



全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

临床 生物力学基础

FOUNDATION OF CLINICAL BIOMECHANICS

秦廷武 主编

 军事医学科学出版社

全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

临床生物力学基础

秦廷武 主编

军事医学科学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

临床生物力学基础/秦廷武主编.

—北京: 军事医学科学出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-5163-0548-5

I. ①临… II. ①秦… III. ①生物力学 IV. ①Q66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 260011 号

出 版: 军事医学科学出版社

地 址: 北京市海淀区太平路 27 号

邮 编: 100850

联系电话: 发行部: (010) 66931051, 66931049, 81858195

编辑部: (010) 66931039

传 真: (010) 63801284

网 址: <http://www.mmsp.cn>

印 装: 北京长阳汇文印刷厂

发 行: 新华书店

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 12.5

字 数: 296 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

印 次: 2015 年 1 月第 1 次

定 价: 38.00 元

本社图书凡缺、损、倒、脱页者, 本社发行部负责调换



Foreword (序言)

“FOUNDATION OF CLINICAL BIOMECHANICS” (临床生物力学基础), by Professor Ting-wu Qin (秦廷武), is well prepared. This work is targeted for physicians and medical students who have an interest in Biomechanics, but no training in mechanics. It is also geared toward engineering students with an interest in medical and clinical applications. The book covers all the essential concepts related to the fundamental mechanics and material science required to better understand the biomechanical behaviors and functions of various anatomical structures. Specific details and examples for problem solving are provided for the musculoskeletal, circulatory, respiratory, vision and hearing systems.

Professor Qin has tremendous knowledge and experience in research, and in teaching basic and applied biomechanics, material science, tissue engineering, and rehabilitation science. This enables him the appreciation and understanding of the information and skill needed for the targeted audience. During his time at Mayo as visiting scientist, I witnessed all his unique traits and talents. I trust that this book will be a tremendous benefit to many for years to come.

Kai-Nan An (安介男), PhD.
John and Posy Krehbiel Professor of Orthopedics
Mayo Clinic College of Medicine
Rochester, Minnesota



前 言

本书是作者长期从事临床生物力学和组织工程研究和教学工作的总结。作者的研究领域涉及组织、器官缺损与功能修复相关的干细胞、组织工程、生物材料、生物力学等方面的交叉学科与领域。长期以来，作者在科学研究和教学实践中发现，很多临床医生和医学生几乎没有生物力学的基本概念和理论，在他们的临床和科研工作中，涉及的生物力学知识通常是基于文献中的描述，但文献的描述要么存在不准确而理解错误，要么无法真正理解作者的本意，导致最终理解不确切，有时甚至是错误的；同时，现有的生物力学专业论文或书籍因为系统性和理论性需要，这些文献过于专业，需要一定的基础知识才能理解其中的内容。另外，随着学科的交叉，有越来越多的非临床科研工作者对临床医学研究倍感兴趣，其中很多工程研究人员对临床医学中的生物力学问题十分关切，但苦于没有开展临床医学中相关生物力学问题的临床医学知识。因此，本书写作目的是为那些对生物力学研究和教学工作感兴趣的医生、医学生了解基本生物力学概念和理论，同时也为工程研究人员和理工科学生了解临床实践中生物力学相关问题而撰写的。显然，为了兼顾上述来自两个完全不同学科领域的人员的知识背景和基础知识，难免会失去生物力学和临床医学本身的学科系统性和理论性，将较为深奥的各自的学科理论进行深入浅出的阐述。与国内同类书籍相比较，本书充分考虑到读者的临床背景和基础知识，重点探讨临床医学中有关的生物力学问题和相关知识，没有传统生物力学书籍中大量出现的理论计算和数学方法，面向的读者是来自临床医学部分专业（康复医学、假肢矫形、骨科、普外、口腔、呼吸、眼科、心脑血管等）的医生和医学生；同时，由于该书侧重考虑到临床医学的生物力学问题，因此该书也为非临床医学的读者提供大量临床医学中的生物医学知识和相应的生物力学诠释。

作者衷心感谢国家自然科学基金和国家高技术研究发展（863）计划项目的资助，使作者能在临床生物力学和组织工程领域中坚守工作 20 年，积累了本书的大部分资料。同时，作者要感谢国内、外同行专家的贡献，使本书的内容更加丰富。在此，作者特别感谢美国 Mayo Clinic 著名的临床生物力学专家 Kai-Nan An（安介男）教授为本书作序。作者还要感谢中国教师发展基金会为本书的出版提供了部分资助。还要感谢全国高

校教材学术著作出版审定委员会刘思祺老师为本书出版进行的审定和校对工作。最后作者要感谢军事医学科学出版社的编辑们的辛勤劳动，使得本书得以顺利出版面世。

由于作者自身水平和知识面的限制，加上在编写过程中时间紧迫，难免有疏漏和片面之处，希望同行专家、各位读者给予批评指正。



2015年1月15日

于四川大学华西医院



目 录

第 1 章 临床生物力学概述	1
1.1 引言	1
1.2 生物力学的基本内涵	2
1.3 生物力学的研究内容与范畴	2
1.3.1 生物固体力学	2
1.3.2 生物流体力学	3
1.3.3 运动生物力学	4
1.4 临床生物力学概念	4
1.5 临床医学中的生物力学问题	5
第 2 章 临床生物力学基础知识	6
2.1 基本指标及其定义	6
2.1.1 力 (Force) 与载荷 (Load)	6
2.1.2 应力 (Stress)	6
2.1.3 应变 (Strain)	7
2.1.4 强度 (Strength)	7
2.1.5 力-位移 (Force-displacement) 曲线和应力-应变 (Stress-strain) 曲线	7
2.1.6 刚度 (Stiffness)	7
2.1.7 弹性模量 (Elastic modulus)	8
2.1.8 屈服强度 (Yield strength)	8
2.1.9 弹性应变能 (Strain energy)	8
2.2 基本变形及其描述	9
2.2.1 单轴拉伸实验 (Tensile test)	9
2.2.2 单轴压缩实验 (Compression test)	9
2.2.3 单纯剪切实验 (Shear test)	10
2.2.4 弯曲实验 (Flexure test)	10



2.2.5	扭转实验 (Torsion test)	11
2.2.6	推出实验 (Push-out test)	12
2.2.7	应力松弛实验 (Stress relaxation)	12
2.2.8	蠕变实验 (Creep test)	13
2.2.9	滞后环实验 (Hysteresis loop test)	13
2.2.10	疲劳实验 (Fatigue test)	14
第3章	临床生物力学基本理论	15
3.1	生物固体弹性理论	15
3.2	流体黏性理论	16
3.3	生物黏弹性理论	17
3.3.1	Maxwell 模型	17
3.3.2	Voigt 模型	18
3.3.3	三参数黏弹性模型	18
3.4	Laplace 方程	19
3.5	伯努利方程	21
第4章	骨组织生物力学	23
4.1	骨组织的组成与结构	23
4.1.1	骨组织的化学组成	23
4.1.2	骨组织的生物学组成	23
4.1.3	骨组织的物理结构	24
4.2	骨组织的力学特性	25
4.2.1	骨的受力	25
4.2.2	骨的变形	25
4.2.3	骨的应力与应变	26
4.2.4	骨的应力-应变曲线	26
4.2.5	骨的生物力学特性	27
4.2.6	骨组织受载荷时的生物力学性能	27
4.3	骨折的生物力学	28
4.3.1	骨的受载形式与骨折类型的关系	28
4.3.2	骨折的生物力学成因	28
4.3.3	骨折固定与治疗的生物力学	29
4.4	骨组织的功能适应性	30
4.4.1	骨形态结构的功能适应性	30



4.4.2 骨塑形、骨重建的功能适应性	30
第5章 软骨组织的生物力学	31
5.1 软骨的结构与组成	31
5.1.1 软骨的结构与分类	31
5.1.2 关节软骨的物理结构	32
5.1.3 软骨的生物学功能	32
5.2 软骨的力学特性	33
5.2.1 关节软骨的黏弹性	33
5.2.2 关节软骨的张力特性	33
5.2.3 关节软骨内应力的分布	34
5.3 软骨退变的生物力学	35
5.4 软骨下骨生物力学特性与骨关节炎	35
5.4.1 软骨下骨的解剖构成	36
5.4.2 软骨下骨的生物学功能	36
5.4.3 骨关节炎中软骨下骨的生物力学性能	36
5.4.4 软骨下骨生物力学改变与关节软骨退变的关系	37
第6章 肌肉的生物力学	38
6.1 肌肉的分类特点	38
6.2 骨骼肌的生物力学特性	38
6.2.1 骨骼肌的特点	38
6.2.2 骨骼肌的基本结构	39
6.2.3 肌肉收缩的纤维滑行学说	39
6.2.4 肌肉的收缩形式	39
6.2.5 Hill 方程	40
6.2.6 Hill 的三元素模型	40
6.2.7 肌肉的张力特性	41
6.3 心肌的力学性质	42
6.3.1 心肌与骨骼肌的差异	42
6.3.2 静息心肌的力学性质	42
6.3.3 激活心肌的力学性质	42
6.4 平滑肌的力学性质	43
6.4.1 平滑肌的特点	43
6.4.2 平滑肌的被动张力与主动张力	43



第7章 肌腱与韧带的生物力学	44
7.1 肌腱与韧带概述	44
7.2 肌腱和韧带的组成和结构	44
7.3 肌腱/韧带的生物力学特性	45
7.3.1 肌腱/韧带的拉伸性能	46
7.3.2 肌腱/韧带的黏弹性	46
7.3.3 肌腱和韧带的生理负荷	47
7.4 肌腱/韧带受力与断裂损伤机制	47
7.5 影响肌腱和韧带生物力学特性的因素	48
第8章 血管组织生物力学	49
8.1 血管壁的组成与结构	49
8.1.1 血管壁的结构	49
8.1.2 血管的几何尺度	50
8.1.3 血管壁中各组分的分布	50
8.2 血管的力学特性	51
8.2.1 血管的应力-应变关系	51
8.2.2 血管的顺应性	51
8.2.3 小动脉和毛细血管的力学特性	52
8.2.4 静脉血管的力学特性	52
8.3 血管壁的黏弹性	53
8.3.1 血管壁的应力松弛	53
8.3.2 血管壁的蠕变	53
8.3.3 血管壁的滞后环	53
8.4 血管壁的张力特征	53
8.4.1 弹性张力和主动张力	53
8.4.2 周向张力和轴向张力	53
8.5 血管壁的周向弹性模量	54
8.6 血管弹性对脉搏波传播的影响	55
8.7 血管生物力学特性的影响因素	55
8.8 心血管疾病与血管力学性能改变	56
8.9 人工血管	56
第9章 眼科生物力学	58
9.1 眼球的解剖结构	58



9.1.1	角膜的结构	58
9.1.2	巩膜的结构	59
9.1.3	中层的结构	60
9.1.4	内层的结构与功能	60
9.1.5	眼内腔和内容物	60
9.1.6	眼附属器	60
9.2	角膜生物力学及其应用	61
9.2.1	角膜的生物力学	61
9.2.2	角膜撕裂与部分切除的生物力学特性	61
9.2.3	近视激光手术后角膜生物力学改变	62
9.2.4	近视激光手术后角膜组织的伤口愈合	63
9.2.5	准分子激光切削对于角膜生物力学特性的影响	63
9.3	巩膜生物力学及其应用	64
9.4	视网膜和筛板生物力学	64
9.5	眼调节和老花的生物力学	65
9.6	其他眼部软组织的生物力学特征	65
9.7	房水流体力学及其应用	66
9.7.1	房水流体力学	66
9.7.2	虹膜根部房水压力分布	66
9.7.3	房水流体力学与瞳孔阻滞	66
第10章 听力系统生物力学		68
10.1	人耳的结构	68
10.2	耳听力系统生物力学	70
10.2.1	中耳的生物力学	70
10.2.2	中耳假体的生物力学	71
10.2.3	耳蜗及基底膜力学模型	71
10.2.4	柯蒂器的力学模型	71
10.2.5	耳蜗材料弹性力学参数的测量	72
10.2.6	耳蜗内各结构的力学相互作用	72
10.3	耳蜗力学与听觉障碍及治疗	72
10.3.1	耳蜗力学的发展	72
10.3.2	耳聋与预防	75
10.3.3	助听器与人工耳蜗	76



第 11 章 血液流变学基础	80
11.1 血液流变学基本知识	80
11.1.1 血液流变学基本内涵及研究内容	80
11.1.2 血液流变学基本知识	81
11.2 临床血液流变学检测指标及其测定方法	82
11.2.1 血液黏度的测定	82
11.2.2 湍流与雷诺数	84
11.2.3 血浆黏度的测定	85
11.2.4 红细胞的聚集性的测定	85
11.2.5 红细胞变形性及其测定	85
11.2.6 血液流变学检测的临床意义	86
11.3 血液黏度的影响因素	86
11.4 血浆黏度的影响因素	87
11.5 循环系统疾病与血液流变学指标异常变化	87
11.5.1 血液流变学与血栓形成	87
11.5.2 血液流变学与高血压	87
11.5.3 血液流变学和冠心病	88
11.5.4 血液流变学与急性心肌梗死	88
11.5.5 血液流变学与糖尿病	88
第 12 章 淋巴流动的生物力学	89
12.1 淋巴系统的组成与淋巴循环	89
12.2 淋巴生成与循环动力	90
12.2.1 淋巴生成	90
12.2.2 淋巴循环的动力	90
12.3 淋巴液形成的生物力学模型	92
12.4 淋巴系统循环障碍与疾病	93
第 13 章 呼吸力学	95
13.1 呼吸系统的组成	95
13.2 呼吸系统生物力学模型和指标	96
13.2.1 呼吸系统的数学模型	96
13.2.2 呼吸的动力	97
13.2.3 呼吸力学的物理量及其测量	97



13.2.4	肺的顺应性	98
13.2.5	肺泡表面张力	98
13.2.6	离体肺的生物力学特性	99
13.3	气体在呼吸道中的流动规律	99
13.3.1	气道结构特点	99
13.3.2	气道系统通气规律	100
13.3.3	肺泡的几何形态和流动规律	101
13.3.4	肺通气功能障碍及其治疗	101
13.4	鼻腔流体力学及其相关疾病	102
13.4.1	鼻腔流体力学	102
13.4.2	空鼻综合征	106
13.5	呼吸道流体力学及功能障碍	107
13.6	气道平滑肌力学特性与支气管哮喘的关系	108
第 14 章	上肢生物力学	110
14.1	肢体的平衡条件	110
14.1.1	肢体生物力学的基本概念	110
14.1.2	力矩的概念	110
14.1.3	力偶和力偶矩的概念	111
14.1.4	力的平移定理	111
14.1.5	肢体关节平衡的力学条件	111
14.2	肩关节的生物力学特性	111
14.2.1	肩关节的功能解剖与运动	112
14.2.2	肩关节的生物力学功能	113
14.2.3	肩关节生物力学特征的应用	113
14.2.4	肩关节生物力学稳定性	114
14.2.5	肩关节中关节力的计算	116
14.3	肘关节的生物力学特性	117
14.3.1	肘关节的功能解剖	117
14.3.2	肘关节的运动功能	118
14.3.3	肘关节的力学稳定结构	118
14.3.4	肘关节的生物力学功能	119
14.3.5	肘关节的关节反作用力	120
14.4	腕关节的生物力学	121
14.4.1	腕关节解剖特点和结构稳定性	121



14.4.2	腕管综合征生物力学	121
14.5	手指生物力学	123
14.5.1	手指关节运动	123
14.5.2	手指生物力学及功能异常	123
第 15 章	下肢生物力学	124
15.1	髌关节的生物力学	124
15.1.1	髌关节的功能解剖	124
15.1.2	髌关节负重的静力学	125
15.1.3	髌关节运动学	125
15.1.4	髌关节生物力学特点	125
15.1.5	人工髌关节的生物力学	126
15.2	膝关节生物力学	127
15.2.1	膝关节的解剖结构	127
15.2.2	膝关节的生物力学特性	128
15.2.3	胫股和髌股关节力学特点	129
15.2.4	膝关节周围的肌肉	129
15.2.5	腓肠肌和腓绳肌之间的关系	130
15.2.6	股四头肌和腓绳肌之间的关系	130
15.3	踝关节的生物力学	131
15.3.1	踝关节解剖结构	131
15.3.2	踝关节的生物力学特点	132
15.3.3	踝关节的肌肉	132
15.3.4	跟腱的生物力学特性	133
15.4	足的生物力学	133
15.4.1	足的功能解剖	133
15.4.2	足的生物力学与足底病	134
第 16 章	脊柱生物力学	135
16.1	脊柱的生物力学结构特征	135
16.1.1	脊柱的功能单位	135
16.1.2	脊柱运动的特点	135
16.1.3	脊柱运动的范围	136
16.2	脊柱负荷	137
16.3	脊柱的生物力学功能	138



16.3.1	脊柱的力学稳定性	138
16.3.2	椎体的生物力学特性	138
16.3.3	脊柱的生理曲度及生物力学意义	139
16.3.4	椎间盘的生物力学特性	140
16.3.5	关节突关节的生物力学特性	141
16.3.6	脊柱韧带生物力学特性	142
16.3.7	脊柱韧带的肥厚和钙化	142
16.4	脊柱生物力学与脊柱的健康	144
16.4.1	脊柱受力与脊柱保健	144
16.4.2	脊柱受力与康复训练	146
第 17 章	人体运动生物力学	147
17.1	人体运动学	147
17.1.1	人体运动学基本概念	147
17.1.2	人体运动学的物理量及描述方法	148
17.1.3	人体运动的形式和原理	150
17.2	人体运动的动力学	152
17.2.1	人体运动动力学基本概念	152
17.2.2	人体运动动力学基本理论	152
17.2.3	人体运动的功能关系	154
17.3	人体运动的静力学	155
17.3.1	人体运动静力学基本概念	155
17.3.2	人体的平衡及其条件	155
17.3.3	人体重心	156
17.4	人体运动的转动力学	157
17.4.1	人体转动运动学概念	157
17.4.2	人体转动动力学概念	157
17.4.3	人体的转动作用	159
17.4.4	动量矩定理的应用	159
第 18 章	力学生物学	161
18.1	力学生物学基本内涵	161
18.2	应力与生长假说	162
18.3	骨组织的应力与生长	163
18.3.1	应力对骨组织的影响	163



18.3.2	应力对成骨细胞的影响·····	163
18.3.3	应力对骨组织影响的作用机制·····	163
18.4	生物力学刺激对关节软骨的影响·····	164
18.5	软组织的应力与生长·····	166
18.6	应力刺激与工程化组织生长·····	167
18.6.1	应力对生长的作用·····	167
18.6.2	骨延长术中的应力与生长·····	167
18.6.3	应力-生长关系用于工程化组织构建·····	167
第 19 章	临床生物力学指标及其测量方法 ·····	171
19.1	生物力学测试的对象与指标·····	171
19.2	生物力学测试的设计·····	172
19.3	基本的生物力学实验方法·····	172
19.3.1	单轴拉伸实验·····	173
19.3.2	单轴压缩实验·····	173
19.3.3	弯曲实验·····	173
19.3.4	扭转实验·····	174
19.3.5	剪切实验·····	174
19.3.6	推出实验·····	174
19.3.7	疲劳实验·····	174
19.3.8	线性黏弹性实验·····	174
19.4	生物力学特殊实验·····	175
19.4.1	近似的基本实验·····	175
19.4.2	理论模型与实验结果的拟合·····	175
19.4.3	非线性黏弹性材料力学分析·····	175
19.5	生物力学测定结果分析与处理·····	176
19.6	影响生物力学实验结果的因素·····	176
参考文献	·····	178

1.1 引 言

临床医学是研究疾病的病因、诊断、治疗和预后，提高临床治疗水平，促进人体健康的科学。它根据患者的临床表现，从整体出发结合研究疾病的病因、发病机理和病理过程，进而确定诊断，通过预防和治疗以最大程度减弱疾病、减轻病人痛苦、恢复病人健康、保护劳动力。近二三十年来临床医学在不少领域取得了许多进展。较为突出的是：①计算机断层摄影、核磁共振、二维超声、血管造影、核医学显像、内镜技术等用于临床，使许多疾病的诊断以直观的图像代替了单纯依据临床症状和简单的理学检查的推理，使疾病的诊断水平有了极为显著的提高；②介入治疗、内镜治疗、放射治疗的发展，微创外科的兴起使许多疾病的治疗水平有了显著的进步；③器官、组织和细胞移植，人工器官、人工组织的研究使器官功能衰竭、组织严重损伤的治疗有了新的转机；④分子生物学、细胞生物学、组织化学、基因工程等技术的发展在阐明病因、发病机理以及诊断和治疗方面显示了重要的前景。临床医学与预防医学、基础医学的结合将更密切。随着科学技术的突飞猛进，许多新技术、新材料和新药（包括基因重组生物因子等）有力地推进了临床医学的发展。

临床医学是直接面对疾病、患者，对患者直接实施治疗的科学。具体而言，临床医学研究的对象是人体的器官、组织、细胞、蛋白质、基因各个层次以及与此紧密相关的流体成分。这些对象的物质形态尽管千差万别，但从物理学的角度来看，可以将其区分为生物固体和生物流体。生物固体包括所有的软、硬组织及其固态组分，合称为生物组织；生物流体包括与软、硬组织相关的气体和液体。研究生物固体变形和生物流体运动的规律就是生物力学。美籍华人冯元桢教授是最早将力学与生物医学进行结合研究的科学家，是举世公认的生物力学的开创者和奠基人。

研究生物固体和生物流体病理改变及其运动的规律就是临床生物力学。临床生物力学的核心，就是在解剖学、生理学、病理学和组织学基础上，认识生物固体和生物流体生理和病理改变的力学规律。其中生物固体力学采用固体力学的理论进行描述；生物流体力学采用流体力学的理论进行描述。理想的生物固体服从弹性力学的理论；理想的生