



中国教师发展基金会教师出版专项基金资助

油气管道多相流

李长俊 贾文龙 编著 ▶▶

YOUQI
GUANDAO
DUOXIANGLIU



化学工业出版社

油气管道多相流

—— 理论、计算、实验 ——

YU QI

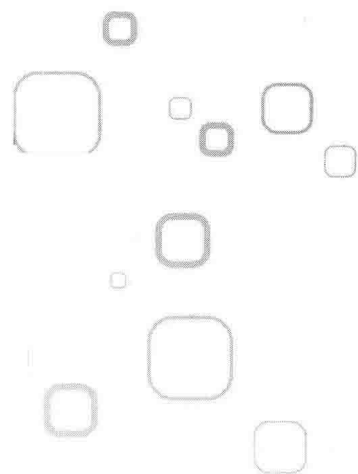
GUANGDONG
UNIVERSITY

© 2012 BY GUANGDONG UNIVERSITY

油气管道多相流

李长俊 贾文龙 编著 ▶▶▶

YOUQI
GUANDAO
DUOXIANGLIU



化学工业出版社

·北京·

本书介绍油气管道多相流方法与技术, 主要内容包括油气管道多相流概况、多相流体热物理性质、多相流流型及其判别方法、气液两相流数学模型、多相混输管道工艺计算方法、天然气管道中的多相流动、含气输油管道不稳定流动分析、气固管道两相流动分析、段塞流流动分析、多相混输管线中的常用设备及自动化技术, 力求反映国内外油气管道多相流发展情况, 并突出油气管道多相流基本原理及实际工程应用。本书可供相关专业的学生学习使用, 也可供从事油气多相流工作的科研、教学、设计技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气管道多相流/李长俊, 贾文龙编著. —北京:
化学工业出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-122-20057-0

I. ①油… II. ①李…②贾… III. ①石油管道-
多相流动 IV. ①TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 047012 号

责任编辑: 刘亚军
责任校对: 王素芹

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20 字数 508 千字 2015 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 65.00 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

在人们的日常生活和现代石油、化工、核能、食品等工业生产中，多相流现象十分广泛。水的沸腾，微风刮过水面拂起的波浪以及灾难性的泥石流，都属于多相流现象。近年来，随着国家经济、社会发展对能源需求量的增加，科学地进行石油天然气的资源开发和利用已经成为了我国重要的能源战略。在油气资源的开发过程中有多种多样的多相流现象。例如，油藏中常常含有一定量的伴生气，气藏中也会含有一定量的凝析油和水。油气介质在流经油气藏和油气井时，不可避免地会遇到多相流动问题。在地面集输过程中，为了降低集输管道的设计、建造和运行成本，也往往采用油气水多相混输技术。因此，掌握油气多相流管道工艺参数的计算方法，认识多相流动的变化规律，对于油气水多相介质的安全、高效管输具有重要意义。

多相流技术在油气工业中的应用始于 1950 年前后。在 20 世纪 80 年代以后，随着油气开发逐渐向海洋推进，油气管道多相流动技术得到了快速的发展。在研究初期，主要是将多相流体处理为均匀混合的单相流体，并结合现场实验数据，建立相关参数之间的经验关系式。随后，人们注意到了流型变化对多相流管道流动参数的影响，逐步发展了与流型相关的多相流动模拟技术。这些方法多是经验、半经验处理方法，虽然在实际工程中得到了广泛的应用和验证，但是缺乏必要的理论基础。针对这一问题，很多学者以流体力学和热力学基本理论为基础，开展了基于流动机理的管道多相流动技术研究，力图从本质上揭示管道多相流动的规律。虽然国内外学者对油气管道多相流进行了长期的研究，取得了一定进展，但由于在流型转变、相间质量、动量和能量传递等方面的复杂性，相关成果还尚未达到成熟的地步。目前，国内外研究机构和学者正投入大量的精力开展油气多相流动技术研究，研究方向也不仅局限于管道内的流动，还覆盖了多相混输设备和自动化技术等方面。

本书所涉及的内容是作者与研究生多年来在管道多相流方面的研究和应用成果的总结与提炼，力求反映国内外油气管道多相流研究领域的新理论、新方法，强调油气管道多相流基本理论和方法在工程实际中的应用，对广大从事油气管道多相流研究与应用的工程技术人员、高等院校相关专业的教师与研究生均具有参考价值。

西南石油大学刘恩斌副教授编写了第 5 章、第 8 章部分内容，已毕业的研究生张友波、刘定智、方炯、孙欧阳对本书的内容做出了贡献。

本书在编写过程中得到了中国教师发展基金会教师出版专项基金的资助和西南石油大学石油与天然气工程学院大力支持，以及国家自然科学基金项目“天然气管道跨越结构清管动力响应实验及理论研究”（批准号：51174172）和“深水天然气水合物输送管道气液固三相流基础理论研究”（批准号：51474184）的支持，谨致谢忱。

由于编者水平有限，教材中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2015 年 1 月

目录

CONTENTS

绪论	1
第一节 多相流定义及其分类	1
第二节 多相流研究的发展状况	2
第三节 多相流的特点	5
第四节 多相流的分析方法及常见模型	6
第五节 多相流技术在石油工业中的应用	8
参考文献	10
多相流体热物理性质	12
第一节 黑油模型	12
第二节 组分模型	25
第三节 组合模型	40
第四节 气液两相水合物生成条件预测	43
参考文献	57
多相流流型及其判别方法	59
第一节 多相流的主要参数及其计算公式	59
第二节 多相流的各种流型	64
第三节 影响流型的因素	75
第四节 多相流流型判别方法	75
参考文献	99
气液两相流数学模型	101
第一节 气液管道均相流数学模型	101
第二节 气液管道分相流数学模型	104
第三节 气液管道漂移流数学模型	110

第四节 气液两相流三维流场数学模型	112
参考文献	115

多相混输管道工艺计算方法 116

第一节 常见气液两相流工艺计算模型	116
第二节 油水两相流工艺计算模型	133
第三节 油气水三相流工艺计算模型	141
第四节 气液两相流的局部件工艺计算模型	148
第五节 气液两相流计算模型的对比分析	153
参考文献	167

天然气管道中的多相流动 169

第一节 天然气管道干空气干燥过程分析	169
第二节 湿天然气管道流动数学模型	181
第三节 湿天然气管道稳态流动分析	184
第四节 湿天然气管道瞬态流动分析	188
第五节 天然气管道清管过程分析	196
第六节 天然气气液两相节流分析	208
参考文献	215

含气输油管道不稳定流动 217

第一节 气泡体积计算	217
第二节 气泡对波速的影响	220
第三节 气泡离散布置模型	222
第四节 气泡均匀分布模型	227
第五节 计算实例	232
参考文献	235

气固管道两相流动 236

第一节 气固两相流特性参数	236
第二节 固体颗粒受力分析	239
第三节 气固管道两相流的特点	243
第四节 气固管道两相流的近似计算	245
第五节 气固两相流数值计算模型	250
参考文献	253

段塞流 254

第一节 段塞流的特性与计算	254
第二节 基于瞬态模型的段塞流特性描述	262
第三节 消除严重段塞流的方法	265
第四节 解决常见段塞流的主要方法	270
参考文献	271

多相混输管线中的常用设备及自动化技术 272

第一节 多相流管线中的常用设备	272
第二节 多相流管道的自动化技术	293
第三节 多相流管道的仿真技术	299
参考文献	312

第一章

绪论

多相流现象是人们日常生活和现代工业生产中的常见现象。例如，水的沸腾，自然界中微风刮过水面拂起的波浪，遮天蔽日的雾霾，灾难性的泥石流，都属于多相流现象。在石油、化工等工业生产过程中，流体在各种气液两相混合器、分离器、换热器、精馏塔中的流动也属于多相流动。

多相流动技术涉及的范围非常广泛，对日常生活和工业生产也十分重要，这一技术在过去的六七十年内得到了快速的发展。但由于多相流相间存在界面效应和相对速度，流动特性与单相流相比复杂得多，致使多相流体系的模型建立、设计分析及生产控制更加困难。为此，国内外学者开展了大量深入细致的研究工作。下面将从多相流定义及其分类、特点、研究方法入手介绍多相流的特点。

第一节 多相流定义及其分类

一、多相流的定义

一般的，相通常是指某一系统中具有相同成分及相同物理、化学性质的均匀物质部分^[1]。各相之间有明显可分的界面。

在宏观上，常把自然界分为三相，即气相、液相和固相^①。单相物质的流动称为单相流，如气流、水流等。多相流是指同时存在两种或两种以上不同相物质的流动，如工业区中烟尘飘移、喝饮料时汽水喷流等。

二、多相流的分类

这里，我们以工业生产中常见的多相流来分类。

（一）气液两相流

顾名思义，气液两相流动就是既含有气相又含有液相的混合流动。在油井、油气集输管路、轻烃输送管道、锅炉的汽化部件以及精馏塔等传热传质设备中，气液两相流动的实例比比皆是。结合专业特点，后面部分将详细讨论油气混输、天然气输送管路中气液两相流等

^① 自然界常见的相态一般为四种：固态、液态、气态和等离子态。等离子态存在的场合较少，如地球南北极出现的极光、日常生活中的日光灯荧光等。另外，在物理学中，物质存在还包括超固态、中子态以及黑洞等。这些状态常在天体物理中存在。作为工程学科，为了便于讨论，我们认为物质分为固、液、气三态。

问题。

(二) 气固两相流

气固两相流动是指同时存在气相和固相的混合流动。例如，在采用分子筛进行天然气脱水时，天然气在干燥塔内的流动就属于气固两相流动。在天然气输送过程中也存在着气固两相流动和分离的问题。例如，天然气在管道中流动含有粉末等颗粒，可燃冰开采在井筒和管道中输送等问题。

(三) 液固两相流

液固两相流动是指同时存在液相和固相的混合流动。在石油集输过程中，含蜡原油在析蜡点以下进行输送时，原油为液相，蜡结晶为固相，这是典型的液固两相流问题。当原油井筒和输送管道中含有砂子等固态颗粒时，其流动也是液固两相流动。

(四) 液液两相流

液液两相流是同时含有两种互不相溶的液相的流动。稠油集输过程中，当采用掺活性水或掺热水集输工艺时，油水混合物在管道内的输送就是液液两相流动。部分处于中后期开发的陆上油田在含水剧增后的油水混输，化工生产中物质提取的萃取过程等，均是液液两相流问题。

(五) 气液液和气液固多相流

气液液和气液固多相流工业实例也普遍存在。当原油中含有一定量的伴生气和水时，其在井筒和管道中的流动就是气液液多相流动。在天然气长输管道中，天然气中含有的固体杂质、天然气中的凝析水和天然气共同构成了气液固多相流动。

在多相流中，可以把物质分为连续介质和离散介质。气液固三种相态中，气体和液体属于连续介质，又称为连续相或流体相。固体颗粒、液滴、气泡属于离散介质也称为离散相或颗粒相。一种或几种液体相和颗粒相相互作用的流动称为多相流动。这种定义方式可简化多相流的数学模型，便于对其进行研究。

第二节 多相流研究的发展状况

多相流动原理的应用一直可以追溯到公元前阿基米德（Archimedes）的蒸汽炮^[2]利用。但它作为一门新兴学科，则是在最近六七十年内才建立起来的。其研究方向根据流体介质的不同而不同，且有各自的特点^[3]。

一、气液两相流动

由于气液两相流动具有可变形的界面和一个可压缩的气相，使其成为两相流动中最复杂的一种。虽然对这类流动的研究很多，开展也最早，但由于其难度大和受生产水平的制约，一直发展不快。从公元前1世纪利用蒸汽推动铁球容器旋转，到19世纪末，人们开始对明渠中的两相流动问题进行观察研究，最后到了20世纪初，在锅炉水力计算中才明确提出了两相流问题。20世纪30年代中期，人们开始研究气液两相流的流型、含气率、沸腾及稳定

性等问题,对当时生产实践起到了极大的指导作用。20世纪50年代末,随着发达国家核反应堆的急剧发展,为了解决由此带来的烧蚀和沸腾传热问题,又进行了流动沸腾烧蚀流型及流型状态图、高热流及两相临界流动、波纹板薄膜凝聚等技术的研究。在工艺计算上,从马蒂尼里(Martinelli)等提出的M-L曲线和M-N曲线计算压降开始,各种计算模型相继提出。20世纪60年代以后,石油工业开始投入到气液两相流技术的研究中,航空航天、国防、化工等工业得到了迅速发展,对多相流的研究更加活跃。研究工作的特点是研究向瞬态过程、流动基本理论、数值计算方法等方向发展,对两相流的基本方程、蒸汽爆炸、瞬态流动、核安全分析、两相流计算方法等都作了广泛的研究。20世纪80年代以来,随着计算机技术和电子信息技术的飞速发展,有关气液两相流技术的研究更加深入。数值分析技术的发展,使人们有可能在计算机上模拟多相流动过程。各国特别是发达国家开始研制多相流计算模拟软件。各种大型的商业软件(如:Fluent、ANSYS、PHOENICS等)也开始将流场分析的范围扩充到气液两相中来。分析工具的进步,带来了多相流领域研究飞速发展。

二、气固两相流

与气液两相流一样,气固两相流也是随着生产的要求和科学技术的发展而发展起来的。例如气动弹性等问题,在航空技术发展的初期就已经出现。经过多年的研究,人们在研究气动颤振的基础上,发展了机翼颤振理论,解决了低速飞机的气动弹性问题。气固两相流的研究开始进入理论研究阶段。1940年后,人们又开始对桥梁、建筑物的颤振问题进行了研究。20世纪50年代初期出现了超声速飞机,以及后来出现的高超声速的宇宙飞船,都是经历了一次又一次的颤振事故,不断克服种种困难(如:气动声障、气动热障等)发展起来的。在管道输送工业中,气力输送是随着物料搬运发展起来的。在这一领域中,人们已经对气固两相流的基本理论如基本方程及应用、相间相互作用、迁移特性(包括扩散、黏性、导热性等)作了系统研究,并开始广泛应用于工业生产中。从1818年开始的物料气体输送实验,到现在的压气式技术,人们已经可以将物料粉末输送到上千千米远的目的地。

三、液固两相流

根据两相容积的大小,这类流动通常又分为三种情况:固相容积远小于液相时,便形成水力学中的沉积问题;若固相容积远大于液相时,这就成为流经多孔介质的渗流问题;当两相容积都不能忽略时,便形成两相混合物的流动,如泥浆流、水煤浆、纤维悬浮流等。这些实际上都是非牛顿流体流动。有关这三种流动的研究都在不断取得进展,形成了较完善的理论。在工程实际中,国外对浆状物料的水力输送因经济效益高,而发展很快。所输送的介质有煤、石灰石、磁铁矿、赤铁矿、铜矿、镍矿等,输送距离有长有短,总输送量每年上千万吨。

其他方面的发展,例如两相溶剂萃取技术、流态化技术、多相流体机械(多相泵、多相流量计、多相压缩机、多相阀和多相风机等)的研究和应用也有很大的发展。

四、石油工业中多相流技术的发展现状

多相流技术在石油工业中的应用开始于20世纪50年代。早期的研究者将多相流体假想为一种均匀混合的单相流体,不考虑流型的影响。根据实验室或现场试数据,建立相关参数

之间的经验关系式。这种不考虑多相流动具体流型的方法在计算分层流、段塞流、环状流等具有明显相界面的多相流动时精度较差。在这一时期,虽然有学者提出了一些经验性的流型判别方法,但在计算多相流压降时并未考虑流型的影响。直到1973年,美国图尔萨大学(University of Tulsa)的贝格斯(Begges)和布里尔(Brill)首次阐述了多相流动的压降和管道的流型之间存在相关关系之后,基于流型的多相流动技术研究方法才得到了快速的发展。

随着20世纪80年代计算机技术的飞速发展,预测压力梯度的经验相关式在很大程度上完善了多相流管线的计算方法。然而,人们很快就认识到使用现有方法所存在的问题。例如,经验性的流型图所考虑的因素不够全面,均相混合物的假设过于简单等。很明显,不论从实验室测得多少数据,也不论现场数据收集得多么仔细,不引入更基础的物理机理不可能进一步提高模型的预测精度和通用性。

多相流的模拟始于20世纪80年代中后期。极地地区和海上石油开采费用的提高使人们更加意识到多相流研究的重要性和必要性。在美国、挪威、英国和法国等,每年有大量的经费投入到多相流的研究中。在最近30年中,对两相流的研究,无论是从实验方法还是从理论研究上都有飞速的发展。在设备方面引进了核子密度计、超声波电容传感器、激光多普勒雷达风速计等新型实验装置。同时,微机处理使得数据采集系统收集的数据能得到更完全的分析,从而可获得大量高质量实验数据。在理论方面,所提出的双流体模型建立方法已被石油工业广泛采用。该方法需要写出各相单独的质量、动量和能量守恒方程,导出的方程式采用数值模拟方法求解。双流体法与经验公式相比具有更高的计算精度,但其也有计算复杂和计算结果不稳定的缺陷。因此,双流体法还需要进一步完善。但由于这种方法能较好地反映两相流动过程,因此近年来颇受重视,许多学者正致力于这方面的研究^[4]。

① 从1984年起,本狄克森(Bendiksen)等一直致力于两相流动态模拟计算的研究,在引入比较少的简化假设基础上,建立了综合的组分分相流体力学模型。

② 1985年,夏尔玛(Sharma)对气液两相流动中的冲击流型专门进行了研究,建立了计算模型,用于模拟冲击流动过程中的两相流现象。

③ 1989年,泰特尔(Taitel)和杜克勒(Dukler)等针对慢瞬变流动工况,假设气液流动中气体处于准稳态,液相的动量方程采用稳态形式,建立了一个动态液相连续性方程和三个稳态方程组成的模型,此模型可用于所有流型的计算。其优点是计算简单,并且可以得到稳定的数值解。缺点是不能处理复杂问题,所得结果也不大精确。

④ 1990年,斯科特(Scott)等对水平或微倾斜管路段塞流的特征参数作了研究,建立了新的数学模型,可用于分析段塞流流型的气液两相流动。

⑤ 1994年,赫纳(Henau)等同样对管道内冲击流型进行了深入研究,在假设理想段塞单元模型基础上,建立了冲击流的动态连续性方程和动量方程以及不同流型下的结构方程,并采用了具有一阶精度的半隐式差分格式进行数值求解。

⑥ 1994年,葆琼(Pauchon)等建立了新的计算动态气液两相流管路和井筒的模型,并提出了相应的数值解法。

⑦ 2003年,图尔萨大学的张洪泉(Zhang Hongquan)等从气液两相段塞流的水动力学模型入手,建立了能够适用于 -90° 至 90° 倾角管道的通用气液两相流模型。

⑧ 2006年,张洪泉(Zhang Hongquan)等将所建立的气液两相通用水力学模型进一步拓展到了油气水三相流模拟之中,确定了三相流的流型转变准则及模型求解流程^[5]。

这些模型的提出,对各种多相流软件的开发起了关键作用。最近20年来,国外许多石油公司和科研机构开发了一系列的多相流管线分析计算软件^[6]。如稳态的PEPITE、PIPEPHASE、TWO PHASE、PIPEFLOW, PIPELINE等,瞬态的OLGA、TACITE、PLAC、TRAFLOW等。

在国内,多相流技术的研究起步较晚,但发展很快。1992年,西安交通大学就建立了动力工程多相流国家重点实验室,各石油高校、科研院所投入了大量的人力物力进行多相流研究,取得了丰硕的成果,并相继推出了自己的软件。同时,随着各油田多相流管线的铺设,多相流技术逐渐成了油气输送方向的研究热点。在知识经济、计算机技术高速发展的今天,对多相流的认识也在不断的加深和发展。利用计算机数据采集系统建立和求解多组分流体模型将会成为今后研究多相流的方向。

第三节 多相流的特点

多相流动是自然界、人类日常生活和工程技术中最常见的现象,它比单相流具有更广泛的普遍性和实用性,但其物理特性及数学描述要复杂得多。概括来说,大致有如下特点。

一、流型复杂多变

在单相流中一般分为层流和紊流两种流态,流态划分只和雷诺数和相对粗糙度有关。而在多相流中,流型较多,且流型的划分与相的相对位置、相对含量、相对速度和相对温度等有关。同时,各流型随流体物性(如:密度、黏度、表面张力、传热系数等)、流动条件、过流形状及边界条件、热负荷及压力等的不同而发生变化。流型改变,流动特性(如:损失特性、传递特性等)也跟着改变。而且,一个流场(例如:加热管道、有相变绝热管道中)可能同时存在几种流型,这就给多相流动的分析带来了很大困难。在实际使用中,通常只能通过实验得出各种流型状态图,建立描述各种流型变化的经验或半经验公式。它们的精度一般较低,适用范围也较小。为了得到更精确、适用范围更大的公式,必须对多相流动的流型转变机理进行研究,揭示流型转变的本质。

二、相间相互作用强

单相流不存在相间相互作用。但在多相流中,不仅有两相间的相互作用,而且对于不连续相来说,各相内部也存在相互作用。这些都是多相流中面临的新问题,如何来描述这些作用是多相流动研究中的一个重要方向。同时,由于这种作用又与流型、物性等密切相关。因此,很难建立某种适用范围较大的相关式,这也给多相流的研究带来了相当大的困难。

三、存在界面扰动

在相界面上,如果存在浓度梯度、温度梯度、化学反应,均会引起表面张力的改变,促使界面产生自发收缩、局部扰动、分裂、振荡等现象,这种现象称为界面扰动。这种扰动将引起各种界面波,其波形、波长、波幅一般变化较大,从而产生相间强烈的相互作用,并对相间质量、动量和能量传递、化学反应和压降产生重大影响。

四、物性变化大

在单相流中，由于流体是单成分的，通常物性变化较小。而在多相流中，至少有两种成分，其物性将随容积比、密度比、温度等变化而变化。因此，多相流中必须定义更多的物性参数。

五、声速与临界速度不再相同

在单相流中，只要假定流动是热力学平衡和等熵过程，其声速（小扰动波传播速度）、临界速度是相同的。但在多相流中，由于相间存在速度差，各相特性不一，临界速度与声速并不相同。

六、存在松弛现象

在单相流中，气体流经激波时，流动参数发生突变，无松弛过程。但在多相流中，除气相服从激波突变规律外，液相或固相对激波并不敏感。因此，激波后各参数不一，必须经过一个松弛调整过程，才能使各相参数趋于新的平衡。这种松弛称为激波松弛。另外，滑动松弛、冷却松弛或膨胀松弛也是多相流特有的现象。

七、能耗增大或减小

在单相流中，不计黏性损失就没有能量损失。但在多相流中，即使不计壁面边界层黏性损耗，也有相间摩擦和蒸发凝析引起的能量损失。因此，多相流能量损耗一般比单相流大。在多相管路输送中表现为：下坡几乎不能回收上坡损失的位能。但若在流体中加入少量高分子物质而形成的两相流，其阻力系数可以降到比单相流还低，因而此时可起到减阻的作用，其能耗比单相流还低。

八、数学描述难度大

由多相流动的以上特点不难看到，在多相流中，相间摩擦、传热、传质、化学反应等都发生在微元表面，相互作用强。因此，描述多相流的守恒方程（质量、动量、能量、状态、组分方程）、本构方程和边界条件不仅数量多、形式复杂，而且方程组的非线性程度和耦合程度都大大增加，要得到严格的设计计算方法，靠经典的解析方法是非常困难或几乎是不可能的，这也给多相流数值解法提出了新的问题和要求。

第四节 多相流的分析方法及常见模型

为了分析多相流的流动特性，需要建立描述多相流动特性的数学模型。不同的分析方法往往产生不同的数学模型。

一、多相流的分析方法

和单相流一样，多相流也是从宏观的连续介质理论和微观类似分子运动论的理论出发来处理问题。在工程实际中，只要求了解宏观参数（如：压力、温度、流速等）。因此，常把含有微粒的多相体系作为连续介质来处理，即常用宏观方法。分析多相流的宏观方法有以下几种。

(一) 扩散模型法

该法假定相互扩散作用是连续进行的，其基本假设是：

- ① 混合物中每一点都同时由各相占据；
- ② 混合物的热力学和传递特性取决于每一相的特性和浓度；
- ③ 管道中各相以自己的质量速度中心移动，相间相互扩散作用反映在模型中。

(二) 有限容积法

该法假定过程处于平衡状态，可用平衡方程式进行描述，其基本假设为：

- ① 对一个有限容积写出质量、动量和能量平衡方程式；
- ② 平衡方程式可按整个混合物或者按单独相列出；
- ③ 管道中流动为一维流动。

(三) 平均法

该法假定过程处于平衡状态，以平均的平衡方程进行描述。

以上三种方法的共同点是：不考虑局部和瞬时的特性，仅考虑相界面上流体微粒集中的相互作用，即属于宏观动力学。

二、常见的多相流模型

根据上述分析方法，目前已经建立的多相流模型有以下几类。

(一) 均相流模型 (Homogeneous flow model)

这种模型将各相考虑成一个各相同性的均匀混合物，相间没有相对移动，没有质量、能量交换，适用于相间存在强耦合的场合。例如：微小气泡均匀混合在液体中的气泡流和两相流速高的雾状流等。

(二) 分相流模型 (Separated flow model)

该模型将各相考虑成完全分离的几种流体，相间存在不同的速度和特性，适用于相间存在微弱耦合的场合。例如：气液两相流中的分层流和环状流，气液液三相流中的分层流等。

(三) 漂移流模型 (Drift-flux model)

漂移流模型在分相流模型的基础上，着重考虑了气液两相之间的相对速度，以及持液率和流速沿过流断面的分布规律。

(四) 基于流型的模型 (Model based on flow pattern)

目前，对多相流各种流型，由实验结果建立一系列物性工艺计算的经验和半经验公式。在工程应用时，可先进行流型判断，然后根据流型选择合适的公式。

(五) 组合模型 (Combination model)

以上几种方法有自己的局限性。可以将它们有机地结合起来，以实现多相流研究的统

一。其方法是：首先，按流型划分方法划分流态，再用各流态最适用的模型（如：均相流模型、漂移流模型和分相流模型等）进行分析。这种分析方法综合了前面各模型的优点，能更准确地描述多相流流动情况。

总之，由于多相流的复杂性，目前研究方法还不太精确，特别是没有一套统一的理论描述多相流的流动状态，多相流分析方法与描述模型还有待进一步发展与完善。

第五节 多相流技术在石油工业中的应用

目前，世界各国相继开发沙漠、极地、海洋等边际油气田。由于环境的恶劣、油气资源远离消费市场等原因，如何最大限度地降低油气开采成本成了这些油田企业最需要解决的问题。在油气田地面工程中，用多相流技术可将井口混合物直接输送到联合站集中处理，省去了井场油气分离设备，将油气双线建设减少为单线建设，经济效益十分可观。在海洋采油中，省去的分离设备还可以大大减小平台面积和简化生产管理。据统计，采用多相流技术最多可以节约40%的海上工程投资费用。正因为如此，许多后续开发的油田，如英国的北海油田，我国的东海平湖气田、南海番禺气田，均广泛采用了多相流技术。同时，部分在役油气田又相继进入开发中后期，在这一背景下，多相流计算在石油工业中的应用也越来越广泛。

一、多相流技术在石油工业中的应用

（一）勘探开发方面

在油藏工程中，采用多相相态理论能更准确地描述油藏分布，预测油田今后的发展动态；在试井分析中，传统的单相试井方法正被更符合实际的多相试井分析方法取代；钻井工艺方面，有关井底流场分析已逐渐采用多相流分析方法；套管腐蚀预测也开始使用多相流技术；在二次采油、三次采油过程中，如何准确描述注水、注气、加添加剂后油流的变化情况都要用到多相流相关技术。

（二）油气输送方面

在油田集输系统中，各油田正逐步采用油气混输工艺。由于多相与单相流动间存在着显著差别，如何准确设计，安全管理多相输送管网成了一个新的课题。此外，即使在传统的单相输送中，多相流现象也比比皆是：成品油管线在输送轻油的过程中，由于高差等因素的影响，轻质油品常常挥发出来，形成局部气液两相流，影响管线的正常工作。湿天然气管网也是如此，随着沿线压力、温度的变化，气体中的重烃组分逐渐析出，从而形成低持液率的气液两相流动。同时，工艺上多相流技术的广泛采用，也促进了多相流设备的研究。多相节流阀、多相流量计、段塞捕集器等多相流设备的研究开发在国外已开始成熟，在我国则处于刚起步阶段，还有很多问题需要解决。

（三）其他方面

在炼油化工中，原料的投入、产品的收集等过程都与多相流技术密切相关。如何准确的预测流程中各处的工艺参数值，是保证正常生产运行的重要手段。此外，天然气轻烃回收技

术中, 确定烃类混合流体的泡点、露点, 也属于多相流技术的范畴。

总之, 鉴于多相流技术的广泛用途和由此带来的巨大经济效益, 石油工业越来越重视多相流技术。

二、石油工业中亟待解决的多相流技术问题

(一) 多相混输管线的工艺设计与仿真

相对其他方面, 有关多相混输管线的工艺设计与仿真是目前研究最多的, 也是技术相对成熟的方面。从最初沿用单相管线的设计方法到现在基于流型划分方法的多模型优选方法, 人们可以在计算机上设计出尽可能优化的多相流管线, 还可以在管线未投产之前模拟出管道今后的运行工况。这些都得益于实验条件的改善、多相流模型的优化和计算机技术的发展^[7]。尽管如此, 多相流管线的设计还远不如单相管线成熟, 一些计算方法使用范围不广、精度偏低; 在系统仿真方面, 多相流管线(特别是伴随相变现象的管线)的仿真速度较慢, 很难满足实时监测的需要; 另外, 对于一些常见的设备(如: 阀、多相泵等), 目前还没有很好的数学模型来描述它在多相流中的实际运行工况。

(二) 多相输送的运营管理

1. 多相流管线的防腐问题

对多相流管线而言, 由于其所含介质和流型的复杂性, 它的内腐蚀机理远比单相流动的腐蚀复杂。特别是管线处于段塞流工况时, 冲击性的液弹更加重了对管道和非管设备(如: 弯头、阀等)的腐蚀。因此, 如何透彻分析多相流腐蚀机理, 寻找更好的防腐措施是今后一段时期迫切需要解决的问题。

2. 多相流管线的泄漏检测与定位

多相流管线大多分布在生态环境比较脆弱而气候条件较为恶劣的海底、沙漠中。这在要求减少管线泄漏情况的同时, 又给管线的泄漏检测带来了不便, 以往的人工巡线等传统方法不再适用。为此, 石油工业发达国家在基本解决输油管线泄漏检测问题的基础上, 开始把研究重点逐渐转向输气管线和多相流管线的泄漏检测及定位问题上来。相比输油管线的泄漏检测, 多相流管线的泄漏检测及定位的困难在于:

- ① 多相流量计的精度不高;
- ② 很难从采集的信号中滤除由于流型变化而引起的噪声;
- ③ 流动模型本身不如单相流动精确;
- ④ 由于多相物性方程不准确, 质量守恒法在多相流泄漏检测中的误差很大;
- ⑤ 由于流动模型复杂, 多相流泄漏检测中的实时性不好;
- ⑥ 由于相间的相互作用, 在油管线中常用的波速法、负压波法等方法在多相管路中很难使用。

3. 清管问题

油气管线的清管问题往往可以归结为多相流问题。国外相关文献^[8]已经提出了用于描述气管线清管过程的数学模型。但由于清管过程中液体段塞长度及其位置会不断变化, 如何实时确定段塞界面就成了清管模拟的一大障碍(目前, 往往由经验公式估算段塞的长度变化情况)。因此, 如何从最基本的水力学模型出发, 分析段塞的发展规律, 确定段塞长度及其