

天问二号星载光学观测小行星(469219) Kamo`oalewa轨道精度仿真分析*

厉奕行^{1,2} 唐凯¹ 樊敏³ 曲耀斌⁴ 黄勇^{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 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

(4 上海卫星工程研究所 上海 201100)

摘要 中国小行星探测任务—天问二号将于2025年发射升空,其探访的第一个目标,小行星(469219) Kamo`oalewa (又称2016 HO3),是一颗与地球共轨的近地小天体,有着极高的运动演化研究价值.目前小行星(469219) Kamo`oalewa只有有限的地基观测资料,限制了其轨道精度.搭载光学载荷的天问二号在抵近Kamo`oalewa的过程中,预计将获得大量的星载光学观测数据.这将大大改善小行星(469219) Kamo`oalewa只有地基光学观测数据,无2021年后的公开观测资料的状况.通过仿真带有一定轨道误差的天问二号的光学观测数据,完成对小行星(469219) Kamo`oalewa定轨预报精度的任务前评估.精度评估使用协方差分析法和数值比较法,在考虑的可能观测精度范围内,预估天问二号光学观测数据能使小行星(469219) Kamo`oalewa定轨精度整体提升至15 km以内,并且分析了两种精度评估方法结果的差异与特性.

关键词 天体测量学, 天体力学, 方法: 数值, 小行星: 个别: (469219) Kamo`oalewa

中图分类号: P135; 文献标识码: A

1 引言

在太阳系广袤的空间中,有着形形色色、大小不一的各类天体,抛开尘埃和碎屑这些难以称之为“天体”的物质,数量最为庞大的天体就是小行星了.大部分小行星分布在火星-木星轨道之间以及海王星轨道之外,一般统称为主带小行星和柯伊伯带小行星,其漫长的轨道演化过程中受到了大质量行星的引力作用以及雅尔可夫斯基效应等其他因素的影响^[1-3].而在地球的轨道附近,同样存在着数目不少的小行星.这种近地小行星,都是可能与地球发生碰撞的天体,对于每一个近地小行星,都有

必要进行足够的跟踪监视,预测长期演化轨道,评估其与地球碰撞的可能性以及危害程度^[4].

小行星(469219) Kamo`oalewa是一颗伴随着地球一起绕日公转,大小约40-100 m的阿波罗型小行星,其与地球的平均距离为2500万公里^[5-6],由The Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System小行星巡天项目于2016年4月27日首次发现确认^[7],是地球的一颗“准卫星”^[8],也有人猜测形成它的物质与月球同源^[9].2018年,美国航空航天局首先发布了近地小行星分类观测任务(Near-Earth Asteroid Characterization and Ob-

2023-07-14收到原稿,2024-03-08收到修改稿

*科工局民用航天技术预先研究项目(D010105)

†yongh@shao.ac.cn

servation)研究报告,计划使用搭载太阳能电推进系统的小型航天器抵近探测小行星(469219) Kamo`oalewa^[10]. 该航天器将搭载多种仪器,包括两个光学相机、两个红外线成像仪、一个光谱仪和一个撞击子装置等,但该项目至今并没有明确的发射计划. 2019年,中国国家航天局公示了对小行星(469219) Kamo`oalewa取样返回和伴飞311P主带彗星的计划^[11],不久确定了2025年天问二号的发射任务,这将是继嫦娥二号飞越小行星图塔蒂斯后中国又一次小行星探测任务^[12].

迄今为止对于小行星(469219) Kamo`oalewa动力学的相关研究并不丰富,在其得到认证后不久, de la Fuente Marcos等人给出了Kamo`oalewa的长期轨道演化特征^[8];而在国内, Yan等人通过数值仿真探测器雷达遥感观测小行星(469219) Kamo`oalewa的方法估算了它的质量^[13]; 田伟^[5-6]在2021年使用所有的公开数据对小行星(469219) Kamo`oalewa进行定轨和轨道精度评估; Liu等人于2022年通过现有地面光学观测资料测定了Kamo`oalewa的雅尔可夫斯基效应,并讨论了这种非引力效应对其轨道状态的短期和长期的影响^[14]; Hu等人于2023年发现了Kamo`oalewa与地球的共振轨道限制了其轨道不确定度的增长,同时周期性修正了雅尔可夫斯基效应对小行星轨道半长轴的影响,并且在考虑雅尔可夫斯基效应的情况下对Kamo`oalewa进行精密定轨并使用协方差分析的手段评估轨道误差的传播^[15]. 由于是一颗与地球共轨的卫星,其轨道并不掠近地球,地基光学观测难以进一步显著改善其轨道,若要提高小行星(469219) Kamo`oalewa的定轨精度,人造天体的抵近观测就是一种可行的方式. 此次采样返回的探测任务,除了进一步加深我们对Kamo`oalewa这样的近地小行星的物理结构了解,探测器在接近Kamo`oalewa的过程中将提供大量高精度的星载光学观测数据,预计能较好地改善其轨道测定精度,有助于我们进一步了解近地小天体的动力学演化历史和演化方向,完善整个太阳系动力学演化的拼图.

搭载了星载光学仪器的天问二号,相比地基望

远镜不受地球大气的影响,成像的质量更好;其观测时段距离小行星更近,观测视星等更高,不需要对小行星进行跟踪曝光,因此不需要处理拖线的背景参考恒星,后期处理造成的精度偏差更小;由于距离近的优势,对于同样的观测误差小行星的位置误差也更小. 因此我们预计天问二号的光学观测数据将一定程度提升小行星(469219) Kamo`oalewa的轨道预报精度. 虽然天问二号还未发射升空,但我们可以用现有的小行星历表和天问二号的设计轨道来仿真天问二号的光学观测数据.

本文的目的就是通过仿真天问二号光学观测数据,结合现有地基光学观测数据对小行星(469219) Kamo`oalewa进行定轨,然后使用两种不同精度评估方法探究本次发射任务对小行星(469219) Kamo`oalewa定轨精度有多大的提升.

2 动力学模型与观测模型

任何参数和观测量都需要在其对应的参考系中描述和处理. 本文使用太阳系质心天球参考系(Barycentric Celestial Reference System, BCRS)进行小行星的相关轨道计算,其坐标轴指向由国际天球参考系(International Celestial Reference System, ICRS)确定,太阳系质心力学时(Barycentric Dynamical Time)为坐标时^[16]. 小行星的观测资料则涉及站心天球参考系(J2000),其坐标轴指向在本项工作中可被认为与ICRS相同. 最后,本文也给出小行星在J2000日心黄道坐标系下的轨道根数,以方便与其他小行星(469219) Kamo`oalewa的工作进行比较. 在图1中,我们罗列了小行星(469219) Kamo`oalewa的受力因素来源及其量级大小. 作为一颗伴随地球绕日公转的小行星,对其影响最大的显然就是太阳与地月系统引力,加上其他太阳系主要天体的引力,我们将以上归类为太阳系主要N体牛顿引力,引力质量(GM)的选取参考了JPL/DE440历表^[17],此外还要考虑16颗质量最大的主小行星带天体的影响,其引力质量参数同样来源于JPL/DE440¹,并在表1给出. 接着是上述N体引力的相对论效应,对于小行星(469219) Kamo`oalewa,相对论修正是仅次于牛顿引力的受力因素来源,对

¹https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/asteroids/

太阳系内的第*i*个天体, 其质点间(pm-pm)引力的相对论修正表达式为^[18]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_{i, \text{pm-pm}} = & \sum_{j \neq i} \frac{GM_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{r_{ij}^3} \left\{ -\frac{2(\beta + \gamma)}{c^2} \times \right. \\
 & \sum_{k \neq i} \frac{GM_k}{r_{ik}} - \frac{2\beta - 1}{c^2} \sum_{k \neq j} \frac{GM_k}{r_{jk}} + \\
 & \gamma \left(\frac{v_i}{c} \right)^2 + (1 + \gamma) \left(\frac{v_j}{c} \right)^2 - \frac{2(1 + \gamma)}{c^2} \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j - \\
 & \left. \frac{3}{2c^2} \left[\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \cdot \mathbf{v}_j}{r_{ij}} \right]^2 + \frac{1}{2c^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{a}_j \right\} + \\
 & \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{GM_j}{r_{ij}^3} \{ [\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j] \cdot [(2 + 2\gamma)\mathbf{v}_i - \\
 & (1 + 2\gamma)\mathbf{v}_j] \} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) + \\
 & \frac{(3 + 4\gamma)}{2c^2} \sum_{j \neq i} \frac{GM_j \mathbf{a}_j}{r_{ij}}, \tag{1}
 \end{aligned}$$

式中: *M*为天体的质量; *r*、*v*、*a*分别是天体在BCRS的位置、速度和加速度; *G*为引力常数; *c*为光速; 参量的下标*i*、*j*、*k*代表太阳系天体的序号, 这里只考虑了月球、太阳以及八大行星; β 、 γ 都是后牛顿参数, 且都近似等于1.

而非球形引力项本文只考虑太阳J2和地球2到5阶的形状摄动, 月球质量过小, 产生的形状摄动也就不予考虑. 非球形引力势在原点为天体中心的固

连参考系(如地固系)下的模型表达式如下^[19]:

$$\varphi = \frac{GM}{d} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{d} \right)^n P_n^m(\cos \theta) [C_{nm} \cos(m\lambda) + S_{nm} \sin(m\lambda)] \right\}, \tag{2}$$

式中: *R*为非球形引力源的参考半径; *d*、 θ 、 λ 是固连系下球坐标; *n*、*m*分别是模型中球谐部分的阶数和次数; *C_{nm}*和*S_{nm}*是该天体的Stokes系数.

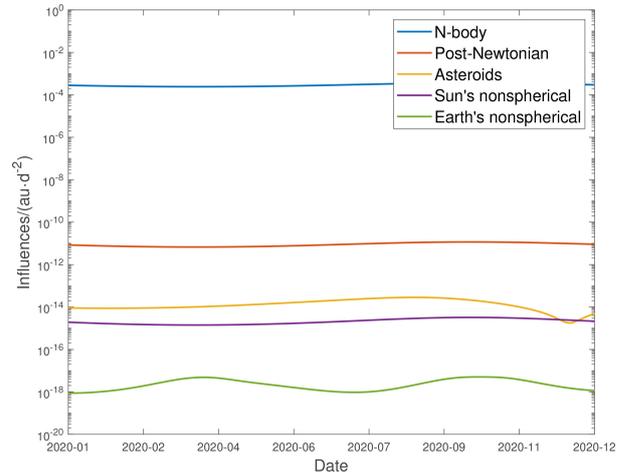


图 1 小行星(469219) Kamo`oalewa受力量级估计

Fig. 1 The magnitude estimation of the forces acting on asteroid (469219) Kamo`oalewa

表 1 主小行星带中16个最大的天体的引力质量

Table 1 GM of 16 most massive perturbers in the main asteroid belt

Name	GM/(au ³ · d ⁻²)	Name	GM/(au ³ · d ⁻²)
Ceres	1.3964518123081070 × 10 ⁻¹³	Eunomia	4.5107799051436795 × 10 ⁻¹⁵
Vesta	3.8548000225257904 × 10 ⁻¹⁴	Juno	4.2823439677995011 × 10 ⁻¹⁵
Pallas	3.0471146330043200 × 10 ⁻¹⁴	Psyche	3.5445002842488978 × 10 ⁻¹⁵
Hygiea	1.2542530761640810 × 10 ⁻¹⁴	Camilla	3.2191392075878588 × 10 ⁻¹⁵
Davidia	8.6836253492286545 × 10 ⁻¹⁵	Thisbe	2.6529436610356353 × 10 ⁻¹⁵
Interamnia	6.3110343420878887 × 10 ⁻¹⁵	Iris	2.5416014973471498 × 10 ⁻¹⁵
Europa	5.9824315264869841 × 10 ⁻¹⁵	Euphrosyne	2.4067012218937576 × 10 ⁻¹⁵
Sylvia	4.8345606546105521 × 10 ⁻¹⁵	Cybele	2.0917175955133682 × 10 ⁻¹⁵

本文以协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)2022年1月1日零时(2459580.5 UTC)作为积分起点 t_0 ,使用adams积分器积分作为定轨程序的主体,并使用JPL-horizons初值积分出Kamo`oalewa的轨道并与JPL-horizons²给出的结果验证模型精度.积分结果表明目前考虑的动力学模型和积分器轨道积分结果与JPL-horizons相近,在绝大多数观测资料所在时段的轨道偏差小于1 km,而小行星(469219) Kamo`oalewa距离我们约 2.5×10^7 km,观测上小于 $0.01''$,满足本文的定轨精度要求.

为了得到小行星(469219) Kamo`oalewa的站心赤经赤纬的理论计算值,对于某一给定时刻BCRS下的小行星(469219) Kamo`oalewa瞬时位置和台站或探测器的瞬时位置,在考虑光行时对小行星位置的修正后,根据两者的简单的几何关系给出观测模型:

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{Y_{\text{astr}} - Y_{\text{obs}}}{X_{\text{astr}} - X_{\text{obs}}} \right), \\ \delta &= \sin^{-1} \left(\frac{Z_{\text{astr}} - Z_{\text{obs}}}{|\vec{R}_{\text{astr}} - \vec{R}_{\text{obs}}|} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

式中: α 、 δ 分别是赤经、赤纬的计算值, X 、 Y 、 Z 是天体在BCRS下的坐标三分量, \vec{R} 是BCRS下的天体的位置矢量, astr代表小行星, obs代表台站或探测器位置.

3 数据来源与处理

本文所使用的地基光学观测数据来源于MPC (minor planet center)³,网站提供了小行星(469219) Kamo`oalewa自发现以来所有能够被认证的观测资料.图2给出了观测数据年分布,被认证的最早观测资料是2004年的两次观测记录,但2016年前这些观测资料的时间跨度都很短,且每次观测的数据点都很少.2016年开始有连续一天以上的大量观测,这些观测基本上由夏威夷大学88英寸望远镜(台站编号T12)完成,参与观测的台站以及每个台站观测

样本数量详见第4节.

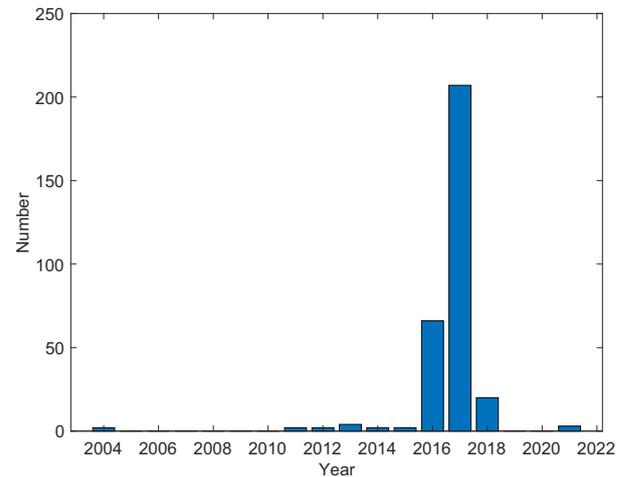


图2 MPC上公开的小行星(469219) Kamo`oalewa光学观测数据年分布

Fig. 2 Yearly distribution of asteroid (469219) Kamo`oalewa observation data publicly available on MPC (Minor Planet Center)

天问二号的仿真光学观测数据是使用JPL-horizon给定的初始状态量生成的小行星(469219) Kamo`oalewa的仿真轨道,并使用天问二号的仿真轨道以及预估的观测精度共同生成仿真观测数据,仿真轨道来源于天问二号的轨道设计.另外在实际定轨过程中,探测器的轨道位置信息并不能准确地获得,因此在定轨程序中所使用的探测器轨道考虑了2 km轨道设计误差.观测精度由天问二号的星载光学载荷决定,我们预估其观测精度在 $0.5''$ 到 $2.5''$.图3给出小行星(469219) Kamo`oalewa的轨道和天问二号生成仿真光学观测数据的时段对应飞行轨道弧段(图3 (a))以及该时段两者间距离的时间关系(图3 (b)).观测弧段时间跨度为2025年11月5日到2026年6月12日,涵盖了天问二号第三次中途修正(M3)-第四次中途修正(M4)-捕获机动(M5)-交会机动的过程,对应的每个弧段初始轨道历元的位置和速度在表2中给出,设计每12小时对小行星(469219) Kamo`oalewa进行一次仿真观测.

²<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=469219>

³<https://www.minorplanetcenter.net>

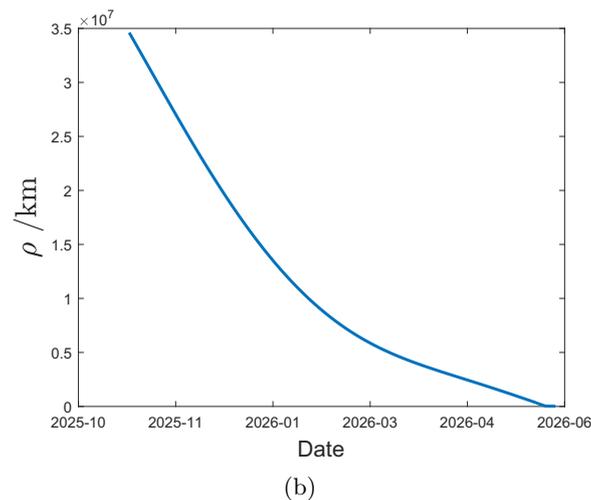
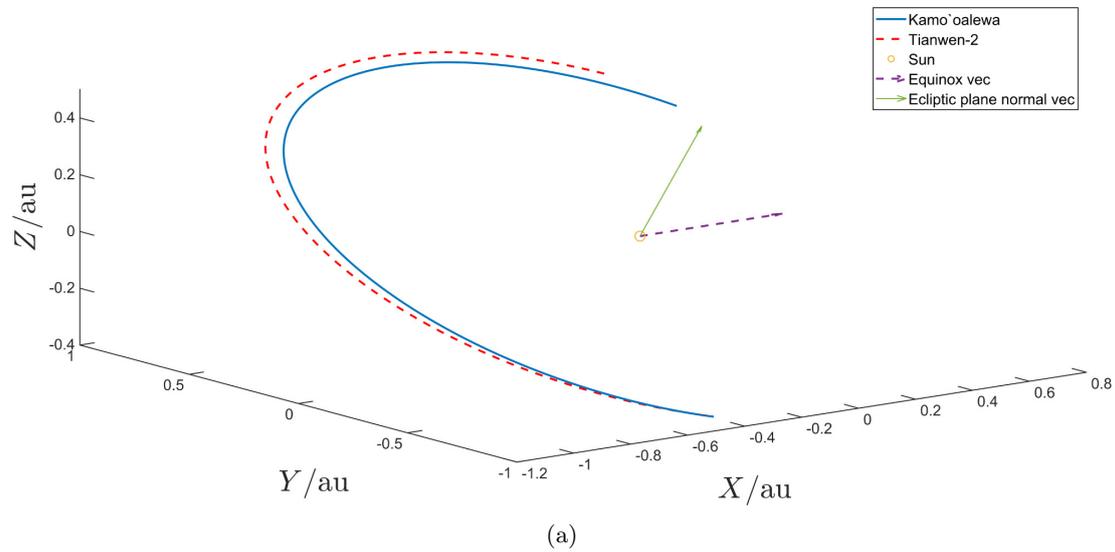


图3 小行星(469219) Kamo`oalewa和天问二号轨迹关系图. (a)天问二号与小行星(469219) Kamo`oalewa在2025年11月至2026年6月在BCRS下的轨道示意图. (b)天问二号与小行星(469219) Kamo`oalewa距离随时间的关系图.

Fig.3 Asteroid (469219) Kamo`oalewa and Tianwen-2 trajectory relationship diagram. (a) Diagram of the orbit of Tianwen-2 and asteroid (469219) Kamo`oalewa in BCRS from November 2025 to June 2026. (b) Plot of the distance between Tianwen-2 and asteroid (469219) Kamo`oalewa over the time.

4 定轨结果

定轨采用的基本方法是最小二乘法,其原理是通过调整需要拟合的参数使得理论值和观测值之间的误差达到最小.对于BCRS下的近地小行星定轨,其观测值为各个地面台站的站心所观测到的小行星(469219) Kamo`oalewa的赤经赤纬序列,待求轨道参数的初值则为JPL-Horizons给定的某一时刻

Kamo`oalewa的位置.而参数初值和观测值有两层转换关系:一是初始轨道参数与每个观测时刻的轨道参数服从在确定的动力学模型下的积分关系;二是每个观测时刻的轨道参数与观测的赤经赤纬之间的关系,这涉及到了观测台站的实际地理经纬度以及海拔,或者是探测器的位置信息.由于动力学模型下状态转移矩阵的变化速率和观测量对初始参数的偏导数矩阵都是一阶近似,故解得的初始

轨道参数的修正量是一种近似, 需要反复迭代修正初始轨道参数, 最终使初始轨道参数收敛至一个稳定的值, 完成定轨^[20].

表 2 天问二号各仿真弧段初始位置与速度
Table 2 Initial positions and velocities of each simulated arc of Tianwen-2

Parameter	M3	M4	M5
Date (UTC)	2460984.616	2461193.841	2461198.841
X/km	72927751	-85170088	-74092343
Y/km	119595171	-124422841	-128639831
Z/km	49992264	-50903243	-54312244
$\dot{X}/(\text{km} \cdot \text{d}^{-1})$	-2162132	2165124	2219064
$\dot{Y}/(\text{km} \cdot \text{d}^{-1})$	1224380	-921282	-736119
$\dot{Z}/(\text{km} \cdot \text{d}^{-1})$	862589	-714009	-679315

MPC网站上没有给出各个台站观测精度, 因此在权重处理上, 地基光学观测数据均采用初次解算残差的Root Mean Square (RMS)定权的方法: 先以等权的形式对小行星(469219) Kamo`oalewa定轨, 统计初步定轨后不同台站残差(O-C)的中误差, 最后将中误差作为权重的参考来源. 表3给出了各个台站的赤经方向残差($\Delta\alpha \cos \delta$)和赤纬方向残差($\Delta\delta$). 在使用地基观测数据和仿真生成的星载光学观测数据联合定轨时, 天问二号轨道误差、星载光学载荷观测误差均被引入作为权重的参考量.

定轨初始时刻同样设置在 t_0 (2459580.5 UTC), 以JPL-Horizons提供的轨道参数作为先验值. 只使用MPC光学观测数据加权定轨结果的见表4, 图4是定轨后的赤经赤纬残差(O-C)与JPL-Horizons结果的对比, 残差基本在 $0.5''$ 以内. 由于JPL未详细公开其定轨的权重分配策略且JPL-Horizons也未给出小行星(469219) Kamo`oalewa的定轨数据及其权重, 而本文定轨在只使用初次解算残差的RMS定权的情况下进行, 因此在结果相近但存在一定的差异. 此外我们也与田伟^[5-6]的历表数据进行了对比, 在观测残差上的结果基本一致.

表 3 地面台站单位权定轨结果RMS
Table 3 RMS of the equal weight orbit determination result for the ground observatory

Station	Data num	$\Delta\alpha \cos \delta / ''$	$\Delta\delta / ''$
645	2	0.1095	0.4855
F51	17	0.2233	0.1756
J95	5	0.9158	0.3834
568	45	0.1252	0.1343
291	3	0.5383	0.3645
926	5	0.5267	0.1146
705	3	0.2886	0.0583
T12	218	0.0847	0.0581
H21	9	0.1328	0.3410
950	3	0.2004	0.5342

表 4 小行星(469219) Kamo`oalewa在BCRS下的加权定轨结果和形式误差(1σ , $t_0 = 2459580.5$ UTC)以及相应日心黄道系轨道根数

Table 4 Weighted orbit determination results and formal error of asteroid (469219) Kamo`oalewa in BCRS (1σ , $t_0 = 2459580.5$ UTC) and corresponding heliocentric ecliptic orbital elements

Parameter	Value
X/km	-54253597.52 ± 19.64
Y/km	123454880.99 ± 9.67
Z/km	69271739.71 ± 9.10
$\dot{X}/(\text{km} \cdot \text{d}^{-1})$	-2452527.70 ± 0.13
$\dot{Y}/(\text{km} \cdot \text{d}^{-1})$	-723906.20 ± 0.21
$\dot{Z}/(\text{km} \cdot \text{d}^{-1})$	-20461.33 ± 0.07
Semi-major axis/km	149773927.6
Eccentricity	0.1029886
Inclination/ $^\circ$	7.78937
Longitude of ascending node/ $^\circ$	66.01862
Argument of perihelion/ $^\circ$	305.68306
Mean anomaly/ $^\circ$	87.47085

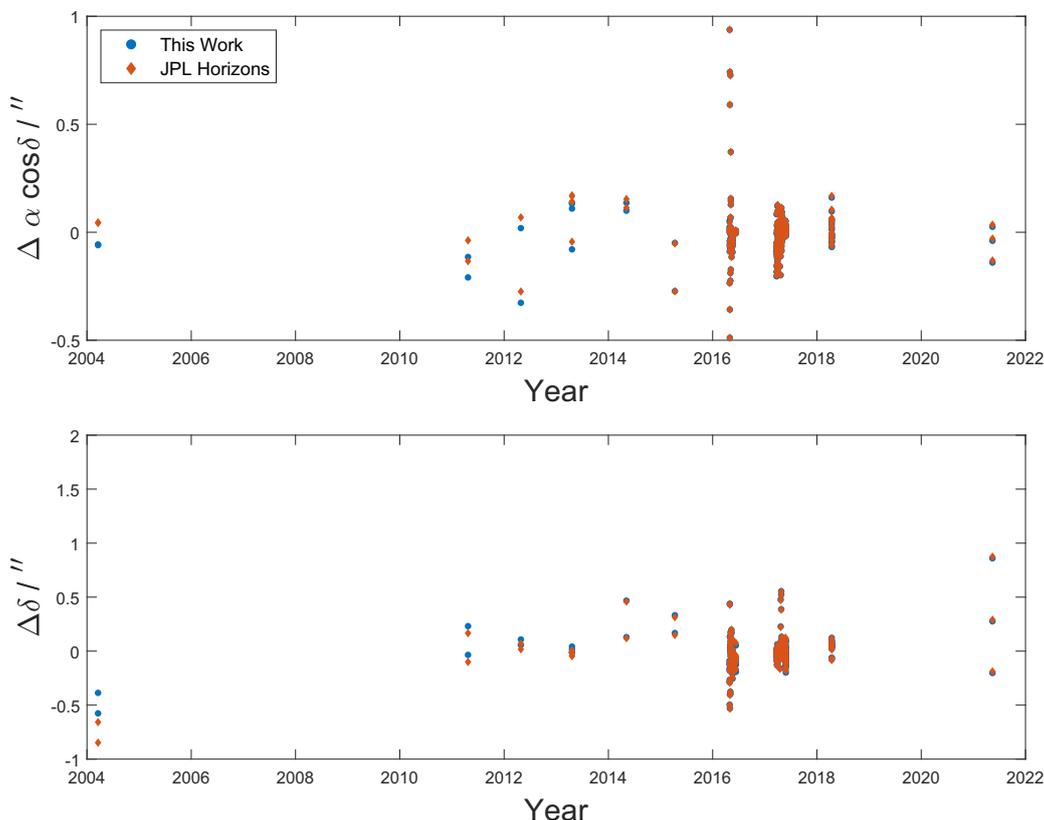


图4 对小行星(469219) Kamo`oalewa加权定轨后的赤经($\Delta\alpha \cos \delta$)和赤纬($\Delta\delta$)方向上残差并与JPL-Horizons对比

Fig. 4 Weighted orbit determination residuals in right ascension ($\Delta\alpha \cos \delta$) and declination ($\Delta\delta$) for asteroid (469219) Kamo`oalewa and comparison with JPL-Horizons

5 定轨精度评估

由于采用的是仿真的天问二号光学观测数据,本工作的重心在于探究天问二号以可能的观测精度在接近段的轨道上产生的光学观测数据对小行星(469219) Kamo`oalewa轨道探测精度将有多大的提升.这里分别引入协方差分析法和数值比较法来评估定轨精度.

5.1 协方差分析法

协方差分析法,是研究利用某些观测手段解算参数的可解性,并评估其参考参数的误差、待解参数先验误差对解算精度影响的方法,同时也能分析动力学和测量模型中未模型化的随机与非随机误差对解算结果的影响^[21].在定轨模型中,协方差分析就是由平差计算得到的协方差矩阵在时间轴上

线性映射,从而得到待解参数的中误差随时间变化的情况.此外在协方差分析中也考虑了探测器的轨道系统误差对结果的影响^[21].涉及到的数学模型如下:

$$\begin{cases} \mathbf{D}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}(t_0) = (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \sigma_0^2, \\ \hat{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}(t_0) = \mathbf{D}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}(t_0) + \mathbf{D}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}(t_0) \mathbf{H}^T \\ \mathbf{P} \mathbf{H}_c \boldsymbol{\pi} \mathbf{H}_c^T \mathbf{P} \mathbf{H} \mathbf{D}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}(t_0), \\ \hat{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}(t) = \boldsymbol{\phi}(t, t_0) \hat{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}(t_0) \boldsymbol{\phi}(t, t_0)^T, \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{H} 是对待估参数(小行星位置和速度)的偏导数矩阵; \mathbf{H}_c 是对考察参数(探测器位置和速度)的偏导数矩阵; \mathbf{P} 为权重; σ_0^2 为单位权方差; $\boldsymbol{\pi}$ 是考察参数的先验协方差; $\boldsymbol{\phi}(t, t_0)$ 是待估参数在 t 时刻对 t_0 时刻的状态转移矩阵; $\mathbf{D}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$ 和 $\hat{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$ 分别是待估参数协方差矩阵和考虑探测器轨道系统误差的协方差矩

阵, \boldsymbol{x} 指代待估参数($X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$).

具体流程是首先算出定轨后初始轨道参数的协因数矩阵和用定轨后的修正量与O-C算出单位权方差, 得到初始轨道参数的协方差矩阵, 再用状态转移矩阵 $\phi(t, t_0)$ 将协方差矩阵映射到任意的 t 时刻, 最后取轨道参数的协方差矩阵得到轨道的形式误差. 图5展示了2004年到2026年(涵盖所有参与定轨观测数据年份)使用地基光学数据定轨和在地基观测基础上加入观测误差为 $2''$ 的天问二号仿真光学数据定轨后的形式误差传播情况. 可以发现加入天问二号仿真光学观测数据后, 定轨精度得到了显著提升, 定轨精度提升至约10 km, 轨道的不确定度

降低了77.93%.

此外我们接着测试了 $0.5''$ 到 $2.5''$ 范围内的其他仿真观测精度的情况, 结果如图6所示, 图中能很明确地看到形式误差的降幅随着观测精度的升高增大, 也能大致评判出探测器轨道误差使小行星(469219) Kamo`oalewa轨道的形式误差降低率并非随着观测精度的提升而线性地提升, 而是逐渐趋缓. 但由于协方差分析法只是形式误差的初值在动力学模型环境下的时间映射, 只是一种内符合的精度评估方法, 并不能直接反映原光学观测数据的分布对小行星轨道的约束, 因此我们还需要结合其他分析方法来评估定轨精度.

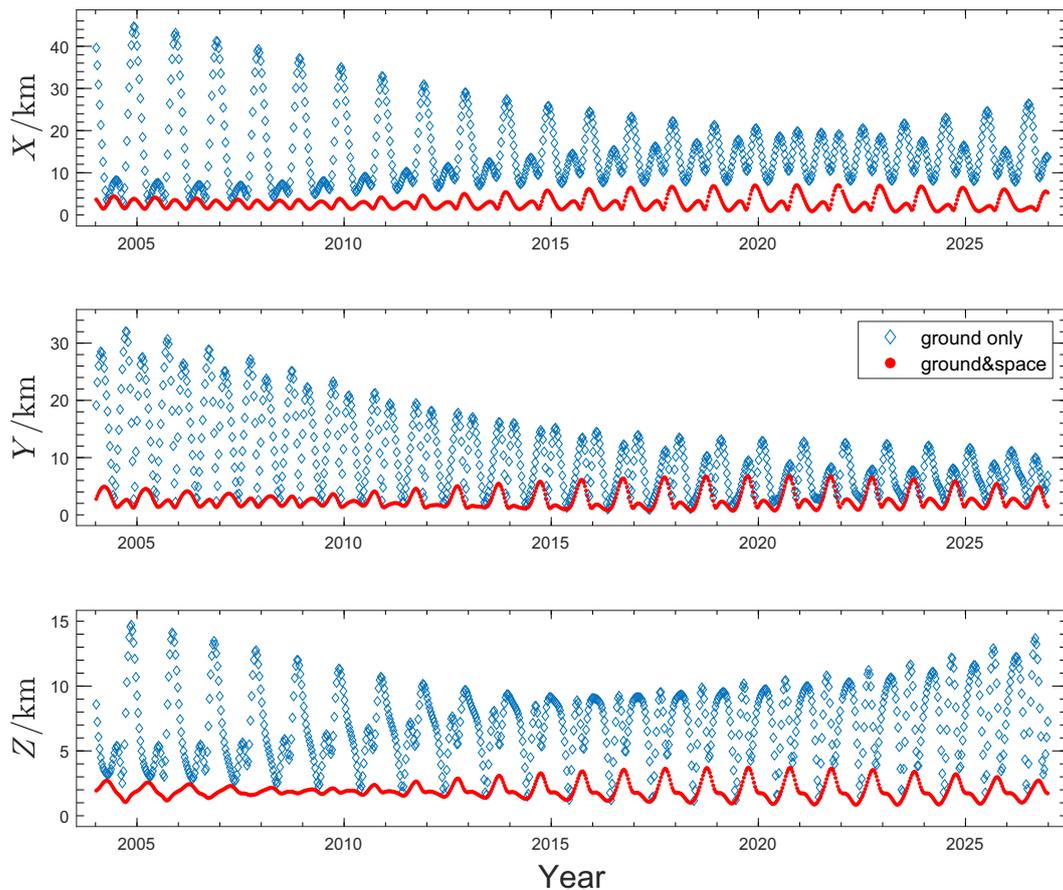


图5 使用天问二号仿真光学观测数据前后小行星(469219) Kamo`oalewa轨道形式误差在2004年到2026年间的对比(1σ , 仿真精度为 $2''$)

Fig. 5 Comparison of orbital formal errors of asteroid (469219) Kamo`oalewa between 2004 and 2026 before and after using simulated optical observations from Tianwan-2 (1σ , with $2''$ simulation accuracy)

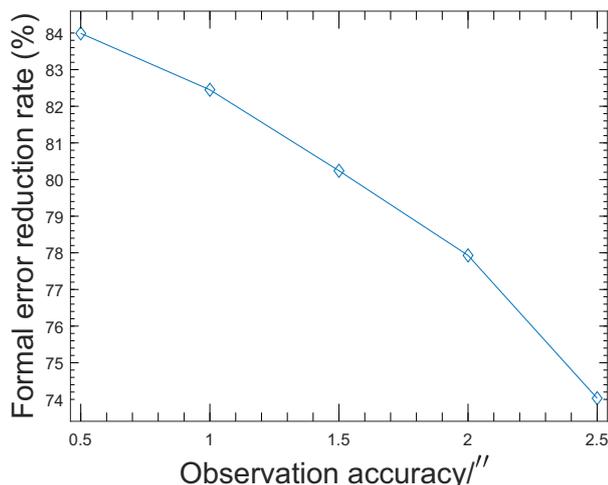


图6 天问二号仿真观测精度与加入其观测数据后轨道形式误差降低率的关系

Fig. 6 The relationship between the accuracy of simulated observations and the reduction in orbital formal error level after incorporating Tianwen-2's observation data

5.2 数值比较法

轨道数值比较法即在拟定一条真轨道的情况下, 同时进行仿真地基观测定轨和仿真地基光学观测+天问二号光学观测数据定轨, 并将定出的轨道初值积分与真轨道在一定时间尺度内比较的方法。

我们首先定义一条“真轨道”: 真轨道是由JPL/DE440历表给定积分初值后在本工作的动力学模型下积分出轨道。而地基的仿真观测与天问二号的仿真数据类似, 是基于同样“真轨道”的对真实光学观测数据的仿真, 每组数据的观测误差由其对应台站的观测误差决定。然后将独立地基仿真定轨、地基和天问二号仿真数据联合定轨分别与真轨道的位置偏差进行比较, 结果见图7。这里同样选取了一例观测精度为2''的仿真情景, 可见加入天问仿真数据测定的轨道与“真轨道”的偏差更小, 整体定轨精度更优, 平均偏差减小了68.41%, 轨道偏差降低到约9 km。在地基光学观测数据分布的主要弧段(2016—2017年), 加入天问二号仿真光学观测数据对轨道改善的效果并不明显, 而在地基数据缺失的2021年之后, 天问二号仿真光学观测数据则明显

使2021—2027年的轨道弧段更加贴近“真轨道”, 与新增未来观测数据将提升轨道预报能力的预期一致。

我们发现由于观测时间间隔并不密集且观测轨道长度有限, 每次生成仿真观测数据重新产生的随机误差会使每次测定的轨道与真轨道之间的偏差并不是一个稳定的值, 特别是在仿真精度小于2'' (即观测误差大于2'')的情况下。因此我们对观测误差在0.5''到2.5''的仿真情景每隔0.5''做5次仿真模拟和分析并求取均值, 结果如图8所示。容易发现加入天问二号仿真观测数据后天地基联合仿真定轨与真轨道偏差的降幅并不是单调递减的, 取0.5''为观测误差时, 定轨精度有明显的回落现象, 这可能是在轨道的数值比较法中, 观测提升到一定精度后放大了探测器轨道误差造成的轨道偏移效应。

6 总结与展望

本文综合了真实地基光学观测数据、仿真地基光学观测数据和仿真天问二号光学观测数据, 在一套精度适用的动力学模型下对小行星(469219) Kamo`oalewa进行定轨, 并使用了协方差分析法和数值比较法评估了未来天问二号的光学观测在改进小行星(469219) Kamo`oalewa轨道精度的贡献。结果表明若天问二号以0.5''到2.5''的观测精度在接近段的轨道弧段产生仿真观测资料, 在考虑了探测器2 km的轨道误差后, 小行星(469219) Kamo`oalewa的轨道测定相较于只使用现有地基光学观测数据, 其形式误差将降低约70%到85%, 而与“真轨道”偏差减小约为50%到65%, 定轨精度总体上提高至15 km以上。可能由于探测器轨道误差的影响, 观测精度的提升和定轨精度的提升并不是线性正相关的, 甚至可能出现在精度水平较高的情况下得到不太理想的结果, 但在观测精度低于1''时, 提升观测精度基本能显著提升定轨精度。如果要得到更为精确可靠的结论, 需要产生更多的仿真样本、轨道误差参数以及加密观测精度网格来进行研究, 这将是我们未来的工作计划之一。

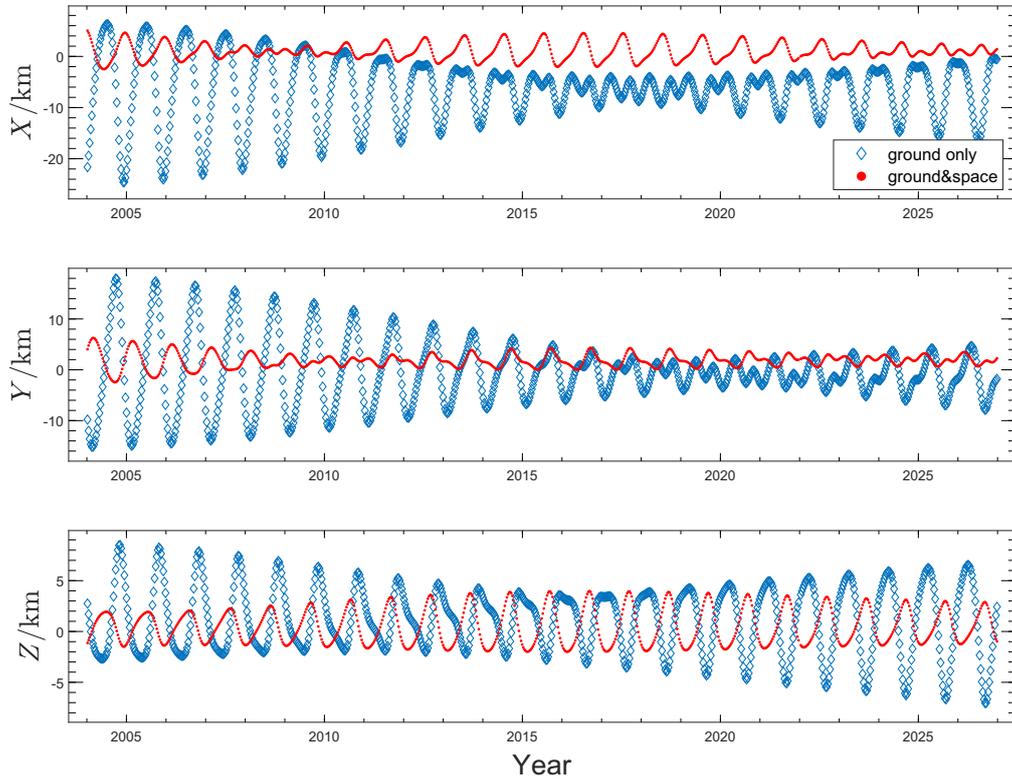


图 7 使用天问二号仿真光学观测数据前后测定的轨道与“真轨道”在2004年到2026年间的对比(仿真精度为2'')

Fig. 7 Comparison of the orbit determined before and after using simulated optical observation data (with 2'' simulation accuracy) from Tianwen-2 with the “true orbit” of asteroid (469219) Kamo`oalewa during the period from 2004 to 2026

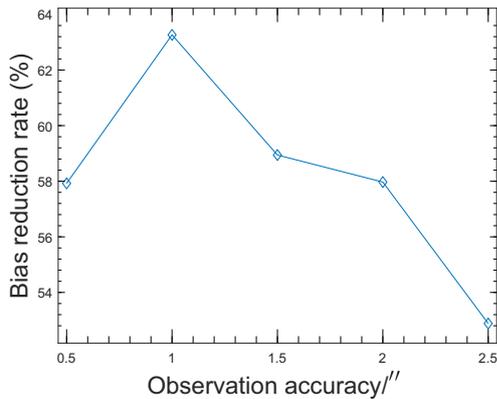


图 8 天问二号仿真观测精度与加入其观测数据后新轨道较真轨道偏移量降低率的关系

Fig. 8 The relationship between the simulated observation accuracy of Tianwen-2 and the reduction rate of the deviation between the new orbit and the true orbit after incorporating Tianwen-2's observation data

目前小行星(469219) Kamo`oalewa只有地基光学观测数据, 观测窗口短、轨道周期覆盖率低, 且缺少2021年后的光学观测数据. 本文基于天问二号接近段轨道仿真观测验证了天问二号的持续观测对小行星(469219) Kamo`oalewa定轨精度的显著提升, 说明我国这次探测任务的意义重大, 除了能采样返回得到其质地信息, 抵近伴飞同样能获得详尽的小行星3D模型, 再加上任务期间的小行星(469219) Kamo`oalewa星载光学观测数据, 同时能为接下来进一步研究与小行星形状相关的动力学效应(如雅尔可夫斯基效应)做好数据和理论模型的准备.

致谢 感谢李培佳博士在轨道数值比较法上给予的帮助指导.

参考文献

- [1] Walsh K J, Morbidelli A, Raymond S N, et al. *M&PS*, 2012, 47: 1941
- [2] Bottke W F, Vokrouhlicky D, Rubincam D P, et al. *The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids. Asteroids III*. Tucson: University of Arizona Press, 2002: 395
- [3] Majaess D J. *Assessing the Yarkovsky Effect in the Kuiper Belt*. Halifax: Saint Mary's University, 2005: 24
- [4] 马鹏斌, 宝音贺西. *深空探测学报*, 2016, 3: 10
- [5] 田伟. *天文学报*, 2021, 62: 16
- [6] Tian W. *ChA&A*, 2021, 45: 402
- [7] Heiligers J, Fernandez J M, Stohman O R, et al. *AsDyn*, 2019, 3: 231
- [8] de la Fuente Marcos C, de la Fuente Marcos R. *MNRAS*, 2016, 462: 3441
- [9] Sharkey B N, Reddy V, Malhotra R, et al. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 231
- [10] Venigalla C, Baresi N, Aziz J D, et al. *JSpRo*, 2019, 56: 1121
- [11] *Announcement of Opportunities for Scientific Payloads and Projects Onboard Asteroid Exploration Mission*. CNSA, 2019
- [12] Huang J C, Ji J h, Ye P J, et al. *NatSR*, 2013, 3: 3411
- [13] Yan J G, Liu L, Ye M, et al. *Icar*, 2022, 385: 115120
- [14] Liu L, Yan J G, Ye M, et al. *A&A*, 2022, 667: A150
- [15] Hu S C, Li B, Jiang H X, et al. *AJ*, 2023, 166: 178
- [16] Kaplan G. *USNOC*, 2005, 179: 1
- [17] Park R S, Folkner W M, Williams J G, et al. *AJ*, 2021, 161: 105
- [18] Will C M, Nordtvedt K J. *AJ*, 1972, 177: 757
- [19] 郭俊义. *地球物理学基础*. 北京: 测绘出版社, 2001: 137
- [20] Tapley B D, Schutz B E, Born G H. *Statistical Orbit Determination*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004: 4
- [21] 胡小工, 黄斌. *中国科学院上海天文台年刊*, 1999, 20: 6

Orbit Accuracy Simulation Analysis of Asteroid (469219) Kamo`oalewa by Optical Observation of Tianwen-2

LI Yi-xing^{1,2} TANG Kai¹ FAN Min³ QU Yao-bin⁴ HUANG Yong^{1,2}

(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)
 (2 *School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)
 (3 *Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094*)
 (4 *Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201100*)

ABSTRACT China's asteroid exploration mission, Tianwen-2, is scheduled to launch in 2025. Its first target, asteroid (469219) Kamo`oalewa (also known as 2016 HO3), is a near-Earth object in co-orbit with Earth, with significant research value in terms of its motion evolution. Currently, there are limited ground observation data available for asteroid (469219) Kamo`oalewa, which restricts its orbit accuracy. Tianwen-2, equipped with an optical payload, is expected to acquire a large amount of onboard optical observation data during its approach to Kamo`oalewa. This will greatly improve the study situation of asteroid (469219) Kamo`oalewa, which currently has only ground-based optical observation data and lacks publicly available observation data after 2021. By simulating the optical observation data of Tianwen-2 with a spacecraft orbit error of 2 km, the pre-mission evaluation of the orbit prediction accuracy of asteroid (469219) Kamo`oalewa has been completed. The precision evaluation was performed using covariance analysis and numerical comparison methods. Within the possible range of observation precision considered in this study, it is estimated that the optical observation data from Tianwen-2 can improve the overall orbit accuracy of asteroid (469219) Kamo`oalewa to better than 15 km. Additionally, an analysis was conducted to examine the differences and characteristics of the results obtained from the two precision evaluation methods.

Key words astrometry, celestial mechanics, methods: numerical, asteroid: individual: (469219) Kamo`oalewa