近代传递过程原理

江体乾 著

化学工业出版社

近代传递过程原理

江体乾 著

化学工业出版社

（京）新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

近代传递过程原理/江体乾著．—北京：化学工业出版社，2002.3

ISBN 7-5025-3440-7

Ⅰ．近…　Ⅱ．江…　Ⅲ．传递-化工过程　Ⅳ．TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）第 007586 号

近代传递过程原理

江体乾　著

责任编辑：王秀鸾

责任校对：李　林

封面设计：朱晓林

*

化学工业出版社出版发行

（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码 100029）

发行电话：（010）64982530

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32　印张 7¾　字数 204 千字

2002 年 4 月第 1 版　　2002 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3440-7/TQ·1422

定　价：22.00 元

前　言

本书的成书过程经历了十余年的漫长岁月。1984 年的第一稿系根据国务院学位委员会公报（1982 年，第二号）提出的关于“传递过程原理Ⅱ”的要求而编写。第一稿是按照作者当时（1983 年）给研究生开课的讲稿和听课笔记整理而成，由褚家瑛、包锦明分别执笔，但未经作者审阅。此稿用到 1992 年底，由当时任课教师缩编为第二稿。这次付印的为第三稿。

着手准备第三稿时适值世纪之交，这就不能不使人们思考一下，经过一个世纪，客观上究竟有哪些重大变化？传统的化学工程——过程科学形成于 20 世纪之初，那时碰到的物料是水、溶液、空气、二氧化碳、……均为小分子物质，因而，其基础学科，包括动量、热量、质量传递均以小分子物质或牛顿粘性定律（线性方程）为依据。到了 20 世纪中叶，由于聚合物、塑料、人造纤维等工业的崛起以及 20 世纪之末生命科学突飞猛进的发展，打破了小分子物质的一统天下，“三传一反”的对象已不再只是小分子物质了，这就要求人们扩大其基础面以应付当前改变了的局面。因而，学点流变学就成为培养人才素质所必须。

考虑到本书属“过程科学”的基本理论，第三稿趁重编之际，除审订全部留下的内容外，还根据新世纪科学技术的进步和时代的要求，对原有理论进行了全新的评价和增删，适当引入了有关的前沿学术思想，又增加了大分子和含活性物质流体的“三传”内容，称之为“近代传递过程原理”，借以提高读者的专业素质，使其能应付 21 世纪工业的挑战。

本书以广义牛顿流体的动量、热量和质量传递为主要内容，以科学方法论为主线，目的在于提高读者的创新能力和欲望，开阔思路。同时，也有必要的回顾和复习内容，这是为了承上启下之需。

十数年的教学实践证明，本书除可作为过程科学，如化学工程与工艺，的研究生教材外，还可作为石油采输，高分子科学与工程，生物工程，生物医学工程，冶金工程，环境科学与工程，微电子工程，能源、资源工程和生命科学等领域的工程师和研究人员的参考书之用。

本书出版得到华东理大学研究生教育基金的资助，在此对所有帮助过本书成书的同仁和我的学生宋道云、黄树新博士致以衷心的谢意。

本书虽经漫长的成书过程，也做过不少的努力，但是缺点、错误在所难免，希望读者发现时不吝赐教，作者在此预致谢枕。

江体乾

2001 年 9 月 1 日于上海

内 容 提 要

本书简介了直角坐标系中的张量知识，并从流变学的观点介绍了近代流体的分类和表征。在此基础上，动量传递以湍流为中心展开。对流传热和质量传递则尽量将传统牛顿流体和非牛顿流体平行叙述，借以激发读者的创新欲望。由于全书着眼于介绍处理问题的科学方法，因而能增强读者创新的能力。

本书适合作为“化学工程与工艺”等“过程科学”学科的研究生教材。同时，对石油采输、高分子加工、生物工程、生物医学工程、冶金工程、环境工程、能源和资源工程和生命科学等专业的研究人员也是一本很好的参考书，对上述各专业正在做博士学位毕业论文的研究生尤为合适。

目　　录

第一章 绪 论

一、前言

传递现象在自然界和工程技术领域都是普遍存在的。传递过程原理虽然是化学工程的基础理论之一，但它并不仅仅限于化学工程，在众多动力机械工程、制冷工程、冶金工程、生化工程、环境工程、材料工程、生物医学工程以及人体工程中均有体现，因而人们对传递过程的研究兴趣与日俱增。

传递过程原理是从“原理”的高度来研究动量、热量、质量传递的，亦即研究三传的实质和规律性，以及其传递速率及其主要影响因素的变化。三种传递过程用统一的方法进行讨论，力图找出这三种传递过程之间在定性定量的描述以及计算方法上的类似性。这对于理解传递过程的机理亦十分有用，因而它是设备设计、性能研究的基础，也是科技水平提高的基石，所以说，它是化学工程的基础理论之一。

二、近代传递过程原理

化学工程和其他过程工业一样，其发展经历了三个阶段：从1928年第一本单元操作书的出现，直到50年代后期为实验阶段，其特征为多以实验或经验为基础来指导工业生产。1950年以后学科逐步提高，从单元操作中提出了“三传一反”，即动量传递、热量传递与质量传递和反应工程。其实，一反的基础也是三传，三传遂即成为化学工程学科的基础理论之一，另外两个基础理论为：化工热力学和流变学。

值得注意的是，在20世纪20～30年代开始各门学科均以小分子物质或溶液作为研究对象，直到第二次世界大战以后高分子合成

材料的出现，改变了研究对象，即除了传统的小分子外，工程师们还要面对着并不熟悉的高分子物质。现代的化学工程学科已经发展成为多维交叉学科，它已与能源、资源、环境、运输、医药、生物、材料、农业、微电子、生命科学相交叉，其研究对象由小分子扩展到高分子物质，由无活性物质扩展至有活性物质。这就形成了近代传递过程，也是它区别于传统传递过程之处，这是科学发展的必然结果。现代化学工程的另一个特点是，除了实验手段外更多的通过数学模型和计算机模拟研究化工过程的基本规律并利用其他学科新成果以提高开发、设计和产品制造水平。

通过数学模型的解析或计算机模拟开发研究过程基本规律或简称为理论研究的就是传递过程原理；其研究对象除传统小分子外尚包括高分子物质及有活性物质的就是近代传递过程原理。它从公认的最一般的守恒定律出发再结合所论过程的定解条件即初始条件和边界条件，运用各种数学工具，就能将数学模型准确地或近似地解出输入量与输出量之间关系。

本书主要介绍理论研究的方法，扼要介绍近代行之有效的近似计算方法。本书的重点为：①广义牛顿流体的三传原理，②传递过程分析、类似性、传递速率及其影响因素，借以提高处理问题的水平。

三、张量分析初步

由于物理量用张量表示，具有书写简洁，运算方便的优点，特别是表达基本规律的方程式中，张量表示法更加显示其优越性，所以不少理工科专业书籍和文献中张量符号越来越多，这就要求人们学一点张量知识。

本节编入的内容，只求满足本课的需要，不求全面和系统。介绍的张量知识仅限于欧氏空间笛卡和直角坐标系，为最简单、最常用的张量理论，只要具备微积分和线性代数的数学知识就能掌握。

由坐标原点与三条不共面的标架（轴）直线构成的坐标系称为直线坐标系。在直线坐标系中，如果各轴线上单位尺度不相同，称

为仿射坐标系；如果单位尺度相同，则称为笛卡尔原坐标系。在笛卡尔坐标系中，如果各直线轴互相垂直，则称为笛卡系直角坐标系，否则称为笛卡尔斜角坐标系。

通常，以 x_i，$i=1$，2，3 表示三维空间笛卡尔直角坐标系的变量，δ_1，δ_2，δ_3 分别表示三个坐标轴上的单位矢量。

以三维空间为代表所得的定义、定理、计算方法均可推广应用于欧氏 n 维空间，这一原则下面不再重复。

（一）约定求和法

如果在同一项中，某个指标重复出现一次，就表示要对这个指标从 1 到 3 求和。例如在 A_iB_i 中，指标 i 重复出现一次，其含意是:

$$A_iB_i = A_1B_1 + A_2B_2 + A_3B_3 \tag{1-1}$$

i 称为约定求和指标。约定求和指标在展开式中不再出现，因此也称为“哑指标”。显然哑指标的字母可以更换，因为 A_iB_i 与 A_jB_j 的含意是相同的。

例 1 $\dfrac{\partial A_i}{\partial x_i} = \dfrac{\partial A_1}{\partial x_1} + \dfrac{\partial A_2}{\partial x_2} + \dfrac{\partial A_3}{\partial x_2}$

例 2 写出 $A_{ij}B_{ij}$的展开式。

在上式中 i 和 j 都是哑指标，展开式如下

$$\begin{aligned} A_{ij}B_{ij} = {} & A_{11}B_{11} + A_{12}B_{12} + A_{13}B_{13} + A_{21}B_{21} \\ & + A_{22}B_{22} + A_{23}B_{23} + A_{31}B_{31} + A_{32}B_{32} + A_{33}B_{33} \end{aligned}$$

例 3 写出 $A_{ij}B_j$ 的展开式

在上式中 j 是哑指标，i 不参加约定求和，i 称为自由指标，上式的展开式如下

$$A_{ij}B_j = A_{i1}B_1 + A_{i2}B_2 + A_{i3}B_3, \quad i = 1, 2, 3$$

全部写出来是

$$A_{1j}B_j = A_{11}B_1 + A_{12}B_2 + A_{13}B_3$$

$$A_{2j}B_j = A_{21}B_1 + A_{22}B_2 + A_{23}B_3$$

$$A_{3j}B_j = A_{31}B_1 + A_{32}B_2 + A_{33}B_3$$

（二）克罗尼克尔符号

克罗尼克尔符号 δ_{ij}定义为

$$\delta_{ij}=\begin{cases}0, & 当\ i\neq j\\ 1, & 当\ i=j\end{cases}\tag{1-2}$$

由定义可知

$$\delta_{ij}=\delta_{ji}$$

在笛卡尔直角坐标系中

$$\delta_i\cdot\delta_j=\delta_{ij}$$

单位矩阵可表示成:

$$I=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta_{11}&\delta_{12}&\delta_{13}\\ \delta_{21}&\delta_{22}&\delta_{23}\\ \delta_{31}&\delta_{32}&\delta_{33}\end{bmatrix}=(\delta_{ij})$$

采用约定求和法和克罗尼克尔符号将给以后的书写和运算带来很大的方便。现写出以下几个常用的性质和运算:

(1) $\delta_{ii}=\delta_{11}+\delta_{22}+\delta_{33}=3$

(2) $\delta_{im}A_m=A_i$

(3) $\delta_{im}B_{mj}=B_{ij}$

(4) $\delta_{im}\delta_{mj}=\delta_{ij}$

(三) 坐标变换

在不同的坐标系中空间一点的坐标值是不同的,人们关心它们之间的变换关系。本章只讨论笛卡尔直角坐标系间的变换关系。

原坐标系为 $Ox_1x_2x_3$,坐标轴的单位矢量为 δ_1,δ_2,δ_3,P 点的坐标为 x_i,$i=1$,2,3,从 O 点到 P 点的矢径记作 $x_i\delta_i$。新坐标系为 Ox_1',$x_2'x_3'$,单位矢量为 δ_1',δ_2',δ_3',P 点在新坐标系中的坐标为 x_j',$j=1$,2,3,从 O 点到 P 点的向径记作 $x_j'\delta_j'$。下面求 x_j' 与 x_i 间的变换关系。

令

$$\beta_{ij}=\delta_i'\cdot\delta_j\tag{1-3}$$

即 β_{ij}是 Ox_i' 轴与 Ox_j' 轴夹角的余弦，9 个方向余弦可列表表示(表 1-1)。

表 1-1　9 个方向余弦

坐标轴	x_1	x_2	x_3
x_1'	β_{11}	β_{12}	β_{13}
x_2'	β_{21}	β_{22}	β_{23}
x_3'	β_{31}	β_{32}	β_{33}

向径可用两个坐标系表示

$$x_j'\delta_j' = x_j\delta_j \tag{1-4}$$

用 δ_i' 点乘式（1-4）得

$$x_j'\delta_j' \cdot \delta_i' = x_j\delta_j \cdot \delta_i'$$

即

$$x_j'\delta_{ij}' = x_j\beta_{ij} \tag{1-5}$$

所以　$x_i' = \beta_{ij}x_j$，$i = 1，2，3$

即　$x_1' = \beta_{11}x_1 + \beta_{12}x_2 + \beta_{13}x_3$

$x_2' = \beta_{21}x_1 + \beta_{22}x_2 + \beta_{23}x_3$

$x_3' = \beta_{31}x_1 + \beta_{32}x_2 + \beta_{33}x_3$

式（1-5）表示的坐标变换关系称为正变换，

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{bmatrix} \tag{1-6}$$

称为正变换系数矩阵。

同理，用 δ_i 点乘式（1-4）得

$$x_j'\delta_j' \cdot \delta_i = x_j\delta_j \cdot \delta_i$$

即
$$x_j'\beta_{ji} = x_j\delta_{ij}$$

所以
$$x_i = \beta_{ji}'x_j', \quad i = 1，2，3 \tag{1-7}$$

即
$$x_1 = \beta_{11}x_1' + \beta_{21}x_2' + \beta_{31}x_3'$$

$$x_2 = \beta_{12}x_1' + \beta_{22}x_2' + \beta_{32}x_3'$$

$$x_3 = \beta_{13} x_1' + \beta_{23} x_2' + \beta_{33} x_3'$$

式（1-7）表示的坐标变换关系称为逆变换，

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{21} & \beta_{31} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \beta_{32} \\ \beta_{13} & \beta_{23} & \beta_{33} \end{bmatrix} \tag{1-8}$$

称为逆变换系数矩阵。显然对于笛卡尔直角坐标系，逆变换系数矩阵恰好是正变换系数矩阵的转置矩阵。

如果坐标变换时，坐标原点由 O 移至 O'，位移矢量为 C，与前面的做法类似，可得到如下关系

$$x_1' = x_j \beta_{ij} - C_i' \tag{1-9}$$

$$x_i = x_j' \beta_{ji} + C_i \tag{1-10}$$

其中 C_i' 是 C 在新坐标系中 x_i' 轴上的投影；C_i 是 C 在原坐标系中 x_i 轴上的投影。

由式（1-5），式（1-7）可以导出一个很有用的关系式。

因为 $$x_i' = \beta_{ij} x_j,\quad x_j = \beta_{kj} x_k'$$

所以 $$x_i' = \beta_{ij} \beta_{kj} x_k'$$

当 $i = k$ 时，$x_i' = x_k'$，则

$$\beta_{ij}\beta_{kj} = \beta_{i1}^2 + \beta_{i2}^2 + \beta_{i3}^2 = 1$$

当 $i \neq k$ 时，必有 $\beta_{ij}\beta_{kj} = 0$，则

$$\beta_{ij}\beta_{kj} = \delta_{ik} \tag{1-11}$$

同理，有 $$x_i = \beta_{ji} x_j' = \beta_{ji}\beta_{jk} x_k$$

当 $i = k$ 时 $$\beta_{ji}\beta_{jk} = \beta_{11}^2 + \beta_{21}^2 + \beta_{31}^2 = 1$$

当 $i \neq k$ 时 $$\beta_{ji}\beta_{jk} = 0$$

所以 $$\beta_{ji}\beta_{jk} = \delta_{ik} \tag{1-12}$$

还可以导出

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{21} & \beta_{31} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \beta_{32} \\ \beta_{13} & \beta_{23} & \beta_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

即正变换系数矩阵和逆变换系数矩阵之积是单位矩阵。这是笛卡尔