

# “变革性技术关键科学问题”重点专项

## 2020年度第二批项目申报指南

(征求意见稿)

“变革性技术关键科学问题”专项 2020 年第二批项目申报指南拟围绕应用数学领域，支持 15 个项目，国拨经费总概算 1.3 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。鼓励围绕一个重要科学问题组织研究。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。

### 1. 三维地震成像的数学方法与超分辨反演高效算法

**研究内容：**针对我国非常规油气勘探关键需求，提出适用于我国黄土层厚、储层纵向薄互层、横向强非均质等特定地质结构的地震波传播数学物理模型，研究其适定性理论、高效正演算法、反问题求解及与机器学习结合的新型高效超分辨反演方法。提出模型-数据双驱动的三维地震成像数学方法。提出致密油气储层岩性、物性参数的人工智能超分辨反演方法。开发关键软件模块，支撑非常规油气的勘探与开发。

**考核指标：**建立适应中国特定地质结构的非常规油气地震波方程，形成 1 套完备的数学理论和高效算法。建立新数学物理模型的适定性理论与精度可控高效正演算法；提出模

型驱动和数据驱动相结合的三维地震成像数学方法；提出致密油气/页岩油气储层岩性、物性参数的人工智能超分辨反演方法。建立的数学物理模型与实际情况符合率在 80% 以上，新模型数值求解的效率提升 40% 以上；研制的人工智能超分辨反演方法的分辨能力(在鄂尔多斯盆地目标区)应达到 1/10 波长以下；处理解释二维地震不少于 30000 公里，处理三维地震不少于 2000 平方公里，并验证方法的有效性。

## **2.油气管网安全运维的大数据分析与算法**

**研究内容：**基于大数据与管网运维机理的耦合计算发展鲁棒可解释的油气管网安全运维数学模型。结合统计学习、深度学习和强化学习发展油气管网安全预警高效算法，进行缺陷和失效统计分析，状态数据分析，多元数据耦合与挖掘，实现多种预警数据整合和挖掘利用。针对管网运维的多元复杂供需关系，研究降本增效型油气战略储备布局，实现应急状态下油气安全稳定快速响应，建立油气实时资源调度的大数据驱动的数学优化模型，结合机器学习发展混合整数规划问题的高效算法。

**考核指标：**建立管道安全全过程监控与诊断的数据采集与管理系统，实现管道工艺参数的实时监控。针对监测及故障诊断、阴极保护的监测、阀室与地表设施监测、关键部位腐蚀速率开发智能安全预警分析软件，缺陷智能识别准确率 75% 以上，提升新气管道管线安全高效运行能力。建立基于

数据驱动的油气管道管容利用效率、能源消耗、检修状态等指标体系；建立管道容量分配、运行状况的油气管道布局与实时信息共享的油气管道优化调度的新型运筹学算法。

### **3.航空发动机短舱问题的偏微分方程建模与计算**

**研究内容:**通过发展湍流理论建立航空发动机燃烧室两相湍流燃烧新模型及相应模拟算法。通过建立复杂介质中的多尺度模型来研究航空发动机复合材料结构的多尺度损伤行为。通过有界区域偏微分方程建模研究发动机短舱的不同结构对层流、湍流、多相流等的影响，并研究模型中逼近解的稳定性，发展高性能计算方法提高逼近解的精度。发展离散度量空间理论以及最优传输理论，提出新的高维数据降维方法。

**考核指标:**自主开发虚拟计算平台，计算航空发动机燃烧室两相湍流燃烧新模型的数值解，新算法比现有算法效率提高一个量级，计算速度比国际一流计算平台快一倍。提高航空发动机复合材料结构中的多尺度模型中多尺度性的定量估计的准确性，数值近似解的逼近精度提高一个量级，与实验数据误差小于国际一流同类计算机软件误差的 50%。发展离散度量空间理论以及最优传输理论提出新的高维数据降维方法及算法，比现有降维方法效率提高一倍。

### **4.智能导航及遥感数据高精度融合的数学方法**

**研究内容:**研究全球导航卫星系统（GNSS）实时高精度

定位的超快收敛理论、高维快速运算方法及在实时精密单点定位（PPP）和载波相位差分技术（RTK）中的应用；GNSS 中心化多源导航融合的整数矢量快速寻优模型及复杂环境下的智能可信导航应用；异源异构多维度遥感载荷大数据融合的几何/辐射反演模型与优化及在微纳卫星组网自主定标的应用；高分辨成像优化理论、三维信息重构模型算法及复杂区域重点目标重构应用。

**考核指标:**复杂环境下 GNSS 模糊度固定率由 70%~80% 提高至 90% 以上；剔除单传感器失效的漏警率小于 0.001，在 GNSS 可见卫星个数不足时，随距离增大，定位误差累积不超过 1%；开发 1 套异源异构遥感载荷数据融合软件，反演模型精度优于 5% 个像素，自主定标精度优于 1.5 个像素；典型噪声测量条件下，重构图像的峰值信噪比不低于 28dB，典型目标重构相对误差小于 5%。

## 5. 高端橡胶材料的可计算建模与智能化设计

**研究内容:** 针对航空轮胎用高端橡胶材料，发展刻画高分子链非线性响应行为的数学理论，构建橡胶材料的非线性黏弹性本构方程，提出基于有限元方法的高效多尺度算法框架；实现橡胶材料力学性能、综合热传输与热力耦合问题的多尺度精确高效模拟计算，提出复合材料铺层结构高效组合优化设计方法，开发对航空轮胎综合性能仿真结果即时输出的具有自主知识产权的计算平台。

**考核指标：**基于本项目理论成果开发的计算平台具备对多界面复合材料完备建模和自适应快速网格划分能力；具备为航空轮胎不同部位智能化调用相应材料本构方程、参数与算法的能力；可实现航空轮胎应力-应变响应的快速数字化求解，静态应力-应变的计算数值精度 $\geq 90\%$ ，动态应力-应变和温升的计算数值精度 $\geq 85\%$ ，计算效率相对于常用商业软件（如：ABAQUS，Ansys）提高 8 倍以上；形成 1 套对航空轮胎材料研制和轮胎制造具有指导能力的高精度设计软件并在企业应用。

## **6.数理模型耦合驱动的自由曲面一体化数控加工理论与算法**

**研究内容：**面向先进制造中几何与物理信息、算法特性、加工大数据高度融合的需求，构建数理模型驱动的自由曲面一体化数控加工基础理论及算法体系。解决曲面设计模式和加工模式的数理融合问题、加工模式与物理特性的匹配问题；提出面向高速高精度加工的自由曲面设计与建模方法；建立几何物理信息与加工大数据耦合意义下的多轴数控加工规划框架；发展数理模型驱动的 NURBS 曲面直接插补方法。

**考核指标：**提出面向加工度量的自由曲线曲面高速高精度建模方法，相比经典 NURBS 方法，算法效率（迭代次数）提升不低于 10%；发展数学原理、物理信息与加工大数据耦

合驱动的自由曲面高质量加工路径规划理论与算法，相比传统 CAM 方法，算法编程效率提升大于 10%，新加工模式带来的曲面物理功能效率（如减阻、增压等）提升不低于 10%；研究基于自由曲面求交的加工残留与精度分析方法，并产出分析报告；建立数理模型驱动的 NURBS 曲面直接插补算法，支持微米级轮廓误差精度编程；开发 1 套融合新原理的 CAD-CAM-CNC 一体化原型系统，搭建样机并在航空领域开展不少于 5 个场景的加工应用验证，其中功能性曲面加工样件不少于 2 个。

### **7.基于最优化方法的大型城市复杂路网智能调度研究**

**研究内容:**针对交通路网环境的复杂性与交通需求的不确定性，研究大型城市局域路网鲁棒协同控制的数学理论与优化方法；针对路网空间的复杂性，发展分布式与分层式路网控制数学理论与优化方法；针对路网高密度道路管控与调度的复杂性，发展基于多目标优化的交通路网智能调度数学理论与优化方法；开发交通路网智能控制软硬件协同平台，开展大型城市复杂路网交通管理典型示范。

**考核指标:**对于大型城市路网目标模式超过 8 种路网形态，建立可实时运行的基于多目标优化的路网调度数学理论与优化方法；对于大型城市局域路网，建立面向环境复杂性与交通需求不确定性的路网鲁棒协同控制数学理论与优化方法；对于超过 500 个路口的山地城市网络，建立路网分布

式与分层式控制数学理论与优化方法；建成超过 36 个山地城市路口的路网交通信号控制示范，其通过路口的平均延误下降 15%，路口通行效率提高 20%。

#### **8.基于多模态数据的复杂网络拓扑分析与演化预测研究**

**研究内容：**面向社会安全风险的预测、防范和处置需求，研究关键数据的精准快速采集技术以及海量多模态数据处理技术。研究多模态时序关系复杂网络的图嵌入表示方法、网络图谱的相似度学习和拓扑分析，异构特征属性之间内嵌的本征结构；复杂信息网络显性子图的搜索空间优化方法、建模与演化预测方法，重要节点挖掘和链路预测方法。

**考核指标：**构建面向社会安全风险感知的千万级结点、亿级边、包含多模态数据的复杂网络，支持不少于 5 类典型场景的分钟级搜索响应和挖掘计算能力；搭建基于复杂网络的社会安全风险建模预测演示验证平台，在 2 个以上的大中型城市开展应用验证，实现对虚实空间中社情民意风险感知准确率大于 85%，其中 3D 识别算法正确率不低于 97%。

#### **9.胰胆恶性肿瘤精准诊疗的数学理论和算法**

**研究内容：**针对复杂环境下浸润性强目标小且模糊的胰胆恶性肿瘤，建立智能感知、增强和识别算法；研究影像中模糊目标特征提取、定量刻画和模糊程度定量分类，构建基于几何和 PDE 理论的模糊和部分缺失的胰胆恶性肿瘤、血管 3D 医学影像的精准分割模型和算法；发展小样本、弱监督、

模态迁移和知识嵌入的强化学习方法，建立多模态多时间序列图像、目标缺损图像和多组学图像 3D/4D 非刚性配准、融合及重建模型和高效非凸算法；探索基于影像的胰胆恶性肿瘤演化机理，构建肿瘤演化进程模型。

**考核指标：**研发针对弱小目标的新一代高对比度的医学成像技术和设备。建立胰胆恶性肿瘤、血管分割和非刚性配准算法，使得分割和配准精度达到 95% 或以上，比现有方法提高或超过 15%，提出达到临床要求的胆胰肿瘤精准诊断的新方法。构建多模态、多组学图像融合和重建算法，模拟胰胆恶性肿瘤演化进程，用于胰胆精准诊疗临床实践。获得胰胆恶性肿瘤精准诊疗中分割、配准和识别核心技术的授权自主知识产权，服务于胰胆恶性肿瘤的精准诊疗。

## 10. 大数据计算与分析的基础算法

**研究内容：**针对我国大数据技术发展的重大需求，聚焦大数据计算“7 个巨人问题”中的“广义多体，统计计算，线性代数计算”问题，研发在典型大数据环境下可运行、高效能求解的基础算法与对应的大数据聚类分析、判别分析与降维分析核心算法；建立对应算法的计算复杂性、收敛性、误差可控性等可用性与正确性数学理论；在 1-2 个典型行业大数据中取得突破应用。

**考核指标：**对广义多体，统计计算，线性代数计算等 3 个基本计算问题各研发一个对百亿级大数据可用、理论证明

正确的基础算法，其计算效率比当前最好算法提升 40% 以上；针对 3 个典型大数据分析任务构建大数据分析算法，有效分析数据规模达到 TB 级，支持 3 种以上大数据环境有效执行；支撑 TB 级医疗影像数据处理（重建或分割），单个体三维影像处理时间低于 0.05 秒，误差率比当前最优水平降低 8% 以上。

### 11. 太赫兹医学影像及诊断系统中的关键数学问题及应用

**研究内容：**探索牙齿、乳腺太赫兹影像检测的系统集成；开发牙齿多层结构折射率不同的成像算法、牙齿表面不平整散射严重的成像算法；建立反常统计力学框架下的癌细胞超扩散演化方程；发展只依赖于曲面黎曼度量共形几何内蕴方法，融合拟共形变换参数与分数阶布朗运动 Hurst 指数两者所包含的信息；为诊断乳腺癌及跟踪癌病变发展进程提供算法支持。

**考核指标：**完成牙齿、乳腺太赫兹影像检测仪样机；提交牙齿多层结构折射率不同的太赫兹成像算法、牙齿表面不平整散射严重的成像算法；给出拟共形变换参数与分数阶布朗运动 Hurst 指数之间的关联形式，计算拟共形变换不变量，提供龋齿及乳腺癌的 AI 识别诊断算法，误识率小于 5%，漏识率小于 3%。

### 12. 面向海量多源遥感数据处理的关键数学问题及其产

## 业应用

**研究内容：**针对海量多源遥感数据中含有的多类型噪声，构建多模态核函数，改进先验信息提取方法，优化图像超分重构算法。在遥感数据处理和反演中涉及病态方程，合理设计反演过程的信息变迁，将遥感数据特性和预处理算法相结合，实现高维病态方程的优化求解。“同物异谱”及“同谱异物”现象导致多光谱数据地物光谱特征呈非线性，基于随机统计分析方法，对多光谱遥感图像进行预处理，建立样本图-谱特征联合模型，进行多光谱数据特征深层次表达，提升遥感影像监督分类精度。

**考核指标：**针对星载遥感成像系统受到平台振动、系统噪声、气候天气等因素的影响，以及超过成像系统截止频率的高频细节信息丢失问题，实现超分辨率重构复原，影像分辨率提升 1.5 倍。经过遥感反演病态方程优化后地表反射率反演精度高于 85%。通过多光谱遥感影像数据图-谱特征模型建立，大区域分类准确率提高 7%。

### 13.基于机器学习与确定性机理融合的高精度地图制作和评估体系

**研究内容：**建立机器学习与确定性机理混合建模框架体系；构建可解释和可信任的确定性及随机算法；研究从交通路网到车道线级别道路的数学表达；发展将众包数据和传统测绘数据进行互补和融合的高精度地图制作方法；研究自然

语言处理技术在高精度地图路标牌语义识别中的应用；建立从地图的采集、制作和融合全流程的质量评估体系。

**考核指标：**建立基于机器学习与确定性机理融合的高精度地图制作和评估体系的理论；实现包含众包数据或测绘数据场景全覆盖和要素全覆盖的高精度地图制作，生产自动化水平达到 95% 以上；在高速、主干道及数据源相对丰富的城区中地图精度不低于 5-10 厘米；保证高精度地图生产全流程的置信值不低于 95%。

#### **14.面向国产高性能自主可控计算机的基础数学库软件与应用**

**研究内容：**基于高性能自主可控计算平台的基础数学算法、面向复杂应用问题的数学模型和高效并行求解器；基于自主处理器和异构并行计算机体系的数学库软件和评测工具，为各类计算问题提供编程接口和框架；支撑复杂工业仿真和高端芯片研发的新型数学模型和高效数值并行算法，以及基于自主处理器和基础并行数学库的仿真、设计软件的开发与应用。

**考核指标：**面向多种应用场景，适配 3 种以上国产自主处理器及百万核异构计算架构，性能不低于国外主流同类基础数学库软件；可支撑千万级模型自由度计算、万核并行效率不低于 30% 的自主工业仿真软件系统 1 套，计算性能不低于国际主流同类软件系统；高端芯片的设计软件具备第一性

原理预测能力，软件算法时间复杂度  $O(n^c)$  由同类主流软件的  $c>1$  降为  $c\leq 1$ 。

### **15.全寿命沥青路面时空演化数学模型构建与结构优化智能算法设计**

**研究内容：**针对当前沥青路面技术中实践数据挖掘不充分、数学理论支撑不完善、相关设计模型可靠性低、设计寿命预估误差大等基础问题，研发全寿命周期条件下的沥青路面结构与材料的时空演化数学模型，形成多层次、多框架下解析推断系统，开发结构优化智能算法，挖掘多因素同步耦合状态下的服役性能衰变机理，构建适应于长寿命使用需求的疲劳设计模型，实现给定指标需求下路面结构最优设计方案，完善沥青路面安全、耐久的结构设计体系，为构建长寿命路面设计体系奠定基础。

**考核指标：**建立沥青路面全周期服役性能指标的时空演化规律数学模型，与实测数据的预测精确度不低于 85%；给出路面结构安全服役性能衰变的疲劳方程估计式，准确率不低于 85%；开发路面结构设计推断系统，生成的优化设计方案使得路面预估寿命不小于 30 年；设计结构优化智能算法，开发软件著作权 1 套。