

赵喜平 编著

Principle, Equipment and Applications of
Magnetic Resonance Imaging

磁共振成像系统 的原理及其应用



科学出版社
SCIENCE PRESS

113073

磁共振成像系统的 原理及其应用

赵喜平 编著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书是国内第一部全面介绍医学磁共振成像及工程原理的学术专著,全书共 22 章,内容可分为物理原理、工程原理(包括低温技术)、成像技术、生物效应、磁共振成像设备与环境的关系、磁共振成像的进展及其发展趋势等六大部分,各种成像技术的医学应用则贯穿于全书的有关章节中。

本书是从事医疗仪器、医学成像、磁共振波谱研究的学者以及现代化医院里各种维修人员的必读书,亦可作为核磁共振、生物医学工程、医学物理及相近各专业本科生和研究生的教科书,将它作为磁共振成像设备使用人员(工程师、影像医师、操作技师)的培训教材也是适宜的。

图书在版编目(CIP)数据

磁共振成像系统的原理及其应用/赵喜平编著. -北京:科学出版社,2000.12
ISBN 7-03-008553-1

I. 磁… II. 赵… III. 磁共振-成像 IV. R445.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 61450 号

2000/12 17

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 12 月第 一 版 开本:787 × 1092 1/16
2000 年 12 月第一次印刷 印张:44
印数:1—2 000 字数:1 000 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(杨中))

蒋大宗先生序

医学成像是生物医学工程学科的重要研究领域,包括近年来发展起来的 X 射线计算机断层成像(X 射线 CT)、磁共振成像、核医学成像和超声成像等方面.随着低温技术、超导技术、磁体技术、电子技术和计算机技术等相关技术的进步,磁共振成像得到了飞速发展.如今,磁共振成像系统已成为现代医学影像领域中最先进、最昂贵的诊断设备之一,其成像速度也从开始时 30 min 一个序列的自旋回波成像发展到数十毫秒一幅图像的回波平面成像.磁共振一词已经家喻户晓.专家们预测,磁共振成像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和医学诊断两个方面持续发展.

核磁共振现象最早由美国理论物理学家布洛赫(Felix Bloch,斯坦福大学)和珀塞尔(Edward Purcell,哈佛大学)发现,后又由达马迪安(Raymond Damadian,纽约州立大学)和劳特伯(Paul Lauterbur,纽约州立大学)等学者用于医学成像.到 1980 年前后,国际上磁共振成像装置方才实现商品化.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意识到了磁共振成像的潜在价值,他们面临着更新知识、消化吸收和推广应用的重任.

从 20 世纪 90 年代开始,我国陆续引进了 1.0T、1.5T,以至 2.0T 的磁共振成像设备,并逐步将应用范围扩展至磁共振血管造影和配合 γ 刀治疗的立体定位等领域.由此看来,我国医学磁共振成像的临床应用开展较晚,对这一技术的研究开始得更晚.但是,目前我国的磁共振成像已进入全面发展阶段,尤其在临床应用方面,我们与发达国家的差距正在缩小.

磁共振成像系统是集多学科、多技术于一身的高科技产品.无论是新产品的研制、新技术的开发,还是临床应用的拓展,都需要人们掌握一定的磁共振理论知识,并对机器的工作原理有所了解.我们面临的任务,一方面是学好用好现有设备,使其充分发挥经济效益;另一方面是急起直追,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人员或研究人员专业素质的提高.然而,国内至今没有一本全面、系统地阐述磁共振成像理论及工程技术的专著,赵喜平博士的著作《磁共振成像系统的原理及其应用》填补了这一空白.

作为该书的审稿人,我有幸阅读了这部巨著的主要内容.书的前面几章详细论述了核磁共振的物理基础和磁共振成像原理,其物理概念清晰、公式推导准确;中间几章阐明了磁共振成像系统的工程原理,包括机器硬件系统和超导磁体的有关知识,内容新颖而丰富,充分显示了作者渊博的知识积累;在后面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之上,以文献综述的形式描述了磁共振成像的前沿应用成果,读来颇受启发.磁共振脑功能成像是目前国际上最热门的研究领域,本书结合作者的博士论文课题,亦对其原理、研究方法和应用领域进行了讨论.

与国外的同类著作相比,该书具有如下特点:

(1) 医工结合:本书在系统阐述各种磁共振成像技术时,均用相当的篇幅讨论该技术

的临床应用价值、综述已取得的研究成果,使之具有明显的医工结合特色,从而更符合磁共振成像研究人员、工程技术人员和临床医师等各类读者的需要.与那些只强调图像表现的关于磁共振影像诊断的图谱类书籍相比,它能使读者不仅知其然,而且知其所以然.

(2) 理论和工程技术相结合:该书不仅用相当的篇幅介绍核磁共振、磁共振成像等基本理论,又充分讨论了国外同类书籍很少涉及的工程技术问题,如超导电性、低温热力学、低温操作技术、线圈技术和超导磁体的匀场操作技术等.对于机器硬件系统的描述,是迄今为止最为系统和详尽的.

(3) 原理和应用相结合:在阐述各种磁共振成像技术之原理的同时,该书还列举了大量实例,以说明其应用价值,如快速成像序列和脑功能成像等.因此,该书关于磁共振成像的医学应用实际上是贯穿全书的.这种体系结构,不仅符合磁共振成像研究人员和工程技术人员的阅读习惯,而且也是医学影像医生感兴趣的.

(4) 采用了循序渐进、逐层深入的体系结构:在内容安排上,该书采用先理论、硬件和成像技术,后应用和工程技术的描述体系,具有明显的逐层深入特点.这样,就使这本书更适合于不同层次或具不同需求的读者.例如,初读时可有选择地略去某些章节,需深入研究时再阅读利用之.

(5) 跟踪最新发展动态:磁共振成像是一门高速发展的技术.该书作者在阅读数百篇最新参考文献的基础之上,采用大型文献综述的形式介绍各种成像技术,令人耳目一新.此外,该书最后一章还对磁共振成像的发展趋势进行了预测.

(6) 内容翔实而丰富:书中除讲述磁共振成像的原理和应用之外,还收集了大量数据并绘制了数百幅插图,使之成为一本大型工具书.作为附录,作者还精心编撰了磁共振成像常用词汇,介绍了对核磁共振做出贡献的14位诺贝尔奖得主,这更增加了著作的资料性.

综上所述,该书是一本新颖、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.毫无疑问,它的出版将有利于我国医学磁共振成像事业.

凭作者的勤奋和求实精神,相信他在不久的将来还会有更好的著作问世.



1999年8月于西安交通大学

范焱先生序

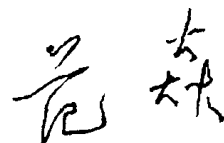
在我国的大型医院中,磁共振成像装置已基本普及,不少中型医院也购置了这一现代化影像设备.通过 10 多年的临床应用,我国医学影像学家已积累了丰富的诊断经验.近年来,有关磁共振成像扫描方法、疾病诊断的论文和书籍时有所见,但其中关于磁共振成像原理的描述过于简单,介绍磁共振成像设备最新功能、工作原理和发展动态的资料就更少.

在生物医学工程领域,每一项新技术的开发和应用,离不开医学家、医学物理学家和生物医学工程工作者的共同努力.磁共振成像技术的发展和应用就充分证明了这一点.随着新千年的到来,磁共振成像这一高新技术将吸引更多的有识之士.

该书主编赵喜平既是医学硕士,又是工学博士,这种知识结构使他无论对磁共振成像的物理原理还是医学应用,都有可能进行深入的研究.近年来,他先后在各种杂志上发表数十篇有关磁共振成像的学术论文.赵喜平博士还在国内较早地开展了磁共振脑功能成像的探索,其中“针刺的脑功能成像”是具有世界水平的研究课题.此外,作为一名工程师,作者多年从事磁共振成像设备的安装和维护工作,掌握了大量的第一手资料并取得了丰富的工作经验,使之成为目前国内比较有造诣的磁共振成像及磁共振工程专家之一.

该书采用循序渐进的结构,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、磁共振成像原理、磁共振成像装置组成、各种成像技术及其医学应用、磁共振成像的生物效应、磁共振成像系统与环境的关系、磁共振成像的发展趋势等问题进行了详尽论述,并在最后综述了这一领域的最新发展动态.全书学术观点准确、物理概念明晰、内容丰富、文笔流畅,故值得一读.

该书不仅是从事磁共振成像系统开发、研究、维修和应用人员的必读书,也是影像科医生、医疗仪器和医学成像研究人员的重要参考资料.将它作为生物医学工程及其相近专业的教科书也是适宜的.



1999 年 8 月于北京

前 言

磁共振成像(MRI, magnetic resonance imaging)是根据生物体磁性核(氢核)在静磁场中所表现出的共振特性进行成像的高新技术.它的物理基础为核磁共振理论,其本质是一种能级间跃迁的量子效应.实验结果表明,利用核磁共振现象可以研究物质的微观结构.据此,人们以不同的射频脉冲序列对生物组织进行激励,并用线圈技术检测其弛豫或质子密度信息,就出现了 MRI.

由此可见, 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.核磁共振从波谱学实验发展到成像技术是一大飞跃.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之一.

近 20 年来,随着超导技术、磁体技术、低温技术、电子技术和计算机科学等相关技术的进步,磁共振成像技术及磁共振成像设备均得到了飞速发展.如今, MRI 系统已成为现代医学影像领域中最先进、最昂贵的诊断设备,并广泛应用于临床. 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.现在,全世界有数千台,我国也有 400 台以上的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.值得指出的是,1990 年以来,全球 MRI 系统的年销量一直稳定在千台左右,这一数字足以证明它的强大生命力.

高性能梯度、开放型磁体或几乎不消耗液氢的超导磁体、软线圈、相控阵线圈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、功能成像和介入 MRI 等技术,给人以日新月异之感.技术的进步,使其应用范围不断扩大,它在医学诊断中所起的作用也愈加重要.与此同时,医学应用的深入,又对 MRI 的发展提出了更高要求,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.

与 X 射线 CT 相比,磁共振成像具有分辨率高、成像参数多、可任意层面断层、对人体无电离辐射损伤即无创无损等优点.它不仅能提供人体的解剖图像,还可反映人体组织的生理生化信息.因此,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诊断学两个方面持续发展.

遗憾的是,目前国内已有的 MRI 装置以进口产品为主.高场的超导磁共振成像设备更是国外几家大公司的一统天下.这些设备不仅造价昂贵,维护费用也高得惊人.为此,深圳安科公司、沈阳东大阿尔派等企业已经或着手生产我国自己的磁共振成像设备.专家们呼吁,必须启动或扶持我国的磁共振成像产业,并尽快培养自己的研究人员和维修工程师.另一方面,除了工程师之外,现在发达国家的磁共振成像中心均有物理师常年进行新

成像序列的研究和开发.作为促进 MRI 应用的经验之一,我国也应建立这一机制.

除此之外,随着各种快速成像方法的问世和众多应用领域的开拓,MRI 设备变得越来越复杂,其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家的挑战,那么,在如何用好自己的 MRI 设备这一课题上,又给用户提出了更高的要求.换句话说,未来的 MRI 将给操作人员提供更加丰富的选择,但正确的选择有赖于良好的教育.在这种情况下,美国放射技师注册管理处(ARRT, the American Registry of Radiologic Technologists)于 1993 年首先将 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 工作人员的专业素质.

我国卫生部也对 X 射线 CT、MRI 装置等大型医疗设备使用人员的业务素质提出了严格要求,并于 1997 年 9 月 21 日首次在全国进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是一项长期的任务.

在这种情景下,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或设备制造商,都急于掌握 MRI 的物理原理及其工程原理,了解该领域的最新发展动态.用“磁共振成像热”一词来形容出现在医学影像界的上述局面毫不夸张.然而,国内目前还没有一本比较全面、系统地介绍磁共振成像系统物理基础和工程技术的书.我们了解到,全国各大学数十个生物医学工程专业以及核磁共振专业的学生也十分需要这方面的教科书.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、具有理工和医学结合特色的书刻不容缓.于是,我们决定编著这本书.

在本书的编著过程中,为了深入浅出地介绍 MRI 的物理原理,我们引用了理论物理学、量子力学和电磁学的有关理论;在工程原理的论述中,则主要参考了有关超导物理、低温物理、热力学以及电磁场的有关内容.本书在介绍各种成像技术、医学应用和发展趋势的过程中,还参考了 300 余篇有关磁共振成像的文献.磁共振脑功能成像是目前 MRI 研究的前沿课题和热门课题.书中这方面的内容结合了编著者本人博士论文的部分研究成果.

本书是国内第一部全面介绍医学磁共振成像系统的物理基础、工程原理、成像技术、医学应用、生物效应及其历史、现状和发展趋势的学术专著.全书共 22 章,约 100 万字(包括 394 幅插图).其内容可分为下述六大部分.首先,作为开篇,我们在概述部分介绍磁共振成像的发展史、特点和临床应用价值;第二部分为物理原理,主要阐述磁共振成像的物理基础、图像重建法以及各种成像技术(包括快速成像技术);第三部分是工程原理,内容有低温物理、超导电性、超导磁体、线圈技术、磁共振成像系统组成和运行环境等;第四部分阐述各种特殊成像技术,如脑功能成像和增强成像(使用磁共振对比度增强剂)等;第五部分讨论生物效应和安全性等方面的内容;最后综述 MRI 的最新进展及其发展趋势.各种成像技术的应用则贯穿于全书的有关章节中.

磁共振成像是一门飞速发展的高新技术.因此,要掌握它的全部信息实际上是不可能的.从这一意义上说,书中难免存在挂一漏万之处.有些问题则是作者的知识范围所不能及的.作为磁共振成像方面的新兵,我们深知自己才疏学浅,因而恳切希望海内外专家赐教.除种种遗漏之外,在此我们对书中可能出现的失误也表示遗憾.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、西安交通大学生物医学工程研究所蒋大宗教授的鼓励和支持。先生不辞高龄，在百忙中审阅了大部分书稿，并亲自为之作序，其奖掖后进的精神令人钦佩。书稿选题的确立、大纲的拟定、各章节次序的安排以及书名的最后确定等方面都凝聚着蒋先生的心血。医学影像技术界的老前辈范焱先生也欣然为本书作序。第四军医大学生物医学工程系的杨春智教授、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所长郑崇勋教授也审读了部分书稿，并对初稿提出宝贵的修改意见。北京天坛医院的高培毅教授、西安华海电子有限公司总经理张孝林先生和西门子公司的陈雁宾先生均为拙作的出版提供了方便。丁新荣、吕娟两位女士在文稿的录入方面给予大力帮助。陈莉女士绘制了部分插图。科学出版社的丁海珈编辑也为本书的出版做了大量工作。此外，没有西安华海电子有限公司和西门子公司的慷慨资助，此书也是很难面世的。值此书稿出版之际，谨向上述各位老师、友人和公司表示诚挚的谢意。

如果作者能对我国磁共振成像的发展做出贡献，我们将感到非常荣幸。

赵喜平

1999年8月8日于第四军医大学西京医院

目 录

蒋大宗先生序

范焱先生序

前言

第一章 概述	(1)
第一节 核磁共振的发现和应用	(1)
第二节 磁共振成像的发展历程	(4)
一、磁共振成像的发展	(4)
二、磁共振成像的命名	(10)
三、早期的临床应用成果	(10)
第三节 我国磁共振成像的临床应用和开发研究	(12)
第四节 磁共振成像的评价	(13)
一、磁共振成像的特点	(13)
二、磁共振成像的局限性	(16)
三、磁共振成像与 CT 的比较	(17)
参考文献	(19)
第二章 核磁共振及其物理学	(20)
第一节 进动、磁矩与电磁波	(20)
一、转动和进动	(20)
二、磁场和磁矩	(22)
三、电磁场和电磁辐射	(23)
第二节 原子核的自旋与磁矩	(26)
一、原子核的一般特性	(26)
二、微观粒子的磁矩及其量子力学表达	(27)
三、核外电子的磁矩	(27)
四、原子核的自旋与磁矩	(28)
五、原子的磁矩	(31)
第三节 静磁场中的自旋核	(31)
一、自旋角动量的空间量子化	(32)
二、核磁矩的空间量子化	(32)
三、核磁矩在磁场中的能量和塞曼效应	(33)
四、自旋核在静磁场中的进动	(35)
第四节 核磁共振现象和共振条件	(38)
一、概述	(38)
二、NMR 的经典力学原理	(38)

三、NMR 的量子力学描述	(41)
四、NMR 的经典力学和量子力学模型	(41)
五、关于 NMR 条件的讨论	(42)
第五节 核磁共振的宏观描述	(44)
一、自旋核的能级分布——玻尔兹曼分布	(44)
二、静磁化强度矢量	(46)
三、磁化强度矢量 M 的激发和章动	(51)
第六节 饱和现象	(53)
第七节 化学位移	(55)
一、化学位移的来源	(55)
二、化学位移的表达	(56)
三、标准物质的选择	(58)
四、化学位移与磁共振成像的关系	(58)
参考文献	(58)
第三章 弛豫和共振信号的检测	(60)
第一节 弛豫和弛豫时间	(60)
一、弛豫的物理意义	(60)
二、弛豫的分类	(60)
三、弛豫时间	(61)
第二节 磁化强度矢量 M 的弛豫过程	(63)
第三节 关于弛豫和弛豫时间的讨论	(67)
一、弛豫开始的时间问题	(67)
二、 T_1 , T_2 的场强依赖性 or 频率依赖性	(67)
三、固体和液体的不同弛豫	(69)
四、纵向弛豫率和横向弛豫率	(70)
五、 T_2 与 T_2^* 的关系	(71)
六、弛豫的温度依赖性	(72)
第四节 弛豫的生物学意义	(72)
一、人体组织中的水及其弛豫特性	(73)
二、人体组织中其他成分的弛豫特性	(74)
三、弛豫的生物学机制	(75)
四、组织弛豫的决定因素	(78)
第五节 布洛赫方程及其应用	(79)
一、固定坐标系中的布洛赫方程	(79)
二、旋转坐标系中的布洛赫方程	(81)
三、布洛赫方程的稳态解及其讨论	(83)
四、布洛赫方程的应用举例	(87)
第六节 自由感应衰减及其信号检测	(89)
一、自由感应衰减信号	(90)

二、动态磁化率	(93)
三、自由感应衰减信号的检测	(95)
第七节 磁性核的特性	(97)
一、磁性核与非磁性核	(97)
二、原子核的磁化和顺磁磁化率	(98)
三、医用磁性核的有关特性	(98)
四、NMR 信号强度及其影响因素	(100)
参考文献	(100)
第四章 磁共振成像原理	(102)
第一节 磁共振图像的品质因素	(102)
一、组织体素和像素	(102)
二、灰度和对比度	(103)
三、信噪比	(105)
四、空间分辨率	(108)
五、图像的显示及窗口技术	(109)
第二节 傅里叶变换及梯度场	(110)
一、问题的提出	(110)
二、傅里叶变换简介	(111)
三、MRI 系统的坐标系	(117)
四、梯度场及其作用原理	(117)
第三节 磁共振成像法	(122)
一、成像法及其分类	(122)
二、点成像法	(123)
三、线成像法	(124)
四、面成像法	(125)
五、多层面及三维体积成像	(128)
六、关于成像方法的讨论	(128)
第四节 磁共振成像的空间定位	(129)
一、层面选择	(129)
二、平面内信号的定位	(133)
三、梯度周期与成像时序	(138)
四、图像重建	(139)
第五节 梯度脉冲的相位效应	(140)
一、梯度脉冲的相位效应	(140)
二、射频脉冲和梯度场对相位的共同影响	(141)
三、选层梯度与进动相位的关系	(142)
四、读出梯度与进动相位的关系	(144)
五、相位编码梯度与进动相位的关系	(145)
参考文献	(147)

第五章 磁性物理学基础	(148)
第一节 基本磁现象	(148)
一、磁学和磁铁	(148)
二、基本磁现象	(148)
三、磁场和电场的联系与区别	(150)
第二节 磁介质和磁感应强度	(150)
一、磁介质	(150)
二、磁感应强度	(151)
三、静磁场和均匀磁场	(152)
四、磁化强度和磁化率	(153)
五、铁磁质及其特性	(154)
第三节 电流的磁场	(157)
一、电流元	(157)
二、直线电流的磁场	(157)
三、环形电流的磁场	(159)
四、直螺线管电流内部的磁场	(160)
第四节 磁体及其分类	(162)
一、磁体	(162)
二、磁体的分类	(163)
参考文献	(165)
第六章 磁共振成像设备	(166)
第一节 磁共振成像系统的组成	(166)
第二节 磁体子系统	(167)
一、磁体的性能指标	(168)
二、成像用磁体的分类	(170)
三、磁体系统的组成	(175)
第三节 梯度子系统	(175)
一、梯度磁场的性能	(176)
二、梯度子系统的组成	(176)
三、梯度线圈	(177)
四、梯度控制器和数模转换器	(179)
五、梯度放大器	(180)
六、梯度冷却系统	(180)
七、涡流的影响	(180)
第四节 射频子系统	(181)
一、射频脉冲	(182)
二、射频线圈	(183)
三、射频脉冲发射单元	(186)
四、射频信号接收单元	(188)

第五节 信号采集和图像重建子系统	(191)
一、采样和采样保持	(192)
二、量化和量化误差	(195)
三、信号采集单元的组成	(195)
四、数据处理和图像重建	(195)
第六节 主计算机和图像显示子系统	(197)
一、主计算机及其功能	(197)
二、主计算机系统的组成	(198)
三、主计算机系统中运行的软件	(203)
四、图像显示	(205)
第七节 生理信号检测及控制子系统	(209)
一、可供利用的生理信号及其获取	(209)
二、生理信号的应用	(211)
三、生理信号检测与控制子系统	(213)
参考文献	(215)
第七章 磁共振成像的线圈技术	(216)
第一节 射频线圈的功能和分类	(216)
一、射频线圈的功能	(216)
二、射频线圈与普通天线的比较	(216)
三、射频线圈的分类	(217)
第二节 射频线圈的指标和选用	(221)
一、射频线圈的主要指标	(221)
二、射频线圈的选用	(224)
第三节 射频线圈的电路和电磁场基础	(226)
一、串联电路的谐振	(226)
二、串联谐振的特点	(227)
三、线圈的等效电阻	(229)
四、毕奥-萨伐尔定律	(230)
五、趋肤效应	(230)
六、集总参数和分布参数	(231)
七、谐振腔	(232)
八、均匀传输线及其匹配	(232)
九、波导	(235)
第四节 信号检测和射频线圈的基本要求	(236)
一、NMR 信号的检测	(236)
二、射频线圈的基本要求	(237)
第五节 亥姆霍兹线圈	(240)
一、亥姆霍兹线圈的计算	(240)
二、实用亥姆霍兹线圈举例	(242)

第六节 螺线管线圈和四线结构线圈	(244)
一、螺线管线圈	(244)
二、四线结构线圈	(245)
第七节 管状谐振器	(247)
一、工作原理	(247)
二、管状谐振器线圈的组成	(248)
三、安尔德曼-格兰特线圈	(249)
第八节 笼式线圈	(253)
一、线圈结构与正弦电流分布	(253)
二、笼式线圈的原理	(255)
三、笼式线圈的电路结构	(255)
四、笼式线圈的分析	(256)
五、笼式线圈举例	(257)
第九节 表面线圈	(259)
一、表面线圈的原理	(259)
二、表面线圈的大小和成像深度的关系	(260)
三、表面线圈的改进和发展	(261)
四、表面线圈举例	(261)
第十节 射频线圈的接口	(263)
一、发射器-线圈接口	(264)
二、前置放大器-线圈-RF 功放接口	(266)
三、前置放大器的保护和匹配	(267)
参考文献	(268)
第八章 磁共振对比度增强剂	(270)
第一节 概述	(270)
一、图像对比度及其增强	(270)
二、对比度增强剂的定义	(270)
三、对比度增强剂的产生	(271)
四、物质的磁性	(272)
五、对比度增强剂的构成要素	(273)
第二节 对比度增强剂的信号增强机制	(273)
一、弛豫、弛豫率和浓度弛豫率	(273)
二、顺磁性环境中的弛豫率	(274)
三、信号增强机制	(275)
四、金属离子的作用	(277)
五、弛豫的定量描述	(277)
第三节 对比度增强剂的配方	(278)
第四节 对比度增强剂的生物学特性	(283)
一、体内分布	(283)

二、清除和排泄	(284)
三、毒性	(284)
四、渗透性	(287)
第五节 常见对比度增强剂的药剂学	(288)
一、金属盐对比度增强剂	(288)
二、金属螯合物对比度增强剂	(289)
三、生物大分子对比度增强剂	(290)
四、微粒型对比度增强剂	(291)
第六节 对比度增强剂的发展趋势	(293)
参考文献	(295)
第九章 磁共振成像术——脉冲序列概述	(296)
第一节 脉冲序列的构成、表达和分类	(296)
一、问题的提出	(296)
二、FID 信号及其运动规律	(296)
三、脉冲序列及其构成	(298)
四、脉冲序列的表达	(299)
五、脉冲序列的分类	(300)
第二节 脉冲序列参数的定义	(301)
一、时间参数	(302)
二、分辨率参数	(302)
三、其他参数	(303)
四、快速成像序列的参数	(304)
第三节 图像对比度与加权	(305)
一、 T_1 值和 T_1 图像对比度	(305)
二、 T_2 值与 T_2 图像对比度	(306)
三、质子密度值与质子密度图像对比度	(308)
四、图像的加权	(309)
参考文献	(310)
第十章 磁共振成像术——常规脉冲序列	(312)
第一节 部分饱和脉冲序列	(312)
一、部分饱和序列的检测原理	(312)
二、部分饱和序列的特点	(313)
第二节 反转恢复脉冲序列	(314)
一、反转恢复序列的时序	(314)
二、激发过程和信号检测原理	(315)
三、反转恢复序列的信号特点	(316)
四、反转恢复序列的改进序列	(317)
第三节 自旋回波脉冲序列	(320)
一、自旋回波及其产生	(320)

二、自旋回波序列的时序及信号强度	(322)
三、自旋回波信号的波形及其影响因素	(323)
四、自旋回波信号的应用	(324)
五、自旋回波序列的图像特征	(325)
六、自旋回波序列族	(326)
第四节 梯度回波脉冲序列	(329)
一、梯度回波及其产生	(329)
二、小角度激励及其应用	(332)
三、梯度回波序列的时序	(333)
四、扰相梯度和相位重聚梯度	(334)
五、梯度回波序列族	(336)
六、梯度回波序列的图像特点和应用	(337)
七、梯度回波序列的评价	(338)
第五节 三维成像及其脉冲序列	(338)
一、三维成像的概念	(338)
二、三维成像的激发特点和扫描带选取	(339)
三、三维成像的序列及其讨论	(341)
四、SNR 与三维成像	(343)
参考文献	(344)
第十一章 磁共振成像术——快速成像序列	(346)
第一节 加快扫描速度的常用策略	(346)
一、K 空间及其对称性	(346)
二、减少傅里叶行的采样策略	(348)
三、半傅里叶成像策略	(349)
四、长方形 FOV 或长方形扫描矩阵策略	(350)
五、钐孔成像策略	(351)
六、螺旋扫描策略	(351)
七、辐射扫描策略	(352)
八、减小翻转角的快速成像策略	(353)
第二节 快速自旋回波序列	(353)
一、传统 SE 序列的数据获取与 K 空间的对应关系	(354)
二、快速 SE 序列	(355)
三、多层快速 SE 序列	(357)
四、快速 SE 序列的参数以及对图像的影响	(358)
五、快速 SE 序列的 K 空间重组	(361)
六、快速 SE 序列的图像特征和应用	(362)
七、快速 SE 序列族	(362)
第三节 快速梯度回波序列	(363)
一、概述	(363)