

学校编号: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 19820101152790

UDC\_\_\_\_\_

厦门大学

硕士学位论文

辐射阻尼增强作用下磁共振成像模拟

Simulation of positive feedback radiation damping in

MRI

党钊钊

指导教师姓名: 陈忠 教授

孙惠军 高级工程师

专业名称: 电磁场与微波技术

论文提交日期: 2013 年 月

论文答辩时间: 2013 年 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2013 年 月

辐射阻尼增强作用下磁共振成像模拟

党钊钊

指导教师

陈忠

教授

孙惠军

高级工程师

厦门大学

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

作者姓名：党钊钊

论文题目：辐射增强作用下的磁共振成像模拟

作者简介：党钊钊，男，1986年01月出生，2010年09月师从于厦门大学陈忠教授，于 年 月获硕士学位。

## 中 文 摘 要

如何增强成像对比度是磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)领域的研究热点之一，传统成像中利用磁共振性质的差异性来获得成像对比度，然而当这些性质的差异性小时，即使经过时间演化，还是难以得到可视的对比度。之前的研究显示，辐射阻尼(Radiation Damping RD)对样品微小差异有较强的敏感性，因此辐射阻尼是能够成为获得样品性质微小差异间成像对比度的方法之一。然而辐射阻尼的产生需要高敏感度的射频线圈，而MRI仪器的射频线圈通常Q值较低，故通过外部电路正反馈增强辐射阻尼，其成像对比度包含独特的成像参数，能够得到比常规成像高的对比度和分辨率，并提供新的成像信息和机理。

本论文结合辐射阻尼和分子间多量子相干理论，建立了辐射阻尼正反馈增强的成像模拟算法，利用基于非线性Bloch方程的模拟算法，系统深入地模拟研究了三维结构样品的辐射阻尼正反馈增强成像信号，就各主要参数对成像对比度的影响进行了讨论，并结合新的磁共振成像方法(分子间多量子相干)，研究两种效应共同作用下成像对比度的变化情况。本文的主要内容如下：

一、阐述了辐射阻尼正反馈增强和iMQC的基本理论，总结了辐射阻尼正反馈增强和iMQC的研究背景、发展过程；详细给出了基于非线性Bloch方程的辐射阻尼正反馈增强模拟算法及流程，设计了模拟的三维结构样品，介绍了模拟的成像机制和数据处理方法。

二、模拟并研究了辐射阻尼正反馈增强和常规梯度回波的成像信号，对比分析两种方法下的成像信号变化，并就各主要参数对成像对比度地影响进行了模拟，得到了与理论分析相一致的结果，即辐射阻尼正反馈增强比常规成像方法所得对比度高，且提供了新的成像信息，表现出全新的的成像机理。

三、本文还模拟了辐射阻尼正反馈增强和新的磁共振成像方法 iMQC 共同作用下成像对比度的变化情况, 通过在 CRAZED 脉冲序列的演化期引入辐射阻尼正反馈增强, 探讨了共同作用和仅有 iMQC 作用下的成像对比度变化, 并分析了各正反馈参数对共同作用时成像对比度的影响。模拟的结果表明, 辐射阻尼正反馈增强和 iMQC 共同作用与仅有 iMQC 作用时相比具有新的成像特性, 提供更多的成像可选控制因素, 对于样品间微小差异性质可提供更多的成像对比度。

**关键词:** 磁共振成像(MRI); 辐射阻尼; 分子间多量子相干; 模拟

# Simulation of positive feedback radiation damping in MRI

## ABSTRACT

How to increase the image contrast has been of crucial importance in the field of MRI, traditionally, imaging contrast is generated by the differences in the magnetic resonance property between the different position. However, when these differences are small, the desired contrast may not be achievable even if a long evolution time is used. Previous published results indicate that radiation damping is one of proposed approaches that may give a solution to this problem, radiation damping can induce a large contrast for small frequency difference even in a short period of time. Nevertheless, radiation damping requires a highly sensitive RF coil and must meet other condition for it to practical useful. It is through an external circuit positive feedback to enhance the radiation damping. It contains a unique imaging contrast imaging parameters, be able to get higher imaging contrast and resolution than conventional method, and provide new imaging information and mechanism.

This paper contains the theory of radiation damping and intermolecular multiple quantum coherence, proposing positive feedback radiation damping imaging simulation algorithm. Using a simulation algorithm based on the nonlinear Bloch equation, the essay systematically study the imaging signal of the three-dimensional structure of the sample. In addition, combined with a new magnetic resonance imaging method (intermolecular multiple quantum coherence), the result on the imaging contrast by some main parameters was discussed. At last, the imaging contrast change was studied under the joint action of two effects. The main contents are as follows:

Firstly, the essay elaborates the basic theory of radiation damping positive feedback enhancement and iMQC, summarizing the research background and development process of radiation damping positive feedback enhancement and iMQC. Giving the positive feedback radiation damping simulation algorithm and process

which based on nonlinear of the Bloch equations, designing the three-dimensional structure of the sample and pulse sequence which used in simulation, introducing the imaging mechanisms and data processing method.

Secondly, via the simulations and study of the radiation damping positive feedback enhancing imaging and conventional gradient echo signal, the paper compare and analyse the imaging signal change in the two different methods, Meanwhile simulating the influence on the imaging contrast by some main parameters. Ultimately, we get a result consistent with the theoretical analysis, that is, the contrast got by the radiation damping positive feedback enhancement is higher than that got by conventional image forming method, and providing a new imaging information, showing a new imaging mechanism.

Thirdly, the paper also simulates the change of imaging contrast under the influence of radiation damping positive feedback enhancement together with iMQC which is a new magnetic resonance imaging method. Through the introduction of radiation damping positive feedback enhancement during the evolution of the CRAZED pulse sequence, the changes of imaging contrast are discussed when under the joint action of two kinds of effect and only iMQC, meanwhile, the effect on imaging contrast of the various parameters of the positive feedback is analyzed. The simulation results show that the joint action of radiation damping positive feedback enhancement and iMQC has some new features compared with iMQC alone, the joint action provides more imaging optional control factors as well as more imaging contrast with regard to the nature of the small differences between samples.

**Keywords:** MRI; radiation damping; iMQC; simulation.



厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 目 录

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 中文摘要 .....                       | I   |
| 英文摘要 .....                       | III |
| 第一章 绪论 .....                     | 1   |
| 1.1 磁共振成像概述 .....                | 1   |
| 1.2 辐射阻尼正反馈增强概述 .....            | 2   |
| 1.2.1 辐射阻尼的发展历史 .....            | 2   |
| 1.2.2 辐射阻尼效应原理概述 .....           | 6   |
| 1.2.3 辐射阻尼正反馈增强的理论表述 .....       | 8   |
| 1.3 分子间多量子相干概述 .....             | 10  |
| 1.3.1 分子间多量子相干(iMQC)的应用及发展 ..... | 10  |
| 1.3.2 iMQC 经典理论描述 .....          | 12  |
| 1.3.3 iMQC 的模拟数值计算方法 .....       | 15  |
| 1.4 数值模拟在 MRI、NMR 中的应用 .....     | 16  |
| 1.5 本文主要工作 .....                 | 16  |
| 第二章 辐射阻尼正反馈增强的磁共振成像模拟 .....      | 23  |
| 2.1 引言 .....                     | 23  |
| 2.2 理论描述 .....                   | 23  |
| 2.2.1 非线性 Bloch 方程 .....         | 24  |
| 2.2.2 辐射阻尼正反馈增强的数值化描述 .....      | 27  |
| 2.3 算法与流程图 .....                 | 27  |
| 2.3.1 脉冲序列 .....                 | 27  |
| 2.3.2 模拟算法 .....                 | 28  |
| 2.3.3 流程图 .....                  | 29  |
| 2.4 成像机制模拟与数据处理 .....            | 30  |
| 2.4.1 成像机制模拟 .....               | 30  |
| 2.4.2 数据处理 .....                 | 32  |
| 2.5 模拟结果与讨论 .....                | 32  |
| 2.5.1 原始模拟样品 .....               | 32  |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.5.2 辐射阻尼正反馈增强与常规成像结果对比.....           | 33        |
| 2.5.3 样品参数变化对于辐射阻尼正反馈增强成像的影响.....       | 35        |
| 2.5.4 各反馈参数对辐射阻尼正反馈增强成像的影响.....         | 37        |
| <b>2.6 本章小结 .....</b>                   | <b>40</b> |
| <b>第三章 辐射阻尼正反馈增强和 iMQC 共同作用模拟 .....</b> | <b>43</b> |
| <b>3.1 引言 .....</b>                     | <b>43</b> |
| <b>3.2 理论描述 .....</b>                   | <b>43</b> |
| 3.2.1 偶极场的计算.....                       | 43        |
| 3.2.2 模拟所用序列.....                       | 44        |
| <b>3.3 辐射阻尼正反馈增强和 iMQC 共同作用模拟.....</b>  | <b>44</b> |
| <b>3.4 不同参数下共同作用的成像模拟.....</b>          | <b>46</b> |
| <b>3.5 本章小结 .....</b>                   | <b>48</b> |
| <b>第四章 全文总结与展望 .....</b>                | <b>51</b> |
| 4.1 本文总结 .....                          | 51        |
| 4.2 展望 .....                            | 52        |
| <b>攻读硕士学位期间科研成果 .....</b>               | <b>53</b> |
| <b>致 谢 .....</b>                        | <b>54</b> |

# CONTENTS

|   |            |
|---|------------|
| <b>Abstract in Chinese</b> .....  | <b>I</b>   |
| <b>Abstract in English</b> .....  | <b>III</b> |
| <b>Chapter 1 Introduction</b> .....   | <b>1</b>   |
| <b>1.1 Introduction of MRI</b> .....  | <b>1</b>   |
| <b>1.2 Introduction of Radiation Damping</b> .....                              | <b>2</b>   |
| 1.2.1 History and development of RD .....                                       | 2          |
| 1.2.2 Principles of Radiation Damping.....                                      | 6          |
| 1.2.3 Theoretical treatments of positive feedback radiation damping .....       | 8          |
| <b>1.3 Introduction of iMQC</b> .....   | <b>10</b>  |
| 1.3.1 Applications and developments of iMQC in MRI.....                         | 10         |
| 1.3.2 Classical treatment of iMQC .....   | 12         |
| 1.3.3 Numerical calculation method of dipolar field .....                       | 15         |
| <b>1.4 Applications of numerical simulation in MRI and NMR</b> .....            | <b>16</b>  |
| <b>1.5 Main works of the dissertation</b> .....                                 | <b>16</b>  |
| <b>Chapter 2 Simulation of positive feedback radiation damping in MRI</b> ..... | <b>23</b>  |
| <b>2.1 Introduction</b> .....   | <b>23</b>  |
| <b>2.2 Theoretical expression</b> .....   | <b>23</b>  |
| 2.2.1 Nonlinear Bloch equations.....  | 24         |
| 2.2.2 The RD positive feedback enhanced numerical description.....              | 27         |
| <b>2.3 Algorithm and flow chart</b> .....                                       | <b>27</b>  |
| 2.3.1 Pulse sequence .....  | 27         |
| 2.3.2 Simulation algorithm .....  | 28         |
| 2.3.3 Flow chart .....  | 29         |
| <b>2.4 Simulations of imaging mechanism and data processing</b> .....           | <b>30</b>  |
| 2.4.1 The imaging mechanism of simulation.....                                  | 30         |
| 2.4.2 Data processing.....  | 32         |
| <b>2.5 Simulation results and discussion</b> .....                              | <b>32</b>  |
| 2.5.1 Original sample used in simulation.....                                   | 32         |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.5.2 The positive feedback radiation damping compared with conventional imaging results ..... | 33        |
| 2.5.3 Effects of the sample parameters on imaging signals of positive feedback RD.....         | 35        |
| 2.5.4 Effects of the feedback parameters on imaging contrast of positive feedback RD.....      | 37        |
| <b>2.6 Conclusions .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>Chapter 3 The simulation under the joint action of positive feedback RD and iMQC .....</b>  | <b>43</b> |
| <b>3.1 Introduction .....</b>  | <b>43</b> |
| <b>3.2 Theoretical expression.....</b>   | <b>43</b> |
| 3.2.1 The calculation of the dipole field .....  | 43        |
| 3.2.2 The pulse sequence of the simulation .....   | 44        |
| <b>3.3 The simulation under the joint action of positive feedback RD and iMQC .....</b>        | <b>44</b> |
| <b>3.4 Effects of different parameters on joint action of imaging simulation</b>               | <b>46</b> |
| <b>3.5 Conclusions .....</b>   | <b>48</b> |
| <b>Chapter 4 Summary and prospect .....</b>  | <b>51</b> |
| <b>4.1 Summary .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>4.2 Prospect .....</b>  | <b>52</b> |
| <b>Publications .....</b>  | <b>53</b> |
| <b>Acknowledgements .....</b>  | <b>54</b> |

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 第一章 绪论

## 1.1 磁共振成像概述

磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)的物理基础是核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)理论,其本质为处于静磁场中的原子核系统受到一定频率的射频激发,在其能级间产生共振跃迁,这一现象于1946年由美国物理学家布洛赫(F. Bloch)和珀塞尔(E.M. Purcell)所领导的两个实验小组<sup>[1-3]</sup>几乎在相同的时间内用不同的实验方法所证实,并以此共同荣获1952年的诺贝尔物理学奖。此后NMR主要被化学家和物理学家用来研究物质的分子结构以及原子核在不同化合物或化学环境中共振频率微小而特异的变化,成为物理、化学和生物学波谱实验分析的重要工具。

从二十世纪七十年代起,NMR理论逐渐完善,开始应用于成像中。1971年美国物理学家 Damadian 在对植入肿瘤细胞的鼠进行NMR实验时,发现正常组织和恶性组织的NMR信号明显不同<sup>[4]</sup>,且受激组织的偏转磁矩在恢复过程中会发出两类不同的信号。Damadian(1971)进一步指出,由于水分子的特殊结构,使其具有很强的磁偶极子表现和NMR信号,使用NMR信号对生物体成像是可能的。1972年美国州立大学石溪分校的Lauterbur进一步指出,用NMR信号完全可以重建图像。次年,Lauterbur在Nature杂志上发表文章,提出用3个线性梯度磁场来选择性激发,得到所需成像层面,并创建组合层析成像法实现磁共振成像<sup>[5]</sup>。于是核磁共振成像学科正式诞生,并成为医学专家进行医学诊断的工具。

此后,众多学者对磁共振成像算法做出大量研究,大大丰富了磁共振成像理论。英国诺丁汉大学的W.S.Hinshaw(1974)提出敏感点成像法,1975年,Ernst提出了多维NMR谱学理论方法,并发展了“傅立叶成像法”<sup>[6]</sup>。在磁共振成像理论进一步研究的基础上,1977年Damadian等人共同研制出世界上第一台全身磁共振成像装置。1980年美国FONAR公司推出了世界上第一台商用磁共振成像系统。此后,美国、英国、联邦德国、荷兰和日本等国开始投入力量研究磁共振成像系统。GE、西门子(Siemens)、布鲁克(Bruker)、飞利浦(Philips)和东芝等公司均推出了较为成熟的商用磁共振成像系统,进一步推动了磁共振成像技术的

发展。

随着科技的快速发展，MRI 仪器软硬件不断取得突破性进展。随着磁场稳定性的提高、各种检测线圈的出现、计算机的迅速发展，MRI 实现了高速、高分辨成像。同时，各种脉冲序列、新的对比度机制和新的成像参数也不断地开发出来，并相互促进发展，使 MRI 得到越来越广泛的应用。1990 年，Belliveau 等首次得到了人脑视觉皮层活动的功能 MRI<sup>[7]</sup>，使得功能磁共振成像(functional MRI, fMRI)作为新的研究方法快速发展，系统的脑科学研究被提上了日程，成为生命科学界、脑生理和心理学界新世纪主攻的方向之一。今天，MRI 对于生命科学的重要性犹如显微镜对材料科学、射电望远镜对天文学、粒子加速器对物理学一样。而且，MRI 最年轻，正处于成长期，它是一个巨大的宝库，很多方法、技术和应用有待开发，必将成为未来生物学家洞察各层次活生物基本问题不可忽略的基本工具。

核磁共振成像技术相比于传统的 X 射线和 X-CT 成像技术，表现出以下优势：1、多参数成像，可获得丰富的医学图像信息；2、成像对比度高；3、可任意方向断层成像；4、对人体无电离辐射伤害；成为当今几大最常用的医学成像技术。但是，核磁共振成像的一个重要不足是不能给出足够的信息说明正常组织与病理组织之间细胞代谢的区别。传统成像中利用磁共振性质的差异性来获得成像对比度，然而当这些性质的差异性很细微时，即使经过时间演化，还是难以得到可视的对比度。而本课题主要是通过利用核磁共振成像中的辐射阻尼效应能够很好的区别组织间细微差异的特性，进而使得生物组织中正常与非正常的部分能够清楚地被诊断出，以达到提高成像对比度并进一步设计新的磁共振成像方式。

## 1.2 辐射阻尼正反馈增强概述

### 1.2.1 辐射阻尼的发展历史

辐射阻尼研究的历史应追溯到核磁共振发展的最初时期。40 年代后半期是物理学轰轰烈烈的研究年代，为第二次世界大战服务的一大批科学家重返实验室，迅速认识到在战时发挥作用的微波及高频无线电波与物质的相互作用在科学上还留有一大片空白。在短短的数年间即报道了数不清的发现，NMR 现象即是其中之一。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库