

# 海底管线中多相流动的实验研究

郑之初 雷晓晓 李东晖

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 本文叙述了模拟气水或油气水多相管流流态的实验装置,它试图利用控制气水或油气水的流量和压力参数的方法来实现管内的各种流态如气泡流,弹状流,分层流,波状流,环雾流等。用差压式传感器来测量管子的压降。装置建成后还可开展油气输运中关键装备如气水(气油)分离装置,混相计量仪和混相增压泵的性能研究。

**关键词** 多相流 管流流态 管流压降 实验装置

## 一、引言

### 1. 研究背景

到2000年之前石油仍是主要的能源,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1240亿吨,其中海上可发现500亿吨,因此海上石油的开采是近期内能源的主要来源之一。我国海岸线总长为32000多公里,水深200米以内的大陆架上已探明的石油储量为150~200亿吨,天然气储量约6.3万亿立方米,1993年已采油600万吨,到2000年达到1500万吨,天然气开采要达到55亿立方米<sup>[1]</sup>。经过“六·五”、“七·五”的十年努力,目前我国海洋油气开发已基本掌握近海油田的开采技术。“八·五”期间为满足开放城市和特区经济发展的要求,把海上开发的石油和天然气用最经济的手段输送到岸上是目前迫切需要解决的关键问题。海上石油运输基本上是船运和管道输送二种方式,船运是一种经济的运输方式,但往往受地理及气候条件的限制,而输油管道其运输方式不受限制,可维持油气连续生产,运输费用也最低,因此它是海上石油最主要的一种运输方式。

### 2. 管线研究概述

从1947年墨西哥湾120英尺水深处建造第一座近海平台以来,随之出现近海油气管道输运问题。60~70年代国际海底管道技术得到飞跃的发展<sup>[2]</sup>,目前世界上最深的管线是从意大利西西里岛到地中海突尼斯的海底管线,水深为603米,最大直径的管线,是墨西哥湾的Loop管线直径为56英寸,而长距离管的代表是北海Brent油田到St. Fergus干线,其长为450公里,直径36英寸,由于管线铺设过程中建造和管子的材料费用占总经费的70%以上,所以早期的管线研究工作都集中在装备和工艺方面如:铺管船、管沟的开挖,海土回填,管线的载荷,强度,腐蚀,涂层材料,瞬态焊接等。“七·五”期间在我国也组织开展了海洋管道的相应研究,如海洋管道强度,稳定和深水铺管可能出现的屈曲及其传播现象的分析和防止的研究,海洋管道在波流联合作用和振荡流作用下的水动力系数研究等。在工程实践方面,1985年中日联合最早开发了渤海海上油田,到九十年代初已铺设了九条海底管线,其中1988年前都是油田之间的集油管道,直径较小(4~10英寸)距离不长(10公里以内),如埕北BZ28-1油田, BZ34-2/4油田的海底出油管线。其中管线的压降和温降计算皆药卖国外专利如多相流分析程序《PIPEFLOW》用以确定管道的保温措施和是否需要中继站<sup>[3]</sup>。90年代后油井向深海发展,即出现了不能依靠油气自身压力达到运输目的地,而需要中继站来增压的问题。加上水下中继站的技术复杂、建设费用较高,安全可靠性和更严格的要求,如何最有效地设置中继站?这就提出了海底管线中特殊多相管流的研究问题。

### 3. 水下生产系统:

七十年代国际上为了开发边际油田和深水油田,开始构思水下生产系统,由于避免了建造固定式或永久浮式平台来支持整个系统,投资成本会减少很多,如果利用自身所开采的油气,通过处理后作为动力源,将整个系统变成封闭的自循环系统,它不仅解决了边际油田和深海油田开发的装备问题,也避免了海上风暴引起的损失,节省停工停产费用,实

全天候的采油技术<sup>[4]</sup>。

水下多相流油气自动采集系统包括：水下多相混输泵及泵站，水下埋设与检测，水下多相流量计，自持式水下动力系统，国际上经历了十多年来的努力，整个系统已逐步由实验性研究转向海上实质性开采。在我国1992年有关部门曾对海洋石油水下生产系统可行性进行了研究，初步认定在我国实现上述方案是可行的。我国南海西部石油公司与西德合作，以距广西北海市约94公里的W11-4N油田开发，来实施水下生产系统的研究<sup>[6]</sup>。方案之一为：各油井生产的流体流到生产管汇汇集，需要测试单井产量时，生产流体输入三相测试分离器进行油气水三相分离，然后分别计量其产量，计量后的油气水重新汇集后进入生产管线与其他油井生产的流体汇合，一起进到油气混输泵加压，用海底管线保持温度在38°~40℃之间从起点输送到终点，详见图1-1。上述系统中最主要的关键难点是多相混输泵、多相计量等技术研究。这是从发展高技术方面提出海底管线中特殊多相管流研究的重要应用背景。

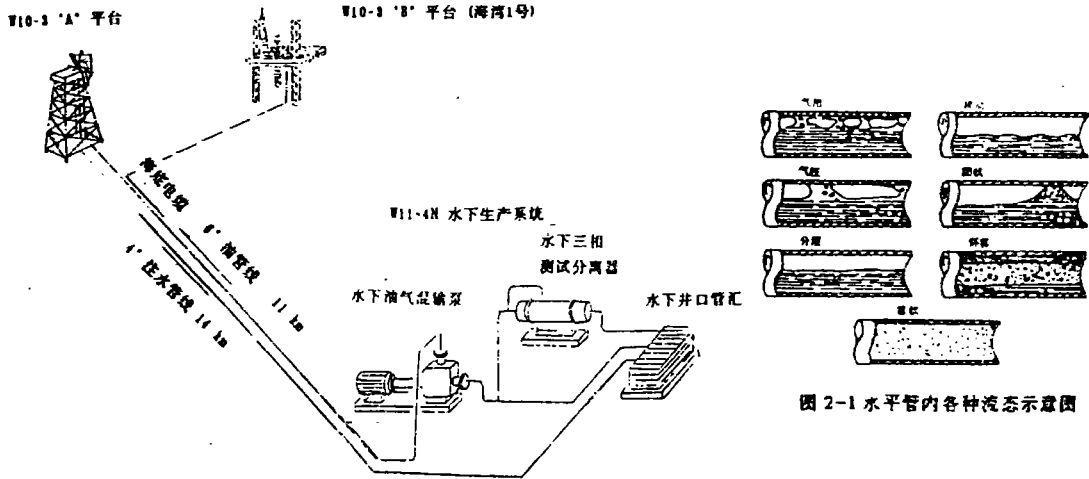


图1-1 水下生产系统方案之一示意图

## 二、油气多相管流模拟

### 1. 工艺分析

管线输送紧密依赖于输送工艺及原油的性质，例如：陆上油田主要采用分相输送的方式，所以在压降计算中，着重研究原油的密度、粘度随温度及压力的变化关系和各种流体的摩阻随Re数的变化。再如，我国陆上油田盛产含蜡粘稠原油，像大庆、胜利等都属于这一类，含蜡原油温度在反常点之前可作牛顿流体处理，当温度接近凝固点时，为非牛顿流体<sup>[6]</sup>。目前在世界范围内含蜡粘性原油的输送工艺正向新型及多样化方向发展，如添加降凝剂、加入液化石油气等。

我国沿海地区的石油富矿不多，大量注水开采并不经济，故产油中含水率较低，以渤海及南海海底输送管线为例，基本上采用使石油在远离凝固点的情况下输送，因此管流可用牛顿流体来描述。同时相对于陆上油田来说原油的粘度较小，加上海底管线宜结构简单、输送要绝对可靠以减少事故，故油气输送通常不采用特殊的输送工艺。文[7]指出：含水量在70%到90%的范围内三相压降明显高于两相流动时的压降。对短期开采的我国边际油田如W11-4N，如果采用注水开采，油中含水率在第七年中也仅为20.71%，所以在多相流压降研究中可以用两相流动来近似模拟。即使对含水率较高的情况，也可采用把油水作为一相，把气作为另一相，用下述公式计算混合液体的粘度，即：

$$\mu_1 = \frac{(\mu_o V_o + \mu_w V_w)}{(V_o + V_w)} - \frac{\mu_o + \mu_w (V_w/V_o)}{1 + (V_w/V_o)} \quad (2-1)$$

其中 $V_o, V_w$ 代表油和水的体积,  $\mu_o, \mu_w$ 代表油和水的粘度,  $\mu_L$ 为混合粘度, 然后再用两相压降的计算方法. 由此可见在我国沿海边际油田的混相油气输送中, 考虑牛顿流体的两相管流的流动研究具有一定代表性.

## 2. 管流流态

与单相流动不同, 油气两相或油气水三相同时在一条管子内流动, 在同一管线的不同位置可以共存不同的流态, 这就造成了多相管流压降计算的复杂性. 在多相流中除摩擦损失以外, 还有其它的能量损失如流体中气体的压缩, 气团的形成, 气体使流体的加速, 流体表面波浪的形成等等, 流动形态不同这些损失也不同. 对于不同的管线状态如水平、垂直、倾斜等由于重力的影响, 管内的流态也会不同. 通常水平管气液两相管流可以出现以下几种流动状态: ①气泡流动②气柱流动③分层流动④波动流动⑤团状流动⑥环雾流动⑦雾状流动, 详见图2-1. 对于垂直管内可以出现下述几种流动状态. ①气泡流动②团状流动③搅拌流动④环雾流动⑤分束环状流动, 详见图2-2. 图2-3中还给出了不同流态下的压降梯度, 由图可见不同流态有不同的压降, 所以准确地判断流态是多相管流压降计算的重要基础.

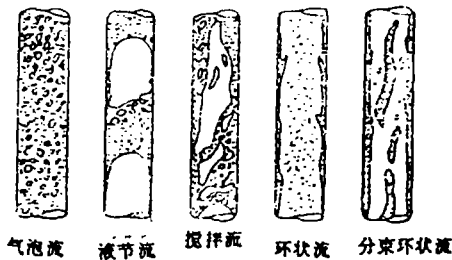


图2-2 垂直管内各种流态示意图

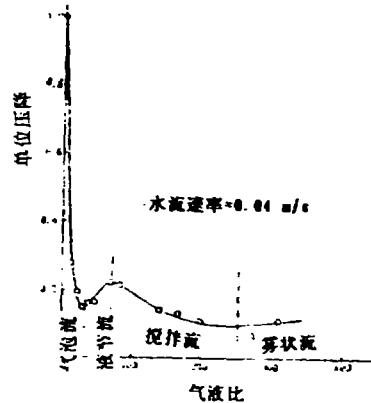


图2-3 不同流态下的管流压降图

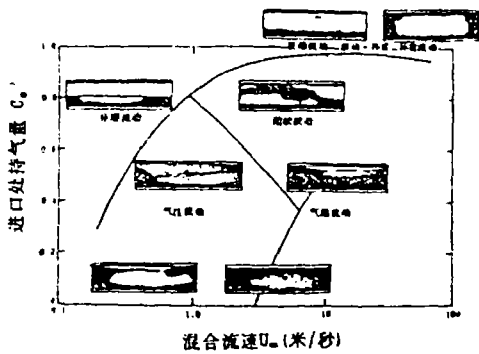


图2-4 Hoogendoorn (水平管) 流态变化图

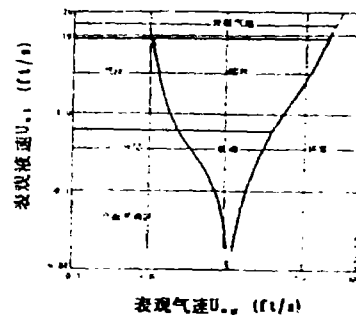


图2-5 Govier 水平管流态变化图

六十年代初Hoogendoorn用内径24, 50, 91和140mm的四种管子, 在压力为1-3大气压下的空气与水、汽油、锭子油三种液体得到了水平管流的七种流态, 并以进口处的含气量 $C_g$ 和混合流速 $U_m$  (m/s)为纵横坐标划分了流态变化详见图2-4. Hoogendoorn认为除非液体的粘度很高( $\lambda > 50 \text{cst}$ 或 $50 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ )管径和气液性质对各流态之间过度线的影响并不十分严重, 空气-水和空气-油系统的过渡线大致相同<sup>[7]</sup>. 1972年Govier根据26mm管径的空气和水的实验以表观气速和表观液速为纵横坐标给出了流态变化关系详见图2-5. Govier进一步指出对其他物系可用物性参数 $X, Y$ 来校正气液流速, 然后用校正后的气速 $\bar{U}_{G1}$ 和液速 $\bar{U}_{L1}$ 来查阅图2-5. 即

$$\bar{U}_{G1} = XU_{G1}, \quad \bar{U}_{L1} = YU_{L1} \quad (2-2)$$

其中 $X = (\gamma_g/1.296)^{1/2}$ ,  $Y = [(\gamma_l/1000)7.24/\sigma]^{1/4}$ ,  $\gamma_g, \gamma_l$ 为气体和液体的比重,  $\sigma$ 为液体的表面张力.

1974年Mandhane用13-165mm的水平管，以1178个空气-水系统的实验数据为基础，以 $U_{o,gr}$ 、 $U_{a,1}$ 为纵横坐标得到了图2-6的流态变化图，并用4800个实验数据来检验其流态图的可靠性。他发现对于小管径( $D < 50\text{mm}$ )成功率为71.6%， $50 < D < 100\text{mm}$ 成功率为59.6%，当 $D > 100\text{mm}$ 时成功率为60.8%。Taitel以四个无因次参数 $X$ 、 $F$ 、 $K$ 、 $T$ 为横坐标及纵坐标作出了流态变化图，详见图2-7，四个无因次参数的表达式如下：

$$X = \sqrt{\frac{(\frac{dP_f}{dL})_a}{(\frac{dP_f}{dL})_g}} \quad (2-3)$$

$$T = \sqrt{\frac{(\frac{dP_f}{dL})_a}{(\rho_l - \rho_g)}} \quad (2-4)$$

$$F = \sqrt{\frac{\rho_l \lambda_l U_{o,gr}}{\rho_l - \rho_g} \frac{1}{\sqrt{Dg}}} \quad (2-5)$$

$$K = \sqrt{\frac{\rho_l^2 \lambda_l^2 U_{o,gr}^2}{(\rho_l - \rho_g)^2 g}} \quad (2-6)$$

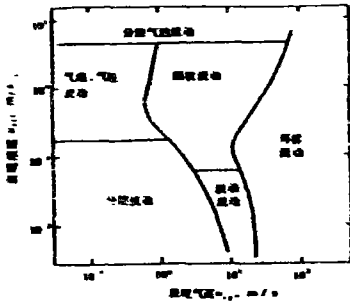


图2-6Mandhane水平管流态变化图

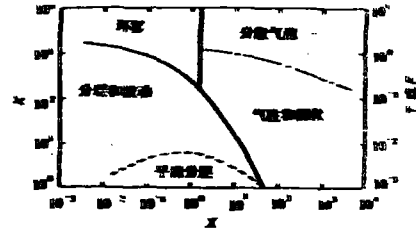


图2-7Taitel水平管流态变化图

其中 $(\frac{dP}{dL})_{a,1}$ 为表现流速 $U_{a,1}$ 下的压降梯度( $\text{kgf/m}^2$ )， $(\frac{dP}{dL})_{g,2}$ 为表现气速 $U_{g,2}$ 下的压降梯度( $\text{kgf/m}^2$ )， $\lambda_l$ 为液体的运动粘度( $\text{m}^2/\text{s}$ )， $g$ 为重力加速度。同样在垂直圆管的两相流动中， $F_{air}$ 以气液双向质量流速 $G_c$ 为纵坐标，以无量纲参数 $1/X_{g,2}$ 为横坐标画出了以直线为分割界面的流态图，参见图2-8，其中

$$G_c = \frac{W_c + W_g}{A} \quad (2-7)$$

$$\frac{1}{X_{g,2}} = \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2-8)$$

(2-8)式中 $Y$ 为含气率。同样Govier等根据相同实验条件下的水-空气数据绘制了垂直向上流动时的流态图，图2-9，其纵坐标为校正后的液体表现速度 $YU_{o,1}$ (英尺/秒)，横坐标为校正后的液体表现气速 $XU_{a,1}$ (英尺/秒)。综上所述我们发现在多相管流的流态划分中，可以将气-水系统作为基本模拟试验系统，通过参数修正可以把结果推广用于其它气-液系统。取用不同的参数组合可以得到不同的流态转换曲线，改变参数组合可以有助于发现更反映实际情况的流态转换图，所以直到1993年还有研究有关不同参数组合对流态区域划分曲线影响的文章报导<sup>[11]</sup>。

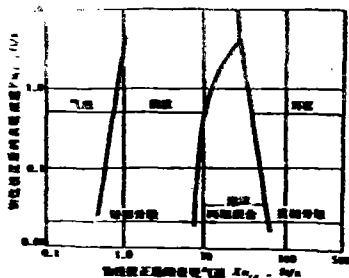


图2-8Govier垂直管流态示意图

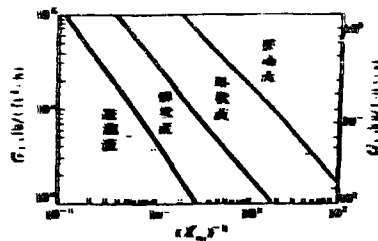


图2-9垂直管流态变化图

### 三、模拟设备:

在管线油气输运中, 选用适合管内流态的计算方法, 才能使计算的压降符合实际情况, 如果能建立输运介质的油气比, 油水比以及压降同流态变化的规律, 那么在海底油气输送管线的设计中将是非常重要的. 八十年末作者利用自行设计的两相引射器(LJ型射流泵)利用不同压比和流量比下的气水或水气引射, 在1英寸内径的垂直, 水平管内分别实现了各种流态, 并用流场显示的方法在图3-1和图3-2中分别给出了获得的各种流态的照片<sup>[10]</sup>. 然而建立流态转换与选定参数的转换图和定量关系, 为测量各种流态下管线的压降, 进行不同管径不同介质的流态实验, 我们必须建设海底管线油气输送的专用模拟实验设备.

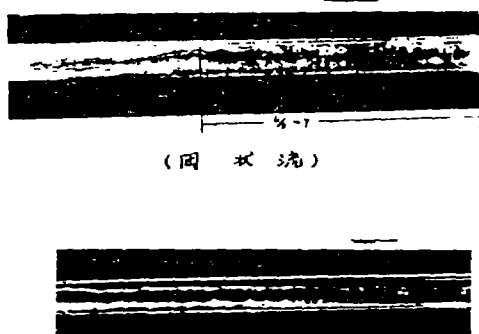


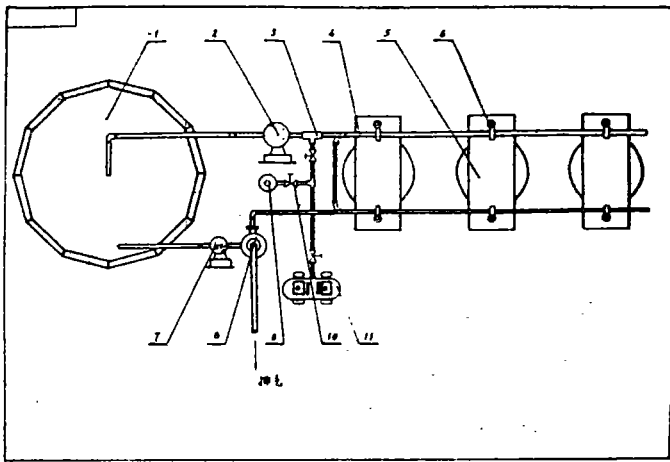
图3-1用引射法获得水平管内的流态照片  
(湍流流)



图3-2用引射法获得垂直管内的流态照片  
(气泡流) (液相流)

图3-3分别给出了设备示意图和设备的照片, 其工作原理为: 循环水池中的水经增压进入两相引射泵将气体吸入, 经均匀混合后气水两相流体进入2英寸内径的实验管道, 用电桥平衡差压式传感器测量一定长度管子的压降, 然后两相流体进入分离装置使气水分离, 气体排入大气, 水经回水泵流入水池进行循环. 一些实验结果表明<sup>[10]</sup>, 一些小管径中取得的气泡流转变为液节流动的数据不能应用于大管径, 所以多数实验的管径范围为20~60mm, 跨过临界值50mm. 测压实验中选用的水平管长度取决于: ①稳定流态的长度②可以测得的足够精度的压降值③实验室允许的范围. 本实验装置由四组8米长的水平管线加垂直管线组成, 有效总长不超过40米. 根据渤海油田3公里管线在各种工况下的压降数据(215.5~152.4kpa), 每米管线的压降为(7.2~5.1毫米水柱), 以此估计8米管长压降可达60~40毫米水柱, 我们选用的24B1型的压力传感器其最大量程为340mm水柱, 测量误差为0.5%, 对所测量的压降其最大误差小于5%. 图3-4给出了多相管流测压系统示意图. 实验装置中管线分上、下二层布置, 上层的支撑杆能上升或下降, 可进行倾斜管流态及压降实验, 管线转折处采用不同曲率半径的弯管, 可以观察不同流动参数下弯管的流态变化. 装置中选用 $Q=8\text{m}^3/\text{h}$ , 扬程 $H=20\text{m}$ 的水泵, 最大流速可达1.2m/s左右, 相应的Re数为 $6\times 10^4$ , 可以进行流体从层流到紊流情况下的实验. 在各种新型油气水分离装置研制过程中, 为保证气水循环通畅, 在油气分离装置后增设回水泵一台.

循环系统中选用 $P_{max}=12$ 大气压, 排量为0.3米<sup>3</sup>/分的压气机二台, 并配置0.6m<sup>3</sup>的贮气罐一座, 以气体在常压下连续运行通过2英寸管径的条件计算, 气流速度可达5m/s, 其相应的Re数为 $1.71\times 10^4$ 左右, 对于管道中气水两相并存, 贮气罐中充压到8个大气压以暂冲方式进入管线, 在短时间内气流速度可达50m/s以上, 其相应的Re数为 $1.71\times 10^5$ , 可以进行气液两相在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. 以南海W11-4N油田产油情况来看, 本模拟设备都能满足上述要求. 本设备尚有添加少量固体粒子和不同液体介质的装置. 在双相及多相管流流态建立之后, 在管线的某一位



1. 循环水池
2. 增压水泵
3. 气水混合器
4. 输送管道
5. 支架
6. 升降杆
7. 回水泵
8. 气水分离器
9. 固体料仓
10. 调压阀
11. 压气机

图 3-3 管流流态模拟装置示意图

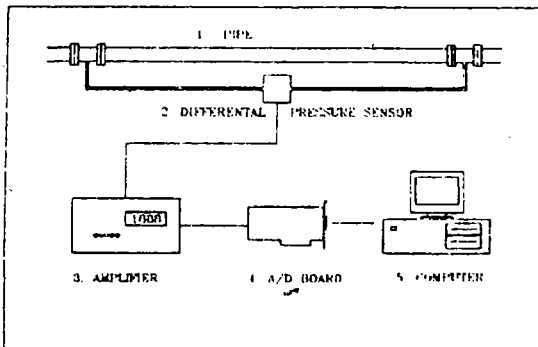
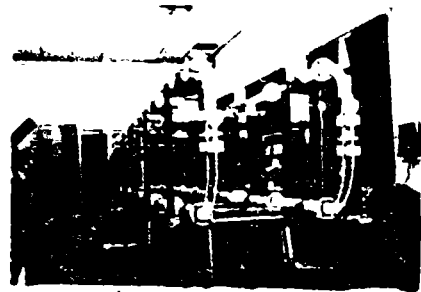


图 3-4 多相流测压系统示意图



置设置多相泵，测量泵前后的压力变化，可以进行不同流态下的增压试验。如在循环系统的终端，设置不同形式的气水或油气水分离装置，可考核各种多相流态下装置的效率和阻力。由于管内的各种流态清晰可见，所以能进行各种原理的测试手段实验，为寻找有效的混相流量计量技术提供良好的条件。所以本实验设备也是研制和发展水下生产系统中关键设备的重要手段。

#### 四、结论

综上所述我们认为：

1. 目前我国正在着手海上油田直输沿海工业城市的管线设计和开始构思水下生产系统，这些都是发展多相管流流态研究的重要工业应用背景。
2. 我国海上油田开采的石油粘度较低，通常海底管线油气又采用远离石油凝固点的加热保温输送，故管内流体可视为牛顿流体。
3. 我国沿海油气中含水率较低，因此可把两相介质的流态模拟推广用于三相，而在两相流态研究中，气水两相流的流态变化关系是最基本的，它可通过密度的修正用于不同介质的流态判别。

4. 在多相管流中, 用与油气输送中已知的流动参数组合与各种流态变化的简单关系来判别管内流态, 给出符合真实情况的压降结果, 这在海底管线设计中是很有价值的。
5. 本实验装置试图利用自行设计的两相引射器在引射和被引射介质不同的压比及流量比下通过气水或水气引射来实现各种多相管流的流态, 用压力传感器测量一定距离内的压降, 它是管线设计, 混相增压泵、油气分离器的研制以及混相流量计量技术研究的基本实验手段。

#### 参考文献

- [1] 凌国灿“海洋工程高技术”《海洋信息》1990年第六期, pp30.
- [2] 方轼江“国外海底管道建造技术述评”《海洋技术》第七卷第四期, 1988年, pp67~86.
- [3] 王金英“BZ34-2/4油田海底管线详细设计”《海洋工程》第九卷, 第四期, 1991年11月, pp1~13.
- [4] 中国海洋高技术研究开发专题报告之五“水下多相流油气自动开探技术”, 1992年12月.
- [5] 王凡, 古国维, 聂臣英, 王长寿, 张丘海编制《W11-4N油田工程水下生产系统预可行性研究》南海西部石油公司勘察设计所, 1991年12月档案号92003-01-D.
- [6] 曲慎杨等《原油管道工程》油气管道工程丛书, 石油工业出版社, 1991年4月第一版.
- [7] 化学工程手册编委会编:《化学工程手册》第四篇, 液体流动化学工业出版社, 1989年10月第一版.
- [8] P. L. Spedding & D. R. Spence 'Flow regimes in two-phase gas-liquid flow', Int. J. Multiphase Flow Vol. 19, No. 2, 1993 pp245~280.
- [9] 郑之初“两相射流的动流场显示”第二届全国流动显示会议论文集, 1986年10月黄山, pp210~213.
- [10] 戴干策等编《化学工程基础》中国石化出版社, 1991年5月, 第一版.