

# 生物力学导论

马和中 编著

北京航空学院出版社

# 生物力学导论

马和中 编著

北京航空学院出版社

## 内 容 简 介

本书系统地叙述了生物力学的主要内容。包括研究人和动物运动的生物运动学（即运动生物力学）；以血液、树液等为研究对象的生物流体力学；以骨、肌肉、腱、软骨和血管等为研究对象的生物固体力学；以血液循环，肺呼吸，颅脑损伤，脊柱受力等为研究对象的生物力学多相问题，此外还介绍了振动对人体的影响。

本书可作为力学和生命科学（包括体育学、生物学和医疗、卫生保健等学科）有关专业学生和研究生教材或参考书。也可供上述专业的工作者及对生物力学有兴趣者参考。

## 生物力学导论

编著 马和中

责任编辑 郭维烈

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京航空学院出版社出版

北京农业工程大学印刷所排版印刷

787×1092 1/32 印张：12 字数：269千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数：4000册

统一书号：15432·028 定价：2.00元

## 前 言

生物力学是处于生命科学（包括生物学、生理学、医学、体育运动等）与力学之间的一门学科。它将生命、运动和运动的原因——力统一起来进行研究。为解决生命科学的许多问题提供了力学的基本理论和分析方法，又为力学开辟了一个广阔的新领域。当前生物力学已经以其独特的内容和研究方式而成为一门具有坚实基础和广阔前途的独立学科。这门学科正在迅速地成长并且已经在体育运动，医疗保健，农业，林业，畜牧业和劳动保护等许多方面取得了引人注目的成果。

目前从事生物力学研究的学者专家队伍主要由原有的生命科学家和力学家所组成。他们都希望通过对于对方学科的了解来全面地掌握生物力学。同时为了培养新一代生物力学工作者，也需要对这门学科做一尽可能完整地介绍。本书正是为满足这两个要求而编写的。但是由于生物力学这一学科涉及面广，发展又很迅速，加之作者水平和书籍篇幅有限，很难达到这一目的。对于书中的错误和不足之处望请各方批评指正。

北京航空学院朱东明付教授，北京医科大学夏家骧付教授对本书提出了许多宝贵意见，谨在此表示衷心的感谢。

作者 1985.9

# 目 录

<b>绪 论</b> .....	( 1 )
<b>第一章 生物基础组织及其力学性质</b>	
§ 1—1 常见的生物有机材料及其力学性质.....	( 7 )
§ 1—2 人体组织的基本成分.....	( 11 )
§ 1—3 人体中的各类组织及其功能.....	( 15 )
<b>第二章 生物运动学</b>	
§ 2—1 运动动作分析.....	( 34 )
§ 2—2 运动动作的分类.....	( 47 )
§ 2—3 运动动作的发展.....	( 61 )
§ 2—4 人体静力受载研究——提升载荷时的腰部应力分析.....	( 64 )
§ 2—5 人体动力学分析.....	( 70 )
§ 2—6 人体受冲击力的研究.....	( 75 )
§ 2—7 跳跃运动分析.....	( 79 )
§ 2—8 踢的力学分析.....	( 82 )
§ 2—9 一些体育器械的力学分析.....	( 89 )
<b>第三章 生物流体及其流动的力学分析</b>	
§ 3—1 血液的力学性质.....	( 94 )
§ 3—2 血液的本构关系.....	( 101 )
§ 3—3 血液在刚性圆管中的层流流动.....	( 104 )

§ 3—4	生物流体力学在生理学和医学上的一些应用.....	(110)
§ 3—5	植物体内的液体流动.....	(117)
<b>第四章</b>	<b>骨的力学性质和功能的适应性</b>	
§ 4—1	骨材料的基本力学性质.....	(119)
§ 4—2	骨的功能适应性理论.....	(124)
§ 4—3	骨的重新塑造过程.....	(130)
§ 4—4	骨折及其治疗.....	(133)
<b>第五章</b>	<b>软组织的力学性质</b>	
§ 5—1	软组织的材料特性.....	(136)
§ 5—2	软组织在单向卸载下的本构关系.....	(142)
§ 5—3	软组织的准线性理论.....	(145)
§ 5—4	血管的力学性质.....	(150)
§ 5—5	关节软骨的力学性质.....	(156)
<b>第六章</b>	<b>肌肉的力学性质</b>	
§ 6—1	骨骼肌的构成和工作原理.....	(162)
§ 6—2	心肌的力学分析.....	(174)
§ 6—3	平滑肌的力学性质.....	(178)
<b>第七章</b>	<b>呼吸系统力学</b>	
§ 7—1	呼吸系统的基本构造.....	(184)
§ 7—2	气体在气管中的流动.....	(186)
§ 7—3	气体在呼吸系统扩散.....	(191)
§ 7—4	肺的几何模型.....	(192)
§ 7—5	肺泡壁(肺实质)的应力分析.....	(194)
§ 7—6	肺泡壁的本构关系.....	(199)
§ 7—7	肺泡的稳定性.....	(202)

## **第八章 循环系统动力学**

- § 8—1 心脏力学·····(206)
- § 8—2 动脉中的血液流·····(210)
- § 8—3 微循环中的血液流·····(224)
- § 8—4 静脉中的血液流·····(229)

## **第九章 颅脑的力学性能和撞击分析**

- § 9—1 颅脑的组成和力学性质·····(235)
- § 9—2 颅骨损伤·····(245)
- § 9—3 脑损伤·····(249)
- § 9—4 颅脑损伤的理论研究·····(259)
- § 9—5 颅脑损伤的实验研究·····(272)

## **第十章 脊柱的力学性质和损伤分析**

- § 10—1 脊柱的基本构造及力学性质·····(283)
- § 10—2 腰脊劳损的分析和控制·····(290)
- § 10—3 脊柱的冲击损伤·····(304)

## **第十一章 牙的力学分析**

- § 11—1 牙的生理构造和承载·····(318)
- § 11—2 牙的应力分析方法·····(321)
- § 11—3 用有限元法分析牙应力和位移的实例·····(324)
- § 11—4 牙的瞬时转动中心·····(327)

## **第十二章 振动对人的影响**

- § 12—1 工业中的振源·····(332)
- § 12—2 人体对振动的反应·····(337)
- § 12—3 振动综合症·····(343)
- § 12—4 人体动力响应特性的研究·····(348)
- § 12—5 车辆减震系统的设计·····(359)

§ 12—6 振动的利用.....(365)

**附 录**

A 固体力学的一些基本概念.....(368)

B 流体力学的一些基本概念.....(372)

**参考文献**.....(375)



## 绪 论

生物力学是研究力与生物体运动、生理、病理之间关系的学科。

自然界的一切生物都处于运动中，动物的全部生命过程是一个没有停歇的运动过程，植物的发生、生长一直到死亡的过程也同样是无休止的运动过程，即便是最简单的单细胞生物，也必须依靠其体内液体不停地流动维持着生命。生物的所有运动都是由力引起的。而这些力既包含着为生物所利用或对生物有损害的环境力（如重心、风力、水力、其它生物的力以及人造的力），也包含着生物自身所产生的主动动力——肌肉力。各种生物在不同的运动、正常生活或病态之下会产生不同形式的主动动力，这些主动动力与环境力的联合作用影响着生物的生理和病理状况，决定着生物的运动。这种复杂关系组成了生物力学的内容。

还应提出的是上面所指的‘生物体’也可以扩大到生物的延续部分，包括生物器官或组织所用的替代物（如假肢，人工心脏）和运动器械（如投掷物）。它们与生物体有密切的力的作用的关系。

### 生物力学的研究目的

通过生物力学的研究，我们可以用力学分析的手段去了解、学习、利用、治疗、保护、改造并配合创造生物。

人自从在地球上出现以来就在不断地了解其周围的生物和各种生物现象（这里也包含了对人自身的了解）。但是许多生物问题如动物的运动，生物的体液循环，骨的生长等只是在运用了力学工具，或者说是在运用了生物力学的理论后，才得到了较清楚的认识。

在对生物了解的基础上，人们可以学习生物（包括人类自身）的许多优点。当前出现了一门新型学科——仿生学，其中有不少内容也正是生物力学所要研究的。本世纪中叶以来仿照蜂窝的形式而制成的蜂窝型夹层结构以其重量轻、强度高和刚度大而成功地用于航天与航空器中。此外人们从鸟的飞翔中得到启发而发明飞机，在对鱼的外形观察后制成低阻力船舶，从蛙和海豚的游动姿态中学会了蛙泳和蝶泳，由模仿人的动作而创造了机械手和机器人。这些成就只有在对生物运动和构形作出深刻地分析后才能取得。而这个分析正是生物力学的一项重要内容。

通过对生物所做的力学分析可以更好地发挥生物的效能。其中最重要的就是体育竞技。根据对姿态和运动过程的力学分析，可以使运动者达到更快的速度，更大的距离，取得更稳定的平衡和更灵活的操纵。近年来的经验表明，田径、技巧、格斗、游泳、举重、球类等大多数体育运动水平的提高都离不开生物力学。此外，对人和动物的杂技也应进行生物力学的分析。

生物力学在对疾病的治疗上起着很大的作用。被广为应用的听诊器和血压计都基于力学原理。目前绝大多数的人体器官已经能实现或即将能实现人工替代。其中大多数替代系统（特别是人工心脏、假肢等）在设计时必须进行固体力学或流体力

学计算。此外生物力学还对牙和骨的修复与矫形，软组织的缝合，循环系统疾病（如血栓病、胆固醇沉积等）的诊断与治疗，颅脑和脊柱损伤的防治等提供了理论分析的基础。一些力学和医学工作者还对中医的脉诊、接骨、推拿等进行探讨。生物力学也能为提供劳动保护，改善劳动条件服务，如制造安全的防护救生设备，为车间工人和交通运输工具中的乘员消除或减缓振动对健康带来的损害等。

从力学的角度来改造生物，也是生物力学的重要内容之一。这里包含了对某个生物个体的改造及对某个种群的改造。例如将力学、生理学与解剖学结合起来对运动员进行有目的、有计划的锻炼，使其肌肉和骨骼的增减适应于某项运动的需要，这是对个体改造的一个范例。而像培养出一种象抗风载能力强，或承重能力强的植物，则属于对生物群体改造的内容。

目前人们已不满足于在原有基础上改造生物，已经开始利用生物工程来创造全新的生物。这是当代科学的一个重大进展。但为了使所创造的生物能具备足够的生命力，它的总体和各个部分必须能维持生命中所必要的静止形态及具有必要运动的能力。为此生物力学的分析也是不可少的。

### 生物力学的研究历史

生物力学作为一门独立的学科是本世纪中叶以后才发展起来的。但是人们对它的研究却有着悠久的历史。中国古代早就有了脉诊、接骨、推拿等医术。在仿生学上也进行了许多研究。国外盖莱纽斯（Galenus, 131~201）说明了肌肉对人体运动的影响。伽里略（Galileo, 1564~1640）用单摆对人的

心率进行了测定。博雷利 (Borelli, 1608~1679) 测定了人体重心, 分析了人体运动。斯蒂芬·黑尔斯 (Stephen Hales, 1677~1761) 测量了心脏的弹性。欧拉 (Euler, 1707~1780) 对动脉脉动波进行了分析。汤姆士·杨 (Thomas Young, 1773~1829) 对声音理论进行了研究。赫姆霍兹 (Helmholtz, 1821~1894) 对发音和神经生理学做出了一定的贡献。值得提出的是法国医生柏肃叶 (Poiseuille, 1799~1869) 对血液流动进行了系统的研究, 并通过这一研究为粘性流体力学奠定了理论基础。

进入二十世纪以来, 由于力学和医学的分工越来越清楚, 反而阻碍了这门学科的发展。但是体育运动日益为人们所重视, 促成了生物运动学的兴起。进入二十世纪中叶以后, 医学和生物学家们逐渐地认识到要解决本学科的许多问题而不考虑力的因素是不行的, 要研究生物的运动、生理与病理和力之间的关系就应该采用已经被人们系统研究了力学理论。另一方面许多力学家们在寻求力学发展和应用的新领域时发现以生物为对象的力学分析正是运用力学的广阔天地。在这两方面的科学工作者们的共同努力下, 生物力学就作为一门学科进入了科学园地, 而且在不长的时间内已经在医疗、体育、农、牧、鱼、林业以及工业、环境保护和劳动保护等方面作出了很大的贡献。

### 生物力学的研究内容

从分类学的观点来看, 可以按多种方式对生物力学的内容进行分类。但为了便于利用力学理论来系统地进行研究, 按照对象的力学性质来进行分类是比较合理的。故生物力学可大体



北林图 A00061443

分为如下四类。

1.生物运动学：它的任务是分析动物的运动。分析时将动物看成是有限个物体的组合，不考虑每个物体的变形（即把每个物体都看成为刚体）。也就是说用一个有限自由度系统的运动来模拟动物的运动。在此基础上研究动物的能量（功和功率）、力与位移、速度、加速度之间的关系。目前生物运动学已成为许多体育院系的必修课程。

2.生物流体力学：研究血液、各种体液、树液等流体（它们被看成理想流体或粘性流体）的特性及在生物体内的流动情况，研究生物（也包括一些体育器械）与空气、水之间的相对运动。

3.生物固体力学：研究生物体内形状稳定部分的受力特性和变形特性。还研究一些医疗、体育器械的强度和变形情况。生物固体组织包括两类。一类如动物的牙和骨，植物的木质部分。它们可称为硬组织。在正常生理载荷下其变形量远小于原长度。故可用工程上常用的小变形理论来研究它们。仅对其中一部分在精确计算中要考虑粘弹性影响。另一类如动物皮肤、内脏，植物的茎和叶，可称为软组织。它们在生理外力作用下会有很大的变形，但除去外力后又能回到原有状态。它们都属于粘弹性材料范畴。研究时要用大变形理论，还应考虑加载历史，加载速率和应变速率等情况。

4.综合问题：生物力学所遇到的许多问题是要同时考虑多介质的相关影响。例如在分析呼吸问题时，要考虑到气体与作为气管（或支气管）的弹性软组织间的相互作用；在分析血液循环问题时，要考虑到粘性流体（血液）和粘弹性物体（心、血管）之间的相互作用；在分析颅脑受撞击问题时、应考虑波

在粘弹性固体（颅骨）和粘性流体（脑）中的传播以及在这两者之间界面上的反射；在分析牙和脊柱的问题时，要考虑到作为固体的牙（或脊椎骨）与作为粘弹性软组织的牙周膜（或椎间盘）之间力的相互作用与传递。

### **生物力学的研究方法**

从总体上看生物力学的研究方法和其它各种物理问题或工程问题的研究方法有相似之处。主要之点在于它们都是通过三条途径来解决问题；用解析方法或数值方法来求解数学模型，用试验方法来测定物理模型或实物试件，对现场进行分析研究。但是在实际研究过程中，生物力学问题远比大多数物理问题和工程问题要复杂。因为各种生物体结构和工作环境差异很大，而神经控制、血液流动、营养状况、生活经历和年龄、性别、职业等都对材料的力学性能有明显的影响。此外试件状态如活组织状态与死组织状态，供血（或供液）状态与失血（或失液）状态，新鲜状态、陈腐状态、冷冻状态等在力学性质上可能有很大的差别。所以和其它物理、工程问题相比，生物力学在研究方法上有其自身的特点。

生物力学的试验有“在体”与“离体”之分。前者是指在生物体内进行试验，它又包括麻醉状态试验与非麻醉状态试验两种。后者是将材料从体内取出，在模拟的实验室环境中实验。一般是后者误差较大，但前者不易进行，尤其是对人来说许多在体实验根本无法实现。

特别要指出的是有一部分生物材料（如肌肉）能产生主动动力，因此不能用常规的材料试验方法对它们进行研究。这是其它物理问题和工程问题所没有的。

# 第一章 生物基础组织及其力学性质

自然界有成千上万种生物，每种生物又由不同形态、性质和功能的组织所构成。这些生物组织从物质组成上包括了有机物质（如蛋白质、糖和脂肪）和无机物质（如钙盐）。从力学的角度上看生物组织中一类是流体物质，它们通过在生物体内的流动起着循环和运输的作用，还能保持生物体内的环境稳定；另一类是固体物质，它们在生物体内的位置基本上是固定的，构成生物体的支持、保护部分，有的具有运动功能，有的（如软组织）具有特定的生理功能。

在本章中，首先叙述一般生物材料的类别和力学特征，然后介绍人体组织的组成、分类、功能和它们的力学性质。

## § 1-1 常见的生物有机材料及其力学性质

生物有机材料主要由蛋白质、糖和脂肪所构成。它们统称为高聚物材料。这类材料的一个重要特点是：它的力学性质不仅取决于构成单元的化学性质，还同时取决于分子的排列方式。尽管它们的力学性质十分复杂，但由于和橡胶、塑料的力学性能有很大的相似之处，所以在一定程度上可以借用对橡胶、塑料的力学分析（这类分析目前已做得比较充分）的结论。还可以用橡胶和塑料材料代替生物有机材料来进行生物体的模型试验。下面介绍两类重要的生物有机材料：

## 一、蛋白质聚合物

它是由数量很多的氨基酸分子连结成长链而组成。是构成骨胶原（骨中主要的有机物成分）的主要材料，也是肌肉、血液和各种软组织的重要成分。根据其分子组成情况大体可分三种：

1. **分子不交联的无定型聚合物（粘塑性材料）**：这种材料的分子呈不规则排列，分子间没有联系，可以相互滑动（图1-1）。在外力作用下材料可以拉长或无规则地扭曲。在除去外力后没有回复到原有形状的趋势。它在很大程度上具有粘性液体或粘性固体的性质。材料对外力的抵抗能力不仅取决于变形量，而且取决于变形（应变）速度。

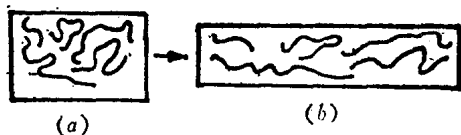


图1-1 分子无交联的无定型蛋白质聚合物的变形  
(a) 不受力情况 (b) 受力情况

2. **分子交联无定型聚合物（弹性材料）**：这种材料的分子之间在某些部位相互交联。材料在无应力下分子处于卷曲状态，在应力作用下分子沿应力方向伸展（图1-2）。但由于分子间有交联、相互间不能滑动，所以在应力消失以后又回到原来的无变形状态。这类材料的典型代表是节肢弹性蛋白，它因出现于节肢动物体内而定名。如跳蚤的腿部就主要由这类材料所组成。它构成了一个弹射能力极强的理想弹射机构，使跳



蚤在水平和垂直方向跳出的距离分别超过了体长的50倍与30倍。蜻蜓身上的节肢蛋白可拉伸到三倍原长，在保持几天后放松，它仍可回到原来的长度而无残余变形。节肢蛋白的弹性性能与橡胶相似但更优于橡胶。较好的橡胶在最适当的速率下每次弹跳约损失能量9%（回弹性为91%）而蝗虫节肢蛋白每次弹跳仅损耗能量8%（回弹性为97%）。动物体内的另一种分子交联的无定形蛋白质聚合物是弹性硬蛋白。它存在于有蹄动物颈椎上的韧带中。当这类动物吃草时它可以自由伸长。在靠近心脏处的主动脉中也存在这种材料，它增加了这部分血管的弹性。分子交联无定形蛋白质聚合物的弹性模量值取决于交联点的间距。间距越短，弹性模量越高。节肢弹性蛋白和弹性硬蛋白的弹性模量 $E$ 一般在100牛顿/厘米<sup>2</sup>左右。

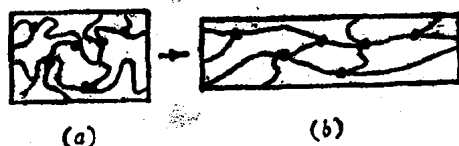


图1-2 分子交联的无定形蛋白质聚合物情况的变形  
(a) 不受力情况 (b) 受力情况

**3. 纤维：**是略有弯曲的高分子以定向排列形式组成的材料。在受力之下这些分子可以拉直，但拉伸量很小（图1-3）。所以这类材料一般不易延伸，其弹性模量约1000牛顿/厘米。其中骨胶原纤维的弹性模量最高，往往超出上述数值的10倍以上。在某些情况下动物能使无定形无交联蛋白质聚合物变化为纤维物质。蚕丝就是一例。在蚕腹中时它属于前一种物质，而在蚕吐出的过程中，经过蚕口即转变为定向纤维。