

附件 2

“引力波探测”重点专项 2021 年度 项目申报指南

“引力波探测”重点专项的总体目标是面向引力波研究发展前沿，围绕引力波探测研究的重大科学问题和瓶颈技术，全面布局阿赫兹到飞赫兹频段、纳赫兹频段和毫赫兹频段等引力波探测研究任务，大力提升我国引力波探测研究的创新能力，培养并形成一支高水平的研究队伍。

2021 年，本重点专项拟优先支持 20 个研究方向，同一指南方向下，原则上只支持 1 项，仅在申报项目评审结果相近、技术路线明显不同时，可同时支持 2 项，并建立动态调整机制，根据中期评估结果，再择优继续支持。国拨经费总概算 5 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设计。鼓励依托国家实验室、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。项目执行期一般为 5 年。一般项目下设课题数原则上不超过 4 个，每个项目参与单位数不超过 6 家。

1. 空间引力波探测

1.1 星载激光频率预稳控制技术研究

研究内容：激光频率在轨长期稳定度控制方案设计与论证；激光稳频系统结构优化设计与精密光学耦合机构研制；针对星载激光稳频控制所需的真空、温度、振动环境等要求的封装、温控与屏蔽技术；星载激光频率预稳控制系统集成与性能评估。

考核指标：完成星载激光频率预稳控制方案论证；研制满足空间应用需求的星载激光频率预稳控制系统样机，通过典型力学和热循环卫星环境模拟试验，稳频激光对应波长范围 1060~1068 nm，在环模测试前后光学耦合效率变化小于 2%，温漂小于 1%/K，温度控制不超过 1mK；激光频率噪声在 1mHz~0.1Hz 频段内不超过 $30\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

1.2 星载激光锁臂稳频技术与时间延迟干涉技术研究

研究内容：基于锁臂技术的星载激光稳频控制方案与数值仿真；时间延迟干涉技术方案和方法；时间延迟干涉技术数值和半物理仿真；激光锁臂稳频技术和时间延迟干涉技术的系统集成。

考核指标：完成星载激光锁臂稳频控制技术方案设计，完成时间延迟干涉技术方案设计，建立基于星载激光锁臂稳频控制技术和时间延迟干涉技术的数值与半物理仿真，在 1mHz~0.1Hz 频段内对激光频率噪声压制不小于 6 个数量级。

1.3 超稳和超高杂散光抑制能力的星载望远镜系统设计研

究

研究内容：星载望远镜系统数值模拟；低波前畸变、光机力热集成一体化的望远镜光学设计与优化；望远镜与星间激光干涉测量系统的耦合效应研究。

考核指标：完成星载望远镜设计方案，望远镜口径大于 220 mm，视场不小于 $\pm 200\mu\text{rad}$ ，光学传输效率大于 86%，杂散光小于发射激光功率的 10^{-10} 。完成卫星轨道环境影响的仿真分析，在 1mHz~0.1Hz 频段范围内，望远镜远场波前质量均方根值 (RMS) 不大于 $\lambda/30$ ，光程稳定性不大于 $1\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$ ，望远镜对出射激光指向扰动小于 $1\text{nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

1.4 星载望远镜研制与装调技术研究

研究内容：星载望远镜技术研制，包括超光滑表面制造技术、高性能镀膜技术等；望远镜系统高精度装调与检测技术；望远镜系统杂散光消除与抑制技术。

考核指标：完成满足空间应用需求的星载望远镜样机，通过典型力学和热循环卫星环境模拟试验，望远镜口径大于 220mm，在 1mHz~0.1Hz 频段范围内，望远镜对出射激光指向扰动小于 $1\text{nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ ，光学传输效率大于 86%，远场波前质量均方根值 (RMS) 不大于 $\lambda/30$ ，杂散光小于出射激光功率的 10^{10} 分之一。

1.5 超高精度星载望远镜性能测试与评估技术研究

研究内容：超高精度星载望远镜性能测试与评估方法，

包括望远镜超低杂散光测量方法、系统杂散光影响分析与抑制方法等；望远镜结构微小形变测量技术。

考核指标：完成超高精度星载望远镜性能测试方案；建立超高精度星载望远镜性能测试平台，对波长范围1060~1068 nm的激光杂散光检测能力不大于出射激光功率的 10^{10} 分之一；在1mHz~0.1Hz频段范围内，对望远镜结构形变所造成的光程变化测量能力不大于 $1\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

1.6 超低扰动检验质量的设计、研制与测试技术

研究内容：空间引力波探测中惯性传感器敏感探头的需求分析和方案设计；检验质量研制方法和处理技术，包括超低磁化率和剩磁矩材料的处理与优化技术、检验质量的高精度加工工艺与处理技术；超低扰动检验质量研制和性能测试。

考核指标：给出惯性传感器敏感探头方案设计，完成惯性传感器检验质量的详细方案设计；检验质量与电容极板框架兼容；检验质量磁化率小于 1×10^{-5} ，剩磁小于 50 nA m^2 ，质量范围1.5~2.5 kg，表面满足光学测量需求（表面平面度小于 $0.5\mu\text{m}$ ），尺寸精度不大于 $10\mu\text{m}$ ，垂直度/平行度不大于10角秒。

1.7 超高稳定性电容极板框架的设计、研制与测试技术

研究内容：惯性传感器电容极板框架的需求分析和方案设计；电容极板框架材料选取与处理技术，包括无磁、高热

导率、高稳定性的极板框架材料的处理与优化技术、电容极板框架的加工工艺与处理技术；超高稳定性极板框架的研制和性能测试。

考核指标：给出惯性传感器敏感探头方案设计，完成惯性传感器电容极板框架的详细方案设计；电容极板框架与检验质量兼容；电容极板框架材料选取无磁性材料，尺寸精度不大于 $10\ \mu\text{m}$ ，垂直度/平行度不大于 10 角秒。

1.8 检验质量电荷管理方法和技术研究

研究内容：检验质量电荷控制需求分析和仿真；检验质量电荷管理方法；检验质量电荷管理技术，包括低功耗高可靠的紫外放电光源及其真空耦合技术、电荷管理控制技术、电荷管理系统与敏感探头的接口技术等；电荷管理装置研制和性能评估技术。

考核指标：电荷管理系统能够有效与敏感探头集成，满足空间应用需求，通过典型卫星振动和热循环环境模拟试验，放电速率不小于 $2 \times 10^5\ \text{e/s}$ ，电荷控制精度不超过 $2 \times 10^{-13}\ \text{C}$ 。

1.9 多参考质量无拖曳控制方法和技术研究

研究内容：多参考质量航天器无拖曳控制理论与方法；无拖曳系统转入科学测量模式的序列优化设计；故障情况下无拖曳状态快速估计与恢复技术；无拖曳控制数值和半物理仿真，以及无拖曳控制评估技术。

考核指标：提出满足空间引力波探测需求的多参考质量无拖曳系统初始化控制理论与方法；设计至少两种系统转入科学测量模式的切换序列；提出故障情况下无拖曳系统快速重建方法；建立无拖曳控制数值和半物理仿真平台，在 1mHz~0.1Hz 频带内，无拖曳控制系统对检验质量引入的加速度扰动小于 $1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ ，检验质量相对于航天器位移控制精度不大于 $1 \text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

1.10 高置信度亚微牛级推进器标定方法与技术研究

研究内容：低噪声快速响应和亚微牛级高分辨推进器的地面标定方法和技术，包括推进器分辨率、动态响应性能测试方法和技术，推进器寿命预测模型及评估方法，推进器标定系统的数学模型及应用软件开发；微小推力测量不确定来源与控制方法；亚微牛级推力测量在线标定方法。

考核指标：提出亚微牛高分辨率推进器的地面和在轨标定方法，推力测量范围 0~200 μN ，测量频带范围 0.1mHz~1Hz，推力测量精度不大于 0.1 μN ，噪声小于 0.1 $\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$ ，动态推力测量响应时间小于 50 ms，最大承载重量不小于 6kg，给出推进器寿命预测方法，完成推进器标定的数学模型及应用软件开发；提出微小推力测量不确定来源与控制方法。

1.11 高精度推进器标定系统研制与性能测试技术研究

研究内容：低噪声、快响应微牛级推力测量装置的研制；推力测量装置的性能测试与标定技术；利用微牛级推力测量

装置开展微牛级推进器的系统集成测试与性能评估。

考核指标：建立满足微牛级推进器性能测试与评估的微牛级推力标定与测试系统，推力测量范围 $0\sim 200\mu\text{N}$ ，测量频带范围 $0.1\text{mHz}\sim 1\text{Hz}$ ，推力测量精度不大于 $0.1\mu\text{N}$ ，噪声小于 $0.1\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$ ，最大承载重量不小于 6kg ，具备满足不少于 2 种微牛级推进器标定和性能测试需求的兼容性。

1.12 空间引力波探测编队系统半物理仿真研究

研究内容：空间引力波探测编队系统半物理仿真，包括星间激光干涉测量与航天器平台耦合的半物理仿真，惯性传感器与航天器平台耦合的半物理仿真等。

考核指标：发展满足空间引力波探测需求的系统半物理仿真方法和技术，建立星间激光干涉测量与航天器平台耦合模型及半物理平台，建立惯性传感器与航天器平台耦合模型及半物理平台，完成空间引力波探测编队系统半物理仿真，确定系统核心测量载荷与航天器平台接口的关键指标体系。

1.13 面向空间引力波探测的引力波模板库研究

研究内容：大质量双黑洞的波源模板、提取与识别技术；极端和中等质量比旋进系统的波源模板、提取与识别技术；银河系内致密双星的波源模板、提取与识别技术；随机引力波信号提取与识别技术；宇宙弦及其他空间引力波源可能的波源模板、提取与识别技术。

考核指标：建立满足空间引力波探测需求的大质量双黑

洞、极端和中等质量比旋进系统、银河系内致密双星的波形模板库，完成大质量双黑洞、极端和中等质量比旋进系统、银河系内致密双星、随机引力波及其他空间引力波源的提取与识别技术方案。

2. 原初引力波探测

2.1 原初引力波科学研究及观测台址大气建模

研究内容：研究原初引力波的量子产生机制，分析不同早期宇宙模型产生的原初引力波的性质与演化；与南天实验结合，研究宇宙微波背景辐射（CMB）反常现象；原初引力波观测台址大气建模及大气对 CMB 极化观测影响研究；大气监测数据的统计分析，研究大气对 CMB 观测数据筛选、扫描策略的影响。

考核指标：发展通过观测数据筛选甄别早期宇宙模型的方法；提供从原初引力波中寻找新物理的方法和理论；完成 CMB 南北半球不对称等反常现象的研究；建立原初引力波实验台址的大气水汽模型，得到大气涨落的特征尺度；分析观测台址大气监测数据，为实测数据的筛选、扫描策略的制定提供理论指导。

2.2 原初引力波地面观测台站及其环境研究

研究内容：研制台址环境监测系统，实现对大气透射率、水汽含量、电磁环境等参量的实时监测；开展原初引力波高海拔台址的科学评估。

考核指标：完成原初引力波台址的环境监测和评估，提供不少于两年的完整测量数据及评估分析报告；高海拔候选台址应不低于 5100 米，观测季可沉降水汽含量中值应不高于 1mm，水汽监测精度应不低于 0.2mm。

2.3 原初引力波望远镜控制系统及总装测试平台研制

研究内容：研制望远镜控制系统，包括望远镜基座控制、望远镜恒温器控制、焦平面探测器状态控制、指令和数据流控制等；研制望远镜总装测试平台和系统的集成测试研究。

考核指标：完成满足原初引力波实验运行需求的控制系统，达到探测器采样率不低于 200Hz 的控制处理要求，基座控制实时性好于 5ms，位置读出时间精度好于 0.1ms；完成总装测试平台，满足在实验室进行千量级焦平面探测器阵列集成测试的需求，低温环境最低温度不高于 300mK，稳定性好于 50 μ K。

2.4 原初引力波望远镜焦平面探测器及天线核心技术研发

研究内容：用于原初引力波探测实验的焦平面探测器核心技术；宇宙微波背景辐射（CMB）望远镜焦平面天线核心技术。

考核指标：单个探测器噪声低于 $5 \times 10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$ ，探测器系统具备极化探测能力，偏振探测纯度达到 90%以上；天线与探测器的光学耦合效率不低于 90%。

3. 脉冲星测时阵列引力波探测

3.1 脉冲星高精度测时阵观测系统面形调控与信号处理关键技术研究

研究内容：百米级口径全可动射电望远镜全工况准实时面形测量与控制技术；超高速信号采集、混合架构实时信号处理与分析、高精度脉冲星消色散与折叠等技术；望远镜电磁兼容设计和电磁干扰检测与抑制方法。

考核指标：建立主动面准实时闭环调控平台，完成百米级天线 0.2mm 面形精度调控技术方案；建立 4GHz 带宽采样和 1024 相位点 1 毫秒周期脉冲星信号处理平台，完成相控阵接收机脉冲星测时技术方案；建立 100MHz~3GHz 频段内电磁屏蔽不低于 160dB 的实验环境和干扰检测平台，完成望远镜电磁兼容方案设计。

3.2 脉冲星高精度测时阵系统环境载荷测量和机电耦合控制技术研究

研究内容：温度及风载荷作用下百米级口径全可动射电望远镜结构变形规律及测量方法；热致天线电性能变化与指向偏差的精确修正及效果评估；基于机电集成控制的望远镜抗风扰高精度补偿方法和实验验证。

考核指标：建立温度对天线结构及其电性能影响关系，构建结构温度测试与天线指向补偿系统，关键部位测量误差小于 0.5°C；构建适用于 1 公里级地貌环境的风信息采集与

天线风荷影响调控系统；构建基于环境载荷的机电耦合综合验证平台，为最终实现天线不大于 2.5 角秒的指向精度提供支持。

3.3 高灵敏度超宽带接收机和宽带相控阵接收机关键技术研究

研究内容：基于大口径射电望远镜超宽带馈源和接收机低噪声设计技术；基于单片微波集成电路（MMIC）技术差分低噪声放大器芯片设计；大规模相控阵馈源阵列实现方案、波束合成以及相控阵接收机设计等技术。

考核指标：超宽带馈源照射角大于 148 度，工作带宽 0.7~4GHz，接收机噪声温度小于 16K；相控阵接收机噪声温度小于 20K，工作带宽为 0.7~1.8GHz，阵元数量不少于 96 个。