

[英] L. 莱顿 著

生物系统的流体动性

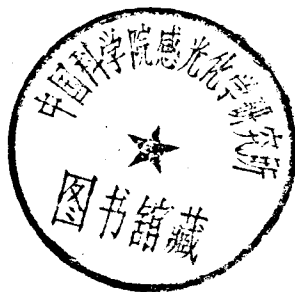
科学出版社

DF48/15

生物系统的流体动性

[英] L. 莱顿 著

赵冠美 译



科学出版社

1980

内 容 简 介

本书是英国牛津大学生物物理专业的一本教科书。书中简单介绍了流体力学的一些基本原理,并以广泛的内容叙述了这些原理在生物学中的应用。如血液、淋巴等生物体内液体的流动;昆虫和鸟类的飞翔、鱼类的游泳等体外流体的流动以及生物体内和生物体与它们的环境之间的热量、液体和气体的传输等。反映了近几年的研究成果和发展方向。内容精练易读,概念明确。

本书可作为生物数学、生物力学和生物物理等专业的大学生、研究生的教科书和参考书,也可作为从事这些方面研究工作的科研人员的入门参考书。

L. Leyton

FLUID BEHAVIOUR IN BIOLOGICAL SYSTEMS

Oxford University press

1975

生物系统的流体的动性

[英] L. 莱顿 著

赵冠美 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年3月第一版 开本:787×1092 1/32

1980年3月第一次印刷 印张:9 7/8

印数:0001—5,180 字数:226,000

统一书号:13031·1129

本社书号:1583·13—10

定价: 1.40 元

序

写这本书的动机主要是从为生物学工作者开物理学和环境物理学课程而产生的,这些课程我已教过大学生物系一年级学生好几年。由于认识到在近代生物学中物理学知识的重要性,类似的课程目前在多数大学中也都开起来了,但我的体验是学生要掌握这门课程并不很容易。部分原因可能是由于许多生物学家对物理学、特别联系到数学就感到困难的缘故。但我认为重要的促进因素是教学方法,特别是缺乏合适的教科书。

当然,目前有许多可资查阅的专门为生物学家写的有关一般物理学原理的书籍,同时还有把这些原理用于特殊领域中的许多更加专门的课本。可是对许多重要的课题作中等程度的介绍似乎不多。不妨以对边界层的处理为例,边界层在生物体和它的环境之间关系的好些方面起着关键性的作用。但在较浅的课本中,对它只在一小段或类似的篇幅中带过去了,在较深的课本中一般又假定对这些基本原理已经熟悉而也不予介绍,因而掌握这些原理的生物学家就比较少。事实上,有关边界层的大多数基本原理只在工程教科书中讲到流体力学时才作适宜的解释,而在生物学丛中即使有的话也是不多的。

这本书的主要目的之一是对流体力学的原理和它们在生物学中的应用提供了一个合理的简洁的叙述。由于所有的生物体都生活在流体环境中,而且有好几种重要的生理过程都涉及到流体的动性。因此,凡是生物学家,看起来都有必要去

1103990

. . .

弄懂这些原理。

我向来对“流体动性”和“生物系统”都从最广泛的内容来加以理解，因此除了介绍在生物体内及生物体和它们的环境之间的热量、液体、和气体的传输外，还添加了有关游泳与飞行这一章，其中包含一些基本的水动力学和空气动力学。此外，鉴于生物学家们在掌握环境物理学原理方面所遇到的困难，似乎对环境理应有所论述，所以还介绍一些微气象学和微气候学的基础知识。为了使它适当的完整，我还把辐射和热平衡包括进去。严格地说，这超出了我的题目范围。

最困难的问题之一是确定课本内容的详细程度，即希望它既可作为大学生的一本参考书，使他们学习起来易于理解，又可作为老一点生物学家阅读那些更高级文献时的一个引导。鉴于此，我把比设想为大学生所需要的更为详细一点的内容放进了书中。为了动物生理学家和医学院学生的需要，我对血液流动作了相当篇幅的论述，而把有关水分传输的热力学作了一个介绍，以供一般生理学家之需。我想强调的是，绝没有要求读这本书的人需要比大多数生物学家通常所具有的更多的物理学和物理化学方面的知识。

究竟放多少数学在这本书里，却是个比较困难的问题。这本书基本上谈的是一个定量的题目，其中的各种关系最好用数学的语言作最有效的表达。因此在书的内容中看上去虽然似乎有较多比重的数学公式，我认为还是必要的。但也并不要求读者有比微积分的基础知识更高的知识水平，而且在适当的地方，我都设法用文字解释这些关系。为了进一步减轻课文中的数学内容，我把许多推导（加上少量其它项目）放在附录中，恳切希望读者去学习这些推导，这不仅会使他们的基本原理的知识有所增加，而且还可以领会到为得到一个特殊解所作出的各项假定是些什么。过去曾有不少生物学家在

把数学模型应用于生物问题时，往往并没有理解到由于这些假定所加的各种限制，而不去怀疑它们。

为了说明各个物理学原理，我在选择例子时力图在植物界和动物界间加以无偏的平衡。自然，某些例子诸如韧皮组织和木质部的传输，以及许多有关水分关系和环境物理的讨论将使植物生理学家，生态学家比他们的动物学家同行们具有更大的兴趣。相反，飞翔和游泳这一章以及论述到血液流动的内容时，只有动物学家对它们感兴趣。不过，应予强调的是，我所企图解释的大多数物理学原理对一般生物学都有用，希望不论研究哪门专业的生物学家对它们的中肯性都来加以欣赏。

L. 莱顿

1974年于牛津

目 录

因次、单位和符号的注释	1
第一章 引言	7
第二章 管道内的流动	23
第三章 在多孔介质中的流动	43
第四章 在平面表面上的流动	57
第五章 在浸没体上的流动	66
第六章 动物的游泳与飞翔	83
第七章 热量传递	110
第八章 气体的扩散和对流传输	145
第九章 地面上空的环境	174
第十章 非牛顿型流体	223
第十一章 水分流动的几个热力学概念	239
附 录	264
参考文献	298
索引	305

因次、单位和符号的注释

因 次

除了少数特殊情况外，本书中所提到的量都可用下面五个基本因次中的一个或几个来表示：长度 (L)，质量 (M)，时间 (T)，温度 (θ)，和电流 (I)。更通用的包含 M ， L 和 T 的一些量的因次由下面所示的推导给出：

面积 ($L \times L = L^2$)；体积 ($L \times L \times L = L^3$)；

速度 (= 距离/时间 = $L/T = LT^{-1}$)；

加速度 (= 速度随时间的变化率 = $LT^{-1}/T = LT^{-2}$)；

力 (= 质量 $\times$ 加速度 = MLT^{-2})；

压力 (= 每单位面积上的力 = $MLT^{-2}/L^2 = ML^{-1}T^{-2}$)；

能量 (= 力 $\times$ 距离 = $MLT^{-2} \times L = ML^2T^{-2}$)；

功率 (= 能量生成率 = 能量/时间 = ML^2T^{-3})。

因次的实际重要性是基于以下法则：即在一个公式两边的量的因次必须平衡。这样就可对方程的可靠性提供一个很宝贵的检查方法，而有助于因次推导，因此也有助于导出未知量的单位。因次分析法的法则可用于解决下面一些问题，在这些问题中可以理论地认定一些有关的参数，然后用组合的方法去保持适当的因次当量；在本书中可以看到这个方法的若干例子。

单 位

根据实情，这里所用的单位是所推荐的国际单位制 (S. I.)。相当于上面因次的五个基本量的单位和符号是：

表 1.

量	S. I. 单 位	符 号
长 度	米	m
质 量	千克	kg
时 间	秒	s
电 流	安培	A
热力学温度	开	K

热力学温度称为绝对温度也许更好些。

课文中所提到的留下来尚须补充和推导单位的量在下面的符号表中可以得到。

虽然一般采用 S. I. 制在早先的文献中已消除了许多混淆而很明晰。但我们仍然面临着用厘米-克-秒(c. g. s)制去处理数据和大部分固有的公式的问题，(c. g. s)制仍然是很通用的，特别是在生物学中。在那里似乎有希望去保持 S. I. 制和早已涉及的单位的连续性。

在有关的工程文献中提供了大量的流体力学数据而出现了一些特殊的问题。虽然许多工程师已转向使用 S. I. 制，但在许多标准的教科书中(特别是美国的)仍然保留把力(F)作为一个基本因次处理的习惯。如果力的单位是公斤-重，即 $\text{kg 质量} \times g$ (重力加速度) $= \text{kg} \times 9.81$ ，那么它的大小是从 S. I. 制推导出来的，单位是牛顿(N)的力的 9.81 倍。这是因为牛顿的定义是使 1kg 的质量产生 1m s^{-2} 的加速度(不是 9.81m s^{-2}) 的力。因此，在进行工程单位变换的练习时必须倍

加小心。当有时把力简单的以公斤,压力以每平方米公斤,以及密度以重量计而不是以质量去进行计算时,这会使生物学家感到更多的困难。

符 号

在本著作中使用的符号显示出相当大的差异性,这不仅在本书中所涉及到的不同课题之间是这样,而且在相同的课题中也是这样。在书中所用的符号尽可能地要与 Royal 协会(1971)推荐的或是由英国标准院(BS 1991)推荐的符号相一致。可是,如果一个特殊分支的课题发展了一种符号系统,那么如果读者要深入学习的话就必须去熟悉它们,努力使得这个符号系统与更常用的符号系统一致。

符号和单位

A 面积 (m^2)	D' 侵入系数 ($m^2 s^{-1} bar^{-1}$)
$\text{\AA}$ 埃 ($10^{-10}m$)	E 能量,功 ($J = Nm$)
C 质量通量 ($kg m^{-2} s^{-1}$)	E 蒸气流量 ($kg m^{-2} s^{-1}$)
C_D 平均(总的)曳力系数	E 照射 ($W m^{-2}$)
C_f 管子或局部摩擦系数	E 电力 (V)
C_F 平均(总的)摩擦系数	F 力 (N)
C_L 升力系数	G 对地的热通量(储存) ($W m^{-2}$)
D 扩散系数 ($m^2 s^{-1}$)	G Gibbs 自由能 (J)
D 切速度 (s^{-1})	H 对空气的热流量 ($W m^{-1}$)
I 辐射强度 ($J m^{-2}$)	I 热阻 ($J^{-1} m^2 s ^\circ C$)
I 电流 (A)	Q 量
J 焦耳 ($kg m^2 s^{-2} = Nm$)	R 气体常数 ($J mol^{-1} K^{-1}$)
J Onsager 通量(各种的)	R 电阻 (ohm)
K 渗水率 ($m s^{-1}$ 等)	R_N 净辐射 ($W m^{-2}$)
L 潜热 ($J kg^{-1}$)	S 短波辐射 ($W m^{-2}$)

L 长波辐射 (W m^{-2})	T 绝对温度 (K)
L Onsager 系数(各种的)	T 弯曲因子
M 分子的重量 (kg)	T 弯力矩 (Nm)
M 代谢热比率 (W)	U 自由流速 (m s^{-1})
N 数目	V 电位差 (volt)
N 牛顿 (kg m s^{-2})	V 体积 (m^3)
P 功率 (W)	V_M 克分子体积 ($\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$)
P_a 帕斯卡 ($= 1\text{Nm}^{-2}$)	W 重量 (mg)
	W 瓦特 (Js^{-1})

a 光吸收系数	k 比电导率 (Onsager) (mho)
b 宽度, 翅展 (m)	l 长度 (m)
c 光速 (m s^{-1})	m 质量 (kg)
c 质量浓度 (kg m^{-3})	m 水压头半径 (m)
c_M 克分子浓度 (mol m^{-3})	mb 毫巴 ($1\text{mb} = 10^2\text{Nm}^{-2}$)
c Kozeny-Carman 系数	p 动量 (kg m s^{-1})
c_p 在常压下的比热 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	p 压力 ($\text{Nm}^{-2} = \text{Pa}$)
d 直径 (m)	q 比率
d 零平面位移 (m)	q 比湿度
e 蒸气压力(例如 mb)	r 半径 (m)
f 频率(周 s^{-1} , 赫芝)	r 扩散阻抗 (s m^{-1})
g 重力加速度 (m s^{-2})	s 内表面因子 (m^{-1})
h 高度 (m)	s_0 比表面 (m^{-1})
h 相对湿度	s 沿轨迹的距离 (m)
h 对流系数 ($\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	t 时间 (s)
$\bar{h}$ 平均对流系数 ($\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	u 速度 (ms^{-1})
k 比渗透性 (m^2)	u_* 摩擦速度 (ms^{-1})
x 克分子分数	z_0 粗糙性长度 (m)
y 活性系数	

α 吸收比	ν 运动粘滞度 (m^2s^{-1})
α 温度扩散率 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	π 渗透压 (Nm^{-2})
α Bunsen 系数	ρ 密度 (kg m^{-3})
β 膨胀系数	ρ 反射率
β Bowen 比率 (H/LE)	σ Stefan-Boltzmann 常数
γ 干湿球湿度计常数	($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)
(例如 $\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)	σ 表面张力 (Nm^{-1})

Δ 差,斜率	σ 木质部传导系数 ($\text{m}^4 \text{N}^{-1} \text{s}^{-1}$)
δ 厚度(m)	σ 膜反映系数
ϵ 多孔性	τ 切应力,动量通量
ϵ 比辐射(率)	($\text{Nm}^{-2} = \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$)
η 动力粘滞度 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} = \text{Pas}$)	τ 透射比
θ 常用温度($^{\circ}\text{C}$)	ϕ 流通量(每单位面积的流率)
κ 湍流转移系数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	ϕ 体积分
λ 热导率 ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)	χ 混合率
λ 活性	ψ 水势 (Nm^{-2} , bar)
λ 平均自由程(m)	ω 角速度 (rad s^{-1})
λ 波长(m)	ω 流股的质量流率 (kg s^{-1})
μ 化学势 (J mol^{-1})	

S. I. 的十进倍数

倍 数	词 头	符 号	倍 数	词 头	符 号
10^{-1}	deci	d	10	deca	da
10^{-2}	centi	c	10^2	hecto	h
10^{-3}	milli	m	10^3	kilo	k
10^{-6}	micro	μ	10^6	mega	M
10^{-9}	nano	n	10^9	giga	G
10^{-12}	pico	p	10^{12}	tera	T
10^{-15}	femto	f			

物 理 常 数

σ Stefan-Boltzmann	$5.670 \times 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
g 重力加速度	9.807m s^{-2}
R 气体常数	$8.314 \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
atm 大气压力	$1.013 \times 10^5 \text{Nm}^{-2} (= 1.013 \text{bar})$
c 光速	$3.00 \times 10^8 \text{m s}^{-1}$

因 数 换 算

长 度	1 英寸=0.0254m 1 英尺=0.3048m	时 间	1 年=3.156×10 ⁷ s 1 天=8.64×10 ⁴ s
面 积	平方英寸=6.452×10 ⁻⁴ m ² 平方英尺=9.29×10 ⁻² m ²	力	1 达因=10 ⁻⁵ N 1 公斤力=9.81N
体 积	立方英寸=1.639×10 ⁻⁵ m ³ 立方英尺=2.832×10 ⁻² m ³ 1 升=10 ⁻³ m ³ = dm ³	压 力	1 达因 cm ⁻² = 0.1Nm ⁻² 1 仟英寸水(4°C) =249.1Nm ⁻²
速 度	1 英尺秒 ⁻¹ =0.3048m s ⁻¹ 1 英里小时 ⁻¹ =0.447m s ⁻¹ 1 海里小时 ⁻¹ =0.514m s ⁻¹		1 毫米汞(0°C) =133.3Nm ⁻² 1 bar = 10 ⁵ Nm ⁻²
能 量	1BTU = 1055J 1 尔格=10 ⁻⁷ J 1 卡路里=4.186J 1k Wh = 3.6 × 10 ⁶ J 1 电子伏特=1.602×10 ⁻¹⁹ J	功 率	1 BTUh ⁻¹ = 0.293W 1 马力=745.7W 1 卡路里 s ⁻¹ = 4.186W
质 量	1 磅(质量)=0.4536kg	粘滞度	1 泊=0.1kg m ⁻¹ s ⁻¹ 1 冲程=10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹

数 学 符 号

=	等于	<	小于
≠	不等于	>	大于
≈	近似等于	«	小于小于
→	趋近于	»	大于大于
≈	渐近相等	f(x)	x 的函数
∝	正比	exp x, e ^x	x 的指数
∞	无穷	e	自然对数的底
Σ	…的和	ln	x 的自然对数
		√x	x 的平方根

第一章 引言

流体动性在生物学中的重要性

所有的生物体都生活在流体的环境中，所以任何过程都存在着生物体和它的环境之间的关系，如运动、热交换或气体交换，均受流体动性的影响。此外，生物体中一些生物过程的产生都含有流体的运动，例如血液和淋巴液的循环、呼吸系统中空气的运动、植物中水份和食物的传输等。因此，有关流体动性以及影响它的各种因素的知识对这类过程的理解是一个基础。

固体与流体

我们如果要讨论流体的动性，首先要定义什么是流体才为合适。

流体在物理上之所以与固体有别，在于它们的组成分子有相对的流动性。虽然固体的分子可以振荡或旋转，但它们只能循固定的平均位置进行这些运动，可是流体的分子却可以在流体整体的内部从一个位置流到另一位置上去。有一个重要的性质作为我们以后讨论流体动性的依据，这就是它们会对各种力产生响应，从而产生形变或形状的变化。对典型的固体来说，其形变为一有限量，而且只要所加的力并不太大，当力一旦消失，固体就恢复原形。但流体就不同了，在受到力的作用时，其形变是连续性的，而且即使在力去掉时仍能

保持。换言之,固体拥有弹性,流体却没有。可是却有许多物质表现出有介乎其间的性质。某些显然是固体的物料一经加力,再也不会恢复原形;而某些流体,包括许多有生物学重要性的胶体系统,当加小力时只产生有限的形变,但当把所加的力增大时,就产生永久性形变并流动。对于这类显然属于异常的物质留在第十章里讨论,现在让我们先来关心各种更为典型的流体。

流体既包括液体,也包括气体。在液体中,与其运动有关的分子的能量通常小于它们间互相吸引的能量,因此在分子间的平均距离一般是比较小的。在气体中,分子却分布得很宽,在它们之间互相吸引的能量小于运动的能量,因此它们比液体中的分子就更加活动自由了。气体和液体在压缩性上也不相同。气体的体积随压力而变(Boyle 定律)。液体却不然,至少在一般的压力范围中是如此。不过为了简化起见,在以下所要作的大多数计算中,即使气体也被假定是非压缩性的。这样做对所涉及的动性来说所引入的误差并不太大,因为只有当速度很大达到声速的五分之一的数量级的情况下,压缩性才显得重要起来。

水的结构

一种流体的动性通常可以和它们的分子结构关联起来,可是液体的结构一般就不象对气体那样易于了解;其中水就提出了一个特殊的问题,因为它拥有好多不与其它液体相同的独特性质。所有这些,都起因于水分子与众不同的结构,其中O和H原子坐落在一个三角形的顶点上(图 1.1a)。当两个H原子与一个O原子结合而形成水分子时,它们是通过共价键来结合的。每个H电子与O原子外壳六个电子之一偶联,后

者所剩下的两对电子(所谓未共电子对)所具的轨道作四面体式的伸展(图 1.1b)。结果所形成的结构是一个四面体,在它的四角上有两个正电荷位置和两个负电荷位置。因此,水分子具有电极性(所以有偶极结构),同时有通过H键把它本身附着于四个邻分子的倾向,两个在荷正电的位置上,两个在荷负电的位置上。

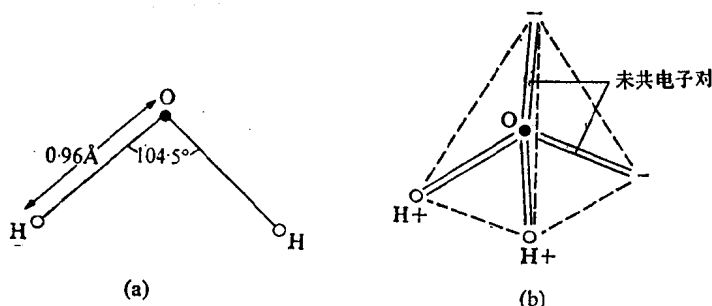


图 1.1 水分子图说明 (a) 键角与长度, (b) 电子电荷四面体式的结构。

H键在水分子中提供了相当强的附聚力,使之产生各种晶体结构——冰。可是就液态水而论,却没有一般可予接受的模型。据信在其分子之间有广泛的H键结合而具有一种似晶体结构,但很缺乏永久性的性质。笼统地说,所提出的模型不外两类:一类设想为离散而寿命短的分子团(即瞬息团的概念),另一类设想为闭锁分子圈的随机网络或笼式结构。

水分子的极性使它对电荷很敏感。例如在荷正电的离子存在时,就会有好几个水分子(其数目取决于离子种类)为H键所牢牢地附聚在上,形成一层水合壳,它们在里面有一定的取向(图 1.2)。以后我们要讲到许多这类系统都有个重要的特点,就是亲水性的(也就是有电荷的)表面上存在一层相似取向的水分子层(所谓有序水),这仍可归因于H键的键合。

这种现象特别出现在胶体颗粒的表面上,诸如蛋白质、纤维素以及其他各种大分子(粘土也是),同时也是胶悬体的好几种性质特征的由来(Bernal 1965)。虽然对有几位科学家所设想的冰晶式的结构还很少有证据,但不容置疑,这种有序水的性质是与距表面较远的水分子群体大不相同的。那就是说,

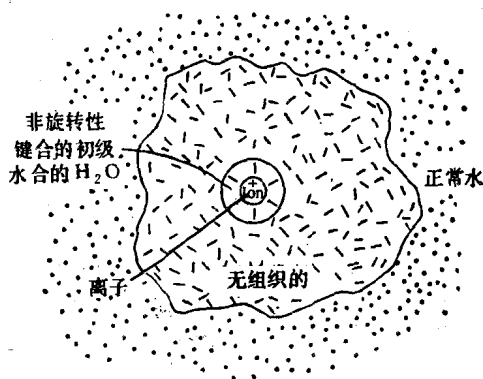


图 1.2 在一个离子的邻区中水的结构模型。(Klotz 1970)

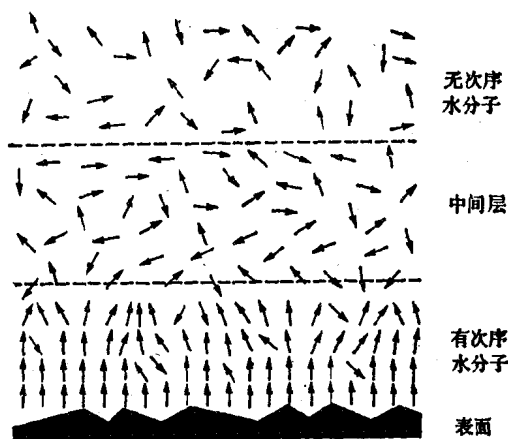


图 1.3 在一个极性表面邻近水分子群的假设取向。注意在紧贴表面的有序层与较远的无序层之间的差异。(Drost-Hansen 1969)