

## 报告正文

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。  
请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

### 立项依据与研究内容 (建议 8000 字以下):

1. 项目的立项依据 (研究意义、国内外研究现状及发展动态分析, 需结合科学研究发展趋势来论述科学意义; 或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录);

#### 1.1 研究意义

人类的大脑是一个非常复杂的系统，其神经元之间的交流和相互作用决定了我们的思维、行为和情感。为了更好地了解人类大脑的结构和功能，神经科学家们利用脑磁测量技术研究了大脑活动的时空特征，这项技术已成为神经科学和临床神经疾病诊断的重要手段之一。目前，大多数脑磁测量仪采用超导量子干涉仪 (SQUID) 作为磁强计，但 SQUID 的制造和维护成本高昂，且对于环境磁场的干扰非常敏感，限制了脑磁测量仪的广泛应用。

SERF (spin-exchange relaxation-free) 磁强计是一种新型的原子磁强计，它利用自旋交换消除杂散磁场的影响，具有高精度、低成本和稳定性好等优点，是一种非常有潜力的替代 SQUID 的磁强计技术。本项目旨在开发基于 SERF 磁强计的脑磁测量仪，解决目前脑磁测量技术中存在的问题，推动脑科学研究和临床神经疾病诊断技术的进步。

如今，脑磁成像已成为一个热门的领域，在全球仅拥有约 200 个活跃的脑磁成像实验室，但可以看到脑磁成像已用于越来越多的研究领域，例如：1) 基础神经科学，旨在促进对大脑在振荡，网络和网络关系方面的功能组织方式的理解；2) 认知神经科学，旨在增进对认知过程的基本理解，例如感知，注意力，记忆，语言和执行控制；3) 临床神经科学，旨在识别帕金森氏和阿尔茨海默氏病，自闭症谱系障碍，精神分裂症，ADHD，癫痫和 TBI 等临床队列中与疾病和严重性相关的脑功能特征；4) 临床应用，利用 MEG 作为难治性癫痫的术前计划以及感觉和语言加工的术前功能图的工具，还包括新兴应用，例如 TBI 和痴呆的研究。

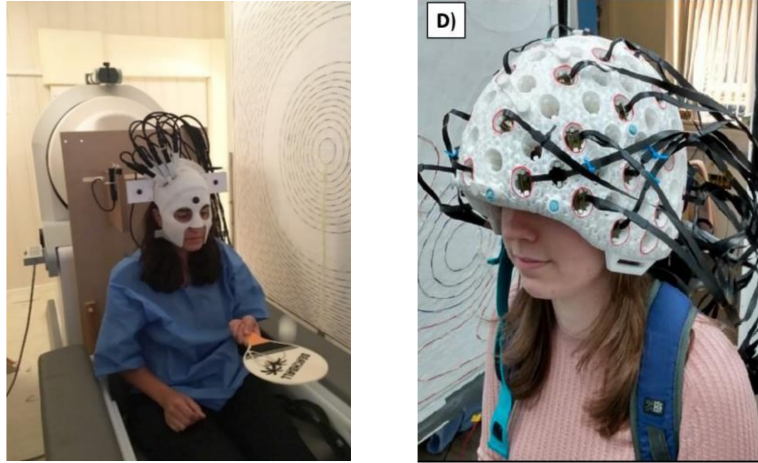


图 1: 脑磁测量系统

## 1.2 国内外研究现状及发展动态分析

目前，大多数脑磁测量仪采用 SQUID 作为磁强计。SQUID 的灵敏度和分辨率很高，能够探测非常微弱的磁场信号，因此在脑磁测量领域得到广泛应用。但 SQUID 的制造和维护成本高昂，且对环境磁场的干扰非常敏感，需要严格的磁屏蔽和温度控制条件，因此限制了脑磁测量技术的应用范围。

近年来，SERF 磁强计得到了广泛的关注和研究。SERF 磁强计利用碱金属原子的自旋交换效应来消除杂散磁场的影响，具有高精度、低成本和稳定性好等优点，是一种非常有潜力的脑磁测量方式。

目前国际上较为成熟的脑磁测量机构主要有诺丁汉大学、阿尔托大学、NIST、日本京都大学等。

其中诺丁汉大学进行脑磁测量较早，且得到了一定的效果。其在 2017 年实现了左侧正中神经刺激以测量诱发响应并进行源定位，使用一个 QuSpin 一代传感器（其灵敏度达到了 15fT/Hz，带宽 135Hz）布置在头部右侧侧感觉运动皮层 [1]。另外，其在 2019 年利用 10 个布置在初级视觉皮层的主探头和 4 个参考探头的传感器组实现了  $\alpha$  波检测试验；视觉刺激试验以及头部运动与视觉皮层激活区域分析实验，并使用 12+4 探头组合实现了母亲接触并施加刺激实验；互动运动实验（射箭）；自然运动学习（四弦琴）[2]。在 2020 年，其基于 49 个探头布置在全头部 +4 个参考探头的 QuSpin 二代传感器（灵敏度 7-10fT/Hz，带宽 135Hz），并利用柔性帽、3D 打印头盔二者分别装配 OPM 与 SQUID 设备对比。采用了视觉-运动

范式，成功进行试验 [3]。

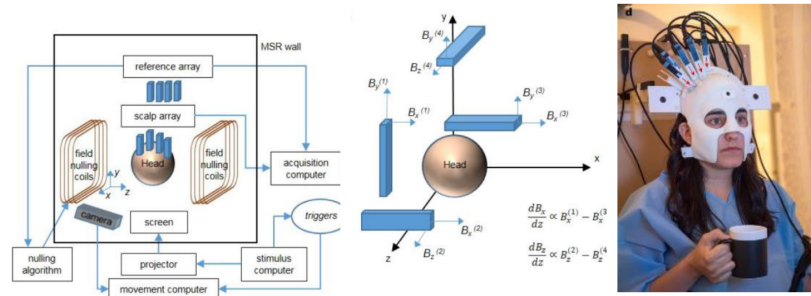


图 2: 诺丁汉大学脑磁装置主要原理与实验实例

NIST 在 2012 年实现  $\alpha$  振荡检测, 并与 2017 年利用 MEMS 磁强计 (灵敏度  $15\text{fT/Hz} - 30\text{fT/Hz}$ , 带宽为几百 Hz) 的 25 探头均匀阵列实现多功能脑磁成像系统, 但其没有实际用于生物磁场测量, 仅用两个直径为  $1\text{cm}$  的磁场线圈的成像 [4]。阿尔托大学在 2020 年利用 QuSpin 一代传感器, 使用 8 个磁强计探头, 阵列覆盖枕叶视觉皮层, 测量动态视觉刺激获得了  $\gamma$  频段响应, 与 SQUID 相比, OPM-MEG 中的  $\gamma$  波段功率和 SNR 更大 [5]。

另外, 还有 Sandia[6]、FieldLine[7]、日本京都大学 [8] 等研究机构都进行了脑磁测量, 并取得了一定成果。

国内则有中国科学院生物物理所与中科院物理所使用自研的紧凑型四通道光泵磁强计 (OPM), 观察了健康实验者的稳态视觉诱发电位 (SSVEP) 信号, 其通道灵敏度  $40\text{fT/Hz}^{1/2}$ , 测量范围  $10\text{Hz} - 100\text{Hz}$ 。使用梯度测量时, 四个传感器的灵敏度优于  $6\text{fT/Hz}^{1/2}$ , 测量范围达到  $25\text{Hz} - 100\text{Hz}$ [9]。浙江工业大学联合杭州听磁科技有限公司, 开发了基于单个大气室的多通道传感器模块, 用作于脑磁图测量 [10]。北京大学联合自动化控制设备研究所在脑磁测量系统方向写了多篇专利, 未见具体研究报道。

## 参考文献

- [1] E. Boto, S. S. Meyer, V. Shah, *et al.*, “A new generation of magnetoencephalography: Room temperature measurements using optically-pumped magnetometers,” *NeuroImage*, vol. 149, pp. 404–414, 2017.
- [2] G. Roberts, N. Holmes, N. Alexander, *et al.*, “Towards opm-meg in a virtual reality environment,” *NeuroImage*, vol. 199, pp. 408–417, 2019.
- [3] R. M. Hill, E. Boto, M. Rea, *et al.*, “Multi-channel whole-head opm-meg: Helmet design and a comparison with a conventional system,” *NeuroImage*, vol. 219, p. 116995, 2020.
- [4] R. Mhaskar, S. Knappe, and J. Kitching, “A low-power, high-sensitivity micro-machined optical magnetometer,” *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 24, p. 241105, 2012.
- [5] J. Iivanainen, R. Zetter, and L. Parkkonen, “Potential of on-scalp meg: Robust detection of human visual gamma-band responses,” *Human brain mapping*, vol. 41, no. 1, pp. 150–161, 2020.
- [6] A. Borna, T. R. Carter, A. P. Colombo, *et al.*, “Non-invasive functional-brain-imaging with an opm-based magnetoencephalography system,” *Plos one*, vol. 15, no. 1, p. e0227684, 2020.
- [7] N. Nardelli, S. Krzyzewski, B. Korenko, *et al.*, “Magnetic field imaging with microfabricated optically-pumped magnetometer arrays,” in *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*, p. jsv\_2\_1, Optica Publishing Group, 2019.
- [8] T. Oida and T. Kobayashi, “Free induction decay mr signal measurements toward ultra-low field mri with an optically pumped atomic magnetometer,” in *2013 35th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (EMBC)*, pp. 2615–2618, IEEE, 2013.

- [9] J. Sheng, S. Wan, Y. Sun, *et al.*, “Magnetoencephalography with a cs-based high-sensitivity compact atomic magnetometer,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, no. 9, p. 094304, 2017.
- [10] G. Zhang, S. Huang, F. Xu, Z. Hu, and Q. Lin, “Multi-channel spin exchange relaxation free magnetometer towards two-dimensional vector magnetoencephalography,” *Optics express*, vol. 27, no. 2, pp. 597–607, 2019.

## 2. 项目的研究内容、研究目标，以及拟解决的关键科学问题（此部分为重点阐述内容）；

### 2.1 研究内容

本项目旨在开发一种基于 SERF 磁强计的高灵敏度脑磁测量仪，并利用该仪器对人脑进行非侵入式的神经电信号测量，探究人脑神经活动的规律与特性。具体的研究内容包括：

1) 设计和制造高灵敏度的 SERF 磁强计传感器，并将其集成到脑磁测量仪中。磁强计传感器是脑磁测量仪的核心部件，它的灵敏度直接影响到仪器的测量精度和信噪比。因此，我们需要对 SERF 磁强计的物理原理和制造工艺进行深入研究，以制造出高灵敏度的磁强计传感器。

2) 设计和制造高灵敏度的磁场屏蔽器。脑磁信号的强度非常微弱，通常只有 0-13T，因此我们需要采用高效的磁场屏蔽技术，将外部磁场的干扰降至最低。

3) 建立脑磁信号采集系统。该系统包括放大器、滤波器、采样器等部件，能够对采集到的脑磁信号进行处理和分析，并输出数字信号。

4) 建立基于深度学习算法的数据分析方法。深度学习算法是一种能够自动提取高层次特征的机器学习算法，能够从海量的复杂数据中提取出关键信息。我们计划采用深度学习算法对采集到的脑磁信号数据进行处理和分析，以提取出与不同神经活动模式相关的脑磁波形信息。

5) 建立基于多模态脑图像数据的集成分析方法。脑磁信号是脑电信号和脑血流信号的叠加，因此我们计划将脑磁信号与脑电图、脑血流图等多种脑图像数据进行集成分析，以全面了解人脑神经活动的特性和规律。

### 2.2 研究目标

本项目的研究目标是开发一种基于 SERF 磁强计的高灵敏度脑磁测量仪，利用该仪器进行非侵入式的脑磁信号采集和研究，并通过建立基于深度学习算法的数据分析方法和基于多模态脑图像数据的集成分析方法，实现对脑磁信号进行更加准确和全面的分析和解读。

其主要目标有：

1) 开发一种基于 SERF 磁强计的高灵敏度脑磁测量仪，实现对脑磁信号的高精度测量，并提高脑磁测量的信噪比和灵敏度。



- 2) 建立一种基于深度学习算法的数据分析方法，提高对脑磁活动的准确识别和定量分析能力，并提高脑磁测量数据的信息提取效率。
- 3) 研究一种基于多模态脑图像数据的集成分析方法，实现对脑功能和结构的全面评估，为临床诊断和脑科学研究提供更加全面和准确的数据支持。

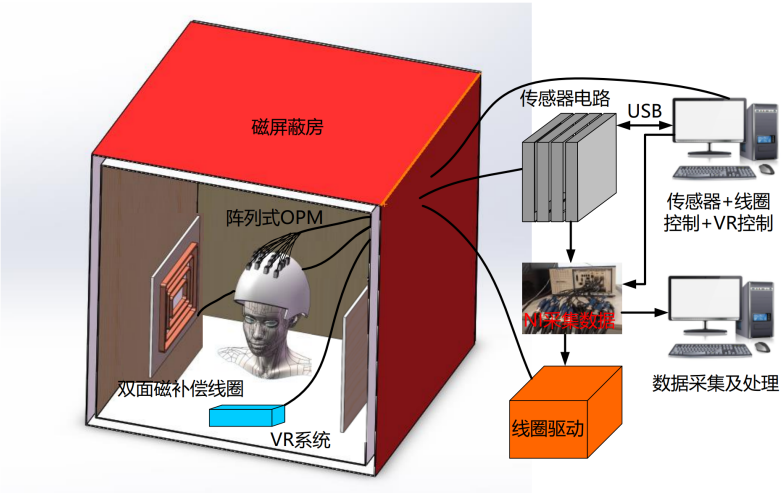


图 3: 脑磁测量装置系统集成示意图

另外，本项目的研究目标是针对目前脑磁图研究中存在的一些难题，通过引入 SERF 磁强计技术和深度学习算法，以及多模态脑图像数据的综合分析方法，来提高脑磁图的测量灵敏度和分析效率，并进一步深入探究脑功能和神经疾病的机制。

针对现有脑磁图测量技术的局限性，本项目的主要研究目标是开发出一种基于 SERF 磁强计的高灵敏度脑磁测量仪。相对于传统的 SQUID 磁强计技术，SERF 磁强计具有更高的灵敏度和更小的体积。通过采用 SERF 磁强计技术，可以实现更高精度的脑磁图测量，从而提高脑功能和神经疾病研究的可靠性和准确性。在实现高灵敏度脑磁测量的基础上，本项目将建立一种基于深度学习算法的数据分析方法，能够从复杂的脑磁图数据中提取出关键的脑磁波形信息。传统的脑磁图数据分析方法主要基于时间和空间域的分析方法，但是这些方法存在着一定的局限性，对于复杂的脑磁波形信息的提取和分析效率有所欠缺。因此，本项目将引入深度学习算法，通过对大量的脑磁图数据进行训练，来建立一种高效的数据分析方法，能够自动提取出脑磁波形的关键特征，并进行更精准的分类和识别，从而为脑功能和神经疾病提供非侵入式的诊断方法。目前深度学习算法已经被广泛应用于图像、语音、自然语言处理等领域，具有很强的特征提取和分类能力。本项

目将利用深度学习算法，建立一种基于脑磁图数据的分析方法，通过对脑磁图数据进行特征提取和分类，实现对脑磁波形的准确识别和定量化分析。同时，探究如何利用深度学习算法优化和改进脑磁图数据的分析方法，从而实现更高效、更准确的脑磁信号分析。

## 2.3 拟解决的关键科学问题

本项目旨在解决当前脑科学研究中存在的技术难题，主要聚焦于以下几个方面：

1) 磁强计灵敏度提升问题：传统 MEG 仪器使用的是 SQUID 磁强计，其灵敏度受到超导量子干涉仪的限制，因此无法探测到非常微弱的脑磁场信号。相比之下，SERF 磁强计由于采用了光学原理，可以实现更高的灵敏度，但目前还没有被广泛应用于 MEG 领域。因此，本项目旨在研究基于 SERF 磁强计的高灵敏度 MEG 仪器的开发和优化，以提高 MEG 的测量灵敏度。

2) 脑磁信号分析问题：脑磁信号是一种具有高度时空分辨率的生物磁信号，能够反映出大脑神经元的活动。然而，脑磁信号的采集和分析过程中存在多种技术难题，例如信号的噪声干扰、复杂的信号处理方法等。因此，本项目旨在研究基于深度学习算法的数据分析方法，能够自动从复杂的脑磁图数据中提取出关键的脑磁波形信息，以提高脑磁信号的分析效率和准确性。

3) 多模态脑图像数据分析问题：随着脑科学研究的深入，越来越多的多模态脑图像数据被用于脑功能区域的识别和功能连接的分析。然而，如何将来自不同模态的脑图像数据进行整合和分析，仍然是一个亟待解决的问题。因此，本项目旨在研究一种基于多模态脑图像数据的集成分析方法，能够将脑磁图、脑电图和脑血流图等多种脑图像数据整合起来进行综合分析，以实现脑功能的更全面和准确的研究。

4) 如何利用基于深度学习算法的数据分析方法，从复杂的脑磁图数据中提取出关键的脑磁波形信息，并准确地识别脑磁信号的不同成分，如  $\alpha$  波、 $\gamma$  波等。另外，如何使用深度学习算法对脑磁图数据进行降维和特征提取，从而实现高效的数据分析和可视化，如何构建深度学习神经网络模型，实现对脑磁图数据的分类、聚类 and 预测等任务，如何评估深度学习算法在脑磁图数据分析中的性能和稳定性，并优化算法的性能和计算效率等问题也非常重要。

在解决上述关键科学问题的过程中，本项目将涉及多个学科领域，包括物理



学、工程学、计算机科学和神经科学等，将为脑科学研究提供一系列新的技术手段和研究方法，具有非常重要的理论和应用价值。

### 3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

#### 3.1 研究方法

在本项目中，我们将采用多种研究方法来实现预期的研究目标。其中，关键的研究方法包括：SERF 磁强计技术的开发和优化、脑磁测量仪的设计和制造、脑磁信号的采集和处理、深度学习算法的开发和优化、以及多模态脑图像数据的集成分析等。

首先，我们将重点研究 SERF 磁强计技术在脑磁测量中的应用。SERF 磁强计技术具有高精度、高灵敏度、高分辨率等优点，是目前最先进的磁强计技术之一。我们将探索如何在脑磁测量中应用 SERF 磁强计技术，开发出一种基于 SERF 磁强计的高灵敏度脑磁测量仪，并在体外和体内进行实验验证。

其次，我们将采集和处理脑磁信号。脑磁信号是一种非常微弱的生物电信号，其采集和处理需要使用高灵敏度的仪器和复杂的算法。我们将采用经典的放大器、滤波器、采样器等设备，对采集到的脑磁信号进行前置处理，然后采用深度学习算法进行数据分析。

第三，我们将开发和优化深度学习算法。深度学习算法是一种具有很高潜力的数据分析方法，可以有效地提取复杂数据中的有用信息。我们将根据脑磁信号的特点和分析需求，开发和优化深度学习算法，以提高数据分析的准确性和效率。

第四，我们将探索多模态脑图像数据的集成分析方法。脑磁信号、脑电信号和脑血流图等多种脑图像数据可以提供多方面的脑信息。我们将研究如何将多模态脑图像数据进行整合，建立集成分析方法，以实现更全面更准确的研究。

#### 3.2 技术路线

本项目的技术路线主要分为两个方面，一方面是研究仪器的开发和优化，另一方面是基于深度学习算法的数据分析方法的研究。

在仪器方面，我们将使用 SERF 磁强计作为核心传感器，设计和制造一种高灵敏度脑磁测量仪。该仪器需要满足以下要求：1）具有高灵敏度和高空间分辨率；

2) 具有低噪声水平；3) 具有良好的稳定性和可靠性；4) 能够适应不同实验要求，包括体内和体外实验。为了实现这些要求，我们将采用一系列先进的技术和方法，如优化 SERF 磁强计的设计和制造、采用高精度电子放大器和滤波器、设计高稳定性的温控系统等。

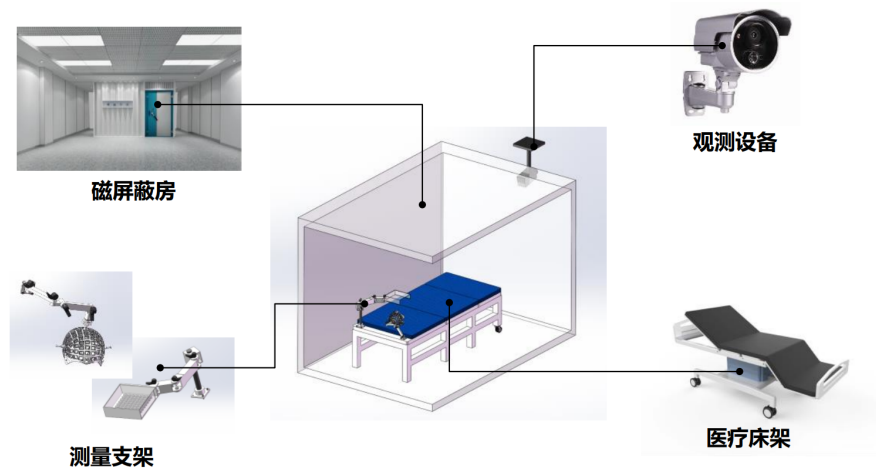


图 4: 心磁测量装置架构

另外，本项目将使用基于坡莫合金的磁屏蔽系统，传统的脑磁测量系统受到外部磁场的干扰，导致测量结果不准确。因此，我们将采用基于坡莫合金的磁屏蔽系统来减少外部磁场的影响。坡莫合金是一种具有磁阻效应的材料，它可以有效地屏蔽外部磁场，从而提高脑磁测量的精度。具体的技术路线是，我们将使用坡莫合金制成的屏蔽材料来制作磁屏蔽罩，将磁屏蔽罩作为屏蔽桶、屏蔽房以及屏蔽室，以减少外部磁场的影响。同时，我们将对坡莫合金的材料性能以及外形进行优化，以提高磁屏蔽效果。

除了外部磁场的干扰，地球磁场的变化也会影响脑磁测量的精度。因此，我们将采用自适应磁补偿系统来校正地球磁场的变化。具体的技术路线是，我们将在脑磁测量仪中加入一组磁补偿线圈，通过反馈控制的方法，实现对地球磁场的实时校正。同时，我们还将对磁补偿系统的控制算法进行优化，以提高校正效果。

另外，将采用可穿戴式的脑磁测量阵列进行脑磁测量，其主要方法是将多个 SERF 探头组成阵列，并通过可穿戴式装备固定在被测对象的头部。为了提高可穿戴式磁强计阵列的贴合度，我们计划采用柔性材料进行头盔制作。这种柔性材料能够更好地适应被测者头部的形状，使得磁强计能够更紧密地贴合在头皮上，从

而提高脑磁测量的精度。

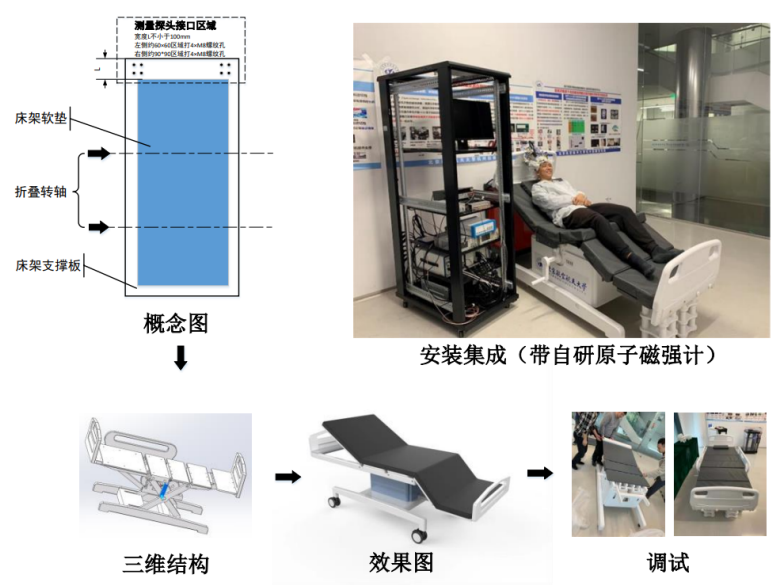


图 5: 医疗床架本体结构与安装集成

同时，我们还计划采用 3D 打印技术进行头盔的定制，以进一步提高贴合度。3D 打印技术可以根据被测者的头部形状，精确地制造出符合其头部曲线的头盔，从而使得磁强计与头皮的贴合度更加紧密。在制作头盔时，我们将考虑如何平衡可穿戴性与准确度。我们需要确保头盔既能够保持足够的紧密贴合，又要避免过度压迫头部，以免对被测者产生不适。因此，我们将进行一系列的实验，测试不同材料和 3D 打印参数对头盔贴合度和舒适性的影响。总之，采用柔性材料进行头盔制作，并结合 3D 打印技术进行头盔定制，可以有效提高可穿戴式磁强计阵列的贴合度，进而提高脑磁测量的精度。

在数据分析方面，我们将采用深度学习算法来处理复杂的脑电波形数据。深度学习算法是一种基于神经网络的机器学习技术，可以从大量的数据中学习数据的复杂特征，从而提高数据分析的准确性和效率。我们将采用基于卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN）的方法，对脑电图数据进行处理。其中，CNN 可以用于提取脑电波形中的空间特征，而 RNN 可以用于提取脑电波形中的时间特征。我们还将采用注意力机制和集成学习的方法来进一步提高算法的性能。

综合上述两个方面，我们将开发一套完整的脑磁测量系统，该系统将包括高灵敏度脑磁测量仪和基于深度学习算法的数据分析方法。这将有助于解决传统脑磁测量技术中存在的问题，并提高脑磁测量技术的精度和效率。

3.3 实验手段

根据以上所述的技术路线，我们可以设计出一种基于 SERF 磁强计的高灵敏度脑磁测量仪。该仪器主要包括以下组成部分：基于坡莫合金的磁屏蔽系统、自适应磁补偿系统、可穿戴式磁强计阵列、数据采集系统以及数据分析系统。这些组成部分的协同工作，可以实现高精度的脑磁测量，并为脑科学的研究提供了重要的实验手段。

在实验过程中，首先需要将被试者头部戴上可穿戴式磁强计阵列。该阵列采用柔性材料进行制作，通过 3D 打印技术进行定制，能够更好地贴合被试者的头部，提高测量精度。随后，将被试者放置在基于坡莫合金的磁屏蔽系统中，该系统能够有效地屏蔽外界磁场干扰，确保测量信号的准确性。同时，自适应磁补偿系统能够实时对测量场景中的磁场进行补偿，进一步提高测量精度。

接着，通过数据采集系统采集被试者的脑磁信号，并将数据传输到数据分析系统中。数据分析系统主要采用基于深度学习算法的数据分析方法，从复杂的脑磁图数据中提取出关键的脑电波形信息，并通过多模态脑图像数据的集成分析方法，将脑磁图、脑电图和脑血流图等多种脑图像数据整合起来进行综合分析。

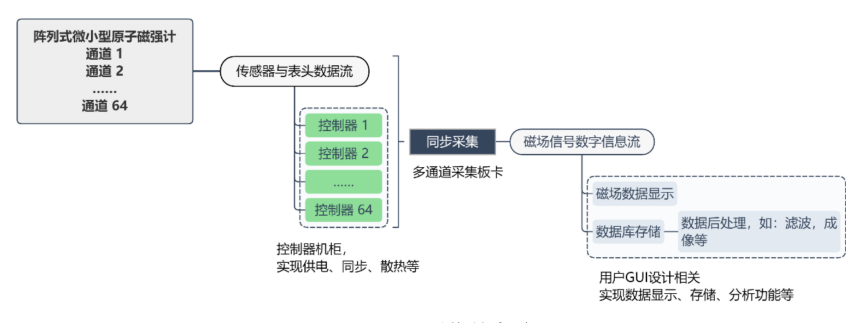


图 6: 数据采集信息流

通过上述实验手段，我们可以获得高精度的脑磁测量数据，并对脑科学的研究进行深入探究。例如，可以研究不同脑区在特定任务下的神经活动模式，探究大脑在不同任务下的信息加工机制，甚至可以探究脑磁测量技术在神经疾病的诊断和治疗中的应用前景等。

在进行神经疾病的诊断时，我们将利用上文提到的深度学习算法进行数据分析。我们将通过建立针对不同神经疾病的深度学习模型，对脑磁图中的数据进行训练和学习，从而达到更加准确的诊断效果。同时，我们还将结合多模态脑图像

数据进行集成分析，进一步提高诊断的精度和准确性。

总之，通过上述的技术路线和诊断手段，我们有望在神经疾病的诊断方面取得更好的效果。这将为医生的临床工作提供有力的支持，同时也能为患者的治疗和康复提供更为准确和精细的服务。

需要注意的是，在实际的脑磁测量过程中，由于外界环境和被试者的状态等因素的影响，仍然会存在一定的测量误差和不确定性。因此，在实验设计和数据分析时需要考虑这些因素。

### 3.5 关键技术说明

在本项目中，有一些关键技术是至关重要的，下面将对这些关键技术进行说明：

1) SERF 磁强计技术：SERF 磁强计技术是一种基于原子物理学的磁测量技术，其主要原理是通过利用原子自旋的磁感应强度来测量外部磁场的强度。相比于传统的超导磁强计技术，SERF 磁强计具有更高的灵敏度、更小的体积和更低的成本。在本项目中，我们将使用 SERF 磁强计技术来设计并开发高灵敏度的脑磁测量仪，以提高脑磁测量的精度和可靠性。

2) 深度学习算法：深度学习算法是一种基于人工神经网络的机器学习算法，其主要特点是能够通过学习大量数据来提高自身的性能和准确度。在本项目中，我们将采用深度学习算法来对复杂的脑磁图数据进行分析 and 处理，以提取出其中的关键信息，进而实现对神经疾病的诊断和治疗。

3) 坡莫合金磁屏蔽技术：坡莫合金是一种具有极高磁导率和磁屏蔽性能的材料，在本项目中，我们将采用坡莫合金材料来制作磁屏蔽罩，以降低外部磁场对脑磁测量的干扰，进而提高脑磁测量的准确性。

4) 可穿戴式磁强计阵列技术：可穿戴式磁强计阵列是一种能够在头部皮层表面直接测量脑磁信号的技术，相比于传统的脑磁测量技术，其具有更高的灵敏度和更佳的信噪比。在本项目中，我们将采用可穿戴式磁强计阵列技术进行脑磁信号的测量，以提高研究结果的准确性和可靠性。该技术的核心是可穿戴的磁强计阵列头盔，其主要由柔性材料制成，可以更好地贴合头部皮层表面，并提高信号采集的准确性。为了保证头盔的贴合度，我们采用了 3D 打印技术进行头盔的定制，可以根据被试的头部尺寸进行量身定制。在信号采集方面，可穿戴式磁强计阵列技术可以直接测量头部表面的磁场，从而获得脑磁信号。相比于传统的脑磁测量



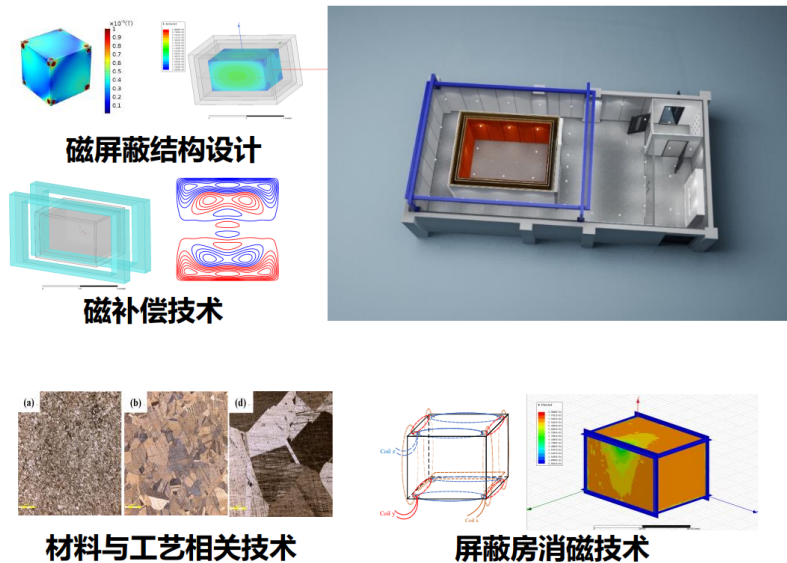


图 7: 磁屏蔽技术路线

技术，可穿戴式磁强计阵列可以更好地避免环境磁场的干扰，减少了信号的混叠和失真，提高了信号的清晰度和分辨率。

#### 4. 本项目的特色与创新之处；

本项目的特色和创新主要体现在以下几个方面：

1) 本项目使用 SERF 磁强计进行脑磁测量，相比传统的超导磁体和磁阻磁计等设备，具有更高的灵敏度和更低的噪声。同时，SERF 磁强计的体积小、重量轻，易于移动和布置，便于进行多种不同的实验和研究。

2) 本项目采用高性能磁屏蔽技术：传统的脑磁测量技术受到环境磁场干扰较大，因此需要进行磁屏蔽。本项目采用坡莫合金磁屏蔽技术，其具有高导磁性、低磁滞、高磁阻比、高温稳定性、高机械强度等特点，能够在较小的空间内实现高性能的磁屏蔽。这一技术的引入将会大幅提高脑磁测量的信噪比和精度，有助于提高对神经信号的探测能力。

3) 本项目采用可穿戴磁强计阵列技术：传统的脑磁测量技术需要将磁强计固定在一定位置上，且需要将头部包裹在磁屏蔽室中，这给实验被试带来了不便。本项目引入了可穿戴式磁强计阵列技术，可以通过柔性材料制作头盔，提高脑磁信号的采集精度和时间分辨率，并能够实时获取被试的脑磁信号数据，使得实验操作更加便捷和高效。

4) 本项目引入了深度学习技术：本项目中引入了深度学习技术，该技术通过建立神经网络模型，将大量的脑电信号数据输入模型进行训练，从而实现对神经信号的自动分类和诊断。这一技术的引入将会大大缩短脑电信号数据的处理时间，并提高数据的准确性和稳定性，有助于更加精确地诊断神经系统疾病，为临床治疗提供有效的参考依据。

## 5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

本项目的年度研究计划以及预期结果主要包括以下方面：

第一年度：

1. 完成高性能磁屏蔽系统的设计与制作，包括磁屏蔽室、磁屏蔽材料的选择与测试、屏蔽效果的评估等。
2. 设计并实现自适应磁补偿系统，优化脑磁信号采集过程，提高信号质量。
3. 开发可穿戴式磁强计阵列，包括使用柔性材料进行头盔制作、使用 3D 打印技术进行头盔定制等，提高脑磁测量的准确度和可重复性。
4. 建立包括癫痫、帕金森综合征、阿尔茨海默症等多种神经疾病的脑磁信号数据库，为深度学习算法的训练提供数据支持。
5. 针对癫痫、帕金森综合征、阿尔茨海默症等多种神经疾病，开展基于深度学习算法的自动诊断研究。
6. 与普林斯顿大学、日本京都大学展开深度合作，共同研发新一代脑磁测量装置。

第二年度：

1. 完善高性能磁屏蔽系统的制作，提高其屏蔽效果，保障实验数据的质量。
2. 继续改进自适应磁补偿系统，提高信号采集的准确性和稳定性。
3. 对可穿戴式磁强计阵列进行进一步优化，提高其贴合度和舒适性。
4. 深入分析神经疾病的脑磁信号特征，探索更有效的自动诊断方法。



5. 开始进行神经疾病的脑磁信号干预研究，包括脑磁调节和干预等方面的研究。
6. 广泛参与 IEEE 等国际会议，公开研究成果。

第三年度：

1. 完成高性能磁屏蔽系统和自适应磁补偿系统的整合，提高实验的效率和信号质量。
2. 对可穿戴式磁强计阵列进行最终优化，并进行实验验证。
3. 继续优化自动诊断算法，提高其准确性和稳定性，建立更大规模、更全面的神经疾病脑磁信号数据库。
4. 深入研究神经疾病的脑磁信号干预方法，寻找检测与治疗疾病的方法。
5. 与普林斯顿大学等组织建立起脑磁测量装置国际认证机构，推动脑磁测量产业化，并与国内外各大医院进行广泛合作，建立脑磁疾病检测试点。