

小型磁共振仪器中射频低噪声放大器和功率放大电路的设计

学校编码: 10384  
学号: 33120131152840

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦门大学

硕士学位论文

小型磁共振仪器中射频低噪声放大器和功率放大电路的设计

Low Noise Amplifier and Power Amplifier Design For Small Magnetic Resonance Instrument

丰伟

丰伟

指导教师: 孙惠军 高级工程师

专业名称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016年 04 月

论文答辩日期: 2016年 05 月

学位授予日期: 2016年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评阅人: \_\_\_\_\_

2016年 月

指导教师 孙惠军 高级工程师

厦门大学

厦门大学博硕

## 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

作者姓名：丰伟

论文题目：小型磁共振仪器中射频低噪声放大器和功率放大电路的设计制作

作者简介：丰伟，男，1991年03月出生，2013年09月师从于厦门大学孙惠军高级工程师，于 年 月获硕士学位。

## 中文摘要

低噪声前置放大器和射频功率放大器位于磁共振仪器收发通道的前端，均是重要的部件之一。低噪声前置放大器将从线圈感应到的 $\mu\text{V}$ 级自由感应衰减(FID)信号进行小信号放大，它的噪声特性直接影响磁共振成像仪的信号灵敏度，因此低噪声前置放大器的噪声、增益和工作频率范围等性能都有着很高的要求。射频功率放大器则是将激发样品所需的射频脉冲序列进行功率放大，使得样品被激发产生磁共振信号，功率、谐波、频带宽度及噪声等特性是射频功放设计及研究的重点。而对于便携式核磁共振谱仪，部件的体积需要设计的尽可能小，因此如何通过器件选型、电路结构设计以及仿真优化等方法，在达到性能要求的前提下，尽量减小体积，是亟待解决的重要问题。

本文从磁共振成像仪器的系统结构出发，根据信号接收通道的特点和课题研究的要求，设计研制了适用于0.5T磁共振关节成像仪的实用低噪声前置放大器。本文详细描述了前置放大器的具体设计、仿真过程和测试结果，所设计的放大器在中心频率处噪声系数最优为0.52dB，工作频率范围为18MHz-23MHz，其中工作频率范围可通过改变电容电感的参数值进行调整。所实现的低噪声前置放大器增益、输入输出驻波比等指标均满足设计要求、性能良好。此外，本文对低噪声前置放大器的平衡式结构也进行了设计与仿真。

本文依据射频功率放大器的设计理论和课题研究要求，对适用于1.5T便携式核磁共振波谱仪的射频功率放大器进行了初步设计和研制。通过器件的合理选型、结构布局的详细分析和仿真，所设计的功率放大器中心频率为64MHz，连续波输出功率约为20W，并且结构简洁，体积适合。此外根据便携式核磁共振波谱仪的结构要求，本文设计制作了一个可用于系统发射、接收功能转换的射频电子开关，并对该射频开关的性能进行了测试。

前置放大器和射频功率放大器均为射频模拟电路，在小型化的研制、调试优化方面均有较高的要求，特别是当射频功率较大时，更增加了设计与研发难度。本文所研究的前置放大器和射频功率放大器为小型化磁共振仪器的研制提供了可行的技术参考，并能够通过进一步的优化，提升性能和体积比。

**关键字：**核磁共振，低噪声放大器，功率放大器

厦门大学博士学位论文

# Low noise amplifier and power amplifier design for small magnetic resonance instrument

Feng Wei

## ABSTRACT

Low noise preamplifier and rf power amplifier located at the front end of the magnetic resonance instrument, are important components of mri system. LNA power amplifier the Input signal detected by coil which the order of magnitude is  $\mu\text{v}$ . The noise characteristics of LNA directly affect the imaging quality of the imaging system. Therefore the noise factor, power gain and frequency range are all have very high performance requirements. The power amplifier enlarge the pulse signal mri needed, thus, the sample is excited to generate a mri signal. The characteristics of power, harmonic, frequency band width and noise are the key point of rf power amplifier design and research a portable nuclear magnetic resonance spectrometer, the volume of the component needs to be designed as small as possible. Therefore, how to select the device, the circuit structure and the simulation and optimization methods to achieve the performance requirements of the premise and reduce the volume, is an important problem to be solved.

Starting from the system structure of magnetic resonance imaging instrument, according to the characteristics of the signal receiving circuit and the specific requirements of the project, a utility of low noise preamplifier for the 0.5T mri imaging instrument is designed. In this paper, the specific design process and test results of the preamplifier are described in detail. The noise coefficient of center frequency is 0.52dB, the working band of this amplifier is 18MHz-23MHz, the operating frequency of this low noise preamplifier can be adjusted by changing the component value in the matching network. The design of the low noise preamplifier

gain, gain flatness, input, output vswr and other indicators are all meet the scheduled requirements, and the performance is good. In addition, the research and design of a balanced structure of the low noise preamplifier is also carried out.

According to the specific requirements of the project and preamplifier's design theory, in this paper, a rf power amplifier for the 1.5T mri instrument is discussed and designed. Through the reasonable selection of the device, the detailed analysis and Simulation of the structure layout, the center frequency of the power amplifier is 64MHz, The continuous wave output power is about 20W, And the structure is simple, the volume is suitable. In addition to the structural requirements of the portable nuclear magnetic resonance spectrometer, a radio frequency electronic switch which can be used for change system's transmitting and receiving functions is also be designed and tested.

Preamplifier and rf power amplifier are all rf analog circuits, are all have higher requirements in the miniaturization of the development, debugging and optimization aspects, especially when the rf power is larger, it is more difficult to design and develop. The preamplifier and rf power amplifier in this paper provides a feasible technical reference for the development of miniaturized magnetic resonance instrument. And can be further optimized to improve the performance and volume ratio.

**Keywords:** Magnetic Resonance; Low Noise Amplifier; Power Amplifier



---

# 目录

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
<b>第一章 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景与目的.....	1
1.2 磁共振成像.....	1
1.2.1 磁共振成像技术.....	1
1.2.2 磁共振成像仪.....	2
1.2.3 磁共振成像基本实验流程.....	3
1.3 本论文研究内容.....	4
<b>第二章 射频电路基本理论.....</b>	<b>6</b>
2.1 散射参量.....	6
2.2 射频中的功率增益.....	7
2.3 稳定性理论.....	9
2.3.1 二端口网络的稳定性判定.....	9
2.3.2 射频电路的稳定性措施.....	10
2.4 噪声理论.....	11
2.4.1 噪声来源.....	11
2.4.2 噪声系数与等效噪声温度.....	12
2.4.3 级联网络的噪声系数.....	14
2.5 电磁兼容理论.....	14
2.6 ADS 软件.....	15
<b>第三章 低噪声前置放大器的设计制作.....</b>	<b>17</b>
3.1 低噪声放大器理论部分.....	17
3.1.1 低噪声放大器主要指标.....	17

3.1.2 分立元件与集成模块放大器.....	18
3.1.3 低噪声放大器的噪声匹配.....	20
<b>3.2 低噪声放大器电路设计.....</b>	<b>21</b>
3.2.1 确定低噪声放大器性能指标.....	21
3.2.2 确定低噪声放大器结构与晶体管选择.....	23
3.2.3 晶体管偏置电路设计.....	25
3.2.4 低噪声放大电路稳定性的设计。.....	28
3.2.5 低噪声放大电路的输入输出匹配。.....	31
<b>3.3 低噪声放大器 PCB 设计和制作.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 低噪声放大器的测量.....</b>	<b>37</b>
3.4.1 散射参数测量.....	38
3.4.2 噪声系数测量.....	38
3.4.3 压缩点测量.....	39
3.4.4 实验测试.....	40
<b>3.5 平衡式低噪声放大器.....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 总结.....</b>	<b>45</b>
<b>第四章 射频功率放大器的设计制作.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 射频功率放大器理论部分.....</b>	<b>47</b>
4.1.1 射频功率放大器主要指标.....	47
4.1.2 射频功率放大器的线性化技术.....	48
4.1.3 射频 PIN 开关.....	51
<b>4.2 射频功率放大器设计制作.....</b>	<b>53</b>
4.2.1 射频 PIN 开关设计制作.....	53
4.2.2 射频功率放大器设计.....	57
<b>4.3 总结.....</b>	<b>67</b>
<b>第五章 总结和展望.....</b>	<b>68</b>
<b>5.1 总结.....</b>	<b>68</b>
<b>5.2 进一步研究.....</b>	<b>68</b>

---

参考文献.....	70
论文发表情况.....	74
致谢.....	75

厦门大学博士

# CONTENTS

<b>CHINESE ABSTRACT.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>III</b>
<b>CHAPTER 1 RREFACE.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 BACKGROUND AND TARGET OF PROJECT.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 MAGNETIC RESONANCE IMAGING.....</b>	<b>1</b>
1.2.1 MAGNETIC RESONANCE IMAGING.....	1
1.2.2 Magnetic Resonance Imaging device.....	2
1.2.3 MRI basic experimental process.....	3
<b>1.3 CONTENT AND STRUCTURE OF THIS PAPER.....</b>	<b>4</b>
<b>CHAPTER 2 SOME BASIC THEORY OF RF CIRCUIT.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 SCATTERING PARAMETER.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 POWER GAIN OF RF CIRCUIT.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 STABLE THEORY.....</b>	<b>9</b>
2.3.1 Criteria of stability about two-port network.....	9
2.3.2 Stability measures of RF Circuit.....	10
<b>2.4 NOISE THEORY.....</b>	<b>11</b>
2.4.1 Noise sources.....	11
2.4.1 noise factor and equivalent noise temperature.....	13
2.4.2 A cascade network noise factor.....	14
<b>2.5 EMC THEORY.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6 ADS SOFTWARE.....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPTER 3 THE DESIGN OF LOW NOISE PRE-AMPLIFIER..</b>	<b>17</b>
<b>3.1 RELATED THEORY OF LNA.....</b>	<b>17</b>
3.1.1 Key indicator of LNA.....	17

3.1.2 discrete component and MMIC amplifier.....	18
3.1.3 noise match of LNA.....	20
<b>3.2 CIRCUIT DESIGN OF LOW NOISE PRE-AMPLIFIER.....</b>	<b>21</b>
3.2.1 Determine the LNA performance index.....	21
3.2.2 Determine the structure and the transistor.....	23
3.2.3 Transistor biasing circuit design.....	25
3.2.4 The stability design of the LNA circuit.....	28
3.2.5 Input and output match of LNA circuit.....	31
<b>3.3 PCB DESIGN OF LOW NOISE PRE-AMPLIFIER.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 MEASURE OF THE LOW NOISE AMPLIFIER.....</b>	<b>37</b>
3.4.1 Scattering parameter measurement.....	38
3.4.2 Noise-factor measurement.....	38
3.4.3 Compression point measurement.....	39
3.4.4 Imaging tests.....	40
<b>3.5 BALANCED LOW NOISE AMPLIFIER.....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 SUMMARY OF THIS CHAPTER.....</b>	<b>45</b>
<b>CHAPTER 4 THE DESIGN OF RF POWER AMPLIFIER.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 RELATED THEORY OF RF PA.....</b>	<b>47</b>
4.1.1 Key indicator of RF PA.....	47
4.1.2 Linearization technique of RF PA.....	48
4.1.3 RF PIN Switch.....	51
<b>4.2 THE DESIGN OF RF POWER AMPLIFIER.....</b>	<b>53</b>
4.2.1 The design of RF PIN Switch.....	53
4.2.2 The design of RF power amplifier.....	57
<b>4.3 SUMMARY OF THIS CHAPTER.....</b>	<b>67</b>
<b>CHAPTER 5 SUMMARY AND PROSPECT.....</b>	<b>68</b>
<b>5.1 SUMMARY.....</b>	<b>68</b>
<b>5.2 FURTHER STUDY.....</b>	<b>68</b>

<b>REFERENCES.....</b>	<b>70</b>
<b>PUBLICATIONS.....</b>	<b>74</b>
<b>ACKNOWLEDGEMENTS.....</b>	<b>75</b>

廈門大學博碩

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景与目的

核磁共振成像<sup>[1]</sup>是现代医学发展的重要方向，研发具有自主知识产权的核磁共振仪是一个永恒的命题；此外，现代科学仪器发展的一个重要趋势是小型化，仪器在相同价格的时候只有做的轻巧才有可能得到更好的推广与普及，笨重、庞大、开放性差的系统势必难以得到普及<sup>[2]</sup>。因此，研发国内拥有自主知识产权的小型化磁共振成像仪，对于国内磁共振成像技术的研究和发展具有非常重要及深远的意义。本文正是立足于小型磁共振成像仪的研制，目的是研发出能适用于相关核磁共振成像仪的射频电路。

### 1.2 磁共振成像

#### 1.2.1 磁共振成像技术

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance)是原子核的磁矩在恒定和高频磁场的共同作用下，并在满足其它一定条件时所发生的共振吸收现象，是一种利用原子核在磁场中能量变化的情况来获取原子核信息的技术。自从1946年发现以来，核磁共振已经成为化学、物理学、生物学及医学中的一个珍贵工具。核磁共振技术在早期只是被用于原子核的磁矩、电磁极矩、自旋的测量，随后则被广泛地运用于分子结构的确定，运用于生物的组织分析、病理分析、医疗诊断、产品无损检测等许多方面，还被用来观测一些动态变化的过程<sup>[3]</sup>。

由于在不同强度的磁场情况下，氢核的共振频率不同，所以相应的观测对象也就有所区别，据此可把现代核磁共振技术按照应用领域大概分为三个部分：磁共振测井MRL、磁共振成像MRI、磁共振波谱学MRS。

核磁共振测井及岩石核磁共振通常应用于低场（低于10MHz）情况，其磁源一般采用永磁体，电磁场是环境磁场（如地磁），样品与磁体的位置关系一般是样品在磁体外侧或样品包围磁体，这种应用的外界环境经常比较恶劣，采集到的信号信噪比很低要使用特殊的电路系统来接收和处理。临床医学中的磁共振成像通常适用于中场（10~100MHz）情况，其磁源可采用电磁、永磁体或超导磁体，

其采集到的信号信噪比在中等水平，相较而言易于接收和处理，但其对成像的位置分辨率要求很高。核磁共振波谱学通常适用于高场（100MHz 以上）情况，其磁源一般采用超导磁体，对环境设备要求较高，样品与磁体的位置关系一般是磁体包围样品，其采集到的信号幅值强，并且相较而言信噪比最高，易于接收和处理<sup>[4]</sup>。

本文的研究内容主要应用于核磁共振成像 (MRI)，核磁共振成像在医学中是一种非侵入性的诊断技术，通常被用于得到生物的生理学图像，MRI系统中磁体产生的磁场会迫使生物体内的氢原子产生特定规则的排列，而另外施加的射频 (RF) 能量会因生物体内组织的不同而产生不同的衰减变化，这些变化对应的不同返回信号在经过接收处理后就可以产生生物的组织图像。

### 1.2.2 磁共振成像仪

磁共振成像仪主要由磁体系统、射频系统(射频线圈、射频开关、前置放大器、后级放大器、射频功放等)、梯度系统(梯度线圈、梯度功放)、计算机系统及相关控制系统(频率源、数模转换、输入输出、模数转换等)所组成<sup>[4]</sup>，如图1.1所示。

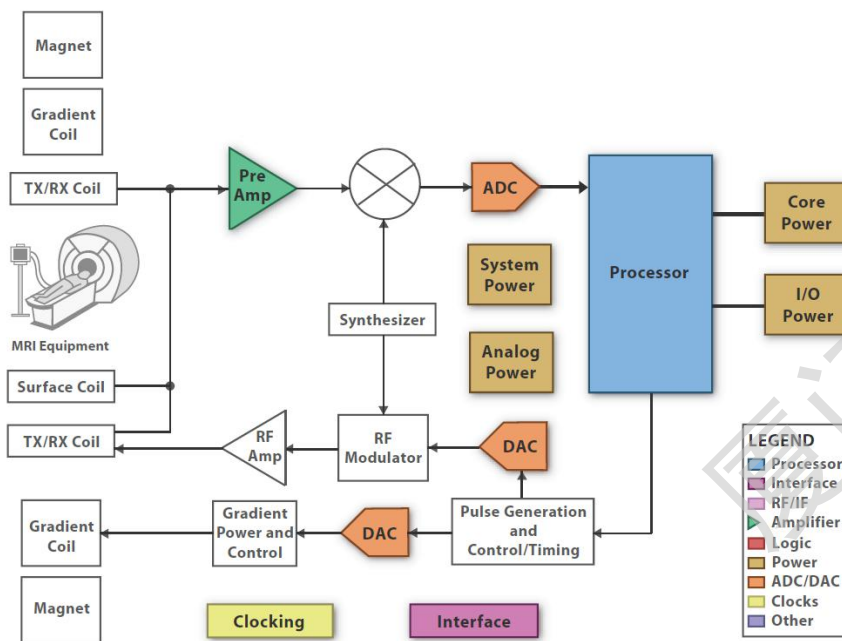


图1.1 核磁共振成像仪架构

其中，磁体系统的作用是产生一个特定空间内非常均匀的磁场，使处于其中的氢原子核在经磁化后产生磁化强度矢量，磁体系统可以说是成像仪最重要的部件，其成本往往也很高。目前在实际应用中的磁共振成像仪所使用的磁体主要有



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩