



清华大学为先书院
科技创新与挑战（TIC）课程
综合图谱

编撰：为先 21 班



目 录

TIC2A 先进材料加工技术（梁墨池 赵一帆 叶家乐）	1
TIC2A 生命健康材料（王晔崎 周治兵）	3
TIC2A 电子信息材料与器件方向（崔云泽）	8
TIC2A 纳米材料与器件方向（韦梦雨 袁靖航）	16
TIC2A 超高性能结构材料方向（林宇凡）	19
TIC2A 功能陶瓷与超材料方向（刘智浩）	21
TIC2B 微纳传感与智能微系统方向（曹稷阳）	23
TIC2B 光学成像方向（张浩然）	25
TIC2B 生医仪器方向（杨舒亦）	27
TIC2B 光电子技术方向（高宗宇）	32
TIC2B 光学测量与传感方向（尹忠栋）	34
TIC2B 导航技术方向（李与涵 戴舟 陈子晗）	39
TIC2B 类脑计算方向（何宇坤 廖桂贤）	43
TIC2C 神经工程方向（高楚贺）	45
TIC2C 医学影像方向（马若馨 王汝佳）	48
TIC2D 智能感知与控制方向（许延圣 包凌嘉 孙畅）	51
TIC2D 先进计算与智能芯片方向（周林林）	60
TIC2D 新型存储器与智能应用方向（刘西尧）	62

TIC2A 先进材料加工技术方向介绍

为先 21 梁墨池 赵一帆 叶家乐

清华大学材料学院陈祥老师课题组致力于材料科学与工程领域的研究。陈祥老师的课题组主要关注材料的设计、合成、表征和性能调控等方面，涉及材料的多个领域，如能源材料、纳米材料、光电材料等。课题组的研究内容包括但不限于新型功能材料的开发与应用、材料的结构-性能关系研究、以及在能源、环境等方面的应用。陈祥老师课题组的研究在材料学领域具有一定的影响力，以其在材料设计与应用方面的研究而闻名。

材料加工工程是研究材料的外部形状、内部组织结构与性能以及材料加工程控制的应用技术学科。材料加工工程是将原料、原材料（有时加入各种添加剂、助剂或改性材料）转变成实用材料或制品的一种工程技术。

材料加工工程专业是培养从事高分子材料制品成型加工、成型设备和模具的设计与制造及高分子新材料研发的高级工程技术人才。本专业学生主要学习高聚物化学与物理的基本理论和高分子材料的组成、结构与性能知识及高分子成型加工技术知识。

材料加工的目的是将材料制备成能用的产品，设计众多学科领域在工业应用领域有重要作用。目前我国的卡脖子领域有很多都和材料加工相关，比如航空发动机叶片的钱造问题、高精尖设备号件的加工等。本组研究内容就是通过某一特定零件的铸造全流程采用软件模拟、3D 打印等智能制造手段，配合材料性能检测、激光处理等技术来提高材料钱造过程的效率与精度，减少原料损耗。

用康进武老师团队自主开发的 **FT HollowMold** 软件进行镂空砂型和密实砂型设计，通过 3D 打印做出砂型，这套流程为**世界首创**。

这套软件的优势：

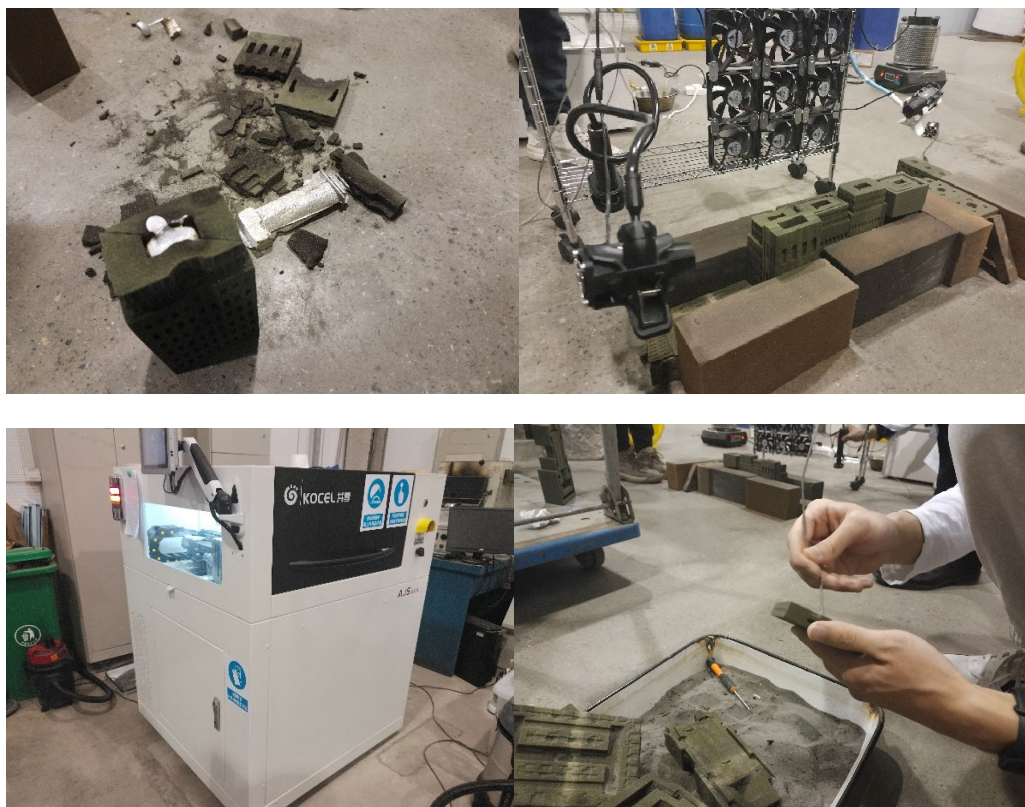
- 镂空和密实砂型都能设计。只需要将衍架、加强筋间隔设为零就能形成密实砂型。
- 相比传统三维建模软件更便捷。只需导入 STL 文件并指定镂空块形状、间隔，就能自动生成。

在实际浇筑过程中，充型平均时间为 5s。冷却过程中用水进行降温，故而凝

固时间降低至 180s 左右（电脑模拟中自然冷却需 5882s）。五个浇铸件耳朵，脚处均有缺陷。除去砂型内沙子未清理干净、浇筑手法等问题外，基本上与模拟结果符合。

对铸造材料的成分、强度、硬度、韧性、显微组织、冷却过程温度特性等进行测试分析。利用激光加工技术对材料表面进行处理，在材料表面刻蚀出特定结构，使之具有特殊性能，如超疏水性等。

在本次 TIC 学习过程中，本小组感受了材料智能加工的全流程，从模型设计到计算机模拟计算，再到铸造加工。感受到了材料加工的价值与难度，通过智能控制等手段实现了对传统铸造工艺的优化与提升。



TIC2A 生命健康材料方向介绍

为先 21 王晔崎 周治兵

生物材料组由王秀梅老师、孙晓丹老师、赵凌云老师、符汪洋老师、尹斓老师组成。下面分享 TIC2A 课程中，孙晓丹老师对 3D 打印技术的介绍、尹斓老师实验室丝网印刷制造电极的体验、符汪洋老师实验室石墨烯柔性传感器的制备和测试。

课程大纲：

周次	日期	上课内容	任课教师
1	9月19日	实验室安全培训与考核	巩前明
2	9月26日	生物传感器技术介绍	符汪洋
4	10月10日	传感器无线电路设计与制备	符汪洋
5	10月17日	3D打印技术简介	孙晓丹
6	10月24日	3D打印支架的制备与表征	孙晓丹
7	10月31日	柔性化学传感器技术简介	尹斓
8	11月7日	柔性电化学传感器的制备与性能测试	尹斓
9	11月14日	验证性实验：柔性化学传感器 (头脑风暴)	孙晓丹, 符汪洋, 尹斓
10	11月21日	验证性实验 (方案设计及制备)	符汪洋
11	11月28日	验证性实验 (方案设计及制备)	尹斓
12	12月5日	验证性实验 (性能表征及数据分析)	孙晓丹
13	12月12日	验证性实验 (展示与总结)	孙晓丹, 符汪洋, 尹斓

三维打印 (3D printing)：又称增材制造 (Additive Manufacturing)，快速成型 (Rapid prototyping, RP)，是数字模型文件为驱动基础，通过逐层打印材料的方式来构造物体的技术。

特点：快速制造 (流程短)，通用机器，最少的或无人干预；个性化，复杂结构。

3D 打印技术在上世纪 80 年代末产生，整体上处于发展的初级阶段：

第一阶段 (1985 年至 2000 年)：快速原型

第二阶段 (2000 年至 2020 年)：快速功能型 (如金属零件 3DP，生物制造 Bio-3DP)

第三阶段（2015 年至 2025 年）：多学科交叉、多材料的 3DP（应用于航天、建筑、土木、装饰、陶瓷、橡胶、食品、制药、再生材料等）

第四阶段（2020 年至 2030 年）：大型重型化、机电功能一体化、功能性非均质复杂结构、编码自装、乃至器官生命体制造。

一个机构：

NAMII——National Additive Manufacturing Innovation Institute

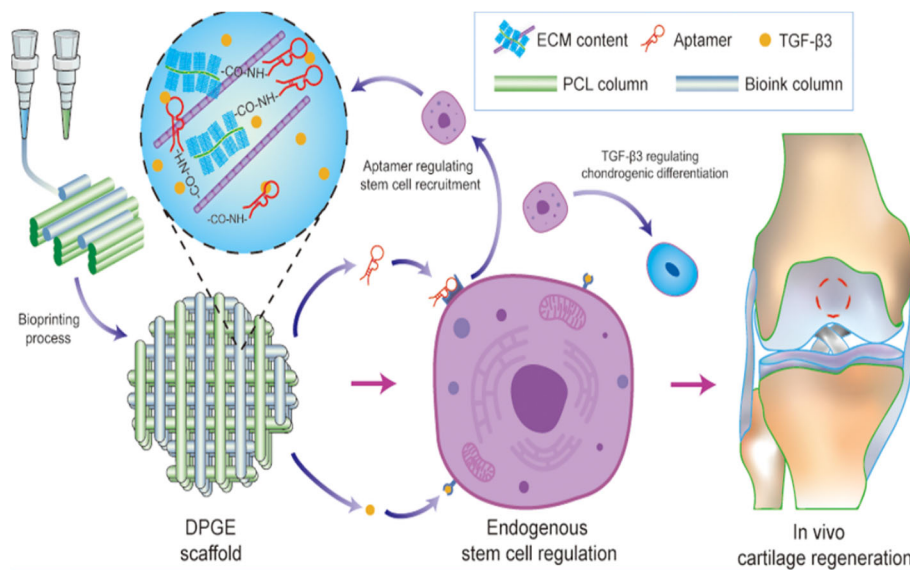
（国家增材制造创新研究院）2012 年 8 月，建在俄亥俄州的 Youngstown。

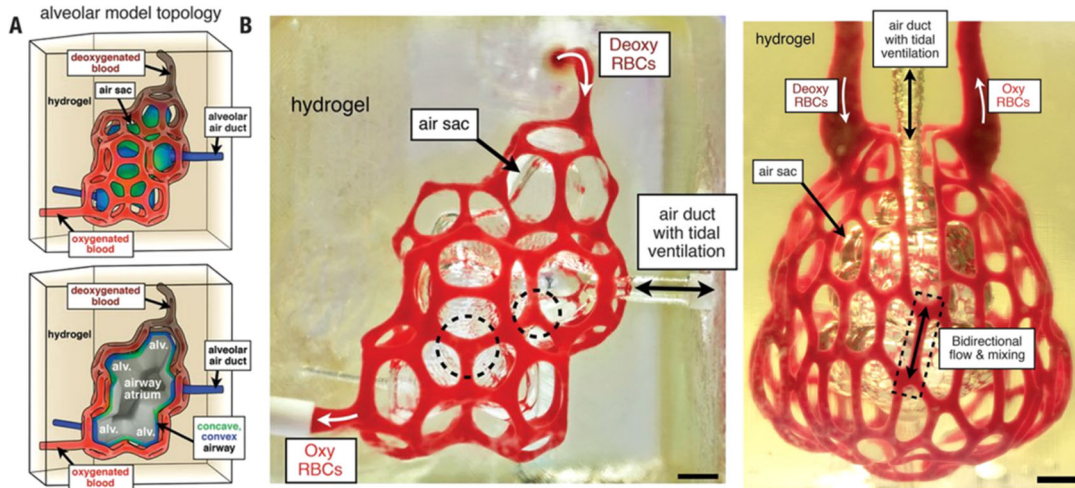
奥巴马：“This institute will help make sure that the manufacturing jobs of tomorrow take root not in places like China or India, but right here in the United States of America.”

愿景：“manufacturing is as cool as working for Google”

两个应用场景：

1. 体内组织再生
2. 体外组织模型





孙老师课堂文献阅读与分享:

Direct-Ink -writing (DIW)

DIW:
An extrusion-based AM method using dispensed inks from small nozzles to fabricate 3D structures layer-by-layer.

- Additives
- Temp.
- densification
- Pressure

Wearable Biosensors:

- further miniature,
- multimodal functionalities,
- soft&elastic,
- customization.

Classification:
biophysical and **chemical sensors**, electrophysiological sensors, energy devices, multimodal systems, implantable devices, and soft robotics.

FIG. 1 Direct-ink writing (DIW) 3D printing. A, Schematic of DIW 3D printing with customized inks for bioelectronics. B and C, Rheological criteria including shear-thinning (B) and yield-stress features (C) of the customized inks for bioelectronics. D, Radar chart showing attributes of DIW 3D printing.

Roland Yingjie Tay, Yu Song, Dickson R. Yao, Wei Gao, Direct-ink-writing 3D-printed bioelectronics, Materials Today

Chemical sensors

(a) pH sensor

(b) Ion-selective sensor

(c) Enzymatic sensor

(d) Immunosensor

(e) Ammonia sensor

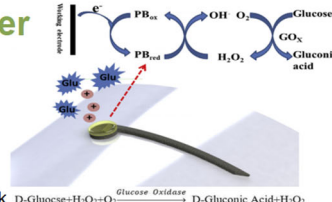
(f) Acetone sensor

Roland Yingjie Tay, Yu Song, Dickson R. Yao, Wei Gao, Direct-ink-writing 3D-printed bioelectronics, Materials Today

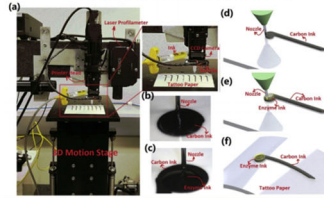
Glucose sensor

Conventional 2D fabrication's drawback:
harmful chemicals, rigorous fabrication steps,
material waste, expensive cleanroom processing,
failure to integrate enzyme/electrode co-production.

DIW: Commercial carbon ink modified with Prussian blue
as electron transfer mediator and a custom-made enzyme ink
were 3D-printed on a tattoo paper using DIW method.
Works linearly in glucose solution(in vitro)
Target: Diabetes. Sweat. Non-invasive packaged system
for long-term, in vivo monitoring.
Concentration range: 100-1000 μ M
The sensitivity of glucose biosensor: 17.5 nA/ μ M
Detection limit(calculated value, S/N=3): 6.9 μ M.



Scheme 1. The 3D-printed biosensor for glucose sensing.



Save time and material, reducing overall cost.

Better reproducibility, repeatability, long-term stability.

Through the DIW approach, the biosensor, associated interconnects, passive electronic components

and antennae can be fabricated using a single process combined with IC integration all on a flexible substrate.

Micro additive manufacturing of glucose biosensors: A feasibility study



Carbon electrode modified with Prussian blue(No Glucose)

(a) Cyclic Voltammetry (CV) scan rate from 10 mV/s to 200 mV/s, the redox(氧化还原) peak current increases.

(b) the peak current versus the sweep rate plot is linear, implying that the kinetic behavior of the electrode is a surface-confined electrode reaction

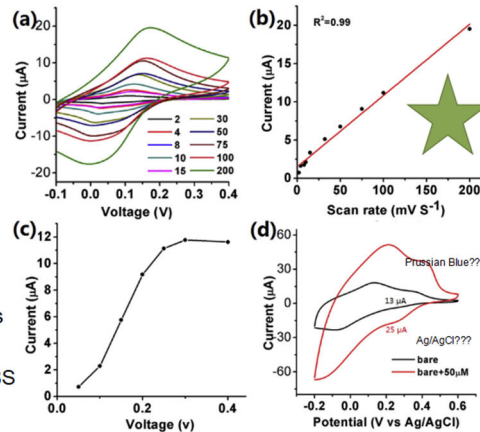
($V_{ion-diffusion} > V_{ion-absorption\ and\ reaction}$)

(c) 3D-printed Prussian blue modified carbon electrode's response to 50 μ M H₂O₂. Prussian blue decreases the high anodic oxidation potential of hydrogen peroxide (>+0.6 V vs. Ag/AgCl) which restricts the specificity of amperometric enzymatic bio-sensors. (Prussian blue is a catalyst to lower hydrogen peroxide redox potential) (The low operating potentials greatly minimize interferences from coexisting electroactive species)

(d) shows the CV curves of the electrode in PBS and H₂O₂ solution at 100 mV/s.

In PBS solution (in the absence of H₂O₂), the oxidizing current is as low, as about 13 μ A at 0.25 V. With addition of 50 μ M H₂O₂, the oxidation current has increased to 25 μ A.

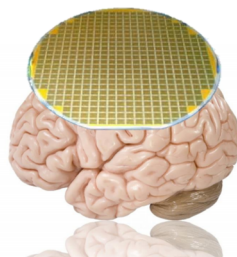
Plus: the electrode sensitivity increased with decreasing electrode diameter. 比表面积



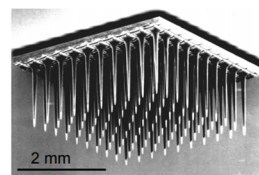
尹澜老师对电子器件在生物、医学上应用的想法:

Integration with the body

- **Current:** Mismatch in mechanical properties, non-biodegradable
- **Future:** soft, shape conformal, stretchable, wireless, biocompatible, biodegradable, miniaturized, shape morphing ...



Utah Array



上课会体验丝网印刷银、石墨电极并测试。

尹老师还介绍了半导体、有机、低维、无机纳米材料应用于医疗的前景。

符汪洋老师介绍了生物物理、生物化学传感器。

经历头脑风暴，我们的验证性实验利用石墨烯的电阻对外界的敏感响应做传感器，检测人的呼吸气体信号，以此判断人是否感染疾病。

其中最大的收获是学会了石墨烯的制备和转移技术，学习了锁相放大器、阻抗分析仪的使用，体验了 RLC 无线传感电路的测试，用 EDA 和 COMSOL 设计并仿真了 planar PCB coil、对石墨烯的能带、电子-空穴对、狄拉克点、量子电容等概念产生了好奇。

TIC2A 电子信息材料与器件方向介绍

为先 21 崔云泽

一、课题组老师主要研究方向

1. 王琛老师课题组：

NEXT Lab 实验室负责人，实验室于今年搭建完成。当前从事基础学术研究，致力从芯片新材料与后摩尔芯片两个端口，多维度开展对新型半导体材料、下一代半导体工艺、新原理高性能器件、多源异质集成微系统和新一代芯片的系统性基础研究和融合性应用研究。其课题组的研究生主要从事的工作偏向材料领域而非器件集成，较多采用 CVD 工艺进行材料分析和表征；

2. 宋成老师课题组：

主要方向：自旋电子学材料、声表面波滤波器和磁电/声电集成器件、自旋转移磁随机存储器（STT-MRAM）

- 2023-2027 国家自然科学基金杰出青年科学项目《自旋电子学材料》
- 2023-2026 国家自然科学基金专项项目《亚/反铁磁自旋的全电调控及原型器件构筑》：和北航自旋电子中心合作：做反铁磁研究和滤波器
- 2023-2027 国家重点研发计划“物态调控”重点专项《强自旋轨道耦合反铁磁材料物态调控及原型器件》
- 2022-2025 国家重点研发计划“新型显示与战略电子材料”重点专项《新型自旋轨道矩材料与高性能存内计算器件》

3. 谷林老师课题组：

主要方向：以电子显微学为主，从晶格和电荷自由度揭示功能氧化物材料、储能材料和催化材料原子尺度结构和电子结构的关联；在此基础上，实现轨道自由度电子占据态的直接观测。

其课题组由于电镜设备和软件等技术今年来被美国封锁，独立开发各种国产版本电镜相关的软件。

4. 于荣老师课题组：

主要方向：同样以电子显微学为主，观测材料的微观结构及性能。包括电子衍射与成像计算、叠层成像算法、原子尺度三维重构等电子显微方法；此外还涉

及新材料与新工艺领域，如稀土永磁材料、金属结构材料、量子材料、催化材料等。

近期主要成果为提出“自适应传播因子叠层成像方法”(APP)，消除了晶带轴偏离对空间分辨率和测量精度的影响，能够大幅提高像差校正电镜的空间分辨率，进入深亚埃分辨。

5. 曾飞老师

主要方向：功能薄膜材料界面效应，存储、记忆与学习效应，材料的掺杂技术与理化性质。近期主要研究为利用铌酸锂和碳化硅等材料做神经元器件，并揭示其背后的物理机理。

6. 潘峰老师（大 boss）

主要方向：对声表面波滤波器逐代升级更新，并且占有一定市场。

做电子显微学认准于荣老师、谷林老师；做自旋器件认准宋成老师；想要挑战杯拿奖认准王琛老师。

二、个人收获

1. 面向 5G 应用的声表面波材料与射频滤波技术概述

声表面波材料与射频滤波技术是在射频领域中应用广泛的技术。声表面波（Surface Acoustic Wave, SAW）是一种在固体表面上传播的机械波，可以用于信号处理和滤波。射频滤波器则是一种用于选择性地通过或屏蔽特定频率范围信号的电子设备。

声表面波材料是实现 SAW 滤波器的关键组成部分。一种常用的声表面波材料是压电晶体，例如氧化锌（ZnO）和锂钽酸锂（LiTaO₃）。压电晶体具有特殊的机械和电学性质，当施加电场或机械应力时，它们能够产生声表面波。这些材料被广泛应用于滤波器、延时线和传感器等射频和微波设备中。

射频滤波技术通过选择性地传输或阻止特定频率的信号来实现频谱分析和信号处理。滤波器可以分为多种类型，包括低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器等。声表面波滤波器是其中一种重要的滤波器类型，它利用压电晶体上的声表面波传播来实现频率选择性。

SAW 滤波器具有许多优势。首先，它们在制造上相对简单，可以通过标准的微电子制程技术来实现集成化。这使得它们成为高性能、低成本的选择。其次，

SAW 滤波器具有较高的品质因数（Q 因数），能够实现较窄的带宽和良好的频率选择性。此外，它们还具有低插入损耗、高功率处理能力和较好的温度稳定性等优点。

在 5G 通信和雷达应用中，声表面波材料与射频滤波技术发挥着关键作用。5G 通信需要处理大量的高频信号，滤波器需要具备高频率和大带宽的处理能力，以实现频谱分析和信号选择。声表面波滤波器通过其优越的性能，为满足 5G 通信的要求提供了有效的解决方案。

此外，雷达系统中也广泛使用声表面波滤波器。雷达需要对接收到的信号进行频谱分析和目标识别，滤波器在其中起到了关键的作用。声表面波滤波器能够实现针对不同频率的信号进行选择处理，从而提高雷达系统的性能和效率。

目前滤波器呈现“两高一大一”的发展趋势：高频率、高功率、大带宽、小型化。

- 高频率：通讯频段不断增加（MHZ-GHZ）：5G 使用的频点密集，对滤波器要求高
- 高功率：数据量爆发式增长（mW-W）
- 大带宽：降低通讯成本（1%-20%）
- 小型化：移动终端体积受挫（cm-亚 cm）

2. 三代磁随机存储器概述

（1）第一代 MARM

第一代 MARM 是指传统的磁存储器，如硬盘驱动器（HDD）和磁带存储。

存储原理：利用磁性材料中的磁性特性来存储数据。数据被编码为磁性颗粒的磁化方向。磁性材料通常是可磁化的金属或合金，如铁、镍和钴。通过在磁性材料上施加磁场，可以改变磁性颗粒的磁化方向，从而实现数据的写入和读取。

存储介质：主要有硬盘和磁带。硬盘驱动器（HDD）是一种常见的磁存储设备，其中数据存储涂覆在金属盘片表面的磁性涂层上。而磁带存储器则是将磁性材料涂覆在磁带上，通过磁头的读写操作实现数据的存取。

读写操作：使用磁性读写头来实现数据的读写操作。磁头包含一个磁性线圈，通过施加电流来产生磁场。当磁头靠近磁性存储介质时，磁场可以改变存储介质中的磁化方向，从而写入数据。而在读取数据时，磁头会检测磁性存储介质的磁

场变化，并将其转换为电信号进行解码。

特点和限制：存储密度相对较低、读写速度较慢以及功耗较高。由于磁性颗粒的尺寸和磁化方向的限制，存储密度受到一定程度的限制。此外，机械部件的存在，如旋转盘片或磁带驱动装置，导致读写速度较慢。同时，由于需要产生和控制磁场，第一代 MARM 的功耗也相对较高。

（2）第二代 MARM

第二代 MARM 采用了自旋转移磁阻（STT）效应作为存储单元的基础。STT 存储器利用自旋力矩效应，通过控制自旋方向的翻转来实现数据的写入和读取。它可以实现多子和少子翻转，其中翻转速度较慢的情况下需要更多的能量。此外，STT 存储器还可以通过自旋极化产生有效磁场，从而克服磁随机访问存储器中的能垒问题。

自旋转移磁阻效应：自旋转移磁阻效应是一种基于自旋力矩的现象。它利用自旋极化电子通过与磁性层中的自旋极化电子相互作用，实现了自旋方向的转移。当通过一条电流通过一个磁性层时，自旋极化电子将传递自旋力矩到另一个磁性层中的自旋极化电子，从而导致自旋方向的翻转。

存储单元：STT 存储器的存储单元是由两个磁性层组成的结构。其中一个磁性层称为极化层（Polarizer），用于产生自旋极化电子流。另一个磁性层称为自旋阀层（Free Layer），用于存储数据。自旋阀层的自旋方向可以通过施加电流来控制。

写入操作：在 STT 存储器中，通过施加电流来控制自旋阀层的自旋方向，从而实现数据的写入操作。当电流通过自旋阀层时，自旋极化电子将传递自旋力矩到自旋阀层中的自旋极化电子，导致自旋方向的翻转。通过控制电流的方向和大小，可以实现不同自旋方向的翻转，从而编码不同的数据。

读取操作：在读取数据时，STT 存储器使用磁性读写头来检测自旋阀层的自旋方向。磁性读写头会感应自旋阀层中的磁场变化，并将其转换为电信号进行解码，以获取存储的数据。

特点和优势：

- 存储密度较高
- 读写速度较快：利用了自旋力矩效应进行数据的读取和写入操作，相比传

统的磁存储器具有更快的响应速度。

- 功耗较低**：相对于第一代 MARM，STT 存储器的功耗较低，可以通过控制自旋阀层的自旋方向来实现数据的写入和读取，而无需额外的能量来产生磁场。

- 多子和少子翻转**：在翻转速度较慢的情况下，需要更多的能量，在不同应用场景下能够灵活地进行优化和适应。

- 克服能垒问题**：STT 存储器利用自旋极化电子产生有效磁场，可以克服传统磁存储器中的能垒问题。利用自旋极化电子的自旋力矩作用，可以降低能垒的高度，从而实现更容易的磁化翻转。

(3) 第三代 MARM

第三代 MARM (Magnetoresistive Random Access Memory) 基于自旋轨道力矩 (Spin-Orbit Torque, SOT) 效应。SOT 存储器利用自旋霍尔效应和自旋轨道耦合效应，通过引入重金属层 (如铂 Pt) 来产生纯自旋流，而不涉及电荷移动。

自旋轨道力矩效应：自旋轨道力矩是一种基于自旋-轨道耦合的现象。在重金属层 (如铂) 中，自旋极化电子的自旋与其轨道运动相互耦合，产生自旋轨道耦合效应。当自旋极化电流通过重金属层时，自旋轨道耦合效应将导致自旋轨道力矩的产生。这个自旋轨道力矩可以用来控制磁性层中的自旋翻转。

存储单元：SOT 存储器的存储单元由磁性层和重金属层组成。磁性层用于存储数据，而重金属层用于产生自旋流和自旋轨道力矩。

写入操作：在 SOT 存储器中，通过施加自旋极化电流，重金属层中的自旋轨道力矩可以传递到磁性层，从而实现数据的写入操作。

读取操作：在读取数据时，SOT 存储器使用磁性读写头来检测磁性层中的磁场变化，类似于 STT 存储器。磁性读写头感应磁性层中的磁场变化，并将其转换为电信号进行解码，以获取存储的数据。

特点和优势：

- 更高速度**：SOT 存储器利用自旋轨道力矩直接控制自旋矢量的方向，无需自旋翻转过程，从而实现更快的数据写入和读取。

- 更低功耗**：SOT 存储器利用自旋轨道力矩来控制自旋翻转，因此功耗较低。

- 更好稳定性**：SOT 存储器相对于铁磁材料在面对复杂环境时具有更好的稳定性。自旋轨道力矩的引入可以减小磁矩的热涨落，从而提高存储器的稳定性和

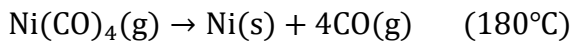
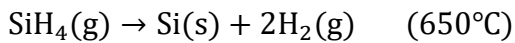
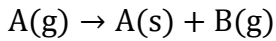
可靠性。

·抗干扰能力强：自旋轨道力矩的作用是通过自旋极化电流产生的，而不是依赖磁场，故 SOT 存储器对外部磁场的干扰相对较小。

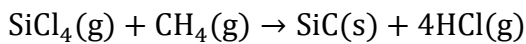
3. 常见的 CVD 方法概述

(1) CVD 主要反应类型

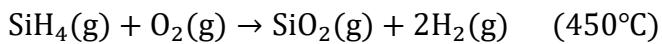
·热分解反应



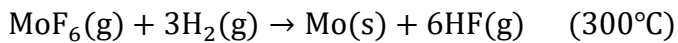
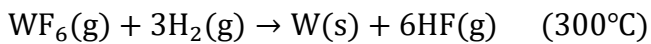
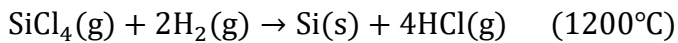
·合成置换反应



·氧化反应（通常用 O_2 ）

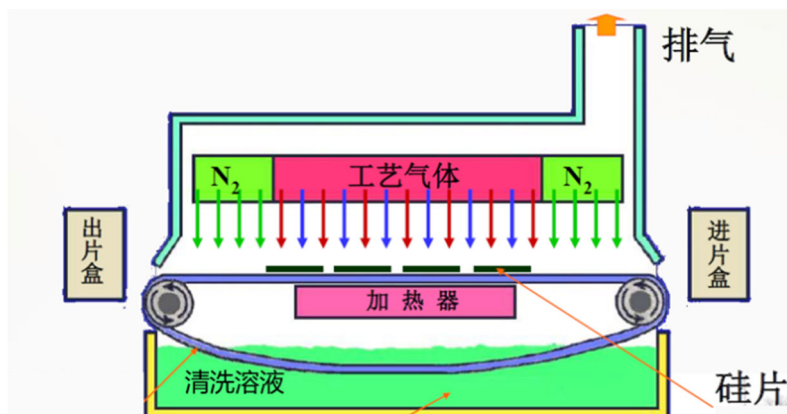


·还原反应（通常用 H_2 ）

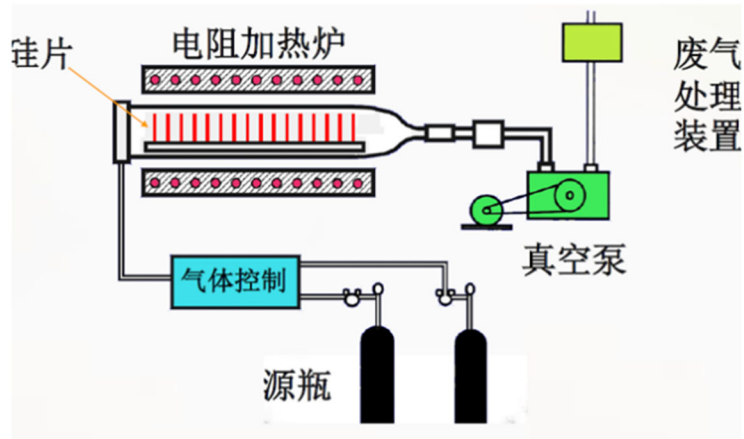


(2) CVD 主要类型

·常压 CVD (APCVD)

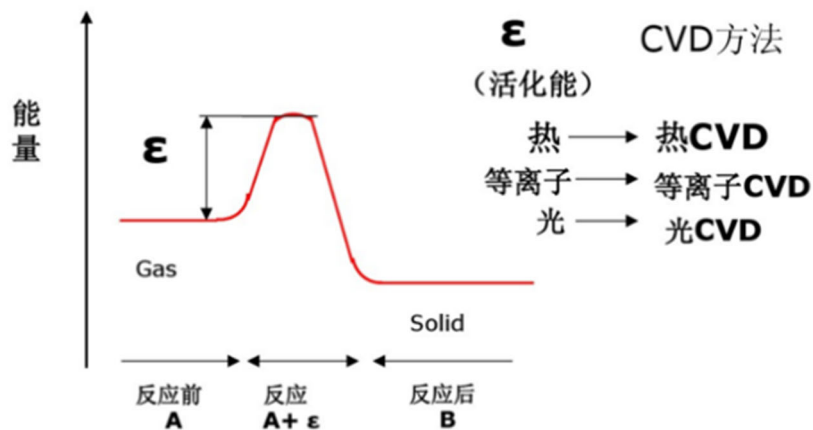


·低压 CVD (LPCVD)

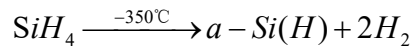
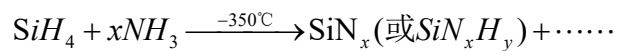
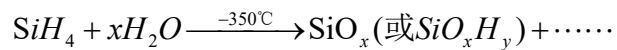


·等离子体增强（PECVD）

等离子体在 CVD 中作用：将反应物气体分子激活成活性离子，降低反应温度。硅烷和氨气的反应通常条件下约 850°C 并沉积氮化硅，但在等离子体氛围内温度可以到 350°C。

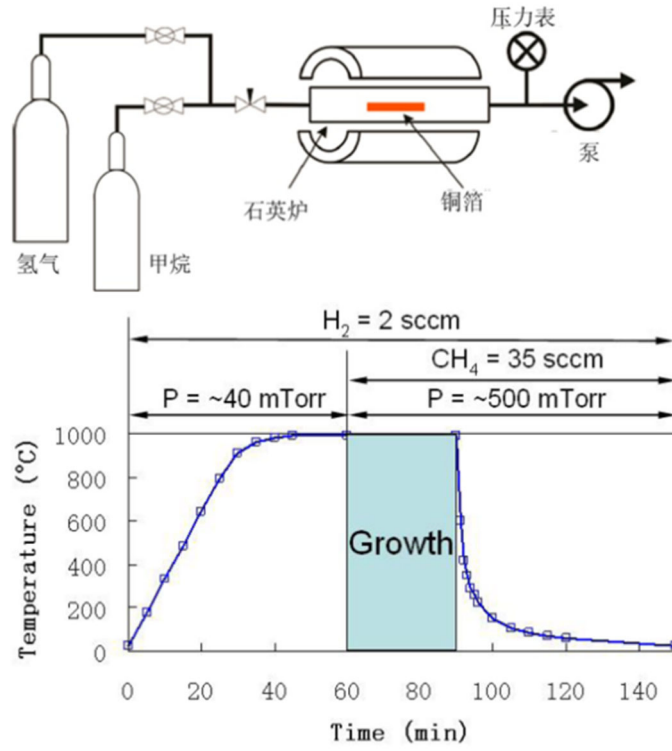


常见 PECVD 反应：



其中生长温度可以降到约 100°C 左右，但是薄膜的质量明显变差，密度变小，缺陷增多

·石墨烯 CVD



建议查看链接: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/369068149>

TIC2A 纳米材料与器件方向介绍

为先 21 韦梦雨 袁靖航

本学期我们选择了 TIC2A 中的碳基纳米材料与器件方向，其中有刘锴、韦进全和朱宏伟三位老师，接下来分别介绍三位老师各自的研究方向，以及我们在这门课程中的收获。

刘锴老师的研究方向是一维、二维等低维范德华材料的界面性质，以及制作智能器件和高温电子器件。范德华层状材料是一种由多层二维晶体组成的材料，层与层之间由范德华力相结合，这种材料有着非常高的表面积和可控的孔隙结构，在催化、分离和吸附等方面有广泛的应用。我们上课时主要接触到了石墨烯这种范德华材料，并用胶带采用机械剥离的方式“撕”出相对层数较少的石墨烯，拉曼光谱仪的检测显示出我们成功撕出了双层的石墨烯。

但是刘老师主要对二硫化钼（一种过渡金属二卤代物，TBLM）这种二维范德华材料有着深入的研究。器件制作方面，在他最近的一篇论文中，他和他的团队提出了一种制作耐恶劣环境的晶体管的方法在这项工作中。在他们的方法中，化学气相沉积（CVD）高质量的单层石墨烯首先通过纯金垫从衬底中转移出来，然后用金垫转移到单层二硫化钼上作为电极。这样，单层石墨烯作为电极的缓冲层，保持完整且无缺陷，超过了文献中报道的金属沉积引起的缺陷石墨烯缓冲层。受益于单层石墨烯的原子平面和可调能级，具有 t-Au/石墨烯电极的二硫化钼器件在载流子密度为 $3.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 时，降低了肖特基势垒高度，小接触电阻为 4.7 千欧/ μm 。与沉积金属电极或仅转移 Au 电极的器件相比，这导致了一个更大的正态电流和更高的载流子迁移率。更重要的是，无缺陷的疏水石墨烯缓冲层阻止了金属从电极向二硫化钼扩散以及水分子在电极-二硫化钼界面上的插入，使二硫化钼器件对恶劣环境具有高电性，包括潮湿、氧化和高温环境都具有较好的抗性，即可以在一些极端工作环境下保持效率。

在范德华材料的界面性质方面，在他之前的一篇文章中，他也对多层二硫化钼材料层与层之间的剪切力的性质作出了分析，发现二硫化钼的层间作用独立于扭曲角，同时提出了一种通用的评估二维材料层间相互作用以及异质结构的方法。

韦老师的研究方向是碳纳米管及纳米材料的可控批量生长、高效纳米太阳能

电池、纳米材料在水净化处理应用、高性能纳米复合材料，由此可见，韦老师的研究主要偏向于应用方面。而我们在韦老师处主要接触到了利用碳纳米管制作的太阳能电池和传感器等器件，了解了制备与表征的方法。

在韦老师最近的一篇论文中，他们制作出了一种高效钙钛矿太阳能电池，让 CsPbBr₃ 柱状颗粒横跨了整个聚乙烯薄膜，将聚乙烯聚合物（PEO）作为配体引入 PbBr₂ 溶液中，修饰 CsPbBr₃ 薄膜的形成，从而促进 CsPbBr₃ 薄膜的微观结构的形成，即从小晶粒演化为具有特定晶体取向的大晶体，CsPbBr₃ 薄膜质量的提高有助于降低缺陷密度，延长载体的使用寿命。其结果表明，通过优化 PEO 在 PbBr₂ 溶液中的体积分数，可以使太阳能电池的效率从 5.92% 提高到 8.12%。除此之外，他们研究过用于高性能太阳能电池的有机-无机杂化钙钛矿层的全绿色溶剂基于氧化物渗透协同系统的高效 CNT-Si 太阳能电池等太阳能电池系统。

另外，他们也研究过金属碳/氮化物（MXene），利用这种材料制作超级电容器等器件。

朱宏伟老师课题组在石墨烯等新型二维材料的可控制备、结构设计及其在能源（太阳能电池、光电探测、光电催化）、环境（水处理、空气净化、土壤治理）、柔性传感器件等领域开展了大量研究工作，取得了一系列重要进展。在《基于石墨烯编织网络的传感系统：机电行为与电子皮肤应用》（Tactile sensing system based on arrays of graphene woven microfabrics: electromechanical behavior and electronic skin application）（ACS Nano 2015, DOI: 10.1021/acsnano.5b03851）论文中，课题组提出了一种实现石墨烯高灵敏柔性应变传感的新思路，将石墨烯与超弹超薄高分子材料复合形成柔性、轻薄似纹身的应变传感器。通过构建传感器阵列，实现了感知分布式压力的电子皮肤功能，可稳定可靠探测脉搏、语音等微弱生理信号，有望应用于移动医疗、可穿戴式设备等领域。

在《石墨烯渗透膜的研究进展：结构、传质机制及潜在应用》（Recent developments in graphene-based membranes: structure, mass transport mechanism and potential applications）（Adv. Mater. 2015, DOI: 10.1002/adma.201502595）一文中，围绕石墨烯材料独特的结构特点及其不同于传统渗透膜材料的传质行为，课题组综述了石墨烯渗透膜材料传质特性的相关实验发现和理论结果，对其在过滤、分离、脱盐、质子交换及能量存储等方面的应用进行了展望。通过总结本课题组及

其它小组的研究成果，系统分析了三种石墨烯膜材料（理想石墨烯单晶膜、纳米孔石墨烯和氧化石墨烯渗透膜）的传质特性、潜在应用及其面临的机遇和挑战。

《碳/硅异质结太阳能电池的研究现状与展望》（Carbon/silicon heterojunction solar cells: State of the art and prospects）（Adv. Mater. 2015, 27, 6549–6574）一文，结合课题组提出的碳/半导体异质结光电模型，综述了碳/硅异质结太阳能电池的研发过程和最新研究进展，以增强太阳能电池性能为目标，介绍了几种关键的电学、光学设计技术（包括化学改性、界面钝化、减反涂层和表面毛化等），展望了碳/硅异质结的潜在应用和未来发展趋势。该光电模型有望在便携式器件和轻型薄膜产品中发挥多重关键作用，在诸如智能手机、移动设备和医学监控设备中做为新型能源。

朱宏伟老师课题组近年来专注于石墨烯材料的可控制备与性能研究，学术问题涵盖结构设计、光电转换、柔性器件、吸附过滤等方面。通过调控石墨烯与其它材料的表/界面相互作用，探索了石墨烯在纳米能源、纳米探测和纳米环境应用中的性能。

TIC2A 超高性能结构材料方向介绍

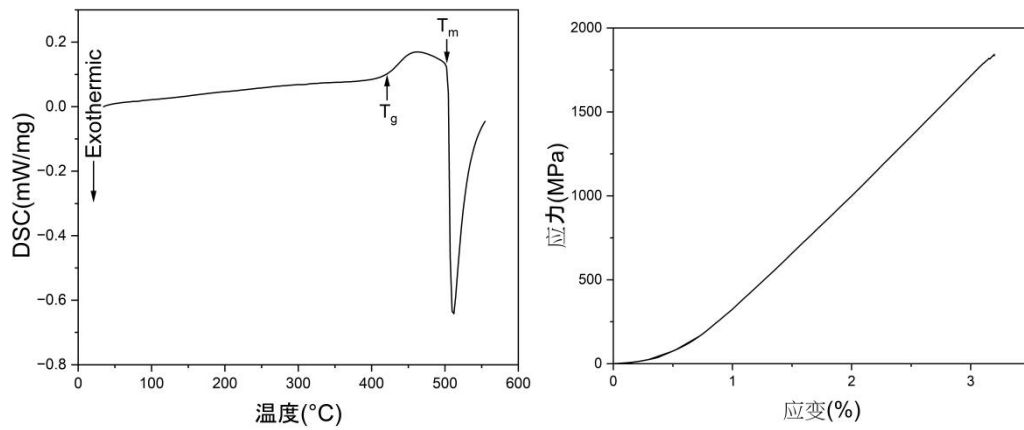
为先 21 林宇凡

本课程在邵洋老师指导下，研究大块非晶合金性质。

传统金属微观结构存在金属晶体，排列整齐，晶胞有规律性地在物质中存在。正常金属物体中，也存在瑕疵使物体某些地方不跟从正常排序规律。但是，这也只是宏观下的瑕疵（如错位）。反之，非晶合金即使在中微观下也仍然无规律地排序，使非晶合金的性质与普通金属晶体截然不同。非晶合金的强度比金属高，较耐腐蚀，磁性质也较优。而同时，因非晶合金没有正常晶体的无方向性，它在过高的应力下并没有金属晶体的形变能力，而常常直接断裂。这种双刃刀的性质使非晶合金无法用于需要高耐力的场景，反而在穿透性弹头上见到了军事应用。它也因磁性优，在需要反复磁化退磁的高压变压器中有市场。



但是，目前的非晶合金制备方法对这些应用造成了极大的挑战。因非晶合金不是金属的正常态，需要非常特别的制备方法才可制造。各个制备方法的中心逻辑为：快速降低合金溶液，从而使合金原子无法在固化前排成有规律的晶体，从而形成非晶合金。所以，非晶合金的制备非常困难，被合金溶液的热导率严重限制。大块非晶合金体积越大，越难将内部冷却，则使外部虽是非晶态，但内部已经有序排列形成晶体。



本课题组采用的是快速浇铸法。将合金溶液快速倒入高热导率的铜具，铜具模型设计为细长柱形以最大化接触面积增加热导率。通过改变合金的成分，能改变形成非晶合金的成功率与各种性质。形成非晶样品后，通过各个标准测试方法，实验测试样品的强度，吸放热曲线，磁性以测定样品的材料性质。同时，测量样品的强度与吸放热曲线也使我们能确定该样品确实是非晶态。

TIC2A 功能陶瓷与超材料方向介绍

为先 21 刘智浩

这一学期 TIC 是在材料学院进行的，主要关于信息功能陶瓷，与此同时，还在不同老师的带领下了解到矢量分析仪、太赫兹时域光谱和低频谱阻抗分析仪等仪器的使用，进行了一些验证性实验，比如电容器材料和制备与性能表征，使用矢量分析仪测试陶瓷圆片，进行太赫兹光谱分析数据处理。在讲解基本光学理论之后，上手操作光学显微镜，搭建几种常见的光学显微成像原理，最后还在老师的介绍下，了解了陶瓷增材制造技术及 3D 打印系统的基本构成、工作原理、基本用途等。

信息功能陶瓷是具有电、磁、声、光、热、力、化学或生物等不同性能之间相互转化和耦合效应的一类无机非金属功能材料，亦称为功能陶瓷或电子陶瓷，主要包括介电、铁电、压电、热释电、半导体、电光、磁性、高温超导等多种功能的新型高技术陶瓷。基于各种功能效应的新一代电子元器件如：MLCC 电容器、片式电感器、电阻器、PTC 和 NTC 热敏电阻、变阻器、晶界层电容器、滤波器、谐振器、压电换能器、驱动器、微位移器等等，它们是计算机、集成电路、移动通信、能源技术和军工电子等领域的重要基础材料与元器件。随着高新技术的快速发展，功能陶瓷材料的发展趋势是多层化、低维化、复相化、织构化以及高均匀性、低成本、低温合成、环境协调；新型元器件则朝着片式化、微型化、模块化、低功耗、高频化、智能化、绿色化、大功率以及在极端条件下服役的高可靠性方向发展。

各位老师根据光的波长，逐级向我们介绍了各自研究领域的基本知识以及目前正在进行的课题。李龙土院士向我们介绍的主要研究课题是微波介质陶瓷材料，讲解了微波波段的电磁波所具有的巨大价值，在通信领域以及生活之中的普遍应用。微波是指频率在 300MHz-300GHz 之间的电磁波。具有易于集聚成束、高度定向性以及直线传播的特性，可用来在无阻挡的视线自由空间传输高频信号。微波频率比一般的无线电波频率高，通常也称为“超高频电磁波”。微波作为一种电磁波也具有波粒二象性。微波的基本性质通常呈现为穿透、反射、吸收三个特性。而制造适用于微波波段的器件以及功能陶瓷能够更好地适用于高频信号的通

信与接受，是通信技术进步的关键。

文永正老师则向我们介绍了在太赫兹波段的电磁波的巨大隐藏价值和应用。在以前，太赫兹波段的电磁波很少被人们所研究，受限于该波段电磁波获取困难，因此很少有人去专门研究，成为了电磁波研究的“冷门”：然而近些年，随着太赫兹波段的电磁波有了更好的激发方式，太赫兹回到人们视野，并且在通信方面和呈现方面的巨大潜力，太赫兹也被越来越多人所研究，我们在老师的讲解之后进行了太赫兹时域光谱的测试，并且进行数据处理，能够使用时域光谱进行样品的测量。

孙竞博老师则向我们介绍了可见光频段光的原理，现象以及应用，例如常见的光的色散、光的衍射以及光的干涉等现象，与此同时，介绍了怎么利用常见光学平台和光学仪器进行光的衍射和干涉光路的搭建，在熟悉使用基本光学实验元器件同时，还利用这些元件搭建成像系统，切切实实从最基础出发，进行高层次应用的扩展，在这一学习过程中，也真实感受到了科研的步骤与方法。

在这一过程中，还有王老师、岳老师和褚老师关于陶瓷器件的测试技术，3D打印增材技术以及其他实验仪器的使用。随之不断锻炼的是我的动手能力，逐渐增长的好奇心，以及目前和未来我所想要培养的严谨求实、创新融合的理工思维，非常珍惜这一次次能够进入实验室亲手操作实验仪器、分析实验数据的机会，和老师们的交流、实践、讨论之后，提升了对于未知领域进行探索的能力，并且能够更加深入地了解一个课题和其背后的原理。

以上是我对于信息功能陶瓷的介绍和我这学期在 TIC 课程之中的收获。

TIC2B 微纳传感与智能微系统方向介绍

为先 21 曹稷阳

一、任大海老师及其课题组介绍

任大海老师：精密仪器系仪器科学与技术研究所 副教授

研究领域：生物微系统、微纳传感器

研究概况：

1. 基于 BioMEMS 的生物分子检测与分析技术
 - (1) 单细胞分离技术与芯片
 - (2) 基于量子点探针的并行检测分析方法
 - (3) 基于 BioMEMS 的高分辨率生物分子检测技术
2. 面向空间应用的 MEMS 器件研究
 - (1) 高精度微型谐振式磁敏感器
 - (2) MEMS 热电转换器件

二、实验室设备实操训练（前半学期）

1. 激光切割机：精度达到 $10\mu\text{m}$ 级别，可用于制作掩模版等；
2. 井深显微镜：利用算法识别出对焦的清晰度并在不同平面进行对焦，根据焦距差，可以计算出两个平面的高度差，可用于 MEMS 芯片的观察；
3. 白光干涉仪：利用白光的反射干涉原理实现对物体表面的成像与其厚度的测量，并可实现动态成像；
4. 扫描电镜显微镜（SEM）：用电子束代替光子，与样品发生相互作用后激发出二次电子，可呈现出样品的二次电子像，具有极高的放大倍率；
5. 探针台：其所使用的探针尖端直径仅有微米级，使用中可以接通各种电流，用于对未封装的 MEMS 芯片的临时测试；
6. 引线键合机：将直径为几十微米的金丝或者铝丝作为导线，通过加热与超声波加力等方式“焊接”在芯片上以方便后续的测试工作；

三、微流控芯片的制作（后半学期）

1. 关于 MEMS

MEMS 全称 Micro Electromechanical System，微机电系统。是指尺寸在几毫

米乃至更小的高科技装置，其内部结构一般在微米甚至纳米量级，是一个独立的智能系统。

优势：微型化、智能化、多功能、高集成度和适于大批量生产；体积小、重量轻、功耗低、耐用性好、价格低廉、性能稳定。

可视为微电路与微机械的交叉领域。

2. 关于微流控芯片

微流控（microfluidics）是一种在微纳米尺度空间中精确控制和操控流体的技术，可将样品制备、反应、分离和检测等多种功能缩微到一个几平方厘米大小的芯片上。具有用量小、生物相容性高、适用于生物学检测、加工性能优良、低成本，适用于批量生产等多种优势。

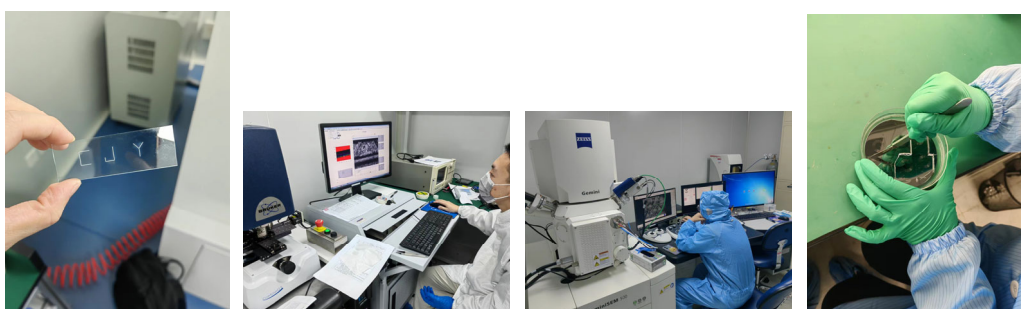
微流控技术是 MEMS 技术在流体处理方面的一个重要分支。

3. 关于课程

探究实验：以不同微粒模拟血液样品中的不同细胞，并对其中一种微粒做了特殊标记（模拟癌细胞）。通过调节流体流速、生成液滴等多种方式，探究使用微流控芯片实现对癌细胞的筛选与分离的可行性。

通过本学期的实验，我们可以：熟悉简单微流控芯片制备的全流程；理解微流控芯片分选细胞的原理；使用自己制备的微流控芯片实现对样品中不同微粒的筛选与分离。

4. 照片记录



TIC2B 光学成像方向介绍

为先 21 张浩然

我们所处的物质世界是三维的，但传统的相机只能获取二维图像，无法感知物体的深度信息。因此，采用三维测量获取物体深度信息，从而更完整地描述物体具有重要意义。光学三维成像是使用光学方法获取物体形貌等三维信息的技术，目前在工业自动检测、生物识别、汽车自动驾驶领域都有着广泛的应用。三维表面成像的一种主要方法就是结构光法，即采用特别设计的二维空间强度变化图案，对场景进行主动照明，使用相机获取结构光照明下场景的二维图像，采用各种结构光原理和算法，即可计算出场景中物体的精确三维表面轮廓。在本学期的 TIC 课程中，我在曹良才老师的课题组里学习结构光三维成像系统的工作原理，了解相机标定的方法，并尝试采用单目逆相机法搭建完整的结构光三维成像系统。

课程中搭建的单目结构光三维成像系统由一台相机与一台投影仪组成，相机与投影仪均可视为针孔相机，二者的工作过程是可逆的。使用投影仪投射格雷码加四步相移正弦条纹至待测物体表面。其中格雷码是由普通二进制编码改进得到，对于任意两个相邻码值，有且只有一位二进制数不同，无权重高低，其解码误差较小，可以得到绝对编码值。将这种编码方式应用于三维形貌测量，可以准确地获取被测物体轮廓上各采集点相对于传感器坐标系下的绝对位置。而正弦条纹则克服格雷码空间离散划分的缺点，两者的混合编码可以得到连续的绝对相位值，在提高测量准确度的同时兼顾测量的速度。

编码图像经待测物体调制后变形，再由相机采集经调制后的编码图像。通过解码算法计算采集图像在投影物体图中的对应点，根据几何关系即可求解物体表面点云的三维坐标。随后对点云数据进行滤波、匹配拼接等操作，实现被测对象的三维重建。

在对待测物体扫描前首先要对相机和投影仪进行标定。相机标定就是指寻找一个合适的数学模型，逼近相机从三维到二维的一个函数，使得这个函数可以找到反函数，从而求出成像的反过程。标定之后的相机即可实现三维场景的重建。投影仪的标定则需要找到相机成像平面与投影仪成像平面的映射关系，通过相机的捕获将对应像素点经过换算解出投影仪对应的像素坐标，从而完成投影仪的标

定。通常采用平面棋盘格的标定板进行标定，通过检测其角点，利用透视不变性原理即可确定物点和像点的对应性。

相比于其他三维成像技术，结构光三维成像具有操作维护简单、测量速度快、精度高、测量范围广等诸多优点，但是目前仍然存在一些缺点，比如对于大反射率的镜面物体或者透明物体的成像效果不佳，有待进一步改进。

TIC2B 生医仪器方向介绍

为先 21 杨舒亦

一、项目背景

随着人口老龄化和生活方式的转变，癌症已经成为威胁人类健康的主要因素。近年来，面向癌症的个体化、精准治疗蓬勃发展，而实现癌症精准治疗的关键在于根据癌症发生的部位、临床病理、基因突变和免疫特性等全面、准确对癌症进行分类，并评估组织中癌细胞的异质性。单细胞分析是研究细胞异质性生物学过程的关键技术，对生物学基础研究，疾病标志物筛查及新药研发等均有着重要意义。相对单细胞基因组、转录组和蛋白组分析，单细胞脂质组分析起步较晚，面临诸多技术挑战。脂质数量庞大，结构复杂，单细胞层面的脂质结构表征和定量分析仍面临诸多难点。

二、技术背景

单细胞分析是研究细胞异性的关键技术，对生物学过程研究及新药研发有着重要意义。目前，单细胞基因组学技术较为成熟，单细胞转录组学和蛋白组学分析技术近年来获得较多关注和投入。与其他组学相比，单细胞脂质组学分析刚刚起步，面临诸多技术难点。由于脂质数量庞大，结构复杂，其在单细胞层面的结构表征和定量分析颇具挑战。脂质的结构异常复杂，根据头基的不同，可将脂质划分为不同类型。此外，脂质的脂肪酸链 (fatty acyl chain)、脂肪酸链位置 (sn-position)、碳碳双键位置 (C=C location)、双键几何构型 (cis/trans) 等结构特征均可变化，造成脂质异构体数量繁多。近年来，研究者们开发了多项技术，用于脂质的精细结构鉴定，包括臭氧诱导解离、环氧化和光化学 (Paternò-Büchi, PB) 反应等。同时，多项单细胞内脂质分析技术也已报道，包括探针电喷雾质谱、流式电喷雾质谱和单探针质谱等。然而，由于单细胞内的待测物绝对含量低和结构分析方法缺失等限制，单细胞内脂质精细结构的解析仍面临着重大挑战。

三、研究方向

清华大学精密仪器系欧阳证教授、马潇潇副教授带领研究团队，发展了一种基于质谱的新型单细胞脂质组精细结构分析方法。利用自由基诱导解离、光化学

衍生与多级质谱，结合细胞固定、细胞电迁移和按需电喷雾离子化等手段，发展了单细胞脂质组精细结构表征技术，在单细胞水平上实现了哺乳动物细胞中脂质的按需、高灵敏度检测，并获得了脂质脂肪酸链（fatty acyl chain）、sn-位置（sn-position）、碳碳双键位置（C=C location）等精细结构信息，解决了哺乳动物单细胞内大规模脂质的精细结构分析这一关键技术难题，为深入挖掘癌细胞间的异质性奠定了基础。

四、技术原理

该技术的基本原理如图 1 所示：首先利用戊二醛对固定细胞进行固定，使细胞在水溶液保持形态完整。在电迁移和液滴辅助电喷雾作用下，固定后的单细胞完成实现高灵敏度质谱检测（图 1b）。细胞固定后，磷脂酰胆碱（PC）的回收率可达 90% 以上。采用水溶性 2-乙酰吡啶（2-AP）作为反应试剂，有效避免了衍生过程中细胞脂质的溶解问题。

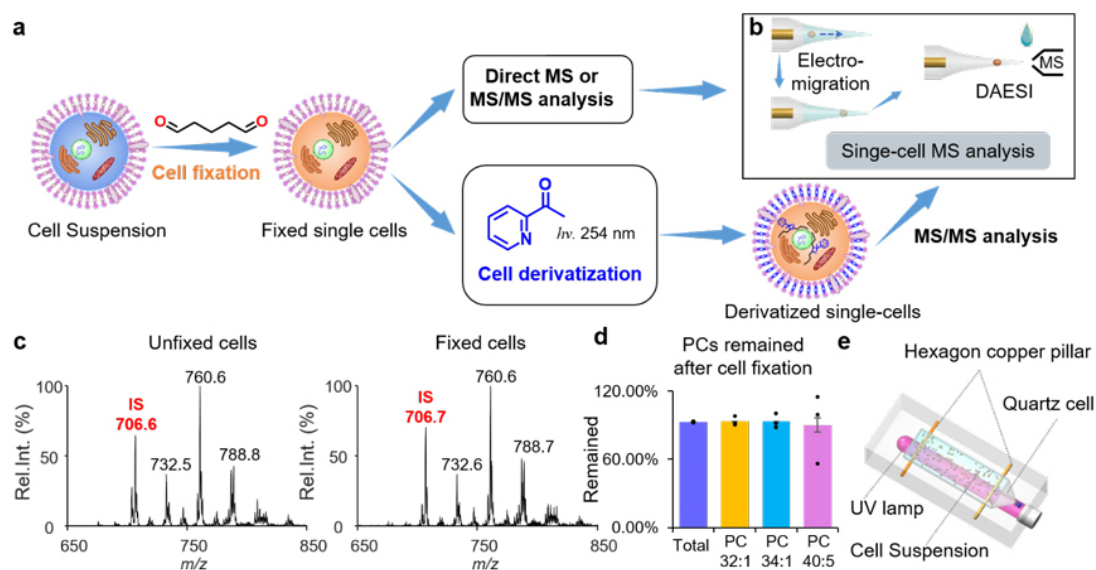


图 1. 单细胞脂质组的质谱精细结构技术 (a) 单细胞脂质精细结构解析流程图, (b) 基于电迁移和液滴辅助电喷雾 (DAESI) 的单细胞质谱分析, (c) 未固定和固定的细胞提取液内前级离子扫描 (PIS) m/z 184 扫描质谱图, (d) 戊二醛固定下的 PC 回收率统计, (e) 单细胞群体独立光化学衍生反应装置图。

结合串联质谱分析，研究人员实现了对单细胞内脂质 C=C 位置异构体的鉴定和相对定量分析。以单个 MDA-MB-231 中的 PC 34:1 (m/z 760) 为例，其 PB 产物离子 (m/z 881) 在串联质谱下可以产生三对诊断离子：636/725，650/739 和

678/767, 分别代表 PC 16:0_18:1(Δ 8), PC 16:0_18:1(Δ 9)和 PC 16:0_18:1(Δ 11)。进而利用这些诊断离子的相对强度即可实现相应脂质异构体的相对定量分析 (图 2a)。除 PC 外, 该技术还可以用于脂肪酸 (FA)、甘油二酯 (DAG)、甘油三酯 (TAG)、胆固醇酯 (CE) 等其他脂质的分析 (图 2b, c)。此外, 还实现了单细胞内脂质 sn 位置异构体的鉴定和相对定量分析。以人乳腺癌 MDA-MB-231 细胞内的 PC 34:1 为例, 其碳酸氢根加合物经多级质谱分析可产生两个 sn 特异性诊断离子, 419 和 445, 代表 PC 16:0_18:1 和 PC 18:1_16:0。液滴辅助电喷雾使得单细胞多次采样和分析成为可能。实验结果表明, 该技术可对单细胞进行至少八次采样, 可实现多个脂质分子的精细结构鉴定和相对定量。

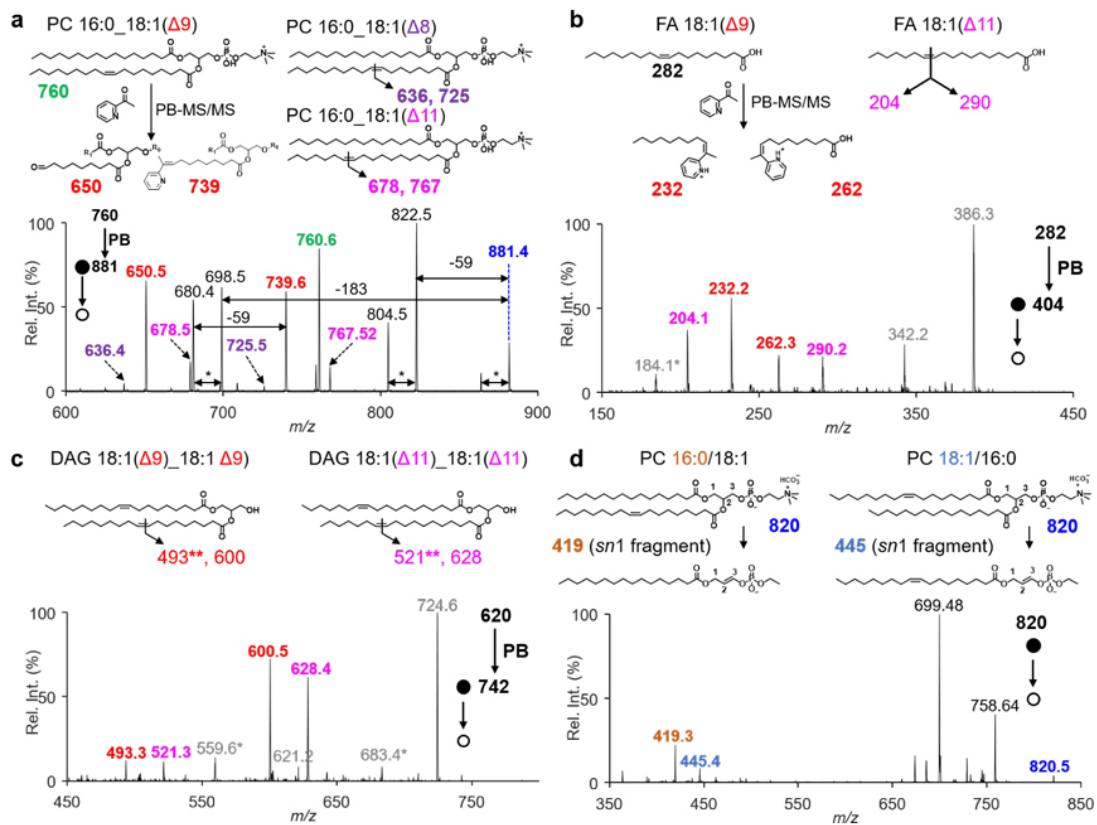


图 2. 单细胞内脂质的精细结构解析。(a) 单个 MDA-MB-231 内 PC 34:1 的 C=C 位置鉴定, (b) 单个 MCF-7 内 FA 18:1 的 C=C 位置鉴定, (c) 单个 MCF-7 内 DAG 36:2 的 C=C 位置鉴定, (d) 单个 MDA-MB-231 内 PC 34:1 的 sn 位置鉴定。

该研究中, 随后开展了对野生型 (HCC827) 和耐药型 (HCC827/GR6) 非小细胞肺癌 (NSCLC) 细胞的单细胞精细脂质组学分析。从脂质分子相对定量、脂

质 sn 位置异构体相对定量和脂质 C=C 位置异构体相对定量等层次分别开展研究（图 3.a-d）。t-SNE 降维聚类分析表明，仅脂质 C=C 位置异构体的相对定量分析能准确区敏感和耐药肺癌细胞。该团队在 HCC827 中检测到了约 9%的耐药细胞，与文献报道的 7~12%的结果高度一致，表明单细胞精细脂质组学分析在精准医疗方面具有不可替代的重要作用。

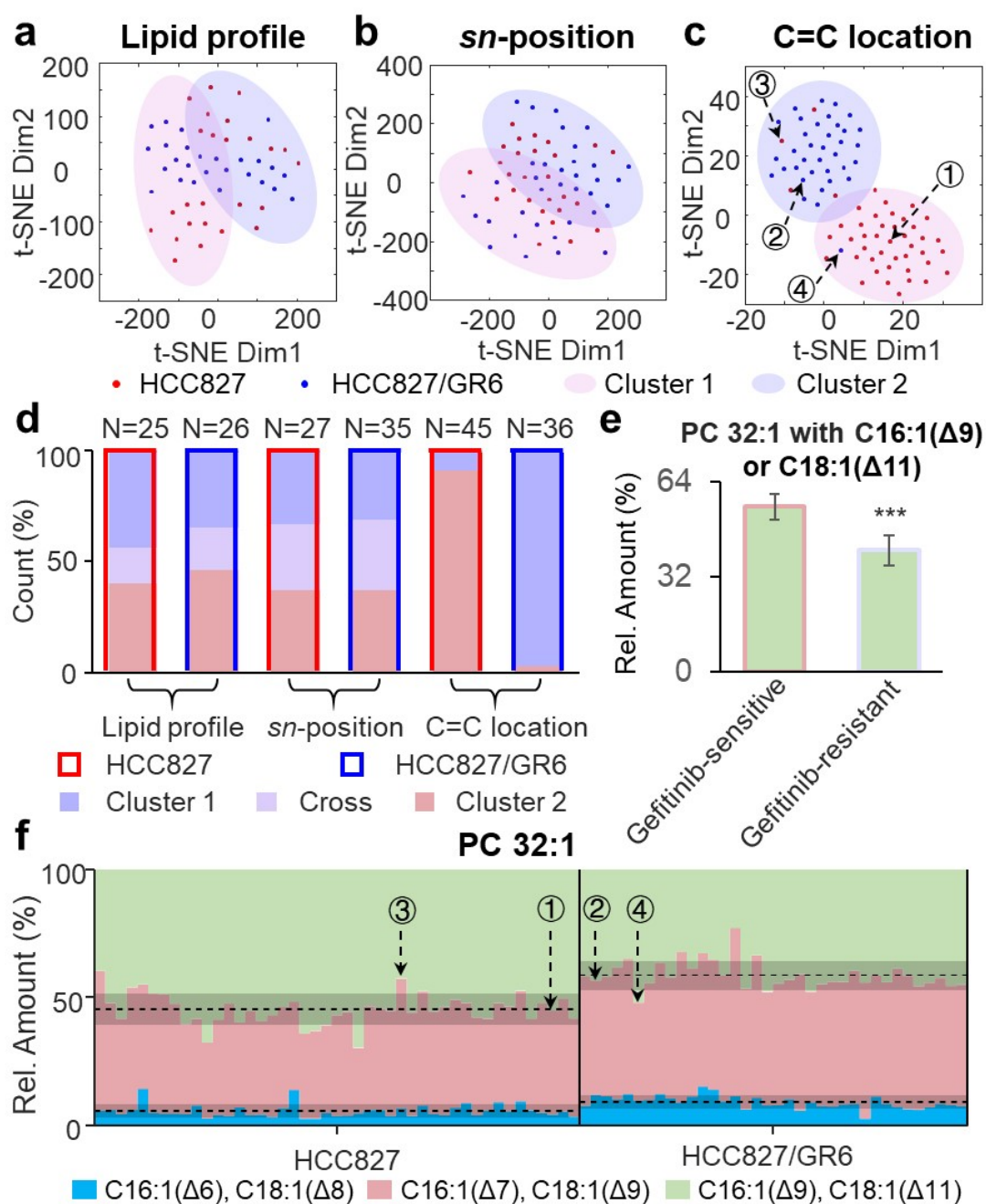


图 3. 敏感型和耐药型 NSCLC 细胞的精准识别。(a-c) t-SNE 降维聚类图，(a) 由脂质分子相对含量分布计算而得，(b) 由脂质 sn 位置异构体相对含量计算而得，(c) 由脂质 C=C 位置异构体相对含量计算而得。(d)

每种聚类分析中样品数目统计。(e) 敏感型与耐药型细胞中含有 C16:1(Δ 9)或 C18:1(Δ 11)的 PC 32:1 异构体相对含量比较。*** $p < 0.001$ 。(f) HCC827 和 HCC827/GR6 单细胞内 PC 32:1 的 C=C 位置异构体相对含量分布。

最后，以四个典型单细胞为例，阐释了同一细胞系内不同细胞间的异质性，并研究了可用于耐药 NSCLC 细胞精准识别的潜在生物标志物。通过定量分析可以发现，含有 C16:1(Δ 9)或 C18:1(Δ 11)的 PC 32:1 异构体相对含量在耐药型 NSCLC 细胞内含量为 $41.0 \pm 5.1\%$ ，在敏感型 NSCLC 细胞内含量为 $55.7 \pm 4.9\%$ ，可用于敏感和耐药细胞区分。例如，在来自 HCC827 细胞系的细胞 1,3 中，细胞 1 属于敏感型，细胞 3 属于耐药型；在来自 HCC827/GR6 细胞系的细胞 2,4 中，细胞 2 属于耐药型，细胞 4 属于敏感型。以上结果表明相同细胞系内的单细胞之间存在显著异质性，为耐药型和敏感型 NSCLC 细胞的区分提供了关键技术，对癌症等疾病的精准诊疗具有重要意义。

TIC2B 光电子技术方向介绍

为先 21 高宗宇

一、课程内容

课程内容主要以光学方面的应用实践为主，包含光量子擦除实验、3D 成像实验、量子密码学实验、光的产生与荧光现象、固体激光器与半导体激光器、光的散射现象与测量这六个实验，期间穿插有课题组相关的内容，在每次实验结束后需要进行实验报告撰写。下面以光量子擦除实验和 3D 成像实验为例，简要介绍 TIC 课程内容。

(1) 光量子擦除实验：

使用马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 干涉仪进行干涉。实验光束被分束镜分成两个光路，之后经过不同长度的光程，再在第二个分束镜处合束，产生干涉现象，在屏幕上观察到干涉条纹。在此实验中，我们主要用其验证互补性的量子力学性质和路径信息的擦除。如果我们在干涉仪的每个臂中放置一个偏振镜，并且将其偏振面彼此旋转 90° ，则干涉图样会消失，这是由于测量路径信息会破坏干涉图样。但如果我们在第二个分束镜和屏幕之间增设一个与其他偏振镜成 45° 的偏振片，则路径信息被擦除，又可以观测到干涉图样。

(2) 3D 成像实验：

人的每只眼睛都在同一环境中同时观察同一物体，但视角有所不同。从这些不同的角度，大脑计算出物体相对于观察者的三维位置。3D 显示器（电影或图像）的基本原理都是将从不同角度捕获的两个图像引导到观看者的眼睛中，且每只眼睛仅仅进入对应的图像。类似于正常视力，大脑从两个不同的图像构建深度感知。此实验主要通过颜色滤光器立体成像、线偏振器立体成像以及 RealD 方法进行 3D 成像的模拟实验。

在期末选题上，张海涛老师主要以同学们创新想法为导向，辅助完成 X-4-X 等结课相关内容。以此次结课课题为例，我们从量子密码学实验中获得了灵感，主要实验了通过旋光效应检测磁场及其变化的可能性。

二、收获

通过 TIC2B 光电子技术方向课程，我主要实践了一系列光学平台以及光学

仪器的使用方法，了解了激光的产生、散射以及各个偏振态的产生及其作用等光学工程方向的基本实践内容，并在这其中学习到了一套进行光学实验的最基本的操作流程、以及进行实验的基本思路，还学习到了光纤切割、链接等一系列光学相关器件的使用方法。

此外，我还通过对期末课题的探讨以及研究，了解到一般科研课题是如何被提出、如何进一步地进行试验、调研文献并以此证实或改进我们原本的想法。在此过程中，调研了较多文献，学习了磁光晶体、光纤设计等方面的知识，为我今后在这一方面的研究打下了较为牢固的基础。

TIC2B 光学测量与传感方向介绍

为先 21 尹忠栋

一、教学目的

- 1、了解激光器、声光调制器(AOM)、耦合器、信号接收器、示波器等光学实验器材的基本原理及使用方法。
- 2、了解激光噪声产生的种类和机制，并了解噪声测量的方法和原理。
- 3、初步学习 matlab 的基本使用方法和语言，并制作数据分析的代码。
- 4、提高光学实验的操作能力，培养独立思考的能力。

二、与课程相关的研究内容

1、激光

(1) 特点

相比于自然光，激光具有方向性强、单色性好、亮度高等的特点，在测量中具有非接触式测量、精度高、测量时间短、空间分辨率高等优点，故其常应用于精密测量领域。

(2) 产生机理

根据 Einstein 量子电磁辐射理论（1916），激光的产生过程，就是发生了光与物质的相互作用，具体包括自发辐射、受激吸收、受激辐射三者。

物质原子中的电子，由于处于不同能级上，故具有不同的能量。

自发辐射，指处于高能级的粒子自发向低能级跃迁，并辐射一个频率满足 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子，各辐射光子方向、相位随机，频率范围宽。

受激吸收，指处于低能级的粒子在频率满足 $h\nu = E_2 - E_1$ 的辐射场作用下，吸收光子并向高能级跃迁。受激吸收需要外界提供能量，且对能量大小要求至少为两能级能量差。受激吸收的速率与低能级上粒子数相关，粒子数越多，受激吸收概率越大。

受激辐射，指当外来光子频率满足 $h\nu = E_2 - E_1$ ，高能级的电子在外来光子的激发下向低能级跃迁并辐射一个与入射光子**传播方向、频率、相位**完全相同的光子。受激辐射是激光器产生激光的重要过程，当受激辐射占优势时，通过不断的光强增益，得到相位一致，单色性好，光强功率足够大的激光。

受激辐射的速率与高能级上粒子数相关，粒子数越多，受激辐射概率越大。

热平衡下，正常分布：高能级粒子数 \ll 低能级粒子数

打破热平衡，反转分布：高能级粒子数 $>$ 低能级粒子数

由上述分析可知，要使受激辐射占优势，须达到粒子数反转分布的条件，也是激光产生的必要条件。

2、激光器

如图 1 所示，激光器的构造中，最重要的三个部分是：泵浦源、增益介质、谐振腔。

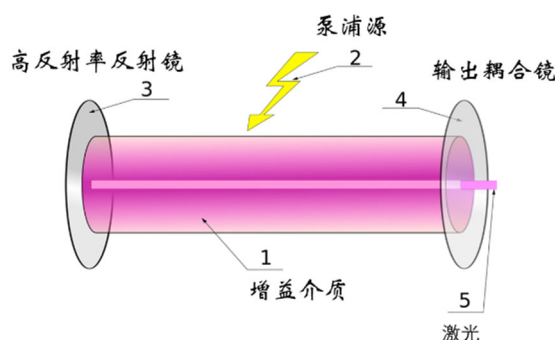


图 1 激光器示意图

泵浦源从外界向激光器中输入能量(一般是电能)，使增益介质中物质的低能级粒子受激吸收跃迁到高能级上，形成粒子数反转的情况。

在增益介质中，通过不断地受激吸收和受激辐射，使光强不断增大，得到激光。且由于增益介质具有一定的带宽，从而对激光频率具有一定的选择性。

谐振腔分两种，一种为两面是高反射率反射镜的谐振腔，一种为环形谐振腔。其作用都是使激光不断经过增益介质，从而不断触发受激辐射，增大光强；并且腔长对激光的波长进行了选择(以第一种为例)，满足下式波长的激光才可以不断反射。

$$2L = k\lambda$$

3、AOM

声光调制器的基本原理是声光效应。

使用时，会在 AOM 的声光介质中输入一定频率的超声波(本实验中为 55MHz)，当超声波经过介质的时候，介质会发生弹性的变形，这种变形不仅会随时间改变，而且会随空间发生变化，并且这种变化都是周期性的。相对与光速

而言，声速很小，故可认为这种形变不随时间变化。最终，介质出现疏密相间的现象，这种现象跟相位光栅非常类似。

由此，具备了光散射或衍射的条件。从本质上来讲，声光效应就是指光通过声波扰动的介质时发生散射或者衍射的现象。

在光栅中会发生拉曼奈斯衍射和布拉格衍射，故 AOM 可分为拉曼奈斯型声光调制器和布拉格声光调制器。前者的主要特征是只能在低频（通常频率小于 10MHz）环境下工作。后者的主要特征是调制带宽较宽，衍射的效率也高。在光学实验中，主要运用的是布拉格声光调制器。

4、激光噪声产生的原因及机制

一方面，激光在产生和传播的过程中，会受到外界环境如声波，其他光波的干扰，从而使激光带有一定的频率噪声和强度噪声；另一方面，由于激光自身机制的原因，还会产生一类噪声，即量子噪声。前者可在一定程度上避免，但后者由于是原理性的噪声，无法避免。

量子噪声来源于量子涨落，例如自发辐射与光场叠加引起的噪声。量子噪声引起的频率噪声为白噪声，光谱线型为洛伦兹函数。

本实验着重测量量子噪声，并判断其与功率之间的关系。

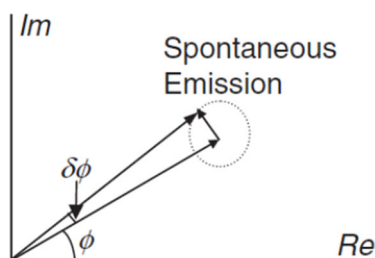


图 2 量子噪声示意图

5、激光噪声测量

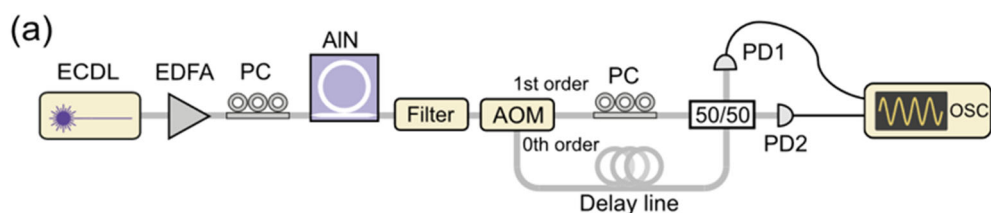


图 3 互相关延时自外差法装置安装简图

如图 3 所示，激光器发出的激光经过 AOM 后被分为两束。其中 0 级光经过

延迟光纤，目的是破坏两束光之间的相干性；1级光经过偏振片，改变偏振方向，提高与0级光形成拍频的效果。

两束光在之后发生耦合，并形成拍频，接着再次分成强度相等的两束，被接收器接收，传入示波器中，形成拍频的波形。

三、收获

在本次实验中，我们以小组形式进行了激光噪声的测量与分析实验，对激光噪声的产生原因有了初步的了解，从这次实验中，也确切感受到了学术性实验与其他实验的不同：

(1) 要求更加深厚的理论基础。在前两堂课上，我们针对激光器及激光噪声的相关性质进行了学习，这些理论知识相比于课堂所学更有深度。本质理论可能比较简单，但当应用某一具体领域时却会发生很大的变化，例如电子跃迁的理论可以应用于激光的产生上。其中的过渡便是对希望创新的科研者的考验。这需要我们养成独立思考，自主探索的能力。

(2) 要有在知识不完备的前提下进行实验的能力。说实话，激光噪声的相关知识仅凭两节课想完全掌握是比较困难的，但我认为，科研工作者不可能在知识彻底完备的情况下进行创新。这次实验正是相同情况，在相关知识不完备下，如何能够理解实验，操作实验，分析结果。这样的不断反思可以提高我们的相关能力。

(3) 要注重团队间协作的能力。在现代的科研工作中，个人的力量太过渺小，必须有团队的共同努力才能有所成果。故对我们提出了团队协作能力的要求。作为领头者，如何合理分工，协调工作，让每个人都发挥自己的作用；作为组员，如何完成好个人工作，同时能与相关组员对接工作，这些都是对我们的要求。

在实验中，也有一些需要反思的地方：

(1) 对课堂知识没有进行及时巩固。应该更多地利用课后时间回顾课上知识，拓展课外知识。

(2) 问题没有及时地反馈。在 matlab 代码制作过程中，遇到了很多问题，但一开始没有及时反馈，导致进度一再拖沓。

(3) 团队协作能力不足。前期对任务的分工合作交流较少，应该更多交流来取长补短。

最后，感谢为这次实验提供帮助的学校、院系及所有老师、学长、同学。

四、参考文献

- [1] 鲍成英. 光学测量与传感. 清华大学, 2023.
- [2] 杜旭涛. 光纤耦合声光调制器的理论和实验研究[D]. 河北工业大学, 2016.
- [3] 高新朝,陈名松,蒋红艳.基于声光效应的相干光通信系统实验方案研究[J].微计算机信息, 2010, 26(15):145-147.
- [4] 李原福. 用一个调制器实现激光稳光和调制的研究[D]. 吉林大学, 2006.
- [5] 杉浦幸雄,王德芳.声光调制器和偏转器[J].压电与声光, 1985(05):60-68.
- [6] 张博涵.声光效应实验原理及其应用研究[J].数字通信世界, 2018(11):137.
- [7] 赵传勋.声光调制器原理及其应用[J].光学仪器, 1984(04):14-19.
- [8] 赵启大.多通道声光调制器的工作原理[J].声学学报, 1995(05):340-347.
DOI:10.15949/j.cnki.0371-0025.1995.05.004.
- [9] Zhiquan Yuan, Heming Wang, Peng Liu, Bohan Li, Boqiang Shen, Maodong Gao, Lin Chang, Warren Jin, Avi Feshali, Mario Paniccia, John Bowers, and Kerry Vahala, "Correlated self-heterodyne method for ultra-low-noise laser linewidth measurements," Opt. Express 30, 25147-25161 (2022).

TIC2B 导航技术方向介绍

为先 21 李与涵 戴舟 陈子晗

一、课题组研究方向介绍

导航技术课题组是清华大学精密仪器系的重要组成部分，组内有多位老师研究不同形式的导航。经过本学期的学习，我们对于导航组的研究内容有了整体把握，可以分为以下几个大方面，即惯性导航组、MEMS 微机电导航组、卫星导航组。其中，导航组的研究主方向在于惯性导航。下文将详细介绍。

首先，导航技术对于现代人民生活、工业生产、国家安全有着重要作用。因此，如何能够提高导航精度，提高导航稳定性与抗干扰性是重要的研究课题。如何尽量减少在导航过程中向外发射信号，减少自身暴露的风险可能也同等重要。因此，导航组的研究重心偏向于惯性导航，符合国家需求。

所谓惯性导航，即不利用传统的无线电或卫星导航，而是通过内置加速度计和陀螺仪解算物体运动的加速度和航向，通过积分得到物体的运动路线，由此实现导航。惯性导航的一大优势就是无需基站或者卫星，依靠自身即可实现导航，是 GF 应用最为广泛的导航方式。同时，惯性导航也具有相当高的灵敏度与准确性，性能丝毫不差于传统的无线电导航或者卫星导航方式。

但是，惯性导航存在一个致命的问题，即其误差会随着时间积累而不断累积，由于其确定位置信息是由加速度两次积分得到，故经过一段时间，误差在位置方向上的累积会变得非常大，如果不及时进行调整，则会导致信息发散。因此，传统的惯性导航工作时间一般只有几个小时，远远不能满足正常的需求。因此，在导航组中，误差调整、削减误差算法、组合导航减小误差等研究方向是热门与重点。

当前行之有效的减小误差的方式主要有两种，一是利用多种导航系统进行集成组合，互相修正以达到测量值稳定，减小误差。最常见的组合方式包括惯导与卫星导航集成、惯导与天文导航集成等方式，通过组合导航的方式，可以有效减小误差。

第二种方式是开发多种修正算法，包括零速度修正法、卡尔曼滤波等等修整算法，利用算法实现惯导自动修正，也是一种有效减小误差的方式。

综上所述，导航技术组的研究范围涉及导航领域的方方面面，重点针对国家重大工程，开发新型、高精度、高可靠性的惯导系统。课题组研究内容包括软件开发、电子电路搭建测试、惯导芯片流片制作、仪器组装等等，适合不同学科背景的同学尝试，探索导航的奥秘。

二、个人收获

经过一个学期的学习，我们对于导航方向的知识以及惯性导航系统有了更多深刻的体会与认知。从最开始对惯导系统一无所知，到最后自己也能搭建 IMU 惯导系统，可以清晰地看到自己的成长，这种感觉很棒。虽然课程中有些内容比较困难，特别是误差修正部分，卡尔曼滤波等方法对我们来说都是全新的，需要课后花一些时间去研究领悟。但我认为，这些时间的投入都是值得的，只有这样，才能够最大程度的发挥 TIC 课程的作用，更加充分地了解实验室的研究内容。

除了理论学习以外，本学期我们还做了许多实验，从惯导系统，到组装简单的陀螺仪加速度计，再到最后一节课上我们亲自测试室内人体惯导系统，自己测试数据、处理数据。这种实验和理论相结合的授课模式我非常喜欢，也通过这样的授课模式获得了最大化的收获。以下是我们在测试室内惯导系统的过程中拍摄的照片以及我们处理的数据图像。



图 1 对腰部固定惯导进行调零



图 2 同学佩戴腰部惯导实地测量数据

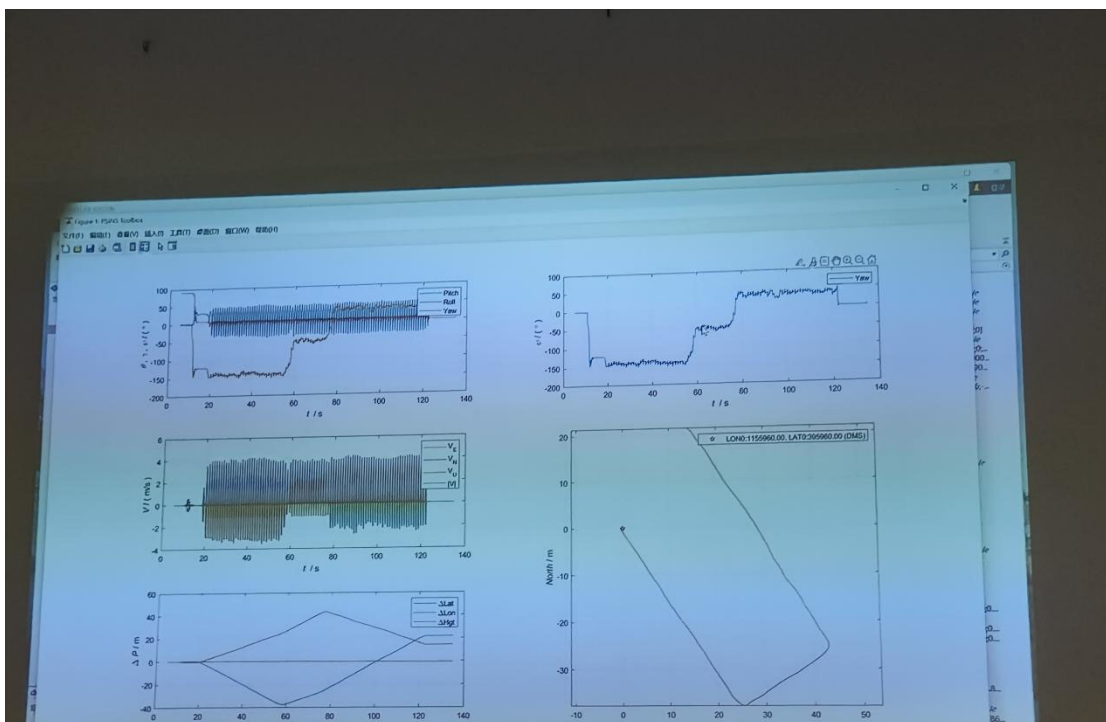


图 3 用 matlab 处理实验数据得到的各参数随时间变化图

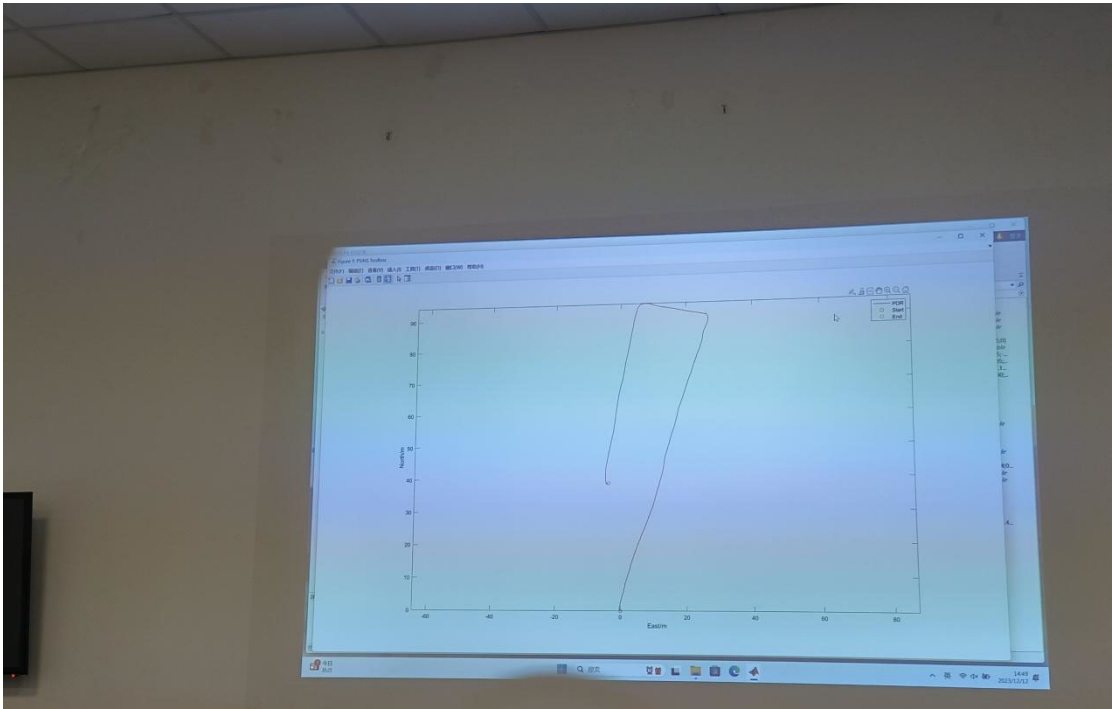


图 4 惯导系统显示的测试同学运动轨迹，基本与实际运动路径符合

TIC2B类脑计算方向介绍

为先21 何宇坤 廖桂贤

一、TIC 研究内容

1、课程背景

脑科学和信息学是当今世界科学研究的两大热点，“类脑计算”是两大学科相结合的新兴领域，其目标是通过借鉴人脑的工作方式，实现人工通用智能。2021年，“中国脑计划”正式启动，类脑计算是一个重要的组成部分。“类脑计算”是《科技创新与挑战2B》的一条课程轨道，由精密仪器系类脑计算研究团队负责。通过走进类脑计算实验室深度体验、实践、交流和讨论，进一步培育学生在与类脑计算相关的交叉领域从事科研和技术创新的基本素养，培养探索未知能力，包括对工程实验室和常用实验设备的认知和了解，实验室安全、基本实验技能和动手能力的训练，树立学科交叉和融合创新的理念等，为《科技创新与挑战》后续进阶课程奠定基础。

2、学习内容

- 神经网络的原理和优化方法：涵盖深度学习的核心理论和经典任务实践，以及如何优化神经网络模型的性能。完成从配置环境、设计网络结构、训练模型并调整参数的全过程。
- 宇树机器狗的二次功能开发：利用宇树机器狗平台，学习机器狗的运动控制SDK，并根据需要编写或修改代码。完成从数据采集、图像预处理、到在PC上训练模型并搭载到机器狗的流程，实现各种基于人工神经网络的任务，如目标追踪。
- ChatGPT 的longchain 接口应用：探索ChatGPT 在具身实体上的应用，为机器狗增加处理更高层次任务以及人机交互的能力。
- 未来还将视类脑技术的发展情况更新课程内容。

3、主要流程

前几节课学习神经网络的原理和搭建代码；然后学习编写、修改机器狗控制代码；最后使用机器狗对上述技术及一些新兴技术（如ChatGPT 等）进行应用使得机器狗能够进行一些特定的较为复杂的活动。

二、TIC 自身收获

掌握python 对于学习类脑来说很重要；

不懂就问，菜就多练，这样既对程序好，也对自己好；

掌握了深度学习的基本原理以及在Pytorch 框架下搭建神经网络的方法；

锻炼软件编程、硬件调试能力。

TIC2C 神经工程方向介绍

为先 21 高楚贺

- 从生命说起

生命 1.0 指的是既不能更新其“硬件”，也不能更新其“软件”的生命形式。生命 1.0 的代表是细菌，在一个细菌的生命周期内，它既不能主动对其身体的结构进行改变，也不能对其行为模式进行调整。它在“硬件”和“软件”上的变化都只能是种群意义上的、通过自然选择进行的，而不是个体意义上的、通过设计得到的。

生命 2.0 指的是不能更新“硬件”，但可以更新“软件”的生命形式。人类就是典型的生命 2.0 物种——在人的一生中，他很难对自己的身体做出调整（除非通过外科手术），但可以通过学习、习惯养成等来调节自己的行为模式。

生命 3.0 指的是既可以更新“硬件”，也可以更新“软件”的生命形式。想象一下，如果在某一天，我们制造出了具有智能的机器人。那么，这个机器人既可以通过升级更新自己的软件，也可以通过替换零件来更新硬件。如果做到了这两点，这个机器人就是生命 3.0。

神经工程的研究就是从单向的脑机接口，发展到双向的脑机交互，最后实现脑机融合的智能形式。目前最先进的神经控制技术在控制维度、精度、复杂度和响应速度等方面还有很大提升空间。

- 指导教师及研究方向

宫琴：讲解了听觉系统的检测、康复和认知工程的研究。通过现代信号处理的方法，检测提取听觉系统从听觉外周、听神经到听觉中枢的信号，并研究听觉系统处理各种信息的通路和机制，对疑难听觉病症进行精准定位。并针对重度聋和全聋患者精准听力康复的需求，创新智能信号处理算法，攻克了对竞争性语音的自适应降噪技术，搭建了对有声调语言可懂度进行优化的电子耳蜗调试平台。通过诱发脑电信号，实现对 CI 佩戴者音高感知能力的客观评价。

Stella：从为什么人类比其他动物聪明问题出发考虑，假设人类可从事物的表象发现背后的逻辑关系和规律。小到理解一个简单的词汇如“妈妈”，大到数学运算和看地图，这些都基于对关系的了解和思考。进一步深入探索关系思维，从

人类和其他动物掌握了哪些关系，到如何通过学习方法和工具提高思考关系的能力，再到人类如何理解和处理复杂的社会关系。

通过对儿童和类人猿的研究，发现人类和其他动物在关系认知方面的相似和差异之处。并通过使用学习方法和工具、语言进行对比，来提升人们的思维能力。

苑克鑫：研究感觉刺激是如何在大脑中被表征并被转化为行为的。具体来说，研究能够接收多种感觉输入的脑区的功能角色，包括脑干，中脑，前脑以及基底核中的部分脑区。它们是大脑中负责将从环境中接收到的感觉信息进行整合和处理，从而影响我们的行为的地方。使用啮齿类、非人灵长类动物模型，进行神经生理记录和病毒辅助的神经环路示踪。

丁海燕：结合工程、神经科学、医学物理和影像知识提供医学诊断、监护信息，辅助治疗评价。比如利用振幅整合脑电实现新生儿脑功能监测，简化的脑电记录方式能够完成床旁长程监测，实现对新生儿到小婴儿的脑发育、成熟度以及损伤的无损评价。还有对心脏结构和功能进行“一站式”检测的心脏核磁共振成像看到心脏的形态和搏动的状态，了解背后相关的病理生理学过程。

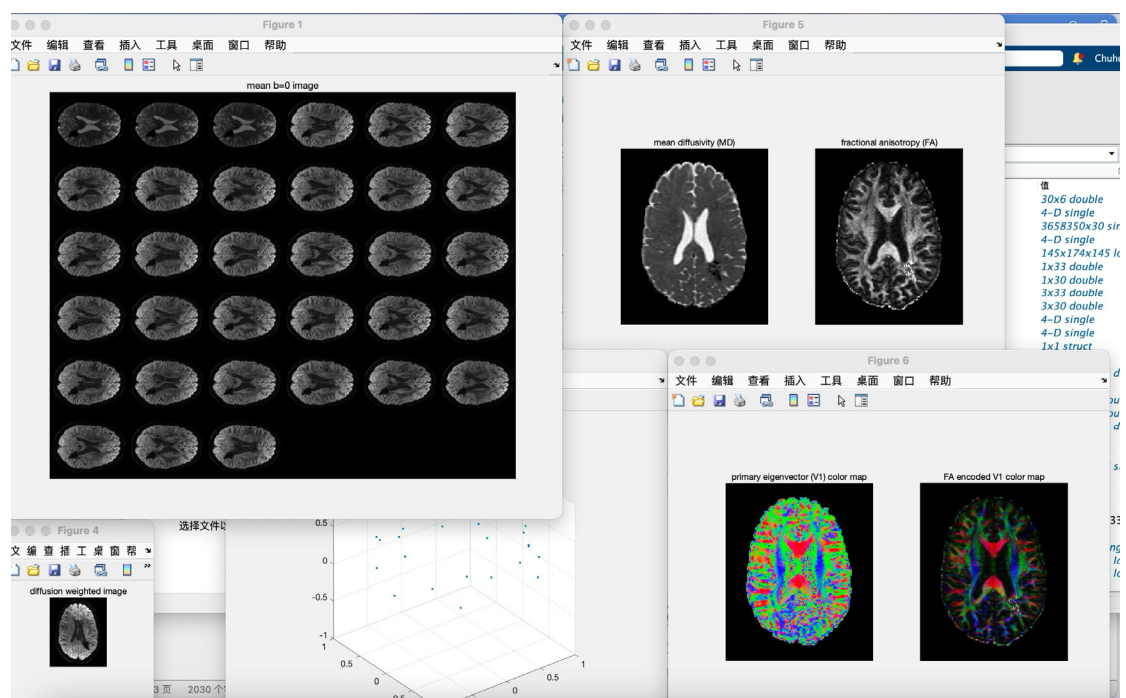
宋森：结合脑科学、认知科学和人工智能相关领域知识，构建全脑功能性模型，试图提出新的人工智能算法；利用影像学、光遗传学、以及脑电等定量手段，研究积极情绪与动机、美感、语义理解、思维与推理等高级认知功能的神经回路基础；将定量手段、人工智能算法及脑反馈技术等用于情绪类障碍的诊断及治疗以及提高正常人群的生活质量与幸福感。；用深度学习等人工智能算法，尤其是图神经网络技术，开发新的计算工具，分析连接组学、基因组学、及脑电、脑成像技术研究产生的大量数据。

● MRI

MRI 最初称为 NMRI (核磁共振成像)，但为了避免负关联而放弃了“核”。当置于外部磁场中时，某些原子核能够吸收和发射射频能量。在临床和研究 MRI 中，氢原子最常用于生成可检测的射频信号，该信号被靠近被检查对象的天线接收。氢原子在人类和其他生物有机体中自然丰富，尤其是在水和脂肪中。由于这个原因，大多数 MRI 扫描本质上都标出了体内水和脂肪的位置。无线电波脉冲激发核自旋能量跃迁和磁场梯度将信号定位在空间中。通过改变脉冲序列的参数，可以基于组织中氢原子的弛豫特性在组织之间产生不同的对比度。

DTI 是通过水分子的弥散运动反映大脑白质纤维素的结构和各向异性特征。各向异性弥散在人体组织中普遍存在，最典型的是脑白质神经纤维束，沿着脑白质走形的弥散相对自由，垂直走形弥散相对受限,以胼胝体压部与内囊为例：弥散梯度场方向为左右方向，由于内囊后支白质纤维走形方向为向下，因此水分子弥散走向垂直于白质纤维走形，因此弥散受限，信号衰减的较少，信号显示较高；胼胝体压部白质纤维走形为左右方向，因此水分子弥散相对自由，因此被衰减较大，信号较低。弥散梯度场方向为前后方向，内囊后支的白质纤维依然弥散受限，信号较高；胼胝体压部也为弥散受限，弥散受限，信号较高。弥散梯度场方向为上下方向：内囊后支弥散相对自由，弥散自由，信号较低；胼胝体压部弥散受限，信号较高。

验证性实验是用 3T、5T 磁场采集我们学生的脑核磁共振成像，并利用 MATLAB 进行 DTI/fMRI 的数据分析。运行结果：



TIC2C 医学影像方向介绍

为先 21 马若馨 王汝佳

一、基础知识部分

本次 tic 课主要介绍了四种成像方式，以下是初步介绍以及优缺点比较：

1、核磁共振 (NMR) 是一种利用原子核自旋的量子特性进行成像的医学检查技术。应用非常广泛，包括检测肿瘤、神经科学研究、心血管疾病等。

2、CT 扫描 是一种通过进行多次 X 射线扫描来产生三维影像的医学成像技术。CT 扫描可以用于检测肿瘤、骨折、血管疾病等多种疾病。

3、PET 扫描 是一种利用放射性核素进行成像的医学检查技术。PET 扫描主要用于检测肿瘤和心血管疾病等。

4、超声成像 是一种利用高频声波进行成像的医学检查技术。超声成像可以用于检测胎儿、器官疾病等。

核磁共振的优点在于可以提供非常详细的影像，对软组织和神经系统的检测效果尤为明显。但其缺点是设备非常昂贵，而且需要非常长的扫描时间。

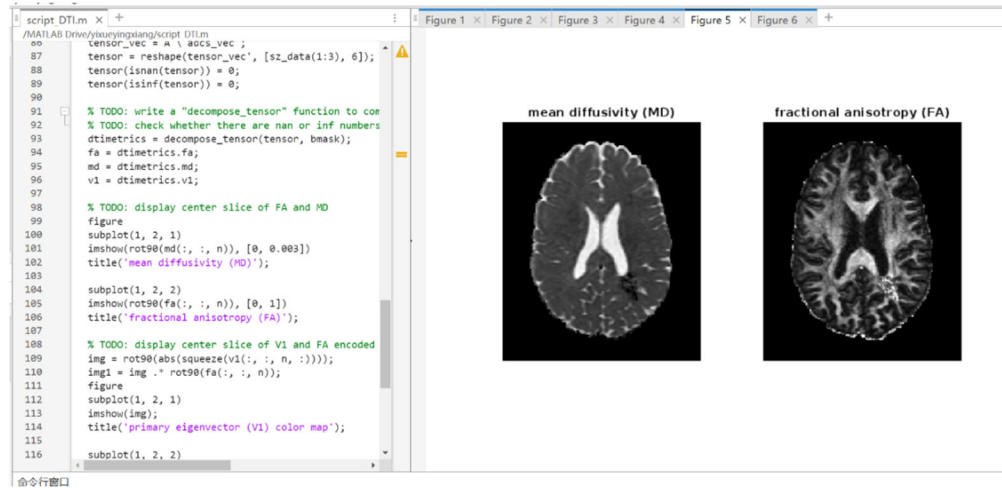
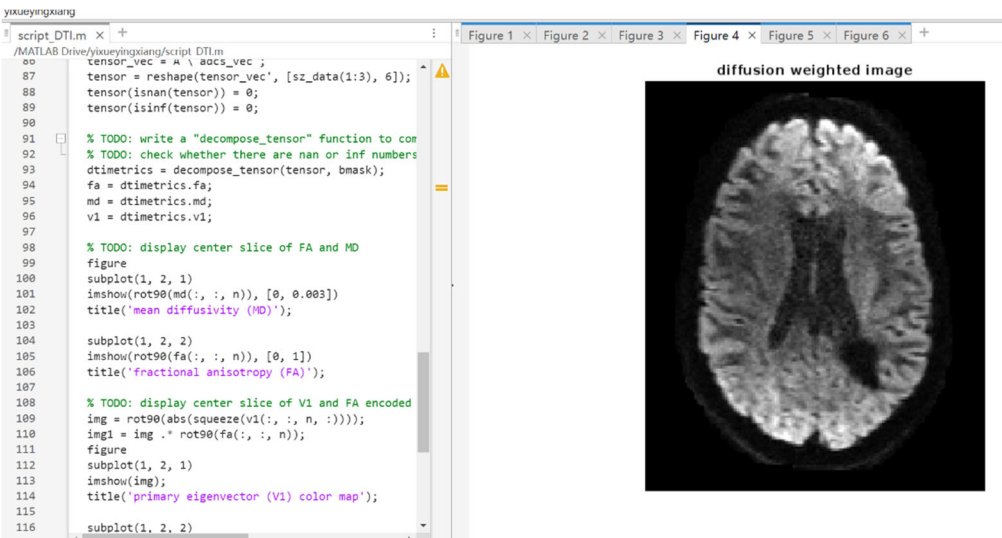
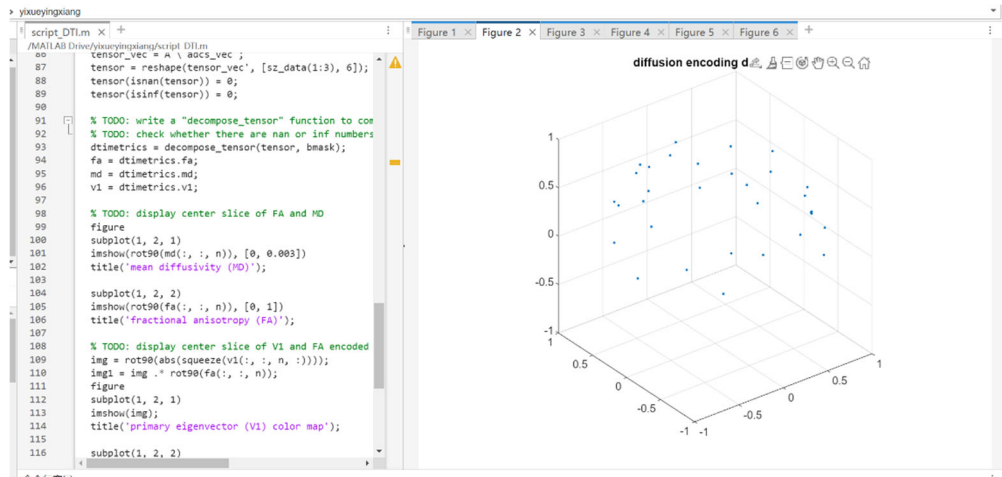
CT 扫描的优点在于可以提供非常清晰的骨骼影像，对于骨折等疾病的检测效果尤为明显。但其缺点是对辐射的暴露量较大。

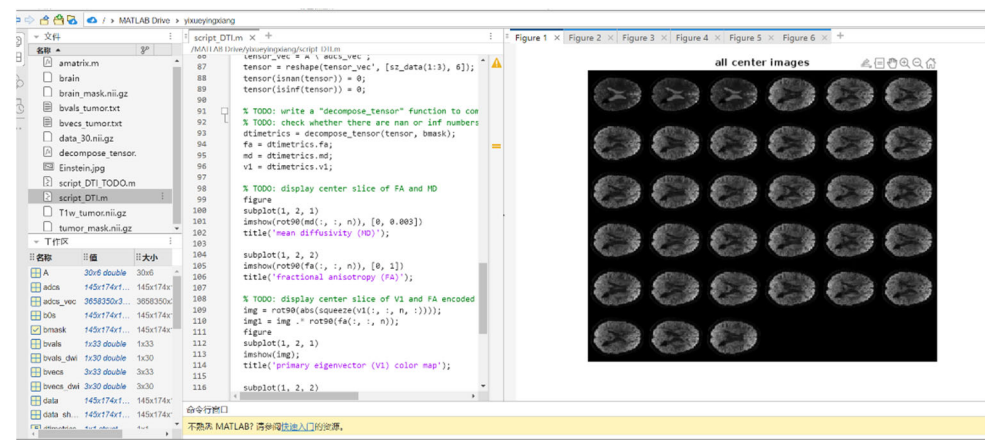
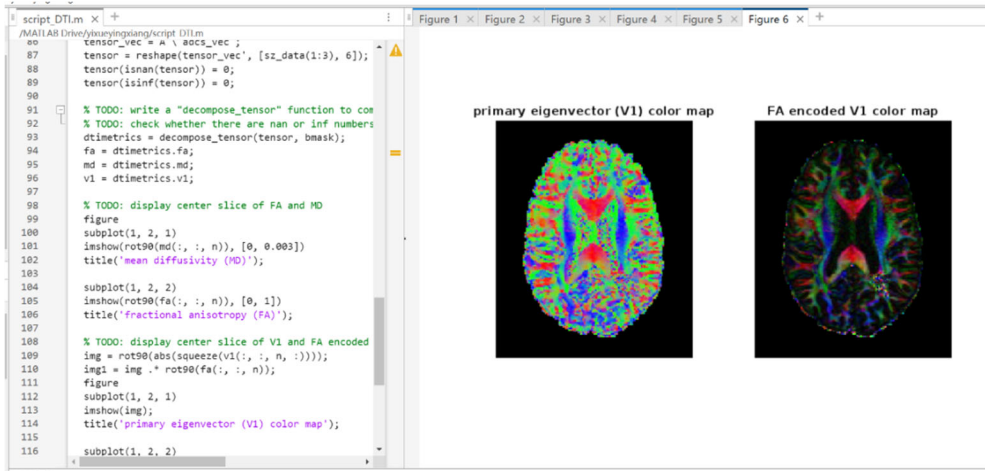
PET 扫描的优点在于可以提供非常敏感的肿瘤检测，同时还可以提供有关肿瘤活动水平的信息。但其缺点在于昂贵，同时需要使用放射性物质。

超声成像的优点在于无辐射，价格相对较为低廉，同时可以提供实时成像。但其缺点在于对于某些组织和器官的检测效果不如其他成像技术。

二、图像处理操作

在医学影像课程上，我们将 MR 采集的数据通过 matlab 处理后得到了医生可以查看的图像，既显示了清晰的脑部结构，又体现出神经的走向与关联，以下是部分代码和处理的图像。





TIC2D 智能感知与控制方向介绍

为先 21 许延圣 包凌嘉 孙畅

本学期，我们三人选修了TIC2B朱纪洪老师所负责的课题组。该课题组围绕前沿科学探索和重大需求，以导航制导与控制技术、人工智能理论为基础，解决重要智能无人系统应用中的关键科学问题与“卡脖子”技术难题。研究中涉及到自动化、计算机以及精密仪器等专业知识。下图为课题组在智能无人系统中所涉及的方向：



课程介绍：

课程中所学习到的理论知识有：

1. 从三角函数到信号调制
2. 从坐标变换到惯性导航原理
3. 从特征向量到系统可控性、可观性
4. 从卷积、特征根到系统响应
5. 从线性方程的解到飞行器参数辨识

学了理论知识后，实践也是必不可少的。课程中也设计了不少实验供我们应用学到的理论。具体实验有：

1. 示波器的应用
2. 无人机控制开发体验
3. 无人机航姿解算实验

4. 无人车速度观测实验

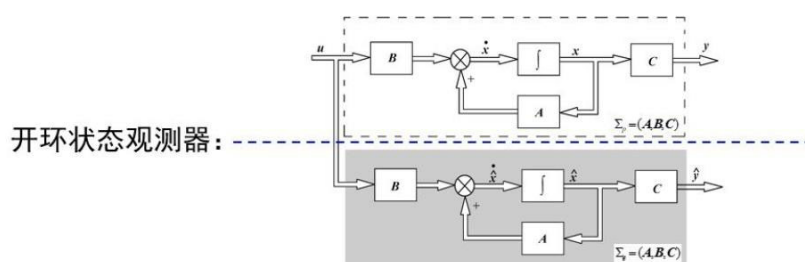
5. 系统响应与辨识实验

接下来我们将以《小车速度估计实验》以及《无人机操控体验及航姿解算》为例子，大致介绍课程中的部分内容。

实验一：小车速度估计

实验理论：

$$\text{连续系统状态空间模型: } \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{cases}$$



$$\text{开环观测器的状态方程为: } \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = \hat{\mathbf{x}}_0 \quad t \geq 0$$

$$\text{原被控系统 } \Sigma_p = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}): \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

$$\text{状态观测器 } \Sigma_e = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}): \quad \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}$$

$$\text{原系统和状态观测器之间状态的误差: } \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$$

$$\text{有: } \dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) \text{ 或 } \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}, \text{ 即: } \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} = e^{\mathbf{A}t}(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)$$

\mathbf{x}_0 ——原系统初始状态

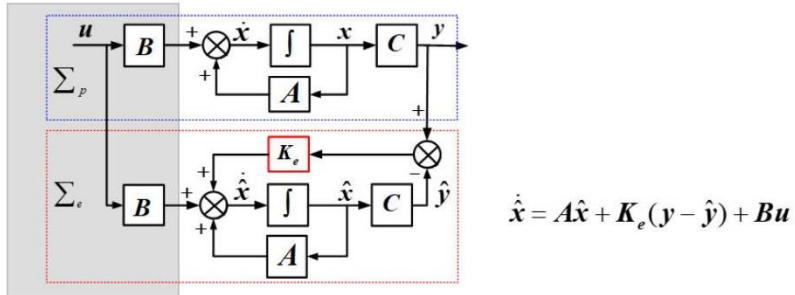
$\hat{\mathbf{x}}_0$ ——开环状态观测器的初始状态



如何消除观测误差：构造误差渐近稳定的观测器

构造渐近观测器的思路： $y - \hat{y} = Cx - C\hat{x} = C(x - \hat{x})$

将输出误差 $(y - \hat{y})$ 反馈至观测器，在短时间内使 $(x - \hat{x})$ 趋近于零，从而达到准确估计状态的目的。



实验步骤:

一、基于Matlab Simulink 的仿真

基于图1 所示原理，在Matlab R2023b Simulink中搭建图2所示模型:

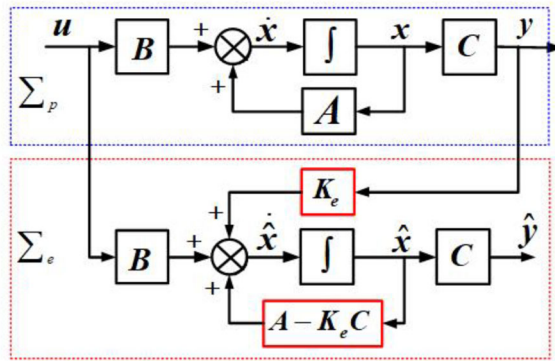


图1 状态观测器原理

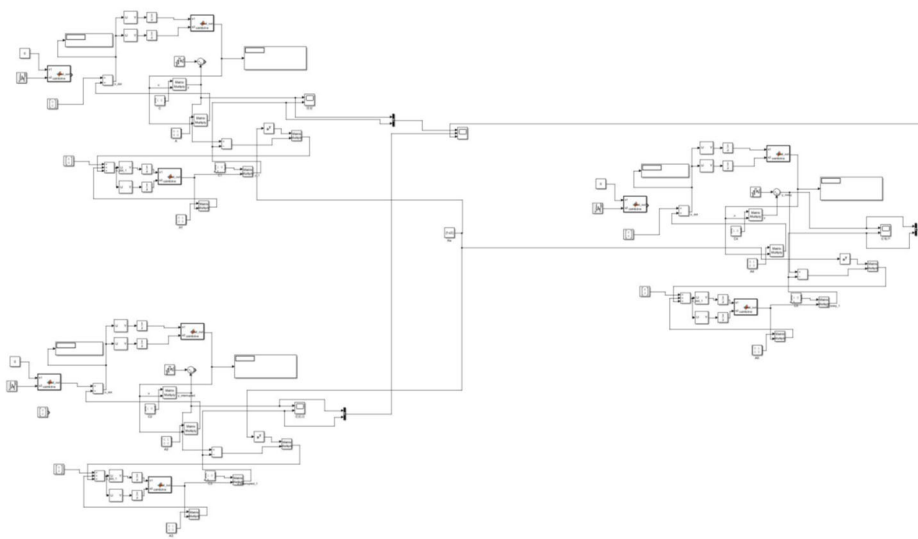


图2 Simulink模型概览

图2左上角、左下角以及右侧的区域分别对应理想状态、受零均值随机扰动的状态以及测量信号含噪声的状态。调整走线后，可以在一个示波器窗口内同时观察三种状态的图线。

在s积分初值为2，v积分初值为1， $(\lambda_1, \lambda_2)=(-2, -2)$ 的条件下，仿真结果如下图所示，其中y和y_1分别代表测量值和观测器输出值：

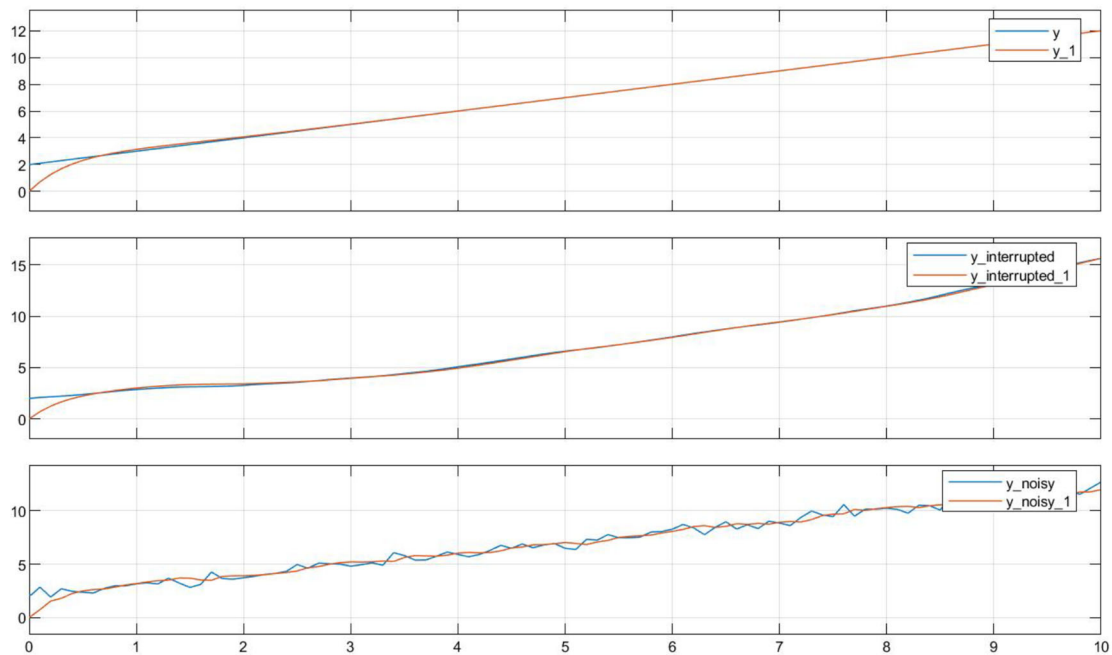


图3 仿真结果1， $(\lambda_1, \lambda_2)=(-2, -2)$

二、不同特征值的对比

取 $(\lambda_1, \lambda_2)=(-10, -10)$ ，结果如下：

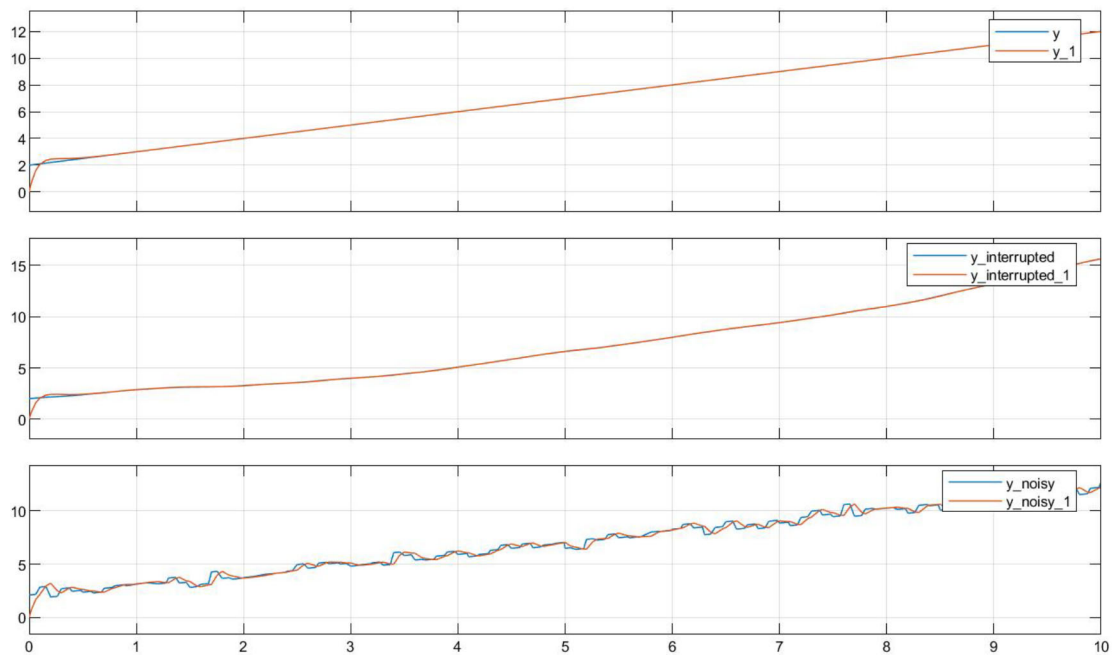


图4 仿真结果2, $(\lambda_1, \lambda_2)=(-10, -10)$

取 $(\lambda_1, \lambda_2)=(-100, -100)$, 结果如下:

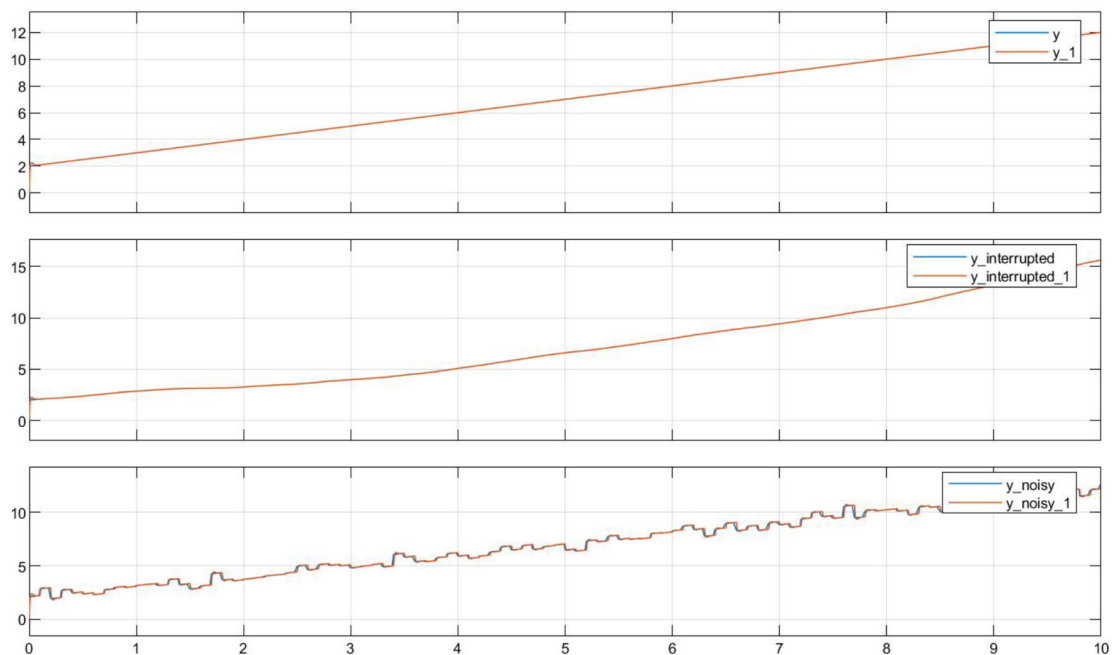


图5 仿真结果3, $(\lambda_1, \lambda_2)=(-100, -100)$

实验总结:

在特征值都是负实数时，随着特征值的绝对值增大，观测器的输出越发接近测量值。然而这未必是一件好事，因为在测量信息含有噪声的情况下，若特

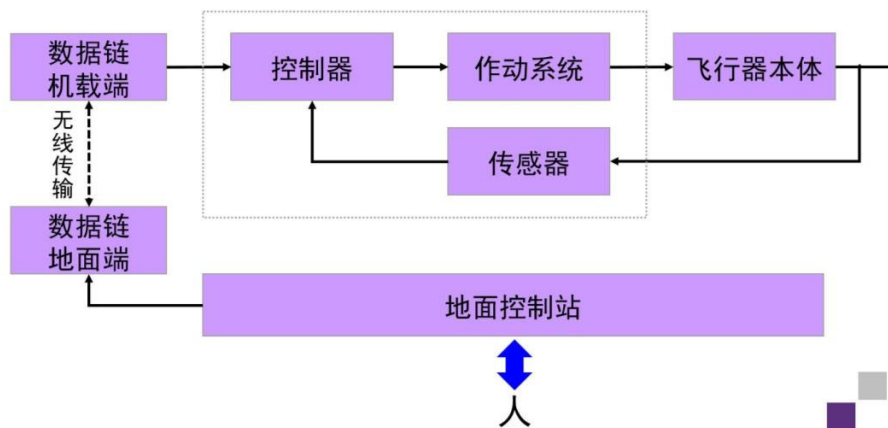
征值过大，输出曲线将与测量数据高度重合，从而使得输出曲线含有大量噪声成分，反而不利于后续的分析。因此，设定特征值时不宜过大。

实验二：无人机操控体验及航姿解算

实验理论：

常见的飞行器包含多轴无人机，固定翼飞机，直升机，纵列式、横列式、共轴式、交叉旋翼式、倾转旋翼式、推力矢量式、尾座式飞机等等。

无人机操控系统主要包括：地面控制站、控制器、作动系统、飞行器本体、传感器等。数据链在机载端与地面端之间进行无线传输，其中地面端由地面控制站发出，而机载端数据则用于控制器对作动系统从而对飞行器本体的控制，飞行器本体在运动过程中，传感器测得数据会反馈给控制器从而进一步控制飞行器。



在本次实验中，作动系统使用了能够快速开发无人机飞控的Pixhack，飞行器本体为四旋翼无人机，地面控制站由QGroundControl 软件以及TARANIS 遥控器组成，传感器包括GNSS接收模块、激光雷达、高度计、陀螺仪、加速度计、磁力计、气压计等。

无人机的航姿（航行姿态）可由两种方式表示。第一种为欧拉角，即偏航角、俯仰角、倾转角；第二种为四元数，欧拉角与四元数表示之间可互相转化。转换关系为：

$$\begin{aligned}
q_0 &= \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\
q_1 &= \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\
q_2 &= \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\
q_3 &= \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2}
\end{aligned}$$

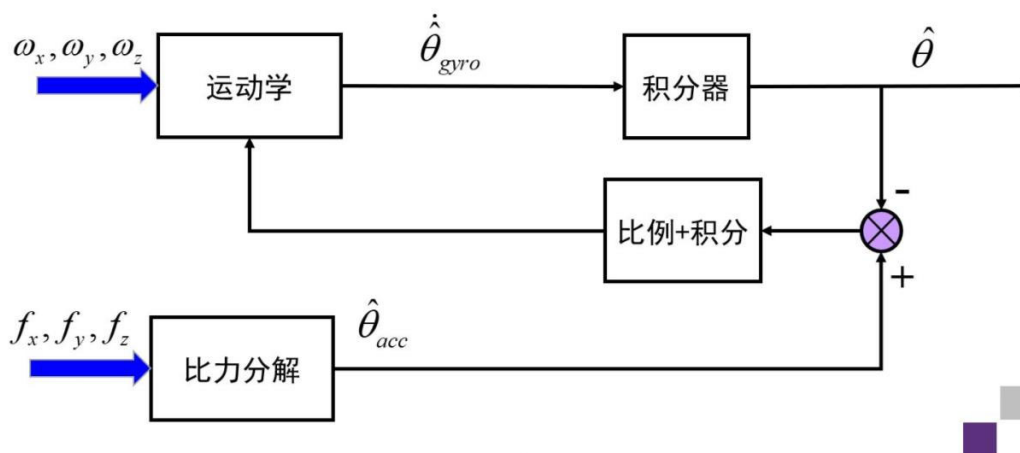
航姿解算的原理为：通过IMU 传感器（陀螺仪、加速度计、磁力计、气压计）采集角速度、比例加速度、磁场强度、气压等数据，并交由程序处理，解算出无人机的航向、姿态、气压高度。程序主要分为两步，首先是初始化阶段，根据加速度计与磁力计的测量信息解算初始航姿；之后以固定频率（本次实验中时间间隔固定为 T_s ）采集陀螺仪、气压计信息，对航姿、气压高度进行解算更新。

由于欧拉角对航姿的解释更为直观，而四元数更方便运算，更新的过程为在上一时刻四元数的基础上依次计算四元数的导数及增量，并与上一时刻四元数相加，再用四元数反算出欧拉角。

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{更新周期为 } T_s} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
C_b^n &= \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\theta\cos\psi\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \sin\theta\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\phi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\theta\sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\theta\sin\psi\cos\phi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \\
C_b^n &= \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

代码运行成功后，针对陀螺仪测量误差因积分而累计，即陀螺零偏问题，老师补充了互补滤波方法，以通过加速度计补偿陀螺零偏。



以上便是对课程中所进行的实验的介绍，相信同学们在看完上述例子后，对课程中所学习到的内容有了更直观的认识。

以下是我们选修这门课后的感想及课程评价：

首先，在这门TIC课程中，实际授课、与同学们进行直接交流的是袁夏明老师。（这里需要说明的一点是，同学在选修TIC2时选择的实际是“课题组”，开课信息中的课程负责人并非一定是授课老师，课程过程中的授课老师也可能不止一个）。袁老师是朱纪洪老师组内的一名助理研究员，研究方向为智能无人系统。课堂上，袁老师授课非常耐心，若有不明白的知识点可以随时举手提问。在课外时间，也可以随时通过微信向老师提问，我们的问题都会得到老师的详细解答。此外，袁老师非常鼓励我们多进行课外阅读来获取知识（例如，这个学期他向我们推荐并送给了我们《最优控制》和《自动控制系统》这两本书）。

从课程内容本身来看，我们对这个方向的TIC课程的最直接感受便是其十分注重基础，尤其是线性代数方面的知识。由于距离我们选修线性代数已经过去很长一段时间，相关知识在我们脑海里逐渐模糊，导致上课进度比老师预想得延缓不少（这里建议有兴趣选修该方向TIC课程的同学先复习一下线性代数的相关知识，否则在老师授课时有可能一头雾水）。在课程中，同学们能够了解到大一上学期所学习到的线性代数知识在控制系统中的实际应用，也能很直观的感受线性代数在解决工程问题中是一个多么高效的工具。

另外，其他TIC分支可能以体验为主，但朱纪洪老师组的TIC课程更像是“专业课”，这导致这个方向的学习相对来说比较“干”。但是，完成课程后你会发现，所学习到的知识点很多，收获也很大（除了上文提到的建议外，还建议大家

在课程开始之前先学习C++和Matlab 编程，否者会花费较长时间来完成课后作业）。

除此之外，朱老师的课题组学术氛围极好，如果有同学对该课题组感兴趣并且想要进一步了解课题组的研究方向，可以随时和组内任何老师进行一对一或多对一的学术交流（这里强烈建议同学们积极与朱老师预约时间进行交流，朱老师人特别特别好，所以同学们不用害怕，勇敢冲！相信大家不仅能够从交谈过程中学习到非常多有用的知识，还能够学习到朱老师身上的科研精神与处世哲学，这将对日后的科研道路影响深远）。

另外，还推荐另一门朱老师专为新生开的通识课——《智能无人系统》，课程所涉及到的知识点与TIC中相似，但是专业性没那么强，对新生十分友好。

总而言之，对控制感兴趣的同学可以在TIC2时选择朱纪洪老师这个方向。若同学们学有余力，还能与老师沟通，到实验室里操控各种各样的机械装置（机器人，四轮车，无人机样样俱全，只要你开口，老师都能满足你的要求）。

真诚希望这份报告对各位同学有所帮助。

TIC2D 先进计算与智能芯片方向介绍

为先 21 周林林

数字电路课程内容：

1. 安全培训
2. 电路与集成电路基础
3. 电子设备简介与实验
4. 集成电路 EDA 技术简介
5. 数字电路设计简介
6. Verilog 简介
7. HDL 与 EDA
8. 计算机体系结构
9. 高速串行接口
10. 信号处理与集成电路设计

电路与集成电路基础介绍了一些电路元器件，比如电容、电阻、电感和面包板。电子设备简介与实验介绍了万用表、直流电源、示波器、波形发生器等设备的使用，以及对基尔霍夫定律进行了简单验证，和对二极管的导通电压进行了测量。EDA 技术简介（电子设计自动化软件），使用 EDA 软件 Virtuoso，绘制了一个简单的振荡器的原理图并进行了模拟仿真。

数字电路简介主要介绍了数字与模拟的区别，其中数字信号主要以 0, 1（高低电平）为主，相较模拟信号，具有高精度与高可靠性数字系统的精度由位数决定，没有理论上限由于存在冗余，数字系统中的信息不容易发生丢失，也可以被纠错或加密，灵活性与通用性，数字系统有完善的计算体系支撑，可以解决任意可计算问题，且易于编程，可大规模集成组成数字系统的基本单元非常简单，容易实现大规模设计和集成，同时进行了真值表和逻辑表达式的推导计算。Verilog 是一种硬件编程语言，相当于对逻辑表达式进行编程，导出与其功能相对应的数字电路。

HDL 与 EDA 介绍了各种门电路的实现以及其 Verilog 代码实现，如与门，非门，与非门，组合逻辑和时序逻辑的实现。

计算机体系结构介绍了计算机的底层结构以及对计算机组成原理和各部分对应的功能进行了简单介绍。高速串行接口介绍了如何进行高速的串口通信的同时,怎么处理接收到的信号,保证信息不失真并用 Luanch-ADE L 进行仿真模拟,并观察眼图。

数字信号处理介绍了对一些数字信号的处理方法,如图像增强,以及信号的转化收集,和硬件系统实现神经网络,还有利用 matlab 写一个一维滤波器,并对滤波器进行仿真模拟。

TIC2D新型存储器与智能应用方向介绍

为先21 刘西尧

一、主讲老师与研究方向

南天翔老师：磁随机存储器（MRAM）

唐建石老师：阻变存储器（RRAM）

谢丹老师：铁电存储器（FeRAM）

二、研究内容

在TIC2D薄膜方向课程中，三位老师研究方向的共同点是新型存储器材料研究，包括材料的制备于器件的测试等流程。三位老师研究的不同之处在于研究材料的物理化学性质不同，存储器的工作原理、性能各不相同。其中，磁随机存储器利用材料的磁学性质实现存储功能，材料在外界磁场变化情况下表现出不同的磁学性质，进而可以实现信息的写入或读出，同理可基于材料的磁学性质对器件进行表征，如使用磁光克尔显微镜等。阻变存储器的实现原理在于材料随外加电流的改变具有高电阻与低电阻两种状态，基于阻态的不同可实现信息的写入与读出。铁电存储器基于铁电材料的自发式极化特性，其自发极化特性会随外界电场改变而变化。根据材料的不同极化状态实现存储。三种存储器的共同特点是具有较好的**非易失性**，即存储器中的信息能够得到较为完整的保持。

存储器的存储性能很大程度上取决于材料的选择与加工工艺，本学期课程中我们分别通过磁控溅射（PVD）、原子层沉积（ALD）等方式完成对存储器薄膜材料的制备，运用扫描隧道显微镜（STM）、椭圆偏振光谱仪（ellipsometry）、原子力显微镜（AFM）等仪器完成对器件的检测，最终探究题目也是基于材料制备过程中工艺的改变来研究其对材料性能的影响。本学期三个方向的课程均以较为完整的流程展开，即：材料制备—器件测试—性能分析，在学习过程中我们对研究的基本流程有较为全面的了解，在学习过程中有完整的体验。

本学期薄膜材料TIC2D方向的课程让同学们多了解几个方向的同时，也兼顾了每个方向实验的完整性，每个独立的小方向中同学们都会经历“材料制备—器件测试—分析总结”这样的实验流程。在了解三个不同方向的主要研究内容以及实验流程后，同学们可根据兴趣选择最终呈现的方向与题目。

三、个人收获

在我所经历过的TIC课程以及过往科研经历中，TIC2D薄膜材料与表征方向课程是体验感最强、收获最多的一门课，我的感悟与收获主要体现在以下几个方面：

1、理论与实践并行

与之前的科研经历和TIC不同的是，该方向的TIC课程有较为完善的理论体系。理论讲解部分有十分清晰的知识逻辑，哪怕没有半导体物理、固体物理等相关专业背景也能够很好地了解相关材料性能，例如在研究“铁电存储器制备与相关性质”的课程中，李丹老师沿着一般晶体——压电晶体——热释电晶体——铁电晶体的顺序向我们讲解了铁电存储器的核心：铁电晶体的多种性质，如自发极化等，讲解通俗易懂，易于理解。南天翔老师在磁随机存储器的相关介绍中向我们介绍了集成电路存储器发展史以及不同存储器，如SRAM、DRAM、RRAM、FeRAM等存储器的性能对比，让我们对存储器发展史有更为全面的认知，也能够在今后的讲解过程中理解相关知识。

除理论部分外，该方向的课程同样注重实践操作——将知识落于实地。与TIC2D其他方向不同的是，存储器的制备属于微纳加工领域的工作，制备与测试过程中的“体验感”可能不像数字/模拟电路实验方向那样强，但存储器材料的制备十分注重实验精度以及性能分析，有助于培养我们精益求精、实事求是的科研素养。

2、兴趣与挑战并存

在进行这个方向的课程选择前，我对存储器的了解近乎空白，也十分好奇不同的存储器究竟是如何实现“存储”功能？课程的三位老师向我们讲解了存储器的工作原理与相关性质后，我也明白了这三种存储器的主要工作原理，也感受到存储器的奇妙之处。尽管没有学过《固体物理》《半导体物理》等课程，在材料基础知识方面存在着较多的缺失，在理解过程中难免会遇到很多困难，但要敢于克服，一切困难终将迎刃而解，最终也将是收获满满！