



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: 彗星 311P 天基-地基光学联合定轨及精度分析  
作者: 杨婉羚, 高梧桐, 刘路, 王波, 鄢建国  
DOI: 10.13203/j.whugis20220710  
收稿日期: 2023-09-27  
网络首发日期: 2023-12-08  
引用格式: 杨婉羚, 高梧桐, 刘路, 王波, 鄢建国. 彗星 311P 天基-地基光学联合定轨及精度分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220710>



**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.whugis20220710.

引用格式：

杨婉玲, 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), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220710. (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*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220710.)

# 彗星 311P 天基-地基光学联合定轨及精度分析<sup>1</sup>

杨婉玲<sup>1</sup> 高梧桐<sup>1</sup> 刘路<sup>1</sup> 王波<sup>1</sup> 鄢建国<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

**摘要:** 我国计划于 2034 年左右对彗星 311P/PANSTARRS (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。本文以我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 年 10 月 17 日至 2021 年 01 月 18 日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为约 130 km 和  $5.034 \times 10^{-3}$  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  $5.270 \times 10^{-3}$  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百公里量级。此外, 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。最后, 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公里。

**关键词:** SPOT; 主带彗星 311P/PANSTARRS; 小天体; 光学数据; 精密定轨

## Orbit determination and accuracy analysis for comet 311P based on space-based and ground-based optical data

YANG Wanling<sup>1</sup> GAO Wutong<sup>1</sup> LIU Lu<sup>1</sup> WANG Bo<sup>1</sup> YAN Jianguo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 收稿日期: 2023-09-27

**项目资助:** 国家自然科学基金(编号: 12203002, 12033009)、航天飞行动力学技术重点实验室基金(编号: KJW6142210210201)和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(编号: 21-01-01)资助项目。

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

**通讯作者:** 刘路, 博士研究生, 主要从事深空探测器精密定轨研究。liulu1101@whu.edu.cn

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:** In this paper, the SPOT (Small Body Precise Orbit Determination Toolkit) 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 17 October 2005 to 18 January 2021. **Results:** The position and velocity uncertainties of comet 311P obtained by SPOT are about 130 km and  $5.034 \times 10^{-3}$  m/s respectively, which are in close agreement with the position and velocity uncertainties (135.8 km and  $5.270 \times 10^{-3}$  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 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, the 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.

**Keywords:** SPOT; Main belt comet 311P/PANSTARRS; minor planet; optical data; precise orbit determination

## 0 引言

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。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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。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,并给出解决方案等<sup>[3]</sup>。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,美国的伽利略探测器(Galileo)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<sup>[4]</sup>。2004年,欧洲航天局(ESA)的罗塞塔·菲莱(Rosetta Philae)探测器发射成功,菲莱号(Philea)于2014年11月12日顺利着陆于彗星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(New Horizons)发射,并于2019年1月1日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<sup>[5]</sup>。2007年,黎明号(DAWN)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<sup>[6]</sup>。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年6月6日,科学家首次确认Hayabusa-2带回的样品中存在生命必须物质——氨基酸<sup>[7]</sup>。

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,我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,我国

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”,标志着我国向航天强国又迈进了一步<sup>[8]</sup>。

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CE-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<sup>[9]</sup>,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<sup>[10]</sup>,保障了探测器与Itokawa的成功交会。Scheeres等人利用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、Delta-DOR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<sup>[11]</sup>。综上所述,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<sup>[12]</sup>。它也是主带小行星中的一颗活跃小行星,以在2013年九个不同的时期内发生的零星地、彗星般地喷发尘埃事件(周期为250天)而著名<sup>[13]</sup>。本文基于国际小行星中心(IAU minor planet Center, MPC)官网公布<sup>[14]</sup>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。一方面可以验证 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, 并紧密围绕我国的行星探测任务, 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。通过与国际上其它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<sup>[15-17]</sup>。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)。接下来我们将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。

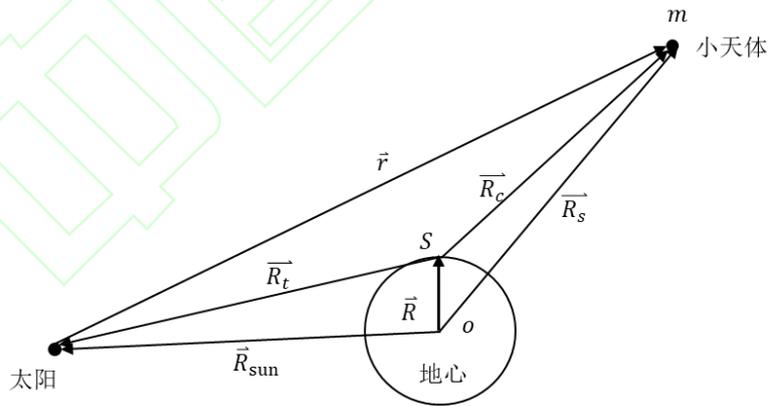


图 1 地基光学测量模型

Fig.1 Ground-based Optical Measurement Model

由图可以看出,  $t$  时刻地面观测站  $S$  到小天体  $m$  的矢量可由下式表示:

$$\vec{R}_c = \vec{R}_t + \vec{r} = -\vec{R} + \vec{R}_{sun} + \vec{r} \quad (1)$$

式中,  $\vec{r}$  为小天体的日心位置,  $\vec{R}_{sun}$  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:

$$\vec{R}_c' = \vec{R}_c - d_t \cdot \vec{v}_c \quad (2)$$

式中， $d_t = \frac{|\vec{R}_c|}{c}$ 为信号传播的时间， $c = 299792458.0 \text{ m/s}$ 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，则由式（3）和（4）可计算赤经赤纬 $(\alpha, \delta)$ 的理论观测值：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\vec{R}'_{cy}}{\vec{R}'_{cx}}\right) \quad (3)$$

$$\delta = \arcsin\left(\frac{\vec{R}'_{cy}}{|\vec{R}'_c|}\right) \quad (4)$$

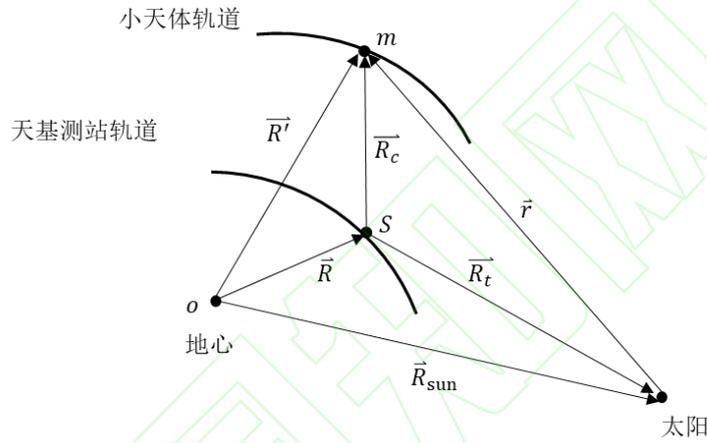


图2 天基光学测量模型

Fig.2 Space-based Optical Measurement Model

与地基观测模型相似，我们可以得到天基测站至小天体的矢量为：

$$\vec{R}_c = \vec{R}_t + \vec{r} = -\vec{R} + \vec{R}_{sun} + \vec{r} \quad (5)$$

之后可再次借助于式（3）和（4）计算得到相应的天基赤经赤纬的理论计算值。需要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 NASA(美国国家航天局，National Aeronautics and Space Administration，简称 NASA)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

## 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，其位置不与地球相固联。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。

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 (ITRF) 下描述，坐标系统之间的转换计算参考了天文学 SOFA 库<sup>[18]</sup>进行实现。积分时间系统采用太阳系质心动力学时 (TDB)，但由于观测值时标对应时间系统为协调世界时 (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

截至到目前，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 年

10月17日至2021年01月18日。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年10月18日至2014年02月11日，约占总数据量的1/4，观测时长约4个月，呈现出观测数量少及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，我们使用了Vereš et al. (2017)最新发布的光学观测数据除偏和定权模型<sup>[9]</sup>。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 et al. (2017)的除偏和定权模型中的权值。由表1明显可以看出，HST天基观测数据的权值要比地面观测数据的权值大。这可能与HST观测精度有关，HST于上个世纪发射，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 et al. (2017)的模型中的权值

Tab.1 The weight value of each station in the model of Vereš et al. (2017)

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

## 2.2 动力学模型

我们为彗星311P建立了精确的动力学

模型。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

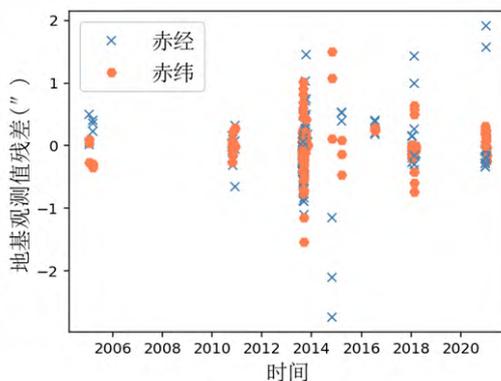
Tab.2 Force Model Configuration for 311P/PANSTARRS

模型	内容	描述	加速度量级/ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-2}$ )	备注
力模型	中心引力	太阳	$10^{-6}$	星历采用 JPL DE441 和 sb441-n16 <sup>[20]</sup>
	N 体摄动	八大行星, 月球, 冥王, 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 Cannonball 模型 (取彗星行星 311P 等效直径为	$10^{-14}$	参数详见相关文献 <sup>[21]</sup>
	太阳辐射压	0.20 km, 密度 $3300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 取几何反照率为 0.3)	$10^{-21}$	

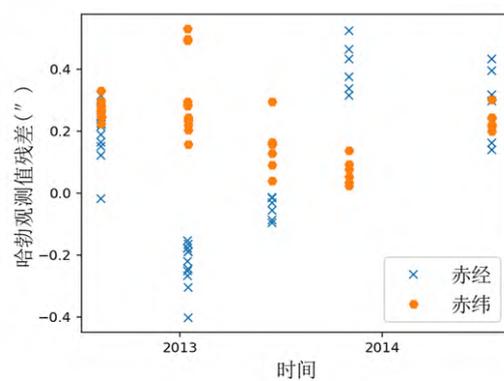
### 2.3 软件可靠性分析

基于 2.1 节所述数据和 2.2 节的力模型，我们利用 SPOT 软件为彗星 311P 执行了精密定轨。图 3 为定轨后天基、地基光学观测数据残差图，其中蓝色的点表示的是赤经的残差，黄色的点表示的是赤纬残差。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的拟合了观测数

据。统计定轨后的天基光学观测数据残差的 RMS 为  $0.1927''$ ，地基光学观测数据残差的 RMS 为  $0.3772''$ ，联合天基地基光学观测数据残值的 RMS 为  $0.3397''$ ，接近于 MPC 官网给出的观测值残差的 RMS ( $0.3000''$ )，这进一步表明轨道确定中对数据的拟合是可靠的。



(a) 地基实测数据残差值



(b) HST实测数据残差值

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  $5.034 \times 10^{-3}$  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百公里量级, 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 年 1 月 17 日 12: 00: 00 时刻 (TDB 时) 的位置、速度以及不确定度。

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

参数	数值	不确定度 ( $1\sigma$ )	单位
$X_0$	47115128.085	110.117	km
$Y_0$	-324485070.004	34.403	km
$Z_0$	-141690779.483	58.933	km
$Vx_0$	17932.1	2.602e-03	m/s
$Vy_0$	2765.9	3.378e-03	m/s
$Vz_0$	2932.6	2.676e-03	m/s

上述仅从内符合的角度评定了 311P 的轨道解算结果, 接下来我们将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, 我们利用国际知名小行星光学软件 OrbFit 对

彗星 311P 执行了精密定轨。我们将 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 年 1 月 17 日 12: 00: 00 时刻 (TDB 时) 的位置、速度、不确定度以及与 SPOT 解算结果的差异。

Tab.4 Uncertainty of Comet 311P's Position, velocity Calculated by OrbFit and JPL at 12:00:00 (TDB) on January 17, 2013 and The orbital Difference With SPOT Results.

解算平台	参数	数值	与 SPOT 的差值	RMS ( $1\sigma$ )	单位
OrbFit	$X_0$	47115273.524	145.439	116.709	km
	$Y_0$	-324485113.809	-43.805	22.845	km
	$Z_0$	-141690785.419	-5.936	65.682	km
	$Vx_0$	17932.058	1.092e-3	2.759e-03	m/s
	$Vy_0$	2765.878	-1.211e-3	3.715e-03	m/s
	$Vz_0$	2932.572	3.897e-3	2.522e-03	m/s
JPL	$X_0$	47115076.296	51.788	284.457	km
	$Y_0$	-324485064.405	-5.599	84.017	km
	$Z_0$	-141690868.076	88.593	139.499	km

$Vx_0$	17932.062	1.092e-03	6.489e-03	m/s
$Vy_0$	2765.872	-1.219e-03	9.144e-03	m/s
$Vz_0$	2932.568	3.897e-03	6.699e-03	m/s

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  $5.270 \times 10^{-3}$  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  $1.306 \times 10^{-2}$  m/s。SPOT 的解算的结果与来自 OrbFit 的解算结果相比，三维位置不确定度都在百公里量级，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 的解算的结果与来自 JPL 的解算结果相比，我们发现 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 解算时考了光学观测数据

的观测时刻存在 1 秒的不确定度，而 SPOT 和 OrbFit 解算中没有考虑观测时刻的不确定度<sup>[22]</sup>。

## 2.4 不同力模型对轨道位置确定的影响

在 2.2 节的力学模型配置的基础上，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，分别比较三个轨道解与表 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

Tab. 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不考虑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公里，不考虑太阳光压的情况下解算得到的轨道位置差异在几十米。三种情况下最终得到的三维轨道位置差异远远小于现在的百公里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，这三个力可以不予考虑。

## 2.5 未来潜在的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 10 年的时间。本节我们通过仿真分析探讨这 10 年中潜在的光学观测对 311P 轨道确定的贡献。我们设定了云南和智利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，我们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。仿真实验中考虑了四种定轨弧长设置：2005 年至 2020 年、2005 年至 2025 年、2005 年至 2030 年以及 2005 年至 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

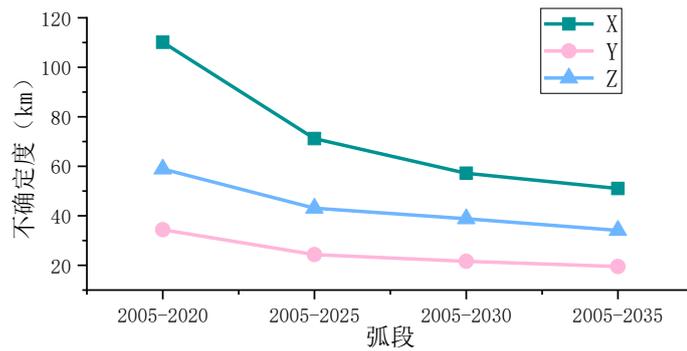


图 4 不同弧长下轨道位置不确定度的变化

Fig. 4 Variation of three-dimensional uncertainty under different arc lengths

由图 5 可知,随着观测弧度长度的增加, x, y, z 三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公里的量级。参考以往深空探测任务,不确定度为几十公里的轨道位置仍不足以支撑对 311P 展开近距离探测。

### 3 总结与展望

本文以我国“十四五”计划中提出第一个小天体深空探测任务为背景,利用目前 MPC 官网发布的所有彗星 311P/PANSTARRS 的地基和天基光学观测数据,运用武汉大学行星科学团队自研小天体精密定轨软件 SPOT 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约 130 km 和  $5.034 \times 10^{-3}$  m/s,定轨后的光学观测数据残差 RMS 为 0.3397"。将 SPOT 解算结果与国际知名小行星光学定轨软件 OrbFit 解算的结果进行了对比。SPOT 和 OrbFit 解算的三维位置不确定度一致于百公里量级,三维速度不确定度一致于  $10^{-3}$  m/s,表明 SPOT 软件的小天体光学定轨模块是可靠的。此外,我们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、广义相对论摄动情以及太阳光压摄动。最后,我们探讨了未来潜在的地面光学观测数据对 311P 轨道确定的贡献,发现潜在的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公里。因此,为了得到更高精度的 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。例如,可以利用我国空间站上的精密望远镜设备进行更多的观测。此外,为保证任务的顺利开展以及数据来源自主可靠,还需要进一步对我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] 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)
- [2] 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(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-

- [3] Sun Zezhou, Meng Lingzhi. Current Situation and Sustainable Development Trend of Deep Space Exploration in China[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 47(6): 785-791.(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.)
- [4] 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*, 1-12(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):1-12)
- [5] Zhong Jiageng, Yan Jianguo, Li Ming. 2022. Exploration mission and shape modeling of small celestial bodies: a review. *Progress in Geophysics*, 37(1): 142-151(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)
- [6] Hand E. Dawn probe to look for a habitable ocean on Ceres[J]. *Science*, 2015, 347(6224): 813-814.
- [7] Parke 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.
- [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.
- [10] Yoshikawa M, Ikeda H, Yano H, et al. Astrodynamics Science About Itokawa, Gravity and Ephemeris[J]. *Icarus*, 2006, 216(2): 426-475.
- [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, 张焯, 黄晓峰, 等. 我国小天体探测任务设想[J]. 国际太空, 2021, 9: 4-9.
- [13] Jewitt D, Agarwal J, Weaver H, et al. episodic ejection from active asteroid 311P/PANSTARSS[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 798(2): 109.
- [14] IAU Minor Planet Center[EB/OL]. <https://minorplanetcenter.net>.
- [15] Gao W, Yan J, Jin W, et al. A simulated gravity field estimation for the main belt comet 133P/Elst-Pizarro[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2021, 366: 57.
- [16] Gao W, Yan J, 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, Gao W, et al. The Neptunian gravity estimated from the motion of Triton based on astrometric observations[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2023, 671: A70.
- [18] Standards of Fundamental Astronomy [EB/OL]. <https://www.iausofa.org/tandc.html#citation>.
- [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, Mutcher M, et al. The Nucleus of Active Asteroid 311P/(2013 P5) PANSTARRS[J/OL]. *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.

网络首发:

标题: 彗星 311P 天基-地基光学联合定轨及精度分析

作者: 杨婉羚, 高梧桐, 刘路, 王波, 鄢建国

Doi: 10.13203/j.whugis20220710.

收稿日期: 2023-09-27

引用格式:

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), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220710. (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*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20220710.)

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:

**EOP 预报误差对深空探测器精密定轨结果影响分析**

王波, 鄢建国, 高梧桐, 叶茂, 于亮, 马卓希, 李斐

武汉大学学报(信息科学版). doi: 10.13203/j.whugis20220004

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220004>

**木星探测器 Juno 精密定轨分析及低阶引力场解算**

秦松鹤, 黄勇, 李培佳, 曹建峰

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 65-74.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200664>

**GNSS 卫星精密定轨全球地面基准站网随机优化算法**

韩德强, 党亚民, 薛树强, 张龙平, 王虎, 齐珂

武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(6): 799-805.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20170099>