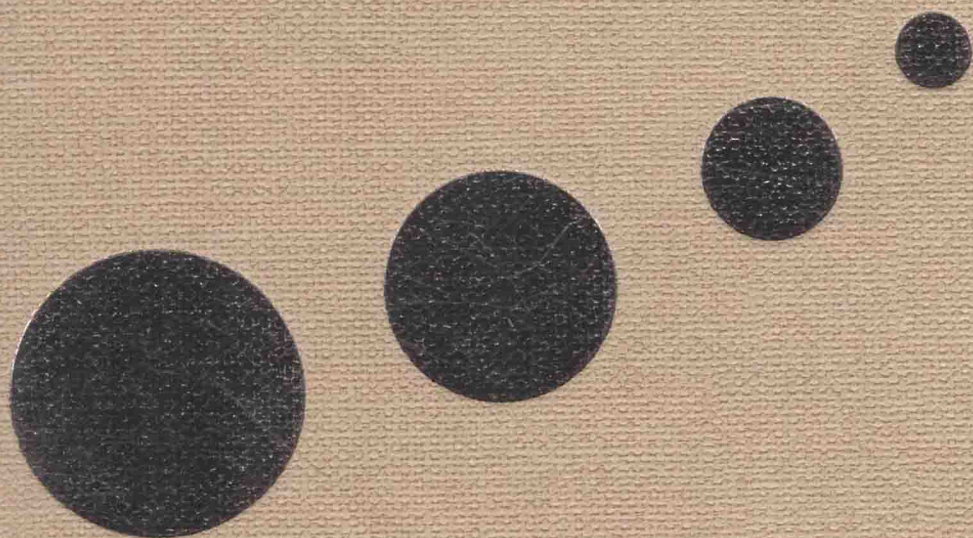




主编 陈明

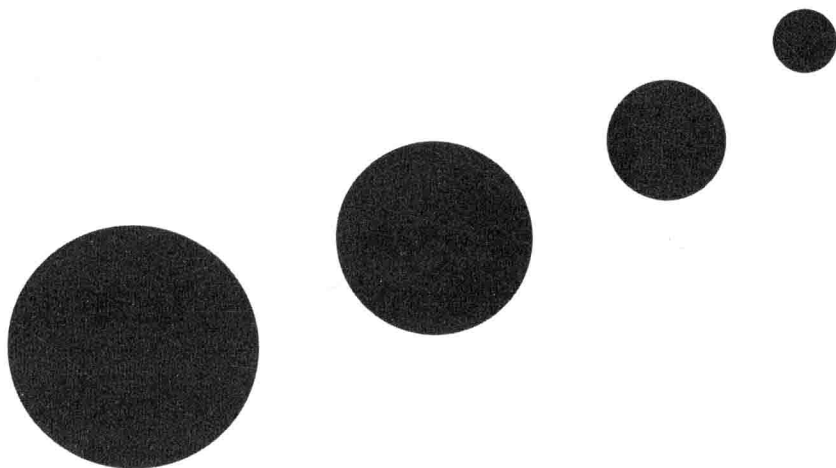
心脏与血管 超声生物力学



上海科技教育出版社

主编 陈明

心脏与血管 超声生物力学



上海科技教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

心脏与血管超声生物力学/陈明主编. —上海:上海科技教育出版社,2014.3

ISBN 978-7-5428-5682-1

I. ①心… II. ①陈… III. ①生物力学—应用—心脏
血管疾病—超声波诊断 IV. ①R540.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 220862 号

责任编辑 蔡 婷

封面设计 杨 静

心脏与血管超声生物力学

主编 陈 明

出版发行 上海世纪出版股份有限公司
上海科技教育出版社
(上海市冠生园路 393 号 邮政编码 200235)

网 址 www.sste.com www.ewen.cc

经 销 各地新华书店

印 刷 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16

字 数 480 000

印 张 22

插 页 2

版 次 2014 年 3 月第 1 版

印 次 2014 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5428-5682-1/R·428

定 价 150.00 元

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

主 编

陈 明 同济大学附属东方医院

编 者

钱梦驿 同济大学声学研究所
罗建文 清华大学生物医学影像研究中心
王金锐 北京大学附属第三医院
肖沪生 上海中医药大学附属龙华医院
刘志跃 内蒙古医科大学
潘翠珍 复旦大学附属中山医院
程 茜 同济大学声学研究所
肖鹏飞 湖南省第二人民医院
游宇光 赣南医学院第一附属医院
陈 瑶 内蒙古医科大学
任明姬 内蒙古医科大学
郝志永 上海海事大学
黄国倩 复旦大学附属华山医院
宋树良 同济大学附属东方医院
刘 超 云南省第一人民医院
刘盛林 同济大学附属东方医院
张 波 同济大学附属东方医院
刘 怡 同济大学附属东方医院
李朝军 上海交通大学医学院附属第一人民医院
王 雷 上海交通大学医学院附属胸科医院
柳 亮 同济大学附属周浦医院
张宇辉 同济大学附属东方医院
王 超 GE 医疗中国
孟凡霞 同济大学附属东方医院
金佳美 复旦大学附属华东医院
马 静 同济大学附属东方医院

陈伟冬	同济大学附属东方医院
曲俊朴	内蒙古鄂尔多斯中心医院
朱 焯	同济大学附属东方医院
董金杭	同济大学附属东方医院
黄志芳	同济大学附属东方医院
高 一	同济大学附属东方医院
郑东燕	同济大学附属东方医院
韩 勇	内蒙古医科大学

序

超声在医学领域的应用已经走过了50个年头,它从超声设备到超声分析软件,都取得了长足的进步,为诊治人类疾病作出了重要的贡献。随着超声仪器工程技术与计算机图像技术的进步与发展,当今超声医学正经历着深刻的变化。在生命科学领域中,包括生物力学在内的基础医学与工程科学的相互交叉,促进了人类防病治病手段的发展。在超声医学领域,学科的发展不仅给临床医师提供了各种现代化的超声影像学设备,而且还通过临床实践积累了大量的医学影像学数据。由此向临床工作者、生物力学与医学工程学工作者提出了更高的目标,要求将超声影像学与生物力学相结合,推动超声医学与生物力学的交叉与融合,把超声生物力学技术应用于探讨人体疾病发生、发展的规律。

为了促进超声医学的发展与提高,使广大超声医学工作者了解力学相关超声影像学技术的特点,在临床实践中准确掌握使用合适的超声力学相关图像技术,为临床超声诊断与治疗提高切实可靠的科学依据,陈明教授等作者编写了《心脏与血管超声生物力学》一书,供超声医学专业人员、相关临床医师阅读参考。本书深入浅出地介绍了有关超声与生物力学的基础理论与超声生物力学测量技术,为促进我国超声医学技术的发展作出了贡献。

中国工程院院士、复旦大学首席教授



2013年10月

序一

本书是国内第一本以力学的理论、技术方法用于对实验动物与人体心血管系统分析研究的专著。力学在世界上应用极广,小至原子、分子间,大至宇宙空间,几乎无所不包;而复杂的生物体内亦有较多力学上的原理及力学对人体与生物体的影响,需要研究与深入。心脏与血管超声生物力学主要论述循环系统中的一些重要的力学问题,它包括了上述两者的组织结构(宏观及微观)及血流动力学中的一系列问题。

本书中叙述有关力学的基本原理及公式推导,介绍多种研究及实际应用的技术方法。在组织结构中如:血管生物力学与超声力学测量、心脏生物结构力学测量、有限元分析法应用于心功能测定、组织多普勒技术、斑点追踪技术、声弹性成像、瞬态波强测量心血管功能、机电波成像技术可用于对心血管功能的评价等。

本书中对流体力学除作了理论与公式讨论外,对粒子图像测速、超声在流体力学中的测定与应用、心血管系统血流向量成像技术等,进行了详细介绍。

声动力学疗法系利用低频低功率或低频高功率对某些疾病特别是对肿瘤基因转染及溶栓等治疗进行研究。肿瘤基因治疗常用超声造影微泡作载体,用自杀基因、抗肿瘤新生血管、基因替代或反义基因等带入细胞内。

原子力显微镜可测至纳米量级,它最早用于非生物材料的研究,而在生物细胞的亚结构方面,如:胞膜、胞质、细胞骨架、微管、微丝、线粒体、高尔基体、DNA、RNA、胞核等,可成为亚细胞病理的研究工具,具潜在发展远景。

本书应属跨学科的学术著作。既有基础理论,又有创新思维;可作研究参考,可供临床指导;特别对我国广大医学超声工作者来说,是一部非常重要的专业参考书。

复旦大学超声医学与工程研究所所长

徐智章

2013年10月



尽管在 20 世纪 70 年代,曾利用 M 型超声心动图测定收缩期室壁应力(σ),至今仍认为在评价心功能方面,M 型超声所测左心室中层力学参数可能较左心室射血分数更为敏感,但是直到 1998 年 Heimdial 等报道了组织多普勒超声测量心肌应变后,方才开启了人们对超声技术测定心脏力学参数的期待。目前虽已有多种超声新技术能测定心肌的应变与应变率,但临床医师、超声影像学医师面对各种超声新技术测定心血管力学特性领域,仍比较陌生。1615 年,哈维根据流体力学原理推断出血液循环的存在,属人类历史上最先的生物力学发现。但是真正将生物力学作为一门独立的学科,还属 20 世纪 60 年代,美国圣迭哥加州大学的冯元桢教授(Fung Y C)称其为生物力学(biomechanics);目前的生物力学已发展到力学生物学(mechano-biology)阶段,它在研究力学过程与心血管生长、重建和修复等之间的相互关系方面取得了长足的进步,为心血管超声开拓了新的测量手段与应用范围,但是超声生物力学作为生物力学的新兴分支,在生物力学领域中还刚刚迈出了第一步。

全书分为二十三章,系统介绍了有关生物力学基础理论知识、超声力学参数的计算原理、超声生物力学测量技术、超声力学技术的临床应用知识。近年来,心血管生物力学研究领域的进展为疾病的诊断与治疗提供了重要的理论依据。尽管心血管超声生物力学研究方法仍处于幼年阶段,但是由于超声生物力学新技术属无创伤性检测手段,操作简便易行,可以在人体反复使用,为开拓用力学方法研究人类心血管力学性质、评估心血管疾病的进展及疗效,提供了新的定量分析手段。心血管超声测量从力学角度为心血管疾病的临床研究提供了新的视角,通过对心脏与动脉血管力学特性的分析,为早期预测心血管疾病、估测靶器官损坏、评价药物疗效提供了有效的观察途径。本书既强调了生物力学基础,又突出了力学与临床的衔接,为临床工作中掌握生物力学测量技能提供了便利,是一本理论性与实践性较强的专业书籍,适合各级医院从事超声影像学的医师、临床医师及研究生阅读参考。该书针对国内的医学专业人员及研究生,阐述心脏与血管超声生物力学方面的相关知识与最新进展,学习有关力学基础理论知识、超声力学参数的计算原理、超声力学测量技术及其临床应用的知识。探讨超声生物力学新技术在心血管临床诊断工作中的作用。该书从超声医学与生物力学相结合的角度,探讨心血管超声力学测量与临床的关系,帮助相关专业人员从基础理论上,理解超声生物力学新技术在心血管临床的应用价值。

编者

2013 年 10 月

内 容 提 要

超声医学已广泛应用于临床诊断疾病,超声波在诊断疾病中的重要作用之一就是为探索疾病的病理生理机制、解释疾病发展进程提供生物学证据。超声生物力学为心血管疾病的诊断与治疗提供了重要的基础理论与实践依据。本书系统介绍超声生物力学的概念、心血管生物力学基础、超声运动生物结构力学方法、超声流体力学、声动力学疗法、超声弹性成像的进展;本书详尽介绍超声生物结构力学测量心脏与血管功能的临床应用。详细阐述了组织多普勒、斑点成像技术、心肌应变与应变率等临床应用的原理及应用技术,由于超声生物力学方法有待逐步完善,本书也叙述了其局限性。

本书将超声医学与生物力学有机地结合在一起,由浅入深地向读者推介心血管领域的超声生物力学技术。适合于从事心脏与血管临床或研究工作的医师、技术人员、研究生、本科生阅读。

尽管目前心血管超声生物力学研究方法仍不尽完善,但是它采用了超声波为探测手段,属无创伤性检测手段,心血管超声生物力学为开拓用力学方法研究人类的在体心血管力学性质、评估心血管疾病的进展及疗效,提供了新的临床定量分析手段。

致 谢

本书承蒙中国工程院院士王威琪教授、复旦大学中山医院徐智章教授的多方指教,特此表示衷心的感谢与敬意!

本书承蒙“上海科技专著出版资金”的大力资助,特此表示衷心的感谢!

本书承蒙“上海市浦东新区心血管疾病学科群(PWZxkq2010—01)项目”与“上海市浦东新区科技发展基金创新资金项目(编号 PKJ2010—Y16)”的出版资助,特此表示衷心的感谢!

目录

Contents

001 第一章 心血管生物力学基础

- 第一节 绪论 / 001
- 第二节 本构方程 / 009
- 第三节 零应力状态与残余应力理论 / 012
- 第四节 滞后、蠕变与松弛 / 014
- 第五节 弹性力学中参量的下标表示法 / 016
- 第六节 动脉粥样硬化大鼠主动脉应力-应变关系 / 022
- 第七节 肺动脉高压下肺动脉力学应力-应变关系 / 023
- 第八节 心血管细胞和分子生物力学 / 025

030 第二章 超声医学基础

- 第一节 超声的基本特性 / 030
- 第二节 超声诊断方法 / 043

053 第三章 心血管解剖与生理学基础

- 第一节 心脏组织的解剖学基础 / 053
- 第二节 心脏的构造 / 056
- 第三节 心脏与血管系统的细胞 / 058
- 第四节 心脏生理学基础 / 061
- 第五节 正常心内压与心内血液循环 / 063

069 第四章 心力衰竭的病理生理学

- 第一节 概述 / 069
- 第二节 心功能不全发病过程中机体的代偿活动 / 073
- 第三节 心力衰竭发生的机制 / 077

第四节 心功能不全时临床表现的病理生理基础 / 081

084 第五章 心脏超声学

第一节 正常 M 型超声心动图 / 084

第二节 各瓣膜多普勒血流流速曲线分析 / 086

第三节 心脏二维超声与彩色多普勒血流图 / 087

第四节 三维超声心动图 / 091

第五节 超声心动图测定左心室功能 / 094

第六节 超声心动图测定左心室舒张功能 / 097

101 第六章 血管超声学

第一节 颈部血管超声特征 / 101

第二节 腹部大血管超声特征 / 104

第三节 四肢血管超声特征 / 107

111 第七章 血管的生物力学测量

第一节 生物力学一维载荷试验 / 111

第二节 生物力学二维载荷试验 / 111

第三节 平行板流动小室 / 112

第四节 体外培养细胞应力加载模型 / 113

第五节 光镊操控技术 / 114

120 第八章 血管的生物力学与超声力学测量

第一节 肱动脉血管超声生物力学的方法学 / 120

第二节 肺动脉高压的肺动脉血管超声生物力学研究 / 131

135 第九章 心脏超声生物结构力学测量

第一节 常规超声心动图测定室壁应力的方法 / 135

第二节 室壁应力-应变的关系评价高血压病左心室收缩功能 / 136

第三节 室壁瘤形成的室壁应力与应变 / 136

第四节 心肌僵硬度评价原发性高血压病左心室重构的左心室收缩功能 / 138

第五节 心肌最大弹性模量在原发性高血压左心室收缩功能评价中的应用 / 140

142 第十章 有限元分析法及在心脏功能测量中的应用

第一节 心脏三维重建技术与有限元法研究现状 / 142

第二节 有限元方法的基本理论 / 145

- 第三节 有限元法心脏建模 / 147
第四节 有限元法心脏运动建模 / 152
第五节 心脏图像分析试验平台与仿真试验结果分析 / 155

163 第十一章 冠状动脉生物力学

- 第一节 冠状动脉的解剖生理特性 / 163
第二节 冠状动脉的生物力学特性 / 165
第三节 冠状动脉生物力学特性与冠状动脉疾病的发病机制 / 168
第四节 冠状动脉生物力学特性对冠状动脉介入治疗策略的优化 / 170

172 第十二章 血管内超声

- 第一节 常规血管内超声 / 172
第二节 冠心病患者的冠状动脉重构及斑块稳定性的评估 / 174
第三节 虚拟冠状动脉内血管成像 / 177

182 第十三章 超声测定血管壁面切应力

- 第一节 血管壁面切应力的生物力学基础 / 182
第二节 切应力空间分布图 / 184
第三节 切应力空间分布图的临床应用 / 186

193 第十四章 原子力显微镜及原子力声显微镜

- 第一节 原子力显微镜的工作原理 / 193
第二节 原子力显微镜的工作模式 / 194
第三节 原子力显微镜显微成像的特点 / 195
第四节 原子力显微镜在细胞生物学领域的应用 / 196
第五节 原子力声显微镜评价大鼠成心肌细胞的细胞骨架 / 199
第六节 杨氏模量在心肌细胞分子生物学中的应用 / 202

208 第十五章 组织多普勒

- 第一节 组织多普勒超声的原理 / 208
第二节 衍生于组织多普勒超声的其他技术 / 208
第三节 组织多普勒的争议 / 211
第四节 组织多普勒超声的临床应用 / 214

222 第十六章 斑点追踪技术

- 第一节 斑点追踪技术的基础 / 222
第二节 斑点追踪技术评价正常心肌运动 / 226
第三节 二维斑点追踪技术研究急性心肌梗死犬的心肌应变 / 227

- 第四节 二维斑点追踪技术评价急性心肌梗死 / 229
- 第五节 二维斑点追踪技术评价左心室收缩功能异常 / 230
- 第六节 二维斑点追踪技术估测左心室扭转及解旋运动 / 231
- 第七节 二维斑点追踪技术评价左心室不同步性 / 232
- 第八节 二维斑点追踪技术评估肥厚型心肌病 / 233
- 第九节 肥厚型心肌病的心肌应变阶差 / 234
- 第十节 二维斑点追踪技术评价右心室功能 / 235
- 第十一节 二维斑点追踪技术评价左心房功能 / 236
- 第十二节 三维斑点追踪技术 / 237

244

第十七章 流体力学

- 第一节 绪论 / 244
- 第二节 作用在流体上的力 / 245
- 第三节 流体的主要物理力学性质 / 246
- 第四节 牛顿流体和非牛顿流体 / 248
- 第五节 流体静力学 / 250
- 第六节 流体运动学 / 250
- 第七节 流体动力学基础 / 254

261

第十八章 超声流体力学的临床应用

- 第一节 生物体血流的流体力学测量技术 / 261
- 第二节 血流向量成像技术 / 263
- 第三节 血流向量成像评价正常心脏的左心室腔内流场变化 / 266
- 第四节 血流向量成像技术的临床应用 / 267
- 第五节 血流向量成像技术在慢性心力衰竭患者的应用 / 268
- 第六节 超声流体力学法测定左心室流入血流速度阶差 / 273
- 第七节 血流向量成像技术的局限性 / 274

277

第十九章 声动力学疗法的基础

- 第一节 超声造影的原理 / 277
- 第二节 造影剂微泡的转归 / 278
- 第三节 造影剂微泡的动力学特性 / 279
- 第四节 微泡击破期微射流的生物效应 / 288
- 第五节 单泡光散射的精确解和几何光学近似 / 289

294

第二十章 声动力学疗法的临床应用

- 第一节 低频低功率超声联合造影剂微泡 / 294
- 第二节 低频超声对细胞凋亡的作用 / 296

- 第三节 超声靶向微泡破裂的转染原理 / 298
- 第四节 声动力学疗法的局限性 / 298
- 第五节 超声微泡对血管内皮细胞的不良作用 / 299
- 第六节 超声靶向微泡破裂技术影响因素及安全性问题 / 301
- 第七节 高能低频超声在治疗冠状动脉内血栓中的作用 / 302

308 第二十一章 声弹性成像

- 第一节 声弹性成像原理 / 308
- 第二节 弹性成像理论的进展 / 310
- 第三节 弹性成像算法方面的进展 / 311
- 第四节 声弹性成像在深静脉血栓中的应用 / 314
- 第五节 静脉血栓弹性成像研究 / 317

320 第二十二章 机电波成像技术在无创评价心血管疾病中的应用

- 第一节 高帧率合成显像技术在临床心血管系统的应用 / 320
- 第二节 在体心脏机电波成像的应用 / 321

324 第二十三章 瞬时波强技术

- 第一节 命名 / 324
- 第二节 应用公式及临床应用参数 / 325
- 第三节 仪器与操作界面 / 326
- 第四节 方法学研究 / 327
- 第五节 临床应用 / 332

物体的生命活动是通过细胞来付诸实现的。生物力学作为研究生物体及构成生物体的细胞力学性质与规律,它须遵守能量守恒、动量定律、质量守恒三大定律,并且符合生物体物质特性的本构方程(constitutive equation)。确定本构方程时,要通过生理学实验以验证与导出微分与积分方程,建立数学模型进行求解,测出生物体组织或材料的力学性质。生物力学研究通过对活体组织压力-应力关系的分析,从生物物理学角度结合组织与细胞病理学的改变,了解生物体组织或细胞力学性质变化与其病理结构改变间的关系,从而为解释因病理变化导致临床生理异常的内在关系提供实验依据。

尽管早在1615年,哈维根据流体力学原理推断出血液循环的存在,属人类历史上最早的生物力学发现,但是真正将生物力学作为一门独立的学科,还属20世纪60年代,美国圣迭哥加州大学的冯元桢教授(Fung Y C)将其称作biomechanics(生物力学)。冯元桢教授将力学方法引进到血管、心脏、肺等器官的研究之中,发现了心脏、血管的“零应力状态”,提出了“残余应力”理论,记录了心血管病变的组织重构与病理组织学之间的内在联系,从而获得较常规临床观察数据更为精确地反映超微组织学改变的力学定量指标。20世纪70年代末,满怀爱国之心的现代生物力学创始人冯元桢先生,呕心沥血地推动生物力学在中国的传播,使其作为一门新兴的分支学科在中国得以启动与进步。在冯元桢教授的《生物力学》著作中有意引证了中医典籍《黄帝内经·素问》中记载的对心脏和血液循环的描述,中国人是最早意识到血液在血管内是“流行不止,环周不休”的。

冯元桢教授的实验室用生物力学方法研究了生物软组织的本构关系;进行了肺毛细血流片层流动模型的肺血流动力学研究;描述了大鼠肺动脉组织的力学特性,研究了猫肺静脉的直径变化与压力的关系,报告了生物组织器官生长和应力的关系;观察到糖尿病大鼠模型的肺动脉展开角发生变化,肺动脉的短轴应力明显增高;他们对慢性吸烟大鼠的肺动脉血管的研究表明,肺动脉血管展开角、应力、应变均出现异常重构性变化。血液循环力学的基本问题之一是血液与血管的相互作用,对动脉血管生物力学特性的研究正是将动脉的本构方程(即应力-应变关系)转化为数学方程问题,以得到力学特性常数,以便深入对血液流变学、发病机制进行研究。

生物力学对心脏与血管的研究,主要了解组成心脏与血管生物材料的几何学特征,测定心脏与血管组织或材料的力学性质,建立心脏与血管组织材料的数学模型,经过生理与病理实验来验证与导出其主要的微分和积分方程。心脏与血管力学作为阐述力学特性与血液循环生理、病理过程的分支学科,通过对正常及病理状态组织受力及应变的关系来解释疾病发生机制,其研究结果有助于揭示力在细胞和分子水平上的作用机制,不仅有助于发展医学工程的新理论,更有针对性地研发新的医疗设备,促进临床新药的设计与研发。

生物动脉血管壁内沿血管走行和动脉短轴的组织纤维结构一直处于张力与牵拉状态,在生物力学实验中,若截取动脉血管的横断截面,沿着动脉血管一侧剪开时,该血管环不是松弛不变,而是沿方向缩进或展开,形成一定的张开角。心血管病变发生时,不仅心脏或血管发生了病理性重构,而且出现了力学重构,其张开角、应