



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 28

现代医学影像 物理学进展

包尚联 高嵩 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 28

现代医学影像 物理学进展

包尚联 高嵩 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

现代医学影像物理学进展/包尚联,高嵩编著. —北京:北京大学出版社,2014. 11
(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-24023-6

I. ①现… II. ①包… ②高… III. ①影象诊断—医用物理学—研究进展
IV. ①R445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 043999 号

书 名: 现代医学影像物理学进展

著作责任者: 包尚联 高 嵩 编著

责任编辑: 郑月娥

标准书号: ISBN 978-7-301-24023-6/O · 0969

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62767347 出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 26.75 印张 500 千字

2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 130.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系”

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

内 容 提 要

本书是介绍医学影像物理学近十多年来最新技术进展的专业著作。书中重点介绍分子成像和多模态成像两个方面的内容,着重介绍分子成像的各种模态和多模态联合成像的方法,以及用这些原理和方法实现的成像装置及它们的主要应用。将被检测人员的信息进行采集、融合和及时处理,并把处理结果传递给医生,从而使得医生掌握尽可能全面的被测人员信息是医院面临的挑战之一,也是减少误诊的必要条件。如果考虑到任何成像装置都存在各种噪声,重建算法都有误差,以及各种装置不完善等原因造成的伪影,医生,即使非常有经验的医生,也难免会有误诊和误判、“以偏概全”的情况发生。本书试图通过向读者介绍各种概念、成像方法和应用方面的最新进展,帮助改善这种情况。

本书可作为高等学校医学物理和生物医学工程专业学生的教材,也可以作为物理类、医学类专业的研究生,以及相关教学科研人员,甚至医疗仪器和产品研发的工程师们的参考书。

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,作出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步作出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任

中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

前 言

本书是继 2004 年北京大学医学出版社出版的《现代医学影像物理学》之后介绍医学影像领域最新进展的专业著作。书中重点介绍分子成像和多模态成像两个方面的内容,尤其是介绍了分子成像的各种模态和多模态整合的成像方法及装置的设计原理。

分子成像是在世界上科学家绘制了人体遗传基因图谱之后,研究新的遗传物质,以及在遗传基因控制下合成的新的蛋白质分子在活体内功能和病理学机制的主要技术手段。人类的进步不仅来源于自然的选择,而且来源于不断出现的人造物质。现代科学技术的发展,促进了人类的进步,加快了人类的进化速度。正是对这些进化过程的研究,使得人类能够更加深入地认识人体内的微观结构和功能,并以此为基础构成分子影像学前沿。研究各种更广泛的目标和应用背景,促进了分子成像学科的建立,并在近十多年内形成了很多新概念、新方法以及新的分子成像装置。

从科学发展的角度看,医学科学的进步使得医生需要掌握和处理的专业知识面越来越宽广,对知识的深度要求越来越高,分工越来越细,获得这些知识并熟练应用于人类健康问题需要的时间周期变长。医生如何在有限的生命周期内掌握和应用这些知识,已经成为医生人生的新挑战。而从病人的角度看,其疾病的诊断和治疗需要的信息越多越好、越综合越好。这两类人群形成的互相矛盾的社会需求,或许可以通过多模态医学影像工具的快速发展得到满足。无论是医生还是医学物理工作者,都是为病人服务的。为了满足病人信息完整采集的需求,促成了多模态医学影像装置的出现及其广泛应用,并且在最近十年内形成了分子成像的学科方向。这个学科方向也正在向多模态成像的方向发展,并已在疾病的诊断和治疗中获得了巨大成功。

自从 2001 年在美国波士顿召开第一届世界分子成像大会之后,我国在唐孝院士倡议下于 2002 年在杭州召开了以分子成像为主要内容的香山科学会议,对分子成像的有关概念进行了讨论,促进了这一学科在中国的诞生,使

得这个领域在中国的发展在十年内突飞猛进。中国科学院自动化研究所田捷研究员,在清华大学白净教授和北京大学包尚联教授的协助下,经过多年的努力,终于在 2006 年获得我国基础研究重大项目(973 项目)的资助(项目编号:2006CB705700),开展了系统的分子成像领域的研究。该项目于 2010 年结题,并于 2011 年滚动申请成功(新项目编号:2011CB707701),使得这个领域的研究不断深入。

分子成像分为基础研究和医学临床两个方面的应用。从成像装置来说,现在是指动物成像装置的研发和应用,以及在传统临床用的成像装置上增加新的分子成像的功能。无论哪种情况,这十多年来的进步都是巨大的。

多模态分子成像的概念、方法和成像装置是应临床疾病诊疗时对信息的综合需求而发展起来的,从 21 世纪初开始得到快速发展,已经有诸如 PET/CT, SPECT/CT, PET/MRI, SPECT/MRI 等大型医疗诊断设备。MV X 射线加速器/kV X 射线 CT 已经随着影像导引的放疗技术(IGRT)而得到了普及,加速器/MRI 等装置也在酝酿之中,各大公司都把它们作为今后发展的重点。多模态和诊疗一体化医疗仪器和设备的诞生及使用,其本质原因是减少在诊断和治疗中辐射损伤引起的副作用。即使尚处于研发阶段的成像装置,也已经显示出它们在临床应用中的优势和巨大潜力。

现代医学影像设备无创伤地采集人体的解剖学、生理学和病理学的信息并实现可视化及定量化,是古老的中医“望闻问切”方法的自然延续。现代医学影像物理学以物理学为基础,跨越信息学和医学的广泛领域,是除了军工产品外制造业和软件业的高端产品,已经成为 21 世纪新的学科生长点和我国高新技术产业发展的重点。其内容包括装置的设计原理、数据采集、图像重建、提高图像质量的方法学研究,以及在科学研究和临床方面的应用。

生物医学成像学科与其他快速发展的工具类学科一样,其真正目标是如实反映真实物体内部的综合信息。但由于大量噪声的存在,此目标还不能实现。到目前为止,所有成像设备只能采集人体的部分信息,即使分子成像、多模态成像装置也不例外。所有的医学影像设备探测到的信息都是那些和人体相互作用、携带了人体信息、离开人体的物质波所携带的信息。所以,某种特定的医学影像是经过数学方法的反演之后得到的,是被成像人的特定部位、某一时刻、部分信息的可视化表达。人体影像确实是人体信息的一部分,含有被成像个体的特殊信息。但是,即使成像过程中没有夹带任何虚假的信息(伪影和噪声在所难免),在某种特定的成像装置上采集的图像也只是被成像个体在特定时空内的很小一部分信息(即对实体的某种抽样结果)。无论对人体本身

的研究,还是对人体疾病的诊断或者治疗,只靠这部分信息作出的判断会有较大的误差。据不完全统计,用医学影像进行的疾病诊断在世界范围内的准确率大约仅为 85%,原因是人体的情况太复杂,对疾病准确诊断所需要的数据还不够完整、不够精细。目前医院对病人采集的信息还需要进一步整合并及时完成在解剖学基础上的配准、生理学基础上的功能信息和解剖信息的集成,以及生化参数和影像的结合和量化。这些内容都是现代医学影像物理学最近十年来发展的主要学科方向和新鲜内容。

由于医院本身是划分为科室的,越大医院划分越细,每个科室只掌握病人的某一部分信息,而准确的诊断又需要尽可能完整的信息,所以,病人信息的整合和及时正确的处理是医院面临的挑战之一,也是防止误诊的必要条件。如果考虑到任何成像装置还不得不携带各种噪声和伪影,医生,即使非常有经验的医生,也难免会有误诊和误判、“以偏概全”的情况发生。本书即试图通过向读者介绍各种概念、成像方法和应用方面的最新进展,帮助改善这种情况。

本书分为八章。第 1 章介绍人体内的主要分子及其功能,属于整本书的基础知识范畴,为分子成像提供化学生物学基础。第 2 章介绍分子探针及其在分子成像装置中的使用,即在统计平均水平上通过分子探针与人体物质的相互作用,获取人体信息的物理、化学过程,从而达到采集人体信息、研究特定分子的生化功能的目标。第 3 章是分子成像的量化问题,包括如何通过药物代谢动力学的计算获得量化物理学、生物学参数。第 4 章首先介绍传统成像模态新增的分子成像功能,包括传统核医学在分子成像时代的进步,以及动物核医学成像和临床核医学成像技术的进步;其次介绍 MRI 设备新增的分子成像及其参数量化问题,主要考虑外源性药物增强动态成像(DCE-MRI)技术及其生物参数量化问题的研究及应用;最后介绍最近几年来光学成像的概念也被引进到生物成像领域,这方面的发展显然很难用于人体成像。第 5~8 章分别介绍双模态医学成像方面的概念、装置和应用,按照目前已经商业化或者正在商业化的产品为线索组织内容,分为 PET/CT, PET/MRI, SPECT/CT, SPECT/MRI 及其他,例如 PET/CT/MRI 等。

本书是在我们课题组长期教学科研并经过小组师生共同努力积累知识的基础上完成的,在此向我们组的所有老师和同学表示衷心的感谢。包尚联和高嵩作为这个小组的代表完成了本书。包尚联已经于 2008 年夏天从北京大学退休,在退休之后才开始完成本书的框架设计、资料收集和写作,主要承担

书中基础内容的撰写和全书的统稿。高嵩 2006 年从北京大学医学物理和工程专业博士毕业,现为北大医学部医学影像实验室教授,重点承担本书中成像装置设计原理、成像方法等内容的撰写。由于水平有限,书中可能会有很多不够完善,甚至概念错误的地方,请各位读者批评指正。

包尚联 高 嵩
2014 年 3 月

目 录

第 1 章 分子影像学的生物学基础	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 分子影像学	(1)
1.1.2 人体内的物质分类	(4)
1.1.3 人体分子分类	(7)
1.2 重要的人体分子简介	(11)
1.2.1 糖类分子	(11)
1.2.2 脂类分子	(13)
1.2.3 蛋白质分子	(14)
1.2.4 抗体	(31)
1.2.5 激素	(34)
1.2.6 神经递质	(38)
1.2.7 人类的遗传物质分子——核酸	(40)
1.2.8 人体分子生化检测及其在诊疗中的应用	(50)
1.3 人类基因还在进化吗？如何进化的？	(58)
参考文献	(59)
第 2 章 分子探针	(60)
2.1 引言	(60)
2.1.1 什么是分子成像中的探针	(60)
2.1.2 分子探针药物在分子成像中的意义	(60)
2.1.3 探针分子设计遵循的技术路线	(63)
2.1.4 多模态分子探针	(68)
2.2 伽玛相机使用的主要探针分子	(70)
2.2.1 伽玛相机使用的放射性同位素	(70)
2.2.2 用于 PET 成像的探针分子	(86)
2.2.3 MRI 使用的分子探针药物	(102)
2.3 医学成像中使用的其他探针分子和示踪技术	(111)

参考文献	(112)
第 3 章 药物代谢动力学	(113)
3.1 引言	(113)
3.1.1 什么是药物代谢动力学	(113)
3.1.2 药物在人体内的生化过程	(115)
3.1.3 药动学的发展历史和现状	(118)
3.2 药物代谢动力学模型及其在不同成像模态中的应用简介	(120)
3.2.1 药物代谢动力学模型简介	(120)
3.2.2 核医学成像方法的药动学模型简介	(123)
3.3 FDG 三腔室模型	(129)
3.3.1 参数估计方法	(131)
3.3.2 聚类分析	(133)
3.3.3 数据验证	(135)
3.4 磁共振造影剂 Gd-DTPA 的体内动力学过程	(137)
参考文献	(140)
第 4 章 单模态医学成像及其装置简介	(141)
4.1 引言	(141)
4.2 X 射线断层成像 (CT)	(142)
4.2.1 CT 的发展简史	(142)
4.2.2 锥束 CT(CBCT)	(146)
4.2.3 工业 CT	(147)
4.2.4 CT 图像重建算法	(148)
4.2.5 CT 图像的 FDK 重建算法	(155)
4.2.6 FDK 算法的 CUDA 实现	(158)
4.3 单光子发射计算机断层成像 (SPECT)	(164)
4.3.1 SPECT 的发展简史	(164)
4.3.2 SPECT 的优势	(165)
4.3.3 SPECT 的基本原理	(165)
4.3.4 SPECT 的基本结构	(167)
4.3.5 事件定位算法	(169)
4.3.6 SPECT 图像重建迭代算法	(174)
4.3.7 针孔 SPECT 成像概述	(190)
4.4 正电子发射断层扫描 (PET)	(194)
4.4.1 PET 的发展历史	(195)

4.4.2	PET 的优点及局限性	(196)
4.4.3	PET 的分辨率极限	(197)
4.4.4	PET 常用放射性核素及药物	(199)
4.4.5	PET 的图像重建	(200)
4.5	磁共振成像 (MRI)	(207)
4.5.1	磁共振成像简史	(207)
4.5.2	磁共振基本原理	(207)
4.5.3	磁共振扩散加权成像	(213)
4.5.4	磁共振扩散张量成像	(218)
4.5.5	磁共振波谱成像	(221)
	参考文献	(225)
第 5 章	PET/CT	(231)
5.1	引言	(231)
5.2	PET/CT 的优势	(233)
5.3	PET/CT 的组成及工程流程	(235)
5.4	PET/CT 的性能指标	(235)
5.5	PET/CT 的质量控制	(238)
5.5.1	测量目的和对测量系统的相应规定	(238)
5.5.2	空间分辨率测量	(240)
5.5.3	PET 系统对体模内散射事件的测试	(242)
5.5.4	灵敏度测试	(243)
5.5.5	计数丢失和随机测试	(244)
5.5.6	均匀性测试	(245)
5.5.7	散射校正精度测量	(245)
5.5.8	计数率精度校正测量	(246)
5.5.9	衰减校正测量	(247)
5.6	呼吸运动对 PET/CT 结果的影响	(248)
5.6.1	PET/CT 检查过程中的呼吸运动	(248)
5.6.2	四维 CT	(248)
5.6.3	呼吸门控	(250)
5.6.4	呼吸运动伪影校正算法	(250)
5.7	PET/CT 进展	(251)
5.7.1	PET/CT 中的 TOF 技术	(252)
5.7.2	PET/CT 的受体显像	(254)

5.7.3	PET/CT 的基因显像	(256)
5.7.4	高分辨率 PET	(258)
5.8	影响 PET/CT 图像质量的因素	(259)
5.8.1	信号采集时间、示踪剂剂量的影响	(259)
5.8.2	生理摄取的影响	(259)
5.8.3	金属植入物的影响	(260)
5.8.4	CT 对比剂的影响	(261)
5.8.5	截断伪影的影响	(261)
5.8.6	PET 示踪剂及血糖水平的影响	(262)
5.9	PET/CT 系统的辐射防护	(263)
	参考文献	(265)
第 6 章	PET/MRI	(267)
6.1	引言	(267)
6.2	PET/MRI 技术路线的基本思路及其应用优势	(268)
6.3	PET/MRI 的主要技术问题	(270)
6.3.1	PET 探头与 MRI 的兼容问题	(270)
6.3.2	PET 对 MRI 射频场的影响	(273)
6.3.3	涡流的影响	(274)
6.3.4	其他因素的影响	(274)
6.4	PET/MRI 系统中新的 MRI 成像方法	(275)
6.4.1	全身 MRI 扫描技术	(275)
6.4.2	全身 MRI 扩散加权成像与 PET 的比较	(276)
6.4.3	MRI 氧深度测量方法	(278)
6.5	PET 图像的衰减校正	(280)
6.5.1	PET/MRI 衰减校正研究进展	(280)
6.5.2	衰减校正中常用的 MRI 成像方法	(283)
6.6	PET/MRI 系统结构设计	(289)
6.6.1	分体式 PET/MRI	(289)
6.6.2	一体化 PET/MRI	(290)
6.6.3	一体化整合式 PET/MRI 的图像校正	(294)
6.7	TOF PET/MRI	(295)
6.7.1	TOF PET/MRI 的优势与应用前景	(295)
6.7.2	TOF PET/MRI 系统设计	(295)
6.8	PET/MRI 研制现状	(296)

6.9 PET/MRI 的主要问题	(299)
参考文献	(300)
第 7 章 SPECT/CT 与 SPECT/MRI	(303)
7.1 引言	(303)
7.2 SPECT/CT 与 PET/CT 设备的差异	(303)
7.3 SPECT/CT 设备简介	(304)
7.3.1 不同机架整合的 SPECT/CT	(304)
7.3.2 同一机架整合的 SPECT/CT	(305)
7.4 SPECT 探头扫描路径的优化设计	(305)
7.5 SPECT/CT 设备的进展	(307)
7.5.1 SPECT 探头的技术改进	(307)
7.5.2 SPECT/CT 系统中 CT 的技术改进	(308)
7.5.3 SPECT/CT 系统中影响 CT 辐射剂量的因素	(308)
7.5.4 降低 CT 辐射剂量的方法	(309)
7.5.5 影响 SPECT/CT 图像质量的硬件因素	(309)
7.6 SPECT 与 CT 的影像配准和融合	(311)
7.6.1 SPECT 和锥束 CT 融合的社会需要及其特点	(311)
7.6.2 SPECT 和锥束 CT 图像的配准和融合方法简介	(312)
7.6.3 算法实现及其结果评价	(312)
7.7 SPECT 分子成像概述	(320)
7.7.1 SPECT 与 PET 的比较	(320)
7.7.2 小动物 SPECT	(320)
7.8 多针孔 SPECT 成像原理	(322)
7.8.1 临床 SPECT 成像	(322)
7.8.2 多针孔 SPECT 成像	(323)
7.8.3 多针孔准直器优化设计新方法	(323)
7.9 小动物 SPECT/CT 系统	(329)
7.9.1 简介	(329)
7.9.2 针孔 SPECT 的系统校准	(329)
7.9.3 小动物 SPECT 系统软件及其应用	(331)
7.9.4 小动物 SPECT 的发展现状	(341)
7.10 SPECT/MRI	(341)
参考文献	(343)

第 8 章 分子和多模态医学影像时代的图像处理与分析	(345)
8.1 引言	(345)
8.2 医学影像的分割	(347)
8.2.1 基于主动轮廓法的分割技术	(349)
8.2.2 几何主动轮廓法	(354)
8.2.3 几何主动轮廓法的改进	(358)
8.2.4 几何主动轮廓法的水平集快速算法	(358)
8.3 医学图像的配准	(360)
8.3.1 医学图像配准的应用背景	(360)
8.3.2 医学图像配准方法概述	(361)
8.3.3 图像配准理论	(363)
8.3.4 基于金字塔分解的图像配准方法	(365)
8.3.5 基于轮廓特征的 SVD-ICP 配准方法	(367)
8.4 医学影像的融合	(375)
8.4.1 图像融合技术的发展状况	(376)
8.4.2 DOLP 金字塔与 ROLP 金字塔方法	(378)
8.4.3 基于小波金字塔的图像融合	(379)
8.5 医学影像的三维重建	(390)
8.5.1 常用三维重建算法	(390)
8.5.2 MC 重建算法	(391)
8.5.3 三维交互技术	(394)
8.6 CS 及 CUDA 在医学图像处理中的应用举例	(397)
8.6.1 基于 CUDA 加速 TV 最小化锥束 CT 图像重建	(397)
8.6.2 基于 CUDA 的快速行处理求解 DTI 超定线性方程组方法	(403)
参考文献	(407)