从而控制离心分离效果。顶端上气体出口管前的带孔板对排出气体中细微液沫起阻滞作用。具有带孔锥管的中段除用于气液分离外, 对油气水三相流动还能利用外侧的重力腔起到油水预分的作用, 中段以下有带孔套管也把下段分成内外二层, 外层为二次重力分离腔, 用以油水充分分离。

多相管流模拟实验设备末端安装了上述气液分离装置, 利用形成的水平管流流态, 我们进行了气泡、弹状、栓状、长栓、水平、波状各种流态下的分离效果实验, 图 11(b)给出了分离器工作时的现场照片, 实验指出气液快速分离效果良好。在分离器的气体 and 液体出口处设置了气体和液体的流量计量装置, 通过进入模拟实验设备的水流量和气体流量的比较可以检



(a)分离器的现场照片



(b)分离器的示意图

图 11 分离器的现场照片和示意图

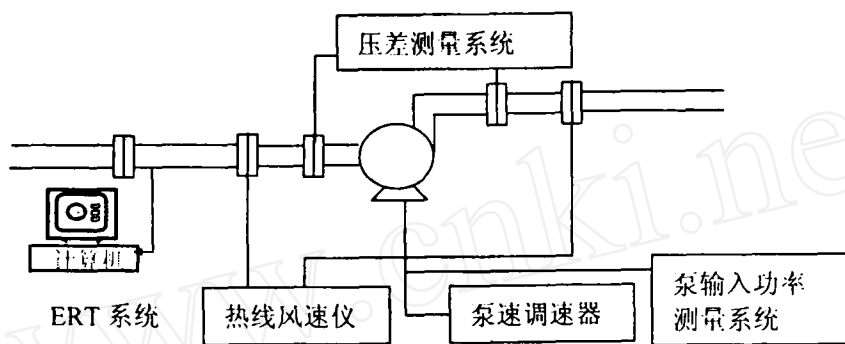
验分离器的分离效率,在气水两相条件下分离效率几乎达 100%。本分离器最大内径为 400mm,高度为 3m 左右,其处理量为 250t/d,而分离器对各种流态下最大进出口的压降为 300mm(水柱)。本装置还可进行拆除重组以适应气水、气固、油气水等各种条件下的分离要求。本文的性能实验为该装置应用于陆上或海上油田,实现高效快速分离、油气水分离装置的设计、制造和样机试制奠定了重要基础。本文的油气水分离装置已获得实用新型专利,组合式分离方法已申请发明专利。

## 6 混相增压实验

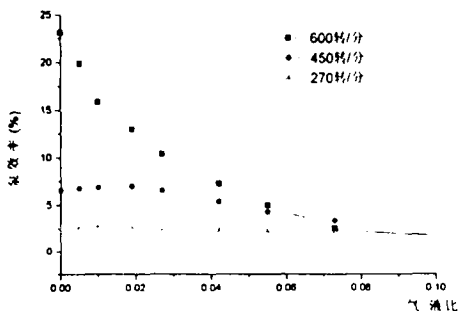
水下生产系统油气混输的关键:在于适用于海底环境的具有泵和压缩机两种性能的多相泵以及适用各种流态条件的混相流量仪。从 80 年代开始国外进行了大型多相泵的研究,泵的形式多种多样,如螺杆泵、活塞泵、隔膜泵、离心泵、射流泵等<sup>[9]</sup>,而对于不能依靠油气自身能量达到输送目的地的长线混输条件来说,适应各种流态而使增压泵具有较高的增压效率是考核增压泵的重要指标,为此在我们的多相管流模拟实验装置上选择一种增压泵(如常用的离心泵)开展了各种流态和转速下的效率实验(详见图 12(a))。实验在两种工况下进行,第一种工况是气水在一定驱动压力和流速条件下以各种流态流经离心增压泵,以模拟油气在输送过程中具有一定能量情况下进行增压,第二种工况是气水在各种流态下仅仅依靠单个离心增压泵驱动,以模拟在各种流态下用增压泵驱动时的输送情况。各种工况都进行了三种泵转速下的效率实验,图 12(b)和图 12(c)分别给出了泵效率和气液比(各种流态)的关系曲线。由图可见,无论工况一还是工况二,随着含气率的增加泵的效率都降低,高转速时下降速率极大,低转速时下降较慢,这是因为低转速时增压泵本来的增压效率就低的缘故。对



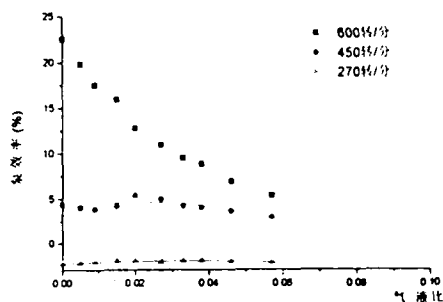
于工况二的情况,转速对效率的影响更明显,低转速的效率可比高转速的低5~6倍,因此要求增压泵必须有一额定的高转速,如果低于此转速,增压泵将不能起到增压效果,由此证明增压站必须在输送介质能量降低到一定水准以下使用才会具有更好的效果。此外通过实验分析对于含气率较大的输送条件,不妨选用稍低一些的泵转速,这在维持效率稳定方面有利。再有在长线输送中由于迁移速度的差异造成了流态的转换和不稳定,而当多相流动流经泵站之后,由于不同气液比条件下增压效率的不同,迁移速度的差异会增强,这更加速了流动的不稳定性,这对管线压降计算、增压站的设计也会带来影响。上述的实验研究为我们管流模拟实验装置上开展了各种多相泵增压实验奠定了基础,通过实验分析,我们认为:在今后的工作中,适合各种流态的多相泵研制很重要,但开展流态控制器的研制,将它置于某一多相泵之前以期达到泵的稳定效率,这也不失为获得高效油气混输的技术途径之一。



(a) 增压泵效率实验示意图



(b) 工况一的泵效率曲线



(c) 工况二的泵效率曲线

图 12 各种流态下的泵效率实验及结果

## 7 结论

分析上述关于气液两相管流模拟实验装置上进行了各项应用基础研究方面的结果,我们认为:

(1) 深井采油和长线输送下,由于重力、含气率和各相迁移速度的影响是导致流态转换的重要原因,而不同区域不同流态的事实是造成压降或其他流动参数计算误差的主要原因。

(2) 在水平管中由于重力造成了管顶和管底压力分布的不均,加上各区域不同的流态,在计算管线压降和载荷时必须沿周向和轴向积分求取,这样才能确保管线设计的稳定性。

(3) 本文提出的以压力时间曲线中无量纲差压比和最大能量比为函数,构筑流态判别图的方法有望发展成为有工业应用前景的流态识别方法。

(4) 本文提出的改进电阻层析成像方法,在确定水平管流中弹状、栓状、长栓、水平、波状等流态的气液界面上是一创新,配以各相的迁移速度的测量,有望发展成上述流态下的混相流量计量仪。

(5) 集重力、离心和膨胀原理于一体,本文发展了一种新颖、快速、高效的气液分离装置,它具有处理量大,分离效率高、压降小,结构紧凑等优点,也能用于气固、气水、油气水等各种工况下的介质分离,可以先在陆上油田推广应用然后走向海洋。

(6) 增压泵的效率受含气率的影响极大,尤其在高速旋转时,为谋求稳定增压效果的增压泵,流态控制很重要,开展作为前置器的流态控制装置研究,不失为一个解决混相增压难题的有效途径。

综上所述,本文介绍的小型多功能多相管流模拟实验装置可以开展多相管流各种流态下的压降、流场显示、流态识别、界面成像、增压效率、油气水分离及混相计量方面的模拟实验研究,在发展我国海洋高技术应用研究方面有重要作用。不久,我们将在此基础上建造大尺寸的模拟实验设备,以期在工程研究和应用上发挥更大的效果。

## 参 考 文 献

- 1 郑之初. 海洋高技术与多相流检测技术. 多相流检测技术进展, ISBN7-5021-1887-X, 北京: 石油工业出版社, 1996. 10, 1-6
- 2 吴应湘, 郑之初, 李东晖, 劳力云, 马艺馨. 油气混输系统的实验研究与实验模拟准则. 海洋工程, Vol. 17 No. 4, 1999. 11, pp. 1-9
- 3 化学工程手册编委编. 化学工程手册—液体流动. 北京: 化学工业出版社, 1999. 10
- 4 徐苓安, 邓湘, 董峰. 电层析成像技术在生产过程中的应用. 东北大学学报, (自然科学版), Vol. 21 S1, 2000. 7, pp1-6
- 5 劳力云, 郑之初, 吴应湘, 李东晖, 赖英旭. 气液两相管流的压力波动特性与流态之间的关系. 东北大学学报, (自然科学版), Vol. 21 S1, 2000. 7, pp9-11
- 6 Yixin Ma, Zhichu Zheng, Ligan Xu, Xiaoqing Liu and Yingxiang Wu. Application of electrical resistance tomography to identification of gas/liquid two-phase flow regimes in horizontal pipe. Flow Measurement and Instrumentation, submitted
- 7 马艺馨. 电阻层析成像技术在气液两相管流界面辨识中的应用. 中国科学院力学研究所博士后研究工作报告, 2000. 10
- 8 郑之初, 吴应湘, 李东晖. 海底管道油气混输关键装备的实验研究. 中国海上油气, Vol. 11 No. 1, 1999. 2, pp24-28
- 9 王勇. 国外多相泵和多相流混输技术综述. 油气田地面工程, Vol. 15 No. 1, 1996. 1