

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 33120131152843

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于 FPGA 的磁共振成像系统通信与脉冲序列生成模
块的设计

Deign of MRI System Communication Module and Pulse
Sequence Generation Module Based on FPGA

郭桦炜

指导教师姓名: 郑振耀 副教授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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):

郭桦炜

2016年05月24日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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）：郭桦炜

2016年05月24日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

磁共振成像具有成像参数多、对比度高、对人体安全无损害等优点，磁共振成像如今发展成为当今世界医学诊断中最广泛以及最先进的影像技术之一。

在磁共振成像系统中，主控板是整个 MRI 仪器的中枢核心，主要包括通信模块和脉冲序列生成模块。其中，通信模块实现了与计算机的数据通信和数据存储；脉冲序列生成模块实现了指令的解析和脉冲序列的生成。本文围绕通信模块以及脉冲序列生成模块进行详细讨论和设计。

本文主要工作内容如下：

第一，针对磁共振成像系统中主控板的设计，提出了采用纯硬件的方式对脉冲序列生成模块进行设计的方案，对作为主控板的 FPGA 开发板进行选型。对开发板进行相关的硬件模块设计以及用 SOPC Builder 软件搭建以 Nios II 为处理器的嵌入式系统硬件。

第二，对通信模块进行设计。在嵌入式系统硬件的 Nios II 处理器上移植 μ C/OS-II 实时操作系统以及 lwIP 协议栈，实现与计算机的网络通信，测试结果表明网络通信成功而且传输速度达到十多兆每秒，满足 MRI 系统需求。

第三，采用 Verilog 语言对脉冲序列生成模块进行设计，实现了对指令的解析以及脉冲序列的生成，采用 Modelsim 仿真软件对硬件电路进行仿真，测试。并将该模块与通信模块连接，最终可生成用户要求的脉冲序列波形。

关键词：磁共振成像；FPGA；网络通信

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

MRI has many advantage such as many imaging parameters, high contrast, more safe and no damage to human body, MRI become one of the most widely used and most advanced in medical diagnosis in today's world.

Main control board is the central core of the MRI system. It includes communication module and pulse sequence module. The communication module realizes the data communication with computer and data storage. Pulse sequence generation module realizes the command parsing and generation of pulse sequence. This article will revolve around communication module and pulse sequence generation module to discuss and design.

In this paper, the main contents are as follows:

First, determine the design idea of the main control board, proposed the use of pure hardware approach to pulse sequence generation module design. The next, select the FPGA development board which used as the main control board. At last, the board will be on the design and use SOPC Builder software to build the embedded system hardware based on Nios II processor.

Second, the communication module design. Transplant $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ real-time operation system and the lwIP protocol stack on Nios II. It realizes the network communication with the computer, the results of the test show that the network communication is successful and the transmission speed of more than ten Mbps satisfy the MRI requirement.

Third, use Verilog language to design the pulse sequence generation module which realizes the command parsing and generation of pulse sequence. Then, use the Modelsim software to simulate and test the hardware circuit. Connecting with the communication module, this module can generate the pulse sequence waveform that the user wants.

Keywords: Magnetic resonance imaging; FPGA; Network communication

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目录

摘要	I
Abstract	III
第一章 绪论	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 核磁共振成像原理概述.....	1
1.2.1 核磁共振基本原理.....	1
1.2.2 核磁共振成像基本原理.....	3
1.2.3 核磁共振脉冲序列.....	5
1.3 磁共振成像仪器结构.....	6
第二章 主控板的整体设计及功能模块概述.....	9
2.1 MRI 主控板的设计思路	9
2.2 FPGA 设计	9
2.2.1 FPGA 介绍及选型.....	10
2.2.2 硬件设计.....	11
第三章 通讯模块的设计.....	15
3.1 μ C/OS-II 简介	15
3.1.1 嵌入式实时操作系统概述.....	15
3.1.2 μ C/OS-II 中的的任务管理.....	15
3.1.3 μ C/OS-II 的任务调度.....	19
3.2 μ C/OS-II 的移植	21
3.2.1 对 OS_CPU.H 头文件的编写.....	22
3.2.2 对 OS_CPU_C.C 文件的编写.....	24
3.2.3 对 OS_CPU_A.S 文件的编写.....	25
3.2.4 μ C/OS-II 的移植测试.....	30
3.3 lwIP 协议栈简介	32
3.4 lwIP 协议栈的移植	33

3.4.1 与 CPU 或编译器相关的头文件.....	34
3.4.2 与 μ C/OS-II 操作系统相关的函数.....	35
3.5 网络性能测试.....	40
第四章 脉冲序列生成模块的设计.....	43
4.1 脉冲序列生成模块的逻辑设计.....	43
4.1.1 磁共振成像仪通信协议说明.....	43
4.1.2 脉冲序列生成模块流程图设计.....	45
4.1.3 脉冲序列生成模块模块化设计.....	47
4.2 脉冲序列生成模块的 Verilog 设计.....	49
4.2.1 cmd_gen 子模块的设计.....	49
4.2.2 one_param 子模块的设计.....	53
4.2.3 two_param 子模块的设计.....	55
4.2.4 recv 子模块的设计.....	57
4.2.5 整体布线设计.....	58
4.3 硬件仿真与测试.....	60
4.3.1 Modelsim 硬件仿真.....	61
4.3.2 模块综合测试.....	63
第五章 总结与展望.....	66
5.1 总结.....	66
5.2 展望.....	66
参考文献.....	68
攻读硕士学位期间发表论文.....	71
致 谢.....	72

CONTENTS

Chinese Abstract	I
Abstract.....	III
Chapter 1 Introduce	1
1.1 Research Background.....	1
1.2 Basic theory of MRI.....	1
1.2.1 Theory of NMR.....	1
1.2.2 Theory of MRI	3
1.2.3 Pulse sequence of MRI	5
1.3 Structure of MRI system	6
Chapter 2 Design and function of main control board	9
2.1 Design idea of main control board	9
2.2 FPGA design	9
2.2.1 FPGA introduction and selection	10
2.2.2 Hardware design	11
Chapter 3 Design of communication module	15
3.1 UC/OS-II introduction.....	15
3.1.1 Overview of embedded real-time operating system	15
3.1.2 Task management in the μ C/OS-II.....	15
3.1.3 Task scheduling of μ C/OS-II	19
3.2 Transplantation of μC/OS-II.....	21
3.2.1 Write to OS_CPU.H.....	22
3.2.2 Write to OS_CPU_C	24
3.2.3 Write to OS_CPU_A.....	25
3.2.4 Transplantation test of μ C/OS-II.....	30
3.3 LwIP protocol stack introduction	32
3.4 Transplantation of lwIP	33
3.4.1 Header files associated with the CPU or compiler	34

3.4.2 Functions associated with μ C/OS-II operation system	35
3.5 Network performance test.....	40
Chapter 4 Design of pulse sequence generation module	43
4.1 Logic design of pulse sequence generation module.....	43
4.1.1 Description of MRI communication protocol.....	43
4.1.2 Flow chart design of pulse sequence generation module.....	45
4.1.3 Modular design of pulse sequence generation module	47
4.2 Verilog design of pulse sequence generation module	49
4.2.1 Design of cmd_gen sub_module.....	49
4.2.2 Design of one_param sub_module.....	53
4.2.3 Design of two_param sub_module	55
4.2.4 Design of recv sub_module	57
4.2.5 Overall layout design	58
4.3 Hardware simulation and test.....	60
4.3.1 Modelsim hardware simulation.....	61
4.3.2 Comprehensive test module.....	63
Chapter 5 Conclusion and prospects	66
5.1 Conclusion	66
5.2 Prospects	66
References.....	68
Publications	71
Acknowledgements	72

第一章 绪论

1.1 课题背景

核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance，NMR）物理现象是美国斯坦福大学 Bloch 和哈佛大学 Purcell 分别发现的^[1]，由此现象而发展的核磁共振技术是研究物质的分子结构和动态过程的最常用和最有效的技术之一，在物理、化学、医学、生物、材料和石油探测等领域有着非常广泛的应用^[2]。

随着 NMR 技术应用领域不断的拓展和深入，推动着 NMR 谱仪技术的不断发展和完善。其中随着 NMR 无损检测技术的日益成熟，人们开始尝试将该无损检测技术应用于医学成像中^[3,4]。

直至 20 世纪 70 年代，美国的 Lauterbur 和英国的 Mansfield 提出利用梯度磁场进行空间定位的方位，使得磁共振成像（Magnetic resonance imaging，MRI）得以实现。由于 MRI 具有成像参数多、对比度高、无骨伪影干扰、可任意方位断层等优点，目前磁共振成像已经发展成为当今世界医学诊断中最广泛以及最先进的影像技术之一^[5]。

在中国，大多的医疗 MRI 仪器都是从国外的大公司引进，虽然功能强大、稳定性好，但是价格昂贵，致使在中国有许多地区的中小型医院无法配备这些 MRI 仪器，导致这些地区医院的诊断能力偏低。因此在我国进行自主研发 MRI 仪器，保证和提高 MRI 仪器的性能的同时降低 MRI 成本，使 MRI 仪器在全国医院范围内普及这是非常有必要的。

本文以苏州医工所与厦门大学合作项目“0.5T 磁共振关节成像系统的研制”为课题，针对 MRI 系统的主控板进行研究，主要完成对主控板上通信模块和脉冲序列生成模块的设计，旨在设计出效率高、质量好、稳定性强的主控板。

1.2 核磁共振成像原理概述

1.2.1 核磁共振基本原理

核磁共振研究的对象是构成物质的最基本单元——原子，当处于静磁场的原子核受到外部一定频率的射频脉冲激发时就会产生核磁共振现象，其共振频率由原子核的自身特性以及外部磁场强度共同决定^[6,7]。

原子由原子核以及绕核运动的电子所组成。许多原子核除了具有质量以及电

荷外还具有自旋角动量。自旋角动量用 \mathbf{P} 表示， \hbar 为普朗克常数， I 为自旋量子数，其绝对值由下式表示：

$$|\mathbf{P}| = \hbar\sqrt{I(I+1)} \quad (1-1)$$

按照经典电磁学理论，旋转的电荷可以看做是环路上运动的电流，原子核上既带有电荷又有自旋，也就有了相应的磁偶极距 $\vec{\mu}$ ，它与角动量的关系是：

$$\vec{\mu} = \gamma\vec{P} \quad (1-2)$$

其中 γ 为旋磁比，其值由核的本性所决定。

原子核的自旋角动量和核磁矩都是量子化的。以 \mathbf{B}_0 的方向作为 z 轴的正方向，核磁矩在 z 轴上的投影为：

$$\mu_z = \gamma P_z = \gamma\hbar m_I \quad (1-3)$$

其中 m_I 为磁量子数。当磁偶极距置于沿 z 轴的外磁场 \mathbf{B}_0 中，原子核与外磁场相互作用所产生的能量为：

$$E = -\vec{\mu} \cdot \mathbf{B}_0 = -\mu_z B_0 = -\gamma\hbar m_I B_0 \quad (1-4)$$

m_I 可取 $2I+1$ 个值，因此在外磁场中原子核能分出 $2I+1$ 个子能级，两两相邻的子能级间的能量差为：

$$\Delta E = \gamma\hbar B_0 \quad (1-5)$$

如果要观察能级间粒子的跃迁，则需要在垂直于主磁场 \mathbf{B}_0 的方向加上射频场，其中射频频率为：

$$\nu_m = \frac{\Delta E}{h} = \frac{\gamma\hbar B_0}{h} = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \quad (1-6)$$

在这里将 $\nu = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$ 或 $\omega = \gamma B_0$ 作为共振条件。

如果用经典物理来描述 NMR，则需讨论宏观磁化矢量 \vec{M} 。

$$\vec{M} = \sum \vec{\mu}_i \quad (1-7)$$

\vec{M} 在磁场 \mathbf{B} 中受到扭矩的作用使得磁距绕 \mathbf{B} 作进动，如下公式表示：

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{B}) \quad (1-8)$$

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.