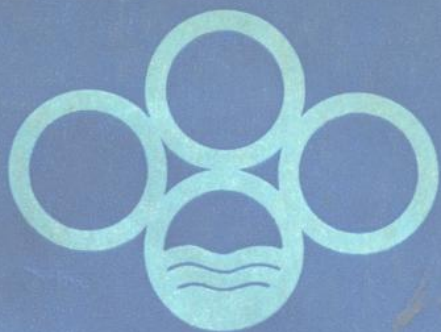




〔美〕L.G.列奇著
《环境系统工程》翻译组译

环境系统工程

水利出版社

50.955
211

环境系统工程

〔美〕L.G. 列奇著

《环境系统工程》翻译组译

50.955
211

水利出版社

内 容 提 要

本书运用系统分析方法阐述和分析自然环境现象、自然环境系统、工程系统和工程处理措施,着重分析环境系统各组成部分之间的相互关系,并大量采用数学分析方法和计算机解法,以便对环境工程系统进行最优设计。

本书重点介绍水环境系统,同时也介绍了大气污染及其控制、固体废物管理和辐射安全等内容。

本书可供从事环境科学工作的科技人员阅读,也可作高等院校土木、水利、给排水专业教学参考书。

[美] L.G.Rich
Environmental Systems Engineering
McGraw-Hill 1973

环境系统工程

[美] L. G. 列奇著
《环境系统工程》翻译组译

*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

150×1168毫米 32开本 13 $\frac{1}{2}$ 印张 355千字

1981年8月第一版 1981年8月北京第一次印刷

印数 0001—5220册 定价 2.00元

书号 15047·4150

译 者 的 话

世界上一切事物，包括宏观世界和微观世界，包括人体本身和人的思维在内，都是无限可分的，因而都可以看成是由许多分事物（分系统或子系统）组成的系统。

系统论是同简化论相对立而提出的一种进行科学研究的认识论和方法论。简化论主张把复杂的事物分解和简化成基本的组成部分和过程，然后对各个组成部分和过程分别进行深入的研究。笛卡儿的“方法论”和伽利略的“分解法”都是属于这种类型。系统论的中心思想或系统观念是“整体大于其各组成部分之和”，主张从整体或系统的角度来研究事物的组成部分和过程之间的相互关系，以更深刻、更正确、更完全地认识事物的本质。

系统工程或系统实践，就是应用系统理论解决实际问题。系统论是系统工程的指导思想或基础理论，系统工程则是实现系统观念的方法论。系统工程是一门横向学科，它是在运筹学、现代控制理论、计算机科学、信息科学、经营管理科学等学科的基础上综合发展起来的一门独立学科。它又和各种生产与科学研究实践相结合，形成各种各样的系统工程，如农业系统工程、水资源系统工程、环境系统工程等等。系统工程从整体的角度协调子系统和子系统之间以及子系统和系统之间的关系，以便对系统实现最优设计、最优控制和最优管理。

在国内，对于系统论和系统工程的研究，还处于初创阶段，环境系统工程则更是一项崭新的课题。为了和从事环境工作的广大科技人员共同学习和认识环境系统工程，我们翻译了美国 L. G. 列奇著的《环境系统工程》一书。

该书运用系统分析的方法，阐述和分析自然环境现象、自然环境系统、工程系统和工程处理措施，着重分析环境系统各组成

部分之间的相互关系，以便对环境工程系统进行最优设计。该书着重介绍水环境系统，但也介绍了大气污染及其控制、固体废料管理和辐射安全等内容。

第一章至第五章和第七章由北京师范大学环境学研究室侯然杰、伍英、陈益秋、车宇瑚、北京农机学院段功强翻译，由陈益秋校阅；第六章由中国科学技术情报研究所尚忆初翻译，第八章至第十四章由清华大学环境工程教研组傅国伟、胡纪萃、张兰生、朱庆爽、蒋展鹏、祝万鹏、钱易翻译，由陶葆楷、陈益秋、傅国伟校阅。

环境系统工程这门学科对我们来说是一项新的课题，因此，译文中肯定会有错误和不妥之处，望读者批评指正。

序

本书的题目是《环境系统工程》，说明了本书的内容。它包括与人类环境有关的广阔课题。书中主要考虑水环境问题，同时也介绍了大气污染及其控制、固体废料管理和辐射安全等内容。把重点放在水环境上，反映了这种环境比较适合于工程控制。

本书应用系统分析方法，阐明和分析环境现象，说明选择和设计控制环境的工程设施的方法。把系统看成一个整体，着重分析其各组成部分之间的相互关系，而不是各组成部分本身。广泛应用系统分析数学和计算机解法。本书是为了工程目的而编写的。

本书不是专题论文或设计手册，而是为工科三、四年级水平的学生写的教科书。本书虽然包括土木工程、给排水课程的许多内容，但也可供其它工程领域的学生使用。内容按思维发展顺序编排，前面几章是为后面讨论的课题打基础。考虑到学生的时间限制，没有把同类型书中能找到的全部课题包括在内，只包括一般认为是最重要的课题。非工程专业的学生也可使用本书，但需要具备工科学生同样的数学基础。

本书的编排考虑到应用时有相当的灵活性。第一章至第三章论述和阐明发生在环境系统中的现象；第四章和第五章讨论自然环境系统；第六章至第十章介绍了工程系统的各种课题；第十一章至第十四章则集中介绍处理方法。本书是为两学期的环境系统工程课设计的，但也可用于具有不同侧重的一学期课程。例如，可以把本书内容组合成：

自然环境系统——第一章至第七章；

水污染控制——第一章至第三章、第五章、第七章和第十章；以及第六章的6-1节和第八章的8-1节；

给水和废水处理系统——第一章至第三章和第十章至第十四章；以及第六章的6-1节和6-5~6-7节。

本书采用了修正的工程因次制度，即把绝对制和重力制合并使用。考虑到米制和英制这两种单位在工程实践中将长期并用，所以作者对这两种单位都使用。由于书中的课题既涉及基础科学，又涉及工程技术，所以符号也是变化的。由于因次制在全书是统一的，所以学生无论对单位或是符号都不会遇到困难。

本书的另一个特点是解题方法。作者不采用通过简单代入数值和常规运算来解公式的例题，而是采用一种比较灵活和比较有效的方法，着重于解决问题的原理。解题方法的形式有：计算机算法，获得资料的途径，应用讨论的方法，或详细阐明书中提出的某些问题。这种方法主要是帮助学生打开思路，但不为他解答应该由他自己解答的问题。在每一章后面附有习题。

本书大部分材料引自其它著作，作者对此表示谢意，作者只是把资料组合在一起，使学生更容易接受。

感谢 B. H. Kornegay, W. E. Castro, J. C. Martin, T. M. Keinath, A. G. Law 和 K. D. Tracy 对本书某些部分进行审阅。

Linvil G. Rich

目 录

译者的话

序

第一章 物理现象	1
1-1 迁移	1
1-2 气体传输	6
1-3 热现象	11
1-4 沉淀	23
1-5 连续流模型	28
第二章 化学现象	37
2-1 溶解平衡	37
2-2 反应动力学	42
2-3 碳酸盐平衡	47
2-4 热化学	55
2-5 胶体行为	58
第三章 生物学现象	67
3-1 有机质	67
3-2 微生物	72
3-3 生长动力学	76
3-4 生化需氧量	80
3-5 嫌气分解作用	83
3-6 光合作用	84
3-7 食物链	87
第四章 生态系统	95
4-1 模型	95
4-2 解析解	97
4-3 时域模拟	99
4-4 连续流微生物系统	102

4-5	农药浓度	105
4-6	富营养化	108
第五章	自然迁移系统	133
5-1	基本模型	133
5-2	溶解氧系统	137
5-3	河流	140
5-4	海湾	149
5-5	空气环境中的迁移	161
第六章	规划因素	167
6-1	水质准则和标准	167
6-2	空气污染及其控制	172
6-3	辐射安全学	177
6-4	环境影响说明书	182
6-5	人口增长模型	190
6-6	区域增长模型	193
6-7	系统的时间-能力扩大	208
第七章	时间序列	213
7-1	趋势、频率和随机成分	213
7-2	时间序列分析	221
7-3	合成流量序列	234
7-4	蓄水引水关系	240
7-5	预测最小流量	244
第八章	管理系统	251
8-1	水质管理	251
8-2	固体废物管理	260
8-3	废水再利用系统	266
第九章	工程输送系统	274
9-1	管网分析	274
9-2	给水配水系统	283
9-3	明渠流	289
9-4	生活污水汇集系统	299
9-5	雨水汇集系统	303

第十章	水处理和再生系统	311
10-1	处理系列	311
10-2	池塘系统	317
10-3	单独住户系统	322
第十一章	用于大颗粒去除系列的方法	326
11-1	隔筛法	326
11-2	沉淀法	327
11-3	沉砂池	333
11-4	初次沉淀池	335
11-5	浮选法	336
第十二章	用于悬浮颗粒去除系列的方法	343
12-1	活性污泥法	343
12-2	生物滤池法	355
12-3	快砂滤池法	359
第十三章	用于溶解物质去除系列的方法	368
13-1	曝气法	368
13-2	炭吸附法	369
13-3	化学沉淀法	370
13-4	离子交换法	376
13-5	膜分离法	379
13-6	消毒法	382
第十四章	用于污泥处理系列的方法	389
14-1	浓缩法	389
14-2	厌气消化	395
14-3	调节法	401
14-4	脱水法	403
14-5	干化与焚化法	407
附 录		410
附录 1	换算到国际制单位的因子*	410
附录 2	解Hazen-Williams方程的诺谟图 ($C = 100$)	415
附录 3	解Manning公式的诺谟图 ($n = 0.013$)	416
附录 4	圆形断面的水力要素	417
附录 5	主要化学元素的原子量和价	417
附录 6	算法结构	418

第一章 物理现象

1-1 迁 移

环境中的迁移是对流和扩散两种现象的结果。虽然在自然环境中这两种现象都在起作用，但是在任何给定的情况下总有一种是起主要作用的。

对 流

对流是由流体运动引起的迁移。在这里用两类时间导数描述这种迁移现象。

试考察流体在一给定方向上流动的情形。设在流体内部远离边界的一个固定参考点上测得某示踪物的浓度，则描述参考点处示踪物浓度的时间导数叫做时间偏导数或局部导数 $\partial c/\partial t$ 。

另一类时间导数叫做时间真导数或运动导数。这个导数表示示踪物在流动的方向上以同流体相同的速度运动时浓度的时间变率。时间真导数包括在一点上的浓度的时间变率和由速度场引起的变化。在直角坐标系中可表为：

$$\frac{Dc}{Dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1-1-1)$$

式中 D/Dt = 算子，

u_x, u_y, u_z = 流动着的流体的速度分量。

因此，时间真导数 Dc/Dt 描述一个流体元流进和流出参考点时其浓度的时间变率。如果没有物质流进或流出流体元，或在流体元内不发生物质的生成或消失，则浓度将保持恒定， Dc/Dt 也就等于零。

扩 散

扩散是溶液或悬浊液中的一种物质（扩散相），在浓度梯度

的作用下，往另一种物质（分散相）中迁移的过程。扩散是自然界中一种最基本的过程，是分子水平上迁移的主要原因。扩散相可以是气体、固体或液体。分散相就是环境媒质，通常是液体或气体。

支配扩散过程的基本关系叫做Fick扩散定律。Fick第一定律可以简述为：以扩散方式通过单位截面积的质量迁移率同扩散物质的浓度梯度成比例：

$$N_x = -D_m \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1-1-2)$$

式中 N_x = 在 x 方向通过垂直于 x 轴的面积元的质量迁移率， $[FL^{-2}t^{-1}]$ ；

$\frac{\partial c}{\partial x}$ = 扩散相的浓度梯度， $[FL^{-4}]$ ；

D_m = 分子扩散系数， $[L^2t^{-1}]$ 。

可以用方程（1-1-2）推导Fick第二定律。

考察图 1-1-1。对于非稳态，扩散相沿 x 方向往流体体积元

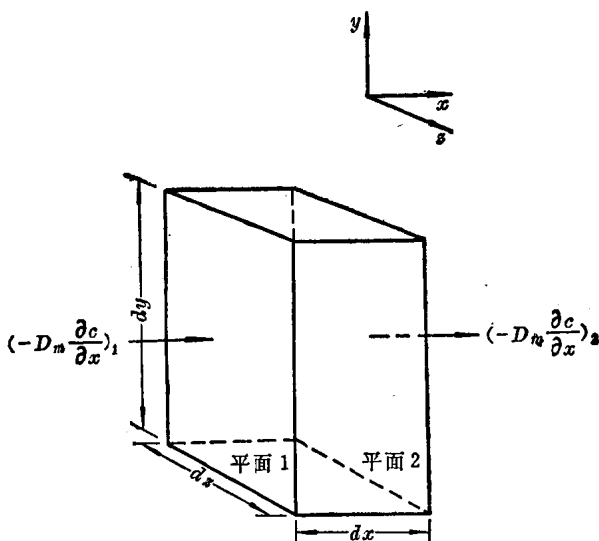


图 1-1-1 扩散进出一个增量体的示意图

扩散的质量平衡是:

质量积累 = 流进的质量 - 流出的质量

$$\frac{1}{\partial A} \frac{\partial m}{\partial t} = \left(-D_m \frac{\partial c}{\partial x} \right)_1 - \left(-D_m \frac{\partial c}{\partial x} \right)_2 \quad (1-1-3)$$

两个平面上的梯度之间的关系是:

$$\left(-D_m \frac{\partial c}{\partial x} \right)_2 = \left(-D_m \frac{\partial c}{\partial x} \right)_1 + \left[-D_m \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) dx \right] \quad (1-1-4)$$

把方程 (1-1-4) 代入方程 (1-1-3) 得:

$$\frac{1}{\partial A} \frac{1}{\partial x} \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial t} = D_m \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1-1-5)$$

方程 (1-1-5) 叫做Fick第二定律。

对于一般的三维情况, 方程 (1-1-5) 可以写作:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_m \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) = D_m \nabla^2 c \quad (1-1-6)$$

式中 ∇^2 = 算子。

分子扩散系数同绝对温度成正比, 同扩散相的分子重量和分散相的粘度成反比。

环境中的迁移

当对流和扩散同时发生时, 两种现象的作用可以迭加, 在数学上可以把时间真导数同方程 (1-1-6) 结合起来用下式表示:

$$\frac{Dc}{Dt} = D_m \nabla^2 c \quad (1-1-7)$$

方程 (1-1-7) 适用于没有湍流的情况。但是, 即使存在湍流, 这种一般的关系式仍然是适用的。在这种情况下用时间平均速度 $\bar{u}_x$, $\bar{u}_y$ 和 $\bar{u}_z$, 加上湍流的速度脉动 u'_x , u'_y 和 u'_z , 代替瞬时速度 u_x , u_y 和 u_z 。对于一维情况, 方程 (1-1-7) 变为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial c}{\partial x} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1-1-8)$$

往往在对流项中只使用时间平均速度比较方便，在这样做时，必须考虑速度波动（它实际是对流）的影响。一般的做法是引入一个叫做湍流扩散系数的项目^[1]：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial c}{\partial x} = (D_m + e) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1-1-9)$$

式中 e = 湍流扩散系数。

对于典型的环境系统，可以改写方程（1-1-9），用截面平均速度 u 代替对流项。但是，这不是简单地用 u 代替 $\bar{u}$ 。横向速度分布的影响包含在一个分散项内：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1-1-10)$$

式中 c = 浓度的截面平均值， $[FL^{-3}]$ ；

U = 速度的截面平均值， $[Lt^{-1}]$ ；

E = 纵向分散系数， $[L^2t^{-1}]$ 。

对于二维和三维情况，也能导出类似于方程（1-1-10）的表达式。注意，虽然方程（1-1-10）在一维情况下同方程（1-1-7）相似，但是湍流的分散项 E 同分子扩散系数 D_m 几乎没有关系。

对于大多数环境系统，使用方程（1-1-10）需要计算在特定状况下的 E 值。在有些情况下，可以用示踪技术进行实际测量^[2]。

不同环境下的扩散和分散系数特性示于图1-1-2。

解题方法 1-1-1 对任何特定情况得出的微分方程，必须在特定的边界条件下求解。当某一守恒物质^[3]，其数量为 W ，在 $t = 0$ 和 $x = 0$ 时，瞬间地投放于某一环境迁移媒质中，发生单

[1] E.R.Holley, 《扩散和分散综合考虑》，J. Hydraul. Div., ASCE, Vol.95, No.Hy2, pp.621~631, 1969。

[2] H.B.Fischer, 《天然河流中分散的预测》，J.Sanit.Eng.Div., ASCE, Vol.94, No.SA5, pp.927~943, 1968。

[3] 在环境中不衰变或降解的物质。

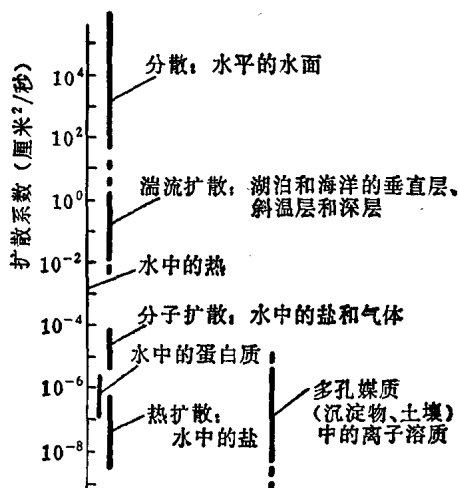


图 1-1-2 不同环境中的扩散和分散系数特性(根据A.Lerman,《湖泊和海洋到达化学稳定状态的时间》,图1,《自然水化学中的不平衡系统》,Advances in Chemical Series 106, American Chemical Society, Washington, 1971)

维分散和对流, 则方程 (1-1-10) 有解^[1]:

$$c = \frac{W}{s \sqrt{4\pi Et}} \exp \left[-\frac{(x-Ut)^2}{4Et} \right] \quad (1-1-11)$$

式中 W = 守恒物质的重量, $[F]$;

s = 垂直于 x 轴的截面积, $[L^2]$ 。

任一时刻 t 的浓度按高斯钟形曲线扩张, 其中心以速度 U 向下游移动。

对于同样情况, 但是没有对流 ($U = 0$), 其解为:

$$c = \frac{W}{s \sqrt{4\pi Et}} \exp \left(-\frac{x^2}{4Et} \right) \quad (1-1-12)$$

在以恒定速率连续释放物质的情况下, $\partial c / \partial t = 0$, 且对所有 $x > 0$ 的值都有:

[1] W.E.Dobbins, 《扩散和混合》, J.Boston Soc.Eng., Civ.Eng.Ser., No.114, pp.108~128, 1963.

$$c = \frac{W}{SU} \quad (1-1-13)$$

在理论上, 非到 $t = \infty$ 时, 不会达到方程 (1-1-13) 所描述的稳态条件。但实际上, 当守恒物质云雾的前缘通过一定距离之后不久就可达到稳定。

连续地但又随时间变化地往稳定均匀的河流中释放(或通过)守恒物质, 则方程 (1-1-10) 可以很方便地用数值法求解。

解题方法 1-1-2 有几种根据河流的观测资料预测 E 值的方法。其中之一^[1]是以示踪物云雾向下游运动时测得的时间-浓度曲线的方差的 time 变化为基础的:

$$E = \frac{\bar{U}^2}{2} \frac{\sigma_{t_2}^2 - \sigma_{t_1}^2}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \quad (1-1-14)$$

式中 $\sigma_{t_1}^2, \sigma_{t_2}^2$ = 上游观测站和下游观测站的浓度-时间曲线的方差;

$\bar{t}_1, \bar{t}_2$ = 示踪云雾通过各站的平均时间;

$\bar{U}$ = 两站之间的平均流速。

示踪云雾的平均传播时间是相当不确定的。有一些研究人员把平均传播时间当成是达到高峰浓度的时间。另一些研究人员则使用示踪物云雾质心的时间。此外, 方程 (1-1-14) 中的平均流速并不一定等于排放速度 Q/S 。最好是根据平均流动时间 $x/\bar{t}$ 计算这个变量。

1-2 气 体 传 输

当含有溶解气体的某液体同一气体环境相接触, 环境中的气体和溶液中的溶解气体不同, 这时气体环境和溶液之间就发生气体的交换。对于低溶度或中等溶度且不与溶质发生化学反应的气体, 溶液体积中溶解气体的浓度变率为:

$$\frac{dc}{dt} = K_L \frac{A}{V} (c^* - c) \quad (1-2-1)$$

[1] H.B.Fischer, 见所引文献。

式中 c = 液体中溶解气体的浓度, $[FL^{-3}]$;

c^* = 溶解气体的饱和浓度, $[FL^{-3}]$;

K_L = 总的传质系数, 液相基, $[Lt^{-1}]$;

A = 表面积, $[L^2]$;

V = 液体体积, $[L^3]$ 。

为了说明液体特性和行为对系数 K_L 的影响, 提出了各种各样的模型。薄膜模型^[1]假设在液体-气体的界面处存在一个不流动的液体薄膜, 在这个薄膜中稳态的分子扩散控制着气体的传输率。

$$\frac{dc}{dt} = \frac{D_m}{x} \frac{A}{V} (c^* - c) \quad (1-2-2)$$

式中 D_m = 分子扩散系数, $[L^2t^{-1}]$;

x = 薄膜厚度, $[L]$ 。

将方程 (1-2-2) 同 (1-2-1) 作比较, 得关系式:

$$K_L = \frac{D_m}{x} \quad (1-2-3)$$

例如, 设有一气体被传输到一个饱和此种气体的液体中。首先, 通过混合和扩散的综合过程, 气体的分子被输运到液体-气体的界面中。在界面中, 气体被溶解, 且其浓度达到同气相中气体的分压平衡。然后, 被溶解的气体通过不流动的液体薄膜扩散到薄膜和液体的交界处, 从这里通过混合作用迁移到整个液体中。参见图1-2-1。当气体从过饱和溶液中逸出时, 则按相反的机制进行。以扩散方式进行的传输比以混合方式进行的传输来得缓慢, 因此, 认为相和相之间的传输率是受不流动薄膜控制的。不管在液体中出现多大的湍流, 总是存在着这种不流动的薄膜, 湍流仅起减小薄膜厚度的作用。这种薄膜理论虽然从理论观点来看是有疑问的, 但是有助于思考。

[1] W.K.Lewis和W.G.Whitman, 《气体吸收原理》, Ind.Eng.Chem. Vol.16, p.1215, 1924。