

一种载人小行星探测目标星初选方法

赵建文, 李人杰, 王晓慧*, 韩 潮, 夏人伟
(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

摘要: 针对载人小行星探测任务目标选取问题, 通过对目标星选取影响因素的定量分析, 提出了目标星初选方案。首先根据火箭的运载能力提出目标星轨道参数的筛选条件, 然后根据地面观测和尺寸约束提出目标星绝对星等的要求, 再根据结构的稳定性和温控要求提出目标星自旋周期的范围, 最后按照科学价值并综合考虑其他因素建立目标星选取优化模型, 得出目标星优选序列。根据提出的目标星初选方案和具体的任务需求进行载人小行星探测目标星选取, 得出了目标星优选序列, 证明了该方案合理、有效, 为载人小行星探测提供一定的技术参考。

关键词: 小行星; 载人探测; 目标星初选; 优选模型

中图分类号: P185.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2014)06-0574-06

A Primary Target Selection Method for Human Asteroid Exploration

ZHAO Jianwen, LI Renjie, WANG Xiaohui*, HAN Chao, XIA Renwei
(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A primary target selection method for crewed asteroid exploration was proposed in this paper after quantitative analysis of the influencing factors. Firstly, the orbital filter criteria were proposed according to the carrying capacity of the launch vehicles. Then the requirements for the absolute magnitude of asteroids were put forward by the constraints of ground-based observation and asteroid size. Next, the range of the rotation period was calculated based on the structural stability and thermal control. Finally, the optimization model was established considering the scientific value combined with other factors. The optimal sequence can be obtained using the optimization model. In consideration of specific mission requirements, the proposed method was applied to the selection of targets for crewed exploration. The final optimal sequence showed its scientificity and efficiency. It laid a foundation for crewed asteroid exploration.

Key words: asteroids; human exploration; primary target selection; optimization model

1 引言

太阳系小行星探测具有重要的科学价值。对其进行探测, 可以研究小行星轨道演化的机制以及近地小行星撞击地球的潜在危险; 探索太阳系的成因和演化历史; 探寻有机物, 为生命起源的研究提供新的思路; 搜寻自然资源; 试验和开发航空航天新技术, 提升航天技术水平^[1]。

而小行星的载人探测有更加特殊的意义。长期以来, 针对小行星的无人探测大多仅是对小行

星表面物理、地质特征(如形状、大小、质量分布等)进行观测或取样研究。但由于航天员具有主观能动性, 可以进行现场考察、科学仪器的布置、样本采集和样本初步辨识等探测活动, 因此可以更好地完成小行星的探测任务。人的认知能力、灵活性和适应性, 使得其可以对无法预估的环境和风险做出快速的、实时的认知和反应, 这对整个任务的成功至关重要。而且, 载人小行星探测将验证一系列深空探测技术, 为载人登陆火星提供技术储备^[2]。

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2014-10-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF13-ZY-02; YWF14-FGC-024); 载人航天预先研究项目

作者简介: 赵建文(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为飞行器总体设计。E-mail: jwzhao@buaa.edu.cn

通讯作者: 王晓慧, E-mail: xhwang@buaa.edu.cn

载人小行星探测的第一步,就是选取适合探测的目标星。根据小行星中心(Minor Planet Center, MPC)的数据,目前已发现的小行星约60多万颗,正式编号的已超过40万颗,而且随着观测技术和手段的提高,该数目还在不断增长^[3]。如果对这些小行星全部进行分析,工作量会极大。因此,在确定最后的探测目标之前,首先得进行目标星的初步筛选。

目前,针对载人小行星探测的目标星筛选研究相对较少。文献[4]提出了载人小行星探测目标星筛选的一种方案,从安全性、可行性和探测价值三个方面出发,提出了目标星初步筛选的约束条件。但这些约束条件所涉及到的具体数值仅是由定性分析得到。

文献[5, 6]也提出了小行星探测目标星筛选的一种方案。该方案从轨道要素出发,重点考虑目标星的可达性,对小行星物理性质和科学价值的考虑较少。

文献[7]较为全面的分析了影响目标星选取的关键因素,但并没有明确各种因素的主次之分。

因此,本文将考虑影响载人小行星探测目标星选取的关键因素,按照各因素的主次之分进行定量分析,并建立目标星优选模型,给出目标星的优选序列。

2 目标星初选方案

小行星的载人探测任务应该充分考虑探测目标的可达性和航天员的安全。因此,小行星的轨道参数是最关键的因素,它直接决定了探测任务所需的速度增量和探测的任务周期,而这两个参数恰恰是可达性和安全性的直接反映;其次,鉴于小行星尺寸和表面温度对航天员进行表面附着探测的影响,还需考虑小行星的绝对星等和自旋周期;最后,在保证探测任务可实施的情况下,才考虑其科学价值。

2.1 轨道参数

对于小行星的载人探测而言,所需考虑的首要因素便是目标星的轨道参数。目标星的轨道参数对运载火箭的性能提出了要求,决定了目标的可达性,进而决定了整个探测任务是否可以实施。同时,轨道参数还决定了探测任务的周期,这对航天员的安全而言是至关重要的。因此,首先应根

据小行星的轨道参数进行筛选。

小行星的轨道参数中半长轴 a , 偏心率 e 和轨道倾角 i 是最重要的三个参数。这三个参数对通信分系统、热控分系统和运载火箭的性能提出了要求。这三个参数的范围可以根据运载火箭所能提供的 C_3 能量计算出来。运载火箭 C_3 能量指的是在日心黄道惯性坐标系下,当探测器到达地球引力影响球的边缘时,探测器相对地球的速度即双曲线超速的平方^[8]。

如图1所示, F 点表示太阳的质心位置,假设地球公转轨道为圆形,其半径为 r , 在 A 点探测器逃离地球引力影响球,沿着图示的椭圆轨道运行。

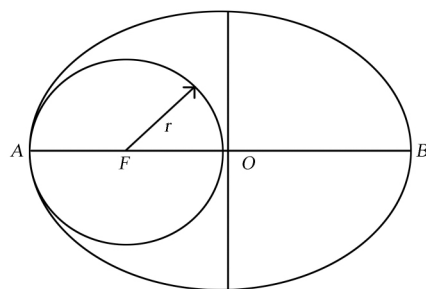


图1 探测器运行轨道
Fig.1 The orbit of the spacecraft

假设探测器顺着地球公转的方向发射,这样探测器具备较大的初速度,其运行的椭圆轨道半长轴较大,设为 a_{\max} , 当探测器到达地球引力影响球的边缘时,地球的公转线速度 v_E 如式(1)所示:

$$v_E = \sqrt{\frac{\mu}{r}} \quad (1)$$

式中, μ 为太阳引力常数。在已知运载火箭 C_3 能量的情况下,则满足公式(2):

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \quad (2)$$

得到探测器运行的椭圆轨道的半长轴如式(3):

$$a = \left(\frac{2}{r} - \frac{v^2}{\mu} \right)^{-1} \quad (3)$$

其中, v 为探测器处于地球引力影响球边缘时在日心轨道惯性坐标系中的速度。当探测器顺着地球公转的方向发射时,其在日心黄道惯性坐标系中的速度应该等于地球的公转速度与其相对于地球质心的速度之和,即满足公式(4):

$$v = v_E + \sqrt{C_3} \quad (4)$$

代入(3)式,得到探测器所能到达的椭圆轨道的最大半长轴如式(5)所示:

$$a_{\max} = \left(\frac{2}{r} - \frac{(v_E + \sqrt{C_3})^2}{\mu} \right)^{-1} \quad (5)$$

对比图1, $|OB| = a_{\max}$, 令 $|OF| = c$, 则此椭圆轨道的偏心率如式(6)所示:

$$e_1 = \frac{c}{a_{\max}} = \frac{a_{\max} - r}{a_{\max}} = 1 - \frac{r}{a_{\max}} \quad (6)$$

同理,当探测器逆着地球公转的方向发射时满足式(7):

$$v = v_E - \sqrt{C_3} \quad (7)$$

代入(3)式,得到探测器所能到达的椭圆轨道的最小半长轴如式(8)所示:

$$a_{\min} = \left(\frac{2}{r} - \frac{(v_E - \sqrt{C_3})^2}{\mu} \right)^{-1} \quad (8)$$

此椭圆轨道的偏心率如式(9)所示:

$$e_2 = \frac{c}{a_{\min}} = \frac{a_{\min} - r}{a_{\min}} = 1 - \frac{r}{a_{\min}} \quad (9)$$

由以上各式计算得到的半长轴和偏心率是由运载火箭的 C_3 能量决定的探测器所能达到的轨道参数的边界值,由于探测器最终要和小行星交会,若小行星的轨道参数在上述计算结果范围之内,则可保证探测器能最终到达小行星,由此,便可确定小行星的轨道半长轴的取值范围如式(10)所示:

$$a_{\min} < a < a_{\max} \quad (10)$$

小行星轨道偏心率的范围如式(11)所示:

$$e < \min\{e_1, e_2\} \quad (11)$$

由于轨道倾角每增加1度,探测所需的速度增量大约增加 $0.5 \text{ km/s}^{[4]}$,同时,若轨道倾角过小,则难以筛选出一定数量的可供探测的小行星,而且有可能排除一些探测价值较大的小行星。因此,需要通过分析限制轨道倾角的范围。

2.2 绝对星等

小行星的数据大多是来自地面观测,这就要求小行星必须具备足够的大小和亮度,否则地面观测难以获得不确定度较低的数据。同时对于载人小行星探测而言,由于要搭载航天员,所以探测器本身具备足够大的规模,而探测器要在小行星表面着陆,所以小行星必须有足够大的尺寸。目

前,小行星的尺寸都是通过其他参数推算出来,还不能直接测量,这些推算大都是估算,有一定的不确定性^[9]。相关研究表明,绝对星等 $H > 22$ 的小行星其尺寸较小,同时自旋周期小于2小时,难以保证航天员表面作业时的安全^[10, 11]。因此,本文将小行星的绝对星等 H 限制在22以下。绝对星等的计算公式如式(12)所示^[7]:

$$H = m_{\text{sun}} - 5 \log \frac{\sqrt{AR}}{d_0} \quad (12)$$

式中, $m_{\text{sun}} = -26.73$ 为太阳的视星等, A 为小行星表面的反照率,取其典型值为0.06, R 为小行星半径, d_0 为一个天文单位($1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$)。在假定小行星的绝对星等 $H < 22$ 的情况下,将上述各值代入(12)式,可以计算得到式(13)所示小行星的直径:

$$d = 2R > 219.2 \text{ (m)} \quad (13)$$

这表明绝对星等 $H < 22$ 的小行星具备足够大的尺寸,因此由地面观测所获得的数据可靠度将会比较高,适合进行载人探测。同时,这有助于我们充分了解星上环境以及其物理性质,从而确定科学价值较高的目标星进行探测。

2.3 自旋周期

小行星的自旋周期也是目标星筛选过程中需要考虑的一个重要因素。若自旋周期过小,则小行星表面的线速度过大,这不但不利于一些有重要探测价值的岩石等附着在小行星表面,同时,航天员在小行星表面的附着作业也会具备相当大的危险性。若自旋周期过大,小行星表面的温差将会增大,这将对探测器的温控系统提出很高的要求,也将对探测器携带的有效载荷的正常工作造成影响^[7]。因此,小行星的自旋周期必须限定在一定的范围之内。

假设小行星为匀质球体,若它对表面物体的万有引力等于离心力^[7],则有公式(14)成立:

$$\frac{GMm}{R^2} = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 R \quad (14)$$

式中, M 为小行星的质量, m 为表面物体的质量, T 为小行星的自转周期, G 为万有引力常数。其中 M 满足式(15):

$$M = \frac{4}{3} \rho \pi R^3 \quad (15)$$

将(15)式代入(14)式,整理得式(16):

$$T = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \quad (16)$$

上式中, ρ 为小行星的密度。不同光谱类型的小行星密度不同。文献 [12] 中给出了典型光谱类型的小行星的密度, 取 C 类小行星的密度为: $\rho_C = 1.38 \text{ g/cm}^3$, 取 S 类小行星的密度为: $\rho_S = 2.71 \text{ g/cm}^3$, 取 M 类小行星的密度为: $\rho_M = 5.32 \text{ g/cm}^3$ 。将这些密度数值以及万有引力常数 $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 代入到 (16) 式中, 得到这三种光谱类型的自旋周期下限: $T_C = 2.81 \text{ h}$, $T_S = 2 \text{ h}$, $T_M = 1.43 \text{ h}$ 。为了充分保证航天员的安全以及小行星的探测价值, 取如式 (17) 所示小行星的自旋周期下限:

$$T = \max\{T_C, T_S, T_M\} = 2.8 \text{ h} \quad (17)$$

小行星的自旋周期应具备上限。文献 [7] 给出了典型光谱类型的小行星热模型表面温度范围, 根据这一模型, 可以得出当自旋周期达到 20 h 的时候, 距离太阳 1 AU 的 C 类小行星的表面温差将达到 280 多摄氏度, S 类小行星的表面温差将达到 240 多摄氏度, 如此高的温差对探测器所携带的一些仪器设备的正常工作将会造成很大的影响, 这也对温控系统提出了十分苛刻的要求。因此, 将小行星的自旋周期限定在 20 h 以下。

综上所述, 小行星的自旋周期范围如式 (18) 所示:

$$2.8 \text{ h} < T < 20 \text{ h} \quad (18)$$

2.4 科学价值

根据轨道参数、绝对星等和自旋周期的约束, 就可以筛选出若干颗适合探测的目标。这些已筛选出的探测目标还需要考虑其科学价值, 并综合考虑上述筛选因素, 建立优选模型, 得出目标星优选序列。

科学价值从小行星的光谱类型来考虑。研究表明, C 类小行星的比重明显偏低, 比碳质球粒陨石还要低, 它们可能含有 20% 的水^[13], 这对研究生命起源具有重要作用; X 类小行星富含金属, 也具备很高的探测价值; S 类小行星的主要成分是硅酸盐, 日本的隼鸟号探测器和美国的 NEAR 探测器进行的两次附着采样探测都是针对 S 类小行星, 因此该类小行星有先期探测经验^[14]。进行优选时, 根据光谱类型探测价值的高低将其量化。

建立优选模型如式 (19) 所示:

$$\begin{cases} \text{Find } \mathbf{x} = \{a, e, i, H, T, T_s\} \\ \min f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^6 c_i \frac{x_i}{w_i} \end{cases} \quad (19)$$

式中, \mathbf{x} 为设计变量矢量, $f(\mathbf{x})$ 为目标函数, T_s 为光谱类型, c_i 为权重系数, w_i 为归一化系数。

根据上述优化模型, 可以得出目标星的优选序列。

2.5 小结

根据上述分析, 将目标星初选的方案总结如下:

- 1) 根据 C_3 能量计算小行星轨道半长轴 a 及偏心率 e 的范围, 选取合适的小行星轨道倾角 i 约束, 根据这三个轨道参数进行第一轮筛选;
- 2) 根据绝对星等的约束在第一轮筛选出的小行星中进行第二次筛选;
- 3) 根据自旋周期的约束(部分小行星自旋周期未知, 也包含在内) 在第二次筛选出的小行星里进行第三次筛选;
- 4) 按照科学价值的要求, 并综合考虑轨道、绝对星等和自旋周期等因素, 建立优选模型, 得出目标星优选序列。

小行星探测目标星初选流程图如图 2 所示。

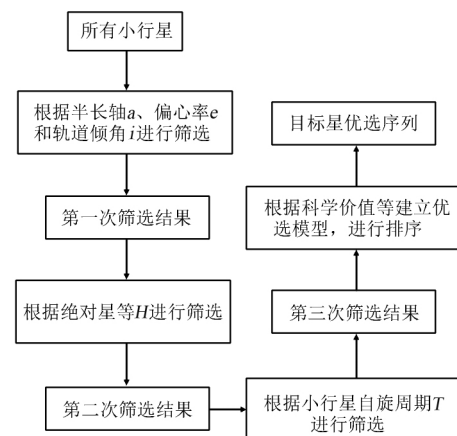


图2 目标星初选流程图
Fig.2 Flow chart of the target selection

3 目标星初选结果

根据本文提出的目标星初选方案, 选取 C_3 能量值, 计算相应的约束条件, 对 MPC 数据库中所有的小行星(截止 2014 年 3 月共 635865 颗) 进行筛选, 得出初选目标。

参考战神 V 型火箭的相关参数,假定有效载荷的质量为 $45 \text{ t}^{[15]}$, 则 $C_3 = 11.1 \text{ km}^2/\text{s}^2$, 计算半长轴 a 和偏心率 e , 并参考相关的文献中对轨道倾角 i 的分析^[4, 16], 得出小行星轨道参数的约束条件如式(20)所示:

$$\begin{cases} 0.8 \text{ AU} < a < 1.3 \text{ AU} \\ e < 0.2 \\ i < 5^\circ \end{cases} \quad (20)$$

根据这一约束条件对小行星数据库进行第一轮筛选,得到了198颗符合约束的小行星。

接下来根据绝对星等的约束进行第二轮筛选,由绝对星等 $H < 22$ 在第一轮筛选结果中再次筛选得出8颗符合要求的小行星。

最后根据自旋周期进行筛选(保留未知),根据式(18)在第二轮筛选的结果中进行第三轮筛选,最终得出了6颗满足上述约束的初选目标,如表1所示。

表1 目标星初选结果
Table 1 Results of the primary target selection

序号	编号	a/AU	e	$i/(\circ)$	H	T/h	光谱
1	10302	1.27	0.14	4.38	19.3	19	X
2	251732	1.20	0.11	4.20	21.8	—	—
3	382875	1.30	0.18	2.88	21.6	—	—
4	2003GA	1.28	0.19	3.84	21.1	5.78	—
5	2006YF	1.11	0.20	4.68	21	—	—
6	2011CG2	1.18	0.16	2.76	21.5	10.81	—

在上述筛选过程中,某些小行星的自旋周期是未知的,为了保证筛选结果不至于过少,保留这些自旋周期未知的小行星。

根据科学价值的要求,并综合考虑轨道、绝对星等和自旋周期等因素,建立优选模型。其中,光谱类型的优劣为 $C > X > S > \text{未知}$, 半长轴 a 越接近1 AU 越好,偏心率 e 、轨道倾角 i 和绝对星等 H 越小越好,自旋周期 T 越接近中值越好。据此得出的目标星优选序列如表2所示。

表2 目标星优选序列
Table 2 Optima sequence of the target asteroids

序号	编号	$f(x)$
1	10302	0.2508
6	2011CG2	0.4953
4	2003GA	0.6759
3	382875	0.6840
2	251732	0.7995
5	2006YF	0.8015

从表2的结果中可以看出,编号为10302的小行星由于其光谱类型和自旋周期 T 已知,且绝对星等 H 和偏心率 e 较小,通过优选模型得目标值 $f(x)$ 最小,可以作为优先考虑探测的目标;而2006YF的偏心率 e 、轨道倾角 i 和绝对星等 H 较大,且自旋周期 T 和光谱类型未知,所以其目标值 $f(x)$ 最大,排在优选序列的末位。

在实际筛选过程中,筛选结果会随着运载火箭 C_3 值的变化而有所增加。

4 结论

1) 分析了载人小行星探测目标星初选中的四个影响因素,包括轨道参数、绝对星等、自旋周期和科学价值。对各影响因素都进行了定量计算或合理量化,并按照主次之分提出了目标星初选流程。

2) 建立了目标星的优选模型,根据筛选出来的若干颗目标星的参数,通过优选模型进行加权评价,使每颗目标星得到一个评分,根据这个评分最后得出目标星的优选序列。并且,优化模型可以进行灵活调整,根据不同的侧重得出不同的优选序列结果。

3) 进行了载人小行星探测目标星初选,通过三轮筛选选出了6颗目标星,根据优选模型得出这6颗小行星的优选序列。结果表明,提出的目标星初选流程和优化模型合理、有效,可以为载人小行星探测前期的相关工作提供一定的技术参考,有利于载人小行星探测任务的顺利开展。

[参考文献]

- [1] 徐伟彪,赵海斌.小行星深空探测的科学意义和展望[J].地球科学进展,2005,20(11):1183-1190.
- [2] Zimmer A K, Messerschmid E. Going beyond: Target selection and mission analysis of human exploration missions to Near-Earth Asteroids[J]. Acta Astronautica, 2011, 69(11-12): 1096-1109.
- [3] Minor Planet Center MPC Archive Statistics [DB/OL]. (2003-03-18) [2014-06-23]. <http://www.minorplanet-center.net/iau/lists/ArchiveStatistics.html>.
- [4] 王悦,刘欢,王开强,等.载人探测小行星的目标星选择[J].航天器工程,2012,21(6):30-36.
- [5] Wagner S, Wie B. Target asteroid selection for human exploration of near earth objects[J]. AAS 10, 2010, 249.
- [6] Cui P, Qiao D, Cui H, et al. Target selection and transfer trajectories design for exploring asteroid mission[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4): 1150-1158.
- [7] 孙克新,徐亮,方宝东.小行星探测目标选取探讨[C]//

- 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第八届学术年会,上海,2011.
- [8] 崔祜涛,崔平远,乔栋. 深空探测轨道设计与优化[M]. 北京:科学出版社,2013:28-29.
- [9] Warner B D, Harris A W, Pravec P. The asteroid lightcurve database [J]. Icarus, 2009,202(1):134-146.
- [10] Binzel R P, Perozzi E, Rivkin A S, et al. Dynamical and compositional assessment of near - Earth object mission targets [J]. Meteoritics & Planetary Science, 2004,39(3):351-366.
- [11] William F B, Alberto C, Paolo P, et al. An Overview of the Asteroids: The Asteroids III Perspective [J]. Asteroids III, 2002, 1: 3-15.
- [12] Krasinsky G. Hidden Mass in the Asteroid Belt [J]. Icarus, 2002,158(1):98-105.
- [13] 赵海斌,徐伟彪,马月华. 小行星深空探测的科学目标与探测计划[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第一届学术会议,哈尔滨,2005.
- [14] 缪秉魁,林杨挺,陈宏毅. 小行星探测研究现状与展望[C]//中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会,南京,2013.
- [15] Daniel R A, Jon D G, Paul A A, et al. Asteroid destinations accessible for human exploration: a preliminary survey in mid-2009 [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2010, 47(6):994-1002.
- [16] Landis R R, Abell P A, Korsmeyer D J, et al. Piloted operations at a near-Earth object (NEO) [J]. Acta Astronautica, 2009,65(11):1689-1697.

+++++

(上接第573页)

- [5] Goodman J L. History of Space Shuttle Rendezvous and Proximity Operations [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(5):944-959.
- [6] Kawano I, Mokuno M. Automated Rendezvous Docking System of Engineering Test Satellite VII [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 1997, 96: 751-766.
- [7] Parten R P, Mayer J P. Development of the Gemini Operational Rendezvous Plan [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1968, 5(9):1023-1026.
- [8] 唐国金,罗亚中,张进. 空间交会对接任务规划[M]. 北京:科学出版社,2008:22-25.
- [9] 唐歌实,孙靖,陈明. 大气模型在神舟飞船轨道确定中的应用[C]//第六届空间物理专业委员会全体会议及空间环境研究预报专题研讨会. 北海:2004,09.
- [10] 刘舒蔚,龚建村,刘四清,等. MISI90 大气密度模型在定轨中的参数输入方式探讨[J]. 载人航天,2012(6):1-6.
- [11] 王忠贵. 我国首次空间交会对接远距离引导方案设计与飞行验证[J]. 中国科学:技术科学,2012,42(7):764-770.
- [12] 张丽艳,戚发轫,李颐黎. 交会对接远距离引导精度分析[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(6):667-670.
- [13] 汤锡生,陈贻迎,朱民才. 载人飞船轨道确定和返回控制[M]. 北京:国防工业出版社,2002:32-43.
- [14] 朱民才. 载人航天轨道确定、轨道控制及任务规划[M]. 北京:国防工业出版社,2007:100-101.
- [15] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京:国防工业出版社,2000:110-112.
- [16] 李济生. 人造卫星精密定轨[M]. 北京:解放军出版社,1995:55-57.
- [17] Vallado D. A., Finkelman D. A critical assessment of satellite drag and atmospheric density modeling [R]. AIAA 2008 - 6442.
- [18] 唐歌实,李颢. 载人航天轨道确定技术及在交会对接中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,2013:121-130.
- [19] 李颢,唐歌实,张宇,等. TGO1/SZ08 交会对接轨道确定与预报精度分析[J]. 飞行器测控学报,2013,32(2):162-167.
- [20] 胡杰松,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(5):69-74.