近地天体防御中的测控挑战

李海涛
（北京跟踪与通信技术研究所，北京 100094）

摘　要：结合未来实施近地天体防御的现实需求，从测控系统面临的新需求和新问题入手，分析了近地天体防御任务与常规小行星探测任务的不同及其对测控系统的任务需求，有针对性地研究了近地天体的轨道测量与确定、提高天地数据传输能力、地面快速数据处理、航天器在轨软件重构、多部门之间的高效指挥控制与协同等方面的技术挑战；最后，针对上述五个方面的挑战，从全面加强地基深空测控网能力、体系性提升小行星防御任务中心能力、构建多部门联合的高效指挥协同机制三个方向，系统性给出了解决途径的相关建议。

关键词：近地天体防御；深空测控系统；面临挑战；解决途径

中图分类号：V55　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9287(2026)03-0225-10

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20250129

引用格式：李海涛. 近地天体防御中的测控挑战[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（3）：225-234.

Reference format: LI H T. Challenges of Tracking, Telemetry, and Command（TT&C）in Near-Earth Object（NEO）defense[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（3）：225-234.

引　言

近地天体（Near-Earth Objects，NEOs）是指轨道与地球轨道相交或接近的小行星和彗星，它们是太阳系内对地球最具潜在威胁的天体种类之一。NEOs 容易受地球引力摄动而频繁改变轨道，甚至撞击地球。其中，日心轨道与地球轨道的最近距离0.05 AU 以内，并且直径大于140 m（足以穿透大气层，并造成较大伤害）的NEOs被认为是撞击地球的潜在威胁近地天体（Potentially Hazardous Near-Earth Objects，PHNEOs）[1]。据美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory，JPL）所属近地天体研究中心（Center for NEO Studies，CNEOS）统计，截至 2025 年 10月25日，人类共发现 39 771 颗近地天体，自1980年以来已探测到的近地天体数目曲线如图1所示[2]。而目前近地天体中完成编目的数量只占真实数量的约1%，还有大量近地天体尚未实现轨道编目。

根据NASA的报告[3]，每天有约100多t的陨石轰击地球。尽管这些陨石中的绝大多数在到达地球表面之前就已经解体，但直径大于100 m的陨石可能会撞击地面，并对撞击点周边造成破坏。此外，即使是进入地球大气层较小的陨石在到达地表之前就已经解体，也会造成严重的破坏。2013 年 2 月 15 日，一颗直径约 18 m 的小行星在俄罗斯车里雅宾斯克（Chelyabinsk）上空约23.34 km处爆炸，其威力相当于 30 枚原子弹。科学家们估计约有9 000～13 000 lb（1 lb = 0.453 592 370 380 38 kg）的车里雅宾斯克陨石碎片坠落到地球上[4]。这是自 1908 年西伯利亚通古斯卡陨石撞击事件以来地球上最大的一次陨石空中爆炸，在一个人口超过100万的地区造成了一场自然灾害。

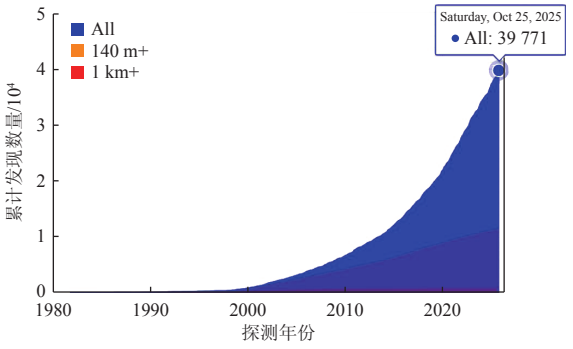


图 1　自1980年以来已探测到的近地小行星数目曲线[3]
Fig. 1　Cumulative number of near-Earth asteroids discovered by year since 1980[3]

近地天体撞击地球的概率虽然很小，但一旦发生，其后果可能会很严重、社会影响很大，甚至可能引发区域性乃至全球性、毁灭性的灾害[5]。因此，近地天体威胁是全人类共同的风险，需要进行防御监测和必要的在轨处置，以避免灾难发生。在近地天体防御任务中，要对有撞击地球风险的近地天体实施在轨处

收稿日期：2025-11-11　修回日期：2026-01-20

置，改变其运行轨道，从而避免灾害的发生或者减小灾害所带来的损失。与常规的小行星探测类深空任务相比，其任务实施中诸多的不确定性因素、复杂的飞行控制以及高精度的轨道测量与确定等要求，对保障防御任务实施的深空测控系统带来了诸多新的挑战。

1 近地天体防御中的测控系统

1.1 近地天体防御任务与小行星探测任务的不同

1.1.1 近地天体参数不确定性与飞行控制复杂性

常规小天体（小行星或彗星）探测任务主要是为了对小天体实施科学探测，而近地天体防御任务的目标则是要改变有撞击地球风险小行星的轨道或将其摧毁，以避免其与地球发生撞击。通常，大部分这类近地小行星被发现的时间较晚，人类对其观测时间有限，其轨道、质量、物质构成等基本参数相对缺乏。这些不确定性给近地天体防御任务的实施带来了新的挑战。这就导致在近地天体防御任务的初始阶段，飞行轨道设计是初步的、不精准的，需要在飞行过程中不断进行修正，以确保航天器能够与目标天体准确交会。同时，实施撞击的策略需要等航天器飞临目标天体附近时，根据近距离探测获得的目标特性才能作出最终决策。因此，该类任务的飞行控制复杂度和技术难度都远比以科学探测为目标的常规小行星探测任务更高。

1.1.2 任务急迫性与准备不充分性

近地天体撞击地球的预警时间通常极为有限，从发现有撞击风险的目标天体到实施防御任务，可能仅有数月甚至数周（目前期望预警距离是0.5 AU，即近地天体距地球约7 500万 km，1 AU约1.49亿km[6]）。在如此紧迫的时间内，要完成任务规划（制定出详细的撞击策略，包括选择适用的处置航天器、确定最佳的发射窗口和最优的任务轨道设计）、航天器研制、发射以及地面测控任务准备等一系列工作，面临着巨大的挑战。任务急迫性带来的准备不充分，也增加了任务实施过程中的不确定性和风险。

1.1.3 在轨处置手段与指挥控制等级变化

根据近地天体的类型和威胁程度不同，在轨处置的手段也是多种多样，有动能撞击、引力拖车、核爆等多种方式[7]。不同方式在轨处置手段对地面指挥控制的要求差异巨大，指挥控制等级也需要随之调整。动能撞击任务相对较为简单，主要关注撞击器的精确导航和撞击瞬间的精确控制，其指挥控制等级与常规小天体探测任务相同，由任务飞行控制中心负责；而核爆处置方式由于涉及到巨大的能量释放和复杂的物理过程，需要更为严格的指挥控制流程，包括对核装置的使用授权和安全管理、引爆时机的精确把握等，此类任务需要得到有核国家的最高决策层的授权，甚至可能还需要联合国层面的授权或协商一致。

1.1.4 快速评估与轨道测定要求

在实施防御处置后，需要在极短的时间内对处置效果进行评估，以确定是否需要实施二次撞击或采取其它补救措施。这就要求能够快速准确地测定目标天体的轨道变化情况，因此需要结合光学、雷达、无线电干涉等多种观测手段获取多源测量数据，实施快速测定轨[8]。特别是，需要利用地基行星雷达对目标天体进行高精度主动测量，以实现对处置后小行星轨道的快速精确确定，满足处置效果快速评估的要求。

1.2 近地天体防御任务中的深空测控系统

在近地天体防御任务中，深空测控系统扮演着至关重要的角色。深空测控系统的核心是深空测控网，是特指专门用于深空航天器测控和数据传输的专用测控网，其特点是配有大口径抛物面天线、大功率发射机、极高灵敏度接收系统、信号处理系统以及高精度高稳定度时间频率系统，能完成对距离地球200万km以远深空航天器的测控任务[9]。深空测控网利用各个地面深空测控站上行和下行无线链路与深空航天器上的测控应答机相互配合，即可实现对深空航天器的天地通信和跟踪测量功能，还可独立完成行星雷达、无线电科学、射电天文等科学应用功能[10-11]，如图2所示。

1.2.1 监测预警中的深空测控系统

在近地天体防御任务的监测预警阶段，通常要利用地基行星雷达对目标天体实施主动探测，以精确确定目标天体轨道并测算其撞击地球的概率，为近地天体防御任务实施提供支撑。从国际上已有的行星雷达系统的发展现状来看，依托深空测控地面站或者是射电天文望远镜的大口径天线，配置大功率连续波发射机来构建小行星探测雷达是有效的技术途径，而且还可以与其它具备接收能力的大口径天线构成双/多基地雷达系统，从而进一步提高系统的探测能力[12]。典型的行星雷达系统就是美国的戈尔德斯通太阳系雷达，位于加利福尼亚州南部的莫哈韦沙漠，由雷达天线、X频段发射机和低噪声接收机组成，配合信号处理单元进行地基雷达探测。雷达天线与深空网（Deep Space Network，DSN）戈尔德斯通深空通信综合设施（Goldstone Deep Space Communications Complex）的DSS-14深空站共用70 m天线，其工作波长为 3.5 cm、发射功率约为 500 kW[13]，可以探测距离为 1.5×10^7 km、直径约 1 km 以上的小行星[14]。

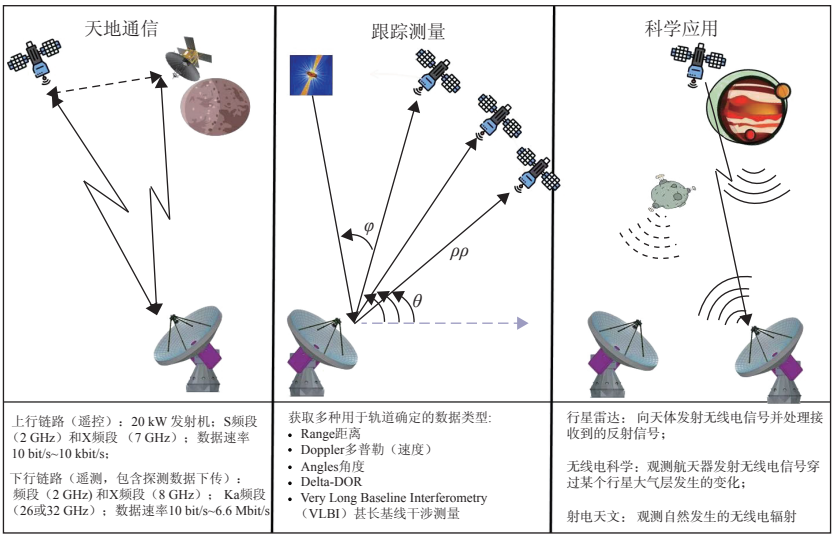


图 2　深空测控网的主要功能[10-11]

Fig. 2　Main functions of the deep space TT&C network[10-11]

地基行星雷达系统具备减小近地天体轨道误差和表征其物理特征的独特能力[15]。地基雷达作为主动探测设备，可观测大的空域，具有全天候工作的优点：不仅可以实现对近地小行星快速搜索捕获和精密轨道测量，进而研究其动力学特性和评估潜在撞击地球的风险，还可以观测小行星的形状和表面性质[16]。而雷达获取的小行星径向距离和速度数据与光学测量数据相结合，可以实现的小行星轨道预报精度相比单独使用光学测量数据提高数千倍[17]。通过对雷达测量数据和光学测量数据的融合处理，可以实现对近地天体轨道参数的快速更新。通过对近地天体的精密轨道确定，还可以判断其是否对地球构成潜在撞击威胁，为后续的处置决策提供关键的依据。

1.2.2　决策处置中的深空测控系统

一旦确定某个近地天体对地球存在撞击威胁，近地天体防御就会进入决策处置阶段。对于动能撞击器、引力拖车等防御处置航天器，深空测控系统需要为其提供精确的轨道测量、确定和控制，确保这些航天器能够与目标天体精确交会，并控制航天器准确命中目标。在这一过程中，深空测控系统是实施防御处置的关键纽带。通过深空测控网建立与航天器之间的测控通信链路，将地面指令准确无误地发送到航天器，接收实时回传的航天器状态信息。同时，持续测量并确定航天器的飞行轨道，并进行轨道修正控制，以确保航天器最终能够与目标天体交会，按照预定计划对近地天体进行直接撞击或轨道偏转等处置操作。同时，地面深空测控网还将持续对目标天体进行雷达主动测量，不断为目标天体的轨道精化提供测距测速和干涉测角数据，为实施最终的处置奠定基础。

2　近地天体防御中的测控挑战

2.1　近地天体轨道测量与确定挑战

近地天体防御任务中，近地天体观测数据的稀疏性与不确定性是首要挑战。如近地小行星的半长轴范围为0.983～1.3 AU（接近地球的彗星半长轴远远大于近地小行星，甚至是双曲线轨道），对如此长周期目标天体进行观测定轨而言，在短期内所能够获取的观测数据相对于整个轨道周期是非常稀疏的。尤其是被发现不久的有威胁近地天体，即使是持续对其进行观测，在其撞击地球之前所能够获取的测量数据也只能算是短弧段测轨，这使得近地天体初轨确定的约束性很差。根据研究，当观测弧长小于轨道周期的 1% 时，近地小行星的轨道根数误差对观测时间跨度的变化敏感度不高，轨道根数误差主要依赖于观测精度等因素[18-19]。

由于近地天体会受到来自大天体（如太阳、木星、土星或地球等）的引力摄动，会影响小行星运行轨道的演化。而如太阳光压、雅尔可夫斯基效应及YORP（Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack）效应等非引力因素的长期作用，也会造成小行星轨道的改变[20-21]。

2.2　提高天地数据传输能力挑战

通常在近地天体防御任务初期，对目标天体的特性是不完全掌握的，需要在探测器抵近进行详查后才能确定其特征参数，以支撑决策在轨处置方式，这就需要探测器快速下传探测器上各类传感器获取的探测

数据，如高分辨率的光学、红外图像以及多光谱探测、雷达探测数据等，其中包含了对小行星表面地形、结构等详细的探测信息，数据量庞大[22-23]。特别是在撞击处置后，还需要实时传输大量的观测数据用于效果评估。

在深空环境中，背景辐射和太阳活动等因素也会对数千万km的数据传输路径造成干扰。特别是，当航天器运行至太阳位于航天器与地球之间的空间位置，太阳活动剧烈时会释放出大量的高能粒子和强烈的电磁辐射，测控信号需要穿过浓密的日冕等离子体区域，会引发信号衰减、时延波动与幅度/相位闪烁，从而降低接收信号的信噪比、引起测距信号抖动，严重时甚至会导致链路中断，从而影响数据传输和测量数据的准确性和可靠性。在这种场景下，Ka 频段的信号退化量比 X 频段低约 8 dB，可以直接提升测控信号的稳定性[24]。在“天问一号”首次火星探测任务中，正处在第25个太阳活动周期，特别是AR3664活动区爆发的日冕物质抛射事件期间，行星际等离子体浓度变化对“天问一号”探测器的X频段测距数据系统差解算造成了约40 m的扰动[25]。

2.3 地面快速数据处理挑战

近地天体防御任务中，抵近目标天体后探测获取光学图像、红外光谱、雷达探测等海量数据，高速下传到地面后，需要在短时间内对这些数据进行处理分析，提取目标特性相关的信息，用于决策后续的在轨处置操作，这些对地面数据处理系统的计算能力和算法效率提出了新的更高的要求。

高分辨率的光学图像包含着小行星表面丰富的纹理、地形和地质信息。通常，这类图像的数据量巨大，一幅典型光学图像数据量可能达到数10 GB 甚至更高。对这些图像进行处理，需要进行图像增强、特征提取、目标识别等一系列复杂操作。由于光学成像易受小行星自转导致的太阳高度角变化大引起的阴影遮挡，雷达测距小行星受表面粗糙度干扰，导致地形建模精度受限。这些都需要大量的计算资源和复杂的算法支持，传统的数据处理系统难以在短时间内完成如此庞大的数据处理任务。不同物质在红外波段具有独特的吸收和发射光谱，通过分析红外光谱数据，能够识别出小行星表面的矿物种类、水冰含量等信息。空间风化会导致小行星矿物光谱吸收特征减弱，且小行星表面可能存在陨石撞击残留的外来物质，会导致光谱类型与内部成分不匹配的情况。因此，红外光谱数据的处理所采用的先进光谱分析算法，计算复杂度高，对计算资源的需求大，如何在有限的时间内完成对大量红外光谱数据的准确分析，是地面数据处理系统需要解决的难题。

2.4 航天器在轨软件重构挑战

在近地天体防御任务中，由于时间紧迫，从发现潜在威胁近地天体到制定并实施防御策略的时间窗口周期非常狭窄。在任务准备阶段，由于对目标天体的了解有限，通常只能基于初步的观测数据制定航天器的工作模式和软件功能。随着探测器逐渐接近目标天体，通过近距离观测和探测，会获取到关于目标天体更详细、更准确的特性信息，如目标天体的形状、密度分布、表面物质成分、自旋状态等。这些新信息可能会导致原有的航天器工作模式不再适用，需要对其进行调整和优化，这就不可避免地涉及到航天器软件功能的重构。

航天器在轨软件重构是指航天器在运行过程中，能够根据任务需求或环境变化动态调整其软件功能的能力。软件重构并非简单的代码修改，而是一个复杂的系统工程。它需要对航天器的整体架构、功能模块、数据处理流程等进行全面的评估和调整。在重构过程中，要确保软件的稳定性和可靠性，避免引入新的漏洞和错误。航天器软件架构需求高度复杂，涵盖了硬件接口、通信协议、任务分配、数据管理等多个方面，必须确保系统的可靠性和安全性。面临深空极端环境的挑战，需要考虑软件的抗辐射、高低温适应性等问题。传统的固化软件架构难以满足动态重构的需求，需要采用模块化、可扩展的软件架构设计。

2.5 高效指挥控制与协同挑战

近地天体防御任务属于重大突发紧急情况，为了能够及时有效完成在轨处置和灾害防护，必须要建立高效的指挥控制与协同机制。通常，需要建立统一的指挥中心，负责协调各个部门和环节之间的工作。该指挥中心应具备实时监控任务进展、快速决策和下达指令的能力；还需要建立完善的信息共享平台，确保各个部门之间能够及时、准确地传递信息，实现数据的实时共享和交互；需要明确任务流程和各部门的责任分工，避免出现职责不清、工作延误现象。

国际合作机制的复杂性进一步增加了协调难度。国际小行星预警网络（International Asteroid Warning Network，IAWN）与太空任务规划咨询小组（Space Mission Planning Advisory Group，SMPAG）构成联合国主导的双层机制。IAWN 负责数据共享与风险评估，SMPAG是国际上在空间撞击灾害应对领域的重要协调机制，其核心目标是整合各国航天资源与民防力量，提升全球应对近地天体撞击地球风险的能力[26]，

2013 年俄罗斯车里雅宾斯克陨石撞击事件发生后，全球已有30余国加入该体系，但在涉及军事敏感技术的共享方面仍存在障碍。

近地天体防御任务是一个系统性很强的任务，除了传统航天任务的几大系统外，还包括在轨处置效果快速评估、后续处置措施决策、撞击灾害预警与应急处置等环节，会涉及国家层面多个部门，如航天部门负责任务的具体实施，包括航天器的研制、发射和测控等；应急管理部门则要制定应对可能发生的撞击灾害的应急预案，在撞击发生时能够迅速采取措施，减少灾害损失。因此，需要建立国家层面高效指挥协同机制。

3　思考与展望

3.1　全面加强地基深空测控网能力

3.1.1　提升深空测控频段

全面提升深空测控网频段至Ka频段，在原有35 m深空测控设备Ka频段接收（31 800～32 300 MHz）能力的基础上，扩展Ka频段发射（34 200～34 700 MHz）能力，就可实现上下行链路Ka频段全功能测控能力，将深空测控无线电测量系统从X频段全面升级至Ka频段。Ka频段测控不但能够提高上下行测控数据速率，还可以实现更高的测量精度。采用频率比X频段更高的Ka频段，其波长更短测量精度更高，还可以大幅度降低地球电离层、行星际空间等离子区以及太阳风的影响，进一步提高深空任务测速精度。目前，欧洲航天局（European Space Agency，ESA）深空航天器的双向Ka频段测速精度已经从X频段的0.1 mm/s提升至0.029 mm/s[27]。

3.1.2　扩大甚长基线干涉测量范围

针对在小行星防御任务中短弧段测定轨的迫切需求，如果可以提供连续的高精度甚长基线干涉测量数据，则可以进一步提高定轨精度。目前，中国深空测控网均具备国内8～10 h的连续甚长基线干涉测量（Very Long Baseline Interferometry，VLBI）弧段，最长的基线长度4 300 km。通过在西北非、加勒比地区、东南亚，以及南太平洋中部建设具有大口径天线的干涉测量台站，与国内的喀什深空站、纳米比亚站、阿根廷深空站组成多天线干涉测量基线，能够将国内的甚长基线干涉测量弧段增加到16~18 h。能够大幅度提升实施小行星防御任务航天器实施轨道机动后，短弧段轨道测量适应性和测定轨精度。也可以采用国际合作的方式，与加勒比、西北非、南部欧洲和南部非洲地区的射电天文望远镜或深空测控设备联合开展对深空航天器的联合干涉测量。

3.1.3　增强深空站上下行链路能力

为了满足小行星防御任务高速数据传输的需求，需要尽可能提高深空站上下行链路能力。在增强上行发射能力方面，2012年中国自行研制S频段和X频段10 kW速调管发射机的基础上，于2017年又实验成功了X频段50 kW连续波速调管高功放[27]，各项技术指标又达到了新的高度，接近世界先进水平（NASA 深空网X频段最大发射功率为80 kW）[28]，已经具备开发100 kW级发射机的基础。在近地天体防御任务中，至少每个深空站需要升级一套100 kW量级的X频段发射机，以提升深空测控网的上行发射能力一个数量级。同时，还需要进一步开展上行组阵技术攻关，充分利用发射信号空间合成的N^2效应，以实现更强的深空测控上行发射能力，支持更高码速率的深空测控上行数据注入和更深远的行星际探测任务[27]。

在下行接收能力方面，喀什深空站已经在“天问一号”火星探测任务中建设了3个35m口径天线，与原有的1个35m天线组成天线阵系统，通过天线组阵接收技术，使得喀什深空站在X频段深空任务数据接收能力达到与佳木斯深空站66 m深空测控设备相当的水平（见图3所示），后续通过升级到Ka频段，接收能力将进一步提升。未来还将在阿根廷深空站和佳木斯深空站构建类似的4 × 35 m X/Ka频段天线阵系统，达到70 m天线的Ka频段接收能力，从而实现更强的下行数据接收能力[29]。



图 3　喀什深空站天线阵系统[29]

Fig. 3　Antenna array system of Kashi Deep Space Station[29]

3.1.4　发展深空激光通信能力

激光通信具有极高的数据传输速率和抗干扰能力，是未来天地数据传输的重要发展方向。激光通信能够以更高的数据速率使任务数据在更短的通信时间内完成下传，同时还减少了支持任务所需的地面站点数量；同时，激光通信飞行终端比传统的射频通信设

备更小、更轻，所需要的能源也更少[30]。NASA“灵神星号”（Psyche）探测器距地球约5 300万km时，开展的深空激光通信技术演示实现了267 Mbit/s传输数据；在距地球约3.9 亿km时，实现最高达 8.3 Mbit/s的下行数据传输速率[31]。星载大口径光通信终端能够发射和接收激光信号，实现与地面的高速通信，而地面10 m级大口径光学望远镜用于接收星载光通信终端发射的激光信号，可提高接收的灵敏度和精度。NASA最近的实验和工程研究已经使混合射频/光学天线成为其当前推进深空光学通信应用的主要途径[32-34]。该技术能够在激光通信中断时由射频系统作为备份通信手段，确保数据传输的连续性、可靠性，这对于近地天体防御任务尤为重要。

后续，中国深空测控网需要建设深空光通信系统，依托35 m深空测控天线（如图4所示），构建等效光学口径6～8 m的射频/光学混合系统，可以实现35 m深空测控设备的综合利用，投入代价小、提升能力快[10]。

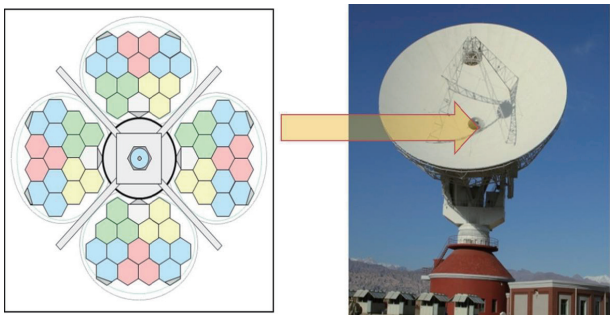


图 4 依托35 m深空测控天线构建射频/光学混合系统示意图[10]
Fig. 4 Schematic diagram of 35 m deep space RF/optical hybrid system[10]

3.1.5 发展相位参考干涉测量能力

相位参考干涉测量技术源自射电天文中的干涉成图方法，它依靠多天线间的基线长短指向组合，并利用了地球自转效应，通过时域和空域相结合的方法解出相位模糊度[35-36]。该技术测量精度比现有的ΔDOR（Delta-differential One-way Ranging）测量精度更高，且不需要航天器具备特殊的信标，利用航天器下行载波信号就可以实现精确测量，系统灵敏度更高，可以观测很弱的航天器信号，或者利用更靠近航天器的弱参考射电源，进一步减小测量的系统误差。

目前，中国深空测控干涉测量系统主要由VLBI天文观测网的上海天马站65 m、佘山站25 m、长白山站40 m、日喀则站40 m、昆明站40 m和乌鲁木齐南山站25 m 6个射电望远镜[37,38]，深空测控网的喀什深空站35 m和佳木斯深空站66 m共2套深空测控设备，一共8个大口径天线组成。其中最长基线为喀什深空站至佳木斯深空站约4 300 km基线。2013年利用“嫦娥三号”开展了中国首次X频段相位参考干涉测量试验，以“嫦娥三号”巡视器作为目标源，着陆器为参考源，利用VLBI天文观测网4个测站（佘山站25 m、密云站50 m、昆明站40 m和乌鲁木齐南山站25 m）的数据，得到了可靠的巡视器相位参考图。通过与实际任务视觉定位结果对比，巡视器相对定位精度优于1 m，等效于巡视器和着陆器相对角位置测量精度优于0.5 mas，差分相时延测量精度达到10 ps量级[39]。

随着观测网规模的扩大，相位参考干涉测量的效果就越好。增加深空测控网的阿根廷深空站35 m以及纳米比亚站18 m口径天线，并与ESA的位于澳大利亚西部的新诺舍和西班牙马德里附近塞夫雷罗斯2个深空站的35 m天线开展联合观测，就可以形成更优的基线组合和UV覆盖（UV 覆盖是指在 VLBI 观测中，所有基线矢量在垂直于观测源方向的投影点，在UV 平面上形成的分布集合[35]），如图5所示[40]。随着国内射电天文观测设备数量的不断增加和航天测控网大口径天线的补充，如贵州天文台新建的平塘40 m天线，会进一步丰富基线组合，从而有效地提高相位参考干涉测量的精度和实时性，为近地天体防御任务提供更高精度导航支持。

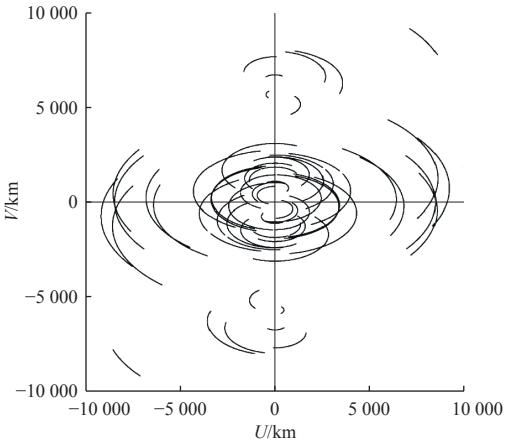


图 5 赤纬30°时中国与ESA联网的干涉测量网UV平面覆盖图[40]
Fig. 5 Spatial frequency UV plane coverage for the Chinese VLBI Network with ESA for declination 30 (Unit: km)[40]

3.1.6 发展行星雷达测量能力

地基行星雷达系统具有强大的发射功率和高分辨率的接收能力，能够对目标天体进行主动探测。通过雷达测距测速，可以精确测量目标天体与地球之间的径向距离和速度变化，为轨道确定提供关键数据；同时还可以利用目标天体反射的雷达回波信号进行多基线的干涉测量，进一步获得高精度的测角数据，进一

步提高目标天体轨道测量的精度。此外，雷达回波信号的干涉特性，还能够获取目标天体的精细结构信息。目前，世界上已有地基行星雷达系统都是依托深空测控设备或射电天文观测设备构建的，如隶属NASA位于美国加州莫哈维沙漠的70 m口径戈尔德斯通太阳系雷达（与美国深空网的DSS-14深空站共用1个70 m天线）和隶属于美国国家天文台位于加勒比海地区波多黎各的305 m口径阿雷西博射电望远镜（2020年12月已经坍塌），承担了目前世界上绝大部分的近地天体的雷达探测工作。

利用中国喀什深空站现有的4个35 m天线，配置X频段50 kW功率发射机，单个35 m天线就可以实现对直径约1 km小行星3×10^6 km的探测距离[13]，4个35 m天线通过天线组阵方式，利用等效全向辐射功率（Equivalent Isotropically Radiated Power，EIRP）与发射天线数目N^2效应和接收能力与天线数目阵N倍关系，可以大幅度提升发射和接收能力，能够实现对直径约1 km小行星1×10^7 km的探测距离[12]。通过对小行星实施连续的主动雷达测量（雷达测距测速 + 雷达信号干涉测量），可以直接获得目标小行星尽可能长弧段的轨道测量数据，提高对其短弧定轨精度，为准确判定有威胁小行星撞击地球的风险奠定基础。

3.2　体系性提升小行星防御任务中心能力

3.2.1　提升精密轨道确定与预报能力

近地天体防御任务实施的飞行控制中心，要在充分考虑太阳辐射压、行星引力摄动、雅尔可夫斯基效应等非引力因素影响的基础上，建立更加精确的近地天体轨道动力学模型。特别是对于雅尔可夫斯基效应，需要建立更加精确的热物理模型，考虑近地天体的形状、自转状态、表面特性等因素对轨道的影响，利用深空测控网为基础构建的行星雷达系统获取的测距测速数据以及雷达干涉测量数据，对目标天体进行精确定轨，提高对其轨道预报的精度，为防御决策提供尽可能准确的撞击概率信息。

同时，飞行控制中心还要开发基于航天器绕飞目标天体过程中星载光学/雷达载荷探测目标天体所获取相对距离/速度信息与地面深空测控网对航天器自身轨道测量数据相融合的近地天体定轨方法和模型。将地基测量和星载光学/雷达载荷测量数据融合，可以提高航天器抵近后对目标天体轨道的精确确定。这对于快速确定被处置后的目标天体或解体后其主体部分的轨道数据也非常有价值。

3.2.2　发展基于人工智能的数据处理能力

近地天体防御任务相关的任务飞行控制中心、资源调度中心以及各个数据处理中心，需要发展基于人工智能的算法，以大幅度提升资源调度、任务规划和数据处理速度和质量。

人工智能可以利用机器学习、深度学习等算法，对海量的深空探测数据进行自动分类、识别和特征提取；通过对小行星表面图像的分析，人工智能可以识别出不同的地质构造、岩石类型等信息；人工智能还可以通过对历史数据的学习，预测航天器和地面站可能出现的故障，提前采取措施进行预防和及时修复，提高任务实施的可靠性。NASA负责深空探测任务的JPL先后开发应用了深空网智能故障预测与维护系统、多个智能任务规划与调度系统，如规划与调度系统（Automated Scheduling and Planning ENvironment，ASPEN）是JPL开发的一套在地面运行的软件系统，支持从航天器操作到地面天线利用的全谱系任务规划，已应用于多个深空任务，该系统能够通过接收航天器所发送的遥测信息，根据预设的目标和条件，利用系统内部的模型和算法自动生成详细的任务规划、飞行计划及其各子系统的指令序列等，大大提高了任务实施的效率[41]。

3.2.3　发展基于集群算力的硬件平台

发展基于集群算力的硬件平台，支持海量数据处理、分析和决策。集群算力硬件平台通过将多个计算节点连接在一起，形成强大的计算能力，能够快速处理海量的数据。采用分布式存储和并行计算技术，将数据分散存储在多个节点上，并同时进行处理，大大提高了数据处理的速度和效率。结合云计算技术实现计算资源的动态分配和管理，根据任务需求灵活调整计算能力，提高资源利用率。

2025年3月，NASA为提高其任务和项目所需计算能力，先进超级计算（NAS）部门将350 个英伟达格雷丝·霍珀（NVIDIA Grace Hopper）计算节点部署至NASA 规模最大的基于图形处理器（GPU）的计算集群——卡比厄斯（Cabeus）超级计算机中，提供超过13 petaflops 的算力，使其总峰值性能提高了一倍多。该系统每个节点都包含一个Grace Hopper GH200 超级芯片，该芯片将 72 核的 Grace CPU 与 Hopper H100 GPU 相结合，采用内存一致性的高带宽、低延迟连接。这种高速大容量的连接，非常适用于人工智能/机器学习相关计算负载[42]。

3.2.4　发展高可靠大数据量重构软件上注开发能力

针对近地天体防御任务中修复在轨发现的软件漏洞（如逻辑错误、兼容性问题）、升级功能以适配新任务需求（如深空探测中的轨道修正算法优化、载荷

数据处理能力增强）、适配硬件状态变化（如部分载荷故障后的冗余重构、星上设备参数校准）、应对复杂空间环境导致的软件异常（如单粒子翻转引发的代码错乱）等带来的航天器在轨软件重构需求，地面飞行控制中心需要具备高可靠大数据量重构软件上注的开发能力。

地面要针对星载计算机的处理器架构、操作系统进行交叉编译适配，生成二进制镜像文件；采用模块化设计拆分软件功能，支持增量重注时仅编译变更模块。采用CCSDS 标准协议（如文件传输协议 CFDP、遥测遥控协议 TC/TM），对软件文件进行分段、帧封装，适配航天测控链路特性。针对近地天体防御任务的深空测控特点，要根据链路带宽、时延、误码率动态设计和调整传输参数（如帧长度、重传机制、传输速率），并通过采用断点续传技术，应对深空测控链路中断所导致的传输中断。地面还要构建仿真测试环境，在经过地面充分验证后再实施软件重构上注操作，以确保软件重构过程中的稳定性，降低重构失败带来的风险。

3.3 构建多部门联合高效指挥协同机制

3.3.1 构建国内多层次任务组织指挥机制

与常规深空探测任务不同，近地天体防御任务的飞行控制中心不再是单纯的深空探测任务飞行控制指挥中心，而是要承担更加复杂的处置决策和国内外多部门多机构协调任务。或者需要在飞行控制中心之上成立一个由国家多个部门组成的国家层面联合领导机构来统筹协调多个领域和部门。国家权力部门具有权威性和资源调配能力，能够确保任务的顺利推进。负责制定任务的总体战略和目标，协调各部门之间的工作，解决任务执行过程中出现的重大问题。

近地天体防御任务联合指挥机构应由航天器研制部门、航天发射和测控部门、天文观测机构、应急管理部门以及外交部门等多个部门组成，各部门在机构中发挥各自的职能和专业优势。指挥协调机制明确各部门的职责和任务分工，规定信息传递的渠道和方式，建立信息共享平台，确保各部门之间的高效协同工作和指挥控制高效、准确。根据在轨处置手段的不同，确定任务实施的指挥控制层级。构建统一的指挥控制平台是实现高效协同的基础设施。制定标准化的协同工作规范以明确各方职责和流程，明确各部门在探测、预警、处置等环节的职责与响应流程，建立跨部门应急联动机制，提升整体任务协同效率。

3.3.2 建立国家层面的国际合作协调机制

近地天体防御任务联合指挥机构应加强与国际小行星预警网络（IAWN）、太空任务规划咨询小组（SMPAG）等国际组织的合作，建立常态化的信息共享和协调机制。联合国维也纳办事处的外空司作为和平利用外层空间委员会（COPUOS）秘书处，是目前人类负责行星防御的国际机构，其工作职责之一就是“通过国际合作应对小行星撞击威胁”，协调各国组建小行星警报网并进行近地天体和行星防御[27]。

特别是在涉及动用核力量实施小行星防御任务时，指挥层级会上升到国家安全层面的最高等级，还涉及国际协调问题。根据联合国《外层空间条约》，在近地天体撞击事件中，若因缔约国的活动导致或加剧了对其他国家的灾害后果，则相关国家需承担国际责任[43]。

4 结 论

伴随着中国探月工程“绕、落、回”三步走战略的顺利实施以及行星探测工程的稳步推进，中国深空测控系统从无到有，已经形成了独立自主、功能完备的深空测控能力，并伴随着技术进步和任务需求的增长，正在不断发展壮大。针对近地天体防御任务的现实需求和潜在风险，中国深空测控系统需要提前布局，以应对不时之需，要不断优化体系布局，加大南半球深空测控力量布局，以确保从南半球接近地球的威胁天体的感知探测和连续跟踪测量[23]；完善系统功能，大力发展雷达主动探测能力，通过与国内外射电天文望远镜联合，力争实现对近地天体0.5 AU距离上的探测能力；提高系统能力，重点针对近地天体的轨道测量与确定、提高天地数据传输能力、地面快速数据处理、航天器在轨软件重构、多部门之间的高效指挥控制与协同等五个方面布局技术攻关，尽早取得突破，为有效应对近地天体防御奠定坚实基础。

参考文献

[1] CHEN Y，BAOYIN H X，LI J F. Target analysis and low-thrust trajectory design of Chinese asteroid exploration mission[J]. Science China:Physics, Mechanics & Astronomy，2011，41(9)：1104-1111.

[2] PERNA D，BARUCCI M A，FULCHIGNONI M. The near-Earth objects and their potential threat to our planet[J]. Astronomische Nachrichten，2013，21(1)：65-71.

[3] NASA. Center for Near-Earth object studies statistics[EB/OL]. [2026-01-17]. https：//cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html.

[4] NASA. NASA’s efforts to identify Near-Earth objects and mitigate hazards：IG-14-030[R]. Washington，DC：NASA，2014.

[5] POPOVA O P，JENNISKENS P，EMEL’YANENKO V，et al. Chelyabinsk airburst，damage assessment，meteorite recovery，and characterization[J]. Science，2013，342(6164)：1069-1073.

[6] HU Z W. Defending planet Earth：near-Earth-object surveys and hazard mitigation strategies[M]. Beijing ：The National Academies Press，2010：19-20.

[7] GELDZAHLER B，VILNROTTER V A，MILLER M，et al. Field demonstration of coherent uplink from a phased array of widely separated antennas：steps toward a verifiable real-time atmospheric phase fluctuation correction for a high resolution radar system[C]// Proceedings of 2016 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference（AMOS 2016）. Maui：AMOS，2016.

[8] JEHN R，HARRIS A，DROLSCHAGEN G，et al. Planetary defense[M]. Berlin：Springer，2021：113-119.

[9] CHODAS P W，CHESLEY S R. Orbit determination and estimation of impact probability for Near Earth objects：NASA/TP-2021-20002728[R]. Pasadena：Jet Propulsion Laboratory（JPL），National Aeronautics and Space Administration（NASA），2021.

[10] 吴伟仁，董光亮，李海涛，等. 深空测控通信系统工程与技术[M]. 北京：科学出版社，2013.

[11] GIOVANNONI B. Deep Space Network（DSN）supporting NASA's endeavors in science and exploration：Whitepaper #410[R]. Pasadena：National Aeronautics and Space Administration（NASA），2021.

[12] BERNER J，BHANJI A. Deep space network services catalog：No. 820-100[R]. Pasadena：JPL，2022.

[13] 李海涛，刘建军，陈少伍，等. 构建我国近地小行星探测雷达系统的需求与技术途径探讨[J]. 中国科学:信息科学，2021，51(2)：325-346.
LI H T, LIU J J , CHEN S W, et al. Discussion on the requirements and feasibility of constructing China's near-Earth asteroids radar system[J]. Scientia Sinica(Informationis)，2021，51(2)：325-346.

[14] SLADE M A，BENNER L A M，SILVA A. Goldstone solar system radar observatory：Earth-based planetary mission support and unique science results[J]. Proceedings of the IEEE，2010，98(8)：1398-1410.

[15] LAZIO J. Next-Generation Ground-Based Planetary Radar：Arecibo Observatory Colloquium[EB/OL]. [2026-01-17]. https://kiss.caltech.edu/papers/planetary_radar/papers/Lazio-Arecibo--v2b-compressed.pdf.

[16] OSTRO S J，GIORGINI J D. Mitigation of hazardous comets and asteroids[M]Cambridge：Cambridge University Press，2004：38-65.

[17] YEOMANS D K，OSTRO S J，CHODAS P W. Radar astrometry of near-Earth asteroids[J]. The Astronomical Journal，1987，94(1)：189-200.

[18] OSTRO S J，CAMPBELL D B，CHANDLER J F，et al. Asteroid radar astrometry[J]. The Astronomical Journal，1991，102(4)：1490-1502.

[19] MILANI A，GRONCHI G F，KNEŽEVIĆ Z，et al. Orbit determination with very short arcs：II. identifications[J]. Icarus，2005，179(2)：350-374.

[20] FARNOCCHIA D，CHODAS P W. Uncertainty propagation for long-term asteroid trajectory estimation[EB/OL]. [2026-01-17]. https://ntrs.nasa.gov/citations/20200000658. NASA/TP-2020-219865.

[21] Committee to Review Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies，Space Studies Board，Aeronautics and Space Engineering Board，Division on Engineering and Physical Sciences. Defending planet Earth：Near-Earth-Object surveys and hazard mitigation strategies[M]. Washington，DC：National Research Council，2010.

[22] FARNOCCHIA D，CHESLEY S R，VOKROUHLICKÝ D，et al. Orbit determination of near-Earth objects with the Yarkovsky effect[J]. Icarus，2013，225(2)：900-911.

[23] 李春来，刘建军，严韦，等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. 深空探测学报(中英文)，2019，6(5)：424-436.
LI C L, LIU J J, YAN W, et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 424-436.

[24] 李春来，刘建军，任鑫，等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置[J]. 深空探测学报 (中英文)，2024，11(3)：304-310.
LI C L, LIU J J, REN X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration，2024，11(3)：304-310.

[25] NASA Jet Propulsion Laboratory. Solar scintillation effects on telecommunication links at Ka-Band and X-Band:JPL Progress Report 42-129[R]. Pasadena：JPL，1997.

[26] 孔静，汪赛进，胡国林，等. 强太阳活动对“天问一号”测控影响[J]. 科学通报，2025，70(28-29)：4969-4977.
KONG J, WANG S, HU G, et al. Impact of intense solar activity on the tracking, telemetry, and command (TT&C) of Tianwen-1[J]. Chinese Science Bulletin，2025，70(28-29)：4969-4977.

[27] United Nations Office for Outer Space Affairs（UNOOSA）. Space Mission Planning Advisory Group（SMPAG）[EB/OL]. [2026-01-17]. https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/neos/smpag.html.

[28] 董光亮，李海涛，郝万宏，等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报（中英文），2018，5(2)：99-114.
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C System[J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5(2)：99-114.

[29] 李新胜，刘海旭，韩来辉，等. 一种 X 频段 50 kW 高功放的设计[J]. 深空探测学报（中英文），2018，5(2)：175-181.
LI X S, LIU H X, HAN L H, et al. A design of 50 kW X-Band high power amplifer[J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5(2)：175-181.

[30] 于志坚，李海涛. 月球与行星探测测控系统建设与发展[J]. 深空探测学报（中英文），2021，8(6)：543-554.
YU Z J, LI H T. Review on development history of TT&C system of China's Lunar and Planetary Exploration Projects[J]. Journal of Deep Space Exploration，2021，8(6)：543-554.

[31] MARTI S. Ka-Band at ESTRACK：expanding Deep Space communication capabilities[C]//Proceedings of 14th Broadsky Workshop & 22nd Ka and Broadband Communication Conference. Cleveland，Ohio：[s. n.]，2016.

[32] 张靓，郭丽红，刘向南，等. 空间激光通信技术最新进展与趋势[J]. 飞行器测控学报，2013，32(4)：286-293.
ZHANG L, GUO L H, LIU X N, et al. Latest progress and trends of development of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT& C Technology，2013，32(4)：286-293.

[33] National Aeronautics and Space Administration. NASA's laser comms demo makes deep space record，completes first phase[EB/OL]. (2024-10-03)[2026-01-17]. https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-laser-comms-demo-makes-deep-space-record-completes-first-phase/.

[34] DEUTSCH L J. Toward a NASA deep space optical communications system[C]//Proceedings of 2018 Space Ops Conference. Pasadena，CA，USA：American Institute of Aeronautics and Astronautics，2018.

[35] THOMPSON A R，MORAN J M，SWENSON J G W. Interferometry and synthesis in radio astronomy[M]. Hoboken：John Wiley & Sons，2008.

[36] MARTIN-MUR T J，HIGHSMITH D E. Mars approach navigation using the VLBA[C]//Proceedings of 21st International Symposium on Space Flight Dynamics. Toulouse，France：[s. n.]，2009：28-2 October.

[37] 郑为民, 张娟, 徐志骏, 等. 实时VLBI处理机技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 354-361.
ZHENG W M, ZHANG J, XU Z J, et al. Real-Time correlator technologies of VLBI[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 354-361.

[38] 江庆龄.中国 VLBI 网升级为“六站一中心”：支撑深空探测与天文研究的新跨越[N]. 中国科学报，2024-12-30 .

[39] 李海涛，周欢，郝万宏，等. 深空导航无线电干涉测量技术的发展历程和展望[J]. 飞行器测控学报，2013，32(6)：470-478.
LI H T, ZHOU H, HAO W H, et al. Development of radio interferometry and its prospect in deep space navigation[J]. Journal of Spacecraft TT& C Technology，2013，32(6)：470-478.

[40] 李海涛，周欢，张晓林. 深空导航相位参考干涉测量技术研究[J]. 宇航学报，2018，39(2)：147-157.
LI H T, ZHOU H, ZHANG X L, et al. Research on phase referencing VLBI technique in deep space navigation[J]. Journal of Astronautics，2018，39(2)：147-157.

[41] CHIEN S，RABIDEAU G，KNIGHT R，et al. ASPEN – automated planning and scheduling for space mission operations[C]//USA: Proceedings of SpaceOps 2000 Conference. 2000：1-8.

[42] National Aeronautics and Space Administration. New grace hopper nodes double the power of NASA’s cabeus supercomputer[EB/OL]. (2025-03-14)[2026-01-17]. https：//www.nas.nasa.gov/pubs/stories/2025/news_Cabeus_Grace_Hopper_Expansion.html.

[43] United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). Treaties and principles on outer space，relevant general assembly resolutions and other documents:ST/SPACE/61[R]. Vienna：UNOOSA, 2008.

作者简介：

李海涛(1973–)，男，研究员，探月工程“嫦娥七号”“嫦娥八号”任务副总设计师，“嫦娥四号、六号、七号、八号”任务和行星探测工程“天问一号、二号”任务测控系统总设计师。主要研究方向：航天测控系统工程、深空测控通信技术。

通信地址：北京市海淀区北清路26号院(100094)

电话：(010)66361118

E-mail：lihaitao@bittt.cn

Challenges of Tracking, Telemetry, and Command（TT&C）in Near-Earth Object（NEO）Defense

LI Haitao

（Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology，Beijing 100094，China）

Abstract：Combining the practical needs for future implementation of near-Earth object (NEO) defense, starting from the new requirements and problems faced by the measurement and control system, the differences between near-Earth object defense missions and conventional asteroid exploration missions as well as the mission requirements of their response systems analyzed, and research was conducted on the technical challenges in such aspects as orbit measurement and determination of near-Earth objects, improvement of space-ground data transmission capability, rapid ground data processing, on-orbit software reconstruction of spacecraft, and efficient command, control and collaboration among multiple departments. Finally, relevant recommendations for systematic solutions were put forward from three aspects: comprehensively enhancing the capability of the ground-based deep space TT&C network, improving the capacity of the asteroid defense mission center in a systematic manner, and establishing an efficient command and coordination mechanism through multi-department collaboration.

Keywords：Near-Earth Object（NEO）defense；deep space TT&C system；technical challenges；solutions approaches

Highlights：

- Technical Challenges of Chinese deep space TT&C system in Near-Earth Object（NEO）Defense.
- The TT&C support for all the missions of China lunar exploration program are introduced.
- Solutions to the Technical Challenges of TT&C system in Near-Earth Object Defense.

[责任编辑：高莎，英文审校：宋利辉]