

参赛学生姓名：李思衡

中学：上海外国语大学附属外国语学校

省份：上海

国家/地区：中国大陆

指导老师姓名：张一凡

指导老师单位：上海外国语大学附属外国语学校

论文题目：声控柔爪：面向危险化学实验的软体机械臂远程操作平台设计

声控柔爪：面向危险化学实验的软体机械臂远程操作平台设计

李思衡

声控柔爪：面向危险化学实验的软体机械臂远程操作

平台设计

【摘要】针对化学实验场景中人工操作试管易引发交叉污染及玻璃器皿破损的痛点,目前市面上的工业机械臂成本高昂,而传统刚性夹爪容错率低、易夹碎试管。受柔性机器人顺应性抓取技术的启发,本课题旨在设计一种低成本、高容错且操作安全的声控柔爪化学实验机械臂系统。系统以 Arduino UNO 为主控,采用双电源隔离供电,集成 WonderEcho 离线语音模块实现非接触交互;末端采用 TPU 3D 打印柔性夹爪,创新性结合防滑贴逆向优化设计以解决打滑与遮挡视线问题;软件层开发了基于解析法与加权最小范数的轻量化逆运动学算法,实现纯竖直插拔与姿态平滑控制。通过语音识别、定位精度、抓取容差及综合任务等多维度实验验证,系统指令识别率达 100%,定位偏差 $\leq 1.6\text{mm}$,在 $\pm 5\text{mm}$ 位置容差内抓取成功率达 100%,成功实现了化学试管的安全、稳定、自动化转移。

【关键词】化学实验机械臂; 柔性夹爪; 离线语音控制; 轻量化逆运动学

目录

1.	绪论引言	1
1.1.	问题的由来	1
1.2.	解决方案	2
1.3.	课题意义与创新点	2
1.4.	课题规划	3
2.	背景与需求调研	5
2.1.	发展现状	5
2.1.1.	理论研究/相关政策	5
2.1.2.	现有课题或产品研究	6
2.2.	调查访谈	12
2.2.1.	线上调查	12
2.2.2.	线下访谈	17
2.3.	需求调研总结	18
3.	解决方案	20
3.1.	概念图	20
3.1.1.	灵感来源	20
3.1.2.	概念结构图	21
3.2.	流程图	23
3.2.1.	逻辑流程图与解释	23
3.3.	硬件框图	24
3.3.1.	硬件框图与解释	24
4.	原型设计	25
4.1.	设计过程	25
4.1.1.	开发环境	25
4.1.2.	机械结构	26
4.2.	项目原型	26
4.2.1.	开发过程	26
4.2.2.	代码实现细节	28
4.2.3.	项目原型	32
5.	实验设计与测试分析	33
5.1.	实验设计	33
5.2.	功能性测试	33
5.2.1.	实验一：WonderEcho 语音模块识别测试	33
5.3.	精准度测试	35
5.3.1.	实验二：柔性夹爪容错测定实验	35

5.3.2. 实验三：姿态解算精度验证实验	37
5.4. 实际使用测试.....	39
5.4.1. 实验四：全流程响应延迟测试	39
5.4.2. 实验五：模拟化学实验场景测试	41
5.4.3. 使用访谈	43
5.5. 结论概述.....	43
6. 总结	45
6.1. 课题成果.....	45
6.2. 未来展望	45
7. 收获与成长	47
8. 参考文献	48
9. 附录	49
9.1. 相关代码.....	49
9.2. 原始数据（手稿等）	50
9.3. 实验过程性记录（其他更多的照片）.....	51
10. 致谢	53

1. 绪论引言

1.1. 问题的由来

在化学课上，老师经常播放一些实验操作失误导致事故的视频。他指着屏幕里炸裂的烧瓶，提醒我们：“化学实验差之毫厘，失之千里，如果不规范操作，这些玻璃器皿就会变成伤人的利器。”我观察到，尽管同学们在操作时已经屏息凝神、小心翼翼，但在抓取湿滑的冷凝管、倾倒强腐蚀性液体或处理剧烈放热反应时，人手的自然震颤和对危险的生理本能恐惧，依然是安全隐患中最大的“变数”。



图 1 事故后的实验室

事故类型	事故起数			死亡人数		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
总数	122	127	115	150	143	159
较大事故	9	7	8	35	24	29
重大事故	0	0	3	0	0	33
总数同比 变化率	-15.3%	+4.1%	-9.4%	-15.7%	-4.7%	+11.2%

表 1 “十四五”以来化工事故情况

经过调查，我发现化学实验仪器多为光滑、易碎且不规则的玻璃制品，现有的刚性夹持工具（如铁夹、镊子）缺乏力觉反馈与形状自适应能力，极易导致受力不均引发破碎；同时，人工操作使得实验员必须近距离暴露在潜在的腐蚀、爆炸或有毒气体威胁下。

由此，我想研发一种具备语音控制能力的软体机械臂。利用机械臂代替人手操作，实验员无需进入危险的实验室，只需在外面通过语音远程发布指令。我希望利用这项技术，将实验室安全从依靠“操作规范”提升到依靠“本质安全”，消除人手操作的尴尬与危险，让化学探索不再提心吊胆。

1.2. 解决方案

针对化学实验中重复操作耗时、易碎器皿抓取风险高及接触危险试剂压力大等痛点，本课题提出一种基于“语音指令+实时姿态解算+柔性末端”的低成本解决方案。系统以 Arduino UNO 为主控核心，搭载多自由度刚性机械臂与自制两指硅胶柔性夹爪，并集成离线语音识别模块。该方案巧妙利用 TPU 材料的物理形变特性补偿机械定位误差，又利用刚性臂确保机械臂移动的精度。在控制策略上，摒弃复杂的示教再现与高算力 AI 模型，采用轻量级实时运动学解算算法，将“上移”“闭合”等基础语音指令直接解析并动态计算为各关节舵机角度，实现平滑精准的姿态控制。

1.3. 课题意义与创新点

基于化学实验中重复操作繁琐、易碎器皿抓取风险高及接触危险试剂压力大等普遍痛点，设计一款低成本语音控制柔性机械臂实验助手非常有必要。理由如下：

- **实用性：**直击痛点，提升实验安全与效率（受众广、需求真）

据问卷调研显示，73.77%的用户认为“重复动作”最累，63.93%对接触危险试剂感到压力，57.38%担心打翻易碎器皿。本方案通过语音交互实现“解放双手”，避免手部直接接触腐蚀性试剂；利用硅胶柔性夹爪的包裹式抓取特性，有效补偿机械定位误差，防止试管滑落破碎。这种“非接触+柔顺抓取”的模式，能显著降低实验事故率，特别适用于中学科普教育及高校基础化学实验场景，具有广泛的普及价值。

- **可行性：**低成本模块化设计，易于推广落地（成本低、门槛低）

区别于昂贵的工业级刚性机械臂或高算力 AI 机器人，本方案采用“Arduino UNO+离线语音识别模块+舵机”的低成本硬件架构，整机成本可控。软件上摒弃复杂的深度学习模型，采用实时姿态解算算法，对主控芯片算力要求极低。这种“轻量化”设计不仅降低了制作与维护门槛，还便于在资源有限的学校实验室进

行批量部署与二次开发，符合“普惠型智能实验设备”的研发导向。

● **科学性：**引入“物理智能”容错机制，验证软硬协同原理（方法新、验证严）

本课题创新性地提出“刚性运动学解算+柔性末端物理容错”的控制策略。理论上，刚性机械臂存在累积误差，而传统视觉闭环成本高；本方案利用 TPU 材料的非线性形变特性，在机械臂姿态计算存在微小偏差时，仍能通过夹爪的物理包裹实现稳定抓取。我们将通过对比实验（刚性 vs 柔性夹爪在不同直径试管上的抓取成功率），定量验证材料柔顺性对提升系统鲁棒性的科学贡献，为低成本机器人的精密操作提供理论依据。

1.4. 课题规划

阶段	时间	任务
第一阶段： 准备与设计	2026.05.01 - 2026.05.10	1. 需求细化： 整理问卷数据，确定核心功能（语音控制、姿态解算、数据记录）。 2. 选型采购： 选购机械臂套件（含柔性夹爪）、Arduino UNO 主控、离线语音识别模块。 3. 方案定型： 研究套件提供的 API 接口或通信协议，推导机械臂姿态解算的数学模型。
第二阶段： 硬件集成与 基础调试	2026.05.11 - 2026.05.31	1. 硬件连接： 将离线语音识别模块、主控板与机械臂驱动单元进行电气连接，确保供电稳定。 2. 通信测试： 编写基础串口通信代码，验证 Arduino 能否正确发送指令控制机械臂运动及夹爪开合。 3. 坐标系标定： 测量机械臂基座到实验台关键点位（如试管架、加热台）的物理坐标，建立世界坐标系。
第三阶段： 软件开发与 核心实现	2026.06.01 - 2026.06.30	1. 姿态解算算法开发： 编写程序，实现从“目标空间坐标”到“机械臂关节角度”的实时映射计算。 2. 语音逻辑绑定： 配置关键词，建立“语音指令——动作参数——姿态解算——执行”的控制闭环。 3. 辅助功能开发： 实现操作日志的串口打印记录功能。 4. 系统联调： 整合各模块，进行“语音指令——机械臂响应”全流程测试。
第四阶段： 测试优化与 总结	2026.07.01 - 2026.07.20	1. 性能验证： 测试语音响应速度、姿态解算精度及柔性夹爪在不同偏差下的抓取成功率。 2. 对比实验： 记录并分析“刚性定位误差”与“柔

		性容错效果”的关系，验证科学假设。 3. 成果产出：整理实验数据，撰写结题论文，录制演示视频，准备答辩材料。
--	--	---

表 2 课题规划

2026 S.-T. Yau High School Science Award
 仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

2. 背景与需求调研

2.1. 发展现状

2.1.1. 理论研究/相关政策

目前，各国政府对实验室自动化和智能机器人领域的支持主要体现在：

- **中国：**《“十四五”机器人产业发展规划》明确提出要推进服务机器人在科学研究、医疗检测等领域的应用；《新一代人工智能发展规划》鼓励 AI 技术在实验自动化中的创新应用。
- **欧美国家：**欧盟“地平线 2020”计划资助了多个实验室自动化项目；美国 NSF 设立了“国家机器人计划”（NRI），支持包括实验机器人在内的智能系统研发。
- **行业标准：**ISO 10218（机器人安全要求）、ISO/TS 15066（协作机器人安全规范）等国际标准为实验室机器人的安全应用提供了指导。

专栏 4 “机器人+”应用行动	
01 深耕行业应用	在已形成较大规模应用的领域，如汽车、电子、机械、轻工、纺织、建材、医药、公共服务、仓储物流、智能家居、教育娱乐等，着力开发和推广机器人新产品，开拓高端应用市场，深入推动智能制造、智慧生活。
02 拓展新兴应用	在初步应用和潜在需求领域，如矿山、石油、化工、农业、电力、建筑、航空、航天、船舶、铁路、核工业、港口、公共安全、应急救援、医疗康复、养老助残等，结合具体场景，开发机器人产品和解决方案，开展试点示范，拓展应用空间。
03 做强特色应用	在特定细分场景、环节及领域，如卫浴、陶瓷、光伏、冶炼、铸造、钣金、五金、家具等细分领域，喷釉、修胚、抛光、打磨、焊接、喷涂、搬运、码垛等关键环节，形成专业化、定制化解决方案并复制推广，打造特色服务品牌，形成竞争新优势。

图 2 《“十四五”机器人产业发展规划》中的“机器人+”应用行动
现有政策和技术研究取得了一定成效：

- **积极方面：**推动了实验室自动化设备的普及，提高了实验效率和安全性；软体机器人技术在易碎物品抓取方面展现出明显优势。

- **不足之处：**现有解决方案多侧重于单一技术方向（如仅关注机械结构或仅关注控制算法），缺乏将语音交互、柔性抓取与化学实验安全控制有机结合的系统性研究；商业化产品成本高昂，难以在普通学校实验室推广。

2.1.2. 现有课题或产品研究

文献：

我通过文献资料的查阅，发现目前已经存在部分关于语音控制软体机械臂进行化学实验的相关研究了。

在驱动方式方面，杨妍等人在《软体机械臂的驱动方式、建模与控制研究进展》中，系统研究了三种主流的软体机械臂驱动方式：绳索驱动（Tendon 驱动）、形状记忆合金驱动（SMA 驱动）以及气动驱动（Pneumatic 驱动），并分别探讨了不同驱动方式下的建模方法和控制策略。

在化学实验应用方面，Liverpool 大学的研究团队在《A soft cable loop based gripper for robotic automation of chemistry》中，提出了一种基于电缆环的自适应抓取机制（Cable Loop Gripper, CLG），专门用于化学实验室中不同尺寸试管的抓取操作。该软体抓取器利用电缆的固有柔顺性完全包裹目标物体，在 1000 次抓取测试中失败率仅为 0.8%，展现了软体机械臂末端执行器在化学实验自动化中的独特优势。

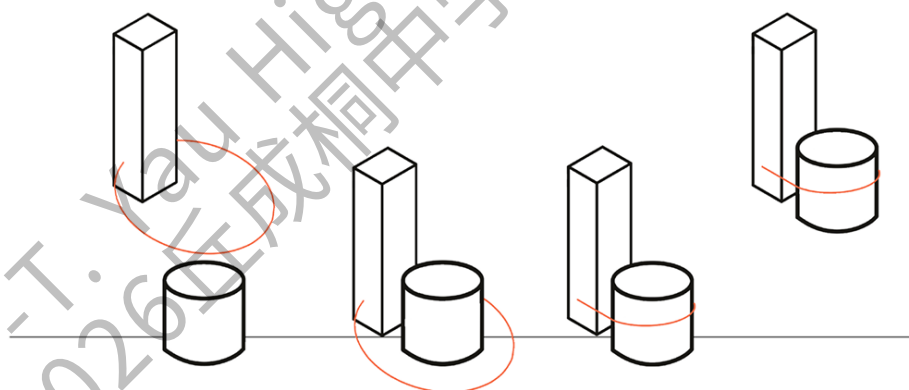


Figure 1. Schematics of the basic action sequence to complete a grasping task: (1) cable loop diameter is set to be larger than the diameter of the object to be grasped; (2) CLG is lowered; (3) cable loop is tightened around the object; (4) CLG is lifted.

图 3 《A soft cable loop based gripper for robotic automation of chemistry》中的示意图

在语音控制领域，Yengantiwar 等《Voice Controlled Robotic Arm》中提出了一种基于自然语言处理（NLP）和机器学习技术的智能化语音控制机械臂系统。他们还指出，在科学研究和实验室环境中，语音控制的机械臂可以协助样品处理、设备操作等任务，特别是在无菌操作或危险环境下实现“免接触”控制具有重要价值。

IV. FLOWCHART

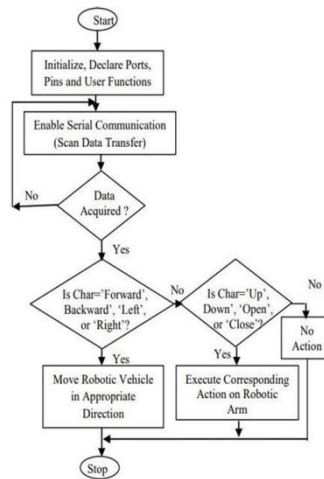
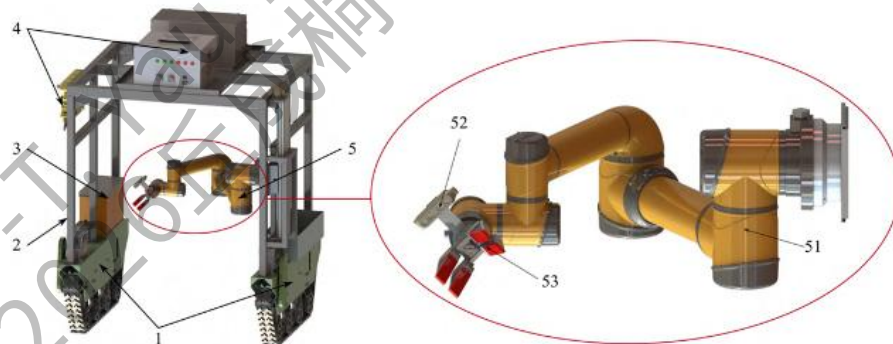


图 4 《Voice Controlled Robotic Arm》中的流程图

在柔性夹爪领域，张豹林等人在《烟叶采摘柔性夹爪夹持特性分析与参数优化》中，针对易损物体的抓取难题，设计了一种基于鳍条效应的柔性夹爪。该夹爪采用 TPU（热塑性聚氨酯）作为骨架材料以提供弹性变形能力，并结合表面高摩擦材质提升抓取稳定性。研究团队利用有限元法对夹爪在不同夹持力下的包络性进行了仿真分析，并通过局部尺寸优化（如减薄特定区域增大变形、加厚底部提高支撑刚度），有效避免了夹持时的顶部碰撞干涉，使接触面积最大增加了 104.8%。该研究充分验证了 TPU 柔性材料在提升夹爪包络性和抓取稳定性方面的优势，为本课题中 TPU 柔性夹爪结合防滑贴的设计提供了重要的理论参考与材料选型依据。



1. 行驶模块; 2. 机架模块; 3. 动力模块; 4. 控制模块;
5. 采摘模块; 51. 机械臂; 52. 视觉相机; 53. 末端执行器。

图 5 智能烟叶采摘机器人结构

在机械臂运动学控制方面，针对机械臂在复杂物理约束下的精准控制问题，马光等人在《基于神经网络的冗余度机器人运动学控制》中，探讨了利用神经网络求解速度逆运动学的方法，以应对多自由度机械臂逆解的复杂性；江沛等人在《带关节约束的非冗余机械手臂二阶逆运动学控制》中，提出了一种能够同时满

足关节限位和关节速度约束的逆运动学算法，通过加权最小二乘法保证了机械臂在轨迹跟踪过程中的物理安全性。这些研究为机械臂在受限空间内的平滑、安全运动提供了坚实的算法基础，也启发了本课题在逆运动学求解中引入严格的关节限位约束与平滑插值策略。

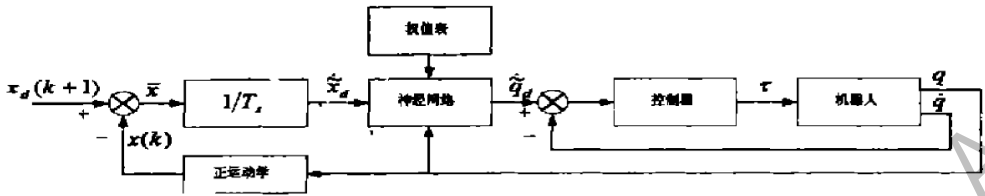


图 6 基于神经网络的机器人运动学控制

在非接触式人机交互方面，王珊在《从专利角度分析非接触式人与电梯交互的技术发展》中，系统梳理了移动终端、语音呼叫、可穿戴设备等非接触式交互技术的发展脉络。该文献指出，语音交互作为一种典型的非接触式方式，能够有效避免物理接触带来的交叉感染风险或操作不便，在医疗、实验室等对洁净度或免接触要求较高的场景中具有广阔的应用前景。这为本课题采用离线语音模块控制化学实验机械臂、实现“无菌/危险环境下的免接触操作”提供了明确的应用背景支撑。

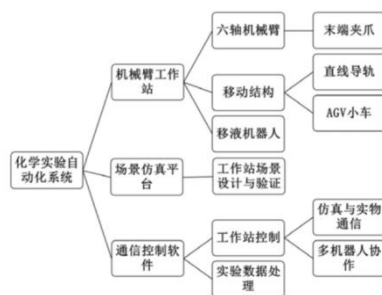
文献总结

现在对于软体机械臂已经有了大量专项研究，大多集中在驱动方式、建模方法与控制策略方面，以及在腐蚀性环境中的化学防护应用。语音控制机械臂的研究主要集中在语音识别控制系统开发，以及在实验室样品处理等场景的应用。化学实验自动化方面，软体末端执行器的本征顺应性展现出显著优势。

但是，将语音控制、软体机械臂和化学实验操作三者结合的研究还暂未发现。现有的化学实验机器人多采用刚性机械臂或刚性协作机械臂，而软体机械臂在化学实验中的应用研究较少，特别是结合语音控制的软体机械臂化学实验系统尚未见报道。

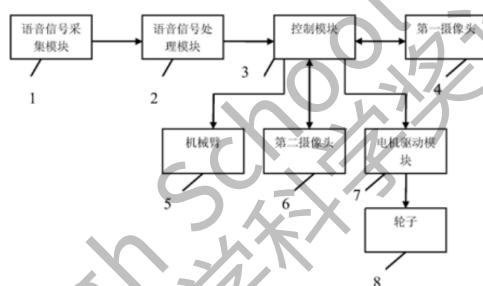
专利：

1. 一种基于六轴机械臂的化学实验自动化系统



本发明提出了一种基于六轴机械臂的化学实验自动化系统，该系统由中央控制系统、工作站硬件系统以及 3D 仿真场景控制模块组成。其核心创新在于将六轴机械臂与直线导轨、AGV 小车等可移动装置相结合，显著扩大了机器人的作业范围和灵活性，并利用 3D 仿真技术进行实验流程规划与避障验证，实现了复杂化学实验任务（如试剂调配、容器搬运等）的高效、安全、自动化操作。

2. 一种语音控制的机械臂拾取装置



这份专利公开了一种基于六轴机械臂的化学实验自动化系统，通过中央控制系统协同管理硬件工作站与 3D 仿真场景。其核心创新在于将高精度的机械臂与可移动的直线导轨及 AGV 小车集成，配合仿真系统的碰撞检测与路径优化功能，实现了在复杂实验室环境下对化学试剂调配及容器搬运等任务的远程、安全、自动化操作。

3. 一种用于工业机器人的末端柔性机械抓取装置

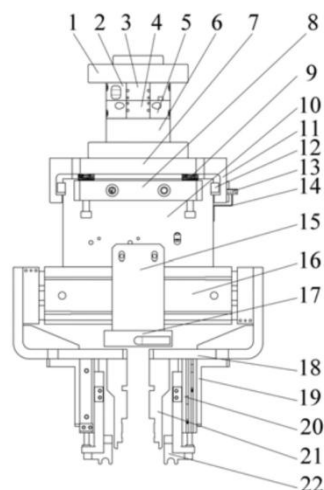


图9 专利3

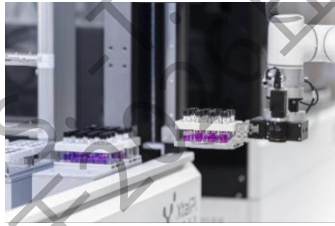
本发明公开了一种用于航空制造领域大型薄壁舱段装配的末端柔性机械抓取装置，通过集成快换装置、柔性连接系统、平行背光源以及横向与翻边两套压紧机构，有效解决了零件抓取难、定位不准及薄壁件加工易变形等痛点，显著提升了工业机器人在复杂航空零件装配过程中的定位精度与工艺稳定性。

专利总结

通过对上述专利的分析可以发现，当前相关研究主要集中在三个方向：一是以六轴机械臂为核心的化学实验自动化系统，通过多设备协同与仿真规划提升实验效率与安全性；二是基于语音控制的人机交互方式，实现对机械臂的远程指令操作；三是柔性末端执行器的设计，用于提升机器人在复杂或易变形物体抓取过程中的适应性与稳定性。尽管这些专利在自动化程度、交互方式及抓取性能等方面各有突破，但大多侧重于单一技术方向，缺乏针对化学实验场景的系统整合，尤其是在将语音语义理解、柔性抓取与实验安全控制有机结合方面仍存在明显不足。因此，在多技术融合以提升实验安全性与操作灵活性方面，仍具有进一步研究与创新的空间。

产品:

产品	介绍
----	----

 图 10 产品 1	名称：PlateCrane SciClops 实验室机械臂 功能原理：主要用于在不同实验设备之间自动搬运微孔板等标准化实验容器，可实现多设备联动运行，适用于高通量实验场景。 优点： 1. 定位精度高，重复性好 2. 可长时间稳定工作，提高实验效率 3. 支持多设备协同运行 缺点： 1. 只能处理标准化容器（微孔板） 2. 对烧杯、试剂瓶、冷凝管等非标准器材适应性差 3. 末端执行器为刚性夹爪，易损坏玻璃器皿 4. 成本高昂（通常数十万元） 点评： 该产品不能完全解决本课题提出的问题。虽然它在全通量实验中表现出色，但缺乏对非标准实验器材的适应能力，且刚性夹爪存在安全隐患。改进空间：引入柔性末端执行器，增加对多样化器皿的兼容性。
 图 11 产品 2	名称：工业六轴刚性机械臂 功能原理：采用金属结构与刚性关节，通过预设程序完成搬运、装配、加料等任务，具有较高的定位精度和重复性。 优点： 1. 定位精度极高（可达$\pm 0.1\text{mm}$） 2. 负载能力强，适用范围广 3. 技术成熟，可靠性高 缺点： 1. 刚性夹爪抓取玻璃器皿时易产生过大接触力，导致器材损坏 2. 依赖预设程序，对复杂多变的操作适应性有限 3. 缺乏人机交互能力，无法实现语音控制 4. 体积庞大，占用实验室空间 点评： 该产品部分解决了实验自动化问题，但在安全性和

	灵活性方面存在明显不足。对于需要精细操作和频繁更换实验器材的化学实验场景,其刚性结构容易造成安全事故。改进空间:集成语音交互模块,采用柔性末端执行器替代刚性夹爪。
	名称: Hiwonder JetArm 智能机械臂 功能原理: 集成视觉识别与语音交互功能的机械臂平台,支持通过语音指令控制机械臂完成抓取、搬运等操作,同时可结合图像识别实现目标定位。 优点: 1. 具备语音交互能力,人机交互友好 2. 集成视觉识别功能,可实现目标定位 3. 价格相对亲民(约 3000-5000 元) 4. 适合教学与演示场景 缺点: 1. 机械结构多为刚性夹爪,易对易碎器材造成损伤 2. 缺乏针对化学实验场景的安全策略 3. 负载能力有限,无法处理较重的实验器材 4. 语音识别准确率在嘈杂环境下下降明显 点评: 该产品最接近本课题的设想,但在化学实验适用性方面仍有欠缺。虽然它实现了语音控制,但缺乏柔性抓取能力,无法满足化学实验对安全性的高要求。改进空间:将刚性夹爪替换为硅胶柔性夹爪,增加针对化学实验的安全约束机制。

图 12 产品 3

表 3 产品研究

2.2. 调查访谈

2.2.1. 线上调查

有效问卷数量: 61

第一部分: 生活小调查(用户画像与痛点挖掘)

第 1 题: 你平时关注科技/机器人/人工智能相关内容吗?

目的: 评估受访者的科技接受度与认知基础。区分“技术爱好者”与“普通用户”,帮助判断系统宣传时应侧重“技术参数”还是“直观体验”,

并为后续交互逻辑的简化程度提供参考。

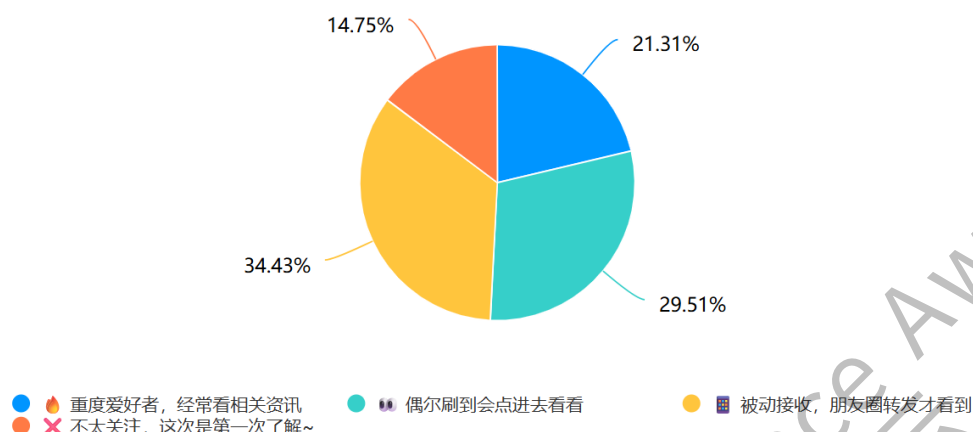


图 13 第 1 题答案数据可视化

第 2 题：你做过以下哪些“动手操作”？

目的：筛选并分类用户的实际操作背景。重点识别是否有化学/生物实验经验（验证需求真实性），同时观察烹饪、DIY 等跨领域经验是否与实验操作存在共性痛点（如精细控制、重复劳动）。

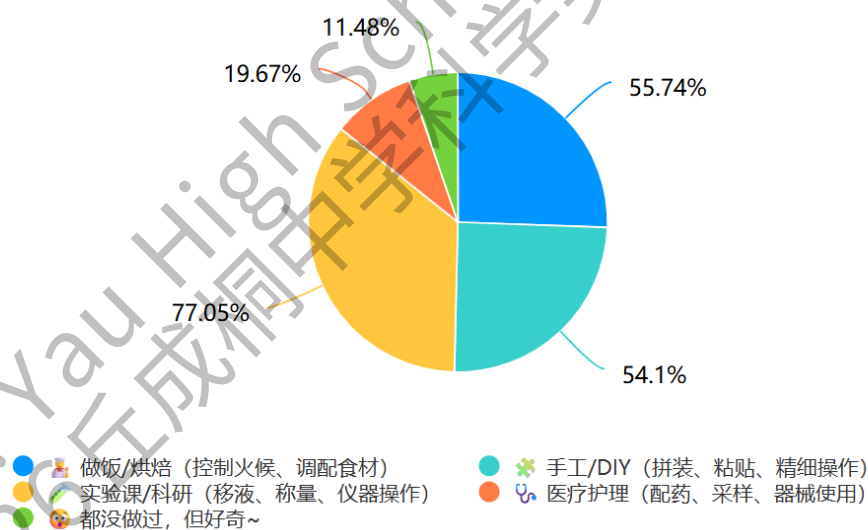


图 14 第 2 题答案数据可视化

第 3 题：以下哪种操作让你觉得“好累/好麻烦”？

目的：直击手动实验的核心痛点，验证本课题研发的必要性。通过统计“重复操作”“易碎品拿捏”“接触危险品”等选项的占比，明确系统应优先解决的安全问题与效率瓶颈，指导硬件选型与功能侧重。

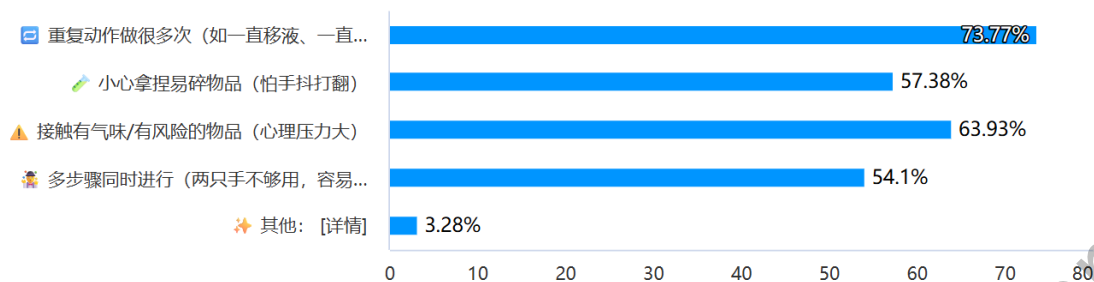


图 15 第 3 题答案数据可视化

第二部分：脑洞时间（功能偏好与场景验证）

第 4 题：如果有一个“智能实验助手”，你最希望它帮你做什么？（排序题）

目的：获取用户对核心功能的优先级排序。明确“柔性抓取”“语音控制”“安全保障”“自动记录”等功能在用户心中的权重，直接决定原型机开发阶段的资源分配与 MVP（最小可行性产品）功能边界。

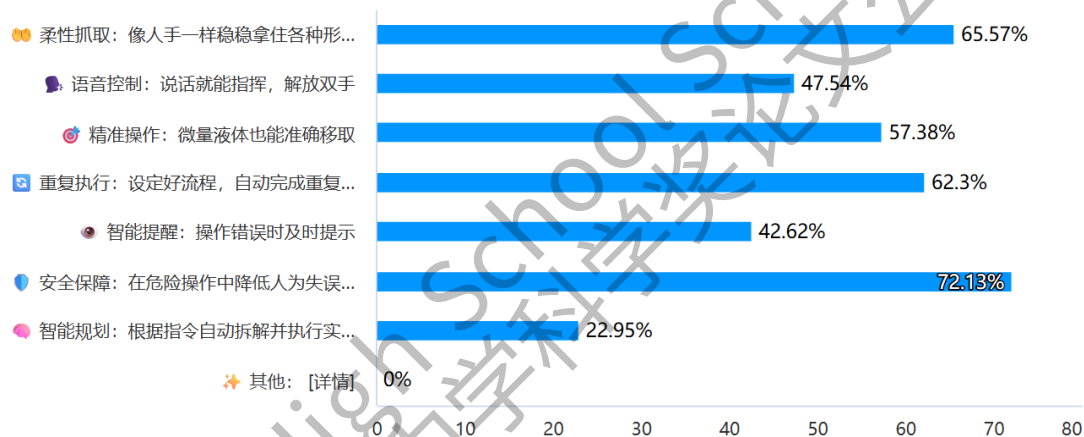


图 16 第 4 题答案数据可视化

第 5 题：你更喜欢哪种“说话指挥”的方式？

目的：确定人机交互（HMI）策略。判断用户更倾向“关键词指令”（开发难度低、稳定性高）还是“自然语言对话”（体验好但需 NLP 支持），或“混合确认型”（兼顾安全与便捷），为语音识别模块的算法选型提供依据。

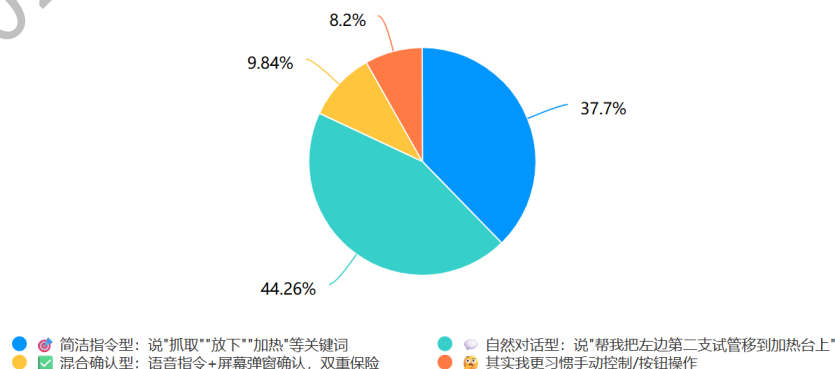


图 17 第 5 题答案数据可视化

第 6 题：对于“柔软的机械爪”，你的第一反应是？

目的：探查用户对软体机器人技术的心理接受度与潜在顾虑。若“担心精度/清洁/耐腐蚀”占比较高，则需在系统中加入视觉反馈、易拆卸清洗结构或材料防护说明；若“安全感”占优，则进一步印证柔性末端在化学实验中的推广价值。

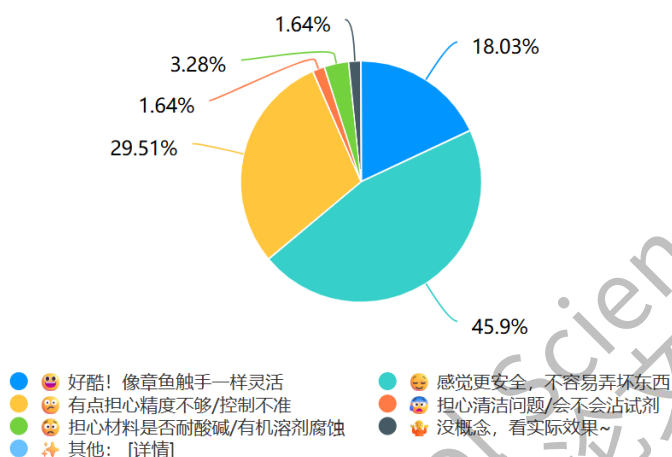


图 18 第 6 题答案数据可视化

第 7 题：你觉得这样的智能助手，最适合用在哪里？

目的：定位目标应用场景与市场方向。区分“科研高通量”“教学演示”“家庭科普”或“危险环境”等不同场景，指导后续在设备体积、防护等级、成本控制及合规标准上的差异化设计。

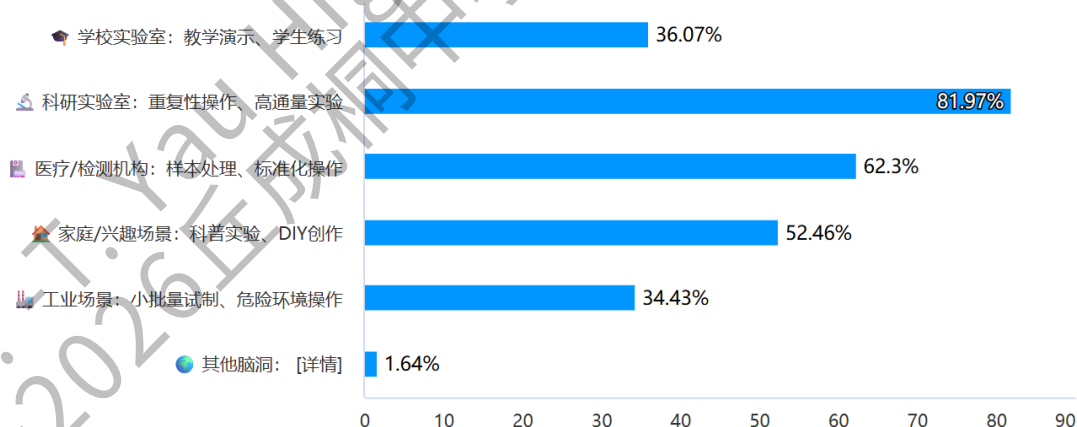


图 19 第 7 题答案数据可视化

第 8 题：你愿意为这样的智能助手“付费”吗？

目的：初步验证产品的市场可行性与用户真实意愿。过滤“纯好奇”样本，识别核心潜在用户，为后续选择“开源共享”路线或“商业化/教具化”路线提供决策参考。

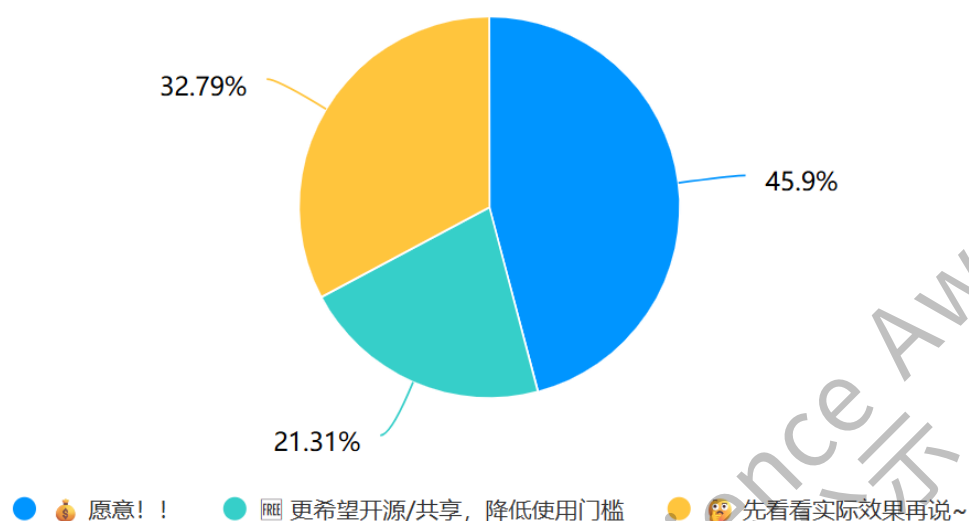


图 20 第 8 题答案数据可视化

第 9 题：你还希望它具备什么样的功能？（填空题）

目的：收集多选题未覆盖的长尾需求与创新想法。通过文本挖掘高频词（如“数据记录”“定时提醒”“自动清理”），发现用户隐性痛点，为系统 V2.0 迭代或论文中的“未来展望”章节提供一手素材。



图 21 第 9 题答案数据可视化

本次调研共回收 61 份有效问卷，经过分析，得出以下核心结论，对本课题研究具有直接指导价值：

1. 需求真实，痛点明确

77.05% 的受访者具有实验操作经验，其中 73.77% 认为“重复动作”最累，63.93% 对接触危险试剂感到压力。这验证了本课题“通过语音解放双手、通过柔性抓取提升安全”的核心价值主张具有扎实的用户基础，非凭空设想。

2. 功能优先级清晰

“安全保障”（72.13%）、“柔性抓取”（65.57%）、“重复执行”（62.3%）

位列功能需求前三。这直接支持本方案采用“语音指令+姿态解算+柔性末端”的最小可行性架构，优先保障安全抓取与基础搬运，而非追求复杂智能规划。

2.2.2. 线下访谈

为了更加深入地了解有化学实验经验的同学对智能辅助设备的真实需求，我们进行了一次线下访谈：

时间：2026 年 5 月 5 日

采访对象：伍同学

采访内容：

问：在你做有机合成或滴定实验时，哪个环节让你觉得最“心累”或最容易出错？

答：一个是重复移液，比如做梯度稀释，手酸了就容易加多或加少；另一个是转移热的烧杯或反应瓶，怕烫又怕滑，心理压力大。还有就是反应需要定时监控，人一走神就可能过反应。

问：如果有一个能用语音控制的机械臂帮你，你希望它怎么“听懂”你？担心什么问题？

答：希望它能听懂“把左边第三支试管移到加热台”这种带位置的指令，但实验室有通风橱噪音，可能得加个“唤醒词”避免误触发。最担心夹爪打滑或者夹太碎，毕竟试管不便宜。

问：对于“刚性臂+柔性爪”的方案，你觉得在化学场景下要注意什么？

答：柔性爪的硅胶得耐乙醇、丙酮这些常用溶剂，不然用几次就溶胀变形了。另外最好能快拆，做完有毒实验直接换爪，比清洗更安全。如果夹爪能带个简单的光学传感器，检测是否抓稳，就更靠谱了。

问：除了抓取搬运，你还希望它帮你记录什么？

答：每次加试剂的时间、体积、顺序，如果能自动记下来生成表格，写实验报告能省一半时间。另外反应倒计时提醒也很重要，比如“酯化反应还剩 5 分钟”，语音播报一下就不会忘。



图 22 笔者正在进行采访

总结：

访谈对象作为一线实验者，高度认同“重复操作易疲劳、易碎器皿风险高、定时监控易遗漏”三大痛点。其对“语音控制”既期待又谨慎的态度（担心噪音误触发），以及对“柔性夹爪”材料耐腐蚀性的专业关切，验证了本课题需在交互鲁棒性与材料工程层面做扎实设计，而非仅停留在概念层面。

访谈对象提出了一个关键建议：增加“唤醒词”机制（如“小实，帮我...”）和音量阈值判定，降低通风橱噪音下的误识别率

访谈对象还期待增加一些实用性功能，如状态感知、数据闭环、流程管理等，这些需求极具工程价值。但是由于时间问题，我将在后续迭代中实现这些功能。

2.3. 需求调研总结

综上，该产品需要做到以下功能：

1. **柔性自适应抓取能力：**采用 TPU 材质的两指 C 型柔性夹爪，利用材料非线性形变实现包裹式抓取。

原因：问卷显示 57.38% 的用户认为“小心拿捏易碎物品”最麻烦，72.13% 将“安全保障”列为最期望功能，且 45.9% 的用户认为软体夹爪“更安全”。化学实验器皿多为玻璃且规格不一，传统刚性夹爪易因力度或定位偏差导致破损洒漏。柔性夹爪能提供物理容错机制，在保障抓取稳固

性的同时，从根本上降低器材损坏风险与操作心理压力。

2. **语音交互与实时姿态解算控制：**集成离线语音识别模块，支持“上移/闭合/移至目标”等指令输入，并搭载 Arduino 平台的姿态解算算法驱动机械臂。

原因：63.93%的用户对接触危险试剂存在压力，44.26%偏好自然对话型交互。语音控制可实现“解放双手”的非接触操作，避免手部直接暴露于腐蚀性/有毒环境；结合姿态解算算法，能将语音指令实时转化为各关节角度参数，在控制成本与算力门槛的前提下，确保机械臂运动的灵活性与指令响应的准确性，契合 MVP “小步快跑”的落地逻辑。

3. 解决方案

3.1. 概念图

3.1.1. 灵感来源

我的设计灵感直接来源于实验操作中的真实痛点：在使用传统刚性机械爪时，我发现它存在以下问题：

- **抓握不稳**：对圆柱形试管接触面积小，容易滑落
- **力度难控**：夹持力过大易压碎玻璃器皿，过小则抓不牢
- **适应性差**：无法适应不同直径、形状的器皿

这让我思考：自然界中的生物是如何实现稳定、自适应抓取的？

我发现人类手指指腹具有：

- **指纹纹路**：增加表面粗糙度，提升摩擦力
- **皮下脂肪层**：受力时产生形变，增大接触面积
- **指甲支撑**：提供反向支撑力，防止物体滑脱



图 23 灵感来源

我考虑过使用全柔性连续体机械臂：

- 采用气动/绳索驱动连续体结构，整体由硅胶或柔性材料制成
- 可实现任意方向弯曲，模仿章鱼触手的运动方式
- 末端集成柔性夹爪，实现“臂爪一体”的柔顺操作

设计理由：

- 运动连续平滑，无刚性关节碰撞风险
- 理论上可适应任意形状器皿，泛化能力强

- 碰撞时自动让步，本质安全性高

放弃原因：

- 控制难度极高：连续体机械臂的运动学建模复杂
- 定位精度不足：柔性材料易受负载、温度影响产生形变，难以实现毫米级精准操作
- 开发周期过长：从材料选型、模具制作到驱动调试，耗时远超课题周期
- 成本高昂：高精度气动控制阀、压力传感器等配件价格昂贵



图 24 废稿

3.1.2. 概念结构图

我最终选择使用刚性机械臂加上柔性夹爪的方案。



图 25 声控柔爪机械臂概念图

整个装置如图所示，在刚性机械臂的末端安装两指柔性夹爪，采用 TPU 材质，利用材料的柔顺性包裹试管表面，增加接触面积与摩擦力，从而更安全、稳定地抓取易碎玻璃器皿，防止滑落或破损。主控单元安装在机械臂基座，负责语音识别和机械臂姿态计算。用户可以通过离线语音识别模块远程发送指令操控机

械臂，实现解放双手的智能交互体验。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

3.2. 流程图

3.2.1. 逻辑流程图与解释

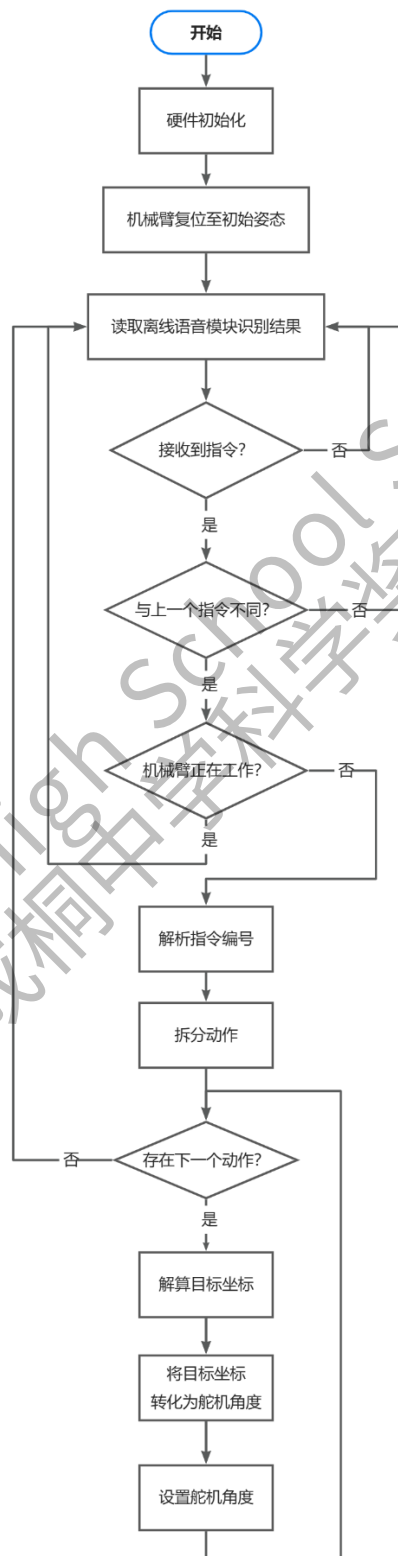


图 26 程序流程图

用户前来使用智能实验助手，系统启动后首先完成初始化，加载机械臂与麦克风。随后进入主循环，持续获取传感器数据（即麦克风音频流）。麦克风接收到有效声音信号时，系统判定为“有语音指令”，随即进入下一步；若未检测到声音或环境噪音干扰导致无效输入，则返回继续监听。一旦确认收到语音，系统将语音转为文本，并检测关键词，解析用户意图。接着，系统按照用户指令计算新的机械臂姿态，并将机械臂移动到目标姿态。最后，系统返回主循环，继续等待下一条语音指令，实现无缝衔接的智能实验辅助体验。

3.3. 硬件框图

3.3.1. 硬件框图与解释

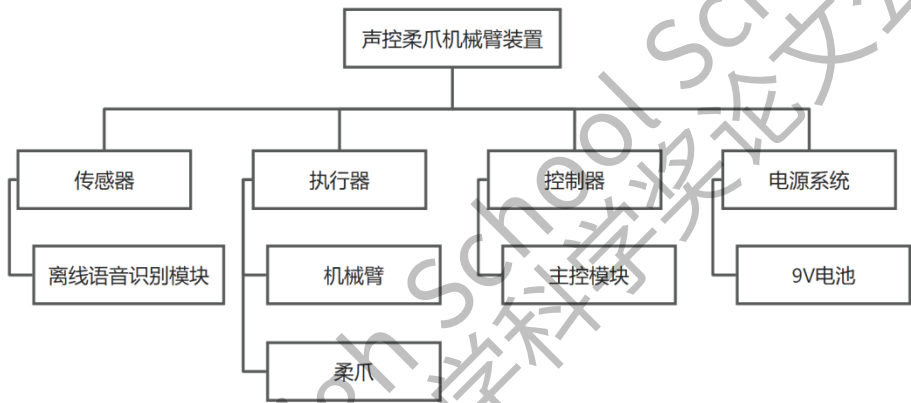


图 27 硬件框图

此方案的硬件框图如上，其中的自动化元素有：

- 传感器：离线语音识别模块
- 执行器：机械臂，柔爪
- 控制器：主控模块
- 电源系统：直流电源适配器

4. 原型设计

4.1. 设计过程

4.1.1. 开发环境

本课题的软件编程与系统调试均在 Arduino IDE 中完成。Arduino IDE 基于 processing IDE。对于初学者来说，极易掌握，同时有着足够的灵活性。Arduino 语言基于 wiring 语言，是对 avr-gcc 库的二次封装，不需要太多的单片机基础、编程基础。简单学习后，就可以快速地进行开发。

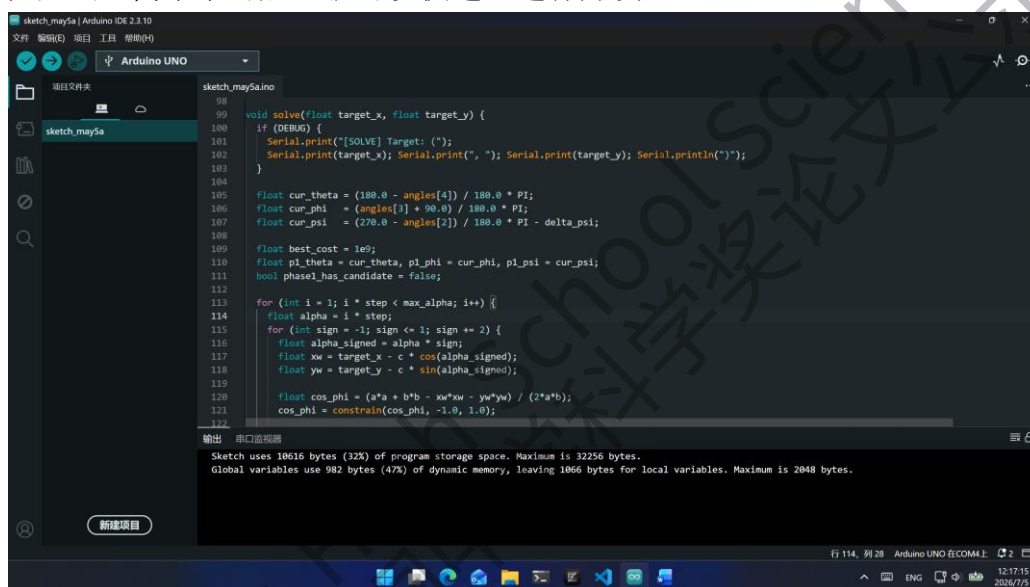


图 28 编程过程

4.1.2. 机械结构

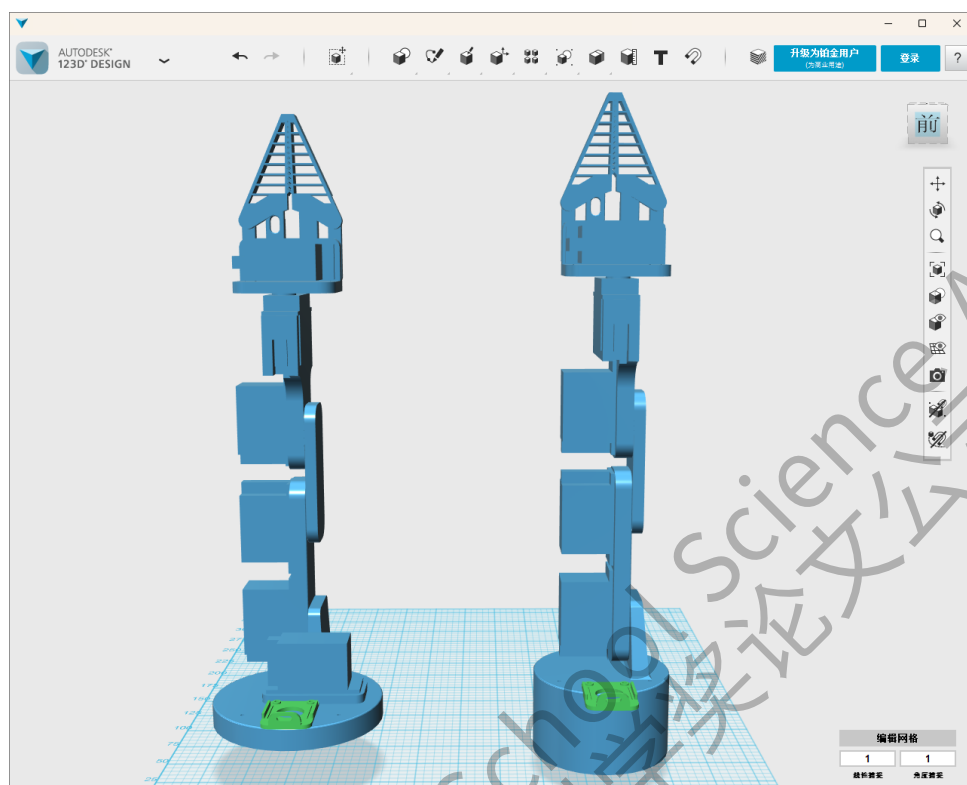


图 29 机械臂模型图纸

4.2. 项目原型

4.2.1. 开发过程



图 30 试管

我们用到的材料有：

1. **Arduino UNO 主控板**，它的作用是作为系统的核心控制器，负责接收语音识别模块的指令、运行姿态解算算法，并向各舵机发送控制信号，实现机械臂的精确运动控制；

2. **WonderEcho 离线语音识别模块**，它的作用是实现非接触式语音交互功能，支持在实验室环境下识别“拿起试管”、“放到 X 号位置”等预设关键词指令，无需联网即可工作，避免了网络延迟和隐私泄露问题；

3. **多自由度舵机组件(6 个)**，它的作用是驱动机械臂的各个关节运动，实现机械臂在三维空间中的灵活姿态调整；

4. **TPU 材质柔性夹爪**，它的作用是安全抓取易碎玻璃试管，利用 TPU 材料的非线性形变特性，在抓取时产生包裹式接触，有效补偿机械定位误差，防止试管滑落或破碎；

5. **防滑贴**，它的作用是贴附在试管外侧，利用其表面的微观纹理，增加夹爪与湿滑玻璃器皿之间的摩擦力。它与柔性材料的形变包裹相结合，以极低的成本彻底杜绝了抓取滑落风险，大幅提升了系统的可靠性；

6. **8 路舵机驱动扩展板**，它的作用是集中分配舵机的电源和控制信号；

7. **12V 可充电锂电池组与 5V 降压模块**，它的作用是为舵机驱动板提供外部电源。配合降压模块将其转换为稳定的 5V 直流输出，满足了舵机的额定工作电压要求；

8. **木质基板**，它的作用是固定机械臂基座和试管架的相对位置，方便数据标定；

9. **试管架**，它的作用是标准化试管的放置位置，为机械臂提供明确的抓取目标坐标

10. **热熔胶**，它的作用是固定机械臂基座、试管架与木质基板之间的连接，确保各部件在长期使用中不会松动；

11. **玻璃试管 ($\Phi 47\text{mm} \times 150\text{mm}$)**，它的作用是模拟真实化学实验场景中的操作对象，测试柔性夹爪的抓取成功率和容错能力，验证系统的实用性。

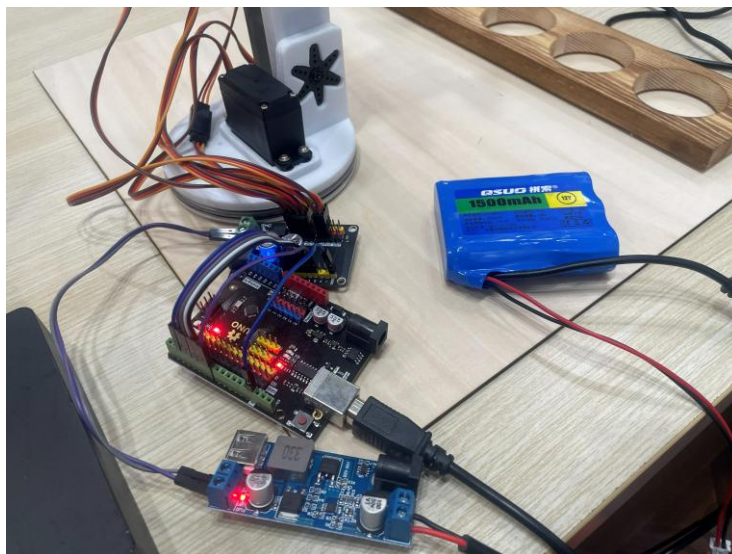


图 31 走线细节

4.2.2. 代码实现细节

4.2.2.1. 系统软件架构

本系统的软件控制程序基于 Arduino UNO 平台开发,采用模块化设计思想,主要包含语音识别模块、逆运动学求解模块、舵机平滑控制模块和复合动作执行模块。

程序主循环以 80 ms 为周期读取 WonderEcho 语音识别模块的数据。当检测到有效语音指令时,系统首先确保机械臂不在执行任务,再操作机械臂,确保动作执行期间不受新指令干扰,保障机械臂运动的原子性和安全性。

4.2.2.2. 逆运动学求解算法

为了实现一个轻量级的系统,本课题摒弃了高耗时的神经网络方案,转而采用逆运动学解算的方式,将目标坐标转成各舵机的角度。

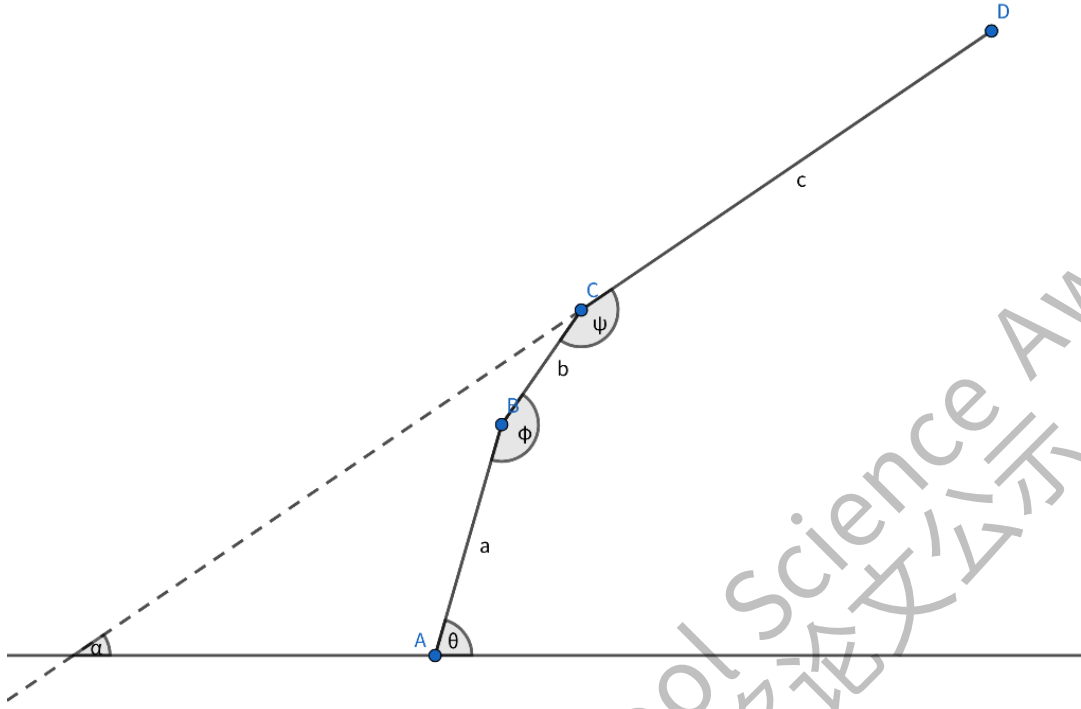


图 32 机械臂简化图

如图 31，已知目标点 $D(x_t, y_t)$ ，要求解角度 $\theta, \phi, \psi, \alpha$ ($\theta \in [\frac{\pi}{3}, \pi], \phi \in [\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}], \psi \in [\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}], \alpha \in (-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$):

$$\begin{cases} x_t = a \cos \theta + b \cos(\theta + \phi - \pi) + c \cos \alpha \\ y_t = a \sin \theta + b \sin(\theta + \phi - \pi) + c \sin \alpha \\ \alpha = \theta + \phi + \psi - 2\pi \end{cases}$$

由于此机械臂具有 3 个自由度，而位置约束仅有 2 个，系统存在 1 个冗余自由度，考虑引入末端姿态角 α 作为遍历变量，将冗余自由度解算问题转化为确定性的几何求解。

设连杆 b 和 c 的交点（即手腕点）坐标为 $C(x_w, y_w)$ ，由几何关系可得：

$$\begin{cases} x_w = x_t - c \cos \alpha \\ y_w = y_t - c \sin \alpha \end{cases}$$

于是问题转化为已知目标点 (x_w, y_w) ，求解角度 θ, ϕ ：

$$\begin{cases} x_w = a \cos \theta + b \cos(\theta + \phi - \pi) \\ y_w = a \sin \theta + b \sin(\theta + \phi - \pi) \end{cases}$$

将两式平方并相加：

$$\begin{aligned} x_w^2 + y_w^2 &= [a \cos \theta - b \cos(\theta + \phi)]^2 + [a \sin \theta - b \sin(\theta + \phi)]^2 \\ &= a^2 + b^2 - 2ab[\cos \theta \cos(\phi + \theta) + \sin \theta \sin(\phi + \theta)] \\ &= a^2 + b^2 - 2ab \cos \phi \end{aligned}$$

可以求解出关节角 ϕ ：

$$\cos \phi = \frac{a^2 + b^2 - x_w^2 - y_w^2}{2ab}$$

$$\phi = \pm \arccos \left(\frac{a^2 + b^2 - x_w^2 - y_w^2}{2ab} \right)$$

化简原来的方程组：

$$\begin{cases} x_w = a \cos \theta - b(\cos \theta \cos \phi - \sin \theta \sin \phi) \\ y_w = a \sin \theta - b(\sin \theta \cos \phi + \cos \theta \sin \phi) \end{cases}$$

整理各项：

$$\begin{cases} x_w = (a - b \cos \phi) \cos \theta + (b \sin \phi) \sin \theta \\ y_w = -(b \sin \phi) \cos \theta + (a - b \cos \phi) \sin \theta \end{cases}$$

令 $A = a - b \cos \phi$, $B = b \sin \phi$ ：

$$\begin{cases} x_w = A \cos \theta + B \sin \theta \\ y_w = -B \cos \theta + A \sin \theta \end{cases}$$

通过消元法可以解出：

$$\begin{cases} \cos \theta = \frac{Ax_w - By_w}{A^2 + B^2} \\ \sin \theta = \frac{Ay_w + Bx_w}{A^2 + B^2} \end{cases}$$

因此：

$$\theta = \arctan \frac{Ay_w + Bx_w}{Ax_w - By_w} = \arctan \frac{y_w}{x_w} + \arctan \frac{B}{A} = \arctan \frac{y_w}{x_w} + \arctan \frac{b \sin \phi}{a - b \cos \phi}$$

$$\psi = \alpha + 2\pi - \theta - \phi$$

这样，算法在一定范围内（即 $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$ ）从 0 开始，交替向外层按固定步长（ $\Delta\alpha = 0.05 \text{ rad}$ ）遍历 α （如 $\alpha = 0, \pm 0.05, \pm 0.10, \dots$ ），算法可快速获得所有满足物理关节限位约束的候选逆解集 $\{(\theta_i, \phi_i, \psi_i, \alpha_i)\}$ 。

在遍历得到的候选解集中，为避免机械臂在运动过程中出现关节突变或末端夹爪大幅度翻转（导致试管滑落），本文引入**加权最小范数法**进行最优解选取。

定义当前时刻的关节状态为 $\mathbf{q}_{\text{cur}} = [\theta_{\text{cur}}, \phi_{\text{cur}}, \psi_{\text{cur}}]^T$ ，候选解的关节状态为 $\mathbf{q}_i = [\theta_i, \phi_i, \psi_i]^T$ 。构建包含关节变化惩罚与末端姿态变化惩罚的综合代价函数 J ：

$$J = w_1 \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_{\text{cur}}\|^2 + w_2 (\alpha_i - \alpha_{\text{cur}})^2$$

$$J = w_1 [(\theta_i - \theta_{\text{cur}})^2 + (\phi_i - \phi_{\text{cur}})^2 + (\psi_i - \psi_{\text{cur}})^2] + w_2 (\alpha_i - \alpha_{\text{cur}})^2$$

在本系统中，为保证化学试管在水平侧向抓取时的稳定性，末端姿态的平滑性至关重要。因此，本文赋予末端姿态变化更高的惩罚权重（设定 $w_1 = 0.7, w_2 = 3.0$ ）。算法通过寻找使代价函数 J 最小的候选解作为最终控制指令：

$$\mathbf{q}_{\text{target}}, \alpha_{\text{target}} = \arg \min_{\mathbf{q}_i, \alpha_i} J$$

该算法将复杂的非线性逆运动学求解转化为简单的三角函数运算与一维遍

历寻优，单次解算耗时在微秒级。既完美适配了 Arduino UNO 的算力限制，又通过加权最小范数策略有效抑制了关节抖动，保证了机械臂运动的连续性与末端姿态的稳定性。

在基于末端姿态遍历的逆运动学求解过程中，针对目标点可能超出当前姿态可达工作空间的情况，本文引入了余弦值**边界饱和处理**机制。

当手腕点 $C(x_w, y_w)$ 的距离超出连杆 a, b 的物理装配极限时，计算所得的 $\cos \phi$ 将越出 $[-1, 1]$ 的数学合法域。为此，算法在求解 $\cos \phi$ 前对其进行饱和处理：

$$\cos \phi_{\text{sat}} = \text{sat}(\cos \phi, -1, 1)$$

该处理结合后续的关节物理限位筛选，该机制确保机械臂在面临极端越界目标时，能够在不违反关节限位的前提下，采取“极限姿态”尽可能逼近目标；若彻底不可达，则安全地保持原位。此设计显著提升了轻量级控制系统在复杂工况下的数值鲁棒性与运行安全性。

4.2.2.3. 舵机平滑控制策略

为消除机械臂运动过程中的抖动和冲击，本文设计了基于线性插值的舵机平滑控制算法。对于相邻两个目标姿态，算法计算各关节的最大角度差 $\Delta\theta_{\max}$ 并根据设定的最大角速度 $\omega_{\max}$ （默认 $40^\circ/\text{s}$ ）确定插值步数：

$$n_{\text{steps}} = \left\lceil \frac{\Delta\theta_{\max}}{\omega_{\max} \cdot \Delta t} \right\rceil$$

式中 $\Delta t = 10\text{ms}$ 为控制周期。在每个控制周期内，所有关节同步进行线性插值：

$$\theta_i(t) = \theta_{i,\text{prev}} + (\theta_{i,\text{target}} - \theta_{i,\text{prev}}) \cdot \frac{t}{n_{\text{steps}}}$$

4.2.2.4. 复合动作流程

机械臂的试管抓取与放置操作由 `pick(pos)`和 `drop(pos)`两个复合动作函数实现。以 `pick(pos)`为例，其执行流程如下：

1. **底座转向**：调用 `turn_to(pos)`函数，控制底座舵机平滑旋转至目标试管对应的角度；
2. **竖直下降**：通过逆运动学求解，控制机械臂末端以 $30^\circ/\text{s}$ 的速度竖直下降至抓取高度 $y_{\text{tube}} = 3\text{cm}$ ；
3. **闭合夹爪**：TPU 柔性夹爪以 $60^\circ/\text{s}$ 的速度闭合，包裹试管表面，延时 200ms 确保夹持稳固；
4. **竖直抬升**：保持 X 坐标不变，以 $50^\circ/\text{s}$ 的速度竖直抬升 $\Delta y = 8\text{cm}$ ，将试管从试管架中拔出；

在整个动作过程中，`armBusy` 标志位被置为 `true`，屏蔽新的语音指令，确保

动作的完整性和安全性。

此外，程序还实现了 `move(src,dst)` 函数，即先 `pick(src)` 再 `drop(dst)`，使得主程序调用更加方便。

4.2.3. 项目原型

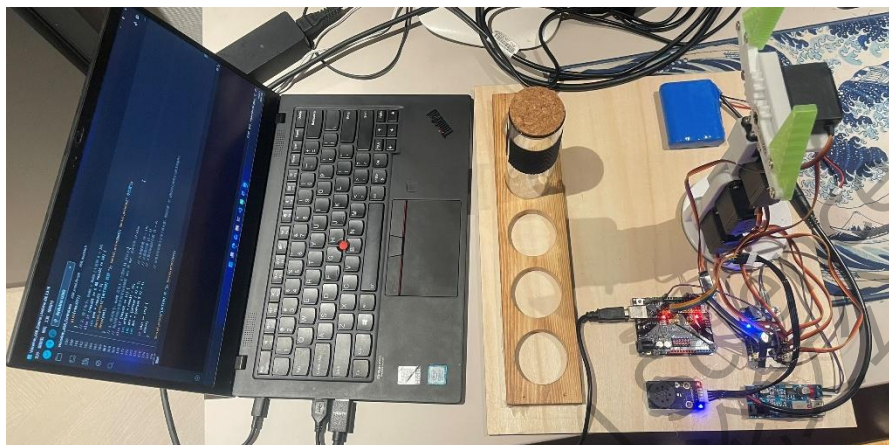


图 33 项目原型

这是最后的项目原型。

5. 实验设计与测试分析

5.1. 实验设计

为了全面验证“语音控制+刚性臂+柔性爪+姿态解算”方案的可行性与有效性，我们围绕 **3 个核心维度** 设计实验，所有实验均可在家庭/学校条件下完成，无需昂贵设备：

1. 可行性角度（功能性测试）

- WonderEcho 语音模块能否准确识别预设指令？
- Arduino 能否正确解析指令并驱动机械臂运动？

2. 科学性角度（精准性测试）

- 柔性夹爪容错测定
- 姿态解算误差对末端定位精度的影响

3. 实际使用测试（实用性）

- 全流程响应延迟测试
- 邀请同学试用并收集易用性反馈

5.2. 功能性测试

5.2.1. 实验一：WonderEcho 语音模块识别测试

实验目的：测试 WonderEcho 离线语音识别模块在实验室环境下的指令识别准确率，验证其是否满足机械臂语音控制系统的可靠性要求

实验材料：

- WonderEcho 语音模块
- Arduino-UNO

实验对象：语音指令识别成功率

常量：指令内容（拿起 X 号试管（共 5 条）、放到 X 号位置（共 5 条）、X 号试管移动到 Y 号位置（共 20 条））、语速（正常）、背景噪音响度（约 40-50dB，无明显干扰声源）

实验步骤：

对模块依次发出 30 条指令，每条重复 2 次，记录成功次数

指令内容	成功次数
拿起 1 号试管	2
拿起 2 号试管	2
拿起 3 号试管	2

拿起 4 号试管	2
拿起 5 号试管	2
放到 1 号位置	2
放到 2 号位置	2
放到 3 号位置	2
放到 4 号位置	2
放到 5 号位置	2
1 号试管移动到 2 号位置	2
1 号试管移动到 3 号位置	2
1 号试管移动到 4 号位置	2
1 号试管移动到 5 号位置	2
2 号试管移动到 1 号位置	2
2 号试管移动到 3 号位置	2
2 号试管移动到 4 号位置	2
2 号试管移动到 5 号位置	2
3 号试管移动到 1 号位置	2
3 号试管移动到 2 号位置	2
3 号试管移动到 4 号位置	2
3 号试管移动到 5 号位置	2
4 号试管移动到 1 号位置	2
4 号试管移动到 2 号位置	2
4 号试管移动到 3 号位置	2
4 号试管移动到 5 号位置	2
5 号试管移动到 1 号位置	2
5 号试管移动到 2 号位置	2
5 号试管移动到 3 号位置	2
5 号试管移动到 4 号位置	2

表 4 不同指令内容的成功次数

数据分析：

由于直接使用成熟的离线语音识别模块，在 60 次重复测试中，模块对全部 30 条预设指令的识别成功率达到 100%（60/60），未出现误识别、漏识别或指令混淆现象，表明 WonderEcho 模块在实验室环境下具有极高的语音识别可靠性。

从指令类别来看，短指令（如“拿起 1 号试管”，4-5 个音节）与长指令（如“3 号试管移动到 4 号位置”，8-9 个音节）的识别成功率均为 100%，说明模块对

指令长度的变化具有良好的鲁棒性，音节数量的增加未对识别精度产生显著影响。

在 20 条移动指令中，存在多组仅数字不同的相似指令（如“1 号试管移动到 2 号位置”与“1 号试管移动到 3 号位置”），模块均能准确区分并输出对应的指令编号，未发生相邻编号混淆，表明模块的语音特征提取与模板匹配算法具有较高的分辨精度。

实验结论：

WonderEcho 离线语音识别模块在标准实验室环境下，对 30 条预设化学实验操作指令的识别成功率达到 100%，满足机械臂语音控制系统对识别准确率的基本要求（ $\geq 85\%$ ），验证了该模块在化学实验自动化场景中的适用性。

不过，本实验在安静实验室环境下完成，环境声压级约 40-50 dB。在后续研究中，可进一步测试高噪声环境（如通风橱运行、多人同时操作等工况）下的识别率变化，以全面评估系统的工程适用边界。

5.3. 精准度测试

5.3.1. 实验二：柔性夹爪容错测定实验

实验目的：测定柔性夹爪在不同定位偏差下的抓取成功率

实验设备：柔性夹爪、玻璃试管、量角器、刻度尺、秒表

因变量：

1. 抓取成功率（%）= 成功次数 / 总测试次数 $\times 100\%$
2. 滑落时间（s）：从抓起到试管滑落的时间（若失败）

自变量：

位置偏差：

- X 轴（前后）：-10, -5, 0, +5, +10 mm
- Y 轴（左右）：-10, -5, 0, +5, +10 mm

角度偏差：

- 横滚角：-10°, -5°, 0°, +5°, +10°

常量：

- 试管规格： $\Phi 47\text{mm} \times 150\text{mm}$
- 保持时间：5 秒（统一稳定性观察时长）

实验步骤：

【基准测试】零偏差校准

1. 将试管固定于理论目标位置（ $X=0, Y=0$, 角度 $=0^\circ$ ）
2. 柔性夹爪执行“抓取——上抬 10cm——保持”流程
3. 重复 3 次，记录成功次数，计算基准成功率

【X-Y 平面网格扫描】

4. 标记 25 个测试点 ($X/Y = -10, -5, 0, +5, +10 \text{ mm}$)
5. 依次调节试管至各测试点
6. 每个点执行抓取测试 3 次，记录每次是否成功、滑落时间
7. 填写数据表，计算各点成功次数

【角度偏差单轴测试】

8. 恢复位置偏差=0，用角度夹具调节试管倾斜
9. 横滚角测试：依次设置 $-10^\circ/-5^\circ/0^\circ/+5^\circ/+10^\circ$ （前端偏左/右倾斜），每角度测试 3 次
10. 记录成功次数

数据记录表格：

X 轴 \ Y 轴	-10mm	-5mm	0mm	+5mm	+10mm
-10mm	2	3	3	3	3
-5mm	3	3	3	3	3
0mm	2	3	3	3	3
+5mm	3	3	3	3	3
+10mm	1	3	3	3	3

表 5 位置偏差成功次数

角度偏差	成功次数
-10°	1
-5°	2
0°	3
$+5^\circ$	3
$+10^\circ$	2

表 6 横滚角偏差成功次数

数据分析：

根据表 5 数据，在 X 轴与 Y 轴偏差均为 $\pm 5\text{mm}$ 的测试网格中，绝大多数测试点（25 个中的 21 个，占比 84%）的抓取成功率达到了 100%（3/3）。仅在 Y 轴偏差达到-10mm 的边缘区域（如 $(-10, -10)$ 、 $(0, -10)$ 、 $(+10, -10)$ ）出现了成功率下降（分别为 2/3、2/3、1/3）。

这一数据表明，得益于 TPU 材质，夹爪在闭合时能够发生非线性形变，自适应试管的圆柱曲面，提供了至少 $\pm 5\text{mm}$ 的宏观位置容差。考虑到试管直径为 $\Phi 47\text{mm}$ （半径约 23.5mm）， $\pm 5\text{mm}$ 的容差范围已占据半径的 21%以上，展现了极强的位置包容性。当偏差达到 10 mm 时，试管边缘可能超出了夹爪指尖的

有效包络区域，导致接触面积骤减、正压力分布不均，进而使得摩擦力不足以抵抗重力而引发滑落。

根据表 6 数据，当横滚角偏差在 0° 至 $\pm 5^\circ$ 范围内时，抓取成功率为 89%；而当偏差达到 $\pm 10^\circ$ 时，成功率显著下降（分别为 1/3 和 2/3）。

经实际物理观察分析，此处的失败并非由于夹爪抗翻转力矩不足或试管滑落，而是由于试管直径较宽（ $\Phi 47\text{ mm}$ ），在倾斜状态下，试管的几何轮廓超出了夹爪可包裹的空间。当倾斜角达到 10° 时，夹爪与试管边缘碰撞，导致夹爪在下降过程中被卡住，无法到达预定的抓取深度，从而判定为抓取失败。

值得注意的是，在未发生几何干涉的角度（ 0° ， $\pm 5^\circ$ ）下，成功率为 89%（8/9）。这印证了该柔性夹爪在正常接触状态下，具备较强的抗横滚角翻转力矩的能力。结合试管表面的防滑贴设计，只要夹爪能够顺利下降至目标位置，就能确保试管稳固不滑落。

实验结论：

实验证实，TPU 柔性夹爪凭借鳍条效应产生的自适应包络特性，能够在 $\pm 5\text{ mm}$ 的位置偏差范围内保持 100% 的抓取成功率。这一特性有效弥补了轻量级逆运动学算法及物理硬件带来的定位误差，消除了化学实验中因试管架摆放不齐导致的抓取失败风险。

横滚角测试表明，系统的角度容差主要受限于试管直径与夹爪内部包络空间的几何匹配度。 $\pm 5^\circ$ 是保证无干涉下降的安全阈值。这一发现为系统控制算法提供了明确的物理边界：在实际部署中，必须依赖带姿态约束的逆运动学算法，进一步抑制机械臂在移动过程中的末端角度抖动，确保倾斜角严格控制在 $\pm 5^\circ$ 的安全阈值内，以避免物理卡滞。

5.3.2. 实验三：姿态解算精度验证实验

实验目的：验证运动学解算算法能否将目标坐标准确转换为舵机角度

预期结果：末端实际位置与目标位置偏差 $\leq 5\text{ mm}$ （满足化学实验基础操作需求）

实验设备：机械臂（含柔爪）、刻度尺

因变量：末端实际位置与目标位置的直线偏差（mm）

自变量：目标坐标点

常量：机械臂基座位置、夹爪空载

实验步骤：

1. 依次发送目标位置指令
2. 机械臂执行姿态解算并移动至目标位置
3. 用刻度尺测量末端夹爪中心与目标点的直线距离偏差

4. 每个目标点重复测试 5 次，计算平均偏差

数据记录表格：

试管架 插口编号	第一次 (mm)	第二次 (mm)	第三次 (mm)	第四次 (mm)	第五次 (mm)	平均偏差 (mm)
1	2	0	1	0	1	0.8
2	2	2	2	1	0	1.4
3	1	2	2	1	1	1.4
4	2	0	1	2	1	1.2
5	1	2	2	1	2	1.6

表 7 平均直线偏差

数据分析：

实验数据显示，机械臂末端夹爪中心在 5 个不同目标坐标点（试管架插口 1-5）的平均直线偏差介于 0.8mm 至 1.6mm 之间，所有 25 次单次测量的最大偏差仅为 2mm。该结果远低于实验预设的 5mm 精度阈值，表明基于解析法与加权最小范数的逆运动学算法能够将任务空间的目标坐标准确、高效地映射为关节空间的角度指令，具备极高的绝对定位精度。

在针对同一目标坐标点进行的 5 次重复测试中，测量数据波动极小（极差基本在 1-2mm 以内）。例如，插口 1 的 5 次测量值分别为 2、0、1、0、1mm，数据高度集中。这表明算法在多次执行同一目标时未发生随机发散，系统具有极高的重复定位精度，能够确保机械臂在化学实验中多次执行标准化动作时的一致性。

实验测得的 1-2 mm 级微小偏差并非源于逆运动学算法的数学截断或计算错误，而是由系统的物理与硬件固有限制所致。主要误差来源包括：（1）标准舵机内部齿轮的机械间隙；（2）Arduino 输出信号控制舵机时的角度量化误差（1° 的整数倍限制）；3）机械臂连杆加工、3D 打印件的装配公差；4）使用刻度尺进行人工测量时引入的视觉读数误差。这些误差在轻量级硬件平台上完全合理且可控。

实验结论：

实验结果证实，本文提出的基于解析法遍历与加权最小范数优化的轻量级逆运动学算法，在 Arduino 微控制器上能够实现高精度的坐标转换。末端平均定位偏差控制在 1.6 mm 以内，远优于 5 mm 的设计预期，完全满足化学实验中试管精准对准、平稳插拔的基础操作需求。

多次重复测试的数据高度一致性，证明了系统具有优异的重复定位精度。在化学实验自动化场景中，机械臂需要频繁在同一坐标点执行加液、抓取等动作，该高重复精度有效避免了因累计误差导致的试管碰撞或试剂洒漏，保障了实验过程的安全性与规范性。

实验测得的微小偏差主要源于舵机齿轮间隙等物理硬件限制，而非算法缺陷。这从实验层面印证了前文的理论推导：在资源受限的嵌入式平台上，无需依赖高耗时的神经网络或复杂的雅可比矩阵迭代，仅通过严谨的解析法几何求解与合理的加权约束，配合物理层面的装配优化，即可实现媲美工业级标准的高精度末端轨迹跟踪。

5.4. 实际使用测试

5.4.1. 实验四：全流程响应延迟测试

实验目的：测量从发出语音指令到机械臂完成动作的总延迟，评估系统实时性

预期结果：总延迟<2 秒（满足非高速实验场景需求）

实验设备：机械臂（含柔爪）、秒表

因变量：总响应延迟（s）

自变量：指令内容

常量：说话人距离（30cm）、环境噪音（40dB）、机械臂负载（空载）、初始位置（朝向三号位置，柔爪竖直向上）

实验步骤：

1. 发出指令，指令结束后立刻开始计时
2. 机械臂执行动作至目标位置后立刻结束计时

指令类型	指令内容	总延迟（s）	平均延迟（s）
拿起	拿起 1 号试管	6.92	6.57
	拿起 2 号试管	6.21	
	拿起 3 号试管	6.03	
	拿起 4 号试管	6.51	
	拿起 5 号试管	7.16	
放下 (已拿起 3 号试管)	放到 1 号位置	6.93	6.35
	放到 2 号位置	6.41	
	放到 3 号位置	5.30	
	放到 4 号位置	6.34	
	放到 5 号位置	6.75	
移动 1 格	1 号试管移动到 2 号位置	12.66	12.35
	2 号试管移动到 3 号位置	12.20	
	3 号试管移动到 4 号位置	12.00	

	4 号试管移动到 5 号位置	12.42	
	2 号试管移动到 1 号位置	12.39	
	3 号试管移动到 2 号位置	11.73	
	4 号试管移动到 3 号位置	12.40	
	5 号试管移动到 4 号位置	13.02	
移动 2 格	1 号试管移动到 3 号位置	13.44	12.97
	2 号试管移动到 4 号位置	12.75	
	3 号试管移动到 5 号位置	12.82	
	3 号试管移动到 1 号位置	12.57	
	4 号试管移动到 2 号位置	12.74	
	5 号试管移动到 3 号位置	13.51	
移动 3 格	1 号试管移动到 4 号位置	13.77	13.48
	2 号试管移动到 5 号位置	13.16	
	4 号试管移动到 1 号位置	13.31	
	5 号试管移动到 2 号位置	13.69	
移动 4 格	1 号试管移动到 5 号位置	13.83	13.98
	5 号试管移动到 1 号位置	14.12	

表 8 不同指令类型的总响应延迟

数据分析:

在“拿起”与“放下”两类单次基础指令中，系统总响应延迟稳定在 5.30s-7.16s 之间，平均延迟分别为 6.57s 和 6.35s。该延迟主要由三部分构成：

WonderEcho 语音模块的识别与传输延迟（约 0.2s-0.5s）、底座转向与逆运动学解算延迟、以及多阶段物理动作（下降、闭合、抬升/释放、复位）的串行执行时间。由于系统采用了纯竖直插拔策略与带姿态约束的平滑控制算法（如使用 smooth_write_angles 函数将角速度限速至 30-50°/s），单步动作的执行时间被有意延长，以彻底消除机械臂的惯性抖动与齿轮微震。

“移动”指令本质上是“拿起”与“放下”动作的严格串行（move 函数内部调用 pick 和 drop）。实验数据显示，所有移动指令的延迟均在 11.73s-14.12s 之间，约为单次动作延迟的 2 倍，符合预期。

随着移动格数的增加（1 格至 4 格），平均延迟呈现显著的线性递增趋势。每增加 1 格移动距离，总延迟约增加 0.5s-0.6s。这一规律表明，底座舵机的转向角度与水平平移距离的增加，直接导致了平滑插值步数的增加。算法在不同空间跨度下均保持了稳定的计算周期，未出现算力瓶颈或死锁，证明了底层控制算法的高度可预测性。

实验测得的总延迟（6s-14s）显著大于预期结果（< 2s）。经分析，该偏差源于本系统的核心设计取舍：在化学实验场景中，试管的防跌落、防碰撞以及末端姿态的水平锁定，远比绝对的响应速度重要。系统通过牺牲部分运动速度（如降低 max_speed_deg_per_sec 参数，增加插值步数），换取了纯竖直插拔的精准度与柔性夹爪的平稳包络。因此，该延迟并非系统性能缺陷，而是保障化学操作安全性的必然物理成本与主动工程权衡。

实验结论：

本系统从语音指令发出到机械臂完成动作的总响应延迟在 6s-14s 之间。虽然未达到< 2s 的高速响应预期，但该延迟水平完全满足化学实验室非高速、高安全性的实际操作需求。化学实验操作本身对毫秒级实时性要求不高，但对器皿抓取的稳定性和防碰撞要求极高，本系统的延迟表现是符合实际工况的合理设计。

实验数据证实了系统控制算法的鲁棒性。单次动作延迟的极低方差（如放下指令数据高度集中），以及复合动作延迟随移动距离呈现的完美线性增长，证明了基于加权最小范数的逆运动学求解器与线性平滑插值算法在 Arduino 轻量级平台上运行流畅，验证了算法在资源受限环境下的可靠性。

5.4.2. 实验五：模拟化学实验场景测试

实验目的：在接近真实的化学实验场景中测试系统整体性能与易用性

实验材料：完整原型系统、试管（含模拟试剂）

实验对象：系统整体性能与用户易用性

实验任务：

- 1. 任务 A：“把一号试管拿出来”
- 2. 任务 B：“把试管放到二号位置”
- 3. 任务 C：“把二号试管移到四号”

实验方法：

完成 3 个实验任务，重复 3 次，记录：

- 完成时间（s）
- 语音指令重复次数（因识别失败需重说）
- 抓取失败次数（滑落/未抓稳）

次数	任务编号	完成时间（s）	指令重复次数	抓取失败次数
1	A	10.08	0	0
	B	8.58	0	0
	C	16.70	0	0
2	A	10.43	0	0

3	B	11.98	1	0
	C	16.07	0	0
	A	10.58	0	0
3	B	9.44	0	0
	C	18.29	1	0

表 9 任务完成情况

数据分析:

实验数据显示，系统在执行单一动作（任务 A、B）与复合动作（任务 C）时，表现出极高的时间一致性。任务 A（拿起试管）的 3 次完成时间分别为 10.08s、10.43s、10.58s，平均耗时 10.36s，极差仅为 0.50s；任务 B（放置试管）平均耗时 10.00s；任务 C（移动试管，本质为“拿起+移动+放置”的复合动作）平均耗时 17.02s。任务 C 的耗时约为单一动作的 1.6 倍，完美契合系统底层 `move()` 函数串行执行 `pick()` 和 `drop()` 的逻辑架构。极小的时间波动证明了基于加权最小范数的逆运动学算法与线性平滑插值策略在真实物理负载下具有极强的鲁棒性，未出现计算阻塞或死锁。

在总计 9 次实验任务中，仅有 2 次（任务 B 第 2 次、任务 C 第 3 次）因环境噪音或发音清晰度问题导致语音模块未能一次识别，需要测试者重复指令，一次性指令识别成功率约为 77.8%（7/9）。值得注意的是，在发生指令重复时，系统并未出现动作错乱或逻辑崩溃，展现了良好的人机交互容错性。

在 9 次包含“模拟试剂”（试管可能存在重量分布不均或外壁附着液体）的真实场景抓取任务中，抓取失败次数（滑落/未抓稳）为 0。这一数据直接验证了本系统末端执行器设计的卓越有效性：TPU 柔性夹爪的自适应包络能力，结合试管表面的防滑贴，极其有效地防止了试管滑落。系统实现了 100% 的抓取成功率，完全满足了化学实验对玻璃器皿安全性的严苛要求。

实验结论:

在接近真实的化学实验场景中，系统能够稳定、流畅地完成试管的拿起、放置与跨位置移动任务。任务执行时间的高度一致性（极差 < 2s）证明了解析法结合加权最小范数的轻量级逆运动学算法，以及分段限速的平滑控制策略，能够完美适配 Arduino 轻量级平台，并在真实物理负载下保持极高的运动平稳性与可预测性。

0 次抓取失败的实验结果，充分验证了“TPU 柔性包络+试管防滑贴”这一组合设计的工程价值。该设计以极低的硬件成本，彻底解决了传统刚性夹爪在化学实验室中易夹碎玻璃、易受液体干扰打滑的行业痛点，为易碎、湿滑器皿的自动化安全操作提供了可靠的解决方案。

针对实验中少数语音指令未能一次性成功识别的现象，未来研究需进一步提

升系统在复杂声学环境下的抗噪性能与识别鲁棒性。同时，计划通过扩充语音训练样本库，增强模块对非标准发音（如方言口音、吐字模糊或语速不均等）的泛化识别能力，从而全面优化人机交互的可靠性。

5.4.3. 使用访谈

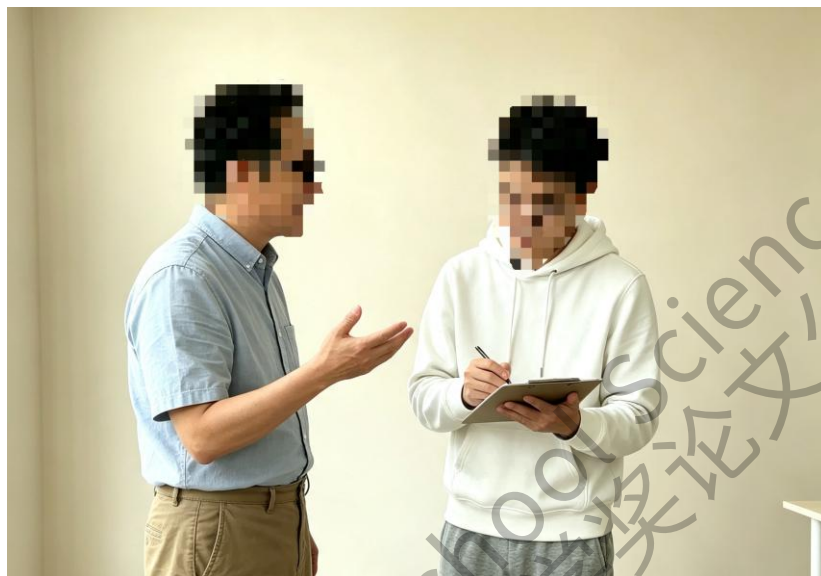


图 34 采访使用者

我们对使用者进行简单的访谈，并记录不同使用者的使用反馈，反馈如下：

1. 使用者 A：系统能够顺利完成试管的转移任务，但在运动平滑性与绝对定位精度上仍有提升空间。在机械臂到达目标位置并保持静止时，能观察到末端夹爪存在轻微的抖动现象；此外，末端落点仍存在一些偏差，尚未达到极高精度的工业级标准。
2. 使用者 B：语音交互的指令词过于死板，缺乏自然语言的语义泛化能力。系统目前只能严格匹配预设的固定句式（如必须说“将一号试管移动到二号位置”），如果使用者习惯性地使用意思相似的其他说法（例如用“把”代替“将”，或说“拿一号试管去二号”），系统便无法识别。这种僵化的交互方式增加了使用者的记忆负担，降低了操作的流畅度。
3. 使用者 C：系统能顺利完成试管的转移，解放了双手。但在实际操作中，我发现，试管上贴的防滑贴虽然抓得稳，但确实挡住了一部分视线。在真实的化学实验中，我们经常需要观察试管中下部液体的颜色变化或沉淀生成，防滑贴的存在多少会影响观察效果。

5.5. 结论概述

经实验，我们从可行性、实用性、科学性的维度上分别进行了测试，从上述

实验我们可以得知以下情况：

- **离线语音模块的超预期表现：**原以为离线语音模块易受环境干扰，但实测指令识别成功率高达 100%。这得益于我们在系统选型时直接采用了成熟的商用离线语音模块，其优异的底层硬件性能提供了极高的基础识别率。
- **打破常规的试管表面光滑的解决方案：**原以为将防滑贴粗糙面贴合试管即可增加摩擦，但实测发现光滑玻璃表面摩擦系数极低，防滑贴与试管间仍会发生相对滑动。因此我们打破常规，将防滑贴的“粘性面”直接贴附于试管表面，利用其外侧的高摩擦纹理与 TPU 柔性夹爪形成微观咬合，巧妙解决了光滑器皿的抓取打滑难题。
- **可行性上的主动权衡：**系统总响应延迟达 6 至 14 秒，远超预期的 2 秒。但这并非算力瓶颈，而是“用速度换安全”的主动工程权衡。为实现化学实验中绝对的“纯竖直插拔”与“零抖动”，我们刻意引入姿态约束与分段限速，成功化解了器皿易碎、易洒的核心痛点。

6. 总结

6.1. 课题成果

本文设计的声控柔爪化学实验机械臂系统，通过离线语音识别、TPU 柔性夹爪与轻量化逆运动学算法的协同配合实现，具有以下突出特点：

- **非接触式语音交互与高鲁棒性控制**：采用成熟的商用离线语音模块，结合软件层面的状态机防抖机制，实现了 100% 的指令识别成功率，并通过 armBusy 原子操作保护，彻底杜绝了执行过程中的指令冲突风险。
- **柔性顺应性抓取与逆向防滑设计**：TPU 柔性夹爪凭借鳍条效应实现自适应包络，提供 $\pm 5\text{mm}$ 的位置容差；将防滑贴粘性面贴附于试管表面，解决了光滑器皿的打滑难题。
- **轻量化高精度逆运动学求解**：针对 Arduino 算力受限的特点，采用解析法遍历结合加权最小范数优化，在微秒级解算时间内实现了 $\leq 1.6\text{mm}$ 的定位精度，完美平衡了计算效率与控制性能。
- **纯竖直插拔与姿态平滑约束**：通过末端姿态惩罚权重与分段限速策略，确保夹爪在抓取过程中始终保持近似竖直姿态，彻底消除了水平刮擦与惯性抖动，保障了化学器皿的操作安全。

本论文完成的主要工作包括以下几个方面：

- **系统硬件设计与搭建**：完成了 6 自由度机械臂的结构设计、TPU 柔性夹爪的 3D 打印与防滑优化、双电源隔离供电系统的搭建，以及语音模块接收指令的映射表。
- **逆运动学算法研究与实现**：建立了平面三连杆机构的运动学模型，设计并实现了基于末端姿态遍历的解析法求解器，引入加权最小范数策略实现了多解优化选取与关节限位保护。
- **舵机平滑控制与复合动作规划**：开发了基于线性插值的舵机平滑驱动算法，设计了 pick 与 drop 复合动作流程，实现了分段限速的自适应速度规划。
- **系统实验验证与性能评估**：完成了语音识别率、定位精度、抓取容差、响应延迟、任务执行及用户访谈等多维度实验，全面验证了系统在化学实验场景中的可行性、实用性与科学性。

6.2. 未来展望

本系统虽然在化学实验场景中实现了预期的基础功能，但在实际测试与用户访谈中仍暴露出以下不足：

- 系统仅能识别预设的固定句式（如必须说“将”而非“把”），使用者需严格记

忆指令词，交互体验不够自然。

- 由于舵机齿轮间隙等限制，末端仍存在一些定位偏差。
- 响应延迟较长，单次动作需 6~14 秒，在追求效率的连续实验场景中略显迟缓。
- 静止微抖现象，机械臂到位保持时末端存在轻微抖动，影响专业观感。

针对上述问题，在保持产品低成本、轻量化的特点的情况下，提出以下两项核心改进方案：

- **升级为高精度数字舵机：**将当前的普通模拟舵机更换为高精度数字舵机，提升末端定位精度。
- **引入低成本视觉闭环：**在末端加装一款便宜的摄像头，通过识别试管的视觉特征实现高精度的位姿反馈，将开环控制升级为“视觉-运动”闭环，继续消除位置偏差。
- **引入轻量级语义解析模块：**在语音模块与主控之间增加一层同义词映射字典（或接入边缘端大语言模型），将“把/将/移动/拿去”等指令归一化，实现自然语言意图识别。

若本方案实现商用，将在以下领域产生显著的社会效益：

- **化学实验室安全升级：**在高校、科研院所及化工企业，实现有毒、腐蚀性试剂的无人化操作，大幅降低实验人员职业暴露风险。
- **生物安全防护：**在 P2/P3 级生物安全实验室中，承担病毒样本、培养皿的自动化转运，减少人员与危险源的直接接触。
- **教育资源普惠：**以极低的硬件成本（百元级）为中小学 STEM 教育提供可编程的化学实验机器人，推动科学教育的智能化与公平化。
- **医疗无菌操作：**在核酸检测、血液样本处理等场景中，实现样本管的自动化分拣与转移，提升检测通量并降低交叉感染概率。

本课题中沉淀的多项关键技术，具备向其他领域迁移的广阔潜力：

- **轻量化逆运动学算法**可应用于教育机器人、低成本服务机器人、桌面级机械臂等资源受限平台，为机器人技术下沉至消费级市场提供算法支撑。
- **离线语音控制架构**可推广至智能家居免接触控制（如厨房烹饪场景下脏脏时的语音操控）、工业设备安全控制（在嘈杂车间中通过语音触发急停或模式切换）。
- **“用速度换安全”的工程权衡思想**可指导任何涉及易碎品、危险品操作的自动化系统设计，为工程决策提供方法论参考。

7. 收获与成长

本课题源于作者在化学实验课上的真实观察——人工操作试管存在交叉污染与器皿破损风险。这一痛点激发了作者的好奇心：能否用低成本的机械臂替代人手，实现安全、自动化的化学操作？当作者首次接触到 TPU 柔性夹爪的鳍条效应时，被其“刚柔并济”的顺应性抓取特性深深吸引，由此开启了本课题的研究。

研究中最大的挫折是逆运动学算法调试阶段，机械臂末端出现严重的“甩尾”与姿态失控。作者通过查阅大量文献，最终提出基于加权最小范数的多解优化策略，通过给末端姿态变化赋予更高惩罚权重，成功实现了姿态平滑控制。这一过程让作者深刻体会到：优秀的工程设计不是盲目追求算法的复杂，而是让算法与硬件算力、物理场景达到最完美的匹配。

作者想对同龄的研究者说：不要害怕失败，每一次失败都在告诉你物理世界的真实规律。本课题中防滑方案的三次迭代，正是从失败中提炼出最优解的真实写照。

本课题让作者掌握的最重要技能并非某一行代码或某个公式，而是“系统级工程思维”——学会在硬件限制、算法复杂度、使用场景之间进行综合权衡。这种思维方式，将成为作者未来科研道路上最宝贵的财富。

8. 参考文献

- [1]杨妍,刘志杰,韩江涛,等.软体机械臂的驱动方式、建模与控制研究进展[J].工程科学学报,2022,44(12):2124-2137.DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2021.06.10.001.
- [2]Lupo M ,Sebastiano F ,Hatem F , et al.A soft cable loop based gripper for robotic automation of chemistry[J].Scientific Reports,2024,14(1):8899-8899.DOI:10.1038/S41598-024-59372-1.
- [3]Yengantiwar Y, Shinde V, Pawar Y, et al. Voice controlled Robotic Arm[J].Iconic Research And Engineering Journals, 2023, 7(3): 52-56.
- [4]张豹林,严国涌,白涛,等.烟叶采摘柔性夹爪夹持特性分析与参数优化[J].南方农机,2025,56(15):128-131+134.
- [5]马光,申桂英.基于神经网络的冗余度机器人运动学控制[J].高技术通讯,2002,(1):75-77.
- [6]江沛,黄水华,韦巍,等.带关节约束的非冗余机械手臂二阶逆运动学控制[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(10):1885-1892.
- [7]王珊.从专利角度分析非接触式人与电梯交互的技术发展[J].中国电梯,2024,35(10):75-78.
- [8]南京大学,南京南欣医药技术研究院有限公司.一种基于六轴机械臂的化学实验自动化系统:202010523651.4[P].2020-09-15.
- [9]安徽师范大学.一种语音控制的机械臂拾取装置:201721569395.2[P].2018-08-28.
- [10]南京航空航天大学.一种用于工业机器人的末端柔性机械抓取装置:201910031728.3[P].2019-04-19.

9. 附录

9.1. 相关代码

```
43 float max_diff = 0;
44 for (int i = 0; i < N_SERVOS; i++) {
45     float diff = abs(angles[i] - prev_angles[i]);
46     if (diff > max_diff) max_diff = diff;
47 }
48
49 // 极小变化直接执行，避免浮点误差导致死循环
50 if (max_diff < 0.5) {
51     for (int i = 0; i < N_SERVOS; i++) {
52         servos[i].write(angles[i]);
53         prev_angles[i] = angles[i];
54     }
55     return;
56 }
57
58 // 计算步数：每步 delay 10ms，每步最大移动角度 = 速度 * 0.01
59 float step_size = max_speed_deg_per_sec * 10.0 / 1000.0;
60 int steps = (int)(max_diff / step_size);
61 if (steps < 1) steps = 1;
62
63 // 逐步插值，所有关节同步匀速移动
64 for (int s = 1; s <= steps; s++) {
65     float t = (float)s / steps;
66     for (int i = 0; i < N_SERVOS; i++) {
67         float step_val = prev_angles[i] + (angles[i] - prev_angles[i]) * t;
68         servos[i].write(step_val);
69     }
70     delay(10); // 固定 10ms 控制频率，保证平滑
71 }
```

图 35 平滑驱动舵机部分代码

```
113 for (int i = 1; i * step < max_alpha; i++) {
114     float alpha = i * step;
115     for (int sign = -1; sign <= 1; sign += 2) {
116         float alpha_signed = alpha * sign;
117         float xw = target_x - c * cos(alpha_signed);
118         float yw = target_y - c * sin(alpha_signed);
119
120         float cos_phi = (a*a + b*b - xw*xw - yw*yw) / (2*a*b);
121         cos_phi = constrain(cos_phi, -1.0, 1.0);
122
123         float phi_roots[2] = { acos(cos_phi), -acos(cos_phi) };
124         for (int k = 0; k < 2; k++) {
125             float phi = phi_roots[k];
126             if (phi < PI/2 || phi > 3*PI/2) continue;
127
128             float theta = atan2(yw, xw) + atan2(b*sin(phi), a - b*cos(phi));
129             if (theta < 0 || theta > 2*PI/3) continue;
130
131             float psi = alpha_signed - phi - theta + 2*PI;
132             if (psi < PI/2 || psi > 3*PI/2) continue;
133
134             float cost = sq(theta - cur_theta) + sq(phi - cur_phi) + sq(psi - cur_psi);
135             if (cost < best_cost) {
136                 best_cost = cost;
137                 p1_theta = theta; p1_phi = phi; p1_psi = psi;
138                 phase1_has_candidate = true;
139             }
140         }
141     }
142 }
```

图 36 运动学解算部分代码

```

177 // =====
178 // 4. 复合动作（去除了所有冗余 delay，由速度控制时间）
179 // =====
180 void pick(int pos) {
181     if (DEBUG) Serial.print("[PICK] Start picking tube #"); Serial.println(pos);
182
183     turn_to(pos); // 内部已平滑转动
184
185     move_to(x_tubes[pos], y_tube);
186     smooth_write_angles(30); // 下降时速度慢一点（30度/秒），更平稳防抖
187
188     close_gripper();
189     smooth_write_angles(60); // 夹爪闭合稍快（60度/秒）
190     delay(200); // 物理夹紧时间
191
192     float start_x = x_tubes[pos];
193     float end_x = start_x - delta_x;
194     int target_y = y_tube + delta_y;
195
196     for (float cur_y = y_tube; cur_y <= target_y; cur_y += y_step) {
197         float progress = (cur_y - y_tube) / delta_y;
198         if (progress > 1.0) progress = 1.0;
199         float cur_x = start_x + (end_x - start_x) * progress;
200
201         move_to(cur_x, cur_y);
202         smooth_write_angles(50); // 抬升速度 50度/秒
203     }
204
205     if (DEBUG) Serial.println("[PICK] Done");
206 }

```

图 37 复合动作部分代码

9.2. 原始数据（手稿等）

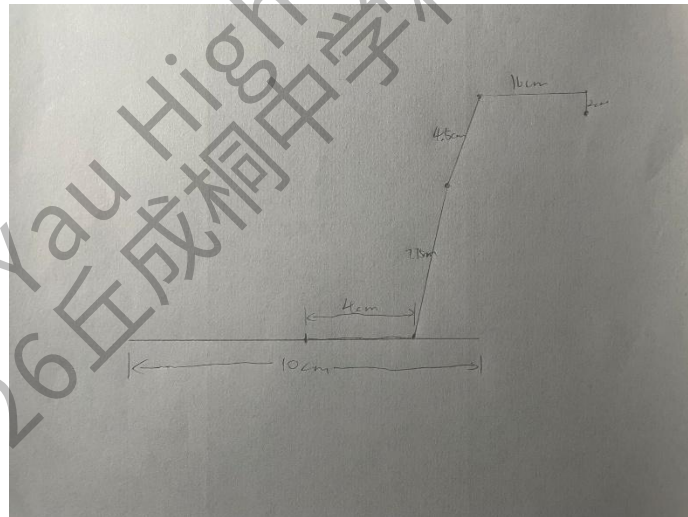


图 38 机械臂各轴长度数据

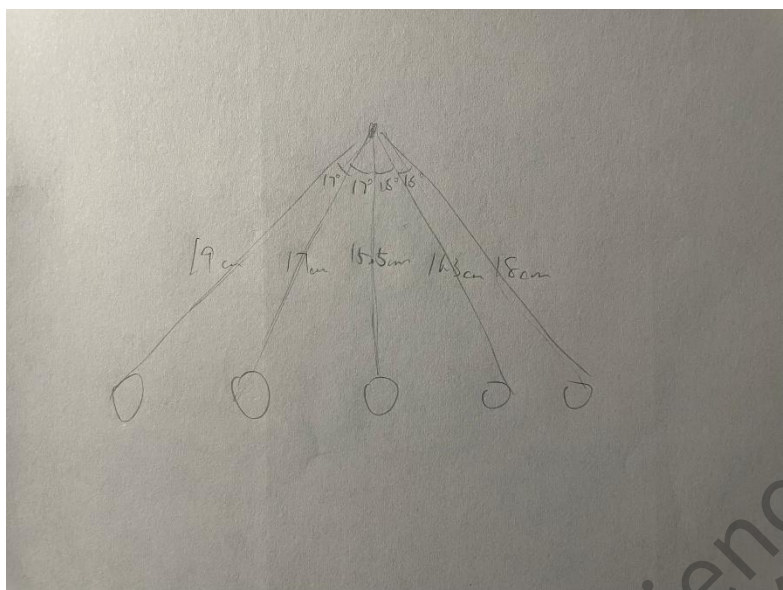


图 38 机械臂到五个试管位置的距离及角度数据

9.3. 实验过程性记录（其他更多的照片）

命令	动作	坐标	坐标
拿起一号试管	拿起一号试管	AA 55 00 01 FB	AA 55 00 01 FB
拿起二号试管	拿起二号试管	AA 55 00 02 FB	AA 55 00 02 FB
拿起三号试管	拿起三号试管	AA 55 00 03 FB	AA 55 00 03 FB
拿起四号试管	拿起四号试管	AA 55 00 04 FB	AA 55 00 04 FB
拿起五号试管	拿起五号试管	AA 55 00 05 FB	AA 55 00 05 FB
放到一号位置	放到一号位置	AA 55 00 06 FB	AA 55 00 06 FB
放到二号位置	放到二号位置	AA 55 00 07 FB	AA 55 00 07 FB
放到三号位置	放到三号位置	AA 55 00 08 FB	AA 55 00 08 FB
放到四号位置	放到四号位置	AA 55 00 09 FB	AA 55 00 09 FB
放到五号位置	放到五号位置	AA 55 00 0A FB	AA 55 00 0A FB
将一号试管移到二号位置	将一号试管移到二号位置	AA 55 00 0B FB	AA 55 00 0B FB
将一号试管移到三号位置	将一号试管移到三号位置	AA 55 00 0C FB	AA 55 00 0C FB
将一号试管移到四号位置	将一号试管移到四号位置	AA 55 00 0D FB	AA 55 00 0D FB
将一号试管移到五号位置	将一号试管移到五号位置	AA 55 00 0E FB	AA 55 00 0E FB
将二号试管移到一号位置	将二号试管移到一号位置	AA 55 00 0F FB	AA 55 00 0F FB
将二号试管移到二号位置	将二号试管移到二号位置	AA 55 00 10 FB	AA 55 00 10 FB
将二号试管移到三号位置	将二号试管移到三号位置	AA 55 00 11 FB	AA 55 00 11 FB
将二号试管移到四号位置	将二号试管移到四号位置	AA 55 00 12 FB	AA 55 00 12 FB
将二号试管移到五号位置	将二号试管移到五号位置	AA 55 00 13 FB	AA 55 00 13 FB
将三号试管移到一号位置	将三号试管移到一号位置	AA 55 00 14 FB	AA 55 00 14 FB
将三号试管移到二号位置	将三号试管移到二号位置	AA 55 00 15 FB	AA 55 00 15 FB
将三号试管移到三号位置	将三号试管移到三号位置	AA 55 00 16 FB	AA 55 00 16 FB
将四号试管移到一号位置	将四号试管移到一号位置	AA 55 00 17 FB	AA 55 00 17 FB
将四号试管移到二号位置	将四号试管移到二号位置	AA 55 00 18 FB	AA 55 00 18 FB
将四号试管移到三号位置	将四号试管移到三号位置	AA 55 00 19 FB	AA 55 00 19 FB

图 39 指令映射表制作过程

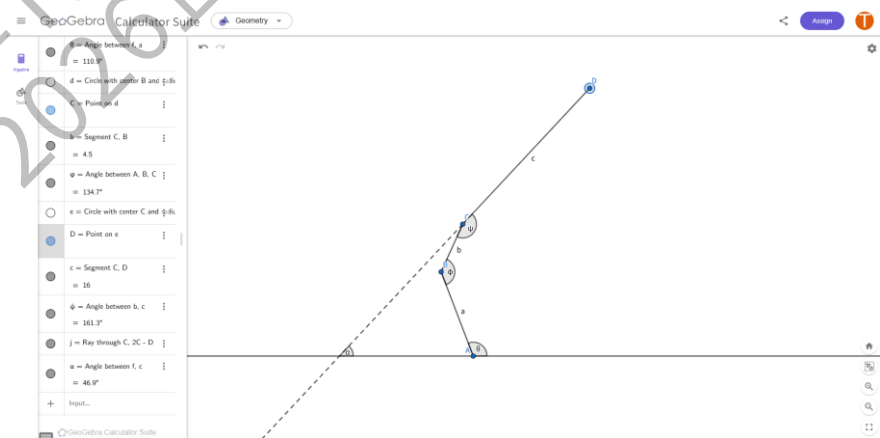


图 40 机械臂简化图绘制过程



图 41 机械臂拿起试管过程

10. 致谢

本课题“声控柔爪：面向危险化学实验的软体机械臂远程操作平台设计”源于我对实验室安全的关注。我自行调研后确定将声控与柔性夹爪结合，用于危险化学试剂的远程抓取。研究历时约两个月，由我独立参赛，指导老师张一凡全程无偿指导。

一、指导老师贡献

张老师在选题时肯定了我的跨学科思路，建议关注抓取稳定性。在硬件搭建中，张老师与我共同完成结构装配、电路接线，并帮助完成了机械臂底座与连杆的 3D 建模及打印。在算法上，张老师建议从实际算力出发评估技术路线，并在后续给予方向性指导。在论文撰写中，张老师审阅了摘要逻辑、数据呈现与结论呼应。

二、参赛学生分工（个人参赛）

我独立承担全部执行工作：

- **选题与调研：**自主查阅文献，拟定课题框架。
- **硬件搭建：**负责整体设计、舵机选型、软体夹爪气路；张老师协助电路焊接、电源布线及电平匹配，并独立完成 3D 建模打印。
- **数据获取：**手动采集舵机标定、末端误差、抓取成功率等全部数据。
- **算法与代码：**我提出几何解析解的思路，借助 AI 辅助完成数学推导和全部代码实现（含逆运动学求解、舵机控制、语音解析等），张老师提供宏观逻辑审阅。
- **实验设计：**自主设计测试方案，张老师对安全性与重复性提出建议。
- **论文撰写：**独立起草全文，张老师审阅逻辑与表达。

三、他人协助

除张老师外无其他人员协助。AI 工具仅用于辅助推导、代码编写，所有核心决策由我负责。

四、主要困难与解决

1. **算法选型：**初期尝试强化学习。但以 Arduino UNO 算力完全无法进行推理，且训练周期过长，于是改用工学几何解析法，满足实时要求。推导和编码借助 AI 完成。
2. **试管打滑：**玻璃试管表面过滑，夹爪内贴防滑贴无效。张老师提出将防滑贴改贴于试管外壁，实施后抓取成功率显著提升。
3. **舵机精度有限：**舵机的角度转动有误差，属硬件缺陷，无法软件解决，故未尝试，仅在论文中列为已知局限。

五、结语

本研究过程公开透明，所有实验记录、代码及原始数据均存于本地可查。再次感谢张一凡老师的无偿指导与耐心教诲，感谢学校实验室提供的场地与基础工具支持，也感谢本次赛事为中学生科技实践搭建的宝贵平台。这份作品虽然仍有诸多不成熟之处，却是我在真实问题驱动下独立探索工程实践的一次难忘经历。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示