



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: 小行星光学定轨软件研制和数据处理分析  
作者: 王波, 刘路, 鄢建国, 高梧桐  
DOI: 10.13203/j.whugis20200195  
收稿日期: 2020-04-24  
网络首发日期: 2021-02-22  
引用格式: 王波, 刘路, 鄢建国, 高梧桐. 小行星光学定轨软件研制和数据处理分析. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200195>



**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.whugis20200195

### 引用格式:

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, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200195( 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, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200195 )

## 小行星光学定轨软件研制和数据处理分析

王波 刘路 鄢建国 高梧桐

(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:** 结合中国航天局 2019 年 4 月 19 日拟定的第一个小行星探测任务规划, 本文针对任务目标之一的主带彗星 133P/Elst-Pizarro (7968) 自主研制了小行星光学定轨软件。使用 1979 年 7 月 24 日至 2019 年 10 月 28 日期间发布的 133P/Elst-Pizarro 地面光学观测数据进行精密定轨, 与国际知名小行星光学定轨软件 OrbFit 对比分析。对比发现解算结果残差分布一致, 两软件生成的残差差值的 RMS 小于  $0.01''$ , 定轨的内符合精度相互吻合。这一结果初步表明自主研制的小行星光学定轨程序的可靠性。在此基础上, 对 133P/Elst-Pizarro 开展光学数据仿真定轨分析, 研究地面光学数据的定轨精度。结果表明: 模拟云南站和智利站每月一次联测, 在只考虑观测噪声影响的情况下, 添加接近目前实际观测水平的高斯白噪声, 使用 20 年光学观测资料定轨, 小行星光学定轨精度在 50 km 量级。同时验证增加观测数据或降低观测噪声均可有效提高小行星光学定轨精度。

**关键词:** 主带彗星 133P/Elst-Pizarro; 光学定轨; 仿真分析; 精度分析

中图分类号: P228.1

文献标识码: A

20 世纪 90 年代前, 科学家主要通过地面天文观测和对外来陨石的 analysis, 来研究小行星的轨道、物理性质和化学成分。随着航天和深空探测技术的发展, 逐步实

收稿日期: 2020-04-24

项目资助国家自然科学基金(U1831132); 湖北省自然科学基金杰出基金(2018CFA087)。

第一作者: 王波, 硕士生, 主要从事小行星光学精密定轨。wangbo@whu.edu.cn

通讯作者: 鄢建国, 博士, 教授。jgyan@whu.edu.cn

现了飞越、绕飞、采样返回等多种空间探测方式<sup>[1]</sup>。如在 1991 年,美国发射的“伽利略”木星探测器在飞往木星途中对 951 号 Gaspra 小行星进行了飞越探测,向地球发送回第一批从未拍摄过的小行星近距离照片<sup>[2]</sup>。此后,2000 年 2 月 14 日,NASA 的“近地小行星交会”探测器 NEAR 顺利进入距离爱神小行星 35 km 的绕飞轨道<sup>[3]</sup>;2005 年 10 月,日本“隼鸟”探测器成功对近地小行星糸川进行交会与采样,为研究早期太阳系的性质提供了重要信息<sup>[4]</sup>;欧洲的“罗塞塔-菲莱”探测器实现了低轨道绕彗核观测和未知彗星表面精确着陆<sup>[5]</sup>;我国“嫦娥二号”首次飞越小行星图塔蒂斯<sup>[6]</sup>,除在国际上创造千米级飞越最近距离记录外,也使中国成为继美、欧、日之后第 4 个实现小行星探测的国家。

继嫦娥二号飞越图塔蒂斯后,中国航天局 2019 年 4 月 19 日发布了首个小行星探测任务规划<sup>[7]</sup>。根据计划,我国将首先对近地小行星 2016HO3(469219)开展伴飞探测,然后采样返回地球附近释放返回舱将样品送回地球。探测器再经地球、火星借力到达小行星带,对主带彗星 133P/Elst-Pizarro(7968)开展伴飞探测。133P/Elst-Pizarro,是一颗既显示小行星特征又显示彗星特征的“活跃小行星”<sup>[8]</sup>,其轨道在小行星带内,在发现其在近日点出现彗星一样的尘埃尾巴前,是将其作为小行星,并命名为 7968 Elst-Pizarro;1996 年得到的它接近近日点的影像,清楚地露出彗尾,首次揭示了 Elst-Pizarro 的彗星性质,并发现彗核的等效半径大约为 2 km<sup>[9]</sup>,亮度约为 17 至 20 等。上述探测任务中,精确确定 2016HO3 和 133P/Elst-Pizarro 的轨道对任务的完成至关重要。

在我国“嫦娥二号”飞越图塔蒂斯试验任务中,中国科学院紫金山天文台于 2012 年间利用国内外光学天文望远镜对图塔蒂斯进行观测,并用获得的 300 多组有效观测数据结合历史光学与雷达资料对图塔蒂斯进行轨道确定以为嫦娥二号飞越小行星提供重要的科学依据和任务保障。获得的小行星定轨内符合精度优于 5 km,

在只使用光学数据定轨情况下,获得的图塔蒂斯定轨内符合精度约为 22 km,定轨结果被嫦娥二号飞越小行星试验任务正式采用<sup>[6]</sup>。实现其对图塔蒂斯的近距离飞越探测,文献[10]对从太阳能电池板监控相机拍摄的图像和卫星姿态信息的分析表明,嫦娥二号和图塔蒂斯表面之间的最近距离为 1.9 km。OSIRIS-REx 是 NASA 2016 年发射的探测器,用于 101955 Bennu 小行星研究和采样返回任务。在探测器发射前利用 1999 年到 2013 年间的 478 次光学观测数据和雷达数据计算目标小行星的轨道,获得的 Bennu 星历不确定性优于 10 km<sup>[11]</sup>,在探测器接近 Bennu 后,再次结合探测器的观测结果改进小行星轨道用以保障后续任务的开展<sup>[12]</sup>。

目标小行星轨道的确定是小行星探测任务链条中关键的一环。上述任务中利用光学和雷达资料获得的小行星高精度轨道保障着整个探测任务的顺利进行。但位于小行星带的 133P/Elst-Pizarro,由于其体积小,星地距离远,难以进行雷达探测<sup>[13]</sup>,现阶段仅有 1979 年至 2019 年的光学观测资料。为我国小行星探测计划的顺利开展,需要进一步研究这一目标光学定轨的精度分析。

本研究的目的是利用 133P/Elst-Pizarro 历史地面光学观测数据,与国际知名光学定轨软件 OrbFit<sup>[14]</sup>进行对比处理分析,验证自主研发的小行星光学定轨软件的可靠性。结合我国小行星观测任务,对 133P/Elst-Pizarro 开展仿真定轨分析,添加不同水平的高斯白噪声,研究观测数据噪声对小行星定轨结果的影响和地面光学观测资料的定轨精度,以对 133P/Elst-Pizarro 实际光学跟踪测量提供一定程度的参考。

## 1 小行星光学定轨软件设计与实现

### 1.1 设计思路

该软件设计目的是处理小行星地面光学观测数据,采用经典的加权最小二乘法来改进小行星轨道,使得理论观测值与实际观测值之间的残差平方和最小<sup>[15]</sup>。图 1 为软件解算流程。

## 1.2 动力学模型和时空基准

利用地面光学观测数据可对目标小行星进行定轨。定轨软件的主要组成部分包括动力学模型、测量模型和参数估计 3 个部分, 在实现动力学模型和测量模型时又会涉及到不同时间系统和空间坐标系的相互转换。因此, 需要找到一个合适的时间和空间基准, 从而能在统一的时间系统下对天体位置进行研究。定轨软件的主要解算配置和时空基准如表 1 所示。

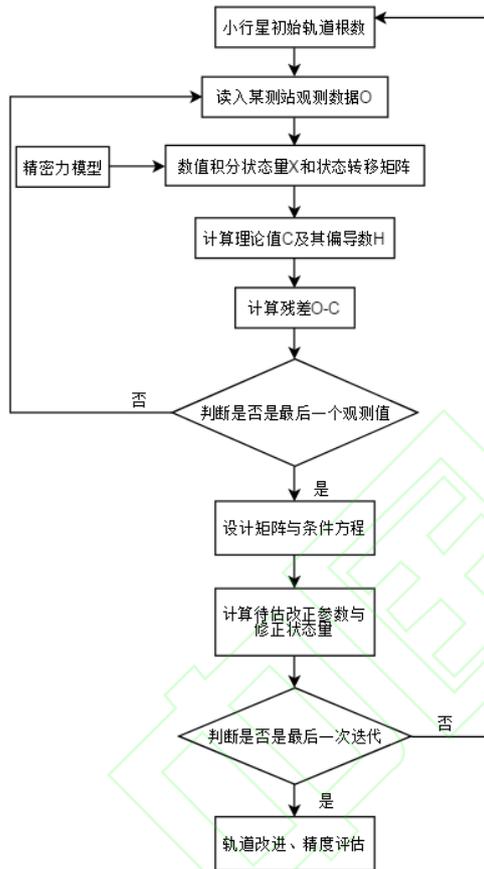


表 1 动力学模型和时空基准

Tab.1 Dynamic Model and Space-time Benchmark

核心模块	项目	内容	备注
动力学模型	太阳质点引力	太阳是目标小行星的环绕天体	
	N 体摄动	天体(包括八大行星、月球和冥王星)质点引力摄动	JPL DE431 历表 <sup>[16]</sup>
	相对论摄动	太阳质心后牛顿加速度修正	
参数估计	太阳辐射压	与小行星的密度、有效直径、反射系数等数值有关	133P/Elst-Pizarro 相关数据详见文献[9]
	状态估计方法	加权最小二乘批处理	
时空基准	估计参数	定轨历元时刻位置、速度矢量	
	坐标时	TDB	

图 1 小行星光学定轨解算流程

Fig.1 Process of Optical Orbit Determination for Asteroids

由于地面站的站址采用国际地球参考系表示, 小行星轨道状态矢量在 J2000.0 日心平黄道坐标系中, 为在同一坐标系中进行计算, 需要完成从国际地球参考系(I TRS)到国际天球参考系(ICRS)、最后到 J2 000.0 平黄道坐标系的转换。转换过程须考虑岁差、章动、地球自转和极移修正等因素的影响。在定轨过程中, 坐标系的转换、运动方程的积分计算等, 也要考虑地面测站(UTC 时)、行星历表(TDB 时)、和岁差、章动等模型所采用的时间系统及其相互间的转换关系<sup>[17]</sup>。极移、章动修正量和世界时与协调世界时差值(UT1-UTC)等参数通过 IERS(International Earth Rotation and reference Systems service, 国际地球自转服务)公报查取。

参考坐标系	J2000.0 日心平黄道坐标系	小行星运动参考系
其他	地球自转模型	修正参数取自 IERS
	IAU1976/1980 岁差章动模型	

### 1.3 理论观测值计算

本文处理站心测角( $\alpha$ ,  $\delta$ )观测数据,即站心赤经赤纬。小行星的运动参考系是 J2000.0 日心平黄道坐标系,运动数值积分得到的小行星状态矢量是在该坐标系下。而地面观测站的位置是在国际地球参考系下,理论观测值是站心 J2000.0 平赤道坐标系下的赤经赤纬,因此,确定理论观测值须完成坐标系的转换。

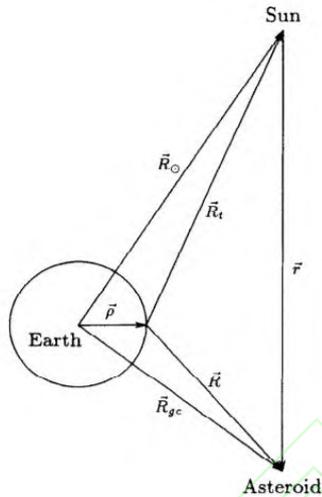


图2 光学观测几何示意图  
Fig.2 Geometrical Diagram of Optical Measurement

如图2 矢量几何所示,假定坐标平面是 J2000.0 平黄道面, $r$  是小行星日心位置, $R_\odot$  是太阳的地心位置,则小行星地心位置矢量  $R_{ge} = r + R_\odot$ 。 $\rho$  是观测站地心位置,则可确定小行星站心位置矢量  $R$  为:

$$R = -\rho + R_{ge} = -\rho + r + R_\odot \quad (1)$$

式中使用的位置矢量均在 J2000.0 平黄道坐标系中,须进行一定坐标系转换才能得到。如  $R_\odot$  是太阳的地心位置,利用 DE431 星历确定的太阳位置  $R_\odot^*$  是在赤道坐标系,则  $R_\odot = R_x(\varepsilon)R_\odot^*$ ,  $\varepsilon$  是 J2000.0 平黄赤交角。同时由(1)式得到的小行星站心位置矢量  $R$  在黄道坐标系,亦须转到赤道坐标系来计算赤经赤纬,  $R^* = R_x(-\varepsilon)R$ 。此外还需考虑光行差校正:

$$dt = \frac{|R^*|}{c} \quad (2)$$

式中  $c$  是光速 299792458.0m/s,  $dt$  是信号传播时间,利用(2)式结果可计算小行星实际位置:

$$R^* = R^* - dt * v \quad (3)$$

式中  $v$  是小行星日心速度,由(3)式得到的小行星 J2000.0 站心平赤道坐标矢量  $R^*$  计算理论观测值赤经  $\alpha$ 、赤纬  $\delta$  表达式如下:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{R_y^*}{R_x^*}\right) \quad (4)$$

$$\delta = \arcsin\left(\frac{R_z^*}{|R^*|}\right) \quad (5)$$

其中,  $R_x^*$ 、 $R_y^*$ 、 $R_z^*$  是  $R^*$  的 X、Y、Z 三轴分量。

## 2 实测数据处理分析

本文实测数据处理使用的是 1979 年 7 月 24 日至 2019 年 10 月 28 日期间发布的 133P/Elst-Pizarro 地面光学观测数据,历时 40 年总共 849 组赤经赤纬数据。该数据来源于多个观测站,包括 G96-Mt. Lemmon Survey、691-Steward Observatory 等。对这些实测数据的定轨解算,考虑的主要摄动力和其他解算配置详见表 1。初始轨道来源于 AstDyS-2 网站上的 133P/Elst-Pizarro 的轨道根数,解算参数为小行星定轨历元时刻的位置速度矢量。

利用上述实测光学资料重新解算 133P/Elst-Pizarro 于 2012 年 5 月 5 日 (JD 2456053) 的位置速度矢量,结果见表 2。

表 2 自主软件参数解算结果

Tab.2 Results of Parameters Solution Using Independent Software

	数值	与初轨偏差	RMS (1 $\sigma$ )	单位
X	-291090530.559	13.986	43.489	km
Y	-317565597.602	-22.477	39.189	km
Z	9623769.361	23.739	40.723	km
Vx	15055.7	3.631e-3	0.0011	m/s
Vy	-10424.3	7.346e-3	0.0014	m/s
Vz	113.6	4.543e-4	0.0017	m/s

由表 2 可以看出,解算后的小行星速

度矢量几乎没有变化，位置与初轨偏差 35.5 km，定轨解算 RMS 约为 71.3 km。与文献[6] 20 km 的图塔蒂斯光学定轨精度相比较，133P/Elst-Pizarro 定轨精度要低，原因是 133P 历史地面光学观测资料较少，而图塔蒂斯的定轨除历史观测资料外，还在 2012 年间组织联合观测获得了大量光学观测数据。本文还利用定轨结果计算测量数据残差，统计残差 RMS 值以评估内符合定轨精度。定轨后赤经残差 RMS 值约为 0.7139"，赤纬残差 RMS 值约为 0.5251"。

除了定轨解算的 RMS 值和测量数据残差 RMS，还可以通过外符合检验的方式评估定轨精度。我们使用相同光学观测数据和初始轨道，用国际上知名的小行星光学定轨软件 OrbFit<sup>[13]</sup>来重新定轨，具体计算结果见表 3。

表 3 OrbFit 参数解算结果

Tab.3 Results of Parameters Solution Using OrbFit

	数值	与初轨偏差	RMS (1 $\sigma$ )	单位
X	-291090532.667	16.093	44.477	km
Y	-317565610.549	-9.530	39.289	km
Z	9623794.171	-1.071	39.574	km
Vx	15055.7	3.881e-3	0.0011	m/s
Vy	-10424.3	6.951e-3	0.0015	m/s

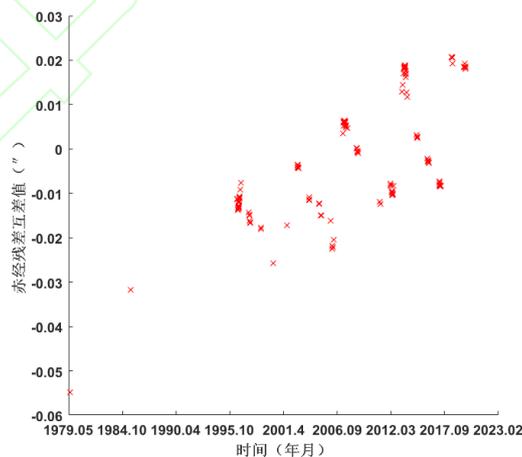
Vz	113.6	2.290e-4	0.0016	m/s
----	-------	----------	--------	-----

由表 3 可以看出，利用 OrbFit 软件解算得到的初轨位置改进量约为 18.7 km，位置解算 RMS 值约为 71.1 km。从表 2 和表 3 两种不同软件解算的结果中，可以发现，因两者处理的光学观测数据及其权重的设置相同，初轨解算的 RMS 值接近，三轴 RMS 差值均小于 2 km。同时，因为两个软件采用的积分器和力模型实现细节上的差异，相互间解算位置偏差大约为 28 km，该偏差在初轨解算误差范围之内。

计算 OrbFit 软件定轨后赤经残差 RMS 值约为 0.7154"，赤纬残差 RMS 值约为 0.5264"。可知，两软件计算残差 RMS 相互间差值小于 0.01"。图 3 给出了赤经赤纬残差互差图，由图分析可得，逐点残差数值差异均小于 0.05"，优于光学观测平均误差<sup>[18]</sup>。

图 4 为两软件定轨后外推星历之间的偏差。从中可见，外推星历的偏差在 30 km 内，而定轨解算精度在 70 km 量级。

综上所述，我们利用历史光学观测数据对 133P/Elst-Pizarro 进行定轨，残差水平和解算精度与 OrbFit 软件系统处理结果一致，外推星历互差值在也在精度范围内。这些结果初步验证了自主研制的小行星光学定轨软件的可靠性。



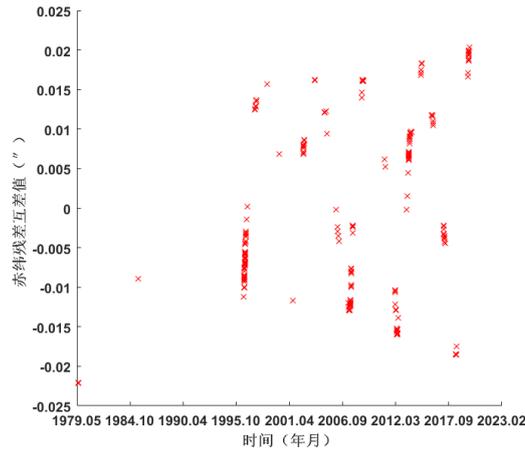


图3 赤经赤纬残差互差分布图

Fig.3 The difference of the Residuals of Right Ascension and Declination

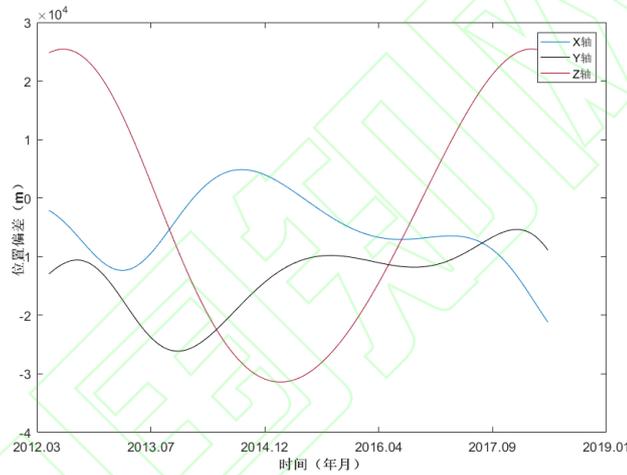


图4 外推星历互差图

Fig.4 The Difference of Extrapolated Ephemeris

### 3 仿真分析

仿真试验一方面可以验证定轨软件的功能和自恰性，另一方面也可以检验定轨策略实施的可行性<sup>[19]</sup>。考虑到我国小行星探测器抵达 133P/Elst-Pizarro 之前，有多年时间可以开展光学观测，有望进一步改进轨道精度。针对我国拟进行的小行星探测任务，我们对 133P/Elst-Pizarro 开展初步的仿真定轨试验分析。仿真过程中，标称轨道在太阳质点引力加速度、所有大行星质点引力摄动、以及太阳的相对论摄动和太阳辐射压等力模型下产生，通过标称轨道和相应观测模型，可仿真出赤经赤纬观测量。由实测数据分析可知，观测站一

晚上得到的光学观测数据约为 4 组，为在 24 小时内尽可能多的获取仿真数据，观测站考虑位于中国的云南天文台和位于智利阿塔卡玛区域的南美观测站，二者相差 12 个时区，联测可在一天时间内得到更多的观测数据。

仿真分析试验目的是探究不同噪声水平影响下的光学模拟观测值的定轨精度。我们选取云南和智利两地的天文台作为模拟观测站生成仿真观测值，观测弧段与前文实测数据集中部分弧段时长类似，历时 20 年。表 4 给出了利用 OrbFit 软件外推 133P/Elst-Pizarro 轨道获得的初始轨道信息，可根据文献[20]转换为我们需要的笛卡

尔坐标。我们假设两天文台每月观测一次，每次共观测 10 组数据，在同一天的不同时刻进行模拟观测生成仿真观测值，分别加上不同精度水平的高斯白噪声进行仿真试验。

表 4 初始轨道

Tab.4 Equinoctial Orbital Elements	
参数	数值
Time	2021 年 1 月 1 日
Semi-major axis	3.1642636217916120 AU
$e*\sin(\omega + \Omega)$	-0.145737655500451
$e*\cos(\omega + \Omega)$	0.058571578867105
$\tan(i/2)*\sin(\Omega)$	0.004122980432246
$\tan(i/2)*\cos(\Omega)$	-0.011400256739563
Mean Longitude	77.6337850956037°

如表 5 所述，我们对 4 种方案进行了对比处理分析，研究不同情况下的光学观测资料对定轨精度的影响。方案 1 为对比实验，处理在零噪声添加下的定轨情况；方案 2 我们设置了与前文实测数据处理结果残差 RMS 相同数值的白噪声；在方案 3 中我们认为赤经赤纬光学观测量具有相同的精度，并认为光学观测的平均误差为  $0.37''^{[21]}$  并以此设置白噪声；方案 4 我们降低噪声水平一个量级进行实验。方案 2、3 添加的均为接近实际观测水平的白噪声，各方案中均有云南站与智利站联测数据和云南单站数据定轨结果对比。由于是仿真实验，由我们软件生成的标称轨道已知，这里定轨的精度评价也可以通过重建轨道与标称轨道的差异给出<sup>[22]</sup>。初轨也可能存在误差，定轨过程中我们在所有方案中初轨位置速度的 X、Y、Z 三方向上分别加上 -10.0 km、10.0 km、-10.0 km 和 -10.0 m/s、10.0 m/s、-10.0 m/s 的偏差进行实验<sup>[23]</sup>。我们在定轨过程中将初轨位置三方向误差分别增加到 100 km 仍然可以收敛，不影响仿真试验结论。

从表 5 中数据信息可以看出，方案 1 用零噪声仿真观测值进行精密定轨，联测和云南单站定轨结果都能将设定的初始轨道偏差全部改正，重建轨道与标称轨道间最大偏差小于 0.3 m，说明定轨程序有很好内恰性。方案 2、3 添加的均为接近实际观测水平的白噪声，联测解算的偏差值分别

为 39.1 km 与 23.3 km，而云南单站数据处理结果分别为 40.8 km 与 23.6 km。这是高斯白噪声对定轨的影响，可以看到，接近实际的观测噪声使重建轨道偏离标称轨道，20 年仿真数据对定轨结果的影响在 50 km 级别，噪声越大，解算位置偏差越大。

结合各方案中联测与云南单站结果数据偏差值和 RMS 分析可知，在 20 年时间跨度下，联测和单站观测方式对偏差值影响较小，更多的是对解算精度的影响，联测可以获得更高精度的解算结果。联测获得的更多观测数据可以降低噪声对定轨解算结果的影响，使重建轨道更接近标称轨道。在方案 4 中，我们降低噪声水平一个量级，无论是联测还是单站数据，解算位置偏差显著降低到 2 km 内。但现有光学观测精度达不到  $0.03''$  这个标准，近些年更多实测光学数据的精度信息中噪声水平约为  $0.3''$ 。在定轨过程中，我们设置观测数据权重与白噪声一致，由偏差值和 RMS 两列可以看出，定轨结果与标称轨道的偏差均收敛到了定轨内符合精度范围内，说明所得位置偏差在该方案观测资料精度下是合理的。

此外，小行星光学定轨精度影响因素除观测资料本身外，还有一个影响因素是时间。增加数据获取时间长度，即增加观测弧的长度，也可以提高定轨精度，如我们在方案 2 联测基础上，延长数据获取时间，从 20 年增加到 25 年，重建轨道与标称轨道间位置偏差降低到 25 km，定轨内符合精度也提高到 75 km。但定轨精度的高低更多的取决于观测资料精度情况，因为我们继续增加数据获取时间长度，却并不能如方案 4 一样达到 10 km 内的定轨精度。当然，再延长更多的观测时间可以达到较好的定轨精度，但花费的时间成本太高且效率较低，故提高光学定轨精度的有效途径是升级观测设备，提高观测精度。

图 5 是方案 2 联测定轨后赤经赤纬残差分布图，由图 5 可知，残差分布均匀，赤经赤纬残差 RMS 值与设置的白噪声水平一致，其余各方案解算得到的残差与之类似，均和给定的测量噪声水平吻合，结

合上文的分析，说明仿真定轨解算结果可靠。

表 5 不同情况标称轨道与重建轨道差值 (m)

Tab.5 D-value between Nominal Orbit and Reconstructed Orbit in Different Cases(m)							
	白噪声	数据	dX	dY	dZ	偏差值	RMS ( $1\sigma$ )
方案 1	无	联测	-0.05	0.24	-0.01	0.24	
		云南站	-0.04	0.24	-0.01	0.24	
方案 2	赤经 0.71"	联测	-30519.91	18815.50	15651.02	39120.86	81714.93
	赤纬 0.53"	云南站	34435.95	18911.55	10867.80	40762.61	129212.05
方案 3	赤经 0.37"	联测	-18289.31	10679.24	9769.22	23323.44	46610.53
	赤纬 0.37"	云南站	19144.14	10929.88	8315.42	23560.70	73702.88
方案 4	赤经 0.030"	联测	-1486.84	868.06	792.09	1895.16	3779.23
	赤纬 0.030"	云南站	1548.28	888.39	674.21	1908.14	5975.91

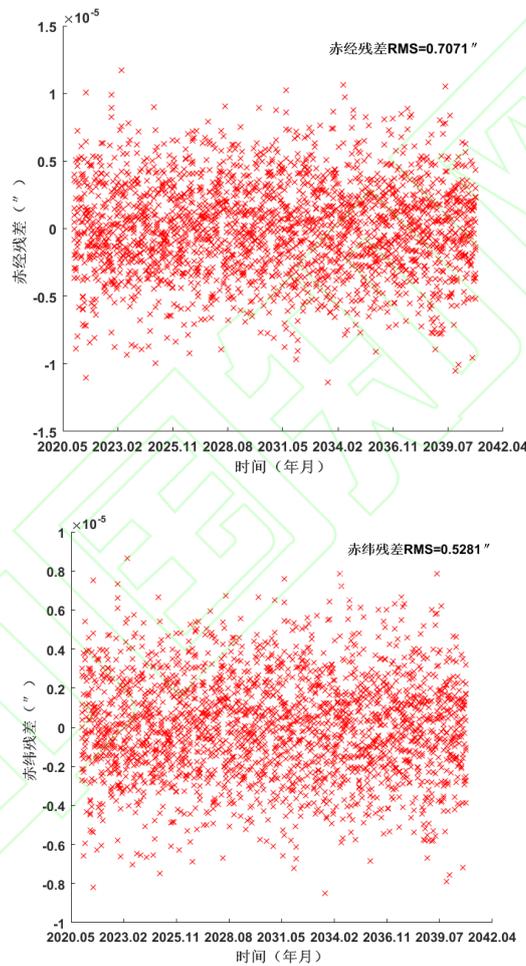


图 5 方案 2 联测定轨残差分布

Fig.5 Residual of Scheme 2 Joint Measurement

#### 4 结语

在深空探测任务中，轨道测量与确定是整个任务导航的关键，直接关系任务的成败。针对我国拟定的小行星探测计划的具体任务，自主研发了小行星光学定轨软件，使用 133P/Elst-Pizarro 的实测数据与 OrbFit 软件系统进行对比处理分析。结果

表明两者解算的观测量残差分布一致，统计残差 RMS 相互间差值小于 0.01"，定轨的内符合精度相互吻合。验证了自主研发的小行星光学定轨软件的可靠性。在 133P/Elst-Pizarro 的仿真定轨分析试验中，只考虑观测噪声影响的情况下，添加接近实际观测水平 0.70" 的高斯白噪声，使用

20 年光学观测资料定轨,小行星光学定轨精度在 50 km 级别。更多仿真实验表明增加观测数据或降低观测噪声均可有效提高小行星光学定轨精度。

对于我国小行星探测任务,现有光学观测资料的定轨精度还不足以支持任务的开展,我们需要在任务开始前或者任务期间对 133P/Elst-Pizarro 进行联合观测得到更多高精度观测资料,以获得满足任务需求的小行星高精度星历。此外,在后续工作中我们将细化动力学模型,考虑 133P/Elst-Pizarro 受到的 Yarkovsky 效应<sup>[24]</sup>和自身在运行至近日点附近的彗核喷发作用引起的轨道摄动。本文对 133P/Elst-Pizarro 的光学定轨实测数据和仿真分析,可以为我国小行星探测任务中的导航定轨提供一定参考。

#### 参考文献

- [1] Zhang Rongqiao, Huang Jiangchuan, He Rongwei, et al. The Development Overview of Asteroid Exploration[J]. *Journal Of Deep Space Exploration*, 2019, 6(05): 417-423+455(张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述[J]. 深空探测学报, 2019, 6(05):417-423+455)
- [2] Veverka J, Belton M, Klaasen K, et al. G-alileo's Encounter with 951 Gaspra: Overview[J]. *Academic Press*, 1994, 107(1):2-17
- [3] Prockter L, Murchie S, Cheng A, et al. The NEAR shoemaker mission to asteroid 433 eros[J]. *Acta Astronautica*, 2002, 51(1):491-500
- [4] NASA. Solar System Exploration:Hayabusa[EB/OL]. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/hayabusa/in-depth/>
- [5] Hermann B, Jean-Pierre B, Istvan A, et al.The Philae lander mission and science overview[J]. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2017, 375(2097)
- [6] 胡寿村, 季江徽, 赵玉晖, 孟林智. 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(05):506-511
- [7] 中国国家航天局. 小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告[EB/OL]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6805886/content.html>
- [8] Li Chunlai, Liu Jianjun, Yan Wei, et al. Overview of Scientific Objectives for Minor Planets Exploration[J]. *Journal Of Deep Space Exploration*, 2019, 6(05):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(05):424-436)
- [9] Liangliang Yu, Chihhao Hsia, Winghuen Ip. Low-Activity Main-Belt Comet 133P/Elst-Pizarro: New Constraints on Its Albedo, Temperature, and Active Mechanism from a Thermophysical Perspective[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159:2:66
- [10] Jianfeng Cao, Yong Liu, Songjie Hu, et al.Navigation of Chang'E-2 Asteroid Exploration Mission and the Minimum Distance Estimation during its Fly-by of Toutatis[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1):491-500
- [11] Chesley S R, Farnocchia D. Asteroid 101955 (1999 RQ36) Epemeris Delivery, JPL Solution 76[R]. Technical Report IOM 343R-13-001, Jet Propulsion Laboratory.
- [12] Farnocchia D, Takahashi Y, Chesley S R, et al. Asteroid 101955 Bennu Epemeris Delivery, JPL Solution 103[R]. Technical Report IOM 392R-18-005, Jet Propulsion Laboratory
- [13] Zhang Xiang, Ji Jianghui. Ground-based

- R-adar Detection of Near-Earth Asteroids [J]. *Progress in Astronomy*, 2014, 32(01): 24-39(张翔, 季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状[J]. 天文学进展, 2014, 32(01):24-39)
- [14] The OrbFit Software Package[DB/OL]. <http://adams.dm.unipi.it/~orbmaint/orbfit/>
- [15] Li Jisheng. Satellite Precision Orbit Determination[M]. *Beijing:Chinese People's Liberation Army Publishing House*, 1995(李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京:解放军出版社, 1995)
- [16] JPL DE431 Ephemeris[DB/OL]. <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ascii/>
- [17] Montenbruck O, Gill E. 卫星轨道—模型、方法和应用[M]. 王家松, 祝开建, 胡小工, 译. 北京:国防工业出版社, 2012
- [18] Mario Carpino, Andrea Milani, Steven R. Error Statistics of Asteroid Optical Astrometric Observations[J]. *Icarus*, 2003, 166(2):248-270
- [19] Hu Songjie, Tang Geshi. BACC Orbit Determination and Analysis Software for DeepSpace Explorers[J]. *Journal of Spacecraft TT and C Technology*, 2010, 29(05):69-74(胡松杰, 唐歌实. 北京中心深空探测器精密定轨与分析软件系统[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(05):69-74)
- [20] Broucke R A, Cefola P J. On the equinoctial orbit elements[J]. *Celestial Mechanics*, 1972, 5(3):303-310
- [21] Vinogradova T A, Kochetova O M, Chern-etenko Y A, et al. The orbit of asteroid (99942) Apophis as determined from optical and radar observations[J]. *Solar System Research*, 2008, 42(4):271-280
- [22] Yang Xuan, Yan Jianguo, Ye Mao, et al. Preliminary numerical analysis of precise orbit determination for a multiway microwave measurement mode in the Lunar and Mars missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(2):154-161(杨轩, 鄢建国, 叶茂, 等. 对一种月球与火星探测多程微波测量链路定轨定位的数值模拟初步分析[J]. 深空探测学报, 2018, 5(02):154-161)
- [23] Liu Shanhong, Yan Jianguo, Yang Xuan, et al. Development of Mercury Precise Orbit Determination Software and Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(04):510-517(刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 等. 水星探测器精密定轨软件研制及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(04):510-517)
- [24] Greenberg A H, Margot J L, Verma A K, et al. Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids[J]. *The Astronomical Journal*. 2020, 159(3)

## Development of Asteroid Optical Determination Software and Data

### Processing Analysis

WANG Bo LIU Lu YAN Jianguo GAO Wutong

State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,

Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Based on the first asteroid exploration plan announced by China Space Administration on April 19,

2019, we develop an optical orbit determination software for the main belt comet 133P/Elst-Pizarro (7968), which is one of the mission targets. The 133P/Elst-Pizarro's ground-based optical observation data from July 24, 1979 to October 28, 2019 are analyzed. Compared with the well-known OrFit software system, it is found that the residual distribution is consistent, the measurement statistical residual RMS is less than 0.01", and the internal coincidence accuracy of orbit determination is also consistent with each other. The results suggests the reliability of our software. Furthermore, we carry out a simulation orbit determination analysis aimed at 133P/Elst-Pizarro to discuss the orbit determination accuracy from ground-based optical data. When we use 20-year optical observation data measured once a month from Yunnan and Chile station and adding Gaussian white noise which is close to the current actual observation level, the results reflect that the optical orbit determination accuracy of the asteroid is at 50 km level. At the same time, it also shows that the optical orbit determination accuracy of the asteroid can be effectively improved by increasing the observation data or reducing the observation noise .

**Key words:** main comet 133p/Elst-Pizarro; optical orbit determination; simulation analysis; accuracy analysis

**First author:** Wang Bo, master candidate, specializes in asteroid optical precision orbit determination. E-mail: wangbo@whu.edu.cn

**Corresponding author:** Yan Jianguo, PhD, professor. E-mail: jgyan@whu.edu.cn

**Foundation Support:** The National Natural Science Foundation of China (No. U1831132); Innovation Group of Natural Fund of Hubei Province (No. 2018CFA087).

**标题：**小行星光学定轨软件研制和数据处理分析

**作者：**王波, 刘路, 鄢建国, 高梧桐

**收稿日期：**2020-04-24

DOI:10.13203/j.whugis20200195

**引用格式：**

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, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200195 ( 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, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200195 )

**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：**

**DS 监测站坐标确定及对定轨精度的影响分析**

赵立谦, 胡小工, 周善石, 唐成盼, 杨宇飞

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(10): 1501-1507

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180468>

**基本导航模式下 BDS-3 卫星地影期间的定轨精度分析**

李晓杰, 刘晓萍, 祖安然, 徐君毅, 刘帅, 辛洁, 郭靖蕾

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6): 854-861

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190110>

**风云三号 C 卫星星载 GPS/BDS 分米级实时定轨模型研究**

王甫红, 凌三力, 龚学文, 郭磊

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 1-6

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180385>