

SECOND
EDITION
第二版

MRI 基础

The Basics

尹建忠 译
廉宗澍 祁吉 校



Ray H. Hashemi

William G. Bradley, Jr.

Christopher J. Lisanti

Lippincott Williams & Wilkins Inc. 授权
天津科技翻译出版公司出版

MRI

基础

第2版

Ray H. Hashemi

〔美〕William G. Bradley, Jr. 著

Christopher J. Lisanti

尹建忠

译

廉宗澂 祁吉

校

天津科技翻译出版公司

著作权合同登记号:图字:02-2004-59

图书在版编目(CIP)数据

MRI 基础 / (美) 哈舍米 (Hashemi, R. H.) 等编著, 尹建忠译. —天津: 天津科技翻译出版公司, 2004.10

书名原文: MRI: The Basic

ISBN 7-5433-1803-2

I. M… II. ①哈… ②尹… III. 磁共振成像 - 教材 IV. R445.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 064068 号

Copyright © 2004 Lippincott Williams & Wilkins.

ISBN 0-7817-2287-X

Published by arrangement with Lippincott Williams & Wilkins Inc., U.S.A.

All rights reserved. No reproduction, copy or transmission of this publication may be made without written permission.

中文简体字版权属天津科技翻译出版公司.

授权单位: Lippincott Williams & Wilkins Inc.

出 版: 天津科技翻译出版公司

地 址: 天津市南开区白堤路 244 号

邮政编码: 300192

电 话: 022-87894896

传 真: 022-87893482

网 址: www.tsltpc.com

印 刷: 北京恒智彩印有限公司

发 行: 全国新华书店

版本记录: 787×1092 16 开本 24.5 印张 510 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

定价: 60.00 元

(如发现印装问题, 可与出版社调换)

第 1 版前言

“应该使事情尽可能简单——并且不能再简单。”

艾伯特·爱因斯坦

自 100 年前发现 X 线至今, MRI 被认为是医学诊断中最重要的进展。它已成为放射学主要的新技术之一, 目前几乎被应用于人体任何部位的检查。那么, 有人会问, 如果 MRI 真的这么好, 为什么有这么多的放射学工作者不情愿“进入”这个领域呢? 一言以蔽之, 那就是“物理基础”问题。MRI 的物理概念的确难以理解, 尤其是那些想解释清楚 MRI 图像, 但又缺乏物理基础知识的临床医师。同时如果没有正确地理解这些物理知识, 任何 MR 的临床工作者并不能真正明白图像中信号改变的基础, 只不过是“不懂装懂”。《MRI 基础》这本书就是试图纠正这种状态。

在本书中, 我们试图用易读、易懂, 甚至在不违背基本概念时采用有趣的方式来阐述这些复杂的内容。读者将会发现本书全面覆盖了 MRI 的物理学内容, 从基本原理到更先进的技术, 如 MR 血管成像和快速扫描技术。同时也讨论了一些只有在高性能梯度条件下才能实现的最新技术, 如平面回波成像。由于大部分内容出自第一作者对放射学住院医师的讲稿, 因此, 章中大多采用通俗易懂的语言或更容易被领会的交谈方式, 从而使这本书更易阅读。

在尽可能全面的同时, 本书并未对所有的枝节问题都面面俱到。第一章对数学的简单介绍是为了使读者掌握 MRI 中涉及的最基本数学知识(并不需要微积分知识)。本书用了相当大的篇幅介绍图像的产生过程, 包括梯度的概念、信号/图像处理 and K 空间。其中的显著特点之一就是介绍信号/图像处理的内容。有两章用于介绍图像的产生, 两章介绍 K 空间, 一章介绍傅立叶变换和一章介绍信号处理, 同时还有一些介绍快速扫描技术(快速自旋回波、梯度回波、快速梯度回波和平面回波成像)的章节。此外, 还有几章对流动和 MR 血管成像以及 MRI 的伪影做了进一步深入介绍。

随文为读者提供了超过 400 幅清楚直观的插图, 以便于领会内容。每章的要点在每章结束后做出归纳和总结。另外, 每章后面还有习题和选择题(答案附在全书最后), 考察读者对此章知识的掌握程度。书中楷体印刷部分的内容可略过, 此部分适合于有一定数学基础的读者。

本书主要为放射学工作者和放射学住院医师以及放射技师编写。而其他与 MRI 相关的医师、医学院学生、研究工作者和专家都可以从这本书中获益。它旨在提供从基础知识到临床应用的最快途径。本书也是放射学住院医师准备美国放射学会考试物理部分和 MR 技师准备他们的 MR 资格考试的用书。

简而言之,你可以在这本书中发现关于 MR 物理基础知识的几乎所有内容,而其中许多问题是你平时经常想知道但不方便问的。另外,这本书不仅可作为学习 MR 基础知识的课本,也可作为了解 MRI 的基础知识和高级技术进展的参考书。我们希望你能够喜欢读这本书,就像我们写这本书时一样。

R. H. Hashemi

W. G. Bradley

前言

读者对本书第二版的需求印证了第一版的坚实基础、普及程度和价值。我们为能够在第一版基础上进行更新和改进而兴奋,此版增加了 1996 年以来在 MRI 领域内的变化和进展。我们介绍了 MRI 长足进步,例如对比增强 MRA,以及诸如扩散张量成像和 SENSE 等新的概念和内容。

现在对这样一本书的需求比以前更明显。每年 MR 设备厂商都会介绍新的脉冲序列,它们的缩写达到了爆炸的程度,使原本就复杂的领域变得更加复杂。为适应这种情况,本书增加了新的一章介绍临床应用 MRI 序列的方法,包括基本的脉冲序列和一些较新序列的例子。它们按顺序放在文中,我们希望读者在下次 MR 设备厂商代表介绍他们新的序列时不再感到困惑。

最后,我们还在文中增加了超过 100 幅不同病例的图像,以说明所讲到的基本原理。这些病例涉及神经、脊柱、肌骨系统和体部的应用,反映了繁忙的 MRI 临床工作所包括的广泛领域。大部分图像采用绝大多数放射学工作者平时容易进行的脉冲序列,而少数需要高端的硬件和软件,例如所看到的心脏图像。这些图像也包含了不同的病理情况,我们希望读者能够感到有意思。

另外,我们对本书第一版过硬的质量感到高兴,这也使第二版的编写变得非常容易。我们希望此书能够被更多的涉及 MRI 的医学工作者所使用,它将为你提供对 MRI 知识最基本的了解。最后,我们愿此书成为你在这个令人着迷的领域进一步学习和研究的跳板。

Ray Hashman Hashemi, M.D., Ph.D.

William G. Bradley, Jr., M.D., Ph.D., F.A.C.R.

Col. Christopher J. Lisanti, M.D.

致谢

我希望表达对 Edward Helmer, M.D. 衷心的感谢,感谢他在 Kaiser Permanente 医学中心不辞辛苦地抄录我对住院医师关于 MR 物理知识的演讲。正是由于他的抄录,启示我要写这本书。Edward 是我在神经放射学方面的良师益友,同时他也是所有学生都非常喜欢的老师。

R. H. Hashemi

感谢 Dar-Yeong Chen, Ph.D. 和 Dennis Atkinson, M.S. 的技术上的帮助;Cathy Reichel-Clark 所做的出色的美术工作和 Chris Lisanti, M.D. 2001~2002 年的 MR 研究生,对这版书所做的贡献。

W. G. Bradley

中文版前言

MRI 的出现,使放射医师不得不从已发展了几十年的、以 X 线作为成像基础的模式步入了一个以量子物理学为成像基础的崭新的领域。鉴于中国医师培养模式与内容的差别,MRI 对于所有的放射医师同样都是陌生的技术。任何有志步入这个领域的医师首先面对的是“入门”的难度,即 MR 成像的基本原理。对于物理学专业人员来讲,这似乎是循序渐进的、自然延续的专业知识深化过程;而对于医师来讲,需要的是“入门”的台阶——医师能读懂的量子物理学。本书恰恰是这样一本可满足医师浅入深出理解 MRI 的物理学基础的参考书。

目前,国内几乎尚没有这样一本使用通俗易懂的方式讲述 MRI 原理的书籍,此书恰弥补了此方面的空白。

该书原著使用了大量的示意图,而且每章后面还附有精练归纳,方便读者学习(本书译文保持了原书的风格)。

书中的内容也随着 MR 技术的发展而涵盖了迄今主要的最新技术发展。相信会对不同层次的读者都有参考价值。

书中译校不准确的地方在所难免,还望广大同道批评、指正。

祁吉

2004 年 5 月 8 日

目 录

第1版前言	i
前言	iii
致谢	iv
中文版前言	v

第一篇 基本概念

第1章 数学基础	3
第2章 MRI的基本原理	19
第3章 射频脉冲	35
第4章 T1、T2 和 T2*	44
第5章 TR、TE 和组织对比	53
第6章 组织对比:一些临床应用	64
第7章 脉冲序列	
第1部分(饱和、部分饱和、反转恢复)	82
第8章 脉冲序列	
第2部分(自旋回波)	92
第9章 傅立叶变换	99
第10章 图像重建	
第1部分(层面选择)	107
第11章 图像重建	
第2部分(空间编码)	120
第12章 信号处理	136
第13章 数据空间	161
第14章 脉冲序列图	180

第 15 章 视野 186

第 16 章 k 空间:最后的领域! 190

第 17 章 扫描参数和图像优化 195

第 18 章 MRI 中的伪影 205

第二篇 快速扫描

第 19 章 快速自旋回波 241

第 20 章 梯度回波

 第 1 部分(基本原理) 259

第 21 章 梯度回波

 第 2 部分(快速扫描技术) 275

第 22 章 平面回波成像 287

第 23 章 新的扫描性能 299

第 24 章 组织抑制技术 310

第 25 章 流动现象 321

第 26 章 MR 血管成像 340

第 27 章 高性能梯度 356

第 28 章 MRI 技术的多种组合 360

答案 371

参考文献 376

缩写表 377

第一篇

基本概念

简介

在这章中，我们将复习一些 MR 成像中所涉及的基本数学概念。我们不想在开始就让你望而生畏，所以将会使这些内容尽可能简单。了解这些基本概念对于深入理解 MR 的成像过程非常有帮助，它同时也是调整扫描参数，以改善成像质量的必要工具。

死记硬背这些数学公式并不重要，理解这些公式内所包含的概念才是至关重要的。在这章中，我们想着重强调一下 MRI 物理学中最重要的数学概念。

三角函数

设想一个直角三角形（有一个直角）有直角边 a 和 b 以及斜边 c ，而由 a 和 c 边构成角 x （图 1-1）。我们可以根据 a 、 b 和 c 定义三角函数 $\sin x$ （ x 的正弦）、 $\cos x$ （ x 的余弦）、 $\tan x$ （ x 的正切）、 $\cotan x$ （ x 的余切）和 $\arctan x$ （ x 的反正切）：

$$\sin x = b/c$$

$$\cos x = a/c$$

$$\tan x = \sin x / \cos x = b/a$$

$$\cotan x = 1/\tan x = \cos x / \sin x = a/b$$

$$\arctan b/a = \arctan(\tan x) = x$$

（等式 1-1）

变量 x ，可以代表不同的角度，如 45° 、 90° 和 180° ；也可代表不同的弧度，如 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 和 π ，而 $\pi = 180^\circ$ 。表 1-1 列出了 x 与 $\sin x$ 、 $\cos x$ 和 $\tan x$ ，其中 $\sqrt{2} \cong 1.4$ ，所以 $\sqrt{2}/2 \cong 0.7$ ，而 $\sqrt{3} \cong 1.7$ ，所以 $\sqrt{3}/2 \cong 0.85$ 。

我们画出 $\sin x$ 随变量 x 的变化（图 1-2）。这称为正弦函数。那么 $\cos x$ 是什么样的呢？（图 1-3）现在我们在同一幅图中画出 $\cos x$ 和 $\sin x$ （图 1-4）。我们可以发现 $\sin x$ 和 $\cos x$ 的对称性。两个函数的区别是 $\sin x$ 相对于 $\cos x$ 向右移了 90° 。以后，我们会谈到相位和相位移，这个概念非常重要。我们可以认为 $\sin x$ 与 $\cos x$ 之间仅存在 90° 的相位差。

现在，让我们回到图 1-1。 c 与 a 和 b 之间是什么关系呢？根据勾股定理：

$$c^2 = a^2 + b^2 \text{ 或 } c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

通过等式 1-1：

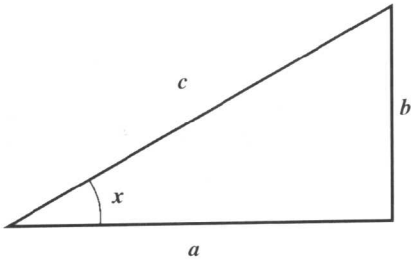


图 1-1 由直角边 a, b 和斜边 c 构成直角三角形, 角 x 由 a 和 c 边组成。

$$\begin{aligned}(\sin x)^2 + (\cos x)^2 &= b^2/c^2 + a^2/c^2 \\ &= (a^2 + b^2)/c^2 \\ &= c^2/c^2 = 1\end{aligned}$$

所以,

$$(\sin x)^2 + (\cos x)^2 = 1$$

如果我们返回 $\sin x$ 与 $\cos x$ 的图中 (图 1-4), 我们可以从图中发现, 由于 $\sin x$ 和 $\cos x$ 之间有一个 90° 的相位差, 所以它们的平方和始终等于 1。另外一种显示 $\sin x$ 和 $\cos x$ 的方法是认为它们在半径为 1 的圆内 (图 1-5)。要明白这个概念, 必须介绍矢量、虚数和指数。

矢量

我们指定一个字母如 v 上面加一个箭头 ($\vec{v}$) 代表一个矢量。这个概念在以后理

解自旋谐振和失相时非常重要。矢量是一个由数量大小和方向二者共同组成的数学整体。例如, 速率不是一个矢量——它只有数量大小。然而, 速度是一个矢量——它既有数量大小又有方向。另一个矢量的例子就是力, 描述时必须包括数量大小 (力的大小) 和方向 (力的作用方向)。

我们画在这个圆内的矢量 (图 1-5), 它的大小为 1。矢量与水平轴的角度为 x 。如果在水平和垂直方向分别作此矢量的垂线, 我们可以得到此矢量的两个分量:

(a) 矢量在水平方向的分量与 $\cos x$ 相关 (记住图 1-1 中 a/c 的比率即 $\cos x$)。

(b) 矢量在的垂直方向的分量与 $\sin x$ 相关 (记住图 1-1 中 b/c 的比率即 $\sin x$)。

虚数

一个正数 n^2 有两个平方根, $+n$ 和 $-n$ 。例如,

$$\left. \begin{aligned}3^2 &= 9 \\ (-3)^2 &= 9\end{aligned} \right\} \text{所以, } 3 \text{ 和 } -3 \text{ 都是 } 9 \text{ 的平方根。}$$

任何一个实数的平方, 都不可能是负数。这样, 我们可以构想一个概念, 把 $\sqrt{-n}$ 叫做虚数。下面所有的数都是虚数:

$$(\sqrt{-9}), (\sqrt{-37}), (\sqrt{-1}), (\sqrt{-18})$$

虚数可以进行以下方式的处理:

表 1-1						
	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π
x	0°	30°	45°	60°	90°	180°
$\sin x$	0	1/2	$(\sqrt{2})/2$	$(\sqrt{3})/2$	1	0
$\cos x$	1	$(\sqrt{3})/2$	$(\sqrt{2})/2$	1/2	0	-1
$\tan x$	0	$1/(\sqrt{3})$	1	$\sqrt{3}$	∞	0

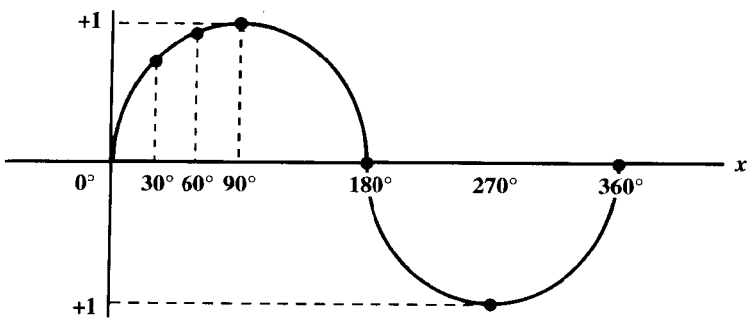


图 1-2 $\sin x$ 的图形。

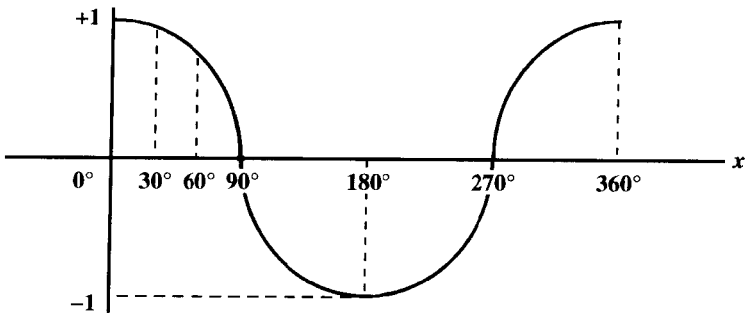


图 1-3 $\cos x$ 的图形。

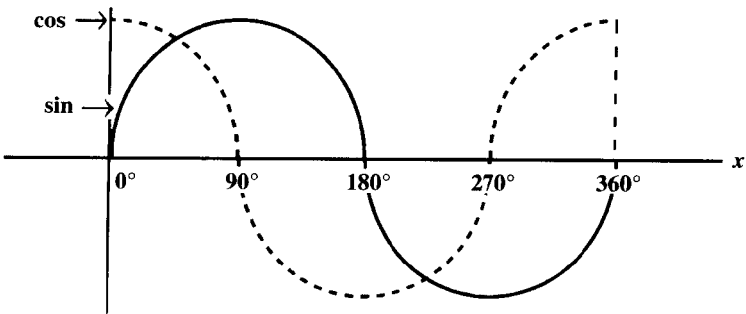


图 1-4 画在一幅图中的 $\sin x$ 和 $\cos x$ 。

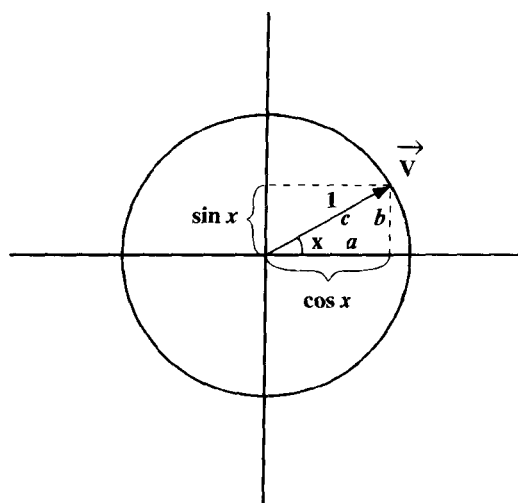


图 1-5 矢量 v 大小为 1, 与水平轴的夹角为 x 。
 $\cos x$ 和 $\sin x$ 分别为矢量在水平和垂直方向上的分量。

$$(\sqrt{-9}) = \sqrt{[(9)(-1)]} = (\sqrt{9})(\sqrt{-1})$$

任何虚数都可以写成一个实数乘以 $(\sqrt{-1})$ 。指定用字母“ i ”表示 $(\sqrt{-1})$ 。(数学家用符号 i 来表示虚数,而工程师用“ j ”代替 i ,因为 i 用来表示电流!)这样,符号 i 就被称为虚数单位。换句话说, $i \times i = -1$ 。

示例

$$\begin{aligned}\sqrt{-16} &= \sqrt{(16)(-1)} = \sqrt{16} \sqrt{-1} \\ &= i\sqrt{16} = 4i\end{aligned}$$

这样看来, i 是一个虚数。它并不存在。当你计算一个数的平方根时,它应该是一个正数。然而,在上面这个示例中,如果用 i 乘以 i ,我们就可以得到 -1 。因此, i 是一个并不存在的虚数。

复数

复数就是一个由实数部分和虚数部分共同构成的数。

$$\text{复数} = \text{实部} + \text{虚部}$$

示例

我们说一个复数有两个组成部分, 2 和 3。虚数部分是 i 的倍数, 式中 $i = \sqrt{-1}$ 是虚数单位。那么,

$$c = (2) + i(3)$$

如果你在 x - y 平面内画出此复数(图 1-6), 矢量 $(2, 3)$ 代表复数 $2+3i$ 。你通常只需要关心复数的实数部分, 在处理复数或进行复数、矢量等的计算中, 最终仅保留实数部分可使事情更简单。

大小和角度

然而, 有时候虚数部分也是有用途的。

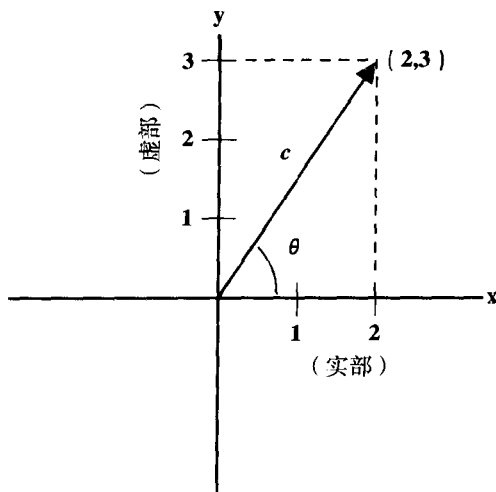


图 1-6 在二维(笛卡儿)坐标系中表示复数 $2+3i$ 的点, 以及复数与其 θ 角, 实部和虚部分量之间的关系。

例如,考虑一下图 1-6。在这幅图中,如果我们计算矢量与 x 轴的角度正切值,我们可以得到:

$$\tan \theta = 3/2 = \text{虚部} / \text{实部}$$

换句话说,通过虚部和实部的比率,我们可以得到矢量角度的正切值。而矢量的大小(有时候被称为矢量的模),可以通过勾股定理得到:

$$c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

这样,

$$\begin{aligned} \text{矢量的大小} &= \sqrt{(\text{虚部})^2 + (\text{实部})^2} \\ &= \sqrt{(3)^2 + (2)^2} \\ &= \sqrt{13} \approx 3.6 \end{aligned}$$

当你处理一个复数时,如果你计算虚部和实部的比率,你可以得到矢量角度大小的度量。如果你计算虚部和实部的平方和,你可以得到矢量大小(的平方)。

函数

数学函数,指定用 $f(x)$ 表示,它是随变量 x 的变化范围。例如, $\sin x$ 是一个随 x 以正弦方式进行变化的函数,正如我们在这章前面的内容中所见到的一样。

信号

信号是一个以时间为变量的函数,也就是,随时间而变化的物理量,通常是在一定时间内变化若干毫伏。如果 x 轴是时间, y 轴是信号强度的大小,那么信号就是一个大小随时间而变化的波形。

在电子系统内,信号是一个能够被测

量的随时间而变化的电流或电压。在 MRI 中,信号不过就是由振荡磁场所产生的电流或电压。有些信号是周期性的——它们按自己前面的形态进行重复,就像正弦波形或余弦波形进行自身的重复一样。

频率、周期和循环

现在我们介绍频率和周期的概念。每一个周期函数都有一个频率,我们称之为 f 。如果我们测量两个峰(或者信号经过零点的位置)之间的时间间隔,这个时间间隔就称为周期。我们用 T 来表示。这样,频率 $= 1/\text{周期} = 1/T$:

$$f = 1/T$$

周期函数的一个循环就是此函数在一个周期范围内的所有部分。例如,我们假定在 1 秒内有 3 个完整的循环(图 1-7)。在这种情况下,

3 个周期用时 1 秒

$$3T = 1\text{s}$$

$$T = 1/3\text{s}$$

$$\text{频率} = f = 1/T = 3 \text{ 循环/秒} = 3 \text{ 赫兹}$$

我们用来描述频率的单位就是赫兹或 Hz(表示循环/秒)。在每个循环周期内有 2π 弧度。也就是说,

f = 当我们指线频率时的频率,单位为循环秒。

ω = 当我们指角频率时的频率,单位为弧度/秒;角频率(弧度/秒) $= \omega = 2\pi \times$ 线频率(Hz)

而 $\pi = 3.1415927 \approx 3.14$ 。简言之,

$$\omega = 2\pi f$$

(等式 1-2)