中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

中国科学院大学2025年研究生
前沿交叉学科学术论坛

科研创新大赛
项目汇编

中国科学院大学前沿交叉科学学院
二零二五年十一月

科研创新大赛晋级决赛小组目录

所属领域	项目编号	项目名称
人工智能	AI002	AI 技术在遥感地理领域的应用调研
	AI003	AI 驱动的多尺度过程工程：从分子到工厂的统一优化框架
	AI009	大模型时代下的软件安全“智能护卫”
	AI014	多模态大模型：从鲁棒感知、模式识别到跨模态语言智能的生成与对抗
	AI015	多模态大模型记忆协同框架研究
	AI019	复杂系统的认知与决策理论与方法研究
	AI022	火星矩阵：深空蜂群智能纪元——面向可持续探索的自主协同感知网络
	AI025	基于生成式 AI 的单目图像三维场景可控重建与编辑调研报告
	AI026	基于主动知识构建的临床决策智能体
	AI039	数控加工、生物医学、网络安全、材料科学与自动驾驶若干子领域调研
	AI040	数字生命——从分子设计、扰动建模到多尺度生命系统建模研究
集成电路	IC003	高可靠光电互连集成电路研究
	IC004	互补式场效应晶体管（CFET）：后摩尔时代集成电路的关键路径与挑战
人工智能与集成电路交叉	AI&IC004	基于通用处理器的结构优化研究
	AI&IC006	面向 Tb/s 级互连的玻璃基光电共封装关键技术研究

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛

研究小组项目汇编

报告题目	“遥感天地，慧察乾坤”： AI 技术在遥感地理领域的应用调研	
研究小组名称	AI 赋能遥感地理小组	
研究小组成员	姓名	学号
	黄宇鸿	202518023429029
	谈方杰	202518023407001
	窦知阳	202518023427004
	丁涛	2025D8023482004
	阎和玉	202518023427001
	王子鹏	202518023427003
指导教师	孙显，黄志蓓，焦建彬，马坷，张兵	
关键词	遥感，地理，人工智能	

[摘要]本研究聚焦 AI 技术在遥感地理领域的应用瓶颈，针对 SAR 图像跨角度生成物理保真度不足、地理定位推理可解释性弱、农作物分类数据融合不深、无人机目标检测鲁棒性差等问题，围绕可见光 - 全息 SAR 跨模态生成、街景地理定位与场景理解、多模态农作物精细分类、无人机多模态目标检测四大方向展开研究。通过融合物理约束与 DiT 等架构、构建多模态地理数据集与视觉思维链框架、嵌入农学先验知识、设计轻量化多模态融合模型等手段，突破现有技术在数据依赖、模态融合、可解释性及工程化应用上的局限，旨在形成数据高效、深度融合、可解释性强的智能遥感解决方案，推动 AI 遥感技术从技术可行迈向工程实用。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

合成孔径雷达（SAR）凭借全天候观测能力成为对地观测核心手段，但单一角度成像难以完整刻画目标散射特性，且 SAR 图像解译面临相干斑噪声、“所见非所得” 等问题，高度依赖海量标注数据；可见光图像易获取但与 SAR 模态特性差异显著。同时，全球街景地理定位存在视觉特征与地理坐标匹配精度低、复杂场景鲁棒性不足问题，精准农业作物分类受限于单一数据、人工依赖，无人机遥感目标检测适配性差、单模态易受环境干扰。AI 技术（如扩散模型、Transformer）为解决上述问题提供了技术支撑，本研究旨在突破现有 AI 遥感技术局限，构建新一代智能遥感模型，为遥感领域关键问题提供高效可靠的解决方案。

（二）领域现状

1. SAR 图像生成：GANs 模型应用于跨角度生成但存在训练不稳定、物理可解释性差问题，扩散模型展现出优势但物理约束融合不足。
2. 地理定位：经历手工特征、深度学习、多模态交互式阶段，现有方法依赖静态视觉编码，推理过程不可解释，跨模态语义割裂，评测体系缺乏对中间推理过程的诊断。
3. 农作物分类：从像素级方法、深度学习语义分割向多模态深度融合演进，基础模型降低了开发门槛，但存在知识融合不足、空间建模隐式、业务化流程缺失问题。
4. 无人机目标检测：单一模态受环境影响大，且模型参数量大难以部署于边缘设备，复杂场景遮挡漏检率高。

（三）当前存在的问题

1. SAR 跨模态生成：多角度散射特性建模不足、角度外插泛化性差、扩散模型与物理约束融合难，生成结果物理保真度低，全息数据生成缺失，高精度配对数据稀缺。
2. 地理定位与场景理解：多模态信息地理语义融合难，推理可解释性差，交互式机制缺失，空间语义理解静态化，视觉思维链落地难，评测体系无法衡量推理过程。
3. 农作物精细分类：跨模态数据语义对齐与尺度统一难，物候规律与模型解耦，空间上下文建模缺失，从分类到决策的价值链闭环断裂。
4. 无人机目标检测：单一模态适应能力差，复杂场景遮挡漏检率高，边缘设备部署难，多模态融合范式固定无法适配光照变化。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

1. SAR 多角度/跨模态生成：实现从高物理保真度多角度全息 SAR 数据，提升生成结果的电磁散射一致性与下游任务效用。
2. 地理定位与场景理解：构建多模态地理数据集与客观评测基准，实现可解释、可交互的地理推理，提升定位精度与空间认知能力。
3. 农作物精细分类：构建 “数据 - 模型 - 应用” 全链条方案，提升分类精度与泛化能力，打通从分类图到农事决策的转化路径。
4. 无人机多模态目标检测：设计多尺度、动态融合、轻量化模型，提升复杂场景下检测精度与实时性，适配无人机边缘设备部署。

（二）技术方法与理论工具

1. SAR 生成：基于 DiT 等框架，集成雷达物理感知编码器探索高物理保真度的 SAR 图像生成方法。
2. 地理定位与场景理解：构建 MG-Geo 数据集与地理推理评测基准，设计地理知识注入的多模态大模型引入推理链驱动的分割机制。
3. 农作物精细分类：整合多源遥感数据与农学知识，构建多模态注意力融合网络，嵌入物候损失函数封装自动化业务应用框架。
4. 无人机目标检测：设计可见光 - 红外联合多尺度模型、轻量化主干网络，结合通道剪枝与知识蒸馏实现模型轻量化，部署至边缘设备。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	AI 驱动的多尺度过程工程：从分子到工厂的统一优化框架	
研究小组名称	过程“智”造	
研究小组成员	姓名	学号
	朱逸帆	2025D8023484006
	王雯雯	2025D8023484001
	林雪城	2025D8023484004
	杨智广	202518023429069
	秦梦凯	202518023422003
	龙祖熙	202518023429037
	赵辰	202418008208013
指导教师	王二强	
关键词	多尺度过程工程，AI 驱动优化，跨尺度建模，物理信息机器学习，逆向设计	

[摘要]多尺度过程工程旨在构建从分子到工厂的全链条建模与优化方法体系，是化工、材料等领域智能化的核心。AI 技术为其带来了新范式，通过机器学习等方法提升了材料设计与过程优化的效率。然而，该领域仍面临数据与机理融合不足、跨尺度耦合困难、模型泛化能力弱及实时优化滞后等挑战。本研究拟通过构建“机理+AI”融合的代理模型、开发多目标逆向设计框架、实现智能调控与先进控制，突破现有瓶颈，推动多尺度过程工程的实用化发展。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

多尺度过程工程是实现从分子尺度到工厂系统智能设计与优化的关键交叉学科。在超材料、膜分离等前沿领域，微观结构的精确调控直接决定产品性能[1, 2]。传统的试错法难以应对复杂体系，而新兴的 AI 技术（如机器学习、强化学习）通过数据驱动建模，显著提升了材料预测与工艺优化的能力，为实现高效、低碳的工业过程提供了全新路径[3, 4]。

（二）领域现状

当前，多尺度建模方法已形成系统的多层次技术体系。在分子尺度，分子动力学和量子化学计算是研究微观动力学与反应机理的核心工具，但面临计算效率与精度的平衡难题[5, 6]。介观尺度通过相场法、元胞自动机、耗散粒子动力学等方法，有效连接了微观机制与宏观现象，在模拟枝晶生长、复杂流体等过程中表现出色[7, 8]。宏观尺度则主要依托连续介质理论和计算流体力学进行设备与系统级建模[8, 9]。在 AI 驱动优化方面，深度学习在分子特性预测、强化学习在过程控制、知识图谱与数字孪生在系统集成方面均展现出强大潜力[1, 3, 10]，构建了从微观到宏观的全链条优化体系。然而，科研端的高精度模型与产业端的实用需求之间存在显著差距，模型的可信度、实时性及跨尺度耦合机制仍是制约其广泛应用的关键。

（三）当前存在的问题

本领域发展面临着三重挑战。科学问题上，数据与机理难以深度融合，AI 模型在数据稀缺时物理合理性差[11]；跨尺度信息传递理论不完善，易引发非物理现象[8]；AI 模型可解释性不足，且多目标、高维度的跨尺度协同优化极为复杂[12]。

技术瓶颈上，跨尺度数据异构性导致融合困难；代理模型泛化能力弱，易受工况扰动；实时计算与部署能力不足；软件平台集成度低，缺乏统一标准[4]。应用挑战上，实时优化滞后无法满足产线需求，系统级目标冲突，安全性认证与知识产权风险突出，同时兼具 AI 与工业知识的复合型人才严重短缺[13]。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

本研究旨在系统解决“数据与机理融合”、“代理模型通用性”、“跨尺度协同优化”和“实时计算”等关键问题。具体目标包括：构建“机理+AI”融合的跨尺度高保真代理模型，以提升模型的物理合理性与泛化能力；实现 AI 驱动的多目标“逆向设计”，攻克从材料结构到工艺参数的反向推导难题；研发面向复杂系统的智能调控与先进控制策略，以应对实时决策与系统不确定性的挑战，最终形成一套从分子设计到系统优化的理论方法体系与关键技术支撑。

（二）技术方法与理论工具

为实现上述目标，本研究将采用分阶段、多技术融合的研究路径。第一阶段，聚焦于构建机理-AI 耦合的跨尺度高保真代理模型。我们将采用 LAMMPS、COMSOL/OpenFOAM 等多尺度仿真工具生成高通量数据，并运用图神经网络、卷积神经网络等深度学习模型构建代理模型。关键创新在于引入化学工程“介科学”的“竞争中协调”原理，设计具备“记忆”与“遗忘”机制的自正则化模型架构，旨在将物理约束深度嵌入 AI 模型，从而显著提升其在噪声和工况变化下的稳健性与泛化能力。第二阶段，致力于实现 AI 驱动的多目标“逆向设计”。我们将以第一阶段构建的高保真代理模型作为快速评价器，耦合遗传算法、多目标粒子群优化等启发式算法，建立逆向设计框架。该框架将用于解决等级孔材料、离子液体界面等体系在多维参数空间下的多目标优化问题，从而由目标性能反向推导出最优的材料结构或分子设计。第三阶段，研发面向复杂系统的智能调控与先进控制。针对如锂电池固废热解、双效精馏等高能耗、高不确定性过程，我们将采用神经网络进行系统辨识，并应用模型预测控制、自抗扰控制及强化学习等先进控制方法，构建融合 AI 预测模型的实时调控系统，以实现过程的节能、安全与稳定运行，有效解决实时优化滞后的应用挑战。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	大模型时代下的软件安全“智能护卫”	
研究小组名称	AI&SE 研究小组	
研究小组成员	**姓名**	**学号**
	刘珺	202518023459003
	段飞燕	202518023429023
	孙天天	202518023459002
指导教师	窦文生 张健 王俊杰 严俊 燕季薇	
关键词	大语言模型，软件安全，智能缺陷检测，静态应用安全测试（SAST），规则生成与优化	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

[摘要] 随着 AI 辅助代码生成与代码规模扩张，逻辑漏洞与投毒后门等安全风险上升，传统静态应用安全检测（SAST）因规则僵化与语义适配不足难以应对长链跨域缺陷，而大语言模型（LLM）在推理链完整性与上下文一致性方面亦存在局限。为此，本项目提出基于“静态分析+认知智能”的双路径智能护卫体系：一是 LLM 辅助的 SAST 增强研究，以 LLM 赋能规则生成与规则库闭环优化，提升静态检测对复杂、跨文件缺陷的覆盖与精确度；二是 LLM 驱动的缺陷检测研究，以模型为中心，通过构建高质量缺陷数据集、设计缺陷推理能力增强方法，提升模型对长链、高复杂度缺陷的检测能力。总体构建高精度、覆盖广泛且可持续演进的软件安全检测体系。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

随着软件系统规模扩大与 AI 生成代码普及，软件安全正由传统漏洞修补转向全生命周期治理。真实工程中的漏洞不仅威胁数据隐私与业务稳定，还可能在复杂供应链中引发连锁风险[1]。同时，LLM 等生成技术虽提升开发效率，却带来投毒攻击[3]、安全退化[4]与隐性后门[5]等新风险，使代码安全更隐蔽、复杂。

静态应用安全测试（Static Application Security Testing, SAST）作为早期防线承担自动发现缺陷的角色，受规则僵化、误报高与语义适配不足等限制[6][7]，在复杂工程中检出率低、误报与漏报突出[8][9][10]，难以满足大模型时代的软件安全需求。随着大语言模型（Large Language Model，LLM）代码理解能力的提升，LLM 辅助的 SAST 增强技术、LLM 驱动的缺陷检测技术有重要理论与应用价值。

（二）领域现状

大语言模型具备语义理解能力，可以解析代码中的注释、变量名等语义信息，实现高质量的程序分析与缺陷检测。目前有两条主流技术路线，LLM 可以增强 SAST[11]的缺陷检测效果，也可以直接驱动缺陷检测。

1. LLM 辅助的 SAST 增强的研究现状：现有研究分为三个方向：（1）LLM 辅助 SAST 预处理：自动识别污染源、汇聚点及第三方 API 行为[12][13]；（2）LLM 后处理增强：过滤 SAST 误报[6]、改善报告可读性[15][16]；（3）端到端 SAST 工具增强：将建模、检测与验证结合[[14][17][18]，实现更智能的缺陷识别。

2. LLM 驱动的缺陷检测的研究现状：LLM 直接用于缺陷检测的研究亦在发展，但受限于推理不足、上下文处理能力有限及幻觉问题，整体效果仍不稳定[2]。

（三）当前存在的问题

1. LLM 辅助的 SAST 增强研究仍面临的核心问题：传统 SAST 规则依赖人工维护，定制成本高；LLM 虽可辅助 API 建模或误报过滤，但优化难以沉淀至规则库，导致真实漏洞检出率仍低。同时，对于跨文件、跨函数的长链路径，LLM 对数据流与控制流的理解有限，复杂路径可达性判断不足，仍易产生误判。

2. LLM 驱动的缺陷检测研究仍面临的核心问题：直接依赖 LLM 进行缺陷检测时，模型推理链条不完整、关键条件识别不足，对长链依赖的上下文建模能力有限，易在多轮生成中产生幻觉，导致上下文失真并影响最终判定准确性。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

本研究旨在构建面向大模型时代的软件安全“智能护卫”体系，整体方案的研究框架图如图 1 所示。

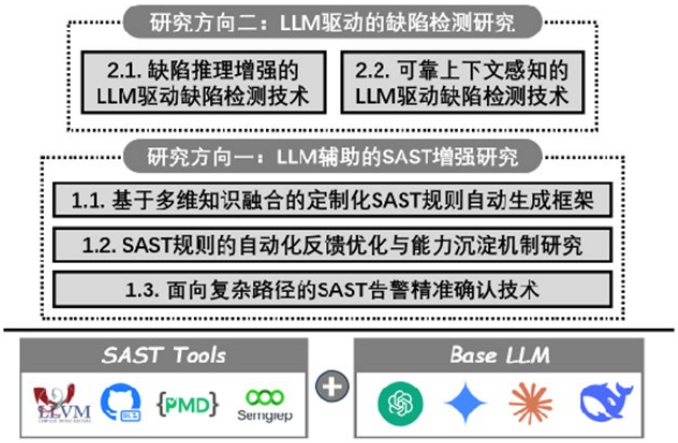


图 1 拟研究内容总体框架

（二）技术方法与理论工具

本研究围绕“LLM 辅助 SAST 增强”与“LLM 驱动缺陷检测”两条主线构建技术体系。首先，构建多维 SAST 知识库，并结合 RAG 引导 LLM 生成语义一致的规则，实现从自然语言到可执行规则的自动转化。其次，引入规则优化 Agent，通过误报样例与回归测试实现规则的自动修复与持续优化。在路径分析中，利用 AST、CFG、DFG 与程序切片提取关键上下文，并结合 LLM 条件抽取与 SMT 求解器完成路径可达性验证。在缺陷检测方面，通过程序切片构建致错路径数据集，对模型进行微调与推理增强，并以异构验证和多视角一致性机制提升上下文可靠性，形成智能化的软件安全分析体系。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	多模态大模型：从鲁棒感知、模式识别到跨模态语言智能的生成与对抗	
研究小组名称	多模态前沿研究小组	
研究小组成员	姓名	学号
	许为鑫	202518023429081
	王坤辉	202518023429002
	花明	202518023429141
	徐笑然	202518023429083
	唐禧	202518023429073
	张沐	202518023429027
	刘念	202518023429043
	李代鹏	202518023429005
指导教师	焦建彬、徐常胜、杨小汕、胡卫明、黄凯奇、叶齐祥、钱胜胜	
关键词	多模态大语言模型、跨模态智能、可控生成	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

[摘要]本项目面向真实应用场景中多模态大模型的易用性、可控性与可靠性三大关键需求，提出一套完整的技术方案。首先，在模型层面统一图像、文本等多模态信息，构建从感知、语言理解到任务决策的一体化框架，为后续扩展至更多模态与应用场景提供基础。其次，通过对抗训练和复杂环境建模，系统提升模型在低照度、遮挡、噪声及分布外输入等条件下的鲁棒性，并增强对跨模态攻击的防御能力。最后，在生成与应用侧引入清晰的条件约束与结果校验机制，形成“生成—校验—追溯”的闭环，保证跨模态生成内容更加贴合事实与业务规则，可支撑工业质检、医疗分析和交互体验评测等重点领域的落地应用。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

随着图像、文本、语音等多源数据在工业、医疗和交互系统中大量出现，仅依靠单一模态模型已难以满足对理解、决策和生成的综合需求。多模态大模型通过统一表示语言与视觉等信息，有望在同一框架内完成“看得懂、说得清、做得准”的闭环。本项目面向真实应用场景，聚焦多模态大模型的易用性、可控性与可靠性三大需求，目标是在保证工程可落地的前提下，提高系统在复杂环境下的稳定性与输出质量，契合当前智能制造、数字医疗与安全可信 AI 的发展方向。

（二）领域现状

现有多模态大模型大致经历三类技术路线：一是以对比学习和双编码结构为代表的高效检索范式，侧重构建共享嵌入空间；二是以大语言模型为核心的统一/解码式架构，将视觉信息映射到语言空间，实现从理解到生成的一体化能力，并通过指令微调提升交互体验；三是引入检索增强、外部工具与多模态 Agent，把外部知识与工具调用纳入工作流。鲁棒性与生成控制方面已有对抗训练、场景增强和可控生成等探索，但整体上多集中于单一模块或单一任务，缺乏面向真实场景的一体化解决方案。

（三）当前存在的问题

产业实践中，多模态系统往往“各一摊”：模型结构与数据流程分散，难以复用和扩展；在低照度、遮挡、噪声等复杂条件下性能波动明显；生成结果缺乏可靠约束与自动校验，事实性错误与幻觉增加人工审核成本。学术研究则主要存在三方面不足：尚未形成统一清晰的多模态建模与任务抽象框架；对跨模态对抗

攻击的系统性防御不足；生成内容的“可控可验”机制与评估指标仍不完善。这些痛点构成本项目的主要切入点。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

围绕“易用、可控、可靠”三大需求，本项目拟实现以下目标：

构建一体化多模态大模型框架：在模型层面统一语言、视觉等模态的表示与推理流程，形成从感知、语言理解到任务输出的一体化架构，为后续增加新模态、新任务提供统一接口。

提升复杂场景下的鲁棒性与安全性：通过对抗训练和不利环境建模，使模型在低照度、遮挡、噪声和分布外输入等条件下保持较稳定表现，并具备对跨模态对抗攻击的一定防御能力，实现“可防可测”。

实现跨模态生成的可控与可验证：在生成与应用侧引入清晰的条件约束和结果校验机制，构建“生成—校验—追溯”的闭环，保证生成内容贴合事实、符合业务规则，支撑工业质检、医疗分析和交互体验评测等重点应用。

（二）技术方法与理论工具

为实现上述目标，项目主要采用以下技术路线：

多模态统一建模：设计统一的多模态嵌入与语义对齐机制，将检测、检索、问答、生成等任务抽象为统一的“条件推理—结果输出”模式，简化系统集成。

鲁棒感知与对抗防御：构建覆盖复杂环境与跨模态扰动的数据集与增强策略，结合对抗样本生成、模态不变特征约束和不确定性估计，提升模型在复杂场景和攻击下的稳定性。

可控生成与结果校验：在生成端引入结构化条件和业务规则，通过检索增强与轻量校验模块，对生成内容进行一致性与事实性检查，并设计与场景匹配的评价指标，用于量化“可控可验”的效果。

整体上，本项目在统一框架、鲁棒与安全防御、可控生成与校验三个层面形成闭环，与摘要中的“三大亮点”一一对应，兼顾学术探索与实际落地。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	多模态大模型多源记忆协同框架研究	
研究小组名称	多模态大模型研究小组	
研究小组成员	**姓名**	**学号**
	杨淳尧	202518023429047
	林子涵	202418013229039
	马欣蕾	202318019427033
	陈思炀	202518023429103
	宋庭聿	202518023429088
	刘志博	202518023429045
指导教师	王亮、赫然、吴书、李国荣	
关键词	多模态大模型，智能体，多源记忆协同	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

[摘要]本研究聚焦于构建多模态大模型的多源记忆协同框架，旨在解决当前智能体在记忆修正精度、持续演化能力和多源信息协同方面的核心挑战。针对“定位难、演化难、协同弱”三大问题，项目提出融合知识编辑、持续学习与多源整合的统一记忆底座，实现对模型内部参数记忆的精准修正，并结合外部知识库与用户交互记忆，构建可追溯、可验证的“读-写-更新”闭环机制。通过在“磐石”科研大模型上的应用验证，推动智能体从静态参数库向具备动态认知与长期记忆能力的自主系统跃迁，助力 AI for Science 范式变革。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

随着人工智能技术的快速发展，智能体作为实现通用人工智能的关键路径，已成为国家战略和产业布局的核心方向。2025 年 8 月国务院印发的《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》明确提出，到 2027 年新一代智能终端、智能体等应用普及率将超过 70%。在这一背景下，构建具备动态认知与长期记忆能力的智能体，成为推动人工智能可持续进化的关键。记忆系统是支撑智能体进行动态决策以及持续学习的核心。在多模态、长程交互和复杂任务场景下，现有技术仍面临“会找不会记”或“能记不易修”的困境。因此，重构大模型的记忆系统，构建一个可精确修正、可持续更新、可审计治理的统一记忆底座，不仅具有重要的理论价值，也对科研助理、企业知识管理等实际应用场景具有深远意义。

（二）领域现状

目前，国内外科技公司已在智能体领域广泛布局，例如 Cursor 编辑器、以及谷歌 DeepResearch 等。学术界也在积极探索大模型记忆系统的演进路径。短期记忆多依赖于上下文工程和键值缓存机制，而长期记忆则通过指令微调、强化学习人类反馈、知识编辑以及非参数化检索增强等方式实现。

尽管已有多种技术手段用于增强模型记忆能力，但这些方法往往孤立存在，缺乏统一框架下的协同机制。

（三）当前存在的问题

在真实应用场景中，多模态大模型的记忆系统仍面临三大关键挑战：记忆修正精度低、记忆演化易遗忘、多源记忆难协同。首先是“定位难”，即内部参数记忆难以精确定位，导致知识编辑过程中出现靶点不清、外溢干扰等问题。其次

是“演化难”，表现为缺少“读/写/更新/弃答”的机制，出现长程一致性弱、跨会话重启后回答不一致等问题。最后是“协同弱”，即参数记忆、外部知识库与用户交互之间割裂严重，缺乏有效的规划与整合机制。这些问题共同制约了智能体在的表现，亟需突破精准编辑、持续演化与多源协同三大关键技术瓶颈。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

本项目旨在构建一个多源多模态记忆增强智能体新框架，打通“知识—记忆—推理—交互”闭环，解决记忆修正精度低、演化易遗忘、协同难等问题。具体目标包括：实现对模型内部记忆的细粒度编辑与领域保持；建立支持持续学习与遗忘抑制的记忆演化机制；设计多源记忆的一致性对齐与协同规划方法。

（二）技术方法与理论工具

围绕上述目标，项目将开展三项核心研究内容：（1）基于知识编辑技术的大模型内部记忆研究。针对编辑定位不准、能力保持不足的问题，重点探索如何精准识别与修改模型参数中的特定知识单元，同时保护邻域知识不受干扰，提升编辑后的泛化能力。（2）基于训练的多模态大模型记忆持续演化研究。针对灾难性遗忘问题，设计持续预训练与增量学习机制，提升模型在跨模态、跨会话任务中的知识积累稳定性，确保长期记忆的有效保持。（3） 面向复杂任务的大模型多源记忆整合与规划研究。针对外部记忆形式多样、来源分散的问题，研究统一的记忆表征方法，构建能够自主调度参数记忆、外部知识库与用户交互历史的协同架构，使模型具备内化的“规划+整合”能力。

通过以上方法，项目将构建支持精确修正、持续演化与多源协同的记忆增强智能体系统，并依托“磐石”科研大模型底座，在科研场景中实现学术知识的高可靠修正、前沿动态跟踪与多源协同推理，助力我国科研智能化基础设施建设。

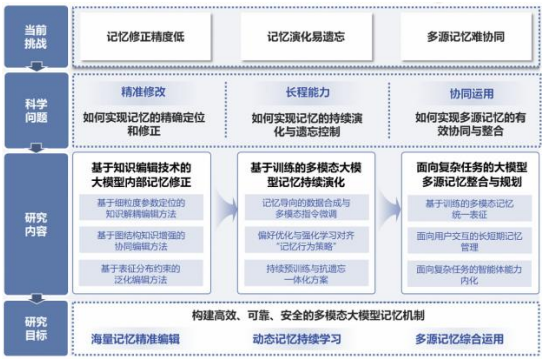


图 1 关键挑战与技术路线

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛

研究小组项目汇编

报告题目	复杂系统的认知与决策理论与方法研究	
研究小组名称	复杂系统的认知与决策研究小组	
研究小组成员	姓名	学号
	李强	**202518023429133**
	王皓玺	**202518023429104**
	王乐翔	**202518023429039**
	黄少平	**202418015547002**
	周晨曦	**202518023429009**
	俞博瀚	**202318015547002**
指导教师	徐波、赵军、刘康、徐爽	
关键词	复杂系统认知与决策，大模型知识机理，大模型压缩，多模态世界模型，混合驱动推理，分层智能体架构，非平稳对手建模	

[摘要]：迈向通用智能亟需可解释、长程、可演化的复杂系统认知与决策能力。现有大模型面临规则遵循机理不清、模型压缩损伤知识、多模态理解缺乏长时一致性、智能体架构扁平化、对手建模难以适应非平稳环境、医疗诊断可靠性不足等关键问题。为此，本研究拟围绕六大核心模块展开攻关：通过大模型知识机理分析揭示规则运用机制；发展机制感知的模型压缩方法以实现知识功能保护；构建多模态世界认知框架以形成“观-忆-思-动”闭环；提出“筹划-规划-执行”三层决策架构以突破认知扁平瓶颈；建立非平稳对手建模方法以实现快速稳健应对；并创新混合驱动推理策略以融合知识、数据与概率推理，形成可解释、可信任、可演化的认知-决策闭环。预期在星际争霸 II、罕见病诊疗等场景进行验证，为国防安全、医疗健康等国家战略领域提供可信赖的通用决策智能体基础。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

复杂系统的认知与决策能力是人工智能迈向通用智能（AGI）的核心挑战。在**国防军事、临床诊断、人机协作等高风险领域**，智能体需在**高维、不确定、高度动态**的环境中完成**长程、多步推理决策**，而当前主流 AI 系统在**结构化规划、因果推理、环境适应**等方面存在明显不足，难以可靠落地。国家“新一代人工智能”与“健康中国”战略对**可解释、长程、可演化的自主决策**提出刚性需求。

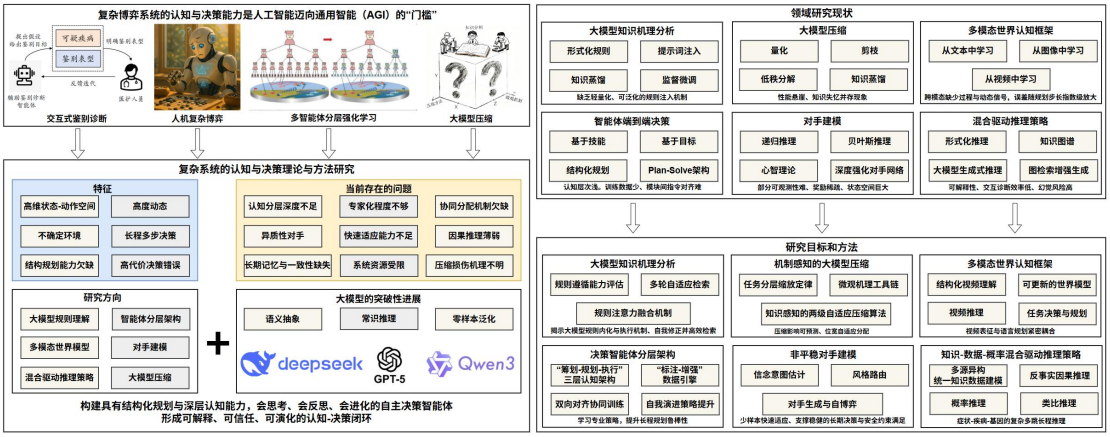


图 1 复杂系统的认知与决策理论与方法研究框架

（二）领域现状

大模型：RAG/SFT 将外部知识注入，但规则检索弱、规则遵循机理不清晰。

模型压缩：量化、剪枝等主流方法以数值误差为优化目标，忽视知识功能的系统性保护，4→3 bit 压缩常现“能力悬崖”。

多模态：Video-LLM 等模型短时记忆、无状态建模，推理链与视觉感知脱节。

智能体：目标-执行两层架构，缺战略层，长程规划脆弱。

对手建模：Level-k 推理、逆向强化学习等传统方法可解释性强但扩展性差。

医疗决策：知识驱动方法可靠但死板，大模型生成式推理灵活但不可信。

（三）当前存在的问题

规则遵循机理不清，外部规则难检索难运用。

压缩损伤机理不明，量化导致知识能力退化，缺乏微观机理分析与保护机制。

记忆与一致性弱，长视频、长任务中遗忘严重，决策链易漂移。

智能体认知层次浅，缺乏战略-战术-执行的深度分解、层级协同与反馈。

对手策略非平稳、异质，快速适应与安全利用不足。

医疗诊断推理缺交互式因果诊断，幻觉高、效率低。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

构建具有**结构化规划与深层认知能力的自主决策智能体**，形成**可解释、可信任、可演化的认知-决策闭环，**实现从**"信息处理"向"自主决策"**的 AI 范式转变，在**理论机制、算法框架和应用场景**三个层面取得突破。

（二）技术方法与理论工具

大模型知识机理分析：研究规则理解与增强机制，通过 KV 缓存注入+注意力损失引导，提升模型对结构化知识的感知与运用能力。

机制感知的大模型压缩：建立任务分层缩放定律，揭示压缩对知识能力的差异化影响；设计知识保护型量化算法，实现从数值保护到功能保护的范式转变。

多模态世界认知框架：构建观-忆-思-动闭环架构，融合视频表征与语言推理；引入动态世界记忆与因果推理链，提升环境理解与决策一致性。

决策智能体分层架构：提出筹划-规划-执行三层 LLM 架构，实现认知解耦与专家专能；设计双向协同训练+自我演进循环，支撑智能体的持续提升。

非平稳对手建模：结合 BDI 理论+元学习，构建对手心智模型与快速适应机制；通过风格路由的专家策略与自博弈，提升对异质对手的泛化能力。

混合驱动推理策略：融合知识图谱+大模型+因果推理，构建双向约束的诊断推理机制；使用强化学习优化多轮交互问诊策略，实现可靠的罕见病辅助诊断。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	火星矩阵：深空蜂群智能纪元	
研究小组名称	空间智能感知与导航	
研究小组成员	**姓名**	**学号**
	江一鹏	202418014020013
	陈世文	202518023426011
	刘思源	202518023429051
	于雨禾	202518023429094
	魏鹏伟	202518023429055
	许腾	202518023429118
指导教师	万方、万雪、高扬、赵海峰	
关键词		

[摘要]

随着深空探测任务复杂度的提升，火星探测面临通信延迟长、环境极端、自主能力不足等挑战。本研究提出构建面向可持续探索的自主协同感知网络，通过AI技术赋能火星探测全过程。研究内容涵盖AI赋能的自主导航与环境感知、智能规划与在轨作业、太空生命科学前沿探索三大方向，重点突破基于视觉的航天器定向、多源信息融合定轨、长时延任务规划、GNN-LLM闭环建造框架及类器官数字孪生等关键技术。研究成果将显著提升航天器在火星极端环境中的自主生存与作业能力，为我国未来火星探测与基地建设提供核心技术支持，具有重要的战略意义与工程应用价值。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

深空探测是国家航天战略的重要组成部分，地火空间作为未来人类发展与资源利用的新疆域，具有极高的战略价值。火星探测任务面临通信延迟长达20分钟、火星极低轨道大气摄动显著、重力场不规则等极端环境挑战，传统导航与控制模式难以满足任务需求。本研究通过AI技术提升航天器自主导航、环境感知与任务规划能力，推动深空探测从“地面依赖”向“在轨自主”转型，对支撑国家重大任务、抢占深空战略制高点具有重要意义。

（二）领域现状

国际上，美国“毅力号”火星车已实现基于视觉的自主着陆导航，GRAIL任务验证了星间测距定轨技术。我国“天问一号”成功完成绕、着、巡探测，但在火星低空自主飞行、智能建造等领域仍存空白。在技术层面，太阳敏感器精度不断提升，GNN与LLM在物理仿真与任务规划中展现出潜力，数字孪生技术逐步应用于空间生命科学研究。

（三）当前存在的问题

1. 导航自主性不足：传统依赖地基测控，通信延迟大，难以实现实时控制。

2. 环境感知鲁棒性差：火星低空大气密度波动大、地形复杂，视觉导航在弱光照、沙尘等条件下性能下降。

3. 星载算力有限：AI算法复杂度高，难以在辐照、功耗约束下实现实时推理与更新。

4. 智能规划与物理仿真存在跨模态鸿沟：LLM规划常缺乏物理可行性，GNN

仿真受数据稀疏与多物理场耦合限制。

5. 系统验证与安全性不足：高风险任务缺乏可形式化验证的保障机制，仿真与实测差异大。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

构建“导航控制—生命科学—表面建造”三位一体的火星探测智能技术体系，实现从地火转移至火星表面长期自主的全流程智能化。重点突破高精度自主导航、长时延智能规划、类器官数字孪生与 GNN-LLM 建造框架，形成闭环自主能力。

（二）技术方法与理论工具

1. 自主导航与环境感知：开发视觉-惯性紧耦合导航系统，融合 CNN 与 ViT 进行地貌识别；构建多源信息融合定轨框架，结合星间测距与 GNN 拓扑优化，提升轨道预报精度。

2. 智能规划与在轨作业：采用“安全屏障+强化学习+LLM 校核”混合规划范式，实现长时延任务自主决策；构建 GNN-LLM 闭环框架，通过物理仿真验证与修正建造规划。

3. 太空生命科学探索：建立天地一体化类器官数字孪生平台，集成多模态数据与 AI 模型，实现生理响应动态预测与健康风险评估。

4. 理论工具包括：视觉 SLAM、图神经网络、大语言模型、物理信息神经网络、数字孪生、强化学习等。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	基于生成式 AI 的单目图像三维场景可控重建与编辑调研	
研究小组名称	人工智能关键技术研究组	
研究小组成员	姓名	学号
	张东旭	202518023429145
	马梦琪	202518023429146
	肖政	202518023429052
	李辰龙	202518023406027
	徐诚	202518023459001
	余晨	202518023429032
指导教师	侯飞、焦建彬、李庆、黄进、徐帆江	
关键词	单目图像，生成式 AI，三维重建，三维场景编辑	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

[摘要] 单目三维重建与三维场景编辑是计算机视觉与图形学领域的核心任务，然而当前三维视觉生成技术仍面临几何一致性差、语义可控性弱、实时性能不足等突出挑战。为此，本研究围绕上述关键问题，系统探究基于几何约束的单目三维重建理论、语义驱动的三维可编辑表示机制，以及高效交互式三维生成系统的构建方法。研究的总体目标是建立从单目图像到可语义编辑三维场景的高精度生成框架，突破单目输入条件下三维生成的几何一致性瓶颈，最终实现可解释、可控且支持实时优化的三维生成与编辑系统，为相关领域的技术应用提供理论支撑与实践方案。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

随着虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、数字孪生、智能设计等领域的快速发展，从二维图像高效生成可交互、可编辑的三维场景已成为连接虚拟与现实世界的核心技术支撑。单目三维重建作为一种低成本、广适用的三维数据获取方式，无需依赖复杂的多视角采集设备或激光扫描仪器，仅通过单张普通图像即可恢复三维信息，极大降低了三维内容创作的门槛，在移动端应用、影视制作、工业设计、文物数字化等场景中具有不可替代的应用价值。

（二）领域现状

单目三维重建与场景编辑领域围绕 “三维表示范式”“生成 / 编辑机制” 演进，核心特征如下：三维表示从传统 SfM+MVS 向隐式（NeRF）、显式（3DGS）及混合式表示发展，各有优劣；单目重建聚焦 “几何一致性 + 外观真实感” 双提升，融合多尺度约束、自监督蒸馏、GAN 等技术；三维场景编辑从手动几何操作转向语义驱动，依托跨模态生成与可微渲染实现文本 / 图像提示下的修改；轻量化与实时化成为落地关键，通过网络压缩、稀疏采样等技术适配端侧需求。

（三）当前存在的问题

单目三维重建与场景编辑领域核心挑战如下：一是单目重建几何一致性不足，深度估计模糊、拓扑约束缺失，易出现形状失真、结构断裂；二是语义驱动编辑机制不完善，存在 “语义 — 几何”“编辑 — 重建” 双重兼容性鸿沟，编辑匹配度低、易失细节；三是实时性能与交互体验欠佳，模型计算复杂、大规模场景编辑有延迟，多模态输入融合差，难实现 “所见即

所得”；四是技术链条割裂，缺乏 “重建 — 编辑 — 渲染” 一体化框架，全流程效率低、误差累积，难以形成闭环。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

1.语义场驱动的三维可编辑隐式表示。构建结合语言描述与视觉特征的语义潜空间，将文本或图像指令映射至三维隐式场，实现“从语义到几何”的直接调控。

2.建立语义—几何双空间的对齐机制。通过跨模态对比学习与结构一致性约束，使语义场与几何场在编辑过程中保持拓扑和细节连续性。

3.结合 3D Gaussian Splatting 快速渲染框架，实现可微编辑反馈。在编辑操作后，利用可微渲染机制快速更新视觉结果，实现高效的实时编辑与优化。

（二）技术方法与理论工具

单目图像到可语义编辑三维场景的高精度生成，本研究通过三大技术方向构建一体化解决方案：一是几何约束驱动的单目三维一致性重建，采用多任务隐式场学习网络，融合全局特征提取、几何一致性联合约束、结构先验注入与自监督优化，依托 NeRF/3DGS 等理论工具提升拓扑稳定性；二是语义驱动的三维可编辑表示，构建几何 - 语义双空间，通过跨模态特征融合、双空间对齐与特征解耦，结合拉普拉斯正则化与可微渲染，实现语义指令精准映射；三是高效交互的轻量化系统构建，通过知识蒸馏、高斯点动态稀疏化、渐进式局部优化，开发多模态接口集成的端侧系统，依托模型蒸馏等工具保障实时交互。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	基于主动知识构建的临床决策智能体	
研究小组名称	AI 驱动科学发现研究组	
研究小组成员	姓名	学号
	冯一纯	202418018915019
	郑江楠	202518023429110
	刘无已	202318019507011
	车田蕊	202518023407008
	焦源	202418008208001
	张校玮	202518023408002
	谢金涛	202318003208164
指导教师	楚甲祥	
关键词	大语言模型，智能体，强化学习，临床决策	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

摘要

当前全球医疗体系面临医护人员短缺与知识爆炸的双重压力，大语言模型为应对这一挑战提供了新思路，但其应用仍受限于事实性幻觉、信息缺失与个体差异。对此，本研究提出基于主动知识构建的临床决策智能体框架，使大模型从被动应答者转变为主动知识构建者。框架融合了知识图谱检索、深度增强生成、多智能体问诊协同、MBTI 个性化问诊及数字孪生决策支持五大技术，通过协同作用从根本上解决知识幻觉问题，实现从静态问答到动态交互、从群体化到个体化诊疗的跨越，为医学研究、基层医疗、临床辅助和患者服务提供了新范式。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

当前,全球医疗体系正面临前所未有的双重挤压。一方面,生物医学知识呈指数级增长,高度碎片化地存在于海量文献和数据库中,形成信息孤岛。据统计,每年发表的生物医学文献超过百万篇,知识更新速度远超人类医生的学习能力。另一方面,医疗资源严重短缺,世卫组织预测到 2030 年全球将面临高达 1500 万医护人员的巨大缺口,这将直接导致医疗服务质量显著下降,加剧医疗资源分配不均的问题。人工智能技术特别是大语言模型的快速发展为解决这一困境提供了新的可能性。将大模型应用于医疗领域,有望突破传统医疗服务模式的瓶颈,实现知识的高效整合与智能化决策,为缓解医疗资源紧张、提升医疗服务质量开辟新的路径。

（二）领域现状

当前，大语言模型在医疗领域的应用主要涵盖文献检索、医学问答和辅助诊断等方向。为提高模型准确性，多数研究采用检索增强生成技术引入外部知识。在临床问诊方面，已有尝试构建对话系统以模拟医患交互，但多数仍处于简单问答阶段。知识图谱因能整合疾病、症状、药物等多维信息，在医疗智能应用中发挥重要作用。强化学习也被用于优化序贯医疗决策，但现有研究多孤立使用各项技术，缺乏有效整合，难以实现协同优势。

（三）当前存在的问题

尽管大语言模型在医疗领域展现出巨大潜力,但仍面临三大核心挑战,严重制约其在临床实践中的应用。首先是幻觉问题。通用大语言模型容易生成看似合理

但实际错误的信息,错误的医学建议可能直接危及患者生命安全。其次是信息缺失问题。在实际问诊过程中,患者往往表述不清或信息提供不完整,导致模型难以获取做出准确判断所需的关键信息。第三是个体差异忽略问题。现有模型主要基于群体数据训练,生成的是面向一般人群的诊疗建议,忽略了药物响应、疾病进展等方面存在的显著个体差异。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

本研究旨在构建基于主动知识构建的临床决策智能体系统,让大语言模型从被动应答者转变为主动知识构建者,实现从群体化到个体化的临床智能决策。具体目标包括:突破大模型知识幻觉的技术瓶颈,构建可信赖的医学知识检索与推理机制;赋予模型动态问诊能力,实现主动、策略性的信息采集;建立患者数字孪生模型,支持个性化精准决策;最终形成可落地应用的临床决策支持系统,赋能医学科研、基层医疗和临床实践。

（二）技术方法与理论工具

本研究将采用五大核心技术路线协同攻关。（1）基于知识图谱的知识检索技术。采用 KGT 框架,通过图模式推理利用知识图谱中可验证的结构化信息主动检索最优子图,从根本上提升大模型的可信赖性。（2）基于深度思考的检索增强生成技术。采用 IP-RAR 框架,通过综合推理检索最大化召回率,并利用自反思机制提炼核心证据,高效整合碎片化的医学文献信息。该技术将赋能医学科研工作,助力科学问题构建与研究方案设计,同时在临床决策支持中提供药物相互作用分析。（3）多智能体协同的临床问诊技术。提出 DoctorAgent-RL 框架,将问诊建模为动态决策过程,医生智能体通过强化学习在高保真患者智能体模拟环境中迭代优化提问策略。（4）基于 MBTI 的个性化问诊。基于 MBTI 理论构建 16 型患者沟通画像表,利用强化学习使医生大模型能实现自适应沟通策略。该技术将应用于智能预问诊、基层医疗支持和重点人群健康管理。（5）数字孪生驱动的个性化决策技术。整合患者多维数据构建能够反映健康状态动态变化的高保真虚拟数字副本,利用大语言模型进行反事实生成与推理,模拟不同干预措施的效果。该技术将为共病、综合征等复杂疾病提供前瞻性、可选择的治疗路径,实现个体化精准决策。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	面向新型佐剂创制的数据-知识协同驱动智能体	
研究小组名称	智能融合创新组	
研究小组成员	**姓名**	**学号**
	陈硕鹏	202418008006017
	赵纪春	202518023429128
	马旭阳	202518023429102
	类红旭	202518023415002
	吕泽权	202418004133021
	曹沛源	202418004133014
	陈新	202518023406003
	杨志浩	202518023406021
指导教师	马光辉，冯登国，魏炜，申立勇，姜海勇，彭谦，高晓冬，冯秀涛，未金花	
关键词	智能体；疫苗佐剂；多组学测序；智能实验平台	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

[摘要]

疫苗研发立足国家战略需求，是保障公共卫生安全的重要手段，其中佐剂作为增强免疫效能的关键组分，其创新设计已成为制约我国新型疫苗发展的重要瓶颈。本团队前期工作表明，颗粒佐剂在递送调控、免疫细胞摄取与活化等方面具有显著优势，但现有研发模式高度依赖经验试错，缺乏可量化、可推演的设计规律。随着机器学习和大语言模型的快速发展，人工智能有望实现颗粒佐剂研发范式变革。人工智能在颗粒佐剂上的应用存在四项挑战：用于训练的数据难获取、知识难梳理、数据-知识难协同和干湿难交互。针对以上挑战，本项目拟构建以“数据-知识协同智能体”为核心的颗粒佐剂智能设计系统，通过标准化文献挖掘与大规模组学数据整合建立定量数据库和定性知识库，融合机器学习、知识图谱与逻辑推理实现多智能体协同设计，并依托自动化智能实验平台构建干湿闭环验证体系，探索面向颗粒佐剂的智能化创制新范式。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

佐剂通过调控免疫应答的强度、广度和持续时间，在疫苗中起“效能放大器”作用。我国在抗原和工艺上进步明显，但佐剂长期依赖铝佐剂，新型颗粒佐剂不足、关键技术受制于人，已成为疫苗升级的短板。国际上 AS01、Matrix-M 等颗粒佐剂显著增强体液和细胞免疫应答、提升保护率，体现出基于颗粒体系、面向时空递送和免疫微环境重塑的佐剂创新，是疫苗技术迭代的重要方向。

本团队已系统研究不同颗粒材料和工艺条件下粒径、电荷和结构对淋巴引流和免疫微环境等的影响，证明颗粒佐剂具备多机制增效潜力，但现有认识仍停留在分散个例中，缺乏可迁移的设计准则和可复用的计算模型。在新发病原、复杂人群免疫差异的背景下，传统试错式研发难以支撑高效的佐剂创新，迫切需要引入人工智能等技术，以“数据-知识协同”实现从经验驱动向智能驱动的范式转变。

（二）领域现状与当前存在的问题

当前佐剂研发仍主要依赖经验试错，通过配方调整和动物、临床试验评价效果，周期长、成本高，难以沉淀可推广规律。计算辅助设计已在分子佐剂中初步应用，但对同时涉及材料特性、递送行为和免疫网络调控的颗粒体系刻画有限。近年来，研究者开始尝试将文献、数据库及组学数据整合为生物医学知识图谱，引入逻辑规则与深度学习相结合的推理框架，以提升模型的可解释性和跨任务迁

移能力，但该技术尚未系统应用于颗粒佐剂设计。总体而言，颗粒佐剂研发缺乏系统数据资源和“佐剂特性—作用过程—免疫指标”的知识图谱与推理链条，且计算预测与实验验证之间缺少高效闭环。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

本项目以“数据-知识协同智能体”为核心，面向颗粒佐剂智能创制建立从数据挖掘、模型构建到自动化实验验证的完整技术路线。总体目标是：在专家指导下构建覆盖颗粒佐剂关键物化参数、免疫细胞演化轨迹、免疫结局指标的定量数据库与定性知识库；在此基础上构建搭建由“理论学家”、“实验学家”和“决策者”等智能体组成的多智能体协同系统，实现佐剂方案的生成、评估与优化；并依托自动化智能工作站，将智能体输出转化为标准化湿实验流程，形成“模拟设计—实验验证—模型更新”的闭环迭代机制，搭建可扩展、具备推理能力的颗粒佐剂智能设计平台。

（二）技术方法与理论工具

在数据与知识构建方面，项目将建立标准化文献挖掘流程，将颗粒佐剂的关键参数与免疫指标统一转化为结构化数据，形成可建模的定量数据库；同时整合大规模组学数据，提炼“佐剂特性–细胞状态–免疫指标”的细胞级因果链条，构建以“佐剂–免疫细胞–通路–结局”为主干的知识图谱。

在智能体设计方面，基于定量数据库构建多个机器学习小模型，用于预测免疫反应，并由“实验学家”智能体按需调用和统筹；以知识图谱为基础构建“理论学家”智能体，负责机制推理与结果校验；再由“决策者”智能体综合多源信息与优化目标，对候选佐剂方案进行决策。

在实验与闭环迭代方面，项目将搭建自动化智能工作站，实现颗粒制备与标准化免疫实验的自动化执行，并将所得数据实时回溯至数据库，更新知识图谱，用于模型与规则的迭代，形成“数据–知识–智能体–实验”的自适应闭环，持续优化颗粒佐剂设计。

综上，本项目通过构建数据-知识协同智能体及其配套的自动化实验平台，有望在颗粒佐剂创制领域实现从经验试错向智能推理驱动的范式转变，为我国疫苗研发创新提供具有示范意义的新路径。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	数字生命——从分子设计、扰动建模到多尺度生命系统建模研究	
研究小组名称	数字生命研究组	
研究小组成员	**姓名**	**学号**
	王浩然	202318010330025
	房晨	202318010330060
	武欢欢	202318010330026
	胡嘉鑫	202318018915047
	崔盼盼	202518023429086
	陈相潭	202418012115043
指导教师	李鑫、张有君、李萌、康禹	
关键词	数字细胞、基础模型、AIDE、衰老生物学、光合作用	

[摘要]（“摘要”二字顶格、楷体小四号加粗：摘要内容楷体小四号不加粗，篇幅 200～300 字。）

细胞是生命的基本单元，其内部基因调控机制的解析对生物学和医学至关重要。传统湿实验成本高、周期长且存在伦理问题，促使研究转向干实验，即利用计算模型模拟生物过程。当前，数字细胞作为细胞的数字孪生，正成为新药研发和精准医疗的关键基础设施，全球竞争激烈。然而，基于静态转录组数据训练的模型在预测细胞动态状态变化方面存在局限，尤其在扰动响应预测任务上表现不佳。本研究旨在针对数字细胞建模、衰老研究、光合作用优化及植物酶工程改造等前沿领域的关键问题，通过融合人工智能、多组学数据和计算模型，开发创新性方法与框架，以深化对生命规律的理解，并推动在疾病治疗、农业增产等领域的应用。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

细胞基因调控对生命活动至关重要。传统实验有局限，计算生物学和 AI 为干实验提供新途径。数字细胞模型模拟细胞活动，成生物医药前沿。现有模型基于静态转录组数据，预测细胞状态动态不足。扰动建模对理解基因功能和细胞响应关键，在药物筛选有潜力，但在因果推断、剂量效应和跨扰动表征方面存在挑战。

（二）领域现状

自然语言处理大模型为生命科学提供借鉴。已出现基于单细胞转录组数据的模型，如 GeneFormer、scGPT。但这些模型依赖 Transformer 架构，未充分考虑基因间无序列次序特性。高质量扰动数据是扰动建模基础，已建立大规模数据集。深度生成模型在分布学习和跨条件预测表现强，但缺乏对基因调控网络的因果结构建模。衰老研究、光合作用和植物酶工程也取得进展，但面临可解释性、数据异质性和验证周期长等问题。

（三）当前存在的问题

数字细胞建模与扰动建模的共性挑战是：单细胞扰动数据规模小、噪音大、批次效应严重。现有模型缺乏对基因调控网络的因果结构建模，难以区分直接效应与间接效应，组合扰动与时间动态建模能力不足。衰老研究领域，现有模型缺乏时空动态性和细胞分辨率，难以捕捉衰老异质性。抗衰老药物筛选

模型难以反映细胞异质性和药物作用差异。光合作用与植物酶工程领域，实验测定复杂耗时，制约模型训练与验证。AI 设计酶在植物体内适配性规律不清，缺乏高效可控的体内定向进化工具。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

构建高精度、可解释的分子到细胞尺度数字生命模型框架。多模态扰动的统一表征与细胞命运预测： 构建高质量扰动数据库，通过对比学习实现跨扰动类型统一表征，提升模型泛化能力。基于预训练的数字细胞大模型： 分阶段构建转录组基础模型、集成多组学的全维度数字细胞模型，用于指导湿实验，解决细胞命运决策等问题。基于数字细胞模型的衰老研究： 整合多器官单细胞数据，利用基础模型解析衰老异质性，通过虚拟扰动筛选抗衰老靶点。可解释的结构化因果模型： 开发端到端模型，融合扩散表征与剂量感知的因果干预，实现连续剂量下细胞响应的精准预测与因果机制解析。模型驱动的光合作用机制研究： 构建多尺度动力学模型评估优化策略，利用蛋白质语言模型设计高性能 Rubisco 酶。AI 辅助植物酶工程改造：发展植物酶特异性 AI 设计方法，构建基于工程化病毒载体的体内定向进化系统，实现酶功能快速优化。

（二）技术方法与理论工具

数据基石： 整合公开单细胞多组学与扰动数据集，进行标准化与批次效应校正，构建高质量 AI-ready 数据库。基础架构： 采用图神经网络构建数字细胞基础模型，捕捉基因间的非序列性相互作用。统一表征： 利用对比学习与元学习，将不同模态的干预映射到统一潜空间。因果发现： 构建结构化因果模型，结合扩散模型学习细胞状态表示，引入可微的无环性约束与稀疏性约束，从数据中联合学习基因调控网络的因果结构和干预响应函数。AI 设计： 应用蛋白质语言模型进行酶序列设计与优化，结合物理模型评估结构稳定性。干湿循环验证： 模型的关键预测通过湿实验验证，例如细胞系扰动验证、酶动力学参数测定、模式植物功能测试，形成计算预测与实验验证的闭环研究范式。

实施计划：分阶段推进，前期聚焦数据平台与基础模型构建，中期深化多模态表征与因果建模，后期强化在衰老、光合作用、酶工程等具体生物学问题中的应用与验证，最终形成高效、可用的数字生命模型方法论与工具集。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	高可靠光电互连集成电路关键技术研究	
研究小组名称	高可靠光电互连集成电路研究小组	
研究小组成员	姓名	学号
	李家民	**202518023426035**
	孙赫	**202518023426027**
	刘石	**202518023426029**
	周晓莉	**202518023426032**
	王一诺	**202518023426021**
	任文浩	**202518023426024**
	陈梦婷	**202518023453001**
指导教师	郑旭强，杨尊松，荀孟，刘新宇，刘凡宇，杨妍	
关键词	光电融合接口，收发机，激光器，高可靠工艺	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

[摘要]面向人工智能对算力的巨大需求，I/O 性能瓶颈已成为关键挑战。本研究聚焦于通过光电融合 I/O 技术突破此瓶颈。然而，国内在高性能 D2D 互连、低抖动 PLL、高速 VCSEL 及高精度 ADC 等芯片方面的研究还有很大的发展空间。且对 RFSOI 器件的损伤机理研究多停留在宏观表征，缺乏深层物理机制的揭示。为应对上述挑战，本研究采用同源前向时钟与无源均衡技术，以实现低延迟、高能效的数据传输。通过级联 PLL 结构降低时钟抖动，并设计集成表面光栅与高热导率热沉的 VCSEL 芯片以提升带宽与可靠性。同时，为 ADC 引入自适应电流补偿缓冲器等新型结构，在保证速度的同时降低功耗。同时，通过深入探究 RFSOI 的多界面损伤机理，提出射频性能与抗辐照能力兼顾的协同加固方法。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

随着人工智能快速发展，算力需求不断提升，I/O 性能提升难度显著，构建光电融合 I/O 接口成为关键技术。光电融合利用光信号大容量、低损耗等优势，可提升带宽与能效。片内采用 D2D 并行接口替代 HBM 接口，需解决光电协同低延迟、高密度互联及低抖动时钟等问题。此外，光电转换需高速高带宽 ADC-DSP 接收机，工艺上可选用抗辐照 SOI 以实现高可靠性。因此，研究 D2D 互连、PLL 时钟、光驱动、ADC 及 RFSOI 工艺具有重要意义。

（二）领域现状

1、D2D：这张表列出了各个顶刊顶会的 D2D 收发机论文的指标水平，可以看出 D2D 收发机正在向着低功耗，单通道高速以及高边密度的方向发展。

表 1 D2D 收发机研究现状

Tech. (nm)	Signaling	Data Rate (Gbps/pin)	Energy Efficiency (pJ/b)	Edge Density (Tbps/mm)	Reference
3	NRZ	32	0.36	3.84	Marvell,VLSI 24
5	NRZ	25.2	0.19	5.8	Nvidia,JSSC 24
3	NRZ	32	0.6	10.5	TSMC,ISSCC 25
3	NRZ	16	0.29	5.27	Cadence,ISSCC 25
28	NRZ	64	1.21	10.5	PKU, ISSCC 25

2、PLL：近几年，PLL 向着低抖动，宽频带，高速的方向发展。

3、VCSEL：850nm VCSEL 带宽直接限制了 AI 计算和数据中心中短距光链路的整体性能。由图 1(b)可知，850nm VCSEL 的调制带宽已提升至 30GHz 以上。

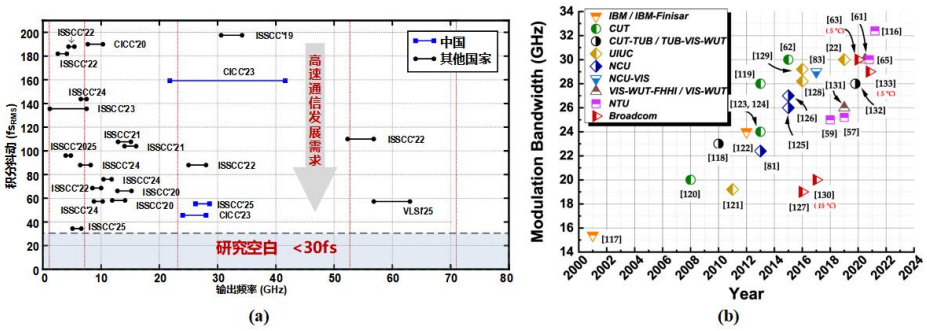


图 1 PLL 和 VCSEL 研究现状

4、ADC：ADC 向着高精度，高速，低功耗的方向发展。

表 2 ADC 研究现状

Tech. (nm)	Arch.	Sample rate (MS/s)	Resolution (bit)	Power (mW)	SNDR/SFDR (dB)	Reference
28	2×TI-Pipe.	4000	14	782	59.7/69.3	THU,TCAS I 24
28	Pipe-SAR	1000	14	15.3	68.2/85.8	Xidian,ISSCC 25
28	Pipelined	3000	14	125.41	62.3/81.1	Macau,VLSI 25

5、RFSOI：针对总剂量效应，国外以范德堡大学为代表，已实现机理与版图加固的系统研究。国内如中科院等，主要侧重于模型表征与衬底结构优化。

（三）当前存在的问题

在追求更高带宽密度和更低功耗的过程中实现低延迟、高可靠性的协同控制是 D2D 收发机面临的挑战。国内先进 PLL 研究仍然较少，并且目前国际上没有小于 30fs 极低抖动 PLL 的报道。VCSEL 带宽受限、热稳定性和工艺一致性问题是进一步提升性能的关键障碍。国内 14bit ADC 刚刚起步，还有很大的发展空间。相比国外，国内研究仍偏重宏观表征，对深层物理损伤机制的揭示尚不充分。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

拟完成高能效低延迟 D2D 并行接口、低抖动宽频带锁相环、高速 VCSEL、高速低功耗 14 位模数转换器和 RFSOI 总剂量机理及加固技术五个研究内容。

（二）技术方法与理论工具

方案核心在于通过同源前向时钟与无源均衡等架构，实现低延迟、高能效的数据传输；借助级联 PLL 与多模 VCO 来优化时钟质量与频宽；并通过引入表面光栅和高热导率热沉、自适应电流补偿的新型输入缓冲器和鲁棒性优异的环形放大器等创新设计提升 VCSEL 芯片、模数转换器的性能与可靠性，同时深入探究 RFSOI 器件的损伤机理以指导协同加固设计。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

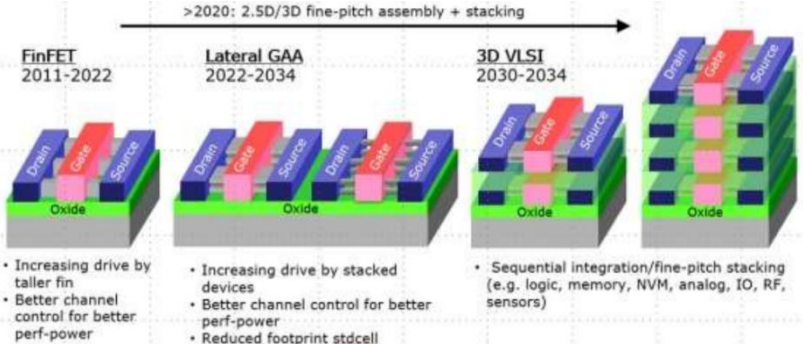
报告题目	互补式场效应晶体管（CFET）：后摩尔时代集成电路的关键路径与挑战	
研究小组名称	纳米 CMOS 组	
研究小组成员	姓名	学号
	卢宇鹏	202518023453017
	毛龙格	202518023453022
	张航	202518023453014
	闫明珠	202518023453004
	潘彦伊	202518023453019
	曹世琦	202518023453015
	肖兴荣	202518023426018
指导教师	殷华湘，许高博，张青竹，李永亮，解婧	
关键词	互补式场效应晶体管，逻辑器件，1nm 节点	

[摘要]现代社会发展随着信息技术的更迭,而半导体集成电路产业作为信息技术的核心学科,是国家科技创新和经济社会发展的核心驱动。自 20 世纪 50 年代,贝尔实验室研发第 一个点接触锗晶体管, 在 1960 年提出金属-氧化物-半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistror MOSFET),随后在 1963 年发明互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor,CMOS), 晶体管的发展为现代微处理 器的发展奠定了基础。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

近十五年来,半导体器件技术的发展经历了从平面结构向三维架构的重要演进。2011 年,英特尔公司在 22nm 工艺节点率先引入三维鳍型场效应晶体管(Fin Feild-Effect Transistor,FinFET), 其创新性地提出三面栅极结构以增大栅极与沟道的接触面积,该结构有效提升了栅控能力[1]。与传统的平面晶体管相比,FinFET 展现出更高的集成密度、更低的漏电流和功耗优势。随后, 台积电、三星等主要半导体制造商相继将 FinFET 作为主流工艺技术,并通过持续优化 Fin 结构的高宽比来进一步提升器件性能[2-3]。随摩尔定律的延续, 在 2020 年到达 5nm 工艺节点, FinFET 技术通过引入应变 SiGe 沟道, 优化了 Ge 元素的掺杂工艺, 显著提高了 p 型晶体管的空穴迁移率, 实现了功耗降低与性能提升的双重突破[4-5]。然而, 随着工艺节点向 3nm 及以下推进, FinFET 结构面临严峻挑战。器件尺寸的持续微缩导致栅控能力减弱、载流子迁移率退化、亚阈值特性恶化以及关态漏电流显著增加等性能劣化问题。如图一所示, 国际器件与系统路线图（IRDS）预测 3nm 节点将成为全环绕栅极晶体管（GAAFET）取代 FinFET 成为 CMOS 逻辑主流技术的转折点[5-7]。



图一 国际器件与系统路线图（IRDS）

（二）领域现状

在应对这些挑战的过程中，研究界提出了多种创新器件结构。比利时微电子研究中心 （IMEC）提出的叉板场效应晶体管（Forksheet FET）和互补场效应晶体管(CFET)等新型架构,通过三维集成方式实现了器件密度的进一步提升[8-11]。特别是 CFET 技术，通过在垂直方向堆叠 n 型和 p 型晶体管，突破了传统平面集成的物理限制。这种结构不仅提供了充足的水平空间资源，还通过纳米片堆叠增强了驱动能力，同时避免了因尺寸微缩导致 的性能下降。

（三）当前存在的问题

然而，CFET 技术仍面临诸多挑战。堆叠结构导致接触孔深宽比增大，接触电阻随之增加，同时栅极与源/漏电极之间的边缘寄生电容也显著增大，这些因素都制约着 CMOS 电路的 PPA 优化。此外，工艺波动对纳米尺度器件的可靠性提出了更高要求，其中系统性波动可通过工艺优化和面向可制造性设计（DFM）来改善，在制造工艺方面，CFET 面临着接触孔深度控制、自热效应管理、热预算限制以及双功函数金属栅集成等复杂挑战[15-16]。单片集成方案需要应对硅/硅锗 Fin 结构深宽比急剧增大的难题，而顺序集成方案则依赖于晶圆转移键合等新兴技术的发展。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

本团队基于对互补式场效应晶体管技术发展瓶颈的系统性分析，围绕其核心挑战构建了由三个相互支撑的研究方向组成的完整研究体系。这三个方向分别从工艺实现、机理探索与系统优化层面展开，形成从基础工艺突破到设计方法创新的研究路径。

（二）技术方法与理论工具

1）原子级精度刻蚀与外延工艺研究：开发原子层刻蚀（ALE）与低温选择性外延（LTSE）的协同工艺窗口，重点研究等离子体化学与表面反应动力学对沟槽侧壁原子级平滑度与应变 Si/SiGe 外延质量的影响规律，目标实现通道厚度波动<5%。

2）自对准栅极集成与三维金属化探索：提出一种基于自对准双重图形化（SADP）与晶向选择性的栅极集成新流程，以绕过先进光刻的极限。系统研究高各向同性原子层沉积技术在三维栅介质与金属栅填充中的应用，评估不同功函数金属体系在纳米限域环境下的电学稳定性。

3）高密度低损耗垂直互连技术：针对垂直通孔（VIA）的侧壁缺陷与填充难题，研究数字蚀刻（DigitalEtch）等新型孔道成型技术，并结合流动式化学气相沉积（FCVD）实现无孔洞、低电阻的金属化方案。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	基于通用处理器的结构优化研究	
研究小组名称	微处理器结构设计优化	
研究小组成员	姓名	学号
	张丰鹭	**25018023429062**
	邓浩宇	**202518023429066**
	黄汝霖	**202518023429042**
指导教师	王剑、胡伟武	
关键词	CPU，GPU，推测并行	

中国科学院大学前沿交叉科学学院制

[摘要]本报告围绕“基于通用处理器的结构优化研究”展开，系统调研GPU、CPU在深度学习与高性能计算场景中的关键瓶颈与前沿技术趋势。首先，在GPU方面，当前深度神经网络模型规模快速增长，单GPU受限于计算-带宽比失衡、L1/L2缓存抖动、多核访存冲突及NoC拥塞等问题。报告综述了任务调度、缓存结构、片上互联、压缩/去重等优化方向，并提出流缓存解耦、L2带宽共享、片上网络优化和Tensor Memory融合的潜在突破点。

其次，在CPU端，随着INT8/FP8/INT4等低精度数据格式及矩阵扩展(AMX/SME/RVV)的发展，通用CPU在推理端具备更高性价比。报告分析了LLM推理中prefill / decode的计算特征、异常激活导致的量化难点，以及CPU在指令集、数据通路和矩阵单元支持方面的不足。

此外，在多核CPU架构上，非规则程序的依赖不确定性限制了并行化潜力。报告回顾线程级推测、事务内存、解耦软件流水、动态多线程等技术，并提出构建可在Chipyard/BOOM上验证的紧耦合推测并行框架，以突破单线程性能瓶颈。

本研究旨在为未来国产通用处理器的AI加速研究进行调研并提供可研究的内容与具体执行方案。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

深度学习在视觉、语言模型等领域取得突破，模型规模呈指数级增长，对算力提出前所未有的要求。通用图形处理器(GPGPU)凭借其大规模并行计算能力，已成为深度神经网络和人工智能应用的主要加速平台。与此同时，中央处理器(CPU)依托其通用指令体系和灵活的执行架构，也能够独立承担深度神经网络的训练与推理任务，尤其在模型规模较小或计算需求多样的场景下具有优势。

本课题将围绕GPU架构优化与CPU侧AI加速两条主线展开：在GPU上调研并行优化策略、访存优化方法；在CPU上调研低精度矩阵计算、量化优化方法和推测并行方法。相关研究将为构建自主可控、高能效、可扩展的通用处理器AI加速体系提供关键技术支撑。

（二）领域现状

当前深度学习和大模型的迅猛发展，使通用处理器在算力、带宽与并行性方面面临前所未有的压力。

GPU 领域已从传统 SIMT 扩展到跨层调度、可重配置缓存、NoC 拥塞管理与多芯片架构，以弥合算力—带宽失衡并提升单卡效率。

CPU 侧则因低精度(INT8/FP8/INT4)和矩阵扩展(AMX/SME/RVV)的发展，逐渐具备高效推理能力。

与此同时，非规则程序的并行化仍是多核架构的核心难题，推动推测执行、事务内存和解耦流水等技术持续演进。

整体趋势正指向更自适应、更协同的异构通用计算体系。

（三）当前存在的问题

GPU 架构优化中存在流缓存设计；NUCA 架构下的缓存分区与多片互联；Tensor Memory 与 Shared Memory/L1D Cache 融合设计；访存粒度压缩与数据去重优化；TLB 预取优化等。

CPU 架构优化中存在向量加速单元设计空间探索；并行编程难度大；动态重组多核性能受限；线程级推测并行任务负载不均衡等问题。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标

GPU 架构优化领域拟研究将从流缓存解耦、L2 缓存带宽与共享机制、片上互联结构优化以及 Tensor Memory/Shared Memory 融合设计四个方面开展探索，旨在构建可扩展、高能效的 GPU 访存体系结构模型。

CPU 架构优化包括量化相关研究和推测并行两项研究。前者拟围绕在量化方向上对 AI 计算进行软硬件结合的优化，研究将从软件层面的量化算法、RVV 的向量运算，CPU 的 AI 加速结构设计三个方面探索，旨在构建高性能的低精度量化 CPU 硬件支持。后者拟构建一个紧耦合的多核 CPU 框架，探索单线程程序在多核架构上的并行化方法，让多个单核 CPU 协同加速完成串行程序的任务，从而突破单线程性能瓶颈。

（二）技术方法与理论工具

1. 基于主流模拟器进行体系结构建模与仿真分析。

2. 使用硬件事件采样进行校正。

3. 基于访存 Trace 生成器建模访存行为，使用统计建模与概率密度估计方法进行带宽分析。

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

前沿交叉科学学院
School of Advanced Interdisciplinary Sciences

“智汇交叉·创领未来”科研创新大赛
研究小组项目汇编

报告题目	面向 Tb/s 级互连的玻璃基光电共封装关键技术研究	
研究小组名称	光电融合小组	
研究小组成员	姓名	学号
	黄淞	202518023426016
	兰扬	202518023426034
	王瑞	202518023426017
	吴昊	202518023426033
	瞿江	202518023453013
	吴若瑜	202518023453016
	李湘	202518023426036
	李昊峰	202518023407003
指导教师	魏同波	
关键词	CPO,光电共封装，AI 优化	

摘要：本报告针对人工智能与超大规模数据中心对带宽指数级增长的需求，提出了一种基于玻璃通孔（TGV）基板的共封装光学（CPO）系统方案，旨在突破传统可插拔光模块面临的“功耗墙”与“密度墙”瓶颈 。研究内容涵盖四大核心维度：首先，在光源端，探索高质量硅基量子点激光器的外延生长与高耦合效率的外接光源热管理技术 ；其次，在高速光电链路端，致力于单波长 200Gbps 以上的高速硅光发射机（MZM+Driver）与接收机（PD+TIA）的协同设计 ；第三，在封装基板端，攻克高深宽比、低损耗的 TGV 精密制造与多芯片异构集成工艺 ；最后，在设计工具端，创新性地融合 AI 与量子启发式算法（QUBO），构建面向多物理场耦合的 CPO 布局自动化优化流程 。本项目最终旨在研制出聚合带宽达 1.6Tbps、能效优于 10pJ/bit 的玻璃基 CPO 演示原型，为下一代绿色、高算力互连提供理论与技术支撑 。

一、研究背景与当前存在的问题

（一）研究背景与意义

背景驱动： 数据密集型应用（AI、VR 等）推动交换机带宽需求每两三年翻番，光模块正向 1.6T 乃至 3.2T 演进 。**技术瓶颈：** 传统“可插拔”架构因长距离电互连导致严重的信号损耗(需高功耗 DSP 补偿)和面板密度受限,面临“功耗墙”与“密度墙”两大矛盾 。**玻璃基 CPO 优势：架构革新：** CPO 将光引擎与 ASIC 共封装，将电互连从厘米级缩短至毫米级，有望实现“去 DSP 化”，大幅降低功耗 。**材料优势：** 玻璃基板（TGV）相比有机基板具有更低的介电损耗（支持 224Gbps PAM4），且具备光透明性，支持“光电合一”集成 。

领域现状：CPO 系统级进展： 国外康宁、英特尔等已推出基于玻璃基板的 CPO 原型，康宁实现了光电 TGV 一体化集成 ；国内上海交大演示了 110GHz 带宽的 TGV 中介层 。**光源技术：异质键合：** UCSB 团队实现了硅基量子级联激光器和异质集成激光孤子微梳 。**单片外延：** 根特大学和 UCSB 在硅基量子点（QD）激光器方面取得突破，实现了低阈值和高通道数 。**高速收发芯片：发射端：** 硅光 MZM 与 CMOS 驱动的单片/混合集成是主流，IBM、中科院半导体所等实现了 50Gbps+ PAM4 发射机，正向线性驱动和分段式调制演进 。**接收端：** IMEC 和 IHP 等机构通过横向 PIN 和鳍型结构将 Ge/Si 探测器带宽推向 67GHz 甚至 265GHz 。**设计自动化（EDA）：** 传统工具无法处理光电热多物理场耦合。当前 Google、NVIDIA 等利用 AI（强化学习）优化布局，而 QUBO 模型作为新兴数学框架，有望解决布局

这类 NP-Hard 问题 。

（二）当前存在的问题

光源集成难题： 片上生长的量子点面临晶格失配导致的高缺陷密度问题 ；外接光源面临耦合效率低、热管理复杂以及封装工艺受限（如热膨胀系数失配）的挑战 。**高速链路瓶颈：发射侧：** MZM 带宽受限于 RF 损耗和速度失配，低耐压 CMOS 驱动难以满足高速调制所需的高摆幅 。**接收侧：** 探测器带宽与响应度存在制约（厚度矛盾），高温下暗电流剧增；TIA 面临带宽、噪声与功耗的折衷 。**基板制造挑战：** 在玻璃上实现高密度互连（TGV）的同时，需解决金属化填孔难（易产生空洞）及异构芯片高精度贴装的问题 。**设计工具割裂：** 缺乏统一的“电-光-热”协同仿真模型；传统算法难以在多物理场强约束下找到布局的全局最优解 。

二、拟研究的内容与执行方案

（一）研究目标：本研究旨在开发面向 Tb/s 级互连的玻璃基 CPO 关键技术，具体目标包括：**光源突破：** 研制高耦合效率的单片集成硅基量子点激光器，并优化 CPO 外接光源的热管理与耦合结构 。**高速收发：**实现单通道速率≥200Gbps 的光电协同设计。包括高带宽分段式 MZM、线性驱动电路、100GHz+带宽的 Ge/Si 探测器及低噪声 TIA 。**基板制造：** 制备深宽比 5:1、孔径约 50μm 的高密度 TGV 玻璃基板，实现无空洞铜填充及高精度 RDL 布线 。**智能 EDA：** 构建 AI 与 QUBO 融合的混合求解框架，实现 CPO 布局的多物理场全局优化 。**系统演示：** 完成 8 通道、聚合带宽 1.6Tbps、能效<10pJ/bit 的 CPO 演示模块原型

（二）技术方法与理论工具：材料与制造工艺：外延生长： 采用 MBE 技术在图形化 SOI 衬底上生长 InAs 量子点，利用应变超晶格层过滤位错 。**TGV 加工：** 采用激光诱导深孔刻蚀+湿法刻蚀工艺成孔，利用 ALD 沉积阻挡层+脉冲电镀实现无空洞铜填充 。**封装集成：** 采用微凸点（Micro-bump）倒装焊（Flip-Chip）和热压键合技术进行多 Chiplet 集成 。**仿真与建模工具：多物理场协同：** 结合 ANSYS HFSS（电磁）、Icepak（热）、Lumerical（光）和 COMSOL 进行跨域仿真 。**电路设计：** 使用 Cadence Virtuoso 进行驱动与 TIA 电路设计，并建立 Verilog-A 紧凑模型实现光电联合仿真 。**算法与优化工具：QUBO 建模：** 将 CPO 布局中的热串扰、电信号完整性等约束转化为二次无约束二元优化模型 。**AI 融合：** 利用图神经网络（GNN）预处理几何约束，利用强化学习（RL）生成初始解，结合量子退火或经典求解器进行寻优 。