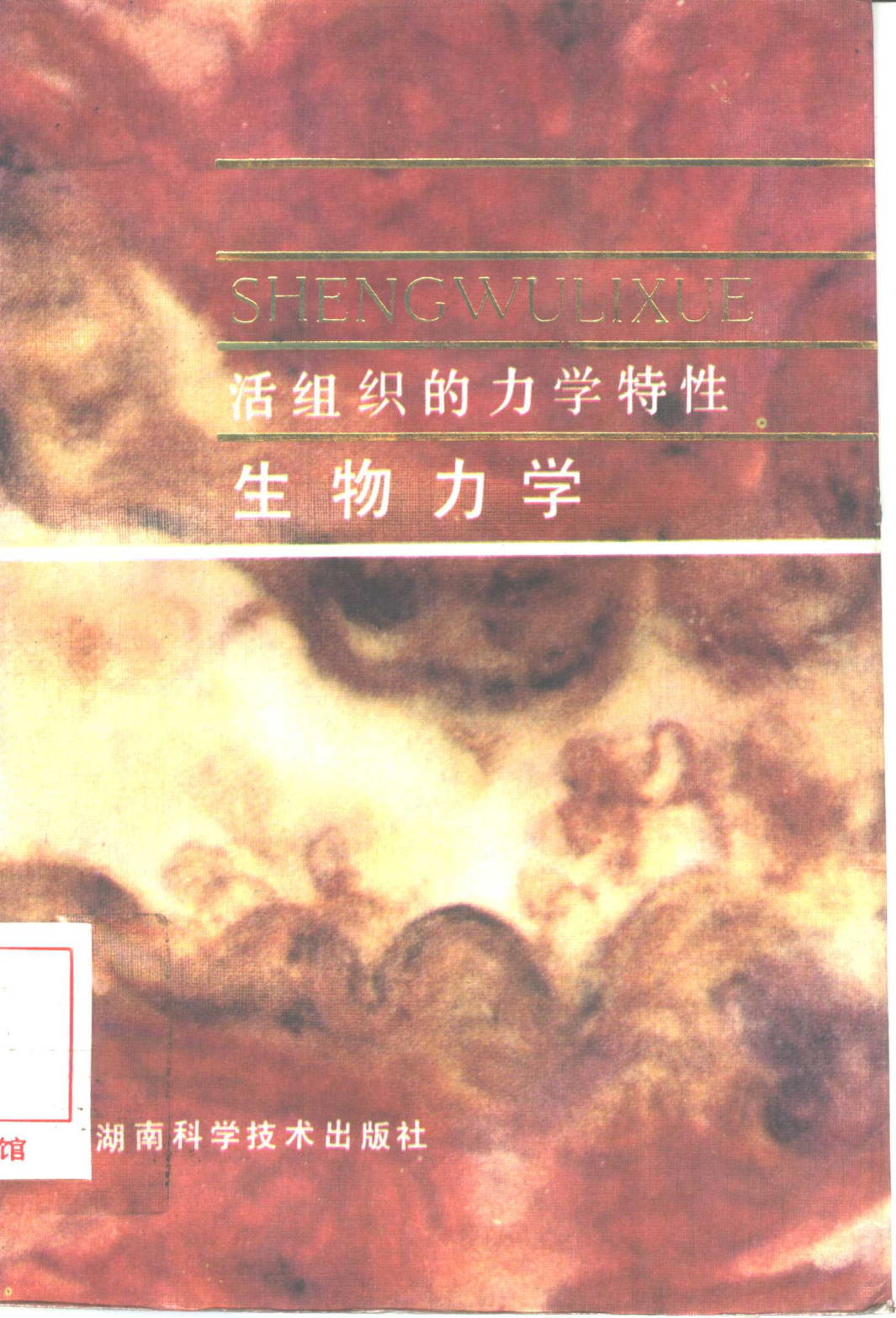




SHENGWULIXUE

活组织的力学特性
生物力学

馆

湖南科学技术出版社

生物力学

活组织的力学特性

〔美〕冯元桢 著

西安交大戴克刚 鞠烽炽译 匡震邦审校

湖南科学技术出版社

生 物 力 学

活组织的力学特性

〔美〕冯元桢 著

戴克刚 鞠烽炽 译

责任编辑：贺晓兴

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路3号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1986年12月第1版第1次印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：16.375 插页：4 字数：396,000

印数：1—2,000

统一书号：13204·146 定价：5.05元

征订期号：湘科 85—7(2)

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，为我国学术界作出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。本书是其中第一部的中文译本。

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等，极需要给以全面地、系统地总结。这套书回答了这些问题。在历史上第一次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分析、解释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桢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(《生物力学：活组织的力学特性》和《生物动力学：血液循环》)是我们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。湖南科技出版社生物技术编辑室的同志作了大量积极的促进工作，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

序 言

我写这套书的动机，是为了向生物工程、生理学、以及力学方面的学生介绍“生物力学”这一迅速发展的学科。事实上在七十年代人们即已公认，所有大学都应设置生物力学课程。然而，尚没有适用于大学教育的教科书，也从未出版过足够广博的专论。已有的几本以《生物力学》为书名的书都过于初步，其他的又过于专门化。很久以来，我总觉得需要有一套书，向学生讲述生物力学在生理学和医学上的应用，同时又提高他们的力学水准。我们不能认为，所有学习生物力学的学生都已具备流体力学和固体力学方面的完备训练，因而在本课程进行的过程中，还必须使学生扩充这些学科的知识。这套书采取的写作方案如下。首先，假定读者已具备一定的力学基础知识，达到我的《连续介质力学导论》(Prentice-Hall, 1977) 前七章的水平。再从生物医学工程、生理学、以及医学应用的观点出发，讲述生物力学的某些基本部分。同时，通过一系列问题和例题来扩充学生的力学知识。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：讲解生命科学的主要部分，同时逐步提高

学生的力学知识。

本书是这套书的第一册。讨论生物材料的力学特性。

生物力学目前所达到的研究水平已超出了基础数学的范畴。为充分发展这一学科，必须应用连续介质力学中的高等处理方法。对于这些较高深的课题，大概只有学生已具备适当的流体力学和固体力学训练后方易于理解，将在第三册《高等生物力学》中给予阐述。

要在一门课程里容纳生物学和物理学两个课题并非易事。生物学包含有大量描述性材料，而力学的目的是进行定量分析。为使这些学科结合起来，有时需要使行文的风格变化，在这里强调数学的清晰，在那里又描述解剖学。这种风格的变化更多表现在开始部分，需要介绍必备的背景材料。

关于练习，需要特别讲几句。力学专业学生的茁壮成长离不开练习。我们必须持之以恒地力求对问题列式和求解。只有通过这种实践，我们才能使生物力学成为一门有活力的学科。我不愿意这本书成为一本习题解答集。我希望提供思考问题的途径。我希望阐明，力学可以作为简便、定量的工具来运用。为此缘故，课文里已对许多问题提出解答，其中一些是用来告诉读者某些已公布的结果，还有一些是为了将读者引导到新的研究途径。我遵循这一宗旨，甚至一开始在第一章的引言部分即已提出某些问题和解答。我想以此书作为教科书的同行们会表示赞同，因为第一课后就可以给学生指定习题。

根据我们限定的目的，就不能要求这本书成为全面的专题汇编或现有资料的手册，也不能是文献评论。那样的目的，需要庞大得多的书籍。本书中我们仅开展几个互有关联而又重要的课题。并没有提供广泛的文献目录，所列的参考文献仅限于课文中引用的文献。或许有人会批评作者多引证自己熟悉的论文和人，我为这种个人的局限性而抱歉，并希望得到谅解，因为每个作者谈论自己的观点多于谈论他人的观点是很自然的。而且，我已力图作到不漏提及存在的其他观点。

生物力学是一门年轻的学科。我们对这一学科的认识尚未臻于完美。还有许多必需的资料没有获得；许多可能的重要应用尚未达到。我们目前的见解有许多弱点。例如，在第七章讨论的组织力学，是以准粘弹性和拟弹性的概念为基础，可能某一天会用完全非线性的却又并不太复杂的本构方程式来取代它。第八章讨论的血管力学是以二维平均为基础的。在第九至十一章的肌肉力学的讨论中，指出了这方面知识的不足。提出了取代 Hill 模型的理论。当本书付印的时候，我曾期望新模型的实验室验证工作能告以完成；然而事情却不尽如人意；有关减退记忆的方法仍为设想阶段。第十二章我们讨论了组织在应力作用下的生长和再吸收。这一专题对于每种活组织的研究都具有普遍重要的意义，但仅有对骨骼有关的定量资料。我们完全可以预言，在将来，生长和再吸收的本构方程的研究将成为生物力学的重大课程。这类方程对于外科手术、矫形外科学、正牙学、视轴矫正法、人体造型、以及运动员训练都有直接的用途。这类方程式基本上使生物力学有别于其他力学分支。为了说明生长和变化的这种意义，我在第十二章中专门写了有关骨骼中血液循环的一长节。这表明我期望这一学科能在未来获得迅速的发展。

许多作者和出版者同意我在本书中引用他们的文章或复制有关的图表资料，在此谨致谢意。特别值得感谢的是 Sidney Sobin, Evan Evans, Hargr Goldsmith, Jen-Shin Lee, Wally Frasher, Richard Skalak, Andrew Somlyo, Salvatore Suter, Andrus Vliidik, Joel Price, Savio Woo, 以及 Benjamin Zweifach 诸教授，他们为制版提供了原始图片。

本书的蓝本是过去十余年我在加州大学圣地亚哥分校采用的讲义。这些班级的学生先后曾参加讨论，我对此表示谢意。本书记载的大量结果，都是我的同事、朋友、和从前的学生的工作。Sidney Sobin, Benjamin Zweifach, Marcos Intaglietta, Arnos^t 和 Kitty Fronek, Wally Frasher, Paul Johnson, Savio Woo 诸教授，自始至终与我在这一学科领域内合作。Jen-shi lee, Pin

Tong, Frank Yin, John Pinto, Evan Evans, Yoram Lanir, Hyland Chen, Michael Yen, Donald Vawter, Geert Schmid-Schoenbein, Peter Chen, Larry Malcom, Joel Price, Nadine Sidrick, Paul Sobin, Winston Tsang和Paul Zupkas诸博士, 为本书贡献了大量材料。尤需感谢Paul Patitucci 对资料的数据处理所作的贡献。Yuji Matsuzaki使我对流动的分离和稳定性的理解有不少帮助。Zhuong Feng-Yuan 教授阅读了清样并提出了不少有益的建议。Engene Mead保证了实验室工作。Rose Cataldi和Virginia Stephens打印原稿。我感谢他们全体。

最后,我还要感谢 Springer-Verlag 出版社的编辑和职员们, 在本书出版过程中他们给予了协助和合作。

La Jolla 加利福尼亚

冯元桢

目 录

1	前言：历史梗概和学科范围	1
§ 1.1	何谓生物力学	1
§ 1.2	历史渊藪	2
§ 1.3	介绍一个名字	7
§ 1.4	生理学中的力学问题	9
§ 1.5	生物力学对健康科学有何贡献	11
§ 1.6	我们的研究方法	14
2	本构方程的意义	25
§ 2.1	引言	25
§ 2.2	应力	26
§ 2.3	应变	30
§ 2.4	应变率	36
§ 2.5	本构方程	37
§ 2.6	无粘性流体	37
§ 2.7	牛顿粘性流体	38
§ 2.8	虎克弹性固体	40

§ 2.9	温度的影响	42
§ 2.10	具有更复杂力学性能的材料	43
§ 2.11	粘弹性体	47
§ 2.12	粘弹性体对于简谐激励的响应	54
§ 2.13	粘弹性模型的应用	57
§ 2.14	试验方法	64
3	血液的流动特性	70
§ 3.1	血液流变学: 概述	70
§ 3.2	本构方程	76
§ 3.3	血液在圆管内的层流运动	82
§ 3.4	血液粘性产生原因的推测	91
§ 3.5	红血球与固态壁之间的流体——机械作用	100
§ 3.6	凝结	102
§ 3.7	血液流变学在医学上的应用	104
4	红血球及其可变形性	115
§ 4.1	引言	115
§ 4.2	人类红血球的尺寸和形状	118
§ 4.3	极值分布	124
§ 4.4	红血球(RBC)的可变形性	128
§ 4.5	红血球弹性的理论分析	130
§ 4.6	细胞膜的实验	138
§ 4.7	红血球膜的弹性	149
§ 4.8	红血球膜的模型	153
5	微血管内的血液流变学问题	157
§ 5.1	引言	157
§ 5.2	表观粘度和相对粘度	158
§ 5.3	血管尺寸对血液表观粘度的影响: Fahraeus— Lindqvist效应	165
§ 5.4	在相当细的刚性管道中悬浮粒子的分布	169

- § 5.5 红血球在紧配管中的运动 169
- § 5.6 在非常窄细的管道中Fahraeus—Lindqvist 效应的
逆转 176
- § 5.7 非常细的管道中的血球容积比 180
- § 5.8 理论研究 189

6 生物粘弹性流体 198

- § 6.1 引言 198
- § 6.2 测试方法和数据表示 201
- § 6.3 原生质 206
- § 6.4 呼吸道内的粘液 207
- § 6.5 唾液 211
- § 6.6 子宫颈粘液和精液 212
- § 6.7 关节液 214

7 生物粘弹性固体 222

- § 7.1 引言 222
- § 7.2 一些弹性材料 223
- § 7.3 胶原 230
- § 7.4 弹性变形的热力学 242
- § 7.5 在单轴加载下组织的特性 247
- § 7.6 软组织的准线性粘弹性 254
- § 7.7 增量定律, 拟弹性概念 269
- § 7.8 软组织的双轴加载 273
- § 7.9 三维应力——应变状态描述 276
- § 7.10 皮肤的本构方程 281
- § 7.11 广义的粘弹性关系 286
- § 7.12 余能函数应力—应变函数的反演 287

8 血管的力学特性 297

- § 8.1 引言 297
- § 8.2 血管的力学特性与其组成材料的成份和结构

之间的关系 298

- § 8.3 单轴载荷下动脉的性质 308
- § 8.4 双轴载荷下动脉中的应力 318
- § 8.5 拟弹性应力—应变关系的数学表达 314
- § 8.6 动态实验：波的传播 320
- § 8.7 小动脉 322
- § 8.8 毛细血管 325
- § 8.9 静脉 329
- § 8.10 对应力的长期响应 335

9 骨骼肌 343

- § 9.1 引言 343
- § 9.2 肌肉的功能排列 344
- § 9.3 骨骼肌的结构 346
- § 9.4 肌肉作用的滑移元理论 349
- § 9.5 单个抽动和波动叠加 350
- § 9.6 骨骼肌束的收缩 351
- § 9.7 强直性痉挛肌肉的Hill方程 352
- § 9.8 Hill 的三元素模型 358
- § 9.9 其它的方法 367

10 心肌 374

- § 10.1 引言：心肌和骨骼肌细胞的区别 374
- § 10.2 未受刺激的心肌的性质 379
- § 10.3 激活心肌的特性 388
- § 10.4 长度较短、可忽略静息张力的活性肌肉 389
- § 10.5 在使静息张力显著的长度范围内受刺激的乳突肌 397
- § 10.6 心肌力学和整个心脏的性质 398

11 平滑肌 403

- § 11.1 平滑肌的种类 403

- § 11.2 收缩机构 406
- § 11.3 平滑肌有节律的收缩 409
- § 11.4 静息平滑肌的性质：输尿管 415
- § 11.5 静态平滑肌：结肠带 421

12 骨和软骨 **435**

- § 12.1 骨的力学性质 435
- § 12.2 骨是有生命的器官 442
- § 12.3 骨的功能适应性 446
- § 12.4 骨中的血液循环 451
- § 12.5 软骨 454
- § 12.6 关节软骨的粘弹性 455
- § 12.7 关节软骨表面的润滑特性 462