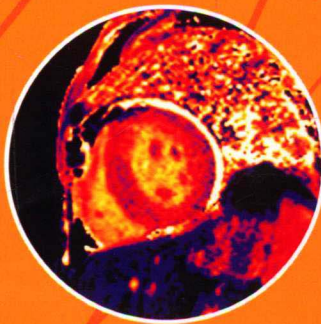


核磁共振 成像原理与技术

HE CI GONG ZHEN CHENG XIANG YUAN LI YU JI SHU

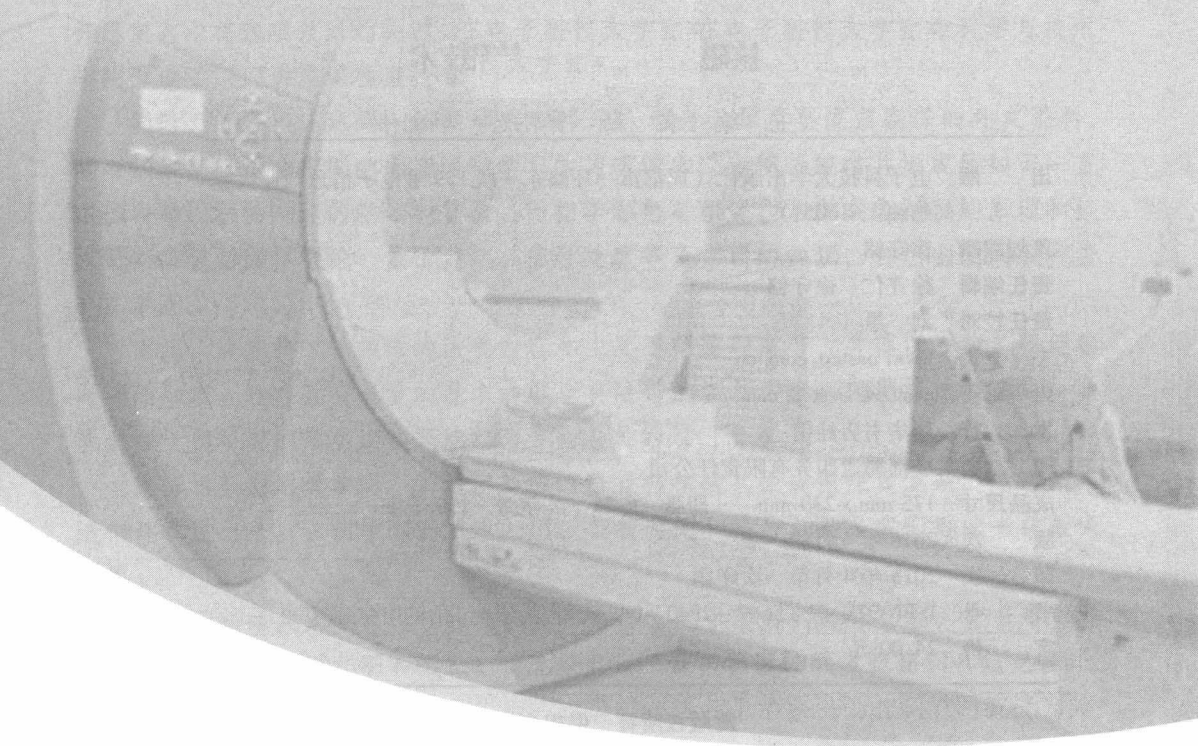
主 编：袁 勤 曾怀忍 毕文伟



电子科技大学出版社

核磁共振成像原理与技术

主 编：袁 勤 曾怀忍 毕文伟



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

核磁共振成像原理与技术/袁勤, 曾怀忍, 毕文伟
主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2015. 4

ISBN 978 - 7 - 5647 - 2940 - 0

I. ①核… II. ①袁… ②曾… ③毕… III. ①核磁共振成像 IV. ①R445. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 070209 号

内 容 简 介

全书共分九章, 内容包括核磁共振成像的基本原理、脉冲序列及其多种成像模式与技术。书中用通俗的语言简明形象地讲解了核磁共振成像原理中的基本物理概念, 讲述了自旋磁矩、拉莫尔进动、核磁共振、磁化矢量弛豫等现象的产生, 并以图文并茂的形式叙述了各种序列的编码和采集, 涉及从信号激发到回波分析等过程的设计。将错综复杂的核磁共振成像过程在限定假设的基础上简化为更容易学习的清晰表述。

本书不仅可供本科相关专业教学使用, 也可作为技术普及资料供对核磁共振成像原理和过程感兴趣的读者使用, 还可供核磁共振临床及应用的研究人员等参阅。

核磁共振成像原理与技术

主 编 袁 勤 曾怀忍 毕文伟

出 版 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦
邮编: 610051)

策划编辑 徐守铭

责任编辑 徐守仁 徐守铭

责任校对 刘 愚

主 页 www.uestcp.com.cn

电子邮箱 uestcp@uestcp.com.cn

发 行 新华书店经销

印 刷 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 175 mm × 230 mm 印张 6.25 字数 150 千字

版 次 2015 年 4 月第一版

印 次 2015 年 4 月第一次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5647 - 2940 - 0

定 价 24.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028 - 83202463; 本社邮购电话: 028 - 83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

核磁共振成像是一种非侵入式的医学成像方法，所使用的低频电磁场与静磁场至今未被证实对有机体存在可验证的副作用（包括染色体畸变率、细胞生长、神经传导速度、心脏收缩及其功能、行为和记忆等的安全性均经过论证）。

虽然 20 世纪 70 年代核磁共振技术才应用于医学成像，但自 1946 年 Bloch 和 Purcell 分别用不同方法观察到核磁共振现象以来，已有多达六项诺贝尔奖授予与核磁共振本身直接相关的技术，涵盖物理、化学、生理医学三个学科范畴。即使是在近些年，核磁共振成像领域仍有很多新的技术与方法在不断涌现，也使得本书一时难以涵盖整个学科版图与研究进展。

正是看到这门学科的前景，主编袁勤自从一年多以前访问范德堡大学时，和曾怀忍便有心将这项技术的关键知识引进国内。随后在电子科技大学生命科学与技术学院开设了一门讲座课程进行专题研究。

同时，编写组注意到，该领域有很多华人学者，却主要依靠翻译的外文资料，缺少一本真正适合中国学生查阅和学习的简明读本，也使得核磁共振成像知识一直在国内难以获得快速的学习和普及。而初学者想要理解和掌握成像过程的原理和技术需具备包括固体理论、量子力学、信号处理等多方面的知识，自己去翻阅各种资料实属不易。

因此，决意将这轮授课的讲稿内容和主要思想整理成书，并辅以一些工程经验与物理知识。这样既有浅显的基本讲解也有附带的拓展内容，以期将该书写成一本既适合于初学者的简明读物又能作为专业人员的入门读本。

编写组努力用简单明了、通俗易懂的语言将核磁共振成像深奥复杂的原理清晰透彻地表述出来。让初学者能快速入门，节省时间和精力，便是我们写此书的最大心愿。

但由于核磁共振成像过程的庞杂性和本书为便于理解的概述初衷，此书难免挂一漏万，希望各位同仁不吝指正，这无疑有助于此书再版的逐步提高和日趋完善。

编 者

2014 年 9 月

目 录

第一章	与核磁共振成像相关的物理概念	1
第二章	核磁共振信号检测原理及流程	12
第三章	核磁共振成像系统的构成	15
第四章	核磁共振图像的重建原理	19
第五章	弛豫过程及基本回波序列	35
第六章	基本成像序列及成像模式	47
第七章	弥散张量成像	75
第八章	脑功能成像	80
第九章	多通道并行成像	86
参考文献		93

第一章

与核磁共振成像相关的物理概念

物理学包括经典物理学和量子力学两大分支。

经典物理学研究的主要内容：热、声、光、电、磁，适用于宏观物体。

采用的研究手段：力、运动及能量。

量子力学与经典力学的区别之一在于：经典物理学认为一个物体的能量取值是可以连续的；量子力学认为一个物体的能量取值是不连续的，只能是分立的，而且状态本身是不确定和不可推断的。量子力学能更好地描述和解释微观粒子的运动规律。核磁共振现象中包含的具体量子力学规律在之后的叙述中用公式进一步归纳，下面首先介绍核磁共振成像中用到的几个经典物理学概念。

一、能量最低原理

一个系统稳定的状态总是当前环境下系统能量最低的平衡状态。与核磁共振中原子核指向趋向性最相关的例子就是当没有外力时，若把两个磁铁棒放在一起，总是正负磁极相反地排列在一起，因为这时它们所处状态的能量最低，最为稳定。

二、电磁感应原理

1. 变化的磁场产生感生电场；
2. 变化的电场产生感生磁场。

电场方向和磁场方向垂直。

三、电流磁效应

与电磁感应要求变化的电场不同，任何通有电流的导线都会在其周围产生磁场，磁场的方向可用右手定则来判断，如图 1-1 所示。

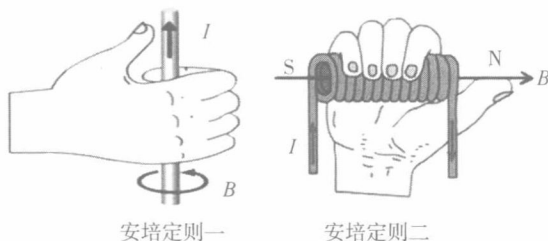


图 1-1 安培定则

安培定则一：通电直导线在周围产生一个环绕的磁场 B ，用右手握住导线，大拇指指向电流的方向，其余四指所指的方向即为磁场中磁力线的方向（或磁针 N 极所受力的方向）。

安培定则二：通电线圈产生磁场 B ，用右手握住线圈，四指指向电流的方向，则大拇指所指的方向为其产生的磁场的磁力线方向。

核磁共振中的主磁场就是利用电流磁效应，在超导线圈中通入电流产生的。

（注：超导线圈是一种特殊的合金材料制作的线圈。当把它浸泡在液氮中保持非常低的温度后，其电阻会降为零，因而通入电流时不会因发热而损耗能量，所以一旦通入电流，撤销外加电源后，其电流依然能持续很多年。）

四、带正电的质子因自旋而拥有磁矩

组成物质的分子由原子组成。原子又分为中心带正电的质子、不带电的中子和外围带负电的电子。原子的构成如图 1-2 所示。

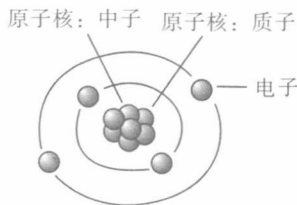


图 1-2 原子构成图

带正电的质子因自旋而拥有磁矩，类似一个小磁针，如图 1-3 所示。带正电的质子会自旋（就像地球自旋一样），正电荷分布其中会随着一起转动，其效果像一系列通电小线圈，因而产生磁效应，从而拥有磁矩 μ （注：质子数和中子数都为偶数的核子没有这一特性）。且自旋磁矩 μ 满足

$$\mu = \gamma h J \quad (1-1)$$

式中， γ 为旋磁比，表征磁矩与角动量比值，是原子的固有参数； h 是普朗克

常数; J 是角动量。

磁矩 μ 的大小与自旋的快慢有关, 自旋的快慢可以用自旋质子的角动量 J 来描述。

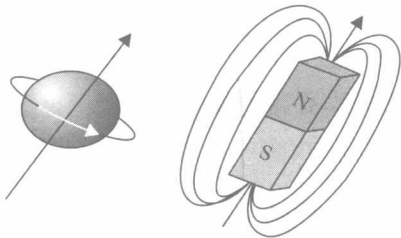


图 1-3 自旋质子、磁矩及其类比图

$$J = \sqrt{I(I+1)} \quad (1-2)$$

式中, I 为自旋量子数, 对 H 质子, I 为 $1/2$, 表征自旋角动量的量子数。

磁矩 μ 在外磁场 B_0 存在时, 保持一定的角度, 如图 1-4 所示。

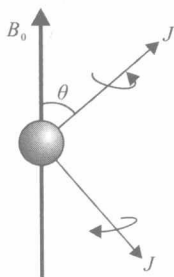


图 1-4 质子自旋磁矩在外场下的状态

角度 θ 的大小可以用角动量在 z 轴上的分量与总的角动量来求得。

$$\cos\theta = \frac{J_z}{J} = \frac{m_I}{\sqrt{I(I+1)}} \quad (1-3)$$

式中, 对 H 质子, I 为 $1/2$; m_I 为 $\pm(1/2)$, 是磁量子数, 表征自旋方向。

五、电磁感应原理

随时间变化的电场或磁场, 在空间中都会形成相应的感生磁场或电场。

把一个小磁铁棒插入或拔出线圈, 或者小磁铁棒从线圈旁边扫过会在线圈中产生电流, 如图 1-5 所示。

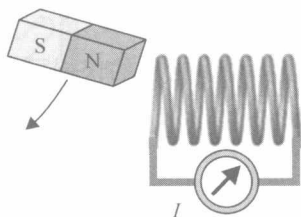


图 1-5 磁铁棒运动时的感生电流

六、法拉第定律

导电线圈中感应电动势 V 与线圈中磁通量 Φ 的变化率成正比，有

$$V(t) = -d\Phi(t)/dt \quad (1-4)$$

$$\Phi(t) = NB(t)S \quad (1-5)$$

式中， N 为线圈匝数； S 为线圈的截面积； B 为磁场强度； $\Phi(t)$ 为磁通量。

磁通量变化时，线圈中产生如图 1-6 所示的电动势，并产生电流，且满足

$$i(t) \propto V(t) \propto d\Phi(t)/dt \quad (1-6)$$

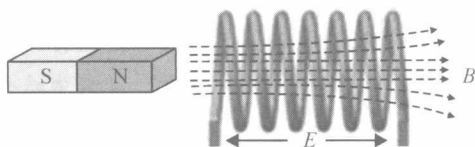


图 1-6 线圈磁通量的变化产生感应电动势

七、拉莫尔进动

质子磁矩在外加磁场中会受到磁力矩的作用，如指南针在地磁场的作用下因磁力矩而旋转，如图 1-7 所示。

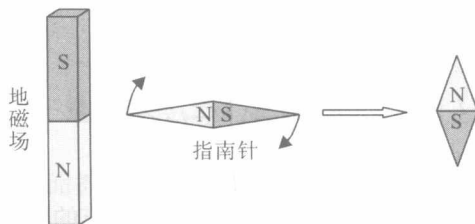


图 1-7 指南针受地磁场产生的磁力矩影响

式中，磁矩 μ 在磁场中受到的磁力矩为

$$l = \mu \otimes B_0 \quad (1-7)$$

式中， $\otimes$ 为叉乘，即矢量积。

磁矩的运动方程为

$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} = \gamma \boldsymbol{\mu} \otimes \boldsymbol{B}_0 \quad (1-8)$$

磁力矩和力矩的概念可能有点抽象，我们用手拧螺钉很难拧动，但用同样的力借助扳手就可轻松拧动，所以物理学中引入力矩 L 这一概念。力矩 L 与作用力的大小有关，还与作用力 F 作用点到旋转中心的距离 R 即力臂有关。扳手越长则力矩越大，拧螺钉越容易。力矩的表达式 (1-9) 和磁力矩非常相似。

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{R} \otimes \boldsymbol{F} \quad (1-9)$$

拉莫尔进动：在磁力矩的作用下，磁矩或自旋质子的自旋轴一旦偏离主磁场，就会绕主磁场旋转（非常类似于旋转陀螺的进动），如图 1-8 所示。

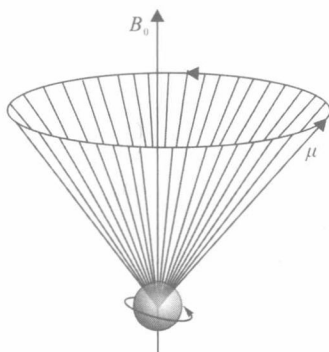


图 1-8 自旋质子的磁矩 μ 绕外磁场 B_0 的进动

进动的频率 ω_0 为

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1-10)$$

在分析磁矩 μ 为何会绕外磁场 B_0 进动之前，我们先来看看以 ω 速度旋转的单位矢量 $\exp(j\omega t)$

如图 1-9 所示，单位旋转矢量的特征是：在每个瞬间其随时间的改变量都垂直于矢量本身。

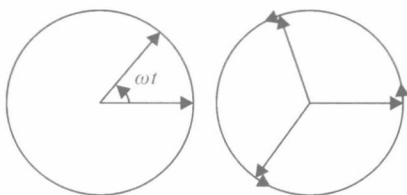


图 1-9 单位旋转矢量变化量的垂直性



下面分析磁矩 μ 为何会绕外磁场 B_0 进动。

先把磁矩 μ 分解为 μ_z 和 μ_{xy} 两个分量, μ_z 沿 z 轴方向, μ_{xy} 开始在 xoy 平面, 如图 1-10 所示, z 轴垂直于图所在的平面。因 μ_z 与 B_0 同方向, 其叉乘为零, 所受到的磁力矩为零, 因此运动状态不变。只需考虑 μ_{xy} , 其所受磁力矩为

$$L = \mu_{xy} \otimes B_0 \quad (1-11)$$

L 与 B_0 即 z 轴垂直, 始终在 xoy 平面, 同时又与 μ_{xy} 平面垂直, 如图 1-10 所示。

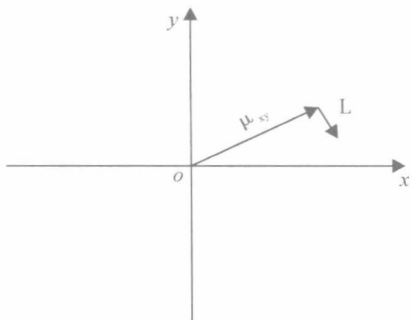


图 1-10 磁矩 μ_{xy} 所受磁力矩 L 示意图

由运动方程(1-8)可得出, 在很小的时间间隔 Δt 内, μ_{xy} 的变化量为 $\Delta\mu_{xy} \perp \mu_{xy}$ 。

$$\Delta\mu_{xy} = \gamma\mu_{xy} \otimes B_0 \cdot \Delta t \quad (1-12)$$

$$\Delta\mu_{xy} = \gamma\mu_{xy} B_0 \Delta t \quad (1-13)$$

因此, 在每个瞬间 μ_{xy} 的变化量都垂直于 μ_{xy} 本身, 对比旋转单位旋转矢量可以得知, μ_{xy} 在磁力矩的作用下在 xoy 平面内绕旋转, 即进动, 如图 1-11 所示。

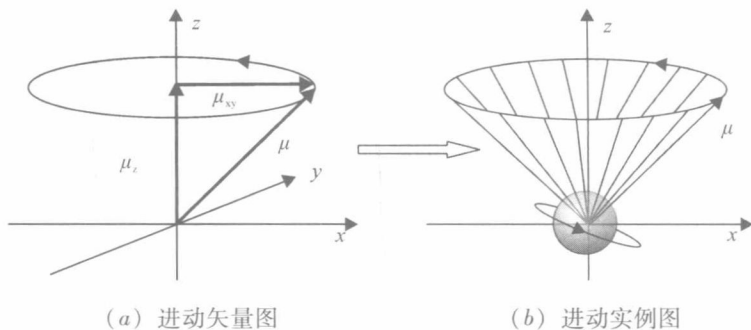


图 1-11

因此, 在很小的时间间隔 Δt 内, 在磁力矩的作用下, μ_{xy} 大小没有变化, 只是方向改变了, 即在旋转。在时间间隔 Δt 内 μ_{xy} 在 xoy 平面旋转的角度 θ 为

$$\theta = \frac{\Delta\mu_{xy}}{\mu_{xy}(t_0)} = \frac{\gamma\mu_{xy}(t_0)B_0\Delta t}{\mu_{xy}(t_0)} = \gamma B_0\Delta t \quad (1-14)$$

角速度 ω 为

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \gamma B_0 \quad (1-15)$$

所以在磁力矩的作用下, μ_{xy} 在平面旋转, 进动频率 (也称拉莫尔进动频率) 为

$$\omega = \gamma B_0 \quad (1-16)$$

八、核磁共振的量子力学解释

由各个自旋质子产生的磁矩合成的总磁矩 M 称为磁化矢量。

无外加磁场时, 原子核中质子的自旋取向是无倾向性的, 任何取向上总的能量都是一样的, 因而各质子自旋磁矩合成的总磁矩 (即磁化矢量 M) 为零, 如图 1-12 所示。

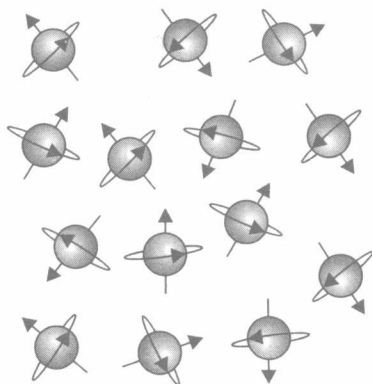


图 1-12 无外场时任意取向的自旋质子

在外加磁场下, 原子核的能态与质子的自旋取向有关。质子的能态和自旋取向是量子化的 (即几个分立的能态和取向), 对于 ^1H 质子, 只有高能态的逆磁取向和低能态的顺磁取向, 顺磁和逆磁取向的数目呈波尔兹曼分布。低能态顺磁取向的数目多于高能态逆磁取向的数目, 如图 1-13 所示。

从图 1-13 中可以看出, 场强大小会影响差异数量。例如, 常温下, 1.5T 外加磁场时, 大约每 200 万个质子中净多出 9 个顺磁排列。同样数目顺磁和逆磁排列的质子自旋磁矩互相抵消。只有净多出的顺磁排列的质子的自旋磁矩才对合成总磁矩 M 有贡献。

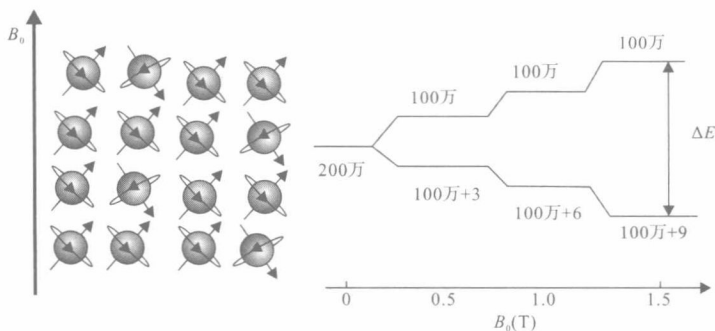


图 1-13 在不同磁场下的能量状态及质子分布数目

将波尔兹曼分布中的指数项按级数展开，忽略高阶项，合成总磁矩即磁化矢量 M_0 可表示为

$$|M_0| = \left| \sum_i \mu_i \right| = \begin{cases} 0 & \text{无外加磁场} \\ \frac{B_0 \gamma^2 \hbar^2}{4kT^2} P_D & \text{有外加磁场} \end{cases} \quad (1-17)$$

式中， P_D 为质子密度； T 为温度； k 为常数； γ 为旋磁比； $\hbar$ 为约化普朗克常数。

核磁共振的量子力学解释：在外加磁场 B_0 中，质子磁矩顺磁场（低能状态）与逆磁场排列的两种状态能量的差值为

$$\Delta E = \hbar \gamma B_0 \quad (1-18)$$

一个质子从一种状态转换到另一种状态必须吸收（或释放）恰好相当的能量，既不能多也不能少。频率为 f 的电磁波其量子化的能量值为

$$E_{RF} = \hbar f \quad (1-19)$$

让处于外磁场中自旋质子接受特定频率 ($f_0 = \gamma B_0$) 的电磁波，使辐射波的能量恰好等于自旋质子两种不同取向状态的能量差 ΔE ，即

$$\hbar f_0 = \Delta E \quad (1-20)$$

如图 1-14 所示，处于低能态的自旋质子吸收电磁辐射能量，而跃升到高能态，这种现象称为核磁共振。



图 1-14 核磁共振示意图

所以，产生核磁共振的必要条件为

$$f_{RF} = \gamma B_0 \quad (1-21)$$

九、核磁共振的经典力学解释

磁矩或磁化矢量在外加磁场中，一旦偏离主磁场，就会以拉莫尔进动频率 ω_0 绕 B_0 进动。

如果选择一个以角速度 ω_0 (x 轴、 y 轴绕 z 轴旋转) 旋转的坐标系 (类似于坐在旋转餐厅，顾客随餐厅一起旋转就不会察觉到别的顾客随餐厅旋转了)，磁矩绕 B_0 的进动在新的坐标系就固定不动了。因为主磁场的作用就是让磁矩或磁化矢量以 ω_0 速度进动，而新坐标系也一样以 ω_0 速度绕 z 轴旋转，所以在旋转坐标系中可以不再考虑 B_0 。

下面的讨论都在旋转坐标系中进行。

通过一个频率为 ω 的射频电磁波在 xoy 平面产生一个磁场， B_1 在 xoy 平面内以角速度 ω 旋转，在旋转坐标系里旋转速度为 $\omega - \omega_0$ ，假设刚开始在 x 轴上。

第一种情况：

$$\omega_{\text{射频}} = \omega_0 \quad (\text{质子磁矩拉莫尔进动频率})$$

这时， B_1 在旋转坐标系中固定在 x 轴上，此时总合成磁矩 M 感受到的只有 B_1 磁场，如图 1-15 所示。

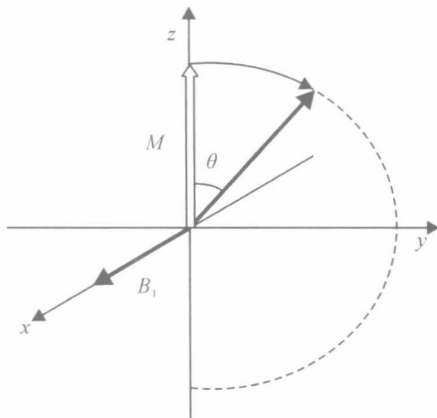


图 1-15 质子总磁矩在外场作用下的偏转

在 B_1 的作用下，总磁矩 M 绕 B_1 进动，即 M 绕 x 轴在 zoy 平面内旋转，由 z 轴向 y 轴偏转，偏转的角速度为进动频率，则



$$\omega(t) = \gamma B_1(t) \quad (1-22)$$

偏转的角度为

$$\theta(t) = \gamma \int_0^t B_1(t) dt \quad (1-23)$$

第二种情况：

ω 为射频电磁波的频率； ω_0 为质子磁矩进动频率。质子总磁矩 M 在频率为 ω 的外磁场 B_1 的作用下发生偏转。

这时 B_1 在旋转坐标系中以角速度 $(\omega_{\text{射频}} - \omega_0)$ 绕 z 轴旋转， B_1 在 x 轴上，会使 M 从 z 轴向 y 轴偏转，如图 1-16 所示。但还没有来得及完成偏转， B_1 就转到了 $-x$ 轴上，此时又使 M 反向偏转从 y 轴向 z 轴偏转，如图 1-17 所示。最终无法产生实质性的偏转。

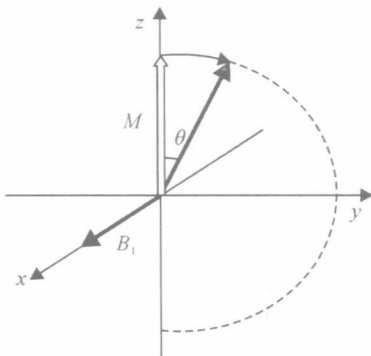


图 1-16 非进动频率下， B_1 在 x 轴时的偏转

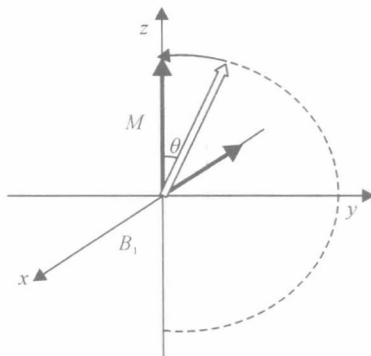


图 1-17 非进动频率下， B_1 在 $-x$ 轴时的偏转

这就非常类似我们常见的荡秋千，只有顺着秋千荡的节奏（类似同步）不断推

拉，秋千才会越荡越高，如果不是顺着节奏，就荡不起来。

十、结论

只有加载一个特定的频率即拉莫尔进动频率的电磁波，产生一个与质子磁矩进动同步旋转的磁场，才能把质子的总磁矩 M 拉偏离到需要的角度，即产生核磁共振。

核磁共振的必要条件是

$$\omega = \omega_0$$

式中， ω 为射频电磁波的频率； ω_0 为质子磁矩拉莫尔进动频率。



第二章

核磁共振信号检测原理及流程

一、核磁共振成像时，主要检测质子（如 ^1H 质子）的合成总磁矩即磁化矢量 M 。

$$M = \sum_i \mu_i \propto {}^1\text{H 质子密度} \quad (2-1)$$

式中， ${}^1\text{H}$ 为质子密度。

无外加磁场时，质子的磁矩是无序排列的，所以，由各质子的自旋磁矩合成的总磁矩为零，如图 2-1 所示。

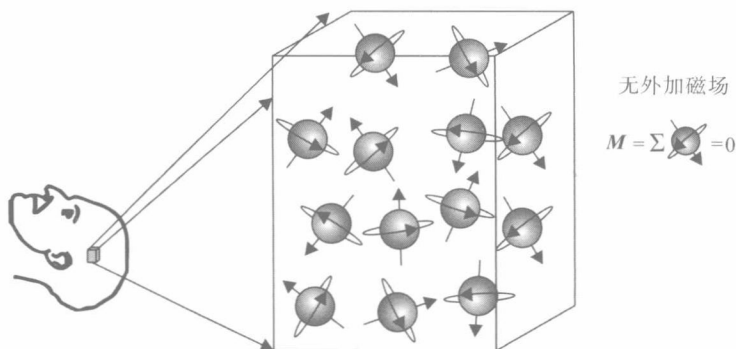


图 2-1 无外场时磁矩合成

二、在超导线圈中加入电流产生一个强大的主磁场 B_0 ，在主磁场的作用下，人体中 ^1H 质子的自旋磁矩会沿着主磁场的方向排列（按照低能状态的顺磁和高能状态的逆磁排列），但顺磁排列的数目多于逆磁排列的数目，因而总的合成磁矩即磁化矢量 M 不为零。