

中图分类号：O441.5

论文编号：10006SY1519121

北京航空航天大学 硕士学位论文

基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷研究

作者姓名 李园园

学科专业 无线电物理

指导教师 王三胜 副教授

培养院系 物理科学与核能工程学院

Research on Micro-defect Detecting by Magnetic Measuring based on SQUID

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Li Yuanyuan
Supervisor: Associate Prof. Wang Sansheng

**School of Physics and Nuclear Energy Engineering
Beihang University, Beijing, China**

中图分类号：O441.5
论文编号：10006SY1519121

硕士学位论文

基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷研究

作者姓名	李园园	申请学位级别	理学硕士
指导教师姓名	王三胜	职称	副教授
学科专业	物理学	研究方向	磁场测量技术研究
学习时间自	2015 年 9 月 1 日	起至	2018 年 3 月 1 日止
论文提交日期	2017 年 12 月 28 日	学位授予单位	北京航空航天大学
论文答辩日期	2018 年 1 月 17 日	学位授予日期	年月日

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得北京航空航天大学或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同事对研究所做的任何贡献均已在论文中做出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

本人完全同意北京航空航天大学有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

指导教师签名：_____

日期： 年 月 日

摘要

无损检测技术发展水平的高低标志着一个国家基础工业发展的好坏，它作为现代工业发展中的基础性技术，能够有效地保证工业产品的品质和工程项目的质量，被广泛誉为工业界的“质量卫士”。

集成电路制造商目前已采用多种方法和技术来定位布线缺陷，包括光学显微镜、扫描电子显微镜、扫描探针显微镜和微探针。也许在诊断 IC 短路问题中，最尖端技术是利用热成像与红外线摄影机相结合方法。当电路行为没有明显的缺陷时，这对于定位缺陷尤其有用。最明显情况是短路问题，因为短路会引起大量的电流，产生一个“热点”在热图像。但是，热成像的空间分辨率很低，特别是装有“倒装芯片”的集成电路，因为厚厚的导热基板。而超导量子干涉仪（SQUID）作为一种高灵敏度、高空间分辨率的磁传感器，可以在大的均匀场环境下检测 fT 量级的微小磁场信号，是对复杂电路板内部缺陷进行探测和确定的有效途径。

本硕士论文旨在通过系列深入地研究，以电磁学磁场分布为理论指导，以微弱磁场分布检测为依托，进而引入数值分析方法，最终实现对微弱磁场信息的有效检测、精确计算与反演分析。通过对 SQUID 工作原理、电磁场分布理论和电磁反演理论的研究和分析，为后续的技术实现、系统搭建和实验验证提供理论指导；通过对高效磁屏蔽理论的分析和技术实现，提供近零磁场环境，使 SQUID 进入正常工作模式；通过磁聚焦器的研究和实现，将磁聚焦器与磁传感器相耦合，最大限度的提高了 SQUID 磁传感器的空间分辨率；结合上述理论研究与技术实现，进一步搭建了基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷原理样机，该样机能够自动化地、高灵敏度地实现对被测对象磁场分布的检测；之后，结合检测数据的磁场信号特征，研究分析了行之有效的数据分析与处理方法，及检测结果云图绘制算法，确保检测结果的准确、直观和高效。最后，利用之前搭建的实验装置，对典型缺陷电路板进行检测，实验结果以平面云图形式直观表明缺陷位置与类型，完成本论文的研究目标。

关键词：SQUID、磁场测量、主被动磁屏蔽、空间分辨率、缺陷检测

Abstract

As the foundation of the development of modern industrial technology, non-destructive testing technology plays an important role in ensuring the quality of industrial products and engineering projects. It is also widely known as the industry's "quality guardian", which can measure the advanced degree of the national basic industry.

Traditional non-destructive testing techniques mainly include thermal imaging, ultrasonic, magnetic powder and single/multi-frequency eddy current testing, etc. These technologies can play a role in a particular defect-detecting field, effectively figuring out the presence of surface defects, also completing the corresponding quantitative evaluation. However, they can't help detecting the tiny or deep cracks in multi-layer composite structures. Superconducting quantum interference device (SQUID) has the characteristics of high sensitivity and high spatial resolution which can detect the tiny magnetic signal of fT magnitude around a large homogeneous magnetic field. As a result, it can effectively detect the internal defects or corrosion crack in multilayer material, which is regarded as an effective way to solve the above problems.

On the deeply research of electromagnetic field distribution theory, this paper aims to realize the effective detection, accurate calculation and successful inversion analysis of tiny defects in samples, by weak magnetic field information detecting, which achieves non-destructive testing. Firstly, sufficient research and analysis of the principle of SQUID, electromagnetic field distribution theory and electromagnetic inversion theory will be carried out to provide theoretical guidance for subsequent technical implementation, system building and experimental verification. Secondly, to ensure the SQUID's efficient working mode, it will research and analyze the magnetic shielding technique, and then set up a suitable magnetic shielding system for SQUID. In addition, realization of the magnetic focuser and 3d micro-displacement control system will improve the spatial resolution of the SQUID magnetic sensor. With the above results of theory research and technology achievement, it will further set up the prototype of micro-defect detecting system based on SQUID, which can automatically and highly sensitively realize the magnetic field distributing detection of the measured objects. Furthermore, combining with the characteristics of the testing data from the prototype, it will analyze the effective methods of data analysis and processing, and design the data-nephogram rendering algorithms, which make sure that the test results are accurate, intuitive and efficient. Finally, according to the above theory research and hardware system, some typical circuit boards will be as samples to carry out a series of experiments. The results can successfully detect the defects, showing out the abnormal curve plane and plane-scanning clouds intuitively.

In a word, the study of this paper can preliminarily realize the defect-detecting mission, achieving the goals of the research task.

Keywords: SQUID, Magnetic-field Measuring, Active and Passive Magnetic Shielding, Spatial Resolution, Defect Detecting.

目录

摘要	i
Abstract	ii
1 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 国际研究进展情况	1
1.2.2 国内研究进展情况	4
1.2.3 技术发展趋势	4
1.3 论文主要研究内容及安排	5
2 SQUID 及磁场检测理论研究	7
2.1 引言	7
2.2 超导量子干涉仪工作原理	7
2.3 磁场分布理论	8
2.4 磁场分布的电磁反演	8
2.4.1 傅里叶变换和傅里叶逆变换	8
2.4.2 吉洪诺夫正则化	9
2.5 本章小结	10
3 磁屏蔽技术研究	11
3.1 引言	11
3.2 高磁导率材料的被动磁屏蔽	11
3.2.1 静磁场中屏蔽效果理论计算	11
3.2.2 屏蔽桶设计	12
3.3 基于高温超导材料的被动磁屏蔽	12
3.3.1 理论分析	12
3.3.2 有限元仿真分析	13
3.4 主动动态补偿磁屏蔽	13
3.5 新型主被动磁屏蔽	14
3.5.1 恒定外磁场下, 屏蔽效能的分析	14
3.5.2 交变外磁场下, 屏蔽效能的分析	15
3.6 场冷与零场冷	15
3.6.1 零场冷情况下, 屏蔽效能的分析	16
3.6.2 场冷情况下, 屏蔽效能的分析	16

3.6.3	理论分析	16
3.7	本章小结	16
4	基于 SQUID 磁聚焦器研究与设计	18
4.1	引言	18
4.2	磁聚焦器基本理论	18
4.2.1	退磁场的计算	18
4.2.2	数值分析	18
4.3	有限元仿真分析	19
4.4	磁聚焦器磁导率测量	20
4.4.1	磁导率测量试验装置	20
4.4.2	磁导率测量结果	21
4.5	磁聚焦器应用于磁传感器	21
4.6	本章小结	22
5	基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷系统搭建和实验验证与分析	23
5.1	引言	23
5.2	系统样机总体设计	23
5.3	数据采集模块的设计与实现	24
5.4	不同高度 z 成像	24
	参考文献	26

第一章 绪论

1.1 课题背景及意义

无损检测技术发展水平的高低标志着一个国家基础工业发展的好坏，它作为现代工业发展中的技术基础研究，在检测产品质量和医疗应用上占据着重要的地位。从航空航天工业到核能工程领域，针对诸如裂纹、腐化等问题，表面和深层缺陷检测是一项非常重要的研究课题 [1-4]。另外，在民用和工业领域，可以用于大型集成电路生产流水线上的在线监测，有助于降低生产成本 [5-10]。除此之外，在生物医学领域中，脑磁检测是一种无创检测技术，它可以测量人类大脑头部由神经元活动产生的表面磁场，也可以同时记录人类大脑中核磁共振质子信号，这种对大脑无损害的临床医学检测设备的研发更是国际上的前沿课题 [11-18]。

随着各类电子系统集成度的提高，芯片中的互联结构也变得更加复杂。集成电路制造商目前已采用多种方法和技术来定位布线缺陷，包括光学显微镜、扫描电子显微镜、扫描探针显微镜和微探针。也许在诊断 IC 短路问题中，最尖端技术是利用热成像与红外线摄影机相结合方法。当电路行为没有明显的缺陷时，这对于定位缺陷尤其有用。最明显情况是短路问题，因为短路会引起大量的电流，产生一个“热点”在热图像。但是，热成像的空间分辨率很低，特别是装有“倒装芯片”的集成电路，因为厚厚的导热基板。为了解决上述问题，需要借助具有高灵敏度与高空间分辨率的磁传感器，实现 fT 量级的磁场测量精度，从而实现对电路典型缺陷的有效检测。

超导量子干涉仪（SQUID）是一种高灵敏度的磁传感器，其空间分辨率达到 μm 量级，在深层缺陷和微缺陷检测领域具有其他技术无法比拟的优势，故而在目前的无损检测技术中占据至关重要的位置，而该技术在国内的发展目前才刚刚开始，因此相关研究学者应该大力加强对它的深入研究和推广应用，本毕业论文中所阐述的相关工作便是对该技术一定程度的探索、研究与应用成果。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国际研究进展情况

A. Mathai 等人在 1993 年使用 4.2K Nb—PbIn 直流 SQUID 构造了一种新型的一维磁通显微镜，样品与传感器都为低温环境下，它的空间分辨率和磁场分辨率是前所未有的。在成像过程中，样品与传感器之间距离大约在 38。该系统实现了 66 左右的空间分辨率和磁场分辨率大约 5.2pT 在 6 千赫的频率。我们利用显微镜获得了低场超导样品的磁化率图像，并设计了一种测量静态磁场的简单方法 [19]。

美国马里兰大学用一个高温扫描 SQUID 显微镜在室温下成像半导体电路。我们的显微镜使用市售的 77 K 制冷机冷却直流 SQUID。该系统保持真空隔离，它与从室温样品分离约 30。当以这种方式操作，SQUID 磁场灵敏度为有 20 pT 在 500 赫兹下。通过磁场图像反演为二维电流密度分布，当前空间分辨率定位到 36 时，样品与传感器间隔为 150 时。该系统测量装置如图 1（a）所示，在扫描过程中，SQUID 保持在样品上方的

固定高度，SQUID 的平面平行于样品，因此 SQUID 测量磁场的 z 分量。对一个在两个引脚之间有一个死短的微电子芯片进行磁成像，测量结果如图 (b) 所示，这显然是短路的地方，因为所有的电流都必须通过设备中的单一缺陷，实现了对 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 大样品的有效检测，空间分辨率为 $150[8]$ 。

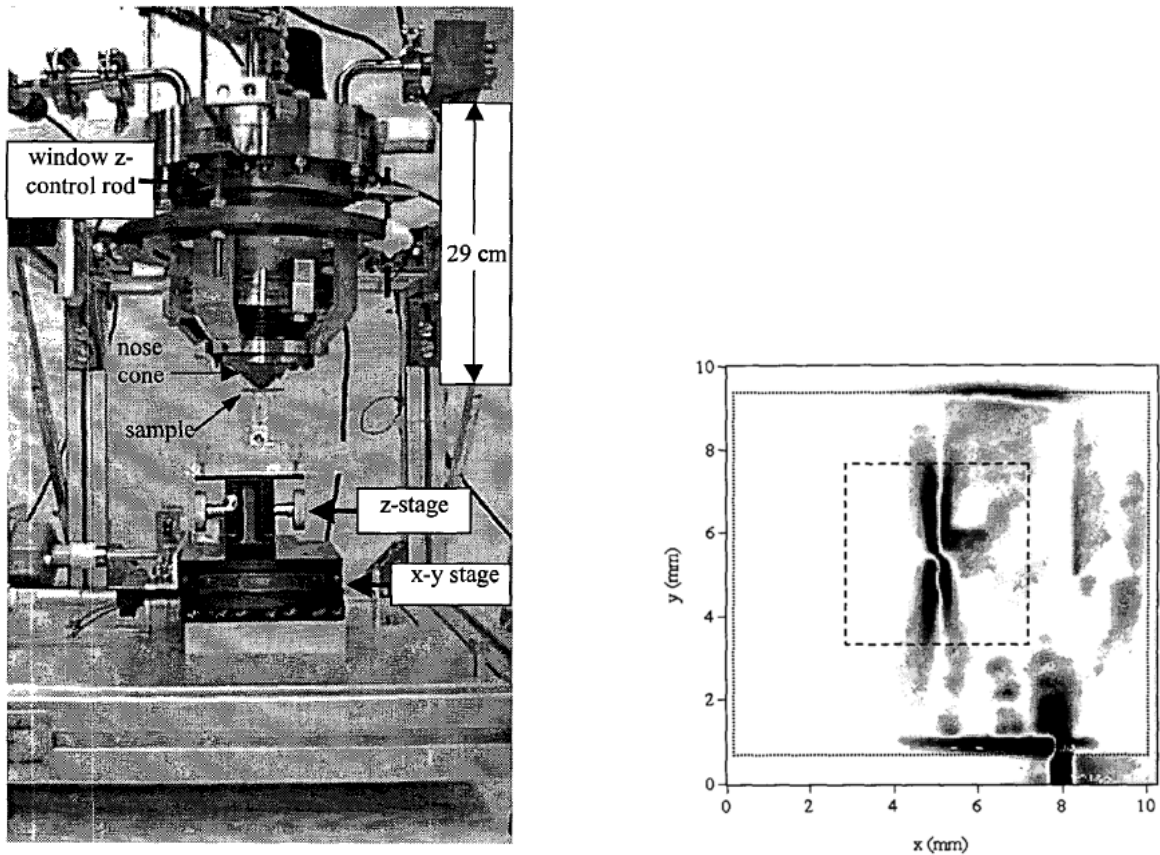


图 1: 美国马里兰大学 HTS SQUID 显微镜实物图及检测结果

L.A.Knauss 等人实现了室温下封装水平芯片缺陷检测，系统灵敏度达到 20pT ，空间分辨率达到 50 ，图 2 为芯片级别电源短路检测图，图中亮点部分为短路缺陷发生的位置 [10]。

2004 年，日本搭建了一个用于检测食品中金属污染物的高温超导量子干涉仪系统 [5, 6]，它能成功地检测到 0.6 到 0.1 毫米大小的不锈钢球和 1 毫米大小的铜球，SQUID 检测结果与理论计算值相吻合（如图 3），检测水平优于当时的市场需求。

随着社会的不断发展，为了提高该技术在工业现场的可适用性，良好的磁屏蔽技术成为其进一步发展的关键。2009 年，日本开发了两种基于双通道高温超导量子干涉仪，面向工业产品和饮料的污染物检测系统，其检测目标异物的颗粒大小为小于 100um 和 300um 。该系统借助带式输送机，可成功地检测到水中 100um (4.12ug) 的小铁颗粒和 300um (120ug) 不锈钢球。

借助超导量子干涉仪搭建的上述诸多检测设备，在缺陷检测领域所达到的水平是常规 X 射线检测或其他方法很难实现。

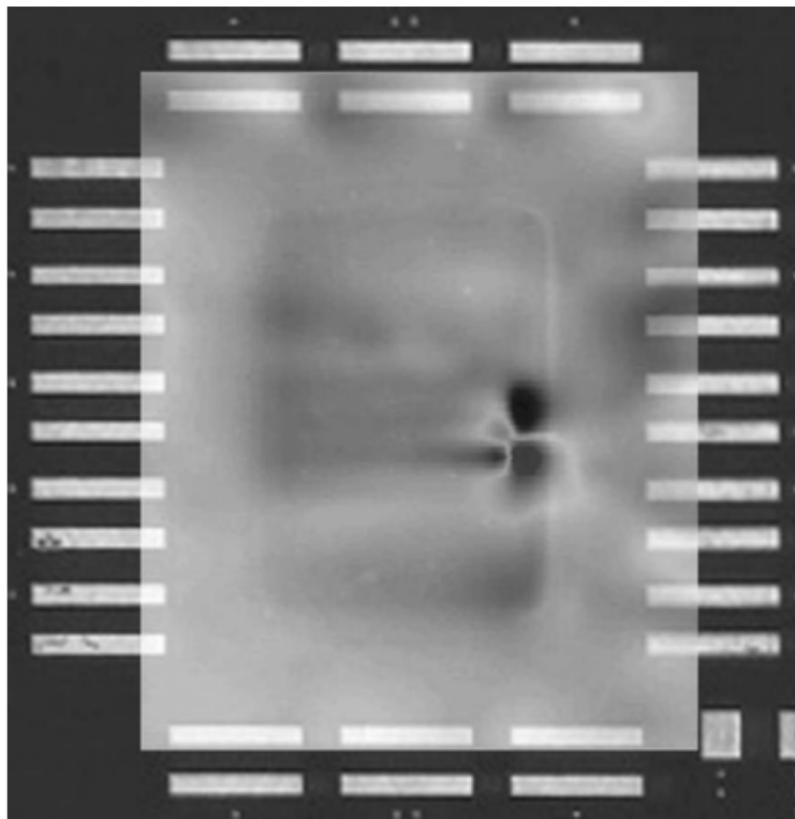


图 2: 磁场分布云图识别芯片短路缺陷

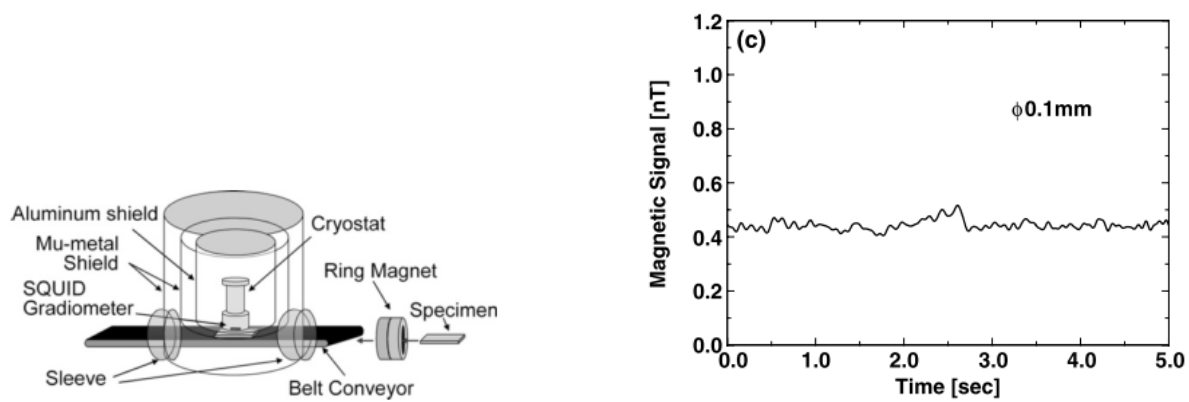


图 3: 用于食品污染物检测的高温超导量子干涉仪系统与检测结果

1.2.2 国内研究进展情况

我国已成功研制了室温扫描 SQUID 显微镜，被称为高温 SSM 系统，其结构如图 4 所示。其中，图（a）为扫描 SQUID 显微镜杜瓦结构，主要由无磁不锈钢、黄铜和蓝宝石片组成；图（b）为杜瓦底部详细图。该显微镜采用高温直流 SQUID 作为传感器，将没有接收线圈的 SQUID 超导环单独贴在黄铜冷指上，进而透过厚度为 75m 的蓝宝石窗口对室温样品进行检测。另外，该系统通过调节波纹管使 SQUID 环直接贴近蓝宝石窗口，而没有使用接收线圈的磁通耦合形式，实现了 150 的空间分辨率和 46 pT 的磁场灵敏度，能够实现对被测样品的缺陷检测 [20-22]。

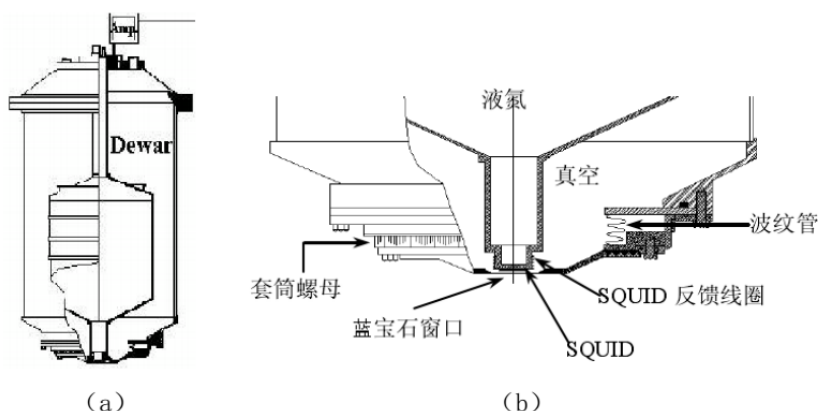


图 4: 中科院物理所室温样品 SSM 结构示意图

目前，国内其他关于扫描 SQUID 显微镜硬件系统的研究都是围绕上述系统的某个部分展开。2005 年，重庆大学的钟超荣等人对该系统空间分辨进行了改进研究，引入了磁聚焦技术 [23]，但仅限于仿真阶段。2008 年，北京科技大学的江忠胜利用该系统进行了初步无损检测实验研究，效果差强人意。

另外，北大超导实验室利用高温超导 YBCO 薄膜材料研制成了射频超导量子干涉仪磁强计系统，系统灵敏度达到了优于 80fT/的国际先进水平。该实验室借助该系统首次开展了对动物心磁的实验研究，取得了一些突破性进展。

综上所述，目前国际上基于 SQUID 的无损检测方面的工作技术相对比较成熟，而国内在这方面的探索和研究与国外有许多的差距，需要加大力量进行推进和不断的完善。

1.2.3 技术发展趋势

由于 SQUID 器件具有高灵敏度的特征，其磁场检测技术区别于传统射线检测，是利用高灵敏度 SQUID 磁传感器对样品进行扫描成像，从而实现在线完整性诊断的新兴技术，该技术可检测到被测构件结构更多的特征信息，从而更加准确、详细的反应其结构特征，完成缺陷检测的任务。

基于 SQUID 的微缺陷检测技术在实际应用中需要尽可能的发挥 SQUID 在磁检测方面的优势，尽可能的减小外界环境对其性能的影响，充分发挥其高灵敏度的特点。另外，针对微缺陷的应用方向，如何直观、高效地显示检测结果也是该技术在工程应用中

所面对的关键问题。与此同时，针对微缺陷检测的基于 SQUID 的完整磁检测系统的搭建和有效运行是该技术应用的基础。

综上所述，该项技术具有以下四方面的发展趋势：

- a) SQUID 高空间分辨率技术实现研究；
- b) 高效磁屏蔽技术研究；
- c) 快速便捷的扫描磁检测系统与磁成像技术研究；
- d) 基于 SQUID 的微缺陷检测系统的样机搭建与应用实现。

1.3 论文主要研究内容及安排

本论文旨在首先通过系列深入地研究，以电磁学磁场分布理论为指导，借助数值分析方法，实现微弱磁场无损检测问题中磁场信息的精确计算与分析。另外，基于 SQUID 应用的高效磁屏蔽技术和磁聚焦技术的研究，有助于搭建空间分辨率为 μm 量级的磁场测量原理样机。在此基础上，需要进一步研究缺陷检测的磁场信号特征，选择合适的特征信号，并引入合理的滤波处理与反演方法，从而获取被测对象中缺陷存在的详细信息，最终实现面向微弱缺陷的无损检测。

本文共分为五章，内容介绍如下：

第一章，绪论。主要对基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷的研究必要性进行简要阐述。之后，对国内外 SQUID 微缺陷检测研究情况进行概述，并总结了下一步该技术的发展趋势。

第二章，SQUID 介绍及磁场检测理论研究。基于本论文所使用的 SQUID 磁传感器，首先研究介绍了 SQUID 的设计原理、工作条件及传感器系统组成。另外，结合磁场检测的目标，研究了磁场分布的基础理论——毕奥-萨伐尔定律，进一步分析了磁场分布的电磁反演理论，为后续的实验应用和技术实现提供理论指导。

第三章，磁屏蔽技术研究。鉴于 SQUID 磁传感器对于磁场信号的高灵敏度，磁屏蔽技术对其实验应用的成败起到关键作用。本章主要研究了传统被动屏蔽和超导屏蔽技术的原理，并总结了其局限性；进一步地提出了一种主动屏蔽与超导屏蔽相结合的方法，既实现了实时补偿，又有效地抑制了交变磁场和多方向磁场的干扰，大大提高了磁场的屏蔽效果，保证了高灵敏度 SQUID 在微弱磁场测量中的成功应用。

第四章，基于 SQUID 磁聚焦器的研究与设计。空间分辨率的高低是 SQUID 应用过程中的一大难题，本章意在通过磁聚焦器的研究与设计实现对 SQUID 空间分辨率的优化。通过一系列的理论研究，重点分析了多个参数对磁化现象的影响，并借助有限元仿真分析手段进行了验证，最终设计出最优参数化的磁聚焦器，大大提高了空间分辨率。

第五章，基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷系统搭建与实验分析。本章主要基于上述理论分析与技术实现的结果，搭建了基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷原理样机，包括：SQUID 磁传感器部分、磁屏蔽部分、三维微位移扫描平台部分和上位机数据分析与

处理部分。并基于该样机的实验数据，进一步地研究分析了对检测数据的滤波算法和结果云图绘制算法，以期直观、有效的获取磁检测结果。最后，以典型电路结构为检测对象，进行了实验缺陷检测。结果表明，该原理样机能够实现微缺陷检测的目的，达到了本论文的研究目标。

最后，总结了本硕士学位论文在基于 **SQUID** 的磁显微测量微缺陷系统研究领域所完成主要工作，并该项技术下一步的应用前景进行展望。

第二章 SQUID 及磁场检测理论研究

2.1 引言

由于 SQUID 磁传感器对于磁场信号的高灵敏度，可以达到 fT 量级，因此，微弱磁场测量实验中必须使用该传感器，本论文的研究课题便是充分利用 SQUID 器件，实现对被测构件中微缺陷弱磁信号的有效检测。

基于上述研究目标，本章首先介绍了 SQUID 的工作原理，为后续的实验应用做准备；其次，作为本论文的根本检测对象，详细研究了磁场分布与电磁反演理论，为后续实验检测过程中的数据处理和结果展示提供理论指导。

2.2 超导量子干涉仪工作原理

超导量子干涉仪（SQUID）是超导电子学技术中的基本元件，这种器件在恰当的工作条件下可以将外部磁场变化高效地转换为电压信号。目前，优化设计的 HTC SQUID 传感器能够分辨的磁通变化为 Φ_0 ，而由于磁通量子 Φ_0 ，本身就是一个很小的物理量，因此本质上可使用 SQUID 磁强计实现对高精度磁场的测量。

SQUID 传感器最基本的特征是输出电压对外部磁场的变化表现出一种以磁通量子为周期的函数关系 [24-26]。为了增加测量灵敏度和线性化输入/输出响应，SQUID 磁强计的设计通常采用属通锁定工作模式，在这种工作模式中，变化的待测磁场使进入 SQUID 环孔中的磁通发生相应变化 (表示 SQUID 传感器的有效面积，是其重要的设计指标)，该磁通变化被 SQUID 传感器转换成电压变化交给磁通锁定电路进行放大、解调、积分和电压/电流变换，最终通过一个与 SQUID 耦合的电感在 SQUID 环孔中产生一个反向磁通以抵消外环孔中的磁通变化，其输出信号就是与 Φ_0 成正比的积分器输出电压。

上述设计模式（工作模式）除了能够提供正比于待测磁场变化的输出电压信号，还能把前置放大器的低频噪声、电路系统的温漂和 SQUID 的器件参数漂移对磁强计系统的影响降到最小。

本论文采用 XY-2 型高温超导 SQUID 磁强计，主要由 SQUID 传感器、磁通锁定电路和 SQUID 控制器 3 部件组成，下图为其工作原理框图。



图 5: 高温超导 SQUID 磁强计工作原理框图

XY-2 型高温超导 SQUID 磁强计所使用的 SQUID 传感器采用临界转变温度高达 90K 的高温超导材料 (YBa₂Cu₃O₇X) 制备，其核心技术是台阶边沿约瑟夫森结技术、大面积磁聚焦器/高谐振频率介质谐振器技术和 SQUID 芯片与磁聚焦器/超导介质谐振器组件的组合封装技术。其中，磁通锁定电路采用无磁通调制式锁定电路设计；SQUID 控制器则由多种功能的外围电路组成，通过对谐振器频率、射频偏置功率和直流电平等参量的控制以保证 SQUID 传感器能在不同环境干扰、背景磁场下处于最佳偏置和最佳磁

通锁定工作状态。

2.3 磁场分布理论

本论文进行磁场检测与反演所依据的基本原理是毕奥-萨伐尔定律，其公式如（2.1）所示，原理示意图如图 6 所示 [27]。

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2} \quad (2.1)$$

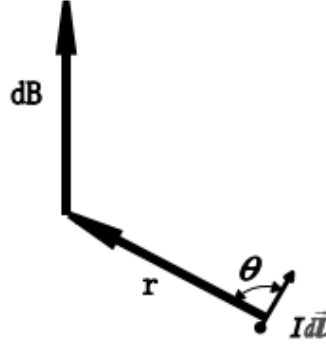


图 6: 点电流产生磁场示意图

其中， B 是磁感应强度，单位：T； μ_0 是真空磁导率； I 代表电流，单位：A；

上式大小： $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times e_r}{r^2}$ ；

方向： $Idl \times e_r$ ；

通过上述过程，可实现对被测构件中微缺陷磁场分布情况的理论分析与计算。

2.4 磁场分布的电磁反演

对于基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷研究，其关注的主要磁场信息量为被测构件中缺陷磁信号在空间 Z 方向的分量，该磁场信息的电磁反演事关检测结果的正确性，是本课题的重要研究内容。

2.4.1 傅里叶变换和傅里叶逆变换

根据毕奥-萨伐尔定律， z 方向磁场可由 x, y 方向电流密度求出，即 [28, 29]

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^a \int_0^b \frac{(y-y')J_x - (x-x')J_y}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.2)$$

对公式（2.2）进行傅里叶变换：

其中， k 为傅里叶空间变量。

再由电流空间的连续性得到电流密度的散度为 0，即

上述公式（2.2）和（2.3）中 x, y 方向的电流密度都是线性的，联立两式可得到频域空间的电流密度，如下：

最后，对频域空间的电流密度进行傅里叶逆变换，便可得到时域空间的电流密度。

对采集的磁场采用傅里叶变换、逆变换的方法来反演求解电流，可得到电流分布图。该方法特点为模型简单、数据处理与编程较容易，但经过傅里叶变换与逆变换处理过的电流分布中，电流信息缺失严重，并不能与磁场分布中的“缺陷”相对应。产生不匹配的原因可能是因为这种方法经过空间域和空间频上的变化后，局部的磁场变化会影响到整个电流空间分布，而且影响到整个二维平面的电流分布。该方法并未达到最理想效果，为了消除这些影响，需要进一步尝试引入滤波算法。

2.4.2 吉洪诺夫正则化

无限长薄电流片产生的磁场在 z 方向上的分量为 [30-33]:

数学计算上，沿带材电流垂直方向将带材表面分割成若干电流微元，然后根据毕奥-萨伐尔定律沿电流垂直方向的测量数据，列出线性方程组，再对线性方程组进行反演，便可求出电流分布。该方法要求测量的磁场数值与真实值差别不能太大，不然会造成求解得到的各电流微元上的电流极大地偏离真实值。

病态方程组的求解主要采用两种方法：第一种方法是使用双精度的高斯主元消去法或者 LU 分解的数值法。单精度的数值计算最大能得到 5 阶矩阵的线性方程组，而当矩阵高于 5 阶，单精度的算法就得到正确的结果。如果需要得到 20-30 阶的线性方程组的稳定数值解，应该利用双精度计算。

此外，更高精度的方法为正则化方法。以 Tikhonov 为代表的数学家于二十世纪六十年代提出了正则化方法，其基本思想是：通过引入正则化，使病态问题变得稳定，从而构成一个与原问题相临近的适应性问题，并用它的解来近似估计原问题的解。

图 7

如图 7 所示，我们沿电流传播方向将被测对象划分为若干等宽的矩形“细条”，在每个细条内近似认为电流密度相等，若能通过磁场反演得知各矩形细条上的电流大小，就可以得知被测对象的表面电流分布。

使用 Tikhonov 正则化方法处理，需要构建比较复杂的物理模型：沿电流传播方向将被测对象划分为若干等宽的矩形， i 表示矩形的空间位置、 k 表示霍尔探头的空间位置，则位于 k 处的霍尔探头测得的磁感应强度是被测对象上每个矩形上的电流在 k 处产生的磁场的叠加。根据 (2.7) 式，建立如下方程：

其中， $B_z(k,i)$ 表示 i 处的矩形在 k 处产生的磁场 z 轴方向的分量， z 为扫描霍尔探测器探头到被测对象所在平面的距离， y_k 为霍尔探头在 y 方向上的位置， y_i 为矩形在 y 方向上的位置， b 为矩形宽度，真空中的磁导率， $J(i)$ 为 i 处矩形上的电流密度。

考虑到位于 K 处的霍尔探头测得的磁感应强度是超导带材上每个矩形上的电流分别在 K 处产生的磁场的磁感应强度的叠加，可以写出线性方程组：

通过求解线性方程组的逆矩阵，就可以得知被测对象的表面电流分布。因为该问题常为不适定的，可以通过 Tikhonov 正则化方法来处理，(2.11) 式的求解就转化为适定题目的求解。

其中，正则化参数是，用来控制与的相对大小；为 Tikhonov 正则化矩阵，其具体形

式与具体问题中矩阵的具体形式有关，一般取为单位阵。通过添加等号右边第二项，将不适定问题正则化，再用多次迭代的方法来求解。

通过在等号右边残差范数后面加上一项，(2.11) 式中的不适定问题便被正则化了，(2.12) 式的解是 (2.11) 式的解的一个很好的近似，而且满足解的适定性条件，可以很方便地通过对 (2.12) 式的迭代来求解。此即吉洪诺夫正则化方法的基本思路。

2.5 本章小结

本章主要讨论 SQUID 的工作原理和系统组成，并针对被测对象，研究了磁场分布理论。之后，深入研究分析了电磁反演方法。

其中，SQUID 工作原理方面，详细介绍了 SQUID 正常工作所需要的系统组成，从 SQUID 传感器、磁通锁定电路和 SQUID 控制器三个方面分布阐述，为后续系统的搭建和实现提供理论支撑和技术指导；

磁场分布理论方面，则基于毕奥-萨伐尔理论，得出了基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷磁场的磁场分布情况，从理论计算的角度得出被测对象的磁场分布与大小，可供实验检测验证与对比分析；

电磁反演方法基于磁场分布理论，主要讨论了从被测结果到磁场分布的逆向计算过程，是本研究课题得已应用实现的最后环节，本章详细分析了傅里叶变换/逆变换和吉洪诺夫正则化两种方法，为最终是实验应用奠定理论基础。

第三章 磁屏蔽技术研究

3.1 引言

在过去的几年里，已经有越来越多的行业领域利用 SQUID 进行微弱磁信号测量，例如：心磁、脑磁和对金属材料及样品的缺陷检测。心磁图是通过测量心脏产生的磁场来记录磁场，已经得到了广泛的研究。在微弱磁场无损检测中，被测样品磁场信号为 nT 量级，而正常环境下磁场信号为 50000nT，因此，在超低磁场环境测量中，屏蔽环境电磁噪声是非常重要的。

高性能的磁屏蔽有以下几种方法：（1）传统高磁导率材料的被动磁屏蔽方法；（2）基于高温超导的磁场屏蔽技术；（3）主动动态补偿磁屏蔽方案；（4）由本课题组提出的动态补偿磁屏蔽和基于高温超导线圈相结合的主被动磁屏蔽装置。

本章将重点介绍主被动相结合磁屏蔽装置，并对其进行屏蔽因数测试。

3.2 高磁导率材料的被动磁屏蔽

传统的磁屏蔽通常是基于高磁导率的软磁材料组成，对于静磁屏蔽技术并不是“躲避”开磁场，而是为了吸引磁场，原理如图 8 所示。图中的壳体是用高磁导率材料（软磁材料）加工的，如坡莫合金、硅钢板和纯铁等，壳体就像一块吸铁石一样，把外部的磁场 H_0 吸引在壳体上，该磁场无法摆脱壳体进入内部，所以壳体内剩余的磁场为 H_i 。（a）图给出了一种理想情况，即屏蔽壳体内部没有磁场进入；图（b）是现实的静磁屏蔽效果，有少量磁场进入了壳体。

图 8

评价屏蔽效果的参数为屏蔽因子 SF：

因此，对于（a）的理想情况，屏蔽因子为无限大。

3.2.1 静磁场中屏蔽效果理论计算

（1）单层结构

对于球壳和无限长的圆柱壳轴向和横向的屏蔽因数进行分析，如果磁导率远远大于 1，公式为 [34]：

其中， R 为外层直径， r 为内层直径， d 为壳的厚度， μ 为材料的磁导率，一般会远远大于半径。

对于轴向磁场方向的无限长圆筒，静态场没有屏蔽效率，纵向屏蔽系数 $SL=1$ 。对于有限长度，这种屏蔽系数可以用相同长度与直径比和相同磁导率的旋转椭球体来估计纵向屏蔽系数 SL ：

其中， N 为消磁系数。

如果考虑到闭合圆柱的屏蔽效果，纵向屏蔽系数为

（2）多层结构对于圆柱形磁屏蔽桶，轴向屏蔽因子与径向屏蔽因子是不相等的，而且轴向屏蔽因子往往会低于横向的屏蔽因子。对于多层圆柱形屏蔽桶的横向屏蔽因子，

可以得到公式 [34, 35]:

3.2.2 屏蔽桶设计

为了确定屏蔽筒相关设计参数对屏蔽性能的影响, 首先采用有限元分析的方法对磁屏蔽性能进行分析研究。

图 9 (a) 给出了磁导率和磁屏蔽因数的仿真结果, 观察可知磁屏蔽因数随着的增加, 呈线性趋势增加, 即磁导率越高, 屏蔽因数越好。因此, 在设计多层屏蔽桶时, 为防止吸收磁饱和, 最外层的磁导率要大于内层的磁导率。

另外, 针对屏蔽桶的层数对磁屏蔽效果的影响进行仿真分析, 结果如图 (b) 所示。从图中可知, 屏蔽桶每层之间是等间距的, 层数越多, 中心区域测得磁场值越小, 屏蔽因数越高, 故可通过增加层数提高屏蔽效果。

图 10(a) 显示了屏蔽系数与层间隙之间的关系 [36], 从图中可知屏蔽系数随着层间隙的变化呈现出一种非线性关系, 存在一个最优值。

图 9

图 10

进一步地, 通过相关文献可知: Saburo Tanaka 将套筒引入开放的屏蔽桶中 [37, 38], 以期获得更高的屏蔽系数。其研究考虑了四种套筒连接的位置情况: 没有套筒、在开口的桶上有套筒、在开口的内桶上有套筒和在开口的内桶和外桶上都有套筒。分析结果如图 10(b) 所示, 结果可知 SF 随着套筒长度的增加而增大, 在套筒 40-60mm 长处 SF 达到最大。最高屏蔽因子 ($SF = 2808$) 在最后一情况中获得, 比第一种情况下的屏蔽因数大 2.3 倍。上述研究结果表明, 套筒在开放的屏蔽桶中起一定屏蔽作用。

传统的磁屏蔽通常是由几层高磁导率材料和高电导率材料组合而成, 这样的屏蔽系统是基于铁磁屏蔽和涡流屏蔽原理, 可以很有效地减少环境磁场噪声, 但是由于高成本和复杂的设计, 往往不能满足实验要求, 特别是野外环境。

3.3 基于高温超导材料的被动磁屏蔽

3.3.1 理论分析

超导磁屏蔽的屏蔽原理与高磁导率屏蔽的屏蔽原理完全不同, 超导磁屏蔽利用的是超导体的迈斯纳效应, 由于超导体“不允许”其内部有任何磁场, 如果外界有一个磁场要通过超导体内部, 那么超导体必然会产生一个与之相反的磁场, 保证内部磁场强度为零 [39-41], 这就会产生感应电流, 该过程是自适应的, 不消耗功率, 不需外加电源。

为了更好的分析超导的屏蔽能力, 可建立简化为一个电阻串连电感, 外加一个理想电压源的等效电路, 在变化场下描述该电路的方程是 [42, 43]:

其中, N 为线圈的匝数; L_0 是一匝线圈的电感; R 是电路的电阻; A 是线圈所包围的面积。

(3.7) 式的右边是由变化场引起的电势, 可假设一个均匀的正弦波场, 角频率, 磁场峰值 B_0 。当超导环处于超导状态, 即 $R = 0$ 时, 由 (3.7) 式可得到每匝线圈的电流为:

对式 (3.8) 的两个边乘以 N ，得到线圈的总的安培数为：

3.3.2 有限元仿真分析

引入有限元方法对超导环的屏蔽效果进行仿真分析，首先建立超导圆环的三维空间模型如图 11 (a) 所示，外面的球为无限大的空气域，中心区域圆环为超导环。

在设定边界条件和沿 z 轴激励源之后，获取最终的磁屏蔽计算结果，图 (b) 为横向磁通密度模分布图，从图中可得超导环内磁通密度模较小，边缘较大，分析原因为：超导环具有迈斯纳效应，产生感应电流来抵消内部磁场，增强外部磁场，所以内部磁场较小而边缘较大；图 (c) 为轴向磁通密度模分布图，从图中可知：在中心轴线上磁场密度模有最小值，磁力线被排斥在超导环外侧；图 (d) 分别为沿着直径方向与轴向方向的一维点线图，蓝色线为横向磁通密度模，从图中可知：沿着直径方向超导环内部磁通密度模比环外磁场小，在内部从边缘到圆心方向磁场逐渐增大，分析其原因为：远离超导环，即感应电流在内部产生的抵消磁场逐渐减弱，和外界磁场叠加以后，磁场值会变大。图中绿色线表示磁通密度模沿中心轴线的分布情况，即在超导环内磁通密度逐渐减小，中心位置为最小值。上述仿真结果可知，超导环对外界变化的磁场具有屏蔽作用。

图 11

3.4 主动动态补偿磁屏蔽

理论研究上，有两种类型的动态补偿系统，以负反馈为工作机制：电感式传感器系统和饱和磁通门系统。这两种类型的磁强计的传递特性是余弦，可进行矢量场的测量。

基于主动动态补偿磁屏蔽的目的，本课题搭建了如图 12 所示的主动补偿系统，主要由三轴磁强计、高精度恒流源、三对方形亥姆霍兹线圈和控制计算机组成。其工作原理为：将具有高灵敏度的磁通门计放置在霍姆赫兹线圈中心，由其检测实时环境磁场值，并通过一定的算法计算出需要补偿该磁场所对应的电流值。进一步地，由控制计算机驱动恒流源向霍姆赫兹线圈施加同规格电流，以产生与环境磁场对应的补偿磁场，从而实现主动磁屏蔽的效果 [44-46]。

根据上述原理搭建的检测系统其工作步骤为：

(1) 设置零磁场，即当三轴磁通门磁强计用于检测 XYZ 分量上的磁场时，利用主计算机算法计算每一个需要抵消磁场的轴的电流值；(2) 恒流源输出相应的电流到三轴线圈；(3) 补偿后检测环境磁场值为零。该过程通过闭合负反馈回路实现，可补偿电流受周围磁场波动的影响。图 13 描述了反馈回路关闭和打开情况下，磁场的 H_X 、 H_Y 与 H_Z 分布。可以清楚地观察到闭环时，磁场值在 $0nT$ 附近波动，而开环时磁场将发生漂移。因此，为了提高磁场的精度，减少周围磁场的干扰，应采用封闭的负反馈回路来控制该屏蔽系统。这种主动补偿可以人为达到 $10nT$ ，最大屏蔽因数为 $58dB$ 。

图 12

图 13

3.5 新型主被动磁屏蔽

三轴赫姆赫兹线圈可以屏蔽掉一些恒定和低频变化磁场，实现实时补偿，但是由于电源和复杂的反馈系统对中高频交变磁场实时跟踪屏蔽响应较弱，导致存在剩余磁场波动，对外磁场的屏蔽不完全，是主动屏蔽技术的一个极大的挑战。

结合前文介绍的超导屏蔽原理可知，结合主动屏蔽动态补偿的优势和超导磁屏蔽技术可有效地克服上述问题。因此，本研究课题提出一种主被动屏蔽系统，由有源屏蔽系统和高温超导环组成，高温超导环放置在有源屏蔽区域的中心，并通过液氮冷却，结构如图 14 所示。

在 77 K 温度下，系统被放置在均匀的磁场区域，采用高温超导量子干涉仪和高精度磁通门计对恒定外磁场和交变外磁场环境下的屏蔽特性进行了分析。

引入屏蔽因数作为磁场屏蔽能力的有效量度，屏蔽因数 SF 为

其中， B_0 是无屏蔽时外部磁场值， B_1 是在屏蔽区域内的磁场值，所有测量值在这里指的是 z 方向磁场值。

图 14

3.5.1 恒定外磁场下，屏蔽效能的分析

图 15 为主被动磁屏蔽系统屏蔽磁场强度图，用三维磁通门计分别测量 X、Y 和 Z 三个方向上磁场值。可以看出，主被动磁屏蔽可以有效减少外界磁场，与 X、Y 轴磁场相比，Z 轴磁场变化不大，Z 轴磁场稳定在 20nT。

图 15

在超导环的中心区域，即 $Z=0$ ($Z_1=0$) 处，沿着横向 x 轴，以 10 毫米为间隔，均匀测量 9 个点。在有无超导环磁屏蔽的两种情况下 ($Z=0$ 曲线表示没有超导环屏蔽条件下， $Z_1=0$ 曲线表示有超导环屏蔽条件下)，通过高精度磁通门传感器测得的 SF 结果如图 16(a) 所示。当超导环存在时，轴向屏蔽因子比无超导环时屏蔽因数大，最多达 10dB。在中心区域，SF 为最大值，沿着半径方向，SF 逐渐减小。因此可知，超导环在 z 轴的屏蔽磁场非常有效。

进一步对超导环的有效屏蔽区域进行研究，在不同高度处进行磁场测量，如图 (b) 所示。研究结果可知，在 $Z_1=0$ 处，中心区域屏蔽因数最好且提供均匀的区域，沿着 x 轴，屏蔽因数逐渐下降。随着高度增加或降低，屏蔽因数均小于 $Z_1=0$ 处的屏蔽效果。因此，要把 SQUID 传感器固定在超导屏蔽中心。

图 16

进一步的，将超高灵敏度的 SQUID 放在屏蔽区域，只用三轴线圈屏蔽，不加超导环线圈的测试结果如图 17 (a) 所示；只用超导线圈屏蔽，不加三轴线圈的测试结果如图 (b) 所示；三轴线圈和超导环一起屏蔽的测试结果如图 (c) 所示。测试结果可以得出：(c) 图可以清楚看到施加的三角波，没有周围噪声的干扰，当按下复位按钮时，数字电压表上显示数值在 0 附近，此时 SQUID 进入磁通锁定工作状态，可以展开微弱磁场的测量；而 (a) 和 (b) 图中有明显的噪声干扰，磁场噪声超过 SQUID 的测量量程，

SQUID 不能进行正常工作。

因此，可以证明该装置能够有效地屏蔽外界磁场干扰，使 SQUID 进入正常工作模式，不用搭建昂贵的磁屏蔽室和多层复合结构的磁屏蔽桶。该装置最明显的优势是：提供一个开放的磁屏蔽环境，方便样品扫描成像系统平台地搭建。

图 17

3.5.2 交变外磁场下，屏蔽效能的分析

为了分析上述磁屏蔽系统在交变磁场环境下的屏蔽效果，本研究主动施加不同频率（10Hz、50Hz、100Hz、500Hz 和 1000Hz）与不同幅值（电压为 1V、2V、5V 和 10V）的正弦波信号，经功率放大器放大后，输入到线圈中。在有无屏蔽时，借助交流高精度磁通门计检测交变磁场，其测试结果如下图 18 所示。

图中可知，相同电压下，低频信号产生磁场较大；随着电压增大，高低频信号产生磁场都相应变大，但是由于阻抗增大导致产生磁场变化较小。由图（a）和图（b）可以观察到，有屏蔽时测量磁场明显减小，10Hz 电压为 10V 正弦波产生交变磁场，磁场测量值由无屏蔽时 27V 减小到 13V，因此可以得出此屏蔽系统对高低频磁场信号都有屏蔽作用。

图 18

进一步地，对不同幅值和频率交变磁场进行屏蔽效能分析，以 SF 表示屏蔽因数， $SF = \frac{B_{out}}{B_{in}}$ 。由图 19 可知，总体来说，对低于 500Hz 信号，屏蔽效果较好，均在 45dB 以上，且屏蔽因数受幅值变化较小，此时与通常屏蔽装置相比，屏蔽效能较高。但对于高于 500Hz 信号，屏蔽效果在 28dB 以上，受幅值影响较大。综上考虑，在外界无任何屏蔽，且白天嘈杂城市环境中，整个屏蔽系统内部磁场均在 100nT 之内。该屏蔽系统，低频时几乎不受幅值影响，对低频屏蔽效果优于高频。

以频率为 50Hz、电压为 5V 的正弦信号产生磁场为研究对象，分析磁场在 $z=0$ 处沿 x 轴变化的情况，如图 20 所示。图中可知，在正负 15mm 之间，为均匀区域，磁场值最小，屏蔽因数最大至 67.7dB。在屏蔽区域边缘处，屏蔽效果有所下降，为 66.5dB。可以看到，该屏蔽系统可以产生一个大面积的均匀屏蔽区域。

图 19 图 20

3.6 场冷与零场冷

高温超导可以在零场冷和场冷两种情况下冷却，邓等人 [47] 对超导块材的最大悬浮力在两种冷却方式下进行比较。实验结果表明，块材在零场冷时与场冷时悬浮力没有直接联系。

那两种冷却方式对超导体的屏蔽有什么样的影响，针对这一问题，到目前还没有直接相关的报道，因此有必要对两种冷却方式下高温超导体屏蔽效能进行比较。

3.6.1 零场冷情况下，屏蔽效能的分析

零场冷为高温超导体冷却进入超导态在无外磁场的情况下，即在屏蔽室近零磁场环境中冷却超导环，然后再分析其屏蔽效果。实验中，通过施加不同频率与幅值的正弦波信号，经功率放大器放大后，输入到线圈中，在有无屏蔽时，用示波器观察交变磁场的输出情况。

图 21 (a) 给出了无外界磁屏蔽时的磁场测量结果图，磁场大小与输出电压成正比，因此我们用电压值代表相应的输出磁场幅值。观察到，随着电压增大，不同频率信号的输出电压都以相同趋势逐渐增大。在 10V 外界电压，10Hz 情况下，输出电压最大为 28V。在零场冷磁屏蔽装置中测试结果如图 (b) 所示，明显观察到，输出电压值减少，最大输出电压为 6V。主被动磁屏蔽装置可以有效进行磁场屏蔽，屏蔽因数如图 (c) 所示，结论为低频信号屏蔽效果优于高频信号。

图 21

3.6.2 场冷情况下，屏蔽效能的分析

场冷为在外磁场存在的条件下冷却，直至达到超导态。实验设置，使超导环处于地磁场环境中，充分冷却后，施加不同频率与幅值的外界正弦信号，分析其屏蔽效果，测试结果如图 22 所示。

其中，图 (a) 为无屏蔽时磁场电压输出，可以看出：与场冷时结果大致一样；图 (b) 为场冷屏蔽时，磁场电压输出明显大于零场冷屏蔽结果。测量屏蔽因数结果如图 (c) 所示，场冷情况下，屏蔽因数减小，因此屏蔽能力下降。零场冷屏蔽因数在 70dB 左右降低到 60dB 以下。故可推断出，场冷与零场冷对屏蔽效果具有很大的影响，我们要尽量采取零场冷的方法进行超导屏蔽，提高屏蔽效果。

图 22

3.6.3 理论分析

两种情况下屏蔽效果是不同的，其原因为：超导环屏蔽原理是迈斯纳效应，当外界磁场发生变化时，超导环会感应超导电流来阻止磁通变化。在场冷条件下，超导在冷却的过程中就获得了一定的磁通 B_{trap} 。俘获磁通的增加会导致钉扎势能的降低，其内部感应电流将变小，那么产生的感应磁场也变小，不能抵消外界的变化磁场，所以屏蔽效能减小。被测对象在场冷时的俘获磁通可以下式描述：

其中， A 为超导环的几何系数； μ_0 是真空磁导率； J_{ic} 表示感应电流，由 (3.11) 式得到， J_{c} 和 r 决定超导环的 B_{trap} ，故该式对实验结果提供一个理论依据。

3.7 本章小结

本章基于对 SQUID 工作所需的磁屏蔽技术的要求，研究分析了传统被动磁屏蔽技术、基于高温超导的被动磁屏蔽技术和新型主被动磁屏蔽技术，并开展了相关的实验和理论分析，得出了有助于基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷的磁屏蔽方案。其中，高性能的传统被动屏蔽需要高磁导率材料和多层结构，可以屏蔽恒定与交变磁场，但其设计

结构复杂及装置需要极好的封闭性。超导屏蔽根据迈斯纳效应，产生感应电流来抵消变化的磁通量，恒定的外界磁场无法屏蔽掉。而本文提出主动屏蔽与超导屏蔽相结合的方法，既可以实时进行补偿，还可以有效抑制交变磁场的干扰；不仅可以屏蔽轴向磁场，还可以屏蔽横向磁场，大大提高磁场的屏蔽效果，最高屏蔽因数为 63dB。在此屏蔽环境下，可以使用高灵敏度 SQUID 来进行微弱磁场测量，对该装置进一步进行优化，有望可以替代昂贵笨重的磁屏蔽室与屏蔽桶。

第四章 基于 SQUID 磁聚焦器研究与设计

4.1 引言

SQUID 磁传感器具有高磁场灵敏度，可以测到 pT 量级的磁场信号，但是用磁测量方法进行样品磁场检测时，为了达到缺陷检测目的，高空间分辨率也是极其重要的问题。磁传感器空间分辨率与灵敏度是相互制约的两个参数，他们与传感器探头的大小有关系，还与传感器到检测样品表面的距离有关系 [28]。由于现代微加工技术发展，SQUID 传感器可以做得很小，一定程度上解决了传感器探头大小的问题，因此提高空间分辨率的关键为减小磁传感器与样品表面的间距，由高磁导率材料构成的磁聚焦器可有效的提高传感器的空间分辨率，目前已得到广泛应用 [48-53]。虽然一些研究小组开始利用磁聚焦器进行实验，但是就其性能好坏的依据还没有开展详细的理论分析，如磁聚焦器的退磁因子与哪些因素有关等。本课题将从理论方面进行退磁因子计算，并在室温情况下对其长径比、锥角等进行初步研究，争取最优化设计磁聚焦器与 SQUID 的耦合，从而提高 SQUID 磁传感器的空间分辨率。

4.2 磁聚焦器基本理论

磁聚焦材料的聚焦能力相当于材料的有效磁导率 [23]，重要的是要注意，由于实际的磁聚焦器件不可能是无限大的，所以与器件的材料磁导率不相同，原因为退磁场的作用影响。材料产生退磁场大小用退磁因子 N 表示，这些参数之间的关系为：

其中， μ 代表有效磁导率； μ_0 代表器件的材料磁导率； N 表示退磁因子。

4.2.1 退磁场的计算

磁聚焦器为圆锥结构，结构参数如下图 23 所示。图 23

对上述磁聚焦器的退磁因子进行分析，根据圆锥与圆柱的结合体的表面磁荷分布，它左右两端的磁荷密度分别为 [27, 54]：，。令轴线上一点 P ，其到圆形平面的距离为 d ，几何体的半径为 R 。由上述可知，圆形面的磁荷面密度，已知点磁荷的磁场强度公式，规定外部施加的磁场方向为正方向，所以圆形面在 P 点产生的磁场可表示为：

计算圆锥面的磁荷在轴线上的影响， P 点在圆锥面的包围内，与尖端的距离为 d_0 ，求出圆锥面上的磁荷在 P 点的磁场强度为：

综上，该几何体轴线上任意一点 P 处（ P 在圆锥面的包围内）退磁场的磁场强度 H 为：

由此可以得到退磁因子 N ：

其中， J 为磁极化强度； μ 为材料磁导率； R 为该几何体的半径； L 为几何体的长度。

4.2.2 数值分析

根据退磁因子最终表达式 (4.6)，由这个表达式很难直接分析出锥角角度与轴线上退磁因子的关系，因此可以将 R 和 L 的数值关系带入，然后用 Maple 计算出退磁因子的变化趋势。保持 R 和 L 不变（即长径比不变），变化 θ 的大小，如图 24，分析退磁

因子的变化情况。

图 24

a. 令 $L=10$, $R=1$ 保持不变, $\tan=1$, 则 $\cos=$ 。此时退磁因子表达式为:

图 25

以 d 为横坐标, ND 为纵坐标作图, 结果如图 25 所示。由图可知, 轴线上中点部分的退磁因子较小, 靠近圆形端面的部分退磁因子随着 d 的增大而快速增大; 靠近圆锥面的部分会出现一个峰值, 这个峰值的大小远小于靠近圆形端面部分的最大值; 并且在 0 附近的时候, 退磁因子的方向与外加磁场方向相同。b. 令 $L=10$, $R=1$ 保持不变, $\tan=3$, 则 $\cos=$ 。此时退磁因子的表达式为:

图 26

以 d 为横坐标, ND 为纵坐标作图, 结果如图 26 所示。由图可知, 轴线上中点部分的退磁因子较小, 靠近圆形端面的部分退磁因子随着 d 的增大而快速增大; 靠近圆锥面的部分会出现一个峰值, 这个峰值的大小远小于靠近圆形端面部分的最大值, 且小于 a 情形中的峰值, 并且在 0 附近的时候, 退磁因子的方向与外加磁场方向相同。c. 令 $L=10$, $R=1$ 保持不变, $\tan=5$, 则 $\cos=$ 。此时退磁因子的表达式为:

图 27

以 d 为横坐标, ND 为纵坐标作图, 结果如图 27 所示。由图可知, 轴线上中点部分的退磁因子较小, 靠近圆形端面的部分退磁因子随着 d 的增大而快速增大; 靠近圆锥面的部分会出现一个峰值, 这个峰值的大小远小于靠近圆形端面部分的最大值, 且小于 b 情形中的峰值; 并且在 0 附近的时候, 退磁因子的方向与外加磁场方向相同。d. 令 $L=10$, $R=1$ 保持不变, $\tan=10$, 则 $\cos=$ 。此时没有圆柱部分, 退磁因子表达式为:

图 28

以 d 为横坐标, ND 为纵坐标作图, 结果如图 28 所示。由图可知轴线上靠近圆形端面的部分退磁因子随着 d 的增大而快速增大; 靠近圆锥面的部分没有出现一个峰值, 而是变成了一条近似直线的曲线, 随着 d 的增大退磁因子缓慢增大; 在 0 的附近退磁因子无限接近于 0。以上 4 种情形锥角的大小关系 $a>b>c>d$ (锥角越来越尖), 靠近圆锥面的退磁因子的峰值随着锥角的减小而减小, 最终变成一条平滑的曲线。由此可知, 当合金样品的长径比不变的情况下, 样品轴线上靠近中心部分的退磁因子较小, 靠近圆形端面的退磁因子较大, 靠近圆锥一端的退磁因子会出现一个峰值, 峰值出现的点位于圆柱与圆锥的交界处, 并且随着锥角变小 (圆锥尖端变尖) 峰值的大小会越来越小。整体来看, 样品轴线上的退磁因子会随着圆锥角度的减小而整体减小。当圆柱部分的长度为 0 时, 轴线上整体的退磁因子减到最小。

4.3 有限元仿真分析

针对磁聚焦器的多种结构: 全圆柱形结构、全圆锥形结构、圆柱与圆锥相结合 (锥角为 30 度) 和圆柱与圆锥相结合 (锥角为 15 度), 通过有限元分析的方法, 分别开展与无磁聚焦器时的仿真对比。由仿真结果可知, 磁力线会聚焦通过高磁导率磁聚焦器,

从而提高磁场强度，达到聚焦目的。进一步通过仿真计算得出磁聚焦器轴线上的二维截面磁场大小及分布，进而判断其聚焦能力，结果如下诸图。不同结构的磁聚焦进行仿真分析，图 29 (a) 为无磁聚焦器时，样品成像图，(b) 和 (c) 图分别为圆柱形和圆锥形结构磁聚焦器，有分析结果可知，全锥形结构磁感应强度是最大的，优于圆柱结构；之后对不同锥角的磁聚焦器进行分析，结果如图 30 所示，圆锥锥角越小，聚焦能力越好，这也是圆锥结构优于圆柱结构的原因。最后，把所有情况进行分析对比，如图 31 所示，清楚观察到：加上磁聚焦器后测得磁场会大于无磁聚焦器情况，证明磁聚焦器具有聚焦作用。综上所述，仿真结果与上述理论结论相吻合，磁聚焦器可一定程度上解决传感器空间分辨率的问题。

图 29

图 30

图 31

4.4 磁聚焦器磁导率测量

4.4.1 磁导率测量试验装置

根据安培电流定理，通电螺线管可以产生均匀的磁场，因此可利用螺线管产生的磁场测量磁性材料的磁化率。图 32 给出了试验用测试磁化率的螺线管线圈，在该线圈中可以产生均匀的交变磁场。在测试过程中，需要在棒状的被测磁性材料上面也绕上一定匝数如 5 匝的线圈，如图 33 所示。其中，绕中心部分的测量方法叫做面磁通门测量方法，测得的退磁因子称为面退磁因子 N_f ；而全部绕满的测量方法中称体磁通门测量方法，利用测量得的磁通量转化成磁性材料的磁矩，然后通过计算得到的退磁因子称体退磁因子 N_m 。

图 32

图 33

实际实验设置中，测试系统结构如图 34 所示，主要包括 SIGNAL DISCOVERY 的锁相放大器、一个高精度的 10 的电阻和长为 39.2cm、匝数为 300 的螺线管。其中，锁相放大器一方面为螺线管产生恒定电压 V_{out} ，从而确保螺线管内产生均匀磁场；另一方面，锁相放大器基于自身的锁相和放大功能，可检测微弱电信号，实现对被测磁性材料感应信号的采集。锁相放大器所采集的信号包括串接在螺线管上的 10 电阻两端的 V_a ，和绕在被测材料上线圈两端的 V_b 。因此，通过 V_a 可以知道磁场中所产生的电流大小，进而可以知道螺线管中产生的磁场大小；而通过 V_b 可以知道磁性材料上面绕的线圈则作为次级线圈产生的感应电压，从而得到磁性材料在螺线管均匀磁场中所接收的磁通量大小。根据法拉第电磁感应定律，依据上述试验过程可以最终推导得出磁性材料的磁化率大小，进而计算得出退磁因子的大小，并迭代至 Chen-D-X 等文章所列表中，进而完成退磁因子 N_f 和磁化率大小的测量。图 34

4.4.2 磁导率测量结果

(1) 不同长度的磁聚焦器

用上述测量装置对总长度分别为 30mm、50mm 和 70mm，锥角为 60 度，直径为 6mm 的磁聚焦器进行磁导率测量。应用锁相放大器施加不同幅值且频率为 155kHz 的正弦信号，经数据处理与分析，其结果如下图 35 所示。图 35

从图中可知，磁聚焦器越长，即长径比越大，相对磁导率越大，退磁因子较小。

(2) 不同锥角的磁聚焦器

用上述测量装置对总长度为 50mm，锥角分别为 30、60、120 和 180 度，直径为 6mm 的磁聚焦器进行磁导率测量。应用锁相放大器施加不同幅值且频率为 155kHz 的正弦信号，经数据处理与分析，结果如下图 36 所示。图 36

从图中可知，锥角对磁导率有一定影响，但不是特别明显；锥角为 60 度的磁聚焦器相对磁导率最大。

4.5 磁聚焦器应用于磁传感器

SQUID 传感器正常工作时，需要处于低温环境中，一般放置在杜瓦内，而被测样品是室温样品，所以磁传感器与样品之间有一定的距离。为了提高空间分辨率，即减小他们之间的距离，最常用的方法是：将磁聚焦器与传感器相耦合。本节将磁聚焦器与三位磁通门计相耦合，结构如图 37（a）所示。使用长度为 30mm，半径为 3mm，锥角为 60 度的磁聚焦器，三维磁通门计灵敏度为 1nT，大小为 3232mm，磁聚焦器粘在三维磁通门计的中心位置。磁聚焦器和样品之间的距离为 2 毫米，样品附在由塑料棒制成的样品架上，可以随着由 PC 控制的移动平台实现三维运动，运动扫描区域可由 PC 显示器控制，扫描精度约为 0.125。扫描显微镜观察的过程为：首先，把耦合磁聚焦器的磁传感器插入到主被动磁屏蔽区域内，放在中心位置；然后，将样品放在样品架上，置于探针头下，设置好初始位置和扫描区域；之后，样品在 x 和 y 方向实现扫描；最后采集数据与保存。

图 37

磁场测量样品选用间距为 5mm 的通电折线，示意图如图 37 所示。其中，针尖与样品之间距离为 2mm，折线施加电流为 1A。（c）与（d）图分别显示有无磁聚焦器和磁传感器相耦合所测得电流分布图，从图（c）可以清晰得出四根导线所在位置，而无磁聚焦器测量结果明显观察到两根导线，因此可以得到：磁聚焦器可以明显提高磁传感器的空间分辨率。进一步地，对间距为 2mm 的折线进行磁场测量，样品中共有 7 根指导线，测试结果如图（e）所示，测试结果可以清楚观察到 7 根导线电流分布，从而更加证明磁聚焦器在提高磁传感器空间分辨率的作用。

4.6 本章小结

本章主要从理论上推导出圆锥结构磁聚焦器的退磁因子，并通过实验研究出磁聚焦器聚磁能力与退磁因子相关，退磁因子与材料的有效磁导率、长径比成反比关系。结合上述研究成果，最终得出磁聚焦器的设计应该具有大的长径比，圆锥锥角 60 度为佳，此时退磁因子小，磁聚焦能力强。进一步地，结合后续基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷实验需要，实现了磁聚焦器与高精度磁传感器的耦合，有效地提高了磁传感器的空间分辨率。

第五章 基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷系统搭建和实验验证与分析

5.1 引言

前文各章对基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷的相关研究和技术实现为原理样机的搭建奠定了基础,本章首先完成了原理样机的总体方案设计与实现,主要包括 SQUID 磁传感器部分、磁屏蔽部分、三维微位移运动平台部分和上位机数据分析与处理部分。接着,基于原理样机的检测结果,采集数据的后期分析与处理角度入手,研究分析了两种滤波方法,以提高检测效率,并进一步的设计实现了磁场检测结果分布云图的绘制算法,保证检测结果可直观、高效的显示,提高检测系统的可用性。最后,以典型的电路结构为检测对象,在此原理样机的基础上开展了一系列的缺陷检测实验。实验结果表明:基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷系统能够以直观、有效的方式获取磁信号,从而反映磁场的缺陷位置与典型类型,实现微缺陷检测的目的,达到了本论文的研究目标。

5.2 系统样机总体设计

本论文主要研究基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷,基于前文的理论研究和技術实践,搭建了基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷原理样机,结构如图 38 所示。

图 38

该原理样机总体设计主要包括:高精度磁传感器、主被动磁屏蔽系统、高精度三维机械运动平台和数据采集与处理分析模块。样机搭建过程需要对每个子模块进行单独调试、运行和实验,然后把所有系统联合调试,最终完成整套系统的搭建,样机实物如图 39 所示。

图 39

其中,传感器部分:实验室现有测交变磁场的三维高精度磁传感器,测量量程为 10Guass,磁场灵敏度为 1nT。另外,超高精度超导量子干涉仪磁传感器是本系统的关键,该传感器系统本征磁通白噪声谱密度小于等于 $300/\text{Hz}^{(1/2)}$,可以测量变化幅度在 ± 3000 的磁通变化测量,具有磁通噪声低、磁场分辨率高的特点。另外, SQUID 的正常工作需要配合技术成熟、价格便宜、安全可靠的液氮作为它的冷却媒质。磁屏蔽部分:无损检测中,被测样品磁场信号为 nT 量级,地磁场为 50000nT,实验需要屏蔽背景磁场来减少噪声和干扰,因此,在超低磁场环境测量中,对环境电磁噪声(如地磁还是城市噪声)进行磁屏蔽是非常重要的。本文磁屏蔽装置为主动磁屏蔽与被动磁屏蔽相结合的方法,详见第三章。三维机械运动平台:由运动控制上位机(计算机)、下位机(单片机系统)、步进电机驱动器及步进电机、机械运动装置及试样平台 5 部分组成。其中,上位机作为控制指令的发送端;下位机在接收到上位机发送来的控制指令后,生成相应的电机运动控制指令;步进电机驱动器直接接收下位机发出的电机控制指令,经过相应的逻辑转换后直接驱动步进电机的动作,进一步由步进电机带动机械滑臂完成最终的空间运动。XYZ 三轴组合后的重复定位精度可以达到 20 μm 。

根据基于 SQUID 的磁显微测量微缺陷的要求，上述原理样机的搭建需要关注一下问题：

- (1) 确保 SQUID 在冷却杜瓦真空层降温到工作区间（70K）；
- (2) 冷却杜瓦底部靠近样品的部分必须由无磁材料加工制作，以防止其因含有剩磁信号对待测样品磁场信息产生影响；
- (3) 三维移动平台应整体尽量采用无磁材料加工制作，步进电机应在满足基本负荷的范围内，选取最小功率的型号，以减小其噪声对系统的影响；
- (4) 承载样品的样品架，应由绝对无磁材料加工制作而成，且应该保证一定的长度，使得样品远离步进电机磁场干扰的影响；
- (5) 磁屏蔽区域屏蔽磁场尽量均匀、剩磁较少，减少对待测样品的影响。

5.3 数据采集模块的设计与实现

在定量缺陷检测实验中，需要采集数据。在整个检测系统中，数据采集系统完成数据的 A/D 转换、分析处理和存储等工作。数据采集和存储是由上位机控制界面控制的，操作界面如图 40 所示，在控制位移平台移动之前，把相应的参数设置好，选上是否采样的选项，然后打开串口，点击开始按钮，在位移平台开始按照运动指令运动的同时，将会进行磁场数据的采样。采样的方式是，采集位移平台所走点阵中的每个点的数据，且每个点上共计采集十个值，以便后期进行数据处理或滤波。在位移平台运动结束后，点击保存数据，选择合适的保存路径，数据会自动保存为一个.txt 文档。最后，根据自己的需要处理所保存的数据即可。

图 40

5.4 不同高度 z 成像

扫描 SQUID 显微镜 (SSM) 是最敏感的仪器，可以获取样品表面附近的磁场。SQUID 扫描显微镜已成为无损检测样品的有力工具，用于微电子、磁通动力学和其他物理领域。为了实现高空间分辨率的 SQUID 扫描显微镜，SQUID 探头应接近样品表面，开发了一种薄蓝宝石窗口的高温 SSM，便于在空气中进行样品测量。但是 SQUID 探头与样品直接的距离取决于蓝宝石窗口的厚度，即不同探头与样品之间的距离，其不同高度处 Z 方向磁场成像性能尚未进行详细的分析，无法确认 SQUID 是否能够检测给定样品的实际磁场。本节内容，主要研究了不同探测高度处 Z 分量 (BZ) 磁场成像性能。用二维分析模型计算了折线的磁场分布，并借助上述原理样机实验验证不同高度处样品的磁场成像结果。

结论

参考文献

- [1] COMSOL 中国. *laaa1aaa* 如何模拟落在水面上的球体? , 2023[EB/OL]. 知乎-有问题, 就会有答案.