国内外月基引力波探测计划的科学目标、科学仪器和支撑技术综述与思考

李奇帆[1]，莫戈瑜[1]，丁延卫[1*]，张晓敏[2*]

1(中山大学航空航天学院，深圳，518107)
2(北京紫微宇通科技有限公司，北京，100000)

摘　要　当前地面与空间引力波探测在分赫兹至数赫兹频段灵敏度衔接不足，而月球较低的地震背景、天然高真空及部分极区低温环境为中频观测提供了条件。本文综述 GLOC、LGWA、LSGA、LILA 及 CIGO/TCIGO 等月基方案，比较其构型、探测频段、科学目标与代表性性能，讨论其与空间及第三代地面探测器的互补性。围绕长基线激光干涉和月球本体响应两类测量路径，梳理科学目标、测量指标、核心载荷与噪声预算间的关系，分析悬挂隔振、热控、辐射与月尘防护及能源供给等支撑技术。综述表明，各方案的灵敏度定义与噪声假设存在差异，现有性能预测难以直接横向比较，月球响应模型、台址环境及系统噪声预算仍需完善。

关键词　月基引力波探测；中低频引力波；激光干涉测量；科学载荷；月面工程保障

中图分类号　V11

最新录用

Review and Reflection on Scientific Objectives, Scientific Instruments and Supporting Technologies of Domestic and International Lunar-based Gravitational Wave Detection Programs

Qifan Li[1],Geyu Mo[1],Yanwei Ding[1*],Xiaomin Zhang[2*]

1 (School of Aeronautics and Astronautics,Sun Yat-sen University,Shenzhen 518107)
2 (Beijing Ziwei Yutong Technology Co., Ltd., Beijing 100000)

Abstract　Gravitational-wave observations remain less sensitive in the subhertz to few-hertz band. Planned space interferometers lose sensitivity toward the upper

* 基金项目：国家自然科学基金项目（U25A20226）
投稿日期：2026.05.28
E-mail: 丁延卫：dingyw3@mail.sysu.edu.cn、张晓敏：xiaominzhang@lzu.edu.cn

ends of their target bands, while terrestrial detectors face strong seismic and gravitational-gradient noise at low frequencies. The Moon offers a relatively quiet seismic environment, natural high vacuum, and very low temperatures at some polar sites. These conditions make lunar observatories promising candidates for extending gravitational-wave observations into the intermediate-frequency band. This review examines representative lunar concepts, including GLOC, LGWA, LSGA, LILA, CIGO, and its tetrahedral extension, TCIGO. We compare their measurement principles, instrument configurations, target frequency ranges, reported performance, and scientific objectives. We also discuss their potential complementarity with LISA, Taiji, TianQin, and third-generation ground-based detectors, particularly for compact binaries and multiband observations. Existing proposals broadly follow two measurement approaches. Long-baseline laser interferometers measure changes in differential optical path length. Lunar-response concepts detect surface motion or strain associated with the Moon's elastic response to gravitational waves. Some proposed systems combine elements of both approaches. For each approach, we examine how science goals lead to strain or displacement requirements, instrument specifications, and noise budgets. Key instruments include optical interferometers, test masses, suspension and isolation systems, and local inertial or strain sensors. We further review lunar-surface support technologies, with emphasis on vibration control, thermal stability, radiation protection, dust mitigation, and reliable power supply. The comparison highlights substantial differences in sensitivity definitions, lunar-response models, and noise assumptions. Consequently, published performance curves do not support a direct numerical ranking of the proposals. CIGO is a proposed triangular interferometer with nominal 100 km arms and a target band of 0.1–10 Hz. TCIGO adds a fourth station to form a noncoplanar configuration. Under specified monochromatic-source and Fisher-matrix assumptions, published calculations indicate improved source localization and sky coverage, with an approximately fivefold gain in average angular resolution. This gain remains conditional on the adopted model and detector configuration. Future work should prioritize site-specific environmental measurements, validation of critical payload technologies, and end-to-end noise budgets. Geometric and optical-link optimization, together with coordinated multiband observations, will also be important for assessing the feasibility and scientific value of lunar gravitational-wave detectors.

Key words Lunar-based Gravitational Wave Detection，Mid-and-Low Frequency Gravitational Waves，Laser Interferometry，Scientific Payload，Lunar Surface Engineering Support

0 引 言

2015 年，激光干涉引力波天文台（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，LIGO）首次直接探测到双黑洞并合产生的引力波，开启了地面高频引力波观测窗口[1-3]。

2023 年，多组脉冲星计时阵列报告了纳赫兹随机引力波背景的证据，将观测范围拓展至超低频[4-6]。在两类观测窗口之间，未来空间任务 LISA 主要面向约 0.1 mHz 至 0.1 Hz，太极和天琴的任务设计频段可延伸至约 1 Hz[7-9]。这些空间任务已经覆盖低频区间的一部分，月基方案重点关注空间探测器灵敏度逐渐下降、地面探测器又受地震噪声和牛顿噪声限制的分赫兹至数赫兹中频区域，其中包含中等质量黑洞双星、致密双星早期旋近及随机引力波背景等重要科学目标[7-11]。

在 10 Hz 波段以下，地面引力波探测器在低频段的探测能力受限于地震噪声、牛顿引力梯度噪声及悬挂/控制系统噪声的显著限制[1,12]，有效观测占空比还受地震、闪电、大风等环境因素影响。而月球地质环境远较地球宁静，这已为阿波罗计划留存的月震仪观测数据证明[13,14]。基于阿波罗月震观测及后续地震背景分析，月球在约 0.1 Hz 至数 Hz 频段的地震扰动总体较地球典型观测环境更弱，部分研究估计可低数个数量级[15]。由于月球大气极为稀薄，大气密度涨落引起的引力梯度噪声显著减弱，同时现阶段人为活动较少；但月震及浅层月壤质量扰动等因素仍可能形成低频环境噪声[15]。月球极地永久阴影区（Permanently Shadowed Regions, PSRs）数十开尔文的超低温环境，Diviner 观测显示部分永久阴影区表面温度可低至约 25 K，典型冷阱温度具有显著空间差异，因此具体探测站的工作温度需结合台址热环境与主动与被动热控设计确定[16]。月表电磁与等离子体环境主要受太阳风、太阳辐射和局部磁异常影响[17-19]，微流星撞击与喷出物亦构成长期运行约束[20]。这些环境优势为低噪声载荷提供了条件，同时也要求针对月面真实边界条件开展专门设计。

在天基引力波探测器方案中，空间激光干涉任务需要控制星间相对运动、激光拍频范围和轨道稳定性，但这并不意味着单个空间编队无法进行源定位。LISA、太极和天琴均可利用轨道运动产生的振幅、相位及多普勒调制，对具有足够信噪比和观测时长的部分事件获得方向信息[7-9]。月基固定台站的优势在于可利用月面稳定基线构建不同几何方向的观测通道，并通过月球自转与公转调制及多台站联合改善天区覆盖。CIGO/TCIGO 近期研究即在统一 Fisher 矩阵框架下比较了 CIGO、LISA 和天琴的定位能力，并显示四面体扩展可进一步改善特定假设下的全天定位均匀性[21]。下文据此从物理原理、任务方案、科学仪器和工程支撑四个层次展开综述。

1 月基引力波探测的基本原理

月基引力波探测目前主要沿两类物理路径发展。一类通过长基线激光干涉测量引力波引起的差分光程变化，代表方案包括 GLOC、LILA-Horizon 和 CIGO；另一类利用引力波激发月球弹性响应或月表应变，再由高灵敏度惯性/应变传感器读取，代表方案包括 LGWA、LSGA 及 LILA-Pioneer 等。两类路径在目标频段和系统实现上存在交叉，不能简单以单一仪器类型完全分割，其共同核心是将目标应变转换为可测的位移、速度或加速度，并建立闭合的噪声预算。

1.1 激光干涉仪探测的基本原理

Michelson 干涉仪将同一激光分束后送入两个方向不同的测量臂，通过比较返回光束的相位差测量差分光程变化。在理想等臂条件下，共模激光频率噪声可得到显著抑制；实际高

灵敏度干涉仪通常还采用激光频率稳定、光学谐振腔和反馈控制等手段降低残余噪声[1,22,23]。地面第二代引力波探测器广泛采用 Fabry-Pérot-Michelson 构型，由高反射率输入耦合镜和终端反射镜形成臂腔，以提高光与引力波信号的有效作用时间[1,22]。月基方案中，GLOC 和 LILA-Horizon 提出三角形长基线干涉构型，而 LILA-Pioneer 采用 L 形应变测量构型[24-26]。对于具有臂腔的干涉仪，其引力波频域响应可写为[23]

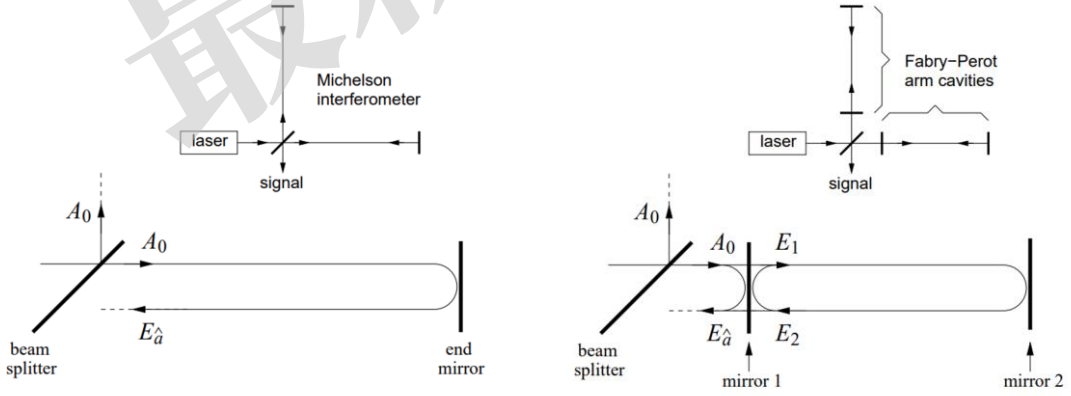
$$\tilde{V}(f)=\frac{1}{2}[a^i a^j G(\vec{a};f)-b^i b^j G(\vec{b};f)]\tilde{H}(f)\tilde{h}_{ij}(f) \tag{1}$$

其中 $G(\vec{z},f)$，$\tilde{H}(f)$ 为转移函数[23]

$$G(\vec{z},f)=\frac{e^{-i\omega T}}{2}[e^{\frac{i\omega T_+}{2}}\ \sin c\frac{\omega T_-}{2}+e^{-\frac{i\omega T_-}{2}}\sin c\frac{\omega T_+}{2}] \tag{2}$$

$$\tilde{H}(f)=e^{i\omega T}\frac{\sinh\left(2\pi f_0 T\right)}{\sinh\left[2\pi f_0 T\left(1+if/f_0\right)\right]} \tag{3}$$

这里 f 为引力波频率，$\omega=2\pi f$，$\tilde{h}_{ij}$ 是引力波应变张量，G 为单臂的有限传播时间响应函数，H 为 Fabry-Pérot 臂腔的频率传递函数。$T=L/c$ 为激光在干涉臂中的飞行时间，L 为干涉臂长度，c 为光速。$f_0\equiv\left|\ln\left(r_1 r_2\right)\right|/\left(4\pi T\right)$ 为转移函数的第一个极点，r_1、r_2 为臂腔两端镜面的振幅反射系数，f_0 为臂腔响应的特征极点频率。$T_\pm\equiv\left(1\pm\vec{z}\cdot\vec{n}\right)T$，$\vec{z}=\vec{a},\vec{b},a^i,b^i$ 为两干涉臂的方向向量，其中 a、b 为干涉臂方向单位向量，n 为引力波传播方向单位向量，z 表示臂方向与传播方向的投影。在实际高灵敏度干涉测量中，臂长不匹配及光学系统非理想因素会使激光频率噪声产生残余耦合，因此仍需结合激光频率稳定、光学控制和数据处理等手段降低其影响。



(a) (b)

图 1　迈克尔逊干涉仪的基本构型：（a）传统迈克尔逊干涉仪；（b）法布里-珀罗腔增强型迈克尔逊干涉仪[23]。

Fig. 1　Basic configurations of Michelson interferometers: (a) conventional Michelson interferometer; (b) Fabry-Pérot cavity-enhanced Michelson interferometer[23].

1.2　月震测量式探测的基本原理

月球引力波天线(LGWA)和月球地震与引力波天线(LSGA)利用月球宁静的地质环境，将

最新录用

月球本身当作引力波的检验载体，相关的探测原理最早由 J.Dyson 等人探索，他们将星球看作弹性物体，计算出该弹性物体对于引力波的响应[27]，在计算中 J.Dyson 等人使用横向无迹规范，引力波与物体的剪切模量μ耦合。近年来的计算则将引力波对天体的作用视为潮汐力，在仪器坐标系下，有[28]

$$\rho\frac{\partial^2 z^i}{\partial t^2}=\frac{\partial\sigma^{ij}}{\partial x^j}+\frac{1}{2}\rho\frac{\partial^2 h^i_j}{\partial t^2}x^j \tag{4}$$

这里$\sigma^{ij}=\left[\lambda\delta^{ij}z^k_k+2\mu z^{ij}\right]$，$z^{ij}=\left(\partial z^i/\partial x_j+\partial z^j/\partial x_i\right)/2$，其中 z^i 为弹性位移分量，σ^{ij} 为应力张量，x^j 为空间位置坐标，t 为时间，h^i_j 为引力波应变张量，λ 和 μ 为 Lamé 弹性常数，δ^{ij} 为 Kronecker 符号，z^{ij} 为线性应变张量。在球对称、线性弹性近似下，引力波主要耦合球谐阶数 l=2 的四极矩正常模，在解方程(4)时仅取 l=2 模式，设引力波为平面波，沿 z 轴入射，可得响应函数为[28]

$$z^i=h(t)R_P\sum_{n,m}g\{n\}(\omega_g)\frac{s^i_{\{nm\}}(r,\theta,\phi)}{R_P}\chi\{n\} \tag{5}$$

式中 $h(t)$表示入射引力波的时间依赖幅度，R_P 为月球半径，ω_g 为引力波角频率。

其中

$$g\{n\}(\omega_g)=\sqrt{\frac{16\pi}{15}}\frac{\omega_g^2}{\omega^2_{\{n\}}-\omega_g^2+i\omega_g\omega_{\{n\}}/Q_{\{n\}}} \tag{6}$$

$$\chi\{n\}=\int_r r^3\rho(r)\left[U_{\{n,2\}}(r)+\frac{\sqrt{6}}{2}V_{\{n,2\}}(r)\right]dr \tag{7}$$

$$s^i_{\{nm\}}(r,\theta,\phi)=(\hat{e}_r)^i U_{\{n,2\}}(r)Y_{\{2,m\}}+\frac{1}{\sqrt{6}}V_{\{n,2\}}(r)\left[(\hat{e}_\theta)^i\partial_\theta Y_{\{2,m\}}+(\hat{e}_\phi)^i\frac{1}{\sin\theta}\partial_\phi Y_{\{2,m\}}\right] \tag{8}$$

这里$U_{\{n,2\}}(r)$，$V_{\{n,2\}}(r)$为径向方程的本征函数取 l=2 的函数簇，取决于月球密度函数$\rho(r)$的形式，$Y_{\{2,m\}}=Y_{\{2,m\}}(\theta,\phi)$为球谐函数取 l=2 的函数簇，(r,θ,φ)为球坐标，$|m|\le l$。其中，$\omega_{\{n\}}$ 和$Q_{\{n\}}$ 分别为第 n 个球谐阶数 l=2 正常模的本征角频率及品质因数；n、m 分别为模态序号与方位阶数，$g\{n\}(\omega_g)$为模态频率响应因子，$\chi\{n\}$为引力波与该模态的耦合积分，$s^i_{\{nm\}}(r,\theta,\phi)$表示模态的空间位移函数，$\hat{e}_r$、$\hat{e}_\theta$、$\hat{e}_\phi$为相应方向的单位基矢[28]

2 国内外月基引力波探测计划及主要科学目标

当前月基引力波方案的共同动机是拓展分赫兹至数赫兹的中频观测能力，并与空间、地面探测器形成连续的多频段观测链。其中空间引力波探测计划并非统一截止于 0.1 Hz：LISA 主要面向约 0.1 mHz 至 0.1 Hz，太极和天琴的任务设计范围均可延伸至约 1 Hz[7-9]，但在接近其高频端时受臂长传递函数和仪器噪声影响，灵敏度与科学覆盖会发生变化。月基方案的科学覆盖可延伸至 mHz 至数 Hz 范围，其相对于现有空间和地面引力波探测器的主要互补优势集中在分赫兹至数赫兹频段，尤其是 deci-Hz 附近[15,21,24-26,29-31]。这些方案主要分

最新录用

为两大技术路线，一类是以月球本体或分布式传感阵列为核心的月震传感探测方案，另一类是以长基线激光干涉仪为核心的干涉测量方案。

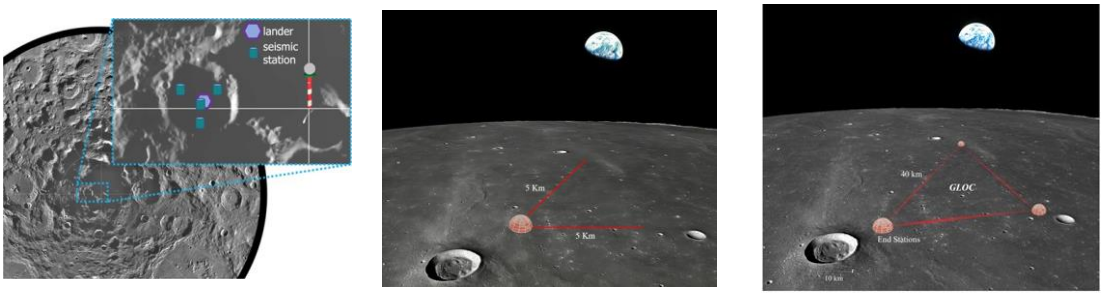
2.1 国外引力波探测计划及主要科学目标

2.1.1 LGWA 计划和 LSGA 计划及主要科学目标

以月球本体响应和分布式传感为主要特征的代表性方案包括月球引力波天线（Lunar Gravitational-Wave Antenna，LGWA）与月球地震与引力波天线（Lunar Seismic and Gravitational Antenna，LSGA）。LGWA 提出由多台高灵敏度惯性传感器监测引力波激发的月球响应，综合任务研究给出的主要观测范围约为 1 mHz 至 1 Hz，并同时服务于致密双星、多信使天文学和月球内部结构研究[29,32,33]，其设计构想如图 2(a)所示,灵敏度曲线如图 3(a)所示。LSGA 最初以 ESA 开放创新平台概念提出，强调月面激光/光纤应变网络与月震学协同。LSGA 最初由 Katsanevas 等提出，采用月面长基线激光干涉与分布式光纤传感相结合的技术路线，测量引力波引起的月表应变，并兼顾月球地震学研究。2020 年 ESA 原始提案重点讨论 10 mHz 至 3 Hz 的科学覆盖区间[34]，随后 Harms 等在 2021 年月基引力波探测白皮书中，将 LSGA 的目标观测频段进一步描述为 1 mHz 至数 Hz[36]。该方案目前仍处于概念研究阶段，其实际灵敏度需要结合光学系统、传感器噪声及月球响应模型进一步评估[15,34]，其设计构想如图 2(b)所示。

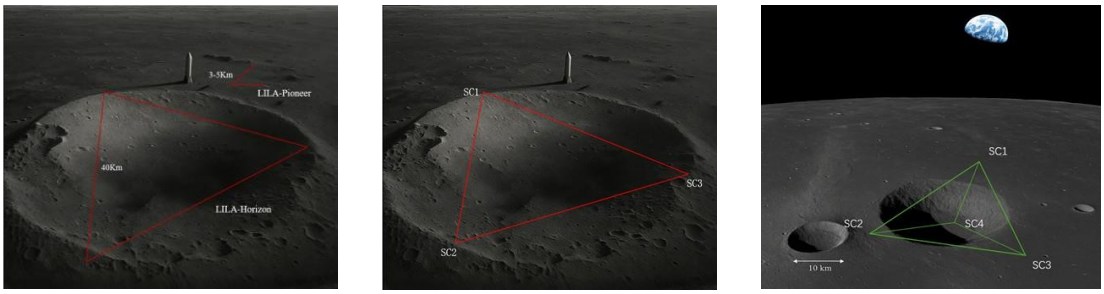
2.1.2 GLOC 计划和 LILA 计划及主要科学目标

以长基线光学测量为核心的代表方案包括宇宙学引力波月球天文台（Gravitational-wave Lunar Observatory for Cosmology，GLOC）和激光干涉仪月球天线（Laser Interferometer Lunar Antenna，LILA）。GLOC 是由美国科学家 Karan Jani 与 Abraham Loeb 提出的月基引力波探测方案，采用约 40 km 尺度的三角形干涉构型，重点覆盖 0.1 Hz 至约 5 Hz，并设置不同低频性能假设[24]，其设计构想如图 2(c)所示，灵敏度曲线如图 3(b)所示。LILA 是由美国范德堡大学正式提出并主导方案设计，采用分阶段路线：LILA-Pioneer 为约 5 km 的 L 形应变测量系统，LILA-Horizon 拟发展为约 40 km 三角形系统。现有研究覆盖 mHz 至 deci-Hz 响应并将 0.1~10 Hz 作为更广义的中频科学目标，其性能仍随月球响应模型和悬挂设计持续更新[25,26,30,31]，其设计构想如图 2(d)所示。此外，Amaro-Seoane 等提出了月面激光干涉仪 LION（Laser Interferometer On the Moon）概念，探讨了由亚赫兹延伸至千赫兹的探测潜力及与空间、地面观测的衔接，其性能预测依赖所采用的设计噪声假设[35]。主要代表性方案的核心性能归纳于表 1。



(a) (b) (c)

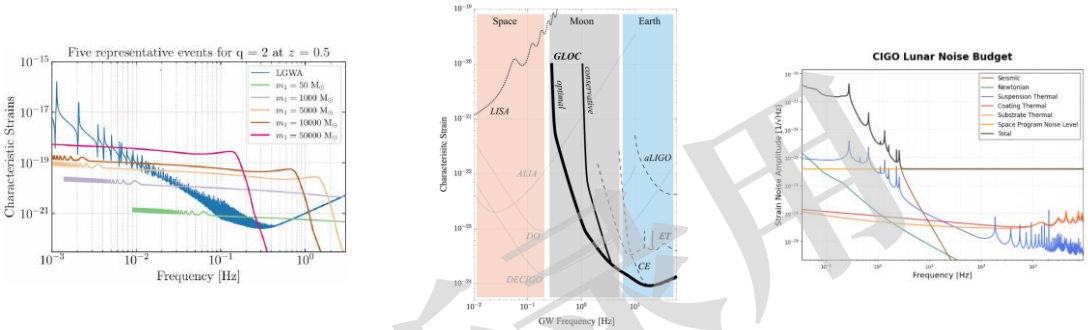
最新录用



(d) (e) (f)

图 2　代表性月基引力波探测方案的概念构型：(a)LGWA[33]、(b)LSGA[34]、(c)GLOC[24]、(d)LILA[25]、(e)CIGO[21]、(f)TCIGO[21]。

Fig. 2　Conceptual configurations of (a) LGWA scheme[33], (b) LSGA scheme[34], (c) GLOC scheme[24], (d) LILA scheme[25], (e) CIGO mission[21], (f) TCIGO mission[21].



(a) (b) (c)

图 3　不同月基方案原文献给出的代表性性能曲线：(a) LGWA 代表性灵敏度曲线[29]；(b) GLOC 概念灵敏度曲线[24]；(c) CIGO 月面环境噪声估计[21]。三幅图的纵坐标定义、噪声模型、观测时间与信噪比假设并不完全相同，仅用于展示各方案原始性能设定，不作数值上的直接横向比较。

Fig. 3　Representative performance curves reported for different lunar concepts: (a) LGWA sensitivity [29], (b) GLOC concept sensitivity [24], and (c) the lunar environmental noise estimate for CIGO [21]. The ordinate definitions, noise models, observation times and SNR assumptions are not identical; the panels are shown for source-level context and should not be interpreted as a direct quantitative comparison.

2.2　国内引力波探测计划及主要科学目标

我国近期提出的月球环形山引力波天文台（Crater Interferometry Gravitational-wave Observatory，CIGO）采用月面近极区三角形长基线激光干涉构型，名义臂长约 100 km，目标覆盖 0.1~10 Hz 并追求约 $10^{-24}\mathrm{Hz}^{-1/2}$ 量级的应变灵敏度。该数值目前属于概念研究中的目标指标，具体可实现灵敏度仍取决于月震、悬挂热噪声、量子噪声、光学损耗和月面工程条件[21]。近期发表的研究在单色源与一年观测时间等特定假设下，利用 Fisher 信息矩阵比较了 CIGO、LISA 和天琴的源定位性能，并给出了 CIGO 的月面环境噪声估计，其方案设计构想如图 2(e)所示，噪声水平估计如图 3(c)所示。

TCIGO（Tetrahedron Crater Interferometry Gravitational-wave Observatory）是在 CIGO 三站平面三角形基础上增加坑底第四站形成四面体几何的扩展概念。四个站点形成六条几何边，相较原 CIGO 新增三条不同取向的站间链路，这些几何基线并不能直接等同于六个相互独立

最新录用

的干涉测量通道，独立观测通道数取决于具体光路组合与数据处理方式。Zhang 等[21]将各三角面组合为多干涉仪网络，在其单色源、固定信噪比阈值和 Fisher 矩阵设定下，报告 TCIGO 相对于 CIGO 的平均角分辨能力提高约 5 倍，并改善了低响应天区的覆盖，其方案设计构想如图 2(f)所示。

总体而言，月基方案的核心价值在于对空间与地面探测器之间的中频观测能力进行补充，并通过月球独特的力学、热学和几何条件探索新的探测架构。各方案目前成熟度差异较大，其中 LGWA、GLOC 和 LILA 等已形成较系统的科学与仪器论证，CIGO/TCIGO 则处于快速发展的概念研究阶段，各引力波探测方案的核心性能如表 1 所示。

表 1　代表性月基引力波探测方案的主要设计参数与性能指标

Table 1　Main design parameters and representative performance of lunar gravitational-wave detector concepts

探测方案	核心构型/尺度	主要探测频段	代表性灵敏度指标	科学目标
LGWA [29,32,33,37]	多台高灵敏度惯性传感器阵列；无“干涉臂长”概念	1 mHz~1 Hz	局域惯性传感器位移灵敏度目标约 $10^{-13}\,\mathrm{m\cdot Hz^{-1/2}}$ @0.1Hz、$2\times10^{-15}\,\mathrm{m\cdot Hz^{-1/2}}$ @1Hz	致密双星、IMBH、多信使预警、月球内部结构
LSGA [15,34,36]	分布式月表应变网络；早期约 10 km 尺度，概念上可扩展至更长 L 形网络	1 mHz~数 Hz	研究主要给出传感器级噪声及阵列性能估计，尚缺少与其他方案统一定义的任务级应变灵敏度指标	致密双星、早期预警、月震与月球内部结构
GLOC[24]	三角形长基线激光干涉仪；约 40 km	deci-Hz~5 Hz	1Hz 附近目标应变噪声约 $10^{-23}\,\mathrm{Hz^{-1/2}}$ 量级	NS/BH/IMBH 双星、Hubble 参数、基础物理
LILA [25,26,30,31]	Pioneer：约 5km L 形；Horizon：约 40 km 三角形	mHz~deci-Hz 响应；中频目标延伸至 0.1~10 Hz	Pioneer 和 Horizon 采用不同构型和噪声模型，相关研究主要以 $h_c(f)=\sqrt{fS_h(f)}$ 等特征应变曲线表征性能	IMBH、致密双星早期旋近、随机背景、月球内部科学
CIGO 与 TCIGO[21]	CIGO：约 100 km 三角形；TCIGO：四站四面体几何	0.1~10 Hz	CIGO 概念设计目标应变灵敏度约 $10^{-24}\,\mathrm{Hz^{-1/2}}$ 量级；TCIGO 目前沿用相同基础噪声模型	中频单色/缓变源定位、致密双星、多频段联合观测

注：不同方案采用的灵敏度定义、月球响应模型、噪声预算和观测假设并不完全一致。LGWA 所列数值为局域惯性传感器位移指标，LILA 主要采用特征应变表征，LSGA 现阶段以传感器和阵列级指标为主。因此，表中数据用于说明各方案的设计水平和性能范围，不作严格的数值横向排序。

2.3　典型科学目标与多频段互补性

除拓展现有引力波观测频段外，不同月基方案还面向各具侧重的天体物理、宇宙学和月

球科学目标。GLOC 概念研究表明，在其设定的灵敏度假设下，中子星、恒星级黑洞及中等质量黑洞双星的可探测范围可覆盖较大比例的可观测宇宙体积，其 1 Hz 附近的灵敏度还可用于宇宙学测量[24]。LGWA 的综合科学研究则将中等质量黑洞、致密双星、多信使观测及月球内部结构等列为重要科学方向[29]。针对中等质量黑洞双星的专门研究进一步表明，在基线灵敏度模型和信噪比阈值为 10 的假设下，其探测视界可达到 z~O(10)；采用更新的月球响应模型及相应灵敏度曲线后，探测视界降至 z~O(1)，说明这类源的预期探测距离对月球响应函数及噪声模型具有较强依赖性[37]。LILA 采用由 Pioneer 向 Horizon 逐步发展的技术路线，重点覆盖 mHz 至 deci-Hz 及亚 Hz 频段，科学目标包括中等质量黑洞、致密双星早期演化、多信使预警、原初或随机引力波背景以及月球内部结构研究[25,26,30]。

多频段联合观测是月基引力波探测的另一重要科学价值。LISA、太极和天琴可在低频阶段长期跟踪双星旋近过程[7-9]，而 deci-Hz 至 Hz 频段的月基探测器有望在部分源进入 Einstein Telescope（ET）、Cosmic Explorer（CE）等第三代地面探测器敏感频段之前继续跟踪其演化，从而延长联合观测时间基线，并改善参数估计、事件预警和源定位能力。对于 CIGO，Zhang 等在单色引力波源与 Fisher 矩阵框架下，以 0.1、1 和 10 Hz 为代表频点比较了 CIGO、LISA、天琴及其联合网络的定位能力；其中在 0.1 Hz 时，联合网络的定位结果优于各单独探测器，体现出不同观测几何的互补性[21]。由于不同研究采用的源种群模型、宇宙学参数、信噪比阈值和观测时长不同，现有事件率估计尚不适合直接横向比较，因此本文主要采用探测视界、目标源类型和联合观测增益描述各方案的科学潜力。

3 月基引力波探测的主要科学仪器和支撑技术

3.1 总体技术框架与指标传递关系

现有月基引力波探测方案依据引力波信号与月球及测量系统的作用方式，可概括为长基线激光干涉测量和月球本体响应测量两类技术路线。GLOC、LILA 及 CIGO/TCIGO 主要采用长基线激光干涉测量，通过获取引力波引起的差分光程变化实现信号探测[21,24-26,30,31]；LGWA 和 LSGA 则利用引力波与月球弹性结构的耦合作用，通过月面地震或惯性传感器测量月球表面响应[29,32-34]。两类路线在信号转换方式和核心科学仪器上存在明显差异，但其总体设计均需要由科学目标确定目标频段和探测灵敏度，再逐级形成科学载荷及环境控制要求。

对于长基线激光干涉测量路线，目标源类型、信号频率和探测信噪比首先确定系统的目标应变灵敏度及有效观测频段，应变信号经干涉臂转换为差分光程和光学相位变化，进一步形成对激光光源、光学系统、测试质量、悬挂或隔振系统以及相位读出的性能要求。系统灵敏度由各类噪声共同决定，其中包括量子噪声、激光频率与强度噪声、光学损耗、测试质量及悬挂热噪声、月面振动和引力梯度噪声，以及控制系统引入的附加噪声。由于 GLOC、LILA 和 CIGO 在基线长度、光学构型及目标频段方面采用不同设计，各子系统指标需要结合相应方案的响应函数和噪声预算分别确定，不宜由单一应变灵敏度直接换算为统一的仪器性能指标[21,24-26,30,31]。

月球本体响应路线的信号传递过程与长基线干涉测量不同。引力波通过潮汐作用激发月

球弹性响应，其表面位移、速度或加速度与入射引力波之间的关系取决于月球内部结构及频率响应函数[28,38]。因此，该类方案首先需要建立引力波应变与月面机械响应之间的转换关系，再依据目标频段内的表面响应幅度确定局域惯性传感器的机械热噪声和读出噪声要求，并结合台站数量、空间分布、时间同步和月震背景完成阵列级信号反演。LGWA 目前重点研究低温惯性传感器、低机械损耗悬挂和高灵敏度位移读出等关键载荷[29,32,33,39]，LSGA 则进一步强调分布式月面传感与月球整体响应测量[34]。近年来的研究表明，月球内部结构、浅层结构和所采用的响应模型均会影响由月面运动反演引力波应变的结果，因此月球响应模型本身也是该技术路线性能评估的重要组成部分[28,38]。

表 2　月基引力波探测主要技术路线及指标传递关系

Table 2　Main technical routes and requirement flow for lunar gravitational-wave detection

项目	长基线激光干涉测量路线	月球本体响应测量路线
代表方案	GLOC、LILA、CIGO/TCIGO[21,24-26,30,31]	LGWA、LSGA[29,32-34]
基本测量原理	测量引力波引起的干涉臂差分光程变化	测量引力波激发的月球弹性响应
指标传递关系	科学目标→应变灵敏度与目标频段→核心光学与测试质量系统要求	科学目标→月面响应灵敏度与目标频段→局域传感器与阵列测量要求
核心科学仪器	激光光源、干涉光学系统、测试质量、悬挂/隔振系统、相位读出与控制系统	月震/惯性传感器、低损耗悬挂、激光或 SQUID 读出、分布式台站及同步系统
主要性能约束	光学噪声、热噪声、月震与控制噪声	月球响应模型、传感器热噪声、读出噪声及月震背景
主要月面支撑条件	微振动抑制、热控、辐射/月尘防护、能源和长期稳定运行	低温运行、台址地震环境表征、热控、辐射/月尘防护、能源和长期稳定运行

最新录用

3.2　主要科学仪器

3.2.1　激光干涉仪

激光干涉仪通过测量引力波作用下两条干涉臂产生的差分光程变化，将微弱的空间应变转换为可测量的激光相位变化，是 GLOC、LILA 及 CIGO 等月基引力波探测方案的核心科学仪器之一。以法布里-珀罗腔的迈克尔逊干涉仪为例，激光经分束后分别进入两条干涉臂，引力波引起的臂长差异会改变返回光束的相位关系，并通过干涉信号实现读出。地面 Advanced LIGO 已采用 4 km 迈克尔逊干涉系统实现高精度引力波测量，为长基线激光干涉技术的发展提供了重要基础[1]。而月基方案利用月面稳定基线和天然真空环境，可进一步拓展干涉测量的空间尺度。

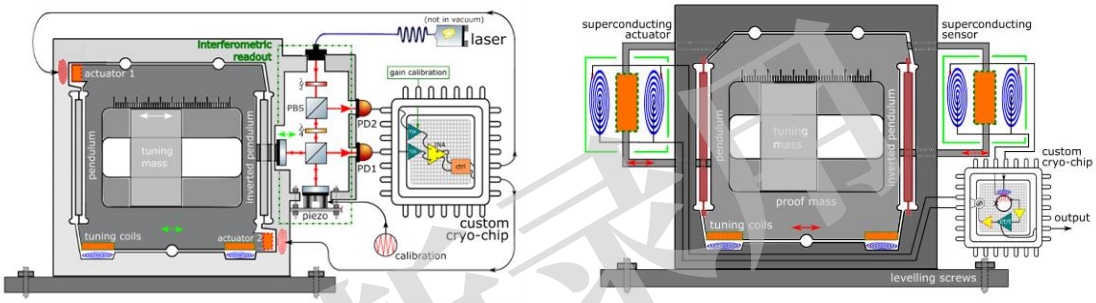
对于采用法布里-珀罗腔的干涉系统，输入耦合镜与终端高反射镜共同构成光学谐振腔，通过增加光在臂腔中的有效作用时间提高相位响应。臂腔长度、镜面透射率、腔精细度及光学损耗等参数需要结合目标频段和总体噪声预算进行设计[1,22]。在月面环境下，除量子噪声和激光噪声外，测试质量热噪声、悬挂或支撑结构噪声、月震扰动及温度变化等也会影响低频测量性能。因此，月基激光干涉仪的设计需要在长基线光学测量能力与月面低频噪声控

制之间进行综合权衡。

3.2.2 月震仪

月球本体响应型引力波探测利用引力波潮汐作用激发的月球弹性形变获取信号，其测量量可表现为月面位移、速度、加速度或应变。LGWA 主要采用高灵敏度局域惯性传感器组成月面阵列，测量月面相对于惯性参考质量的微小运动，并结合月球响应模型提取引力波信息[29,32]。LSGA 则侧重月震学与应变测量相结合的技术路线，通过分布式激光或光纤应变传感网络获取月表形变信息，并结合月球内部结构模型开展引力波与月震信号分析[34]。

月震仪的核心是具有低机械损耗的敏感结构及高精度位移读出系统。LGWA 方案提出了多种低温传感器构型，其中包括铌制 Watt 连杆与激光干涉读出的组合，如图 4(a)所示，以及采用低温硅敏感结构和超导量子干涉器件进行读出的方案[32,33]，如图 4(b)所示。这些设计通过降低机械损耗和读出噪声，提高 mHz 至 Hz 频段内微弱月面运动的测量能力。后续研究进一步围绕低温悬挂、机械热噪声和超导惯性传感器等关键环节开展了分析，为月基高灵敏度月震测量提供了技术基础[33,39,40]。



(a) (b)

图 4 LGWA 局域惯性传感器概念：(a)铌制 Watt 连杆与激光干涉读出；(b)低温硅敏感结构与 SQUID 读出[33]。

Fig. 4 LGWA local inertial sensor concept: (a) niobium-made Watt rod with laser interferometry readout; (b) cryogenic silicon sensing structure with SQUID readout [33].

3.2.3 测试质量与局域惯性传感单元

测试质量和局域惯性传感单元为引力波测量提供低噪声机械参考，其具体形式与探测原理密切相关。长基线激光干涉方案主要通过测试质量建立稳定的光学长度基准，而 LGWA、LSGA 等月球本体响应方案则利用局域惯性传感器测量月面相对于惯性参考质量的微小运动[29,32-34]。由于两类方案在信号转换方式、工作频段和环境耦合机制方面存在差异，其测试质量及读出系统需要采用不同的设计方法。

（1）长基线激光干涉路线的测试质量

在长基线激光干涉系统中，测试质量既构成干涉仪的光学基准，其机械运动又直接影响差分光程测量。测试质量材料、悬挂或支撑形式以及热噪声和控制噪声等因素均会进入系统噪声预算。现有月基方案对此仍处于不同设计阶段。例如，LILA-Horizon 的后续研究提出采用悬挂测试质量并针对月面低频振动环境开展隔振设计[31]；CIGO 的现有噪声研究则以 Cosmic Explorer Stage 1 相关测试质量、热屏蔽和振动隔离技术作为性能估计参考，并根据

月面环境重新构建噪声模型[21]。因此，月基长基线干涉仪的测试质量设计需要结合具体光学构型和目标频段进一步确定。

空间引力波任务在精密惯性参考方面已经积累了较成熟的技术基础。LISA Pathfinder 采用自由漂浮测试质量和电极壳体组成惯性传感系统，通过电容传感实现多自由度位置测量，并利用静电执行实现非干涉测量自由度的控制[41]，如图 5(a)所示；相关技术已经通过在轨实验验证，可为月基精密机械参考和低噪声读出设计提供技术借鉴。但月面存在持续重力、月震、月尘以及复杂的表面等离子体和热环境，空间自由漂浮测试质量的具体结构不能简单沿用于月面系统。

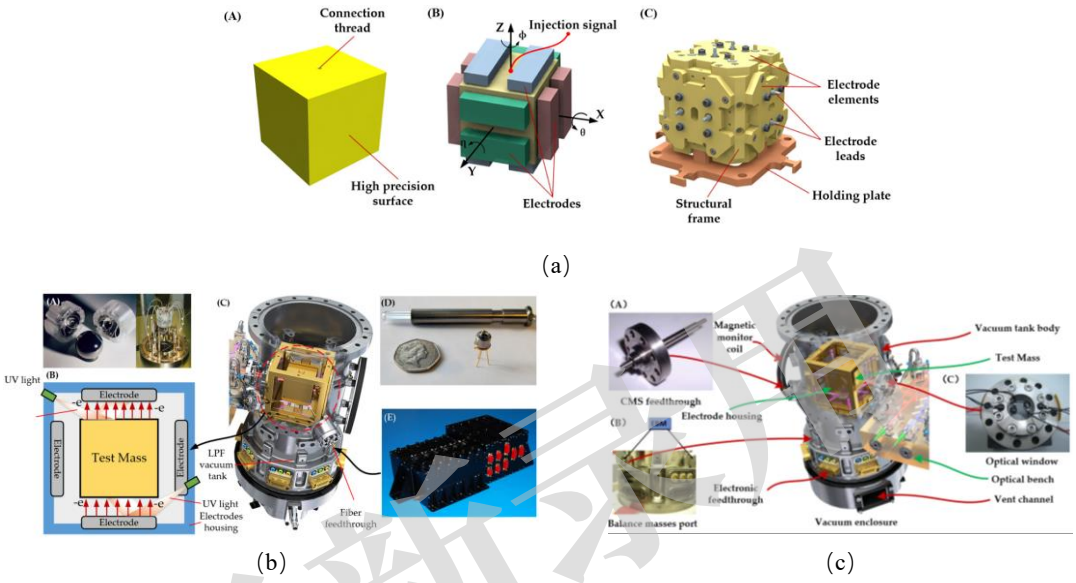


图 5　空间惯性传感相关技术示例：（a）测试质量与电极壳体[41]；（b）非接触式电荷管理组件[42]；（c）惯性传感器局部真空与封装组件[43]。图中技术用于说明可供月基精密惯性测量借鉴的空间任务技术。

Fig. 5　Examples of spaceborne inertial-sensing technologies: (a) test mass and electrode housing[41]; (b) non-contact charge-management hardware[42]; (c) local vacuum and sensor enclosure assembly[43]. These technologies are shown as references for lunar precision inertial sensing.

月表及暴露结构的电荷状态主要受到太阳紫外光致电子发射以及太阳风电子和离子等过程影响，并随光照和等离子体环境发生变化[44]。若后续月基惯性传感器采用电容敏感或其他对电荷敏感的测试质量结构，则需要结合具体台址和结构重新评估电荷噪声。LISA Pathfinder 已经通过紫外光电子发射实现了自由漂浮测试质量的非接触电荷控制[42]，该技术可作为月面精密惯性传感器电荷管理的参考，如图 5(b)所示。

残余气体同样是高精度惯性测量中的潜在噪声源，空间惯性传感器通常采用局部封装和真空环境维持测试质量的稳定工作状态，如图 5(c)所示。LISA Pathfinder 的在轨结果表明，测试质量周围残余气体产生的黏滞阻尼可形成可观测的布朗力噪声[43]。对于月基载荷，尽管月面具有高真空环境，采用局部封装或传感器腔体时仍需结合放气、密封和污染控制条件评估残余气体效应，并据总体噪声预算确定相应真空要求。

（2）月球本体响应路线的局域惯性传感单元

LGWA、LSGA 等方案利用引力波激发的月球弹性响应开展探测，通过布设于月面的高

灵敏度传感器测量局部位移或加速度变化[29,32-34]。与长基线激光干涉测量不同，该类方案的信号获取依赖于月球本体对引力波的响应特性，引力波应变与月面运动之间的转换受到月球内部结构、简正模及浅层结构等因素影响[28,38,45]。因此，月球响应模型与局域传感器性能共同决定该类方案的有效探测灵敏度。

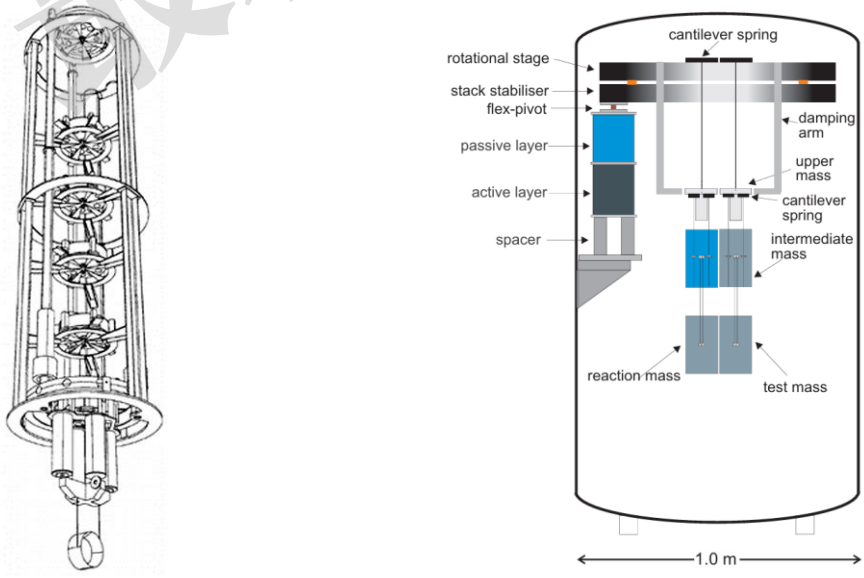
在现有方案中，LGWA 对局域惯性传感器的研究相对系统。其载荷设计面向月球低温环境，提出采用低机械损耗 Watt 连杆结构，并结合激光干涉读出或超导量子干涉器读出，以获取月面微小运动信号[32,33,39]。多个传感单元构成月面阵列后，可通过不同台站的联合观测获取月球弹性响应的空间信息，并用于引力波信号识别及月球内部结构研究[29,32,33]。局域惯性传感器的机械损耗、工作温度和读出噪声，以及月球响应模型的准确性，是影响该技术路线最终探测性能的主要因素。

3.3 主要支撑技术

月基引力波探测器需要在长期运行条件下保持低噪声和高稳定性。微振动、热环境、空间辐射、月尘以及能源供给虽不直接完成引力波信号读出，但会通过机械、热、电磁和污染等途径影响科学载荷的测量性能。因此，月面支撑系统的设计需要与核心载荷、台址环境和总体噪声预算协同考虑。现有月基方案主要涉及微振动抑制、热控制、辐射防护、月尘防护和能源供给等关键环节。

3.3.1 微震动抑制系统

月面微振动来源包括月震、微流星体撞击和热环境变化等自然扰动，以及着陆器、执行机构和能源设备运行产生的工程扰动。Apollo 月震资料表明，太阳照明可通过热效应改变月面地震噪声特征；微流星体持续撞击也会形成可观测的月面背景振动[13,14]。对于长基线激光干涉仪和高灵敏度惯性传感器，这些扰动均可能通过基座运动和结构耦合进入位移读出，因此台址地震环境表征是隔振系统设计的基础。



(a) (b)

图 6 地面引力波探测器隔振技术示例：（a）Virgo 超级衰减器[46]；（b）GEO600 三级摆悬挂系统[47]。

Fig. 6 Examples of vibration-isolation technologies in terrestrial gravitational-wave detectors: (a) the Virgo superattenuator [46]; (b) the GEO600 triple-pendulum suspension system [47].

最新录用

地面引力波探测器已经形成较成熟的多级隔振与悬挂技术。Virgo 超级衰减器（如图 6(a)所示）、KAGRA 多级隔振系统和 GEO600 三级摆悬挂（如图 6(b)所示）均利用多级机械滤波降低地面振动向核心光学元件的传递[46-48]，主动隔振与反馈控制则可进一步改善低频平台运动[49]。这些技术为月基系统提供了重要参考，但月面重力水平、目标频段和环境噪声谱不同，悬挂刚度、固有频率和控制带宽需要结合具体任务重新设计。LILA-Horizon 已针对亚赫兹月面测量开展专用悬挂与隔振研究[31]。对于更低频段，仅依赖被动悬挂难以覆盖全部扰动，通常还需结合低噪声惯性传感、主动控制和环境监测形成分频段抑制体系。

3.3.2 热控制系统

月面热环境具有明显的地形和光照依赖性。非永久阴影区域经历较大的周期性热变化，而极区永久阴影区可形成低温环境。Diviner 观测表明，部分月球南极冷阱表面温度可低至约 25 K[16]。对于引力波探测载荷，低温环境有利于降低部分热噪声，但测试质量、光学平台和惯性传感器的实际工作温度还受到太阳和月表辐射、结构导热、设备自热及热屏蔽方式的共同影响。因此，热控设计的重点在于建立稳定的局部热环境，并限制温度梯度和温度波动向位移读出的耦合。

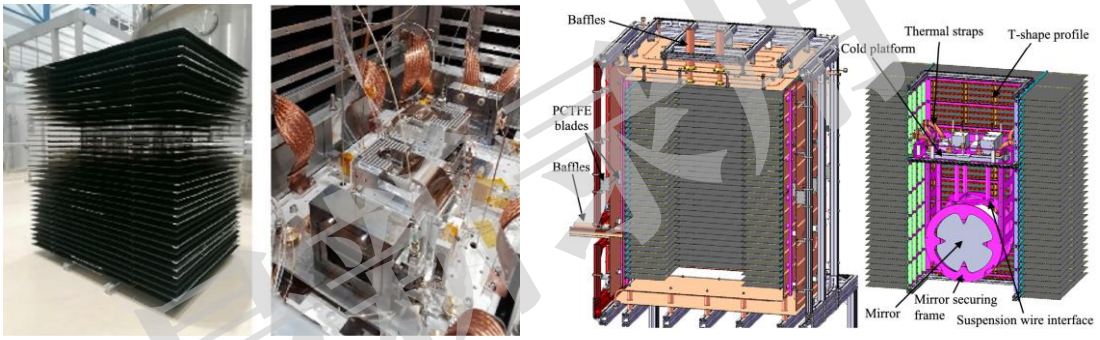


图 7　E-TEST 低温载荷及热控结构示意图:(a) E-TEST 低温恒温器及传感器组件[50]。（b）E-TEST 辐射换热器与悬挂载荷集成结构[50]。

Fig. 7　E-TEST Low-temperature Load and Thermal Control Structure Diagram :(a) E-TEST cryostat and sensor assembly [50]. (b) E-TEST radiation heat exchanger with integrated suspension load structure [50].

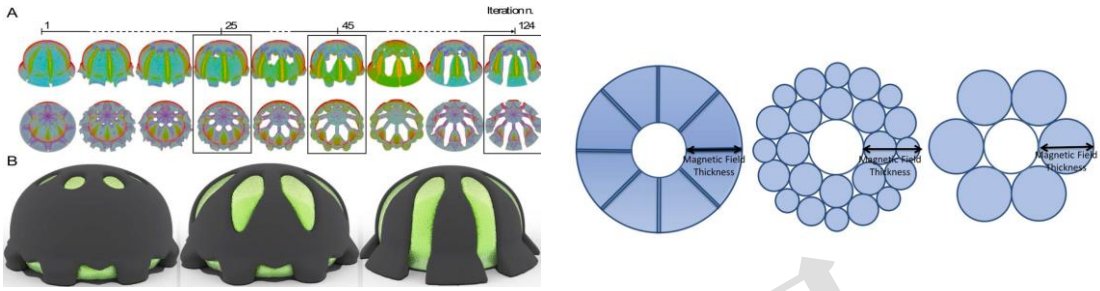
低温精密载荷可通过辐射冷却、低导热支撑、多级热屏蔽和高导热热链等方式降低寄生热流。面向引力波探测器大型低温载荷开展的无接触辐射冷却研究，为此类系统的热设计提供了可借鉴的方法[50]，如图 7（a）、图 7（b）所示。在设备自热或外部热边界缓慢变化难以完全依靠被动手段抑制时，可采用分布式温度监测与低噪声加热器构成慢速闭环控制。对于月基引力波探测，热控系统还需要与悬挂、光学基准和能源系统一体化设计，使热稳定性要求与实际噪声预算相匹配。

3.3.3 辐射防护系统

月面长期运行设备需要面对银河宇宙射线和太阳高能粒子等空间辐射环境。高能粒子引起的总电离剂量、位移损伤和单粒子效应会对空间电子器件的长期可靠性形成约束[51]；月

面屏蔽设计还需结合具体辐射环境和任务持续时间评估[52]。对于精密引力波载荷，辐射防护除保证设备寿命外，还应避免屏蔽结构自身引入过大的质量、热负荷和机械扰动。

被动防护通常依靠结构材料、月壤覆盖以及含氢材料等降低辐射暴露。月壤与聚乙烯或含水材料组合的相关辐射屏蔽研究表明，材料组成和含氢组分会显著影响屏蔽效果[53]，如图 8（a）所示。主动磁辐射屏蔽则利用磁场偏转带电粒子，相关研究已对螺线管构型、超导线圈、结构支撑、低温和功率系统开展了系统分析[54,55]，如图 8（b）所示。由于强磁场及其配套系统可能与高灵敏度惯性传感和精密光学测量发生耦合，月基引力波台站采用主动磁屏蔽时需要同步评估漏磁场、结构载荷、热耗和供电需求。



(a) (b)

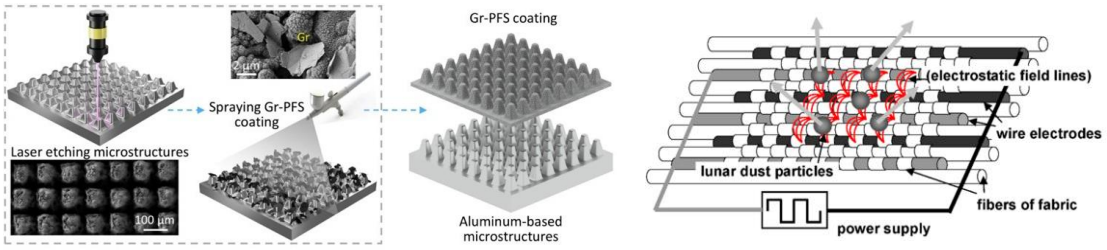
图 8　辐射防护技术示例：(a) 被动辐射屏蔽与拓扑优化概念[52]；(b) 主动磁辐射屏蔽螺线管构型[54,55]。

Fig. 8　Examples of radiation-protection technologies: (a) passive shielding and topology-optimization concept [52]; (b) solenoidal configurations for active magnetic radiation shielding [54,55].

3.3.4　月尘防护系统

月尘具有颗粒细小、形貌不规则、磨蚀性强并易发生静电带电等特征，可附着于光学表面、热控辐射器和活动机构，进而影响透过率、散热效率和机构寿命。NASA 月尘防护技术指南将材料与表面设计、结构遮蔽、机构防护和主动清除作为月面设备需要综合考虑的技术方向[56]。对于引力波探测器，月尘防护还应兼顾低振动和低电磁扰动要求。

被动防护可通过优化材料表面性质、结构遮挡和降低颗粒粘附等方式减少沉积。多尺度粗糙度铝表面的实验研究表明，表面微纳结构能够改变月尘模拟颗粒的接触和粘附行为[57]。进一步的石墨烯增强全氟硅烷涂层研究将铝基微结构与低表面能涂层结合，用于降低月尘粘附[58]，其结构及作用机理如图 9(a)所示。对于已经沉积的颗粒，可采用机械或超声激励以及静电、电动力除尘等主动方式。超声振动已用于月尘模拟物覆盖太阳电池的清除研究[59]，电动力和静电除尘技术也已在月尘防护实验中得到较系统验证[60,61]，如图 9(b)所示。面向精密引力波台站时，应根据部件位置和观测模式选择除尘方式，并评估振动、电场和颗粒再悬浮对科学测量的影响。



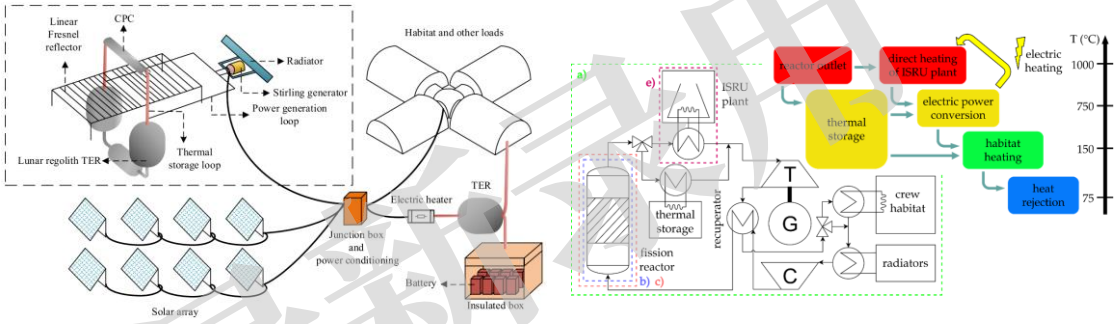
(a) (b)

图 9　月尘防护技术示例:(a) 石墨烯增强全氟硅烷涂层改性铝表面的结构及作用机理示意[58]。(b) 静电或电动力主动除尘技术[60,61]

Fig. 9　Example of Moon Dust Protection Technology :(a) Schematic of the structure and working principle of a graphene-enhanced perfluorosilane coating on an aluminum surface [58]. (b) Electrostatic or electrodynamic lunar-dust removal methods [60,61].

3.3.5　能源供给系统

月基引力波探测器的能源方案与台址光照条件和科学载荷功耗密切相关。受光区域可采用太阳能发电并配置储能系统；已有研究提出结合光伏、电池、月壤原位储热和 Stirling 发电的月面连续供能架构[62]，如图 10(a)所示。永久阴影区或长时间缺乏直接光照的区域则需要考虑远距离输电、核能或其他不依赖持续太阳照明的供能方式，如图 10(b)所示。对于精密测量区，能源设备还需控制由功率变换、热排放和机械部件运行产生的振动与电磁扰动，因此发电与储能装置宜与核心测量区保持合理的空间隔离。



(a) (b)

图 10　月面能源供给技术示例：（a）太阳能发电、储能与电力分配概念[62]；（b）月面裂变表面电源概念[63]。

Fig. 10　Examples of lunar-surface power technologies: (a) solar generation, energy storage and power distribution[62]; (b) lunar fission surface-power concept [63].

月面裂变表面电源可提供不依赖光照的连续功率。NASA 提出的 40 kWe 级可部署月面裂变电源概念中，电源系统可与用户保持约公里尺度的空间分离，并通过高压直流进行远距离输电[63]。对于需要跨越长时间无光照阶段的任务，再生燃料电池可作为电化学储能的一种选择，NASA 已开展面向月面应用的系统研究[64]。月基引力波台站的最终能源架构应根据台址、载荷功耗、热控需求和低噪声要求综合确定。

4　总结

本文围绕 GLOC、LGWA、LSGA、LILA 以及 CIGO/TCIGO 等代表性月基引力波探测方案，对其科学目标、测量原理、核心科学仪器和月面支撑技术进行了综述[15,21,24-26,29-34]。现有方案主要形成两类技术路线：一类采用长基线激光干涉方法测量

差分光程变化，另一类利用引力波激发的月球弹性响应并通过局域惯性传感器进行读出。两类方案均面向分赫兹至数赫兹附近的观测能力拓展，并与 LISA、太极、天琴等空间探测计划以及第三代地面探测器形成潜在的多频段互补[7-9,21,24-26,29-31]。

从技术实现看，月基引力波探测的性能不仅取决于干涉仪、测试质量或惯性传感器本身，还受到月震、热环境、辐射、月尘和能源系统等因素的共同影响。不同方案在目标频段、月球响应模型、噪声预算、台址和载荷构型方面仍存在较大差异，因此当前阶段更适合围绕各自的测量原理建立完整的信号传递链和噪声模型，并通过台址环境测量与关键载荷验证逐步收敛系统指标。

4.1 月基引力波探测的发展展望

月面环境表征是后续任务论证的重要基础。现有研究已经显示，月面地震背景、温度条件和月球内部结构均具有明显的频率和台址依赖性[13-16,28,38]。未来需要结合候选台址长期环境数据，进一步建立月震、热扰动、电荷与月尘等环境量到科学读出的耦合模型，并形成覆盖科学载荷和工程支撑系统的端到端噪声预算。只有在此基础上，才能合理确定隔振、热控和环境监测等子系统的性能需求。

关键科学载荷仍需加强月面适配研究。地面引力波探测器的多级隔振和低噪声光学技术、空间任务的精密惯性传感经验，以及低温传感与辐射冷却技术均可为月基方案提供参考[31,46-50]。但月面约 1/6g 重力、天然真空、月尘和极区热环境构成了新的边界条件[15,16,56]，现有成熟技术需要经过重新设计和系统级验证。LGWA、LILA 等方案已经开始分别从低温惯性传感、悬挂隔振和台址选择等方向推进关键技术研究[29-31,33]。

多频段联合观测将进一步体现月基探测器的科学价值。LISA、太极和天琴可在较低频率阶段长期跟踪致密双星演化[7-9]，月基 deci-Hz 和 Hz 级探测器则有望在部分源进入 ET、CE 等第三代地面探测器敏感频段之前继续提供观测。在 Zhang 等设定的单色源和 Fisher 矩阵分析条件下，CIGO 与 LISA、天琴的联合网络在 0.1 Hz 代表频点显示出较单独探测器更好的定位性能[21]。因此，未来任务设计除关注单台探测器灵敏度外，还应同步考虑观测时长、时频基准、数据格式以及与其他引力波观测网络的联合分析能力。

面向长期月面运行，台址、能源、热控和低噪声环境之间还需要进行系统权衡。LGWA 关注月球极区低温环境，LILA 的台址研究则表明永久阴影区并非所有技术路线的唯一选择，光照、地形、通信和人类活动均可能影响最终部署方案[29,30]。未来月基科学基础设施建设可为引力波探测提供通信、供能和维护条件，同时应通过空间隔离和运行管理保护核心测量区域的低扰动环境。

4.2 对我国 CIGO/TCIGO 方案后续研究的思考

CIGO 采用月面约 100 km 尺度的三角形激光干涉构型，主要面向 0.1~10Hz 频段。近期研究在单色引力波源、Fisher 矩阵和一年观测时间等设定下分析了 CIGO 与 LISA、天琴的源定位能力，并进一步提出在坑底增加第四站形成 TCIGO 四面体构型。该研究结果显示，在所采用的模型条件下，TCIGO 相对于 CIGO 可获得约 5 倍的角分辨能力提升，并改善全天区覆盖[21]。这一结果说明非共面几何能够为月基干涉网络提供更丰富的方向响应信息。

TCIGO 目前仍属于构型概念研究。正四面体模型便于评估几何增益，但实际月球环形

山的深度、坡度和站间距离难以严格满足等边条件，相关研究也指出实际部署可能需要采用非等臂构型[21]。因此，后续论证需要结合真实月形数据开展台址筛选和几何优化，并进一步分析非等臂条件下的光学链路、激光频率噪声抑制和数据组合方法。

四站结构形成多条不同取向的站间连线，可构成多个干涉测量组合，但可获得的独立数据通道数量取决于实际光学拓扑和数据处理方式。后续研究可在更完整的噪声预算基础上，系统比较 CIGO 与 TCIGO 在不同源类型、波形模型和观测时长下的参数估计能力，并进一步研究与 LISA、太极、天琴及第三代地面探测器联合观测的收益。对于偏振测量和额外引力波偏振模式等更进一步的科学目标，还需要建立相应的探测器响应模型并进行独立的参数估计研究。

参考文献

[1] The LIGO Scientific Collaboration, AASI J, ABBOTT B P, *et al*. Advanced LIGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, **32**(7): 074001. DOI: 10.1088/0264-9381/32/7/074001

[2] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, *et al*. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical Review Letters*, 2016, **11**6(6): 061102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

[3] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, *et al*. GW151226: observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence[J]. *Physical Review Letters*, 2016, **116**(24): 241103. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.241103

[4] XU H, CHEN S Y, GUO Y J, *et al*. Searching for the nano-hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese pulsar timing array data release I[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, **2**3(7): 075024. DOI: 10.1088/1674-4527/acdfa5

[5] ANTONIADIS J, ARUMUGAM P, ARUMUGAM S, *et al*. The second data release from the European Pulsar Timing Array III: Search for gravitational wave signals[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, **678**: A50. DOI: 10.1051/0004-6361/202346844

[6] REARDON D J, ZIC A, SHANNON R M, *et al*. Search for an isotropic gravitational-wave background with the Parkes pulsar timing array[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, 951(1): L6. DOI: 10.3847/2041-8213/acdd02

[7] AMARO-SEOANE P, AUDLEY H, BABAK S, *et al*. Laser interferometer space antenna[OL]. arXiv preprint arXiv: 1702.00786, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1702.00786

[8] LUO Z R, WANG Y, WU Y L, *et al*. The Taiji program: a concise overview[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, **2021**(5): 05A108. DOI: 10.1093/ptep/ptaa083

录用稿

[9] MEI J W, BAI Y Z, BAO J H, *et al*. The TianQin project: current progress on science and technology[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, **2021**(5): 05A107. DOI: 10.1093/ptep/ptaa114

[10] MOORE C J, COLE R H, BERRY C P L. Gravitational-wave sensitivity curves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, **32**(1): 015014. DOI: 10.1088/0264-9381/32/1/015014

[11] BARACK L, CARDOSO V, NISSANKE S, *et al*. Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, **36**(14): 143001. DOI: 10.1088/1361-6382/ab0587

[12] ACCADIA T, ACERNESE F, ALSHOURBAGY M, *et al*. Virgo: a laser interferometer to detect gravitational waves[J]. *Journal of Instrumentation*, 2012, **7**(3): P03012. DOI: 10.1088/1748-0221/7/03/P03012

[13] LAROSE E, KHAN A, NAKAMURA Y, *et al*. Lunar subsurface investigated from correlation of seismic noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(16): L16201. DOI: 10.1029/2005GL023518

[14] LOGNONNÉ P, LE FEUVRE M, JOHNSON C L, *et al*. Moon meteoritic seismic hum: steady state prediction[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, **114**(E12): E12003. DOI: 10.1029/2008JE003294

[15] BRANCHESI M, FALANGA M, HARMS J, *et al*. Lunar gravitational-wave detection[J]. *Space Science Reviews*, 2023, **219**(8): 67. DOI: 10.1007/s11214-023-01015-4

[16] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, *et al*. Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the moon's south polar region[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 479-482. DOI: 10.1126/science.1187726

[17] DANDOURAS I, TAYLOR M G G T, DE KEYSER J, *et al*. Space plasma physics science opportunities for the lunar orbital platform-Gateway[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1120302. DOI: 10.3389/fspas.2023.1120302

[18] LIN R P, MITCHELL D L, CURTIS D W, *et al*. Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from lunar prospector[J]. *Science*, 1998, **281**(5382): 1480-1484. DOI: 10.1126/science.281.5382.1480

[19] HARADA Y, HALEKAS J S. Upstream waves and particles at the moon[M]//KEILING A, LEE D H, NAKARIAKOV V. Low-Frequency Waves in Space Plasmas. Hoboken: Wiley, 2016: 307-322. DOI: 10.1002/9781119055006.ch18

最新录用

[20] SZALAY J R, POKORNÝ P, STERNOVSKY Z, *et al*. Impact ejecta and gardening in the lunar polar regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, **124**(1): 143-154. DOI: 10.1029/2018JE005756

[21] ZHANG X L, YU C Y, LI H R, *et al*. The new generation lunar gravitational wave detectors: Sky map resolution and joint analysis[J]. *npj Space Exploration*, 2026, **2**(1): 21. DOI: 10.1038/s44453-026-00037-w

[22] ACERNESE F, AGATHOS M, AGATSUMA K, *et al*. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, **32**(2): 024001. DOI: 10.1088/0264-9381/32/2/024001

[23] RAKHMANOV M, ROMANO J D, WHELAN J T. High-frequency corrections to the detector response and their effect on searches for gravitational waves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2008, **25**(18): 184017. DOI: 10.1088/0264-9381/25/18/184017

[24] JANI K, LOEB A. Gravitational-wave lunar observatory for cosmology[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021, **2021**(6): 044. DOI: 10.1088/1475-7516/2021/06/044

[25] JANI K, ABERNATHY M, BERTI E, *et al*. Laser interferometer lunar antenna (LILA): advancing the U.S. priorities in gravitational-wave and lunar science[OL]. arXiv preprint arXiv: 2508.11631, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2508.11631

[26] CREIGHTON T, LOGNONNÉ P, PANNING M P, *et al*. Fundamental noise and gravitational-wave sensitivity of the laser interferometer lunar antenna (LILA)[OL]. arXiv preprint arXiv: 2508.18437, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2508.18437

[27] DYSON F J. Seismic response of the earth to a gravitational wave in the 1-Hz band[J]. *Astrophysical Journal*, 1969, **156**: 529. DOI: 10.1086/149986

[28] YAN H, CHEN X, ZHANG J H, *et al*. Toward a consistent calculation of the lunar response to gravitational waves[J]. *Physical Review D*, 2024, **109**(6): 064092. DOI: 10.1103/PhysRevD.109.064092

[29] AJITH P, SEOANE P A, SEDDA M A, *et al*. The Lunar Gravitational-wave Antenna: mission studies and science case[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2025, **2025**(1): 108. DOI: 10.1088/1475-7516/2025/01/108

[30] TRIPPE J, POLIDAN R, CREIGHTON T, *et al*. Site selection for the Laser Interferometer Lunar Antenna (LILA)[OL]. arXiv preprint arXiv: 2604.02405, 2026. DOI: 10.48550/arXiv.2604.02405

最新录用

[31] SHAPIRO B N. Vibration isolation for the laser interferometer lunar antenna[OL]. arXiv preprint arXiv: 2512.11268, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2512.11268

[32] HARMS J, AMBROSINO F, ANGELINI L, *et al*. Lunar gravitational-wave antenna[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 910(1): 1. DOI: 10.3847/1538-4357/abe5a7

[33] VAN HEIJNINGEN J V, TER BRAKE H J M, GERBERDING O, *et al*. The payload of the Lunar Gravitational-wave Antenna[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, **133**(24): 244501. DOI: 10.1063/5.0144687

[34] KATSANEVAS S, BERNARD P, GIARDINI D, *et al*. Lunar Seismic and Gravitational Antenna (LSGA)[R]. Paris: European Space Agency, 2020[2026-11-10]. https://ideas.esa.int/core/servlet/hype/IMT?documentId=a315450fae481074411ef65e4c5b7746&documentTableId=6668269872857064730&templateName=&userAction=Browse

[35] AMARO-SEOANE P, BISCHOF L, CARTER J J, *et al*. LION: laser interferometer on the moon[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2021, **38**(12): 125008. DOI: 10.1088/1361-6382/abf441

[36]HARMS J, ANGELINI L, COUGHLIN M, *et al*. Lunar gravitational-wave detection[R]. Washington, DC: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021(2021-12-31) [2026-11-10].http://surveygizmoresponseuploads.s3.amazonaws.com/fileuploads/623127/6378869/154-041ef4ef6bfb0d70a60f62ddca3d94c7_BPS___Lunar_GW_Detection.pdf

[37] SONG H L, YAN H, KANG Y C, *et al*. Probing intermediate-mass black hole binaries with the lunar gravitational-wave antenna[J]. *npj Space Exploration*, 2025, **1**(1): 2. DOI: 10.1038/s44453-025-00002-z

[38] MAJSTOROVIĆ J, VIDAL L, LOGNONNÉ P. Modeling lunar response to gravitational waves using normal-mode approach and tidal forcing[J]. *Physical Review D*, 2025, **111**(4): 044061. DOI: 10.1103/PhysRevD.111.044061

[39] BADARACCO F, VAN HEIJNINGEN J V, FERREIRA E, *et al*. A cryogenic and superconducting inertial sensor for the Lunar Gravitational-Wave Antenna, the Einstein Telescope and SELENE-physics[C]// RUFFINI R, VERESHCHAGIN G, eds. Proceedings of the Sixteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity. Singapore: World Scientific, 2023: 3245-3253. DOI: 10.1142/9789811269776_0266

[40] BILENKO I A, JU L, PAGET D, *et al*. Niobium flexure suspension design for high *Q* sapphire test masses for future gravitational wave detectors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**(8): 1173-1177. DOI: 10.1088/0957-0233/13/8/302

最新录用

[41] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, *et al*. Capacitive sensing of test mass motion with nanometer precision over millimeter-wide sensing gaps for space-borne gravitational reference sensors[J]. *Physical Review D*, 2017, **96**(6): 062004. DOI: 10.1103/PhysRevD.96.062004

[42] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al*. Precision charge control for isolated free-falling test masses: LISA pathfinder results[J]. *Physical Review D*, 2018, **98**(6): 062001. DOI: 10.1103/PhysRevD.98.062001

[43] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, *et al*. Sub-femto-*g* free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA pathfinder results[J]. *Physical Review Letters*, 2016, **116**(23): 231101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.231101

[44] STUBBS T J, FARRELL W M, HALEKAS J S, *et al*. Dependence of lunar surface charging on solar wind plasma conditions and solar irradiation[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, **90**: 10-27. DOI: 10.1016/j.pss.2013.07.008

[45] COZZUMBO A, MESTICHELLI B, MIRABILE M, *et al*. Opportunities and limits of lunar gravitational-wave detection[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2024, **382**(2271): 20230066. DOI: 10.1098/rsta.2023.0066

[46] BALLARDIN G, BRACCI L, BRACCINI S, *et al*. Measurement of the Virgo superattenuator performance for seismic noise suppression[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(9): 3643-3652. DOI: 10.1063/1.1392338

[47] PLISSI M V, TORRIE C I, HUSMAN M E, *et al*. GEO 600 triple pendulum suspension system: seismic isolation and control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(6): 2539-2545. DOI: 10.1063/1.1150645

[48] AKIYAMA Y, AKUTSU T, ANDO M, *et al*. Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, **36**(9): 095015. DOI: 10.1088/1361-6382/ab0fcb

[49] TSANG T, PEÑA ARELLANO F E, USHIBA T, *et al*. Optimizing active seismic isolation systems in gravitational-wave detectors[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2025, **42**(21): 215012. DOI: 10.1088/1361-6382/ae10fe

[50] JACQUES L, ZEOLI M, AMOROSI A, *et al*. Cryogenic radiative cooling of a large payload for gravitational wave detector: design and results of the E-TEST project[J]. *Cryogenics*, 2025, **147**: 104057. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2025.104057

[51] DUZELLIER S. Radiation effects on electronic devices in space[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2005, **9**(1): 93-99. DOI: 10.1016/j.ast.2004.08.006

最新录用

[52] ISOLAN L, SUMINI V, SUMINI M. Monte Carlo analysis of dosimetric issues in space exploration[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2024, **221**: 111786. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.111786

[53] JOHNSON Q F, GERSEY B, WILKINS R, *et al*. Radiation shielding of lunar regolith/polyethylene composites and lunar regolith/water mixtures[C]//62nd International Astronautical Congress. South Africa: NASA, 2011.

[54] WASHBURN S A, BLATTNIG S R, SINGLETERRY R C, *et al*. Active magnetic radiation shielding system analysis and key technologies[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2015, **4**: 22-34. DOI: 10.1016/j.lssr.2014.12.004

[55] WESTOVER S C, MEINKE R, NEROLICH S, *et al*. Magnet Architectures and Active Radiation Shielding Study (MAARSS)[R]. Houston: NASA Technical Reports Server, 2019

[56] ABEL P B, ANDERSON M D, BLOM E T, *et al*. Lunar Dust Mitigation: A Guide and Reference: First Edition (2021)[R]. Houston: NASA, 2023

[57] WANG X, WANG W D, SHAO H, *et al*. Lunar dust-mitigation behavior of aluminum surfaces with multiscale roughness prepared by a composite etching method[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(29): 34020-34028. DOI: 10.1021/acsami.2c07237

[58] WANG X, HUANG Z K, CHEN S, *et al*. Graphene-enhanced perfluorosilane coating with an ultralow sliding angle prevents lunar dust adhesion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, **529**: 173181. DOI: 10.1016/j.cej.2026.173181

[59] RITTENHOUSE J J, BOERINGA Z L, HAN D R, *et al*. Lunar dust mitigation for solar cells via ultrasonic vibrations[J]. *Acta Astronautica*, 2025, **228**: 474-485. DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.12.018

[60] CALLE C I, BUHLER C R, MCFALL J L, *et al*. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions[J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, **67**(2/3): 89-92. DOI: 10.1016/j.elstat.2009.02.012

[61] CALLE C I, BUHLER C R, JOHANSEN M R, *et al*. Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2011, **69**(11/12): 1082-1088. DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.06.010

[62] TAN H, XU B, LIN Z J, *et al*. Planning and design of lunar power supply systems based on in-situ resource utilization via a multi-energy integrated system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2026, **284**: 128975. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128975

最新录用

[63] OLESON S, PACKARD T, TURNBULL E, *et al*. A deployable 40 kWe lunar fission surface power concept[C]//Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS-2022). Cleveland: NASA, 2022: 519-527. DOI: 10.13182/NETS22-38629

[64] CASHMAN J, SMITH P, CAIN K, *et al*. Regenerative Fuel Cell Systems for Lunar Surface Applications[R]. Houston: NASA, 2022

第一作者和通信作者简介



第一作者：李奇帆 男，2002 年 9 月出生于河南省洛阳市，现为中山大学航空航天学院硕士生，主要研究方向为空间引力波和月基引力波探测新技术。电子邮箱：Liqf53@mail2.sysu.edu.cn



第一作者：莫戈瑜 男，现为中山大学航空航天学院博士生，主要研究方向为引力波探测技术。电子邮箱：pb051214@mail.ustc.edu.cn



通讯作者：丁延卫 男，现为中山大学航空航天学院教授，博士生导师，主要研究方向为高稳定结构与次结构、低频段低噪声电学温度测量、高精度光纤与量子温度测量、新型主动与被动温度控制、空间引力波和月基引力波探测新技术。电子邮箱：dingyw3@mail.sysu.edu.cn

最新录用