

Principle and Numerical Simulation of Transport Processes

传递过程原理 及其数值仿真

周 萍 周乃君 蒋爱华 陈红荣 编著

 中南大学出版社

Principle and Numerical Simulation of Transport Processes

传递过程原理 及其数值仿真

周 萍 周乃君 编著
蒋爱华 陈红荣

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

传递过程原理及其数值仿真/周萍等编著. —长沙:中南大学出版社,2006.8

ISBN 7-81105-340-3

I. 传... II. 周... III. 化工过程-传递-计算机仿真
IV. TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 094568 号

传递过程原理
及其数值仿真

周萍 周乃君 编著
蒋爱华 陈红荣

-
- 责任编辑 邓立荣
 责任印制 文桂武
 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
 印 装 长沙市华中印刷厂
-

- 开 本 787×1092 1/16 印张 27 字数 686 千字
 版 次 2006年9月第1版 2006年9月第1次印刷
 书 号 ISBN 7-81105-340-3/TP·018
 定 价 38.00 元
-

图书出现印装问题,请与出版社调换

前 言

为了加强动力工程及工程热物理学科研究生的专业基础和数值仿真方法的训练,本书在一般工程流体力学、传热与传质学课程的基础上,进一步阐述了动量、热量与质量三种传递现象的基本原理和工程应用,并专门介绍了对上述过程进行数值仿真的基本原理和方法。本书是作者多年教学实践和科学研究经验的总结。

参加本书编写工作的有:梅炽(第1章)、周乃君(第2章~第7章)、陈红荣(第8章~第10章)、蒋爱华(第11章~第14章)、周萍(第15章~第22章),另由谢锴提供了第22章的算例资料,杨莺参加了第10章书稿的整理,裴海灵参加了第2章~第7章书稿的整理。全书由周萍负责审阅定稿。

在本书的编写过程中,作者参阅并引用了国内外近年来发表的相关著作和文献中的一些成果和数据,在此特向各位相关作者致以真挚的谢意。

限于作者的学识水平和能力,书中肯定有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者
2006年5月

目 录

第一编 流体动量传递原理

1 绪 论	(3)
2 流体基本性质	(7)
2.1 流体的分散性与连续介质模型	(7)
2.1.1 流体的分散性	(7)
2.1.2 连续介质模型	(7)
2.2 流体的压缩性与不可压缩模型	(8)
2.2.1 流体的压缩性	(8)
2.2.2 不可压缩模型	(9)
2.3 牛顿粘性定律与粘性系数	(9)
2.3.1 牛顿粘性定律	(9)
2.3.2 粘性系数	(10)
2.4 牛顿流体与非牛顿流体	(11)
2.5 质量力与表面力	(13)
2.6 层流与湍流	(14)
3 流体输运方程	(15)
3.1 随体导数	(15)
3.1.1 拉格朗日描述法	(15)
3.1.2 欧拉描述法	(16)
3.1.3 随体导数	(16)
3.2 雷诺输运定理	(18)
3.2.1 控制体与系统	(18)
3.2.2 雷诺输运定理	(18)
3.3 连续性方程	(20)
3.4 应力张量	(21)
3.5 动量方程	(22)
3.6 变形率张量与亥姆霍兹定理	(24)
3.7 本构方程	(28)

3.8	纳维 - 斯托克斯方程	(29)
3.9	运动方程的无量纲化与相似率	(31)
4	N-S 方程的层流基本解	(34)
4.1	不可压缩流体运动方程组的封闭性与定解条件	(34)
4.1.1	基本方程组的封闭性讨论	(34)
4.1.2	定解条件	(34)
4.1.3	求解方法	(35)
4.2	库埃特流动(二维平面内层流)	(36)
4.3	泊肃叶流动(二维轴对称层流)	(38)
4.4	斯托克斯流动(平板启动)	(39)
4.5	西门茨流动(平面驻点流动)	(41)
4.6	低雷诺数流动(圆球绕流)	(43)
5	边界层流动	(47)
5.1	边界层流动的基本特征	(47)
5.2	边界层运动方程	(50)
5.3	边界层方程的相似性解	(52)
5.4	平板边界层的布拉修斯精确解	(55)
5.5	轴对称绕流边界层的级数解法	(57)
5.6	边界层积分方程解法	(60)
5.6.1	边界层动量积分方程	(60)
5.6.2	边界层能量积分方程	(61)
5.6.3	边界层方程的积分近似解法	(62)
6	湍流与湍流理论	(66)
6.1	湍流现象与湍流的形成	(66)
6.1.1	粘性运动的有旋性与湍流特征	(67)
6.1.2	层流的稳定性	(68)
6.1.3	猝发现象与涡的迁移	(70)
6.1.4	湍流的拟序结构	(71)
6.2	湍流描述方法	(72)
6.2.1	时间平均法	(73)
6.2.2	空间平均法	(73)
6.2.3	系综平均法	(74)
6.3	湍流运动基本方程	(74)
6.3.1	连续方程	(75)
6.3.2	动量方程(雷诺方程)	(75)
6.3.3	能量方程	(76)
6.3.4	涡量方程	(78)

6.4	湍流模式理论	(79)
6.4.1	湍流运动基本方程的封闭性讨论	(79)
6.4.2	湍流模式理论分类及特点	(79)
6.4.3	涡粘度与布辛涅斯克假设	(80)
6.4.4	0 方程模式(普朗特混合长度理论)	(80)
6.4.5	单方程模式(湍动能方程)	(81)
6.4.6	双方程模式($k-\varepsilon$ 模式)	(82)
6.4.7	重整化群(RNG)模型	(83)
6.4.8	雷诺应力与代数应力模型简介	(84)
7	几种典型湍流问题的半经验解法	(86)
7.1	混合长度与流速分布律	(86)
7.2	射流与尾流	(88)
7.2.1	基本特征	(88)
7.2.2	相似解法(平面射流)	(91)
7.3	圆管内湍流	(93)
7.3.1	时均运动方程式	(94)
7.3.2	流速分布率	(95)
7.3.3	光滑管流动阻力	(96)
7.3.4	粗糙管流动阻力	(97)
7.4	平壁湍流速度边界层	(99)
7.4.1	基本方程	(99)
7.4.2	分区特征	(100)
7.4.3	壁面律	(100)
7.4.4	速度边界层	(101)
7.4.5	层流-湍流组合边界层	(103)

第二编 热量传递原理

8	热扩散	(108)
8.1	热扩散基本理论	(108)
8.1.1	傅立叶导热定律	(108)
8.1.2	热传导过程的能量平衡	(114)
8.1.3	齐次问题与非齐次问题	(116)
8.2	稳态导热	(116)
8.2.1	一维情形	(116)
8.2.2	多维情形	(123)
8.3	非稳态导热	(130)

8.3.1	集总热容系统的非稳态导热	(130)
8.3.2	无界区域内的一维非稳态导热	(132)
8.3.3	用 Laplace 变换法求解非稳态导热问题	(138)
8.3.4	非齐次导热问题的处理	(139)
8.3.5	相变导热问题	(142)
9	对流换热	(144)
9.1	对流换热的基本概念	(144)
9.1.1	热边界层	(144)
9.1.2	表面传热系数与边界层厚度的关系	(145)
9.1.3	Nu 数的物理含义	(146)
9.2	对流换热问题的数学描述	(146)
9.2.1	对流换热情况下的能量平衡	(146)
9.2.2	能量方程在坐标系下的表现形式	(149)
9.2.3	典型层流情况下的主导方程	(150)
9.2.4	湍流情况下换热的能量方程	(152)
9.3	外部强迫对流换热	(153)
9.3.1	相似解法及相似解	(153)
9.3.2	近似解法	(162)
9.4	内部强迫对流换热	(165)
9.4.1	充分发展段的层流换热	(165)
9.4.2	管内湍流换热	(168)
9.5	自然对流换热	(173)
9.5.1	相似解法	(173)
9.5.2	积分方程解法	(178)
9.5.3	封闭空间内的自然对流	(180)
10	辐射传热	(183)
10.1	热辐射基本概念和固体表面辐射性质	(184)
10.1.1	热辐射能量的描述	(184)
10.1.2	黑体辐射特性和规律	(186)
10.1.3	固体表面辐射性质	(188)
10.2	固体表面间的辐射换热	(195)
10.2.1	角系数	(195)
10.2.2	角系数的计算	(197)
10.2.3	漫灰体表面辐射换热计算	(201)
10.2.4	非漫、灰表面辐射换热计算	(209)
10.3	介质中热辐射	(213)
10.3.1	介质热辐射基本概念与描述方法	(213)

10.3.2	辐射传递方程	(216)
10.3.3	辐射能量方程	(218)
10.3.4	辐射边界条件	(220)
10.3.5	一维灰介质辐射传递方程精确解	(222)
10.3.6	辐射传递方程的近似解法	(224)

第三编 质量传递原理

11	质量传递的机理	(233)
11.1	传质的基本概念	(233)
11.1.1	传质过程及其特征	(233)
11.1.2	混合相的物质浓度和成分	(234)
11.1.3	物质流流速	(235)
11.1.4	物质通量	(235)
11.2	菲克(Fick)第一定律	(236)
11.3	扩散系数	(237)
11.3.1	气体的扩散系数	(238)
11.3.2	液体扩散系数	(238)
11.3.3	固体扩散系数	(238)
11.4	质量传递微分方程	(239)
11.4.1	二元扩散中的质量守恒微分方程一般形式	(240)
11.4.2	质量传递微分方程的几种简化形式	(242)
12	扩散传质	(244)
12.1	一维稳态扩散传质	(244)
12.1.1	等摩尔(分子)逆向扩散	(244)
12.1.2	A组元通过呆滞组元B(或惰性介质)的扩散	(245)
12.1.3	边界上的扩散和化学反应	(247)
12.1.4	主体相内有一级化学反应的稳态传质	(249)
12.1.5	气体通过固体层的扩散——气体渗透	(250)
12.1.6	气体通过多孔介质的扩散	(251)
12.2	二维稳态扩散传质	(252)
12.3	非稳态扩散传质	(253)
13	对流传质	(255)
13.1	浓度边界层与表面传质系数	(255)
13.2	对流传质机理与模型	(257)
13.2.1	湍流扩散概念	(257)
13.2.2	界膜传质模型	(258)

13.2.3	渗透理论与表面更新模型	(259)
13.2.4	薄膜 - 渗透理论	(261)
13.3	对流传质微分方程与传质相似准数	(262)
13.3.1	组分守恒方程(传递方程)	(262)
13.3.2	传质相似准数	(263)
13.4	层流下的质量传递	(264)
13.4.1	平板表面上层流传质控制方程	(264)
13.4.2	平板表面间层流传质的近似解	(265)
13.4.3	管内层流传质	(267)
13.5	平板壁面上湍流传质的近似解	(268)
13.6	对流传质的实验关系式	(269)
13.6.1	流体与单个球形颗粒之间的传质	(270)
13.6.2	流体通过固定床	(270)
13.6.3	流化床内流体与颗粒表面间传质	(271)
13.7	对流传质与对流传热的类似	(271)
14	综合传质	(275)
14.1	相际平衡与平衡浓度	(275)
14.2	双膜传质理论与贯通传质系数	(276)
14.2.1	通过相界面传质的特点与双膜模型	(276)
14.2.2	通过相界面的传质速率与贯通传质系数	(277)
14.3	相界面有化学反应时的传质——炭粒燃烧过程	(279)
14.3.1	反应 - 传质速率	(279)
14.3.2	燃烧时间	(280)
14.4	平板层流边界层中同时进行动量、热量与质量传递的过程	(281)
14.5	动量与质量同时传递的过程	(286)
14.6	传热与传质同时发生时的综合传递过程	(288)
14.6.1	界面附近的温度分布与热量平衡	(289)
14.6.2	湿球温度与湿球系数	(289)
14.6.3	干燥速率与干燥时间	(291)
14.6.4	强制平板流中的传热传质过程	(293)

第四编 传递过程的数值仿真

15	导 言	(299)
15.1	描述传递过程的通用控制方程	(299)
15.1.1	质量守恒方程	(299)
15.1.2	动量守恒方程	(299)

15.1.3	能量守恒方程	(299)
15.1.4	化学组分守恒方程	(300)
15.1.5	湍动能与湍动能耗散率方程	(300)
15.1.6	通用控制方程	(301)
15.2	边界条件与初始条件	(301)
15.3	控制方程的数学分类及其对数值解的影响	(302)
15.3.1	偏微分方程的分类	(302)
15.3.2	双曲型方程	(302)
15.3.3	抛物型方程	(303)
15.3.4	椭圆型方程	(304)
15.4	传递过程仿真中所应用的数值方法	(304)
16	空间区域与控制方程的离散化	(308)
16.1	计算区域的离散化	(308)
16.1.1	区域离散化的实质及其网格种类	(308)
16.1.2	设置节点的两种方法	(310)
16.2	建立离散化方程的有限差分法	(311)
16.2.1	导数的差分表达式	(311)
16.2.2	一维非稳态有源对流-扩散方程的离散	(313)
16.3	建立离散化方程的有限容积法	(315)
16.3.1	控制容积法的实施步骤	(315)
16.3.2	有限差分法与有限容积法的比较	(317)
16.4	建立离散化方程的有限元法	(317)
16.4.1	Galerkin 有限元法	(317)
16.4.2	混合型边界条件	(320)
16.4.3	变分原理	(321)
16.4.4	伴随变分原理	(323)
17	离散方程的数值特性	(326)
17.1	截断误差与相容性	(326)
17.1.1	截断误差	(326)
17.1.2	相容性	(327)
17.2	离散误差与收敛性	(327)
17.2.1	离散误差	(327)
17.2.2	离散方程的收敛性	(327)
17.3	舍入误差与初值问题的稳定性	(328)
17.3.1	舍入误差	(328)
17.3.2	数值解误差的组成	(328)
17.3.3	初值问题的稳定性	(329)

17.3.4	非稳态系统的稳定性准则	(320)
17.3.5	Lax 等价定理	(333)
18	扩散问题	(334)
18.1	一维稳态导热问题	(334)
18.1.1	一维稳态导热方程的离散化	(334)
18.1.2	界面上当量热导率的确定方法	(335)
18.1.3	界面上连续性要求的说明	(336)
18.1.4	源项的线性化处理	(337)
18.1.5	离散方程的系数与代数方程组的收敛性	(337)
18.1.6	边界条件的处理	(338)
18.2	一维非稳态导热问题	(340)
18.2.1	一维非稳态导热方程的离散化	(340)
18.2.2	离散格式的收敛性及其解的物理意义	(341)
18.3	多维非稳态导热问题	(342)
18.3.1	二维全隐式离散方程	(342)
18.3.2	3种二维坐标系中全隐式离散方程的通用形式	(343)
19	对流与扩散问题	(344)
19.1	一维稳态对流与扩散问题	(344)
19.1.1	对流项的中心差分格式	(344)
19.1.2	迎风格式	(345)
19.1.3	精确解	(346)
19.1.4	指数格式	(347)
19.1.5	混合格式	(347)
19.1.6	乘方格式	(348)
19.1.7	a_E 、 a_W 的通用表达式	(348)
19.2	多维对流与扩散方程的离散化及边界条件的处理	(350)
19.2.1	二维对流-扩散方程的离散化	(350)
19.2.2	三维对流-扩散方程的离散化	(352)
19.2.3	边界条件的处理	(353)
19.3	假扩散	(354)
19.3.1	假扩散的含义	(354)
19.3.2	由于一阶导数截差阶数低而引起的假扩散	(354)
19.3.3	流速与网格线倾斜交叉引起的假扩散	(355)
19.3.4	非常数项源项引起的假扩散	(356)
19.4	可以克服或减轻假扩散的格式	(356)
19.4.1	二阶迎风格式	(356)
19.4.2	三阶迎风格式	(357)

19.4.3	QUICK 格式	(357)
19.5	对流 - 扩散方程离散形式的稳定性	(358)
20	求解流场的原始变量法	(360)
20.1	动量方程的源项与特殊性	(361)
20.1.1	动量方程的源项	(361)
20.1.2	动量方程的特殊性	(361)
20.2	交错网格	(362)
20.3	交错网格上动量方程的离散	(363)
20.3.1	动量离散方程	(363)
20.3.2	交错网格界面上参数的确定	(364)
20.4	压力与速度的修正	(365)
20.4.1	速度修正值的计算公式	(365)
20.4.2	压力修正方程	(366)
20.4.3	压力修正方程的边界条件	(366)
20.4.4	速度修正值计算公式与压力修正方程的说明	(366)
20.5	SIMPLE 算法及其发展	(367)
20.5.1	SIMPLE 算法的计算步骤	(367)
20.5.2	SIMPLER 算法	(368)
20.5.3	SIMPLEC 算法	(368)
20.5.4	PISO 算法	(369)
20.6	同位网格上的 SIMPLE 算法	(370)
20.6.1	同位网格上界面流速的插值方法	(371)
20.6.2	同位网格上压力修正方程	(371)
20.6.3	同位网格上 SIMPLE 算法的计算步骤	(372)
21	辐射换热求解模型	(373)
21.1	区域法	(373)
21.2	蒙特卡罗法	(375)
21.2.1	表面之间的辐射换热	(375)
21.2.2	中间介质中的吸收	(376)
21.2.3	中间介质中的辐射方向	(377)
21.2.4	温度与热流的计算	(378)
21.3	离散传播法	(378)
21.4	离散坐标法	(380)
21.4.1	辐射传递方程的坐标离散	(380)
21.4.2	离散坐标的性质及其约束条件	(381)
21.4.3	离散坐标方程的求解	(381)

22 数值仿真方法在工程中的应用	(383)
22.1 化学反应模型	(383)
22.1.1 PDF 模型	(384)
22.1.2 EBU 模型	(384)
22.2 商业软件简介	(385)
22.2.1 商业软件的一般特点	(385)
22.2.2 几个主要 CFD/NHT 商业软件简介	(386)
22.3 工程应用实例:塔式锌精馏炉燃烧室多场耦合数值模拟	(387)
22.3.1 物理模型	(387)
22.3.2 控制方程	(388)
22.3.3 边界条件	(389)
22.3.4 计算结果及其分析	(390)
附录 1 向量代数	(396)
附录 2 张量初步	(400)
附录 3 正交曲线坐标系中的粘性流体力学基本方程组	(403)
附录 4	(412)
附表 1-1 水在一个大气压下不同温度时的粘性系数	(412)
附表 1-2 干空气在一个大气压下同温度时的粘性系数	(412)
附表 1-3 饱和水在不同温度下的导热系数	(412)
附表 1-4 干空气在一个标准大气压下的导热系数	(412)
附表 11-1 气体扩散系数($p=0.1\text{MPa}$)	(413)
附录 11-2 低压气体的 pD_{AB} 值	(414)
附表 11-3 低浓度物质在水中的 D_{AB}	(415)
附表 11-4 物质在有机溶质无限稀释中的 D_{AB}	(416)
主要参考文献	(417)

第一编

流体动量传递原理

1 绪论

从传统工业生产过程到高新技术领域,虽然其具体工艺形式多种多样,技术内容十分复杂,但按其所有过程的基本形态来说,都可以划分为一些基本的单元操作(纯物理性的加工,如流体或粉体输送、多相分离、加热与冷却、蒸发与干燥等)和基本的单元过程(含有化学变化的加工处理,如燃烧、浸出、溶解、熔炼、电解与电积等)。所有这些操作与过程都会涉及到连续介质或物体内部,以及不同物体之间的动量、能量和各种物质组分的迁移。在科技文献中,这些迁移现象被统称为传输现象(Transport phenomena)或传递过程(Transfer processes)。工程应用中主要关心的是这些传递过程的速率大小,或者说传递速率与传递推动力(或传递阻力)之间的定量关系。实际的工程问题中,传递过程常伴随着物质组分间的化学反应,而且是互相耦合发生的。所以也有人将传递过程的速率问题与化学反应速率问题放在一起研究,并称之为速率过程(Rate processes)。

经验证明,在系统地了解和掌握了动量、热量与质量传递过程(或速率过程)的原理与计算之后,对所有具体的单元操作与单元过程就比较容易理解和掌握了。因而,有关传递过程原理的课程很自然地被视为掌握现代科技的钥匙和支柱。

在20世纪70~80年代之前,研究传递过程(或速率过程)多半停留在基本理论或半经验半理论的分析阶段,对有些复杂过程还只能进行纯经验性(或实验性)的归纳和描述(例如对湍流流动、湍流传热与传质等)。另外,对被研究体系内传递量与特征参数(如速度、温度与浓度等),通常只能研究或估算其平均值(集总参数),无法获得关于这些参数在被研究空间与时间上的分布信息,而且得出的平均值数据也只能是一种很粗略的近似。随着现代计算技术的飞速发展,数值仿真方法很快被用于传递过程的深入研究及其内部信息的挖掘。数值仿真方法获得的信息是被研究对象在全时空范围内的微观信息分布和过程动态变化趋势,从而可以对被研究的对象和过程的结构设计和操作进行优化,使研究工作上升到一个更新更高的水平。

本书将数值仿真方法单独列出并放在传递过程一般原理与方法的介绍之后加以比较系统地介绍,这既表明前者对传递过程研究的重要意义和密切关系,同时也是为了强调研究传递过程必须实现数值化与精确化的大趋势。

最后还须指出,在分别学习各种传递过程的原理与方法之前,先从整体上了解一下三种传递过程之间的类似性,将使学习过程收到事半功倍的效果:它可以帮助初学者掌握本课程的知识结构的大框架,还可以有助于将学习某一种传递过程的规律和成果推广到对其他传递现象的理解与把握,从而起到举一反三的作用。

三种传递现象间的类似性表现在其微观机理上的相通性和其数学描述形式上的雷同性。从微观机理上看,三种传递过程都同样地是由以下几种作用支配的:

- (1)连续介质中的分子运动和扩散,如层流粘性(动量传递),固体或层流中的导热(热