

附件 2

“变革性技术关键科学问题”重点专项 2020 年度定向项目申报指南

变革性技术是指通过科学或技术的创新和突破，对已有传统或主流的技术、工艺流程等进行一种另辟蹊径的革新，并对经济社会发展产生革命性、突变式进步的技术。“变革性技术关键科学问题”重点专项重点支持相关重要科学前沿或我国科学家取得原创突破，应用前景明确，有望产出具有变革性影响技术原型，对经济社会发展产生重大影响的前瞻性、原创性的基础研究和前沿交叉研究。

本专项 2020 年拟支持 7 个定向择优项目，国拨经费总概算 1.4 亿元；拟支持 8 个定向委托项目，国拨经费总概算 0.4 亿元。申报单位根据指南支持方向，面向解决重大科学问题和突破关键技术进行一体化设计。鼓励围绕一个重大科学问题，从基础研究到应用研究全链条组织项目。鼓励依托国家重点实验室等重要科研基地组织项目。项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部考核指标。每个项目下设课题不超过 4 个，每个项目参与单位数不超过 6 家。

项目执行期一般为 5 年，申报项目特别需提出明确、有显示度的 5 年总体目标和 2 年阶段目标和考核指标（或研究进度）；立

项目实行“2+3”分段式资助，在项目执行2年左右对其目标完成情况进行评估，根据评估情况确定项目后续支持方式。

1. 集成电路设计自动化（EDA）中的创新数学理论和方法

研究内容：针对模拟电路自动化设计中高维、非凸、计算代价昂贵的黑盒函数的优化问题，探索这些函数的结构及其逼近模型构建方法，发展新型全局优化算法；针对集成电路仿真中的结构系统，利用具有规则或近似规则的矩阵结构，发展相关的数学理论、模型降阶方法以及基于快速变换的结构化分析方法；针对可制造性设计的光刻热点分析问题，构建光刻热点特征提取方法，发展定制深度神经网络方法，在保证高精度前提下，提高分析效率；研究三维集成电路热应力及其可靠性分析的可计算建模，发展三维集成电路热应力及其可靠性分析的区域分解和多尺度融合的离散格式和异构并行自适应算法。

考核指标：发展基于黑盒函数模型的全局优化理论的高效稳定算法，大幅提升模拟电路自动优化设计效率，算法效率提高3倍以上；发展结构及近似结构问题的数学理论，构建全新快速数值方法，实现集成电路上亿阶结构化系统的分析，相比现有电路分析工具，能求解问题的规模提高5倍以上，能求解问题的速度提升5倍以上；构建光刻热点特征提取方法和定制深度网络的分类方法，相比传统卷积神经网络方法，提升集成电路光刻热点检测效率5倍以上；发展具有自主知识产权热应力分析工具原型，相比三维集成电路热应力分析的标准有限元方法提升效率5倍以上；相关理论与方法在我

国集成电路研究单位或设计企业得到验证。

有关说明：由上海市科委作为推荐单位组织申报。

2. 面向大型客机防除冰设计的多尺度模拟与不确定量化

研究内容：研究高维随机空间和间断解的逼近数学理论及高效高维计算与机器学习方法，发展贝叶斯推断意义下不确定性量化反问题及边值问题最优控制的快速算法，研究针对多尺度热力学非平衡特征的多尺度算法。研究大型客机结冰条件对翼型升阻力不确定因素的敏感性，构建冰形不确定性与机翼气动特性的内在关系。通过不确定量化反问题手段研究在结冰机理试验室和风洞条件下影响冰形状的主要因素，这些因素重要性排序以及最优控制问题。

考核指标：发展带不确定性流体力学方程高维多尺度不确定量化计算方法，并且构造高分辨率无震荡激波捕获方法。新方法计算效率比现有算法提高一个量级。针对贝叶斯推断意义下不确定性量化反问题及最优控制问题发展新的快速采样算法与机器学习方法，比传统算法计算效率提高一个数量级；发展对动理学和流体力学方程多尺度耦合问题的多尺度多物理，具有渐进保持性质的多层直接模拟蒙特卡罗（Multilevel DSMC）方法，计算效率比传统 DSMC 算法提高一个数量级。通过理论计算及风洞试验综合验证；基于不确定量化方法的机翼表面防除冰设计使得加热面积减少 20%。研制的高维不确定量化与机器学习软件具备解决大型客机机翼防除冰设计，结冰安全评估不确定量化设计和最优控

制问题的能力，并被用于大型客机机翼防除冰设计。

有关说明：由上海市科委作为推荐单位组织申报。

3. DNA 存储中的组合方法

研究内容：通过 DNA 存储技术中的组合方法的研究，开发一套完整的 DNA 存储适配系统。构建 DNA 编码的组合模型，研究基于 DNA 分子特性的组合设计理论，在保证存储效率的前提下提升信息编码的鲁棒性；研究 DNA 合成和测序相关的组合结构及算法，为生化合成和测序技术提供优化模型，提高 DNA 分子大规模合成和测序的成功率；开发全类型数据存储模式；构建 DNA 解码的组合模型，研究基于组合构造的序列分析和拼接算法，以及 DNA 信息的快速读取数学模型；研究可解码的最小数据集等 DNA 存储的极值问题，揭示各类生化技术的模拟极限；研究 DNA 存储的加密算法，保证信息安全；开发完整的 DNA 存储适配系统。

考核指标：开发一套新型 DNA 编码算法，实现数据信息到 DNA 的单位编码效率在 6 倍测序条件下，保证解码成功率不小于 95%，编码效率提升至 1.6；开发适用于任意磁盘可存储类型数据的 DNA 序列优化转换算法；开发一套大规模 DNA 存储（百 TB 级及以上）纠错及索引算法，实现数据快速无损解读；开发一套 DNA 存储加密算法；开发一套完整的 DNA 存储（编码、合成、存储、测序、解码）全流程的适配软件系统和全过程计算机模拟系统，并完成达到百 TB 级别信息的全过程编码、解码计算机模拟测试和百 MB 级别的实验测试和验证。

有关说明：由天津市科技局作为推荐单位组织申报。

4. 医学成像中的关键数学问题及其产业应用

研究内容：围绕低剂量 CT 图像重建、多能谱 CT 图像重建、磁共振快速成像问题，发展医学成像过程的精准建模、医学图像处理的非凸优化、欠定和病态情况下的超大规模逆问题求解算法等。围绕医学图像判读问题，发展多模态医学图像分析方法，包括结合概率积分几何与微分几何的多模态图像自由形变配准、基于几何偏微分方程与最优传输理论的图像深度学习定量分析算法等。开发自主可控的国产建模仿真引擎，为成像技术研发中模型和算法的实际验证提供支撑。

考核指标：开发出低剂量 CT 成像算法，满足诊断效能条件下，辐射剂量降至常规扫描的 1/10 以下；基于光子计数器的高性能多能谱医学 CT 成像算法，清晰区分骨组织、软组织、碘溶液等多种物质；心脏等器官的非增强快速磁共振成像算法，三维静态成像在各向同性亚毫米分辨率下，扫描时间小于 1.5 分钟，动态成像空间分辨率小于 2×2 毫米，时间分辨率小于 40 毫秒。完成不少于 20 个志愿者的国产设备扫描测试，图像质量优于传统方法。为复杂疾病的现代诊断和治疗技术提供算法支撑，开发出基于最优传输理论的图像深度学习定量分析算法，用于疾病诊断的自动化；复杂曲面共形展开算法，用于直肠癌等疾病的精准筛查；多模态图像自由形变配准算法，用于肿瘤疾病的精准放疗。

有关说明：由北京市科委作为推荐单位组织申报。

5. 隐私保护数据处理的数学方法

研究内容: 针对云计算与 5G 通信中保护数据隐私的数据处理问题, 研究保密数据和分布式数据的采集、存储、检索与机器学习。研究分布式隐私保护数据处理方法, 包括安全多方计算实用化方法, 可抵抗恶意攻击的安全多方计算协议, 基于集群架构的最优分布式存储编码, 设计达到实用级别的保护隐私大数据采集、保密信息提取 (PIR) 与机器学习方案, 设计达到带宽最优、存储最小及读取最优的合作再生码。研究基于全同态加密的隐私保护数据处理方法, 设计基于近似 GCD 与 RLWE 的多比特层次型与近似实数运算的全同态加密方案与高效算法, 结合计算机代数、自动推理与人工神经网络研究密文数据的检索与机器学习, 研究密文数据的张量分解与流形上的优化算法。研究以上方法在云计算与 5G 通信中应用, 研究多入多出网络中使用最少次数公钥全同态加密的数据隐私保护方法, 用于设计响应方密文上的智能推荐方案; 研究隐私保护节点实时工作量评估算法, 实现具有隐私保护的 5G 网络传输节点智能选择。

考核指标: 构建同时达到最优读取、最优带宽、最小存储的分布式存储编码, 对比目前微软、谷歌、华为云使用的存储编码, 修复带宽节约 15%~30%。针对万人规模的半诚实用户群, 构建分布式梯度下降、数据综合等背景下数据采集的隐私保护安全协议。构建基于全同态的密文数据机器学习方法, 全同态加密算法达到在 128 比特安全性前提下, 密文膨胀低于 30 倍, 单次同态运算比特数

超过 100，速度比 Helib 提高 10 倍。设计一套多数据模型下轻量级密文域上的计算协议，达到可严格证明的 CCA2 安全，比 Brakerski 公钥全同态加密方案速度提高 1~2 倍，通信开销减少 40%~80%。

有关说明：由中国科学院作为推荐单位组织申报。

6. 乳腺癌精准医学中的数学模型与算法研究

研究内容：针对乳腺癌化疗耐药与进展转移临床关键问题，基于多组学大数据，开发数据处理、刻画与分析的新模型与新算法，构建调控网络，预测关键通路和基因，解析分子机理，设计个体化的精准诊疗策略。综合运用非线性随机分析、图论和组合优化，设计组学数据重构高精度算法，研究面向生物网络的图模型及其理论，结合多组学数据开发刻画调控网络异质性的优化模型及相应的组合优化算法，研究化疗耐药与进展转移的分子调控机制；挖掘特异性关键通路和驱动基因并进行体内体外功能验证，研究分子机理并探讨其临床意义。

考核指标：构建基于多组学数据的数学理论和算法体系，建立中国人群乳腺癌高精度多组学数据库，开发精确定量重构组学数据的新型组合优化算法，构建刻画复杂生物网络的图模型及其理论体系，开发基于多组学数据的调控网络构建与解析算法、癌症关键通路和驱动基因预测算法。成果应用于乳腺癌化疗耐药及进展转移研究，构建乳腺癌耐药转移基因调控网络体系，揭示进展转移新理论；发现 5~7 个与化疗耐药与进展转移相关的特异性新靶点；发现 3~5 个分子标志物，实现临床应用；构建乳腺癌预

后模型，指导个体化精准治疗。

有关说明：由山东省科技厅作为推荐单位组织申报。

7. 航路规划大规模复杂动态图的数学建模及分布式计算

研究内容：在多目标约束条件下，融合确定数学方法、随机扰动和分支扰动处理方法建立如下四个模型，并对其进行分析，随机扰动和分支扰动下的大规模局部动态图的建模与分析，飞机飞行在航路曲面上动力学行为的建模与分析，飞机飞行中的随机扰动和分支扰动行为的建模与分析，数据-规则双驱动的航路规划模型；研究基于航路点和高度的三维大规模航路图的结构分析，航路复杂网络的优化和动态图的并行计算；基于 E 级高性能计算系统的随机扰动和分支扰动下的大规模局部动态图的分布式计算。

考核指标：建立具有随机扰动和分支扰动的航路规划局部动态图模型、动力学模型、随机行为模型、数据-规则双驱动模型，图节点数大于 60 亿，边数大于 400 亿，动力学因素不低于 11 个（气温、压、密度，风速、向，坐标，飞机性能等），随机性因素不低于 7 个（航路天气，云层，起飞、目标、备降机场状态，航空管制，突发事件等）；实现随机扰动和分支扰动下的大规模局部动态图的最短路、连通分支、图划分、基于点和边聚类算法的可行的并行算法；实现基于 E 级的随机扰动和分支扰动下局部动态图的分布式计算，节点不低于 10000 个，峰值不低于 50PFlops，支撑千亿级节点图的高性能分析；实现上述模型在千亿级节点、7 种以上机型的动态航路规划验证。

有关说明：由广东省科技厅作为推荐单位组织申报。

8. 朗兰兹对应及相关问题

围绕朗兰兹对应等重要数学前沿问题开展研究。研究志村簇几何结构的精细刻画，并用它刻画朗兰兹对应的性质；研究 BSD 猜想以及与之紧密相关的 $GL(n)$ 的 Iwasawa 理论；研究 L-函数的算术理论、Deligne 关于 L-函数特殊值的猜想、高阶 p-进 L-函数的构造及其基本性质；研究典型李群不可约酉表示的构造和分类，完整刻画其中最基本的么幂表示；研究高维基底的 Lefschetz-Verdier 迹公式和上同调对应特殊化理论，并用它研究朗兰兹纲领中的巡游函子。

有关说明：由中国科学院作为推荐单位组织申报，由中科院数学与系统科学研究院作为项目牵头单位申报。

9. 随机分析的基础理论研究

研究 SLE 理论与随机量子化方程的正则性结构理论，研究量子规范场存在性及其质量间隙问题以及其他与统计物理和量子物理中临界相变和模型普适性密切相关的重要数学问题；研究无穷维随机微分几何与 Malliavin 分析理论，研究路径空间、环路空间和其他重要映射流形上基本的无穷维几何与分析问题；研究随机微分方程与随机偏微分方程理论、现代鞅论与拟正则狄氏型理论以及量子系统的量子概率与信息论结构刻画理论；以随机分析为工具，研究现代人工智能中深度网络的可解释性与算法收敛性、现代金融中信用风险度量及量子信息中量子测量与量子退相干等关键理论问题。

有关说明：由中国科学院作为推荐单位组织申报，由中科院数学与系统科学研究院作为项目牵头单位申报。

10. 几何分析和低维拓扑中的若干问题

围绕复几何中曲率方程的奇异结构、黎曼几何中的数量曲率和低维流形，研究相关的几何和拓扑问题开展研究。用几何分析方法分类 Kahler-Ricci 流产生的奇点，并研究其奇点分类与代数几何中 flip 变换的联系；研究一些新曲率方程及其奇点结构；研究微分流形上正数量曲率的黎曼度量与流形拓扑结构以及广义相对论中的能量问题之间的关系；研究低维拓扑领域中核心问题，包括四维辛流形的分类，三维流形的表示体积和 Thurston 问题等。

有关说明：由教育部作为推荐单位组织申报，由北京大学作为项目牵头单位申报。

11. 随机数学及数学与物理的交叉研究

研究针对统计物理中的相变现象、无穷粒子系统、遍历性与稳定速度的数学方法和工具。研究连续时空随机系统、分枝系统与过程、随机环境与移民机制、随机能量模型、随机树与图、弱距离正则图等的数学结构或表示；研究算子在函数空间上的有界性、特征值估计与随机稳定性、几何物理方程解的正则性和爆破行为、能量和最大模估计等；研究随机系统的动力学行为与特性、结构种群系统的全局 Hopf 分支问题、多尺度物理过程的计算问题等。

有关说明：由教育部作为推荐单位组织申报，由北京师范大学作为项目牵头单位申报。

12. 量子场论与引力的数学前沿及其应用

研究现代理论物理中量子场论方法的数学基础和数学结构，建立无穷维空间上分析及其与几何拓扑和代数等领域的广泛联系；研究引力的经典动力学和奇点理论，探索在其他非线性问题如流体上的应用；研究量子引力和全息原理的数学机制，发展其在凝聚态、量子信息等相关领域中的应用；研究黑洞的全息对偶理论及其在宇宙学和天文观测等领域中的应用；研究拓扑量子场论的数学方法及其在凝聚态和材料科学等领域中的应用。

有关说明：由教育部作为推荐单位组织申报，由清华大学作为项目牵头单位申报。

13. 丛上的几何与分析

研究复几何技术和 p 进制代数的融合，研究 P 进制上的 Kodaira-Spencer-Kuranishi 理论，研究 P 进制框架下的稳定性条件，发展新的 p 进制几何分析，以此为基础研究 Hodge 猜想。研究 Monge-Ampère 方程、Yang-Mills 方程、极小曲面方程等方程解的存在性、正则性及紧性；研究平均曲率流、Yang-Mills 流等几何发展方程的存在性及收敛性；研究这些几何中非线性偏微分方程解的奇点性质；研究这些结果的几何应用。

有关说明：由中国科学院作为推荐单位组织申报，由中国科学技术大学作为项目牵头单位申报。

14. 代数簇的模空间及子空间

围绕双有理几何、镜面对称和代数簇的模空间方面若干重要

前沿问题，包括 Hodge 猜想、Tate 猜想、Abundance 猜想等开展研究。研究法诺簇、卡拉比 - 丘簇和一般型簇的有界性问题和高维簇的双有理分类问题；研究正特征极小模型理论和一般消灭理论；研究卡拉比 - 丘流形的 BCOV 猜想；研究高维簇模空间的紧化理论，包括存在性和射影性问题等；研究法诺簇的 K-稳定性问题；研究模空间上的周环和拓扑问题。

有关说明：由教育部作为推荐单位组织申报，由复旦大学作为项目牵头单位申报。

15. 哈密顿系统的理论及应用

发展周期轨道的迭代理论，与 Maslov 型指标迭代理论、Floer 同调、辛场论和切触场论相结合研究切触流形上 Reeb 向量场的周期轨道、Hamilton 系统的周期解、流形上闭测地线以及天体力学中多体问题的周期解的存在性、多重性与稳定性；研究周期解轨道与流形整体性质间的内在联系及其定量刻画；发展线性 Hamilton 系统的可约性理论，并用于研究算子谱理论，无穷维 Hamilton 系统以及薛定谔方程的局域化理论；探索产生谱隙和局域化的机制；将发展出的理论和方法用于非线性分析，动力系统，辛几何和数学物理中其它相关问题的研究。

有关说明：由教育部作为推荐单位组织申报，由南开大学作为项目牵头单位申报。