



BIODYNAMICS
CIRCULATION

生物动力学

血液循环

● [美] 冯元桢著 戴克刚译

BIODYNAMICS

CIRCULATION

生 物 动 力 学

血 液 循 环

[美]冯元桢著 戴克刚译

湖南科学技术出版社

内 容 简 介

本书阐明了循环的物理原理，并对心脏、动脉、静脉、微循环和肺部血流进行了专题论述，并附有丰富的例举和习题，以启发读者的思维。

本书可供基础医学、临床医学、体育、生物医学工程、力学、生物学、生态学等领域的科研或医务工作者阅读，也是上述有关专业的教师、研究生，大学高年级学生的教学参考书。

生物动力学 血 液 循 环

[美]冯元楨著

戴克刚译

责任编辑：刘奇英

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1986年11月第1版第1次印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：13.375 插页：10 字数：346,000

印数：1—2,000

统一书号：13294·142 定价：5.10元

征订册号：湘科86—7(1)

作者简介

冯元桢先生，江苏无锡人，1919年生。早年在重庆中央大学毕业并取得硕士学位。1945年赴美。在加州理工学院获得航空学与数学博士学位，此后长期在该院担任教授。1966年到加州大学(圣地亚哥)任教授，创办了该校的生物医学工程事业。

冯元桢先生的卓越贡献涉及到流体力学、固体力学、生物力学以及工程应用和健康事业。他勤勉治学，著作等身，曾发表论文二百余篇，以其见解的新颖和思维的缜密而受到国际学术界的推崇。已出版长篇专著八部，其中《空气弹性理论》、《固体力学基础》、《连续介质力学导论》早已为人熟知。近年的新作《活组织的力学特性》、《血液循环》、以及《流动、运动、应力和生长》，被生物力学界誉为经典著作，已译为多种文字。他的成就使他获得了国际微循环学兰德斯奖、美国土木工程学冯·卡门奖、美国生物医学工程学勒斯尼尔奖、美国机械工程学森坦尼奥奖和沃尼尔奖。被遴选为美国国家工程科学院院士。先后任美国生物医学工程学会主席、全美力学学会主席、国际流变学学会副主席、《生物力学工程学报》和《生物流变学学报》的编委。

冯元桢先生是一位教育家。他的学生遍布世界各国，不少人已成绩斐然。他严谨的治学态度和谦诚的风范，使他成为后辈的楷模。

冯元桢先生关心祖国的四化建设，近十年来，他多次到中国各地讲学、指导、调查访问，为推动中国生物医学工程事业的发展而奔忙。尤以1979年秋的武汉讲习会，对中国生物力学的开展具有深远影响。他在这次讲习会的讲稿已被搜集成书，在国内出版。他在加州大学的实验室曾先后接待多名中国学者，进行长期或短期的训练和学习。华中工学院、重庆大学、江苏化工学院等校聘请他为名誉教授。

译者序

湖南科学技术出版社出版冯元桢先生这三部著作的中文译本，为我国学术界作了一件很有意义的事。

从1981年以来，冯元桢先生相继出版了《生物力学：活组织的力学特性》、《生物动力学：血液循环》、《生物动力学：运动、流动、应力和力》等三部专著。各书独立成体而又相互关联。本书是其中第二部的中文译本。第一部的中文译本正在排版之中，第三部正在进行翻译，不久将相继问世。

冯元桢先生曾多次谈到，写作这套书的目的是为了用精确的力学语言来描述生理学中的力学问题，以使得生理学能变得和物理学一样清晰。事实上，以前我们阅读生理学著作时，常常发现由于物理原理被忽视以及缺乏数学工具，使其本身的发展受到束缚。而要使力学作为一种有力的工具应用于医学问题，绝非易事。生物力学工作者不仅需要必备的力学训练，也必须动手钻研生物医学，以便使自己对生动、复杂的生命现象有所认识。从而使自己对所感兴趣的生物医学课题具有独立识别的能力，并达到用工程手段去解决的水平。这就需要施以专门训练。这套书提供了良

好的教材。

多年以来，生物力学吸引着越来越多的科学工作者，且成果累累。但是，这门学科发展的背景及历史、所涉及的范围、理论基础、研究方法、采用的手段、达到的主要成就、以及今后有待解决的问题等，极需要给以全面地、系统地总结。这套书回答了这些问题，并建立起生物力学自己的学科体系。因此，这套书的出现无异于一块里程碑，标志着这门年轻学科的发展进入了一个新的阶段。

生物力学的创立和发展，渗透着冯元桢先生数十年的心血。这套书中的许多篇章，介绍的正是冯元桢先生自己的工作，体现了他自己的学术观点和思想。其中我要提请读者注意的是，对生理学中各类课题的认识和探讨，都是以经典的物理原理为基础，以清晰的物理概念来廓清生理学中存在的种种疑团，提出自己的一系列新颖见解。而在每个问题的研究中，以数学为脉络将实验、观察、数据、理论贯串一起，从而获得精确定量的结论。以本书为例，第二章中关于心肌应力分布的论述，以及第六章中肺微循

环片流理论的建立，把生理学中存在多年的两大课题提高到新的研究水平，尤能说明作者思想的深度和运用数学工具的力量。

我国的生物医学工作者还面临着一个特有的任务，这就是整理和提高祖国医学的水平。中医学是一个伟大宝库，是中华民族对人类的一大贡献。但应指出，祖国医学两千余年来面貌基本不变，这是很特殊的。在当今世界众多学科中，很难找到相似的情形。这一方面说明了先民的智慧，使得后人很难超越。另一方面，也向当代的科学工作者提出了挑战。中医学是以经验为基础，以古代朴素的辩证唯物论为基础理论，以诗文状述，比喻附会的方式著书传代。其实，中医学所探讨的生理和病理过程，一个重要的方面仍然是生命体的物理现象。如果通过我国科学工作者的努力，使得中医学获得坚实的实验基础，依据自然科学原理进行解释和探讨，以清晰的概念和精确的定量来描述，就更利于中医学的普及和提高。那末，中医学就会从区域性学科而发展为国际性学科，对于人类的贡献就会更大。希望我国的科学工作者能够从冯元楨先生这三部书中得到启发，正是我向国内读者介绍这套书

的目的之一。

即将出版的两部书是我约请大学时期的几位老师和同学共同翻译的，他们所给予的支持使我难以忘怀。湖南科学技术出版社生物技术编辑室的同志作了大量积极的工作，促成这套书的出版，他们很敏锐。在此表示我热忱的谢意。

最后，借此机会，感谢冯元桢先生多年来对我的培养、教诲和支持。

戴克刚

1985年于西安交通大学

序 言

本书是我所著《生物力学》(“Biomechanics”)一书的续集。上一部论述活组织的力学特性。这部书论述循环力学。第三部我将论述呼吸、体液平衡、运动、应力分布、体质强度以及应力与生长的关系。这部书称为《生物动力学》(“Biodynamics”),以区别于上一部,但沿袭同样的体裁。我的目的是用精确的力学语言来描述生理学中的力学问题,以使这一学科能变得和物理学一样清晰。

在《生物力学》的序言中,我曾提到过写这套书的动机,即是为了给生物医学工程、生理学、医学和力学专业的学生以生物力学方面的知识。很久以来,我总觉得需要有一套书,使生理学和医学专业的学生通晓于应用生物力学,同时提高他们的力学水准。动笔之前,我假定读者已具备了一定的力学基础知识,相当于我的《连续介质力学导论》(“First Course in Continuum Mechanics”) (“Prentice Hall”, 1977版)前七章的水平。然后,从生命科学的角度展开课题,同时通过一系列问题和例举提高读者的力学水平。主要正文读起来象一本生理书,但安排的练习却又类似于力学教科书。教师要能兼顾两个方面:讲解生命科学的基础部分,同时

逐步扩充学生的力学知识。

一个科学工作者的探索风格取决于他看待问题的角度。在本书所研究的每个生理学问题中，我要强调的是其数学条理、实验探索、数据收集、模型实验、在体观察以及理论思维，都能够用数学的脉络贯串一起。阐述问题的方法、所提出的疑问的性质，都符合于这一基本思想。然而，只要具备基础的数学知识，就可以阅读这部书的大部分。为了使读者能够顺利地阅读这些篇章，数学阐述常常是相当详尽地。

本书以血流的物理学讨论为开篇，然后顺序讨论心脏力学、动脉、静脉、微循环以及肺血流。在这些器官中，流体和固体的相互作用是其主要特点。在器官的血流分析中，每种场合都说明了是怎样的结构和流变特性在产生作用。附录中介绍了流体力学和固体力学基本方程式。质量传递的课题，血液和红血球之间以及毛细血管和管外空间之间进行的水、氧、二氧化碳和其他物质交换，将放在第三部书：《生物动力学：流动、运动和应力》（*Biodynamics: Flow, Motion, and Stress*），其目的是为了使这（三部书的篇幅相当。

循环学是一门综合性学科，本书着眼于循环力学。我们十分谨慎地介绍方法和基本方程式。充分讨论了各种方法的优点、弱点以及尚未解决的问题。要把这些方法应用于某一器官，尚需要数据基础。要解决问题，必须要有一套完整的几何形态解剖学数据以及器官材料的流变学数据。遗憾的是，目前的世界水平，尚没有对所有动物的所有器官都建立起这样的数据库。但对于猫肺，则已有一套完整的资料。因此，在第六章里，我详尽地介绍了肺血流的分析。希望在不久的将来，完成人和动物所有器官的解剖学数据以及流变学数据的系统收集，从而使器官生理学上升到一个更高的水平。

血液循环拥有丰富的文献，且发展非常迅速，这里涉及的资料必定有限。此外，未知的现象比已知的更多。为长远计，我将本书的范围限定于生物力学的几个基本方面。读者要想得到资料

手册或文献汇编，必须另去寻找。列出许多习题是为了鼓励学生阐明和解决新问题，这本书并不是一本习题解答集，所提供的是思考问题的方法。我要论证力学是研究生命科学的一种简便可靠的工具，仅此而已。每章末尾附有一个适当广泛的参考文献目录，从这些文献的注释中，可查找更多的参考资料。或许有人会指责作者多引证自己熟悉的论文和人物。我为这种个人的局限性而抱歉，并希望得到谅解，因为每个作者理所当然地要陈述自己的学术观点。而且，我已力求作到不遗漏提及其他观点的存在。

虽说我个人已竭尽全力并反复推敲，但可肯定，本书仍有许多缺点和不足之处。望您不吝赐教，以期改进于将来。

La Jolla 加利福尼亚

冯元桢

目 录

1	循环的物理原理	1
§ 1.1	守恒定律	1
§ 1.2	血流的动力或阻力	2
§ 1.3	流体牛顿运动定律	3
§ 1.4	湍流的重要性	6
§ 1.5	减速度可以比作压力梯度发生器	7
§ 1.6	血管内的压力和流动——广义伯努利方程	9
§ 1.7	总体外周流动阻力的分析	10
§ 1.8	血液流变学的重要意义	13
§ 1.9	循环力学	14
§ 1.10	历史的点滴回顾	14
§ 1.11	能量平衡方程	16
	参考文献	23
2	心脏	24
§ 2.1	引言	24
§ 2.2	心脏的形状和材料	28
§ 2.3	心电系统	31
§ 2.4	心动周期的力学过程	34

§ 2.5	心瓣膜是如何工作的?	41
§ 2.6	心脏的流体力学	47
§ 2.7	心肌	50
§ 2.8	心壁的应力	54
§ 2.9	需要残余应力分布的一种新假设	55
§ 2.10	最优工作原理	60
§ 2.11	新假设引起的结果	62
§ 2.12	包含肌肉纤维的连续体	65
	参考文献	70

3 动脉血流 76

§ 3.1	引言	76
§ 3.2	平板间或管内的层流	82
§ 3.3	Poiseuille公式的应用: 血管分枝的最优设计	86
§ 3.4	弹性管中的定常层流	91
§ 3.5	管道中的湍流	96
§ 3.6	脉动血流的湍流	98
§ 3.7	脉动流的频率参数	101
§ 3.8	血管中脉波的传播	105
§ 3.9	迭加于定常流的行波	116
§ 3.10	非线性波动的传播	119
§ 3.11	波动在分叉处的反射和传输	120
§ 3.12	频率对动脉树中任意点压力-流量关系的影响	129
§ 3.13	大动脉的压力波和速度波	135
§ 3.14	几何非均匀性的影响	137
§ 3.15	流体粘性和管壁粘弹性的影响	147
§ 3.16	非线性的影响	152
§ 3.17	流动与壁的分离	156
§ 3.18	动脉脉搏波的信息传递和临床应用	156
	参考文献	158

4 静脉 173

- § 4.1 引言 173
- § 4.2 弹性不稳定性的概念 175
- § 4.3 圆柱管在外压力作用下的不稳定性 181
- § 4.4 自然状态下就是椭圆的管 190
- § 4.5 可坍塌管内的定常流动 194
- § 4.6 静脉中的非定常流动 201
- § 4.7 肌肉活动对静脉血流的影响 208
- § 4.8 颤振 209
- § 4.9 当气管压力超过血压时肺静脉不闭合 216
- § 4.10 肺中的“瀑布现象” 223
- 参考文献 224

5 微循环 233

- § 5.1 引言 233
- § 5.2 微血管的解剖学 235
- § 5.3 微血管中的压力分布 242
- § 5.4 间质空间里的压力 246
- § 5.5 微血管中的速度分布 246
- § 5.6 速度分布与血细胞比容分布的关系 251
- § 5.7 小雷诺数流体力学 259
- § 5.8 奥森近似解及其他改进 267
- § 5.9 入口流动、大颗粒流及其它例举 269
- § 5.10 粒子和管壁的相互作用 274
- § 5.11 白血球和血管内皮的相互作用力 279
- § 5.12 血流的局部控制 287
- 参考文献 295

6 肺部血流 302

§ 6.1	引言	302
§ 6.2	肺部血管	305
§ 6.3	肺毛细血管	308
§ 6.4	肺动脉和肺静脉的弹性	312
§ 6.5	肺泡片的弹性	316
§ 6.6	肺毛细血管中血液的表观粘度	319
§ 6.7	解析问题的公式	323
§ 6.8	基本模拟理论	328
§ 6.9	片流的一般性质	331
§ 6.10	肺泡血流的压力-流量关系式	338
§ 6.11	肺的总体血流	342
§ 6.12	肺血流的区域差异	354
§ 6.13	当 $P_{v,n} < P_A$ 时的“闸门”状态	356
§ 6.14	肺中运行时间的分布	362
§ 6.15	其他方面的研究	367

参考文献 371

基本方程式 380

§ A.1	引言	380
§ A.2	质量和动量守恒	380
§ A.3	不可压缩牛顿流体的纳维-斯托克斯方程	383
§ A.4	各向同性虎克弹性固体的纳维方程式	384
§ A.5	血流动力学基本方程式	386
§ A.6	动力学相似性和雷诺数	389
§ A.7	弹性固体的基本方程式	391
§ A.8	粘弹性体	393
§ A.9	圆柱极座标系	395
§ A.10	湍流	398

参考文献 402

内容索引 403

1

循环的物理原理

§ 1.1 守恒定律(The Conservation Laws)

血流定然要服从质量、动量和能量守恒定律。对于任一给定的空间区域而言，质量守恒定律的含意是：凡是流入的必定流出。如果流动被限制在血管中，则可得到类似于基尔霍夫电路定律的法则：在任一节点，流入节点的血流总和必定等于流出该节点的血流总和。对于一根变截面的管道，定常流动的含意是：沿管道长度方向，流速和横截面积成反比。

动量守恒定律的内容为：在无外力作用的情况下，物体的动量不发生改变。若有外力作用于物体，则动量变化率等于外力。

这些定律虽已尽人皆知，但切莫因熟悉而掉以轻心。须知，人类之所以能飞上月球，正是因为懂得了牛顿定律。古希腊人尽管对心脏和血管的解剖学知之甚详，但终因他们忽视了质量守恒定律，从而失去了发现血液循环的荣誉！西方世界一直等到十七世纪，威廉·哈维（1578—1657）才创立了血液循环的概念。而哈维证明血液循环，只用了质量守恒定律，他只证明，随着每一次心搏，有血流流出心脏。

再没有什么比学习普遍原理并随时应用它们更有价值、更有