

CAMBRIDGE

多相流基础

[美] Christopher E. Brennen 著

FUNDAMENTALS OF MULTIPHASE FLOWS

倪永燕 潘中永 译 朱仁庆 校译



科学出版社

多相流基础

[美] Christopher E. Brennen 著

倪永燕 潘中永 译

朱仁庆 校译

江苏政府留学奖学金(2011 年度)

江苏省高校优秀中青年教師境外研修项目(2012 年度)

国家自然科学基金(51209108)

江苏省自然科学基金(BK20151342)

资助

科学出版社

北 京

图字: 01-2016-5513 号

内 容 简 介

《多相流基础》总结了与各种形式的多相流流动相关的基本概念, 将对各类多相流基本知识的理解集成于一书, 并表述用于分析多相流基本问题的统合性方法。在对多相流流动做了基本描述之后, 第 2 章到第 6 章介绍了作为散布流动中散布相的粒子、空泡和液滴的特性及其运动方程; 第 7 章到第 13 章首先介绍了多相流拓扑结构及其内部流动的丢失和能量转换方式, 随即讲述了五种不同多相流流型的特性、控制方程和分析方法; 第 14 章介绍了一种适用于由浮力和流体阻力控制的多相流流动计算的漂移通量模型; 第 15 章和第 16 章介绍了多相流的系统不稳定性和运动波。

本书适用于在多相流基础理论领域处于研究前沿的研究生和科研人员学习和参考。

Fundamentals of Multiphase Flows, second edition (0-521-84804-0) by Christopher E. Brennen first published by Cambridge University Press 2005

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press). 2016

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press).

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

图书在版编目(CIP)数据

多相流基础/(美)克里斯托弗·厄尔斯·布伦南著;倪永燕,潘中永译. —北京:科学出版社,2016.10

书名原文: Fundamentals of Multiphase Flows (2nd ed)

ISBN 978-7-03-050122-6

I. ①多… II. ①克… ②倪… ③潘… III. ①多相流-研究 IV. ①O359

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 239807 号

责任编辑: 惠 雪 程心珂/责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 倩/封面设计: 许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张: 21 1/2

字数: 433 000

定价: 129.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

译者的话

多相流是一门涵盖内容十分广泛的现代交叉学科，在几乎所有的工业领域和自然界的运动与演化中都有广泛和深入的应用。多相流形式多种多样、时空尺度跨度巨大。还没有简单的定义说明能够充分描述多相流的多样性和普遍性。因此，多相流所面临的挑战无处不在。

近年来，我们在各自感兴趣的现代船舶推进和流体输送领域开始关注多相流问题。经过在该领域的数年工作发现，有时对问题所涉及过程的了解和知识积累得越多、分析研究得越深入，则越发觉其中深奥广远的物质本质无法用当前的知识和技术水平去揭示或分析，越感到我们自身所具备的知识太过粗糙和肤浅。

非常幸运的是，我们于 2012 年结识了 Christopher Earls Brennen 教授，并在其帮助下于 2013 年 5 月至 2014 年 4 月到美国加州理工学院访问研究。在访学期间，我们除了跟随学习 Tim Colonius 教授开设的流体力学课程、积极参加极其频繁的内部学术研讨会之外，还仔细学习和研究 Christopher Earls Brennen 教授所著的 *Fundamentals of Multiphase Flow* 一书。

Christopher Earls Brennen 教授在加州理工学院工作近 50 年，在多相流、透平机械理论和空化研究领域广为人知，是目前全球唯一同时获得美国机械工程师学会 (ASME) 和日本机械工程师学会 (JSME) 流体工程和流体科学奖的科学家，1998 年到 2002 年任美国加州理工学院副校长。加州理工学院自 2011~2012 年度至今在“泰晤士高等教育世界大学排行榜”上一直名列第一。*Fundamentals of Multiphase Flow* 一书是 Christopher Earls Brennen 教授在加州理工学院多年教学与研究的基础上逐步整理完善而成的，具有英美经典著作所具有的大局观强、内容丰富而又不失脉络清晰的特点。该书并不拘泥于讲述任何一种多相流流动或者技术内容的细节，而是将众多多相流基本知识的理解集成于一书，并表述用于分析多相流基本问题的统合性方法。这样就可以使多相流领域的学生和研究者种类繁多且内容宽泛的资料中找到适合于其研究方向的试验和分析方法。我们非常荣幸地将该书译成中文，以供国内有兴趣的学生和科研人员参考。

本书第 1 章介绍多相流的基本符号和用于多相流的质量、动量和能量方程；第 2 章到第 6 章介绍作为散布流动中散布相的粒子、空泡和液滴的特性及其运动方程；第 7 章到第 13 章首先介绍多相流拓扑结构及其内部流动的损失和能量转换方式，随即讲述五种不同多相流流型的特性、控制方程和分析方法；第 14 章介绍一种适用于由浮力和流体阻力控制的多相流流动计算的漂移通量模型；第 15 章和第

16 章介绍多相流的系统不稳定性和运动波。其中第 1 章、第 6 章到第 8 章、第 11 章到第 16 章由江苏科技大学倪永燕翻译,与空化(空泡)问题相关的第 2 章到第 5 章、第 9 章和第 10 章由江苏大学潘中永翻译。江苏科技大学朱仁庆教授应邀对全书进行了校译、统稿。

本书适于船舶与海洋工程、动力工程及工程热物理学科的师生使用,特别适用于在多相流基础理论领域处于研究前沿的研究生和科研人员学习和参考。

我们在美国加州理工学院的访问研究分别得到江苏政府留学奖学金(2011 年度)和江苏省高校优秀中青年教师境外研修项目(2012 年度)的资助,本书的出版则受到国家自然科学基金(51209108)和江苏省自然科学基金(BK20151342)的资助,特此致谢。也特别感谢访学期间接待我们的 Christopher Earls Brennen 教授、Tim Colonius 教授、Cheryl Geer 女士以及其他一些给予我们诚挚关照和热心帮助的朋友。

译者

2016 年 1 月

原书前言

多相流这一主题涉及的领域非常广泛，其包括大量不同的技术内容、尺度范围、工程学科以及各种各样的分析方法。因此，与多相流问题相关的书籍浩如烟海。对于多相流领域的学生和研究者而言，他们在如此种类繁多且内容宽泛的资料中找到适合于其研究方向的试验和分析方法非常困难。本书的目的在于将众多多相流基本知识的理解集成于一书，并表述用于分析多相流基本问题的统合性方法。因此，本书总结了与各种形式多相流相关的基本概念。本书并不全面讲述任何一种多相流流动或者技术内容的细节，不过与前述细节相关的参考书会在适当的位置标注在参考文献中。本书的读者对象是在多相流基础理论领域处于研究前沿的研究生和科研人员，期望上述读者对象可以参阅本书获取一些有关多相流问题求解的基本方法。

非常感谢那些在多相流领域的我的朋友和资深研究员，他们的研究思想和研究成果对本书提供了很大帮助。特别感谢我的亲密同事 Allan Acosta、Ted Wu、Rolf Sabersky、Melany Hunt、Tim Colonius 以及已经过世的 Milton Plesset，与他们的合作令我的职业生活快乐丰富。本书是在加州理工学院多年教学与研究的基础上逐步整理完善而成的。我非常荣幸能够与 Hojin Ahn、Robert Bernier、Abhijit Bhattacharyya、David Braisted、Charles Campbell、Steven Ceccio、Luca d'Agostino、Fabrizio d'Auria、Mark Duttweiler、Ronald Franz、Douglas Hart、Steve Hostler、Gustavo Joseph、Joseph Katz、Yan Kuhn de Chizelle、Sanjay Kumar、Harri Kytömaa、Zhenhuan Liu、Beth McKenney、Sheung-Lip Ng、Tanh Nguyen、Kiam Oey、James Pearce、Garrett Reisman、Y.-C. Wang、Carl Wassgren、Roberto Zenit Camacho 和 Steve Hostler 这些极具天赋的学生一起研究多相流问题，对这些学生我怀有特殊的感情。此外，也特别感谢 Cecilia Lin，她付出了很多个人时间为本书准备插图。

将本书先前的精装版献给我的母亲 Muriel M. Brennen，她的爱和鼓励在我的一生中都激励着我。平装版献给另外一个特别的女人——我的妻子 Barbara——她给我带来了新的生活和至高无上的爱。

Christopher Earls Brennen

加州理工学院

2008 年 12 月

符 号 表

拉丁字母

a	类波扰动振幅
A	过流断面面积或空泡群半径
A	衰减
b	幂律指数
Ba	Bagnold 数 $\rho_S D^2 \dot{\gamma} / \mu_L$
c	浓度
c	声速
c_κ	波数 κ 的相速度
c_p	常压比热
c_s	固体或液体的比热
c_v	定容比热
C	柔度
C	阻尼系数
C_D	阻力系数
C_{ij}	阻力和升力系数矩阵
C_L	升力系数
C_p	压力系数
C_{pmin}	最小压力系数
d	直径
d_j	射流直径
d_o	漏斗开口直径
D	粒子、雾滴或空泡直径
D	质量扩散率
D_m	体积 (或质量) 平均直径
D_s	索特平均直径
$D(T)$	传递矩阵 $[T]$ 的行列式
D	热扩散率
e	比内能
E	单位体积能量交换速度

f	频率/Hz
f	摩擦系数
f_L, f_V	液体和蒸气的热力学量
F_i	力矢量
F_r	弗劳德数
F	单位体积内的相互作用力
g	重力加速度
g_L, g_V	液体和蒸气的热力学量
G_{Ni}	组分 N 在 i 方向的质量通量
G_N	组分 N 的质量通量
h	比焓
h	高度
H	高度
H	总扬程 $p^T/\rho g$
He	索利定律常数
Hm	Haberman-Morton 数, 一般为 $g\mu^4/\rho S^3$
i, j, k, m, n	角标
i	-1 的平方根
I	声冲击
I	单位体积内的质量交换速度
$\dot{j}_i$	i 方向的总体积通量
$\dot{j}_{Ni}$	组分 N 在 i 方向的总体积通量
$\dot{j}_N$	组分 N 的体积通量
k	多方常数
k	热导率
k	玻尔兹曼常数
k_L, k_V	液体和蒸气的量
K	常数
K^*	空化柔度
Kc	Keulegan-Carpenter 数
K_{ij}	附加质量系数矩阵
K_n, K_s	法向和切向弹性弹簧常数
Kn	克努森数, $\lambda/2R$
K	摩擦常数
ℓ	特征尺寸

ℓ_t	湍流长度尺度
L	惯性
L	汽化潜热
m	质量
$\dot{m}$	质量流量
m_G	空泡内气体质量
m_p	粒子质量
M	马赫数
M^*	质量流量增益系数
M_{ij}	附加质量矩阵
M	分子量
Ma	Martinelli 参数
n	单位体积内粒子的数目
$\dot{n}$	单位时间内时间数量
n_i	i 方向单位矢量
$N(R), N(D), N(v)$	粒子大小分布函数
N^*	单位面积点的数量
Nu	努塞特数
p	压力
p^T	总压
p_a	辐射声压
p_G	气体分压/气体高于汽化压力的值
p_s	声压级
P	周长
Pe	佩克莱数, 一般为 WR/α_C
Pr	普朗特数, $\rho v c_p/k$
q	一般变量
q_i	热通量矢量
Q	一般变量
Q	单位质量内热交换或热释放的速度
Q_ℓ	单位长度管路上的热增加速度
r, r_i	径向坐标和正矢量
r_d	叶轮出口直径
R	空泡、粒子或雾滴半径
R_k^*	分量 k 的抵抗

R_B	等体积当量半径, $(3v/4\pi)^{1/3}$
R_e	平衡态半径
Re	雷诺数, 通常为 $2WR/v_C$
R	气体常数
s	沿流线或管路中心线测量的坐标
s	拉普拉斯转换变量
s	比熵
S	表面张力
S_D	散布相表面
St	斯托克斯数
Str	施特鲁哈尔数
t	时间
t_c	(二粒子) 对撞时间
t_u	粒子速度弛豫时间
t_T	粒子温度弛豫时间
T	温度
T	颗粒温度
T_{ij}	传递矩阵
u_i	速度矢量
u_{Ni}	组分 N 在 i 方向的速度
u_r, u_θ	极坐标中的速度分量
u_s	震激 (传播) 速度
u^*	摩擦速度
U, U_i	没有粒子时的流体速度和速度矢量
U_∞	上游均匀流速
v	粒子、雾滴或空泡的体积
V, V_i	粒子的绝对速度和速度矢量
V	体积
V	控制体体积
$\dot{V}$	体积流量
w	量纲一的相对速度 W/W_∞
W, W_i	粒子的相对速度和相对速度矢量
W_∞	粒子极限速度
W_p	特征相分离速度
W_t	特征相混合速度

We	韦伯数, $2\rho W^2 R/S$
W	单位质量上的做功速度
x, y, z	笛卡儿坐标
x_i	位置矢量
x	质量含量
X	质量量
z	竖直向上的测量坐标
希腊字母	
α	体积含量
β	体积量
γ	气体比热比
$\dot{\gamma}$	剪切速度
Γ	单位体积能量耗散率
δ	边界层厚度
δ_d	阻尼系数
δm	(小部分) 质量
δ_T	热边界层厚度
δ_2	边界层动量厚度
δ_{ij}	克罗内克算子
ε	(小部分) 体积
ε	回复系数
ε	单位体积能量耗散率
ζ	衰减或放大速度
η	单位液体体积的空泡数量
θ	角度坐标或速度矢量的方向
θ	约化频率
θ_w	漏斗半开度角
κ	波数
κ	可压缩体积模量
κ_L, κ_G	形状常数
λ	波长
λ	平均自由路径
λ	科尔莫戈罗夫长度尺度
Λ	湍流的积分长度尺度
μ	动力黏度

μ^*	库仑摩擦系数
ν	运动黏度
v	基于质量的化学计量系数
ξ	粒子载荷
ρ	密度
σ	空化数
σ_i	初生空化数
σ_{ij}	应力张量
σ_{ij}^D	偏应力张量
$\Sigma(T)$	热力学参数
τ	科尔莫戈罗夫时间尺度
τ_i	交界面剪切应力
τ_n	法向应力
τ_s	剪切应力
τ_w	壁面切应力
ψ	斯托克斯流函数
ψ	扬程系数, $\Delta p^T / \rho \Omega^2 r_d^2$
ϕ	速度势
ϕ	内摩擦角
ϕ	流量系数, $j / \Omega r_d$
$\phi_L^2, \phi_G^2, \phi_{L0}^2$	Martinelli 压力梯度比
φ	空泡半径的小摄动
ω	角频率
ω_a	声模态频率
ω_i	不稳定性频率
ω_n	固有频率
ω_m	(空泡) 群固有频率
ω_m	压力计频率
ω_p	峰值频率
Ω	旋转频率 (rad/s)
下标	
对于任意变量 Q	
Q_1, Q_2, Q_3	Q 的三个笛卡儿坐标分量
Q_1, Q_2	某种组分或流动结构的上游值和下游值
Q_∞	远离粒子或空泡的值

Q_*	喉部的值
Q_A	一般相或者组分 A 的值
Q_b	(基于整体体积的) 平均值
Q_B	一般相或者组分 B 的值
Q_B	空泡内的值
Q_C	连续相或者连续组分的值
Q_c	临界值或者在临界点的值
Q_D	散布相或者散布组分的值
Q_e	平衡态值或者在饱和液/汽线上的值
Q_e	当量值或者出口值
Q_G	气相或者气体组分的值
Q_i	矢量 Q 的分量
Q_{ij}	张量 Q 的分量
Q_L	液相或液体组分的量
Q_m	最大值
Q_N	一般相或者组分 N 的值
Q_o	初始值、上游值或成藏值
Q_O	氧化剂的值
Q_r	r 方向分量
Q_s	表面、系统或者震激的值
Q_S	固体粒子的值
Q_V	汽相或蒸气组分的量
Q_w	壁面上的值
Q_θ	θ 方向分量

上标及其他标号

对于任意变量 Q

Q', Q'', Q^*	用于区分与 Q 相同的量
$\overline{Q}$	Q 的平均值或者共轭复数
$\dot{Q}$	Q 的小摄动
$\tilde{Q}$	振荡 Q 的复数幅度
$\dot{Q}$	Q 的时间导数
$\ddot{Q}$	Q 的二次时间导数
$\hat{Q}(s)$	$Q(t)$ 的 Laplace 变换
$\check{Q}$	镜像点原点的坐标
δQ	$Q(t)$ 的小变化

$\text{Re}\{Q\}$	Q 的实部
$\text{Im}\{Q\}$	Q 的虚部

备注

符号

1.1.3 节对本书中所用到的多相流符号有更全面的描述。有少数符号只在个别需要的地方临时应用，这类符号没有列在上面的符号表中。

单位

本书大多数时候采用和分析的是量纲一的参数。但是有些情况下需要应用有量纲的热力学属性和输运属性。这时候采用国际标准单位制，即基本单位为质量 (kg)、长度 (m)、时间 (s) 以及绝对温度 (K)。

目 录

译者的话

原书前言

符号表

第 1 章 多相流简介	1
1.1 引言	1
1.1.1 多相流范围	1
1.1.2 多相流模型	2
1.1.3 多相流符号	3
1.1.4 大小分布函数	5
1.2 运动方程	7
1.2.1 平均化处理	7
1.2.2 质量守恒连续方程	8
1.2.3 散布相数目连续性	9
1.2.4 菲克定律	10
1.2.5 动量守恒连续方程	11
1.2.6 散布相动量方程	13
1.2.7 散布相相互作用补充说明	14
1.2.8 能量守恒方程	14
1.2.9 分离相之间的热交换	18
1.3 与湍流的相互作用	19
1.3.1 粒子和湍流	19
1.3.2 对湍流稳定性的作用	21
1.4 运动方程补充说明	22
1.4.1 平均化处理	22
1.4.2 平均化处理对平均运动的影响	23
1.4.3 管路流动中的平均化处理	24
1.4.4 组合相方程建模	24
1.4.5 质量、力及能量相互作用项	25

第 2 章 单个粒子运动	26
2.1 引言	26
2.2 球体绕流	27
2.2.1 高雷诺数球体绕流流动	27
2.2.2 低雷诺数球体绕流流动	29
2.2.3 分子效应	33
2.3 非定常特性的作用	33
2.3.1 粒子非定常运动	33
2.3.2 浓度对附加质量的影响	36
2.3.3 非定常势流流动	36
2.3.4 非定常斯托克斯流动	39
2.4 粒子运动方程	43
2.4.1 运动方程	43
2.4.2 相对运动的大小	47
2.4.3 浓度对粒子运动方程的影响	48
2.4.4 浓度对粒子阻力的影响	49
第 3 章 空泡与雾滴平动	53
3.1 引言	53
3.2 平动引起的变形	53
3.2.1 量纲分析	53
3.2.2 空泡形状和终端速度	55
3.3 马兰戈尼效应	57
3.4 皮叶克尼斯力	60
3.5 生长或破裂中的空泡	61
第 4 章 空泡生长及破裂	64
4.1 引言	64
4.2 空泡生长及破裂	64
4.2.1 Rayleigh-Plesset 方程	64
4.2.2 空泡内容物	66
4.2.3 不考虑热效应时的空泡生长	69
4.2.4 不考虑热效应时的空泡破裂	71
4.2.5 汽/气泡稳定性	72
4.3 热效应	74
4.3.1 热效应对生长的影响	74

4.3.2	热控制生长	76
4.3.3	空化与沸腾	78
4.3.4	质量扩散对空泡生长的作用	78
4.4	振荡空泡	80
4.4.1	空泡固有频率	80
4.4.2	非线性效应	83
4.4.3	整流质量扩散	84
第 5 章	空化	86
5.1	引言	86
5.2	空泡空化的主要特点	86
5.2.1	空化初生	86
5.2.2	空化空泡破裂	88
5.2.3	空泡破裂过程中的形状扭曲	90
5.2.4	空化破坏	92
5.3	空化空泡	93
5.3.1	空化空泡观察	93
5.3.2	空化噪声	96
5.3.3	空化发光	101
第 6 章	沸腾及凝结	102
6.1	引言	102
6.2	水平表面	102
6.2.1	池沸腾	102
6.2.2	核态沸腾	104
6.2.3	膜态沸腾	105
6.2.4	Leidenfrost 效应	106
6.3	竖直表面	107
6.3.1	膜态沸腾	108
6.4	凝结	109
6.4.1	膜态凝结	110
第 7 章	流态	111
7.1	引言	111
7.2	多相流拓扑结构	111
7.2.1	多相流流态	111