



现代声学科学与技术丛书

# 生物医学超声学

上册

万明习◎主编

宗瑜瑾 王素品◎副主编



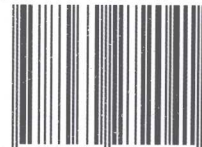
(Q-2470.0101)



生物分社  
联系电话: 010-64012501  
<http://www.lifescience.com.cn>  
e-mail: lifescience@mail.sciencep.com

销售分类建议: 生物医学工程

ISBN 978-7-03-027204-1



9 787030 272041 >

定 价: 120.00元(上、下册)

现代声学科学与技术丛书

# 生物医学超声学

(上册)

主编 万明习

副主编 宗瑜瑾 王素品

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书分为上、下两册,上册系统地介绍了生物医学超声学的基础理论和关键技术,包括生物医学超声的物理基础、换能器、信号与信道特性,以及超声测量与成像的理论、系统和关键技术等;下册主要介绍超声造影成像、超声弹性成像、超声图像处理、超声生物效应、治疗超声、医学超声波微器件,以及其他生物医学超声技术的基本理论、方法及应用。全书共分为14章,每章后均配有习题和参考文献供读者练习、进一步阅读和思考。通过学习本书,读者能够对生物医学超声学的理论和方法有较全面的理解和掌握,并能够开阔视野进而提高自己的业务水平。

本书可作为高等院校生物医学工程及相关专业高年级本科生和研究生教材,也可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

生物医学超声学(上、下册)/万明习主编. —北京:科学出版社,2010

(现代声学科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-027204-1

I. 生… II. 万… III. ①生物医学工程-超声学 IV. ①R318②R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 065161 号

责任编辑:罗 静 李秀伟 李 锋 刘 晶/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

装 订 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年5月第一次印刷 印张:53 1/4

印数:1—1 500 字数:1 218 000

定价:120.00元(上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

生物医学超声学是一门年轻并处于蓬勃发展中的交叉学科,也是生物医学工程学最重要的分支之一。为了满足西安交通大学生物医学工程专业开设的“生物医学超声学”课程的教学需要,编者于1992年在实验室多年科研教学工作积累和本人授课经验的基础上编写了《医学超声学——原理与技术》一书。该书由西安交通大学出版社出版以来,一直在西安交通大学和相关兄弟院校教学中使用,大家提出了许多宝贵的修改建议。

近十几年来,国内外的科研人员对生物医学超声学所涉及的医学超声物理、换能器及材料、电子学、信息处理与计算、生物组织超声定征、图像处理、超声生物效应与治疗等方面进行了广泛深入的研究,新的理论、方法不断产生和发展,超声诊断和治疗设备不断推陈出新,这大大拓展和丰富了生物医学超声学的内容和应用领域。在这种形势下,非常有必要对这本教材的内容进行补充和修正,以便既能系统地反映生物医学超声学所涉及的基本原理和关键技术,又能反映当前生物医学超声学的发展趋势。

本书分为上、下两册,共14章。上册包括前7章,可作为生物医学工程专业高年级本科生教材。下册包括后7章,可作为生物医学工程专业研究生教材。全书也可作为从事生物医学超声研究人员和教学人员的参考书。第1章是绪论,简单介绍生物医学超声学的发展历程和诊断、治疗超声设备的分类;第2章对生物医学超声物理的基本内容进行了概念性和结论性的阐述;第3章内容为生物医学超声换能器的原理、材料、分类、结构、辐射声场与性能测试;第4章系统讨论了描述医学超声信号与信道的主要指标及其影响因素,介绍了典型超声发射和接收处理通道的工作原理;第5章比较系统地介绍了各主要超声参量测量的数学、物理原理和实验方法;第6章对超声成像的扫描成像原理、波束处理、数字扫描变换和图像处理等关键技术进行了重点介绍;第7章系统介绍了超声多普勒血流测量和彩色血流成像所采用的信号获取与处理方法、仪器工作原理与结构等;第8章介绍了超声造影微泡的材料、结构及其声学特性,造影成像的数学、物理原理与信号处理方法,以及微血管灌注评价、分子成像等方面的内容;第9章介绍了超声弹性成像的数学、物理原理和方法;第10章的主要内容为生物医学超声图像处理;超声生物效应是治疗超声的重要基础,越来越多地受到关注,因此第11章介绍了超声生物效应机制、影响因素及其研究方法;第12章主要介绍了治疗超声的基础、原理和系统,其中对高强度聚焦超声治疗的焦点控制、系统构成和治疗规划等进行了详细的论述;第13章以超声波电机、体内微型机器人和几种微型超声换能器为例介绍了生

物医学超声微器件与系统的现状和发展趋势;最后将超声全息成像、超声显微镜、超声 CT、超声无损测温、光声成像、热声成像、超声空化的声学与光学检测及成像的内容放在第 14 章,并对其进行了较为全面和恰当深度的阐述。

每一章后面均附有习题,一方面可以帮助读者掌握书中的基本概念、理论和方法;另一方面可以引导读者对有关问题进行更深入的思考,以便在实际工作中能够更好地掌握和运用书中的理论和方法。另外,针对本书的核心内容,大多数章后还附有实验,这些实验对本书内容构成了有益的补充。读者可根据所在实验室的条件自行设计和完成这些实验,也可参照我们编写的《生物医学超声实验》一书(西安交通大学出版社)。

自 2000 年以来,我们就启动了本书的编写工作,所有参编人员均为主编所领导和指导学术团队的教师和研究生。许多作者为此书付出了辛勤的劳动。本书第 1~7 章的内容由王素品、李天钢、钟徽、陆明珠、宗瑜瑾、李俊博和张锐在原《医学超声学——原理与技术》一书基础上进行补充和修正;参与第 8 章编写的有宗瑜瑾、宋延淳、谷金宏、谷晓林等;第 9 章先后由白培瑞、赵贵敏、张大春编写;第 10 章由张红梅编写;第 11 章由冯怡编写;第 12 章由陆明珠编写;第 13 章由张锐编写;第 14 章的内容由刘焕青、丁婷、曹华、许成等在原《医学超声学——原理与技术》一书基础上进行补充完成。最后全书由万明习、宗瑜瑾和王素品统一整理成稿。

在编写过程中,作者参阅了国内外本领域和相关领域的大量教科书和论文等文献,并注意反映我国在生物医学超声领域的研究进展。书中每章参考文献的选择除了满足引文要求外,还力求涵盖本领域的经典文献和最新文献。由于生物医学超声学涉及面广,发展很快,积累了丰富的文献资料,本书在引文方面可能还有疏漏,敬请谅解。此外,由于编者水平有限,本书在内容选取与写作等方面存在不足和错误之处在所难免,恳请读者不吝赐教,予以批评和指正,我们将在本书今后再版时予以修正。

本项工作得到国家自然科学基金重点项目、面上项目、973 项目(2010CB732603)的支持,在此一并表示感谢。

编 者

于西安交通大学

2009 年 5 月

# 目 录

## 前言

## 上 册

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 生物医学超声系统的分类 .....	2
1.2.1 按超声的波形分类 .....	2
1.2.2 按利用的物理方法分类 .....	2
1.2.3 按医学超声设备的体系分类 .....	2
1.3 生物医学超声学的发展历程及现状 .....	5
1.3.1 超声诊断方面 .....	5
1.3.2 超声治疗方面 .....	13
1.4 生物医学超声学的发展趋势 .....	15
参考文献 .....	15
<b>第 2 章 医学超声的物理基础</b> .....	17
2.1 超声波的一般概念 .....	17
2.1.1 机械振动与机械波 .....	17
2.1.2 超声波的类型 .....	20
2.1.3 常用超声学参量的定义 .....	22
2.1.4 超声波的叠加、干涉、绕射和惠更斯原理 .....	26
2.2 超声波的数学描述——波动方程及其解 .....	27
2.3 界面上波的反射和透射 .....	29
2.3.1 超声波垂直入射到平界面上的反射和透射 .....	29
2.3.2 超声波倾斜入射到平界面上的反射和透射 .....	30
2.3.3 平面超声波在曲界面上的反射和透射 .....	33
2.3.4 超声波多层透射与声耦合 .....	35
2.4 生物组织的超声特性 .....	37
2.4.1 生物组织构成 .....	37
2.4.2 超声衰减 .....	37
2.4.3 生物组织超声特性的参数值 .....	39
2.5 多普勒效应 .....	42

2.5.1	声源至运动界面通路	42
2.5.2	运动界面至接收器通路	43
2.5.3	矢量公式	43
2.6	诊断超声的安全阈值	44
	习题	45
	参考文献	47
<b>第3章</b>	<b>医用超声换能器</b>	<b>48</b>
3.1	压电效应、压电方程与压电体参数	48
3.1.1	压电效应	48
3.1.2	压电方程	49
3.1.3	压电体参数	50
3.2	压电振子	54
3.2.1	压电振子的振动模式	54
3.2.2	压电振子的等效电路	57
3.2.3	压电振子的谐振特性	59
3.3	压电材料	61
3.3.1	压电单晶体	62
3.3.2	压电陶瓷	67
3.3.3	新型压电材料	73
3.4	诊断超声换能器的种类、结构与特性	79
3.4.1	诊断超声换能器分类	79
3.4.2	诊断超声换能器的结构	79
3.4.3	诊断超声换能器的特性	84
3.5	超声换能器的声场特性	86
3.5.1	换能器声场的指向性	87
3.5.2	单阵元换能器的超声场	90
3.5.3	多阵元换能器的超声场	95
3.6	治疗超声换能器	103
3.6.1	单阵元高功率换能器	104
3.6.2	多个自聚焦和阵元组合换能器	109
3.6.3	相控阵高功率治疗超声换能器	110
3.6.4	微型 HIFU 治疗换能器	114
3.7	超声换能器性能的测定	115
3.7.1	超声换能器频率特性的测定	115
3.7.2	超声声场分布的测定	117
3.7.3	超声辐射功率的测量	119



3.7.4	超声声场分辨率的测量	125
3.8	医用超声换能器新技术	126
3.8.1	二维阵列超声换能器	126
3.8.2	电容式微机械超声换能器	128
3.8.3	血管内超声换能器	130
	习题	131
	实验	132
	参考文献	132
<b>第4章</b>	<b>诊断超声信号、信道与指标</b>	<b>134</b>
4.1	诊断超声信号与信道概述	134
4.2	超声发射信号形式及其特性	134
4.2.1	信号特性的表达方法	135
4.2.2	超声信号分类	135
4.2.3	超声信号特性	136
4.3	超声信号与系统的主要指标	142
4.3.1	动态范围	142
4.3.2	工作频率、频带宽度	144
4.3.3	系统基频、显示帧频	145
4.3.4	系统分辨力	147
4.3.5	发射功率、接收功率	152
4.3.6	灵敏度、信噪比	153
4.4	超声发射通道	153
4.4.1	单脉冲发射方式	153
4.4.2	连续正弦波发射方式	154
4.4.3	选通正弦波发射方式	155
4.4.4	调制波发射方式	155
4.4.5	数字发射激励方式	156
4.5	模拟超声接收处理通道	157
4.5.1	前置放大	157
4.5.2	时间增益补偿	159
4.5.3	对数压缩放大	161
4.5.4	信号检波、抑制与视频放大	167
4.6	数字超声接收处理通道	169
4.6.1	数字时间增益补偿	169
4.6.2	数字对数压缩方法	170
4.6.3	数字回波检波解调方法	171

4.7 接收相关处理与脉冲压缩技术 .....	173
4.7.1 脉冲压缩技术基本原理 .....	173
4.7.2 线性调频发射成像 .....	175
4.7.3 相位编码发射成像 .....	176
习题 .....	180
实验 .....	182
参考文献 .....	182
<b>第5章 生物组织超声参量的测量</b> .....	<b>183</b>
5.1 超声速度的测量 .....	183
5.1.1 脉冲透射法 .....	183
5.1.2 脉冲回波法 .....	184
5.1.3 驻波法 .....	187
5.1.4 共振法 .....	187
5.1.5 生物组织声速在体测量 .....	188
5.2 声特征阻抗的测量 .....	190
5.2.1 密度测量方法 .....	190
5.2.2 垂直入射反射系数测量方法 .....	190
5.3 超声衰减的测量 .....	191
5.3.1 超声波在组织中的衰减 .....	191
5.3.2 透射法 .....	192
5.3.3 瞬态热电偶法 .....	193
5.3.4 回波法 .....	194
5.4 非线性声学参量 $B/A$ 的测量 .....	199
5.4.1 非线性声学参量 $B/A$ 的定义 .....	199
5.4.2 热力学测量法 .....	200
5.4.3 有限振幅声波法 .....	201
5.4.4 泵波——相位法 .....	204
5.5 超声散射的测量 .....	206
习题 .....	208
实验 .....	209
参考文献 .....	209
<b>第6章 超声成像原理与系统</b> .....	<b>210</b>
6.1 超声成像概述 .....	210
6.2 超声波束处理技术 .....	211
6.2.1 凹面晶体 .....	211
6.2.2 声学透镜 .....	212

6.2.3	电子聚焦	212
6.2.4	可变孔径	226
6.2.5	动态变迹	228
6.2.6	非衍射波束	238
6.2.7	合成孔径波束处理	248
6.3	B型扫描成像	256
6.3.1	机械扇形扫描成像	256
6.3.2	电子线性扫描成像	258
6.3.3	相控阵扇形扫描成像	260
6.3.4	凸阵扇形扫描成像	266
6.3.5	宽带发射与动态频率扫描成像	266
6.3.6	多波束合成	269
6.4	M型超声成像	272
6.4.1	M型超声成像原理	272
6.4.2	全方向M型成像系统	275
6.5	其他扫描成像方法	278
6.5.1	C型扫描成像	278
6.5.2	F型扫描成像	279
6.6	数字扫描变换器与图像处理	280
6.6.1	DSC的工作原理	281
6.6.2	数字扫描图像处理	292
6.7	腔内超声成像	296
6.7.1	经腔泌尿道超声成像	297
6.7.2	经腔消化道超声成像	298
6.7.3	经直肠超声成像	299
6.7.4	经阴道超声成像	299
6.7.5	经食管心脏超声成像	300
6.8	眼科高频超声成像	301
6.8.1	高频超声传播特性与成像	301
6.8.2	眼科高频超声成像	303
6.9	血管内超声成像	305
6.9.1	血管内超声导管与成像	305
6.9.2	血管内超声成像数字扫描转换和图像处理	307
6.9.3	IVUS图像质量影响因素	307
6.9.4	采用横向滤波器消除血细胞散射噪声	311
6.9.5	以散射模型为基础的IVUS图像偏心校正	313

6.10	三维与四维超声成像	314
6.10.1	三维超声成像	314
6.10.2	扫描方式与图像数据的采集	315
6.10.3	三维图像的重建	315
6.10.4	三维图像的显示	316
6.10.5	四维超声成像	316
6.11	组织谐波成像	317
6.11.1	组织谐波成像原理	317
6.11.2	谐波的提取与成像方法	319
6.11.3	组织谐波成像的特点	321
6.11.4	应用举例	322
6.12	背向散射成像	324
6.12.1	背向散射积分成像	324
6.12.2	定量背向散射系数成像	325
6.13	全数字化超声成像系统	327
6.13.1	概述	327
6.13.2	全数字化超声关键技术	328
6.13.3	全数字化超声成像系统	333
	习题	334
	实验	336
	参考文献	336
<b>第7章</b>	<b>超声血流检测与成像</b>	<b>338</b>
7.1	超声血流检测的物理学基础	339
7.2	超声血流运动信息提取	339
7.2.1	经典多普勒估计法	340
7.2.2	自相关估计法	349
7.2.3	自回归估计法	352
7.2.4	有限差分估计法	354
7.2.5	互相关估计法	355
7.2.6	宽带最大似然估计法	357
7.2.7	流速矢量的超声检测	358
7.3	距离选通技术与流速分布测量	360
7.3.1	超声束交叉域多普勒法	361
7.3.2	脉冲超声多普勒技术	361
7.3.3	伪随机码超声多普勒技术	365
7.3.4	流速分布测量	369

7.4	超声多普勒血流动态谱分析 .....	372
7.4.1	超声多普勒血流动态谱概述 .....	372
7.4.2	多普勒动态谱与其他成像模式的复合 .....	372
7.5	超声多普勒血流成像 .....	374
7.5.1	连续波超声多普勒血流成像 .....	374
7.5.2	脉冲超声多普勒血流成像 .....	375
7.5.3	实时二维彩色多普勒血流成像 .....	376
7.6	能量多普勒血流成像 .....	381
7.6.1	成像原理 .....	381
7.6.2	PDI 的特点 .....	383
7.6.3	彩色 M 模式成像 .....	384
7.7	彩色多普勒速度能量血流成像 .....	384
7.8	其他 .....	385
7.8.1	渡越时间式超声流速计 .....	385
7.8.2	超声多普勒气泡检测 .....	386
7.8.3	超声多普勒法在血压测量中的应用 .....	387
7.8.4	经颅多普勒技术 .....	388
7.8.5	横向多普勒 .....	389
7.8.6	B-Flow 成像 .....	393
	习题 .....	394
	实验 .....	397
	参考文献 .....	397

## 下 册

<b>第 8 章</b>	<b>超声造影成像 .....</b>	<b>399</b>
8.1	超声造影剂 .....	399
8.1.1	超声造影剂的发展 .....	399
8.1.2	影响微泡稳定性的主要因素 .....	402
8.1.3	微泡的结构 .....	405
8.1.4	超声造影剂的制备方法 .....	408
8.2	超声造影剂物理特性及成像基础 .....	410
8.2.1	超声场中的超声造影剂 .....	410
8.2.2	超声造影微泡的线性特性 .....	411
8.2.3	超声造影微泡的非线性特性 .....	414
8.2.4	微泡的破裂 .....	415
8.3	纳米包膜造影微泡在声场中的理论振动模型 .....	418

8.3.1	自由振动的无包膜空气微泡 .....	418
8.3.2	纳米包膜微泡 .....	420
8.3.3	厚膜微泡 .....	422
8.3.4	微泡在声场中振动的建模仿真 .....	423
8.4	超声造影成像方法 .....	425
8.4.1	基波 B 模式成像 .....	425
8.4.2	谐波 B 模式成像 .....	425
8.4.3	谐波功率多普勒成像 .....	426
8.4.4	脉冲逆转 B 模式成像 .....	427
8.4.5	脉冲逆转多普勒成像 .....	429
8.4.6	次谐波和超谐波成像 .....	431
8.4.7	多脉冲释放成像 .....	432
8.4.8	微泡破坏/间歇成像 .....	434
8.4.9	其他微泡造影成像方法 .....	436
8.4.10	各种谐波成像方法性能比较 .....	437
8.5	微血管血流灌注检测及定量评价 .....	438
8.5.1	微血管灌注评定的生理和病理 .....	439
8.5.2	超声造影剂灌注检测成像技术 .....	440
8.5.3	超声造影成像及灌注评定的相关操作 .....	441
8.5.4	基于超声造影成像的微血管灌注评价方法 .....	444
8.5.5	超声微血管灌注参量成像 .....	456
8.6	超声分子成像 .....	459
8.6.1	靶向超声造影剂 .....	459
8.6.2	被动靶向的应用 .....	461
8.6.3	主动靶向的应用 .....	464
8.7	与超声造影微泡有关的其他问题 .....	466
8.7.1	压力估计 .....	466
8.7.2	增强高强聚焦超声的治疗作用 .....	467
8.7.3	基因和药物的控制释放 .....	467
	习题 .....	468
	实验 .....	468
	参考文献 .....	468
<b>第 9 章</b>	<b>超声弹性成像技术 .....</b>	<b>472</b>
9.1	概述 .....	472
9.2	生物组织模型 .....	473
9.2.1	生物组织黏弹性力学模型 .....	473

9.2.2	生物组织超声散射模型 .....	474
9.3	超声弹性成像主要方法 .....	476
9.3.1	振动幅度声弹性图 .....	476
9.3.2	振动相位梯度声弹性图 .....	478
9.3.3	组织压缩应变声弹性成像 .....	478
9.3.4	多步压缩应变弹性成像 .....	480
9.3.5	剪切波弹性成像 .....	481
9.3.6	声辐射力成像 .....	482
9.3.7	血管壁弹性成像 .....	482
9.4	超声弹性成像的技术指标 .....	483
9.4.1	对比度传输率 .....	483
9.4.2	应变滤波器 .....	484
9.4.3	空间分辨率 .....	485
9.5	一维位移/应变估计 .....	486
9.5.1	基本算法 .....	486
9.5.2	其他一维弹性成像算法 .....	494
9.6	二维位移/应变估计算法 .....	500
9.6.1	区域匹配算法 .....	501
9.6.2	基于光流的运动估计方法 .....	505
9.6.3	小结 .....	510
9.7	组织运动与声辐射力成像 .....	510
9.7.1	声辐射力及声辐射力成像 .....	510
9.7.2	振动声成像 .....	511
9.7.3	组织谐波运动成像 .....	515
9.7.4	声辐射力脉冲成像 .....	516
9.7.5	声束序列及数据获取 .....	517
9.8	血管弹性成像 .....	518
9.8.1	基于相关反馈算法的动脉血管壁应变估计 .....	519
9.8.2	以 IVUS 图像为基础的血管壁弹性成像 .....	522
	习题 .....	527
	实验 .....	528
	参考文献 .....	528
<b>第 10 章</b>	<b>超声图像处理 .....</b>	<b>531</b>
10.1	B 型超声图像特性 .....	531
10.1.1	噪声特性 .....	532
10.1.2	纹理特性 .....	533

10.1.3	分形特性 .....	534
10.2	超声图像去噪和增强 .....	535
10.2.1	中值滤波 .....	536
10.2.2	小波滤波 .....	536
10.2.3	基于偏微分方程演变的超声图像去噪增强 .....	540
10.3	超声图像分割 .....	545
10.3.1	基于 Gabor 滤波的边缘提取 .....	545
10.3.2	模糊 C 均值聚类分割算法 .....	546
10.3.3	基于统计模型的分割方法 .....	547
10.3.4	Live wire 分割模型 .....	555
10.3.5	可动边界模型 .....	557
10.4	超声图像配准 .....	565
10.4.1	图像刚性配准 .....	567
10.4.2	图像非刚性配准 .....	571
10.4.3	超声图像与其他模态图像的配准及融合 .....	574
10.5	超声图像三维重建及其可视化 .....	576
10.5.1	超声图像数据三维重建 .....	577
10.5.2	体绘制 .....	581
10.5.3	面绘制 .....	584
10.5.4	可视化软件包简介 .....	588
10.6	体积测量 .....	589
10.6.1	基于 Freehand 超声成像的体积测量方法 .....	590
10.6.2	具有二阶连续性的三次样条测面体积估计法 .....	591
10.7	超声图像特征提取与组织定征 .....	595
10.7.1	纹理特征分析和分形维数估计 .....	595
10.7.2	心脏运动估计及参数提取 .....	596
	习题 .....	599
	参考文献 .....	599
<b>第 11 章</b>	<b>超声生物效应 .....</b>	<b>602</b>
11.1	超声生物效应主要机理 .....	602
11.1.1	热效应 .....	602
11.1.2	空化效应 .....	605
11.1.3	机械效应 .....	609
11.1.4	理化效应 .....	610
11.2	超声生物效应的应用及研究进展 .....	612
11.2.1	超声诊断应用及进展 .....	612



11.2.2	超声治疗应用及进展	613
11.3	超声生物效应的研究方法	625
11.3.1	超声照射的体内/体外实验	625
11.3.2	显微技术在超声生物效应研究中的应用	628
11.3.3	流式细胞术在超声生物效应研究中的应用	632
11.3.4	基因工程技术的应用	635
11.3.5	超声作用机制的蛋白质组学研究方法	638
11.4	超声造影剂与超声生物效应研究	640
11.5	研究举例:应用蛋白质组平台研究超声/抗癌药物/造影微泡诱导 肿瘤细胞凋亡的协同作用	641
11.5.1	药物、超声协同诱导肿瘤细胞凋亡分析及蛋白质组差异分析	641
11.5.2	微泡、超声协同诱导肿瘤细胞凋亡分析及蛋白质组差异分析	642
11.5.3	微泡、药物或者携带药物的微泡型载体诱导肿瘤细胞的凋亡分析及 蛋白质组差异分析	643
	习题	644
	实验	645
	参考文献	645
<b>第 12 章</b>	<b>治疗超声</b>	<b>649</b>
12.1	治疗超声概述	649
12.2	治疗超声的热学机制	650
12.2.1	生物传热方程	650
12.2.2	热剂量的时间-温度关系	651
12.3	治疗超声的空化机制	652
12.3.1	瞬态空化	652
12.3.2	稳态空化	653
12.3.3	空化热效应	654
12.3.4	微泡声发射	654
12.4	超声治疗的工作方式和相关声场参数	655
12.5	治疗超声的非线性	657
12.5.1	非线性参量 $B/A$	658
12.5.2	非线性波形畸变	659
12.5.3	声流	660
12.5.4	声辐射力	661
12.6	治疗超声的应用及其生物效应机制	661
12.6.1	生物组织的超声作用特性	661
12.6.2	理疗和相关应用的生物效应机制	662