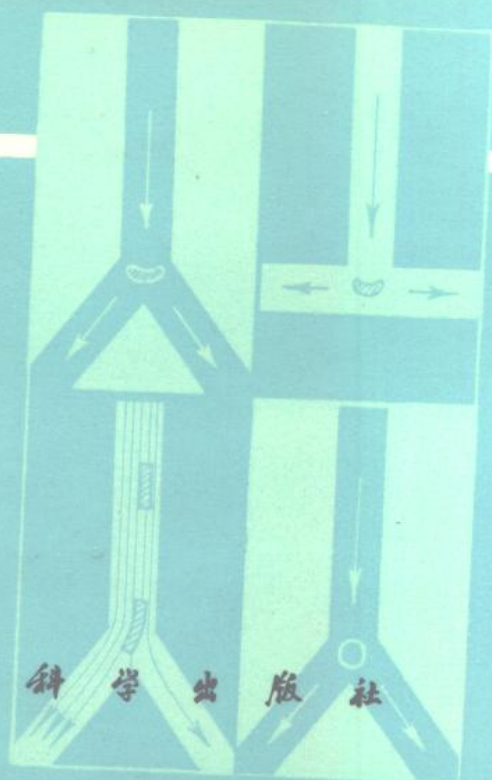


冯元桢著

生物力学



生物力学

冯元桢 著



科学出版社

1983

内 容 简 介

本书是在现代生物力学的开拓者之一，美国工程科学院院士——冯元桢教授 1979 年底在我国的讲学录的基础上编写而成的。书中以他和他的实验室的工作为主体，介绍了生物力学的历史、主要成果、特点、研究方法和应用前景。全书着重阐明概念和原理，尽量避免复杂的数学推导，论述简明扼要。

可供生物学、医学、力学和工程技术等各方面有志于生物力学，或对生物力学感兴趣的科技人员及有关大专院校师生参考。

生 物 力 学

冯 元 桢 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

*

1983 年 10 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1983 年 10 月第一次印刷 印张：13 5/8

印数：精 1—3,640 插页：精 3 平 2

平 1—3,500 字数：358,000

统一书号：13031·2290

本社书号：3136·13—10

定价：道林布面精装 5.40 元
报 纸 平 装 2.55 元

序 言

生物力学是一门古老而又年轻的科学,最近一、二十年来才突飞猛进。主要由于:一、可以促进对自然界动植物的了解;二、对医学卫生、生理、病理研究有所贡献;三、对舟车、飞机、宇航的安全设计有决定性作用;四、扩大了力学的园地,增加了新材料、新问题,因而要求新方法、新发展。其中第二个动力尤为重要。因为近年来世界各国莫不为医药卫生的进步,一则以喜,一则以忧。喜其增进了人民的健康与寿命;忧其费用太大,变成国家及人民经济的一个重大负担。生物力学为建议或改进诊断或治疗的方法,增加了一个新的工具,有助于提高效率、减轻负担,所以引起广泛的兴趣。

生物力学用力学的方法来处理从前不属于力学的问题,使许多医学及生理学上知其然而不知其所以然的观察及经验有了较深的了解。它的目标是看生物界繁复无穷的现象,是否可以用几个基本的物理概念来解释。生物力学的基础就是能量不灭、动量不灭、质量不灭三定律,加上描写物性的本构方程。假使一个现象可以用这些基本概念来解释,那就容易了解。从而对该现象的新的应用,也就有把握用力学的方法来演绎了。所以生物力学能为已经用的或新建议的方法提供一个可靠的分析工具。工欲善其事,必先利其器。生物力学是研究医学的工具之一。这个工具造得好,用得好,可以使工作效果好而省钱。所以医学卫生愈普及,愈昂贵,生物力学愈有发展的必要。

中国除了有与世界各国相同的情形外,另有一份特别的、祖先传下来的宝贵遗产,那就是中医和气功。我不懂中医和气功,但我想,生物力学可能是研究中医和气功的工具之一。

1979年秋天,华中工学院和重庆大学举办生物力学讲习会,

并于 11 月 23 日至 25 日在重庆大学召开全国第一次生物力学会议,要我有系统地介绍一下生物力学的内容。我们决定于 10 月 4 日到 11 月 1 日间,在华中工学院讲生物组织和材料的物理性能。于 11 月 9 日到 22 日之间,在重庆大学讲血流问题。前者是生物的材料力学,也就是生物流变学,着重在导致本构方程式。后者是生物力学的许多应用之一。这本书就是那个讲习会的讲稿,由陶祖莱、王君健、吴云鹏、王公瑞整理、编写出来的。

我本来有一个写一本生物力学的十年计划,已经开始了几年。为了讲习会的需要,我赶紧准备了一份材料,是用英文写的。可惜页数太多,打好字,连插图共计 1600 多页,带到了武汉,但复制价格昂贵、纸张难筹,又为时仓促,没有来得及早日寄回。所以当时没有能发给参加讲习会的各位,迄今犹觉歉然。在重庆时,吴云鹏和重庆大学动力系及生物力学研究室的同志们,在短短的时间中,翻译并印发了一本生物工程论文选,共 400 页,作参考之用,真是不容易的。我非常感谢。这些材料,现在大部分都由陶祖莱、王君健、吴云鹏、王公瑞四位精选后,纳入目前这本书里了。

我和他们四位第一次见面是在 1979 年夏天。那时他们到美国加州大学圣地亚哥分校来访问,并参加第二次世界微循环会议,在我的实验室工作了两个月。这期间,我们学术切磋,使我获益不少。

他们整理编写这本书,工作是十分繁重的。祖莱最用功。1979 年 10 月我们在武汉,每天上午我讲三小时,下午座谈二、三小时。祖莱大概每天晚上整理编写,因为每等不了几天,他的稿子就写成交给我了。这书里第二、三、四、七、八、十二、十四章就是祖莱这样写成的。君健写的第一章引论,是在重庆写的,第十五、十六两章讲肺力学,是他在 1980 年春天整理编写的,比我当时讲的材料多得多。云鹏负责写第五、十一、十三章;而第六、九、十章则由公瑞执笔,都费了许多心血。大家稿成后,都交给陶祖莱总其成,以求文体和名词的统一,并由他与科学出版社联系。其中往复商讨,费去的时间和精力,岂是可以用时日计的!而我在这整个编写工作中,

除了看过部分初稿外，仅在定稿时又看了一遍。在此谨向他们致真诚的谢意。

目前在生物力学园地里工作的人，不是学医的，就是学理工的。这本书的对象，也是学医的和学理工的，所以书里对于数学的应用，力求简洁。既不可避免，亦不注重。书内选入的材料，一半以上是生物组织的物理性质，我想这选择不会太错。因为生物力学所以异于别的力学，最重要的就在于材料性质的不同。而身体的健康，决定于器官组织的物理性能的正常与否。所以测量物理性能，也是诊断的重要手段。

书里的另外一半，只讨论了血流的问题。而对引论中列举的生物力学的种种别的应用，一概没有讨论。这样以偏概全，一小半理由是讲习会时间的限制，和避免这本书变得太大。一大半是由于作者对别的问题所知更少，不敢执笔。生物力学还年轻，它正在迅速成长中。许多问题，还没有解决，有许多现象，还不晓得怎样提问题。一定还有更多的现象，现在还没有被发现。所以一本书里的材料的不全面，是不可避免的，这倒还好说，等将来改进吧！不过，就是书中选入讨论的问题，取材也偏重于作者熟知的工作，及亲自参与的实验，而没有做百科全书性的文献通考，报告现状，这个缺失，是我要向读者道歉的。作者所知有限，书中一定有许多错误，我希望读者在发现错误时，写信告知，使我们以后得以改进。

最后，我要记载对华中工学院朱九思院长，以及我从前的热机学老师——重庆大学金锡如副校长的感谢，是他们的提倡，促成了生物力学讲习会的举办。更要感谢教育部的支持和国家四化的政策；要不是有这个政策，恐怕不会有讲习会，更不会有这本书了。

冯元桢

1981年1月

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 何谓生物力学.....	1
§ 1.2 历史渊源.....	1
§ 1.3 研究的方法.....	4
§ 1.4 生物力学对保健事业的贡献.....	5
参考文献.....	8
第二章 血液的流动性质	9
§ 2.1 流体的粘性.....	9
§ 2.2 血液的粘度.....	11
§ 2.3 血液在圆管内的层流运动.....	16
§ 2.4 关于血液的非牛顿粘性的原因的推测.....	22
§ 2.5 红血球和固壁间的流体动力相互作用.....	30
§ 2.6 血液的本构方程.....	31
§ 2.7 血液流变学在医学上的应用.....	34
参考文献.....	36
第三章 红血球及其变形	39
§ 3.1 人类红血球的几何形状.....	39
§ 3.2 红血球大小的极值分布.....	44
§ 3.3 红血球的可变形性.....	47
§ 3.4 红血球弹性的理论分析.....	50
§ 3.5 细胞膜力学性质的实验研究.....	55
§ 3.6 红血球膜的本构方程.....	61
§ 3.7 红血球膜的构造模型.....	63
参考文献.....	64
第四章 微血管内的血液流变问题	67

§ 4.1	表观粘度和相对粘度·····	67
§ 4.2	血管尺寸对血液表观粘度的影响——Fahraeus-Lindqvist 效应·····	72
§ 4.3	红血球在细管内的运动·····	76
§ 4.4	Fahraeus-Lindqvist 效应的逆转 ·····	82
§ 4.5	细管内的血球比积·····	85
§ 4.6	若干理论分析·····	93
	参考文献·····	95
第五章	生物粘弹性流体 ·····	97
§ 5.1	应力、应变及本构方程 ·····	97
§ 5.2	研究粘弹性流体的意义及方法·····	110
§ 5.3	粘弹性流体的小变形振荡与流动·····	112
§ 5.4	原生质·····	115
§ 5.5	呼吸道内的粘液·····	116
§ 5.6	唾液·····	118
§ 5.7	子宫颈粘液和精液·····	119
§ 5.8	关节液·····	120
	参考文献·····	123
第六章	生物粘弹性固体 ·····	124
§ 6.1	几种弹性材料·····	124
§ 6.2	胶原纤维·····	127
§ 6.3	弹性变形的热力学分析·····	134
§ 6.4	在单轴载荷下组织的反应·····	137
§ 6.5	软组织粘弹性的准线性理论·····	145
§ 6.6	拟弹性的概念·····	158
§ 6.7	软组织二维应力实验·····	159
§ 6.8	软组织的三维应力-应变关系 ·····	160
	参考文献·····	164
第七章	血管的力学性质 ·····	168
§ 7.1	血管壁的构造·····	168

§ 7.2	一维拉伸时动脉血管的性状·····	170
§ 7.3	二维拟弹性应力-应变关系 ·····	179
§ 7.4	动脉中的波动·····	184
§ 7.5	微动脉的力学性质·····	185
§ 7.6	毛细血管·····	187
§ 7.7	静脉·····	189
	参考文献 ·····	191
第八章	肌肉的力学性质·····	194
§ 8.1	骨骼肌、心肌和平滑肌 ·····	194
§ 8.2	骨骼肌的结构和收缩机理·····	196
§ 8.3	Hill 方程·····	199
§ 8.4	Hill 方程的一般化·····	202
§ 8.5	心肌的力学性质·····	214
§ 8.6	平滑肌的力学性质·····	224
	参考文献·····	236
第九章	骨与软骨的力学性质·····	240
§ 9.1	骨的力学性质·····	240
§ 9.2	骨是有生命的器官·····	246
§ 9.3	骨的功能适应性·····	246
§ 9.4	软骨·····	250
§ 9.5	关节软骨的粘弹性·····	251
§ 9.6	关节软骨表面的润滑特性·····	256
	参考文献·····	262
第十章	基本方程·····	264
§ 10.1	质量守恒和动量守恒 ·····	264
§ 10.2	不可压缩牛顿流体的纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程 ·····	267
§ 10.3	各向同性胡克体的纳维方程 ·····	267
§ 10.4	血流动力学基本方程 ·····	269
§ 10.5	血液流动的相似性、雷诺数·····	270

参考文献	274
第十一章 动脉中的血液流动	275
§ 11.1 动脉系统	275
§ 11.2 圆管层流	278
§ 11.3 管路中的湍流流动	283
§ 11.4 脉动流的频率参数	285
§ 11.5 血管中波的传播	288
§ 11.6 叠加于定常流动的行波	291
§ 11.7 波在管路分支处的传导和反射	292
§ 11.8 血管几何非均匀的影响	295
§ 11.9 频率对动脉中压力与流量关系的影响	297
§ 11.10 管路进口过渡段的影响	297
§ 11.11 弯曲对流动的影响	298
§ 11.12 流体粘性和管壁粘弹性的影响	299
§ 11.13 流动分离	302
参考文献	303
第十二章 微循环	304
§ 12.1 微循环流动的特色	304
§ 12.2 微血管组织的构造	304
§ 12.3 微循环流的实验观测	308
§ 12.4 毛细血流的随机特色	315
§ 12.5 微循环力学问题概述	320
§ 12.6 肺微循环	325
参考文献	344
第十三章 静脉力学和静脉内的血液流动	345
§ 13.1 静脉血液流动的特点和弹性不稳定性概念	345
§ 13.2 在外力作用下圆管的不稳定问题	347
§ 13.3 椭圆管的稳定性分析	352
§ 13.4 可坍塌管内的定常流动	355
§ 13.5 静脉中的非定常流	359

§ 13.6 肌肉作用对静脉流动的影响	362
§ 13.7 流动的分离和颤振	363
参考文献	363
第十四章 心脏力学	364
§ 14.1 心脏的构造	364
§ 14.2 心电系统	367
§ 14.3 心搏的力学过程	369
§ 14.4 心脏的流体力学问题	375
参考文献	381
第十五章 气体在肺内的流动、混合和扩散	382
§ 15.1 解剖结构	382
§ 15.2 气体在气管中的流动	382
§ 15.3 气流与扩散的相互作用	390
§ 15.4 肺泡中的扩散	397
§ 15.5 肺泡壁上的气体交换	400
§ 15.6 三维扩散	405
§ 15.7 通气血流比在肺中的分布	406
参考文献	407
第十六章 肺的弹性和稳定性	408
§ 16.1 应变与肺泡隔膜的几何关系	408
§ 16.2 应力与肺泡隔膜的几何关系	410
§ 16.3 肺实质的本构关系	415
§ 16.4 稳定性	419
参考文献	426

第一章 概 论

§ 1.1 何谓生物力学

力学是研究运动的科学。生物学是研究生命的科学。生物力学则是研究生物与力学有关的问题。它的内容是十分丰富的。从鸟飞鱼游到鞭毛虫和纤毛的运动;从人的整体到各个器官,包括血液、体液和气体与水分的运动,以及植物体内水分的输运等。

本书主要讨论与生理学和医学有关的力学问题。这部分内容也正是近世生物力学的重点。人们之所以重视这方面的课题,主要是认为:如果没有生物力学就不可能很好地了解生理学。这正如其他工程问题一样,例如:没有空气动力学就不可能了解飞机的性能,也不可能进行合理的设计。不仅如此,我们知道,飞机设计上的重大改进,差不多总是与固体力学和流体力学的基本进展相关联。同样地,对于一个器官而言,生物力学可以有助于了解器官的功能,由功能的变化来推知变化的生理或病理含义,从而设法进行防治。这就更为深刻地丰富了生理学和医学的内容。因此,近年来生物力学受到重视是很自然的。

§ 1.2 历史渊源

生物力学很早就受到了科学家的注意。一个光辉的例子是血液循环的发现。在西方,它是 Harvey 在 1615 年发现的。这个现在看起来很明显的事实,在当时却是很不易的。当时还没有显微镜,终其一生,Harvey 没有看见过微血管,当然也就不可能见到血液经动脉流向静脉的过程。此外,还有一个明显的困难,就是动脉中的血液与静脉中的血液看来不相同。他的发现是逻辑推理的结

果。在当时是一个“理论”的结论。实际上,微血管直到 1661 年才为 Malpighi 发现,比 Harvey 的预言晚了四十五年。

Harvey 曾跟伽利略学习过。早在 1615 年就已形成了血液循环的看法,但直到 1628 年才发表。当他弄清楚了血液只能向一个方向流出心室以后,他就着手测量心室的容量。他发现是二英两。心脏每分钟搏动 72 次,因此每小时搏出的血液应为 $2 \times 72 \times 60$ 英两 = 8640 英两 = 540 磅! 这么大的血液从何而来? 又流向何处? 于是他认为: 必定有一个循环系统存在。这不就是大家所熟知的质量守恒法则、流体力学中的连续性原理吗?

实际在动物体内发现微循环的,是 Malpighi (1628—1694)。他解剖了青蛙的肺,看到了微血管的存在及其中的血流。他的描述即使在今天来看也是很精采的。

稍长于 Harvey 的伽利略,在他成为一位著名的物理学家之前,是一个医科学学校的学生。他曾经找到了摆长与周期的定量关系,并用摆来测定人的心率,用与心搏合拍的摆长来表达心率。

在伽利略等人的影响下,数学家笛卡尔企图从力学的观点来研究生理学。但他在生理方面并没有实际的知识,他纯粹从理论上建立了一个十分复杂的动物结构模型,包括神经的功能。后来的研究大都不能证实他的预断。这就使得人们对他的这种研究方法失去了信心。其实他的那部遗作是一部重要的著作,其中有错误,但也有很宝贵的创见。

Borelli (1608—1679) 是一位意大利的数学家和天文学家。他没有笛卡尔那样的雄心,却获得了较好的效果。在他的著作《论动物的运动》(1680) 一书中,成功地阐明了肌肉的运动和动物自身的运动问题。他讨论了鸟飞和鱼游,心脏和肠的运动。

Boyle 研究过肺,并讨论了鱼的呼吸与水中空气的关系。Euler 在 1775 年写了一篇论文论述波在动脉中的传播。Young (弹性模量就是以他的名字命名的) 是伦敦的一个医生。当他看到三棱镜分光为彩色光谱的时候,他创造了光的波动理论,同时还建立了声带发音的弹性力学理论(杨氏模量就是为此而提出的)。另

外一位流体力学家是 Poiseuille, 当他还是一位医科学学校学生的時候, 就发明了用水银计来测量狗主动脉的血压, 并且发现了粘性流体在直圆管层流中压力差与流量的关系, 后世称之为 Poiseulli 定律。

Von Helmholtz 堪称为“生物工程之父”。他是 Königsberg 大学的生理和病理学教授, Bonn 大学的解剖和生理学教授, Heidelberg 大学的生理学教授, 最后在柏林大学(1871)是物理学教授。当他刚从医科学学校毕业在军队工作时, 在营房里写出了“能量守恒定律”。他在光学、声学、热力学、电动力学、生理学和医学上都作出了贡献。他发现了眼的聚焦机理, 并继 Young 之后写出了彩色视觉的三色理论, 他发明了晶状体镜来研究眼球内晶体的变化, 发明了眼底镜来观察视网膜; 他研究了听觉的机理并发明了 Helmholtz 共振仪。他的涡量守恒定理是流体力学的基础。他的著作“声调的感受”(Sensation of Tone), 至今仍广为流传。他第一次确定了神经脉冲的传播速度为 30 米/秒, 并指出肌肉收缩所释放的热是动物热的重要来源。

另外一些为工程界所熟悉的有: 生理学家 Fick 的扩散定律; 流体力学家 Korteweg (1878) 和 Lamb (1898) 对血管中波的传播的分析; Frank 提出了心脏流体动力学理论; Van der Pol (1929) 用非线性振荡器来模拟心脏, 并用四个 Van der Pol 振荡器组成的模拟装置, 得到了逼真的心电图。

另外, 还有 Hales 测量了马的动脉血压, 并寻求血压与失血的关系。他用蜡作出心室处于舒张压时的模型, 然后测量模型的体积以估计心输出量。通过测量, 他估计出心肌力。他还测量了主动脉的膨胀特性, 并借此解释心脏泵出的间歇流如何转化成血管中的平稳流。他认为动脉的扩张功能类似于消防机的空气室, 它可以使泵出的间歇流变为平稳的射流。他在血液流动中引进了外周阻力的概念, 并指出这种阻力主要来自组织中的微血管。他还进一步指出: 热水和白兰地酒具有扩张血管的功效。

Frank 提出了心脏的流体力学理论。Starling 提出了物质透过

膜的传输定律,并说明了人体内水平衡的问题。Krogh 由于对微循环的贡献而获得诺贝尔奖。Hill 则因肌肉力学而获诺贝尔奖。他们的贡献为生物力学奠定了基础。

§ 1.3 研究的方法

在讨论生物力学问题时,我们仍依照力学的传统方法,按如下步骤进行:

(1) 首先考虑生物的形态,器官的解剖以及组织的结构和微结构,借此了解所研究的对象的几何特点。

(2) 测定组织或材料的力学性质,确定本构关系,在生物力学中往往是很困难的。这是因为我们往往不能将组织分离出来进行试验;或是由于所要求的组织试件尺寸太小;或是难于使组织维持在活体状态。再则,生物组织产生的变形往往是很大的(大的意思是应变-位移关系是非线性的)。应力-应变关系通常是非线性的,并与受力的历史过程有关。

(3) 根据物理学中的基本原则(质量守恒、动量守恒、能量守恒和 Maxwell 方程等)和组织的本构方程,导出其主要的微分方程和积分方程。

(4) 弄清础器官工作的情形,以期获得有意义的边界条件。

(5) 用解析方法或数值方法解边界值问题(具有合适条件的微分方程或积分方程)。

(6) 作生理实验以验证上述边界值问题的解。若有必要,另立数学模型求解,以期理论与实验相一致。

(7) 探讨理论与实验在实际中的应用,研究是否有作更进一步改进的必要。

显然,在研究的过程中,理论和实验必须互相参照,进行修正,以期获得一致,并能使问题在定性和定量方面得到满意的说明。这样,当器官组织的性质或某些边界条件发生变化时,我们即可据此预言其机能的变化,从而有助于诊治。

目前绝大多数问题都还不能按上述步骤满意地解决,因为困难是很多的。对生物力学工作者来说,最大的困难常常是缺少活体组织本构方程的资料。没有本构方程就无从着手分析。反过来,没有边界值问题的解,也无法确定本构关系。这正是本书强调本构方程的原因。从第二章到第九章讨论的都是这类问题。在生物流体中,血液谈得详细些;在生物固体中,侧重于血管、肌肉、骨和软骨。

§ 1.4 生物力学对保健事业的贡献

生物力学的大多数研究工作,是为了提高对生命系统的基本认识,从而设法在生病时采取相应措施。任何重要的生物工程设计,除了已为人们所真正解决了的以外,都还应作更深入的研究。例如人工心脏瓣膜,现在已经是普遍的了,但是还需要进一步提高其使用寿命,尽可能减少它对血液的损伤;设法消除血液与人工材料交接面处的不良的相互作用;简化抗凝处理等。为了有效地改进第二代产品,我们必须了解血液在心脏内、在流过瓣膜时以及在主动脉中是如何流动的。为此就需要采用现代化的手段。如用激光干涉仪和超声图象仪等来研究几何和动力相似的模型内的流动;利用特殊的显示技术来观察二次流的发展过程;编写出计算程序来确定速度和应力的具体分布情形,设计专门设备来研究湍流。我们很有必要在这方面作出努力,就如当年发展飞机和火箭时那样。航空工程师们有这样的经验:设计上的重大改进往往是由于固体力学和流体力学在基础理论方面取得进展才引起的。并且,对一个年青的工程师来说,最有效的培养莫过于授予他们以基础知识。

生物医学问题是非常复杂的。如以人工心脏瓣膜为例。除了流体力学,我们还需懂得血液流变学、血液与心壁的内皮细胞和人造材料的作用、红血球力学、细胞膜如何受到损害和破裂、白血球和血小板的形态、凝血成栓的机理等。这些问题中的绝大部分目

前所知甚少,很需要进行基本的、深入的研究。

现在我们将目前生物力学的课题略事归纳:

1. 心血管系统中的临床问题

a. 心脏瓣膜的修复。

b. 心脏的辅助装置: 如左心室辅助泵、主动脉气囊反搏器、全身加速与心跳同步、外部按摩、心舒张时的反搏等。

c. 体外循环: 心肺机、血液滤析机。

d. 心脏更换: 需要有关异物与生物相容性、可结合性和流体力学等方面的基础知识。

e. 外科手术后的危机: 肺水肿及肺不张。

f. 动脉脉波分析: 脉动波理论已经有了很大的进展,实验的研究也很普遍。临床应用在古代就有了,但想用这种方法诊断确定动脉硬化的部位还有待于未来。

g. 超声波的应用: 血管声测量法、湍流噪声的分析、动脉粥样化狭窄处声波的发生。

2. 定量生理学

a. 生理学的系统分析。

b. 生物组织的流变学: 如血液、肌肉、骨骼、结缔组织和人造植入材料等。

c. 液体渗过生物膜和血管的分析。

d. 扩散分析: 如肺内血流与气流比率的分布、指示剂稀释法等。

e. 液体与气体的界面及固体与液体间的界面。界面有许多重要性能及问题,如肺泡泡间膜上的表面活性物质、血液在人造植入材料上的凝血趋势。近期研究表明: 血小板的作用和血栓在界面的形成与剪应力有关,因此这一重要问题的解决有赖于力学。

f. 微循环: 生物力学对微循环研究的每个方面都有过贡献。这也许是历史上的巧合。在发展这个分支学科中,生理学家与力学家一直在进行合作。

3. 外科