

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2026.03.10

鹊桥二号探测器环月大椭圆轨道 定轨精度分析

马云龙^{1,2}, 黄勇^{1,2,3,4}, 李培佳^{1,3,4}, 黄逸丹^{1,3}, 张政浩^{1,2}, 袁佳晨^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049; 3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030; 4. 中国科学院行星科学重点实验室, 上海 200030)

摘要: 针对鹊桥二号探测器 24 h 周期环月逆行大椭圆轨道的定轨问题, 首次基于不同阶段的实测数据, 分析了观测数据量、测距测站个数、VLBI 数据是否加入以及探测器-地面几何观测构型等因素对定轨精度的影响。分析结果表明, 观测构型是影响定轨精度的关键因素, 探测器处于通视状态时, 位置精度约为 41 m, 速度精度约为 0.28 cm/s; 而在非通视状态时精度显著下降, 位置精度约为 155 m, 速度精度约为 0.93 cm/s。进一步分析发现, 不同于环月圆轨道, 大椭圆轨道误差在径向、切向与法向分量量级相当, 且定轨精度沿轨道呈现非均匀分布, 远月点附近位置精度较低, 近月点附近速度精度较低。研究结果可为未来月球与深空探测任务中的大椭圆轨道确定与任务设计提供参考。

关键词: 精密定轨; 鹊桥二号; 月球大椭圆冻结轨道; VLBI

中图分类号: V412.4⁺1 **文献标识码:** A

1 引言

月球探测器的精密定轨是月球探测任务成功的关键技术支撑^[1,2]。在中国探月工程中, 为了适应不同的科学需求与应用目标, 探测器轨道类型多样。早期环月任务(如嫦娥一号、二号、三号)主要采用极轨圆轨道, 探测目的是实现对月球表面的全球覆盖性观测, 为后续着陆任务勘察地形^[3-7]。随着中国深空网的建成和 VLBI 测量技术的不断改进, 测量精度有了显著提高。探测器的定轨精度也从几百米量级(嫦娥一号)提高至 20 m(嫦娥三号), 体现了测量技术进步对近圆轨道定轨能力的有效促进^[8]。

月面采样返回与中继通信任务则引入了更复杂的轨道构型。嫦娥五号、六号轨道器为满足交会对接需求, 采用低倾角圆轨道, 其定轨精度可以达到 18 m^[9]。为支持嫦娥四号人类首次月背软着陆, 鹊桥一号中继星成功部署于地月 L2 点的 Halo 轨道以提供中继通信服务^[10-12]。

收稿日期: 2025-12-25; 修回日期: 2026-01-30

资助项目: 中国科学院专项基金-中国科学院前瞻战略科技先导专项(XDA30040500, XDA0350404)

通讯作者: 李培佳, pjli@shao.ac.cn

段建锋等人^[13]研究表明, 此类三体问题下的不稳定轨道, 其定轨精度(从数百米到数千米)强烈依赖于太阳光照条件(+Z轴对日/非对日)与测控数据的类型与弧段。刘思语等人^[12]分析了嫦娥四号中继星处于稀疏观测模式下绕地月L2点的定轨精度, 结果表明: 中继星绕L2点轨道精度优于2 km, 包含有VLBI时延和时延率的弧段精度可以达到百米量级。

鹊桥二号探测器于北京时间2024年3月20日发射, 经过一次地月转移中途修正后, 3月26日被月球捕获进入10 d周期大椭圆轨道, 之后进行两次轨道调整, 最终于北京时间4月1日23时进入轨道周期约为24 h, 近月点高度约为400 km, 远月点高度约为16 000 km的环月大椭圆太阳同步冻结轨道。

月球大椭圆冻结轨道动力学特性稳定, 几何构型优良, 可长期满足月球南极以及南半球高纬度地区的中继通信需求^[14,15]。此外, 该探测器的轨道参数设计使得其在月球引力场的不规则性影响下能够长期保持稳定, 轨道的形状和空间指向变化很小, 这大大减少了维持轨道所需的燃料消耗, 延长了中继星的运行寿命。

这种独特的轨道也带来了一定的定轨挑战。首先, 动力学环境复杂, 探测器在近月点与远月点经历引力梯度变化, 对动力学模型的精度提出了更高要求; 其次, 观测几何剧变, 轨道面与地月的连线即观测构型呈周期性变化, 地面测站的几何构型约束发生显著波动; 最后, 观测数据差异大, 任务不同阶段的不同测控计划, 得到的地基测量数据量不同, 影响定轨解算精度。

本文在鹊桥二号探测器环月大椭圆冻结轨道的演化特性分析基础上, 结合鹊桥二号不同飞行阶段测量数据情况, 分析不同定轨策略下鹊桥二号大椭圆冻结轨道的定轨精度及其特性。

2 鹊桥二号探测器轨道演化特性

鹊桥二号探测器首次使用了环月大椭圆太阳同步冻结轨道, 其近月点高度约为400 km, 远月点高度约为16 000 km。与鹊桥一号中继星绕地月L2平动点飞行的14 d周期轨道不同, 其轨道周期为24 h, 距离月球更近, 并且不需要进行频繁轨道维持。该轨道的设计满足了嫦娥六号的中继需求, 可为嫦娥六号以及探月四期等月背中纬度地区任务提供良好的支持。

基于表1的轨道根数, 图1展示了为期一个月的鹊桥二号星下点预报轨迹。结果表明, 该轨道可实现对全月覆盖, 且覆盖密度在南极及南半球区域显著集中。这一分布特性从轨道几何层面证实, 鹊桥二号能够为月球背面及南极区域的长期探测任务提供有效的中继通信支持。

基于表1的轨道根数, 对鹊桥二号探测器进行时长为1年的轨道预报, 其轨道相关参数的演化特征如图2所示。分析表明, 其轨道关键参数在长期演化中保持稳定, 并呈现明确的周期性。近月点高度、远月点高度及偏心率均存在约15 d的周期振荡, 其中近月点变化为200~600 km, 远月点变化为15 900~16 400 km, 偏心率变化范围为0.762~0.811。轨道倾角除15 d周期变化外, 还叠加了周年变化分量, 变化范围为90.0°~147.9°。太阳同步轨道的核心特征是: 轨道面升交点赤经的进动速率与月球绕太阳运行的平均视运动速率相吻合。如图3所示,

表 1 鹊桥二号探测器轨道根数

参数	值
初轨时刻 (UTC)	2024 年 5 月 4 日 7:00:00
坐标系	月心天球坐标系
半长轴/km	10 024
偏心率	0.769 1
轨道倾角/(°)	107.0
近点角距/(°)	63.6
升交点经度/(°)	243.9
轨道周期/h	24.8

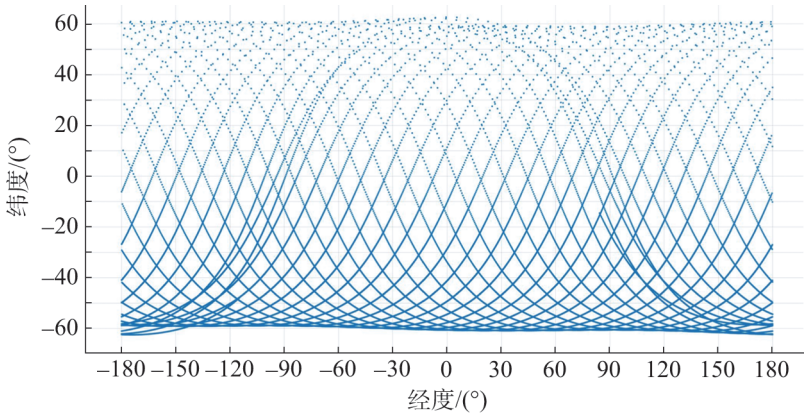


图 1 鹊桥二号星下点覆盖

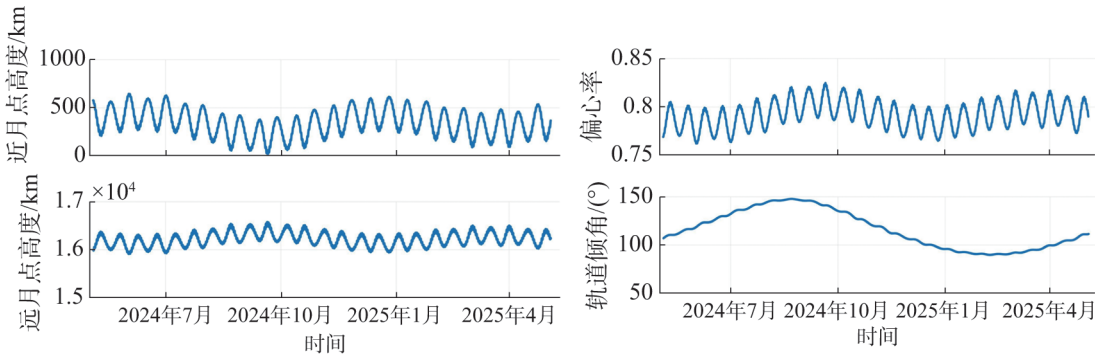


图 2 鹊桥二号近月点、远月点、偏心率、轨道倾角演化

鹊桥二号轨道升交点赤经在一年内的变化约为 364.69° , 对应的平均日进动约为 1° , 该结果与其约 24 h 的轨道周期相匹配。该结果验证了其轨道设计的太阳同步特性。

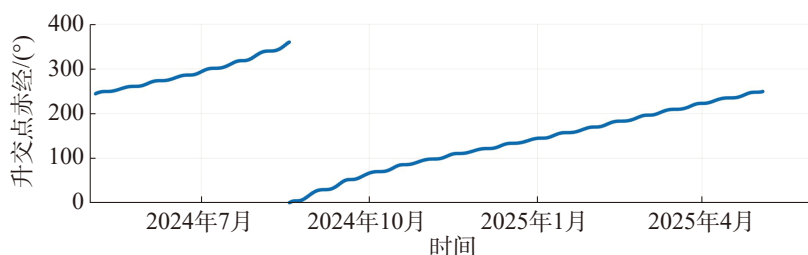


图3 鹊桥二号升交点赤经演化

综上, 鹊桥二号所采用的环月大椭圆冻结轨道, 其关键参数在长期演化中具有良好稳定性, 且轨道面具备自主维持的太阳同步特性。这一设计使得中继卫星无需频繁轨道维持即可满足嫦娥六号等月面任务对中继通信的轨道面指向与覆盖需求。实测轨道演化与设计预期相符, 验证了该复杂轨道设计方法的有效性, 可为未来深空探测任务中的类似轨道设计提供技术参考^[14-16]。

3 测轨数据及定轨策略

鹊桥二号探测器的精密轨道确定, 依赖于中国功能完备的深空测控网与 VLBI (甚长基线干涉测量) 测量网。以喀什、佳木斯、南美站等为核心的深空测控网具备多频段综合测控能力, 可为中国月球及深空探测器的各个飞行阶段提供高精度的测距测速数据^[17-19]。VLBI 测量网则由上海天马、北京、昆明、乌鲁木齐四站构成, 通过获取高精度的时延及时延率数据, 在轨道确定中发挥着不可替代的作用^[20,21]。根据任务需求不同, 鹊桥二号环月入轨后的测定轨工作可划分为三个阶段, 其地基测量数据情况有所不同。

环月入轨后至 5 月初为早期入轨飞行阶段, 在该阶段探测器进入目标轨道后, 暂未承担中继通信任务。因此, 日常跟踪主要依靠喀什站 (18 m 天线)、纳米比亚站及南美深空站进行, 每日观测时长约 3~6 h, VLBI 网未安排常规观测。

5 月初至 6 月上旬为主任务保障阶段, 在该阶段鹊桥二号需为嫦娥六号提供月背中继通信支持, 任务对测量数据的实时性与定轨精度要求提高。由于此阶段深空站与 VLBI 测网资源优先保障嫦娥六号任务, 因此鹊桥二号的日常测控以喀什站 (18 m 天线)、青岛站 (18 m 天线) 及纳米比亚站为主, 每日观测时长约 3~8 h (见图 4), 为确保定轨精度, VLBI 网在关键日期对鹊桥二号开展了多次观测。6 月中旬, 嫦娥六号完成月面采样并转入环月轨道, 鹊桥二号随之圆满完成此次中继通信任务, 进入长期飞行管理阶段 (简称长管段)。此阶段轨道维持需求低, 测控资源大幅缩减, 平均每日观测时长仅 2~3 h, 且无 VLBI 观测 (见图 5)。

本文定轨分析使用中国科学院上海天文台深空探测器定轨软件 SODP, 采用动力学统计定轨方法。定轨考虑的动力学模型包括 150 阶月球非球形引力摄动、太阳系大天体 N 体摄动、

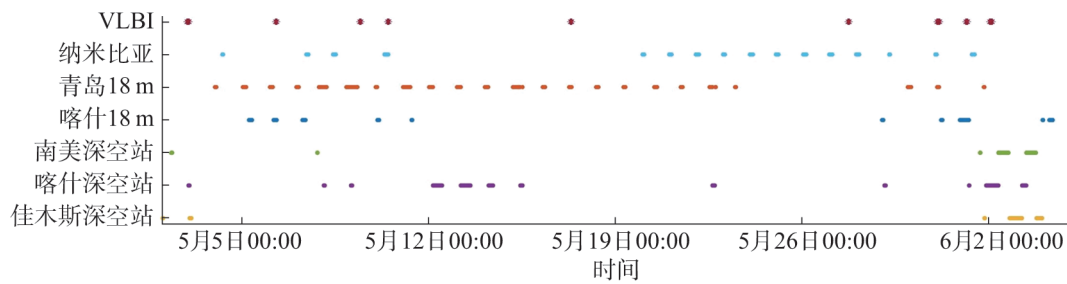


图 4 主任务阶段测距及 VLBI 测站观测情况

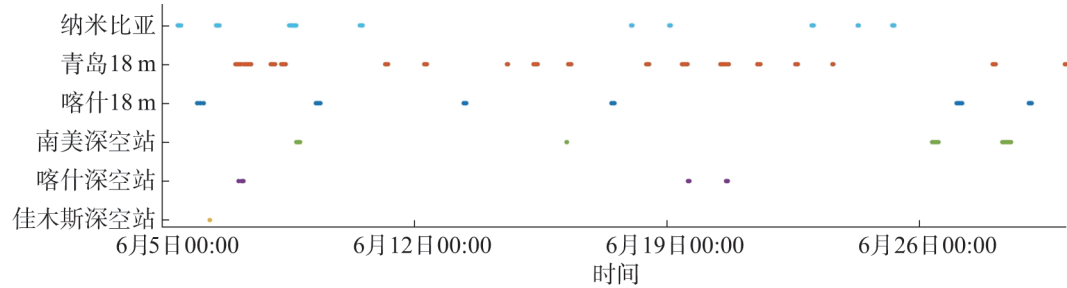


图 5 长管阶段测距测站观测情况

光压摄动、一阶后牛顿摄动。解算参数包括探测器的位置、速度、光压参数 Cr 、分站分弧段解算测距系统差。定轨时的动力学模型以及具体解算参数策略见表 2。

表 2 动力学模型及轨道计算参数

项目	模型/说明
参考系	月球质心天球参考系
中心天体引力	月球
N 体摄动	太阳、地球、大行星
星历	JPL DE421
月球非球形摄动	GRGM660, 150×150 阶
解算参数	探测器位置、速度、分弧段解算测距系统差、光压参数
权重配比的先验噪声	测距: 1 m; 测速: 0.1 mm/s; VLBI 时延: 1 ns
大气延迟修正	Saastamoinen-NMF
积分器及积分步长	KSG 二阶定步长积分器 30 s

采用重叠弧段方法评价定轨精度：分别对两段相邻弧段（Arc1 与 Arc2）独立解算轨道，对比两轨道在重叠时段内的差异，以此评估定轨结果的内符合精度与一致性，其原理如图 6 所示。

考虑到鹊桥二号探测器的轨道周期约为 24 h，以及 VLBI 观测的覆盖性，在长弧重叠弧段定轨分析时，定轨弧长选为 3 d（即 3 个轨道周期），重叠弧长为 1 d（即 1 个轨道周期）。

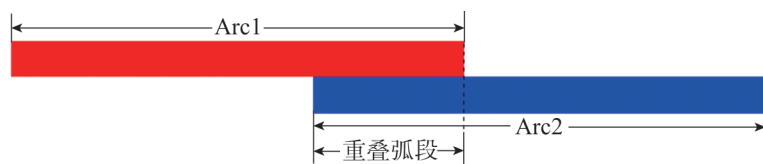


图6 重叠弧段示意图

4 鹊桥二号探测器定轨精度研究

4.1 主任务阶段定轨精度分析

本节利用鹊桥二号探测器主任务阶段一个月的观测数据进行探测器重叠弧段定轨精度分析。该时段内, 探测器需为嫦娥六号月背中继通信提供支持, 对定轨的实时性与精度均有较高要求。具体观测数据情况参见第三章。

定轨考虑两种策略: (1) 仅使用测距与测速数据; (2) 联合使用测距、测速与 VLBI 数据。定轨后观测量残差均方根 (RMS) 平均统计结果为: 测距 1.90 m, 测速 0.73 mm/s, 时延 1.33 ns, 时延率 1.01 ps/s。图 7 为 Arc0506 弧段定轨后残差图。重叠弧段分析结果如表 3 所示。

重叠弧段定轨分析结果显示, 采用 3 d 弧长定轨解算时, 仅使用测距、测速数据的定轨平均位置精度约 75 m, 速度精度约 0.67 cm/s; 加入 VLBI 数据后, 定轨精度显著提高, 平均位置精度提高至 44 m, 速度精度提高至 0.40 cm/s。

表 3 中同时列出了各定轨弧段内的测距站数量, 由于每天跟踪测距计划不同, 部分弧段 3 d 内仅有单站每日进行约 3 h 观测。分析表明, 测站数量对定轨精度具有明显影响: 测站数量越多, 定轨精度越高, 这一规律在仅使用测距、测速数据时尤为突出; 在测站较少的情况下, 引入 VLBI 数据对精度的改善作用更为显著。

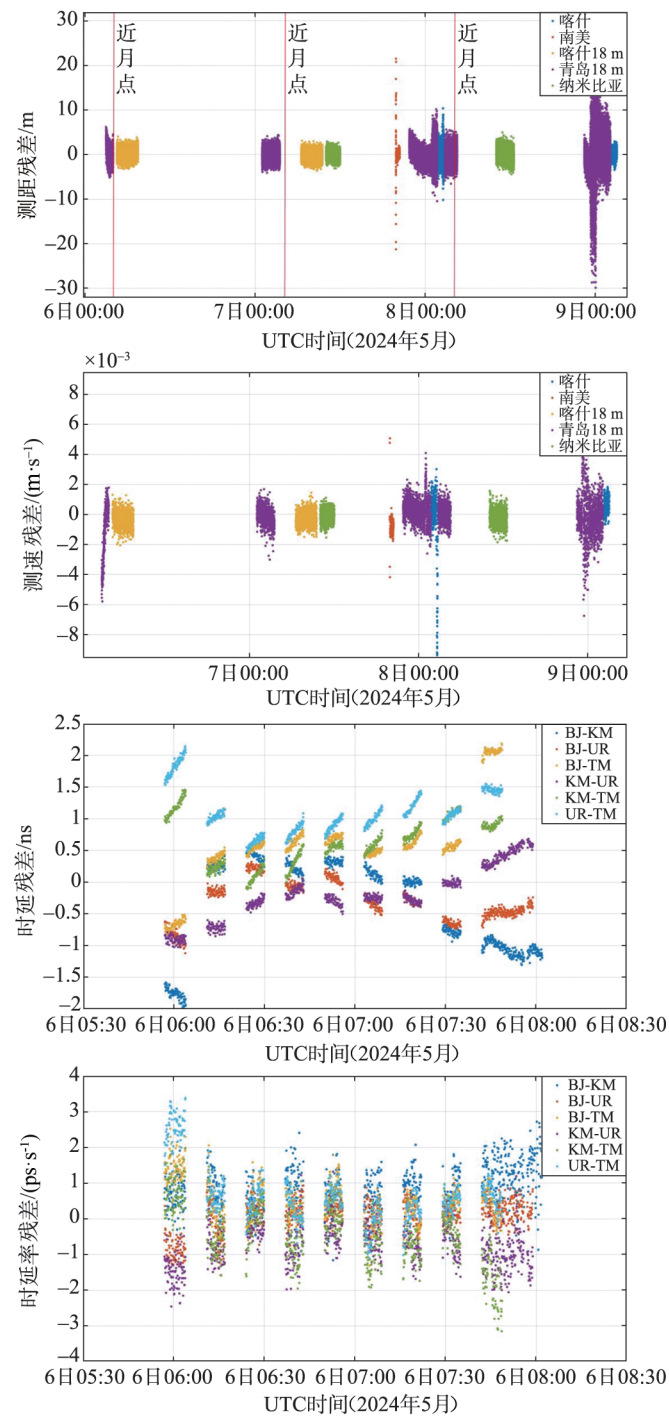
图 8 为 Arc0506 与 Arc0508 弧段联合定轨结果的重叠弧段位置、速度比较图。由图 8 可见, 在近月点附近轨道的速度误差较大, 与环月圆轨道径向 (R) 精度较高的特点不同, 鹊桥二号 24 h 环月大椭圆轨道在径向 (R)、切向 (T) 和轨道面法向 (N) 三个方向的轨道误差量级基本一致, 该结论在其余弧段的分析中均得到验证。

4.2 稀疏数据条件下的定轨精度分析

本节对鹊桥二号探测器观测数据稀疏的长期飞行管理阶段定轨精度进行分析。该阶段 VLBI 测控网不参与观测, 每日仅由测距站提供约 2~3 h 的跟踪数据。

重叠弧段定轨精度结果如图 9 和图 10 所示。平均位置精度约 104 m, 速度精度 0.64 cm/s。定轨后观测量残差 RMS 平均统计结果为测距 2.22 m, 测速 0.80 mm/s。

进一步的分析表明, 探测器的定轨精度显著受其与地面测站间几何构型的影响, 如图 11 所示。本文根据轨道面法线与地月连线的相对关系, 将观测构型分为两类: 通视状态 (正向, face-on, 二者共线) 与非通视状态 (侧向, edge-on, 二者垂直)。由于轨道进动, 这两种状态约以 1 月为周期交替出现。定义轨道面法线与地月连线夹角为通视角, 由图 11 可以看到,



注：BJ-北京，KM-昆明，UR-乌鲁木齐，TM-上海天马。

图 7 长弧 Arc0506 定轨后残差图

表 3 主任务阶段重叠弧段位置速度精度

重叠弧段 弧段 1/弧段 2	位置/m		速度/(cm·s ⁻¹)		测距测站个数 弧段 1/弧段 2
	有 VLBI	无 VLBI	有 VLBI	无 VLBI	
Arc0502/Arc0504	35	70	0.28	0.49	5/3
Arc0504/Arc0506	4	10	0.04	0.06	3/5
Arc0506/Arc0508	17	25	0.13	0.13	5/4
Arc0508/Arc0510	38	35	0.42	0.44	4/4
Arc0510/Arc0512	44	46	0.25	0.25	4/2
Arc0512/Arc0514	*	86	*	0.44	2/2
Arc0514/Arc0516	75	129	1.00	1.63	2/1
Arc0516/Arc0518	77	118	0.37	2.16	1/2
Arc0518/Arc0520	*	51	*	0.69	2/3
Arc0526/Arc0528	44	181	0.25	0.41	2/4
Arc0528/Arc0530	72	115	1.20	1.31	4/6
Arc0601/Arc0603	35	71	0.28	0.49	6/5
Arc0603/Arc0605	48	41	0.23	0.25	5/5
平均	44	75	0.40	0.67	-

注: * 表示相邻两弧段内均无 VLBI 数据; ArcMMDD 表示定轨弧段从 UTC 时间 2024 年 MM 月 DD 日 0 时开始往后 3 d, 如 Arc0502 表示定轨弧段为: UTC 时间 2024 年 5 月 2 日 0 时—2024 年 5 月 5 日 0 时。

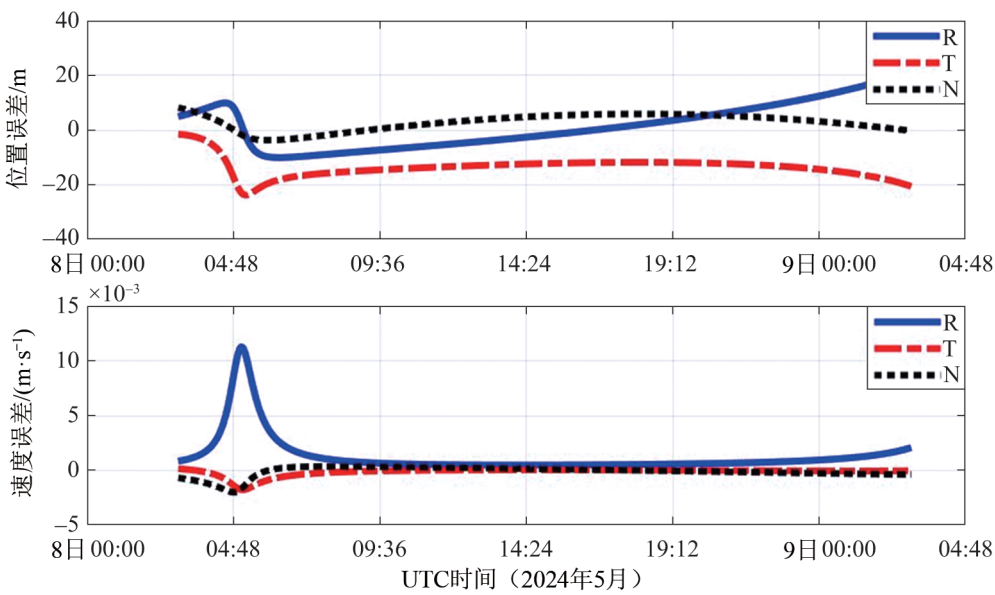
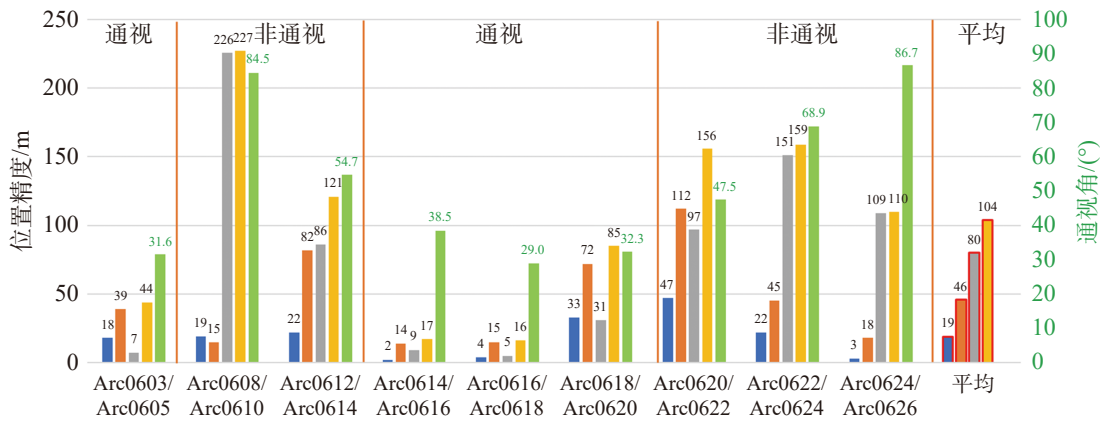
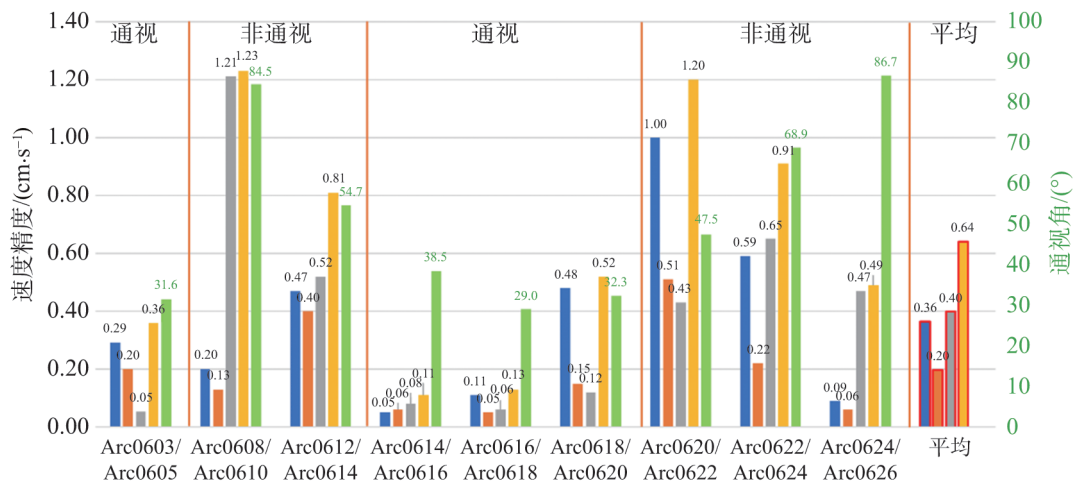


图 8 Arc0506 与 Arc0508 重叠弧段位置速度比较



注：图中蓝色表示径向，橙红色表示切向，灰色表示法向，黄色表示总差异，绿色表示通视角。

图 9 长管阶段鹊桥二号探测器重叠弧段位置精度



注：图中蓝色表示径向，橙红色表示切向，灰色表示法向，黄色表示总差异，绿色表示通视角。

图 10 长管阶段鹊桥二号探测器重叠弧段速度精度

通视角较小时探测器处于通视状态，定轨精度较高，平均位置精度为 41 m，平均速度精度为 0.28 cm/s；而通视角较大时探测器处于非通视状态，定轨精度较低，平均位置精度 155 m，平均速度精度为 0.93 cm/s。

这一差异可通过定轨的观测方程进一步解释。定轨过程在数学上可以简单表述为：在动力学模型约束下，利用离散的观测数据，最优估计探测器的状态向量。定轨的观测方程如下：

$$y = \tilde{H}\Phi(t, t_0)x_0 + \varepsilon,$$

式中状态转移矩阵 Φ 描述初始误差 δx_0 随时间的传播规律，与动力学建模精度相关；观测矩



图 11 通视与非通视状态示意图

阵 $\tilde{H}$ 描述状态变化对观测量的灵敏度, 由观测几何决定。在通视构型状态下, 探测器飞行过程中地面站对整个轨道面可见, 观测几何条件更优, 此时视线方向与探测器的位置矢量和速度矢量均保持较大夹角。因此, 观测矩阵 $\tilde{H}$ 对轨道平面内的所有状态分量都具有高灵敏度, 且这些分量之间的相关性低。这导致法方程条件数较小, 状态估计的误差椭圆接近于各向同性的圆, 所有方向都能被较好地确定, 此时仅依靠测距、测速就能将轨道约束住。在非通视状态下, 地面测距、测速站无法完整观测到探测器的主要运动平面, 其对轨道的约束能力较弱, 定轨精度较差。图 12 为非通视和通视状态下解算参数的相关系数矩阵, 可以看到, 非通视状态下解算参数相关性较强, 而通视状态下解算参数相关性显著变弱。未来任务中, 可考虑在非通视状态下加入 VLBI 观测, 或引入天基观测, 以改善地面测量几何, 从而提高探测器定轨精度。

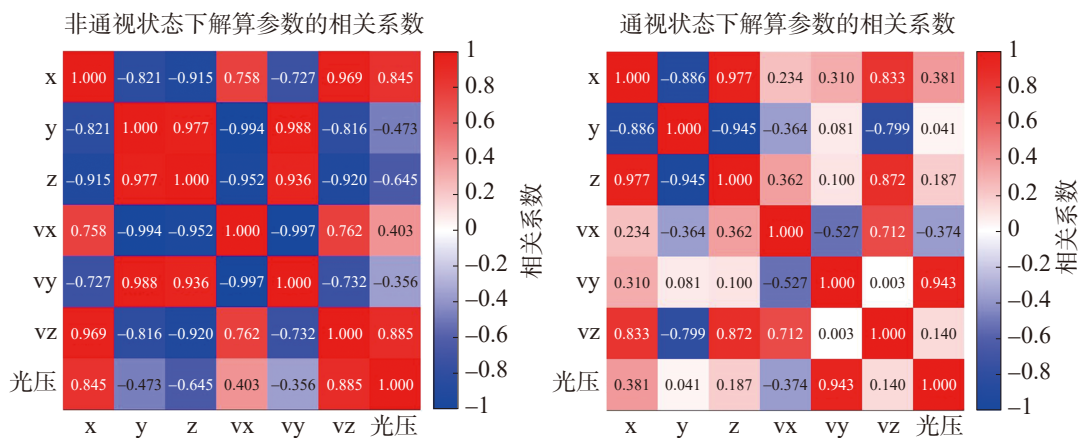
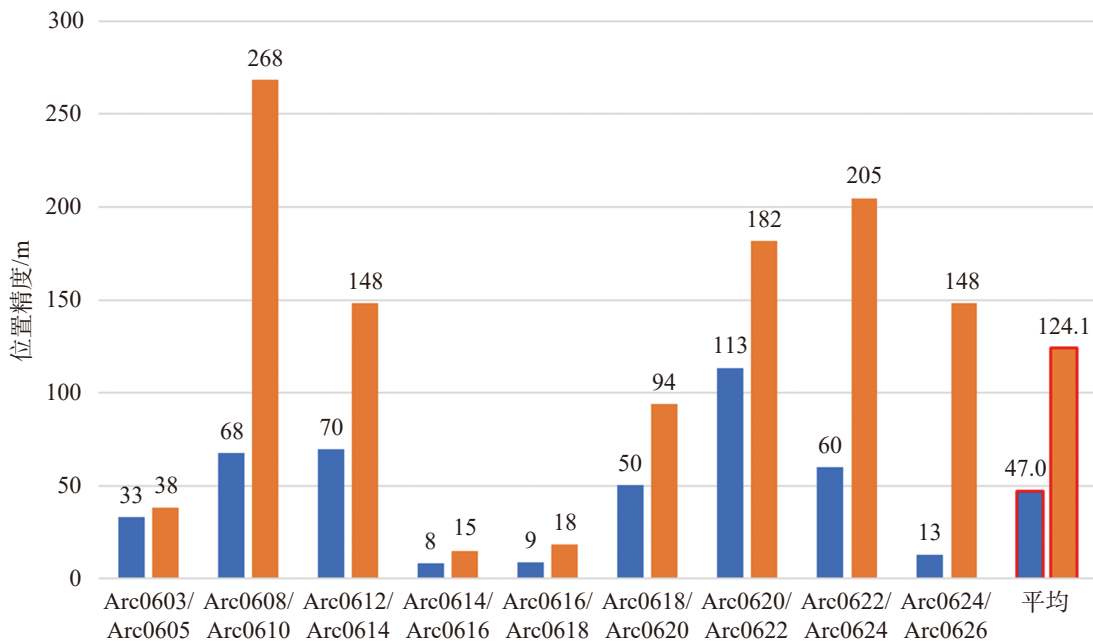


图 12 非通视与通视状态下解算参数的相关系数

本文研究的环月大椭圆轨道与嫦娥系列圆轨道以及地月 Halo 轨道在定轨特性上存在显著差异,主要体现在动力学模型约束和轨道特征上。环月圆轨道上飞行过程中所受的动力学摄动较为稳定,GRAIL 重力场的发布提升了月球背面引力场模型精度,环月圆轨道的定轨精度可优于 20 m^[8,9],并且受到月球引力场的约束,其在径向方向的精度可优于 1 m。鹊桥一号探测器飞行的 Halo 轨道处于地月三体平动点附近,其所受的引力场梯度小,需要定期进行轨道维持。在三体弱稳定环境下,多源测量数据融合的长弧定轨可以实现优于 500 m 的定轨精度^[11,12],以保障对月球背面探测器的连续稳定中继通信。鹊桥二号探测器飞行的环月大椭圆冻结轨道所受的动力学模型约束在近月点和远月点差异较大,且其位置和速度在近月点附近变化剧烈,这样的不均匀性会使得其近月点和远月点的定轨精度呈现明显差异。针对这一特点,本文对比分析了这两点附近的定轨精度,如图 13 和图 14 所示。计算结果表明,在远月点附近,探测器位置精度较低(平均约 124.1 m),但速度精度较高(平均约 0.18 cm/s);近月点附近则相反,位置精度较高(平均约 47.0 m),速度精度较低(平均约 1.77 cm/s)。

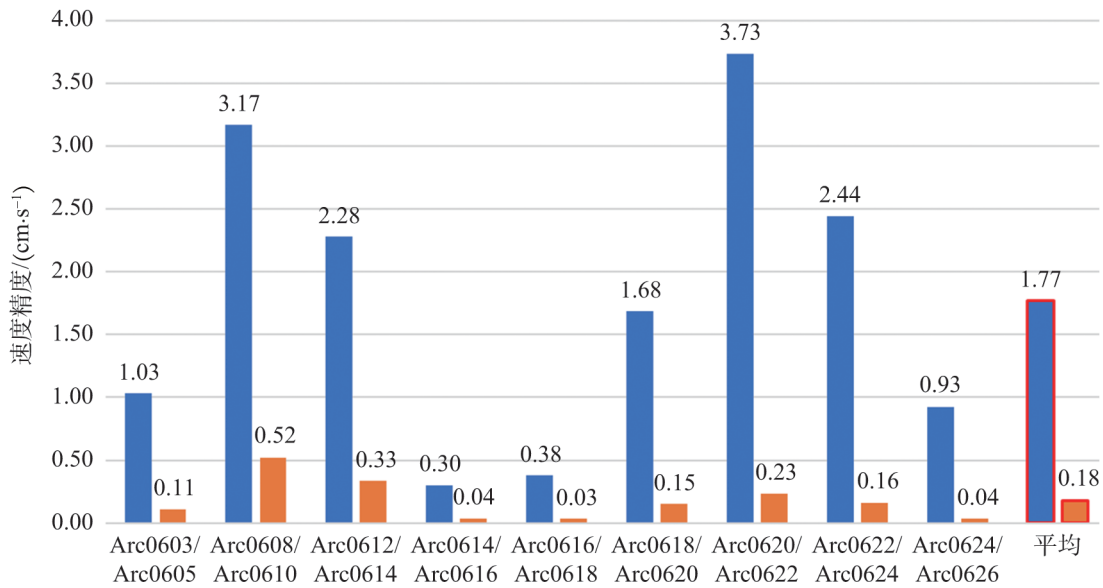


注:图中蓝色表示近月点附近,橙红色表示远月点附近。

图 13 长管阶段鹊桥二号探测器在近月点和远月点附近重叠弧段位置精度

5 总结

本文首次利用鹊桥二号探测器的实测数据,分析了其环月大椭圆冻结轨道的定轨精度和轨道演化特性,并对不同任务阶段与观测条件下的轨道精度特性进行了系统评估。结果表明,定轨精度主要受测站数量、VLBI 数据及观测几何构型等因素影响。在主任务阶段,测距联合



注: 图中蓝色表示近月点附近, 橙红色表示远月点附近。

图 14 长管阶段鹊桥二号探测器在近月点和远月点附近重叠弧段速度精度

VLBI 数据定轨, 位置精度约为 44 m、速度精度约为 0.40 cm/s; 而在数据稀疏且无 VLBI 支持的长管阶段, 定轨精度有所降低。同时, 通视几何状态下的定轨精度显著优于非通视状态。进一步分析表明, 该轨道呈现出与圆轨道不同的精度空间分布规律: 远月点附近位置精度较低而速度精度较高, 近月点附近则相反。本文结论可为后续深空探测任务中的轨道设计与测定轨策略提供重要技术参考。

致谢

感谢中国科学院上海天文台 VLBI 测轨分系统及北京航天飞行控制中心提供的跟踪数据。

参考文献:

- [1] 李春来, 刘建军, 左维, 等. 空间科学学报, 2021, 41: 68
- [2] 段建锋, 张宇, 曹建峰, 等. 深空探测学报, 2019, 6: 203
- [3] 黄勇. 博士论文, 上海: 中国科学院上海天文台, 2006: 1
- [4] 陈明, 唐歌实, 曹建峰, 等. 武汉大学学报. 信息科学版, 2011, 36: 212
- [5] Li P J, Hu X G, Huang Y, et al. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55: 514
- [6] 董光亮, 樊敏, 李培佳, 等. 宇航学报, 2013, 34: 457
- [7] 裴照宇, 王琼, 田耀四. 深空探测学报 (中英文), 2015, 2: 99
- [8] 黄勇, 昌胜骐, 李培佳, 等. 科学通报, 2014, 59: 2268
- [9] 李培佳, 黄勇, 樊敏, 等. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 66
- [10] 黄勇, 李培佳, 樊敏, 等. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 107

- [11] QIN S H, Huang Y, LI P J, et al. *Advances in Space Research*, 2019, 64: 836
- [12] 刘思语, 黄勇, 李培佳, 等. *深空探测学报 (中英文)*, 2022, 9: 14
- [13] 段建锋, 陈明, 张宇, 等. *深空探测学报*, 2019, 6: 247
- [14] 孟占峰. *航空学报*, 2024, 45: 210
- [15] 杨维康. *宇航学报*, 2008, 29: 426
- [16] 周文艳, 高博宇, 董畑姍, 等. *中国空间科学技术 (中英文)*, 2024, 44: 16
- [17] 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50: 87
- [18] 董光亮, 李海涛, 郝万宏, 等. *深空探测学报*, 2018, 5: 99
- [19] 王美, 陈略, 韩松涛, 等. *深空探测学报*, 2018, 5: 539
- [20] 曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. *科学通报*, 2010, 55: 2559
- [21] 洪晓瑜, 张秀忠, 郑为民, 等. *深空探测学报 (中英文)*, 2020, 7: 321

Analysis of the Orbit Determination Accuracy of the Queqiao-2 in the Lunar Highly Elliptical Orbit

MA Yunlong^{1,2}, HUANG Yong^{1,2,3,4}, LI Peijia^{1,3,4}, HUANG Yidan^{1,3},
ZHANG Zhenghao^{1,2}, YUAN Jiachen^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China; 4. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper addresses the orbit determination problem for the Queqiao-2 relay satellite in its 24-hour retrograde circumlunar highly elliptical orbit. Based on actual measurement data from different mission phases, the analysis investigates the influence of several factors on orbit determination accuracy, including the volume of observational data, the number of ranging stations, the inclusion of VLBI data, and the geometric observing configuration between the spacecraft and ground stations for the first time. The results indicate that the observing configuration is a critical factor affecting accuracy. When the spacecraft is in a line-of-sight (face-on) state, the position and velocity accuracies are approximately 41 m and 0.28 cm/s, respectively. In contrast, when in a non-line-of-sight (edge-on) state, the accuracy degrades significantly to approximately 155 m and 0.93 cm/s. Further analysis reveals distinct characteristics compared to circumlunar circular orbits. For this highly elliptical orbit, the magnitudes of the orbit error components in the radial, tangential, and normal directions are comparable. Furthermore, the orbit determination accuracy exhibits a non-uniform distribution along the orbital path: position accuracy is lower near the apolune, while velocity accuracy is lower near the perilune. The findings of this study provide a valuable reference for the orbit determination and mission design of highly elliptical orbits in future lunar and deep-space exploration missions.

Key words: orbit determination; Queqiao-2; Lunar highly elliptical orbit; VLBI