

CAO Jianfeng, MAN Haijun, LIU Shan hong, HUANG Hao, ZHANG Yu. Orbit Determination of Asteroid 2016HO3 and Analysis of Detection of Yarkovsky Effect Force (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 761–769. CSTR:32142.14.cjss.2025-0007. DOI:10.11728/cjss2025.03.2025-0007

2016HO3 轨道确定及雅科夫斯基 效应力探测分析*

曹建峰¹ 满海钧¹ 刘山洪¹
黄皓² 张宇¹

1(北京航天飞行控制中心 航天飞行动力学技术重点实验室 北京 100094)

2(北京师范大学天文系 天文与天体物理前沿科学研究所 北京 100875)

摘要 针对自主小行星探测任务中对历表的高精度需求, 对小行星 2016HO3 进行数据处理与深入分析. 构建了小行星 2016HO3 的高精度动力学模型, 该模型在 40 年积分周期后与 Horizons 星历的偏差保持在 400 m 以内. 利用 MPC 发布的观测数据进行了定轨计算, 并对两种不同加权策略下的定轨结果进行了对比分析. 同时, 在轨道解算过程中, 还尝试进行了雅科夫斯基效应力的探测. 结果表明, 两种加权策略下的残差表现出高度一致性, 但轨道偏差却接近 100 km. 此外, 通过轨道解算成功探测到了雅科夫斯基效应, 并验证了该检测方法的有效性. 轨道演化分析进一步揭示, 当地面设备在每年固定月份观测小行星时, 该月份的轨道偏差最为稳定, 而其他月份的轨道则呈现出显著的发散趋势. 本研究为自主小行星探测任务后续的测量数据处理提供了有益的参考和理论方法支持, 有助于提升探测任务的精度和可靠性.

关键词 小行星探测, 历表构建, 雅科夫斯基效应, 轨道演化

中图分类号 P129

Orbit Determination of Asteroid 2016HO3 and Analysis of Detection of Yarkovsky Effect Force

CAO Jianfeng¹ MAN Haijun¹ LIU Shan hong¹
HUANG Hao² ZHANG Yu¹

1(Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics,
Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094)

2(Frontier Science Institute of Astronomy and Astrophysics, Astronomy Department,
Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract To address the requirement for high-precision ephemerides in autonomous asteroid explo-

* 高层次创新人才项目资助 (小行星监测防御轨道理论与应用技术研究)

2025-01-07 收到原稿, 2025-04-14 收到修定稿

ration missions, data processing and analysis were conducted on asteroid 2016HO3. Initially, a high-precision dynamical model for the asteroid was established. After a 40-year integration, the resulting ephemerides exhibited a deviation of less than 400 m compared to those from the JPL Horizons system. Subsequently, orbit determination calculations were performed using observational data released by the Minor Planet Center (MPC). The impact of two weighting strategies on the orbit determination results was analyzed, revealing that, despite highly consistent residuals, the orbital deviation approached 100 km. Furthermore, an attempt was made to detect the Yarkovsky effect through orbital solutions, which verified the effectiveness of the detection method. The orbital evolution analysis demonstrated that, due to the fixed-month observations of the asteroid by ground-based facilities, the orbital deviation was most stable during that specific month, whereas the orbital evolution diverged significantly in other months. This study provides references and theoretical support for subsequent data processing in autonomous asteroid exploration missions.

Key words Asteroid exploration, Ephemeris construction, Yarkovsky effect, Orbital evolution

0 引言

小行星作为太阳系内数量庞大的小天体,其轨道特性及内部结构一直是天文学与行星科学研究的核心内容.随着航天技术的不断进步与深空探测能力的显著提升,中国已着手实施自主小行星探测计划.该计划旨在通过发射探测器,对小行星 2016HO3 (国际编号 469219, 名称 Kamo'oalewa, 下文简称 HO3) 进行近距离观测与采样分析,以深入揭示其物理属性、化学组成及演化过程^[1].

HO3 与地球具有相似的公转周期,其轨道相对于地球呈现出周期性运动特征,因此被视为地球的准卫星^[2].该小行星于 2016 年 4 月 27 日首次被夏威夷海勒卡拉山的 1.8 m 口径泛星计划巡天望远镜发现.由于 HO3 尺寸较小且目标暗弱,地面观测数据相对匮乏,目前对其了解尚不充分^[3].2017 年 Reddy 等获取了 HO3 的测光数据,并据此估算出其绝对星等为 24.63.同时,根据谱线特征,Reddy 等^[4]将 HO3 分类为 S 型小行星.在假设反照率为 0.03~0.60 的情况下,推算出 HO3 的自转周期为 (28.02 ± 0.48) min, 直径为 40~100 m.

对 HO3 已经进行有持续的观测与数据收集,旨在更深入地了解其轨道特性与物理属性^[5-7].随着观测数据的不断累积,HO3 的独特轨道形态与潜在的科学价值逐渐受到更多关注^[8].此外,HO3 体积较小,其长期轨道演化受雅科夫斯基效应的影响较大^[9].雅科夫斯基效应是由小行星表面温度分布不均导致的热辐射压力,对小行星的轨道演化具有显著影响.对 HO3 的雅科夫斯基效应进行探测与分析,有助于

揭示其轨道演化的物理机制,并为理解太阳系内其他小行星的动力学行为提供重要参考^[10,11].

目前,HO3 的轨道解算存在诸多不确定性.Horizons 发布了 HO3 的星历,其一并发布的星历不确定度为百公里量级^[12-14].此情况主要归因于 HO3 的观测弧段较短,且每次跟踪均集中于每年距离地球最近的 3—4 月,从而导致了观测几何条件相对较差.因此,进一步深入研究其轨道特性与动力学行为,提高轨道解算的精度与可靠性,对于全面揭示 HO3 的科学价值具有重要意义.同时,HO3 的轨道确定与动力学特性研究也将为后续的小行星探测任务提供重要的科学依据与参考.小天体高精度数值历表作为小天体动力学基础研究的重要组成部分,是小行星探测任务中任务论证、任务规划、轨道设计以及射电科学数据分析的基础数据,具有重要的工程与科学意义.

1 小行星观测数据

国际小行星中心网站发布了 2004 年 3 月 17 日至 2024 年 3 月 18 日期间的观测数据,共包括 14 个望远镜观测的 322 组赤经、赤纬数据.参与 HO3 观测的望远镜口径为 0.4~3.5 m,其中 T12 (218 组)、568 (45 组)、F51 (17 组) 3 个望远镜观测的数据最多,且 F51 观测的时间跨度最大,首次观测为 2011 年,最后一次观测为 2016 年.图 1 给出了小行星现有观测数据与地心距的关系,受限于 HO3 的暗弱特性与地基望远镜的观测能力,观测弧段主要集中在每年的 3—4 月,地心距集中在 3000 万 km 范围内.

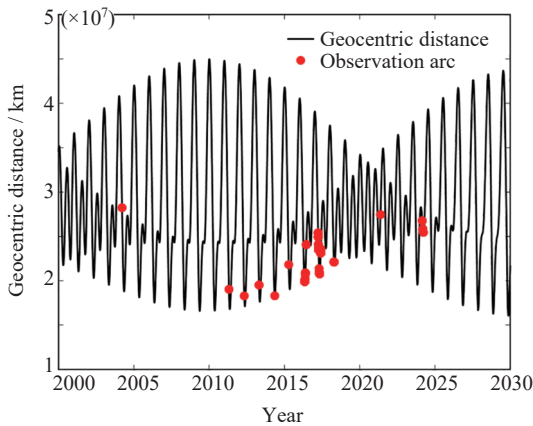


图 1 HO3 观测数据与地心距关系
Fig. 1 HO3 observations corresponding to the geocentric distance

表 1 轨道计算的摄动力模型
Table 1 Perturbation force models for orbit calculation

项目	模型
时空参考系	质心天球参考系
行星历表	JPL DE440
质点引力	日月+大行星+冥王星 小行星(主要的16颗小行星) ^[16]
非球形引力	地球非球形(5×5)
雅科夫斯基效应力	简化模型 ^[17]
广义相对论	1阶后牛顿

2 动力学模型与定轨计算软件

2.1 轨道动力学模型

在不考虑非球形引力的前提下, 太阳系天体受力模型中的质点引力加速度与广义相对论摄动加速度为^[15]

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}}_s = & \sum_j \frac{\mu_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_s)}{r_{sj}^3} + \sum_j \frac{\mu_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_s)}{r_{sj}^3} \left\{ -\frac{2(\beta + \gamma)}{c^2} \right. \\ & \sum_{k \neq s} \frac{\mu_k}{r_{sk}} - \frac{2\beta - 1}{c^2} \sum_{k \neq j} \frac{\mu_k}{r_{jk}} + \gamma \left(\frac{v_s}{c} \right)^2 + (1 + \gamma) \left(\frac{v_j}{c} \right)^2 - \\ & \frac{2(1 + \gamma)}{c^2} \dot{\mathbf{r}}_s \cdot \dot{\mathbf{r}}_j - \frac{3}{2c^2} \left[\frac{(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_j) \cdot \dot{\mathbf{r}}_j}{r_{sj}} \right]^2 + \\ & \left. \frac{1}{2c^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_s) \cdot \ddot{\mathbf{r}}_j \right\} + \frac{1}{c^2} \sum_j \mu_j \frac{(\dot{\mathbf{r}}_s - \dot{\mathbf{r}}_j)}{r_{sj}^3} \\ & \{ (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_j) \cdot [(2 + 2\gamma) \dot{\mathbf{r}}_s - (1 + 2\gamma) \dot{\mathbf{r}}_j] \} + \\ & \frac{(3 + 4\gamma)}{2c^2} \sum_j \frac{\mu_j \ddot{\mathbf{r}}_j}{r_{sj}}. \end{aligned} \quad (1)$$

表 2 小天体引力常数

Table 2 Gravitational constants for small celestial bodies

小行星名称	引力常数/(m ³ ·s ⁻²)
Ceres	62809392663.751
Pallas	13923011068.771
Juno	1622414767.576
Vesta	17288009363.646
Hebe	372800244.326
Hygiea	5542391735.244
Eunomia	2098154705.595
Psyche	1530048436.930
Euphrosyne	2844871570.964
Europa	1110804430.899
Cybele	1426480699.967
Sylvia	986352777.786
Thisbe	1155799234.540
Camilla	749743219.400
Davida	2331286426.251
Interamnia	2357317307.308

其中, β 和 γ 为后牛顿参数, 对广义相对论而言, 取值均为 1; c 为真空中的光速, $\mathbf{r}_s$ 表示航天器在太阳系质心系中的位置矢量, v 表示速度矢量的模, μ_j 表示各天体对应的引力常数, $\mathbf{r}_j$ 表示各天体在太阳系质心系中的位置矢量, r_{sj} 表示第 j 个天体距航天器的距离.

HO3 为近地小行星, 至少在未来的 100 年内不会飞离地球, 因此其动力学特性有别于太阳系内的一般小行星. 本文在 HO3 的轨道分析中, 所考虑的受力模型详细列于表 1, 主要摄动小行星的相关信息则参见表 2.

雅科夫斯基效应力源自小行星或彗星表面热辐射的不均匀性, 该不均匀性导致推力产生. 天体表面吸收阳光加热后, 热辐射释放不均, 形成微小温度梯度, 引发物质热膨胀与重新分布, 进而对小天体施加一个净推力^[18]. 早期雅科夫斯基效应理论模型中, 研究者设定了一系列前提条件, 包括小行星边界条件遵循线性规律、自转轴指向恒定以及绕日公转轨道为圆形. 在这些前提下, 半长径变化率被划分为周日变化项与季节变化项. 对于尺寸小于 100 m 的 HO3 天体, 雅科夫斯基效应力在其长期轨道演化分析中具有显

著影响. 鉴于 HO3 的物理参数尚未明确, 本研究采用简化的建模方法进行分析^[10], 在轨道坐标系下雅科夫斯基效应力产生的加速度为

$$\begin{bmatrix} A_R \\ A_T \\ A_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \cdot g(r). \quad (2)$$

其中, A_1, A_2, A_3 的量纲为 $\text{AU} \cdot \text{d}^{-2}$, $g(r)$ 可以近似表示为 $g(r) = \left(\frac{r_0}{r_{\text{sun}}}\right)^2$, $r_0 = 1\text{AU}$, r_{sun} 表示日心距. 一般而言, 仅需要考虑横向加速度, 即 A_2 分量. 对于高精度的应用, 需要考虑复杂的热辐射模型.

在天球参考系下, 雅科夫斯基效应力产生的加速度为

$$\mathbf{a} = \left(\mathbf{M} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \right) \cdot g(r). \quad (3)$$

加速度对 (A_1, A_2, A_3) 的偏导数为

$$\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial (A_1, A_2, A_3)} = \mathbf{M} \cdot g(r). \quad (4)$$

其中, $\mathbf{M}$ 表示天球参考系至轨道坐标系的旋转矩阵.

依据 Horizons 网站发布的星历数据, 以 2000 年 1 月 1 日 0 时的位置与速度作为初始条件, 进行了为期 40 年的星历积分. 如图 2 所示的对比结果显示, 最

大位置偏差未超过 400 m, 速度偏差保持在 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内. 其中位置偏差主要集中于沿迹方向, 而速度偏差则集中于径向方向. 由此导致的地基测角建模误差小于 3 mas, 远低于当前地基测量的典型精度 0.1 mas. 这表明, 软件当前采用的力模型精度足以满足小行星轨道解算的需求, 且未考虑的力模型对轨道解算结果无实质性影响. 在评估的各种受力模型中, 非球形引力与小行星质点引力对 HO3 历表的影响相对较小, 引起的星历偏差分别为 157 m 和 427 m.

2.2 轨道计算软件

定轨分析采用太阳系多星精密定轨软件 MODAS. 该软件旨在满足未来空间探测任务需求, 统一进行轨道计算, 适用于太阳系内各类天体. 其能够解决多天体、多探测器联合定轨问题, 并满足由轨道数据衍生的科学需求, 例如历表精化和重力场反演等. MODAS 通过处理与比较月球、火星、木星及小行星的探测数据, 验证了其功能与精度^[19]. 在构建 HO3 的历表过程中, 作者对 MODAS 软件进行了升级完善, 特别扩充了雅科夫斯基效应力的计算模块, 并具备了相关系数的解算能力. 这一改进在 HO3 历表的实际构建中得到了有效验证.

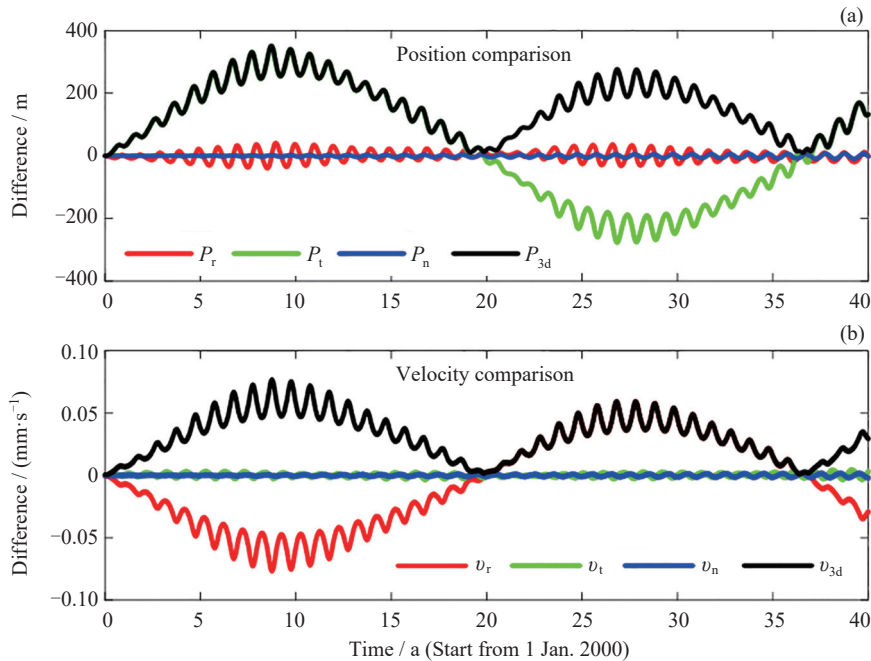


图 2 积分轨道与 JPL/Horizons 发布星历的差异

Fig. 2 Differences between integrated orbits and ephemerides published by JPL/Horizons

3 数据处理

3.1 轨道解算

对小行星中心 (Minor Planet Center, MPC)* 发布的观测数据组进行处理. 鉴于 2004 年数据质量不佳^[12], 计算分析采用 2011—2024 年全部 320 组数据中的 319 组, 一组数据因残差超出 3σ 异常值剔除标准而被排除. 定轨计算的基本力模型参见表 1. MODAS 延续深空探测任务的轨道计算方法, 采用 KSG 积分器, 该积分器为定阶、定步长的多步法类型. 在处理 HO3 数据时, 积分步长设定为 18000 s. 各测站的观测数据被赋予等权, 即赤经和赤纬观测数据的权重均设为 $1.0''$. 定轨计算迭代 5 次后收敛, 整个定轨过程耗时约 30 s. 图 3 给出了定轨残差的统计结果, 以均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 表示, 其表达式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 \right)}. \quad (5)$$

其中, ε_i 表示第 i 组观测数据的残差, n 表示观测数据的个数.

图 3 所示中赤经 E_{RMS} 为 $0.2156''$, 赤纬 E_{RMS} 为

$0.1450''$. 残差统计值与文献 [12,13] 发布的定轨残差统计值的量级一致, 表明定轨分析软件、流程及策略均合理可行.

Horizons 网站发布了 JPL 解算的 HO3 历表, 图

4 给出了定轨结果与 Horizons 发布星历的比对, 在 20 年时间尺度内位置偏差最大为 60 km, 速度最大偏差小于 $1.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 该偏差小于 Horizons 网站同步提供的星历不确定度.

3.2 数据权重的影响

由于不同望远镜在观测 HO3 时性能存在差异, 且观测数据相对稀疏, 观测数据权重的设置对轨道解算结果有显著影响. 3.1 节的分析采用了等权处理方法, 即对所有望远镜数据的赤经和赤纬赋予相同权重. Veres 等^[20] 对主要小行星的测量误差进行了统计分析, 通过探究测量残差与观测历元、观测亮度及运动速率的相关性, 设计了一种新的加权方案, 专门用于小行星轨道确定, 以有效处理较暗观测中产生的较大误差. NEODyS 网站 (近地天体动态站点) 由意大利比萨大学天文系维护, 旨在跟踪和研究近地天体, 包括小行星和彗星. 此网站提供轨道数据、撞击风险评估工具及数据可视化功能, 帮助用户获取这些天体的轨道与位置信息. NEODyS 的数据来自国际天文学联合会小

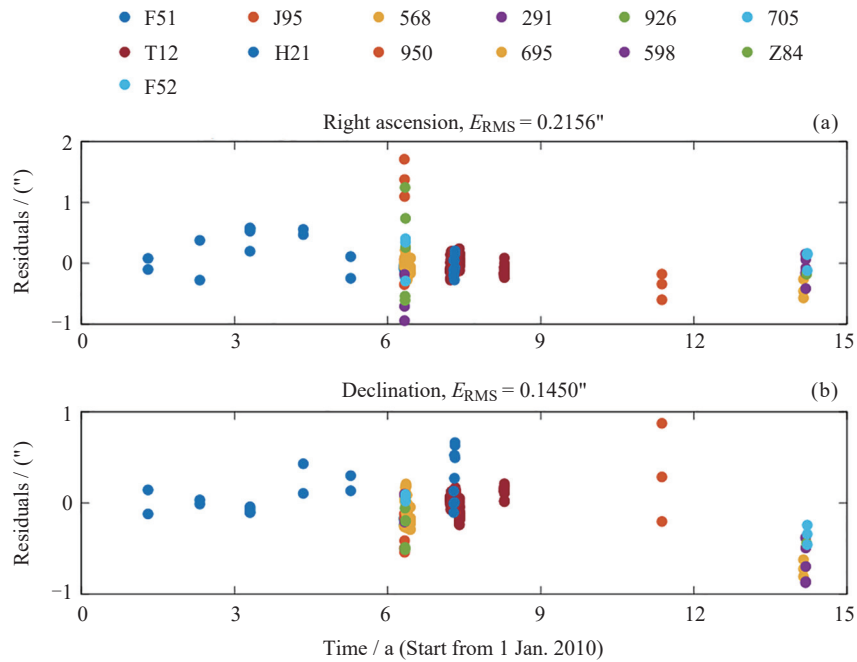


图 3 定轨残差统计

Fig. 3 Statistics of orbit determination residuals

* <http://www.minorplanetcenter.net/>

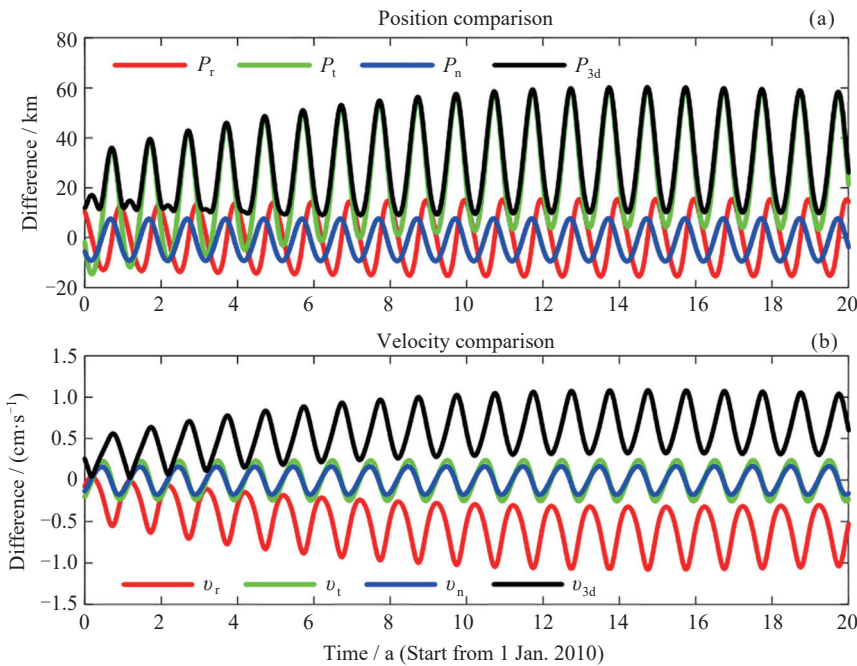


图 4 定轨星历比较

Fig. 4 Comparison of determined orbits

行星中心及其他相关天文观测机构, 确保数据准确可靠. 可通过该网站评估近地天体对地球的影响, 并为太空探索和行星防御计划提供所需信息. NEODyS 网站同步发布了观测数据及数据处理中具体的权重设置 (见表 3). 本节将针对此权重设定进行定轨分析与比对.

对两种不同权重设置的定轨结果进行比对, 表 4 给出了基于这两种策略所得定轨计算的残差统计结果. 具体而言, 两种策略计算得到的赤经残差的 E_{RMS} 为 0.32%, 赤纬残差 E_{RMS} 为 3.1%.

图 5 呈现了两种策略下定轨星历之间的偏差统计, 其中定轨弧段内位置偏差的最大值达到 100 km, 速度偏差为 $3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. 结果显示, 两种策略的定轨残差具有高度一致性, 但对轨道偏差的影响存在显著差异. 鉴于 HO3 观测设备性能存在差异, 理论上, 统计加权方法更有助于高性能设备在历表改进中的贡献. 同时, 在观测数据较为稀疏的情况下, 仅凭观测数据的残差难以准确评估轨道的真实精度.

3.3 雅科夫斯基力

在轨道确定计算的过程中, 同时尝试了对雅科夫斯基力的解算, 具体解算了沿迹 (T) 方向的系数. 基于这一解算策略, 采用 2011—2021 年的地基光学观测数据, 成功检测到了微弱的雅科夫斯基效应力. 具体解算值见表 5, 同时给出了其他研究解算的系数,

表 3 NEODyS 权重设置策略
Table 3 Weighting strategies for NEODyS

测站代号	NEODyS/($^{\circ}$)
F51	0.2
F52	0.2
645	0.3
695	0.6
568	0.2
291	0.5
926	1.0
705	1.0
T12	0.158
H21	1.0
950	1.0
J95	1.0
598	0.6
Z84	0.4

表 4 定轨残差统计
Table 4 Statistics of orbit determination residuals

定轨策略	数据类型	数据个数	使用个数	残差 $E_{\text{RMS}}/(^{\circ})$
等权处理	赤经	320	318	0.2156
	赤纬	320	319	0.1450
NEODyS权重	赤经	320	320	0.2163
	赤纬	320	319	0.1495

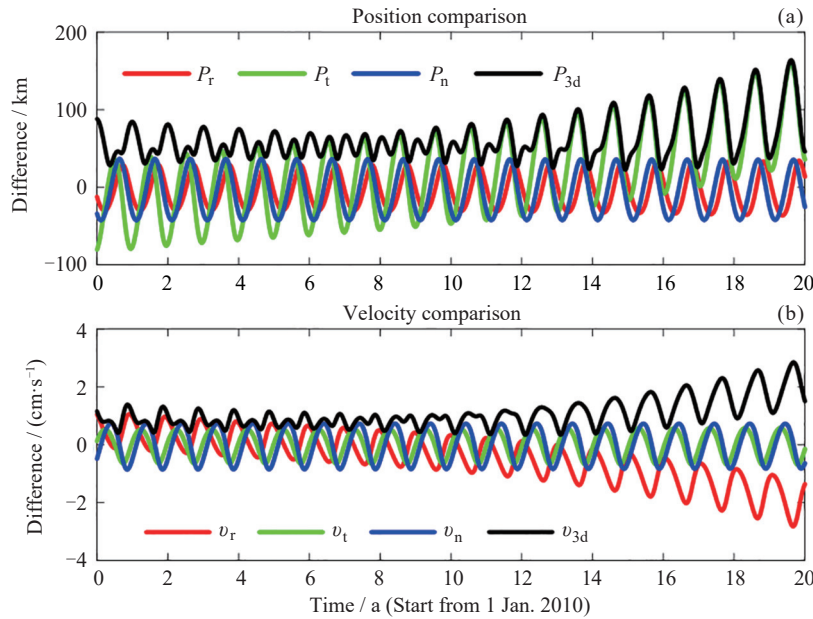


图 5 星历比较

Fig. 5 Ephemeris comparison

表 5 雅科夫斯基效应力检测情况
Table 5 Detection status of other Yarkovsky effect forces

解算来源	A_2	不确定度
文献[9]	-1.434×10^{-13}	0.410×10^{-13}
文献[12]	-1.075×10^{-13}	0.447×10^{-13}
Horizons	-1.364×10^{-13}	—
本文	-1.515×10^{-13}	0.303×10^{-13}
NEODYs权重	-1.203×10^{-13}	0.225×10^{-13}

不同研究解算的系数值处于同等量级. 相比于文献 [9, 12] 中的解算不确定度, 本文通过引入更多观测数据 (增加了 2024 年的观测数据), 实现了对不确定度的进一步控制. 随着观测数据的持续积累, 雅科夫斯基效应力的探测能力有望得到进一步提升.

根据高斯摄动理论, 雅科夫斯基效应力引起的轨道半长轴漂移为^[21]

$$\frac{da}{dt} = \frac{2p}{nr} A_2 g(r). \quad (6)$$

其中, A_2 为沿迹方向的系数, n 为角速度, p 为半通径. 解算的 A_2 为负数, 表明雅科夫斯基效应力导致小行星的半长轴变小.

3.4 轨道演化特性

HO3 是地球的准卫星, 其公转周期与地球公转

周期相近, 每年 3—4 月最接近地球. 图 6 给出了 2010—2030 年轨道形式误差的演化情况, 该图在日心 RTN 坐标系下呈现了各方向轨道的不确定度. 具体而言, 每年 3 月的不确定度较小, 而其他月份则表现出较大的波动. 图 6(a) 给出了未考虑雅科夫斯基效应力的结果, 图 6(b) 考虑了雅科夫斯基效应力的影响. 对比两图可见, 在当前观测条件下, 考虑雅科夫斯基效应力会导致轨道误差增大. 此外, 随着演化时间的增加, 轨道不确定度逐渐增大, 并呈现发散趋势. 由于地基光学探测设备的局限性, 对 HO3 的跟踪主要集中于其近地时期. 针对未来的小行星探测任务, 有必要持续开展跟踪试验, 以期逐年提高轨道计算与预报的精度.

4 结论

利用 2011—2024 年国际小行星中心的观测资料, 借助 MODAS 软件并应用等权及 NEODYs 权重设定方案进行了轨道确定分析. 结果表明, 在两种不同的权重设定条件下, 轨道确定残差表现出高度一致性, 然而轨道偏差有明显不同, 最大位置误差达到 100 km. 研究还检测到 HO3 受到的雅科夫斯基效应作用, 并与其他研究结果进行比较, 验证了方法的有效性. 计算显示, HO3 的轨道半长轴因受雅科夫斯

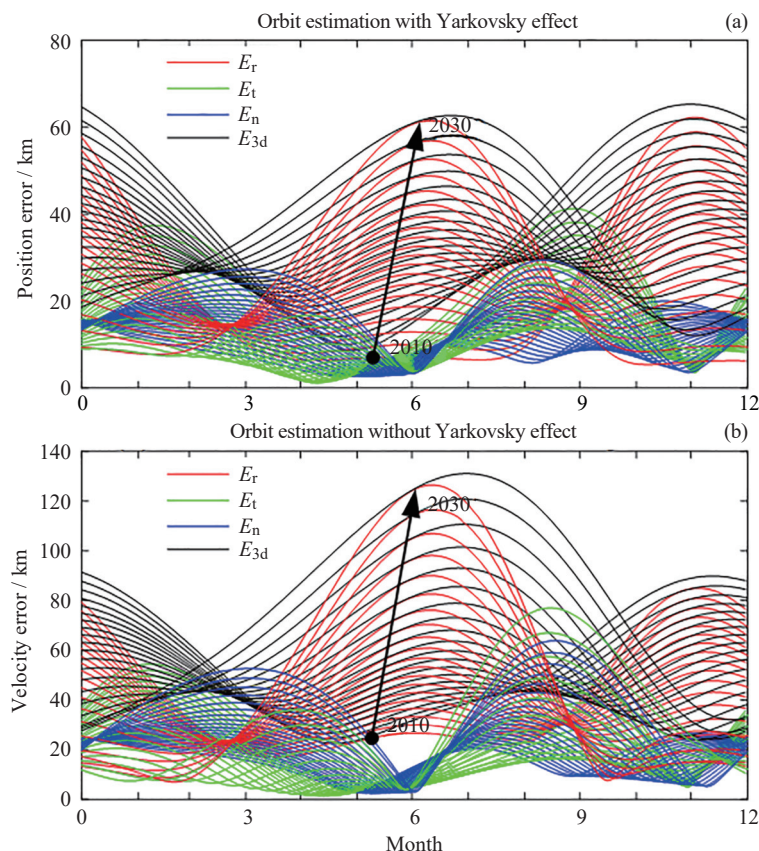


图6 2010—2030年轨道演化分析

Fig. 6 Orbit evolution analysis in 2010—2030

基效应影响存在减小的趋势. 此外, 分析 HO3 轨道演化特性发现, 引入雅科夫斯基效应后, 轨道误差增加, 随着时间推进, 轨道不确定性呈现增长趋势. 因此, 未来的小行星探测任务需进一步开展跟踪试验, 以提高轨道精度. 本研究为理解 HO3 的科学价值提供了重要依据, 并可为后续小行星探测任务提供参考.

参考文献

- [1] WEI Sijia, HE Yuyang, LIU Tianyu, *et al.* History and implications of asteroid exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(1): 19-50 (魏思佳, 何雨畅, 刘天宇, 等. 小行星探测历史及启示 [J]. *空间科学学报*, 2024, **44**(1): 19-50)
- [2] DE LA FUENTE MARCOS C, DE LA FUENTE MARCOS R. Asteroid (469219) 2016 HO₃, the smallest and closest Earth quasi-satellite[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, **462**(4): 3441-3456
- [3] GUR'YANOV S A, GALUSHINA T Y. Study of the dynamics of the asteroid Kamo'oalewa[J]. *Russian Physics Journal*, 2021, **63**(11): 1989-1996
- [4] REDDY V, KUHN O, THIROUIN A, *et al.* Ground-based characterization of Earth Quasi Satellite (469219) 2016HO₃ [C]//Proceedings of American Astronomical Society. DPS Meeting: USA: AIAA, 2017: 204-207
- [5] JIA Xiaoyu, YANG Chen, WANG Tong, *et al.* Modeling of surface temperature for near-Earth asteroid 2016HO₃[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(5): 470-480 (贾晓宇, 杨晨, 王彤, 等. 近地小行星 2016HO₃ 表面温度建模研究 [J]. *深空探测学报*, 2019, **6**(5): 470-480)
- [6] LI X Y, SCHEERES D J. The shape and surface environment of 2016 HO₃[J]. *Icarus*, 2021, **357**: 114249
- [7] FENUCCI M, NOVAKOVIĆ B. The role of the Yarkovsky effect in the Long-term dynamics of asteroid (469219) Kamo'oalewa[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **162**(6): 227
- [8] REZKY M, SOEGIARTINI E. The orbital dynamics of asteroid 469219 Kamo'Oalewa[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, **1523**(1): 012019
- [9] LIU L, YAN J G, YE M, *et al.* Yarkovsky effect detection from ground-based astrometric data for near-Earth asteroid (469219) Kamo'oalewa[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, **667**: A150
- [10] HUI M T, JEWITT D. Non-gravitational acceleration of the active asteroids[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **153**(2): 80
- [11] VOKROUHLICKÝ D, MILANI A, CHESLEY S R. Yarkovsky effect on small Near-Earth asteroids: mathemat-

- ical formulation and examples[J]. *Icarus*, 2000, **148**(1): 118-138
- [12] HU S C, BIN L, JIANG H X, *et al*. Peculiar orbital characteristics of Earth Quasi-Satellite 469219 Kamo'oalewa: implications for the yarkovsky detection and orbital uncertainty propagation[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **166**(4): 178
- [13] TIAN W. Orbit determination of the asteroid (469219) Kamo'oalewa and its error analysis[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2021, **45**(3): 402-411
- [14] HUANG Hao, LIU Shanhong, CAO Jianfeng, *et al*. Optical observations and its application on orbit determination for 2016HO₃ exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(3): 521-530 (黄皓, 刘山洪, 曹建峰, 等. 2016HO₃ 探测任务星载光学观测建模及定轨 [J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(3): 521-530)
- [15] PETIT G, LUZUM B. IERS Conventions (2010), IERS technical note No. 36[R]. Paderborn: Bonifatius GmbH, 2010: 1-179
- [16] FOLKNER W M, WILLIAMS J G, BOGGS D H, *et al*. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431[R]. 2014: 1-81
- [17] DEL VIGNA A, FAGGIOLI L, MILANI A, *et al*. Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, **617**: A61
- [18] JIANG Haoxuan, JI Jianghui. The review of thermophysics, Yarkovsky and YORP effects for asteroids[J]. *Progress in Astronomy*, 2018, **36**(3): 213-231 (姜浩轩, 季江徽. 小行星热物理及 Yarkovsky 效应和 YORP 效应的研究进展 [J]. *天文学进展*, 2018, **36**(3): 213-231)
- [19] CAO Jianfeng, LI Xie, JU Bing, *et al*. Multi-satellite precision orbit determination and data analysis software in solar system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, **9**(5): 532-541 (曹建峰, 李颢, 鞠冰, 等. 太阳系多星精密定轨软件 [J]. *深空探测学报*, 2022, **9**(5): 532-541)
- [20] VEREŠ P, FARNOCCHIA D, CHESLEY S R, *et al*. Statistical analysis of astrometric errors for the most productive asteroid surveys[J]. *Icarus*, 2017, **296**: 139-149
- [21] FARNOCCHIA D, CHESLEY S R, VOKROUHLYCKÝ D, *et al*. Near earth asteroids with measurable Yarkovsky effect[J]. *Icarus*, 2013, **224**(1): 1-13

作者简介



曹建峰 男, 1982 年 8 月出生于江苏省如皋市, 现为北京航天飞行控制中心副研究员, 主要研究方向为航天器精密定轨及其科学应用。

E-mail: jfcao@foxmail.com