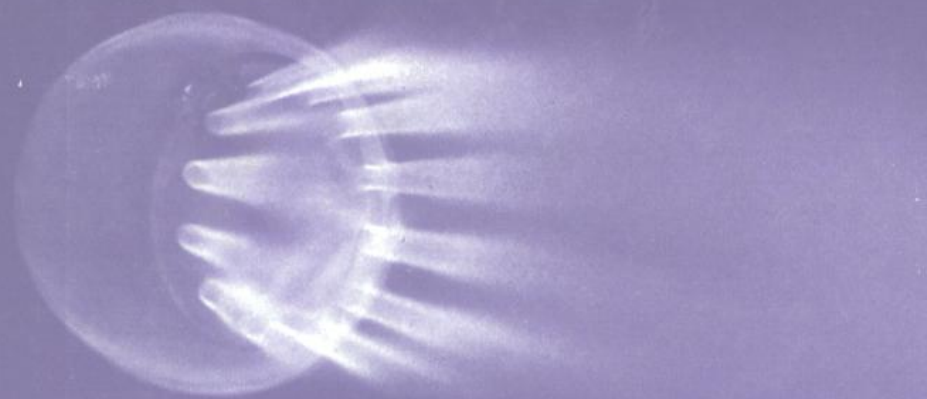


湍流气粒两相流动 和燃烧的理论 与数值模拟

〔中〕周力行 著

陈文芳 林文漪 译



科学出版社

湍流气粒两相流动和燃烧的 理论与数值模拟

[中] 周力行 著

陈文芳 林文漪 译

周力行 校

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是为适应研究生和高年级本科生培养需要而编写的专著。全书分为两篇。第一篇是气、液、固体燃料燃烧理论基础，包括多组分有反应流动基本方程，着火和灭火，层流预混气燃烧，液滴和煤粒燃烧，层流边界层中燃烧，气粒（雾）两相流动基本特性、基本方程和简单情况的理论分析。第二篇是湍流气粒（雾）两相流动和燃烧的数值模拟，包括单相湍流流动的模拟，两相湍流流动的模拟，湍流气相和两相燃烧的模拟，数值模拟在实际工程装置中的应用。

本书的体系有别于国内外类似书籍的体系，其主要特点是把经典燃烧理论和连续介质力学结合起来，把分析解理论和近代数值模拟理论结合起来。这本书可作为工程热物理、流体力学、热能工程、航空及航天、冶金、化工、石油、核能、水利等领域的高校教师、研究生和高年级本科生的教学和学习用书，也可作为上述领域中有关研究及设计人员的参考用书。

Zhou Lixing

THEORY AND NUMERICAL MODELING OF TURBULENT GAS-PARTICLE FLOWS AND COMBUSTION

Science Press and CRC Press, INC., 1993

湍流气粒两相流动和燃烧的

理论与数值模拟

周力行著

陈世芳 杨建译

周力行

责任编辑 唐正必

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994年12月第一版 开本：850×1168 1/32

1994年12月第一次印刷 印张：9 $\frac{3}{8}$ 插页：2

印数：1—2100 字数：239 000

ISBN 7-03-004270-0/TB·120

定价：14.80元

序 言

本书是作为硕士生和博士生教材而撰写的，它包括作者在清华大学工程力学系近30年来所开设的燃烧学课程及10多年来开设的湍流两相流动与燃烧的数值模拟课程的讲授内容，也包括作者在前联邦德国、美国及前苏联10余所高等学校的讲学内容。

本书主要目的是：第一，通过经典分析解，给读者以层流流动中基本燃烧现象的理论分析的清晰概念；第二，给出湍流单相流动、两相流动及燃烧的数值模拟理论、方法和结果。本书试图把经典燃烧理论（如着火及火焰传播理论）和连续介质力学（如有反应流动的基本守恒方程和边界层理论）结合起来，试图把经典分析研究和近年来所发展的数值研究结合起来。虽然涉及燃烧理论和燃烧过程的数值模拟已有许多书，但至今还没有一本书，其目的是为了把这两个领域结合在一起，而且也没有一本书把重点放在湍流两相流动和燃烧这样复杂的问题上。这些问题发生在很多实际工程装置中，例如流体机械、换热器、燃烧室及工业炉中。

全书分为两篇。第一篇是燃烧和气粒两相流动的基础知识，包括多组分有反应流动的基本守恒方程、着火和灭火、层流预混燃烧、液滴与颗粒燃烧、层流边界层中的燃烧及气粒两相流的基础。这部分通过较简明的数学对物理现象进行描述，并在有可能的情况下将分析结果与实验结果作比较。但是，不罗列详细的实验数据和实验方法。

本书的第二篇阐述湍流两相流动及燃烧的数值模拟。这里侧重于阐述与流体流动直接有关的现象，因此只讨论单相湍流流动模拟，湍流两相（气粒两相）流动模拟，以及湍流单相燃烧和湍流两相燃烧模拟。其他的问题，例如辐射传热及污染物生成模拟，流体流动的一般性数值解法与程序编制等，在现有许多书中都能

找到。本书中不仅介绍模型的表述、方程组及其数值解法，而且还讨论这些方法的模拟结果及其应用和评价。

本书可供从事热能工程、工程热物理、流体力学、航天与航空、冶金、化工、核能工程及水利工程等专业的研究人员及其助手使用，也可作为上述各专业的高等院校教师和学生的教学参考书。

书中吸收了清华大学工程力学系两相流动及燃烧实验室的许多重要的研究成果。

作者衷心感谢宁晁、周光炯、吴承康教授对本书所提的宝贵意见。感谢我的同事和学生林文漪教授，李荣先、王希林、张健副教授，黄晓晴博士、洪涛博士、廖昌明博士等，他们在作者的指导下为发展两相流动及燃烧的数值模拟作出了贡献，他们的工作充实了本书的内容。

值本书中文版出版之际，作者感谢科学出版社陈文芳副编审和清华大学工程力学系林文漪教授在百忙中付出巨大努力，将英文版译成中文，使国内广大读者有机会使用本书。

作者热切期望广大读者对本书提出宝贵的批评与建议。

周力行

1994年3月于北京清华园

主要符号表

拉丁字母符号

A	面积	Le	Lewis 数
a	声速; 导温系数	M	分子量
B	指数前因子; 传递数	m	质量
c	经验常数	N	颗粒数总通量
c_d	阻力系数	n	颗粒数密度; 摩尔浓度; 反应级数; Rosin-Rammler 分布律中的指数
c	比热		
d	直径		
D	扩散系数; 宽度	Nu	Nusselt 数
E	活化能	p	压强; 概率密度分布函数
e	内能	Pe	Peclet 数
F	力; 面积	Pr	Prandtl 数
f	混合物分数	Q	热量; 热效应
G	总质量流; 质量流率	q	热流
g	重力加速度; 质量流; 浓度脉动均方值	R	通用气体常数; 颗粒的重量分数
G_a	平均流产生项	r	半径
G_b	浮力产生项	Re	Reynolds 数
H	滞止焓; 高度	Ri	梯度 Richardson 数
h	焓; 高度	R_f	通量 Richardson 数
J	扩散流	S	火焰传播速度; 源项; 表面; 变形率张量
k	湍流动能; 反应率系数		
K	蒸发常数; 平衡常数	s	颗粒直径平方
\mathcal{L}	潜热	Sc	Schmidt 数
L	长度; 空气-燃料比	Sh	Sherwood 数
l	湍流尺度; 长度	T	温度

t	时间
u, v, w	速度分量
V	体积; 漂移速度
w	反应率
x, y, z	坐标
X	摩尔分数
Y	质量分数
Z	组合的质量分数

希腊字母符号

α	过量空气系数
β	当量比
γ	比热比
δ	厚度
Γ	输运系数
μ	动力粘性系数
η, ξ	无量纲坐标
η	混合物分数
θ	无量纲温度
λ	导热系数
ϵ	湍流动能耗散率; 反应度; 黑度系数
ν	运动粘性系数
ρ	密度
σ	Stefan-Boltzmann 常量
ϕ	通用因变量
Φ	体积分数; 耗散能
τ	剪应力; 时间尺度
ψ	流函数

下角标

A	空气; 灰
c	原煤; 对流; 反应
ch	反应; 焦炭
cr	临界
d	扩散
e	有效的; 出口; 蒸发
E	灭火
F, fu	燃料
f	火焰; 流体
g	气体
h	焦炭; 异相的
hr	异相反应
i	着火
i, in	初始的; 入口
$iner$	惰性气体
i, j, k	坐标方向
k	第 k 组颗粒相
l	层流的; 液体
m	混合物; 平均值; 最大值
n	法向的
ox	氧; 氧化物
p	颗粒; 一次的
pr	燃料产物
r	辐射
s	s 组分; 表面; 二次的
st	稳态的
t	切向的
T	湍流的
v	挥发分
0	初始的

w 壁面；水分
 ∞ 无穷大；来流

上角标

— 时平均
~ Favre 平均
' , " 脉动分量
* 特征值
• 时间变化率

目 录

主要符号表

导论	(1)
1. 湍流气粒两相流动	(1)
2. 燃烧	(1)
3. 燃烧理论	(3)
4. 湍流气粒两相流动与燃烧数值模拟	(4)

第一篇 燃烧与气粒两相流动的基础

第一章 多组分有反应流动的基本方程	(11)
1.1 多组分气体的基本关系式	(11)
1.2 化学反应动力学的基本定律	(15)
1.3 基本守恒方程	(17)
1.4 多组分有反应流动中相似准则	(25)
1.5 Zeldovich 转换和广义 Reynolds 比拟	(25)
1.6 分界面上边界条件和 Stefan 流	(27)
第二章 着火与灭火	(36)
2.1 问题的背景	(36)
2.2 量纲分析	(37)
2.3 非定常处理法与 Lagrange 坐标系处理法	(39)
2.4 定常处理法与 Euler 坐标系处理法	(55)
2.5 零值梯度分析法	(59)
第三章 层流预混燃烧	(65)
3.1 基本方程及其性质	(65)
3.2 两区近似解	(67)
3.3 精确解	(72)
3.4 本生灯的实验结果	(73)

第四章	液滴与固体燃料颗粒燃烧	(76)
4.1	有燃烧和没有燃烧的液滴蒸发	(76)
4.2	液滴蒸发的实验结果	(84)
4.3	固体燃料颗粒燃烧	(88)
4.4	煤的热解挥发	(89)
4.5	碳的异相反应	(92)
4.6	焦炭粒燃烧	(94)
4.7	煤粒燃烧	(106)
第五章	层流边界层中的燃烧	(110)
5.1	基本方程	(110)
5.2	有表面反应的层流边界层	(111)
5.3	同时有蒸发和气相燃烧的层流边界层	(117)
5.4	炽热惰性平板层流边界层中的着火	(121)
第六章	气粒两相流动	(126)
6.1	问题的背景	(126)
6.2	基本特性	(126)
6.3	基本方程	(133)
6.4	单颗粒动力学	(141)
6.5	分析解	(145)
第二篇 湍流气粒两相流动与燃烧的模拟		
第七章	单相湍流流动的模拟	(153)
7.1	问题的背景	(153)
7.2	Reynolds 时均方程组	(154)
7.3	Reynolds 应力及通量输运方程组	(155)
7.4	各向同性湍流粘性系数模型—— $k-\epsilon$ 模型	(157)
7.5	Reynolds 应力(通量)输运方程模型和代数应力 (通量)模型	(167)
7.6	可压缩湍流流动的模拟	(175)
第八章	湍流气粒两相流动的模拟	(177)

8.1	湍流气粒两相流动的时均方程组	(177)
8.2	单流体模型 (无滑移模型)	(179)
8.3	颗粒轨道模型	(184)
8.4	多流体模型 (多连续介质模型)	(196)
第九章	湍流气相与两相燃烧的模拟	(208)
9.1	时平均反应率	(208)
9.2	有限反应率的 EBU-Arrhenius 模型	(209)
9.3	简化的 PDF-快速反应模型	(211)
9.4	简化的 PDF-局部瞬时平衡模型	(216)
9.5	简化的 PDF-有限反应率模型	(220)
9.6	关联矩封闭模型	(225)
9.7	湍流两相燃烧的模拟	(227)
第十章	工程装置中实际流动与燃烧过程的模拟	(232)
10.1	液雾与空气两相流动中的混合及蒸发	(232)
10.2	旋风分离器中气粒两相流动	(234)
10.3	液雾燃烧	(240)
10.4	煤粉空气两相流动与燃烧	(248)
10.5	结束语	(267)
	参考文献	(275)
	索引	(279)

导 论

1. 湍流气粒两相流动

大多数工程装置中的流体流动，例如水力渠道或气体管道中的流动，换热器、流体机械、化工反应器、燃烧室及工业炉中的流动，由于工程装置的几何尺寸、流速范围以及各种障碍或扩张的存在导致流动分离，都是湍流流动，而且往往是复杂的湍流流动，例如回流、旋流和有浮力的流动等。况且，纯液体或纯气体的流动是很少见的，工程中大部分实际的流体流动是含有颗粒、液滴或气泡的。

含有大量固体颗粒或液滴的气体流动称作气粒流动，或两相流动，或多相流动，或悬浮流动。“两相”或“三相”这个词就其热力学含义而言，是指气固、气液、液固或气液固系统，但是就动力学的含义而言，不同速度、不同温度和不同尺寸的颗粒或液滴可以是不同的相。因此，我们使用“多相”这个术语。在自然界和工程中，气粒两相流动是多种多样的，例如云和雾（雨滴），含灰尘的空气，含沙的河流，气力（水力）输送，粉尘分离与收集，液雾喷涂，干燥与冷却，液雾和煤粉燃烧，等离子体化学，流化床，炮膛中火药粒的流动，蒸汽轮机中蒸汽-水滴两相流动，气体-纤维两相流动，等等。

在很多情况下，湍流气粒两相流动中还有传热与传质现象。有时还有化学反应发生（放热或吸热效应），甚至还会有静电效应（含极细粉尘的气流在金属或塑料管道中运动）或电磁效应（等离子体喷枪中或磁流体发电机中含颗粒的两相流动）。

本书讨论的对象是有传热、传质及化学反应的湍流两相流动。

2. 燃烧

“燃烧”这个词意味着伴有强烈放热和光辐射现象的化学反应。这些反应，首先是固体燃料（非金属或金属）、液体燃料或气

体燃料的氧化反应。但是，氯化反应、氟化反应、氮化反应和分解反应，如果有强烈放热效应的话，也可以看作燃烧。实际上，燃烧是一个伴有传热、传质和化学反应的气相流动或两相流动的复杂过程。通常，可按燃烧前燃料与氧化剂未混合或预混合，把燃烧分成扩散燃烧和预混燃烧两种。反应流动有两种极限情况，这取决于所谓第一 Damköhler 数 D_1 ，它被定义为流动时间（停留时间）与反应时间之比。如果 D_1 远小于1，或者反应很慢并且与流动过程比较可以忽略不计，这种反应流动是冻结流动。如果 D_1 远大于1，或者反应极快并且接近于平衡状态，那么该种反应流动是平衡流动。对于大部分有燃烧的流动， D_1 大约为1的数量级。燃烧有两种极限情况，这取决于所谓第二 Damköhler 数 D_2 ，它是扩散时间与反应时间之比。如果 D_2 比1大得多，或者扩散比起反应慢得多，将会出现一种扩散燃烧。如果 D_2 比1小得多，或者反应比起扩散慢得多，将会出现一种动力燃烧。例如，气体扩散火焰无疑是扩散燃烧，但是气体预混火焰却是扩散-动力燃烧。固体表面燃烧不是扩散燃烧（在高压、高温或低相对速度下），就是动力学燃烧（在低压、低温或高相对速度下）。

“火焰”这个词在其科学意义上可以定义为温度和浓度发生急剧变化的区域。火焰的重要特性之一是，火焰区可以自动地传播。火焰传播速度是火焰相对于冷的新鲜可燃混合物的速度，它等于火焰在一端封闭的长管中传播时观察到的火焰位移速度与混合物流动速度之差。实验中已观察到火焰传播的两种可能出现的工况：火焰速度为0.2—1m/s 的缓燃和火焰速度约为3000m/s 的爆震。火焰的其他特性是碳的生成、火焰辐射（由于碳或烟颗粒），以及在层流预混火焰中出现浓度高达 10^{12} 离子/cm³的电离现象。

绝热火焰温度是预混绝热燃烧系统的理想最终温度，这时不是燃料（对于过量空气系数大于1的贫混合物）就是氧（对于过量空气系数小于1的富混合物）完全耗尽。过量空气系数定义为实际的空气-燃料比与二者化学当量比的比值。绝热火焰温度将在化学当量的空气-燃料比值下达到最大值。

3. 燃烧理论

虽然人类发现和利用火大约始于100万年前,而发现和利用电则只不过在300年前,但是电磁理论在19世纪已建立,而燃烧理论的发展却慢得多.直到18世纪中叶,人们对燃烧仍然一无所知,因为燃烧是一个非常复杂的物理和化学的过程.在 Lavoisier 之前,人们认为含有“燃素”的物质才会燃烧.在1756年至1777年期间, Lavoisier 和 Lomonosov 在他们各自实验观测基础上首先提出燃烧是一种氧化反应的论点.19世纪由于热化学和化学热力学的发展,曾把燃烧装置作为热力学体系,考察其初态、终态间的关系,预报燃烧热、产物组分平衡浓度及绝热燃烧温度.本世纪初 Semenov, Lewis 和 Von Elbe 发展了燃烧反应动力学,指出燃烧是可以由许多活化中心加速的链式反应.基于反应与传热传质之间相互作用的概念的燃烧的定量或数学理论,包括着火与灭火、火焰传播、湍流燃烧,首先是由 Semenov, Zeldovich, Frank-Kamenetskii, Damköhler, Karlovitz, Shelkin, Shetinkov, Summerfield 等人于本世纪30年代至40年代间首先建立的.接着,液滴和炭粒的燃烧理论由 Varshavskii, Godsave, Penner, Spalding, Paleev, Predvoditelev, Khitritin, Hottel, Pomerantsev 等于50年代至60年代间进行了研究.50年代末至60年代初, Von Karman 和钱学森提出了称之为空气热化学或化学流体力学(反应流体力学)这一术语,它是燃烧理论与连续介质力学的结合.随后, Penner, Williams, Marble, 董道义,程心一和本书作者也沿着这一方向进行了研究.从70年代初开始,在计算流体力学和计算传热学已取得成就的基础上,发展了燃烧的计算机模拟或数值模拟.在这个领域中作出贡献的有 Spalding, Launder, Patankar, Crowe, Pratt, Swithenbank, Smoot 等人.在中国,本书作者及其同事们对湍流气粒两相流和燃烧的数值模拟进行了10年以上的系统研究并作出了贡献.

应当指出,燃烧激光诊断技术的发展开辟了燃烧理论发展史

上的一个新纪元。这项技术使人们有可能用非接触法测量有燃烧条件下的气体速度、温度和气体组分浓度，并且能够用数值推算来对照这些结果。显然，同时运用基本理论、数值模拟和激光诊断，我们对燃烧现象会有更深入的认识。可以预计，燃烧理论的发展将从纯描述性或半经验的科学走向严密定量的科学，使之更有效地为工程设计服务。

4. 湍流气粒两相流动与燃烧的数值模拟

在有燃烧或没有燃烧的湍流气粒两相流动中，两相内部始终存在质量、动量和能量的传递，而且两相之间还有质量、动量和能量的相互作用。此外，由于工程装置几何形状的复杂性，纯粹的平面二维或轴对称流动是少见的，但三维流动（如带有二次风孔或切向进风口的柱形燃烧室等）却屡见不鲜。因此，我们研究的实际工程问题中的对象往往是三维湍流两相流动与燃烧。

由上面讨论的湍流气粒两相流动与燃烧的特点可以看出，要发展严密的科学设计方法，靠经典的分析解方法是不可能的。解决问题的唯一途径是用近代计算流体力学和大型数字计算机为基础的计算机模拟或数值模拟理论和方法，亦即建立各种条件下的基本守恒方程组，加以封闭，并不加简化地直接用数值方法求解这些非线性联立偏微分方程组。自60年代末至今的近20多年内，确实已成功地发展了这种理论和方法，并且已用于工程设计中。目前，已有可能预报极为复杂的流动，例如大型工业炉内三维湍流回流及旋流有反应的两相流动，得到与实验相对照的合理模拟结果。将多维湍流气粒两相流动与燃烧的数值模拟全面引进工程设计中已不会是十分遥远的事了。

本世纪60年代以前，优化或放大设计的方法主要是基于实验或直观经验方法，或者用模型实验再加上相似律整理数据的半经验设计方法。例如，目前锅炉炉膛设计中通用的热力算法或者冷却水工程中通用的工程算法都属于后一种。虽然这类经验方法到目前、甚至在将来都有用，因为它们可以给出简便可行的定

性估算，但是由于这些方法经验性强、适用范围窄，因此就不能适用于广泛变化的条件。气粒两相流动与燃烧数值模拟，是70年代以来现代数字计算机、数值分析学、计算流体力学、计算传热学和计算燃烧学最新发展的结果。这是工程设计中强有力的工具，它使我们有可能预报流体机械、换热器、燃烧器、工业炉、等离子发生器、河流和大气环境中的真实过程，得到工程设计所需的详细数据。因此，它能把实验减少到最低限度，节省所需的经费、时间和人力。可以毫不夸张地说，不能不承认这是一场工程设计上的革命。

对“模拟” (modeling 或 simulation) 人们有不同的理解。30年前甚至更早，不少人把模拟仅仅理解为按照相似律制造小实验模型的方法，或者也包括不符合相似律的用水流或气流定性显示的实验方法。毫无疑问，这类方法不仅在过去和现在，而且在将来，也不失其重要作用。然而，它们却有明显的缺陷。例如，要使模型与原型中极其复杂的湍流有反应两相流动完全相似，至少需要维持十几个相似准则相等。31年前，本书作者就曾由湍流有反应两相流动基本守恒方程出发，严格地得到这一结论。实际上，要维持所有这些准则相等是无法办到的。因此，我们往往不得不去掉一些假设为次要的准则，只保留少数假设为重要的准则，这就使得实验模型充其量只能在定性上与原型相似，甚至在很多情况下会在定性上失真。

数学模拟的方法在很早以前就被提出过。较早提出的模型有零维模拟、一维模拟和零维加一维的板块模拟。所谓零维模拟，就是不考虑流体力学的热力学模拟。假设温度和浓度空间分布均匀。它常用于内燃机中，在化工上称之为良好搅拌反应器 (well-stirred reactor, WSR) 模型。这类模型只能按热力学原理对给定的初态找出终态 (如总体传热和燃烧的外部特性与给定条件间的关系)。例如，内燃机输出功率与曲柄角度间的关系，但是它无法预报出工程装置内速度、温度和浓度的分布细节。因此，只能给出定性的数据，或者只能主要依赖实验给出半经验的定量数据。

一维模拟可以预报出各变量沿轴线方向上的变化，假定横截面上各变量分布均匀。这类模拟虽然比零维模拟可以给出更多的信息，但是这种方法所模拟的仍是简化了的流动、传热与燃烧过程。这类模拟有时叫平推流（栓塞流）（plug flow）模拟。进一步发展的半经验模拟是板块模拟，其中把整个流场分成若干个平推流部分（代表前向流动）和良好搅拌反应器部分（代表回流流动）。这类模拟实际上就是零维加一维模拟。显然，无论是一维模拟还是板块模拟，都不能给出整个流场的定量信息。对于某些工程装置中接近于很简单流动的情况，如边界层或射流型流动，有时采用经验剖面的积分法来模拟，称之为积分近似模拟，可看成是“一维半”或“准二维”模拟。

本书所讨论的数值模拟指的是多维模拟，即二维或三维的微分模拟。这种模拟是基于计算流体力学、计算传热学和计算燃烧学的原理，用数值方法而不经任何简化直接求解非线性联立的质量、动量、能量及组分等守恒偏微分方程组。只有这种模拟才能预报流动、传热与燃烧过程的细节，即给出气粒两相整个流场中各变量的时空分布，因此，可用于优化及放大设计。事实上，这种模拟已成为并将继续成为工程设计的有力工具。

根据多年探索和研究的经验，数值模拟大致可分成如下若干步骤：

(1) 建立基本守恒方程组

数值模拟的第一步是由流体力学、传热学、燃烧学、热等离子体动力学及其他科学的基本原理出发，建立基本守恒方程组，即连续方程、动量方程、能量方程、组分方程、湍能方程等。这些方程所构成的联立非线性偏微分方程组，不能用经典的分析法，而只能用数值方法求解。对于单相层流流动的基本方程组已很少有争议了，但是对湍流流动，特别是湍流两相流动，由不同的模拟理论出发，往往基本守恒方程组也有不同的形式。因此，如何构造基本方程组，首先就成为模拟理论的重要部分。