引文格式:刘山洪,吴正楷,黄皓,等.基于地基观测数据的2016HO3历表重建与精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(7):1304-1310.DOI:10.13203/j.whugis20230120

Citation: LIU Shanhong, 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, 2025, 50(7): 1304-1310. DOI: 10.13203/j.whugis20230120

基于地基观测数据的2016HO3历表重建与精度分析

刘山洪[1,2] 吴正楷[3] 黄 皓[4,5] 曹建峰[1,2] 满海钧[1,2]
鞠 冰[1,2] 李 勰[1,2]

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,湖北 武汉,430072
4 北京师范大学天文系,北京,100875
5 北京师范大学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,工程和科学上均具有较强的现实意义。针对天问二号任务探测目标之一的近地小行星2016HO3,分析了截至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基本在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 a尺度上与喷气推进实验室发布的结果比较,两者差异赤经和赤纬方向上分别小于0.025″和0.25″。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 a尺度上与喷气推进实验室线上历书系统的位置差异的均方根为87.393 km。

关键词:天体测量;历表构建;小行星2016HO3
中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-04-09
DOI:10.13203/j.whugis20230120 **文章编号**:1671-8860(2025)07-1304-07

Reconstruction and Accuracy Analysis of 2016HO3 Ephemeris Based on Ground Observations

LIU Shanhong[1,2] *WU Zhengkai*[3] *HUANG Hao*[4,5] *CAO Jianfeng*[1,2] *MAN Haijun*[1,2]
JU Bing[1,2] *LI Xie*[1,2]

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. We aim 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 establish the process of using ground-based observation data to solve the ephemeris of small celestial body, 2016HO3. According to 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 al-

基金项目:国家自然科学基金(12203002,11973015,U1831132,12033009);中国科学院战略性先导科技专项(XDA0350300)。
第一作者:刘山洪,博士,助理研究员,主要从事天体物理场建模与智能计算研究。shanhongliu@whu.edu.cn
通信作者:黄皓,博士生。202431101069@mail.bnu.edu.cn

most within 1.0″, which confirms the rationality of the data processing flow and the calculation strategy. Compared with the ephemeris published by Jet Propulsion Laboratory (JPL), 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 a is about 87.393 km. This study can provide some reference and basic data support for the measurement data processing of the upcoming Tianwen 2 mission.

Key words: astrometry; ephemeris reconstruction; minor planets 2016HO3

在太阳系内开展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[1-5]。中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[6-7],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。

由于2016HO3尺寸较小、星等较弱,地面观测数据和已知信息较为缺乏。文献[8]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[8]。假定设置反照率为0.60~0.03,2016HO3直径约40~100 m,小行星的引力常数为0.115±0.004 m^3/s^2,自转周期为28.02±0.48 min[8]。2016HO3以与地球相似的周期共同绕太阳公转,同时也周期性绕地球运动,被称为地球准卫星[9]。2016HO3是目前发现的5颗地球准卫星中轨道性质最为稳定的,因此十分适合就位探测及采样,另外4颗分别是(164207) 2004 GU9、(277810) 2006 FV35、2013 LX28和2014 OL339,2016HO3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[9-11],最近时距离地球约1 500万km,最远时约4 500万km。小天体短期和中长期高精度数值历表是小天体动力学的基础研究内容之一,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[12-16]。

针对2016HO3,国内外也有诸多轨道动力学方面的研究工作。文献[6]利用2004—2018年间的全球地基光学观测数据估计了2016HO3的轨道参数,它在2020—2025年的外推轨道误差约100 km。文献[17]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,并由此估算出有2%~15%的可能其最终会撞击地球。文献[18]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,估算了小行星地球共轨运动发生在±20 000 a时间区间内,在此期间发生了准卫星-马蹄形共轨跃迁。目前准卫星运动始于15 a前,将在约50 a后向马蹄形过渡,之后将以阿波罗小行星的形式运动。文献[19]研究了兼顾2016 HO3质量和太阳辐射压力的不确定性、其邻近轨道运动的鲁棒性,发现极轨比赤道轨道和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。文献[20-22]根据中国2016HO3探测任务仿真了射电科学试验,证实了通过地基结合星载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引力常数值值和小行星轨道。此外,文献[10]提出了近地小行星表征和观测任务,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。

本文先梳理了小天体历表解算理论,给出了解算历表考虑的摄动力模型,全面收集了截至2022年10月全球对2016HO3可获得的地基天文观测数据,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历表精度,分析了拟合后残差;结合喷气推进实验室线上历书系统(Jet Propulsion Laboratory, JPL) Horizons和前人提供的解算2016HO3历表,对本文解算的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,小天体总加速度$\boldsymbol{a}_{mp}$在日心

J2000下的具体形式为:

$$\boldsymbol{a}_{mp}=\boldsymbol{a}_S+\boldsymbol{a}_{NB}+\boldsymbol{a}_{RL}+\boldsymbol{a}_{eJ2} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{a}_S$表示太阳作为中心天体的引力加速度;$\boldsymbol{a}_{NB}$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、质量等信息见表1;$\boldsymbol{a}_{RL}$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[6],具体参见文献[23];$\boldsymbol{a}_{eJ2}$为地球J2项摄动,当小行星距离地球小于0.1天文单位时,需要考虑地球J2摄动。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。需要注意的是,暂不考虑太阳光压和雅科夫斯基效应对其的影响。为了验证本文力模型的精确性,通过JPL Horizons获取初始历元,对2000—2050年的2016HO3轨道进行积分,进而与JPL Horizons发布历表对比,如图1所示。可以看到,在3个方向上其差异最大值在量级,而2016HO3距离地球约为0.1天文单位,反映到测角观测量上约为0.01″量级,和现有的观测残差均方根(root mean square,RMS)相比低一个数量级,完全满足轨道解算需求。

2 观测数据

本文采用的小行星2016HO3的光学观测数据来自国际小行星中心(Minor Planet Center,MPC)网站(https://www.minorplanetcenter.net/)以及AstDys-2网站(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,具体见表2。

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 Ephemerise)

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

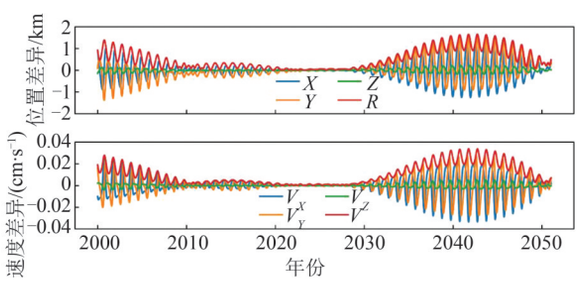


图1 2016HO3自积分轨道与JPL Horizons历表差异

Fig. 1 Integrated Orbit Difference of 2016HO3 Between Ours and JPL Horizons's Results

表2 2016HO3相关观测站和望远镜参数

Table 2 Parameters About Observatories and Telescopes for 2016HO3

望远镜名称	简称	任务及所属	视场
Pan-STARRS 1	PS1	夏威夷大学/宽视场巡天	7 $(°)^2$
Great Shefford	GS	私有	18.4′×18.4′
LPL/Spacewatch II	LPL	亚利桑那大学/巡天和太阳系小天体搜寻	20′×20′
Mauna Kea	MK1	夏威夷大学/太阳系天体观测	19′×19′
A.R.O	ARO	阿马天文台与NASA合作观测近地天体	25.6′×25.6′
Tenagra II	TII	私有并加入国际小行星预警网络	1.35°×1.35°
La Palma	LP	加那利天体物理研究所	25 $(')^2$
Apache Point	AP	新墨西哥州立大学和天体物理研究联盟	16′×16′
SDSS	SDSS	斯隆数字巡天	3 $(°)^2$
Mauna Kea	MK2	夏威夷大学/太阳系天体观测	19′×19′

从图2中可以看出,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(V、G、g分别表示望远镜的观测波段),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,可以看出2016HO3的地心距主要集中在2 000万～4 000万km,日心距约为1.4×10^7～1.6×10^7 km。尽管采用的数据从2004—2018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轨道精度约为数十千米,在某些时段可达到上百千米。

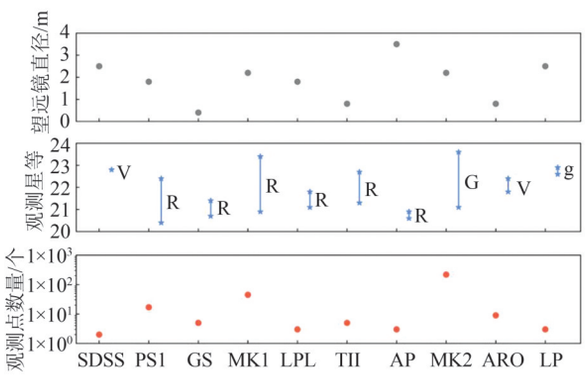


图2　观测数据与测站分布

Fig. 2　Observation Data and Observatory Distribution

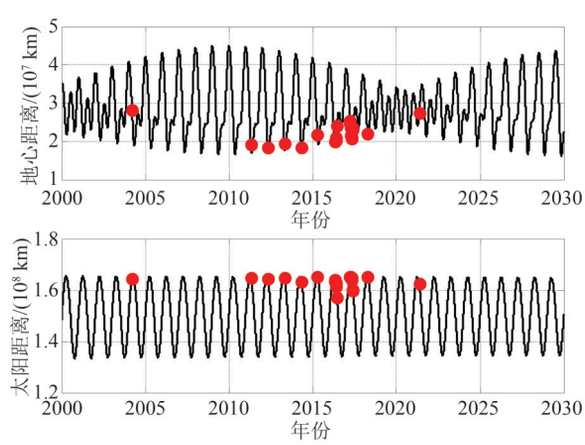


图3　观测数据与2016HO3-地心距离以及2016HO3-太阳距离分布关系

Fig. 3　2016HO3 Observations Corresponding to the Earth and Heliocentric Distances

3　解算结果

3.1　定轨残差分析

采用OrbFit软件解算小行星2016HO3历表,参数设置如下:解算积分区间为2000-01-01T00:00—2020-12-31T00:00,步长为1 d。观测量权重使用近地天体动态网站提供的权重,解算参数为天体初始轨道根数改正量。解算中采用的一组AstDys-2提供的初始轨道参数见表3,历元时刻选取为57 752.473 868 941(地球动力学时)。由于观测数据稀少,本次解算未对观测数据进行剔除,假设每次观测为等精度观测且互不相关。初始轨道参数见表3,a表示半长轴,L_P表示近日点经度,e为偏心率,i为轨道倾角,L_N为升交点经度。

表3　初始轨道参数

Table 3　Initial Orbital Parameters

轨道元素	数值
a/AU	1.001 104 671 052 933 4
$e\sin L_P$	0.024 475 026 134 328
$e\cos L_P$	0.101 119 475 838 630
$\tan(i/2)\sin L_N$	0.062 286 625 080 603
$\tan(i/2)\cos L_N$	0.027 117 735 634 020
平黄经/(°)	101.266 488 502 499 1

解算后残差数据见图4,分别给出了光学观测数据赤经和赤纬方向上的残差分布,不同颜色表示观测值来自不同测站。可以看出,观测量较为集中的2010—2018年间,赤经和赤纬方向上拟合后观测残差绝大部分都在1.0″以内,与前人解算残差类似[6]。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。

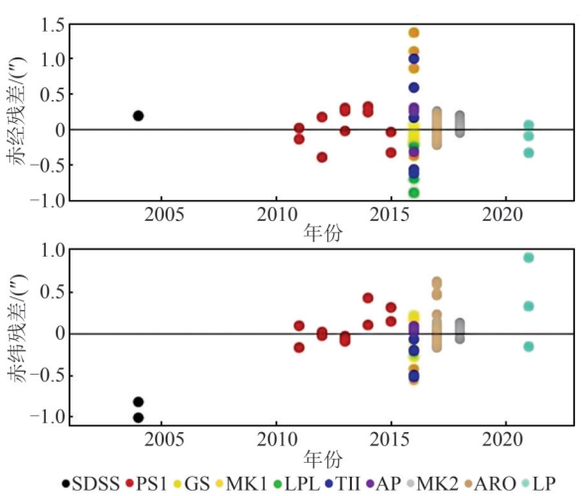


图4　观测数据拟合后残差

Fig. 4　Observation Residuals of Post-Fit

3.2　轨道精度评估

将本文解算的小行星轨道与JPL Horizons发布轨道进行比较,选取时段为2020-01-01—2020-12-31。赤经、赤纬差值见图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。将结果与文献[6]的解算结果进行对比,文献[6]在2021年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—2030年,两者分别与中间产品JPL Ho-

rizons历表进行对比(见图6)。可以看出,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年往前递推误差增加明显。从图6(a)和图6(b)的横向比较来看,两者位置差异具有类似的趋势,误差基本在一个量级上,再次证实了本文结果具有较好的外部符合性。需要说明的是,在30 a时间尺度上,本文解算的2016HO3历表精度略好于文献[6]结果,主要有两个方面的原因:(1)本文处理2004—2021年所有观测数据,而文献[6]处理时段为2004—2018年;(2)两者采用了不同的计算平台和拟合策略。这从侧面证实小天体历表解算精度在百千米量级时,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。

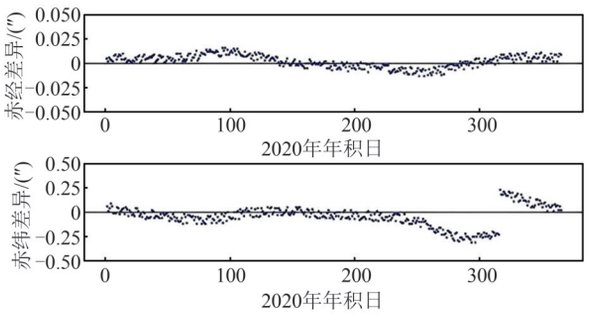
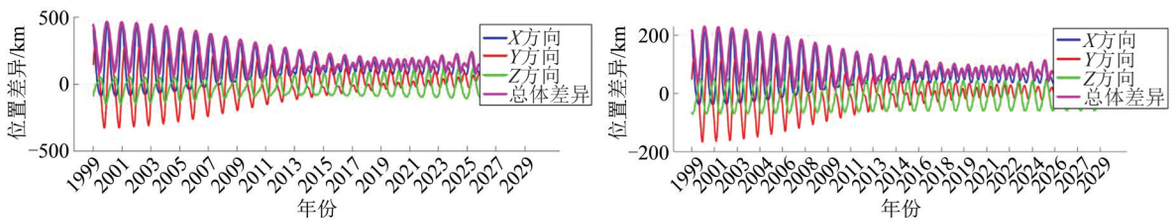


图5 本文结果与JPL Horizons发布轨道差异

Fig. 5 Difference on Right Ascension and Declination Between This Study and JPL Horizons



(a) 文献[6]结果 (b) 本文研究结果

图6 同类结果位置差异对比

Fig. 6 Position Difference Comparison with Other Studies

进一步地,基于观测量和权重特点模式建立多种解算模式(见表4)。结合观测值密集时期考虑,选取4个时刻,分别为2000年、2010年、2017年、2022年的01-01T00:00:00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	采用近地天体动态网站公布的权重
B	观测值中去除2004年观测点(紫金山天文台,私人通讯)
C	根据观测值残差手动设置固定权重
D	根据观测值残差,设置观测量大于3σ剔除标准

模式*A*选取近地天体动态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3σ之外的设置为1″,2σ~3σ设置为0.5″,1σ~2σ设置为0.2″,1σ设置为0.1″;模式*D*为在模式*A*的基础上剔除观测量残差大于3σ的观测点。不同解算时刻以及模式的解算结果见表5。

从表5中可以看出,4种模式下不同时刻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3σ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2000-01-01T00:00—2050-01-01T00:00期间,本文采用模式*B*解算的历表和JPL Horizons历表在太阳系质心J2000下的三维位置和速度的差异,见图7。

表5 不同解算时刻及解算模式的解算结果

Table 5 Solutions with Different Initial Epoch Parameters and Strategies

解算时刻	模式	r/km	v/(cm·s^{-1})	赤经/(″)	赤纬/(″)
2000年	*A*	160.458 0	2.920 3	0.187 9	0.155 3
	B	115.524 5	2.106 3	0.187 8	0.136 4
	C	291.488 5	5.305 6	0.189 1	0.142 3
	D	143.354 8	2.608 7	0.112 5	0.089
2010年	*A*	160.575 0	2.922 4	0.187 9	0.155 2
	B	115.675 4	2.109 0	0.187 7	0.136 4
	C	291.488 5	5.305 6	0.189 1	0.142 3
	D	143.354 8	2.608 7	0.112 5	0.089 4
2017年	*A*	160.574 9	2.922 4	0.187 9	0.155 2
	B	115.675 3	2.109 0	0.187 7	0.136 4
	C	291.488 5	5.305 6	0.189 1	0.142 3
	D	143.355 0	2.608 7	0.112 4	0.089 4
2022年	*A*	160.575 0	2.922 4	0.187 9	0.155 2
	B	115.675 5	2.109 0	0.187 7	0.136 4
	C	291.488 5	5.305 6	0.189 1	0.142 3
	D	143.354 8	2.608 7	0.112 4	0.089 4

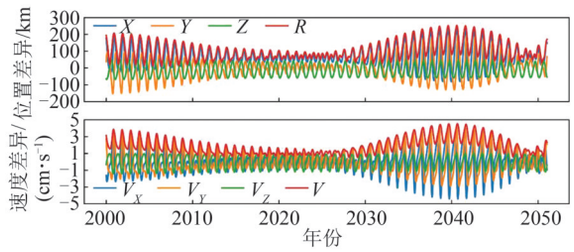


图 7　2010年模式 B 本文解算结果与 JPL Horizons 历表差异

Fig. 7　Ephemeris Difference Between Ours (with Initial Orbit at 2010 and Strategy B) and JPL Horizons's Results

从图 7 可以看出，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 cm/s。由于 2016HO3 的观测数据集中在 2016—2020 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[24]，在进行定轨计算时通过提供 MPC 格式的观测量并设置相应权重模型，如表 6 所示。无论使用何种权重模型，模式 B 的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 87.393 km，速度为 1.590 cm/s。

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/km	v/(cm·s^{-1})	赤经/(″)	赤纬/(″)
vfcc17	A	273.204	4.953	0.189	0.144
	B	87.393	1.590	0.188	0.137
fcct14	A	160.575	2.922	0.188	0.155
	B	115.676	20 109	0.188	0.136

4　结　语

本文基于中国“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观测数据，解算了小行星 2016HO3 历表，并且评估了解算精度。拟合后残差基本在 1.0″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。解算结果与 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取舍会对 2016HO3 的定轨解算有较大影响。50 a 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 为 87.393 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，时间跨度为 2004-03-17—2021-05-13，尚无高精度的雷达测量和近期跟踪测量数据，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，一方面需要增加观测量数目、提高观测精度，另一方面则需要在探测任务实施中，利用星载测量数据对 2016HO3 历表精度不断进行优化迭代提升，罗塞塔任务、隼鸟 2 号以及冥王号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: 730-731.

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

[3] 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.
JIN Weitong. Precision Orbit Determination and Gravitational Mass Estimation for Small-Body Probes[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

[4] 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.
GUO Xi, YAN Jianguo, YANG Xuan, et al. Review of the Gravity Field of Asteroids[J]. *Progress in Geophysics*, 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] 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.
TIAN Wei. Orbit Determination of the Asteroid (469219) Kamo'oalewa and Its Error Analysis[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2021, 62(2): 56-64.

[7] REDDY V, KUHN O, THIROUIN A, et al. Ground-Based Characterization of Earth Quasi Satellite (469219) 2016HO3 [C]//Planetary Sciences

Meeting,Pasadena, CA,USA, 2017.

[8] REDDY V, KUHN O, THIROUIN A, et al. Ground-Based Characterization of Earth Quasi-Satellite (469219) 2016HO3 [C]//Planetary Sciences Meeting , Pasadena, CA, USA, 2021.

[9] DE LA MARCOS C F,DE LA MARCOS R F. Asteroid (469219) 2016HO3,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) 2016HO3 [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) 2016HO3 Kamo'oalewa [J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 231.

[12] HEILIGERS J, FERNANDEZ J M, STOHLMAN O R, et al. Trajectory Design for a Solar-Sail Mission to Asteroid 2016HO3 [J]. *Astrodynamics*, 2019, 3(3): 231-246.

[13] LIU S H, WANG X, HAN Y L, et al. Possible Origin of Mars-Crossing Asteroids and Related Dynamical Properties of Inner Main-Belt Asteroids [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, 692: A144.

[14] 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): 229511.
LIU Shanhong, WU Zhengkai, CAO Jianfeng, 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): 229511.

[15] 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.

[16] 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.
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.

[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 (2016HO3) 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 2016HO3 [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] 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.
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.

[23] 刘山洪. 深空探测器射电跟踪数据应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 323.
LIU Shanhong. Scientific Applications of Radio Tracking Data from Deep Space Probes [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(2): 323.

[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.