



上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

气液两相流动态特性的研究

王 经 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海科技专著出版资金资助

上海交通大学学术出版资金资助

气液两相流动态特性的研究

Research on the Dynamic Behavior of
Gas-Liquid Two-Phase Flow

王 经 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书的主要内容是在对气液两相流动基本理论、基本实验和国内外该领域最新研究成果、分析研究的基础上,归纳和总结了作者本人及其所领导的课题组二十余年来在两相流动态特性分析方面的研究成果,对目前正被逐渐接受并应用的各种不同类型的动态研究方法作了较详细的介绍。同时,作为对该方法的最早应用者之一,作者在书中重点介绍了本人对两相流动波动、非线性和混沌特性的研究工作。根据确定性混沌动力学和时间序列分析方法的基本原理和实验建模法的步骤,提出一种新的进行两相流动态分析的方法——混沌时间序列分析方法。书中还介绍了作者开发的用于进行气(汽)液两相流动态特性分析的混沌时间序列分析软件(WL CHAOS),以及上述方法在气液两相流实验系统中进行实际分析的研究结果。

图书在版编目(CIP)数据

气液两相流动态特性的研究/王经编著. —上海:上海交通大学出版社,2012

ISBN 978-7-313-07522-2

I. 气... II. 王... III. 两相流动—研究
IV. O359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 116679 号

气液两相流动态特性的研究

王 经 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

浙江云广印业有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:14.5 字数:267 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~2 030

ISBN 978-7-313-07522-2/O 定价:50.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0573-86577317

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪，科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略，上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”，资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

序

气(汽)液两相流动态特性的分析是研究流动及传热不稳定性的重要依据,流型的划分和诊断是所有两相流科学研究的前提。因此,两相流流动和传热的动态特性研究成为当前工程热物理领域最具挑战性的研究课题之一。随着计算机科学的迅速发展,国外于 20 世纪 70 年代起步,将现代统计方法和系统辨识理论用于多相流学科,探索研究多相流动态特性、流动不稳定性机理和流型诊断方法的新途径。

王经教授借助 1987 年在法国巴黎皮埃尔·玛丽·居里大学攻读博士学位的优势,是国内较早开始该学科领域研究的学者。20 世纪 90 年代初她完成的博士学位论文《Etude des Fluctuations Caracteristiques du Taux de Vide dans les Ecoulements Diphasiques Liquide-Gaz》(法文,法国巴黎 1992 年)(英文: Study on Void Fraction Oscillation Characteristics in Liquid-Gas Two-Phase Flow),以及回国后在华中科技大学动力工程博士后流动工作站的博士后工作报告《汽(气)液两相流动态特性及研究方法的探讨——波动、非线性和混沌》(武汉 1995 年),是她在该研究领域的代表作。

王经教授 1967 年毕业于西安交通大学动力系低温制冷专业,随后在工厂、高校从事工程技术和教学科研工作。文革结束后,她克服种种困难,负笈海外刻苦求学获得法国巴黎大学工学博士学位。回国后一直工作在高校教学科研第一线,具有扎实的理论功底和丰富的研究经验,现为上海交通大学工程热物理研究所教授、博士生导师,中国工程热物理学会多相流专业委员会委员和中国计量工程学会多相流测试专业委员会委员。作为多相流学科的同行人、她的大学老师和校友,我一直密切关注着王经教授的工作。她 1992 年回国后首先与我联系,汇报她在国外的研究工作。多年来,我们通过学会的共同工作和参加国际会议,对于该领域的研究进行了多次深入的讨论和交流。我同意她在研究方法中的许多观点,并支持她把二

十年来艰辛探索和研究的成果整理汇编出版,以达到与同行互相交流、促进多相流学科发展的良好愿望。本书是她辛勤工作的一次总结,其独到之处在于本书将多相流科学有关动态波动的理论与系统辨识理论、数据处理、数据采集技术相互结合,在对气液两相流动态特性及研究方法论述的写作方法上,注重按照理论—实践—理论的认知规律,对所研究问题逐步展开,所探索基本理论的深度呈螺旋式上升,逐步加深读者的认识能力;在对气液两相流流型过渡机理的论述及相关诊断方法研究成果的介绍方面,紧密追踪当前国内外的最新成果,将从实验中获得的数据通过科学的数据处理后,探索研究对象的客观规律,获得问题的解。书中还包括她带领的课题组所完成的国家自然科学基金项目、国家 863 高技术资助基金项目的内容,以及她所指导的博士生、硕士生的研究课题论文的实验数据、分析结果等。全书内容翔实,并对研究结果作了实事求是的评价。是一本专业性很强的学术专著,为从事该领域研究和教学工作的教师学生提供了学习参考,也可成为相关领域工程技术人员的参考书。

科学研究是追求真理的过程,但对大多数研究者来说,这意味着你的人生将充满艰辛而默默无闻。“梅花香自苦寒来”,我衷心地祝贺王经教授积 20 年努力终于实现夙愿完成了本书的写作。

中国科学院院士 中国工程院院士
中国工程热物理学会多相流专业委员会名誉主任
西安交通大学教授
陈学俊

前 言

气(汽)液两相流动态特性的分析是研究流动及传热不稳定性的重要依据,流型的划分和确定是所有两相流科学研究的前提。因此,两相流流动和传热的动态特性及不稳定性机理的探索是当前工程热物理领域最具挑战性的研究课题。随着传热传质强度的不断增高,流动结构和耦合效应更加复杂,研究对象的几何尺度向大与小两个极端发展,传输过程的持续时间与弛豫时间相比愈来愈短……面临这种多相流流动和传热过程的动态性、非平衡性、复杂性的挑战,原来沿用多年的以准静态假设、线性化处理为前提的研究方法就显得“力不从心”,甚至无能为力。工程热物理领域的科学工作者必须开阔眼界、突破传统、深化认识,从研究方法上取得突破。

另一方面,20世纪50年代以来,随着计算机科学的发展,在电子信息、机械等其他相关工程技术领域,对动力系统动态特性的研究取得了长足的进步。并形成系统科学独特的一支——系统动力学(System Dynamics)。这是一门研究信息处理、信息反馈系统的学科,其特点是以动力系统动态输出参数为依据,按照“系统之宏观行为源自其微观结构”的基本原理,从微观结构入手,建立系统模型去探索系统的动态特性及其演化规律。同时,各种先进测试手段的应用;现代数据处理分析方法的发展,激励动态信息的获取、传输、转换、储存、处理与分析识别不断取得重大突破,从而使系统动力学成为解决系统动态特性及不稳定性的有力工具,并正在发展成为当代工程技术、科学研究领域中一门知识面广、多学科交叉的高技术学科。很明显,将这门学科应用于两相流动和传热的动态特性及不稳定性研究中,是我们工程热物理领域的科学工作者责无旁贷的任务。

本书正是基于这样的认识,对两相流动态研究的系统动力学方法结合作者多年来的科研工作成果,进行了初步探讨。作为高校教学科研第一线的实践者,作者在指导博士生、硕士生完成国家863科研课题和国家自然科学基金的实际工作中,深感有必要将两相流动态特性研究方法和流型划分诊断方法进行较全面的总结,对其中所涉及的科学原理、实验方法与技术予以清晰的解释,从而有助于研究生和同行在已有研究成果基础上,进行更深入的探讨,进一步发展本研究领域,尽早取得该领域的突破。

本书的主要内容是分析探讨了气液两相流科学中关于动态特性的基本理论,

即系统动力学、波动理论等,以及实验研究的基础,包括数据采集、数据处理方法和国内外该领域的最新研究成果。在此基础上,归纳和总结了作者本人及所带领指导的课题组二十余年来在两相流动态特性分析方面的研究成果,对目前正被逐渐接受并应用的各种不同类型的动态研究方法作了较详细的介绍。作为对该方法的最早应用者之一,作者在书中重点介绍了本人对两相流动波动、非线性和混沌特性的研究工作。根据确定性混沌动力学和时间序列分析方法的基本原理,依据实验建模法的步骤,提出一种新的进行两相流动态分析的方法——混沌时间序列分析方法。书中还介绍了作者开发的用于进行气(汽)液两相流动态特性分析的混沌时间序列分析软件(WLCHAOS),以及上述方法在气液两相流实验系统中进行实际分析的研究结果。

本书主要取材于作者本人与课题组成员二十余年来在两相流科学领域的研究论文。包括作者在法国巴黎皮埃尔·玛丽·居里大学的博士论文(法文,现存法国巴黎皮埃尔·玛丽·居里大学图书馆);在华中科技大学动力工程博士后流动工作站的博士后工作报告(“汽(气)液两相流动态特性及研究方法的探讨——波动、非线性和混沌”)以及作者指导的博士生、硕士生的学位论文和所发表的研究论文的内容。书中所引用、介绍的国内外其他学者的研究工作成果,全部是译自或摘引于近二十年来公开发表的国内外学术期刊、国际会议论文集。作者借此对上述研究人员表示衷心的感谢。

全书分为5章,按内容为两大部分:第1,2,3章为涉及本书主要内容的理论基础,第4,5章为实验研究、结果分析讨论展望。

本书的特点在于书中所涉及的研究成果,均来自研究者和作者课题组成员的实践,并具有深厚扎实的理论基础。同时,鉴于作者所依据的国家863课题与国家自然科学基金的研究课题都源于起点较高的选题,与国际上的研究项目同步甚至超前,本书的内容基本处于国际同期研究水平。

作者在此对法国巴黎皮埃尔·玛丽·居里大学流体热力学实验室的同事们深表怀念和感谢,是他们所给予的支持、帮助和学术上的建议使作者得以完成博士论文。作者还要感谢伟大祖国的博士后流动站制度和华中科技大学动力工程博士后流动工作站;感谢当年国家教委为回国留学人员提供的基金资助和博士后科研基金资助,从而使本书的主要部分得以在博士后研究期间成文。同时作者特别要感谢国家自然科学基金委员会、国家863专项基金和教育部博士点基金给予作者课题组的研究基金资助。

在多相流科学领域历经二十余年的研究与许多良师益友的支持鼓励分不开,特别是我国多相流学科的创始人、中国科学院和中国工程院院士、西安交通大学陈学俊教授,他不仅是作者的大学老师,也是作者回国后在多相流科学领域研究探索

的指路人。陈先生在耄耋之年多次谆谆教导和关怀,令我终生难忘,他的关心和支持给了作者完成本书极大的勇气。感谢中国工程热物理学会多相流专业委员会和中国计量工程学会多相流专业委员会的各位同行,即西安交通大学多相流国家重点实验室及浙江大学、清华大学、东南大学、中科院力学研究所、上海理工大学等兄弟高校的多位教授、博士生、硕士生在历次学术年会上与作者的交流和讨论,他们的远见卓识和对科学的执著追求成为作者下决心完成此书的动力。感谢本书的合作者,我的学生牛刚博士、贾志海博士、路广遥博士、刘夷平博士、张华博士、王淑华博士等,本书许多内容都包含了他们的辛勤工作和创新成果。感谢课题组的所有成员,原谅作者不能在此一一点名致谢。感谢上海交大出版社出版基金的支持和潘新等编辑的辛勤工作,最终使本书得以出版。

感谢我的丈夫、上海交通大学李从心教授。我们是夫妻,更是校友和学友。我们相濡以沫,相互扶持已走过四十个年头。在我留学法国期间,他独自照顾家庭和一双年幼的女儿;在我艰难的研究工作中,在系统动力学理论与实验技术上他给予许多指导和帮助,没有他的支持,我绝不可能完成此书。

限于作者的学识水平和能力,对于两相流动态特性这一十分复杂而又极具挑战性的理论与实验研究领域,作者仅以本书“抛砖引玉”,书中定会存在不足之处,恳请读者和专家学者不吝赐教,批评指正。作者深信,随着更多学者进一步地深入理论研究以及更为先进的实验和测试手段的应用,21 世纪的多相流科学领域一定会获得突破性的发展,取得丰硕的成果。

仅以此书献给我的母校——交通大学。

王 经
2011 年春节于上海

符号与标记

符号	名 称	单位
A	面积(area)	m^2
C	电容(capacitance)	$\text{F}(\text{C}/\text{V})$
D	直径(diameter)	m
D_{H}	水力直径(hydraulic diameter)	m
f	摩擦因子(friction factor)	
H_{l}	液体高度(liquid height)	m
k	波数(wave number)	m^{-1}
L	长度(length)	m
P	压力(pressure)	Pa
Q	体积流量(volume flux)	m^3/s
S	滑移率(slip ratio),熵(entropy)	
T	温度(Temperature, Celsius scale),时间段(time)	$^{\circ}\text{C}(\text{K})$
t	时间(time)	s
u	表观速度(superficial velocity)	m/s
v	速度(velocity)	m/s
v_{k}	分相速度(velocity of phase K)	m/s
v_{A}	面积速度(velocity of area A)	m/s
v_{V}	体积速度(velocity of volume V)	m/s
V	体积(volume)	m^3
x	位置,横坐标(position, abscissa)	m
y	位置,纵坐标(position, ordinate)	m
h	比焓(specific enthalpy)	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{k})$

(续表)

符号	名 称	单位
u_e	比内能(specific internal energy)	J/(kg · k)
α	空泡份额(void fraction)	
β	管道水平倾斜角度(pipe incline,) (angle to horizontal)	rad
δ	液膜厚度(liquid film thickness)	m
$\textcircled{H}_K$	绝对温度(Kelvin Scale)	K
ϵ	介电常数(permittivity)	f/m
ϵ_l	液体份额(hold-up)	
φ	角度(angle)	rad
θ	角度(angle)	rad
μ	动力黏度(dynamic viscosity)	Pa · s
ν	运动黏度(kinematic viscosity)	m ² /s
ρ	密度(density)	kg/m ³
σ	表面张力(surface tension)	N/m
τ	切应力(shear stress)	Pa
右下角标		
b	气(汽)泡(bubble),后面(back)	
c	临界值(critical)	
f	前面(front),液膜(liquid film)	
g	气相(gas phase)	
i	界面(interface)	
l	液相(liquid phase)	
m	混合(mixture)	
s	漂移(superficial),段塞流(slug)	
t	尾部(tail)	
w	壁面(wall)	
无量纲数		
Fr	弗劳德数(Froude number)	

(续表)

符号	名 称	单位
Pr	普朗特数(Prandtl number)	
Ra	瑞利数(Rayleigh number)	
Re	雷诺数(Reynolds number)	
We	韦伯数(Weber number)	
χ	马蒂尼参数(Martinelli parameter)	
缩写		
KH	开尔文-亥姆霍兹理论 Kelvin-Helmholtz theory	
SS	段塞稳定性理论(Slug Stability Theory)	
VLW	黏性长波理论(Viscous Long Wavelength Theory)	
特殊符号		
$\langle \rangle_2$	表示某函数的面积平均(该面积为两相中第 k 相流体所占据的面积 A_k)	
$\langle \rangle_3$	表示某函数的体积平均(该体积为两相中第 k 相流体所占据的体积 V_k)	
$\langle \rangle_2^*$	表示管道整个截面函数的平均值	
$\frac{D}{Dt}$	随体导数	

目 录

第 1 章 气液两相流动态特性基础理论	1
1.1 气液两相流动及基本方程	2
1.1.1 气液两相流动的基本概念	2
1.1.2 两相流基本方程组	7
1.2 管内气液两相流动的数学模型及其动态特性	18
1.2.1 建模简化原则	18
1.2.2 简化模型中采用的假定条件	19
1.2.3 管内气液两相流的基本方程组	20
1.3 气液两相流流型过渡与流型图	23
1.3.1 流型图	23
1.3.2 流型的转变	26
1.4 波动理论与气液两相流动态特性	27
1.4.1 一维两相流波动理论	27
1.4.2 流动不稳定性的基本概念	28
1.4.3 两相流动不稳定性分析	32
1.5 空泡波方程及其传播	38
1.6 压力波方程及其传播	41
1.6.1 压力波传播的基本方程式	41
1.6.2 影响压力波传播的因素	44
第 2 章 气液两相流动态特性研究方法的理论	45
2.1 系统动力学与两相流动态特性研究	45
2.1.1 系统动力学简介	45
2.1.2 系统动力学的基本研究方法	46

2.2	系统辨识在多相流学科中的应用	48
2.3	经典谱估计与谱分析技术	53
2.3.1	相关函数法	53
2.3.2	周期图法	56
2.3.3	传统谱估计的讨论	56
2.4	时间序列分析方法与现代谱估计	58
2.4.1	时间序列分析方法	58
2.4.2	ARMA 模型谱的参数估计算法	60
2.4.3	其他谱估计方法简介	64
2.4.4	小波分析技术	68
2.5	神经网络分析方法	68
2.6	流动层析成像分析方法	71
2.6.1	图像处理方法与高速摄影技术	71
2.6.2	过程层析成像技术	72
2.7	系统辨识方法在两相流动态分析中的应用实例	77
2.7.1	PDF 和 NN 流型识别方法	77
2.7.2	水平及倾斜管内油气两相流 PDF 和 NN 流型识别	77
2.8	气液两相流动态特性研究 PDF 和 NN 流型识别方法	89
第 3 章	非线性动力学理论及其在两相流动态特性研究中的应用	91
3.1	非线性动力学理论	91
3.1.1	非线性问题	93
3.1.2	两相流动态非线性问题	96
3.2	动态系统的分叉与混沌现象	99
3.3	两相流动态特性混沌时间序列分析方法	103
3.3.1	什么是混沌运动	103
3.3.2	确定性混沌动力学的基本概念	106
3.3.3	混沌时间序列方法	113
3.4	WLChaos 分析软件	114
3.4.1	实验数据和时间序列模块(TD 和 TS)	115

3.4.2 相图(吸引子)的构成	116
3.4.3 PP 和 SA 模块(延迟法和吸引子图模块)	119
3.4.4 李雅普诺夫指数模块(LE 和 KZ)	120
3.5 对混沌时间序列分析法的讨论	125
3.6 数学符号表	126
第 4 章 两相流动态特性的实验研究	127
4.1 两相流动态参数的测量	127
4.1.1 空泡份额的测量及空泡份额传感器概述	128
4.1.2 射线法空泡份额传感器	130
4.1.3 光纤空泡份额传感器	131
4.1.4 用于 ECT 技术的空泡份额电容传感器	133
4.2 空泡波的实验研究	135
4.2.1 空泡份额波及其实验研究现状	135
4.2.2 气液两相流动空泡份额波实验研究	138
4.2.3 结果和分析讨论	141
4.3 压力波的实验研究	44
4.3.1 研究概况	144
4.3.2 实验装置及过程	147
4.3.3 实验结果与分析结论	148
4.4 气液两相流动态特性实验研究方法的讨论和展望	152
4.4.1 关于实验方法的讨论	152
4.4.2 动态特性实验研究的展望	153
第 5 章 油气混输两相流动态特性的研究	154
5.1 油气混输工程与油气两相流动	154
5.1.1 油气混输工程及关键技术简介	154
5.1.2 油气两相流动及其动态特性的研究	159
5.2 油气两相流流型及过渡机理的研究	161
5.2.1 油气两相流流型的预测模型	162

5.2.2 油气两相流流型过渡影响因素的研究	166
5.3 水平管内油气两相流层状流向段塞流流型过渡机理的研究	176
5.3.1 段塞流的形成	176
5.3.2 分层流向段塞流转变的理论预测	179
5.3.3 分层流向段塞流流型过渡的实验研究	183
5.3.4 实验研究结果及讨论	185
5.4 分层流动的数值模拟及讨论	188
5.4.1 控制基本方程及边界条件的建立	188
5.4.2 求解控制基本方程	193
5.4.3 数值模拟结果及其与实验结果的比较	194
5.4.4 数值模拟的结论与展望	201
5.5 油气两相混输流型识别研究的关键技术问题	201
参考文献	203

第1章 气液两相流动动态特性基础理论

多相流动指由固、液、气(汽)三相中任何两相或两相以上(包括异质同相)不相溶物质的混合流动。多相流动学科包括牛顿流体与非牛顿流体的各种不同类型的组合,即气液、固液、气固、汽液、气液固、气液液等,属于流体力学、传热学、界面科学多学科交叉理论的研究领域。多相流动广泛存在于动力工业、石油工业、化学工业以及各种加工工业的换热设备中。实际工程及理论研究表明,多相流动是比单相流动更为复杂的流动现象,不仅多相流动系统具有在结构及分布上特殊的不均匀性;流动状态的非平衡性和多值性,以及各相间存在可变形相界面等多相流动最重要的流动特征,而且由于流动过程中相界面的随机变动,所引发的流型变化特征与各相的物性、流量、流动参数、管道几何形状及几何位置等许多因素密切相关,使得多相流动学科成为热流体学科的最具有挑战性的重要学科。多相流动,包括牛顿流体与非牛顿流体的各种不同类型的组合,及其随机变动的相界面和流动特性,使得多相流动的数学模型的建立、求解、预测等难度极大;而在多相流动的模拟实验研究领域,包括各种不同类型的多相流介质的配置,物性参数的测试,系统各重要流动参数的计量,实验采集数据的数学处理等工作,也同样呈现很大的难度,成为相关学科领域实验、理论研究工作的重点。

20 世纪上半叶至今,人们对两相流(气液、气固、液固等)的流动规律进行了大量的实验研究,在流型分布、转变和流型图的制定等领域取得很大的进展,为两相流科学的发展和换热设备工业设计、制造、应用提供了可靠的数据依据。但随着科学技术的飞速发展,实际工程中越来越多的多相流问题尚未解决,严重影响相关学科的发展。从目前查看的国内外有关资料和现场报告可知,一些关键技术问题尽管已取得不少成果,但还存在许多重大理论与技术问题尚未解决,特别是尚未从研究思路和方法上获得重大突破。当前,在多相流数学模型的建立领域;油气水混合物多相流动、人体血液流动介质、气固混合物多相流动、燃气成分的模拟等不同混合物多相流动的流动规律,特别是流动形态(流型)的变化、压降的计算、持液率的测量等领域;多相流计算机仿真模拟技术;多相管流实验检测技术、流型诊断数据处理软件包的研制领域;多相流体工程机械(如多相混相输送泵、气液分离机械)的研制及管线的故障诊断系统研制等领域,都急需进行大量扎实有效的研究和突破。