

# 2024 年度国家自然科学基金数学天元基金-深圳 “数学与智能+” 交叉重点专项申请指南

为了推进数学理论、方法与技术在医疗健康、电子信息、数字经济等领域中的交叉融合与应用研究，推动数学在战略性新兴产业中的创新发展和应用落地，支撑粤港澳大湾区国际科技创新中心与综合性国家科学中心建设，国家自然科学基金数学天元基金和深圳市科技创新局联合设立“数学与智能+”交叉重点专项（以下简称“交叉重点专项”）。现征集 2024 年度交叉重点专项申请，具体说明和要求如下：

## 一、 科学目标

本重点专项项目围绕数学与数字经济的“智能+”融合研究，促进应用数学和产业技术创新融通发展。本年度聚焦智能制造、未来通信、生命健康等关键领域，开展前沿数学理论、方法与技术的创新攻关研究，以期构建更加高效、智能化的生产方式以及诊疗模式等，促进相关产业转型升级，为区域经济发展注入新动能。

## 二、 资助研究内容

本重点专项项目拟资助以下研究方向：

### 项目 1：面向复合手术机器人端侧手术导航大模型应用的关键数学技术

针对神经外科与神经介入复合手术机器人智能导航中异构数据模态多、快速响应需求高引起的端侧大模型部署难问题，构建端侧多模态手术导航大模型数据融合及量化加速的数学理论与方法，重点聚焦：构建端侧复杂异构多模态数据的融合模型，依据端侧算力建立不少于 2 种多模态特征对齐的高效融合算法；研究端侧大模型的量化方法，实现模型参数的稀疏表示，使端侧模型内存占用相对于模型量化前减少 30%以上；研究面向具身智能复合手术机器人终端硬件需求的端侧推理加速策略，优化后推理时间缩短 15%至 30%；在国产复合手术室中部署验证，实现手术导航中的即时交互和高速响应，提高手术效率和安全性。

## 项目 2: 数据-机理混合驱动的选择性激光熔化 3D 打印加工过程仿真算法及理论

面向大尺寸、多光束的激光选区熔化装备,开展含气-液-固相变的激光-热-流-固多物理场耦合的选择性激光熔化 3D 打印加工仿真建模,开展模型动力学行为研究,揭示工艺参数对制件产品的影响机理;发展强稳定、保物理特性和一致收敛的高效求解算法,并开展算法收敛性分析;融合历史和加工数据,发展数据和物理机理混合驱动的新型求解算法,实现模型参数估计和物理场重构的快速计算;研发高性能仿真并行算法,在国产超级计算机上部署测试,算法可扩展至百万处理器核心,且并行效率不低于 80%;形成一套具有自主知识产权的选择性激光熔化 3D 打印加工仿真软件,针对不小于 500mm\*500mm\*500mm 的制件,仿真结果与实际制件之间的平均误差小于 10%。

## 项目 3: 数据与结构协同驱动的信道编译码理论与算法

针对 6G 通信的低延迟和高可靠性要求,研究数据与结构协同驱动的端到端信道编译码方法。利用新型代数结构、突破循环置换块的限制,设计新的准循环码类,给出性能分析方法,并以此为先验降低码型搜索复杂度;研究基于强化学习或自编码器的码型搜索算法,超越现有系统码 AI 搜索方法且码长超过 2000;研究基于自编码器的信道编译码算法的泛化误差理论;研究针对准循环 LDPC 码的新型神经译码算法,比基线神经 BP 译码器性能提升不少于 0.3dB;发展基于 Transformer、扩散模型、或混合专家模型的智能编译码算法,适用于码长超过 2000 的高性能编码方案。

## 项目 4: 基于超声-射线的芯片封装器件高分辨率成像数学理论、方法及应用

针对多薄层异质高端芯片的核心封装材料和工艺研发对于“结构-力学-缺陷”高精度成像检测的迫切需求,研究基于超声-射线的非接触高分辨率成像的数学理论与方法。提出混合模态信号的高分辨率表示方法,实现被测物体细节信息的高效计算;研究结构特征对超声、射线传播行为的作用机制,建立超声、射线传播物理效应与数据结合的多属性正演数学模型;发展基于高维稀疏结构数据统计分析理论的芯片三维结构与材料力学性能高精度快速智能成像算法,探索超声与

射线成像互隐正则化方法，突破大规模病态非线性逆问题方程组高精度稳定求解难题，重建三维图像的峰值信噪比不低于 40dB；开展大尺寸 FCBGA 等先进封装材料（热界面、底填等）及结构非接触成像的应用验证。

### 项目 5：非侵入式血流动力学新型高分辨率成像方法与理论研究

非侵入式血流动力学成像在心脑血管疾病的早期预警防治、精准诊疗和持续跟踪评估中发挥重要作用。针对当前成像技术的时空结构分辨率低和运动特征刻画精度低的难题，利用隐式界面追踪方法和深度学习，建立高分辨率反演成像新模型。刻画和学习成像过程与目标拓扑结构演变的复杂耦合关系，发展高效稳定的数值方法，建立端到端学习的收敛性分析和跨场景动态调控的优化方法；构建新一代可学习的反射成像技术，研制新一代的非侵入式血流动力学成像技术的原型系统，和现有成像技术相比实现 20% 以上的时间和空间分辨率提升，在不少于 3 种专病领域和三家以上大型医疗机构开展应用示范。

### 项目 6：机器人仓储系统订单柔性智能履约技术和方法

针对广泛应用于工业生产和物流服务领域的机器人仓储系统大规模订单高质量履约的共性需求，研究连续动态作业环境下多主体柔性联合优化理论和方法，解决机器代替人背景下仓储系统面临的大规模连续不间断订单实时和柔性履约决策难题。聚焦于：研究“订单分配-料箱命中-机器人调度”业务分解和联合决策建模方法，通过关键和普通决策变量的灵活设计和组合配置，构建订单履约紧耦合和松耦合的柔性联合优化模型体系；研究柔性联合优化模型的数学特性，开发结合人工智能和运筹优化的通用算法框架；秒级求解大规模（仓库面积 $\geq 10000$ 平方米，机器人数量 $\geq 500$ 台）柔性联合优化问题，获得满足实际业务需求的高质量解（连续作业工作台站效 $\geq 200$ 箱/小时），并实验验证；提出的柔性联合优化理论和方法适用于不少于 2 类机器人仓储系统，并在不少于 3 个实际项目中开展应用示范，产能提升 $\geq 10\%$ 。

### 项目 7：面向大规模储能电池部件设计的拓扑优化算法

针对全钒液流电池部件设计所涉及的自由界面和复杂多物理场约束的优化问题，开发基于迭代卷积阈值的稳定鲁棒的拓扑优化算法，设计电池部件以提升充放电性能。建立部件的拓扑结构与电池内多物

理场之间的映射关系,训练基于数据与机理驱动的深度学习生成模型;设计基于弱对抗网络的面向一般性拓扑优化问题的深度学习算法;建立电池部件设计的拓扑优化算法平台,实验验证拓扑优化结果的可行性和有效性,加工测试基于拓扑优化所设计的电池部件搭建液流电池示范样机,电池电流密度达到  $400\text{mA}/\text{cm}^2$  以上,能量效率  $\geq 80\%$ ,实现额定电流密度提升  $30\%$  以上,并在高性能全钒液流电池开发中成功应用。

### 项目 8: 指导机器人构型和动作设计的数学理论与应用

针对机器人探索复杂环境的自适应变形需求,以具备连续连接表面的模块化自重构机器人为对象,构建“环境-任务-构型-动作”耦合的数学模型,并给出模块间离散连接关系和全表面连续连接位置的计算方法,指导机器人变构形通过复杂地形。由于模块间连接关系的离散性和构型连续连接位置的内部碰撞限制,算法的设计应克服离散参数的无梯度引导问题和连续参数的约束条件复杂问题。提出与强化学习结合的可迁移动作设计理论,实现构型和动作的并行计算以快速进行价值评估;搭建模块化自重构机器人,验证所提出方法的可行性;限制计算复杂度为多项式级,实现特定于 5 类以上地形的构形及动作设计,地形通过率达  $90\%$  以上。

### 项目 9: 面向工业互联网场景的异构智能体高效通信随机优化理论与技术

以工业互联网应用为牵引,建立智慧工厂环境下人、智能体以及相互之间,以达意传输和支持智能决策为核心的异构智能体高效无线信息传输理论与方法。提出基于概率保真和随机优化的编解码方法;构建在非理想统计学假设条件下面向差异化需求的随机采样及信息计算、传输与重构的数学理论与方法;解决异构智能体资源动态博弈机制优化问题,搭建智慧工厂环境下的异构智能体移动通信示范系统,验证所提新理论、新方法的正确性与可应用性,并在一家智慧工厂落地应用。

### 项目 10: AI 驱动的锂电池跨尺度模拟和关键材料设计

针对锂电池材料跨尺度模拟面临的构象空间大、多物理场耦合等挑战,研究以图神经网络为基础的可计算模型,发展材料模拟的随机分批算法,发展基于随机分批算法加速的图神经网络基础模型,建立

相应数学理论；构建真实工况条件下全电池的力-电-化学等多物理场耦合模型，发展保结构算法；基于新模型和算法，生成储能密度、循环稳定性等材料关键性能的海量数据，研发适用于锂电池材料设计的人工智能计算平台；面向产业实际问题，基于 AI 模型逆向筛选、设计电极材料、电解质等，形成计算机辅助设计-模拟计算-实验验证的材料筛选设计方法论；开展新方法论的典型示范应用，在国产 GPU 上取得加速 5 倍的成效。

### 项目 11：基于肿瘤微环境的胰腺癌精准治疗策略及超微结构调控方法

评估和调控肿瘤微环境对胰腺癌的治疗有着关键性作用，放射性粒子植入是改变不可切除胰腺癌肿瘤微环境的有效策略。针对放射性粒子植入前、后肿瘤微环境动态监测和精准治疗的难题，通过采集医学影像数据、显微成像数据及空间转录组数据，建立包括分子、细胞、组织层面的多模态三维微环境描述模型；通过深度影像计算定量分析，建立基于扩散和粒子辐射的多尺度多物理场的肿瘤微环境演变模型；发展模型的高效、并行及智能算法；提出胰腺癌肿瘤微环境最优调控和精准治疗策略，并开展临床验证。

### 项目 12：基于高维统计与人工智能结合的抗体类药物筛选和优化新方法

针对抗体类药物研发中抗体筛选及亲和力优化等关键问题，开发基于抗体-抗原蛋白质复合物结构预测算法的抗体类药物筛选和优化平台。构建千亿级别蛋白质同源序列公共数据库，支持抗体类药物蛋白质的结构预测；以预测的复合物结构为基础，发展融合深度学习、蛋白质大语言模型、高维数据统计、蒙特卡洛优化等理论及方法的新型人工智能模型，并结合生物学实验，建立“干湿结合”的自动化抗体药物筛选和亲和力优化流程；新流程支持抗体筛选在短时间内将百万级备选抗体序列缩减到湿实验验证可承受范围 (<100)，即可获得结合抗原的抗体；以抗肿瘤多特异抗体、ADC 靶向抗体等为例，实现对 5 个以上抗原进行筛选，并经湿实验验证，对 2-3 个抗原发现潜在有效抗体。

### 项目 13：多系统组织病理自动化诊断大模型研究

针对病理组织形态复杂、且病理诊断主观性强、结果不能互认的问题，研发多系统组织病理自动化诊断大模型。研究在稀疏标注下的大模型高效微调方法及多目标分割、分类方法，实现乳腺、肺等以肿瘤为主的组织病理图像单细胞精度的自动分割、边界提取与模式特征识别；基于 10 万例以上病理图像建立自动化筛选及处理疑难罕见病理的方法；结合免疫组化图像，研究病理组织 H&E 与免疫组化图像信息融合下的特征表征及度量，实现依据 H&E 图像判定肿瘤组织分类与分型；基于 10 万例以上病理形态、诊断文本、治疗及预后等多模态信息建立肿瘤治疗疗效及预后预测的模型算法。研发实现包含组织病理诊断、免疫组化检测评价，治疗疗效及预后预测于一体的自动化系统并开展临床试点应用。

#### **项目 14：基于长尾多模态数据分布式/增量学习的钢铁表面缺陷检测方法研究**

钢铁表面缺陷检测面临数据稀缺、缺陷形态多样且随时间动态变化的问题,且检测数据表现出高度复杂的长尾分布特征。针对钢铁表面缺陷检测智能系统研发需要,提出兼顾稳健和有效的长尾数据自适应目标函数;提出兼顾通信代价、算力成本和预测精度的长尾分布式增量学习方法;提出基于多源异构长尾数据的特征提取及融合方法,以及全局和局部特征分离、尾部类别数据增广等特征强化方法;研究多模态分布式长尾学习新范式以及通用模型基础上的适用于长尾数据的微调方法。新方法在热轧带钢表面缺陷检测等生产环节落地,相较于现有技术准确率提升 20-25%以上,对于重大缺陷的检出率达到 99%以上,模型能够基于主流边缘端算力进行实时推理。

#### **项目 15：医学影像判读大模型的研发及示范应用(集成项目)**

集成 2022-2023 年度已部署的相关医学影像数据标注、影像判读、大模型分布式训练、测评等项目成果,基于自主可控基础大模型平台,研发医学影像判读大模型。聚焦突破:语言和图像双模态对齐融合、混合推理、图生文、文生图关键技术,医学影像知识增强的语言基础大模型和语言-图像基础大模型,基于增强语言大模型的医学影像自动标注方法,医学影像描述报告自动生成技术,医学影像判读报告自动生成技术等;集成所提出的新技术,研发医学影像自动描述系统和报告自动生成系统,并在 10 家以上三甲医院试点应用。

### 三、资助方式

以重点项目群方式资助，项目资助周期不超过五年。项目执行期前两年由数学天元基金与深圳市科技创新局联合资助（侧重于理论与方法，每项 200 万元；综合集成项目，每项 400 万元）；对于明确在深圳市转化落地的项目，后三年拟由深圳市资助（侧重于技术与应用落地，每项不低于 300 万元）；项目资助采取淘汰机制，执行两年后进行中期评估，评估优秀的项目可获连续资助。项目研究团队须由包含数学和其他领域的专家组成，采取项目内双负责人制（其中，一名负责人来自数学领域，另一名负责人来自其他领域；两位负责人的排名先后由项目组成员自行确定）。2024 年拟资助不超过 15 项。申请书中的研究期限应填写为：**2025 年 1 月 1 日至 2026 年 12 月 31 日**。

### 四、 申请要求及注意事项

#### （一）申请条件

本重点专项项目申请人应当具备以下条件：

1. 具有承担基础研究课题的经历；
2. 具有高级专业技术职务（职称）。

在站博士后研究人员、正在攻读研究生学位以及无工作单位或者所在单位不是依托单位的人员不得作为申请人进行申请。

#### （二）限项申请规定

1. 本重点专项项目不计入高级专业技术职务（职称）人员申请和承担总数 2 项的范围；
2. 本重点专项项目申请人和参与者只能申请或参与申请上述 15 个研究内容之一的项目；
3. 申请人同年只能申请 1 项本重点专项项目。

#### （三）申请注意事项

1. 本重点专项项目申请接收时间为 2024 年 10 月 8 日—2024 年 10 月 14 日 16 时。请申请人于 2024 年 10 月 8 日后登录国家自然科学基金网络信息系统（以下简称信息系统）<https://grants.nsf.gov.cn/>（没有系统账号的申请人请向依托单位基金管理联系人申请开户）撰

写申请书。资助研究内容中项目 1 至项目 14 的合作研究单位数量不得超过 2 个；项目 15（集成项目）的合作研究单位数量不得超过 4 个。

2.申请人在填报申请书前，应当认真阅读本项目指南和《2024 年度国家自然科学基金项目指南》中申请须知的相关内容，不符合项目指南相关要求的申请项目将不予受理。

3.申请人应根据项目指南公布的资助研究方向和拟解决的核心科学问题，自行拟定项目名称、科学目标、研究内容、关键科学问题、技术路线等。

申请书资助项目类别选择“数学天元基金项目”，亚类说明选择“数学天元基金”，附注说明填写：“交叉重点专项—项目 xx”。附注说明中的“项目 xx”需要填写资助研究内容中项目 1 至项目 15 中的一项。所有项目申请代码 1 均应选择数学学科申请代码。申请书正文的最前面须标明所选研究方向的序号及标题。以上选择不准确或未选择的项目申请将不予受理。

4.数学天元基金项目无间接费用，申请经费为直接费用。申请人应根据《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》的有关规定，以及《国家自然科学基金项目资金预算表编制说明》的具体要求，按照“目标相关性、政策相符性、经济合理性”的基本原则，认真编制《国家自然科学基金项目资金预算表》。

5.申请人完成申请书撰写后，在线提交电子申请书及附件材料。申请材料中所需的附件材料（有关证明材料、审批文件和其他特别说明要求提交的纸质材料原件），全部以电子扫描件上传。

6.依托单位应对本单位申请人所提交申请材料的真实性、完整性和合规性进行审核；对申请人申报预算的目标相关性、政策相符性和经济合理性进行审核。具体要求如下：

（1）应在项目接收工作截止时间前（2024 年 10 月 14 日 16 时）通过信息系统逐项确认提交本单位电子申请书及附件材料，无需报送纸质申请书。项目获批准后，将申请书的纸质签字盖章页装订在《资助项目计划书》最后，一并提交。签字盖章的信息应与信息系统中的电子申请书严格保持一致。

(2) 依托单位完成电子申请书及附件材料的逐项确认后，应于申请材料提交截止时间前通过信息系统上传本单位科研诚信承诺书的电子扫描件（请在信息系统中下载模板，打印填写后由法定代表人亲笔签字、依托单位加盖公章；若当年已上传本单位科研诚信承诺书的电子扫描件，则不用再重新提交），无需提供纸质材料。依托单位须在项目申请截止时间后 24 小时内在线提交项目申请清单。

## 五、 联系方式

1. 填报过程中遇到的技术问题，可联系国家自然科学基金委员会信息中心协助解决，联系电话：010-62317474。

2. 其他问题可咨询国家自然科学基金委员会数理科学部数学科学处：

联系人：严夺魁

电 话：(010) 62325025

邮 箱：yandk@nsfc.gov.cn