

磁共振成像

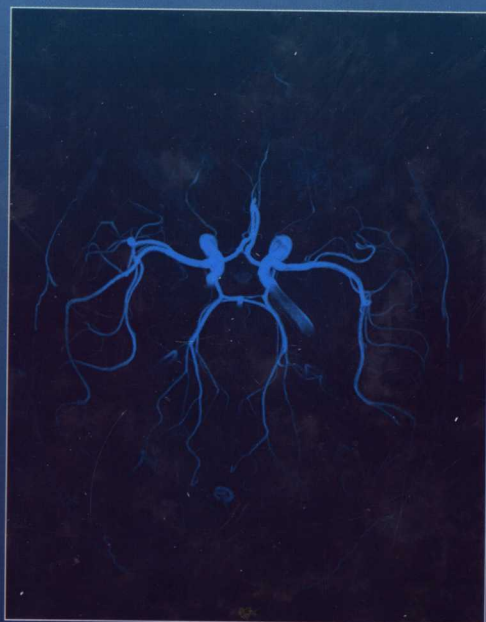
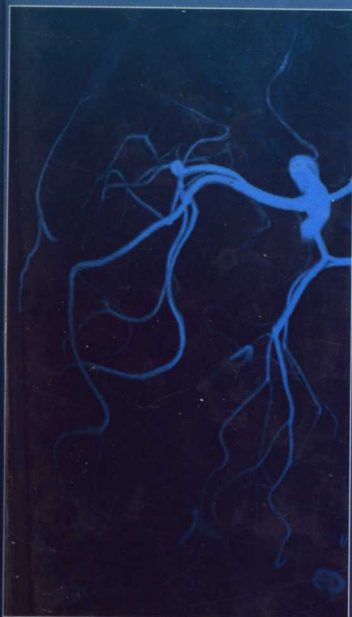
Magnetic Resonance Imaging

赵喜平 / 著



科学出版社

www.sciencep.com



磁共振成像

赵喜平 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部全面介绍磁共振成像系统的物理原理、工程原理、设备构成、成像技术、医学应用、生物效应、安全性和最新研究成果的学术著作。全书共八篇三十四章。第一篇为概述,介绍磁共振成像的发展史、评价、临床应用价值、最新进展和发展趋势;第二篇是物理原理,用5章的篇幅阐述核磁共振物理学、共振信号的产生及检测理论和图像重建理论;第三篇为成像设备的硬件基础,讨论磁性物理学、磁体、射频线圈及整机的构成和工作原理;第四篇和第五篇为本书的核心,分别介绍成像序列和特殊成像技术;第六篇是超导磁共振成像系统的工程原理,内容有低温物理学、超导电性简介和超导磁体的操作技术等;第七篇和第八篇分别叙述磁共振成像的质量控制和它与环境的相互关系。各种成像技术的临床应用则贯穿于全书的有关章节中。

本书内容丰富、理论严谨、图文并茂,反映了最新发展动态,是从事医学成像、医疗仪器、磁共振波谱和医学信息学研究的学者以及现代化医院里各类维修人员的必读书和工具书。同时,它可用做核磁共振、医学影像、生物医学工程及相近各专业学生的教科书或参考书,也可作为磁共振成像设备使用人员(影像医师、工程师和操作技师)上岗资格考试的教材或辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

磁共振成像/赵喜平著. —北京:科学出版社, 2004

ISBN 7-03-013302-1

I. 磁… II. 赵… III. 核磁共振-成像 IV. R445.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第041460号

责任编辑:马学海 李久进 / 责任校对:刘凤英

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:高海英

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2004年11月第一次印刷 印张:75 插页:1

印数:1—2 500 字数:1 725 000

定价:170.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)



作者简介

赵喜平，男，1956年生，甘肃省武山县人，汉族。1991年获第四军医大学医学硕士学位（生理学专业），后又获西安交通大学工学博士学位（生物医学工程专业）。2001年底至2003年5月赴加拿大国立研究院生物诊断研究所进行磁共振脑功能成像的合作研究。现为第四军医大学西京医院磁共振室高级工程师。

近年来先后在各种学术期刊上发表论文和学术讲座60余篇，编著百万字以上的磁共振成像专著两部、合作编著专著和主编教材各一部。是我国磁共振成像和磁共振工程界卓有建树的学者之一。(E-mail: xiping.zhao@163.net)

582-11-05

戴建平序

核磁共振(NMR)现象 1946 年由美国物理学家布洛赫(Felix Bloch)和珀塞尔(Edward Purcell)发现。早先它仅被用在化学分析中,后由于劳特伯(Paul Lauterbur)、曼斯菲尔德(Peter Mansfield)和达马迪安(Raymond Damadian)等学者的开拓性工作而使其进入医学成像领域,成为当今最重要的影像学手段之一。但是,直到 1980 年前后,磁共振成像装置方才商品化。随着国门的开放,中国的放射学家、医学物理学家和生物医学工程学家很快意识到了磁共振成像的潜在价值。于是,从 20 世纪 90 年代开始,我国陆续引进了 1.0T、1.5T、2.0T 和 3.0T 的磁共振成像设备,并逐步扩大了应用的广度和深度。这一方面,放射学家经历了一个更新知识、消化吸收和推广应用的过程。

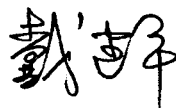
现在,大型医院已基本普及磁共振成像装置,不少中等医院或区县级医院也购置或正准备购置这一现代化影像设备。通过 10 多年的临床实践,医学影像学家已积累了丰富的诊断经验。总的来说,国内医学磁共振成像的临床应用开展较晚,对这一技术的研究和开发就更晚。但是,我国的磁共振成像目前已进入全面发展阶段:在临床应用方面,我们与发达国家的差距正在缩小;在设备制造方面,我们的磁共振产业已经起步。

磁共振成像是集多学科、多技术于一身的高科技产品。无论是新设备的研制、新技术的开发还是临床应用的拓展,都需要人们掌握足够的磁共振理论知识,并对机器的工作原理有所了解。因此,我们正面临两方面的任务:一是学好用好现有设备,使其充分发挥经济和社会效益;二是急起直追,发展自己的磁共振成像产业。这两个目标的实现,都有赖于磁共振成像从业或研究人员专业素质的提高。但是,近年来有关磁共振成像方法、疾病诊断的论文和书籍时有所见,但其中关于磁共振成像原理的描述过于简单,介绍磁共振成像设备最新功能、工作原理和发展动态的资料就更少。赵喜平博士的专著《磁共振成像系统的原理及其应用》曾填补国内这一领域的空白,出版后深受业界欢迎。相信这部《磁共振成像》的出版将更有利于我国医学磁共振成像事业的发展。

该书采用循序渐进和明晰的组织结构,从磁共振成像的发展历程入手,对核磁共振及其信号检测原理、成像原理、成像装置组成、成像技术及其医学应用、生物效应、磁共振成像系统与环境的的关系、场所设计、磁共振成像的最新动态和发展趋势等问题进行了详尽论述。书中对核磁共振物理基础和磁共振成像原理的阐述概念清楚、公式推导准确;对成像设备的工程原理(包括机器硬件系统和超导磁体知识)的介绍内容丰富而实用,充分体现作者渊博的知识;在介绍特殊成像即磁共振成像的其他医学应用时,作者在掌握大量文献资料的基础上,以文献综述形式描述了磁共振成像的前沿应用成果,读来颇受启发;书中用较多的篇幅罗列目前对静磁场、梯度磁场和射频磁场生物效应的研究成果,反映了医学设备以人为本、健康至上的设计理念。与国外的同类著作相比,该书具有医工结合、理论和实践结合、原理和应用结合的特点。论著能跟踪最新成像技术,并以应用为主线来组织材料,因而是一部新颖、系统、全面且文笔流畅的学术专著,值得医学影像从业人员以及生物医学工程等相关专业的学者一读。

该书编著者赵喜平先生既是医学硕士，又是工学博士，其知识结构使他有可能从物理原理和医学应用两个方面对磁共振成像进行深究。读其著作，这一点给人印象至深。更难能可贵的是，作为一名高级工程师，多年从事磁共振成像设备安装和维护工作的经历使作者掌握了大量的第一手资料并取得了丰富的工作经验，这在书中亦有所反映。对于这样一部长达 170 余万字的著述，没有超人的毅力、勤奋和执著的精神，是很难在短期内完成的。在此，我谨对赵博士表示衷心的祝贺！

相信在不远的将来，作者还会有更好的著作问世。



2003 年 9 月 11 日于北京

前 言

磁共振成像(MRI, magnetic resonance imaging)的物理基础为核磁共振(NMR, nuclear magnetic resonance)理论。所谓NMR,是指与物质磁性和磁场相关的共振现象。也可以说,它是低能量电磁波,即射频波与既有角动量又有磁矩的核系统在外磁场中相互作用所表现出的物理特性。利用这一现象不仅能研究物质的成分,还可观察其微观结构。据此,人们以各种射频脉冲序列对生物体进行激励,并用检测线圈记录组织的弛豫、质子密度、流动、化学位移、扩散、灌注、血液氧合状态和组织温度等信息,就出现了MRI技术。从NMR的发现到MRI装置的诞生,这中间经历了几代物理学家及医学家长达数十年的辛勤努力。核磁共振从波谱学实验发展到成像技术是一大飞跃。

MRI是核磁共振的重要应用领域。如今,液体磁共振、固体磁共振和MRI各自比较独立地发展着,形成了三足鼎立的局面。它们在理论上相互补充、在实验技术上彼此借鉴,共同繁荣了核磁共振学科。半个世纪中,核磁共振从物理研究到化学应用和生物应用、再到临床应用所走过的路程,是当今基础科学的发展推动社会进步最有说服力的例子。

随着超导技术、低温技术、磁体技术、电子技术、成像技术、图像处理技术和计算机科学技术的进步,MRI设备和成像法均取得了飞速发展。高场强超导短磁体、开放型磁体、高性能梯度、软线圈、相控阵线圈、多通道采集、并行成像以及计算机网络的应用,显示出MRI系统的硬件发展趋势。几年来先后出现的磁共振血管造影、心脏MRI、电影MRI、快速与超快速成像、功能成像(包括脑功能成像、扩散成像及灌注成像)、MRI导引的介入外科、热成像、弹性成像、微成像和扩散张量成像等,集中反映了MRI在医学应用方面的新成果。技术的进步,使其应用范围不断扩大;医学应用的深入,又对MRI产业提出了新要求,从而促使其进一步发展。MRI走过的正是这样一条良性循环的道路。如今,MRI已成为医学影像领域中最先进、最昂贵的诊断设备之一。

诺贝尔奖评委会于2003年10月6日下午在瑞典卡罗琳斯卡医学院宣布将当年的诺贝尔生理学或医学奖授予30年前对磁共振成像做出重要贡献的科学家。两位诺贝尔奖得主分别为美国化学家劳特伯(Paul Lauterbur,伊利诺伊大学厄巴拉分校,1929年5月6日生于美国俄亥俄州)和英国物理学家曼斯菲尔德(Peter Mansfield,诺丁汉大学物理和天文学院,1933年10月9日生于英国伦敦)。前者发明了梯度场,使磁共振成像技术逐渐走向成熟;后者则在成像方法上进行了开拓性研究并发明了回波平面成像技术,使得图像质量更好、成像过程更快。诺贝尔奖评委会在为此而发布的公告中将MRI的成就归结为如下几个方面:自诞生以来在医学领域获得了飞速发展;可对人体任何部位成像,但在脑和脊髓检查中具有特殊价值;由于可在三维空间内观察病变,使之成为重要的术前定位手段;有利于肿瘤的诊断、治疗和疗效追踪;可取代多种传统的创伤性造影方法,从而能减轻患者痛苦。

MRI是继X射线的发现(1901年获诺贝尔物理学奖)和X射线CT的发明(1979年

获诺贝尔生理学或医学奖)之后又一项取得诺贝尔奖殊荣的医学影像成果。这一科学界最高奖项的获得,充分肯定了MRI在人类医疗和保健活动中的巨大意义,也极大地鼓舞了这一领域的学者。它还预示着,21世纪的医学进展将主要取决于现代科学技术的进步。也就是说,与其他学科的交叉发展,是医学取得突破性成果的关键。正如19世纪末(1895年11月5日)伦琴发现X射线为20世纪的医学发展奠定了基础一样,21世纪的医学成就不仅仅依赖于医学家,更有赖于化学家、物理学家和计算机专家。

现在,全世界有两万余台、我国也有千余台磁共振成像设备正在人类疾病的诊断中发挥着无与伦比的作用。医学界普遍认为: MRI是20世纪医学诊断方面最重要的进展之一; MRI的潜力尚未完全发挥; 21世纪它仍将以一个新兴学科的面貌在工程技术及医学应用两个方面持续发展。MRI的采用,不仅代表医院现代化程度的高低,更重要的是标志其诊断水平的提高。

随着众多应用领域的开拓, MRI设备变得越来越复杂,技术含量也越来越高。各种新名词、新概念与日俱增。如果说MRI的进一步发展是对生产厂商的挑战,那么,在如何用好用足自己的MRI设备这一课题上,对用户的要求就更高。换句话说,未来的MRI将给操作人员提供更丰富的选择,但正确的选择有赖于良好的教育。美国放射技师注册管理处(ARRT, The American Registry of Radiologic Technologists)早在1993年就将MRI技师的培训问题提至议事日程。ARRT因此成为美国MRI技师管理和继续教育的法定组织。该组织认为,必须建立严格的教育和考试计划,以提高MRI从业人员的专业素质。在加拿大,位于温尼伯的红河学院正与加拿大研究院生物诊断研究所联手举办长达9个月的MRI技术员上岗培训班。我国卫生部对X射线CT、MRI装置等大型医疗装备使用人员的业务素质提出了更加严格的要求,并于1997年9月21日首次在全国举行了上述人员的上岗资格考试。由此看来, MRI使用人员的业务培训或继续教育已引起各国政府的广泛重视。

显然,无论是广大的诊断医师、操作技师、物理师、维修工程师,还是磁共振成像的研究人员,都急于掌握MRI的全面知识并了解该领域的最新发展动态。作者了解到,全国各大学或医学院数十个生物医学工程专业、医学影像学专业以及核磁共振专业的教师和学生也十分需要这方面的教科书。用“磁共振成像热”来形容出现在医学影像界的上述局面毫不夸张。这种形势进一步说明,在我国出版一本系统介绍磁共振成像的、具有理工和医工结合特色的专著刻不容缓。为此,作者从1997年开始编著《磁共振成像系统的原理及其应用》一书。令人欣慰的是,这本书2000年12月于科学出版社出版后在短短几个月内竟然销售一空,这就更加证实了上述判断的客观性。于是,作者义无反顾地决定在此基础上再编著一本有关磁共振成像方面的专著。

目前的这本著作不仅修正了原书中的谬误,而且增加了大量新内容、改写了近一半的章节,使总字数由原来的100万增至170余万。作者力图使其成为一部全面介绍医学MRI系统的物理基础、信号处理、设备构成、成像技术、医学应用、工程原理、生物效应、运行安全、场所设计和最新研究成果的学术专著,并尽可能体现更新颖、更系统、更富资料性、更易阅读的写作主旨。

本书共八篇三十四章,170余万字,包括621幅(组)插图。其内容按篇和章的层次加以组织。第一篇为概述,介绍磁共振成像的发展史、临床应用价值、最新进展和发展趋势;第二篇是物理原理,用五章的篇幅阐述核磁共振物理学、共振信号的产生及检测

方法、K 空间理论和图像重建理论；作为设备的硬件基础，第三篇讨论磁性物理学、磁体、射频线圈、梯度线圈的相关知识以及整机的构成和工作原理；第四篇和第五篇为本书的核心，集中介绍各种成像序列和磁共振的特殊成像领域；第六篇是超导磁共振成像系统的工程原理，内容有低温物理学、超导电性简介和超导磁体的操作技术等；第七篇和第八篇分别叙述磁共振成像的质量控制和它与环境的相互关系。各种成像技术的临床应用则贯穿于全书的有关章节中。八篇内容彼此独立，以便于不同读者选择性阅读。例如，对于影像科医生和 MRI 设备的操作人员，第四篇和第五篇为必读内容；对于图像处理 and 医学成像方面的学者，第二篇的内容更显重要；对于 MRI 设备的维修工程师，第二、六、七和八篇都是不可缺少的内容。书后还有五个附录。

磁共振成像是一门飞速发展的高新技术。因此，要掌握它的全部脉络实际上是困难的。从这一意义上说，书中难免存在挂一漏万和未尽人意之处。有些问题则是作者的知识范围所不能及的。作为磁共振成像领域的新兵，作者深知自己才疏学浅，因而恳切希望海内外专家和热心读者赐教。还应说明的是，鉴于书中引例浩繁，所引前辈学者论文及时贤著作中的成例未能一一注出（仅在各章末尾列出本章主要参考文献），现致歉于此，以示不敢掠美之意。

书稿的著述得到我国生物医学工程学科的创始人和奠基人、IEEE Fellow、博士生导师、西安交通大学生命科学院生物医学工程研究所蒋大宗教授的鼓励和支持。中华医学会放射学分会主任委员、《中华放射学杂志》总编、北京天坛医院院长戴建平教授欣然为本书作序。加拿大研究院生物诊断研究所的 Patrick Stroman 博士给作者以热情鼓励并提供部分参考资料。第四军医大学生物医学工程系的杨春智教授、物理学教研室主任杨吉庆教授和该教研室的多位老师、北京大学重离子物理研究所的俎栋林教授以及西安交通大学生物医学工程研究所的郑崇勋教授也审读了部分书稿，并对初稿提出过宝贵修改意见。宁波鑫高益磁材有限公司总裁高大建先生、总经理助理张宁先生；北京万东医疗装备有限公司总经理将达先生、总工程师王晓庆博士和磁共振事业部经理王为民博士；西门子迈迪特（深圳）磁共振有限公司总裁薛敏博士、市场部经理赵建林先生；沈阳东软集团副总裁郑全录教授、东软数字医疗系统有限公司磁共振事业部部长施金泉先生、技术总监秦松茂先生；加拿大研究院生物诊断研究所 David I. Hoult 研究员等均与作者进行过有益的探讨。丁新荣、吕娟两位女士在文稿录入方面给予大力帮助。陈莉女士绘制了部分插图。科学出版社的首席策划马学海博士也为本书的印行做了大量工作。

本书得到鑫高益磁材有限公司、西门子迈迪特磁共振有限公司和蓝港数网股份有限公司等企业的慷慨资助。

屈指一算，本书的策划、写作、编辑、绘图直至最后定稿正好耗费了三个春秋（包括已出版的那部分内容）。值此书稿出版之际，谨向各位老师、同道、友人以及给拙作以资助的公司和产业界的有识之士表示诚挚的谢意，也对长期理解和支持作者艰苦写作的家人表示敬佩。除此之外，我还要特别感谢带我步入磁共振成像之门的、并使我受益无穷的老师 and 朋友们！

赵喜平

2003 年 11 月 11 日于西安

目 录

戴建平序
前言

第一篇 概 述

第一章 磁共振成像的发展史	(3)
第一节 核磁共振的发现和应 用	(3)
一、核自旋与核磁矩的发现	(3)
二、分子束核磁共振现象的发现	(5)
三、凝聚态物质核磁共振现象的发现	(6)
第二节 核磁共振的射频激发和自旋回波的发现	(11)
第三节 化学位移的发现及核磁共振波谱学	(12)
一、化学位移现象的发现	(12)
二、磁共振波谱学及其发展	(13)
第四节 傅里叶变换法及二维法的产生	(17)
一、厄恩斯特对傅里叶变换法的贡献	(18)
二、二维成像法和二维波谱法的产生	(19)
三、出生于苏黎世的又一位诺贝尔奖得主	(19)
第五节 磁共振成像的发生与发展	(20)
一、磁共振成像的萌芽期	(20)
二、磁共振成像的成熟期	(22)
三、磁共振成像的发展期	(35)
四、磁共振成像的命名	(38)
五、早期的临床应用成果	(39)
六、磁共振成像的推广	(42)
七、磁共振成像大事记	(44)
第六节 核磁共振的学术团体及其学术交流史	(45)
一、AMPERE 和 BRSG	(45)
二、戈登磁共振会议	(46)
三、实验核磁共振大会	(46)
四、英国 NMR 讨论组织	(47)
五、生物系统中的磁共振国际大会	(47)
六、国际磁共振学会和国际磁共振大会	(48)
七、英国生物系统中的磁共振讨论会	(49)
八、国际医学磁共振学会和国际医学磁共振大会	(49)

九、我国的磁共振学术会议·····	(50)
第七节 我国磁共振成像的临床应用和开发研究·····	(50)
一、萌芽探索期·····	(50)
二、全面发展期·····	(51)
三、磁共振成像产业的起步和发展·····	(52)
主要参考文献·····	(54)
第二章 磁共振成像的评价 ·····	(56)
第一节 磁共振成像的特点·····	(56)
一、多参数成像·····	(56)
二、高对比度成像·····	(57)
三、任意方位断层·····	(57)
四、人体能量代谢评估·····	(57)
五、心血管系统成像不需造影剂·····	(58)
六、无电离辐射·····	(59)
七、无骨伪影干扰·····	(59)
第二节 磁共振成像的局限性·····	(60)
一、成像速度慢·····	(60)
二、对钙化灶和骨皮质病灶不够敏感·····	(60)
三、图像易受多种伪影干扰·····	(61)
四、禁忌证多·····	(61)
五、定量诊断困难·····	(61)
六、设备庞大复杂·····	(61)
第三节 磁共振成像与 X 射线 CT 的比较·····	(61)
主要参考文献·····	(63)
第三章 磁共振技术的医学应用 ·····	(64)
第一节 从 X 射线到磁共振成像·····	(64)
第二节 磁共振波谱的医学应用·····	(66)
一、在体波谱学·····	(66)
二、磁共振波谱的医学应用·····	(67)
第三节 组织的磁共振图像特点·····	(69)
一、 T_1 加权像的信号产生机制·····	(69)
二、正常组织的图像特点·····	(70)
三、病理组织的图像特点·····	(72)
第四节 磁共振成像的医学应用·····	(75)
一、概况·····	(76)
二、颅脑和颈部·····	(77)
三、脊柱·····	(78)
四、胸和纵隔·····	(79)
五、腹部·····	(79)

六、盆腔·····	(80)
七、乳腺·····	(81)
八、四肢、肌肉和骨骼·····	(82)
九、胎儿和小儿·····	(83)
十、血管成像·····	(83)
十一、心脏成像·····	(84)
十二、扩散成像·····	(85)
十三、灌注成像·····	(85)
十四、脑功能成像·····	(86)
十五、介入治疗的导引·····	(86)
主要参考文献·····	(86)
第四章 磁共振成像的进展及其发展趋势 ·····	(88)
第一节 磁共振成像设备的进展 ·····	(88)
一、主磁体的四个变化特点·····	(88)
二、高性能的梯度子系统·····	(93)
三、高效线圈、信号采集的数字化和多通道化·····	(97)
四、从四肢和乳腺专用机到头和心脏专用系统的涌现·····	(98)
五、移动床的 MRI·····	(99)
六、MRI 系统的环保理念·····	(99)
七、MRI 系统的人性化设计·····	(100)
八、对计算机的要求及其网络化趋势·····	(100)
第二节 磁共振成像技术的进展 ·····	(101)
一、快速和超快速扫描·····	(102)
二、心脏检查的若干进展·····	(104)
三、血管成像·····	(106)
四、功能成像·····	(108)
五、水成像·····	(109)
六、介入治疗中的 MRI·····	(109)
七、实时交互式成像·····	(112)
第三节 岗位培训及考核 ·····	(112)
第四节 磁共振成像的展望 ·····	(113)
一、MRI 系统的价格将大幅度下降·····	(113)
二、MRI 系统的装机量将持续增长·····	(113)
三、高场和超高场系统将占据市场主流·····	(114)
四、中、低场的机器还会继续发挥临床作用·····	(114)
五、新的“一体化”机及其发展·····	(115)
六、MRI 设备的“多样化”·····	(115)
七、更加人性化的外观及结构设计·····	(116)
八、新型造影剂将发挥更大作用·····	(116)

九、MRI 系统与其他医学影像设备的融合	(117)
十、磁共振技术的医学应用还将扩大	(118)
主要参考文献	(118)

第二篇 磁共振成像原理

第五章 核磁共振及其物理学	(123)
第一节 进动、磁矩与电磁波	(123)
一、转动和进动	(123)
二、磁场和磁矩	(125)
三、电磁场和电磁辐射	(126)
第二节 原子核的自旋与磁矩	(129)
一、原子核的一般特性	(129)
二、微观粒子的磁矩及其量子力学表达	(130)
三、核外电子的磁矩	(130)
四、原子核的自旋与磁矩	(131)
五、原子的磁矩	(134)
第三节 静磁场中的自旋核	(134)
一、自旋角动量的空间量子化	(134)
二、核磁矩的空间量子化	(135)
三、核磁矩在磁场中的能量和塞曼效应	(136)
四、自旋核在静磁场中的进动	(138)
第四节 核磁共振现象和共振条件	(140)
一、概述	(140)
二、NMR 的经典力学原理	(141)
三、NMR 的量子力学描述	(143)
四、NMR 的经典力学和量子力学模型	(144)
五、关于 NMR 条件的讨论	(145)
第五节 核磁共振的宏观描述	(146)
一、自旋核的能级分布——玻尔兹曼分布	(147)
二、静磁化强度矢量	(149)
三、磁化强度矢量 M 的激发和章动	(153)
第六节 饱和现象	(155)
主要参考文献	(157)
第六章 弛豫和共振信号的产生	(158)
第一节 弛豫和弛豫时间	(158)
一、弛豫的物理意义	(158)
二、弛豫的分类	(158)
三、弛豫时间	(159)
第二节 磁化强度矢量 M 的弛豫过程	(161)

第三节 关于弛豫和弛豫时间的讨论	(164)
一、弛豫开始的时间问题	(164)
二、 T_1 、 T_2 的场强依赖性 or 频率依赖性	(164)
三、固体和液体的不同弛豫	(167)
四、纵向弛豫率和横向弛豫率	(168)
五、 T_2 与 T_2^* 的关系	(169)
六、弛豫的温度依赖性	(170)
第四节 弛豫的生物学意义	(170)
一、人体组织中的水及其弛豫特性	(170)
二、人体组织中其他成分的弛豫特性	(172)
三、弛豫的生物学机制	(173)
四、组织弛豫的决定因素	(176)
第五节 布洛赫方程及其应用	(177)
一、固定坐标系中的布洛赫方程	(177)
二、旋转坐标系中的布洛赫方程	(178)
三、布洛赫方程的稳态解及其讨论	(180)
四、布洛赫方程应用举例	(184)
第六节 自由感应衰减及其信号检测	(186)
一、自由感应衰减信号	(186)
二、动态磁化率	(190)
三、自由感应衰减信号的检测	(192)
主要参考文献	(193)
第七章 傅里叶变换及 K 空间	(195)
第一节 傅里叶变换简介	(195)
一、傅里叶级数与傅里叶变换	(195)
二、MRI 中常用的傅里叶变换对	(196)
三、傅里叶变换的波形分析法	(198)
第二节 傅里叶成像和 K 空间	(201)
一、K 空间的定义	(201)
二、一维傅里叶成像和 K 空间	(202)
三、多维傅里叶成像和 K 空间	(204)
四、K 空间的填充	(205)
第三节 K 空间的特性	(208)
一、K 空间与最终图像的关系	(209)
二、K 空间与图像质量的关系	(209)
三、K 空间大小与图像分辨率的关系	(211)
四、K 空间与 FOV 的关系	(212)
五、K 空间的对称性	(213)
第四节 线性 K 空间的应用	(214)

一、中央序 K 空间	(214)
二、部分傅里叶技术	(214)
三、半傅里叶技术	(215)
四、部分回波技术	(216)
五、长方形 FOV 成像	(218)
六、钥孔成像	(219)
七、运动补偿	(220)
第五节 K 空间的非线性填充及其应用	(222)
一、K 空间的辐射状填充	(222)
二、K 空间的螺旋填充	(230)
第六节 三维 K 轨迹简介	(235)
主要参考文献	(238)
第八章 磁共振信号的采集和图像重建	(240)
第一节 概述	(240)
第二节 磁共振信号的采集和傅里叶重建	(241)
一、无限采样	(241)
二、无限采样的奈奎斯特标准	(243)
三、有限采样	(245)
四、质子密度的重建	(246)
五、离散和截断采样的空间分辨率	(248)
六、截断采样的离散傅里叶变换	(249)
第三节 傅里叶变换图像重建中的滤波和分辨率	(250)
一、滤波器和点扩散函数	(250)
二、MRI 的空间分辨率	(252)
第四节 部分傅里叶成像及其图像重建	(253)
一、部分傅里叶成像 K 空间的非对称特性	(254)
二、非对称回波的图像重建	(255)
三、复数质子密度的图像重建	(256)
四、迭代重建法	(256)
五、多维 K 空间的共轭对称和图像重建	(258)
第五节 螺旋采集的投影重建	(259)
一、投影和 Radon 变换	(259)
二、螺旋采集数据的投影重建法	(261)
主要参考文献	(267)
第九章 磁共振成像原理	(268)
第一节 磁共振图像的品质因素	(268)
一、组织体素和像素	(268)
二、灰度和对比度	(270)
三、信噪比	(271)

四、空间分辨率·····	(274)
五、图像的显示及窗口技术·····	(275)
第二节 梯度场及其应用·····	(277)
一、问题的提出·····	(277)
二、MRI 系统的坐标系·····	(277)
三、梯度场及其作用原理·····	(278)
第三节 磁共振成像法·····	(282)
一、成像法及其分类·····	(283)
二、点成像法·····	(283)
三、线成像法·····	(284)
四、面成像法·····	(286)
五、多层面及三维体积成像·····	(288)
六、关于成像方法的讨论·····	(288)
第四节 磁共振成像的空间定位·····	(289)
一、层面选择·····	(289)
二、平面内信号的定位·····	(293)
三、梯度周期与成像时序·····	(298)
四、图像重建·····	(299)
第五节 梯度脉冲的相位效应·····	(300)
一、梯度脉冲的相位效应·····	(300)
二、射频脉冲和梯度场对相位的共同影响·····	(301)
三、选层梯度与进动相位的关系·····	(302)
四、读出梯度与进动相位的关系·····	(304)
五、相位编码梯度与进动相位的关系·····	(305)
主要参考文献·····	(307)

第三篇 磁共振成像设备

第十章 磁性物理学·····	(311)
第一节 基本磁现象·····	(311)
一、磁学和磁铁·····	(311)
二、基本磁现象·····	(312)
三、磁场和电场的联系与区别·····	(313)
第二节 磁介质和磁感应强度·····	(314)
一、磁介质·····	(314)
二、磁感应强度·····	(315)
三、静磁场和均匀磁场·····	(316)
四、磁化强度和磁化率·····	(316)
五、铁磁质及其特性·····	(317)
第三节 电流的磁场·····	(320)

一、电流元·····	(320)
二、直线电流的磁场·····	(321)
三、环形电流的磁场·····	(322)
四、直螺线管电流内部的磁场·····	(323)
第四节 磁体及其分类·····	(325)
一、磁体·····	(325)
二、磁体的分类·····	(326)
主要参考文献·····	(329)
第十一章 磁共振成像设备 ·····	(330)
第一节 磁共振成像系统的组成·····	(330)
第二节 磁体子系统·····	(331)
一、磁体的性能指标·····	(331)
二、成像用磁体的分类·····	(334)
三、磁体系统的组成·····	(339)
第三节 梯度子系统·····	(339)
一、梯度磁场的性能·····	(340)
二、梯度子系统的组成·····	(340)
三、梯度线圈·····	(341)
四、梯度控制器和数模转换器·····	(342)
五、梯度放大器·····	(343)
六、梯度冷却系统·····	(344)
七、涡流的影响和补偿·····	(344)
第四节 射频子系统·····	(345)
一、射频脉冲·····	(345)
二、射频线圈·····	(346)
三、射频脉冲发射单元·····	(350)
四、射频信号接收单元·····	(351)
第五节 信号采集和图像重建子系统·····	(355)
一、采样和采样保持·····	(355)
二、量化和量化误差·····	(358)
三、信号采集单元的组成·····	(358)
四、数据处理和图像重建·····	(359)
第六节 主计算机和图像显示子系统·····	(361)
一、主计算机及其功能·····	(361)
二、主计算机系统的组成·····	(362)
三、主计算机系统中运行的软件·····	(367)
四、图像显示·····	(369)
第七节 生理信号检测及控制子系统·····	(374)
主要参考文献·····	(375)