

化工流体

力学

戴干策
陈敏恒

编著

HUAGONG

LIUTILIXUE

化学工业出版社

化工流体力学

戴干策 陈敏恒 编著



化学工业出版社

内 容 提 要

本书在阐明流体力学基本原理和计算方法的基础上,着重论述化工设备中流体运动的规律。

全书共12章,前6章是基础部分,主要内容包括流体流动的守恒原理,理想流体的无旋及有旋运动,粘性流体运动的基本方程,边界层理论,湍流理论等;后6章是与化工过程及设备密切有关的各种实际问题,如管流,射流,湍流与混和,气泡、液滴、薄膜的运动,非牛顿流体运动等。

本书介绍各种原理和方法时,分析了它们在化工中的应用,并力求从物理意义上说清问题。每章均编选了较多的、有一定实际价值的例题,并附演习题及参考资料。

本书可供物理、力学、化学等专业从事科学研究和工程技术的人员参考使用,同时可作为化工院校研究生、本科生的参考教材。

化 工 流 体 力 学

戴干策 陈敏恒 编著

责任编辑:施承薇

封面设计:任 辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行经销

△

开本 $850 \times 1168^{1/2}$ 印张28字数764千字

1988年4月第1版 1988年4月北京第1次印刷

印 数 1—5,000

ISBN 7-5025-0082-0/TQ·44

定 价 6.80元

序

流体力学是一门重要的工程学科，它的应用几乎遍及国民经济的各个部门，近年来出版了许多流体力学著作，但着重论述流体力学在化学工程中应用的，据我们所知现在还没有。有鉴于此，我们写了化工流体力学这本书，它的主要内容是在阐明流体力学基本原理、计算方法的基础上，探讨流体力学在化学工程中的应用，目的在于为化学工程提供理论基础。

在化学工程发展的初期，本世纪30~40年代，流体流动只是化学工程中的一个单元操作，其内容主要是一维运动，阻力计算，流量测量等。随着化工技术的发展，愈益要求阐明化工过程的机理，分析影响设备性能的因素，因而需要了解化工设备中流动的详细情况。于是不仅物理化学而且流体力学成了化学工程的重要理论支柱。50年代末期以来，研究化工设备中的流动特点以及流动对化工过程的影响，蓬勃开展起来，几乎涉及到了所有化工过程及设备。概括起来说，目前流体力学在化学工程中的应用主要有：

① 传递过程理论：以流体流动的原理和计算方法为基础，确立传热、传质过程的规律；

② 混和理论与实践：以流体力学理论为指导，阐明混和机理，探讨流动、混和与反应的关系，发展混和的有效手段。

③ 多相流动：在均相流动的基础上，研究包含颗粒、气泡、液滴、薄膜等多相流动系统，为化工分离过程奠定理论基础；

④ 非牛顿流体流动：非牛顿流体是一种有特异行为的流体，有着完全不同于牛顿流体的规律，以非牛顿流体为对象的单元操作在迅速发展着，因而化工过程必须同时以非牛顿流体力学为基础。

本书在内容选择以及有关应用问题的讨论上，也大体上着眼于这些方面。在编写中，我们注意体现以下特点：

① 着重物理概念，兼顾数学计算

流体力学中解决流动问题的传统解法是数学解析法，因此，历来在流体力学书籍中应用较多较深的数学是很自然的。但解析方法解题有其局限性，同时考虑到一部分读者对这种方法不熟悉，本书侧重从物理概念上阐明问题的形成及结果的物理意义与应用，而对解题过程则仅介绍若干典型方法。

② 理论与应用结合

流体力学着重阐明基本流动现象及其规律，最常涉及的流场的几何形状都比较简单，如平板、圆球、圆柱等。而化工设备的结构却很复杂，本书不是停留在对这些简单流场的讨论，而是以此为基础，通过设备模型的建立，论述其应用。

本书12章的前6章是基础部分，主要介绍流体力学的基本概念、基本方程和基本理论；后6章讨论与化工有关的各种实际问题。每一章除了阐述基本原理和计算外，还选编了若干实例，用以说明这些原理的应用。

本书初稿曾在华东化工学院等院校和研究所的本科生和研究生中试用过。

在编写和改写过程中经过多次讨论修改，参加讨论修改的有任德呈、范自晖、张至英、黄发瑞、姚一平、董师孟等同志，任德呈同志并协助对全稿进行整理，作了大量细致的工作。黄发瑞、姚一平两同志编选、演算了全部演习题，陈建新同志帮助制图，焦国君等同志参加抄写。

天津大学力学系舒玮教授审阅了本书的一、四、六、七、八、九等章节，华东化工学院方图南副教授审阅了本书的二、三、十二等章节，他们提出了许多宝贵的意见，特别是舒玮教授，对本书的编写给予了多方面的关心和帮助。

总之，本书从编写到出版，是经过许多同志的工作，大家共同努力来完成的，对他们的辛勤劳动和支持，我们表示衷心的感谢。

由于作者水平和经验的限制，谬误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

戴千策 陈敏恒

目 录

第一章 流体运动概述	1
1.1 流体的物理属性	2
1. 连续介质假定	2
2. 压缩性	4
3. 粘性, 牛顿流体	4
动量传递, 流体中的内摩擦 (4); 牛顿粘性定	
律 (6); 粘度 (7)	
4. 粘性, 非牛顿流体	10
幂律流体 (11); 粘塑性流体 (12)	
5. 导热性, 导热系数	13
傅立叶定律 (13)	
6. 扩散性, 扩散系数	14
费克定律 (15); 传递现象的类似 (15)	
7. 表面张力	16
毛细压力 (16); 表面张力与温度及浓度的关系,	
表面活性物质 (17)	
1.2 流动空间的几何特征, 流动问题分类	20
1. 流体运动问题的分类	20
外部问题 (绕流) (20); 内部问题 (管流) (20)	
2. 化工设备中的流动问题, 典型化工设备	23
搅拌槽 (24); 塔设备 (24); 固定床 (25); 流化床 (26)	
1.3 流体运动的动力学条件, 流动状态	27
1. 化工设备中流动的发生	27
2. 两种流动状态: 层流与湍流	27
流动状态的判别, 雷诺数 (29)	
1.4 流体运动的表示方法	31
1. 拉格朗日法	31

流体坐标 (31); 轨线 (32)	
2. 欧拉法	33
流线 (33); 流管 (35); 随体导数 (35)	
3. 定常流动与非定常流动	37
4. 一维流动	38
1.5 流体运动规律研究的基本途径	43
1. 理论解析法	43
2. 实验观测法	44
3. 数值计算法	45
本章主要符号	47
演习题	47
参考书刊	49
第二章 流体静力学	50
2.1 静止流体的应力状态	50
1. 表面力和彻体力	50
2. 内力和外力	51
3. 应力、应力状态	51
4. 静止流体的应力状态, 静压力的特性	53
2.2 流体静力学基本方程	54
1. 流体平衡微分方程	54
2. 流体静力学基本方程	56
3. 静压力和位能——静力学基本方程中各项的物理意义	57
4. 旋转圆筒中液体的静压力分布	57
5. 可压缩流体中的静压力分布	59
2.3 流体静力学基本方程的应用	61
1. 压力的表示方法	61
2. 压力的测量	62
3. 静力学基本方程的其它应用	71
本章主要符号	74
演习题	74
参考书刊	76
第三章 流体流动中的守恒原理	77
3.1 应用守恒原理的控制体和控制面方法	77

3.2 物质守恒	78
1. 流量与平均速度	78
2. 一维流动的物料衡算式——一维连续性方程	79
3.3 能量守恒	82
1. 流动系统的机械能衡算——伯努利方程	82
2. 粘性流体的机械能衡算	84
3. 可压缩流体的机械能衡算	87
4. 伯努利方程的物理意义和几何意义	88
5. 伯努利方程的应用	89
重力射流 (90); 缩脉 (90); 压力射流 (91); 驻点压力 (92)	
3.4 动量守恒	97
1. 管流中的动量守恒	98
2. 动量守恒定律的应用	98
弯管受力 (99); 管的突然扩大 (102); 多孔板的机械能损 耗 (104); 射流吸入 (106)	
3.5 守恒原理在流量测量中的应用	109
1. 毕托管	109
2. 孔板流量计	113
3. 文丘里流量计	118
4. 转子流量计	121
本章主要符号	125
演习题	125
参考书刊	131
第四章 理想流体的无旋及有旋运动	132
4.1 流体微团运动的分析	132
1. 流体微团运动的分解	133
2. 流体微团变形和旋转运动的特征量	138
线变形(长度变化)(139); 角变形(切变率) (140); 旋转(141)	
4.2 理想流体运动的基本方程	145
1. 连续性方程	145
2. 理想流体的运动方程——欧拉方程	148
3. 欧拉运动方程沿流线的积分——伯努利方程	149
4. 无旋条件下欧拉运动方程的积分	151

4.3 二维运动, 流函数	156
1. 流函数的定义	157
2. 流函数方程	159
有旋运动 (159); 无旋运动 (159)	
3. 流函数的应用	159
4.4 涡旋运动	163
1. 涡旋运动的性质	163
涡线, 涡管 (164); 涡管强度 (164); 速度环量及其与涡管 强度的关系 (165); 涡管强度守恒原理 (168)	
2. 环量守恒定理, 涡管强度保持性定理	169
凯尔文环量守恒原理 (169); 涡旋的产生与消失 (170); 涡管强度保持性定理 (171)	
3. 涡旋的形成, 叶片旋转时的尾涡	171
间断面、涡旋的形成 (171); 平板后面的间断面 (172); 搅拌 槽中涡轮桨叶片后的尾涡 (173)	
4.5 无旋运动	174
1. 无旋运动的特性	175
速度势, 势流 (175); 二维无旋运动中流函数与势函 数的关系 (176)	
2. 势流基本方程	176
3. 基本无旋流	178
均匀流 (178); 径向流: 点源和点汇 (178); 环流 (179)	
4. 理想流体绕物体的运动, 绕圆柱、球的流动	182
兰金体的运动, 源汇叠加, 偶极流 (182); 绕圆柱体的 流动 (186); 圆柱形测速管原理, 三孔探针 (190); 绕球 的流动 (196)	
5. 附加质量, 视质量	197
4.6 有环量的无旋流动	198
1. 有环量的绕圆柱体流动	199
升力的产生 (199); 速度分布 (199); 压力分布 (201); 柱体 表面上的作用力——升力 (202); 马格努斯效应及其应用 (202)	
2. 兰金涡	203
速度分布 (203); 压力分布 (203)	

4.7 旋风分离器中的涡旋运动	205
1. 速度分布	206
切向速度 (206); 径向速度 (208); 轴向速度 (208)	
2. 压力分布	208
3. 旋风分离器中的双层旋转流结构	209
本章主要符号	211
演习题	211
参考书刊	213
第五章 粘性流体运动的基本方程	214
5.1 粘性流体的运动方程	215
1. 粘性流体运动的应力状态	215
应力分量 (215); 应力对称 (216)	
2. 以应力表示的运动方程	217
3. 广义牛顿定律	218
切应力与应变率的关系 (219); 法向应力与应变率	
的关系 (219); 粘性流体中的压力 (220)	
4. 粘性流体的运动方程——奈维-斯托克斯方程	220
5. 粘性流体运动时的初始条件和边界条件	221
5.2 粘性流体运动的性质与方程求解	222
1. 粘性流体运动的性质	222
2. 运动方程的求解	224
准确解 (224); 近似解 (231); 数值解 (231)	
5.3 湍流运动的基本方程, 雷诺方程	232
1. 湍流运动的主要特征	232
不规则性 (232); 有旋性, 三维性 (233); 扩散性 (233); 耗能	
性 (234); 连续介质运动 (235)	
2. 湍流运动研究的基本途径	235
3. 湍流运动的瞬时速度与时均速度	235
4. 时均连续性方程	238
5. 雷诺方程	239
6. 动量传递与湍流附加应力	240
7. 湍流附加应力与时均运动的关系, 湍流运动的半经验理论	241
涡流粘度 (242); 混合长理论 (243)	

5.4 能量方程	246
1. 能量方程	247
2. 粘性流体中的能量耗散	249
3. 湍流能量方程式	251
5.5 扩散方程	254
1. 层流扩散方程	255
2. 湍流扩散方程	257
5.6 流体动力相似与因次分析	258
1. 流动现象相似	258
2. 相似准数	260
3. 流体动力相似原理	264
4. 因次分析	264
物理方程的齐次性和无因次化(264); 变量的无因	
次化 (265); 待定函数的无因次化 (266)	
5. 相似理论和因次分析方法的应用	269
本章主要符号	270
演习题	270
参考书刊	273
第六章 绕物体的运动	274
6.1 低雷诺数下绕物体的流动, 斯托克斯公式	275
1. 低雷诺数下绕球运动的特征	275
速度分布 (275); 压力分布 (275); 流线 (276)	
2. 阻力公式——斯托克斯公式	277
阻力系数(279)	
3. 斯托克斯公式的进一步讨论	280
非球形物体 (280); 颗粒间相互作用 (280); 器壁的影响 (282)	
4. 斯托克斯公式的应用	283
5. 极慢运动方程及其求解	283
绕球流动(285)	
6.2 高雷诺数下的绕流, 边界层	290
1. 边界层概念, 平面上的边界层	291
边界层的发展, 厚度的增长(292); 边界层中的流	
动状态 (292); 边界层中的流型 (293); 边界层厚度的估	

计 (298); 摩擦阻力 (294)	
2. 表面上的边界层, 分离现象	296
具有压力梯度的边界层(296); 边界层分离, 涡旋 的形成 (297); 分离条件 (298)	
6.3 圆柱绕流, 涡旋诱发振动	299
1. 流型随雷诺数的变化	299
低雷诺数下的绕流 (299); 中等雷诺数下的绕流 (300); 大雷诺数下的绕流(301)	
2. 卡门涡街	303
单圆柱体后涡旋的发射频率与运动速度(303); 管排 涡旋发射(303)	
3. 涡旋诱发振动	304
4. 涡旋流量计	305
6.4 绕圆球流动, 数值方法的应用	305
1. 球坐标系的涡-流函数方程	305
2. 有限差分解法	307
计算框图 (308); 网格设计 (309); 基本有限差分公式 (310); 涡旋传输方程的差分计算(312); 流函数方程的差 分计算(313)	
3. 差分计算的稳定性和收敛性	314
4. 初始条件和边界条件	316
5. 流线、涡线的确定, 球表面压力分布和阻力系数的计算	317
6. 计算结果, 绕球流动的特征	320
6.5 流体阻力的理论与实践	321
1. 阻力产生的机理及其影响因素	321
摩擦阻力 (321); 压差阻力 (322)	
2. 阻力公式, 阻力系数	323
绕圆球流动的阻力系数 (324); 绕圆柱流动的阻力系数 (331)	
3. 减小阻力的措施	332
6.6 沿平板的流动, 边界层方程及其求解	334
1. 边界层方程	334
量级比较 (334); 边界层方程 (338); 边界条件 (339)	
2. 不可压缩流体纵向绕平板时的层流边界层	341

问题的形成 (341); 相似解 (342); 相似变换 (342); 级数解或数值解 (343); 摩擦阻力 (345); 位移厚度, 动量厚度 (346)	
3. 边界层动量积分关系式	347
6.7 绕物体流动时的湍流边界层	353
1. 湍流边界层的多层结构	353
粘性底层 (354); 对数律层 (355); 过渡层 (356); 内层的统一表达式 (356); 外层速度分布 (358); 粘性顶层 (358)	
2. 平板湍流边界层	359
边界层厚度 (359); 阻力系数 (360); 粘性底层 (361)	
3. 具有压力梯度的湍流边界层	362
速度分布 (262); 切应力分布 (364)	
6.8 伴有传热、传质时的绕流, 传热、传质边界层	365
1. 传质边界层	365
传质边界层方程 (366); 传质边界层的厚度 (367); 传质边界层的积分关系式 (367)	
2. 传热边界层	373
本章主要符号	381
演习题	381
参考书刊	384
第七章 管内流动	386
7.1 圆管层流流动	387
1. 进口段流动	387
进口段边界层的发展 (287); 进口段的流动状态 (388); 进口段长度 (389); 进口段压降 (389)	
2. 定常圆管层流运动	389
简化运动方程法 (390); 薄“壳”流体动量平衡法 (391); 速度分布 (393); 平均速度 (394); 阻力公式 (394); 壁面上的切应力 (395); 哈根-泊稷方程的应用 (395)	
3. 周期性圆管层流运动	397
低频脉动 (398); 高频脉动 (398)	
4. 套管环隙中的轴向流动	400
同心套管 (400); 偏心套管 (402)	
7.2 圆管湍流运动	406

1. 光滑管的实验研究结果	406
实验阻力公式 (406); 速度分布的七分之一次方定律 (407)	
2. 光滑管内湍流通用速度分布与一般阻力定律	409
速度分布 (410); 阻力定律 (410)	
3. 管内涡流粘度分布	413
涡流粘度与速度分布的关系 (414); 涡流粘度的分布 (414)	
4. 粗糙管中的速度分布与阻力定律	417
绝对粗糙度和相对粗糙度 (417); 粗糙管实验结果 (417); 速度分布与阻力公式 (418); 相当砂粒糙度, 工业管道的实验结果 (421)	
5. 光滑管、粗糙管通用阻力公式	423
7.3 非直管、非圆管中的流动	426
1. 弯曲管, 分离现象	427
2. 弯曲管, 第一类次流	429
3. 弯曲管中流动的数值计算结果	431
次流 (431); 轴向流 (433); 压力分布 (433)	
4. 弯管阻力计算	434
5. 非圆管中的流动, 第二类次流, 水力直径	435
层流时矩形管中流量与压降的关系 (435); 湍流, 第二类次流 (436); 阻力计算, 水力直径 (437)	
7.4 变截面管中的流动	441
1. 两相交平壁间的流体定常运动	443
简化方程, 确立边界条件 (443); 特性参数 $\mathcal{R}$ (445); 收缩流 (446); 扩张流 (447)	
2. 二维扩张管中的流动状态	447
无明显分离的流动 (449); 不稳定的分离流 (449); 充分发展的分离流 (449); 射流状态 (450)	
3. 无分离时扩张管中速度分布的特征	451
4. 变截面管阻力计算	453
摩擦阻力的计算 (455)	
7.5 流量分配管中的流体流动	456
1. 分配管中流动的总平衡方法	457

动量衡算法 (458); 能量衡算法 (458); 侧流 (458)	
2. 分配管计算	460
3. 管内流量变化时摩擦阻力的计算	461
7.6 管内流动与传热	464
1. 变物性时的管内流动	465
粘性对流动的影响 (465); 密度对流动的影响 (467)	
2. 进口段内的传热特点	470
3. 管内层流传热	472
方程的建立 (472); 恒热流 (473); 流体平均温度 (474); 传热系数 (474); 恒壁温 (474)	
4. 管内湍流传热——热量传递与动量传递的类似律	475
热量与动量传递类似的物理基础 (475); 雷诺类似律 (477); 普朗特类似律 (479); 温度分布 (480)	
本章主要符号	480
演习题	482
参考书刊	483
第八章 射流	485
8.1 自由射流	486
1. 自由射流的发展	486
起始段 (流动发展区) (487); 过渡段 (488); 基本段 (488)	
2. 射流运动状态: 层流与湍流	488
3. 卷吸机理	488
4. 自由射流特性参数的估计	489
自由湍流中的混合长 (490); 射流宽度的增长 (491); 射流中心速度的衰减 (491)	
5. 自由射流的实验观测	492
势流核心区的长度 (492); 射流宽度 (492); 速度分布 (493); 速度比尺和长度比尺 (493); 卷吸速度与卷吸系数 (495); 密度差的影响 (496)	
8.2 复杂射流	499
1. 并流射流	499
速度分布 (500); 强射流与弱射流 (500); 速度比尺与长度比尺 (501); 势流核心区的长度 (503)	

2. 错流射流	505
基本流型 (506); 偏折射流边界 (508); 轴向速度衰减 (509);	
速度分布 (510); 倾斜射流 (512); 逆流射流 (512)	
3. 管内射流	518
基本流型 (518); 环流区的判别 (519); 中心速度衰减 (523);	
外流速度变化 (523); 压力变化 (524)	
4. 射流撞击与径向壁射流	527
撞击区流型 (527); 撞击区中心速度衰减 (528); 径向压力分	
布 (529); 壁射流 (531)	
8.3 射流计算	534
1. 平面射流	534
运动方程 (534); 涡流粘度 (536); 相似变换 (537); 速度分	
布 (538); 射流宽度 (538); 射流流量 (539)	
2. 圆射流	539
8.4 射流的工程应用	547
1. 颗粒悬浮	547
最低动量 (548); 颗粒大小与流动状态 (548)	
2. 传热强化	551
本章主要符号	552
演习题	553
参考书刊	555
第九章 湍流与混和	557
9.1 层流稳定性与湍流起源	557
1. 流动稳定性问题	558
2. 剪切流的不稳定性	558
3. 层流向湍流状态的转变	560
4. 影响状态转变的因素	562
压力梯度 (562); 表面弯曲, 离心力影响 (563); 壁面加热或	
冷却 (563); 吸入 (565); 表面粗糙度 (568)	
5. 线性稳定性理论——小扰动法	566
基本原理 (566); 稳定性方程 (567); 拇指曲线 (570); 平板边	
界层的计算结果 (571)	
6. 猝发现象与拟序结构	572

湍剪流内层结构 (573); 猝发过程 (574); 猝发现象与热量和物质的传递 (575); 搅拌槽中湍流的拟序结构 (576)	
9.2 湍流的物理模型	577
1. 涡旋拉伸	577
2. 能量梯级	581
3. 大雷诺数湍流	581
充分发展的湍流的物理图象 (581); 能量耗散 (582); 脉动速度 (583)	
9.3 湍流的统计特性	584
1. 湍流脉动的简化分析: 均匀性和各向同性	585
均匀湍流 (585); 各向同性湍流 (585)	
2. 湍流强度	586
3. 相关函数和相关系数	587
相关系数 (587); 欧拉空间相关 (588); 各向同性湍流中的纵向相关和横向相关 (590); 欧拉时间相关 (591); 三阶相关 (591)	
4. 相关函数的性质和湍流尺度	592
积分尺度 (595); 微分尺度 (595)	
5. 湍流能谱	599
能谱函数 (599); 相关系数与能谱函数之间的相互关系 (600); 泰勒假定 (602); 波谱 (603); 能谱函数与湍流尺度 (603); 横向相关与能谱函数的关系 (604); 湍流能谱表示湍流特征 (605); 一维与三维谱 (606)	
9.4 各向同性湍流	607
1. 各向同性湍流的动力学方程——卡门-霍华斯方程	608
2. 能谱方程	609
3. 各向同性湍流中的能量耗散	611
4. 能谱曲线的一般形状	612
5. 能谱区段	613
低、中波数区 (614); 较高波数区 (含能涡旋区) (614); 最高波数区 (统计平衡区) (615); 惯性子区 (616); 湍流特征雷诺数 (617)	
6. 能谱方程的封闭——海森堡解	618
9.5 湍流脉动的测量方法和若干测量结果	621