



磁共振成像系统的 电磁理论与构造方法

王秋良/著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

磁共振成像系统的电磁理论与构造方法

王秋良 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以作者及其合作的研究团队多年的研究成果为基础,结合国际上前沿的研究进展和动态,系统地介绍了磁共振成像原理,磁共振成像设备设计的电磁场理论基础,磁共振超导磁体设计,高磁场超导磁体及其建造技术,梯度线圈、射频线圈、精细匀场的有源匀场和无源匀场等设计原理与方法,磁共振快速成像方法及重建技术。最后介绍了非标准几何结构的高温超导磁共振磁体及屏蔽电流,静磁场、时变梯度场、射频场的生物效应等内容。本书集学术性与实用性为一体。

本书读者对象为从事磁共振成像相关领域学者、企业从业人员、科研院所研究人员、科研一线攻关的青年学者,特别是设备研制人员及有创新愿望的研究生和高年级本科生等,旨在帮助读者学习磁共振成像各分解部件的设计理论与方法及建造技术,了解国内外磁共振成像的研究现状,认清发展趋势,由此带动我国磁共振成像产业的发展。

图书在版编目(CIP)数据

磁共振成像系统的电磁理论与构造方法/王秋良著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056864-9

I. ①磁… II. ①王… III. ①核磁共振成像—研究 IV. ①R445.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 048470 号

责任编辑:钱俊 / 责任校对:杨然

责任印制:肖兴 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年3月第一次印刷 印张:46 3/4

字数:920 000

定价:398.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

我十分高兴应邀为王秋良博士的学术巨著《磁共振成像系统的电磁理论与构造方法》作序。

秋良是我熟知且有长期合作的电工和磁共振领域的优秀中青年才俊。就我所知,他于1994年获得工学博士学位后,曾先后在日本九州大学超导科学研究中心、韩国电气研究所、三星高等技术院、英国牛津仪器公司和德国重离子加速器中心从事磁体科学和技术的设计研究,这些历练非常有助于他日后的学术发展。他于1999年入选中国科学院“百人计划”而加入电工研究所,此后一直专注于电工、电能新技术研究,包括极高磁场应用超导磁体科学和技术、特种超导电工装备、低温工程、空间磁体科学、加速器磁体技术、低温传质传热、工程电磁场、大规模的计算软件和材料制备技术等。凭借杰出的工作,他于2007年入选国家“百千万人才工程”,2009年获得国家“杰出青年科学基金”资助,2016年入选国家“万人计划”。

磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)是利用物质中所含的磁性原子核与外加磁场相互作用产生的核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)效应而成像的高新技术,产生于1973年。这种技术产生的医学影像大约在30年前开始成为独立的临床诊断影像,现如今是当代医院不可或缺的技术。有趣的是,在国外当时有不少人不喜欢原子核(误以为或与核弹或核辐射有关)这个词,因此只称为磁共振。在我国,大众还都把医院的MRI就叫做核磁共振。

医用MRI设备大体上分为永久磁体类的普及型和超导磁体类的强场高端型。据2013年的统计,世界范围内的磁共振成像设备已超过15万台,当年新增超过15000台(绝大多数为高端超导型)。据估计,目前全球医院的MRI年更新率(新增和换旧)也保持在15000台以上。相较于我国,2013年同期已装机量只接近1万台,其中超导MRI只有3000多台。可以说MRI是物理科学造福于人类的巨大贡献之一,堪与激光并列。正因如此,2003年的诺贝尔生理医学奖授给MRI。还值得一提的是,两位获奖人:一位是物理学家,另一位是化学家。

要获得MRI的医学影像,必须有磁共振成像的设备。而生产和研制高性能MRI设备的关键技术多掌握在国外大型企业和研究机构中。我国MRI的研制始于20世纪80年代,现已有多家公司可生产低场永磁和高场超导MRI设备。但由于起步较晚,国内的高场超导MRI产品的整体水平和市场占有率都还远落后于世界先进水平。目前我国只能主导低场永磁MRI产品,这是因为国外大公司的退出。而至今我国众多医院和科研机构都不得不付出高昂的代价购买进口的高场MRI设备。2013年世界经合组织(OECD)统计25个发达国家中,平均每百万人口就保有14台超导MRI。按此推算,我国和世界上其他国家的高端MRI会有巨

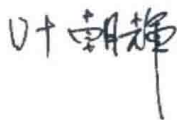
大的增长空间。有鉴于此,推进我国高端 MRI 的研制和生产迫在眉睫。

高端 MRI 系统是集超导磁体技术、低温技术、数字信号处理技术和图像处理技术等多学科、多技术于一身的高科技产品。为了完成新设备的研制,以实现临床应用的拓展,需要相关的科学和技术人员掌握足够的磁共振理论知识和部件的研制方法。秋良和他率领的研究团队多年从事超导 MRI 设备的研制,不但与合作单位共同研制出 0.5~0.7 T 开放结构、1.5~3 T 短腔宽孔结构、3~7 T 动物成像系统,而且在国家重大仪器等项目的支持下开展了 9.4 T 超高场代谢磁共振成像系统的研制。在此基础上,他总结了自己团队及合作者多年的研究成果,结合国际上的前沿研究进展和动态,著成《磁共振成像系统的电磁理论与构造方法》一书,相信其出版必将有利于我国磁共振成像事业的发展。

我有幸浏览了本书的手稿,得知本书以 MRI 系统的工程实现为主线,全面介绍有关 MRI 系统所涉及的知识,是一本关于 MRI 工程科学的专著。本书采用明晰的解析方式,从磁共振成像概述入手,简要介绍了磁共振成像发展历程、成像原理、系统构成、常用脉冲序列及未来发展趋势。之后,重点介绍了磁共振成像系统中各硬件的电磁理论与设计方法,包括电磁理论基础知识,超导磁体、梯度线圈、有源匀场线圈、无源匀场和射频线圈这些关键部件的设计原理与方法。此外,书中还结合国际前沿技术介绍了磁共振快速成像方法和图像重建技术及高温超导磁体技术在磁共振成像领域的应用。值得一提的是,本书还介绍了 MRI 设备电磁安全的分析方法,这有助于回答普遍关注的强磁场 MRI 的人体安全性问题。

在我见到的同类著作中,这本书具有理论和实践相结合、原理和应用相结合的特点。该著作能跟踪最新的磁共振成像技术,并结合著者自身多年的研究经验来组织撰写,颇具特色。

我向从事磁共振研制、研究的广大工程技术人员、研究生推荐这本书,相信这也是有益于相关领域科技工作者的参考书。



中国科学院武汉物理与数学研究所研究员

中国科学院院士

2018 年新春于武昌小洪山

前 言

磁共振成像(MRI)是继计算机断层扫描技术之后医学影像学的又一重大进步。自1980年第一台商用磁共振成像系统推出后,磁共振成像设备走过了从理论到实践、从形态到功能、从宏观到微观的发展历程。目前磁共振成像已成为不可或缺的临床成像方法,不仅可以为根据诊断需要提供成像组织灵活多样的对比度,而且可用于解剖学和生理学研究。

受益于高磁场超导磁体技术的进步,磁共振成像设备的磁场强度不断提高。高场MRI系统的信噪比高,具有更高的图像分辨率,可以看到比低场MRI更多的细节,能够进行分子水平的成像,研究组织的功能和代谢,特别是可用于脑认知科学的研究。随着MRI技术的进步,其应用范围不断扩大;而随着医学应用的不断深入,又对MRI设备提出了新的要求,从而促进MRI技术的不断创新改善。

随着超导技术、低温技术和先进制造技术等不断发展,超导MRI磁体设备的成本越来越低,超导MRI设备的应用也得到了普及。目前,超导1.5 T和3 T全身MRI设备已成为医院的常规设备,西门子的7 T全身MRI系统已得到FDA的认证,且已有一些研究机构安装了9.4 T超高场MRI系统,明尼苏达大学目前正在研发10.5 T超高场全身MRI系统,德国和法国正在联合研制11.75 T的MRI超导磁体系统。我国对于磁共振设备的研制开展于20世纪80年代,经过多年的努力后已取得长足的进步和可观的成就,低场机器已经具有相当高的国产化程度,国产超导1.5 T MRI商业机已经进入市场,目前正在研制高场3 T MRI设备,且在国家重大仪器等项目支持下已经开展了9.4 T超高场代谢磁共振系统的研制。目前国家正在启动成像设施和极端条件实验装置等重大基础设施的建设,将建成超高磁场的磁共振成像系统和磁共振谱仪系统,为我国的医疗诊断和科学研究提供强有力的技术支撑。

随着我国医疗卫生事业的发展,对高场MRI系统的需求日益增加,但研制高场MRI系统的技术都掌握在国外大型企业和研究机构手中,使得国内医疗机构必须付出十分高昂的代价才能购买到高质量的高场MRI设备,大大增加了医疗机构的负担和国内人民就医的医疗费用。在这种背景下,作者总结了自己与团队及合作者多年研发经验,并结合国际上最前沿的研究进展和动态,著成这本关于磁共振成像系统的电磁理论与构造方法的书籍。希望借此进一步推动国内MRI设备研制技术的发展,为磁共振成像设备设计研制领域中的科研工作者提供理论基础和实践基础。

本书共11章。第1章为磁共振成像概论;第2章介绍了用于磁共振成像设备

设计所需的电磁场理论基础;第3章介绍了MRI超导磁体的设计原理与方法;第4章介绍了MRI高磁场超导磁体技术,包含超导磁体的材料特性、系统冷却、机械效应、磁热耦合及系统制造等一系列技术问题;第5章主要介绍了MRI梯度线圈的设计方法,并简要介绍了梯度线圈的制作、供电、冷却与测试方法;第6章介绍了有源匀场线圈的设计方法,同时给出匀场线圈与磁体的解耦设计及有源匀场线圈的测试方法;第7章介绍了用于精细匀场的无源匀场方法;第8章介绍了射频线圈的分析设计方法,以及相应的接口电路设计;第9章介绍了磁共振快速成像方法及重建技术,包括部分傅里叶采集及重建、非笛卡儿采集及重建、并行成像、压缩感知、低秩稀疏、人工稀疏以及多技术融合加速和重建技术,并对新型快速成像技术进行了展望;第10章介绍了非标准几何结构的高温超导磁共振磁体及屏蔽电流分析;第11章介绍了MRI系统中静磁场、时变梯度场和射频场的生物效应及数值分析方法。

本书是近几年在国家自然科学基金、国家科技支撑计划、973计划、863计划、国家重大科研仪器研制项目、中国科学院项目以及企业和地方政府的支持下开展高场磁共振成像系统研究的结晶,在此非常感谢上述单位和部门的大力支持。

在本书的编写过程中,夏灵教授、刘峰教授和杨文晖研究员、董增仁研究员等提供了有益的帮助,并编写了部分章节内容。感谢许建益董事长、陈文波总经理提供的大量工程实践。感谢博士生牛超群、陈智峰、倪志鹏、朱旭晨、王磊、胡洋、李毅、李兰凯、胡格丽,尤晓菲和硕士生唐文举等参加了部分章节内容的编写以及绘制了书中的插图等。感谢超导磁体及强磁场应用研究部的各位同仁以及未能提及的专家、学者和各位友人在本书的编写过程中提供的大力帮助。非常感谢家人为此所付出的辛勤劳动。

在编写过程中参阅了大量的文献资料和相关插图,在此向它们的作者和有关单位表示真诚的谢意。

由于作者水平有限,在编写过程中可能有些叙述和表达欠妥,缺点在所难免,恳请读者批评指正。

王秋良

中国科学院大学,中科院电工所

Email: qiuliangw@hotmail.com

2016年11月于北京中关村

符 号 表

A	矢量磁位	ϵ_r	相对介电常数
B	磁感应强度(磁通密度)	μ	磁导率
D	电通密度	μ_0	真空磁导率
E	电场强度	μ_r	相对磁导率
H	磁场强度	σ	电导率
M	磁化强度	σ_s	面电流密度
J	电流密度	$\sigma_{f\tau}$	自由体电流密度
J_m	磁流密度	σ_{fs}	自由面电流密度
M	互感	$\sigma_{m\tau}$	等效磁流密度
L	自感	ρ	体电荷密度
v	速度	ρ_s	面电荷密度
T	温度	ρ_{ms}	面磁荷
T	力矩	$\rho_{m\tau}$	体磁荷
I	电流强度	χ	磁化率
R	电阻	n	法线方向单位矢量
Ψ	电流势	e	单位矢量
ψ	流函数	E	杨氏模量
φ	电标量位	ν	泊松比
ψ_m	磁标量位	G	拉梅系数
ϵ	介电常数	Δ	拉梅系数
ϵ_0	真空介电常数		

目 录

序言

前言

第 1 章 磁共振成像概论	1
1.1 磁共振成像的发展历程	1
1.2 磁共振物理原理	4
1.3 磁共振成像的空间定位	9
1.4 磁共振信号采集与图像重建	13
1.4.1 磁共振成像过程中的傅里叶编码	13
1.4.2 磁共振信号采集中的重要性能参数	15
1.4.3 K 空间的基本概念和性质	18
1.4.4 K 空间数据的图像重建	19
1.5 磁共振成像的系统构成	20
1.5.1 磁共振成像的主磁体	20
1.5.2 梯度和射频部分	25
1.5.3 系统控制和信号处理部分	27
1.5.4 计算机部分	27
1.6 磁共振成像脉冲序列	28
1.6.1 脉冲序列简介	28
1.6.2 测定 FID 信号的序列	31
1.6.3 测定自旋回波的序列	32
1.6.4 测定梯度回波的序列	35
1.6.5 梯度自旋回波序列	38
1.6.6 回波平面成像序列	38
1.6.7 螺旋桨技术或刀锋技术	40
1.7 磁共振成像未来发展趋势	41
参考文献	43
第 2 章 磁共振成像系统构造的电磁理论基础	45
2.1 电磁问题的 Maxwell 方程组	45
2.1.1 静态磁场的求解问题	46
2.1.2 时谐电磁场的求解	48

- 2.1.3 理想和非理想导体界面的边界条件 49
- 2.2 具有均匀各向异性磁性介质的磁场 49
- 2.3 空间无源区域磁场问题 50
 - 2.3.1 球坐标系下的磁场问题 51
 - 2.3.2 直角坐标系下的磁场问题 52
- 2.4 载流导体产生的磁场 54
 - 2.4.1 直线载流导体产生的磁场 54
 - 2.4.2 圆弧载流导体产生的磁场 55
 - 2.4.3 蜗线形载流导体产生的磁场 58
- 2.5 线圈的电感计算方法 59
- 2.6 电磁场中的有限差分方法 64
 - 2.6.1 有限差分方法 64
 - 2.6.2 时域有限差分方法 67
- 2.7 流函数的概念 72
 - 2.7.1 流体力学中的流函数 72
 - 2.7.2 线圈设计中的流函数 73
- 2.8 静态磁场中运动导体的感应电场与电流密度 76
 - 2.8.1 计算理论 76
 - 2.8.2 计算实例:均匀磁场中旋转球体的感应电场 79
- 参考文献 79

- 第3章 磁共振成像超导磁体设计 82**
 - 3.1 磁共振成像超导磁体的设计概述 82
 - 3.1.1 磁共振成像超导磁体简介 82
 - 3.1.2 超导磁体设计要求 86
 - 3.1.3 超导磁体设计方法 90
 - 3.2 对称水平温孔型磁共振成像超导磁体的设计 96
 - 3.2.1 被动屏蔽磁共振成像超导磁体设计的数学模型 98
 - 3.2.2 主动屏蔽磁共振成像超导磁体设计的数学模型 100
 - 3.3 对称水平温孔型磁共振成像超导磁体设计实例 101
 - 3.3.1 短腔被动屏蔽全身 1.5 T 磁共振成像超导磁体 101
 - 3.3.2 1.5 T 短腔、主动屏蔽全身磁共振成像超导磁体 105
 - 3.3.3 3.0 T 主动屏蔽、全身磁共振成像超导磁体 113
 - 3.3.4 多均匀区、主动屏蔽 4.7 T 动物成像磁共振成像超导磁体 119
 - 3.4 非对称水平温孔型磁共振成像超导磁体设计 124

3.4.1	设计理论	125
3.4.2	DSV 偏心距离分析	126
3.4.3	非对称、主动屏蔽 1.0 T 磁共振成像超导磁体设计实例	126
3.4.4	双半径、主动屏蔽 3.0 T 磁共振成像超导磁体设计实例	130
3.5	开放式磁共振成像超导磁体设计	133
3.5.1	设计理论	134
3.5.2	预留凹槽的对称、主动屏蔽开放式磁共振成像超导磁体设计 实例	136
3.5.3	PET/MRI 多模成像分裂式超导磁体设计实例	137
3.5.4	非对称开放式磁共振成像超导磁体设计实例	142
3.6	开放式 MRI 混合超导铁磁磁体设计	145
3.6.1	混合线性规划-有限元方法	146
3.6.2	混合遗传算法-有限元方法	151
3.7	超高场强磁共振成像超导磁体设计	154
3.8	磁共振成像电磁扰动屏蔽超导磁体设计	160
3.9	磁共振成像超导磁体的发展趋势	164
	参考文献	171
第 4 章	磁共振成像超导磁体基础	177
4.1	超导磁体常用的材料及其特性	177
4.1.1	低温超导材料	179
4.1.2	高温超导材料	185
4.1.3	超导材料使用的考虑	190
4.1.4	超导磁体的绝缘材料	193
4.2	超导磁体系统的冷却	197
4.3	超导磁体电机机械效应	209
4.3.1	绕制张力的分析	209
4.3.2	超导磁体的热机械效应	213
4.3.3	电磁应力计算模型	215
4.4	超导磁体的磁热耦合	219
4.5	超导磁体失超与低温容器耦合	233
4.6	超导磁体系统制造的若干问题	238
4.6.1	超导磁体制造的工艺路线	239
4.6.2	超导磁体的绕制和浸渍	240
4.6.3	磁体的组装	245

4.6.4	接头和开关	245
4.6.5	磁体的测试和试运行	249
	参考文献	250
第5章	梯度线圈设计	255
5.1	梯度线圈的设计需求	255
5.1.1	梯度线圈的设计问题	255
5.1.2	梯度线圈的设计要求	256
5.1.3	梯度线圈设计的难点	258
5.2	梯度线圈设计方法概述	259
5.2.1	离散电流设计方法	260
5.2.2	连续电流密度设计方法	266
5.3	梯度线圈设计经典目标场法	271
5.3.1	圆柱面梯度线圈设计	271
5.3.2	平面梯度线圈设计	278
5.4	梯度线圈设计改进目标场法	283
5.4.1	双平面梯度线圈设计	284
5.4.2	圆柱面梯度线圈设计	288
5.4.3	应用实例	293
5.5	结合振动控制的圆柱面梯度线圈设计的目标场法	296
5.5.1	振动模型的建立	297
5.5.2	目标区域为圆柱面的梯度线圈设计	298
5.5.3	目标区域为球面的梯度线圈设计	305
5.6	梯度线圈设计逆边界元法	310
5.6.1	设计理论	310
5.6.2	非对称结构梯度线圈设计	314
5.7	梯度线圈设计等效磁化电流法	320
5.7.1	等效磁化电流法的理论基础	320
5.7.2	非对称横向梯度线圈设计	324
5.7.3	LINAC-MRI 混合系统分裂式横向梯度线圈设计	325
5.8	梯度线圈与低温容器的耦合	328
5.8.1	低频三维柱坐标 FDTD 方法	328
5.8.2	瞬态涡流计算的 FDTD 方法	333
5.9	考虑瞬态涡流的纵向梯度线圈设计	339
5.9.1	设计理论	339

5.9.2 设计案例	345
5.10 梯度线圈的制作、供电、冷却与测试	351
5.10.1 梯度线圈的制作	351
5.10.2 梯度线圈的供电	351
5.10.3 梯度线圈的冷却	352
5.10.4 梯度线圈的性能测试	352
5.11 梯度线圈的发展趋势	354
参考文献	358
第6章 有源匀场线圈	363
6.1 有源匀场线圈设计理论与方法	363
6.1.1 有源匀场线圈设计理论	363
6.1.2 有源匀场线圈设计要求	366
6.1.3 有源匀场线圈设计方法	366
6.2 有源匀场线圈设计的解析法	369
6.2.1 径向匀场线圈设计理论	369
6.2.2 径向匀场线圈设计结果	375
6.2.3 轴向匀场线圈设计理论	377
6.2.4 轴向匀场线圈设计结果	380
6.3 有源匀场线圈设计的数值法	387
6.3.1 设计理论	387
6.3.2 设计案例	390
6.4 圆柱面有源匀场线圈设计的目标场法	399
6.4.1 设计理论	400
6.4.2 设计案例	403
6.5 双平面有源匀场线圈设计的目标场法	413
6.5.1 设计理论	414
6.5.2 设计案例	417
6.6 平面型有源匀场线圈设计的谐波-磁场联合优化设计	426
6.6.1 设计理论	427
6.6.2 谐波-磁场混合优化数学模型	431
6.6.3 设计案例	432
6.7 有源匀场线圈设计的逆边界元法	435
6.7.1 设计理论	435
6.7.2 设计案例	435

6.8	高磁场成像磁体的 Z_2 匀场线圈的解耦	444
6.8.1	设计理论	444
6.8.2	设计案例	445
6.9	有源匀场线圈的测试	450
6.9.1	实验原理和方法	450
6.9.2	匀场实验案例	450
	参考文献	457
第7章	无源匀场方法	460
7.1	无源匀场原理与方法简介	460
7.1.1	匀场片磁场分析	462
7.1.2	优化算法分析	463
7.2	匀场片磁场分析	465
7.2.1	圆柱形匀场片产生的磁场	465
7.2.2	矩形匀场片产生的磁场	465
7.2.3	匀场片产生的球谐波分析	467
7.3	基于磁场优化的无源匀场方法	472
7.3.1	设计理论	472
7.3.2	设计案例	473
7.4	基于 L_1 范数正则化最小二乘算法的无源匀场方法	475
7.4.1	设计理论	475
7.4.2	设计案例	475
7.5	非规则成像区域的无源匀场方法	478
7.5.1	设计理论	478
7.5.2	设计案例	479
7.6	考虑磁耦合模型的无源匀场方法	480
7.6.1	设计理论	480
7.6.2	设计案例	482
7.7	基于谐波优化的无源匀场方法	484
7.7.1	设计理论	485
7.7.2	设计案例	485
7.8	混合磁场-谐波优化的无源匀场方法	488
7.8.1	设计理论	488
7.8.2	设计案例	489
7.9	无源匀场等效磁流法	493

7.9.1	设计理论	493
7.9.2	设计案例	496
7.10	无源匀场磁化强度映射法	498
7.10.1	设计理论	498
7.10.2	设计案例	500
7.11	无源匀场实施	502
7.11.1	无源匀场流程	502
7.11.2	无源匀场设备	503
7.11.3	无源匀场案例	503
	参考文献	505
第 8 章	射频线圈设计	508
8.1	磁共振射频线圈介绍	508
8.1.1	射频线圈技术的发展	508
8.1.2	射频线圈的性能指标	511
8.1.3	射频线圈的设计要求	513
8.1.4	射频线圈的设计方法	513
8.2	磁共振射频线圈系列	518
8.2.1	亥姆霍兹线圈	518
8.2.2	螺管线圈	518
8.2.3	四线结构线圈	519
8.2.4	管状谐振器	520
8.2.5	鸟笼线圈	521
8.2.6	表面线圈	522
8.2.7	相控阵线圈及并行成像	523
8.2.8	旋转射频线圈技术	523
8.3	等效电路分析方法	524
8.3.1	LC 谐振电路	525
8.3.2	矩形平面射频线圈分析	526
8.4	矩量法分析射频线圈	527
8.4.1	矩量法原理	527
8.4.2	电磁场中的矩量法	528
8.4.3	术中多通道射频接收线圈分析	530
8.5	射频线圈设计逆方法	532
8.5.1	设计理论	532

8.5.2 设计案例	534
8.6 混合 MoM/FDTD 方法分析射频线圈	537
8.6.1 混合 MoM/FDTD 方法	538
8.6.2 表面线圈分析	539
8.7 射频线圈的接口电路	540
8.7.1 线圈的调谐与匹配	540
8.7.2 发射/接收开关	542
8.7.3 发射线圈与接收线圈的解耦合	543
8.8 射频系统的发展趋势	544
参考文献	546
第 9 章 磁共振快速成像方法及重建技术	551
9.1 部分 K 空间采样及其重建技术	551
9.2 非笛卡儿采样及其重建技术	556
9.2.1 简介	556
9.2.2 非笛卡儿采样重建算法	557
9.2.3 逆网格化算法	562
9.3 并行成像及其重建技术	563
9.3.1 基于笛卡儿采样轨迹的经典并行成像技术	564
9.3.2 基于非笛卡儿采样轨迹的经典并行成像技术	569
9.4 随机采集及稀疏数据重建	576
9.4.1 压缩感知	576
9.4.2 压缩感知在 MRI 中的应用	582
9.4.3 低秩矩阵填充及其在 MRI 中的应用	583
9.5 人工稀疏	584
9.6 多种快速采样方法相结合的成像及重建技术	588
9.6.1 融合了 PI 和 CS 稀疏的方法——k-t Sparse SENSE 和 iGR-ASP 等快速成像方法在三维 MRI 中的应用	590
9.6.2 融合了 PI、CS 和 LR 等稀疏的方法——L+S 快速成像方法在三维 MRI 中的应用	591
9.7 新型快速成像技术展望	592
9.7.1 MRF 原理	593
9.7.2 MRF 实现流程	593
9.7.3 MRF 的发展与改进	594
参考文献	596

第 10 章 非标准磁共振成像高温超导磁体技术	610
10.1 非标准几何结构的磁共振超导磁体系统	610
10.2 MgB_2 高温超导磁共振磁体技术	621
10.2.1 高温 MgB_2 超导线材的接头技术	621
10.2.2 高温超导 MgB_2 磁体的冷却	622
10.2.3 超导 MgB_2 核磁共振磁体的研制	623
10.3 Bi 系和 Y 系高温超导磁共振磁体技术	626
10.3.1 全身 Bi 系高温超导 MRI 磁体	627
10.3.2 YBCO 高温超导 MRI 磁体	630
10.4 极高场核磁谱仪磁体技术	637
10.4.1 30 T NMR 磁体概念设计	638
10.4.2 1.02 GHz NMR 磁体	641
10.4.3 1.3 GHz NMR 磁体	644
10.5 高温超导磁体中的屏蔽电流	649
10.5.1 屏蔽电流的产生机理	650
10.5.2 屏蔽电流分析理论模型	653
10.5.3 消除感应电流的方法	665
参考文献	668
第 11 章 磁共振成像系统的电磁生物效应	677
11.1 MRI 系统的电磁生物效应	677
11.1.1 静磁场的生物效应	678
11.1.2 梯度场的生物效应	680
11.1.3 射频场的生物效应	681
11.2 电磁安全标准与数值仿真方法	682
11.2.1 MRI 电磁安全标准	682
11.2.2 数值仿真方法	683
11.3 时域有限差分方法	686
11.3.1 柱坐标系中的时域有限差分方法	686
11.3.2 射频场生物效应计算案例	690
11.4 高分辨率时域有限差分方法	691
11.4.1 高分辨率时域有限差分方法	692
11.4.2 梯度场生物效应计算案例	694
11.5 基于分布式等效磁流的时域有限差分方法	695