

# 传递现象相似

夏光榕 冯权莉 编著 陈澄华 审



中国石化出版社

# 传递现象相似

夏光榕 冯权莉 编 著  
陈澄华 审

中国石化出版社

DU38/29/2911

## 内 容 提 要

动量传递、热量传递和质量传递,在传递机理、传递过程和传递结果等方面十分相似,本书旨在介绍这些传递现象及其相似。

本书内容有:动力学物性相似、微分衡算相似、分子传递相似、层流传递相似、湍流传递相似、复合传递相似和三传类比。全书分七章,每章配有适量例题和习题。

本书可作为化工、石化、冶金、轻工、动力、环境和生物医学工程等专业教师、研究生和本科生的教学参考书,也可供相关专业的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

传递现象相似/夏光榕,冯权莉 编著. —北京:中国石化出版社,1997 ISBN 7-80043-654-3

I. 传… I. ①夏… ②冯… III. 化工过程-传递-相似性-研究 N. TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 16500 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外小黄庄 32 号

邮编:100011 电话:(010)64241850

社长:周培荣

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

\*

787×1092 毫米 32 开本 17.75 印张 1 插页 380 千字 印 1—2000

1997 年 4 月北京第 1 版 1997 年 4 月北京第 1 次印刷

定价:27.00 元

## 序

动量、热量和质量传递,在传递的机理、过程、物理-数学模型、边界条件、求解方法和求解结果等方面十分相似。在一定的条件下,三种传递还存在定量关系,即具有类比性。利用相似和类比,可以使某些极其复杂的湍流问题得以解决。例如,用范宁摩擦因子求解湍流场中的传热系数和传质系数;把传质的研究成果应用于传热等。本书的目的是介绍三种传递现象相似和类比。

以“行”排列,是本书的特点。目前,有关三种传递现象的文献,多以“列”排列,即按“传递对象”安排内容,先动量传递,再热量传递,最后质量传递。R. B. Bird 在其名著《传递现象》中,推荐了按“行”排列,即按“传递类型”安排内容,把三种传递相似的内容安排在同一单元,如速度边界层、热边界层、浓度边界层;层流流动、层流传热、层流传质等。两种安排方式各具特点,鉴于本书的读者大多数已具备相当的基础理论,因此采用以“行”排列的方式。

注意到传递的基础理论与数学运算的关系。对一个传递现象的求解,其程序是:对传递现象的物理分析、建立微分方程、给定边界条件、简化数学模型、进行数学运算、求得问题的解。可见,数理方程的建立和求解在传递中至关重要。但是,数学推导是手段,它服从于对三种传递现象相似的理解和应用。必要的推导应当有,本书把某些冗长的推导作为附录。

书中特别强调了定解条件和使用条件。前者是建立数学

物理模型、化简数学模型的重要内容。后者是指某一数学模型适于何种流体、何种流道、何种流型以及是否定常态等。

限于时间和水平，书中定有欠妥之处，望读者予以指正。

本书第一至六章由夏光榕编写，第七章及例题和习题由冯权莉编写，全书由陈澄华审。

作 者

1996. 4. 20

## 主要符号表

### 英文符号

- $A$ ——面积、截面积、传热面积、传质面积、 $m^2$ ；校正值，无因次
- $C$ ——固体比热容， $J/(kg \cdot K)$ ；系统总摩尔浓度， $kmol/m^3$
- $C_D$ ——曳力系数、阻力系数、平均曳力系数，无因次
- $C_{Dz}^0$ ——喷出参数为零时的局部曳力系数，无因次
- $D$ ——直径， $m$
- $D_i$ ——管内径， $m$
- $D_{AB}$ ——组分 A 通过组分 B 的扩散系数， $m^2/s$
- $E$ ——单位质量的总能量， $J/kg$
- $F$ ——力、外合力， $N$
- $F_B$ ——质量力（体积力）， $N$
- $F_d$ ——曳力、摩擦曳力， $N$
- $F_g$ ——单位质量流体所受的重力， $N/kg$
- $F_i$ ——惯性力， $N$
- $F_s$ ——表面力（机械力）， $N$
- $F_{df}$ ——形体曳力， $N$
- $F_{ds}$ ——摩擦曳力， $N$
- $F_x, F_y, F_z$ ——外力在直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的分量， $N$
- $F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}$ ——惯性力在直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的分量， $N$
- $F_{xB}, F_{yB}, F_{zB}$ ——质量力（体积力）在直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的分量， $N$
- $F_{xg}, F_{yg}, F_{zg}$ ——流体所受重力在  $x, y, z$  方向上的分量， $N$
- $F_{xp}, F_{yp}, F_{zp}$ ——压力在直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的分量， $N$
- $F_{xs}, F_{ys}, F_{zs}$ ——净机械力在直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的分

- 量, N
- $G$ ——质量速度、质量通量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $G_A$ ——组分 A 的传质速率,  $\text{kmol}/\text{s}$
- $H$ ——焓,  $\text{J}/\text{kg}$
- $I$ ——湍动强度, 无因次
- $J_A$ ——相对于摩尔平均速度的组分 A 的摩尔通量 (浓度梯度引起的摩尔通量),  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $K$ ——总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 比例系数、常数, 无因次
- $L$ ——长度, m
- $L_e, L_t, L_D$ ——流动、传热、传质进口段长度, m
- $L_y$ ——湍动标度, m
- $M$ ——质量, kg; 摩尔质量 (分子量),  $\text{kg}/\text{kmol}$
- $M_A, M_B, M_m$ ——组分 A、组分 B 的分子量、平均分子量,  $\text{kg}/\text{kmol}$
- $N$ ——组分 A、B 的总摩尔数, kmol; 相对于静止坐标的总摩尔通量,  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $N_A$ ——相对于静止坐标的组分 A 的摩尔通量,  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $N_{Ae}$ ——组分 A 的瞬时传质通量,  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $P$ ——总压力,  $\text{N}/\text{m}^2$ ; 棒条周边长, m; 润湿周边长, m
- $P_c$ ——临界压力,  $\text{N}/\text{m}^2$
- $Q$ ——单位质量吸收的热量,  $\text{J}/\text{kg}$
- $Q_l, Q_0$ ——通过端面  $x=l, x=0$  处的总热量, J
- $R$ ——气体通用常数,  $R=8314.34\text{J}/\text{kmol} \cdot \text{K}$ ; 脉动速度关联系数, 无因次
- $R_A$ ——单位体积中组分 A 生成的摩尔速率,  $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
- $T$ ——温度, 绝对温度, K
- $T_s$ ——壁面温度, K

- $T_c$ ——临界温度, K  
 $U$ ——单位质量的内能, J/kg  
 $V$ ——体积,  $m^3$   
 $W$ ——单位质量所作功, J/kg  
 $X$ —— $x$ 方向上单位质量流体的质量力, N/kg  
 $X_r, X_z$ ——径向轴向方向上单位质量流体的质量力 N/kg  
 $X_\theta$ ——柱坐标方位角或球坐标余纬度方向上单位质量流体的质量力, N/kg  
 $X_\phi$ ——球坐标方位角方向上单位质量流体的质量力, N/kg  
 $Y$ —— $y$ 方向上单位质量流体的质量力, N/kg  
 $Z$ —— $z$ 方向单位质量流体的质量力, N/kg  
 $a$ ——比表面积,  $m^2/m^3$   
 $a_A, a_B$ ——组分 A、B 的质量分数, 无因次;  
 $b$ ——冷凝膜厚度, m  
 $c_A, c_B$ ——组分 A、B 的摩尔浓度,  $kmol/m^3$   
 $c_{AO}, c_{As}$ ——组分 A 在边界层外, 界面处的浓度,  $kmol/m^3$   
 $\bar{c}_A$ ——组分 A 的时均浓度,  $kmol/m^3$   
 $c'_A$ ——组分 A 的脉动速度,  $kmol/m^3$   
 $c_p$ ——定压比热容, J/ (kg · K)  
 $c_v$ ——定容比热容, J/ (kg · K)  
 $d$ ——管径、孔径, m  
 $d_e$ ——当量直径, m  
 $d_o$ ——管外径, m  
 $e$ ——绝对粗糙度, mm  
 $f$ ——范宁摩擦因数, 无因次;  
 $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$ ;  
 $h$ ——对流传热系数 (膜系数),  $W/ (m^2 \cdot K)$   
 $h_x$ ——局部 ( $x$ 处) 的对流传热系数,  $W/ (m^2 \cdot K)$



$h_m$ ——平均对流传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$

$h_2^0$ ——喷出参数为零时的局部对流传热系数,  $w/(m^2 \cdot k)$

$j_A$ ——相对于质量平均速度的组分 A 的质量通量 (浓度梯度引起的质量通量),  $kg/(m^2 \cdot s)$

$j_{Ax}, j_{Ay}, j_{Az}$ —— $j_A$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的分量,  $kg/(m^2 \cdot s)$

$j_A^*$ ——组分 A 的涡流扩散质量通量,  $kg/(m^2 \cdot s)$

$k$ ——导热系数,  $W/(m \cdot K)$

$k_m$ ——平均导热系数,  $W/(m \cdot K)$

$k_0$ ——基准温度下的导热系数,  $W/(m \cdot K)$

$k_c^0, k_c$ ——气相传质系数,  $m/s$

$k_L^0, k_L$ ——液相传质系数,  $m/s$

$k_G^0, k_G$ ——气相传质系数,  $kmol/(s \cdot m^2 \cdot Pa)$

$k_{cm}^0, k_{cm}$ ——平均对流传质系数,  $m/s$

$(k_{cx}^0)^0$ ——喷出参数与零时的局部对流传质系数,  $m/s$

$l$ ——长度,  $m$

$n$ ——系统的组分数, 无因次; 相对于静止坐标的总质量通量,  $kg/(m^2 \cdot s)$

$n_A, n_B$ ——相对于静止坐标的组分 A、B 的质量通量,  $kg/(m^2 \cdot s)$

$p_A$ ——组分 A 的分压,  $N/m^2$

$p_d$ ——动压力,  $N/m^2$

$p_s$ ——静压力,  $N/m^2$

$\bar{p}$ ——时均压力,  $N/m^2$

$p'$ ——脉动压力,  $N/m^2$

$\bar{p}'$ ——脉动压力的时均值,  $N/m^2$

$q$ ——热流速率,  $J/s$ ; 单位宽度的体积流率,  $m^3/(s \cdot m)$

$\dot{q}$ ——单位体积中释放的热速率,  $J/(m^3 \cdot s)$

- $q_x$ ——局部处 ( $x$  处) 的热流速率, J/s  
 $q_r$ ——径向 ( $r$  处) 的热流速率, J/s  
 $r$ ——管半径, m  
 $r_1, r_2$ ——内管, 外管半径, m  
 $r_A$ ——单位体积中组分 A 的生成速率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$   
 $r_o$ ——球体 (或柱体) 的半径, m  
 $r_{\max}$ ——最大流速处距管中心的距离, m  
 $t$ ——温度, K  
 $t_b$ ——主体 (平均) 温度, K  
 $t_c$ ——中心面温度, K  
 $t_f$ ——流体的温度, K  
 $t_m$ ——平均温度, K  
 $t_s$ ——壁面温度, K  
 $t_i, t_a$ ——进出口温度, K  
 $t_0$ ——基准温度、初始温度、边界层外的均匀温度, K  
 $t_w$ ——冷凝壁温度, K  
 $\bar{t}$ ——时均温度, K  
 $t'$ ——脉动速度, K  
 $u$ ——流速, 相对于静止坐标的流体质量平均速度, m/s  
 $u_A, u_B$ ——组分 A、B 相对于静止坐标的速度 (绝对速度), m/s  
 $u_b$ ——主体平均温度, m/s  
 $u_o$ ——边界层外的均匀速度, m/s  
 $u_i$ ——层流内层外缘流速, m/s  
 $u_M$ ——相对于静止坐标的流体摩尔平均速度, m/s  
 $u_{\max}$ ——最大流速, 管中心处流速, m/s  
 $u_x, u_y, u_z$ ——流速在直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的分量, 瞬时流速, m/s  
 $u_r, u_\theta, u_z$ ——流速在柱坐标系  $r, \theta, z$  三个方向上的分量, m/s

$u_r, u_\phi, u_\theta$ ——流速在球坐标系  $r, \phi, \theta$  三个方向上的分量, m/s

$\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ ——直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的时均流速分量,  
m/s

$u'_x, u'_y, u'_z$ ——直角坐标系  $x, y, z$  三个方向上的脉动速度分量,  
m/s

$u_{ys}$ ——在壁面处垂直于壁面方向上的速度, m/s

$u^*$ ——摩擦速度,  $u^* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho}}$ , m/s

$\bar{u}_A$ ——组分 A 的均方根速度, m/s

$\nu$ ——流体的比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$

$W$ ——质量流率, 冷凝液流率,  $\text{kg}/\text{s}$

$x$ ——距平板前缘的距离, m

$x_l$ ——平板厚度之半或由绝热壁算起的厚度, m

$x_c$ ——临界距离, m

$y$ ——距壁面的距离, m

$y_0$ ——平壁间距之半, m

$y_A, y_B$ ——组分 A、B 在气相中的摩尔分数, 无因次

希腊文符号

$\alpha$ ——导温系数 (热扩散系数)

$\beta$ —— $x$  轴与重力方向之间的夹角, rad

$\Gamma$ ——单位周长上液体的质量流率,  $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$

$\delta, \delta_i, \delta_c$ ——速度边界层、热边界层和浓度边界层厚度, m

$\delta_f$ ——虚拟的导热膜厚度, m

$\delta'_c$ ——传质的虚拟层流层厚度, m

$\epsilon, \epsilon_H, \epsilon_M$ ——涡流 (运动) 粘度、涡流热扩散系数、涡流质量扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

$\xi$ ——热边界层厚度与流动边界层厚度之比, 无因次;

$\theta$ ——时间, s; 柱坐标方位角、球坐标余纬度, rad

$\theta'$ ——柱、球坐标系微分衡算中的时间, s

$\lambda$ ——分子平均自由程, nm; 潜热, J/kg

- $\mu$ ——流体的粘度, Pa·s  
 $\mu_B$ ——溶剂的粘度, Pa·s  
 $\mu_L, \mu_G$ ——液体、气体的粘度, Pa·s  
 $\gamma$ ——流体的运动粘度,  $m^2/s$   
 $\rho$ ——流体的密度,  $kg/m^3$   
 $\rho_A, \rho_B$ ——组分 A、B 的密度,  $kg/m^3$   
 $\rho_v, \rho_l$ ——蒸气、饱和液体的密度,  $kg/m^3$   
 $\rho_{AM}$ ——组分 A 的平均密度,  $kg/m^3$   
 $\sigma$ ——表面张力, N/m  
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ —— $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的法向应力分量,  $N/m^2$   
 $\sigma_{AB}$ ——平均碰撞直径, nm  
 $\tau$ ——剪应力、表面应力 (机械应力), Pa; 过剩温度, K  
 $\tau_s$ ——作用于壁面上的剪应力, Pa  
 $\tau_{ix}$ ——局部处 ( $x$  处) 的摩擦应力, Pa  
 $\tau_r$ ——涡流剪应力或雷诺应力, Pa  
 $\bar{\tau}$ ——剪应力的时均值, Pa  
 $\bar{\tau}'$ ——湍流剪应力的时均值, Pa  
 $\bar{\tau}''$ ——总时均剪应力, Pa  
 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ ——作用在与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴相垂直面上  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的法向应力分量, Pa  
 $\tau_{xy}$ ——作用在与  $x$  轴相垂直面上的  $y$  方向上的剪应力分量, Pa (即此应力分量的作用面与  $x$  轴相垂直, 此应力的作用方向与  $y$  轴同向)。  
 $\Phi$ ——单位体积中的功耗、单位体积流体的摩擦热速率,  $J/(m^3 \cdot s)$ ; 球坐标系中的方位角, rad  
 $\psi$ ——流函数,  $m^2/s$   
 $\omega$ ——角速度, rad/s

#### 无量纲参数

$Bi$ ——毕渥数,  $\frac{h(v/A)}{k}$ ; 傅里叶系数

$Fo$ ——傅里叶数,  $\frac{a\theta}{l^2}$

$Le$ ——刘易斯数  $\frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{k}{\rho c_p D_{AB}}$

$Nu$ ——努塞尔数,  $\frac{hd}{k}$

$Nu_x$ ——局部努塞尔数,  $\frac{hx}{k}$

$Nu_m$ ——平均努塞尔数,  $\frac{hL}{k}$

$Pr$ ——普朗特数,  $\frac{\nu}{\alpha}$ ,  $\frac{c_p \mu}{k}$

$Re$ ——雷诺数,  $\frac{\rho u_0 d}{\mu}$

$Re_L$ ——流体在平板上流动的雷诺数,  $\frac{\rho u_0 L}{\mu}$

$Re_x$ ——局部雷诺数,  $\frac{\rho u_0 x}{\mu}$

$Re_{xc}$ ——临界雷诺数,  $\frac{\rho u_0 x_c}{\mu}$

$Re_f$ ——液膜雷诺数,  $\frac{\rho u_0 d_c}{\mu}$

$Sc$ ——施密特数,  $\frac{\nu}{D_{AB}}$ ,  $\frac{\mu}{\rho D_{AB}}$

$Sc_G$ ——气相施密特数,  $\frac{\mu_G}{\rho D_{AB}}$

$Sc_L$ ——液相施密特数,  $\frac{\mu_L}{\rho D_{AB}}$

$St$ ——斯坦顿数,  $\frac{h}{c_p \rho u_0}$

$St_x$ ——局部斯坦顿数,  $\frac{h_x}{\rho c_p u_0}$

$St'$ ,  $St'_x$ ——传质斯坦顿数、局部传质斯坦顿数,  $\frac{k_c^0}{u_0}$ ;  $\frac{k_{cx}^0}{u_0}$

$Sh$ ——局部舍伍德数,  $\frac{k^0 d}{D_{AB}}$

$Sh_x$ ,  $Sh_m$ ——局部舍伍德数、平均舍伍德数  $\frac{k_{cx}^0 x}{D_{AB}}$ ;  $\frac{k_{cm}^0 L}{D_{AB}}$

- $j_H$ ——传热  $j$  因数,  $St \cdot Pr^{2/3}$   
 $j_D$ ——传质  $j$  因数,  $St' Sc^{2/3}$   
 $L^*$ ——无因次长度,  $x/l$   
 $m$ ——相对热阻,  $\frac{k}{hx} = \frac{1}{Bi}$   
 $n$ ——相对位置,  $\frac{x}{x_1}$   
 $c_A^*$ ——无因次浓度差,  $\frac{c_A - c_{A2}}{c_{A0} - c_A}$   
 $c_{Ab}^*$ ——无因次浓度差,  $\frac{c_A - c_{Ab}/k}{c_{A0} - c_{Ab}/k}$   
 $T^*$ ——无因次温度差,  $\frac{t - t_2}{t_0 - t_2}$   
 $T_b^*$ ——无因次温度差,  $\frac{t - t_b}{t_0 - t_b}$   
 $u^*$ ——无因次速度,  $\frac{u_x}{u_0}$ ;  
 $u^+$ ——无因次速度,  $\frac{u}{u^*}$ ;  
 $y^+$ ——无因次距离,  $\frac{yu^*}{\nu}$ ;  
 $\eta$ ——无因次距离,  $y \sqrt{\frac{u^*}{\nu x}}$ ;  
 $f(\eta)$ ——无因次流函数,  $\frac{\psi}{\sqrt{u^* \nu x}}$

# 目 录

## 主要符号表

### 第 1 章 动力学物性相似

1-1 粘度 .....	(1)
1-2 导温系数 .....	(4)
1-3 扩散系数 .....	(6)
1-4 动力学物性相似 .....	(7)
1-5 涡流扩散系数相似 .....	(8)
1-6 动力学物性相似的意义 .....	(10)

### 第 2 章 微分衡算相似

2-1 微分衡算基础 .....	(12)
2-2 连续性方程 .....	(18)
2-3 运动微分方程 .....	(21)
2-4 能量微分方程 .....	(34)
2-5 质量微分方程 .....	(41)

#### 例 题

### 第 3 章 分子传递相似

3-1 分子传递的机理 .....	(53)
3-2 分子传递的物理模型和数学模型 .....	(56)
3-3 定解条件 .....	(58)
3-4 一维定常态分子传递的求解 .....	(64)
3-5 一维定常态分子传递的求解(有内部产生项) .....	(83)
3-6 二维定常态分子传递 .....	(111)
3-7 非定常态流动、导热和分子传递 .....	(128)
3-8 多维定常态导热和分子扩散 .....	(162)

3-9 非定常态一维和多维导热与分子扩散的数值解 和图解法 .....	(172)
----------------------------------------	-------

例题及习题

#### 第4章 层流传递相似

4-1 边界层理论 .....	(228)
4-2 对流传热和对流传质的机理 .....	(232)
4-3 对流传热系数和对流传质系数 .....	(234)
4-4 平壁层流边界层方程 .....	(237)
4-5 边界层动量积分方程 .....	(250)
4-6 平板壁面上层流传热、层流传质的精确解和 近似解 .....	(257)
4-7 管内层流传热和层流传质 .....	(285)
4-8 边界层分离 .....	(295)

例题及习题

#### 第5章 湍流传递相似

5-1 概述 .....	(325)
5-2 湍流条件下的连续性方程和雷诺转换 .....	(338)
5-3 湍流条件下的运动微分方程,普兰特动量 传递理论 .....	(339)
5-4 光滑管和粗糙管中的速度分布及流体阻力 .....	(347)
5-5 湍流条件下的能量方程和传质微分方程 .....	(359)
5-6 流体沿平壁流动时湍流边界层、热边界层和 传质边界层的计算 .....	(364)
5-7 冷凝换热与沸腾换热相似 .....	(379)
5-8 自然对流体系的传热与传质 .....	(406)
5-9 涡流扩散系数与混合长 .....	(418)

例题和习题

#### 第6章 复合传递相似

6-1 伴有化学反应的质量传递 .....	(455)
6-2 同时进行动量、热量和质量传递的过程 .....	(470)



6-3 动量和质量同时传递的过程 ..... (477)

6-4 同时进行热量和质量传递的过程 ..... (480)

例题和习题

### 第7章 三传类比

7-1 三传类比的基本概念 ..... (491)

7-2 定常态、无总体流动的三传类比 ..... (493)

7-3 非定常态的三传类比 ..... (512)

7-4 三传的类比及区别 ..... (514)

例题和习题

### 附 录

附录1 主要物理量的单位换算表 ..... (529)

附录2 柱坐标系的连续性方程推导 ..... (532)

附录3 法向应力的推导 ..... (533)

附录4 误差函数表 ..... (538)

附录5 双曲函数表 ..... (539)

附录6 拉普拉斯变换表 ..... (541)

附录7 空气的热物理性质 ..... (543)

附录8 饱和水的热物理性质 ..... (544)

附录9 干饱和水蒸气的物理性质 ..... (546)

### 参考文献