



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 基于地基观测数据 2016HO3 历表重建与精度分析  
作者： 刘山洪, 吴正楷, 黄皓, 曹建峰, 满海钧, 鞠冰, 李颢  
DOI: 10.13203/j.whugis20230120  
收稿日期: 2023-04-09  
网络首发日期: 2024-04-25  
引用格式: 刘山洪, 吴正楷, 黄皓, 曹建峰, 满海钧, 鞠冰, 李颢. 基于地基观测数据 2016HO3 历表重建与精度分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230120>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230120

引用格式：刘山洪，吴正楷，黄皓，等. 基于地基观测数据 2016HO3 历表重建与精度分析[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2024, DOI:10.13203/J.whugis20230120

Liu Shanong, Wu Zhengkai, Huang Hao, et al. Reconstruction and accuracy analysis of 2016HO3 ephemeris based on ground observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230120

## 基于地基观测数据 2016HO3 历表重建与精度分析

刘山洪<sup>1,2\*</sup> 吴正楷<sup>3</sup> 黄皓<sup>4,5</sup> 曹建峰<sup>1,2</sup> 满海钧<sup>1,2</sup> 鞠冰<sup>1,2</sup> 李颢<sup>1,2</sup>

1 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094

2 北京航天飞行控制中心, 北京 100094

3 武汉大学数学与统计学院, 武汉 430072

4 北京师范大学天文系, 北京 100875

5 天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 100875

**摘要：**小天体历表是小天体探测任务的重要基础支撑数据，工程上和科学上均具有较强的现实意义。针对天问二号任务的探测目标之一近地小行星 2016HO3，分析了截止到 2022 年 10 月可获得的地基天文观测情况，建立起小天体历表解算流程。拟合后结果表明：赤经和赤纬方向上观测量残差在 1.0" 以内，证实了处理流程和解算策略的合理性。重建历表 1 年尺度上与 JPL/Horizons 发布的结果比较，两者在赤经和赤纬方向上差异分别小于 0.025" 和 0.25"。发现不同权重模型以及观测点取舍对定轨精度有较大影响，扣除 2004 年的两组观测值并叠加使用 vfcc17 权重模型时解算历表精度最高，在 50 年尺度上与 Horizons 位置差异 RMS 值为 87.39 km。本研究将为我国天问二号小行星探测任务后续测量数据处理提供一定的参考和数据支持。

**关键词：**天体测量; 历表构建; 小行星; 2016HO3

**中图分类号：**P237

## Reconstruction and Accuracy Analysis of 2016HO3

收稿日期：2023-04-09

基金项目：国家自然科学基金(项目编号:12203002, 11973015, U1831132, 12033009).

第一作者/通讯作者简介：刘山洪，博士，助理研究员，主要从事探测器精密定轨、天体重力场及历表建模研究。

shanhongliu@whu.edu.cn

# Ephemeris Based on Ground Observations

LIU Shanhong<sup>1,2\*</sup> WU Zhengkai<sup>3</sup> HUANG Hao<sup>4,5</sup> CAO Jianfeng<sup>1,2</sup>

MAN Haijun<sup>1,2</sup> JU Bing<sup>1,2</sup> LI Xie<sup>1,2</sup>

1 Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100094, China

2 Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China

3 School of Mathematics and Statistics, Wuhan University, Wuhan 430072, China

4 Astronomy Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

5 Frontier Science Institute of Astronomy and Astrophysics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

## Abstract

**Objectives:** The ephemeris of small bodies is an important and basic supporting data in small body exploration missions, which has strong practical significance in engineering and science. This paper aims at the near-Earth asteroid, 2016HO3, one of the exploration targets of the Tianwen 2 mission.

**Methods:** First, we introduce and analyze the available ground-based observation data, and then establish the process of using ground-based observation data to solve the ephemeris of small celestial body, 2016HO3. According to the solving epoch, weighting and observation selection, 16 orbit determination schemes were compared.

**Results:** The results show that the observed residuals after fitting in the right ascension and declination directions are almost within  $1.0''$ , which confirms the rationality of the data processing flow and the calculation strategy. Compared with the ephemeris published by JPL/Horizons, during one year the differences between the two are less than  $0.025''$  and  $0.25''$  in the right ascension and declination directions respectively. It has been also noticed that different weighting models and the processing of observations significantly affect the orbit determination of 2016HO3.

**Conclusions:** When using observations excluding two observations at 2004 combined with the vfcc17 weight model, the root mean square of position difference with respect to the ephemeris provided by JPL/Horizons during 50-year is about 87.39 km. This study will provide some reference and basic data support for the measurement data processing of the upcoming Tianwen 2 mission.

**Keywords:** Astrometry; Ephemeris; Minor planets; 2016HO3

## 0 引言

开展太阳系内近地小行星和主带小行星探测任务，一方面有助于研究小天体的物质组成和运动规律，为太阳系早期形成和演化研究提供参考，另一方面为小天体资源的利用和开发提供技术保障<sup>[1-5]</sup>。我国首次小天体探测任务已经立项，计划通过一次任务先后探测两个小天体，近地小行星 2016HO3（编号 469219，名称 Kamo`oalewa）和主带彗星 133P/Elst-Pizarro<sup>[1-6]</sup>，将测定两个小天体的轨道自转、形状形貌以及组成结构等科学参数。2016年4月27日，2016HO3由位于夏威夷海勒卡拉山 1.8 m 口径的泛星计划巡天望远镜首次观测到，永久编号为 469219<sup>[7]</sup>。

由于 2016HO3 尺寸较小、星等较弱，地面观测数据缺乏，已知信息较为缺乏。2017年 Reddy 等人获取了 2016HO3 测光曲线，估计其绝对星等  $H=24.63$  ( $G=0.15$ )，根据谱线特征判定其为 S 型小行星<sup>[8]</sup>。假定设置反照率为 0.60~0.03 时，2016HO3 直径约 40~100 m，小行星的引力常数为  $0.115\pm 0.004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ ，自转周期为  $28.02\pm 0.48 \text{ min}$ <sup>[8]-[9]</sup>。2016HO3 以与地球相似的周期共同绕太阳公转，同时其轨道相对于地球呈现出周期性运动，因此是一颗地球“准卫星”（Earth Quasi-Satellite, EQS）<sup>[9]</sup>。2016HO3 是目前发现的五颗地球“准卫星”中轨道性质最为稳定的准卫星，因此十分适合就位探测及采样，另外四颗分别是 (164207) 2004 GU9, (277810) 2006 FV35, 2013 LX28, 和 2014 OL339，其真实轨道会因木星摄动在“准卫星”轨道和“马蹄形”轨道之间变化<sup>[9]-[11]</sup>。2016HO3 最近时距离地球约 1 500 万公里，最远时约 4 500 万公里。小天体短期和中长期高精度数值历表是小天体动力学基础研究内容之一，同时也是小行星探测任务中任务规划、任务论证、轨道设计调控和射电科学数据解译的重要基础数据，具有重要的工程意义和科学意义<sup>[12]-[16]</sup>。

针对 2016HO3，国内外也有诸多轨道动力学方面的研究工作。田伟利用了 2004 到 2018 年间全球的地基光学观测数据，估计了对该小行星的轨道参数，小行星在 2020 至 2025 年外推轨道误差约 100 km<sup>[6]</sup>。Fenucci 等人指出由于 2016HO3 的尺寸太小，Yarkovsky 效应在相对长期的轨道动力学中不能忽视，并且由此估算出其撞击地球的可能性为 12%~15%<sup>[17]</sup>。Rezky 等人通过 REBOUND 软件包中提供的高斯-拉道格式研究了 2016HO3 的轨道动力学，估算了 2016HO3-地球共轨运动发生在  $\pm 20000$  年时间区间内，并产生了准卫星（QS）-马蹄形（HS）共轨跃迁；目前 QS 运动始于 15 年前，将在大约 50 年后向 HS 过渡，之后将以阿波罗小行星的形式运动<sup>[18]</sup>。Feng 等人研究了兼顾 2016 HO3 质量和太阳辐射压力的不确定性及其临近轨道运动的鲁棒性，发现极轨比赤道轨道或倾斜轨道对此不确定性具有更强的鲁棒性，证明了小尺寸、弱引力场天体也存在稳健轨道<sup>[19]</sup>。Yan 等人根据我国 2016HO3 探测任务

仿真了射电科学试验，证实了通过地基与星载数据相结合，使用包括探测器和小行星的跟踪测量数据，可以较高精度估计其 GM 值和轨道<sup>[20-22]</sup>。此外 Venigalla 等人提出了 NEACO 任务，对 2016HO3 采用小卫星进行飞掠探测，主要用于其质量解算、测图和表面物质观测等<sup>[10]</sup>。

本文先梳理了历表解算中考虑的摄动力模型，全面收集了截止到 2022 年 10 月全球对 2016HO3 可获得的地基光学观测数据，详细分析了数据质量和观测情况。评估了不同解算策略下 2016HO3 历表解算精度，分析了拟合后残差。最后结合 JPL/Horizons 和前人解算的 2016HO3 历表，进行了全面对比分析。

## 1 动力学模型

小天体受力模型和大行星、探测器的受力模型存在明显差异和侧重点，小天体总加速度 ( $\mathbf{a}_{mp}$ ) 在日心 J2000 下的具体形式为：

$$\mathbf{a}_{mp} = \mathbf{a}_S + \mathbf{a}_{NB} + \mathbf{a}_{RL} + \mathbf{a}_{ej2} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{a}_S$  表示太阳作为中心天体的引力加速度， $\mathbf{a}_{NB}$  为包括八大行星、冥王星和其他 16 颗大质量小天体在内的 N 体摄动加速度，其中 16 颗摄动小行星的编号、质量等信息在表 1 列出； $\mathbf{a}_{RL}$  表示考虑太阳及八大行星的广义相对论摄动加速度，计算方法为考虑基于参数化的一阶后牛顿 N 体点质量相对论效应，使用度规张量给出较为完整的表达式<sup>[6]</sup>，本文不再赘述<sup>[23]</sup>。 $\mathbf{a}_{ej2}$  为地球  $J_2$  项摄动，当小行星距离地球小于 0.1AU 时需要考虑地球  $J_2$  摄动。 $\mathbf{a}_{ej2}$  太阳、八大行星、月球和冥王星等主要天体的质量和状态向量与 JPL 行星/月球历表 DE441 所采用的数值保持一致。需要注意，暂不考虑太阳光压和雅科夫斯基效应对其的影响。

表 1 摄动小行星编号和参考质量（主要参照 INPOP 历表）

Table 1 Perturbation asteroids and their masses (referred to INPOP ephemeris)

小天体编号	名字	质量/kg	不确定度/kg
1	Ceres	9.38E+20	2.21E+18
2	Pallas	2.05E+20	1.47E+18
3	Juno	2.53E+19	7.88E+17
4	Vesta	2.59E+20	7.73E+17
6	Hebe	9.11E+18	8.73E+17
7	Iris	1.01E+19	5.58E+17
10	Hygiea	8.67E+19	4.29E+18
15	Eunomia	2.96E+19	1.05E+18
16	Psyche	2.11E+19	2.12E+18
29	Amphitrite	8.60E+18	1.23E+18
52	Europa	3.05E+19	2.54E+18
65	Cybele	2.01E+19	3.39E+18
87	Sylvia	1.83E+19	3.57E+18
88	Thisbe	3.70E+14	1.81E+14
511	Davidia	1.81E+19	3.84E+18
704	Interamnia	4.18E+19	4.40E+18

为了验证本文力模型的精确性，通过 Horizon 获取初始历元，积分 2000 年至 2050 年的 2016HO3 轨道，进而与 Horizon 发布历表对比，绘制在图 1。可以看到在三个方向上其差异最大值在 1 km 量级，而 2016HO3 距离地球约为 0.1AU，反映到测角观测量上约为 0.01" 量级，和现有的观测残差 RMS 相比低一个数量级，完全满足轨道解算需求。

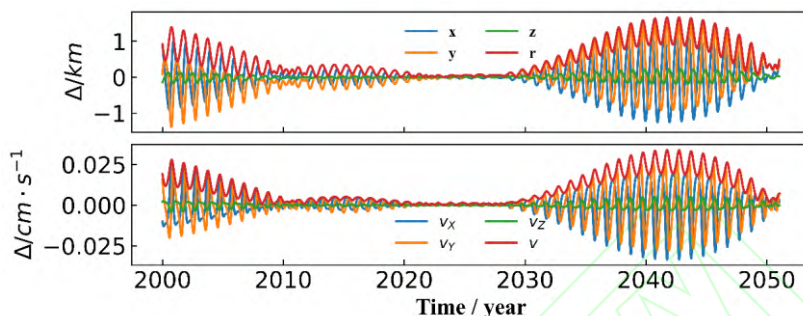


图 1 2016HO3 自积分轨道与 JPL/Horizon 历表差异

Figure 1 The integrated orbit difference of 2016HO3 between ours and JPL/Horizon's results

## 2 观测数据

本文采用的小行星 2016HO3 的光学观测数据来自于国际小行星中心 (Minor Planet Center, MPC) 网站 (<https://www.minorplanetcenter.net/>) 以及网站 AstDys-2 (<https://newton.spacedys.com/astdys/index.php?pc=1.1.7.0&n=469219>)。MPC 网站发布的 310 组光学数据由 Pan-STARRS 1、Great Shefford、LPL 等望远镜观测得到，具体列在表 2。

表 2 2016HO3 相关观测站和望远镜参数

Table 2 Parameters about observatories and telescopes for 2016HO3 observations

望远镜名称	简写	任务及所属	视场
Pan-STARRS 1	PS1	夏威夷大学/宽视场巡天	$7^{\circ 2}$
Great Shefford	GS	私有 (Peter Birtwhistle)	$18.4' \times 18.4'$
LPL/Spacewatch II	LPL	亚利桑那大学/巡天和太阳系小天体搜寻	$20' \times 20'$
Mauna Kea	MK1	夏威夷大学/太阳系天体观测	$19' \times 19'$
A.R.O	ARO	Astronomical Research Institute 与 NASA 合作观测近地天体	$25.6' \times 25.6'$
Tenagra II	TII	私有 (Michael Scwhartz) 并加入 IAWN	$1.35^{\circ} \times 1.35^{\circ}$
La Palma	LP	———	$25^{\circ 2}$
Apache Point	AP	新墨西哥州立大学和 Astrophysical Research Consortium	$16' \times 16'$
SDSS	SDSS	大视场巡天	$3^{\circ 2}$
Mauna Kea	MK2	夏威夷大学/太阳系天体观测	$19' \times 19'$

从图 2 可以看到，地面光学望远镜口径范围为 0.4~3.5 m，观测波段主要集中在 R 波段，观测星等范围为 20~24 等，其中 Mauna Kea 站观测数据最多，共 218 组。图 3 绘制了小行星观测数据与地心距、日心距的关系，可以看到 2016HO3 的地心距在观测时主要集中在 2 000~4 000 万千米，日心距约为  $1.4 \times 10^7 \sim 1.6 \times 10^7 km$ 。尽管采用的数据从 2004 到 2021 年覆盖了多个轨道周期，但由于观测量稀少且集中于某几个观测窗口，目前 JPL/Horizons 在线历表系统基于 MPC 提供的光学观测数据给出的小行

星 2016HO3 的轨道精度约为数十公里，在某些时段可达到上百公里。

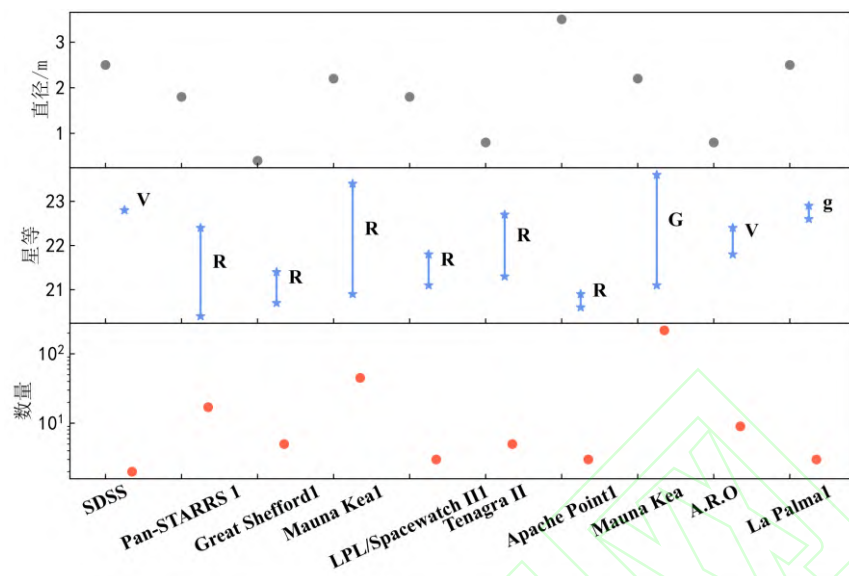


图 2 观测数据与测站分布

Figure 2 The observations and observatory distribution

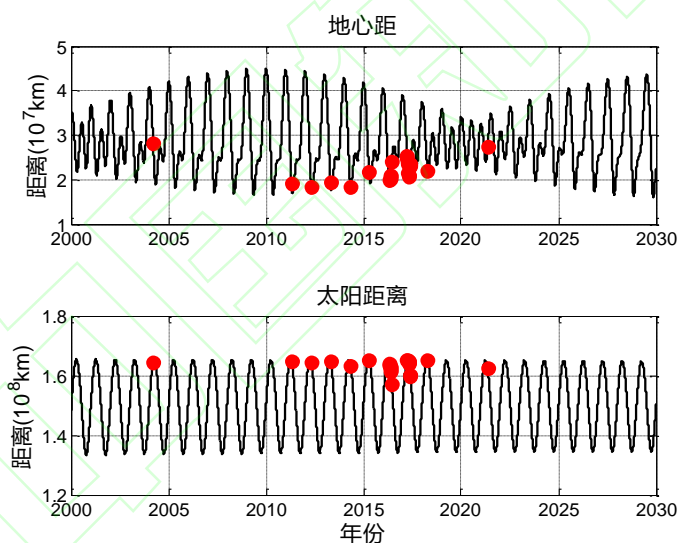


图 3 2016HO3 观测数据与地心距、日心距之间的关系

Figure 3 2016HO3 observations corresponding to the earth and heliocentric distance

### 3 解算结果

#### 3.1 定轨残差分析

基于 OrbFit 软件解算小行星 2016HO3 历表，参数设置介绍如下：解算积分区间为 2000 年 1 月 1 日 00: 00 到 2020 年 12 月 31 日 00: 00 (UTC)，步长为 1 天。观测量权重使用 NEODys<sup>1</sup>网站提供的权重，解算参数为天体初始轨道根数改正量。AstDys-2 还提供了两组初轨信息，解算中采用的一组初

<sup>1</sup> <https://newton.spacedys.com/~neody2/mpcobs/469219.rwo>

始轨道参数列在表 3，历元时刻选取为 57752.473868941（TDT）。由于观测数据稀少，本次解算未对观测数据进行剔除。

表 3 初始轨道参数

Table 3 The initial orbital parameters

轨道元素	数值
a	1.0011046710529334
e*sin(LP)	0.024475026134328
e*cos(LP)	0.101119475838630
tan(i/2)*sin(LN)	0.062286625080603
tan(i/2)*cos(LN)	0.027117735634020
mean long	101.2664885024991

解算后残差数据绘制在图 4，分别给出了光学观测数据赤经（Right Ascension）和赤纬（Declination）方向上的残差分布，不同颜色表示观测值来自不同测站。可以看到，观测量较为集中的 2010 年至 2018 年间，赤经和赤纬方向上拟合后观测残差在 1.0" 以内，与前人解算残差类似<sup>[6]</sup>。可以说明该结果内符合精度良好，处理流程和解算策略均合理。

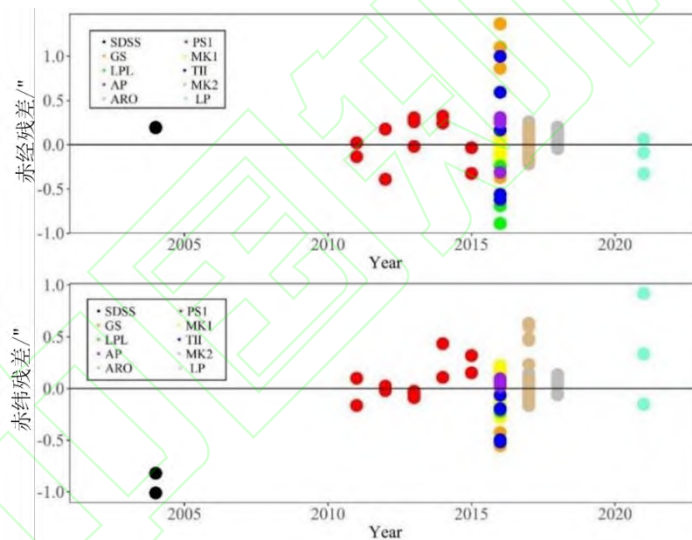


图 4 观测数据拟合后残差

Figure 4 Observation residuals at post-fit

### 3.2 轨道精度评估

为了验证解算轨道正确性，自解算小行星轨道与 JPL/Horizons 发布轨道比较，选取时段为 2020 年 1 月 1 日至 12 月 31 日。赤经、赤纬差值绘制在图 5，在赤经方向上两者差值在 0.025" 以内，在赤纬方向上两者差值在 0.25" 以内。



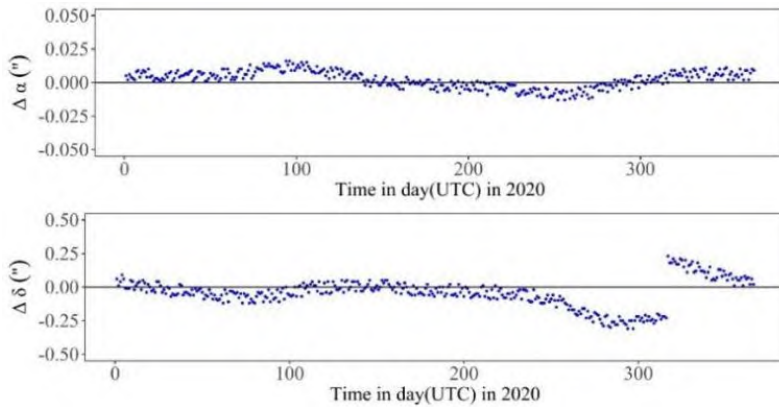
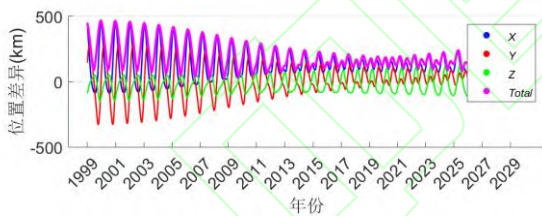


图 5 与 JPL/Horizons 发布轨道差异

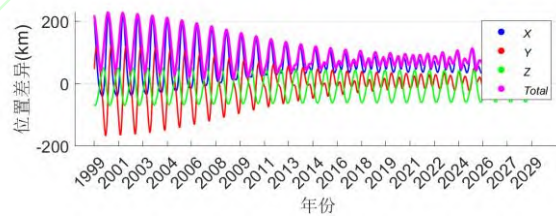
Figure 5 Difference on the right ascension and declination between this study and JPL/Horizons

将结果与田伟等人<sup>[6]</sup>解算结果进行对比，其在 2021 年首次利用地基光学观测数据对 2016HO3 轨道进行了解算。选取对比时段为 2000 年至 2030 年（通讯获取），两者分别与中间产品 JPL/Horizons 历表进行对比，绘制在图 6。从图 6（a）也可以看到，有观测数据的时段轨道误差显著小于外推时段的轨道误差，尤其是 2013 往前递推误差增大明显。从图 6（a）和（b）横向比较来看，两者位置差异具有类似的趋势，误差基本在一个量级上，证实了本结果具有较好的外部符合性。需要说明，在 30 年时间尺度上，本研究解算的 2016HO3 历表精度略好于其结果，主要归功于处理了 2004 到 2021 年所有观测数据，而前者处理时段为 2004 到 2018 年。侧面证实小天体历表解算精度在百公里量级时，增加地基光学观测数据对历表解算精度的提升具有重要贡献。



(a) 田伟结果<sup>[6]</sup>

(a) Tian Wei's result<sup>[6]</sup>.



(b) 本研究结果

(b) Our results

图 6 同类结果位置差异对比

Figure 6 Position difference comparing with other study

进一步，基于观测量和权重特点模式建立多种解算模式，列在表 4。结合观测值密集时期考虑，选取四个时刻（分别为 2000 年、2010 年、2017 年以及 2022 年的 1 月 1 号 00:00:00）作为初始历元对 2016HO3 的历表进行解算。

表 4 多种解算策略设置

Table 4 Several solving strategies

解算模式	具体设置
A	采用 NEODyS 公布的权重

B	观测值中去除 2004 年观测点
C	根据观测值残差设置固定权重
D	根据观测值残差设置观测量大于 $3\sigma$ 剔除标准

模式 A 选取 NEODYs 网站提供的观测权重；模式 B 在模式 A 的基础上将 2004 年两组观测点剔除；模式 C 为优化权重：对于观测量残差处在 $3\sigma$ 之外的设置为  $1''$ ， $2\sigma-3\sigma$ 设置为  $0.5''$ ， $1\sigma-2\sigma$ 设置为  $0.2''$ ， $1\sigma$ 设置为  $0.1''$ ；模式 D 为在模式 A 基础上剔除在观测量残差大于 $3\sigma$ 的观测点。表 5~表 8 表示在不同解算时刻以及模式的解算结果。

表 5 不同解算时刻及解算模型的解算结果

Table 5 Solutions with different initial epoch parameters and strategies

解算时刻	模式	$r(km)$	$v(cm \cdot s^{-1})$	$RMS_{R.A.} (")$	$RMS_{Dec} (")$
2000	A	160.4580	2.9203	0.1879	0.1553
	B	115.5245	2.1063	0.1878	0.1364
	C	291.4885	5.3056	0.1891	0.1423
	D	143.3548	2.6087	0.1125	0.089
2010	A	160.5750	2.9224	0.1879	0.1552
	B	115.6754	2.1090	0.1877	0.1364
	C	291.4885	5.3056	0.1891	0.1423
	D	143.3548	2.6087	0.1125	0.0894
2017	A	160.5749	2.9224	0.1879	0.1552
	B	115.6753	2.1090	0.1877	0.1364
	C	291.4885	5.3056	0.1891	0.1423
	D	143.3550	2.6087	0.1124	0.0894
2020	A	160.5750	2.9224	0.1879	0.1552
	B	115.6755	2.1090	0.1877	0.1364
	C	291.4885	5.3056	0.1891	0.1423
	D	143.3548	2.6087	0.1124	0.0894

从表 5 可以看出，四种模式下在不同时刻下解算的轨道没有显著差异。当去除 2004 年的两组观测数据后，轨道解算精度提升 25%。相较于使用全部观测量，对定轨残差处在范围外的观测点进行剔除后，轨道解算精度提升约 11%。为验证 2016HO3 历表长期位置精度，对比了 2000 年 1 月 1 日 00:00 到 2050 年 1 月 1 日 00:00 期间，本文采用模式 B 解算历表和 JPL/Horizons 历表在太阳系质心 J2000 下的三维位置和速度的差异，绘制在图 7。

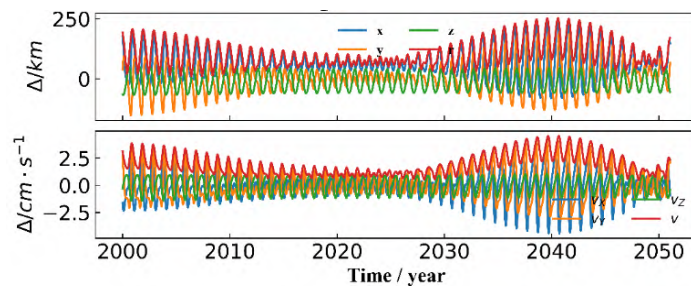


图 7 2010 年 B 模式下解算结果与 JPL/Horizons 历表差异

Figure 7 Ephemeris difference between ours (with the initial orbit at 2010 and strategy B) and JPL/Horizons results

从图 7 可以看到，位置和速度差异存在年周期变化，位置方向的偏移量最大不超过 250 km，速度

上不超过  $3\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于 2016HO3 的观测数据集中在 2016-2018 年，该时间范围内历表差异相对较小，小于 100 km，与 JPL/Horizons 发布的定轨弧段精度相当。此外，由于 2016HO3 轨道倾角较小，X、Y 方向差异具有类似变化趋势，Z 方向差异较小且稳定。

此外，本文还比较了两种权重模型，分别为 *vfcc17* 和 *fcct14*<sup>[24]</sup>，在进行定轨计算时提供 MPC 格式的 obs 观测文件并设置不同的权重模型。如表 9 所示，无论使用何种权重模型，模式 B 解算结果均优于模式 A；对于模式 A，使用 *fcct14* 模型结果要优于 *vfcc17* 模型，但对于模式 B，使用 *vfcc17* 模型的结果要优于 *fcct14* 模型，这说明解算权重模型、观测点时刻及数量选取对 2016HO3 轨道解算均有影响。总之，使用 *vfcc17* 模型并剔除 2004 年的两组观测数据后其定轨的外符合精度最高，位置为 87.39 km，速度为  $1.59\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 6 不同权重模型解算结果

Table 6 Solution differences using different weight models

权重模型	解算模式	$r/\text{km}$	$v/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$RMS_{R.A.}/(^{\circ})$	$RMS_{Dec}/(^{\circ})$
<i>vfcc17</i>	A	273.204	4.953	0.189	0.144
	B	87.393	1.590	0.188	0.137
<i>fcct14</i>	A	160.575	2.922	0.188	0.155
	B	115.676	20109	0.188	0.136

## 4 结论

本文基于我国“天问二号”任务的实际需求，针对 2016HO3 探测目标全面收集并分析了地基天文光学数据，解算了小行星 2016HO3 历表，并且评估了解算精度。拟合后残差在  $1.0''$  以内，验证了利用地基观测数据进行小行星轨道解算流程的正确性。结果与 JPL/Horizons 发布的 2016HO3 轨道比较，赤经、赤纬方向上的差异分别小于  $0.025''$  和  $0.25''$ 。发现不同的权重模型和观测量的取舍会对 2016HO3 的定轨解算有较大影响。50 年尺度历表与 JPL/Horizons 发布的结果相比，基于 *vfcc17* 权重模型并去除 2004 年观测数据，其解算历表的位置差异 RMS 值约为 87.39 km。当前小行星 2016HO3 的观测数据少，仅有 10 个望远镜获取了 310 组光学观测数据，且全部集中在西半球，时间跨度从 2004 年 3 月 17 日至 2021 年 5 月 13 日，且尚无高精度的雷达测量和探测器抵近跟踪测量数据，是限制 2016HO3 历表精度提升的重要原因。若要进一步提升轨道精度，一方面需要开展地面观测、增加观测量数目、提高观测精度，另一方面在探测任务实施中利用星载测量数据对 2016HO3 历表精度不断进行优化提升，罗塞塔任务、隼鸟 2 号以及 OSIRIS-Rex 等任务均采用类似策略。

## 参考文献

[1] Zhang T, Xu K, Ding X L. China's Ambitions and Challenges for Asteroid-Comet Exploration[J]. *Nature*

*Astronomy*, 2021, 5(8): 730-731.

[2] Li X Y, Scheeres D J. The Shape and Surface Environment of 2016 HO3[J]. *Icarus*, 2021, 357: 114249.

[3] Jin Weitong. *Precise Orbit Determination of Small Body Spacecraft and Gravitational Mass Estimation*[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020. (金炜桐. 小天体探测器精密定轨与引力质量解算[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.)

[4] Guo Xi, Yan Jianguo, Yang Xuan, et al. Review of the Gravity Field of Asteroids[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 1-7. (郭茜, 鄢建国, 杨轩, 等. 小行星引力场综述[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 1-7.)

[5] Liu S H, Wu Z K, Yan J G, et al. Orbital Eccentricity and Inclination Distribution of Main-belt Asteroids-the Statistical Model Revisited[J]. *icarus*, 2023, 404: 115650.

[6] Tian Wei. Orbit Determination of the Asteroid (469219) Kamo`oalewa and Its Error Analysis.[J] *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2021, 62(2): 56-64.(田伟. 小行星(469219)Kamo`oalewa 轨道的确定与误差分析[J]. 天文学报, 2021, 62(2): 56-64.)

[7] Reddy. The Observation of 2016HO3 [C]// The observation of 2016HO3, USA: [S.N.], 2018.

[8] Reddy V, Kuhn O, Thirouin A, et al. Ground-based Characterization of Earth Quasi Satellite (469219) 2016 HO3[[C]//AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts# 49. 2017, 49: 204.07.

[9] 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.

[10] Venigalla C, Baresi N, Aziz J D, et al. Near-earth Asteroid Characterization and Observation (NEACO) Mission to Asteroid (469219) 2016 HO3[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2019, 56(4): 1121-1136.

[11] Sharkey B N L, Reddy V, Malhotra R, et al. Lunar-like Silicate Material Forms the Earth Quasi-satellite (469219) 2016 HO3 Kamo`oalewa[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 1-7.

[12] Heiligers J, Fernandez J M, Stohlman O R, et al. Trajectory Design for a Solar-sail Mission to Asteroid 2016 HO3[J]. *Astrodynamics*, 2019, 3(3): 231-246.

[13] Emelyanov N V, Drozdov A E. Asteroid satellite ephemeride service. Mutual occultations and eclipses[J]. *Icarus*, 2021, 355: 114160

[14] Farnocchia D, Chesley S R, Takahashi Y, et al. Ephemeris and Hazard Assessment for Near-earth Asteroid (101955) Bennu Based on OSIRIS-REx Data[J]. *icarus*, 2021, 369: 114594.

[15] Liu Shan hong, Wu Zheng kai, Cao Jian feng, et al. Impact Analysis of the Main Asteroid Belt on the Long-term Dynamics of Mars Orbit[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2023, 53(2): 114-122.

(刘山洪, 吴正楷, 曹建峰, 等. 主小行星带对火星轨道长期动力学影响评估[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(2): 114-122.)

[16] Li Xiangyu, Qiao Dong, Huang Jiangchuan, et al. Dynamics and Control of Proximity Operations for Asteroid Exploration Mission[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, 49(8): 69-80. (李翔宇, 乔栋, 黄江川, 等. 小行星探测近轨操作的轨道动力学与控制[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(8): 69-80.)

[17] 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.

[18] Rezky M, Soegiartini E. The Orbital Dynamics of Asteroid 469219 Kamo'oalewa[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1523(1): 012019.

[19] Feng J L, Hou X Y, Di Lizia P, et al. Sensitivity Analysis of the Orbital Motion Around 469219 Kamo'oalewa (2016 HO3) to Uncertainties on Asteroid Mass and Solar Radiation Pressure[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(3): 1602-1618.

[20] Yan J G, Liu L, Ye M, et al. A Simulation of the Joint Estimation of the GM Value and the Ephemeris of the Asteroid 2016 HO3[J]. *icarus*, 2022, 385: 115120.

[21] Jin W T, Li F, Yan J G, et al. A Simulated Global GM Estimate of the Asteroid 469219 Kamo'Oalewa for China's Future Asteroid Mission[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 493(3): 4012-4021.

[22] Wang Bo, Liu Lu, Yan Jianguo, et al. Development of Asteroid Optical Determination Software and Data Processing Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 277-284. (王波, 刘路, 鄢建国, 等. 小行星光学定轨软件研制和数据处理分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 277-284.)

[23] Liu Shanhong. *Scientific Applications of Radio Tracking Data from Deep Space Probes*[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (刘山洪. 深空探测器射电跟踪数据应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.)

[24] 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.

### 网络首发:

**标题:** 基于地基观测数据 2016HO3 历表重建与精度分析

**作者:** 刘山洪, 吴正楷, 黄皓, 曹建峰, 满海钧, 鞠冰, 李颢

**收稿日期:** 2023-04-09

**DOI:**10.13203/j.whugis20230120

### 引用格式:

刘山洪, 吴正楷, 黄皓, 等. 基于地基观测数据 2016HO3 历表重建与精度分析[J].武汉大学学报 (信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230120

Liu Shan hong, Wu Zheng kai, Huang Hao, et al. Reconstruction and accuracy analysis of 2016HO3 ephemeris based on ground observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230120

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!**

---

**您感兴趣的其他相关论文:**

**彗星 311P 天基-地基光学联合定轨及精度分析**

杨婉玲, 高梧桐, 刘路, 王波, 鄢建国.

武汉大学学报 (信息科学版). DOI: 10.13203/j.whugis20220710

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220710>