



TSINGHUA UNIVERSITY

环境流体力学导论

余常昭

清华大学出版社

环境流体力学导论

余常昭

清华大学出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了与环境问题有关的流体力学基本知识。全书共分八章。第一章为流体运动的基本概念和基本方程。第二、三章为紊流(湍流)基础,包括紊动的发生、紊流的描述、紊流的基本方程和紊流模型。第四至第八章依次为扩散理论、剪切流中的离散、射流、浮力羽流和浮射流,分层流,及地下水中的弥散,既有基本理论,也注意介绍在地表水、大气和地下水污染分析中的应用。

本书可作为环境工程、水利工程或其他有关专业的研究生课和大学高年级学生选修课的教材或参考书,也可作为与环境有关专业的科研、教学、工程技术人员的参考用书。

(京)新登字 158 号

环境流体力学导论

余常昭

清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 12 字数: 312 千字

1992 年 10 月第 1 版 1992 年 10 月第 1 次印刷

印数: 0001—3000

ISBN 7-302-01024-2/X · 15

定价: 6.80 元

光华基金会为支持学术专著和研究生教材的出版,给予我社资助,本书即为由光华基金会资助出版的专著之一。

前 言

环境问题是当前和人类生存关系至为密切的一个重要问题。为处理好环境问题需要了解自然环境变迁的规律以及研究保护和改善环境的技术。前者如河道演变、水土流失、洪水和飓风的破坏,后者如水资源和大气污染的监测、评价、及其防治保护措施等,许多工作都和流体运动有关。广义说来,环境流体力学包括研究所有和环境问题有关的流体运动的知识;但从狭义说来,则以其中重要而普遍的部分,即污染物质在各种水域和大气中扩散与输移的规律为主要内容。

废水排放的受纳水域有地面的河流、湖泊、水库和海湾等,有些污染物质还可能渗入到地下水域中,如农田的农药、河道中沉积毒物和放射性物质等都可能向地下入渗。由于流体域性质的不同,影响污染物质扩散输移的因素也各异。如深水湖泊、水库中的水体有温度分层的特点,河口、海湾内可能有密度分层、潮汐和风力的作用,工厂烟囱排出的废气在大气中扩散还会受到大气紊动和地表环境等因素的影响。

另一方面,由于污染物性质的不同,在流体中浓度分布的规律也会变化。例如,热污染中温度的分布受热力学因素的影响,化学污染中污染物质受生化作用在水体中有其生长与衰减的过程,重金属污染中则还有固、液两相和吸附等复杂作用。但无论如何,由于流体运动所导致的对含有物质的扩散、输移作用总占重要地位而需要先行分析清楚,这在排放口近区主要是射流运动性质,在远

• ■ •

区则属随流扩散性质。一般研究常从简单情况出发,先不考虑污染物质的存在对流动的影响,即把它作为一种标志物质即示踪物质来分析,而将污染物质的特性部分另行专门处理。

按此考虑,本书先扼要回顾流体运动的基本概念和基本方程,包括几种重要的简化流动类型的理论。由于紊动和扩散的密切关系,以及近年对环境流动已有不少引用较精确的紊流模型进行分析,故在第二、三章介绍一般基础流体力学或水力学课程很少涉及的紊流基础知识。然后再分章介绍扩散理论、剪切流中的离散、紊动射流(包括浮力羽流和浮射流)、分层流以及地下水中的弥散等方面较专门的基本理论和分析方法,以为分析各类环境流体域中物质的扩散、混合与输移问题的基础。至于有关生化作用和地球物理方面属于其他专门著作的内容则未涉及。

本书曾作为清华大学环境工程系和水利系研究生课的教材,其前版是《环境水力学理论基础》讲义(1984年1月),并曾在1985年联合国教科文组织资助的《水环境中污染物混合输移的分析与计算》继续教育进修班上讲授部分内容,后来课程名称改为环境流体力学,故改用本书名,内容也在教学过程中不断修改和补充。对于在研究生阶段另选流体力学课的学生,第一章和第二、三章的部分内容可以不学,此外还可按学时情况对内容按需要选习。环境流体力学是针对环境问题需要而新设的一门技术基础课程,学科本身还在形成发展中。本书内容的安排与材料的取舍,只是编者目前的看法,其中缺点和错误甚盼读者指正。成书过程中得到夏震寰教授的鼓励,张永良、郝吉明、李玉梁、陆琦等同志均曾提供宝贵意见,谨并致谢。

编 者

1991年3月

主要符号表

本表包括各章通用的主要符号意义,其他局部使用的符号则在出现时说明。

英文符号:

A	断面面积。
a	加速度。
B	比浮力通量(单位质量流体的浮力通量);水面宽度。
B_0	出口起始断面比浮力通量。
b	射流主体段的半厚度;槽底宽度。
b_0	出口起始断面的射流半厚度。
b_c	射流势流核心区的半厚度。
b_m	射流混合区的厚度。
b_e	流速 $u=u_m/e$ 处的射流半厚度。
$b_{1/2}$	流速 $u=u_m/2$ 处的射流半厚度。
C	各种系数;槽流摩阻的谢才系数;断面平均浓度的简写。
C_D	阻力系数。
C_s	断面平均浓度。
c	浓度场的点浓度。
c_m	断面上的最大浓度;射流轴线浓度。
c_0	出口起始断面的浓度。
c_p	浓度矩;定压比热。
c_v	定容比热。
D	直径。
D_m	分子扩散系数。

D_t	紊动扩散系数。
D_{tt}	纵向紊动扩散系数。
D_{tt}	横向紊动扩散系数。
D_{ij}	紊动扩散系数张量。
D_L	纵向离散(弥散)系数。
D_T	横向离散(弥散)系数。
D_h	地下水水力弥散系数。
D'	地下水机械弥散系数。
D_d	地下水有效分子扩散系数。
d	粒径。
E	总能量; 能谱密度; 射流的卷吸率。
Ek	埃克曼数。
e	单位质量流体的内能。
F	力; 单位质量流体的质量力; 分布函数; 函数符号。
F_c	移流扩散方程的源汇项。
F_d	密度弗劳德数。
F_{d_0}	出口起始断面的密度弗劳德数。
Fr	弗劳德数。
f	摩阻系数; 函数符号。
f_i	内界面摩阻系数。
$f(r)$	纵向相关系数。
G	重力。
g	重力加速度。
g^*	折减重力加速度
g_0^*	出口起始断面折减重力加速度。
$g(r)$	横向相关系数。
H	水深。
h	水深。
h_1	二层流的上层水深。
h_2	二层流的下层水深。

h_c	临界水深。
h_0	出口断面起始水深。
h_B	浮力主导的浮射流浮升终点高度。
h_m	动量主导的浮射流浮升终点高度。
I	积分值。
I_w	水面坡度。
i, i_b	槽底纵坡。
i_t	摩阻坡度。
K	综合扩散系数；混合系数。
K_x	纵向混合系数。
K_y	横向混合系数。
k	单位质量流体的紊动动能；波数；渗透系数。
L	长度；特性长度；距离。
L_0	射流起始段长度。
l	普兰特动量传递理论的混合长度。
l_0	出口起始断面的特征长度。
l_Q	动量射流的流量特征长度。
l_m	浮射流综合反映起始浮力和起始动量的特征长度。
l_s	综合反映横流与密度分层的特征长度。
l_w	泰勒涡量传递理论的混合长度。
M	动量通量；扩散质的总质量。
M_0	起始动量通量。
m	比动量通量(单位质量流体的动量通量)。
m_0	起始比动量通量。
N	布伦特-韦伊塞勒频率。
n	频率；槽床糙率；孔隙率。
O	原点。
P	压力；概率。
Pe	佩克立数。
p	压强；概率密度函数。

Q	体积流量(比质量通量); 扩散质通量; 源强度。
Q_0	出口断面起始流量。
Q_E	卷吸流量; 欧拉的时间相关(自相关)。
Q_H	热通量。
Q_{ij}	空间相关。
q	单宽流量。
q^2	三个脉动流速分量的平方和。
q_A	单位面积吸热率。
q_R	单位质量流体吸收辐射热率。
R	流速比(射流出口流速/横流流速)。
R_*	$1/R$ 。
R_{ij}	两随机变量的相关系数。
$R_E(t)$	欧拉的自相关系数。
$R_L(\tau)$	拉格朗日的自相关系数。
Re	雷诺数。
Ri	理查森数。
R_p	浮羽流的理查森数。
Ro	罗斯比数。
R_d	弥散中的阻滞因子。
r	半径; 径距; 径向坐标。
S	变形率张量; 平均稀释度; 分层流体中浮射流的两个综合特征长度之比。
S_m	轴线上稀释度。
s	曲线坐标; 曲线段长度; 熵。
T	温度; 周期。
T_c	断面混合的时间尺度。
T_E	欧拉积分时间比尺。
T_L	拉格朗日积分时间比尺。
t	时间。
U	均匀流的纵向流速。

$u_i (i=1,2,3)$ } 欧拉流场直角坐标系的点流速分量,一般依次为纵向、横
 u, v, w } 向及铅垂向。

u_0, w_0 射流出口断面起始流速。

u_a 横流流速。

u_i 二层流的界面流速。

u_m, w_m 断面上最大流速;射流轴线流速。

$v_i (i=1,2,3)$ 拉格朗日质点速度分量。

V 断面平均流速。

V_1 二层流的上层流速。

V_2 二层流的下层流速。

v 柯尔莫戈罗夫速度比尺。

v_e 卷吸流速。

v_s 摩阻流速。

W 功。

$x_i (i=1,2,3)$ } 直角坐标系的三个正交坐标,一般依次为纵向、横向及铅
 x, y, z } 垂向。

z_m 综合反映浮射流起始动量与横流流速的特征高度。

z_B 综合反映浮射流起始浮力与横流流速的特征高度。

希腊字符号:

α 流体微团邻边夹角;热扩散系数(导温系数);卷吸系数。

β 体积膨胀系数。

γ 重度;两种比热之比(c_p/c_v)。

Γ 速度环量。

δ 边界层厚度。

δ_{ij} 张量算符。

ϵ 单位质量流体的能量耗损率;射流的扩展系数;无量纲密度差
 $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)$ 。

ζ 坐标;浮射流的一个无量纲高度。

η 坐标;无量纲距离;柯尔莫戈罗夫长度比尺。

θ 二层异重流的科立根数。

θ	角度。
κ	紊流的卡门常数。
λ	波长；热传导系数；浓度分布剖面与速度分布剖面的宽度比。
λ_l	紊动的纵向微比尺(纵向耗能比尺)。
λ_s	紊动的横向微比尺(横向耗能比尺)。
Δ_l	紊动的纵向积分比尺。
Δ_s	紊动的横向积分比尺。
Δ_L	拉格朗日扩散长度比尺。
μ	粘滞系数。
$\bar{\mu}$	无量纲流量比；稀释度。
ν	运动粘滞系数。
ν_t	紊动粘性系数(涡粘性系数)。
ξ	均匀流的随流坐标。
ρ	密度。
ρ_1	二层流的上层密度。
ρ_2	二层流的下层密度。
ρ_a	周围环境密度。
ρ_0	出口断面起始密度。
ρ_m	断面最大密度；射流轴线密度。
Σ	应力张量。
σ	标准差, 常数。
σ^2	方差。
σ_k	紊流 k 方程中系数。
σ_ϵ	紊流 ϵ 方程中系数。
τ	时间；剪切应力。
τ_0	槽壁剪切应力。
τ_E	紊动的欧拉时间微比尺。
Φ	耗散函数；射流当地特性参数。
φ	流速势。
ψ	流函数。

ω 角转速。

$\Omega_i (i=1,2,3)$ 涡量(旋度)。

附加符号:

顶标“—”(如 $\bar{u}$) 系综平均值; 时间平均值。

顶标“'”(如 u') 脉动值。

顶标“^”(如 $\hat{u}$) 偏离值(时均值与断面平均值之差)。

顶标“~”(如 $\tilde{c}$) 潮周平均值。

〈 〉(如 $\langle c \rangle$) 断面平均值。

目 录

第一章 流体运动的基本概念和基本方程	1
1.1 描述流体运动的几个概念	1
1.2 运动流体的应力和变形关系,本构方程	5
1.3 连续方程	10
1.4 运动方程	11
1.5 能量方程	15
1.6 基本方程组的封闭问题	19
1.7 有势流动,拉普拉斯方程	20
一、势流特征与拉普拉斯方程	20
二、平面势流	21
1.8 有涡流动,涡量方程	23
1.9 边界层概念与边界层方程	27
一、低雷诺数与高雷诺数的流动	27
二、边界层概念	28
三、边界层的微分方程	30
四、边界层的动量积分方程	31
1.10 小密度差流动,布辛涅斯克近似	32
1.11 旋转流体流动,科里奥利力效应	33
第二章 紊流基础(一)——紊流的发生与紊流的描述	36
2.1 流动的稳定性	36
2.2 紊流的发生过程	39
一、剪切层	40
二、壁面紊流的发生与猝发现象	41

三、自由紊流的发生与相干结构	44
四、充分发展紊流的特性	49
五、紊流的类型	52
2.3 统计平均法	53
2.4 紊动的概率分布	56
2.5 流速的统计矩	59
2.6 紊流脉动量的相关	62
2.7 紊动比尺	64
2.8 涡旋的拉伸与涡旋级串	68
2.9 紊动能谱	72
第三章 紊流基础(二)——紊流的基本方程与紊流模型	78
3.1 紊流的连续方程	78
3.2 紊流的运动方程——雷诺方程	79
3.3 紊流的能量方程	82
一、紊流瞬时流动的能量方程	82
二、紊流时均流动的能量方程	84
三、紊流脉动的能量方程	86
四、紊流边界层中能量的平衡	87
3.4 紊流的涡量方程	91
3.5 紊流模型	93
一、紊流基本方程组的封闭问题与紊流模型的类型	93
二、零方程模型	94
三、一方程模型—— k 方程模型	98
四、二方程模型—— $k-\epsilon$ 方程模型	100
五、其他模型	102
第四章 扩散理论	104
4.1 概述	104
4.2 分子扩散的费克定律, 扩散方程	105
4.3 分子扩散的随机游动分析	107
4.4 移流扩散方程	110
4.5 紊动扩散——拉格朗日法	112

一、单个质点的紊动扩散——泰勒扩散理论	112
二、两质点的相对扩散	116
4.6 紊动扩散——欧拉法	121
一、紊流扩散方程	121
二、紊动扩散系数	124
4.7 关于扩散方程的求解	126
4.8 静止流体中瞬时源和连续源的扩散	128
一、瞬时源的扩散	128
二、连续源的扩散	134
4.9 均匀紊流中的扩散	138
一、均匀紊流中瞬时源扩散的浓度分布	139
二、均匀紊流中连续源扩散的浓度分布	140
4.10 有边界反射的扩散	142
一、固体边界的反射	142
二、大气中扩散的逆温层反射	144
第五章 剪切流中的离散	150
5.1 一维纵向移流离散方程	150
5.2 圆管流动中的离散	154
一、圆管层流中的离散	154
二、圆管紊流中的离散	158
5.3 宽矩形断面明槽流动中的离散	159
5.4 紊流边界层中的离散	162
5.5 非定常剪切流中的离散	166
5.6 平面二维流动中的离散	171
5.7 浓度矩法	172
5.8 天然河流中的离散	175
一、河流中混合的几个阶段	175
二、河流的紊动扩散系数	176
三、河流的纵向离散系数	178
四、感潮河段的离散	183
第六章 射流、浮力羽流和浮射流	187

6.1	概述	187
	一、射流的类型	187
	二、紊动射流的特性	188
	三、射流问题的分析途径	199
6.2	等密度自由紊动射流	201
	一、平面自由紊动射流的动量积分解	201
	二、平面自由紊动射流的微分方程解	208
	三、圆形断面自由紊动射流的动量积分解	211
	四、圆形断面自由紊动射流的微分方程解	215
	五、矩形断面喷口的自由紊动射流	219
6.3	浮力羽流	227
	一、浮羽流的基本方程与求解	228
	二、浮羽流的量纲分析解成果	235
6.4	自由紊动浮射流	238
	一、自由紊动浮射流的积分方程及其数值解	239
	二、自由紊动浮射流的量纲分析解	254
	三、自由紊动浮射流的微分方程 $k-\epsilon$ 模型解	261
6.5	横流中的紊动射流	268
	一、垂直向上射入横流中的等密度圆形断面紊动射流	268
	二、垂直向上射入横流中的浮射流	275
	三、从侧边水平射入横流中的浮射流	278
	四、关于烟囱喷流扩散的补充	280
6.6	分层流体中的紊动射流	283
	一、静止分层流体中的自由紊动浮射流	283
	二、分层横流中的浮射流	289
	三、烟囱喷流浮升高度的经验估算	293
6.7	表面射流	295
第七章	分层流	307
7.1	概述	307
7.2	静止流体的分层与稳定	308
	一、湖泊、水库和海洋中水体的分层	308