引文格式:杨婉羚,高梧桐,刘路,等.彗星311P天基-地基光学联合定轨及精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):874-880.DOI:10.13203/j.whugis20220710

Citation: YANG Wanling, GAO Wutong, LIU Lu, et al. Orbit Determination and Accuracy Analysis for Comet 311P Based on Space-Based and Ground-Based Optical Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(5):874-880. DOI:10.13203/j.whugis20220710

彗星311P天基-地基光学联合定轨及精度分析

杨婉羚[1] 高梧桐[1] 刘 路[1] 王 波[1] 鄢建国[1]

1 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:中国计划于2034年左右对彗星311P/PANSTARRS(原名P/2013 P5)进行近距离探测,获取其精密轨道是保证任务成功的前提。以中国小天体探测任务为背景,采用武汉大学行星射电科学团队自主研发的小天体精密定轨软件SPOT(small body precise orbit determination toolkit),利用2005-10-17—2021-01-18发布的地基天基望远镜光学观测数据,对彗星311P进行了精密轨道确定的研究。SPOT解算的彗星311P三维位置与速度不确定度分别约为129.5 km和5.034×10^{-3} m/s,与国际知名小行星定轨软件OrbFit解算的彗星311P的三维位置和速度不确定度(135.8 km和5.270×10^{-3} m/s)近乎一致。这一实验结果验证了SPOT软件光学定轨模块的可靠性,同时也指出了当前彗星311P轨道位置不确定度在100 km量级。此外,还分析了轨道确定中所用力学模型对解算结果的影响,结果表明,当前311P轨道确定过程中可以忽略16个大主带小行星的引力摄动、广义相对论摄动以及太阳光压摄动;探讨了任务之前潜在的地基光学观测对彗星311P轨道确定的贡献,发现潜在的地基光学观测可以降低彗星311P的轨道不确定度,但是在任务开始时轨道位置不确定度依然高达几十千米。

关键词:SPOT;彗星311P;小天体;光学数据;精密定轨;天基-地基光学数据

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-04-26

DOI:10.13203/j.whugis20220710 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0874-07

Orbit Determination and Accuracy Analysis for Comet 311P Based on Space-Based and Ground-Based Optical Data

YANG Wanling[1] *GAO Wutong*[1] *LIU Lu*[1] *WANG Bo*[1] *YAN Jianguo*[1]

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: China has formulated plans to undertake a proximity exploration of comet 311P/PANSTARRS (previously known as P/2013 P5) around 2034. However, the successful execution of this mission is contingent upon obtaining an accurate determination of the orbit of comet 311P. **Methods**: The small body precise orbit determination toolkit (SPOT) developed by the planetary radio science team of Wuhan University is used to perform a study of the precise orbit determination for comet 311P in the context of China's small body exploration mission. We used the optical observations of ground-based and space-based telescopes released from October 17, 2005 to January 18, 2021. **Results**: The position and velocity uncertainties of comet 311P obtained by SPOT are about 129.5 km and 5.034×10^{-3} m/s respectively, which are in close agreement with the position and velocity uncertainties (135.8 km and 5.270×10^{-3} m/s) calculated by the well-known OrbFit. **Conclusions**: This experimental outcome not only validated the dependability of the optical data-based orbit determination module of the SPOT software, but also highlighted that the current positional uncertainty of comet 311P's orbit is on the order of hundreds of meters. Furthermore, this study investigates the influence of the mechanical model utilized in the orbit determination process on the

基金项目:国家自然科学基金(12203002,12033009);航天飞行动力学技术重点实验室基金(KJW6142210210201);武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金(21-01-01)。

第一作者:杨婉羚,硕士,主要从事小行星光学精密定轨研究。wanlingYang@whu.edu.cn

通信作者:刘路,博士生。liulu1101@whu.edu.cn

calculation results. The findings indicate that the gravitational field of the 16 large main-belt asteroids, as well as the perturbations caused by general relativity and solar light pressure, can be neglected in the current orbit determination process of 311P. Additionally, this paper evaluates the potential impact of ground-based optical observations conducted before the mission on the orbit determination of comet 311P. **Conclusions:** The results suggest that such observations have the potential to reduce the orbital uncertainty of the comet, but the uncertainty in the position of the orbit still remains significant, with values reaching tens of kilometers.

Key words: SPOT; comet 311P; minor planet; optical data; precise orbit determination; space-based and ground-based data

在过去半个多世纪，以小天体为目标的探测活动逐渐成为国际深空探测领域的热点。其主要原因是小天体作为太阳系中的“活化石”，在研究太阳系的发展与演变中起着至关重要的作用。例如，小天体的诞生可追溯到太阳系形成之初，多数小天体内部的演化程度较低，对各类小天体进行研究可以获得太阳系形成时物质的状态及分布信息，增进人类对太阳系的了解[1]。此外，对小天体进行研究可进一步探索地球生命的起源。大部分小天体上含有生命形成的多种必要的化学元素，了解认识它们对研究地球生命起源有着重要的启示[2]。更为现实的是，对小天体进行研究还能为防御小行星撞击地球提供思路。近地小行星在运行的过程中受多种不稳定摄动力影响，使其轨道呈现无序变化，精确了解小天体轨道演化过程可对地球被撞击的风险程度进行评估，并给出解决方案[3]。基于以上三点，对小天体的探测势在必行。

目前，国际上主要航天国家在小天体探测领域已取得一系列进展。1991年，美国的Galileo探测器在前往木星的途中飞越了国际编号为951的小行星Gaspra，实现了人类历史上第一次近距离小行星探测[4]。2004年，欧洲航天局的罗塞塔·菲莱探测器发射成功，菲莱号于2014-11-12顺利着陆于彗星67P/Churyumov-Gerasimenko，实现了人类首次彗星就位探测。2006年，新地平线号探测器发射，并于2019-01-01飞越柯伊伯带小天体2014MU69，标志着人类探索宇宙的脚步已遍及太阳系的八大行星、彗星和小行星[5]。2007年，黎明号成为人类历史上第一个进入小行星带的探测器，此后完成了对小行星Vesta以及小行星Cere的环绕探测，是世界上第一个先后环绕两个小天体的探测器[6]。继隼鸟1号（Hayabusa-1）在2010年成功完成世界首个小行星采样返回任务后，隼鸟2号（Hayabusa-2）继续太空之旅。2022-06-06，科学家首次确认Hayabusa-2带回的样品中存在生命必需物质——氨基酸[7]。

相较于深空探测领域硕果累累的美国、在彗星探测领域处于领先地位的欧洲以及在小行星采样返回领域领先的日本来说，中国在深空探测领域起步较晚。以2004年1月国务院正式批准探月工程立项作为中国迈入深空探测领域的标志性事件至今，中国已完成了对月球的绕、落、回三步走计划以及首次火星探测任务，并又进一步在“十四五”航天发展规划中提出为期10年分3个阶段实行的小天体探测任务“天问二号”，标志着中国向航天强国又迈进了一步[8]。

在进行小天体探测的过程中，精确的小天体轨道是实现卫星通讯、完成轨道设计、探测器自主导航的基础。因此，获取目标小天体的精密轨道至关重要。例如，中国Chang'e-2任务在飞越小行星Toutatis之前，紫金山天文台利用56组光学和雷达数据将Toutatis的位置精度解算至5 km以下[9]，保障了探测器成功飞掠小行星Toutatis。日本Hayabusa-1任务中，探测器到达目标小行星Itokawa之前就已经累积了大量的地面光学及雷达观测数据，基于这些数据可将Itokawa星历位置不确定度限制到7 km[10]，保障了探测器与Itokawa的成功交会。Scheeres等[11]利用OSIRIS-REx探测器飞越小行星（101955）Bennu期间获取的双程测距数据、双程多普勒测量数据、相对差分单向测距数据和光学影像数据对探测器进行了精密定轨，最终得到探测器相对于Bennu的位置不确定度为5 m。综上可知，小天体轨道确定时所使用观测资料的多源性、精度以及数据量是决定定轨精度的重要因素。

本文研究的彗星311P/PANSTARRS是中国未来小天体探测任务中的探测目标之一[12]。它也是主带小行星中的一颗活跃小行星，以在2013年9个不同时期内发生的零星地、彗星般地喷发尘埃事件（周期为250 d）而著名[13]。本文基于国际小行星中心（IAU minor planet center,

MPC)官网公布[14]的311P/PANSTARRS历史地基光学观测数据、哈勃望远镜(Hubble space telescope,HST)天基光学观测数据,利用自主研发的小天体精密定轨软件SPOT(small body precise orbit determination toolkit)对彗星311P进行精密轨道确定分析,一方面验证SPOT软件的可靠性,另一方面基于当前轨道确定结果提出一些有益的建议,以促进下一步彗星311P跟踪测量的进展。

1 SPOT小天体精密定轨软件

SPOT软件是武汉大学行星射电科学团队基于Python语言,独立自主设计和研发的一款可以同时处理多类深空探测数据,进行探测器、目标天体精密定轨及目标天体相关的物理与动力学参数解算的软件系统。SPOT软件在研发过程中借鉴了国际上深空探测的成功案例,并紧密围绕中国的行星探测任务,具有高度的自主可控制性和可移植性,能够为太阳系内行星、彗星等科学探索任务提供可靠的技术支持。通过与国际上其他精密定轨软件系统的严格比对和交叉验证,SPOT展现了其优良的性能和优异的可靠性[15-17]。本文将详细介绍最新扩展的小天体光学精密定轨模块。SPOT的小天体光学精密定轨模块设计的理念在于通过处理不同观测平台(地基与天基)获取的光学观测数据,进行小天体精密定轨,以求达到与国际上常用的小天体精密定轨软件一致的精度水平。

1.1 测量模型

当前SPOT小天体光学精密定轨模块可以处理常见的小天体的地基、天基光学观测数据(赤经和赤纬)。下面详细介绍地基与天基光学观测数据的测量模型在SPOT软件内的实现。

1.1.1 地基光学观测模型

地基光学测量模型中,天文望远镜位于地球表面。图1给出了某一观测t时刻,地心o、观测站S、太阳以及小天体m之间的简化位置关系。

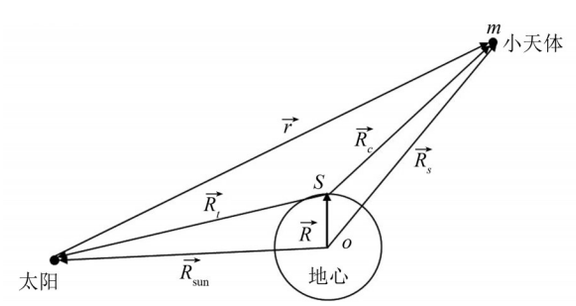


图1 地基光学测量模型

Fig. 1 Ground-Based Optical Measurement Model

由图1可以看出,t时刻地面观测站S到小天体m的矢量可表示为:

$$\vec{R}_C=\vec{R}_t+\vec{r}=-\vec{R}+\vec{R}_{\text{sun}}+\vec{r} \tag{1}$$

式中,$\vec{r}$为小天体的日心位置;$\vec{R}_{\text{sun}}$为太阳的地心位置;$\vec{R}$为测站的地心位置。

在太阳系小天体精密定轨过程中,需要考虑光行差改正。忽略狭义相对论下的严格公式,小天体在t时刻的实际站心位置为:

$$\vec{R}_C{}'=\vec{R}_C-d_t\cdot\vec{v}_c \tag{2}$$

式中,$d_t=\left|\vec{R}_C\right|/c$为信号传播的时间;$c=299\,792\,458.0$ m/s为光速;$\vec{v}_c$为小天体的日心速度。若$\vec{R}_{Cy}'$、$\vec{R}_{Cx}'$、$\vec{R}_{Cz}'$分别是$\vec{R}_C'$在X、Y、Z的三轴分量,则赤经α、赤纬δ的理论观测值计算公式为:

$$\alpha=\arctan\frac{\vec{R}_{Cy}'}{\vec{R}_{Cx}'},\delta=\arcsin\frac{\vec{R}_{Cy}'}{\left|\vec{R}_C'\right|} \tag{3}$$

1.1.2 天基观测模型

天基观测相较于地面观测而言,具有覆盖全球、不受大气层、电离层等因素影响的优点。在天基光学测量模型中,天基望远镜位于地球轨道上,与地面观测站不同,其位置不与地球相关联。图2给出了某一观测t时刻,地心o、天基测站S、小天体m之间的简化位置关系。

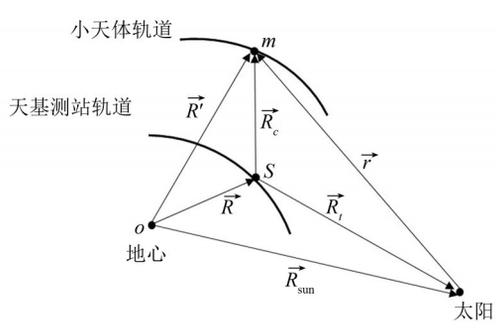


图2 天基光学测量模型

Fig. 2 Space-Based Optical Measurement Model

与地基观测模型相似,天基测站至小天体的矢量表达式同式(1)。之后可再次借助式(3)计算得到相应的天基赤经、赤纬的理论计算值。需注意的是,天基测站至地心某时刻的位置需要通过HST星历进行确定。

1.2 时间空间基准

SPOT光学定轨模块中时空参考框架的选择如下:运动方程在天球坐标系下进行构建和积分,框架定义由SPICE Kernels提供。SPICE是美国国家航天局行星科学部门建立的一个用于向深空探测任务提供所需信息的系统,其主要的

SPICE数据集通常被称为Kernels。地面测站的位置在国际地球参考框架下描述，坐标系统之间的转换计算参考了天文学SOFA库[18]进行实现。积分时间系统采用太阳系质心动力学时（barycentric dynamical time，TDB），但由于观测值时标对应时间系统为协调世界时（coodinated universal time，UTC），将涉及到UTC和TDB两种时间系统的转换，具体转换方法的实现参考了SOFA提供的函数。

2　彗星311P精密定轨分析

2.1　数据

截至目前，彗星311P可获取的观测数据只有光学观测数据，共207组，每一组对应着一对赤经和赤纬。这些光学观测数据可以从MPC下载得到，时间跨度为2005-10-17—2021-01-18。在这些光学观测数据中，地基光学观测数据合计165组，剩余42组为HST天基光学观测数据。HST光学数据集中观测在2013-10-18—2014-02-11，约占总数据量的1/4，观测时长约4个月，呈现出观测数量少且观测时间跨度较短的特征。

光学观测数据的精度取决于观测台站、观测时间和生成观测数据时所使用的星表。为此，使用Vereš等[19]最新发布的光学观测数据除偏和定权模型。该模型一定程度上去除了光学数据生成时由所用星表中恒星位置不准确和自行而引起的系统误差，观测值权值的设置考虑了星表精度、观测日期和类型以及测站等因素。表1给出了彗星311P每个测站观测值对应于Vereš等[19]的除偏和定权模型中的权值。由表1可以明显看出，HST天基观测数据的权值要比地基观测数据的权值大。这可能与HST观测精度有关，HST于20世纪发射，而地基望远镜大多建立于21世纪，如权值为0.200的F51（Pan-STARRS 1、Haleakala）建立于2008年，因此，在轨道确定中，HST天基观测数据可以作为地面光学观测数据的一个很好的补充，但在提升定轨精度方面，HST光学观测数据的贡献不大。

表1　各测站对应于Vereš等[19]的模型中的权值

Table 1　Weight Value of Each Station in the Model of Vereš et al.[19]

测站代码	权值	备注	测站代码	权值	备注
250	1.300	HST天基观测数据	Q62	1.000	
691	0.500		E10	0.400	
645	0.300		C10	1.000	
G96	0.500		215	1.000	地基观测数据
F51	0.200	地基观测数据	G36	1.000	
568	0.200		W96	1.000	
W87	0.566		Q11	1.000	
H21	1.000		H06	0.600	
K91	0.693				

2.2　动力学模型

彗星311P精确的动力学模型建立如下：动力学模型中考虑了太阳施加给彗星311P的中心引力，八大行星、月球、冥王星以及16颗较大主带小行星施加给彗星311P的N体摄动力，来自太阳的广义相对论效应以及太阳辐射压摄动力。该力模型更详细的配置见表2。

表2　311P/PANSTARRS力模型配置

Table 2　Force Model Configuration for 311P/PANSTARRS

模型	内容	描述	加速度量级/(km·s^{-2})	备注
力模型	中心引力	太阳	10^{-6}	星历采用喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory，JPL）
	N体摄动	八大行星、月球、冥王星，包括谷神星Ceres、灶神星Vesta以及智神星Pallas在内的16个主带小行星摄动	10^{-11}	
	广义相对论摄动	太阳质心后牛顿修正	10^{-14}	DE441和sb441-n16[20]
	太阳辐射压	Cannonball模型（取彗星行星311P等效直径为0.20 km，密度3 300 kg/m^3，取几何反照率为0.3）	10^{-21}	参数详见文献[21]

2.3　软件可靠性分析

基于§2.1所述数据和§2.2的力模型，利用SPOT软件为彗星311P执行精密定轨。图3为定轨后天基、地基光学观测数据残差图，其中蓝色点表示赤经残差，黄色点表示赤纬残差。从图3可以看出，两种数据的残差都均匀分布在0值附近，表明轨道确定中较好地拟合了观测数据。统计定轨后的天基、地基、联合天基-地基光学观测数据残差的均方根（root mean square，RMS）分别为0.192 7″、0.377 2″、0.339 7″，接近于MPC官网给出的观测值残差的RMS（0.300 0″），这进一步表明轨道确定中对数据的拟合是可靠的。

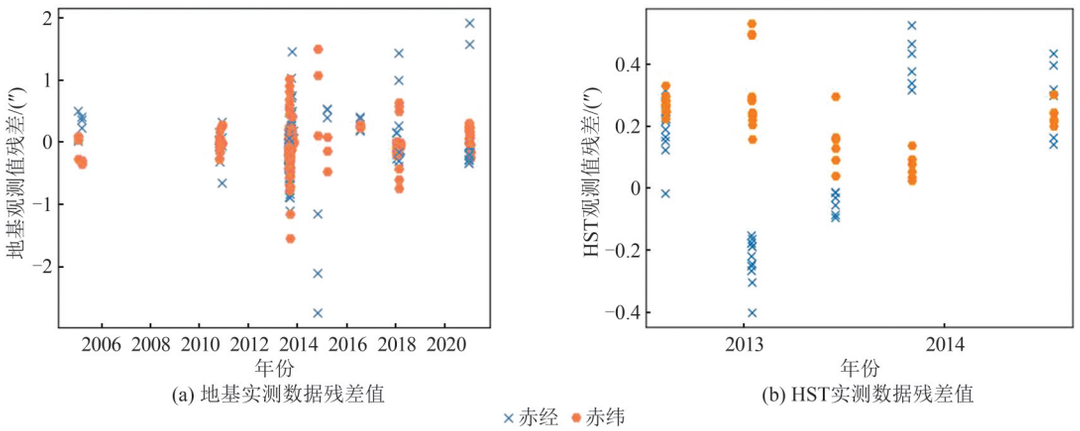


图3 定轨后天基、地基光学观测值(赤经、赤纬)残差

Fig. 3 Residual of Optical Observations (Right Ascension and Declination) of the Space-Based and Ground-Based After Orbit Determination

表3给出了指定时刻彗星311P解算得到的位置、速度及其不确定度。从表3数据计算得到解算后的三维位置不确定度为129.5 km,三维速度不确定度为5.034×10^{-3} m/s,表明当前的观测数据只能将彗星311P的轨道位置不确定度约束到100 km量级,速度不确定度约束到10^{-3} m/s量级。

表3 SPOT软件解算的彗星311P在2013-01-17T12:00:00(TDB时)的位置、速度及不确定度

Table 3 Uncertainty of Comet 311P's Position, Velocity Calculated by SPOT Software at 12:00:00 (TDB) on Jan. 17, 2013

统计项	X_0/km	Y_0/km	Z_0/km	Vx_0/(m·s^{-1})	Vy_0/(m·s^{-1})	Vz_0/(m·s^{-1})
数值	47 115 128.085	−324 485 070.004	−141 690 779.483	17 932.1	2 765.9	2 932.6
不确定度(1σ)	110.117	34.403	58.933	2.602×10^{-3}	3.378×10^{-3}	2.676×10^{-3}

上述仅从内符合的角度评定了311P的轨道解算结果,下面从外符合角度来分析轨道解算结果,同时验证SPOT软件光学定轨模块的可靠性。为此,基于相同的彗星311P的光学观测数据以及力模型,利用国际知名小行星光学软件OrbFit对彗星311P执行精密定轨。将SPOT的轨道解算结果与OrbFit的轨道解算结果进行对比,同时还对比了来自JPL的311P的轨道解算结果。JPL的轨道解算结果来自于JPL small body database。表4给出了具体的对比结果。

表4 OrbFit和JPL解算的彗星311P在2013-01-17T12:00:00(TDB时)的位置、速度、不确定度以及与SPOT解算结果的差异

Table 4 Uncertainty of Comet 311P's Position, Velocity Calculated by OrbFit and JPL at 12:00:00 (TDB) on Jan. 17, 2013 and the Orbital Difference with SPOT Results

解算平台	统计项	X_0/km	Y_0/km	Z_0/km	Vx_0/(10^{-3} m·s^{-1})	Vy_0/(10^{-3} m·s^{-1})	Vz_0/(10^{-3} m·s^{-1})
OrbFit	数值	47 115 273.524	−324 485 113.809	−141 690 785.419	17 932 058	2 765 878	2 932 572
	与SPOT的差值	145.439	−43.805	−5.936	1.092	−1.211	3.897
	RMS(1σ)	116.709	22.845	65.682	2.759	3.715	2.522
JPL	数值	47 115 076.296	−324 485 064.405	−141 690 868.076	17 932 062	2 765 872	2 932 568
	与SPOT的差值	51.788	−5.599	88.593	1.092	−1.219	3.897
	RMS(1σ)	284.457	84.017	139.499	6.489	9.144	6.699

由表4中数据计算得到OrbFit解算的三维位置不确定为135.8 km,三维速度不确定度为5.270×10^{-3} m/s;JPL解算的三维位置不确定为327.8 km,三维速度不确定度为1.306×10^{-2} m/s。将SPOT解算的结果与OrbFit的解算结果相比,三维位置不确定度都在100 km量级,三维速度不确定度都在10^{-3} m/s量级,这说明了利用SPOT软件进行小天体光学定轨是可靠的。SPOT解算的结果与JPL的解算结果相比,发现JPL解算得到的轨道不确定度要明显大于SPOT和OrbFit

解算得到的轨道不确定度，这是因为 JPL 解算时考虑了光学观测数据的观测时刻存在 1 s 的不确定度，而 SPOT 和 OrbFit 解算中没有考虑观测时刻的不确定度[22]。

2.4　不同力模型对轨道位置确定的影响

在§2.2 的力模型配置的基础上，为探究不同小量级摄动力对最终解的影响，本文设计了一套对比实验。实验中，在原有的力模型的基础上单次去除 16 个较大主带小行星的摄动力、广义相对论摄动力和太阳辐射压力进行 311P 的轨道确定，分别比较 3 个轨道解与表 3 所示的参考轨道解的三维位置差值。表 5 给出了最终的对比结果。

表 5　不同力模型之间的三维轨道位置差异

Table 5　Three-Dimensional Orbital Position Differences Between Different Force Models

力模型	三维位置差异/km
N体摄动②（16 个较大主带小行星的摄动）	−4.055
广义相对论摄动	4.259
太阳辐射压	0.080

由表 5 可知，不考虑 16 个较大主带小行星的引力摄动和广义相对论摄动的情况下解算得到的轨道位置与参考轨道位置的差异在几个千米，不考虑太阳辐射压情况下解算得到的轨道位置差异在几十米。3 种情况下最终得到的三维轨道位置差异远远小于现在的 100 km 量级的轨道位置不确定度，这表明基于当前的光学观测数据对 311P 的轨道定轨中，这 3 个力可以不予考虑。

2.5　未来潜在地基光学观测对轨道位置确定的贡献

对 311P 的探测预计在 2034 年左右，从现在起到任务开展之前还有约 9 年的时间。下面通过仿真分析探讨这 9 年中潜在的光学观测对 311P 轨道确定的贡献，设定，智利和中国云南两个天文台作为仿真观测的台站。为保证仿真数据量与目前每年观测的数据量近似，设定每年每个台站观测一次，每个台站一次获取 5 组赤经、赤纬观测值。仿真实验中考虑了 4 种定轨弧长设置：2005—2020 年、2005—2025 年、2005—2030 年以及 2005—2035 年，其中 2021 年之前的数据是实测数据。最终的定轨结果如图 4 所示。

由图 4 可知，随着观测弧长的增加，x、y、z 3 个方向上的位置不确定度明显下降，但是考虑潜在的地基光学观测数据的贡献下，2035 年时 311P 的轨道位置不确定度依然有几十千米的量级。参考以往深空探测任务，不确定度为几十千米的轨道位置仍不足以支撑对 311P 展开近距离探测。

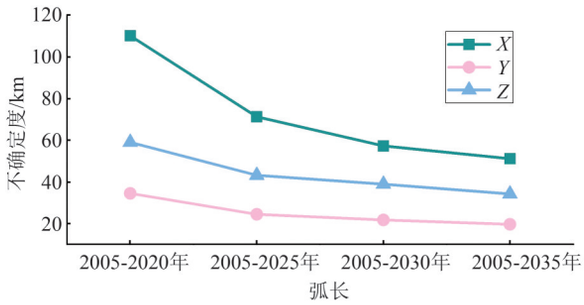


图 4　不同弧长下轨道位置不确定度的变化

Fig. 4　Variation of Three-Dimensional Uncertainty Under Different Arc Lengths

3　总结与展望

本文以中国“十四五”航天发展规划中提出的第一个小天体深空探测任务为背景，利用 MPC 官网发布的所有彗星 311P/PANSTARRS 的地基和天基光学观测数据，运用 SPOT 软件对其进行了精密定轨研究。SPOT 软件解算得到的彗星 311P 三维位置与速度不确定度分别为 129.5 km 和 5.034×10^{-3} m/s，定轨后光学观测数据残差 RMS 为 0.339 7″。将 SPOT 解算结果与 OrbFit 解算结果进行对比，其三维位置不确定度一致于 100 km 量级，三维速度不确定度一致于 10^{-3} m/s 量级，表明 SPOT 软件的小天体光学定轨模块是可靠的。此外，本文探讨了不同力模型对彗星 311P 轨道确定的影响，发现利用当前的光学观测数据进行彗星 311P 的轨道确定中可以忽略 16 个较大主带小行星的引力摄动、广义相对论摄动及太阳辐射压摄动；并探讨了未来潜在地面光学观测数据对 311P 轨道确定的贡献，发现潜在光学观测数据可以明显降低轨道位置的不确定度，但是到 2035 年彗星 311P 的轨道位置不确定度依然高达几十千米。因此，为得到更高精度的 311P 的位置信息，在任务开展之前协同更多观测平台对 311P 进行加强观测是必要的。如可以利用中国空间站上的精密望远镜设备进行更多的观测。为保证任务的顺利展开以及数据来源自主可靠，还需要进一步对中国的观测设备进行升级，降低数据的噪声水平，不断革新和完善观测系统。

参　考　文　献

[1]　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. Re-

view of the Gravity Field of Asteroids[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 1-7.

[2] 李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 424-436.
LI Chunlai, LIU Jianjun, YAN Wei, et al. Overview of Scientific Objectives for Minor Planets Exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 424-436.

[3] 孙泽洲, 孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 785-791.
SUN Zezhou, MENG Linzhi. Current Situation and Sustainable Development Trend of Deep Space Exploration in China[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(6): 785-791.

[4] 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.

[5] 钟佳耿, 鄢建国, 李明. 小天体探测任务及形状建模综述[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1): 142-151.
ZHONG Jiageng, YAN Jianguo, LI Ming. Exploration Mission and Shape Modeling of Small Celestial Bodies: A Review [J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(1): 142-151.

[6] HAND E. Dawn Probe to Look for a Habitable Ocean on Ceres[J]. *Science*, 2015, 347(6224): 813-814.

[7] PARKER E T, CHAN Q H S, GLAVIN D P, et al. Non-Protein Amino Acids Identified in Carbon-Rich Hayabusa Particles[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2022, 57(4): 776-793.

[8] 刘岩, 王磊. 我国小天体探测进入工程研制阶段[J]. 太空探索, 2021(5): 14-15.
LIU Yan, WANG Lei. China's Small Celestial Body Exploration Has Entered the Stage of Engineering Development[J]. *Space Exploration*, 2021(5): 14-15.

[9] 胡寿村, 季江徽, 赵玉晖, 等. 嫦娥二号飞越小行星试验中图塔蒂斯轨道确定与精度分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(5): 506-511.
HU Shoucun, JI Jianghui, ZHAO Yuhui, et al. Determination and Accuracy Analysis of Tutatis Orbit in Chang'e-2 Flying over Asteroids Test[J]. *Scientia Sinica* (*Technologica*), 2013, 43(5): 506-511.

[10] YOSHIKAWA M, IKEDA H, YANO H, et al. Astrodynamics Science About Itokawa, Gravity and Ephemeris [C]//AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, 2006.

[11] SCHEERES D J, MCMAHON J W, FRENCH A S, et al. The Dynamic Geophysical Environment of (101955) Bennu Based on OSIRIS-REx Measurements[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(4): 352-361.

[12] 余后满, 张熇, 黄晓峰, 等. 我国小天体探测任务设想[J]. 国际太空, 2021(9): 4-9.
YU Houman, ZHANG He, HUANG Xiaofeng, et al. Tentative Idea of Small Celestial Body Exploration Mission in China[J]. *Space International*, 2021(9): 4-9.

[13] JEWITT D, AGARWAL J, WEAVER H, et al. Episodic Ejection from Active Asteroid 311P/PANSTARRS[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 798(2): 109.

[14] MARSDEN B G. The Minor Planet Center[J]. *Celestial Mechanics*, 1980, 22: 63-71.

[15] GAO W T, YAN J G, JIN W T, et al. A Simulated Gravity Field Estimation for the Main Belt Comet 133P/Elst-Pizarro[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2021, 366(6): 57.

[16] GAO W T, YAN J G, WANG B, et al. A Lander Radio Science Experiment for the Estimation of the Gravity Field and Rotation of Comet 133P/Elst-Pizarro[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 505(1): 103-115.

[17] WANG B, YAN J G, GAO W T, et al. The Neptunian Gravity Estimated from the Motion of Triton Based on Astrometric Observations[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, 671: A70.

[18] HOHENKERK C. Standards of Fundamental Astronomy[J]. *Scholarpedia*, 2011, 6(1): 11404.

[19] 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.

[20] PARK R S, FOLKNER W M, WILLIAMS J G, et al. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, 161(3): 105.

[21] JEWITT D, WEAVER H, MUTCHLER M, et al. The Nucleus of Active Asteroid 311P/(2013 P5) PANSTARRS[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(6): 231.

[22] DEL VIGNA A, ROA J, FARNOCCHIA D, et al. Yarkovsky Effect Detection and Updated Impact Hazard Assessment for Near-Earth Asteroid (410777) 2009 FD [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 627: L11.