

附件 2

“力学技术科学及应用”重点专项 2026 年度项目申报指南 (征求意见稿)

为深入贯彻落实“十五五”科技创新战略部署，国家重点研发计划启动实施“力学技术科学及应用”重点专项。按照专项实施方案总体安排，现发布 2026 年度项目申报指南。

“力学技术科学及应用”重点专项总体目标为：聚焦国家重大需求背后的基础力学问题，推动力学研究服务国家重大任务攻关及重点产业发展；在基础力学理论、计算仿真方法和先进实验设备等方面实现系统性突破，提升力学服务国家战略需求的基础能力，促进成果在国家重大任务建设中推广应用。

2026 年度指南分为常规项目与青年科学家项目两类，拟支持 47 个项目，国拨经费总概算为 42800 万元。

一、常规项目

2026 年度围绕“极端环境服役力学行为表征预测与调控”“强非线性/非平衡系统的多场耦合交叉力学行为预测与控制”“数智赋能的复杂系统力学建模与仿真”3 个重点任务进行部署(任务 1-3)，拟支持 27 个项目，国拨经费总概算为 34800

万元。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的指南方向申报。同一指南方向下，原则上只支持 1 项。申报单位根据指南支持方向，将基础力学问题研究作为重点，带动解决重大需求中的应用问题。项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部研究内容和考核指标。项目执行期一般为 5 年。常规项目下设课题数原则上不超过 4 个，每个项目参与单位总数不超过 6 家。项目设 1 名负责人，每个课题设 1 名负责人。

任务 1. 极端环境服役力学行为表征预测与调控

1.1 极端力热环境下高速流动多过程理论方法与载荷调控

研究内容：以天地往返运输系统等国家重大工程需求为牵引，瞄准极端力热环境下高速流动多过程耦合机理不清、气动力热载荷难以精准预测与有效调控的难题，研究高速流动中动量输运、能量传递与热化学反应等多过程耦合规律，构建涵盖力学、物理化学等过程的多过程耦合理论，阐明流动结构演化规律及其致力致热机理；发展高速飞行时大攻角、强分离状态气动力热载荷的数值预测方法，构建基于多过程耦合的湍流模型，形成可实现高速飞行多过程耦合流场与气动力热载荷演化预测的数值模拟软件；开展高焓、强激波、高速边界层转捩等极端条件下的力学实验研究，发展多物理量协同测量技术，构建用于验证多过程理论和方法的实验数

据集；针对吸气式空天飞行器进气道前缘等关键部位，基于多过程理论方法开展气动力热载荷调控，并针对典型状态开展地面演示验证，为飞行器减阻和防热设计提供理论与技术支撑。

考核指标：建立高速流动的多过程力热诊断理论，形成气动力、壁面热流的分解方法，编制 1 套力热诊断分析程序，并在不少于 3 类构型中完成验证，适用于 $Ma > 10$ 、总温不低于 5000 K；开发高速流动极端力热数值预测软件，适用总温不低于 5000 K，依托风洞完成关键部件典型工况试验验证，模拟与实验结果对比压力偏差不超过 10%，大面积区热流预测偏差不超过 15%；实验气流速度范围 3 – 7 km/s，局部模型尺度不小于 2 m，热流测量空间分辨率不大于 1 mm（直径），压力测量空间分辨率不大于 2 mm（直径）；典型工况下复杂干扰区热流测量重复性偏差不大于 20%，复杂干扰区压力测量重复性偏差不大于 15%；研制一套前体进气道演示验证模型，模型尺度不小于 2 m，实验气流速度不低于 3 km/s，相比无控基准状态，调控后轴向力系数减小 10%以上，热流峰值降低 10%以上。

关键词：高速流动，多过程耦合，气动力热，热化学非平衡，流动控制。

经费说明：国拨经费概算约 1750 万元，配套经费 750 万元。

1.2 轻质烧蚀防热复合材料的气动-传热-化学-力学多场耦合计算仿真与实验技术

研究内容：以未来载人登月/深空探测飞行器轻质烧蚀热防护系统设计重大需求为牵引，瞄准轻质烧蚀防热复合材料在极端气动加热环境下烧蚀、力学与传热响应预测难题，研究高焓值、大热流、强剪切环境下微细观结构演变、热力响应与质量输运强非线性热/力耦合行为，建立热/力/化学复杂边界下材料非线性烧蚀/力学剥蚀本构模型，揭示轻质防热材料热化学烧蚀、气动剪力剥蚀与热应力侵蚀作用机理，开发基于多源数据与物理建模融合的智能解算方法；研究多尺度条件下边界层流动、面/体烧蚀、非线性传热传质时空演化理论，建立气动-传热-化学-力学多场耦合计算模型，形成气动加热环境/材料烧蚀-剥蚀/力学响应耦合数值计算仿真软件；建立电弧风洞气动剪力剥蚀结构与烧蚀热解边界条件下的热环境计算与测量方法，开发具备高时空分辨率的防热材料烧蚀、炭化与热解响应原位在线测量技术，研制多维响应信息智能测量与解算系统，开展载人登月深空探测飞行器热防护系统示范应用。

考核指标：轻质烧蚀防热复合材料烧蚀后退（包括热化学烧蚀后退和气动剪力剥蚀后退及其耦合作用）、炭化层厚度计算结果与风洞试验数据相比偏差不超过 10%；气动-烧蚀-传热耦合计算仿真结果与电弧风洞实验分层温度传感器最高

温度测量结果偏差不超过 15%；烧蚀后退与炭化层厚度测量传感器测量精度优于 0.15 mm，数据采集频率不小于 50 Hz；热解引射条件下的热环境计算结果与电弧风洞实验测量结果偏差不超过 15%；完成气体总焓不小于 80 MJ/kg，热流密度不小于 9 MW/m² 环境下轻质烧蚀复合材料高焓等离子体风洞烧蚀试验；完成气体总焓不小于 15 MJ/kg，热流密度不小于 7.5 MW/m²，气动剪力不小于 600 Pa 环境下轻质烧蚀复合材料电弧风洞高焓剪切试验。

关键词：深空探测，高温气体动力学，计算力学，非线性科学，热防护，轻质烧蚀复合材料。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.3 基于时空相变热质协同调控的极端热环境非烧蚀防热技术

研究内容：以空天领域国家安全能力建设重大需求为牵引，瞄准新一代高超声速飞行器极热环境非烧蚀热防护难题，开展极端热环境疏导式热防护设计与相变输运调控研究，构筑微纳改性拓扑热疏导网络，揭示非均匀热载荷下沸凝回路工质协同调控机制，阐明高动态热流下响应迟滞与传热恶化的内在机制，实现极端环境热防护的动态自适应疏导。开展极端动态热环境疏导式热结构热力响应建模与多尺度耦合失效机理研究，基于耐极热环境硼化钎基超高温陶瓷材料与结

构的设计，克服多相之间本征特性的差异，在微观尺度上精确控制组分的分布、界面结合以及热传导路径，实现不同相的高效复合，阐明气动热环境下材料与结构的热力响应行为与失效机制。开展疏导式力热一体化结构原理样件制备与风洞热考核实验研究，突破原理样件制备技术瓶颈，构建微观结构演变与高温力学行为的构效关系，阐明极端热环境下硼化钎基超高温陶瓷材料与结构氧化烧蚀、裂纹扩展的演变规律，发展主/被动结合热管理效能评价方法，形成 3000℃有氧环境长时非烧蚀热防护与热管理技术。

考核指标: 1. 稳定工作状态下疏导结构内部等效导热系数不小于 7500 W/m·K，相同热流条件下采用内部疏导式隔热方案的结构驻点稳态温度降低相较于同等外形被动隔热结构（驻点温度 $\geq 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）不小于 500 $^{\circ}\text{C}$ ，采用电弧风洞或等离子体风洞设备考核； 2. 研制全尺寸极锐前缘（ $R \leq 4\text{mm}$ 、 $200\text{mm} \times 400\text{mm}$ ）热疏导原理样机，通过 1000 s 以上极热环境风洞试验考核（对应的驻点温度 $\geq 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），结构保持完整，线烧蚀率 $\leq 1.0 \times 10^{-4}\text{ mm/s}$ ，采用电弧风洞或等离子体风洞设备考核。

关键词：极热环境，热防护，硼化钎基超高温陶瓷，非烧蚀，相变热质输运。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.4 稠密大气进入可展开柔性防热结构的多场耦合与失效机制研究

研究内容：针对稠密大气进入过程中柔性防热结构烧蚀/剥离、腐蚀、界面损伤破坏及结构性能退化等复合失效问题，开展防热/隔热/气密多层复合柔性防热结构设计与研制，形成适应多场耦合作用的新型柔性防热结构方案；阐明柔性防热结构多场耦合作用下失效机制，揭示柔性防热结构非定常气动环境下的结构失稳机理和高温/高压/强腐蚀作用下的性能演化规律，建立多场耦合作用下柔性防热结构失效的量化评价方法；研究柔性防热结构安装装配和连接界面的损伤与失效行为，形成柔性防热连接结构的可靠性设计方法；构建模拟稠密大气进入地面试验平台并开展典型服役环境地面模拟试验，验证在“力-热-化”耦合作用下柔性防热结构的极限服役能力和响应规律，量化评估柔性防热结构的服役可靠性。

考核指标：研制防热/隔热/气密多层复合柔性防热结构，耐峰值热流 $\leq 1.0\text{MW/m}^2$ ；多场耦合柔性防热结构失效演化模型与地面考核试验相比失效预测误差 $\leq 15\%$ ；柔性防热结构与连接部件界面失效强度预测精度 $\geq 85\%$ ；典型环境柔性防热结构防热性能预测精度 $\geq 85\%$ ；形成不少于2项柔性防热结构设计规范或评估方法；研制 $\leq 5\text{m}^2$ 柔性防热结构原理样机，满足 ≥ 30 次地面展收试验要求，材料面内抗拉强度损失率 $\leq 10\%$ 。

关键词：稠密大气，多场耦合，柔性防热结构，损伤失效机制。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.5 高马赫数飞行器声爆演化机制、调控技术及飞行验证

研究内容：围绕高马赫数飞行器开展声爆演化机制与调控技术研究，并通过飞行验证为工程应用提供坚实支撑，为未来航班化高马赫数运输的环境相容性提供科学支撑：（1）针对高马赫数极端来流条件及极高动压条件下多体分离复杂工况，发展马赫数 1.4 至 25 宽速域近场波系高精度数值模拟方法，建立声爆风洞试验测量技术，揭示细长体超声速民机/运输机与钝头体空天飞行器两类构型及不同发射方式衍生出的分离构型在极端环境下的声爆初始波形形成机制，建立近场过压分布与外形参数的关联模型；（2）在广义 Burgers 方程框架下建立分层大气声爆波传播理论模型，系统研究大气湍流引起的波形畸变与高强度声爆波的非线性传播演化规律，揭示机动飞行中聚焦声爆（超压峰值可达巡航 2~5 倍）的形成条件与演化机制；（3）构建声爆信号与飞行轨迹的定量关联模型，发展基于地面传感器网络的多站时差定位与波形匹配反演方法，实现飞行轨迹的快速预测与预警；（4）探索面向两类构型的低声爆外形设计方法和声爆约束下的飞行轨迹

/航线优化策略，形成环境影响评估与规划规范；（5）设计并制造缩比原理样机，开展飞行试验，通过理论预测与实测数据的对比验证，形成“预测-试验-修正”的迭代闭环，建立低声爆设计技术规范建议。

考核指标：近场压力分布预测误差不超过 5%，地面声爆超压峰值预测误差控制在 10%以内，大气效应模型覆盖 0 至 100 公里高度范围，声爆-轨迹关联模型定位精度优于 10 公里，聚焦声爆超压峰值预测误差不超过 15%；发展适用于马赫数 1.4 至 25 宽速域流动的数值模拟方法，建立单次预测时间小于 10 分钟的远场传播快速评估工具，实现 5 分钟内完成基于地面测量的轨迹反演，并通过外形优化使声爆强度降低 20% 以上；设计并制造静强度机和试飞验证机各一架，开展飞行试验获取声爆数据，发展一套高超声速风洞声爆测量装置，风洞试验与数值模拟偏差控制在 10%以内，理论预测与飞行实测声爆超压误差不超过 15%；形成考虑声爆约束的飞行轨迹/航线规划指南、声爆环境影响评估标准草案及基于验证的低声爆设计技术规范建议。

关键词：高马赫数飞行器，声爆预测，演化机制，声爆调控，应用示范。

经费说明：国拨经费概算约 2000 万元，配套经费 5000 万元。

1.6 重型重复使用火箭超多机并联极端力学环境传递演

化机理与预测技术研究

研究内容：以我国航天强国建设为重要牵引，支撑未来深空探测和低成本自由空间进出能力构建，瞄准重型重复使用火箭超多机（不少于 25 台）并联动力架构面临的极端力学环境多源激励预示不准、强非线性传递特性不清、系统级耦合链路不明的基础科学难题，研究超多机并联极端力-热-声-振全要素多源激励特性与多场耦合作用机制，建立超多机并联激励源高保真预示方法；研究超多机并联力学环境跨尺度、跨层级传递路径与放大机制，厘清多分支增压输送-结构-发动机等多系统耦合振动机理，建立从发动机到全箭的力学环境传递网络模型；研究飞行剖面高动态并联发动机调控以及箭体结构特性概率散差等关键敏感参数对力学环境非线性演化影响规律，建立超多机并联系统级力学环境预测方法；研究超多机并联极端力学环境主动调控、结构抑制优化策略及一体化设计方法；开展超多机并联力学环境搭载测量，完成本项目方法集成验证。

考核指标：揭示单机、多机、超多机核心力学环境跨级传递规律，传递率量化误差不大于 3 dB，通过地面试验测量对比完成指标考核验证；揭示多机并联输送管路流致振动耦合机理，建立增压输送-结构-发动机等多系统耦合振动预示模型，地面试验分支管路液路流动脉动峰值频率偏差小于 10%，对应流动脉动量级偏差小于 15%；建立超多机发动机并联极

端力热环境多场耦合预示模型，通过超多机并联系留点火或动力系统试车 1:1 真实试验，验证关键位置峰值振动频率偏差小于 10%，均方根振动量级预示结果偏差不大于 3 dB；提出主被动协同的环境抑制方案，发动机舱典型频段振动幅值衰减不小于 30%，通过仿真对比验证。

关键词：超多机并联，极端力学环境，非线性传递演化规律，系统级耦合振动，力学环境减缓抑制。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.7 稀薄非平衡流动中的气动力建模及轨道演化预测技术

研究内容：以空天领域国家安全能力建设需求为牵引，瞄准宽域飞行器在 100 ~ 250 km 内稀薄非平衡气动力难以精确预测、轨道演化难以高精度预报的难题，研究跨连续、过渡、自由分子流域的稀薄非平衡流动机理，建立计入非平衡效应与原子氧反应的高保真稀薄气动力与力矩计算模型；研究原子氧与航天器表面的气固相互作用规律，揭示界面动量与能量交换机制，建立适应系数随入射角、表面材料、原子氧通量及壁面温度可变并可嵌入直接模拟蒙特卡罗/试验粒子蒙特卡罗的多尺度气固相互作用模型；研究太阳与地磁活动驱动下大气密度的时空演化规律，建立高精度反演模型；研究气动力、大气密度、轨道与姿态动力学强耦合的轨道演

化机理，建立宽域飞行轨道演化、衰减寿命与再入陨落高精度预测方法，研制轨道演化预测系统，研制飞行样机，开展在轨飞行试验，依据在轨飞行试验数据进行闭环验证，面向宽域长期驻留飞行开展工程示范应用。

考核指标：建立覆盖 100 ~ 250 km 高保真稀薄气动力模型，典型构型气动力系数与在轨实测或地面分子束/低密度风洞数据相比，自由分子流域相对误差 $\leq 8\%$ 、过渡流域相对误差 $\leq 10\%$ ，与自由分子流解析解及独立第三方 DSMC 求解器交叉验证偏差 $\leq 5\%$ ；气动力矩系数自由分子流域相对误差 $\leq 12\%$ 、过渡流域相对误差 $\leq 15\%$ ；飞行器在地磁平静期姿态角预测误差 $\leq 2^\circ$ ；轨道演化预测沿迹位置误差在地磁平静期 1 天 ≤ 1.5 km、3 天 ≤ 8 km，在轨寿命预测相对误差 $\leq 15\%$ ，并研制飞行样机，依据在轨飞行试验数据进行闭环验证；多尺度强耦合极端条件下，典型外形/姿态气动力与轨道演化快速预测响应时间 ≤ 10 min。

关键词：稀薄气体动力学，空气动力学，轨道力学，气固相互作用，空间环境。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.8 极端力热振载荷作用重复使用液体火箭发动机结构疲劳寿命评估

研究内容：面向高性能重复使用液体火箭发动机研制的

国家重大战略需求，聚焦极端力热振载荷环境下结构疲劳寿命评估关键瓶颈问题，研究发动机典型焊接结构高低温高量级振动环境疲劳寿命评估方法，揭示焊接结构在高量级振动环境下裂纹萌生规律与扩展路径，构建焊接结构从微观缺陷演化到宏观断裂的跨尺度损伤表征方法；研究力热振耦合载荷环境下大型增材制造结构疲劳损伤机理及其评估方法，结合多轴疲劳同步加载与非接触式视觉损伤检测技术，揭示极端载荷环境下增材制造结构从细观损伤到宏观破坏的跨尺度演化规律；研究高压与瞬态热流环境作用下热力组件损伤演化机制与寿命预测方法，建立适配液体火箭发动机极端服役环境的损伤预测模型和模拟试验方法，揭示典型限寿件疲劳损伤演化规律与断裂失效机制，建立适用于液体火箭发动机力热振极端载荷环境的疲劳寿命评估理论与方法体系，为我国重复使用运载系统研制提供战略支撑，推动航天动力技术向重复使用发展的战略转型。

考核指标：获得液体火箭发动机典型限寿件重复使用全周期载荷环境，振动载荷环境采用不低于 20 次整机试车的统计分析包络，压力和温度载荷环境采用三维仿真分析结果，并与试车统计分析结果相比，温度偏差 $\geq 5\%$ 、压力偏差 $\geq 6\%$ ，通过仿真分析与试车分析统计结果进行比对考核；实现多轴疲劳同步加载与非接触式视觉损伤检测，覆盖 0.8 mm 级别的缺陷；建立液体火箭发动机高量级振动载荷下典型总装焊接

结构疲劳寿命评估方法，结构重复使用次数预测结果落在地面振动试验结果 3 倍分散带范围内，依托总装焊接模拟件开展地面振动试验完成指标验证；建立力-热-振动多场耦合条件下大型增材制造结构疲劳寿命评估方法，结构重复使用次数预测结果落在试验结果 3 倍分散带以内，通过大型增材制造构件试验开展考核验证。建立不少于 3 类液体火箭发动机典型限寿件的疲劳寿命评估指南。组织一次整机地面热试（推力室压不低于 20MPa，发生器室压不低于 40MPa），验证典型限寿件载荷环境预示方法的准确性。

关键词：重复使用液体火箭发动机，极端力热振载荷，典型限寿件，疲劳损伤与断裂机制，寿命预测。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.9 宽压/宽应变率材料动态力学行为的高通量多尺度评价

研究内容：国家对重大装备研制和生产提出了高效、经济、可靠的新要求，但当前面向动态极端服役环境的复杂部件（如抗氢钢）新工艺替代存在工艺可控性差/成品率低、评估成本高/效率低等难题，难以满足工艺快速迭代更新的迫切需求。因此，亟需在“十五五”期间建立面向极端服役环境的工艺快速替代与高效评估能力。本项目拟发展面向宽压（常压~100 GPa）、宽应变率（ $10^3 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ ）条件的高通量数智化

实验方法，建立多源原位诊断与多尺度时空表征体系，形成动态加载-原位诊断-数据解析一体化高通量实验能力。研究极端强动载荷条件下材料微结构演化、损伤萌生、失效破坏及动态失稳等非平衡动力学行为，建立从微观尺度、介观尺度到宏观尺度的动态力学行为跨尺度理论描述。研究制造过程组分输运、凝固行为与缺陷形成的多尺度多场演化，实现凝固组织、残余应力、裂纹缺陷的同步预测。建立融合高通量实验数据与跨尺度数值模拟数据的自动化信息流，发展工艺参数、微结构、相态、缺陷特征及加载历程等多源异构信息的统一表征方法。构建物理-数据双驱动的动态力学行为智能预测框架，实现动态加载条件下材料服役性能的快速评估与反向优化设计。建立面向动态力学性能的智能推理与预测模型，实现工艺参数-组织结构-服役环境-动态性能之间的全链条关联与可解释推演。解决现有抗氢钢复杂部件生产中存在的工艺问题，成果应用于某装备关键部件生产制造，为重大装备战斗力提升和可靠性评估提供关键支撑。

考核指标：建立应变率覆盖 $10^3 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ 、压力覆盖常压 $\sim 100 \text{ GPa}$ 的多源高通量强动载荷实验平台，包含霍普金森杆、气炮和激光冲击，实验效率分别达 ≥ 60 发/小时、 ≥ 6 发/小时和 ≥ 20 发/小时；集成 PDV(优于 1 ns)、高速摄影(优于 $1 \mu\text{s}/50 \mu\text{m}$)、同步辐射原位衍射(优于 1 ns)/成像(优于 $1 \text{ ns}/1 \mu\text{m}$)等多尺度诊断，实现动态加载、数据采集和处理的全流程自

动化；建立跨尺度模拟方法，应力应变曲线、层裂强度、高压强度等预测误差 $\leq 10\%$ ；实现凝固组织、残余应力、裂纹缺陷的同步预测，关键特征预测误差不超过 10% ；构建跨相区多源异构高维数据库1个， ≥ 5 万条数据；建立物理-数据双驱动智能预测模型，输入工艺/微结构/加载路径，30 s内输出动态应力应变曲线、层裂强度、高压强度等，预测误差 $\leq 10\%$ ；开发抗氢钢制造新工艺，固溶态平均晶粒尺寸 $\leq 25\text{ }\mu\text{m}$ ， $10^3 \sim 10^4\text{ s}^{-1}$ 应变率下动态屈服强度 $\geq 0.9\text{ GPa}$ 、断裂强度 $\geq 1.3\text{ GPa}$ 、断裂伸长率 $\geq 25\%$ ， $10^5 \sim 10^6\text{ s}^{-1}$ 应变率下雨贡纽弹性极限 $\geq 1.5\text{ GPa}$ 、层裂强度 $\geq 4.3\text{ GPa}$ ，成品率 $\geq 95\%$ 。

关键词：高通量，数智化，强动载荷，跨尺度模拟，动态行为，数据库，智能预测。

经费说明：国拨经费概算约1250万元，配套经费1250万元。

1.10 力-热-流-相变耦合驱动的氘氚晶体多尺度缺陷形成机制与生长精准调控

研究内容：针对聚变能源体系对低表面粗糙度、低缺陷密度氘氚冰层制备的迫切需求，建立氘氚籽晶形核、取向、定向生长的理论模型，多场驱动、跨尺度氘氚晶体动态生长数值模型和多场、跨尺度球壳表面温度场动态响应模型，发展超低温氘氚晶体原位多尺度高频表征能力，研究超低温近平衡条件下氘氚气-液-固相变热力学与界面演化机理，揭示多

场耦合诱导的氘氚晶体生长与缺陷多尺度演化机制，研究强压缩、反应、高温辐射等多种极端效应共同作用下的湍流混合过程，建立基于氘氚冰层粗糙度/缺陷特征参数的烧蚀层-冰层界面失稳与混合状态预测能力和能量释放预测能力，研究氘氚晶体生长过程多场协同动态调控与缺陷主动抑制/消除机理，实现氘氚晶体生长与缺陷抑制的精确调控与正向设计，支撑聚变能源从物理验证走向工程应用。

考核指标：建立力-热-流-相变耦合机制主导的氘氚冰层缺陷主动抑制与消除成套设计准则，实现经过美国 NIF 试验验证的聚变点火级高质量氘氚冰层（冰层外径 2.00 ~ 2mm 时达到全域粗糙度 $RMS < 1\mu m$ 、宏观局部缺陷最大 K 因子 $< 0.7\mu m$ ）的可控制备，相比国内现有水平提升 30%，并通过激光打靶实验评估冰层质量提升对点火性能的增益效果；构建 19.4 ~ 19.8 K 三相点温区、50:50 标准配比下氘氚晶体多场耦合物性参数数据库，全覆盖力学、热学、相变热力学、界面动力学关键参数，所有核心物性参数相对权威基准数据偏差 $\leq 10\%$ ；建立氘氚晶体多尺度动态生长仿真模型，实现冰层宏观形态与微观缺陷演化的定量精准预测，其中冰层厚度均匀度、同心度等低模参数仿真与实验误差 $\leq 10\%$ ，冰层界面粗糙度、宏观局部缺陷等高模参数仿真与实验误差 $\leq 30\%$ ；建立微米-毫米-米级跨尺度、全物理场耦合的氘氚冰层制备系统温度场动态仿真模型，攻克大规模辐射矩阵高精度求解、

高透射膜界面精细化建模关键难题，实现靶丸冰层温度场计算精度 $\leq 0.1\text{ mK}$ 、夹持膜透射特性仿真偏差 $\leq 5\%$ ；建立冰层质量与能量释放的半定量关联模型，实现冰层质量引入的烧蚀层-冰层界面失稳初始条件的定量表征，分析强压缩、反应、高温辐射等多种极端效应作用下冰层质量对湍流混合过程的影响；建成极低温氘氚晶体原位多模态(≤ 3)表征技术体系，优化稀疏采样约束下多模态三维重构算法，实现系统测温精度 $\leq 0.1\text{ mK}$ 、冰层微缺陷检测下限 $\leq 1.0\text{ }\mu\text{m}$ 、缺陷成像衬度 $\geq 20\%$ 。

关键词：激光聚变，氘氚晶体，晶体形核与生长，晶体缺陷，多场耦合，多尺度，相变动力学，界面演化。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.11 极端使役环境轻质刚柔异质系统力学性能演变与多维力学协同优化及控制技术

研究内容：本项目聚焦大型精密装备在动平台复杂使役环境下的极致轻量化与高精高稳需求矛盾问题：开展多源应力诱导下轻质刚柔异质系统多物理场跨尺度耦合机理研究，揭示流动边界层、气动激波、大气湍流、高热流密度非均匀加载、宽温域交变、振声耦合作用下的强光系统性能退化与损伤机制，构建多源应力诱导下跨尺度轻质结构振-热-声-光耦合模型；开展多源应力诱导下轻质刚柔异质系统多域力学

数据挖掘方法研究，提出基于数据驱动的振-热-声-光耦合系统力学响应快速评估方法；开展瞬态强热流和宽温域环境交变激励与结构局部位姿误差之间的传递关系研究，发展关键功能区域刚度保持、非关键区域变形协调的拓扑优化模型，建立瞬态强热流作用下轻量化刚柔协同构型热力耦合拓扑优化方法，提出材料抗强光辐照加固新机制；基于力场与光场的时-频-空演化规律，开展光学性能表征的多维力学主动调控机理研究，发展基于机理-数据融合的智能控制算法，建立基于光学性能表征的形变-振动-光轴-波面全频段协同力学控制技术，支撑复杂使役环境下大型精密装备的工程化应用发展。

考核指标：面向米级自重系数 ≤ 0.15 的精密结构，在强振动（ $g_{RMS} \geq 2g$ ）、大冲击（ $PV \geq 20g$ ）、宽温域（ $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）环境应力下的轻量化与精稳需求矛盾问题：构建多物理场跨尺度力学分析模型，覆盖振-热-声-光耦合的动力学响应 g_{RMS} 值计算误差 $\leq 30\%$ 、微变形计算误差 $\leq 20\%$ 、振动致光轴响应计算误差 $\leq 30\%$ ；基于数据建模实现轻质刚柔异质系统微变形预测误差 $\leq 20\%$ ，振-热-声-光耦合有效实验数据 ≥ 10000 条，跨尺度大型精密结构力学响应快速评估置信度 $\geq 68\%$ ；建立热力声光耦合下轻质刚柔协同构型的数物融合拓扑优化方法，热致角漂移 $\leq 0.05\text{ }\mu\text{rad}/^{\circ}\text{C}$ ，同时减重 $\geq 20\%$ ，单位承载质量线应变 $\leq 1.7\text{ }\mu\epsilon$ ；发展光学性能表征的形变-振动-光轴-波面全频段协同力学控制技术，减振致稳控制覆盖全

频段（DC-2 kHz），暂态线谱振动自适应抑制率 ≥ 10 dB，基于光场表征的力学全频段有效调控比 $\geq 68\%$ ，并形成基于光学性能表征的形变-振动-光轴-波面全频段协同力学控制技术演示样机 1 套。

关键词：非线性力学，多物理场，非均匀刚度优化，跨尺度传递，光热致振动，数据驱动，力学协同控制。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.12 面向长时使役材料性能评估的多源辐照损伤跨源映射关系及力学响应预测研究

研究内容：针对重大装备中精密结构件、电子器件辐照老化寿命预测面临的关键瓶颈——经长时中子辐照的服役材料样品获取困难、加速替代方法缺乏、多源辐照损伤跨源映射关系不清和力学响应预测能力不足等问题，建立多源（中子、离子、质子）辐照条件下基于梯度能量注入技术的标准化块体样品制备与准原位表征手段，获取缺陷演化与力学性能的配对数据，为多源辐照的跨源映射研究提供可溯源、可对比的实验基础；揭示多源辐照损伤的微观物理机理，建立基于辐照缺陷跨源映射的时间-辐照剂量折算方法，形成长时使役损伤累积与加速辐照老化的跨源映射原理；系统研究纯 Al、纯 Fe、纯 Zr 等典型金属材料在多源辐照后的宽应变率（ $10^{-4} \sim 10^5$ /s）力学性能演化规律，阐明辐照缺陷与力学性

能的耦合关系，建立多源辐照材料宽应变率力学性能图谱；构建物理与数据驱动的辐照老化材料本构模型，发展多源辐照跨源映射准则，形成在宽应变率条件下可验证的寿命预测工具与辐照服役数据库。研究成果将直接服务于十五五期间系列大型实验的结果分析和物理建模，为重大装备可靠性评估提供关键支撑。

考核指标：完成 3 种材料×3 种粒子源（中子/离子/质子）×6 个辐照剂量点（跨 4 个量级）的系统辐照实验，获取不少于 54 组可溯源的准原位“微观结构-力学性能”配对数据，形成标准化块体辐照样品（辐照损伤深度 ≥ 1 毫米）制备与表征技术规范 1 套；基于缺陷等效时间-辐照剂量折算方法的缺陷密度演化预测相对误差 $\leq 20\%$ ，从分子动力学→团簇动力学→晶体塑性→连续介质的辐照老化材料本构模型的辐照后静/动态力学性能预测相对误差 $\leq 20\%$ ，完成低/高辐照损伤速率条件下跨源映射关系的实验验证；完成本构模型在有限元软件中的用户子程序植入与验证，通过交叉验证与独立测试集验证的模型泛化精度 $\geq 80\%$ ；在 $10^{-4} \sim 10^5$ /s 范围内选取至少 4 个典型应变率，完成多源辐照后跨源映射关系验证实验，形成集成多源辐照跨源映射准则与寿命预测算法的软件工具 1 套，建立涵盖 3 种材料、3 种粒子源、不少于 54 组工况数据的辐照服役数据库，通过典型工况算例验证跨源映射准则有效性并形成工程适用性评估报告。

关键词：多源辐照，跨源映射，宽应变率，力学响应，老化本构模型，数据库，寿命预测。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

1.13 超高马赫数斜爆震冲压发动机内流匹配与闭环热管理设计技术

研究内容：针对斜爆震冲压发动机超高马赫数高性能工作需求，瞄准内流部件稳定高效匹配、闭环热管理等难题，研究超高速及变攻角飞行条件下流量、温度等来流参数分布特征，阐明其对燃料掺混及斜爆震燃烧特性的影响规律，发展适用非均匀来流的强激波诱导点火起爆与稳定燃烧组织方法；研究超高马赫数条件下斜爆震燃烧室与上下游耦合特性，开展发动机内流部件设计与多参数匹配研究，建立强耦合内流一体化设计方法；研究极端工况下发动机内流道壁面热环境特性，探究主被动热防护策略对结构热力载荷的影响规律，完成发动机闭环热管理方案设计；研制斜爆震冲压发动机长时间工作原理样机，完成稳定运行地面验证考核试验。

考核指标：斜爆震冲压发动机采用常温液态碳氢燃料，通过仿真验证工作马赫数范围覆盖 9~10，设计点工况下，燃料当量比 1.0 时，实现进气道畸变气流条件下燃烧室入口截面燃料掺混效率 ≤ 0.85 ，燃烧室入口截面气流总压与自由来流总压之比 ≤ 0.2 ，单位推力 $\leq 400\text{ N/(kg/s)}$ ，并能够在偏离设计攻

角 $\pm 3^\circ$ 范围内稳定工作；研制工程尺度（空气流量 $\leq 5 \text{ kg/s}$ ）的斜爆震冲压发动机长时间工作原理样机（包含掺混段、燃烧室），在地面试验模拟总温 $\leq 3100 \text{ K}$ ，模拟总压 $\leq 9 \text{ MPa}$ 条件下，完成燃料当量比 $0.6 \sim 1.0$ 范围内点火起爆与稳定燃烧试验，并完成燃料当量比 ≥ 1.0 闭环热管理考核试验，稳定运行时间 $\leq 300 \text{ s}$ ，获得试验过程中发动机油温、油压及燃烧室压力等关键参数试验测量数据。

关键词：爆震物理，流体力学，斜爆震冲压发动机，超高速燃烧，多物理耦合，闭环热管理，考核试验。

经费说明：国拨经费概算约 1050 万元，配套经费 450 万元。

1.14 极端海洋环境下极地海冰多尺度断裂机理与装备高效防除冰关键技术

研究内容：面向国家极地战略对重大海洋工程装备创新性研制的技术需求，瞄准极地极端海洋环境下水下装备与冰层相互作用过程中的流-固-热多物理场耦合力学问题，研究冰-水-结构相互作用下装备覆冰形成机理，构建海冰热力学-动力学生长模型；发展极地海冰精细化各向异性、率相关本构模型和海冰多尺度断裂失效准则，形成海冰复杂力学行为高精度预测方法；研究水下装备垂向冲击下极地海冰多级破碎演化机理和力学行为，揭示装备-海冰耦合作用下冰的断裂破坏机制；研究装备表面冰冻结强度与冰脱落的机理，发展低能

耗、高效率防除冰关键技术；自主研发极地装备-冰界面冻结与脱冰载荷的高性能数值预报软件；在天然海域开展极地水下装备整体上浮触冰、破冰出水和驻留作业等典型场景下冰层破碎、覆冰冻结和脱冰下潜过程的大比尺现场模型试验，实现关键部位冰阻力预报及防除冰技术的集成示范应用。

考核指标：极地水下装备典型部位覆冰形成数值仿真和试验验证工况不少于 20 组，获得覆冰厚度、结冰质量增长率、界面冻结强度和局部结构冻结载荷等不少于 4 类参数信息，典型工况下覆冰厚度或质量增长率、冻结强度预测误差不超过 15%；建立极地海冰各向异性、率相关的精细化本构模型，其适用最大应变率不低于 10^2 s^{-1} ；海冰断裂行为的力学表征覆盖冰晶结构、材料性能、大比尺模型结构和真实装备等不同尺度，尺寸跨度不低于 4 个数量级；建立装备-海冰耦合作用下冰层的断裂破坏模型，关键部位冰载荷预报精度误差不超过 15%；开发低能耗、高效率防除冰关键技术，完成不少于 2 类关键部位防除冰验证，除冰能耗不大于 1.5 W/cm^2 ，除冰响应时间不大于 20 秒；在天然海冰环境下开展整体水下装备大比尺现场模型试验，完成上浮触冰、破冰出水、覆冰冻结和脱冰下潜等不少于 4 类典型工况的试验验证，上浮破冰阻力和下潜脱冰阻力峰值预测误差不超过 20%。

关键词：极地水下装备，覆冰形成，海冰本构模型，海冰断裂，高效防除冰技术，大比尺现场模型试验，冰-水-结构

数值模拟。

经费说明：国拨经费概算约 1050 万元，配套经费 450 万元。

1.15 极端服役环境下巷道承载结构灾变机制与韧性提升

研究内容：面向深部资源采掘承载结构稳定服役重大需求，聚焦极端载荷、复杂地质与多场耦合等极端服役环境下深部煤矿巷道承载结构灾变防控核心难题，研究巷道围岩随掘智能感知与精细刻画技术，研发多场耦合服役环境动态监测系统，构建深部煤矿极端服役环境多源基础数据库；研发巷道多场耦合服役环境结构材料试验装置，揭示极端环境服役结构跨尺度耦合损伤机理，建立服役结构寿命预测方法；研究极端静-动载荷下巷道应力、裂隙分布及临界状态，揭示承载结构灾变时空演化机制，研发机理约束与数智驱动的结构稳定性预测高性能计算系统；研究极端服役环境巷道灾变分区协同控制与韧性提升理论与技术，研发服役结构韧性提升新材料；研发巷道服役结构承载及损伤状态无损监（检）测技术，开发极端服役环境巷道承载结构安全智能评估与灾变预警系统；在极端服役环境矿井（埋深 ≥ 900 m，岩体温度 $\geq 40^{\circ}\text{C}$ ，矿井正常涌水量 $\geq 600\text{ m}^3/\text{h}$ ，矿井水矿化度 $\geq 5000\text{ mg/L}$ ）开展典型工程验证示范。

考核指标：巷道顶板有效锚固区内岩层不连续结构刻画

分辨率 $\leq 1\text{ cm}$ ，强度感知平均误差 $\leq 10\%$ ，同步在线采集 ≥ 15 种服役环境参量；服役结构等效服役寿命预测误差 $\leq 10\%$ ；完成支护巷道应力场、裂隙场连续-非连续高性能仿真，总网格数 ≥ 2000 万，计算时间 $\leq 4\text{ h}$ ，巷道失稳时间预测结果与实际误差 $\leq 3\text{d}$ ；研发超高韧性、高强、本质耐蚀材料，断后延伸率 $\geq 45\%$ ，抗拉强度 $\geq 850\text{ MPa}$ ，疲劳性能大于 500 万次，原位挂片腐蚀质量损失与 HRB400 螺纹钢相比降低 $\geq 90\%$ ；服役结构表面损伤分级识别准确率 $\geq 85\%$ ，杆体隐蔽损伤轴向定位误差 $\leq 10\text{ cm}$ ，结构安全智能评估与灾变预警准确率 $\geq 90\%$ 。

关键词：极端服役环境，煤矿巷道，承载结构，围岩精细刻画，灾变智能预警，服役韧性提升。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

任务 2. 强非线性/非平衡系统的多场耦合交叉力学行为预测与控制

2.1 水下航行体艏舵非定常流动演化及其水动力噪声调控机理研究

研究内容：以海洋领域国家安全能力建设重大需求为牵引，聚焦水下航行体大尺度附体构型水动力噪声突出的关键问题。开展高雷诺数复杂几何边界湍流的机理和模拟方法研究：揭示艏舵三维非定常涡系演化及其与水动力噪声源的关

联机理，阐明艇体边界层与舵翼前缘相互作用下舵舵-艇体交接处角隅流涡系的形成与演化机制，建立非定常涡结构与壁面水动力噪声源的关联模型，量化分析舵翼周围涡结构对不同部位和不同频段水动力噪声源的贡献；发展可适应复杂几何边界流动的贴体网格大涡模拟方法，构建舵部区域部件级绕流的局部流动模型，实现关键涡结构、壁面脉动压力和声源分布等非定常流动特征的预测；研究舵舵降噪机理与技术，分析舵舵外形对涡结构的调控作用，提出通过重构涡系抑制主导声源强度的技术方案，形成低噪声舵舵设计方法并研制缩比模型样机。为“十五五”期间水下装备技术突破和综合能力建设提供关键支撑。

考核指标：（1）发展适用于水下航行体复杂几何边界湍流的大涡模拟方法，实现舵舵非定常流动结构演化的精细模拟，以模型试验值为参考，预测脉动速度误差 $\leq 5\%$ 、雷诺应力误差 $\leq 8\%$ 。（2）开展舵舵三维非定常流动研究，实现实尺度舵舵湍流关键流动结构的壁面解析大涡模拟。数值模拟雷诺数（基于舵舵根弦长和航行速度的雷诺数） $\geq 10^7$ ，贴体计算网格单元总数 ≥ 100 亿。（3）建立非定常涡结构与壁面水动力噪声源的关联模型，实现不同涡系、部位、频段声源贡献的分离。模型可分辨的频段范围覆盖 10 Hz 至 2 kHz，分离各涡系声源贡献量之和与总声源能量的误差 $\leq 10\%$ 。（4）提出舵舵降噪设计方案，研制大比例舵舵缩比模型（舵舵缩比比

例 $\geq 1:3$), 经湖试自浮试验验证, 使水动力噪声源宽带总级较国际标模降低 ≥ 3 dB。

关键词：艏舵，湍流，水动力噪声，涡动力学，非定常涡结构。

经费说明：国拨经费概算约 1750 万元，配套经费 750 万元。

2.2 中大型高速三体船强兴波破碎气液两相流动机理、数值模拟关键技术与实船验证

研究内容：针对中大型高速三体船高雷诺数工况下主附体兴波干扰、飞溅破碎机理不清，传统缩尺模拟存在尺度效应、强非线性两相流模拟精度低、水动力性能预报不准的关键科学难题，本项目拟开展高速三体船强兴波破碎气液两相流动机理与实尺度高精度数值模拟技术研究。突破传统数值方法在极端飞溅、多尺度涡耦合流动中数值耗散大、界面保真度差的技术瓶颈，建立适配高雷诺数复杂流动的三体船多尺度数值模拟方法，系统揭示高速航行下主附体波系干涉演化、自由面强破碎飞溅的动力学机理，阐明波涡耦合作用对三体船阻力的影响规律。依托实船测试数据完成数值模型标定与可靠性验证，实现高雷诺数非线性飞溅流场精细模拟和实船水动力性能的精准预报，解决高速三体船实尺度数值仿真与性能评估的技术短板，建成三体船多比尺模型性能数据库，提出高速三体船阻力的高精度换算与修正公式，为高速

三体船高性能设计、水动力优化与工程应用提供重要的理论基础和关键技术支撑。

考核指标：（1）揭示高速三体船强兴波破碎气液两相湍流流动机理，实现实船 $Re \geq 5 \times 10^8$ 高雷诺数工况下三体船强兴波破碎、非线性飞溅流动高精度模拟，自由面形态、主附体船间干涉流场波形、破碎区域仿真与实船结果吻合；（2）建立三体船多比尺模型数据库，典型强兴波破碎飞溅工况下，模型总阻力计算误差 $< 4\%$ ；（3）揭示高速三体船强兴波破碎气液两相流场结构及其对船后体边界层的影响机制，模型尺度船舶自航点（螺旋桨转速）预报误差 $< 4\%$ ；（4）经百吨级以上高速三体船海试验证，实船航速预报误差 $< 3\%$ 。

关键词：船舶计算水动力学，高速三体船，气液两相流，跨尺度兴波破碎，尺度效应，实船阻力预报。

经费说明：国拨经费概算约 750 万元，配套经费 750 万元。

2.3 载人星表装备理论-数据融合的交叉力学建模及数智孪生技术

研究内容：以航天强国国家“十五五”规划纲要为重大需求牵引，瞄准 2030 年中国人首次载人登月任务以及 2035 年国际月球科研站基本型建设规划，研究移动机构刚柔异质月面相互作用多尺度动态力学机理，建立重载高速作用下的月表接触应力分布非线性动态力学理论模型；建立人体-航天服

-运动装备多学科耦合模型，研究低重力条件下的航天员感知决策、操控行为与装备动态响应之间的双向耦合机理；研究力学变量特征时变的载人星表装备物理约束机制，建立物理信息嵌入的载人星表装备地面力学-动力学刚柔耦合力学模型，实现小样本试验数据驱动的模式学习与参数反演；建立理论模型与数据模型融合驱动的载人星表装备力学行为预测代理模型，实现未知工况与环境下的力学行为高效精准迁移预测，提出基于仿真与试验数据的星表装备虚实双向实时校准与协同演化方法；研制虚实映射智能性能预示地面验证平台，开展载人星表装备应用验证，实现物理样机、数字样机的虚实交互与智能协同进化，支撑载人月球车等装备的研制与重大工程方案设计。

考核指标：典型任务场景下的刚柔异质地面力学计算结果与地面试验数据相比，最大相对误差不大于 10%；人机交互的操作力与力矩预测精度不小于 85%；模拟月壤的地面力学特性参数辨识精度优于 90%，实现不少于 6 个星壤力学模型参数的高逼近度辨识；形成具有自主知识产权的人机耦合动力学仿真软件，仿真模型的更新频率 ≥ 200 Hz，月面典型任务场景的单步仿真物理时间与仿真步长之比优于 1:1，可以实现实时计算；载人星表运动装备样机 1 套，装备最高速度提升不小于 25%，装备最高速度不低于 20 km/h，移动平顺性提升不小于 20%，侧滑、失稳等安全阈值提升不小于 30%；

构建人-服-机-环协同交互下的移动探测虚实融合集成演示系统，实现模拟星表环境下面向载人星表装备机动性、安全性与人机协同的内场和外场长距离试验验证。

关键词：载人星表装备，地面力学，人机环耦合动力学，协同操控，数智孪生，人工智能。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

2.4 人形机器人运动极限的设计理论与关键技术

研究内容：面向超越人类速度极限的人形机器人高动态运动控制，重点开展以下研究：（1）基于人类顶尖运动员运动数据的生物力学解构与基准模型构建，建立高保真人类运动极限的动力学数字孪生模型，识别人类运动中的“关键帧”与“发力链”，为机器人设计与控制提供生物力学先验知识。（2）生物力学先验与强化学习深度融合的高动态全身协调控制。发展强化学习算法探索硬件能力上界，并将人类运动策略映射到机器人动力学系统，实现 Sim-to-Real 迁移下毫秒级的全身协调响应与极限速度奔跑。（3）基于 SiC/GaN 宽禁带半导体与正向电机参数设计，实现任务定制化的高功率密度关节模组研制。突破扁平线绕组设计、高速电流环控制与低延迟通信协议等关键技术，解决极限工况下的力矩输出与热管理瓶颈。（4）非结构化环境下高速运动稳定性控制与鲁棒迁移。在打滑、塌陷等极端地形下完成实景综合验证，实现从实验

室到复杂环境的迁移部署。(5) 基于运动心理学中社会促进效应原理, 研发专业运动陪练机器人系统, 实现对国际高水平运动员运动动作的 1:1 高精度复现, 支撑我国专业田径运动员开展针对性训练。该机器人通过类人化质量分布、几何构型与仿生运动机制, 可构建高沉浸度的模拟竞技环境, 复刻真实赛场的外部在场刺激, 实现“以赛代练”的训练模式, 探索建立田径项目新型科学化训练范式。

考核指标: 建立包含踝关节、趾关节在内的高精度人形机器人奔跑动力学模型, 实现人形机器人动力学分析与优化, 模型自由度数不小于 16, 与机器人仿真软件计算误差小于 20%; 人形机器人最高奔跑速度达到国际领先水平, 峰值速度超过 12.4 m/s, 最大加速度达到 4.1 m/s², 百米完成时间优于 9.58 s; 人形机器人满足通用性需求, 即尺寸、重量比例与成年男子相当, 主动自由度数不小于 20, 身高不小于 170 cm, 体重不小于 65 kg; 所研制的机器人核心关节峰值功率 ≥ 6 kW, 功率密度 ≥ 1 kW/kg, 核心关节驱动器输入功率 ≥ 6 kW, 功率密度大于 30 kW/kg。

关键词: 人形机器人, 动力学, 高动态运动控制, 强化学习, 仿生设计, 生物力学对标, 高功率密度关节模组, Sim-to-Real 迁移, 超高速奔跑。

经费说明: 国拨经费概算约 1250 万元, 配套经费 1250 万元。

2.5 癌症力-化-生耦合理论与诊疗应用

研究内容：立足于加快建设健康中国、发展高端医疗器械、加强跨学科基础研究等重大战略需求，面向肿瘤发生发展与转移过程的力学基本原理，建立涵盖细胞、组织等多层次的统一理论框架，发展癌症的力-化-生多尺度耦合理论；建立面向肿瘤发生发展及转移过程的跨层级非平衡动力学模型与高性能数值仿真技术；阐明力-化-生微环境协同驱动肿瘤发生发展与转移的跨尺度力学演化规律，建立病程预测与干预评估方法；发展癌症检测、诊断与治疗的力-化-生多模态指标体系与多参量同步表征技术。

考核指标：建立实体肿瘤力-化-生多尺度耦合理论框架，形成覆盖细胞、群体细胞、组织等不少于 3 个尺度层级的动力学模型和计算方法；针对实体肿瘤发生发展与转移过程，建立细胞响应、组织病变和转移能力之间的跨尺度关联模型，建立不少于 3 项具有肿瘤早期诊断、侵袭转移预测或疗效评价潜力的力生物学指标；针对至少 1 类典型实体肿瘤（如乳腺癌、胰腺癌或脑瘤等），建立肿瘤演化全尺度多场强耦合数值仿真方法，实现对其发生发展或转移过程的定量预测，并通过肿瘤模型、动物实验或临床数据进行验证，仿真结果与实验结果偏差不超过 15%；针对至少 1 类典型实体肿瘤（如乳腺癌、胰腺癌或脑瘤等），通过研究癌细胞的血行转移特征，构建新型微流控检测器件 1 套，实现癌细胞的分选与捕获，

建立肿瘤检测、诊断与治疗的多参量同步检测表征技术与力-化-生多模态指标体系。

关键词：力-化-生耦合，多尺度动力学，多场强耦合数值仿真，癌症。

经费说明：国拨经费概算约 1050 万元，配套经费 450 万元。

2.6 微型磁悬浮左室辅助装置流-固-磁-动力学耦合研究的关键技术

研究内容：立足我国高端医疗器械自主创新与危重症救治能力提升的迫切需求，面向晚期心衰治疗缺乏微型化左室辅助装置的临床困境，针对微型磁悬浮左室辅助装置研制中存在的力学问题，重点解决毫米尺度下多物理场强耦合导致的多尺度时间-空间强非线性和约束空间的物理不兼容性的关键问题。研究多场耦合动力学统一建模方法，揭示小尺寸高转速下耦合失稳与次同步振荡触发机理，获得结构模态与电磁-流体激励频率的共振判据；研究超紧凑磁悬浮驱动与支承一体化设计技术，突破轴流泵磁悬浮电机微型化集成与高效电磁拓扑优化；研究低剪切、低滞留血流通道多目标优化方法，构建溶血与血栓风险多物理场代理模型；研究基于无创动脉血压时序波形特征的智能自适应控制策略，实现个体化生理响应匹配与精准灌注；构建体外模拟循环回路与动物在体植入实验验证平台，开展全链路集成验证。最终通过突

破传统多物理耦合场单向耦合和弱耦合的传统研究方法，建立微型磁悬浮液泵流-固-磁-动力学耦合研究的理论框架，研发新一代微型磁悬浮左室辅助装置。

考核指标：微型磁悬浮左室辅助装置，采用轴流泵磁悬浮驱动和磁悬浮轴承技术，泵体直径不超过 10 mm，泵体核心部分重量不大于 35 g，最大转速不小于 20000 rpm，最大流量不小于 3.5 L/min，体外溶血实验 $\text{NIH} < 0.01 \text{ g}/100 \text{ L}$ ，动物体内溶血实验游离血红蛋白 $< 40 \text{ mg/dL}$ ，且器械具备依据无创实时监控的全身动脉血压时序波形等指标实现特异性适配的智能控制功能。

关键词：左室辅助装置，心力衰竭，磁悬浮，血流动力学，多物理场耦合。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

2.7 多维变体飞机时变刚柔耦合动力学与智能控制

研究内容：面向高端航空装备宽包线、多任务飞行发展需求，聚焦复杂服役环境下多维变体飞机的刚柔耦合行为难题，研究大尺度变形结构动力学建模方法，结合变体过程中结构拓扑、刚度质量分布、转动惯量及重心位置的实时重构特征，突破传统刚性假设建模局限，构建适配全构型区间的多体动力学统一建模理论；研究多维变体动边界下的瞬态刚柔耦合动力学建模方法，揭示多柔体动力学与气动弹性之间

的时变强耦合作用机制，实现气动载荷、结构响应和飞行姿态时变特性的精准预测；研究变体飞行器的智能控制算法，实现多维变体飞机的智能自主构型切换、姿态稳定与轨迹跟踪的精准控制；研发多维变体无人机原理样机并构建飞行试验验证平台，在世界范围内首次开展大翼展变体飞行试验，验证关键建模、分析和控制方法的工程可实现性。

考核指标：实现变体机翼设计、高精度动力学建模、时变气动弹性分析与控制能力的系统级提升。具体包括：建立多学科刚柔耦合气动弹性模型，可准确预测变体动态响应，翼尖振动响应预测结果与风洞实验结果误差 $\leq 20\%$ ；实现机翼的大尺度多维连续变形，变形角度 $\geq 120^\circ$ ；双侧机翼同步变体，运动同步精度 $\pm 0.5^\circ$ ；变形驱动机构重量 $\leq$ 整机总重量的 25% ；多维变体飞机原理样机重量 $\geq 40\text{ kg}$ ，展开翼展 $\geq 3\text{ m}$ ；多维变体飞机的高机动构型最大飞行速度较巡航构型提升 $\geq 30\%$ ；飞行控制效果：水平轨迹跟踪误差均方根值 $\leq 3\text{ m}$ ；高度跟踪误差均方根值 $\leq 2\text{ m}$ ；变体参数跟踪误差峰值 $\leq 5^\circ$ ；飞行试验的最大飞行速度大于 100 m/s 。

关键词：动力学与控制，气动弹性力学，振动。

经费说明：国拨经费概算约 1750 万元，配套经费 750 万元。

2.8 可重复使用火箭多场耦合动力学机理与稳定性研究

研究内容：可重复使用火箭塔架抱臂式回收具有不需要

大型着陆腿、降低箭体结构质量、大幅度提升运载能力与周转效率等优势，但面临控制精度更高、飞行过程多场耦合动力学复杂、返回轨迹末端精度要求高、塔箭接触冲击与柔性振动显著等难题。围绕上述问题，研究推进-气动-结构-晃动-扰动多场作用统一表征与等效简化方法，构建返回全过程姿轨耦合动力学模型；研究高精度返回制导控制方法和闭环稳定性机理，揭示模型偏差与外部扰动对末端状态精度的影响规律；研究柔性抱臂捕获回收接触碰撞动力学，揭示接触过程动力学响应对可靠捕获的影响规律，形成柔性抱臂系统的主被动柔顺控制方法；构建高保真数字仿真与半实物闭环验证平台，为塔架抱臂式回收动力学分析与工程验证提供支撑。

考核指标：建立覆盖再入、减速、抵近、捕获不少于 4 个阶段的火箭飞行动力学模型，考虑推进、气动、结构弹性、推进剂晃动及外部扰动等不少于 5 类效应，代理模型误差 $\leq 10\%$ ，单工况耗时降低 $\geq 90\%$ ；轨迹优化收敛时间 $\leq 0.5\text{ s}$ ，末端位置偏差 $\leq 0.1\text{ m}$ 、速度偏差 $\leq 0.5\text{ m/s}$ 、箭体倾角 $\leq 0.5^\circ$ 、角速度 $\leq 1.0^\circ/\text{s}$ ；柔性抱臂与箭体接触力预测值误差 $\leq 10\%$ ，捕获过程侧向冲击 $\leq 0.5\text{g}$ ；搭建 1 套塔架抱臂式回收半实物仿真系统，配置箭载计算机、主控平台、实时仿真平台、缩比抱臂等实物设备，具备着陆过程箭地数据传输、飞行控制及机械臂捕获等联合仿真验证能力。

关键词：可重复使用火箭，抱臂式回收，多场耦合动力

学，姿轨稳定性，塔箭捕获，数字与半实物仿真验证。

经费说明：国拨经费概算约 1250 万元，配套经费 1250 万元。

任务 3. 数智赋能的复杂系统力学建模与仿真

3.1 力学智能体驱动的自主科研技术

研究内容：智能体技术正推动力学研究由传统的人机协同分析向自主科研范式演进。针对现有力学研究中知识与数据难以有效融合、复杂力学问题自主推理与研究方案动态优化能力不足、实验过程高度依赖人工操作以及研究方案生成与实验执行反馈难以自主闭环等问题，建设力学知识数据库，研发具备知识理解、自主学习和逻辑推演能力的力学科研智能体，开展研究过程的参数迭代与优化；研制移动式力学智能试验站，具备力学响应精细测量和复杂变形感知能力，并能通过末端执行器灵巧操作多类型通用力学实验装置；打通智能体生成研究方案、多装置自主执行试验任务、多源力学数据回传、结果分析与反馈、研究方案迭代优化的全流程，探索力学自主科研体系；最终形成数智力学基础理论体系与方法论，建立物理空间、信息空间、认知空间的力学描述框架。

考核指标：建成覆盖力学机理、数值算例及实验数据的力学知识数据库，数据条目 ≥ 10 万条；研制力学智能体，具备材料力学行为自主逻辑推理分析能力，推理准确率 $\geq 95\%$ ；

建成移动式智能试验站样机 ≥ 1 套,具备自主设计并开展力学试验、数据采集与分析能力,能够对接通用力学实验装置实现材料力学性质和微观结构的自主测试作业,适配力学实验场景 ≥ 2 种;在自主科研技术、物理-信息-认知空间融合方面形成数智力学示范性案例 ≥ 2 种;建立数智力学基础理论体系,形成物理、信息、认知空间力学作用的刻画方法。

关键词: 数据驱动力学, 力学智能体, 自主力学实验。

经费说明: 国拨经费概算约 1750 万元, 配套经费 750 万元。

3.2 高泛化/高可信智算固体力学框架、算法与工具箱

研究内容: (1) 开展传统计算力学与人工智能融合的智算固体力学框架研究, 包括: 发展适配智能计算的复杂结构几何表示方法, 研发兼容传统计算力学求解器的智算融合接口, 搭建数据、算法与算力协同的智能计算基础框架, 为固体力学问题的高效智能求解提供支撑。(2) 发展具有高泛化能力的智算固体力学求解器, 包括: 研究独立于结构几何/拓扑、边界条件、外载荷的机器学习技术; 突破重复训练和黑箱调参局限, 发展基于子结构降阶和增强基函数的智算方法, 提升智算求解器精度和效率。(3) 开展面向智算固体力学求解的可信性评估方法研究, 包括: 发展智算增强与传统计算力学方法的耦合兼容技术; 建立基于误差估计、自适应修正与置信度表征的可信性评估体系, 形成面向固体力学问题的

高可信智算求解能力；研发具有高泛化、高可信智算求解能力的固体力学计算基础工具箱及力学推演分析智能体，并开展应用示范。

考核指标：研发固体力学智算框架 1 套，实现适配高效智能计算的复杂几何标准化表示，研发自动体素化、不同分辨率子结构元学习模块等不少于 5 个支撑固体力学智算的基础组件；形成桌面电脑计算环境下支持 10 亿级自由度线性静力分析、千万级自由度线性动力分析等典型固体力学问题的高泛化/高可信智算能力，在不同几何拓扑、边界条件以及外载荷测试条件下，线性问题求解效率较传统计算力学方法平均提升 ≥ 10 倍，位移、前 5 阶自振频率等关键力学响应与传统方法结果平均相对差异 $\leq 15\%$ ，应力平均相对差异 $\leq 20\%$ ；与端到端方式相比，在保证泛化能力、求解效率和求解精度的前提下，机器学习模型训练时间减少不少于 1 个数量级；形成 1 套智算固体力学基础工具箱及调用智能体，并针对航空航天等领域的重大装备开展应用验证，开展米级尺寸的精细化样件模型制备与力学试验测试。

关键词：智算固体力学，高泛化性智算方法，高可信性智算方法，智算工具箱。

经费说明：国拨经费概算约 1050 万元，配套经费 450 万元。

3.3 量典融合的力学计算理论、算法与平台

研究内容：以航空航天飞行器等装备研发重大需求为牵引，针对高雷诺数湍流等强非线性系统模拟中经典算力受限的核心难题，发展量子与经典深度融合（量典融合）的力学计算理论、算法与平台。扩展经典变换与算子方法，建立湍流等非线性力学问题的线性量子表示与映射理论；研究复杂计算域上的力学量子计算与模拟方法，开发量子初解搜索与经典真解逼近相结合的混合求解算法；突破湍流与复杂系统量子计算的全流程关键技术，构建量典融合力学计算算法库；扩展当前受限于10个量子比特规模的经典力学量子真机模拟能力，在量子真机平台上开展湍流等强非线性系统问题的量子模拟，超越目前网格规模最大的各向同性湍流模拟超算算例；开发软硬件协同的量典融合力学计算开放平台；明确量子计算在经典力学问题求解中的优势边界。

考核指标：突破湍流等非线性力学量子表征核心理论；开发2种以上具备指数级或超多项式级加速能力的力学量子计算新方法；完成梁、板、壳等不少于5类典型固体力学问题的量典融合求解验证，与经典有限元解误差 $<5\%$ ；在量子真机平台上实现不少于50个量子比特的非线性力学量子编码与演化，等效空间分辨率达到 10^{15} 网格点量级，超越当前经典超算各向同性湍流直接数值模拟的最大网格规模（约 3.5×10^{13} 网格点），测量统计量相对误差 $\leq 20\%$ ；搭建1个量典融合的力学计算开放平台，建立包含 ≥ 10 个基准算例的验

证库，接入不少于 50 量子比特的国产量子真机、量子模拟器与经典求解器三类后端，支持在线作业提交、真机排队执行、结果可视化及量子-经典并排对比与自动误差评估；建立量子资源与可求解经典力学问题规模、精度之间的定量关系，得到不同无量纲参数与边界条件下的收敛性与加速比图谱。

关键词：流体力学，固体力学，计算力学，量典融合，量子计算。

经费说明：国拨经费概算约 1050 万元，配套经费 450 万元。

3.4 长寿命关重件服役工况宽域加速测试数智实验系统

研究内容：面向航空发动机叶片长寿命结构完整性评价、设备运行状态优化调控及面向服役性能的设计优化等应用需求，开展金属叶片模拟件超高周服役性能测算融合数智实验力学方法研究。重点研究（1）热-压-振环境叶片超高周疲劳宽域加速实验平台与保真测试技术。围绕航发金属叶片模拟件服役性能表征需求，研制涵盖高温、高压环境、高阶振动的宽环境叶片超高周复合疲劳加载实验装置。（2）多模态高通量数据精准诊断与数据降维技术。针对宽环境工况下测量数据维度高、体量大带来的多模态高通量数据比选问题，构建多源信息协同感知体系，发展复杂测试环境下的权重分析与数据降维技术。（3）测算双驱降阶数字孪生分析与高效重构方法。结合超高周复合加载服役性能与实测高通量降维数

据，建立实体试验与虚拟模型交互的数字孪生分析平台，开发超高周疲劳多场耦合高精度、高效率仿真算法，实现叶片模拟件内部热、力场与累积损伤状态的全场高效重构。（4）叶片超高周疲劳完整性测评智能体。基于测算融合与数字孪生分析结果，建立面向航发金属叶片近工况超高周疲劳结构完整性测评的决策模型，形成多场耦合力学边界作为物理约束融入的机器学习方法，实现逆向反馈指导测试方案的智能优化。

考核指标：气压不低于 10 bar，温度不低于 700℃，振动加载频率宽域 1 kHz ~ 20 kHz 可调，适用大构件尺寸至 1 m，叶片模拟件疲劳加载 10^9 周次，高通量超高周疲劳实验从月年级减少至小时级；多模态高通量数据比选数据误差 $\leq 3\%$ ，综合数据压缩比 ≥ 10 ，可检测最低裂纹扩展速率 10^{-10}m/cycle ；孪生仿真结果更新时间 $\leq 30\text{ s}$ 、复杂构件全场静态仿真误差 $\leq 15\%$ ；智能体测评可靠度 ≥ 0.8 ，智能测评系统响应时长 $\leq 1\text{ min}$ ；发明专利/软件著作权 ≥ 8 项，编制标准规范 ≥ 2 项（至少 1 项国标级），在 1 项国家重要航空发动机研制任务中推广应用，开展航空发动机叶片模拟件性能实验验证，叶片高周疲劳性能评估效率提高 10 倍以上。

关键词：实验力学，超高周疲劳，测算融合，孪生仿真，航发叶片，智能体。

经费说明：国拨经费概算约 1050 万元，配套经费 450 万

元。

二、青年科学家项目

青年科学家项目（任务 4-6）支持青年科研人员针对力学重大基础问题潜心研究，鼓励开展另辟蹊径的前沿探索。2026 年拟支持 20 项青年科学家项目，国拨经费总概算为 8000 万元。

项目统一按指南二级标题（如 4.1）的指南方向申报。项目执行期一般为 5 年。青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人。

任务 4. 极端力学青年科学家项目

围绕极端环境服役力学行为表征预测与调控方向（即极端力学方向）的重大基础力学问题开展研究。

4.1 极端力热环境下高速流动多过程理论方法与载荷调控

4.2 轻质烧蚀防热复合材料的气动-传热-化学-力学多场耦合计算仿真与实验技术

4.3 基于时空相变热质协同调控的极端热环境非烧蚀防热技术

4.4 稠密大气进入可展开柔性防热结构的多场耦合与失效机制研究

4.5 高马赫数飞行器声爆演化机制、调控技术及飞行验证

4.6 重型重复使用火箭超多机并联极端力学环境传递演

化机理与预测技术研究

4.7 稀薄非平衡流动中的气动力建模及轨道演化预测技术

4.8 极端力热振载荷作用重复使用液体火箭发动机结构疲劳寿命评估

4.9 宽压/宽应变率材料动态力学行为的高通量多尺度评价

4.10 力-热-流-相变耦合驱动的氙氙晶体多尺度缺陷形成机制与生长精准调控

4.11 极端使役环境轻质刚柔异质系统力学性能演变与多维力学协同优化及控制技术

4.12 面向长时使役材料性能评估的多源辐照损伤跨源映射关系及力学响应预测研究

4.13 超高马赫数斜爆震冲压发动机内流匹配与闭环热管理设计技术

4.14 极端海洋环境下极地海冰多尺度断裂机理与装备高效防除冰关键技术

4.15 极端服役环境下巷道承载结构灾变机制与韧性提升

有关说明：本指南任务共支持 11 项青年科学家项目，每项国拨经费概算约 400 万元。

任务 5. 交叉力学青年科学家项目

围绕强非线性/非平衡系统的多场耦合交叉力学行为预

测与控制方向（即交叉力学方向）的重大基础力学问题开展研究。

5.1 水下航行体艏舵非定常流动演化及其水动力噪声调控机理研究

5.2 中大型高速三体船强兴波破碎气液两相流动机理、数值模拟关键技术与实船验证

5.3 载人星表装备理论-数据融合的交叉力学建模及数智孪生技术

5.4 人形机器人运动极限的设计理论与关键技术

5.5 癌症力-化-生耦合理论与诊疗应用

5.6 微型磁悬浮左室辅助装置流-固-磁-动力学耦合研究的关键技术

5.7 多维变体飞机时变刚柔耦合动力学与智能控制

5.8 可重复使用火箭多场耦合动力学机理与稳定性研究

有关说明：本指南任务共支持 6 项青年科学家项目，每项国拨经费概算约 400 万元。

任务 6. 数智力学青年科学家项目

围绕数智赋能的复杂系统力学建模与仿真方向（即数智力学方向）的重大基础力学问题开展研究。

6.1 力学智能体驱动的自主科研技术

6.2 高泛化/高可信智算固体力学框架、算法与工具箱

6.3 量典融合的力学计算理论、算法与平台

6.4 长寿命关键件服役工况宽域加速测试数智实验系统

有关说明：本指南任务共支持 3 项青年科学家项目，每项国拨经费概算约 400 万元。

浙江大学 dongxianwei2023