

# “变革性技术关键科学问题”重点专项

## 2020年度项目申报指南

### (征求意见稿)

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。

2020年本重点专项将围绕制造、信息、能源、材料、地学、生命、数学等7个领域方向部署项目。

#### 1. 基于超临界水热化学还原的制氢装备技术基础

**研究内容：**针对化石能源洁净无污染制氢以及可再生能源低成本大规模制氢的重大需求，突破传统热化学制氢技术瓶颈，研究超临界水热化学还原大规模制氢装备的关键制造科学问题与技术。主要包括：超临界水热化学还原制氢反应原理及大型反应器制造理论；大型固体原料高压连续输送、排渣原理及装备的设计方法；超临界水热化学还原制氢反应器材料—结构—反应一体设计制造理论；超临界水制氢反应器材料的腐蚀、渗氢机理及其对制氢装备服役性能的影响规律；超临界水热化学还原制氢系统集成理论及参数测量与控制。

**考核指标：**阐明超临界水热化学还原大规模制氢原理，建立制氢关键装备在极端服役条件下的设计、制造及安全服役理论。形成大规模制氢系统的固体原料高压连续进料、高温高压反应器、有害物质富集与在线排出关键技术及装备的制造工艺。研制出包含大型高温高压反应器（内径 1m 级）、固体原料高压连续输送系统（输送的原料浓度>60%，压力 30MPa）的制氢样机 1 套，实现氢气产量>1000Nm<sup>3</sup>/h，煤制氢能耗下降 30%，主要污染物（SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、PM2.5）零排放和 CO<sub>2</sub> 自然富集。

## 2. 支撑真空沸腾光场条件之大光栅整制造技术

**研究内容：**围绕真空沸腾光场对高性能超大口径光栅的需求，研究基于大面积反射式一次静态曝光技术的大口径光栅制造关键科学问题与技术。主要包括：揭示干涉曝光光场中离轴反射镜表面质量和曝光环境对相干噪声的影响规律，探究光刻胶在超大超重光栅基板表面流动特性及成膜机制，研究无缝掩膜制作工艺及其复形结构形成及演化机制，探究槽型控制、缺陷种类、界面材料、膜层粘附力等对无缝脉宽压缩光栅衍射效率、光谱带宽、抗激光损伤阈值的影响规律，形成大面积、高精度光栅微纳结构掩膜制备及其转移和复形技术，实现具有自主知识产权的大口径无拼缝脉冲压缩光栅关键制造装备和技术。

**考核指标：**阐明反射式静态干涉曝光系统离轴反射镜等关键元件表面质量与相干光互作用机制，揭示各工艺环节对光栅衍射效率、带宽、损伤阈值等性能的影响规律。开发全

口径反射式静态曝光装备一套（包括离轴反射镜、大口径高精平面镜、高稳光学平台等），其不均匀性优于 $\pm 5\%$ ；开发双向米量级超重光栅基板涂胶装备一台，其不均匀性优于 $\pm 3\%$ ；研制出光栅样件，口径不小于  $1600\text{mm}\times 1050\text{mm}\times 160\text{mm}$ ， $200\text{nm}$  带宽内衍射效率 $\geq 90\%$ ，抗激光损伤阈值优于  $0.17\text{J}/\text{cm}^2$ 。

### 3. 超高热流密度微通道散热新原理及关键技术

**研究内容：**面向高集成度、高功率电子系统发展需求，研究受限微流体高效热输运机理，发展流—固—热—力—电多要素仿真分析与协同优化技术，建立超高热流密度冷却新方法；研究高热导率材料原位合成及微加工工艺，发展低热阻冷却系统集成制造关键技术；研制超高热流密度散热器和高功率冷却系统演示模块，完成冷却能力测试。

**考核指标：**研制芯片尺度超高热流密度散热器，单片集成材料种类 $\geq 3$  种；冷却能力 $\geq 1500\text{W}/\text{cm}^2$ ；高效热管理系统演示模块尺寸 $\leq 50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 15\text{mm}$ ，冷却能力 $\geq 2.5\text{kW}$ ，在高集成度雷达、高频信号发射源等系统实现应用验证，冷却热流密度相比传统液冷冷板等经典散热技术提升 10 倍以上。

### 4. 非易失自旋存储器件物理与集成方法

**研究内容：**针对传统易失性动态随机存储器（DRAM）的效能瓶颈，突破非易失性自旋轨道矩驱动型磁随机存储器（SOT-MRAM）的器件物理和集成限制，推动 SOT-MRAM 对现有 DRAM 的更新替代。研究室温、无外加磁场条件下

非易失性自旋轨道矩（SOT）诱导电流驱动自旋的定向翻转机理，探索新的全电控 SOT 自旋翻转新方法；研究 SOT 自旋存储器件的功能特性以及与 CMOS 兼容的 SOT-MRAM 后道集成方法。

**考核指标：**提出具有自有知识产权的 1~2 种全电控的 SOT 自旋翻转新方法；研制非易失性 SOT-MRAM 的磁隧道结存储单元，关键性能指标相比 DRAM 提升 1 个数量级以上，即：写速率 $<5\text{ns}$ ，能耗 $<10\text{pJ}$ ，写入次数 $>10^{12}$ ；制备出全电控的 SOT-MRAM，容量 $\geq 16\text{Kb}$ ，特征尺寸 $<90\text{nm}$ 。

## 5. 多物理场仿真 EDA 软件技术

**研究内容：**面向超高频、高真空等电子器件的精准、快速分析设计需求，构建压电器件、真空器件等的电/磁/力/热等多物理场三维精确仿真模型；研究三维模型计算的加速方法，以及多物理场联合仿真技术，建立适应超高频、高真空等模拟电子器件的全自主仿真工具。

**考核指标：**提出超高频、高真空等电子器件的三维模型计算加速方法，建立电/磁/力/热等多物理场三维联合仿真平台；对千根金属电极计算规模的典型压电器件，仿真速度比商用 ANSYS 软件提高 3 个数量级以上，单频率点仿真速度达到分钟级；对带状注非线性典型真空器件，仿真速度比商用软件 MAGIC 或 CST 商用软件提高 2 个数量级，单频率点全过程的仿真速度达到分钟级。

## 6. 高分辨率低剂量动态 X 射线成像技术

**研究内容：**面向重大疾病早期诊断等重大需求，研究高

性能金属卤化物材料，厘清 X 射线光电转换和信号倍增机理，发展暗电流抑制技术，提高成像动态响应区间，突破传统 X 射线探测器转换效率低、信号串扰等瓶颈，实现基于金属卤化物的高分辨、高灵敏、高稳定 X 射线成像新技术。

**考核指标：**发展 2 种非铅金属卤化物闪烁体厚膜 ( $>25\text{cm}^2$ )，量子产额大于 90000 光子/MeV，辐射寿命小于 10ns；制备  $100\text{cm}^2$  尺寸的金属卤化物单晶， $50\text{Gyair}$  辐照剂量下稳定；研制基于金属卤化物探测器的 X 射线成像器件，相比经典闪烁体间接成像灵敏度提高 10 倍以上，达到  $10000\ \mu\text{CGyair}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ，同时空间分辨率达到  $15\text{lp/mm}$ ；研发动态 X 射线成像原理样机，成像剂量为目前商用平板探测器的 1/10，实现体模动态成像的演示验证。

## 7. 绿色合成氨技术

**研究内容：**发展合成氨催化剂新途径和新体系，研究催化新途径和新体系的反应机理，开发催化剂体系的配套工艺技术，形成合成氨升级换代成套新技术。

**考核指标：**阐明 N-N 键活化和 N-H 键形成的催化作用原理，研制出 2~3 类新型催化剂，实现温和条件合成氨，在温度  $\leq 250^\circ\text{C}$ ，压力  $\leq 1.0\text{MPa}$  下产氨速率  $\geq 5.0\text{mmol.gcat}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ，完成新型催化剂 3000 小时以上的稳定性模拟实验，形成自有知识产权的变革性合成氨技术。

## 8. 宽波段平面超表面太阳能聚光器

**研究内容：**面向低成本太阳能聚光发电，发展无机械运动装置的反射式平面超表面太阳能线性聚光器。基于等效媒

质理论和光学变换理论，研究聚集过程能量高效传递机理，揭示电介质超表面对宽频、宽入射角太阳辐射的有效聚集方法；研究超表面规模化制备技术；提出与聚光能流密度分布耦合的高效光热转换方法，形成“太阳能—聚集—热转换”系统。

**考核指标：**聚光比 $\geq 70$ ，接收波长范围 400~3000nm，入射光接受角范围  $170^\circ$ ，聚光过程能量损失不大于 8%，聚光器单片尺寸 $\geq 600\text{mm}\times 1000\text{mm}$ ，材料制备支持底板并行加工方法；研制基于以上聚光器的光热转换原理样机，输出热功率 $\geq 5\text{kW}$ ，液体工质温度 $\geq 400^\circ\text{C}$ 。

## 9. 离子液体强化 $\text{CO}_2$ 绿色转化新过程研究

**研究内容：**研究离子液体多位点相互作用及协同调控机制，揭示离子微环境活化 C-O 键及 C-H、C-C 化学键重构机理；研究离子液体微环境强化反应/传递多尺度耦合机制，开创新一代多相微通道高效离子床反应器；突破离子液体催化  $\text{CO}_2$  合成碳酸酯/环状聚碳、电化学还原  $\text{CO}_2$  合成甲醇/多碳醇等新过程的精准调控及工程化难题，开辟离子液体强化  $\text{CO}_2$  转化的原子经济性利用新途径。

**考核指标：**研制 3 种以上具有工业化应用价值的新型离子液体催化剂和 2 种以上新型离子液体反应器；形成离子液体催化  $\text{CO}_2$  合成碳酸酯/环状聚碳新技术，实现低温( $\leq 80^\circ\text{C}$ )、低压 ( $\leq 5\text{bar}$ ) 下，单程转化率 $\geq 90\%$ ， $\text{CO}_2$  总利用率 $\geq 98\%$ ，产品选择性 $\geq 99\%$ ，在工业规模示范装置上获得验证及应用；形成离子液体强化  $\text{CO}_2$  电化学合成甲醇/多碳醇新技术，电流

密度 $\geq 500\text{mA}/\text{cm}^2$ 、法拉第效率 $\geq 65\%$ ， $\text{CO}_2$ 利用率 $\geq 50\%$ ，研制多级串并联模块化装置、单级规模 $\geq 50$ 升，实现单程转换效率 $\geq 35\%$ ，稳定性 $\geq 100$ 小时。

#### 10. 面向超高清显示的新一代窄谱带有机发光材料

**研究内容：**针对超高清显示产业需求，研发在不滤光条件下可实现广色域的窄谱带高效率有机发光材料，设计开发新一代窄谱带有机发光材料体系，应用于高能效超高清有机显示器件。在宏观与微观水平上揭示有机发光材料中多激发态耦合与演变的时空规律，为激发态调制提供新方法。

**考核指标：**在分子尺度上监测激发态的产生、演变及关联过程，阐明激发态-光子/声子相互作用机制；设计开发的有机发光材料发射峰半峰宽不大于  $0.14\text{eV}$ ，研制的有机显示器件单元在不滤光条件下其色域不低于 90% 国际电信联盟 (ITU)2020 色彩标准。

#### 11. 面向地外原位资源利用技术的人工光合成关键材料与系统

**研究内容：**发展利用月壤和火星土壤合成高效地外人工光合成材料的原位制备方法；突破现有人工光合成技术光电转换效率低、产物选择性差的瓶颈，研发具有多场响应和多能转换互补综合性能的地外人工光合成材料新体系；研究地外极端苛刻环境下的高效人工光合成材料使役效应；构建高效地外人工光合成系统，实现在轨实验验证。

**考核指标：**发现 2~3 种可用于地外的新材料并实现地外原位可控制备， $\text{CO}_2$  光电转换效率达到 5% 以上，功率密

度达到  $70\text{W}/\text{m}^2$ 。构建多场响应、多能转换互补的地外原位资源利用在轨验证系统，日产氧速率达到  $0.27\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 。

## 12. 克量级直径大于 1 纳米单一手性半导体碳纳米管制备

**研究内容：**突破单一手性半导体碳纳米管的分离制备瓶颈，研究新型分子调控技术，开发凝胶分子对碳纳米管多重结构的筛选识别技术；研制碳纳米管自动化分离装置，实现直径大于 1 纳米单一手性半导体碳纳米管产业化制备；开发取向碳纳米管薄膜高效印刷技术，研制高性能三维红外光电传感系统。

**考核指标：**单一手性碳管产能达到每台每天 0.1 克（碳管直径 $>1$  纳米，半导体纯度 $>99.99\%$ ，手性结构纯度 $>90\%$ ）；碳纳米管薄膜面积大于 4 英寸（线密度大于 50 根/微米，取向角度偏差小于 $\pm 30^\circ$ ）；碳纳米管光电集成系统具有三维垂直双层叠加结构，光电流响应变化大于 100（1310 或 1550 纳米红外光）。

## 13. 生物组装自愈合牙修复材料

**研究内容：**发展生物组装自愈合牙修复材料的程序化构筑技术。通过结构及功能协同的晶体/非晶纳米复合材料的可控生长，实现牙齿原位修复。结合干细胞调控，发展可程序化的多级次、多组分、多梯度的牙釉质及牙本质生物组装新方法，研发仿生牙齿种植体材料。

**考核指标：**研制的生物组装自愈合牙修复材料，可修复牙齿：区域 $>2\text{cm}^2$ 、硬度 $>3.0\text{GPa}$ 、杨氏模量 $>70\text{GPa}$ 、粘弹性



品质因子 $>0.7$ ，耐循环磨耗 $>150000$ 次；研制的仿生种植体材料，杨氏模量 $60\sim 100\text{GPa}$ ，硬度 $1\sim 4\text{GPa}$ 。

#### 14. 页岩油开发可控冲击波压裂技术的基础研究

**研究内容：**探索金属丝电爆炸等离子体驱动高温含能材料形成冲击波的机理，研究高温高压环境中的可控冲击波产生方法；研究井筒复杂环境下装备的协同控制、系统隔热和机-电-热-力复合结构的综合设计方法，形成适用于高温、高压和强冲击环境的脉冲功率驱动源，研究高温高压和强冲击环境下含能材料的存储及定量重复注入方法，形成满足深部储层改造的可控冲击波产生器；研究高温高压环境下可控冲击波致裂储层的效应，揭示可控冲击波与储层的作用机理；探索油气储层工程参数与可控冲击波工艺参数的优化匹配方法，建立基于可控冲击波技术改造高温储层的环境友好型技术体系。

**考核指标：**在井筒温度 $120^{\circ}\text{C}$ ，液柱压力 $50\text{MPa}$ 下，稳定产生可控冲击波，直流功率 $500\text{W}$ 的脉冲功率驱动源耐强冲击 $50\text{MPa}$ ；在井筒套管外径处，冲击波峰值压力达 $200\text{MPa}$ ，持续时间 $40\mu\text{s}$ ；储层改造半径 $20$ 米。

#### 15. 难熔元素和同位素分析技术创建与革新及地学应用

**研究内容：**创建与革新针对地质样品超低丰度的难熔元素和重要同位素体系的高精度分析技术。研究包括创建Pt-Os和Hf-W放射性同位素分析技术并示踪地球深部核-幔和幔-壳相互作用和物质循环；革新Re-Os同位素等体系定年技术实现疑难金属矿床成矿年龄的准确测定，揭示矿床成因并理

解成矿规律；研发油气成藏定年的有效技术和研究方法，用于油气藏的时代限定和烃源岩示踪；运用放射性同位素体系对沉积地层定年并联合稳定同位素揭示中元古代重要环境变化事件的时限和机制。

**考核指标：**创建  $^{190}\text{Pt}$ - $^{186}\text{Os}$  和  $^{182}\text{Hf}$ - $^{182}\text{W}$  同位素体系的分析技术， $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  和  $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$  分析精度优于 10ppm 和 5ppm；革新和优化 Re-Os 同位素分析技术，Re 和 Os 含量分析精度分别优于 0.5% 和 1‰， $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  优于 0.1‰；提出区分定年硫化物等矿物期次的鉴别标志，提升金属矿床的定年精度到优于 5%；研发黑色页岩和油气成藏定年技术，提升定年精度分别优于 3% 和 5%；铂族元素含量分析精度优于 10%。提供成功应用的相关实例 4~6 个。

## 16. 人类活动诱发地震机理及分析评估技术研究

**研究内容：**针对与注水有关的人类活动（如页岩气开采、污水回注等）可能诱发地震活动及灾害风险等开展研究。研究开采区已有典型震例，分析诱发地震的构造、介质和应力等条件；对开采全过程进行高密度地震观测，分析地震活动时空演化特征与断层活化迹象；开展注水诱发断层活化及弱化的实验研究和数值模拟，分析介质和应力状态变化及发震机理；研究潜在开采区构造和应力状态，评估诱发地震可能性及灾害风险；与活动断层带天然地震进行对比研究。

**考核指标：**初步揭示诱发地震机理，建立综合研究方法，为注水诱发地震分析提供评估与应对策略技术平台；形成开采全过程微震监测与断层活化迹象检测技术；建立开采区破

坏性诱发地震可能性及相关灾害风险分析评价方法；探索活动断层带强震预测新方法。

## 17. 生物界面蛋白质冠主动精准调控与高效递送载体构建

**研究内容：**针对药物递送载体活体内肝脾富集和递送效率低等关键难题，突破“亲水修饰减弱血浆蛋白吸附作用以避免单核巨噬系统捕获”的传统思路，提出递送载体—生物界面蛋白质冠的主动调控和精准构建新策略。以分子量单一和序列可控的合成高分子为构筑基元，构建能与特定血浆蛋白组分和功能抗体可逆共价键合的程序化自降解纳米载体；建立高时空分辨的蛋白质冠原位表征技术，掌握单纳米粒表面反应活性位点、价态变化、化学键生成与断裂过程的时空演变规律，揭示纳米尺度下蛋白质冠形成和演化的动力学过程与机制；发展高分子载体基元的原位质谱测序和定量技术，并在单细胞、活体器官和动物模型水平上阐明蛋白质冠组成和高级结构与纳米载体的内吞/转胞吞机制、生物分布及运输效率之间的内在关联；重点发展能显著减弱肝脾蓄积，并在恶性肿瘤等病变部位富集，且同时具有组织反应性靶向/动态交换/多价捕获等特性的递送载体；深入研究递送载体的生物安全性和纳米毒理效应，创制高效低毒安全的精准治疗与诊断试剂。

**考核指标：**（1）建立 2~3 种具有高时空分辨和组织穿透性的递送载体材料蛋白质冠原位表征技术，实现在动物活体、原位肝脾器官、单细胞和单纳米粒子水平上的实时跟踪

和高分辨成像；(2) 发展 1~2 种针对序列可控高分子纳米载体的原位质谱测序和质谱定量生物分布的新策略；(3) 发展 4~5 种药物递送载体材料表面蛋白质冠的主动精准调控新技术，显著降低肝脾等器官蓄积；(4) 实现药物递送载体在恶性肿瘤等病变组织的富集效率相对于传统设计纳米载体提升 3~5 倍以上，构建 2~3 类具有组织反应性靶向/动态交换/多价捕获等集成特性的药物递送纳米载体。

## **18. 工程化细胞逆转重要器官纤维化的分子机制和临床转化研究**

**研究内容：**针对人体重要器官纤维化无法逆转的世界性难题，利用智能生物材料、细胞微包裹/组装、类器官、基因编辑、适配体表征等技术构建工程化细胞，建立逆转肝、肾、肺等重要器官纤维化的新疗法。研究重要器官纤维化进程中微环境、细胞结构和功能的演变特征及其相互影响；创建工程化细胞制备技术，利用类器官等技术构建肝、肾、肺等器官纤维化模型，探讨智能生物材料、工程化细胞等在器官纤维化逆转中的关键作用；开展工程化细胞治疗器官纤维化的临床前研究和临床研究，示踪工程化细胞在体内的存活、迁移、归巢、分化，阐明工程化细胞逆转器官纤维化的免疫调控机制。为工程化细胞治疗人体重要器官纤维化提供科学依据及变革性技术。

**考核指标：**(1) 针对重要器官纤维化，创建不少于 10 种逆转纤维化的工程化细胞，建立治疗用工程化细胞产品的生产工艺和质量标准；(2) 开发 10~15 种具有细胞调控功能

的新型智能生物材料，阐明材料与细胞协同逆转器官纤维化的关键机制；（3）在对至少 3 种工程化细胞治疗肝、肾、肺纤维化模型安全性、有效性进行系统评价的基础上，实施至少 1 种工程化细胞治疗 $\geq 2$  种重要器官纤维化的临床研究（每种不少于 50 例），形成工程化细胞治疗器官纤维化的标准化方案，建立临床治疗级工程化细胞的质量标准及安全性和有效性评价体系。

### 19. 新一代变革性 SPECT 影像的关键科学问题

**研究内容：**针对  $^{18}\text{F}$ FDG/PET 特异性诊断及普及应用方面的不足，在国际上率先研制用于 SPECT 显像的特异性肿瘤显像剂，以及人工智能引导的用于人体全身的全环 SPECT/CT 设备，在体实时监测肿瘤在不同时期生物标志物的分子变化水平，进行肿瘤的在体分子分型，指导肿瘤的个体化治疗。通过中国自主创新研制的药物和设备，打破美国主导 20 年的  $^{18}\text{F}$ FDG/PET 核医学分子影像格局，为癌症的早筛和精准诊治提出中国解决方案，为核医学领域带来变革，并带动相关产业的发展。

**考核指标：**（1）研制两种以上  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  标记的新型特异性肿瘤显像剂，获得第 1 类新药证书或临床试验批件，开展临床推广应用；（2）完成全环 SPECT/CT 设备样机的研制，取得国家药品监督管理局认可的第三方检验机构的整机安全及性能检测报告，主要性能指标如下：2a) 针对人体局部感兴趣区成像，SPECT 空间分辨率 $< 2\text{mm}$ ；2b) 系统灵敏度相对于现有主流双探头通用型 SPECT 设备提高 5 倍以上；2c) SPECT

单床位成像视野：断层径向>48cm；轴向>30cm；2d)CT 图像高对比度分辨率：>20lp/cm@0%MTF；2e) CT 值准确性：水 (0+3HU)，空气 (-1000+10HU)。

## 20. 用于阿兹海默病诊疗的手性纳米多靶点药物

**研究内容：**针对阿兹海默病 (AD) 相关的多种蛋白异常纤维化及相关病理机制的共同核心问题—蛋白质错误折叠，将手性效应及纳米尺度效应引入药物设计，同时实现所有已知多种致病蛋白错误折叠及异常纤维化的完全抑制，逆转已纤维化蛋白的错误折叠使其回复正常状态，实现优异的神经保护特性并具有高度生物安全性。研究手性纳米物质在免疫、代谢、内分泌等多种病理生理过程及相关疾病进程中的新机制和新效应。整合具有特殊功能的天然手性药物及多肽药物，引入细胞技术和基因技术等前沿生物技术，以发展用于 AD 早期诊断与治疗的新型手性纳米多靶点药物，实现 AD 治疗药物 0 到 1 的突破。

**考核指标：**(1) 建立手性纳米多靶点药物设计体系及批量化制备技术，获得 2~3 类系列 AD 治疗药物，并能够在相关动物模型实验的行为学及病理学研究中取得显著疗效；(2) 发现 3~5 种手性纳米多靶点药物的生物医学新效应，揭示其药理作用机制，为下一代手性纳米多靶点药物的研发奠定基础；(3) 1~2 种药物通过临床实验评审，成功进入临床试验。

## 21. 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。

## 22. 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，例如多层蒙特卡洛算法，高维配置点的各项异性稀疏网格方法、特殊不确定形态采样方法，不确定空间高分辨率无震荡激波捕获方法。针对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。发展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 (MultilevelDSMC)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，并被中国商飞用于大型客机机翼防除冰设计。



### 23. 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 合成相关的组合结构及算法，为生化合成技术提供优化模型，提高 DNA 分子大规模合成的成功率；开发多类型数据存储模式；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；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 的单位编码效率不小于 1.5；开发适用于不少于 5 种类型数据的 DNA 序列优化转换算法；开发一套 DNA 存储纠错及索引算法，实现数据无损解读；开发一套完整的 DNA 存储（编码、合成、解码）全流程的适配软件系统和全过程计算机模拟系统，并完成超过 MB 级别信息的全过程编码、解码测试。

### 24. 医学成像中的关键数学问题及其产业应用

**研究内容：**发展应用数学前沿理论，解决医学领域高端影像科学及其产业化研究中面临的若干关键数学问题，包括：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：**为高端医疗成像设备和软件的国产化提供算法支撑，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  $2 \times 2$  毫米，时间分辨率小于 40 毫秒。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。

## 25. 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：研究安全多方计算实用化方法，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，包括：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，包括：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%。

## 26. 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。包括：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。最终建立基于多组学数据的数学模型和算法流程，指导个体化诊疗，推动乳腺癌精准医学领域的根本性技术变革。

**考核指标：**针对乳腺癌的化疗耐药与进展转移中的调控机制研究与信息挖掘问题，构建基于多组学数据的数学理论和算法体系。包括：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。

## 27. 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。

## 28. 固液耦合超滑新体系及作用机制

阐明固液耦合的超滑新原理，揭示超滑界面的形成、演化以及固液耦合作用机制，构建固液耦合超滑新体系（接触压力大于 1GPa，摩擦系数小于 0.005），研制新润滑系统及使用固液耦合超滑技术的工程装备样机（例如但不限于高铁

齿轮箱或空天用机械装备等，摩擦系数降低 30%，工作温度不超过 80℃)。

### **29. 航空发动机叶片和轴承超极限性能复合场制造新技术**

建立航空发动机叶片和轴承超极限性能复合场制造的新原理与方法，复合场制造装备的设计方法和制造技术。研制航空发动机叶片和轴承的复合场制造装备样机，形成叶片和轴承的无损检测评价规范。航发叶片疲劳极限提高 25%~30%，服役寿命提高 2~3 倍；航发轴承疲劳极限提高 20%~25%，服役寿命提高 1~2 倍。

### **30. 运载火箭大型加筋筒壳整体成形技术**

形成高性能、短流程的航天超强铝合金大型加筋筒壳结构整体成形新原理与方法，研制出大型加筋筒壳整体成形装备样机，成形出基于超强铝合金（抗拉强度 $\geq 600\text{MPa}$ ，延伸率 $\geq 6\%$ ）的工程样件。

### **31. 仿生微纳自主导航系统研究**

阐明仿生自主导航机理，建立导航敏感器件跨尺度光学设计方法，形成仿生纳米器件跨尺度宏微异质结构集成制造方法，研制出仿生自主导航系统，实现在飞行器（例如但不限于无人机等）应用的无卫自主导航，导航系统整体体积小于 0.5L，重量小于 1Kg，测向无累积误差且精度优于 $\pm 0.01^\circ$ ，姿态精度优于 $\pm 0.05^\circ$ ，数据更新率高于 200Hz，启动时长 $< 5\text{s}$ 。

### **32. 敏捷现场可编程器件技术**

面向云计算、移动通信、人工智能等领域对高密度数据处理及产品快速构建定型需求，探索新型敏捷现场可编程器件技术，突破传统现场可编程器件（FPGA）计算效率低、能量效率低、承载容量受限、成本高等难题。

### **33. 面向机器通信的新型网络体系架构与可信交互协议**

针对工业互联网等急需的安全、可靠、确定时序等通信需求，变革传统面向人的网络架构与协议设计方法，探索面向机器的感—传—算—用一体化新型网络架构，发展兼容多种能力差异机器的灵活适配、可信交互协议。

### **34. 具有开放扩展架构的模块化移动终端技术**

针对传统移动终端更新换代导致的资源浪费，研究可持续演进的模块化终端新形态，通过软件、模块升级与按需组合，支持多频段、多体制无线接入，实现终端由封闭向开放扩展架构的转变。

### **35. 适应新型信息服务的未来网络架构**

针对现有网络架构支持新型服务时网络效率低下的难题，研究可按业务需求、综合调配资源的未来网络架构新体系，高效支持多样化信息服务发展，同时具备对各类恶意攻击的高安全免疫能力。

### **36. 高效芯片热管理控温方法和系统研究**

设计开发针对高性能芯片定点热管理的高效控温系统。制冷能效比（COP） $>10$  和比冷却功率 $>4\text{W/g}$ ，器件热通量大于  $60\text{mW/cm}^2$ ；控温稳定，温度波动小于  $0.5^\circ\text{C}$ ；可持续控温。

### **37. 大推力、增强型别费尔德—布朗效应 (Biefeld-BrownEffect) 离子发动机**

利用改进型别费尔德—布朗效应，研究和开发不消耗自身工质的大推力离子发动机。临近空间真空环境中，推力达 2kgf 以上；在  $\geq 20\text{kV}$  高压加载下，供给电流达到 500mA 以上稳定运行。

### **38. 柔性智能压电复合材料器件**

研发同时具有大应变响应和大驱动力输出的柔性智能压电复合材料器件；研究结构—功能一体化，传感—驱动一体化柔性压电材料器件的新结构设计及性能测试方法，解析此类器件在空间环境中的使役行为及失效机制；发展基于柔性压电复合材料器件的大型航天器结构智能控制新方法。

### **39. 飞秒光场调控制备新型柔性电子材料及器件**

研究飞秒激光强场作用下的化学反应与组装的热力学基础与动力学路径；研究飞秒激光诱导材料相变、晶体生长、异质界面化学键嫁接、分子偶极序构的调控机制；研发飞秒激光调控制备新型柔性电子材料及集成器件的新技术。

### **40. 页岩储层甲烷原位燃爆压裂理论与技术**

研究井下温压条件下甲烷与助燃剂的燃爆特性，构建助燃剂安全投放与协同控制机制；探索甲烷原位燃爆压裂对井筒完整性的影响规律，建立页岩储层甲烷原位燃爆压裂控制机制；研究储层中甲烷燃爆冲击作用规律，揭示燃爆压裂人工缝网形成机理，评价其自支撑裂缝导流能力；研究甲烷燃爆压裂储层适应性，建立页岩储层甲烷原位燃爆压裂参数优



化设计与综合评价方法。初步构建页岩储层甲烷原位燃爆压裂理论与技术。

#### 41. 高通量培养筛选鉴定健康相关微生物的关键技术

面向国家重大需求，有机结合生命科学、医学、大数据计算等前沿交叉领域，瞄准目前制约我国微生物组研究的技术瓶颈，针对性解决以下关键技术：（1）建立健康微生物菌自动分离培养及性状分析平台，揭示“微生物—代谢—免疫”轴的微观机理；（2）建立培养组学、蛋白组学、宏基因组学、代谢组学技术的大数据网络，掌握多组学大数据云技术的方法，建立人工智能算法，揭示疾病与健康相关的微生物组特征及代谢、免疫特征；（3）建成中国健康微生物库；基于自主研发的生信云计算，突破微生物组研究关键技术，建立中国人群微生物组的健康大数据库。

#### 42. 朗兰兹对应及相关问题

面向基础数学核心领域朗兰兹纲领，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。

#### 43. 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。

#### 44. 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。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。

#### 45. 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、弱距离正则图等有向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。

#### 46. 量子场论与引力的数学前沿及其应用

面向基础数学与量子物理交叉核心问题和重大发展需求，探索和发展与量子场论和引力相关的基础理论及其应用。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，建立其与微分方程、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。

#### 47. 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。

#### 48. 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。

#### 49. 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。