

# “数学和应用研究”重点专项 2023 年度

## 项目申报指南

(征求意见稿)

“数学和应用研究”重点专项的总体目标是：面向国家战略需求，解决一批影响未来发展的重大数学与应用问题，提升我国自主创新能力。

2023 年度指南围绕数据科学与人工智能的数学基础，科学与工程计算方法，复杂系统的分析、优化、博弈与调控，计算机数学理论与算法，基础数学重大前沿问题研究等 5 个重点任务进行部署，拟支持 18 个项目。同时，拟支持 10 个青年科学家项目。

### 1. 数据科学与人工智能的数学基础

#### 1.1 高密度集成电路部件缺陷视觉检测的数学方法与智能系统

**研究内容：**针对当前高密度集成电路部件缺陷检测技术对新缺陷和未知缺陷的检测能力不足，以及模型系统泛化迁移能力弱的问题，建立新的缺陷检测理论、方法与系统。针对负样本表达不充分问题，提出基于非完备贝叶斯学习理论的异常检测新模型和缺陷发现新方法；提出领域预训练大模型和小样本-弱标注学习相结合的模型自适应迁移与泛化技术；研究基于元数据与生成模型相结合的数据自标注新方

法，构建大规模高密度集成电子电路部件检测大数据集；研发支持新缺陷类型在线学习、可快速部署与自适应更新的集成电子电路部件检测系统,并在实际应用中验证。

**考核指标：**建立原创性的高密度集成电子电路部件缺陷检测理论和方法。构建异常检测和缺陷发现新方法，其所发现的细粒度新缺陷类型准确率达到 60%；基于提出的模型自适应迁移与泛化技术，金板轻微异色、焊盘变形、线路短路、上锡不良、锡高和锡变等重要缺陷的检测准确率较现有算法提升 5%；面向 IC 载板、HDI 板、半导体引线框架等电子部件，构建包含 50 种高密度集成电子电路部件缺陷、800 万个样本以上的大规模缺陷检测数据集，缺陷检测系统部署后基础模型检测准确率较现有算法提升 2%；系统支持新缺陷类型在线学习、快速部署与自适应更新，实际应用于不少于 10 个厂家。

## **1.2 支持药械联合精准靶向放疗的数学模拟技术与智能系统**

**研究内容：**针对癌症的药械联合精准靶向放疗需求，建立杀死癌细胞所需的高保真中子输运场模拟数值方法；研究任意固态中子慢化材料的热中子散射截面计算方法，构建束流整形智能优化、相对生物效应智能预测、靶区勾画深度学习、药械联合多源数据同化模型，形成微损伤、高效率的中子治疗计划系统；提出新一代含硼靶向药物智能筛选模型，

开发具有血脑屏障穿越能力和细胞核靶向功能的硼药；以射频四极场加速器硼中子俘获治疗（AB-BNCT）装置为载体，验证新模型、新系统与新技术的可行性与有效性。

**考核指标：**所建立的高保真中子输运场模拟数值方法对人体的建模分辨率达到毫米级、网格数建模能力超过 1 亿；研制出损伤不低于 10%、并行效率高于 90%且具备完全自主知识产权的 AB-BNCT 治疗计划软件，AB-BNCT 热中子散射截面库包含慢化材料种类大于 10 种，水模实验剂量误差低于 5%；获得 $\beta$ -硼基氨基酸作为靶向硼药的衍生物样品大于 20 种，筛选出不少于 3 个靶点的新型硼药，肿瘤与正常组织的硼浓度之比大于 5；在射频四极场 AB-BNCT 动物实验中完成 $\beta$ -硼基氨基酸硼药的有效性 & 安全性论证。

### 1.3 非独立同分布大数据统计基础理论、方法与应用

**研究内容：**突破基于数据独立同分布假设的传统统计学研究范式，建立非独立同分布大数据统计基础理论与方法。提出可解释性、易于应用的策略大数定律和策略中心极限定理等概率极限理论，发展基于策略极限理论的统计推断框架；研究大数据非线性关联关系度量与检验方法，以及基于模型平均与集成机器学习的关联分析与因果推断方法；研究非独立同分布大数据的深度学习统计理论等。相关统计理论与分析方法在民航核心风险事件预测与金融风险度量中得到实际应用。

**考核指标：**所提出的策略极限理论、统计建模方法与统计推断框架，非独立同分布大数据关联关系和因果分析等统计推断理论，在基础理论原创性、方法架构系统性、建模功效最优性等多个层面产出多项原创性成果；提出应用策略极限理论、关联分析方法的深度学习网络架构设计与优化方法，降低网络模型参数复杂度 30% 以上。在民航核心风险事件预测、金融风险度量等领域进行验证，与现有算法相比提升风险事件预报精度 20% 以上。

## **2. 科学与工程计算方法**

### **2.1 液晶及其复合体系的数学理论和计算**

**研究内容：**研究液晶分子、张量和向量模型的相互关系和适定性理论，发展液晶缺陷和相变的数学理论。发展计算自组装准晶结构的新算法，可刻画液晶高分子信息、参数物理意义清晰的介观自洽场模型。发展高效解景观算法，构建不同液晶体系的缺陷景观，刻画其成核动力学和相变路径。发展液晶弹性体介观非平衡态动力学模拟方法，开发液晶及其复合体系自主可控的微、介、宏观一体化设计软件。研制含不同液晶基元的弹性体材料，实现对其精确调控。

**考核指标：**给出液晶缺陷的数学刻画，建立准晶结构的周期逼近理论。设计解景观和准晶结构的高效计算方法，与传统方法（如周期逼近方法）相比，精度和效率分别提高 2 个量级和 5 倍以上。开发液晶一体化设计软件 1 套，可计算

1 千万自由度以上的有限元模型。研制的液晶弹性体拉伸强度不小于 10MPa、自修复率大于 90%，驱动力/角度/距离可调控，样品间的调控误差小于 10%。

## **2.2 复杂环境下路面的多尺度算法及应用**

**研究内容：**围绕交通领域复杂环境下的路面设计和养护，研究考虑多结构层、多介质材料及宏微观耦合模型的路面多尺度算法及数学理论。针对沥青基、水泥基等材料，发展融合微结构随机几何表征的三维多尺度算法及理论。探索解决复杂环境下结构与材料蠕变和疲劳损伤的计算难题，包括沥青路面车辙深度与疲劳寿命的计算。发展基于可靠度的结构与材料非线性多尺度路面新型设计算法和路面评价方法。

**考核指标：**建立多结构、多介质和多物理场的路面多尺度数学模型及其适定性等理论。提出多因素强耦合的多尺度路面高效高精度设计算法，完成至少两种路面设计算例，与当前算法（如弹性层状体系及弹性地基板算法）相比，精度提升不低于 10%。创建两种路面（沥青、水泥路面）的疲劳寿命预测模型与沥青路面的车辙预估模型，预测精确度（与检测数据相比）达到 85%以上。

## **2.3 黑土区面源污染过程多尺度动态数学建模与计算**

**研究内容：**以黑土区典型农业流域为代表，研究识别农业面源特征，研发综合基础数据库（来源、类型、分布与负荷）。发展面源污染物输运的多尺度（分子、孔隙、田块、

流域)数学模型,探索解决偏微分方程在参数辨识和控制优化方面的难题(如具有渗流输运强耦合、退化等复杂系统的能控性)。结合机器学习发展新型高效算法,研发适用于我国面源污染数值模拟的自主软件,为面源污染预测和精准防控提供依据。

**考核指标:**建立覆盖黑土区不同空间尺度(区域、流域、地块)的农业面源污染基础信息数据库。建立面源污染输运数学模型,及其参数辨识、控制优化的数学理论。解决三维土壤渗流模型中的参数难题(如介质过于简化等),提出高精度高效算法,实现对典型应用问题分辨率至少提高10倍的并行计算。针对典型面源污染风险预测与防治,研制面源过程与机制耦合预测模型软件,在加载同样面源污染基础数据库条件下,与现有模型相比,研制模型模拟结果的纳什系数提高大于20%,给出适用于黑土区的防控措施最佳费效比配置方案,在负荷削减20%目标下,成本显著降低( $P<0.05$ )。

## 2.4 电离层波传播及应用中的数学建模与数值模拟

**研究内容:**结合电离图的物理特征,研究高效能机器学习求解算法,提高电离图判度的准确率。发展精度可控的高效正演算法,GNSS(全球导航卫星系统)和地基电离层探测数据反演、层析的反问题模型的数学理论,以及高稳定的反演算法。研究构建基于模型-多元异构数据驱动的电离层重构数学模型及其数值理论。发展电离层电磁波传播问题的高

效能计算方法，高精度定位的理论模型与算法。

**考核指标：**建立电离图智能判度算法，准确率优于 90%（基于垂测数据）。设计高精度高稳定算法，反问题求解稳定性较现有算法（如分段准抛物法）提高 80%，层析精度优于 5%，解算时间小于 10 分钟。提出数据/模型融合的电离层重构算法，精度相对误差小于 8%（临界频率）。建立电离层电磁波传播高效能数值方法以及高精度定位模型与算法，IRI 模型下射线追踪时间较现有算法缩短 40%以上；相对等效虚高原理定位算法等短波侦测系统单站定位算法，短波信号定位精度提高 30%。

### **3. 复杂系统的分析、优化、博弈与调控**

#### **3.1 绿色发展背景下经济系统的动态分析、控制及博弈**

**研究内容：**在绿色发展背景下，借助随机动力系统与倒向随机微分方程，建立经济系统若干动态模型，给出动态分析新视角；研究资源环境约束下企业生产效率测算及优化问题，发展多目标和复杂信息结构的动态随机控制与博弈理论，给出动态优化策略，实现经济、社会和生态等综合效益最大化；研究绿色金融市场的风险识别机制及产品定价模式；设计高效优化算法，量化研究经济系统的分析、控制及博弈问题。

**考核指标：**建立结构切换、信息延迟及突发事件影响下的大规模经济系统动态随机模型；建立多目标大种群动态系

统的控制与博弈理论，设计最优投入产出策略及近似最优算法，计算误差低于 10%；建立非线性绿色金融市场风险控制与产品定价理论；设计经济系统的分析、控制及博弈高效算法，求解速度比现有梯度下降算法提高 10%。

### **3.2 复杂系统的通用优化模型、理论与算法及其应用**

**研究内容：**针对复杂系统中的典型优化问题：流形优化、线性锥优化、非凸非光滑优化、多阶段随机变分不等式和随机优化等问题，构建完整理论体系，设计高效计算方法，研制软件包；针对超大规模混合整数规划问题，建立模型和数据双驱动的求解方法，研发相应的通用优化软件包；有效解决海外资产安全评估、国家战略物资储备布局、物资供应库存优化、复杂电网调度和复杂路网列车运行图等两个以上国家重大决策需求。

**考核指标：**构建典型优化问题的理论，设计普适性的高效求解方法和混合整数规划的学习优化算法，算法性能与通用软件 Gurobi/Cplex/Xpress 相比，计算效率提升 30%、准确率提升 10%；研发通用优化软件包，同等硬件条件下，其求解时间和准确率都优于 Gurobi/Cplex/Xpress，应用到相关领域提高经济效益 20%；研发具有自主知识产权的电网调度和路网列车运行图中的核心优化软件。

## **4. 计算机数学理论与算法**

### **4.1 计算机数学核心理论、算法与软件**



**研究内容：**发展自动推理、符号分析、张量与矩阵计算复杂度、代数优化（如 SOS）、符号计算和机器学习融合的深度推理等计算机数学核心理论与算法，开发自主高效软件库，在芯片计算加速、数据同态感知、机器人运动学、组合恒等式及符号积分的自动证明与发现等方向得到实质性应用。发展量子计算的数学理论，包括基于计算复杂度的量子计算能力边界确定、量子密码验证算法与软件。

**考核指标：**与 Maple、Matlab 等商业软件中的已有算法相比，符号分析用于机器证明效率提高 3 倍；代数优化与自动推理用于人工智能系统分析规模提高 2 到 3 倍；张量与矩阵快速算法用于芯片计算加速至少 20%；深度推理算法与现有推理算法相比效率提高一个量级；基于本指南研究方法，开发性能达到或超过 Maple 等商业软件的计算机数学自主软件库；设计比国际公认的已有量子算法复杂度更低的新算法；自主研发量子密码验证软件工具。

## **4.2 信息安全关键领域核心算法研究及算法库构建**

**研究内容：**针对信息安全领域算法安全性分析设计及芯片级安全实现急需的数学难题算法，研究 SAT、CSP 求解算法、全息算法、复杂性二分定理等，解决求解瓶颈问题，突破 EDA 优化和对称密码等领域的若干关键难题；针对数论变换、整数分解、SVP 等计算困难问题建立新型计算框架和高效算法，打破公钥密码、芯片测试领域主要计算壁垒；研

制信息安全领域通用计算架构的核心算法库和适配国产计算架构的专用算法库。

**考核指标：**给出全息算法的精确数学刻画，证明适用范围更广的复杂性二分定理。对比国际最好开源软件，CSP、SAT 求解算法计算效率提升 30%以上，数论和代数计算模块效率提升 20%以上；研制出一套自主可控的通用计算架构的 CSP、SAT、代数计算问题求解器，性能超越国际最好开源软件；建立适配国产计算架构 SAT 求解算法、数论算法和格密码算法专用软件库。

#### 4.3 编解码的数学新度量与结构理论及应用

**研究内容：**针对未来 6G 通信对底层新型信道编解码基础技术的需求，在新场景多维度环境下，研究基于概率、随机分析与统计度量的新型编解码的设计与性能、效率度量，包括译码复杂度、时延等；研究基于图论的新型编解码的图码结构和性能分析理论；研究实数域上广义编解码理论的数学基础；利用非线性信息论和函数计算研究编解码的新度量与结构。

**考核指标：**初步建立面向 6G 新场景下新型编解码所需要的新概率和随机理论框架，给出有限码长限制下编解码效率的数学度量；初步建立新型码结构与图结构的映射体系，给出信道编码性能可达的最优界估计；初步建立基于非线性信息论和函数计算的新型编解码多维指标的平衡关系度量

与算法。

## 5. 基础数学重大前沿问题研究

### 5.1 BSD 猜想和 Motive 的 L-函数特殊值

研究秩 0 和 1 情形的椭圆曲线 BSD 精确公式与  $p$ -逆定理, 以及更一般 motive 的 BBK 猜想; 建立相关 Iwasawa 主猜想。研究 L-函数在算术类中的变化行为, 如椭圆曲线二次扭族首项次数的 Goldfeld 猜想和首项系数的 Kolyvagin 猜想; 研究非正规情形的 Iwasawa 主猜想; 建立在坏素数处的 BSD 公式, 研究自守表示给出的 motive 的 BBK 猜想, 研究算术 Gan-Gross-Prasad 猜想和算术 Rallis 猜想; 以及 Goldfeld 猜想和 Kolyvagin 猜想。

### 5.2 镜像对称及相关问题

建立规范线性西格玛模型所对应的数学理论, 研究其与 Hodge 形变理论的关系; 构造开弦计数不变量, 研究计数不变量与范畴计数不变量的比较定理; 沿 Gross-Siebert 纲领研究同调镜像对称; 研究 Landau-Ginzburg 模型相关的镜像对称; 研究量子上同调环的自然性, 证明 Gromov-Witten 不变量在双有理等价下的不变性及量子 D-模的自然性; 研究计数不变量与经典拓扑的联系, 如伽马猜想等; 刻画计数不变量的双有理不变性; 研究 Gromov-Witten 不变量与可积系统的联系; 研究范畴计数不变量在模空间上的变分性质。

### 5.3 高维里奇流研究及其应用

围绕里奇流的奇异分析和局部正则性基本问题，研究四维里奇流的孤立奇点的分类和高维弱里奇流的奇点集结构；完备非紧的三类孤立子在合适几何条件下的分类及其在里奇流奇异分析上的应用；Kähler 里奇流的奇点与 Mori 极小化纲领的里奇流几何化证明；Fano 流形上 Kähler 里奇流的极限分类与建立 K-稳定性意义下的形变理论。

#### 5.4 椭圆型方程解的量化及相关性态的研究

研究非线性泛函及其对应的椭圆型方程在非紧群作用下导致的集中或爆破现象，构建失紧泛函问题的爆破分析原理，进而研究场方程、Bose-Einstein 凝聚等问题中解的量化及相关性态。研究与偏微分方程密切相关的函数（如决定爆破点位置的 Robin 函数，Kirchhoff-Routh 函数）的临界点的性质，进而研究重要的椭圆问题（如 Euler 方程涡旋问题）的解的存在性、唯一性。研究爆破现象集中在子流形上的解的存在性和稳定性。

#### 5.5 随机矩阵和概率渐近理论

围绕自正则化随机变量和高维随机矩阵的基本问题研究自正则化相依和高维随机变量的极限理论、中偏差和大偏差原理；研究随机矩阵乘积的极限定理，研究高维随机矩阵（如相依随机矩阵、稀疏随机矩阵、结构随机矩阵、矩阵值随机过程）特征根统计量的极限理论；研究 Airy 型随机过程的样本轨道性质和 Tracy-Widom 分布的普适性；建立高维数

据统计推断、分布式统计和分布式计算的理论基础。

## 5.6 极值图论若干前沿问题的研究

围绕极值图论中的若干前沿问题展开研究，发展相关理论。研究退化类 Turán 问题，得到某些典型退化图类 Turán 函数精细估计；发展基于代数几何的随机代数方法，并应用于 Turán 函数的下界构造。研究图与超图的极值结构、稳定性和超饱和问题。研究图与符号图的整数流理论和子图覆盖与分解问题。研究极值图论和 Ramsey 理论中的正则化方法。研究图与超图的划分问题，给出不同条件下划分新方法。

## 6. 青年科学家项目

### 6.1 基础数学重大前沿问题研究

针对代数和数论、几何和拓扑、分析数学、微分方程与动力系统、概率论与组合数学等领域的基础数学重大前沿问题开展研究。

**有关说明：**本指南方向共支持 6 项青年科学家项目。

### 6.2 基于 Signature 理论的机器学习与应用

针对典型机器学习应用场景（例如，随机微分方程求解），研究 Signature 映射的构造理论与基于 Signature 映射的高效机器学习执行策略。探索在机器学习中有有效耦合问题结构（代数结构、几何结构）与保持结构的新模型与新方法。

**有关说明：**本指南方向共支持 1 个青年科学家项目。

### 6.3 科学计算和科学前沿及工程领域的交叉研究

围绕科学前沿和工程技术领域前沿关键科学问题和国家重大需求中的科学/工程计算难题，开展可计算建模、高效算法设计及应用验证的研究，发展新型高精度计算方法、融合机理和数据的多尺度多场高效算法等。

**有关说明：**本指南方向共支持 1 个青年科学家项目。

#### **6.4 海量数据分析与最优化结合的模型、理论与算法**

建立海量数据分析与最优化相结合的模型、理论、算法体系，将大数据技术与最优化方法在应用中有机结合，为大数据与人工智能背景下的问题求解提供理论与方法。

**有关说明：**本指南方向共支持 1 个青年科学家项目。

#### **6.5 对称密码可证明安全与分析的关键数学理论**

研究基于组合数学的通用安全性证明方法；基于复杂性理论的效率或安全性假设下界；适用于隐私保护场景的对称密码算法设计思路；基于概率论的对称密码量子安全性分析。

**有关说明：**本指南方向共支持 1 个青年科学家项目。