



地月空间近地小行星观测系统研究

唐玉华¹, 吴伟仁^{1,2}, 李明涛^{3,4*}, 韩思远⁵, 祁海明⁵,
王新涛^{3,4}, 周琪³, 张哲¹, 田少杰¹, 石萌¹, 金霄¹

1. 探月与航天工程中心, 北京 100080

2. 深空探测实验室, 北京 100080

3. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100080

4. 中国科学院大学, 北京 100049

5. 国家航天局, 北京 100048

* 通信作者. E-mail: limingtao@nssc.ac.cn

收稿日期: 2022-01-09; 接受日期: 2022-03-19; 网络出版日期: 2022-07-15

国防科工局空间碎片和小行星专项课题 (批准号: kjsp2020020101)、科工局民用航天预研课题 (批准号: D020302) 和空间科学预先研究项目资助



摘要 近地小行星撞击是造成人类毁灭性灾难的七大威胁之一, 开展小行星防御、保护地球家园是全人类共同的责任. 做好小行星防御, 首先要建立和完善小行星监测系统. 目前, 国际小行星监测主要以地基光学系统监测为主, 由于光学观测条件限制, 导致来自太阳方向的小行星无法及时被“捕获”跟踪, 而天基监测系统由于其特定的位置优越性, 成为地基观测系统的有益补充. 本文系统梳理了地基监测系统存在的问题和不足, 分析了月基和地月空间轨道部署望远镜的优劣, 提出了基于地月系统 L4、L5 点轨道部署天基望远镜用于近地小行星观测的方案, 并提出了国际合作实施建议, 对未来构建近地小行星监测系统具有参考价值.

关键词 地月空间, 行星防御, 近地小行星, 拉格朗日点轨道, 红外望远镜

1 引言

2013年2月15日, 一颗直径约18米的小行星, 在毫无预警的情况下, 袭击了俄罗斯车里雅宾斯克上空, 产生的冲击波造成了大面积区域受损, 导致接近1500人受伤, 3000多栋房屋受损^[1,2]. 更有1908年, 小天体撞击引起的通古斯大爆炸造成约2000平方公里树木被摧毁; 6500万年前发生的K-T撞击事件, 一颗直径约10 km的小行星撞击墨西哥尤卡坦半岛, 导致95%的海洋生物和包括恐龙在内的75%的陆地生物灭绝^[3]. 近年来, 人类频繁地观测到近地小行星飞掠事件, 仅2021年就发生1590次, 观测到29颗小行星进入大气层, 形成火流星事件¹⁾.

1) <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>.

引用格式: 唐玉华, 吴伟仁, 李明涛, 等. 地月空间近地小行星观测系统研究. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 1169–1185, doi: 10.1360/SSI-2022-0011
Tang Y H, Wu W R, Li M T, et al. Near-Earth asteroids observation system in cislunar space (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 1169–1185, doi: 10.1360/SSI-2022-0011

天文学上, 近地小行星是指与太阳的最近距离小于 1.3 AU (AU 为天文单位, 等效 1 个日地平均距离, 约 1.5 亿公里) 的小行星. 小行星撞击地球由于其进入速度大、撞击能量高, 给人们造成极大威胁, 被认为是毁灭人类文明的七大威胁之一. 近地小行星撞击风险应对是全人类长期面临的重大挑战.

提前发现并编目近地小行星是应对小行星撞击威胁的前提条件. 截至 2021 年 10 月 15 日, 人类已经发现了 27098 颗近地小行星. 公里级直径的近地小行星撞击可以导致全球性灾害, 根据近地小行星尺寸数量分布的理论模型, 其编目完成率超过了 95%; 直径 140 米级近地小行星 (绝对星等小于 22 等, 若假设其几何反照率为 0.14, 则对应 140 米直径) 撞击可以导致中小型国家级灾害, 编目完成率仅约 40%; 直径 50 米级近地小行星撞击可以导致大型城市级威胁, 编目完成率仅约 3%; 而直径 20 米级近地小行星撞击可以导致城镇级威胁, 编目完成率不足 1%^[4]. 因此, 目前还有大量未知、具有潜在撞击威胁的小行星尚未被编目. 加强对近地小行星的发现编目工作仍然任重道远.

目前近地小行星的发现编目主要依赖地基光学望远镜. 受大气和阳光的影响, 地基光学望远镜仅能在夜晚工作, 无法在白天对来自太阳一侧方向的近地小行星进行预警^[1,5]. 近 200 年来, 4 次最为知名的近地小行星撞击事件 (1908 年通古斯大爆炸事件、1976 年吉林陨石雨事件、2013 年车里雅宾斯克事件、2018 年白令海峡事件), 小行星全部来自太阳一侧方向. 因此, 太阳一侧方向是目前近地小行星监测预警体系的盲区^[6]. 天基监测是弥补地基光学观测盲区的有效途径^[7~9].

月球作为距离地球最近的地外天体, 地月空间的开发探索是本世纪以来世界航天的焦点. 我国已经完成嫦娥工程第 1 阶段“绕、落、回”发展目标, 未来将建设国际月球科研站, 使得在地月空间建设望远镜成为可能^[10]. 本文研究基于地月空间构建近地小行星观测网络, 对其必要性、观测能力和拓展应用进行了分析, 提出了未来国际合作实施建议.

2 地月空间近地小行星观测系统需求分析

地基光学望远镜是近地小行星发现的主力设备, 发现了 98.6% 的近地小行星. 但现有地基光学望远镜观测网络由于在连续观测时间、可观测天区、地理布局等方面存在不足之处, 仍需要天基或月表观测系统进行补充^[11].

2.1 地基望远镜观测网络的不足

目前地基望远镜观测网络主要存在 5 方面不足.

(1) **有效观测时间短, 单站持续观测时间短.** 地基光学望远镜只能在夜晚工作, 并且容易受到天气、月光等影响, 有效观测时间短, 年有效观测时间不足 1/3, 影响巡天观测效率. 此外, 由于地球自转, 导致观测弧段不连续, 单站的观测时间较短, 无法较长时间对目标进行持续跟踪, 影响跟踪观测效率.

(2) **存在太阳一侧方向的观测盲区.** 由于大气散射影响, 白天地球上光线比较强, 小行星信号^[12~15]被淹没在背景噪声中. 因此, 地基光学望远镜在太阳一侧方向存在观测盲区, 如果近地小行星从太阳一侧方向抵近地球, 地基望远镜无法提前预警. 2013 年车里雅宾斯克事件中, 肇事小行星就是从太阳一侧方向撞击地球的, 在撞击前没有任何预警.

(3) **地基观测手段受限.** 小行星观测主要包括可见光、红外和雷达等手段. 其中, 光学和红外是被动观测手段, 通过接收小行星的反射和辐射信号来探测小行星, 可以用于对大范围天区进行巡天搜索, 并且探测距离较远. 而雷达是一种主动观测手段, 一般针对已知小行星进行跟踪观测, 通过发射信号并接受小行星反射的回波, 对小行星的轨道、形态、结构和物质组成进行精细探测. 雷达一般用于对飞临地球已知小行星进行探测.

红外波段与光学波段观测相结合,可以获得小行星的反照率和较为准确的尺寸^[16],对准确估计小行星的撞击能量具有重要意义.地基观测由于大气对红外线的吸收,红外信号损失较大,不适合做地基红外巡天.而天基不受大气影响,非常适合红外观测.

(4) **地理分布不均衡.**受全球经济发展不平衡、海陆分布等因素影响,地基望远镜观测网络南北、东西半球分布不均匀.主要观测设备集中在北半球和西半球,南半球和东半球观测设备少.如果小行星从南半球抵近地球,很难提前发现.近地小行星 2019 OK 直到抵达地球前 6 个小时^[17],才被位于巴西的民间爱好者天文台发现,其中一个重要原因是南半球的观测设备少.

(5) **未来可能受人类大量地球附近空间活动影响.**随着巨型星座的建设,数以万计的卫星将被发射到近地轨道上,可能对地基光学观测构成较大的影响,在望远镜图像中留下拖着长尾的轨迹,影响近地小行星的发现效率.除此之外,人类愈加频繁的空间活动,在近地轨道上形成大量空间物体和空间碎片,这些太空物体都可能会对小行星观测造成干扰.

2.2 月表和天基观测的优势

月表和天基观测将能够有效克服地基观测的弊端,具有以下优势.

(1) **有效观测时间长,单站持续观测时间长.**月球上没有大气,在能源充足的条件下,可以不受昼夜影响,连续开展巡天观测.月球自转缓慢,能够对特定目标进行较长时间的连续跟踪观测.

这方面天基观测具有更大的优势.通过选择合理的轨道,可以保证能源和视场问题,实现连续巡天观测和对特定目标开展长时间的持续跟踪观测.

(2) **提升对地基盲区覆盖能力.**月球和轨道上没有大气散射影响,能够对太阳附近的天区进行观测,从而对地基光学系统的观测盲区形成有益补充,提升对地球太阳一侧方向近地小行星的监测能力,为形成完善的监测体系提供支持.

(3) **可以完善观测手段,获得小行星较详细的特性信息.**可以在月球和轨道上布局红外望远镜,获取小行星的尺寸、反射率、热物理等信息,为小行星防御、资源探测和科学探测提供丰富的信息^[18].

(4) **可以弥补南半球观测设备空缺.**将望远镜部署在月球南极,能弥补地球南半球观测设备空缺的现状.如果在月球北极部署另外一组望远镜,将具备南北半球天区观测能力.

在轨道上部署的望远镜具有几乎全天区的视场,仅需要规避太阳方向的部分天区.也可以通过观测指向规划,弥补地球南半球观测设备的空缺.

(5) **受人类空间活动影响小.**月球远离近地空间,不受巨型星座和人类空间活动的影响.通过选择合理的轨道布局,可以避开巨型星座的影响,受人类空间活动影响小.

2.3 地月空间观测系统与地基望远镜互补作用

综合以上分析,地月空间望远镜系统与地基望远镜存在较好的互补关系,主要体现在以下几个方面.

- (1) 弥补地基观测有效观测时间短的不足,实现近地小行星的长时间连续观测;
- (2) 对地基望远镜白天方向观测盲区形成有益补充,提升对来自太阳一侧方向小行星的观测能力;
- (3) 弥补地基红外观测的不足,实现近地小行星尺寸、反射率、热物理特性等探测,为小行星防御提供精细信息;
- (4) 弥补地基望远镜地理布局不均衡的不足,实现南北半球均衡观测;
- (5) 与地基望远镜联合观测,提升对近地小行星的跟踪弧长,改进观测几何,进而提升定轨精度^[19,20].

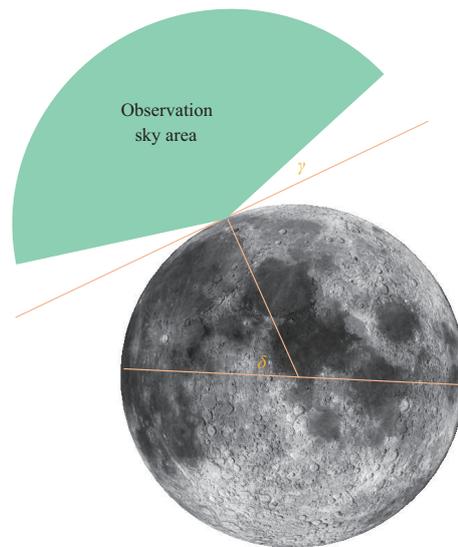


图 1 (网络版彩图) 月表望远镜可视天区

Figure 1 (Color online) Observation sky of Lunar based telescope

3 地月空间观测系统布局方案

3.1 月表观测系统

首先讨论月表望远镜的布局问题. 望远镜在月球表面的位置决定了望远镜的观测视场. 月球近似是一个球体, 望远镜只能看到当地水平面之上一定仰角的天区, 如图 1 所示. 月球上无大气, 仰角 γ 主要考虑地形遮挡, 一般为小角度, 因此也可以近似认为望远镜可以看当地水平面之上的半个天区. 理论上, 只要两台对称部署的望远镜, 可以近似实现具备全天区指向观测的能力.

纬度越靠近南半球, 越有利于对南半球方向飞来的近地小行星开展观测. 布局在南极, 则可以具备对南半球天区的观测能力. 纬度越靠近北半球, 越有利于对北半球方向飞来的近地小行星开展观测. 布局在北极, 则可以具备对北半球天区的观测能力. 将望远镜布局在极区, 通过转动调整望远镜指向, 能够对从不同经度方向飞来的小行星进行观测. 由于小行星可能从不同经度方向飞向地球, 因此具备不同经度方向的观测能力至关重要. 此外, 极区太阳高度角低, 有利于保持较低的温度, 为红外望远镜工作创造良好的温度条件.

布局在赤道地区的望远镜, 通过转动调整望远镜指向, 可以对不同纬度方向飞来的小行星进行观测, 但经度方向受到月球的遮挡. 部署在月球正面的望远镜, 无法对背面飞来的小行星进行观测; 反之, 部署在月球背面的望远镜, 无法对正面飞来的小行星进行观测. 而小行星可能从不同经度方向飞来, 如果只有 1 台望远镜, 则不具备对不同经度方向飞来的小行星进行观测的能力. 此外, 由于小行星主要从黄道面方向飞来, 而太阳和地球恰恰在黄道面内, 在规避太阳和地球的同时, 也可能会漏掉部分小行星. 此外, 月球正面的望远镜容易受到地球遮挡、地球辐照影响; 而月球背面望远镜, 则需要额外的中继通信支持. 赤道地区太阳高度角变化剧烈, 不利于保持恒定的低温, 不利于红外望远镜工作.

在月表不同位置部署望远镜综合分析如表 1 所示, 需要说明的是, 尽管月球正面部署望远镜存在容易受到地球遮挡的缺点, 但将望远镜部署在正面, 可以在空间态势感知、月基对地观测方面具有应

表 1 不同位置部署望远镜比较分析

Table 1 Comparative analysis of telescopes deployed in different positions

Site	Polar (South)	Polar (North)	Equator (near side)	Equator (far side)
Advantageous sky area	South hemisphere	North hemisphere	Near sid hemisphere	Far side hemisphere
Blind sky area	North hemisphere	South hemisphere	Far side hemisphere	Near side hemisphere
Earth occlusion	None	None	Yes	None
Communication condition	Moderate	Moderate	Good	Need relay satellite
Solar elevation variation	Small	Small	Drastic	Drastic

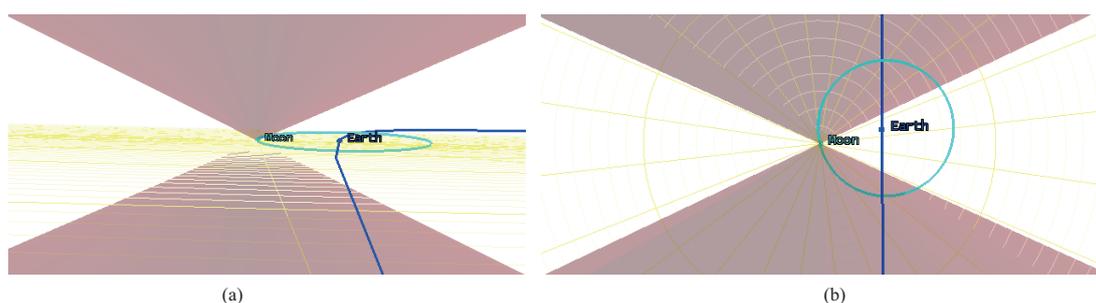


图 2 (网络版彩图) 月球南极、北极部署望远镜. (a) 平行于黄道面视角; (b) 垂直于黄道面视角

Figure 2 (Color online) Telescope deployed in Lunar poles. (a) View in ecliptic plane; (b) view perpendicular to ecliptic plane

用前景, 需要进一步论证.

在月球南极和北极各部署一台望远镜, 就可以实现根据需要对全天区进行扫描观测的能力, 如图 2 所示. 而极区的光照角度较低, 可为红外望远镜提供良好的低温环境. 考虑到南半球地基观测设备较少, 建议优先在南极地区部署望远镜.

单纯从小行星观测的角度, 建议第 1 步在月球南极地区, 光照、温度和地形条件比较好的区域, 建设第 1 台望远镜, 优先具备南半球的天区观测能力; 随后在月球北极地区部署第 2 台望远镜, 共同实现南北半球天区观测能力. 同时选址时, 应考虑红外探测器对温度的要求、地形遮挡、能源供应、与地面的通信等综合因素, 需要持续深化论证.

需要说明的是, 将望远镜部署在月球表面的运输代价更大, 而且存在月球遮挡. 而将望远镜部署在轨道上, 可以规避这些问题.

3.2 地月空间轨道观测系统布局方案

相比在月球表面部署望远镜, 在地月空间轨道上布局望远镜具有更大的优势.

(1) 不受地球和月球遮挡, 视野开阔, 通过调整观测指向, 单台望远镜就可以具备南北半球天区的观测能力;

(2) 通过选择合适的轨道可以保证光照条件, 地月平动点轨道具有阴影时间少、光照充足的优势;

(3) 对地可见性时间长, 通信条件比较好;

(4) 部署望远镜需要的运输成本比较低.

综合以上分析, 在地月空间轨道上布局望远镜更具有优势. 地月空间轨道包括近地轨道、近月轨道和平动点轨道等类型.

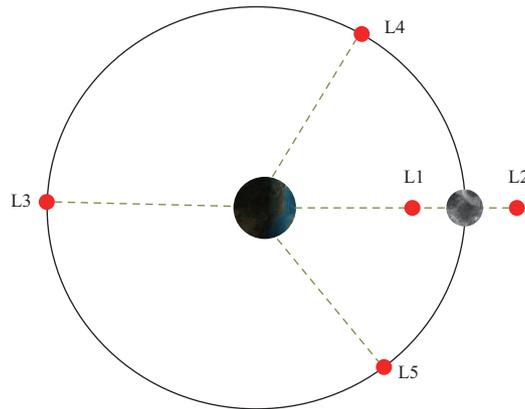


图 3 (网络版彩图) 地月系统平动点示意图

Figure 3 (Color online) Libration points in the Earth-Moon system

对于近地/近月轨道, 观测时容易受到地球/月球遮挡. 地月空间共有 5 个平动点, 如图 3 所示, 其中 L1, L2, L3 点为共线平动点, L4 和 L5 点为三角平动点. L1 和 L2 点距离月球较近, 在观测时, 也容易受到月球遮挡, 影响观测天区. 同时, 由于共线平动点在动力学上是不稳定的, 需要进行一定的轨道维持. 如果从兼顾月球探测的角度, 也可以在共线平动点布局望远镜, 但从小行星观测的角度, 共线平动点并非优选位置.

L4 和 L5 两个三角平动点与地球和月球构成等边三角形, 相距地球和月球约 38 万公里, 视野开阔. 三角平动点在动力学上是稳定的, 适合部署长期运行的轨道望远镜. 同时 L4 和 L5 点轨道的发射转移代价也比较小. 因此, 建议优先在 L4 和 L5 点部署望远镜, 用于近地小行星观测.

考虑近地小行星的轨道分布、与地基望远镜观测天区互补、红外望远镜观测能力等因素, 天基望远镜的观测天区一般指向地球轨道前方或者后方天区, 如图 4 所示.

3.3 地月空间轨道观测系统与其他天基轨道望远镜比较

在近地小行星天基观测方面, 美国和欧洲提出了日地 L1 点、L2 点、类金星轨道、DRO 轨道, 我国提出了地球领航/尾随轨道等轨道布局方案. 地月系统 L4/L5 点轨道组成的观测系统可与地基观测系统、其他天基系统形成互补和协同关系.

相比其他轨道布局方案, 地月系统 L4/L5 点轨道具有如下优势.

(1) **轨道稳定性好.** L4/L5 点轨道在动力学上是稳定的^[21], 通过设计合理的目标环绕轨道, 能够将轨道维持间隔保持在年尺度量级, 既能够节省燃料, 也降低了测控成本.

(2) **轨道转移时间短, 燃料节省.** 从地球停泊轨道出发后, 经过约 15~20 天飞行时间, 可以到达 L4 和 L5 点轨道, 停泊轨道逃逸后所需速度增量约 300 m/s. 相比其他天基轨道, 地月空间轨道具有转移时间短、燃料节省的优点.

(3) **距离地球近, 有利于数据传输.** L4 和 L5 点距离地球约 38 万公里, 相比日地 L1 点轨道 (150 万公里)、日地 DRO 轨道、地球领航轨道 (千万公里量级) 和类金星轨道 (千万 ~ 亿公里量级), 具有距离近的优势, 有利于数据传输.

(4) **可以兼顾在轨处置.** L4 和 L5 点望远镜可以在日常开展监测预警, 在应急时刻, 可以去撞击来袭的近地小行星, 兼顾近地小行星的在轨处置.

(5) **拓展应用多.** L4 和 L5 点优良的特性, 使得其在空间天文、空间物理、导航通信、空间态势感

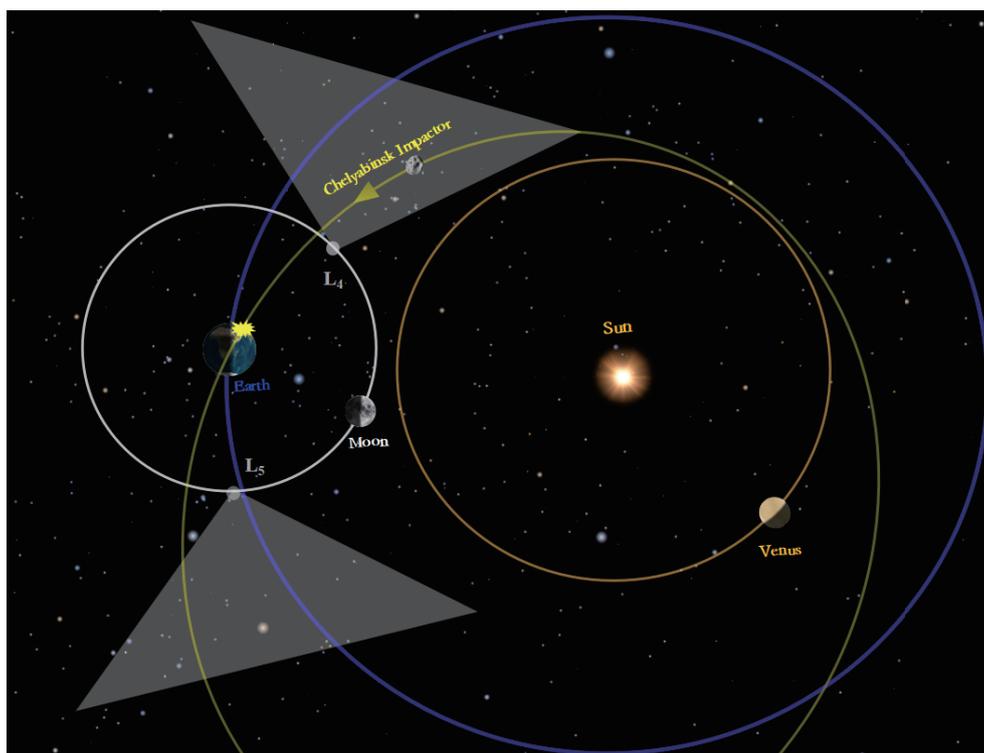


图 4 (网络版彩图) 地月 L4 和 L5 点轨道观测系统

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of observation system in L4 and L5 point orbits

知等领域也具有优势, 拓展科学与工程应用多.

(6) 可以继承探月成熟技术. L4 和 L5 点任务能够继承月球探测工程的技术基础, 成熟度高, 有利于节省成本.

相比地球领航轨道、日地 L1 点等日心轨道, 地月系统轨道的缺点是其观测时需要综合考虑太阳、地球和月球的规避, 观测策略^[22]设计较为复杂. 由于天体遮挡, 如果小行星恰巧来自地球或者月球方向, 可能无法及时发现这些小行星.

此外, 由于地月平动点距离地球比较近, 对近地小行星的预警距离不如深空轨道远, 预警时间不如深空轨道长. 由于温控、能源、光噪声等约束, 地月平动点轨道无法完整覆盖地基光学盲区, 在太阳方向仍然存在无法观测的区域, 需要其他天基轨道, 如地球领航轨道^[23,24]、类金星轨道等进行补充, 形成既满足巡天发现, 又满足临近预警的监测预警体系.

3.4 地月空间轨道观测系统观测策略设计

3.4.1 地球和月球遮挡天区分析

一般将望远镜小行星连线与望远镜太阳的连线的夹角称为太阳相位角. 当太阳相位角为 180° 时, 目标与太阳处于望远镜两侧, 为全顺光观测; 当太阳相位角为 0° 时, 目标与太阳处于同一方向, 为全逆光观测.

典型观测天区如图 5 所示, 地基观测系统的优势观测天区为观测相位角为 $-145^\circ \sim -180^\circ$ 区域和 $145^\circ \sim 180^\circ$ 之间的区域. 为了与地基观测形成互补, 天基观测一般选择 $-145^\circ \sim -40^\circ$ 和 $40^\circ \sim 145^\circ$ 的天

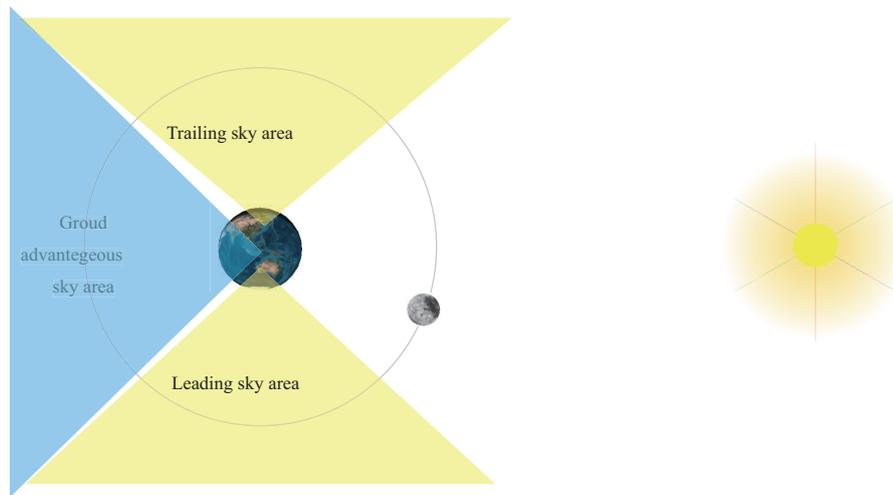


图 5 (网络版彩图) 典型观测天区

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of typical sky observation area

区. 根据地球运动方向, 称 $40^{\circ}\sim 145^{\circ}$ 为前半区, 而 $-145^{\circ}\sim -40^{\circ}$ 为后半区. 地基望远镜仅能在黎明前几个小时可以看到前半区天区, 但观测角度较低, 使得其信噪比降低. 同理, 地基望远镜仅在黄昏后几个小时可以看到后半区天区, 但观测角度较低, 也会降低信噪比.

考虑到热控、光学噪声、能源等约束条件, 天基望远镜一般指向前半区和后半区开展观测, 在与地基形成有效互补的同时, 尽量避免将望远镜视场指向过于靠近太阳的天区. 实际上, 车里雅宾斯克事件和通古斯事件中小天体均来自这两个天区. 当然, 这种指向策略, 也会导致遗漏一部分来自太阳方向的近地小行星, 要解决这个问题, 需要将望远镜送入深空轨道, 比如地球领航轨道或者地球尾随轨道^[23,24]. 这也是构建多种轨道构成的天基系统的必要性^[22].

以 L4/L5 点轨道望远镜为中心, 地球相对其做圆周运动, 地球出现在观测天区的时间比例约为 1/2. 首先考虑平面情况, 由于在轨道上, 没有大气, 考虑地球规避角为 $\pm 6^{\circ}$ (远大于地球圆面的张角 (约为 1.9°)), 可以计算出地球对可观测天区的遮挡比例为 6.3%. 考虑巡天需要对黄道面上下 45° 的广大立体天区进行搜寻, 遮挡比例进一步降低到 0.84%.

同理, 由于月球亮度较小、反射率较低, 假设规避角为 $\pm 3^{\circ}$ (远大于月球圆面的张角 (约为 0.5°)), 则可以计算出月球对可观测天区的遮挡比例为 3.2%. 考虑到黄道面上下方扫描, 遮挡比例进一步降低到 0.2%.

从巡天的角度, 地球和月球对可观测天区的遮挡比例约为 1%, 相当于巡天时, 存在两个 $12^{\circ}\times 12^{\circ}$, $6^{\circ}\times 6^{\circ}$ 的孔洞. 相比 $2\times 95^{\circ}\times 90^{\circ}$ 的目标天区范围, 几乎可以忽略.

需要说明的是, 尽管存在地月可能遮挡 1% 的观测天区, 但在实际观测时, 对巡天观测的影响很小. 因为望远镜的瞬时视场一般为 10 平方度左右, 可以在扫描策略设计时, 先扫描未被地月遮挡的天区, 等待地月不再遮挡时再去扫描其他天区. 以图 6 为例, 在新月时, 优先扫描后半区; 在满月时, 优先扫描前半区.

3.4.2 考虑地月遮挡的 L4/L5 双望远镜观测策略设计

考虑 L4 点, L5 点, 地球, 月球, 太阳的相位关系, 设计了观测策略, 通过在 L4 点, L5 点双望远镜的配合与视场切换, 使得两台望远镜分别观测前半区和后半区, 如图 7 所示.

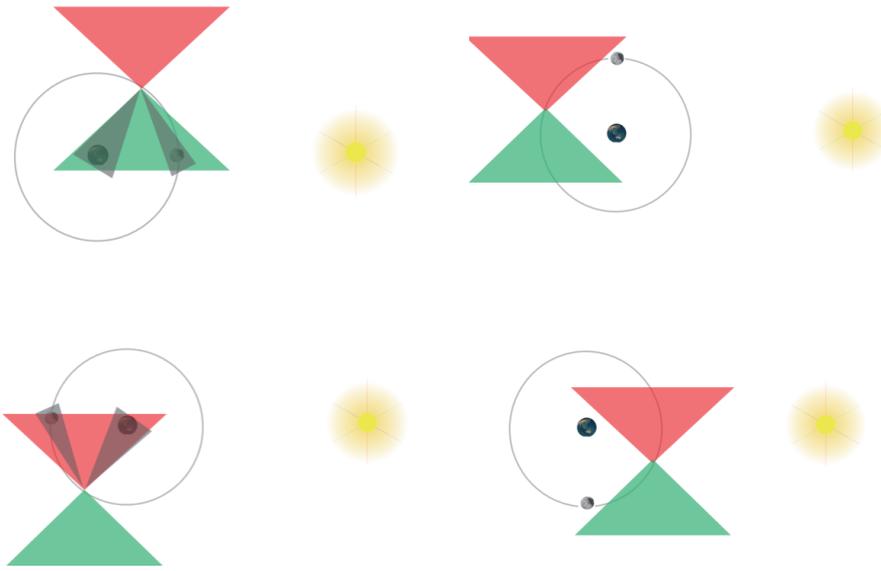


图 6 (网络版彩图) 地月对 L4 点望远镜观测天区的遮挡示意

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of the sky observation area of the L4 telescope blocked by the Earth and Moon

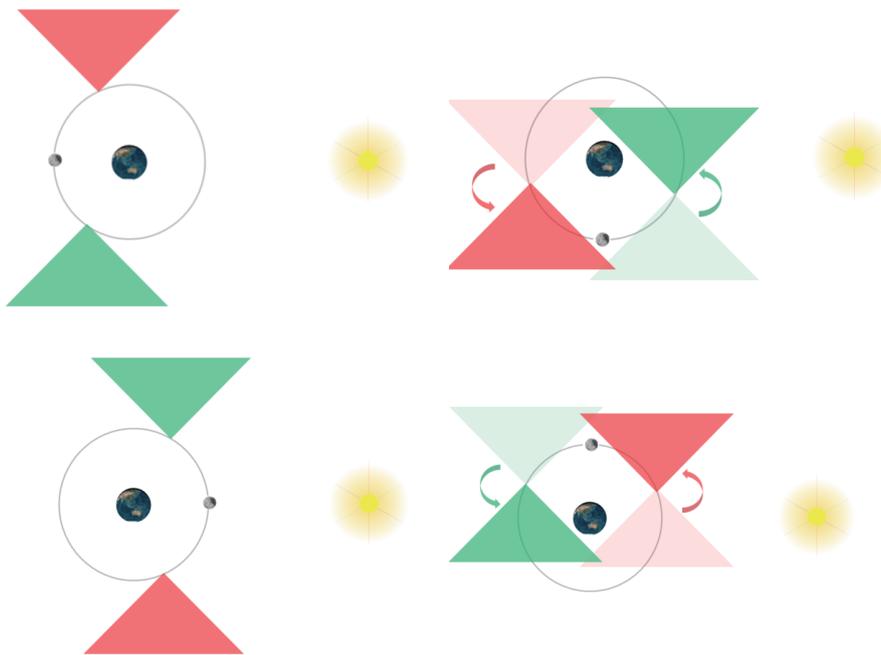


图 7 (网络版彩图) L4 和 L5 双望远镜配合观测

Figure 7 (Color online) Schematic diagram of cooperative observation of the L4 and L5 telescopes

具体策略如下.

(1) 初始时刻月球位于日地连线地球外侧, 从地球上观月相为满月, 此时 L5 点望远镜看后半区, L4 点望远镜看前半区;

(2) 约 7 天后, 月相为下弦月, 此时切换观测视场, L5 点望远镜看前半区, L4 点望远镜看后半区;

(3) 约 7 天后, 月相为新月, 此时 L5 点望远镜保持看前半区, L4 点望远镜保持看后半区;

(4) 约 7 天后, 月相为上弦月, 此时切换观测视场, L5 点望远镜看后半区, L4 点望远镜看前半区.

如此, 周而复始, 实现前后天区的探测能力. 每台望远镜只看半天区, 约 8550 平方度. 假设望远镜视场为 10 平方度, 单次观测时间为 180 秒, 1.8 天可以扫描天区一遍, 5.4 天可以扫描天区 3 次, 实现对小行星巡天搜索发现. 此外, 两台望远镜还可以互为后随观测, 一台望远镜发现目标后, 另外一台望远镜可以开展后随跟踪观测.

3.5 总体布局方案

月基观测能够对地基观测形成有益的补充, 但观测视场受到月球遮挡, 并且发射部署代价比较大, 也面临着能源供应、通信等问题.

地月系统 L4/L5 点观测系统, 具有受地月遮挡影响小、视场开阔等优点, 而且发射部署、通信、能源代价小, 可以利用探月工程现有成熟技术.

因此建议优先发展 L4/L5 点轨道观测系统: 在地月空间稳定的三角平动点, 部署两台空间红外望远镜, 与地基观测系统配合, 实现对近地小行星的监测预警.

在经济条件允许的情况下, 可以依托月球国际科研站工程, 在月球南极/北极等区域部署红外望远镜, 与地基和 L4/L5 点轨道观测系统开展协同观测, 提升对近地小行星的监测密度, 缩短天区重访周期, 提升监测预警的时效性.

4 近地小行星监测能力分析

考虑小行星的反射和辐射信号、天空背景噪声、探测器噪声、读出噪声、仪器自身辐射等仿真参数, 如表 2 所示, 根据参考文献 [23] 中的计算公式, 可以计算望远镜对小行星的信噪比, 进一步可以计算出望远镜对应的观测能力等高线图, 如图 8 所示.

由表 3 和 4 和图 8 可以看出, 红外望远镜对低太阳相位角 (更靠近太阳天区) 观测具有优势, 可对地基盲区起到较好的弥补作用. 需要说明的是, 在本文仿真中, 小行星的温度模型采用快速自转小行星模型, 后续还需要根据不同的温度模型进行深化研究.

5 在轨处置兼顾能力分析

等效直径为 20~50 米级的小尺寸近地小行星数量高达数百万颗, 难以在短时间内完成小尺寸的近地小行星的完全编目. 对这类小行星, 可以利用地月空间观测系统实施短临告警, 在发现小尺寸小行星飞临地球前, 及时告警, 为地面疏散人口财产, 降低损失提供提前预警信息.

鉴于直径 20~50 米级近地小行星, 可引发城镇至大型城市级威胁, 疏散所需的时间成本较高, 并且很多财产和基础设施是无法疏散的, 因此如果有一定预警时间, 在轨处置仍然是优先选项. 这类小行星发现时间较短, 往往只有 7 天甚至更短的预警时间. 如果从地面发射撞击器, 是无法具备完整的发射准备时间的. 因此, 利用天基部署的撞击器将是可能选项.

表 2 观测能力仿真参数

Table 2 Simulation parameters for observation capability analysis

Parameter	Value
Telescope aperture	500 mm
Focal length	1 m
Optical efficiency	0.8
Wavelength band	8~12 μm
Quantum efficiency	0.6
Dark current noise	4000 e/s/pixel @8~12 μm
Instrument self radiation noise	294 e/s/pixel@8~13 μm
Readout noise	30e ⁻ RMS@500 kHz
Inverse gain	10 ⁵ /2 ¹⁴
Pixel size	18 μm
Asteroid temperature	Fast rotator model
Asteroid emission rate	0.9
Asteroid albedo	0.15
Integration time	180
SNR	6

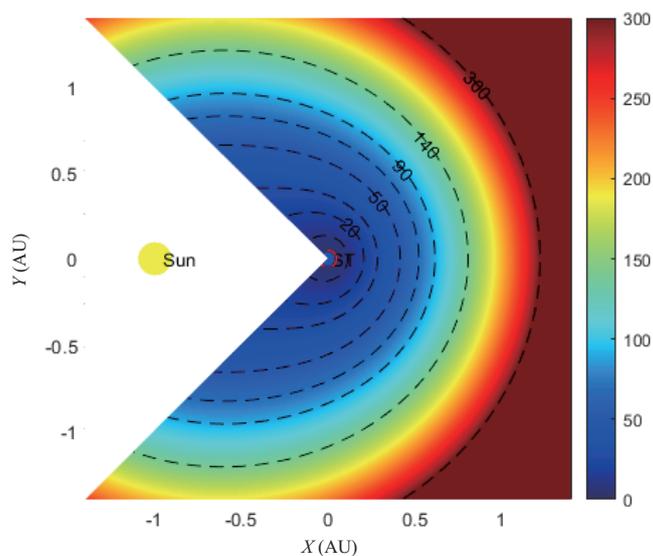


图 8 (网络版彩图) 观测能力等高线

Figure 8 (Color online) Observation capacity contour

地月观测系统可以在日常开展近地小行星观测, 在应急时刻, 可以转变工作模式, 改变轨道以撞击来袭的近地小行星, 在小行星撞击地球之前将小行星的轨道偏转或者摧毁^[25].

考虑到轨道偏转需要的作用时间较长, 在 7 天左右的预警时间条件下, 预期可以偏转的距离将微乎其微. 而小行星距离地球太近, 无法使用颇具争议的核爆手段. 利用动能撞击器, 破坏小行星结构, 摧毁或者撞裂小行星以减缓灾害, 将是一种值得探索的手段.

表 3 观测能力仿真结果 (积分时间 180 秒)

Table 3 Simulation results of observation capability (integration time: 180 s)

Asteroid diameter (m)	Limited detection range corresponding to different solar phase angles (10 thousand km)		
	45°	90°	180°
20	5250	3850	3140
50	14000	8400	6260
90	19600	12600	9250
140	23800	16400	12000

表 4 观测能力仿真结果 (积分时间 30 秒)

Table 4 Simulation results of observation capability (integration time: 30 s)

Asteroid diameter (m)	Limited detection range corresponding to different solar phase angles (10 thousand km)		
	45°	90°	180°
20	2700	2300	1950
50	8300	5350	4200
90	14300	8600	6400
140	18500	11750	8600

关于如何破坏小行星的结构的研究由来已久, Holsapple 等^[26]在 2019 年综述了摧毁小行星结构的相关研究, 并给出了摧毁不同直径小行星所需的能量密度. 参考文献 [26] 的能量密度估算, 可以利用吨级撞击器使得直径约 30 米的岩石类小行星产生明显的裂痕, 甚至使得小行星分裂为碎块, 从而使其在高层大气中解体, 减缓小行星撞击危害, 为拦截摧毁小行星奠定了理论基础. 然而实际上, 破坏小行星的结构是复杂的, 需要综合小行星特性开展数值仿真与试验研究才能确定破坏小行星结构所需的能量密度.

小行星撞击地球, 必然会经过地月空间, 如果在地月系统 L3, L4, L5 点部署拦截器, 则可以守株待兔, 对来袭小行星进行动能拦截, 如图 9 所示. 通过部署多个拦截器, 还能进行协同拦截, 提供撞击的能量密度, 增加拦截成功率.

假设撞击器驻守在 L3, L4 和 L5 点, 具有 1 km/s 的速度增量, 拦截时间为 5 天, 通过轨道动力学仿真, 可以计算出撞击器的变轨可达区域, 如图 10 所示. 可以看出, 如果在地月系统 L3, L4 和 L5 点部署 3 个撞击器, 将具备拦截各个方向来袭小行星的能力, 可以形成约 2 倍地月距离, 约 80 万公里的防御圈. 拦截器可以对进入防御圈内的小天体进行拦截.

可以看出, 增加地月系统 L3 点轨道后, 可以实现对不同方向飞来小行星的拦截, 能够增加拦截的方向完备性. 因此, 从处置完备性的角度, 在 L3 点轨道增加一颗卫星是必要的. L3 点卫星也可以平时做监测预警, 应急时刻去拦截小行星. 但其需要携带更多的燃料进行轨道维持.

“观处一体”对观测星的设计提出了更高要求, 要求飞行器同时具备广域高灵敏监测能力和超高速撞击能力, 其工程实施代价和技术方案尚需深化论证.

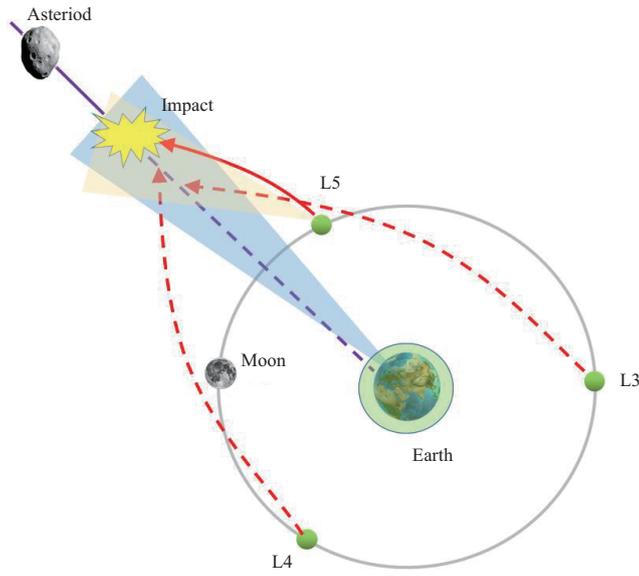


图 9 (网络版彩图) 近地小行星拦截示意图

Figure 9 (Color online) Schematic diagram of near-Earth asteroid interception

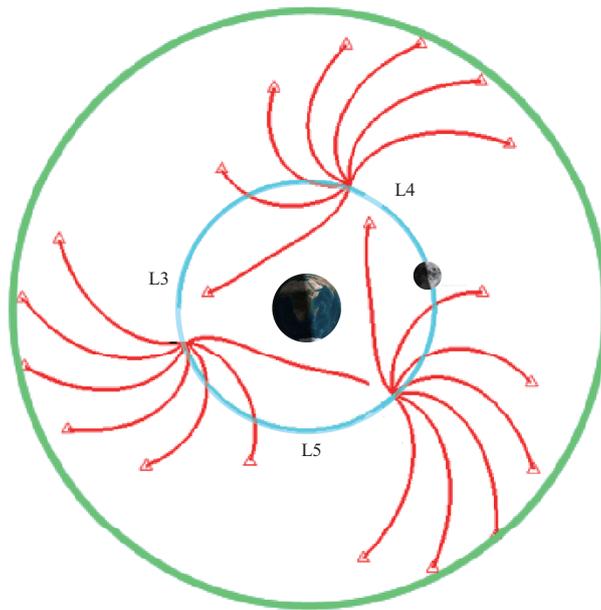


图 10 (网络版彩图) 地月平动点拦截器防御圈

Figure 10 (Color online) Reachable range of Earth-Moon libration point interceptors

6 拓展科学应用

6.1 空间红外天文

红外望远镜能够对行星际空间进行巡天, 对星际有机分子、系外行星、恒星演化等进行探测开展

红外天文研究.

6.2 空间物理和空间天气

通过搭载空间物理场探测载荷, 能够对地月空间的空间物理现象进行探测, 揭示大尺度空间物理场的变化规律, 为认识地月空间环境提供支持, 为地月空间探测和载人登月提供空间天气预警服务.

6.3 导航通信

在地月 L4/L5 点可以搭载高稳定时钟, 作为空间时间基准; 搭载导航载荷, 补充提升北斗导航系统能力; 搭载通信转发载荷, 实现地月空间通信中继能力. 构成大基线的天基 VLBI 系统, 提升深空探测测控通信支持能力, 同时也可应用于射电天文研究.

6.4 空间态势感知

在地月 L4/L5 点的望远镜对地球同步轨道也具有感知能力, 能够实现对地球同步轨道带的编目普查, 提升对同步轨道带高价值空间资产的保护能力.

7 国际合作实施建议

地月空间小行星观测系统能够与现有地基观测系统形成良好的互补关系, 对覆盖地基光学观测盲区、延长观测弧段、改善观测几何等具有重要意义, 未来也能够与地球领航轨道^[24]、日地 L1 点^[27]、DRO 轨道的天基观测系统形成有效配合, 在空间天文、空间物理、导航通信和空间态势感知等领域也具有较好的潜在应用前景, 未来有望建设成地月空间综合观测系统.

7.1 合作思路

未来可依托月球科研站建设、载人月球探测、空间科学等重大航天工程, 充分利用国际合作资源, 推动以我为主、多方共建、成果共享的国际合作计划, 分阶段建成地月空间综合观测系统.

- 任务层次合作: 可多方分别发射地月 L4 和 L5 点观测任务, 以及在月球不同地理位置部署望远镜, 共同构成地月空间联合观测系统;
- 载荷层次合作: 以我国为主完成空间观测系统的发射部署, 其他国家可提供载荷, 参与完成地月空间观测系统的建设.
- 器件层次合作: 国外提供红外探测器等关键载荷模块, 我国完成载荷的系统集成、研制、发射和组网部署.
- 数据共享与联合科学研究: 建立科学研究联盟, 实现数据共享, 开展联合科学研究, 推动重大成果产出.

7.2 建设路线图

按照“结合重大工程建设、先易后难、稳步实施、协同组网”的原则, 稳步推进地月空间小行星观测系统的建设.

第 1 步, 推动地月系统 L4/L5 点试验卫星任务, 开展轨道运行控制、观测能力、观测模式等技术验证, 开展小行星观测试验, 在任务末期开展小行星动能撞击试验.

第2步,根据轨道观测试验结果,适时启动地月系统L4/L5点轨道观测系统建设,形成业务化运行的地月空间小行星观测系统;在适当时候,补充L3点轨道观测系统建设,从此兼顾监测预警与在轨处置的天基系统布局方案.

第3步,依托国际月球科研站,择机在南极或者北极建设月表红外望远镜,开展月表小行星观测试验.

第4步,适时拓展空间天文、空间物理、通信导航和空间态势感知等多用途科学试验,形成完整的地月空间观测系统.

8 结论

本文针对地基光学望远镜观测网络现有的不足,分析了地月空间观测系统与地基光学望远镜观测网络的互补和协同作用,提出了在地月系统L4/L5点部署红外望远镜观测网络,用于近地小行星观测,并初步分析了望远镜观测能力,进一步展望了相关拓展应用和国际合作设想.分析表明,地月空间望远镜观测系统能够与地基望远镜观测网络在观测盲区、观测波段、连续观测时间等方面有效互补,能够继承月球探测工程的技术基础,拓展科学应用多,具有良好的发展前景,同时可与地球领航轨道、类金星轨道等深空轨道构成互补,共同形成近地小行星天基监测体系.未来可充分利用国际合作资源,逐步发展地月空间近地小行星观测系统,适时开展空间天文、空间物理、导航通信和空间态势感知等拓展科学试验.本文开展的研究属于概念设计阶段,在载荷能力分析、观测模式设计、在轨处置可兼顾性、破坏小行星结构等方面还需进一步深化.

致谢 感谢北京空间机电研究所刘志敏、中国科学院上海技术物理研究所孙海彬关于红外载荷的讨论.

参考文献

- 1 Brown P G, Assink J D, Astiz L, et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 2013, 503: 238–241
- 2 Micheli M, Wainscoat R J, Denneau L. Detectability of Chelyabinsk-like impactors with Pan-STARRS. *Icarus*, 2018, 303: 265–272
- 3 O’Keefe J D, Ahrens T J. Impact production of CO₂ by the Cretaceous/Tertiary extinction bolide and the resultant heating of the Earth. *Nature*, 1989, 338: 247–249
- 4 Granvik M, Morbidelli A, Jedicke R, et al. Debaised orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. *Icarus*, 2018, 312: 181–207
- 5 Vereš P, Jedicke R, Wainscoat R, et al. Detection of Earth-impacting asteroids with the next generation all-sky surveys. *Icarus*, 2009, 203: 472–485
- 6 Emel’yanenko V V, Popova O P, Chugai N N, et al. Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event (February 15, 2013). *Sol Syst Res*, 2013, 47: 240–254
- 7 Wie B, Zimmerman B, Lyzhoft J, et al. Planetary defense mission concepts for disrupting/pulverizing hazardous asteroids with short warning time. *Astrodynamics*, 2017, 1: 3–21
- 8 Jedicke R, Morbidelli A, Spahr T, et al. Earth and space-based NEO survey simulations: prospects for achieving the spaceguard goal. *Icarus*, 2003, 161: 17–33
- 9 Coder R D, Wetterer C J, Hamada K M, et al. Inferring active control mode of the hubble space telescope using unresolved imagery. *J Guidance Control Dyn*, 2018, 41: 164–170
- 10 Pei Z Y, Liu J Z, Wang Q, et al. Overview of Lunar exploration and International Lunar Research Station. *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2577–2586 [裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站. *科学通报*, 2020, 65:

- 2577–2586]
- 11 Mainzer A, Grav T, Bauer J, et al. Survey simulations of a new near-Earth asteroid detection system. *Astron J*, 2015, 149: 172–189
 - 12 Li Z-W, Zhang T, Zhang N, et al. High precision orientation of faint space objects. *Optics Precision Eng*, 2015, 23: 2627–2634 [李振伟, 张涛, 张楠, 等. 暗弱空间目标的高精度定位. *光学精密工程*, 2015, 23: 2627–2634]
 - 13 Lyzhof J, Basart J, Wie B. A new terminal guidance sensor system for asteroid intercept or rendezvous missions. *Acta Astronaut*, 2016, 119: 147–159
 - 14 Wang S-H, Hu M-F, Chen Z-P. Noise analysis and the study of SNR model on the astronomical CCD camera. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28: 731–734 [王书宏, 胡谋法, 陈曾平. 天文 CCD 相机的噪声分析与信噪比模型的研究. *半导体光电*, 2007, 28: 731–734]
 - 15 Sun C M, Yuan Y, Zhao F. Analysis of SNR for space-based imaging detection of space object. *Infrared Laser Eng*, 2015, 44: 1654–1659 [孙成明, 袁艳, 赵飞. 空间目标天基成像探测信噪比分析. *红外与激光工程*, 2015, 44: 1654–1659]
 - 16 Michelsen R, Haack H, Andersen A C, et al. Asteroid and NEA detection models. In: *Proceedings of International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 2003
 - 17 Gong Z Z, Li M, Chen C, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization. *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 346–372 [龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术. *科学通报*, 2020, 65: 346–372]
 - 18 Wang X B, Huang J N, Wang A, et al. Photometry studies of physical properties for Near-Earth asteroids. *Optics Precision Eng*, 2020, 28: 2549–2562 [王晓彬, 黄佳宁, 王翱, 等. 近地小行星基本物理性质的测光研究. *光学精密工程*, 2020, 28: 2549–2562]
 - 19 Wang X-H, Li J-F, Wang Y-R. Orbit determination and precision analysis of space object with space-based camera. *Optics Precision Eng*, 2013, 21: 1394–1403 [王秀红, 李俊峰, 王彦荣. 天基照相机监测空间目标定轨方法及精度分析. *光学精密工程*, 2013, 21: 1394–1403]
 - 20 Wang X. Study on the precise orbit elements determination of low-orbital space target based on multi-arc measured data. Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 [王翔. 基于多弧段测量数据的低轨空间目标精确定轨方法研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017]
 - 21 Hou X Y, Liu L. On quasi-periodic motions around the triangular libration points of the real Earth-Moon system. *Celest Mech Dyn Astr*, 2010, 108: 301–313
 - 22 Grav T, Mainzer A, Sonnett S, et al. The NEO Surveillance Mission (NEOSM) Survey Simulations. In: *Proceedings of AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, 2020. 52: 208-03
 - 23 Wang X T, Zheng J H, Li M T. Study on observation simulation for space-based potentially hazardous asteroids warning mission on Earth trailing heliocentric orbit. *Optics Precision Eng*, 2020, 28: 2563–2571 [王新涛, 郑建华, 李明涛. 地球公转轨道危地小行星天基光学监测仿真研究. *光学精密工程*, 2020, 28: 2563–2571]
 - 24 Wang X T, Zheng J H, Li M T, et al. Warning of asteroids approaching Earth from the sunward direction using two Earth-leading heliocentric orbiting telescopes. *Icarus*, 2022, 377: 114906
 - 25 Ma P B, Baoyin H X. Research status of the near-Earth asteroids' hazard and mitigation. *J Deep Space Exploration*, 2016, 3: 10–17 [马鹏斌, 宝音贺西. 近地小行星威胁与防御研究现状. *深空探测学报*, 2016, 3: 10–17]
 - 26 Holsapple K A, Housen K R. The catastrophic disruptions of asteroids: History, features, new constraints and interpretations. *Planet Space Sci*, 2019, 179: 104724
 - 27 Dunham D W, Reitsema H J, Lu E, et al. A concept for providing warning of earth impacts by small asteroids. *Sol Syst Res*, 2013, 47: 315–324

Near-Earth asteroids observation system in cislunar space

Yuhua TANG¹, Weiren WU^{1,2}, Mingtao LI^{3,4*}, Siyuan HAN⁵, Haiming QI⁵, Xintao WANG^{3,4}, Qi ZHOU³, Zhe ZHANG¹, Shaojie TIAN¹, Meng SHI¹ & Xiao JIN¹

1. *Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100080, China;*
2. *Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100080, China;*
3. *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
5. *China National Space Administration, Beijing 100048, China*

* Corresponding author. E-mail: limingtao@nssc.ac.cn

Abstract One major threat to humanity is the impact of near-Earth asteroids (NEAs). Planetary defense is a shared responsibility of all human beings to protect our home planet. For planetary defense, we must first set up an asteroid monitoring system. At the moment, asteroid monitoring mostly relies on ground-based optical systems. Because of the limitations of optical observation conditions, asteroids from the sunward direction during the daytime cannot be detected and tracked in time during the day. Due to its specific location advantages, an appropriate space-based monitoring system would be a useful supplement to the ground-based observation system. In this paper, the problems and shortcomings of the ground-based monitoring system, as well as the benefits and drawbacks of space-based telescopes, were summarized. The mission concept of space-based telescopes for NEAs observation based on the L4 and L5 point orbits of an Earth-Moon system is proposed. Furthermore, suggestions for international cooperation are made. This research will be useful in the future when building the NEAs monitoring system.

Keywords cislunar space, planetary defense, near-Earth asteroids, Lagrange point orbit, infrared telescope