

陶 祖 莱 编著



生物流体力学



科 学 出 版 社

生物流体力学

陶祖莱 编著



科学出版社

1984

内 容 简 介

生物流体力学是近二十年来兴起的一门边缘学科,对生物学、医学、生理学及生物工程的发展有着重要意义,故近年来发展很快。

作者从力学观点出发,用系统学观点阐明了生命现象中的流体力学问题及其理论基础,较系统地介绍了60—70年代生物流体力学的几个主要分支的进展,并从方法学上阐明了生物流体力学在认识生理规律中的作用。书中还包括了作者自己做的工作。

本书可供有志于生物力学的力学、生物学、生理学、生物医学工程等方面的科技工作者,及其有关大专院校教师、研究生及高年级学生参考。

生 物 流 体 力 学

陶 祖 莱 编著

责任编辑:马素卿

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

*

1984年9月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1984年9月第一次印刷 印张:27 1/8

印数:0001—4,800 字数:621,000

统一书号:13031·2681

本社书号:3685·13—10

定 价: 4.20 元

目 录

第一章 生理流动及其流体力学问题	1
§ 1 生命现象和流体运动	1
§ 2 心血管流动概述	2
§ 3 泊肃叶流及其在心血管系统的应用	13
§ 3-1 泊肃叶流动	13
§ 3-2 分支管系流动阻力及切变率的分布	15
§ 3-3 血管分支形态的优化分析	19
§ 4 呼吸系统的流动	24
§ 4-1 人体呼吸气动力学问题概述	26
§ 4-2 鸟肺的呼吸流	33
§ 5 植物体内的流动	35
§ 5-1 蒸腾流	36
§ 5-2 易位流	37
§ 6 原生质流动	39
§ 7 生理流动的流体力学问题	41
参考文献	44
第二章 连续介质力学基础	46
§ 1 引言	46
§ 2 连续假设	46
§ 3 拉格朗日方法和欧拉方法	48
§ 4 应力与应力张量	50
§ 4-1 应力张量 τ_{ij} 的对称性	52
§ 4-2 主方向与不变量	53
§ 4-3 欧拉应力、拉格朗日应力和基尔霍夫应力	56

§ 5 应变	58
§ 6 应变率	60
§ 7 弹性体及其简单模型	62
§ 7-1 胡克体	62
§ 7-2 完全弹性体有限变形与应变位能	63
§ 8 粘弹性概念与线性粘弹性模型	64
§ 8-1 玻耳兹曼叠加原理	65
§ 8-2 粘弹性-弹性相当原理	66
§ 8-3 线性粘弹体在定态谐振时的特性	67
§ 8-4 几种简单的线性粘弹体	69
§ 9 牛顿流体和非牛顿流体	71
§ 9-1 牛顿流体	71
§ 9-2 非牛顿流体	73
§ 10 流体运动的基本方程	75
§ 10-1 连续方程	75
§ 10-2 运动方程	77
§ 10-3 流体运动的能量方程	78
§ 10-4 不可压缩牛顿流体运动方程组的一般形式	80
§ 11 粘性流动概述	80
§ 12 低雷诺数流动	85
§ 12-1 低雷诺数下物体运动的流场	86
§ 12-2 缝隙流动-润滑理论	91
§ 12-3 多孔介质内的渗流	93
§ 13 高雷诺数流动	94
§ 13-1 二维平板定常流动边界层	97
§ 13-2 二维振荡流动边界层	98
§ 13-3 层流与湍流	100
§ 14 流动分离	102
§ 14-1 二维或轴对称定常流动分离	103
§ 14-2 表面流线和三维定常流动分离	104

参考文献	105
第三章 血液的流变性质	107
§ 1 引言	107
§ 2 血液	108
§ 3 血液的非牛顿性状	111
§ 3-1 应力-应变率关系非线性	111
§ 3-2 屈服应力	113
§ 3-3 Casson 方程	114
§ 3-4 假塑性流体模型	115
§ 3-5 血液的粘弹性	116
§ 3-6 Fåhræus-Lindqvist 效应	117
§ 4 血液非牛顿性状的若干说明	118
§ 4-1 红细胞的聚集	118
§ 4-2 红细胞及细胞串的变形	120
§ 4-3 红细胞的相对运动	121
§ 4-4 有形元素间的相互作用	123
§ 4-5 血浆因素	124
§ 5 血液的本构方程	126
§ 5-1 定常状态	126
§ 5-2 非定常状态	128
§ 6 血液的微连续介质模型	130
§ 7 有关血液的两相系统模型	133
§ 7-1 能量法	133
§ 7-2 颗粒间的相互作用	136
§ 7-3 刚性颗粒浓悬浮系统	138
§ 7-4 Burger 法	140
§ 7-5 胶性颗粒悬浮系统	142
§ 7-6 低切变率下血液非牛顿行为的简单理论分析	143
§ 7-7 液滴悬浮模型	147
§ 8 红细胞的力学性质	149

§ 8-1 红细胞的几何形状	149
§ 8-2 红细胞形状的力学说明	151
§ 8-3 红细胞膜的力学特性	155
§ 8-4 红细胞膜的本构方程	157
参考文献	158
第四章 血管的力学性质	161
§ 1 引言	161
§ 2 血管的构造	162
§ 3 血管壁内的张力	166
§ 3-1 拉普拉斯定律	167
§ 3-2 弹性张力与主动张力	167
§ 3-3 弹性薄壁圆管的应力	169
§ 4 大血管的力学性质——实验结果	172
§ 4-1 大血管的静力学特性	172
§ 4-2 血管的粘弹性	174
§ 4-3 血管力学特性的热力学说明	179
§ 5 增量化理论与线性粘弹性模型	180
§ 5-1 增量化理论	180
§ 5-2 血管的线性粘弹性模型	183
§ 6 拟弹性假说	187
§ 6-1 冯元桢的拟弹性模型	188
§ 6-2 应变位能	191
§ 6-3 组合模型	194
§ 7 准线性理论	198
§ 8 非线性粘弹性模型	201
§ 9 小动脉的力学性质	204
§ 10 毛细血管的力学性质	206
参考文献	207
第五章 肌肉力学基础	209

§ 1 引言	209
§ 2 横纹肌的结构和收缩机理	209
§ 3 Hill 方程和 Hill 模型理论	213
§ 3-1 Hill 方程	213
§ 3-2 Hill 模型	217
§ 3-3 线性记忆理论	219
§ 4 纤维滑移理论	223
§ 5 松弛状态下心肌的力学性质	229
§ 6 Hill 模型应用于心肌	233
§ 6-1 串联弹性元的性质	236
§ 6-2 收缩元的性质	238
§ 7 心肌本构方程的新形式	240
§ 8 左心室的流变模型	242
§ 8-1 力平衡方程	243
§ 8-2 本构方程	245
§ 9 心脏功能的评价问题	248
§ 9-1 左心室壁内的应力	251
§ 9-2 心肌收缩特性	253
§ 10 平滑肌力学性质简述	254
参考文献	260
第六章 心脏内的血液流动	262
§ 1 引言	262
§ 2 心脏的构造和功能	262
§ 3 心脏血流的动力学问题	267
§ 3-1 心脏血流的相似性	269
§ 3-2 心室射血流动理想模型	271
§ 3-3 瓣关闭的流体力学机理	272
§ 4 主动脉瓣膜流动分析	276
§ 4-1 主动脉瓣关闭过程的一维理论	276

§ 4-2 开启过程中主动脉瓣膜的运动	285
§ 4-3 瓣膜几何形状和压力的关系	289
§ 4-4 瓣膜形状和运动速度对流动的影响	290
§ 5 瓣膜运动和流场的相互作用	292
§ 5-1 数值计算方法	294
§ 5-2 二尖瓣流场的数值解	295
参考文献	297
第七章 大血管中的脉动流	298
§ 1 引言	298
§ 2 大血管内血液流动的物理特点和数学描述	300
§ 3 管道内小扰动的传播与脉搏波	304
§ 4 可变形管内流动的特性	312
§ 4-1 可膨胀圆柱管内的定常流动	312
§ 4-2 三种流动的比较	314
§ 4-3 可坍管内的一维定常流动	320
§ 4-4 结语	329
§ 5 动脉血流相似性和线性化理论基础	330
§ 5-1 动脉血液流动相似性	332
§ 5-2 动脉血流线性理论的基础	339
§ 6 可膨胀圆管内脉动流的线性理论	351
§ 6-1 Womersley 理论	352
§ 6-2 厚壁管模型	369
§ 6-3 波动模式	372
§ 6-4 有限位移模型	375
§ 6-5 初始应力的影响	379
§ 7 传输线理论	382
§ 7-1 一维运动方程及其线性化	383
§ 7-2 有限长度弹性管内的理想流动	386
§ 7-3 有限长度弹性管内的粘性流动	395
§ 7-4 传输线理论应用于管系	399

§ 7-5	积分变换法	405
§ 7-6	Ridout 差分-微分方法与电模拟	407
§ 7-7	心血管系统模拟计算概述	412
§ 8	非线性理论	412
§ 8-1	一维非线性方程及其特性	414
§ 8-2	关于动脉血流的特征线法	416
§ 8-3	有限幅度波传播特性及激波	428
§ 8-4	动脉血流非线性分析	436
§ 8-5	左心室-动脉血流综合分析	441
§ 9	静脉血流的流体力学问题	443
§ 9-1	可坍管定常流动的特点	445
§ 9-2	可坍管定常流动的集中参数模型	448
§ 9-3	静脉脉动流	452
§ 10	大血管流动的实验研究	455
§ 10-1	动物试验的若干结果	456
§ 10-2	水力模型实验	458
§ 11	波的传播与血管力学性质	460
	参考文献	461
第八章	大血管和气管里的流场和壁面剪应力	464
§ 1	引言	464
§ 2	动脉疾病和血液流动的力学性状的关系	465
§ 2-1	主动脉 P.S.D. 与血液湍流	465
§ 2-2	脑动脉血管瘤	467
§ 2-3	动脉粥样硬化与当地血液流动特性	468
§ 3	动脉血流的湍流问题	473
§ 4	直圆柱管内的进口流动	476
§ 4-1	刚性圆管定常进口流动	478
§ 4-2	脉动进口流动的有限元分析	481
§ 5	弯曲管内的流动	485

§ 5-1	曲管流动方程和相似参数	487
§ 5-2	充分发展的弯曲管流动	489
§ 5-3	曲管内发展中的定常流	496
§ 6	分支管道流动	506
§ 6-1	分支管道流动的实验观测	506
§ 6-2	分流效应的理论分析	512
§ 6-3	分支管道流动的数值分析	519
§ 7	管腔表面不规则时的流动	530
§ 7-1	狭窄管道内的定常流动	530
§ 7-2	狭窄管道内的脉动流	535
§ 7-3	分布斑块引起的血管壁组织缺氧	541
§ 8	血管分支、弯曲、截面积突变部位红细胞和血小板的运动	544
§ 8-1	涡环内的血细胞	545
§ 8-2	T形分支处的流动	549
	参考文献	550
第九章	微循环流体动力学	553
§ 1	微循环中的流体力学问题	553
§ 2	小管血流异常现象及其物理本质	557
§ 2-1	边缘血浆层和红细胞径向迁移	558
§ 2-2	小管血流的速度分布及塞子流	566
§ 2-3	Fahraeus 效应及其逆效应	569
§ 2-4	管壁表面性质的影响	575
§ 3	小管血液定常流动的理论分析	578
§ 3-1	Casson 流体定常圆管层流	578
§ 3-2	双层流体运动模型	581
§ 3-3	微极性流体模型	585
§ 3-4	低雷诺数定常进口流动	590
§ 4	毛细血管内的血液流动	595
§ 4-1	毛细血流模型实验	596

§ 4-2	刚性颗粒模型	597
§ 4-3	可变形颗粒模型与润滑理论	610
§ 5	毛细血管壁构造与物质运输	617
§ 5-1	通过半透膜的扩散和对流	618
§ 5-2	孔隙传输理论	620
§ 5-3	Starling 假说	622
§ 5-4	溶质透壁输运与毛细血流	622
§ 6	毛细血流与周围组织的液体交换	624
§ 6-1	组织液压力、浓度均匀时的毛细血流	625
§ 6-2	毛细血流与组织液流动	631
§ 6-3	组织液流动与透壁流体交换	636
§ 6-4	流体交换引起的毛细血管内血液表观粘度的变化	642
§ 7	肺微循环	644
§ 7-1	肺毛细血管组织构造及片流模型	645
§ 7-2	肺泡片的弹性	647
§ 7-3	肺毛细血管内血液的表观粘度	647
§ 7-4	肺毛细血流问题的数学描述	650
§ 7-5	一维理论	653
§ 7-6	二维理论	656
§ 8	毛细血流的随机性	660
	参考文献	664
第十章	生理流动中的传质问题	667
§ 1	生理流动中的物质输运方程	667
§ 1-1	化学势和扩散	667
§ 1-2	流动中的对流扩散	670
§ 1-3	物质输运方程的一般形式	672
§ 2	通过细胞膜的物质输运	676
§ 2-1	膜的化学组分	677
§ 2-2	细胞膜的结构	678

§ 2-3 通过细胞膜的物质运输形式	680
§ 3 通过细胞膜的扩散和渗透	680
§ 3-1 水的渗透	681
§ 3-2 非电解质的扩散	684
§ 3-3 电解质的扩散	685
§ 4 载体扩散	687
§ 5 能动运输	691
§ 5-1 推进运输	691
§ 5-2 囊泡运输	693
§ 6 体循环系统氧及二氧化碳的运输	693
§ 6-1 氧与血红蛋白的结合	694
§ 6-2 氧在血红蛋白溶液中的运输	699
§ 6-3 红细胞与血浆间的氧交换	701
§ 6-4 透过毛细血管壁的氧交换	706
§ 6-5 二氧化碳在血液中的运输	711
§ 7 肺内的气体交换	713
§ 7-1 末端支气管-肺泡内的气体混合	714
§ 7-2 肺泡与肺毛细血流间的气体交换	718
§ 7-3 肺通风量与血流量的关系	725
参考文献	728
第十一章 其他生理流动	729
§ 1 引言	729
§ 2 淋巴流动	729
§ 3 小管内溶质浓度梯度不变的流动	737
§ 3-1 量纲分析	738
§ 3-2 数学模型	740
§ 3-3 近似解及其意义	743
§ 4 蠕动流	748
§ 4-1 蠕动流方程及相似参数	749

§ 4-2 低雷诺数蠕动流	752
参考文献	756
第十二章 生理流动与系统分析	758
§ 1 引言	758
§ 2 系统分析方法	759
§ 3 循环系统动力学	762
§ 3-1 概述	762
§ 3-2 组元模型	764
§ 3-3 单开口系统分析	766
§ 3-4 双开口系统分析	770
§ 3-5 心血管系统分析	774
§ 4 心血管流动和体液平衡——循环系统的长期调 节	779
§ 4-1 体液对心血管血液流动的影响	779
§ 4-2 循环系统对组织液流动特性的影响	782
参考文献	787
第十三章 水生动物泳动的流体动力学	788
§ 1 引言	788
§ 2 低雷诺数下动物泳动的力学原理	790
§ 2-1 抗力理论	790
§ 2-2 流体运动方程基本解	796
§ 2-3 用基本解确定 K_N 和 K_T	799
§ 2-4 有机体泳动的细长体理论(低雷诺数)	802
§ 3 纤毛推进的流体动力学问题	804
§ 4 水生动物高雷诺数泳动的细长体理论	811
§ 4-1 虚质量估算	815
§ 4-2 反作用力计算	816
§ 4-3 转弯问题	819
§ 4-4 泳动推进的鳗鲡目模式和鲭科模式	820

§ 5 新月形尾鳍推进的二维理论	823
§ 5-1 推进原理	824
§ 5-2 二维理论	825
§ 6 动物泳动的阻力	830
参考文献	832
第十四章 动物飞行的空气动力学问题	833
§ 1 引言	833
§ 2 持续飞行	834
§ 2-1 昆虫的持续飞行	835
§ 2-2 鸟类的持续飞行	837
§ 2-3 鸟类的滑翔	839
§ 2-4 信天翁的翱翔	840
§ 3 飞行的动力	841
§ 4 飞行动物的尺度	843
§ 5 悬停飞行的空气动力学原理	846
参考文献	853

第一章 生理流动及其流体力学问题

§1 生命现象和流体运动

新陈代谢是生命运动的基本形式。其前提是不断地从外界吸取同化作用(把外界物质变为和生物体自身同样的物质)所需要的原料,不断地排除异化作用(自身物质分解产生进行生命活动所需要的能量)所产生的废物。这种物质交换和内部输运往往是以流体运动的形式进行的。原生物通过体表膜层直接和环境进行交换。植物根系从土壤中吸取水和养分,通过木质部的导管输送给叶;叶吸收二氧化碳,利用太阳能通过光合作用制成糖,再经韧皮部的导管输送到全身,促使自身生长。高等动物通过呼吸系统吸进氧;通过消化系统摄取食物;由循环系统将代谢活动所必需的氧和养料输送到全身各组织,并将代谢产物带走,经呼吸道、消化系统和泌尿系统排出体外。一旦上述种种流动过程之一中止,生命就无法维持。

不仅如此,生物体的基本构造单位——细胞本身是由细胞核、细胞质、细胞膜构成的,细胞质时刻都在流动,为代谢活动正常进行创造条件。细胞分裂(生长过程)时细胞质的运动尤为激烈。对于某些单细胞生物(如变形虫)来说,正是细胞质的流动,使它能作出适宜的反应,避开伤害,捕获食物。

据估计^[1],人体重量70%是液体,50%在细胞内,5%在血液中,其余15%分布于组织间隙内,使代谢过程环境的物理化学条件保持稳定,以获最佳功能。

可见,生物体的生命运动和有关的流动过程有着密切的

关系。不掌握这些流动过程的规律,就不可能对生命现象有深刻、完整的认识。

另一方面,生理流动又为流体力学的发展提供了新天地。无论是介质物性、运动动力、边界条件还是流动参数变化范围,生理流动和工程问题很不一样。仅仅把已有的流体力学理论和方法推广于生物体是不够的,需要作新的探索。

下面举几个例子,说明生理流动的特点。

§ 2 心血管流动概述

高等动物循环系统由心脏、动脉、毛细血管、静脉构成。左心室收缩,将新鲜血液注入主动脉,经动脉系输送到全身各组织的毛细血管中,在那里进行物质交换,供给氧和养料,带走二氧化碳和废物;再经静脉系统流回右心房;由右心室泵入

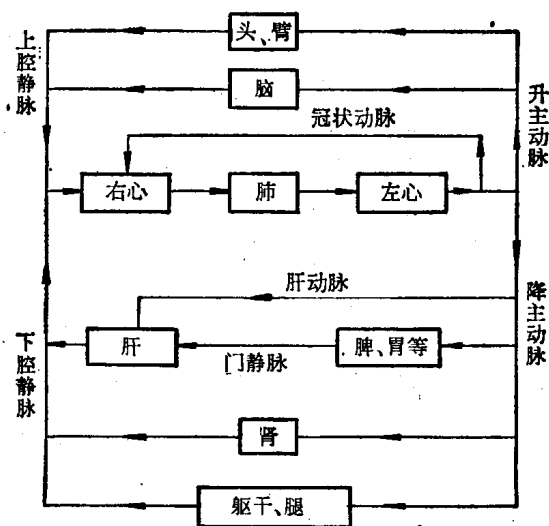


图 1-1 大循环功能模型^[1]