

# 磁共振

## 基础物理与技术应用另解

主编 孙万里 刘永波 万福林

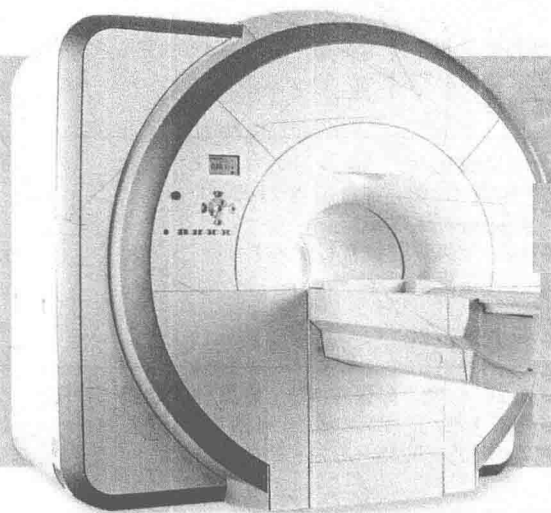


西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

# 磁共振

## 基础物理与技术应用另解

主编 孙万里 刘永波 万福林



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

---

## 图书在版编目(CIP)数据

磁共振基础物理与技术应用另解/孙万里,刘永波,万福林  
主编. —西安:西安交通大学出版社,2016.10  
ISBN 978-7-5605-9058-5

I. ①磁… II. ①孙…②刘…③万… III. ①磁共振-研究  
IV. ①0482.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 246236 号

---

|      |                |
|------|----------------|
| 书 名  | 磁共振基础物理与技术应用另解 |
| 主 编  | 孙万里 刘永波 万福林    |
| 责任编辑 | 王 磊 张沛烨        |

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82668280  
印 刷 虎彩印艺股份有限公司

---

|       |                              |    |                    |    |   |    |       |
|-------|------------------------------|----|--------------------|----|---|----|-------|
| 开 本   | 850mm×1168mm 1/32            | 印张 | 2.875              | 彩页 | 1 | 字数 | 65 千字 |
| 版次/印次 | 2016 年 10 月第 1 版             |    | 2016 年 10 月第 1 次印刷 |    |   |    |       |
| 书 号   | ISBN 978-7-5605-9058-5/O·554 |    |                    |    |   |    |       |
| 定 价   | 26.80 元                      |    |                    |    |   |    |       |

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82667663

读者信箱:medpress@126.com

版权所有 侵权必究

孙万里,男,教授,硕士研究生导师,中国医学装备协会磁共振成像设备与技术委员会委员,工程组副组长。2002—2016年1月任长治医学院医学影像系主任,2002—2016年3月任长治医学院附属和平医院影像科、磁共振成像诊断科主任。曾任山西省高等学校特色专业点负责人、长治医学院医学影像技术专业申报负责人。医学影像学精品课程主讲教师。获国家发明专利3项,市级科学技术奖3项。



刘会坡,理学博士,副研究员。主要从事偏微分方程反问题数值计算。2013年开始开展磁共振成像与技术相关研究工作,主要从事扩散方程反问题数值求解的算法理论和软件开发。基于核磁成像数据,开发了求解方程相关系数的软件。

刘永波,女,副主任医师,山西潞安集团总医院影像科主任。任山西省女医师协会影像专业委员会委员,长治市放射专业委员会委员,长治市放射质量控制部委员,长治市医学会介入放射学组副主任委员。在国家学术期刊发表论文10余篇,参编著作2部,获煤炭部科技成果2项,省、市级科技进步奖2项。

万林福,南昌大学第一附属医院影像科技师长,从事CT/MR技术工作二十余年。现任江西省中华医学会影像技术分会常务委员,江西省中华医学会影像技术CT/MR学组组长,中华医学会影像技术分会继续教育部委员,中国医学装备协会磁共振成像装备与技术委员会委员,技术与工程学组成员。

袁兰,博士,北京大学硕士研究生导师,国家计量认证授权签字人。主要研究为生物成像方法、利用磁共振和光学方法研究药物分子经脑间质途径药物扩散。现主持科技部重大专项课题1项(磁共振设备质控序列标准化研究)、国家自然科学基金重大培育项目1项。参与科技部重大专项课题1项,国家

科学自然科学基金 3 项。发表文章 100 多篇,近两年申请国家发明专利 3 项。参加《国家计量技术法规文件制定》课题一项,参与光学、磁共振仪器国家标准的建立及有关仪器平台的建设。

傅瑜,女,医学博士,主任医师,副教授,北京大学第三医院神经内科、磁共振成像设备与技术北京市重点实验室副主任,主要从事临床医疗、教学和科研工作。国家计量认证授权签字人。现主持科技部重大专项课题“磁共振设备质控序列研究及显微水膜研制”1 项,2008 年获北京大学医学部青年岗位能手。参与的“肌萎缩侧索硬化/运动神经元症(ALS/MND)的基础与临床研究”2008 年获中华医学科技三等奖、2009 年获教育部科学技术进步一等奖。2010 年获国家自然科学基金“Gd-DTPA 在脑细胞外间隙的清除机制研”(81071148)。参与承担北京市科委重大项目。2012 年辅助诊断装置获国家发明专利,专利号 ZL 2008 1 0226376. 9(第三发明人)。发表第一作者和责任作者文章 10 余篇,其中 SCI 2 篇。



编者与同学们就书稿进行讨论

左起 5 至 16 依次为:张森、马亚平、李爽、高亚娟、王新国、王利、孙万里、李娟、刘文燕、高旭宏、祝小丹、李梦莹,右 1 为耿建

## 编委会

|     |     |     |     |     |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 主 编 | 孙万里 | 刘永波 | 万福林 |     |  |
| 副主编 | 刘会坡 | 袁 兰 | 傅 瑜 |     |  |
| 编 委 | 祝小丹 | 刘文燕 | 王新国 | 李 娟 |  |
|     | 高亚娟 | 高旭宏 | 李 爽 | 张 淼 |  |
|     | 王燕楠 | 马亚平 | 耿 健 | 王 利 |  |
|     | 李梦莹 |     |     |     |  |

# 序

我很有兴趣读到本书,并为该书写序。

近年来,本书的笔者孙万里教授和我一直在追求一个梦想,那就是振兴和成就我国的大型医疗成像装备产业。

目前,国内大型医疗成像装备产业相对落后,人才教育、培养、科研等存在严重脱节。经过多年的努力,孙万里教授与国内一批磁共振工程技术专家共同筹备,并成立了我国首个磁共振工程技术为主要发展方向的专业协会——中国医学装备协会磁共振专业委员会。依托协会平台,磁共振专委会为大型医疗成像装备产业链中教育和培养脱节及诸多空白区域的填补做了有益的探索性工作。目前的医学教育与影像医学教育体系普遍忽视医学的数理基础及其与理工学科的基本沟通能力的培养,在成像原理等方面存在死记硬背现象,跨学科知识获取意识薄弱。这势必导致所培养的人才在毕业后的工作实践和理论“两手”都不硬,医学影像技术及工程技术的创新发展后继乏力。在此背景下,我国医学影像领域的不少科研人员和临床专家都在应用进口设备的先进技术从事重复、验证性质的科学研究。由孙万里教授带领其团队编写的《磁共振基础物理与技术应用另解》一书旨在探索非物理学背景的磁共振成像技术人员学习磁共振成像技术物理原理的简易方法和途径,为学科交叉的磁共振成像技术和研究人员提供另一种可借鉴的方法。

全书共分六章。第一章,笔者将哲学、物理、数学与医学相结合,为磁共振影像技术、临床磁共振的理论学习提供了一个新的思路和学习方法,“ $T_1$  无穷尽, $T_2$  尽穷无”是作者对磁共振的高度抽象和实际应用凝练;第二章和第三章,作者理论结合实际,对磁

共振主要成像参数和平面回波成像(EPI)的相关问题进行阐述;第四章,作者从非数学专业的角度,探索了高低能级离子数与磁化强度变化的数学和物理逻辑推导,主要用意在于强调基础科学对临床磁共振的价值;第五章和第六章,作者对脂肪成像技术做了进一步论述,深度分析临床波谱分析的方法和理论来源。

作为中国最早一批,具有丰富实践经验的磁共振临床工作者,笔者创新性的探索将为非物理学背景人士学习磁共振物理原理提供新的途径,同时有助于培养医学与理、工学科的沟通 and 创新能力。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '张敏' (Zhang Min), with a stylized, cursive script.

2016 年 8 月 29 日

# 前言

## Foreword

《磁共振基础物理与技术应用另解》一书以应用技术和哲学为混合出发点,以创新思维、创新理解、创新理论、创新解释为主要方法,采用文理互通、深入浅出、图文结合、知识和应用纵横交叉等不拘一格的方法,将 MRI 基本理论、基本技能、基本思维、基本解释交叉融汇于 MRI 应用和技术中,用不一的方法探索性地阐述了已知的 MRI 一些问题。具有一定的易读性和欣赏性,更具探索性。

全书共分相互连贯又可能略显“脱节”的六章 11 节。第一章,作者将哲学、相对论、数列极限、自然对数和 Bloch 方程等与 MRI 技术和成像以近临床的形式结合在一起,所悟“ $T_1$  无穷尽,  $T_2$  尽穷无”是作者对 MRI 技术和成像抽象而又具体的总的另解;第二章,作者对原本枯燥的 MRI 主要成像参数进行了生动的阐述;第三章作者理论结合实际,将 EPI 及其他相关知识展现得淋漓尽致;第四章,作者从理论推导探讨了高低能级离子数与磁化强度变化的关系,主要用意

在于强调科学理论对临床 MRI 的基础价值;第五章,作者运用不同的方法和技术对脂肪成像做了进一步论述;第六章,作者深度剖析了 K 空间处理技术在 MRI 中的价值和简洁陈述了临床波谱分析的方法和理论来源。

此外,本书还力图在哲学与 MRI 物理、数学、临床应用之间探索建立一条或多条具有逻辑性和临床实用性的“桥梁”,因此具有明显的难度和潜在的实用价值。

在编写过程中,编者都在挑战自己,虽尽努力,但仍然避免不了错点,希望读者对我们书中的缺陷或者不足给予指正。

编者

# 目录

## Contents

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| 第一章 永恒美丽的诗卷——探索极限思想在 MRI 成像技术的应用 ..... | (1)  |
| 第二章 磁共振成像中相关参数的新理解 .....               | (7)  |
| 第一节 弛豫过程中平抛运动的提出及理想假设的推翻 .....         | (7)  |
| 第二节 弛豫与参数的关系 .....                     | (12) |
| 第三节 数形结合解释翻转角 .....                    | (16) |
| 第三章 临床应用技术的深入浅出 .....                  | (27) |
| 第一节 回波平面成像技术的原理和应用 .....               | (27) |
| 第二节 流动效应 .....                         | (31) |
| 第三节 STIR 与频率饱和法的互补 .....               | (36) |
| 第四章 不同因素对成像影响的新探索 .....                | (42) |
| 第一节 高场强对 STIR 效果的影响 .....              | (42) |
| 第二节 磁共振成像中高低能级离子数与磁化强度变化的关系的推导 .....   | (48) |
| 第五章 脂肪图像信号在理论中的新理解 .....               | (52) |
| 第一节 脂肪信号在自旋回波中的变化 .....                | (52) |
| 第二节 脂肪信号的成像原理 .....                    | (61) |
| 第六章 MRI 最后一站——图像后处理及波普分析 ..            | (67) |
| 第一节 基于数学理论的 K 空间 .....                 | (67) |
| 第二节 自旋偶合、自旋分裂及波谱分析 .....               | (74) |
| 参考文献 .....                             | (81) |

# 第一章

## 永恒美丽的诗卷

### ——探索极限思想在 MRI 成像技术的应用

MRI 成像技术是近 30 年来医学和生命科学最伟大的革命之一。MRI 成像技术对象主要是 H 质子。不同于其他影像技术成像, MRI 成像技术显著的特点为多参数成像, 其序列设计、理论、成像计算和应用过程体现了相对论和自然规律。其中极限思想贯穿始终, 极限思想也成为理解 MRI 成像技术内涵的指导, 同时也成为理解 MRI 成像技术精华的难点。从近临床 MRI 成像技术的角度深入浅出地研究极限思想, 对于进一步理解 MRI 成像技术原理和临床使用 MRI 成像技术具有指导意义。

#### 一、相对论是极限思想的哲学基础

一般地说, 任何事物只有在相对于其他事物的运动和变化中才能被认识, 离开了它的对立物, 就势必成为不可理解的东西, 这就是相对论。

极限是特化的相对。自然界和任何社会, 也包括对 H 质子的认识, 精确与近似, 标准与非标准, 有限与无限, 量变与质变, 肯定与否定, 常规与特殊, 纵向、横向等充满对立的哲学思想和现象, 通过过程统一在极限。魏晋时期的数学家刘徽就

运用数列极限的思想解决数学问题,创造出计算圆面积的简单方法。宋代朱熹早有格物致知的物理学科概念,虽然以后学者有着不同的解释,但格物意涵有不断地实验细化和理解事物原理直到最后和极限的致知真理。因此,相对论是极限思想的哲学基础,而极限是特化的、两重性的极致相对论。

因为 MRI 成像技术的物理、数学基础、序列设计以及临床应用,多是运用极限理论和思想对图像的解释和疾病的推断,所以从接近临床的哲学和极限思想角度来说,相对论和极限思想也是 MRI 成像技术的基础。

## 二、极限理论和思想在 MRI 成像技术的应用

### 1. MRI 成像技术充满了极限理论和思想

数列极限、泰勒函数和 Bloch 方程是近临床 MRI 成像技术的数学基础和知识节点。数列极限的特征是:有绝对的任意性,相对的确定性的概念;研究变化的趋势; $N$  的实质是变化的趋势的某一时刻的定值,而 MRI 成像技术就是求项数  $n$  无限增大的过程中的相对有限的  $N$  的组合; $(1+1/x)^x$ ,是对数列极限任一正数,存在一个以直线  $y=A+\epsilon$  和  $y=A-\epsilon$  为边界的条形区域,所有的点数值  $(n, a_n)$  都落在这个条形区域内;换句话说数列的项在坐标平面内对应的点,只有有限个点落在条形区域外,这直观对应于 Bloch 方程中,在设计  $T_R, T_E$  等参数条件下计算得到的  $T_1W/T_2W$ 。泰勒函数和泰勒级数在近似计算中有重要作用,而 MRI 成像技术不管是整体的  $T_1W/T_2W$ ,还是计算过程中的所有的点数值  $(n, a_n)$ ,都是取近似值,泰勒函数和泰勒级数还可对点数值再微化,因此是 MRI 成像技术的质量控制和管理的基础。

### 2. Bloch 方程在 MRI 成像技术的应用

Bloch 方程是 1946 年创立的描述复杂非线性现象的方

程。见下：

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - \frac{1}{T_2} (\vec{M}_x \vec{i} + \vec{M}_y \vec{j}) + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z) \vec{k}$$

$$M_z(t) = M_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$$

$$M_{x,y}(t) = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}}$$

Bloch 方程是固定坐标系的计算, 由于在固定坐标系都是螺旋线, 所以引申了转动坐标系, 出现  $1/e$ , 即自然对数底的倒数, 通过极限理论和思想的过渡, 出现 Bloch 延伸方程。而在 Bloch 延伸方程中加进了控制, 用  $1/e$  的思想和理论计算瞬间磁化矢量。可以从近临床 MRI 成像技术去理解该方程, Bloch 方程的特点是, 在  $M_0$  确定下,  $T_1$ 、 $T_2$  是时间常数, 其他是时间变量, Bloch 延伸方程就成为只有一个  $T_R/T_E$  是时间自变量的能简单理解 MRI 成像技术瞬间磁化矢量的方程, MRI 成像技术实际上研究的就是  $T_R/T_E$  时间自变量变化过程中, 图像函数值变化的情况和变化的趋势。而  $T_R/T_E$  的设置既是有限的也是无限的, 如果设  $T_E = T_2$ , 得  $e^{-1} = 1/e = 0.37$ , 得  $e^{-T_E/T_2} = 1/e = 0.37$ ; 设  $T_E = 2T_2$  则  $e^{-T_E/T_2} = 1/e^2 = 0.14$ ; 设  $T_E = 3T_2$  则  $e^{-T_E/T_2} = 1/e^3 = 0.05$ , 在此  $T_E$  的角色相当于数列极限的项数  $n$ , 而所得到的值是数列的极限  $N$ 。Bloch 延伸方程的设计和计算过程诠释了极限理论和思想的 MRI 成像技术中的应用。

### 3. 肯定与否定的统一

MRI 成像技术图像均是有(存)两种或以上成像因素(信息)的统一(极限思想)体。“你中有我, 我中有你”,  $T_1$  加权有  $T_2$  时间成分; 相互对立依存; 互为肯定否定。例如: 稳态 GRE 全部重聚焦序列。由于信号成分是  $FID(S+)$  和  $SE(S-)$  的复杂重叠, 图像是混合的  $T_1/T_2$  WI, 既有形态又有功能。从 MRI 成像技术图像函数:

$$I = N(H) f(v) (1 - e^{-T_R/T_1}) (e^{-T_E/T_2})$$

$N(H)$  为质子密度,  $v$  是液体流动函数, 可以看出 MRI 成像技术图像是四种物理运动参数混合作用结果, 只不过是加权的不同。

#### 4. 量变与质变的统一

MRI 成像技术常规 GRE 序列设计使用中有大、小翻转角。角度是量变(时间和参与的 H 质子增多), 随着时间延长, 翻转角增加, 弛豫后,  $T_1$  时间延长,  $T_2$  时间并不显著延长。信号从  $T_2$  WI 转为  $T_1$  WI, 产生质变。H 质子运动具有质和量两个方面。量是激励时间长短、参与的 H 质子多少, 质是  $T_1$  与  $T_2$  的不同。  $T_1$  所反映的空间和时间上的量到质的变化永远同时含有  $T_2$  所引起时间和空间量到质的变化。

量变是质变过程、经历, 质变是量变一定程度、规模的结果。两者区别到联系、量变到质变无限循环的过程的起始和终点都是极限。

#### 5. 精确与近似的统一

MRI 成像技术序列、图像中, 在所谓稳态 GRE, 初始 RF 激励脉冲后的  $N$  个  $T_R$  间期, 一直同时进行的有剩余横向磁化向纵向磁化反馈和部分纵向磁化翻转到平面横向又形成新横向磁化的矛盾运动。这个矛盾运动过程的结果是纵、横磁化共存相对不变的稳定状态, 俗称稳态。稳态既不是  $T_1$  WI, 也不是  $T_2$  WI, 而是  $FID(S+)$ ,  $SE(S-)$ 。因此, 基于弛豫与偏离永不开、平衡不会脱离失衡单独存在, 再精确也是基础上的一个近似值, 再近似也有一定程度的精确。从极限思想理论理解, 稳态即统一在近似基础上的精确。

MRI 成像技术虽然有繁杂过程, 但运用极限思想可以将其要约理解为, MRI 成像技术是不纯粹性、相对性的成像, 是极限思想的一种才智载体。因此 MRI 成像技术对疾病诊断

或病理的解释是有条件的、近似的、有限的。由此诊断定性或结论是相对确定的。

### 三、极限理论和思想的溯源

$e$  是自然对数的底。在数学上它是函数:  $(1+1/x)^x$ , 当  $x$  趋于无穷大时的极限值。 $e$  广泛应用在包括 MRI 成像技术的科学技术和研究中, 以  $e$  为底数, 可以将许多公式简化, 运用  $e$  思维格局变大而且思路简单清晰, 许多事物看的较透彻。当  $x$  趋向正无穷大的时,  $(1+1/x)^x$  的极限值等于  $e=2.71828\cdots$ ; 当  $x$  趋向负无穷大时候,  $(1+1/x)^x$  的结果也等于  $e=2.71828\cdots$ 。也就是说,  $e$  代表的是事物从两个相反方向过程发展得来的共同形式或结果。如果将相反的方向逻辑地理解为不同方向, 而两个相反方向理解为不同方向中的特例, 那么,  $(1+1/x)^x$  就扩展成了一个逻辑集成公式。该集成公式可以从根源上和数学思想方面描述哲学各种矛盾的对立发展过程形式和统一结果: 数列极限绝对的任意性、相对的确定性的概念, 直线  $y=A+\epsilon$  和  $y=A-\epsilon$  为边界的条形区域, 所有落在这个条形区域内就是  $e$  趋于无限大或无限小过程的一个点的瞬间值; 泰勒函数和泰勒级数在解决精确与近似矛盾的重要作用; 函数  $f(x)-f(x_0)$  对点数值再微化的计算; Bloch 方程在转动坐标系, 本身就是利用  $1/e$  的极限理论和思想, 具体计算瞬间磁化矢量。因此,  $e$  是极限理论和思想的精髓和溯源。

总之, 极限理论和思想是抽象的又是具体的。极限理论和思想在自然科学属于客观存在的事实, 在哲学属于主观对客观的正确认识。自然对数的底是极限思想的溯源和精髓。极限理论和思想在 MRI 成像技术的应用, 犹如一幅永恒美丽的诗卷: 大漠孤烟直, 长河落日圆;  $T_1$  无穷尽,  $T_2$  尽穷无。

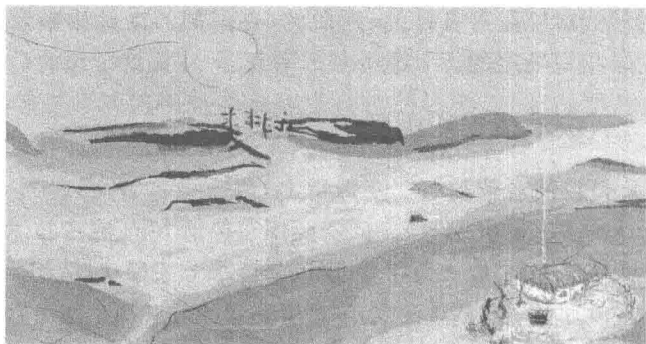


图 1-1-1 永恒美丽的诗卷

永

大漠孤烟直, 长河落日圆,  $T_1$  无穷尽,  $T_2$  尽穷无