



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

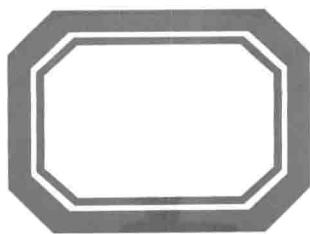
前 沿 系 列 · 3 2

核磁共振成像 ——物理原理和方法

俎栋林 高家红 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 · 3 2

核磁共振成像 ——物理原理和方法

俎栋林 高家红 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

核磁共振成像: 物理原理和方法/ 俎栋林, 高家红著. —北京: 北京大学出版社, 2014. 9

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-24871-3

I. ①核… II. ①俎… ②高… III. ①核磁共振成像 IV. ①R445.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 217532 号

书 名: 核磁共振成像——物理原理和方法

著作责任者: 俎栋林 高家红 著

责任编辑: 郑月娥

标准书号: ISBN 978-7-301-24871-3/O · 1010

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> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电子信箱: zye@pup.pku.edu.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 34.5 印张 650 千字

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 128.00 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 简 介

本套书是《核磁共振成像学》的修订版,是全面描述核磁共振成像物理原理的学术专著,分为两册,《核磁共振成像——物理原理和方法》主要描述和讨论核磁共振成像的物理原理和方法;《核磁共振成像——生理参数测量原理和医学应用》主要描述和讨论在核磁共振成像中生理参数测量的原理和临床医学应用.本套书部分图片为彩色印刷.

《核磁共振成像——物理原理和方法》内容包括核磁共振成像(MRI)的空间编码机制、信号采集方法、脉冲序列时序原理、扫描 k -空间轨迹的概念、自旋激发动力学方程、RF 脉冲设计(包括激发 k -空间概念)、分子自扩散测量方法、图像重建方法和 MRI 扫描仪结构以及运行原理.其中脉冲序列包括临床常用的 SE、GE 和 IR 序列以及高速成像 EPI 序列、spiral 序列、turbo-FLASH 序列等.

《核磁共振成像——生理参数测量原理和医学应用》内容包括 MRI 血流测量、血管造影(MRA)、脑功能 MRI、灌注 MRI、磁化强度饱和转移 MRI、细胞分子 MRI、人体 MR 谱成像、油水分离化学位移 MRI 等的物理原理,以及 MRI 图像伪影的标识、产生机制和抑制方法.

本套书部分内容可作为理工科大学硕、博士研究生 MRI 教材以及医科大学 MRI 硕、博士研究生 MRI 教学参考书,也可供理工科大学 MRI 教师、科学院 MRI 基础研究人员、MRI 企业高级工程技术人员以及对 MRI 有浓厚兴趣的其他人员研读或参考.

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 and 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,更能使广大物理学家和青年学子亲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

1946年,美国斯坦福大学布洛赫(Bloch)教授和哈佛大学珀塞尔(Purcell)教授所领导的两个研究小组分别独立地首次成功进行了体样品核磁共振(NMR)实验,这项划时代的卓越工作使他们赢得了1952年诺贝尔物理学奖.1949—1950年中国学者虞福春博士在斯坦福大学师从布洛赫(二十个月),用NMR方法精确测定了20多种原子核的磁矩.期间与Proctor先生一起发现了“化学位移”现象,这一重大发现为NMR波谱仪奠定了基础,此后NMR成为有机化学家手中最为得力的观察工具.1971年美国达马迪安(Damadian)博士发现NMR能够帮助鉴别肿瘤,预示了NMR的医学应用前景,在当时引起轰动.1973年纽约州立大学石溪分校的劳特堡(Lauterbur)教授用线性梯度磁场进行空间编码,成功获得第一帧NMR图像,宣告了一个崭新的核磁共振成像(MRI)领域的诞生.1975年瑞士核磁学家恩斯特(Ernst)教授提出多维NMR谱方法学理论,开创了NMR傅里叶成像法,并因此巨大贡献荣获了1991年诺贝尔化学奖.1977年英国学者曼斯菲尔德(Mansfield)提出革命性的超快速MRI方法——EPI,引发了一系列技术突破.Lauterbur和Mansfield因在MRI领域中的卓越贡献而于2003年赢得了诺贝尔生理学及医学奖.从1944年迄今,因为对NMR发展作出重大贡献或用NMR/MRI作出重大发现而获得诺贝尔奖的总人数,据不完全统计,已经达到15人之多.

MRI对软组织灵敏度高,空间定位准确,无放射性,对人体无任何损伤,使其优于CT、超声等其他成像模式,受到普遍欢迎.目前MRI技术发展已经进入深水区,从世界范围看,一方面超高场MRI仍面临许多技术挑战,另一方面MRI应用中要能快速、定量测量人体所有器官、避免任何伪影,还有许多课题待研究、许多技术问题待解决、许多应用待开发、许多方法待创新.超导MRI国产化水平、永磁MRI质量都有待继续提高,向发达国家MRI技术看齐还需要巨大的努力.

本套书是殂栋林2004年出版的《核磁共振成像学》的修订版.为了反映最新研究成果、研究热点和前沿课题(全书引用文献近千篇),对原书进行了大刀

阔斧的删改和调整;为了使该书体系更完整,增加了“图像重建方法”一章.根据评审专家意见出版社编辑决定将全套书分为独立的两册,上册《核磁共振成像——物理原理和方法》主要描述和讨论核磁共振成像的物理原理和方法;下册《核磁共振成像——生理参数测量原理和医学应用》主要描述和讨论核磁共振成像中的生理参数测量原理和医学应用专题.

这样,原书第一至第六章、新增加的“图像重建方法”一章和原第十四章共8章构成上册.为了使体系更合理,交换了原第四、第五章的次序,一方面第三章(常用序列)、第四章(高速序列)作为脉冲序列内容挨在一起更紧凑;另一方面,在讲高速序列(以 EPI 和 spiral 为主)的新第4章最便于讨论“数据采集 K -空间轨迹”概念.而新第5章 RF 脉冲设计需要引进“RF 激发 k -空间”概念,而这个 k -空间概念不如采集 K -空间概念直观,更难理解,因此放在后面符合先易后难、由浅入深的原则,也就更合理.原书第七至第十三章共7章属于医学应用专题放在下册,由于独立成书对章次序进行了调整,其中图像伪影一章移到最后作为第7章;第1章讲血流 MRI 和血管造影,它也是后面两章的基础,因为灌注 MRI 研究微血管成像问题,以及基于 BOLD 的脑功能 MR 成像也是建立在微血管网络基础上的;第4章讲饱和转移、细胞分子成像;第5章定域 MR 谱仍为原来的次序,水、脂分离化学位移 MRI 移到后面;这后三章均与化学位移有关.

上册第1章给出了 NMR 动力学方程——布洛赫方程及其稳态解,介绍了最重要最基本的 NMR 概念,例如核磁矩、拉莫尔进动、共振条件、弛豫、回波、脉冲序列、信噪比等,是全书的根基.为了紧凑,原第二章第一节人体水,除抽出弛豫特性合并到第1章外,其余删除,新第一节开门见山直接讲空间编码原理,接着讲劳特堡成像实验、恩斯特傅里叶成像法等.原第三章的层面选择、小角近似、布洛赫方程线性解也移到第2章.原第三章中“§9 梯度回波临床应用”和“§10 图像信噪比”两节已删去,腾出空间以容纳更形象的图解、更新的内容,例如在 §3.2 中补充了新发展的快恢复快 SE 序列、SAR 概念和 SAR 标准.为了最精练地反映最新成果,原版中自旋动力学一章是完全重新编写的.用“自旋激发动力学和 RF 脉冲设计”(新第5章)取代原来的“MRI 动力学和传播子矩阵”(原第四章),增加这一章是讲述“RF 脉冲设计”的需要,RF 脉冲设计需要求解非线性布洛赫方程,是最艰难的一章;被取代的章并不是简单删除,其中梯度稳态双回波、True FISP 序列已并入 §3.6,受激回波序列也移到第3章(§3.9).为了重写下册的灌注成像、脑功能成像两章以及改写血流成像一章,本书又增加一位新作者,也为全书润色提供条件.

本套书不能完全取代《核磁共振成像学》第一版,例如原第四章 MRI 动力学给出了常用脉冲序列信号公式的理论推导,原第六章有关于扩散 MRI 中 b -矩阵分量的理论推导.限于篇幅删除这些内容,不妨碍运用这些公式,实在需要探究那些理论推导的可以查阅第一版.下册第 4 章大约改写了 80% 的内容,以吸收近 10 年兴起的细胞、分子成像的研究成果,该章名称也随即进行了修改.几乎每章都进行了多少不等的修改,保留经实践检验具有旺盛生命力的成果,砍掉那些应用很少的材料以腾出空间反映最新研究成果.对于课题研究者来说,书中讨论的内容往往不过瘾,可根据章末文献目录自己查阅原文以完成通透的理解.

本套书由原来单作者增加到两位,其中高家红博士原是美国芝加哥大学医学物理和神经科学教授,是国家千人计划第二批引进的北京大学物理学院教授、北京大学 MRI 研究中心主任,从事 MRI 研究二十余年.两位作者都在一线从事 MRI 研究、教学,带研究生,俎栋林在北京大学主讲“核磁共振成像学”、“MRI 工程学”研究生课程以及“电动力学”本科生主干基础课十几年;高家红在美国芝加哥大学等校主讲“MRI Physics”和“Brain Functional MRI”十几年,并开始了在北大主讲 MRI 研究生课程的历程.教、学相长,多年吸取了研究生们的宝贵意见,精练了教学内容,积累了经验,同时吸取了大量国际 MRI 文献报道的能产生广泛兴趣的新鲜成果,包括许多华人学者的贡献和国内的 MRI 物理方面的研究成果.教学中积累了一些习题,放在北京大学出版社网站,提供给全国各高校及研究院所研究生教学参考选用.

本套书是关于主流 MRI 即医学 MRI 物理的一套专著,即便是其第一版也不是一本纯教材.北京大学 4 学分的 MRI 课程,是北大医学物理和工程专业研究生必修课,每年也只是选讲其中几章.按新著上册来说,第 1~4 章和第 8 章共五章是每年必讲的内容,其他章节加上本套书未收入的 MRI 扫描仪物理(将单独出版)的内容都是根据研究生学位论文选题的需要进行选择讲解的对象,选讲内容一般不整章细讲,细讲只是选几节,即便整章讲也是以讲座的形式,因此放在网站上的习题并不是每章都有.研究生后续选修课程例如“脑功能 MRI”可以选用本套书下册第 2 章及相关章节;“RF 脉冲设计”可选用上册的第 5 章;“扩散 MRI”可选用上册第 6 章;不一一赘述.

本套书选材的重点是在 MRI 物理方面,大都是临床 MRI 实用或有希望成为临床 MRI 实用的技术成果以及对硕、博士研究生选题有帮助的课题,即主流 MRI 物理.对诸如超高场 MRI、行波 MRI、氦-3 和 氩-129 肺 MRI 成像、介入

MRI、可移动或便携式非均匀场 MRI 等内容将放在《MRI 扫描仪》一书中另外出版,本套书没有涉及。

我们特别感谢历届主修过我们 MRI 课程的研究生在书稿的多年准备过程中所给予的大力帮助和支持。没有这些同学们的积极参与、互动和批评指正,本书是不可能达到现有水平的。我们十分感谢国家出版基金资助,感谢“中外物理学精品书系”编委会的支持。我们也诚挚感谢北京大学出版社陈小红、郑月娥等编辑为本书编辑出版作出的巨大努力。我们更加感谢家人和朋友们一贯的关心、鼓励、支持和协助。由于作者学术水平有限,书中缺陷、错误在所难免,恳请各位读者不吝赐教。

作者

2013 年 3 月于北京大学

目 录

第 1 章 核磁共振基本原理	(1)
§ 1.1 原子核的磁性	(1)
1.1.1 原子核的自旋角动量和自旋磁矩	(1)
1.1.2 原子核的磁化和顺磁磁化率	(4)
§ 1.2 核磁共振条件	(6)
1.2.1 塞曼能级和共振跃迁	(6)
1.2.2 自由核磁矩的拉莫尔进动和共振章动	(7)
§ 1.3 弛豫过程和弛豫时间	(9)
1.3.1 自旋-晶格相互作用, 自旋-晶格弛豫时间 T_1	(9)
1.3.2 自旋-自旋相互作用, 自旋-自旋弛豫时间 T_2	(11)
1.3.3 相关时间	(13)
1.3.4 人体水质子弛豫特性	(14)
1.3.5 肿瘤鉴别	(18)
§ 1.4 NMR 量子力学描述	(19)
§ 1.5 磁共振经典理论	(21)
1.5.1 磁化强度矢量 $\mathbf{M}$ 和弛豫假设	(21)
1.5.2 布洛赫方程和旋转坐标系	(22)
1.5.3 布洛赫方程的稳态解	(25)
1.5.4 NMR 信号的高度、宽度、形状等特征量	(25)
1.5.5 自旋核的动态(横向)磁化率	(27)
1.5.6 主磁场不均匀引起的吸收线加宽	(28)
§ 1.6 布洛赫方程的暂态解、脉冲傅里叶变换核磁共振	(28)
1.6.1 磁化强度 $\mathbf{M}$ 的章动	(29)
1.6.2 自由感应衰减	(29)
1.6.3 FID 信号的傅里叶变换	(30)
§ 1.7 自旋回波(SE)	(33)

§ 1.8 简单脉冲序列,弛豫时间 T_1 、 T_2 的测量	(35)
1.8.1 反向恢复(IR)序列测量 T_1	(35)
1.8.2 自旋回波序列(90° - τ - 180°)测 T_2	(36)
1.8.3 CP 序列(90° - τ - 180° - 2τ - 180° - 2τ - $\dots$)测 T_2	(37)
1.8.4 CPMG 脉冲序列(90° - τ - 180° - 2τ - 180° - 2τ - $\dots$)	(38)
§ 1.9 NMR 信号检测与信噪比	(39)
1.9.1 并联谐振和端电压	(39)
1.9.2 NMR 信号强度	(41)
1.9.3 噪声和噪声系数	(42)
1.9.4 NMR 信噪比	(44)
参考文献	(46)
第 2 章 NMR 成像原理	(48)
§ 2.1 空间编码原理	(48)
2.1.1 NMR 成像发展的历史背景	(48)
2.1.2 线性磁场梯度	(49)
2.1.3 投影	(51)
2.1.4 背投影	(53)
2.1.5 劳特伯 NMR 成像实验	(54)
§ 2.2 傅里叶成像	(56)
2.2.1 虚拟的劳特伯投影重建改进方案	(56)
2.2.2 傅里叶成像实验	(58)
2.2.3 二维傅里叶变换	(59)
2.2.4 傅里叶成像技术与投影重建技术的比较	(61)
§ 2.3 傅里叶成像理论	(62)
2.3.1 峰形函数与滤波函数	(62)
2.3.2 K -空间	(65)
2.3.3 MR 图像重建公式	(66)
2.3.4 恩斯特二维及多维谱理论简介	(68)
§ 2.4 spin-warp 傅里叶成像	(70)
§ 2.5 层面选择	(71)
2.5.1 层面取向和位置	(71)
2.5.2 层面厚度	(73)
2.5.3 层面选择激发	(73)

2.5.4	sinc 脉冲的截断效应	(76)
2.5.5	汉明窗和汉宁窗	(77)
§ 2.6	RF 脉冲	(78)
2.6.1	矩形脉冲,硬脉冲	(78)
2.6.2	选择激发 RF 脉冲,软脉冲	(80)
2.6.3	选择性饱和脉冲	(81)
参考文献		(85)
第 3 章	临床基本通用脉冲序列	(88)
§ 3.1	自旋回波脉冲序列	(89)
3.1.1	基本单层面自旋回波脉冲序列的时序	(89)
3.1.2	采样、采样率、采样带宽和频率编码方向线分辨率	(91)
3.1.3	“混叠”问题和过采样	(92)
3.1.4	数据矩阵与 K -空间	(93)
3.1.5	二维图像的信噪比	(94)
3.1.6	信噪比对场强的依赖性	(95)
3.1.7	相位编码方向图像分辨率和梯度的选择	(96)
3.1.8	自旋回波序列的像元素信号强度公式	(97)
3.1.9	加权像	(97)
3.1.10	成像时间	(99)
§ 3.2	改进的自旋回波变型序列	(99)
3.2.1	标准双回波和多回波序列	(100)
3.2.2	对比度加权双回波序列	(100)
3.2.3	快自旋回波(fSE)脉冲序列	(101)
3.2.4	fSE 的图像对比度	(102)
3.2.5	fSE 双回波图像	(103)
3.2.6	快恢复快 SE 序列	(104)
3.2.7	多层面 SE 脉冲序列(MSE)	(105)
3.2.8	多层面快 SE 序列	(107)
3.2.9	RF 功率和特定吸收率(SAR)	(108)
§ 3.3	反向恢复(IR)脉冲序列	(111)
3.3.1	标准 IR 序列的时序	(111)
3.3.2	快反向恢复序列(fast IR)	(113)
3.3.3	多层面 IR 序列	(113)

3.3.4	T_1 加权的 IR 实像动态范围	(114)
3.3.5	对比度概念, 差噪比(CNR)	(115)
§ 3.4	对比度模型和压脂肪技术(STIR)	(118)
3.4.1	本征对比度	(118)
3.4.2	对 SE 序列图像的 T_1 权重的分析	(119)
3.4.3	IR 序列的重 T_1 对比度加权成像	(120)
3.4.4	抑制脂肪的 STIR 技术	(123)
3.4.5	抑制脑脊液的 FLAIR 技术	(123)
§ 3.5	梯度回波(GE)脉冲序列	(125)
3.5.1	GE 序列基本概念	(125)
3.5.2	允许小角倾倒	(126)
3.5.3	单位时间信噪比、单位时间差噪比	(127)
3.5.4	T_2^* 弛豫效应	(128)
3.5.5	磁化率效应	(128)
3.5.6	三维成像	(129)
§ 3.6	相干稳态 GE 脉冲序列(GRASS)	(131)
3.6.1	残余横向磁化强度的重聚相	(132)
3.6.2	稳态自由进动	(133)
3.6.3	CE-FAST(或 PSIF)序列的时序	(134)
3.6.4	对比度	(135)
3.6.5	SSFP 双回波	(138)
3.6.6	True FISP 序列	(139)
§ 3.7	不相干 GE 序列, FLASH, 恩斯特角	(140)
3.7.1	破坏梯度回波(sGE)序列	(141)
3.7.2	恩斯特角	(141)
3.7.3	sGE 序列的对比度	(142)
3.7.4	破坏梯度回波序列的应用要领	(143)
3.7.5	如何选用稳态自由进动 GE 和 FLASH 序列	(144)
§ 3.8	超快 FLASH 脉冲序列	(145)
3.8.1	自旋密度加权的超快 FLASH 成像	(145)
3.8.2	T_1 加权反向恢复(IR)超快 FLASH 成像	(146)
3.8.3	T_2 加权的超快 FLASH 成像	(147)
3.8.4	化学位移选择性饱和超快 FLASH 成像	(148)

3.8.5 NMR 谱的超快 FLASH 成像	(148)
§ 3.9 受激回波脉冲序列	(149)
3.9.1 “8”球回波和受激回波	(150)
3.9.2 间隔三个 RF 脉冲激发 $M_{\perp}$ 的相干路径和回波	(152)
3.9.3 受激回波成像序列	(153)
参考文献	(154)
第 4 章 单射成像和高速脉冲序列	(158)
§ 4.1 提高成像速度的途径、 K -空间和高速序列类别	(158)
4.1.1 半傅里叶成像和四分之一傅里叶成像	(158)
4.1.2 归一化 K -空间	(159)
4.1.3 脉冲梯度和在 K -空间的扫描轨迹	(161)
§ 4.2 回波平面成像(EPI)序列	(162)
4.2.1 原始 EPI 序列	(162)
4.2.2 改进的 EPI 序列	(164)
4.2.3 EPI 序列对硬件的要求	(165)
§ 4.3 常用或基本 EPI 序列	(166)
4.3.1 SE-EPI 序列	(166)
4.3.2 GE-EPI 序列	(167)
4.3.3 IR-EPI 序列	(168)
4.3.4 单射 EPI 成像时间,最小回波间隔 ESP 及最大回波列长度	(168)
4.3.5 EPI 序列图像对比度	(170)
§ 4.4 EPI 序列的伪影	(171)
4.4.1 化学位移伪影	(171)
4.4.2 交错多射 EPI	(172)
4.4.3 $N/2$ 奈奎斯特鬼影	(173)
4.4.4 奈奎斯特鬼影的校正	(175)
4.4.5 图像畸变伪影	(177)
4.4.6 图像畸变伪影的校正	(179)
4.4.7 T_2^* 感应的图像模糊	(181)
4.4.8 体元内散相	(181)
§ 4.5 EPI 变型序列	(181)
4.5.1 省略偶回波的 EPI	(181)
4.5.2 圆形 EPI	(182)

4.5.3	测量 T_2^* -map 的变型 EPI 序列	(182)
4.5.4	三维 EPI, 即回波体积成像(EVI)	(183)
§ 4.6	渐开平面螺旋序列	(184)
4.6.1	原始单射渐开平面螺旋(spiral)扫描序列	(184)
4.6.2	变型 spiral 序列	(187)
4.6.3	典型 spiral 数学描述	(189)
4.6.4	spiral 序列的应用和优缺点	(193)
4.6.5	模糊校正	(195)
§ 4.7	RARE 序列	(196)
§ 4.8	GRASE 序列	(197)
4.8.1	GRASE 脉冲序列	(199)
4.8.2	GRASE 相位编码次序	(200)
4.8.3	回波时间移动	(207)
4.8.4	相位校正	(209)
§ 4.9	高速 STEAM 序列	(210)
参考文献		(211)
第 5 章	自旋激发动力学与 RF 脉冲设计	(216)
§ 5.1	自旋激发动力学	(216)
5.1.1	旋转坐标系	(216)
5.1.2	RF 磁场	(217)
5.1.3	布洛赫方程	(217)
5.1.4	布洛赫方程的小倾角近似解	(219)
5.1.5	布洛赫方程的大倾角解	(220)
5.1.6	RF 脉冲度量参数	(227)
§ 5.2	SLR 脉冲设计	(228)
5.2.1	硬脉冲近似和正 SLR 变换	(229)
5.2.2	逆 SLR 变换	(231)
5.2.3	多项式设计和 SLR 脉冲	(232)
5.2.4	脉冲设计参数关系	(234)
5.2.5	设计考虑和实例	(238)
§ 5.3	复合脉冲	(243)
5.3.1	二项式型复合脉冲	(244)
5.3.2	其他定型复合脉冲设计理论	(247)