

关于发布多物理场高效飞行科学基础与调控机理 重大研究计划 2025 年度项目指南的通告

国科金发计〔2025〕7号

国家自然科学基金委员会现发布多物理场高效飞行科学基础与调控机理重大研究计划 2025 年度项目指南，请申请人及依托单位按项目指南所述要求和注意事项申请。

国家自然科学基金委员会

2025 年 1 月 24 日

多物理场高效飞行科学基础与调控机理 重大研究计划 2025 年度项目指南

“多物理场高效飞行科学基础与调控机理”重大研究计划面向一小时左右全球抵达高速民航和航班化天地往返运输国家重大需求，聚焦多物理场高效飞行重大基础问题（多物理场是指跨域变构高速飞行器在飞行过程中，表面与空气摩擦产生气体环境温度 $> 3000\text{K}$ 的高温场，飞行器构型和表面气固界面非稳态时变、压强峰值 $\geq 7.5\text{kPa}$ 的气动力学场，跨域高速飞行产生 $10^{16}\sim 10^{20}\text{m}^{-3}$ 等离子体电子密度的复杂电磁环境）。重点针对两级入轨总体图像（一二级飞行器均可通过变形呈现近似火箭构型和近似飞机构型），建立跨大空域、宽速域、可重复的高效智能飞行器设计理论与

方法，实现飞行器构型连续变化、主动流动调控和智能控制等核心基础理论与技术突破，为航天运输系统创新发展提供理论基础与技术支撑。

一、科学目标

瞄准中国航天运输系统国家重大需求，提出跨域高效智能飞行新思路，面向跨域、变构、可重复飞行关键特征，建立非定常空气动力学模型，发展多物理参数实时感知与智能控制理论，突破主动热防护、变构型机构-结构设计、主动流动控制和电磁力热环境模拟与科学实验等关键技术，取得一批多物理场高效飞行原创性成果，牵引学科深度融合与创新发展，革新面向航天巨系统的智能系统工程范式，为我国未来航天运输系统提供关键理论、方法、技术和人才队伍储备，促进中国航天运输系统发展规划的顺利实施。

二、核心科学问题

本重大研究计划围绕以下三个核心科学问题开展研究：

（一）变构型材料与机构的多物理场耦合机理。

揭示柔性材料-变形机构在复杂约束下热防护、变形机构与结构、刚柔耦合等机理，建立结构健康监测、耐久性与损伤容限评价新方法，满足对飞行器变构材料与机构的极限需求。

（二）跨域非稳态流动模型及调控机制。

研究复杂时变边界条件下飞行器流动与飞行变形的相互作用机制，发展主动流动调控手段，实现气动特性精确预示和高效降热减阻。

（三）变构与飞行的一体化智能控制。

揭示强不确定环境下飞行动力学耦合控制机理，突破跨域无缝自主导航及环境-任务自匹配的在线自主规划决策等关键技术，构建变构型与飞行器的一体化智能控制方法。

三、2025 年度资助研究方向

(一) 重点支持项目。

围绕核心科学问题，以总体科学目标为牵引，2025 年拟资助前期研究成果积累较好、处于当前研究热点前沿、对总体科学目标有较大贡献的申请项目，研究方向如下：

1. 跨域变构飞行器多维光滑连续变形翼时变动力学特性与主动控制方法研究

针对跨域变构飞行器多维光滑连续变形翼在气动、结构、热环境耦合作用下复杂的动力学稳定性问题和可靠建模难题，提出宽域气动环境下刚-弹-柔耦合系统非线性时变动力学建模方法，揭示变形过程中机翼动力学失稳现象的触发条件和演化规律、建立高可靠性和高鲁棒性的智能化主动控制方法，采用仿真与试验相结合的方式验证复杂非线性时变动力学系统模型的预测误差控制在 10%以内，动态失稳发生的概率降低至 1%以下，颤振临界速度提升至少 15%。

2. 跨域变构飞行器发汗冷却过程内外流耦合机制与预示方法

针对跨域变构飞行器表面非稳态流动力热特征与主动流动调控手段复杂耦合的问题，建立高超声速外流场作用下多孔结构内部几何特征与冷却工质亚声速流动、相变过程的准确描述和调控方法，解决传统方案热流-相态-流量强耦合导致的气动建模难、流量控制难、传热恶化预测难等问

题；建立发汗冷却作用下跨域变构飞行器气动力热特性预示的建模理论与高效计算方法，开展风洞试验方法研究，突破跨域变构主动流动控制飞行器气动力热响应特性高精度高效预示关键技术，解决发汗冷却与外流场耦合计算和发汗冷却控制调控问题，建立可控相变发汗冷却功能梯度结构设计方法，研制原理样机，采用仿真与试验相结合的方式验证可控发汗冷却高超飞行器标模气动力预示误差不超过 15%，气动热预示误差不超过 20%。

3. 跨域变构飞行器力热等离子体环境测量与重构方法研究

针对跨域变构飞行器飞行环境参数跨度大、流动状态复杂以及主动流动控制耦合导致的飞行器弱模型飞行控制难题，围绕高速飞行器非平衡高温流场的复杂变化过程，重点开展飞行环境下多物理场耦合模型、力热等离子体环境参数测量与全表面快响应重构（测量物理量：表面压力场/表面温度场/等离子体（最高达到 10^{20}m^{-3} ），重构更新速度 $\leq 500\text{ms}$ ）、地面模拟环境实验与验证方法（地面等离子体环境电子密度最高达到 10^{20}m^{-3} 、总温达到 6000K）等研究，获得飞行过程力热等离子体物理场分布以及物理场演化重构模型，为克服飞行器弱模型飞行控制难题，提供全表面环境参数支撑。

4. 面向复杂动态任务的航班化天地往返智能规划决策方法

针对飞行器空天跨域飞行过程中点对点运输、在轨服务等多任务实时规划难题，建立点对点运输、在轨服务等典型任务场景以及区域规避等安全约束的形式化描述与分析架构，提出飞行任务时序和航迹的鲁棒规划决策方法；建立异构载荷和复杂飞行任务的逻辑模型，提出飞行器频繁进出空间场景下的任务航迹自动匹配、智能任务滚动规划与动态临机调度方法；

突破融合环境态势预测和任务特征学习的快速自适应规划方法，进行动态未知场景下基于经验学习的规划加速以及实时在线验证与评估，实现复杂动态任务下航班化天地往返的智能决策规划。所建立的智能规划决策方法针对 ≥ 100 个复杂线性时序任务和 50 个飞行器场景，预先任务规划时间 ≤ 5 秒；基于板载计算资源，针对 ≥ 15 个临机时序任务和 10 个飞行器场景，规划时间 ≤ 1 秒。

5. 跨域变构飞行器高性能 AI 模型架构研究

针对跨域变构飞行器在力-热-电磁多物理场环境下的变构型、主动降热减阻及智能自主飞行等带来的多学科强耦合综合优化难题，研究适用于跨域变构飞行器力-热-电磁多物理场耦合的关键参数训练基础架构；设计适用于多物理场耦合环境的 AI 算法轻量化内核，提出高效环境感知与三维建模方法；研究多源干扰与不确定性建模方法，建立考虑气动、结构、防隔热、飞控、感知、建模等多专业强耦合的跨域高速飞行器垂直 AI 模型。实现稠密大气、临近空间、外空间等 3 种跨域变构型建模，支持主被动结合降热减阻，完成因果与溯源分析验证。完成跨域变构飞行器垂直 AI 模型千万核级国产超算并行化训练，高效融合的模态数据种类 ≥ 3 种，模型参数量 $\geq 7000M$ ；完成异步并行收敛性分析，设计可扩展性异步并行训练框架，算法训练效率相比同步并行方法提升 $\geq 20\%$ 。。

(二) 集成项目。

在本重大研究计划前期布局和资助成果的基础上，集中优势力量，围绕以下方向进行集成，力争实现跨越发展。

1. 多物理场高效飞行关键成果耦合匹配机制与集成飞行试验技术

面向重大计划三大核心科学问题的理论、方法集成匹配与考核验证需求，建立面向柔性变形、主动流动控制、信息智能感知传输与智能飞行控制耦合匹配的总体优化方法，明确不同验证载荷的设计边界与能力考核准则，揭示多学科载荷成果集成匹配的耦合机制以及对飞行能力的影响规律；探明大尺寸连续变形与飞行器本体耦合干扰机制，实现跨域变构飞行中飞行器表面复杂强时变流场表征与飞行器结构动态特性精准分析需求；构建多载荷验证窗口匹配与轨迹优化模型，实现非对称连续变形干扰下的姿态稳定控制与多约束窗口飞行试验轨迹优化；突破跨域高效飞行复杂空间约束与流动界面下的力、热参数原位测量技术，获取跨域变构飞行环境下的力、热、变形等物理量的测量数据；开展面向跨域高效飞行成果验证的飞行平台集成研究与试验设计，构建高超飞行条件力热耦合环境，完成多物理场高效飞行理论、方法等关键成果在近真实飞行条件下的考核验证。验证载荷总重不低于 200kg，有效飞行时长不低于 200s，最大速度不低于 6Ma，最大飞行高度不低于 50km，变形部件几何尺寸不小于 1.5m。

2. 跨域变构飞行极端环境下信息感知与传输系统集成验证

针对跨域变构飞行器在极端力热等离子体环境下电磁感知与信息传输的需求，研究跨域飞行器变构下信息窗口区域的力热等离子体多物理场耦合机理、多因素耦合下电磁波辐射特性调控机制、多物理场与信息特征的关联模型等科学问题，突破极端环境参数（非平衡高温流场电子密度 10^{15} - $10^{20}/\text{m}^3$ 、总温 $\geq 6000\text{K}$ ）解耦测量与空间分布重构、分布式天馈系统设计（极小开窗尺寸 $\leq \varphi 100\text{mm}$ 、耐温 $> 1700\text{K}$ ）与辐射特性调控、电磁信息智能感知与定位、分布式自适应信息传输等关键技术，研制变构与

等离子体环境电磁信息感知传输原理集成系统，开展地面模拟环境（等离子体电子密度 10^{15} - $10^{20}/\text{m}^3$ 、总温 $\geq 6000\text{K}$ 、等离子体射流速度不小于 4000m/s ）综合实验验证，为跨域高效智能飞行提供信息化支撑。

3. 跨域变构飞行器流动调控非稳态气动特性精确预示理论与方法

针对跨域变构飞行器稀薄-连续跨域飞行环境和变构型、大面积主动热防护特征强耦合带来的强非稳态效应使得飞行器气动建模与精确预示面临巨大困难的问题，建立适用于大空域、宽速域非稳态流动调控与多尺度变构飞行流场统一的非线性本构气体动力学理论与气动力/热智能高效数值计算方法；发展面向飞行器总体高效降热减阻的主动流动调控手段与布局优化技术，揭示跨域变构主动流动调控飞行器气动力热响应规律与飞行性能提升机制，开展地面试验验证研究；构建满足航天运输系统工程应用需求的多域融合变构型方案，探索宽域时变非线性流动调控机理和规律，应用跨域变构非稳态气动特性精确预示理论，发展智能变体与流动调控快速决策与评估方法，完成半实物仿真验证。建立跨域变构非稳态流动及其主动调控理论与方法体系，形成可兼容多种流动控制手段和变形方式、能够覆盖稀薄-连续跨流域状态的高效计算 CFD 软件平台；与风洞试验、飞行试验数据或 DSMC 仿真对比，所获取的典型跨流域工况轴向力偏差不大于 12%、大攻角法向力系数偏差不大于 8%；经平台优化后采用主动流动调控技术的高超飞行器关键部位降热 70%、宏观减阻 40%、整体机动性提升 30%。

四、项目遴选的基本原则

(一) 紧密围绕核心科学问题，注重需求及应用背景约束，鼓励原创性、基础性和交叉性的前沿探索。

(二) 优先资助能够解决多物理场高效飞行中的基础科学难题并具有应用前景的研究项目。

(三) 重点资助具有良好研究基础和前期积累，对总体科学目标有直接贡献与支撑的研究项目。

五、2025 年度资助计划

拟资助重点支持项目 5 项，资助直接费用约为 300 万元/项，资助期限为 4 年，重点支持项目申请书中研究期限应填写“2026 年 1 月 1 日—2029 年 12 月 31 日”；拟资助集成项目 3 项，直接费用资助强度约为 1000—1500 万元/项，资助期限为 3 年，申请书中研究期限应填写“2026 年 1 月 1 日—2028 年 12 月 31 日”。

六、申请要求及注意事项

(一) 申请条件。

本重大研究计划项目申请人应当具备以下条件：

1. 具有承担基础研究课题的经历；
2. 具有高级专业技术职务（职称）。

在站博士后研究人员、正在攻读研究生学位以及无工作单位或者所在单位不是依托单位的人员不得作为申请人进行申请。

(二) 限项申请规定。

执行《2025 年度国家自然科学基金项目指南》“申请规定”中限项申请规定的相关要求。

(三) 申请注意事项。

申请人和依托单位应当认真阅读并执行本项目指南、《2025 年度国家自然科学基金项目指南》和《关于 2025 年度国家自然科学基金项目申请与结题等有关事项的通告》中相关要求。

1. 本重大研究计划项目实行无纸化申请。申请书提交日期为 2025 年 3 月 1 日 - 3 月 20 日 16 时。

项目申请书采用在线方式撰写。对申请人具体要求如下：

(1) 申请人应当按照科学基金网络信息系统中重大研究计划项目的填报说明与撰写提纲要求在线填写和提交电子申请书及附件材料。

(2) 本重大研究计划旨在紧密围绕核心科学问题，对多学科相关研究进行战略性的方向引导和优势整合，成为一个项目集群。申请人应根据本重大研究计划拟解决的具体科学问题和项目指南公布的拟资助研究方向，自行拟定项目名称、科学目标、研究内容、技术路线和相应的研究经费等。

(3) 申请书中的资助类别选择“重大研究计划”，亚类说明选择“重点支持项目”或“集成项目”，附注说明选择“多物理场高效飞行科学基础与调控机理”，**受理代码选择 T02**，根据申请项目的具体研究内容选择不超过 5 个申请代码。

重点支持项目的合作研究单位不得超过 2 个，集成项目的合作单位不得超过 4 个。集成项目主要参与者必须是项目的实际贡献者，合计人数不超过 9 人。

(4) 申请人在申请书起始部分应明确说明申请符合本项目指南中的资助研究方向（写明指南中的研究方向序号和相应内容），以及对解决本重大研究计划核心科学问题、实现本重大研究计划科学目标的贡献。

如果申请人已经承担与本重大研究计划相关的其他科技计划项目，应当在申请书正文的“研究基础与工作条件”部分论述申请项目与其他相关项目的区别与联系。

2. 依托单位应当按照要求完成依托单位承诺、组织申请以及审核申请材料等工作。在 **2025 年 3 月 20 日 16 时**前通过信息系统逐项确认提交本单位电子申请书及附件材料，并于 **3 月 21 日 16 时**前在线提交本单位项目申请清单。

3. 其他注意事项。

(1) 为实现重大研究计划总体科学目标和多学科集成，获得资助的项目负责人应当承诺遵守相关数据和资料管理与共享的规定，项目执行过程中应关注与本重大研究计划其他项目之间的相互支撑关系。

(2) 为加强项目的学术交流，促进项目群的形成和多学科交叉与集成，本重大研究计划将每年举办一次资助项目的年度学术交流会，并将不定期地组织相关领域的学术研讨会。获资助项目负责人有义务参加本重大研究计划指导专家组和管理工作组所组织的上述学术交流活动，并认真开展学术交流。

(四) 咨询方式。

交叉科学部交叉科学二处

联系电话：010-62329548, 010-62329489

