

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

核磁共振成像学

Magnetic Resonance Imaging

俎栋林

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

核磁共振成像学

Magnetic Resonance Imaging

俎栋林

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是教育部研究生工作办公室推荐的研究生教学用书,是国内第一本核磁共振成像(MRI)学中文教科书。本书全面系统地介绍了核磁共振(NMR)基本原理、MRI基础,包括成像物理机制、空间编码、信号采集和重建图像的方法、RF脉冲概念、脉冲序列时序原理、图像采集的 K 空间概念;介绍了MRI动力学、布洛赫方程和传播子矩阵、脉冲序列的设计和计算;介绍了临床常用脉冲序列如SE、GE和IR序列以及高速成像EPI序列、Spiral序列、Turbo-Flash序列等。

本书对于MRI临床应用各个方面,包括扩散MRI、灌注MRI、流动MRI测量、血管造影(MRA)、油水分离化学位移MRI、磁化强度转移MRI、脑功能MRI、人体MR谱成像以及MRI伪影抑制等的物理原理,给出了详略得当的介绍和动力学描述。除讨论基本原理外,书中引用了大量MRI领域前沿文献,涉及若干热门研究课题。

本书可作为理工科大学应用物理专业,尤其是理、工、医交叉学科方向及医学物理和生物医学工程方向以及医学院校生物医学工程专业、图像分析与处理专业的硕士、博士研究生专业课教材,也可供MRI医生、MRI企业工程师及在相关领域工作的教师和研究参考。

图书在版编目(CIP)数据

核磁共振成像学/俎栋林. —北京:高等教育出版社,2004.1

ISBN 7-04-012966-3

I.核... II.俎... III.核磁共振-成像-研究生-教材 IV.R445.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第069450号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
排 版	北京高等教育出版社照排中心		
印 刷	北京中科印刷有限公司		
开 本	787×960 1/16		
印 张	51	版 次	2004年1月第1版
字 数	870 000	印 次	2004年1月第1次印刷
插 页	2	定 价	69.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

核磁共振(NMR:nuclear magnetic resonance)正式诞生于1946年.其实,NMR历史还可以追溯得更远.早在1924年,泡利为了解释光谱线的超精细结构,就提出了某些原子核具有自旋角动量和自旋磁矩的概念,并推算出核磁矩在外磁场中的Zeeman能级间距落在射频范围,用适当的RF磁场进行作用可以出现共振吸收现象.1936年Gorter试图观察LiF中 ^7Li 核的共振吸收,由于所用的样品太纯,弛豫时间太长,不幸未成功,但为后来提供了经验.1939年Rabi改进了Stern分子束磁共振实验,获得成功.为此Rabi荣获了1944年诺贝尔物理学奖.

1946年斯坦福大学布洛赫(Bloch)小组和哈佛大学珀塞尔(Purcell)小组分别用不同的样品(水和石蜡)、不同的方法(双线圈、感应法和单线圈、吸收法)独立地进行了体(bulk)样品核磁共振实验成功.布洛赫提出了NMR经典理论,珀塞尔提出了NMR量子理论.他俩分享了1952年诺贝尔物理学奖.

核磁共振发现之初的几年中,主要用于精确测定各种原子核的磁矩.中国学者虞福春和Proctor博士在布洛赫小组工作时首次发现了“化学位移”.于是NMR很快发展成为研究物质分子化学结构的手段.20世纪50年代诞生了商品NMR波谱仪.为了提高NMR谱的分辨率,所用磁场强度逐年提高.

1965年Cooley和Tukey提出快速傅里叶变换算法.同时借助于计算机的发展和超导磁体的采用,1966年Ernst发展了脉冲傅里叶变换NMR测谱方法.这一革命性的飞跃使高分辨NMR波谱得以发展.并且使对天然丰度很低的核的观察变为现实,而且使固体NMR技术也发展起来.

学科交叉、借鉴对科学的发展无疑起推动作用.20世纪60年代天文学方面射电望远镜的发明,以及借助于射电望远镜做出的四大发现震撼了科技界.Cormack和Hounsfield把射电望远镜的方法应用于X射线计算机断层成像,于1968年发明了被誉为放射医学第二次革命的X-CT(computer tomography).他俩荣获了1979年诺贝尔生理学医学奖.紧接着产生了 γ -CT、正电子CT、超声CT等.

1973年纽约州立大学石溪分校Lauterbur受到X-CT的启发,发明

用线性梯度磁场进行空间编码,首次从实验上得到 NMR 图像,于是核磁共振成像(MRI:magnetic resonance imaging)学科正式诞生.MRI 遂成为医学家做医学诊断的工具.

1975 年 Ernst 提出多维 NMR 谱方法学理论,也为 NMR 成像奠定了新的方法学理论和实验基础,把 NMR-CT 发展为“傅里叶成像法”.使 NMR 成像区别于 CT 而被命名为 MRI. Ernst 由于对 NMR 方法学的巨大贡献荣获了 1991 年诺贝尔化学奖.

1977 年英国学者 Mansfield 提出回波平面成像(EPI:echo planar imaging)方法,1980 年 Edelstein 等人把 Ernst 原始的傅里叶成像法修改为 Spin-Warp 傅里叶成像,1982 年 Crooks 引进多层面技术,这些为临床 MRI 准备了条件.正如恩格斯所说,社会一旦有技术上的需要,比 10 所大学更能把科学推向前进.由于社会需求的巨大推动,医学 NMR 发展极其迅速.到 1983 年全身 MRI 商品机器就出现了.

在 MRI 机器的幼年期,软、硬件发展是关键.1985 年 Haase 和 Frahm 等人提出梯度回波(FLASH:fast low angle shot)脉冲序列,同年 Hayes 等发明鸟笼式 RF 谐振器.1986 年 Hennig 提出快自旋回波(fast spin echo)序列,同年 Turner 提出设计梯度线圈的逆方法——目标场方法.1990 年 Roemer 等人发明相位阵列(phased array)腰椎线圈.这些为超导高场 MRI 扫描器准备了条件.到 90 年代中期,MRI 机器达到现代化水平.在超导 MRI 系统上广泛采用鸟笼线圈,淘汰了传统的马鞍形线圈,圆极化代替了线极化;各种表面线圈包括相位阵列线圈广泛应用;涡流自屏蔽高梯度线圈和高速开关梯度放大器应运而生,EPI 序列开始在临床机器上运行,实现高速(几十 ms/幅)、高分辨(亚 mm)成像;临床检查时间大为缩短.而且,系统可靠性和重复性已经达到可以定量成像的水平.1997 年 Sodickson 和 Manning 提出空间谐波并行采集(SMASH:simultaneous acquisition of spatial harmonics)理论,1999 年 Pruessmann 等人提出灵敏度编码(SENSE:sensitive encoding)并行采集理论,软硬件技术并行发展,MRI 摄影速度有可能提高一个量级以适应神经活动的反应速度.

在 MRI 扫描器软硬件不断突破性发展的同时,新对比度机制、新成像参数也不断开发出来,而且相互促进.以扩散 MRI 为例,1984 年 Wesbey 等人首次实现扩散(diffusion)磁共振成像,dMRI 要求高梯度,促进了自屏蔽高梯度的发展.反过来,要求定量扩散成像,这促使 Basser 等人于 1994 年提出扩散张量成像(DTI:diffusion tensor imaging)的理论和方法,开拓出一个成像参数族包括神经纤维束造影.

得益于高场 MRI 的优势,1990 年 Belliveau 等首次得到人脑视觉皮

层活动的功能 MR 像。由于功能磁共振 (fMRI: functional MRI) 和正电子发射断层 (PET: positron emission tomography) 的发展, 美国把 90 年代定为“脑十年”, 欧洲也有“脑十年”计划, 把系统论脑科学研究提上了日程, 成为生命科学界、脑生理和心理学界新世纪主攻的科研方向之一。几百年来现代科学一直沿“还原论”的道路发展, 即物质层次无限可分。致使粒子加速器能量越来越高。自从有了 MRI, 使按“系统论”方法研究人体、心脏、人脑等的动态、功能成为现实。今天看来, MRI 对于生命科学的重要性犹如电子显微镜对材料科学、射电望远镜对天文学、粒子加速器对物理学一样。然而, MRI 最年青。它是一个巨大的技术宝库, 很多方法、技术和应用课题有待开发。它必定成为未来生物学家洞察各层次活生物基本问题不可忽略的基本工具。目前, 小孔径 MRI 即 NMR 显微镜 (把已经淘汰的高场 NMR 谱仪改造为之) 已可用来研究苍蝇的神经系统 (孙哲, 博士论文, MIT)。这种显微镜的目标是直接观察单细胞。另外, 非均匀场 MRI 用于勘探石油和地下水已是成功的事例。

MRI 是综合高技术, 涉及多学科。不仅机器技术含量高, 而且 MRI 的临床应用也涉及许多数学、物理基础知识和工程技术方面的基本知识。如扩散成像、灌注成像、流动成像、血管造影、化学位移成像、磁化强度转移成像、谱成像、伪影的抑制、超快动态成像和功能成像等都需要了解其物理机制及其动力学。这不仅对理解脉冲序列有帮助, 对图像对比度的定量解释也有帮助。对于尚未确定自己未来发展方向的青年学子来说, 只要有普通物理和高等数学的知识, 就可以读懂本书的大部分章节。

虽然 MRI 系统十分昂贵, 然而其普及率在发达国家已经达到平均约六万人一台。由于其无核辐射损伤, 已经成为人群体检的首选工具。全世界约有一万台机器在各级医院运行。平均每年有两万篇关于 MRI 的文章发表。MRI 已经成为一个很大的行业和研究领域。在发展中国家, MRI 机器的普及还有很大的空间。其普及的速度和应用水平的提高与 MRI 学、MRI 诊断学的教学和研究以及产业水平是密切相关的。

北京大学于 1994 年在“核技术及应用”专业内增开了“医学物理”研究方向, 包括医学影像和放疗, 招收硕士、博士研究生, 旨在培养教学、研究人员, 在医院工作的“物理师”和在企业工作的工程师。作者于 1995 年开始讲《核磁共振成像学》研究生课程, 苦于国内没有教材, 只得自己动手写讲义, 讲义的基础部分 (上册) 于 1998 年印出, 散发流传到若干单位和个人手中, 权作讲义在小范围内试用。明尼苏达大学磁共振中心胡小平教授审阅了那本讲义, 提出了宝贵的修改意见; 张挽时教授、孟庆安研究员、夏平畴研究员阅读了那本讲义, 提出了一些缺点和不足。使用本讲义的研

究生和博士生指出了许多录入错误.在此一并表示衷心的感谢.

对那本讲义进行修订,增加临床应用部分就形成了本书.临床应用部分也是以多年讲稿为基础,进行修订定稿的.这本书的结构是:第1~5章属于MRI基础部分,第6~13章属于MRI临床应用部分,第14章是MRI机器概论.如何使用本书?应当说明,作为4学分研究生必修课,一学期不可能全部讲完.对临床应用部分,一般应根据选课研究生覆盖的课题选讲有关内容.对基础部分,第4章也不一定讲,有余力的学生可以自己看.第1、2、3章是为新手准备的入门教材,作为高年级本科生的选修课讲义也是可行的.

历届听课的研究生几乎每人承担了一节文稿的录入任务,约2/3的文稿由我的妻子录入,女儿帮助绘制了几百幅插图.在此也一并表示感谢.另外,感谢教育部“全国遴选研究生优秀教材”立项和支持此书出版的评委.最后感谢高等教育出版社董洪光、胡凯飞编辑和其他人员为本书出版做出的努力.感谢我的家人和朋友们一贯的关心、鼓励、支持和协助.由于本人学术水平有限,书中错误在所难免,恳请各位读者和老师不吝赐教.

俎栋林

2003年1月于北京大学承泽园

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 82028899 转 6897 (010)82086060

传真：(010) 82086060

E-mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

邮编：100011

购书请拨打读者服务部电话：(010)64054588

策划编辑 胡凯飞
责任编辑 董洪光
封面设计 李卫青
责任绘图 郝林 杜晓丹
版式设计 史新薇
责任校对 殷然
责任印制 宋克学

目 录

第一章 核磁共振基本原理	1
§ 1 原子核的磁性	1
一、原子核的自旋角动量和自旋磁矩	1
二、原子核的磁化和顺磁磁化率(paramagnetic susceptibility)	4
§ 2 核磁共振条件	6
一、塞曼能级和共振跃迁	6
二、自由核磁矩的拉莫尔进动和共振章动	7
§ 3 弛豫过程和弛豫时间	9
一、自旋-晶格相互作用,自旋-晶格弛豫时间 T_1	9
二、自旋-自旋相互作用,自旋-自旋弛豫时间 T_2	11
三、相关时间	13
§ 4 NMR 量子力学描述	14
§ 5 磁共振经典理论	16
一、磁化强度矢量 M 和弛豫假设	16
二、布洛赫方程和旋转坐标系	17
三、布洛赫方程的稳态解	19
四、NMR 信号的高度、宽度、形状等特征量	20
五、原子核的动态(横向)磁化率	22
六、主磁场不均匀引起的吸收线加宽	24
§ 6 布洛赫方程的暂态解,脉冲傅里叶变换核磁共振	24
一、磁化强度 M 的绝热章动	25
二、自由感应衰减	26
三、FID 信号的傅里叶变换	27
四、非选择激发 RF 脉冲和选择激发 RF 脉冲	28
§ 7 自旋回波	30
§ 8 简单脉冲序列,弛豫时间 T_1 、 T_2 的测量	32
一、反转恢复序列测量 T_1	32
二、自旋回波序列($90^\circ - \tau - 180^\circ$)测 T_2	33
三、CP 序列($90^\circ - \tau - 180^\circ - 2\tau - 180^\circ - 2\tau - \dots$)测 T_2	34
四、CPMG 脉冲序列($90^\circ - \tau - 180^\circ_y - 2\tau - 180^\circ_y - 2\tau - \dots$)测 T_2	35
五、 $T_{1\rho}$ 的测量	36
§ 9 NMR 信号检测与信噪比	36

一、并联谐振	36
二、NMR 信号强度	38
三、噪声和噪声指数	39
四、NMR 信噪比	42
参考文献	43
第二章 NMR 成像基本原理	45
§ 1 人体磁共振成像(MRI)的生理基础	45
一、人体水含量	46
二、弛豫时间	47
三、自旋-晶格弛豫	48
四、自旋-自旋弛豫	51
五、肿瘤鉴别(tumor discrimination)	52
§ 2 用线性梯度磁场进行空间编码和劳特伯 NMR 成像实验	53
一、线性梯度效应	53
二、投影	55
三、背投影(back projection)	57
四、劳特伯 NMR 成像实验	59
§ 3 投影重建技术和理论简介	60
一、层析技术诞生和发展简史	60
二、断层投影(tomography projectons)	61
三、直接背投影	62
四、滤波背投影	62
五、卷积滤波	64
六、傅里叶重建	64
七、迭代重建	66
§ 4 傅里叶成像(Fourier imaging)	66
一、修改的劳特伯投影重建方案	67
二、傅里叶成像实验	68
三、二维傅里叶变换	69
四、傅里叶成像技术与投影重建技术的比较	71
§ 5 傅里叶成像理论	72
一、傅里叶成像的数学分析	72
二、广义自旋密度和线形函数	75
三、恩斯特(Ernst)二维及多维谱理论简介	76
§ 6 Spin-Warp 傅里叶成像	79
§ 7 层面(slice)选择	80
一、层面取向和位置	80
二、层面厚度	82

§ 8 RF 脉冲	82
一、选择性 RF 脉冲,软脉冲	83
二、非选择性 RF 脉冲,硬脉冲	83
三、sinc 函数形 RF 脉冲	83
四、高斯型 RF 脉冲	85
五、选择饱和(selective saturation)	86
参考文献	88
第三章 临床常用的基本脉冲序列	91
§ 1 自旋回波脉冲序列	91
一、基本单层面(slice)自旋回波脉冲序列的时序图	91
二、采样、采样率、采样带宽和频率编码方向线分辨率	93
三、“混叠”问题和过取样	94
四、数据矩阵与 K 空间	95
五、二维图像的信噪比	96
六、信噪比对场强的依赖性	97
七、相位编码方向极限分辨率和梯度强度的关系	98
八、自旋回波序列的像元素信号强度公式	99
九、加权像	99
十、成像时间	100
§ 2 改进的自旋回波变型序列	100
一、标准双回波和多回波序列	100
二、快自旋回波脉冲序列	101
三、fSE 的图像对比度	103
四、多层面 SE 脉冲序列(MSE)	103
五、快 SE 和多层面 SE 相结合	104
六、三维 SE 脉冲序列	105
§ 3 反向恢复脉冲序列	107
一、标准 IR 序列的时序	107
二、快反转恢复序列(fast IR)	108
三、多层面 IR 序列	109
四、 T_1 - 加权的 IR 实像动态范围	109
五、对比度概念,差噪比	110
§ 4 对比度模型和压脂肪技术(STIR)	114
一、本征对比度	114
二、SE 对比度加权成像	114
三、IR 序列的重 T_1 - 对比度加权成像	116
四、抑制脂肪的 STIR 技术	120
五、抑制脑脊液的 FLAIR 技术	120

§ 5 梯度回波(GE)序列	121
一、基本 GE 回波序列	121
二、允许小角倾倒	122
三、单位时间信噪比、单位时间差噪比	123
四、 T_2^* 弛豫效应	124
五、选层 RF 脉冲和选层梯度	124
六、RF 功率沉积	126
§ 6 残余横向磁化强度再聚相 GE 序列(GRASS)	128
一、残余横向磁化强度的再聚相	128
二、稳态自由进动	129
三、CE-FAST(或 PSIF)序列的时序	130
四、对比度	131
五、三维 GRASS 序列	135
§ 7 破坏残余横向磁化强度的 GE 序列,FLASH	136
§ 8 磁化强度预备的梯度回波序列	139
一、 T_1 -加权的 MP-RAGE 序列	140
二、 T_2 -加权的 MP-RAGE 序列	141
§ 9 梯度回波序列的临床应用	141
一、GE 稳态和半稳态三类变型序列的使用条件 and 对比度	142
二、混叠问题(aliasing)	143
三、横向相干的破坏方式	143
四、化学位移、水和脂肪分离的 Dixon 方法	144
五、高效率和高分辨成像	145
六、功能 MR 研究	145
§ 10 图像信噪比(SNR)	146
一、图像信噪比的基本表达式	146
二、接收电路的病人负载	146
三、高、低场 MRI 系统中体元信噪比	148
四、SNR 的实用表示	149
五、扫描参数引入 SNR	150
六、接收机对 SNR 的影响	150
七、弛豫对 SNR 的影响	151
参考文献	151
第四章 MRI 动力学和传播子矩阵	155
§ 1 MRI 动力学方程的解	155
一、布洛赫方程的矩阵形式	155
二、旋转坐标系中的 Bloch 方程	156
三、传播子矩阵	157

§ 2 传播子矩阵的初步应用	157
一、FID 信号	158
二、自旋回波($90^\circ - \tau - 180^\circ - \tau - \text{echo}$)序列	159
三、“8”球回波和受激回波	160
四、梯度回波	165
§ 3 自旋回波(SE)序列的像元信号公式的导出	166
§ 4 反转恢复(IR)脉冲序列像元信号公式的导出	167
§ 5 破坏残余 M'_\perp 的梯度回波成像序列像元信号公式的导出	170
一、残余横向磁化强度 M'_\perp	170
二、对残余横向磁化强度 M'_\perp 的不同处理	172
三、破坏梯度回波序列像元信号强度公式	173
§ 6 稳态自由进动	175
一、SSFP 形成的物理机制	176
二、稳态自由进动的定性模型	177
三、SSFP 的定量计算	179
四、连续偏置分布	182
五、交变相位脉冲列	183
六、小倾角 RF 脉冲	184
§ 7 稳态自由进动再聚焦梯度回波序列	187
一、在急速重复的脉冲列中的稳态磁化强度	187
二、SSFP 梯度回波信号的时域图像强度和对比度	189
三、SSFP 梯度回波信号的频域图像强度和对比度	191
四、原始 FISP 序列	192
五、SSFP 双回波	194
参考文献	195
第五章 高速扫描序列	198
§ 1 提高成像速度的途径、 K 空间和高速序列类别	198
一、扫描时间和半傅里叶成像	198
二、归一化 K 空间	199
三、脉冲梯度和在 K 空间的扫描轨迹	200
§ 2 回波平面成像(EPI)	202
一、EPI 序列的时序	202
二、EPI 对硬件的要求	203
三、EPI 图像对比度	204
§ 3 变形 EPI 序列	205
一、BEST 序列	205
二、SE - EPI 混合序列	205
三、GE - EPI 混合序列	206

§ 4 渐开平面螺旋序列	207
一、蚊香式(spiral)扫描序列	207
二、方形蚊香序列	211
§ 5 高速 FLASH 成像	212
一、自旋密度加权的高速(snapshot) FLASH 成像	212
二、 T_1 -加权反向恢复(IR)高速 FLASH 成像	213
三、 T_2 -加权的 SE 高速 FLASH 成像	214
四、化学位移选择性高速 FLASH 成像	215
五、谱的高速 FLASH 成像	215
§ 6 DANTE 超快成像序列(DUFIS)	216
一、DANTE 自旋回波列的 2D MRI 序列	217
二、DANTE 受激回波列的 2D MRI 序列	219
三、3D DANTE 超快梯度回波成像	219
§ 7 三维高速成像移频 BURST 序列	220
一、频移 BURST 3D 成像时序和频移原理	220
二、FS-Burst 序列的优势	221
三、两个回波列的特性	222
§ 8 高速成像 RUFIS 序列	222
§ 9 RARE 序列	224
§ 10 高速 STEAM 序列	226
§ 11 GRASE 序列	227
参考文献	228
第六章 扩散磁共振成像	231
§ 1 扩散对磁共振信号的影响	231
一、扩散现象的物理描述	231
二、在平衡态和稳态条件下如何观察扩散	232
三、扩散对 MR 信号的影响	233
§ 2 扩散磁共振成像理论及扩散自旋回波序列	235
一、支配磁化强度 M 扩散输运的 Bloch-Torrey 方程	235
二、磁共振扩散测量方法和脉冲序列	237
三、扩散磁共振成像	240
四、扩散成像自旋回波(SE)序列	242
§ 3 b 因子计算	244
一、在扩散谱测量的自旋回波序列中 b 因子的计算	244
二、在脉冲梯度 SE 序列中 b 因子随脉冲波形的变化	246
三、在扩散 MRI 中成像编码梯度对 b 因子的贡献	246
四、在 SE 扩散成像实验中的扩散时间和扩散梯度的“滤波”效应	249
五、裁剪脉冲序列使 b_i 和 b_{ct} 最小	249

§ 4 扩散 MRI 灵敏度及其生物系统中的扩散效应	251
一、最小可测量的扩散系数	251
二、最佳梯度因子 b	252
三、生物系统中微动力学和微观结构效应	253
四、受限制扩散	253
五、各向异性扩散	255
六、在多隔间系统中的扩散	257
七、代谢扩散	257
§ 5 受激回波扩散成像序列	258
一、受激回波序列	258
二、测量扩散的受激回波序列	259
三、受激回波扩散成像	260
四、受限制扩散的 STEAM 成像	261
五、动物中枢神经系统的扩散加权 STEAM 成像研究	261
六、人脑的扩散加权高速 STEAM 成像序列	264
§ 6 稳态自由进动(SSFP)快扩散敏感成像	265
一、稳态自由进动(SSFP)中的相干路径	266
二、SSFP 中的扩散灵敏度	267
三、扩散敏感 SSFP 成像	268
四、人脑的 SSFP 扩散敏感像	269
§ 7 扩散 EPI 成像	271
一、运动伪影	271
二、EPI 扩散加权成像序列	272
三、人脑的 EPI 扩散成像研究结果	273
§ 8 在扩散张量成像中 b 矩阵的解析计算	275
一、 b 矩阵的一般表达式	276
二、MR 扩散谱 b 矩阵一般表达式	277
三、扩散张量成像 SE 序列 b 矩阵一般表达式	278
四、扩散张量成像 EPI 序列 b 矩阵一般表达式	281
§ 9 扩散张量 MR 成像	286
一、宏观有效扩散张量 $\overset{\Rightarrow}{D}^{\text{eff}}$ 及其对回波信号的影响	287
二、有效扩散张量 $\overset{\Rightarrow}{D}^{\text{eff}}$ 的成像实验测量——扩散张量成像(DTI)	288
三、只用 7 次 DWIs 确定 $\overset{\Rightarrow}{D}$ 的简单方法	289
四、扩散椭球	290
五、扩散张量 $\overset{\Rightarrow}{D}^{\text{eff}}$ 的不变量	291
六、仅用 7 次 DWIs 和 25 次 DWIs 实验结果的比较	295

七、扩散张量成像的临床应用	298
§ 10 扩散加权成像(DWI)在脑病尤其是中风脑缺血诊断中的应用	299
一、在正常脑中的扩散	299
二、脑瘤中的水扩散	303
三、表观扩散系数(ADC)和脑缺血	304
四、对缺血时 ADC 减小原因的进一步推测	308
五、集成的扩散/灌注 MRI 对中风检查、诊断和处理	309
六、在中风时集成的扩散/血液动力学 MRI 的作用	312
七、脑缺血时水扩散减小的机制和预测值	315
参考文献	320
第七章 血流 MR 成像和血管 MR 造影	326
§ 1 生理血流运动	326
一、运动类型	326
二、流体在管道中和血液在血管中流动的描述	327
三、血管血流特征	328
§ 2 流动血对 MR 信号的影响	329
一、流空效应及高速信号损失	330
二、湍流引起信号损失	330
三、层流引起奇回波散相、偶回波重聚相	331
四、凝滞和舒张膜门控	334
五、流动相关增强(FRE)	336
六、血流异常和血管疾病诊断	338
七、辨别血栓和慢血流	341
§ 3 流动伪影和流动补偿技术	344
一、流动的综合效应及流动鬼影	344
二、抑制 FRE 鬼影的预饱和技术	345
三、流动补偿即 GMN 技术	346
四、用流动补偿产生的新问题	349
五、心电门控	351
§ 4 血流在梯度回波图像上的流入(inflow)或 TOF 效应	351
一、在破坏 GE 序列中信号强度与激发脉冲数、倾倒角的定量关系	352
二、二维成像	353
三、三维成像	355
四、对低速流入效应的理解	356
五、克服 TOF 饱和的措施	357
§ 5 相位成像	358
一、相位成像概念和方法	358
二、相位像的灰度表示	359

三、相位差像	359
四、在相位分布图中的运动伪影	360
五、用相位像检查主磁场均匀性	360
六、测量磁化率分布	361
七、用“斑马条纹”相位像显示流动效应	364
§ 6 MR 流动测量, 飞行时间法	364
一、团注激发跟踪测量方法	364
二、激发团注一维跟踪法	366
三、团注预饱和跟踪测量方法	366
四、临床应用	367
§ 7 流动测量, 相敏法	368
一、相敏法测量流动的 SE 序列	368
二、相敏法测量流动的 GE 序列	369
三、用相位差对比度测量流动仿真(phantom)的实例	371
四、应用相敏法应注意的问题	371
五、用一维相位数据(RACE)测流速	373
六、RACE 的临床应用价值	374
§ 8 MR 速度成像	374
§ 9 血管造影(MRA), 飞行时间(TOF)法	378
一、二维流入敏感(或 TOF)法	379
二、最大强度投影显示	381
三、三维傅里叶变换梯度回波 TOF	381
四、黑血造影, 最小强度投影	386
五、三维快速黑血成像和黑血 MRA	387
§ 10 相对对比度血管造影(PC MRA)	389
一、用相位探测运动的原理	389
二、PC MRA 的重要属性	395
三、相敏流动成像脉冲序列	396
四、数据后处理	398
五、临床应用	399
§ 11 全身 MRA	405
一、对比度最佳化	405
二、头和颈 MRA	405
三、心血管成像	406
四、肾动脉	409
五、四肢血管成像	410
六、未来发展前景	411
参考文献	411