

学校编码: 10384
学号: 19820111152857

分类号__密级__
UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

新型单扫描时空编码的定量磁化率成像初步研究

Preliminary study on quantitative susceptibility mapping via
single-scan spatiotemporally encoded MRI

王阿莉

指导教师姓名: 陈忠 教授

蔡聪波 副教授

专 业 名 称: 电磁场与微波技术

论文提交日期: 2014 年 04 月

论文答辩时间: 2014 年 05 月

学位授予日期: 2014 年 06 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 06 月

新型单扫描时空编码的定量磁化率成像初步研究

王阿莉

指导教师

陈忠

教授

蔡聪波

副教授

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,该学位论文为陈忠教授课题组的研究成果,获得陈忠教授课题组经费或实验室的资助,在厦门大学核磁共振实验室完成。

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

目 录

中 文 摘 要	i
英 文 摘 要	iii
第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 核磁共振成像基本原理	2
1.3 定量磁化率成像原理	7
1.4 单扫描时空编码原理	8
1.5 论文结构	9
第二章 定量磁化率图像重建方法及其应用	13
2.1 引言	13
2.2 去除背景场方法	13
2.2.1 复杂谐波伪影去除法 (SHARP)	14
2.2.2 偶极场投影法 (PDF)	15
2.3 定量磁化率图像重建原理及方法	17
2.3.1 多方向采样磁化率计算方法	17
2.3.2 k 空间加权微分法	19
2.3.3 贝叶斯正则化方法	18
2.4 QSM 在临床中的应用	21
2.5 本章小结	25
第三章 基于常规采样方法的 QSM 重建	29
3.1 引言	29
3.2 原理描述	30
3.2.1 梯度回波脉冲序列	30
3.2.2 l_0 范数重建原理	32
3.2 实验方法与实验材料	33
3.3 实验结果与讨论	36
3.4 本章小结	39
第四章 基于单扫描时空编码的局部相位成像研究	43

4.1 引言.....	43
4.2 理论描述	43
4.2.1 chirp 脉冲	43
4.2.2 chirp 脉冲激励的自旋核响应	47
4.2.3 全重聚 SPEN 序列.....	49
4.3 实验方法与材料	51
4.4 实验结果与讨论	54
4.5 本章小结	61
第五章 总结与展望	65
5.1 总结.....	65
5.2 展望.....	66
论文发表情况	67
致 谢.....	69

厦门大学博硕士论文摘要库

CONTENTS

Chinese Abstract	i
English Abstract	iii
Chapter 1 Preface.....	1
1.1 Introduction	1
1.2 Basic principles of MRI	2
1.3 Principles of QSM.....	7
1.4 Principles of single-scan SPEN	8
1.5 Structure of this dissertation.....	9
Chapter 2 Reconstructed methods and applications of QSM.....	13
2.1 Introduction.....	13
2.2 Background field removal methods.....	13
2.2.1 Sophisticated harmonic artifact reduction for phase data(SHARP) ...	14
2.2.2 Projection onto dipole fields(PDF)	15
2.3 Reconstructed principles and methods of QSM.....	17
2.3.1 Calculation of susceptibility through multiple orientation sampling..	17
2.3.2 Weighted k-space derivative method	19
2.3.3 Bayesian regularization method.....	18
2.4 Clinical applications of QSM	21
2.5 Conclusions.....	25
Chapter 3 Reconstruction of QSM based on conventional sampling method.....	29
3.1 Introduction.....	29
3.2 Theoretical formalism.....	30
3.2.1 The gradient recalled-echo pulse sequence.....	30
3.2.2 The reconstructed principles of l0 norm of gradient.....	32
3.2 Experiments and materials	33
3.3 Results and discussion	36
3.4 Conclusions.....	39
Chapter 4 Local phase imaging based on single-scan spatiotemporally encoded MRI	43
4.1 Introduction.....	43
4.2 Theoretical formalism.....	43
4.2.1 The chirp pulse.....	43
4.2.2 The spins' response excited by the chirp pulse	47

4.2.3 The fully refocused SPEN sequence	49
4.3 Experiments and materials	51
4.4 Results and discussion	54
4.5 Conclusions.....	61
Chapter 5 Summary and prospect	65
5.1 Summary.....	65
5.2 Prospect.....	66
Publications	67
Acknowledgements	69

厦门大学博硕士学位论文摘要库

作者姓名：王阿莉

论文题目：新型单扫描时空编码的定量磁化率成像初步研究

作者简介：王阿莉，女，1988年12月出生，2011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

磁共振成像技术（MRI）以核磁共振（NMR）原理为基础，可以提供一种无损伤手段来探测体内结构。平面回波成像（EPI）只需一次激发就可获取整幅图像，但在强磁场或者不均匀场中对磁化率伪影非常敏感，不适合用来获取相位图像。单扫描时空编码（SPEN）方法可以很好地解决这一问题，它对磁场不均匀具有天生的免疫力，并且在均匀场下可以提供与 EPI 方法类似质量的图像。定量磁化率成像（QSM）以相位信息为基础，是科学研究和临床应用的一个热点问题。本文将单扫描 SPEN 技术应用到局部相位像研究中，对促进 QSM 更深层次和更广泛的应用具有重要意义。本文的主要研究成果有：

一、首先对定量磁化率成像原理进行了简要介绍，接着对具有代表性的 QSM 重建方法和去除背景场方法进行了全面综述，并对 QSM 在 MRI 中的应用进行了总结。

二、完成了基于常规采样方法的 QSM 重建。文中基于多回波脉冲序列 MGE3D 对数据进行采集，多回波数据可以提供更多的相位信息，更加有利于 QSM 重建。利用 l_0 范数法对实验数据进行 QSM 重建，并对结果进行讨论。介绍了离体猪脑组织和 SPIO 样品的制作方法。

三、首次将基于单扫描时空编码的全重聚脉冲序列应用到局部相位像研究中，该序列可以使每个位置的解码信号都实现梯度散相和偏共振散相的重聚。并基于 SPIO 样品、柠檬样品和猪脑样品的实验结果进行分析和讨论。通过实验结果验证了将该全重聚 SPEN 脉冲序列应用到局部相位像研究的可行性，为单扫描动态 QSM 研究提供了数据采集方法。

关键词：时空编码；定量磁化率成像；局部相位像

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Preliminary study on quantitative susceptibility mapping via single-scan spatiotemporally encoded MRI

Ali Wang

ABSTRACT

Magnetic resonance imaging (MRI) which is based on the nuclear magnetic resonance (NMR) can provide a no damaged means to detect structure in vivo. Echo planar imaging (EPI) has the ability to acquire a whole image in a single-scan, but it is sensitive to susceptibility artifacts when it is operated in high or inhomogeneous magnetic field. Therefore, EPI is usually not suitable for phase imaging. Single-scan spatiotemporally encoded (SPEN) MRI is one of the effective approaches in dealing with this weakness. It has a higher natural immunity to field inhomogeneity and can provide image with similar quality to that from EPI method in homogeneous field. Quantitative susceptibility mapping (QSM) based on phase information is a hot question in scientific research and clinical application now. This paper proposed a local phase imaging method based on single-scan SPEN method, which will be of significance in promoting QSM having deeper and broader applications. The main work of this thesis is listed as follows.

1. This paper firstly has a brief introduction of QSM principle. Then a comprehensive review was made about the methods of the typical reconstruction methods of QSM and background field removal methods, then a summary was presented about the applications of QSM in MRI.

2. The reconstruction of QSM based on conventional sampling method was accomplished. Multi-echo pulse sequence was used to obtain FID data, Multi-echo data could provide more phase information which would be helpful in the reconstruction of QSM. This paper used l_0 norm of gradient method to reconstruct the QSM images, and the results were discussed and compared.

3. A fully refocused SPEN sequence was applied to local phase imaging researches for the first time, which could make the decoding signals from different positions get refocused about gradient and off-resonance, and the results of different samples had been analyzed and discussed, including SPIO sample, lemon sample and pig brain sample. The feasibility of applying this fully refocused SPEN sequence to local phase imaging researches was verified, which will provide sampling method for

single-scan dynamic QSM.

Keywords: spatiotemporally encoded; quantitative susceptibility mapping; local phase imaging

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 引言

磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging, MRI）技术^[1]最早由美国科学家 Paul C. Lauterbur 于 1971 年提出，两年后，Lauterbur 于 1973 年在 Nature 上首次发表了第一个磁共振成像实验结果^[2]。磁共振成像技术以核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance, NMR）原理为基础，利用人体或动物体中水质子、³²N、³¹P 等磁性原子核的特性，实现对人体或生物体的任意方位断层成像或立体成像，从而获得可以和 X-CT 相媲美的组织和器官解剖图像，并且能提供与生化、病理有关的详细信息^[3]。

Lauterbur 采用“zeugmatography”法得到了第一张蛙的磁共振图像^[2]，“zeugmatography”来源于希腊语 zeugma，意为“联合起来的结果”。他利用在静磁场上施加的线性梯度场实现了对自旋核的空间编码，解决了 MRI 信号的空间定位问题。施加线性梯度场后对样品进行逐点激发，利用 CT 成像的反投影法重建出第一张 MR 图像。

1975 年，Ernst 等人提出频率编码和相位编码的概念^[4]，将二维傅立叶变换（2D-FFT）应用到 MRI 图像重建中，大大缩短了图像重建时间。频率和相位编码的提出，可以比较容易地将二维 MRI 扩展到三维 MRI，奠定了现代 MRI 的基础，凭借这一贡献，Ernst 本人获得了 1991 年的诺贝尔化学奖。

1977 年，Mansfield 在自旋回波的实验中提出平面回波成像（Echo Planar Imaging, EPI）^[5,6]技术，只需一次激发就可获取整幅图像，将成像时间缩短到几分之一秒。EPI 在医疗和科研都具有广泛的应用，在一些常见病和潜在病（如局部缺血性心脏病、中风、癌症等）的早期诊断上起到了重要作用。EPI 技术的提出使实时成像成为可能，依靠这一发现，Mansfield 和 Lauterbur 共同获得 2003 年的诺贝尔生理与医学奖。

2002 年，Frydman 小组受 EPI 技术的启发，提出单扫描时空编码（spatiotemporally encoded, SPEN）快速采样方法^[7,8]，采取与之前成像技术不一样的脉冲激发和采样方法，并首先利用该技术获得了首张二维 NMR 波谱。单扫描时空编码技术采用选择性脉冲——chirp 脉冲对样品进行激发，采样过程包括编码期和解码期，应用到 MRI 中可以克服磁场不均匀和化学位移引起的伪影^[9-11]，

在脉冲梯度场的作用下，实现一次扫描获得 2D 图像甚至 mD 图像。

定量磁化率成像 (Quantitative Susceptibility Mapping, QSM) 诞生于 21 世纪初^[12-14]，是在磁化率成像 (Susceptibility Weighted Imaging, SWI) 基础上发展起来的新的成像方法^[15]，二者基于常被忽略的相位信息获取临床诊断信息^[16]。相位信息包含丰富的组织磁化率变化信息^[17-19]，组织中的顺磁性物质会影响组织磁化率差异，从而改变 MRI 信号的相位，进而导致局部磁场不均匀。QSM 技术结合特有的重建算法，可以定量地反映组织磁化率的本质特性，对组织内顺磁性物质的定量有利于许多脑血管疾病和神经系统疾病的诊断。毋庸置疑，QSM 将会有很广泛的临床应用。

1.2 核磁共振成像基本原理

利用成像脉冲序列在成像仪上采集的是自由感应衰减信号 (Free Induction Decay, FID)，MRI 信号本身没有空间定位功能，若想恢复出图像，还需要结合层面选择、频率编码、相位编码以及相应的重建算法等技术^[20,21]。下文将对这些技术进行详细介绍。

1.2.1 层面选择

在自然状态下，每个质子都存在一个微小磁矩，但所有质子空间上的总磁矩为零，对外不显磁性。外加一个磁场 B_0 后，所有质子的磁矩方向与外磁场一致或相反，所有质子的磁矩和形成一个与外磁场方向相同的磁化强度矢量 M_0 。由拉莫方程可以知道，质子的共振频率 ω 与其所处的磁场强度 B 有关：

$$\omega = \gamma B \quad (1.1)$$

其中 γ 为磁旋比，对于 ^1H 核， $\gamma = 42.58 \text{ MHz/T}$ 。在外磁场 B_0 下，所有质子的共振频率相同，无法区分不同空间位置的质子。若在外磁场上叠加一个线性梯度场，磁感应强度随位置发生线性变化，那么叠加后每一质子所处的磁场强度也随位置发生线性变化，从而共振频率也会随位置发生线性变化，再通过频率编码和相位编码即可实现对质子的空间定位。

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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库