

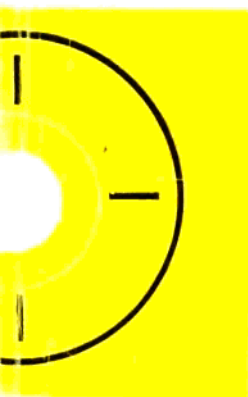
核磁共振



成像技术

廖孟杨 主编

武汉大学出版社



94
R445.2
3
2

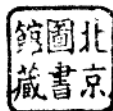
核磁共振成像技术

廖孟扬 主编



3 0147 0135 7

武汉大学出版社



C

000147

(鄂)新登字 09 号

图书在版编目(CIP)数据

核磁共振成像技术/廖孟扬 主编

——武汉:武汉大学出版社,1994.4

ISBN 7-307-01627-3

I. 核…

II. 廖…

III. ① 核磁共振——应用,在影像诊断学中的 ② 影像诊断学

——核磁共振——应用

IV. R445.2 O 482.53

武汉大学出版社出版发行

(430072 武昌 珞珈山)

武汉大学印刷厂印刷

1994年4月第1版 1994年4月第1次印刷

开本:850×1168 1/32 印张:8.75

字数:218千字 印数:1—1000

ISBN 7-307-01627-3/R·29 定价:14.00元

内容简介

本书较全面系统地介绍核磁共振成像(MRI)的基本原理、系统组成及调试方法,全书共分作八章。第一、二两章介绍核磁共振的基本原理和成像的基本方法;第三、四两章分别介绍射频磁场与梯度场在MRI系统中的作用以及它们的形成;第五章介绍核磁共振信号的提取、存贮、处理、重建和显示方法;第六章介绍系统的软件,分析成像系统的各种模块功能;第七章介绍磁体的原理、结构和作用;第八章介绍MRI系统的安装及调试。

本书可供教学、科研、生产单位从事医学成像的工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业的大学高年级学生及研究生作教学参考。



前 言

核磁共振成像(MRI)是80年代出现的崭新的成像技术。它通过检测人体内的氢原子核在足够强的外加恒定磁场中产生的共振信号来对人体组织成像,是当前最先进的医疗诊断手段。当今MRI所产生的巨大吸引力,不仅仅是由于它能得到清晰的人体组织图像,而且它对人体不会造成放射性损害。MRI的日益广泛应用,使人类对自身的结构及有关疾病信息的理解,可以更加深刻和透彻。因此,国内外对于MRI的发展日益给予极大的热情和关注。

随着我国国民经济的迅速发展,为了适应人们对医疗条件和健康水平不断提高的需要,近几年来我国已有不少医院花了近十万元人民币购置了核磁共振成像设备。目前,越来越多的人希望学习、了解和掌握核磁共振成像技术,有关工程技术人员则更希望了解核磁共振成像系统的结构和它的安装调试过程。鉴于目前国内系统地介绍核磁共振成像技术的论著较少,为适应目前社会的需求,我们编写了这本较系统地阐述MRI的基本原理、系统组成及调试等方面的技术性较强的参考著作。

本书共分八章。第一、二两章介绍核磁共振的基本原理和成像的基本方法,旨在阐明核磁共振成像的基本物理概念,不追求严格的数学推导,仅使用了最低限度的数学来表达基本概念。第三、四两章分别介绍射频磁场与梯度磁场在MRI系统中的作用以及它们的形成过程,并列举了一些实际电路作为参考。第五章介绍核磁共振成像信号的提取、存贮、处理、重建和显示方法,着重在原理性的描述和信号的流向上。第六章介绍系统的软件,从设计思路入手,分析了成像系统软件的各种模块功能。第七章介绍成像系统的核心设备——磁体的原理、结构和作用。最后一章介绍成像系统的

安装及调试过程。

本书可供工程技术人员特别是从事医学影像设备的工程师们作技术参考,同时可作高等院校有关专业的大学高年级学生及研究生作教学参考资料。

本书由武汉大学图像信息技术研究所所长廖孟扬教授主编。前后参加本书编著工作的有本研究所的章家美教授、陈金峰副教授、王思贤副教授、张东(硕士)讲师、王文伟(硕士)讲师、徐排勤工程师及90级研究生崔义超、向新明、张海强和周全红。

在本书的编写过程中,北京科健公司的韩跃工程师,广州军区武汉陆军总医院放射科的张东阳主任、鲁汉彬和何洪林工程师及本研究所的敖汉兰、杨哲鹏同志和许多研究生都给予了热情的关怀和支持。本书由梁红同志协助绘图。在此特向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促和我们水平所限,书中难免会有错误和不妥之处。恳请读者批评指正。

编著者

1993年12月于武汉大学

目 录

第一章 核磁共振原理	1
§ 1.1 核磁共振现象	1
1.1.1 原子核的性质	1
1.1.2 核磁共振条件	3
§ 1.2 宏观磁化强度矢量的运动	8
1.2.1 核弛豫	8
1.2.2 磁化强度矢量的运动方程	10
1.2.3 自由感应衰减	19
§ 1.3 NMR 成像的基本原理	21
1.3.1 概述	21
1.3.2 梯度场的作用	23
1.3.3 区域选择	27
1.3.4 RF 脉冲序列	38
第二章 核磁共振成像方法与成像系统	44
§ 2.1 引言	44
§ 2.2 成像方法	45
2.2.1 场聚焦核磁共振法(FONAR)	45
2.2.2 灵敏点和灵敏线方法	47
2.2.3 选择激励的线扫描法	53
2.2.4 平面自旋成像法	60
2.2.5 回波平面成像法	63
2.2.6 投影重建法	67
2.2.7 傅立叶组合层析摄影	72
§ 2.3 成像方法的比较	77
§ 2.4 成像系统简介	78

第三章 射频场	82
§ 3.1 原理和框图	82
§ 3.2 射频线圈与发射/接收转换开关	85
§ 3.3 发射通道	90
3.3.1 频率合成器	90
3.3.2 发射混频器	92
3.3.3 发射衰减器	93
3.3.4 功率放大级	96
3.3.5 发射控制	101
§ 3.4 接收通道	102
3.4.1 低噪声前置放大器	102
3.4.2 接收衰减器	104
3.4.3 接收混频与中频滤波	107
3.4.4 相敏检波器	108
3.4.5 低频放大与低通滤波	110
3.4.6 A/D 变换器	115
第四章 梯度磁场的产生	117
§ 4.1 原理与框图	117
§ 4.2 梯度场线圈	119
§ 4.3 梯度电流驱动部分	122
4.3.1 梯度电流前置放大器	122
4.3.2 梯度电流功率驱动电路	124
§ 4.4 高压开关控制与高压开关	127
4.4.1 高压开关控制电路	127
4.4.2 高压开关电路	127
4.4.3 涡流补偿	129
第五章 数据的采集、重建和显示	131
§ 5.1 概述	131

§ 5.2 图像的采集	132
5.2.1 梯度波形的产生	132
5.2.2 射频脉冲控制器	135
§ 5.3 图像的重建	137
5.3.1 海量存储器	138
5.3.2 错误检校板	140
5.3.3 阵列处理机(AP)及其接口	142
§ 5.4 图像的显示	147
5.4.1 显示系统概述	147
5.4.2 帧存及其接口	148
5.4.3 数字/字符电路	149
5.4.4 视频输出板	150
 第六章 核磁共振成像(MRI)系统基本软件	 153
§ 6.1 原始数据采集	153
6.1.1 程序设计思想	153
6.1.2 模块实现	159
6.1.3 菜单实现	162
§ 6.2 图像重建	164
6.2.1 程序设计思想	164
6.2.2 模块实现	166
6.2.3 菜单实现	168
§ 6.3 图像显示	169
6.3.1 显示的内容	169
6.3.2 基本软件模块	170
6.3.3 菜单实现	171
 第七章 磁体系统	 173
§ 7.1 低温超导原理及超导磁体的结构	173
7.1.1 低温超导原理	173
7.1.2 超导磁体的结构	174

7.1.3 冷却装置的结构	176
§ 7.2 主线圈和匀场线圈	178
7.2.1 主线圈的结构及主磁场分布	178
7.2.2 匀场线圈	182
7.2.3 线圈的工艺技术	187
7.2.4 线圈的冷却方式	188
§ 7.3 超导磁体的供电装置	189
7.3.1 电流引线	190
7.3.2 超导开关	192
7.3.3 超导磁体的供电电源	193
§ 7.4 超导磁体的稳定性	194
§ 7.5 其它类型的磁体系统	195
7.5.1 电磁体设备	196
7.5.2 永磁体设备	198
 第八章 核磁共振成像仪的安装与调试	 200
§ 8.1 安装环境	200
§ 8.2 射频部分的安装与调试	201
8.2.1 RF 发射/接收开关和前放的安装	201
8.2.2 RF 线圈的安装	202
8.2.3 接收机测试	202
8.2.4 发射机测试	204
§ 8.3 梯度场电路部分的安装测试	205
8.3.1 梯度线圈的安装	205
8.3.2 梯度部分的功能测试	206
8.3.3 电源供应的故障寻迹	207
8.3.4 梯度电路板的故障寻迹	207
§ 8.4 系统预调试	210
8.4.1 系统增益和偏移调整/接收机噪声和偏移测量	210
8.4.2 寻找 NMR 信号	211
8.4.3 梯度相位调整	212
8.4.4 RF 线圈调整至中心	213

8.4.5	主磁场均匀性	214
8.4.6	磁体稳定性	215
8.4.7	接收机平衡	215
8.4.8	涡流检测	216
8.4.9	梯度校准	217
8.4.10	发射增益调整	218
§ 8.5	最终调试	221
8.5.1	多切片/多回波	221
8.5.2	样品信噪比	228
8.5.3	图像信噪比	228
§ 8.6	磁体系统的操作与保护	229
8.6.1	磁体夹层的抽真空	233
8.6.2	磁体预冷和 LHe 的灌注	234
8.6.3	超导磁体的升流	239
8.6.4	主磁场均匀性的调整——匀场	247
8.6.5	超导磁体的失超及其保护	252
8.6.6	冷却剂液面的监测	257
8.6.7	磁体的维护及安全使用	261
主要参考文献		265

第一章 核磁共振原理

§ 1.1 核磁共振现象

1.1.1 原子核的性质

一、原子核的自旋

在核磁共振的研究中,自旋角动量和磁矩是原子核的两个非常重要的性质。实验表明,大多数的原子核具有自旋运动,从而具有自旋角动量。可以形象地把原子核看作陀螺,它围绕着某个轴作自身旋转运动,核自旋角动量 $\mathbf{P}$ 的方向与旋转轴相重合,大小为:

$$|\mathbf{P}| = \frac{h}{2\pi} \sqrt{I(I+1)} = \hbar \sqrt{I(I+1)} \quad (1.1-1)$$

式中, h 是普朗克常数, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, I 为自旋量子数,只能取零、半整数或者整数。

具有偶数质量数的原子核的 I 值都是整数,而质量数为奇数的原子核 I 值都是半整数,如 H_1^1 、 C_6^{13} 、 N_7^{15} 、 F_9^{19} 、 P_{15}^{31} 等原子核的 $I = 1/2$,这几种核是核磁共振中最主要的研究对象。

根据量子力学,核自旋角动量 $\mathbf{P}$ 在任一方向上的投影只能取一些量子化的数值,并且,在任一坐标系 XYZ 中, $\mathbf{P}$ 在三个坐标轴上的投影 P_x 、 P_y 、 P_z 不可能同时具有确定的数值。不妨假定 P_z 是确定的,则 P_x 、 P_y 就不能有确定的数值。 P_z 只能取下列不连续的数值:

$$P_z = \frac{h}{2\pi} M = M\hbar \quad (1.1-2)$$

式中 M 是原子核的磁量子数, 只能取从 I 到 $-I$ 的 $(2I+1)$ 个整数, 即 $M=I, I-1, \dots, -I$ 。因此, P_z 也只能取 $(2I+1)$ 个数值, 其中最大值 $P_{z\max}$ 通常用 P 表示, 由式 (1.1-2) 得到:

$$P = I\hbar \quad (1.1-3)$$

通常把这个核自旋角动量的投影最大值 P 称为核自旋。核自旋角动量的空间量子化, 如图 1.1.1 所示。

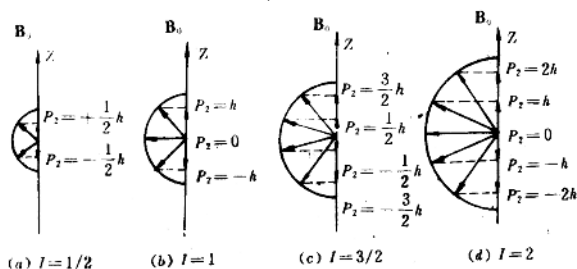


图 1.1.1 核自旋角动量的空间量子化

二、原子核的磁矩

原子核带有一定的正电荷, 由于 $I \neq 0$ 的核都有自旋运动, 因此这些电荷也围绕着旋转轴旋转, 从而会产生一个磁场。一般是用磁矩来描述这种磁性质, 凡是自旋不为零的原子核都具有磁矩。原子核带正电, 因此核磁矩 μ 的方向与 $\mathbf{P}$ 相同, 大小为:

$$|\mu| = g \frac{e}{2m} |\mathbf{P}| = \gamma |\mathbf{P}| \quad (1.1-4)$$

式中, e 为质子电荷, m 是质子质量。 g 称为核的 g 因子, 是一个无量纲的系数。 $\gamma = g \frac{e}{2m}$ 称为磁旋比, 是描述原子核特性的一个参

数。后面将看到,核磁共振条件也与 γ 值有关。

原子核磁矩在 Z 方向上的投影为:

$$\mu_z = \gamma P_z = g \frac{e}{2m} M \hbar = \mu_N g M \quad (1.1-5)$$

式中 $M=I, I-1, \dots, -I$ 。 $\mu_N = \frac{e}{2m} \hbar$ 是原子核磁矩的最小值,称为核磁子,一般以核磁子为单位来测量核磁矩。核磁矩投影最大值 $\mu_{z\max}$ 通常用 μ 表示,由式(1.1-5)得到:

$$\mu = \gamma P_{z\max} = \mu_N g I \quad (1.1-6)$$

表 1.1.1 列出了几种原子核的自旋量子数与核磁矩最大投影分量的数值, μ 以核磁子为单位。

表 1.1.1 几种原子核的自旋和磁矩

原子核	I	μ (核磁子)
H_1^1	1/2	+2.79268
H_1^2	1	+0.857387
He_2^4	0	0
C_6^{13}	1/2	+0.702199
Na_{11}^{23}	3/2	+2.21711
K_{19}^{40}	4	-1.291

1.1.2 核磁共振条件

一、拉莫尔进动

大家知道,一个旋转的陀螺,当用外力使它的旋转轴离开垂直方向时,它并不因为重力的作用而倒下来,而是使它的旋转轴围绕垂直方向进行转动,从而描绘出一个圆锥形轨迹,这就是陀螺在地球引力场中的进动(见图 1.1.2a)。同样,由于 $I \neq 0$ 的原子核具有

磁矩 μ , 因此, 如果把它放在静磁场中, 它就要受到场的作用, 当原子核的自旋旋转轴方向与静磁场方向不同时, 由于核的自旋运动, 磁场对核磁矩的作用将使它围绕静磁场方向进行转动 (见图 1.1.2b)。这种转动称为拉莫尔进动。

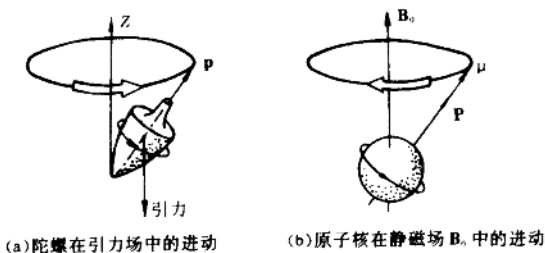


图 1.1.2 陀螺和核磁矩的进动示意图

假定静磁场 B_0 沿 Z 方向, 磁场对 μ 的力矩是:

$$L = \mu \times B_0 = \gamma P \times B_0 \quad (1.1-7)$$

这个力矩引起自旋角动量的变化。根据经典力学可知, 相对于某一点来说, 质量为 m 的刚体的角动量对时间的一阶导数等于作用于该物体的力矩, 即

$$\frac{dP}{dt} = L \quad (1.1-8)$$

可以看出, dP 与 L 方向相同。由式 (1.1-7) 知, L 与 P 相垂直, 因此 dP 也与 P 相垂直。这样, P 只改变方向, 不改变数值。由式 (1.1-7), 若 $\gamma > 0$, 按照右手螺旋法则, 在图 1.1.2b 所示瞬间, L 是垂直于纸面向外的, 而 dP 与 L 方向相同, 因此, 如果从 $+Z$ 轴向 $-Z$ 轴观察, P 将是沿着顺时针方向进动的 (见图 1.1.2b)。

由图 1.1.2b 可以得出:

$$dP = P \sin \alpha \cdot d\psi \quad (1.1-9)$$

式中, α 为 P 与 B_0 之间的夹角, $d\psi$ 是 P 在 dt 时间内绕 Z 轴转过

的角度。因此

$$dP/dt = P \sin \alpha \cdot \frac{d\psi}{dt} = P \sin \alpha \cdot \omega_0 \quad (1.1-10)$$

式中, $\omega_0 = d\psi/dt$ 是进动的角频率。由式(1.1-7), 可得

$$L = \mu B_0 \sin \alpha = \gamma P B_0 \sin \alpha \quad (1.1-11)$$

根据式(1.1-8)、(1.1-10)和(1.1-11), 即可得出:

$$p \sin \alpha \cdot \omega_0 = \gamma P B_0 \sin \alpha$$

所以

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1.1-12)$$

这就是拉莫尔进动角频率的公式。由式中可见, ω_0 与 γ 和 B_0 成正比, 而与 μ 和 B_0 之间的夹角 α 无关。

二、核磁共振效应

核磁矩 μ 在静磁场 B_0 中的能量为:

$$E = -\mu \cdot B_0 = -|\mu| |B_0| \cos \alpha = -\mu_z B_0 \quad (1.1-13)$$

根据式(1.1-5), $\mu_z = \mu_N g M_I (M = I, I-1, \dots, -I)$, 因此核磁矩 μ 在静磁场中的能量只能取一些不连续的值:

$$E_M = -\mu_N g M B_0 = -\frac{e}{2m} \hbar g M B_0 = -\gamma \hbar M B_0 \quad (1.1-14)$$

式中 $M = I, I-1, \dots, -I$ 。这些不连续的能量值称为原子核的能级。

原子核从某个能量状态变到另一个能量状态称为原子核在能级之间跃迁。按照量子力学的选择定则, 只有磁量子数的变化 $\Delta M = 0, \pm 1$ 的跃迁才是允许的。而 $\Delta M = 0$ 的跃迁在这里没有意义, 因此只有 $\Delta M = \pm 1$ 的跃迁, 即相邻能级之间的跃迁才是可能的。原子核发生 $\Delta M = \pm 1$ 的能级跃迁时, 会发射或者吸收圆偏振的电磁波, 电磁波中的旋转磁场矢量的旋转平面垂直于静磁场方向。如果把电磁波作用到原子核上, 当所加电磁波的频率 ν 所决定

的能量量子 $h\nu$ 正好等于原子核相邻能级之间的能量差时,这个电磁波就会引起原子核在这两个能级之间的跃迁。所谓核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, 以下简称 NMR), 就是处于均匀静磁场中的具有磁矩的原子核, 当吸收了相应电磁波的能量后, 在相邻能级间发生的共振跃迁现象。

由式(1.1-14)可得, 相邻能级之间的能量差为:

$$\Delta E = \mu_N g B_0 = \gamma \hbar B_0 \quad (1.1-15)$$

由此得到核磁共振条件是:

$$h\nu = \Delta E = \gamma \hbar B_0 \quad (1.1-16)$$

即

$$2\pi\nu = \gamma B_0 \quad (1.1-17)$$

比较式(1.1-17)和拉莫尔进动角频率 ω_0 的公式(1.1-12)可以看出, $\nu = \omega_0/2\pi$ 。所以, 满足核磁共振条件的电磁波的频率等于拉莫尔进动频率。对应于一般核磁共振成像用的磁场强度, 这个频率落在射频(Radio Frequency, 以下简称 RF)范围内。

在不太严格的情况下, 可以用经典力学的方法, 直观地说明核磁共振现象。

对于一个原子核, 在沿 Z 轴加上静磁场 B_0 的同时, 沿 X 方向再加一个大小交变的磁场 $2B_1 \cos \omega t$, 一般 $B_1 \ll B_0$, 这时我们来看一下核磁矩的变化情况。首先, 可以把上述交变磁场看作是由大小相等、旋转方向相反、旋转角速度为 ω 的两个旋转磁场合成的, 它们的磁场强度都为 B_1 , 其中一个磁场的旋转方向与核磁矩的进动方向相同, 它能够与核磁矩发生相互作用, 而另一个磁场的旋转方向相反, 它与核磁矩的作用时间很短, 因此其作用可以忽略。这样, 就相当于只在垂直于 B_0 的平面上加了一个旋转磁场 B_1 。其次, 为了简化与直观起见, 假设有一个旋转坐标系 $X'Y'Z'$, 它的 Z' 轴与固定坐标系 XYZ 的 Z 轴相重合, X' 、 Y' 轴则围绕 Z' 轴旋转, 并且假设 X' 轴永远与旋转磁场 B_1 相重合, 如图 1.1.3a 所示, 这表示二者的旋转角速度一致, 那么在此坐标系 $X'Y'Z'$ 中就可以认为 B_1