

# 木星探测轨道分析与设计\*

陈 杨<sup>†</sup> 宝音贺西 李俊峰

(清华大学航天航空学院 北京 100084)

**摘要** 研究了与木星探测相关的轨道设计问题, 重点关注木星探测轨道与火星、金星等类地行星探测轨道的不同及由此带来的轨道设计难点. 首先分析了绕木星探测任务轨道的选择. 建立近似模型讨论了向木星飞行需要借助多颗行星的多次引力辅助, 对地木转移的多种行星引力辅助序列, 使用粒子群算法搜索了 2020 年至 2025 年之间的燃料最省飞行方案并对比得到了向木星飞行较好的引力辅助方式为金星 - 地球 - 地球引力辅助. 结合多任务探测, 研究了航天器在飞向木星途中穿越主小行星带飞越探测小行星的轨道设计. 最后, 给出 2023 年发射完整的结合引力辅助与小行星多次飞越的木星探测轨道设计算例.

**关键词** 天体力学, 行星与卫星: 普通, 航天器

**中图分类号:** P 135; **文献标识码:** A

## 1 引言

木星是太阳系中体积最大、自转最快的行星, 距离太阳由近及远顺序为第 5. 木星存在 63 颗卫星, 很像 1 个微型的太阳系, 探测木星有助于了解太阳系形成、演化的过程和行星系统的起源. 同时木星的卫星也极具科学价值, 木卫一上遍布火山, 木卫二薄薄的冰壳下可能存在海洋和生命.

人类到目前为止已经发射了若干颗探测器造访木星. 1973 年“先驱者 -10”号在距离木星 13 000 km 处穿过木星云层时拍摄了首张木星照片. 1977 年 8 月和 9 月发射的美国“旅行者 -1”号和“旅行者 -2”号也对木星进行了观测. 第 1 个专门用于木星探测的航天器是 1989 年 10 月 18 日发射的“伽利略”号, 它由轨道器和撞击器组成, 轨道器共环绕木星飞行 11 圈, 其间以飞越的方式探测了木星的 3 颗卫星. “伽利略”号探测器首次获得了木星大气的数据并发现木星的卫星上存在地下海洋.

木星探测也是未来深空探测的热点之一, 美国、欧洲、俄罗斯和日本的未来木星探测任务都在进行或论证中. 美国将于 2011 年 8 月发射探测器“Juno”号调查木星上水和氨的含量. 2030 年之前, 美国的“JEO”和“JGO”木星探测计划、欧洲的“Laplace”木星探测计划和俄罗斯的“Europa-Lander”木卫二登陆计划将陆续实施.

国外对木星探测轨道设计的研究已开展多年. 美国航天局的喷气推进实验室 (JPL) 在“伽利略”号木星探测器的设计过程中, 对木星探测轨道的设计进行了系统的研究<sup>[1]</sup>.

2011-05-10 收到原稿, 2011-07-20 收到修改稿

\* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划 2012CB720000), 国家自然科学基金项目 (10832004) 共同资助

<sup>†</sup> chenyang.thu@gmail.com

近几年, JPL 也在组织科研人员对木卫二探测的轨道设计方法进行研究. Olds 等<sup>[2]</sup>详细讨论了利用行星引力辅助飞向外太阳系行星的轨道设计问题.

我国在具备自主探测火星和金星的技术之后, 目光必将投向更广阔的深空. 目前航天工业部门与相关高校正在对以木星、小行星为主的远期深空探测任务进行规划与初步论证, 木星是我国远期深空探测的重要目标.

国内目前还没有专门针对木星探测轨道的研究文献, 但很多研究人员在工作中对行星际探测轨道设计方法和木星探测需要使用的引力辅助节能技术进行过深入研究. 张旭辉等<sup>[3]</sup>研究了火星探测轨道设计和行星借力飞行技术, 乔栋等<sup>[4]</sup>研究了基于  $C_3$  匹配的行星借力飞行轨道设计方法, 尚海滨等<sup>[5]</sup>研究了结合引力辅助与小推力技术的行星探测轨道设计方法.

本文对木星探测轨道设计问题进行了较详细的讨论. 说明了环木任务轨道的选择, 分析了向木星飞行在轨道设计上与传统行星探测所不同的两个主要特点. 给出了地木转移可以使用的几种不同行星引力辅助方案以及有效性对比. 结合深空多任务探测, 研究了木星探测途中飞越小行星的轨道设计方法. 本文研究工作针对性较强, 可以为我国未来有可能进行的木星探测提供重要参考.

## 2 木星探测轨道分析

### 2.1 木星轨道

木星轨道半径约为地球轨道半径的 5.2 倍. 表 1 为木星的轨道根数. 其中  $a_J$ ,  $e$ ,  $i$ ,  $\Omega$ ,  $\omega$ ,  $M$  分别为半长轴、偏心率、轨道倾角、升交点黄经、近日点幅角和平近点角.

表 1 J2000 日心黄道坐标系下木星的轨道根数 (21 Sep 2006 UTCG)

Table 1 Orbit elements of Jupiter in J2000 ecliptic coordinate system (21 Sep 2006 UTCG)

| $a_J$ (AU) | $e$   | $i$ ( $^\circ$ ) | $\Omega$ ( $^\circ$ ) | $\omega$ ( $^\circ$ ) | $M$ ( $^\circ$ ) |
|------------|-------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| 5.207      | 0.048 | 1.304            | 100.502               | 273.475               | 224.406          |

表 2 为木星重要的物理参数. 其中  $m_J$  为质量,  $\mu_J$  为引力常量,  $R_J$  为平均半径,  $P_J$  为自转周期,  $\rho_J$  为平均密度.

表 2 木星的平均物理参数

Table 2 The mean physical parameters of Jupiter

| $m_J$ (kg) | $\mu_J$ ( $\text{km}^3/\text{s}^2$ ) | $R_J$ (km) | $P_J$ ( $^\circ$ ) | $\rho_J$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
|------------|--------------------------------------|------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1.899e27   | 1.267e8                              | 71400      | 9.925              | 1.326                               |

根据表 1 和表 2 中的数据, 可以用下式计算得到木星轨道的周期为 11.882 yr

$$T_J = 2\pi\sqrt{\frac{a_J^3}{\mu}}, \quad (1)$$

其中  $\mu$  为日心引力常量, 大行星相对太阳的引力影响球半径为 [6]

$$r_{\text{in}} = a_J \left( \frac{\mu_J}{\mu} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (2)$$

代入木星轨道数据知木星的引力影响球半径约为 0.322 AU (即 4821.6 万 km).

## 2.2 木星探测轨道特点

### 2.2.1 环木轨道的选择

探测木星的环绕任务轨道与火星、金星探测的任务轨道有所不同. 由于木星的巨大质量, 将航天器制动为环绕木星运行的圆轨道将需要较多的速度增量. 例如, 航天器从到达木星影响球时的抛物线轨道捕获进入半径为 4 倍木星半径的木心圆轨道所需速度增量大小为 8.7 km/s. 同时考虑航天器在围绕木星飞行时也要顾及到飞越探测木星的卫星, 那么环绕木星的任务轨道应为大椭圆轨道.

为了降低受到木星辐射的影响, 椭圆轨道近木点不应低于 4 倍木星半径 [7]. 远木点的选择主要为了减少环木捕获所需燃料, 参考“伽利略”号的环木轨道, 远木点选择在木星半径的 100 倍左右比较合适 [7]. 图 1 表示了  $100R_J \times 4R_J$  的木星环绕任务轨道以及木星的几颗重要卫星的轨道.

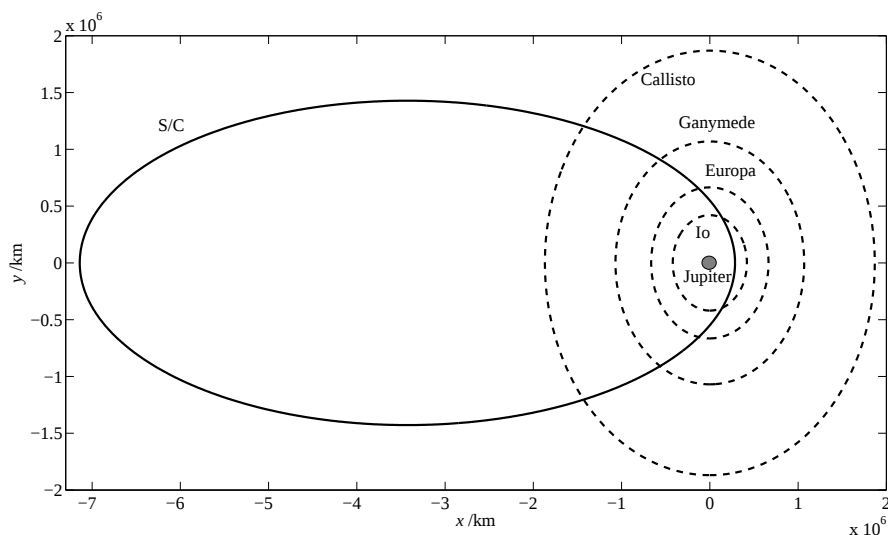


图 1 环木轨道

Fig. 1 Jupiter-centered orbit

图 1 中 Io、Europa、Ganymede 和 Callisto 分别表示木卫一、木卫二、木卫三和木卫四的轨道. 在探测器轨道与木星卫星轨道的交点处可以设计对木星卫星的飞越探测.

### 2.2.2 地木转移轨道

考虑日心地木转移轨道, 如果沿霍曼变轨的方式从地球直接转移至木星, 离开地球

(影响球边缘) 和到达木星 (影响球边缘) 的双曲线剩余速度  $v_{\infty E}$  和  $v_{\infty J}$  可以分别得到 [8]

$$v_{\infty E} = \sqrt{\frac{2\mu}{a_E} - \frac{2\mu}{a_E + a_J}} - \sqrt{\frac{\mu}{a_E}}, v_{\infty J} = \sqrt{\frac{\mu}{a_J}} - \sqrt{\frac{2\mu}{a_J} - \frac{2\mu}{a_E + a_J}}, \quad (3)$$

其中  $a_E$  为地球轨道半长轴, 那么离开地球时对运载火箭能力要求的参数  $C_3$  和到达环木轨道制动捕获所需的速度增量  $\Delta v_J$  可以表示为

$$C_3 = v_{\infty E}^2, \quad (4)$$

$$\Delta v_J = \sqrt{v_{\infty J}^2 + \frac{2\mu_J}{r_{pJ}}} - \sqrt{\frac{2\mu_J}{r_{pJ}} - \frac{2\mu_J}{r_{pJ} + r_{aJ}}}, \quad (5)$$

其中  $r_{pJ}$  和  $r_{aJ}$  为环绕木星的任务轨道近木点和远木点. 根据上式可以计算直接从地球出发飞向木星并进入  $100R_J \times 4R_J$  的大椭圆轨道所需发射  $C_3$  与木星捕获速度增量  $\Delta v_J$  分别为  $77.25 \text{ km}^2/\text{s}^2$  和  $1.11 \text{ km/s}$  (即总速度增量约为  $9.90 \text{ km/s}$ ). 直接飞向木星在地球逃逸时对火箭的运载能力要求过高, 因此, 向木星飞行与火星、金星探测的一个显著区别是有必要使用低能量转移方式 - 行星引力辅助技术以降低发射能量.

航天器在飞向木星的过程中, 不仅可以使使用各大行星的引力辅助, 而且会穿越火星和木星之间的主小行星带. 一次木星探测任务可以结合若干次的金星、火星和主带小行星飞越探测, 充分发挥航天器的科学和工程价值, 以较小的投资得到更多的回报. 因此, 多任务、多目标的木星探测必将越来越引起各航天大国的重视.

综合来说, 使用节能技术和结合大行星、小行星的飞越多任务探测是木星探测与传统类地行星探测的主要区别, 也是设计木星探测航天任务必须重点考虑的问题.

### 3 使用行星引力辅助飞向木星

#### 3.1 引力辅助模型

引力辅助 (又称借力飞行或引力助推), 是一种在深空中借助于行星引力改变轨道的无燃料变轨方式. 考虑到航天器日心飞行段的空间和时间尺度都比在行星附近飞行大很多, 计算行星引力辅助时, 可采用脉冲引力辅助模型, 即将行星引力辅助近似为探测器在 J2000 日心黄道惯性系中获得一个瞬时速度脉冲, 而不考虑其位置变化.

借力飞行时, 航天器的日心位置  $\mathbf{r}$  与借力行星的位置  $\mathbf{r}_{Pl}$  相同

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{Pl}, \quad (6)$$

且在借力飞行前后, 认为航天器位置不变, 即

$$\mathbf{r}^+ = \mathbf{r}^- = \mathbf{r}, \quad (7)$$

航天器相对借力行星的轨道为双曲线轨道, 借力飞行前后的双曲线剩余速度分别为  $\mathbf{v}_{\infty}^-$  和  $\mathbf{v}_{\infty}^+$  有

$$\mathbf{v}_{\infty}^- = \mathbf{v}^- - \mathbf{v}_{Pl}, \mathbf{v}_{\infty}^+ = \mathbf{v}^+ - \mathbf{v}_{Pl}, \quad (8)$$

其中  $v_{Pl}$  为借力行星的日心速度,  $v^-$  和  $v^+$  为借力飞行前后航天器的日心速度. 借力飞行前后双曲线剩余速度大小相等, 满足

$$v_\infty = \|v_\infty^-\| = \|v_\infty^+\|, \quad (9)$$

但由于双曲线剩余速度方向改变, 航天器从借力飞行中获得了速度增量  $\Delta v_{GA}$ , 可以表示为

$$\Delta v_{GA} = v^+ - v^- = v_\infty^+ - v_\infty^-. \quad (10)$$

借力飞行时相对借力行星的双曲线轨道如图 2 所示, 图中  $r_p$  为双曲线轨道近星点半径 (也称引力辅助半径).

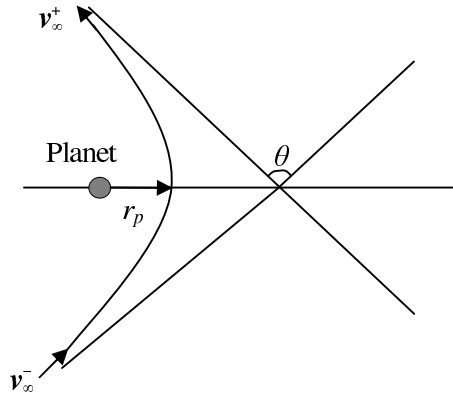


图 2 借力飞行示意图

Fig. 2 Hyperbolic orbit of gravity assist

双曲线剩余速度的偏转角为  $\theta$ , 根据下式确定 [9]

$$\theta = 2 \arcsin \left( \left( 1 + \frac{v_\infty^2 r_p}{\mu_{Pl}} \right)^{-1} \right), \quad (11)$$

其中  $\mu_{Pl}$  为借力行星的引力常量.

为了求得引力辅助给航天器提供的速度增量和借力飞行后航天器的速度, 建立行星中心引力辅助坐标系  $O-XYZ$ , 如图 3 所示. 坐标系原点建立在引力辅助行星的中心,  $X$  轴沿进入双曲线剩余速度  $v_\infty^-$  的方向,  $Z$  轴垂直于由借力飞行前航天器的日心速度  $v^-$  与借力行星的日心速度  $v_{Pl}$  所决定的平面 (显然,  $Z$  轴垂直于  $X$  轴),  $Y$  轴与  $X$  轴、 $Z$  轴构成右手坐标系. 3 个坐标轴的单位矢量分别记为  $i$ 、 $j$  和  $k$ .

由双曲线轨道的性质可知, 离开借力行星的双曲线剩余速度  $v_\infty^+$  在以进入双曲线剩余速度  $v_\infty^-$  为轴, 顶角为  $\theta$  的圆锥面上, 且大小等于  $v_\infty$ . 根据几何关系可以得到

$$v_\infty^- = v_\infty i, \quad (12)$$

$$v_\infty^+ = v_\infty (\sin \theta \cos \psi k + \sin \theta \sin \psi j + \cos \theta i), \quad (13)$$

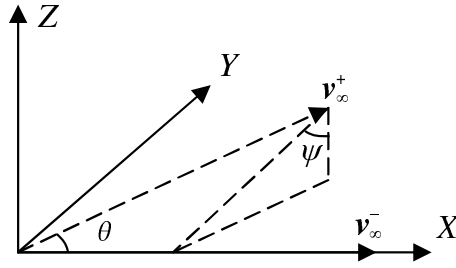


图 3 引力辅助坐标系

Fig. 3 Gravity assist frame of reference

其中  $\psi$  为  $v_{\infty}^-$  矢量在  $YZ$  平面上的投影与  $Z$  轴的夹角, 取值范围  $[0, 2\pi]$ .

给定相对行星双曲线轨道的近星点半径  $r_p$  和借力角度参数  $\psi$  即可计算借力飞行产生的速度增量  $\Delta v_{GA}$  和借力飞行后航天器的日心速度  $v^+$ .

### 3.2 向木星飞行所需引力辅助分析

#### 3.2.1 有效的引力辅助序列

减少木星探测轨道燃料消耗的首要问题是减少从地球出发的  $C_3$  (或速度增量). 利用行星引力辅助飞向木星, 火箭只需要将航天器送入向引力辅助行星飞行的轨道, 而并不需要直接为航天器提供能够到达木星的能量. 飞向木星所需的速度增量由引力辅助提供, 因此可以大大降低地球出发  $C_3$ .

如果引力辅助的等效脉冲为加速脉冲, 那么行星引力辅助后航天器轨道的近日点应在行星的日心位置附近. 航天器到达引力辅助行星时的日心速度为  $v^-$ , 从引力辅助行星转移至木星所需速度为  $v^*$ , 有

$$v^* = v^- + \Delta v_{GA} + \Delta v_T, \quad (14)$$

其中  $\Delta v_T$  是为了达到飞向木星的速度所需要发动机提供的速度增量. 在行星引力辅助轨道设计中, 希望  $\Delta v_T$  的值尽量小 (最好等于 0) 以减少燃料消耗. 近似分析时, 考虑  $v^*$ 、 $v^-$ 、 $\Delta v_{GA}$  和  $\Delta v_T$  均共线的理想情况, 即

$$v^* = v^- + \Delta v_{GA} + \Delta v_T, \quad (15)$$

从引力辅助行星飞向木星所需的最小速度为霍曼转移方式的近日点速度

$$v_{\min}^* = \sqrt{\frac{2\mu}{a_{PI}} - \frac{2\mu}{a_{PI} + a_J}}, \quad (16)$$

其中  $a_{PI}$  为引力辅助行星的轨道半长轴. 根据文献 [10], 引力辅助所能提供的最大速度增量  $\Delta v_{GA}$  的大小  $\Delta v_{GA}$  等于引力辅助行星表面的环绕速度大小

$$\Delta v_{GA\max} = \sqrt{\frac{\mu_{PI}}{R_{PI}}}, \quad (17)$$

式中  $R_{Pl}$  为引力辅助行星的半径. 航天器到达引力辅助行星时的速度  $v^-$  也可根据从地球出发的霍曼转移估算. 航天器能够不消耗燃料就利用引力辅助实现地木转移的近似条件可以写为

$$v^- + \Delta v_{GA_{\max}} > v_{\min}^*, \quad (18)$$

由于近似分析中各数据均为估算, 因此, 实际利用上式判断时应留有较大余量.

减少木星探测燃料消耗的另一个方式是减少木星捕获所需速度增量. 考虑木星捕获阶段, 根据公式 (3) 和 (5) 可知, 引力辅助行星半长轴越大, 从引力辅助行星转移至木星时, 环木捕获所消耗的燃料就越少.

分别对从地球出发并使用金星 (VGA)、地球 (EGA) 或火星 (MGA) 的一次引力辅助飞向木星轨道进行分析, 速度增量估算数据如表 3.

表 3 一次引力辅助飞向木星速度增量分析

Table 3 The velocity increment analysis of single gravity assist

| Gravity-assist planet      | $v_{\min}^*$ (km/s) | $v^-$ (km/s) | $\Delta v_{GA_{\max}}$ (km/s) | $\Delta v_J$ (km/s) |
|----------------------------|---------------------|--------------|-------------------------------|---------------------|
| Venus(Earth-Venus-Jupiter) | 46.4                | 37.7         | 7.3                           | 1.3                 |
| Earth(Earth-Earth-Jupiter) | 38.6                | 29.8         | 7.9                           | 1.1                 |
| Mars(Earth-Mars-Jupiter)   | 30.0                | 21.5         | 3.6                           | 0.9                 |

根据表 3 中数据可知, 由于火星质量较轻, 对于飞向木星的引力辅助效果最差, 但有助于降低到达木星环木捕获的速度增量. 金星和地球引力辅助效果对地木转移相差不大, 地球更有利于降低捕获燃料消耗. 但是金星、地球和火星均不满足仅使用一次引力辅助而不消耗燃料飞向木星的条件. 因此, 在发射能量有限的情况下木星探测必须使用多颗行星的多次引力辅助相结合的飞行方式. 首先利用地球或者金星的多次引力辅助抬高轨道远日点使航天器具有能够飞向木星的能量, 再利用地球或者火星的引力辅助降低交会木星所需速度增量.

根据以上分析, 可能采用的从地球飞向木星的引力辅助序列有: 金星 - 地球引力辅助 (VEGA)、金星 - 地球 - 火星引力辅助 (VEMGA) 和金星 - 地球 - 地球引力辅助 (VEEGA).  
3.2.2 2020 年 ~2025 年发射机会搜索

本文对 2020 年至 2025 年之间每年使用不同引力辅助方式飞向木星的发射机会进行搜索. 搜索中结合我国未来可能的发射能力, 假设从地球出发时, 运载火箭可以为探测器提供的发射能量  $C_3$  最多为  $\text{km}^2/\text{s}^2$ . 目标环木轨道为  $100R_J \times 4R_J$  的大椭圆轨道. 为了便于对比, 表中除了给出 VEGA、VEMGA 和 VEEGA 这 3 种有效的引力辅助序列外, 还给出其他 3 种引力辅助方式的计算结果: 金星引力辅助 (VGA)、地球引力辅助 (EGA) 和火星引力辅助 (MGA). 搜索结果见表 4. 表中  $C_3$  为发射能量参数, 单位  $20 \text{ km}^2/\text{s}^2$ ,  $\Delta v_{\min}$  表示所需探测器自身提供的总速度增量, 包括飞向木星过程中和环木捕获所需的速度增量, 单位  $\text{km/s}$ ,  $TOF$  表示从地球飞向木星的飞行时间, 单位儒略年.

表 4(a) 金星引力辅助、地球引力辅助和火星引力辅助

Table 4(a) VGA, EGA and MGA

| Launch<br>year | VGA   |                   |       | EGA   |                   |       | MGA   |                   |       |
|----------------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|
|                | $C_3$ | $\Delta v_{\min}$ | $TOF$ | $C_3$ | $\Delta v_{\min}$ | $TOF$ | $C_3$ | $\Delta v_{\min}$ | $TOF$ |
| 2020           | 20.00 | 7.20              | 5.92  | 20.00 | 3.88              | 4.96  | 20.00 | 4.24              | 4.38  |
| 2021           | 20.00 | 6.14              | 2.91  | 20.00 | 3.82              | 4.51  | 20.00 | 4.27              | 5.36  |
| 2022           | 20.00 | 8.47              | 2.79  | 20.00 | 3.94              | 4.86  | 20.00 | 4.37              | 6.41  |
| 2023           | 20.00 | 6.49              | 4.86  | 20.00 | 3.89              | 5.19  | 20.00 | 4.38              | 5.44  |
| 2024           | 20.00 | 7.43              | 2.67  | 20.00 | 3.77              | 4.99  | 20.00 | 4.36              | 6.35  |
| 2025           | 20.00 | 6.62              | 5.55  | 20.00 | 3.71              | 4.88  | 20.00 | 4.36              | 6.40  |

表 4(b) 金星 - 地球引力辅助、金星 - 地球 - 地球引力辅助和金星 - 地球 - 火星引力辅助

Table 4(b) VEGA, VEEGA and VEMGA

| Launch<br>year | VGA   |                   |       | EGA          |                   |             | MGA          |                   |             |
|----------------|-------|-------------------|-------|--------------|-------------------|-------------|--------------|-------------------|-------------|
|                | $C_3$ | $\Delta v_{\min}$ | $TOF$ | $C_3$        | $\Delta v_{\min}$ | $TOF$       | $C_3$        | $\Delta v_{\min}$ | $TOF$       |
| 2020           | 20.00 | 2.46              | 4.83  | <b>13.24</b> | <b>1.09</b>       | <b>6.96</b> | 20.00        | 2.43              | 6.82        |
| 2021           | 20.00 | 3.64              | 4.78  | 14.15        | 2.38              | 5.52        | 13.86        | 2.70              | 7.50        |
| 2022           | 20.00 | 2.85              | 4.90  | 20.00        | 2.45              | 5.80        | 20.00        | 5.80              | 6.83        |
| 2023           | 20.00 | 5.67              | 5.67  | <b>14.77</b> | <b>1.08</b>       | <b>6.42</b> | <b>18.78</b> | <b>1.82</b>       | <b>7.03</b> |
| 2024           | 20.00 | 5.89              | 5.89  | 13.81        | 1.45              | 6.95        | 20.00        | 2.80              | 8.42        |
| 2025           | 20.00 | 4.96              | 4.96  | 18.52        | 2.18              | 5.67        | 20.00        | 2.69              | 8.18        |

根据表中数据可知，搜索计算结果与分析相同，只使用某一个行星引力辅助并不能大幅度节省燃料，而不同行星的多次引力辅助组合能够有效地降低交会木星所需燃料。比较好的发射机会在表 4 中用粗体表示，由搜索结果可知，在运载火箭能力有限的情况下，向木星飞行最好的引力辅助序列为金星 - 地球 - 地球引力辅助，其次为金星 - 地球 - 火星引力辅助。值得说明的是美国“伽利略”号木星探测器采用的就是金星 - 地球 - 地球引力辅助序列。

4 中途飞越主带小行星

主小行星带是太阳系内介于火星和木星轨道之间的小行星密集区域。90% 以上的小行星都运行于此。在这片距离太阳约 2.17~3.64 AU 的空间区域内，聚集了几十万颗小行星 (已发现)。

在航天器飞向木星的过程中，会至少 1 次穿越火星与木星之间的主小行星带，在此期间，会与大量的主带小行星相接近。因此，木星探测任务的过程中可以结合小行星探测，多任务探测方式可以有效地降低深空探测的成本并带来更多的科学回报。

规划小行星探测方案时，首先要确定探测目标。对于木星探测任务来说，飞向木星的轨道已经确定，因此，应该以此为标称轨道，统计出在标称轨道附近的小行星作为候选目标星。

统计步骤可概括如下：

- (1) 确定穿越主带小行星的轨道初值以及飞行时间。

- (2) 将穿越小行星带的飞行轨道划分为  $n$  段, 每个节点的时间记为  $t_i$ , 其中  $i$  为节点编号, 有  $i = 1, 2, \dots, n$ .
- (3) 积分递推轨道得到每个节点上航天器的位置矢量, 记为  $\mathbf{r}(t_i)$ .
- (4) 计算每颗小行星在每个时间节点的位置矢量, 记为  $\mathbf{r}_j(t_i)$ , 其中  $j$  为小行星编号.
- (5) 判断航天器与小行星的距离是否小于接近标准  $d_{\max}$ , 判断条件可以写为

$$\|\mathbf{r}(t_i) - \mathbf{r}_j(t_i)\| \leq d_0, \quad (19)$$

在穷举搜索接近航天器的小行星时,  $d_0$  的取值可以较大, 因为深空飞行的时间和空间尺度都非常大, 初始状态的微小改变就可以引起末端状态的较大响应. 对初值进行微调, 就可以对这些小行星进行飞越.

## 5 木星捕获分析

航天器到达木星影响球时相对木星为双曲线轨道, 在近木点处制动, 最终进入目标使命大椭圆轨道. 如果将捕获变轨近似为速度脉冲, 那么速度增量大小可根据 (5) 式计算. 燃料消耗  $\Delta m$  为

$$\Delta m = m \left( 1 - \exp \left( -\frac{\Delta v_J}{I_{sp} g_0} \right) \right), \quad (20)$$

其中  $m$  为航天器捕获前的质量,  $I_{sp}$  和  $g_0$  分别为发动机的比冲和海平面重力加速度.

## 6 算例与设计结果

### 6.1 常数取值

在轨道设计中需要使用的常数如表 5 所示.

表 5 常数取值  
Table 5 Parameters

| Parameter | Value   | Unit             |
|-----------|---------|------------------|
| $m_0$     | 2000    | kg               |
| $I_{sp}$  | 312     | s                |
| $g_0$     | 9.80665 | m/s <sup>2</sup> |

### 6.2 标称轨道

以 2023 年出发为例, 航天器由运载火箭发射逃逸地球, 经过金星 - 地球 - 地球 3 次引力辅助飞向木星, 最终制动进入远木点  $100R_J$ 、近木点  $4R_J$  的环木轨道. 此标称轨道在运载火箭发射逃逸地球后中途不需要变轨, 只需在近木点提供 1.08 km/s 左右的捕获速度增量即可. 表 6 中列出了详细的飞程序.

表 6 标称轨道的详细飞程序

Table 6 Trajectory design result of nominal orbit

|                                               | Value                 | Unit                            |
|-----------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Earth launch time                             | 2023 Jun 23           | UTCG                            |
| Earth launch $C_3$                            | 14.74                 | km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> |
| Venus GA time                                 | 2023 Dec 03           | UTCG                            |
| Velocity increment of Venus GA                | [-0.32; -4.08; -2.86] | km/s                            |
| 1st Earth GA time                             | 2024 Oct 17           | UTCG                            |
| Velocity increment of 1st Earth GA            | [-0.71; 4.65; -0.32]  | km/s                            |
| 2nd Earth GA time                             | 2026 Oct 19           | UTCG                            |
| Velocity increment of 2nd Earth GA            | [2.98; 5.88; -3.76]   | km/s                            |
| Jupiter arrival time                          | 2029 Nov 03           | UTCG                            |
| Velocity increment of Jupiter orbit insertion | 1.08                  | km/s                            |

### 6.3 搜索飞越小行星

航天器在两次地球甩摆之间和飞往木星的过程中两次穿越主小行星带. 统计该两段轨道近距离经过的小行星, 令  $d_0=3000000$  km, 搜索范围是目前所有已获得永久编号的 276 002 颗小行星. 第 1 次穿越小行星带时有 51 颗小行星满足要求, 第 2 次穿越过程中有 22 颗小行星满足要求. 限于篇幅, 表 7 中只给出接近距离小于 1 500 000 km 的小行星.

表 7 两次穿越主小行星带时接近的小行星

Table 7 The main-belt asteroids close to the nominal orbit

| Asteroid number | $t$ (UTCG)  | $d$ (km)  | $a$ (AU) | $e$   | $i$ (°) |
|-----------------|-------------|-----------|----------|-------|---------|
| 15399           | 13 Sep 2025 | 1340073.4 | 2.617    | 0.150 | 1.709   |
| 45215           | 09 May 2026 | 707953.7  | 2.272    | 0.209 | 5.839   |
| 92491           | 13 Mar 2026 | 735282.2  | 2.386    | 0.252 | 3.659   |
| 151598          | 14 Feb 2026 | 518901.9  | 2.294    | 0.158 | 3.973   |
| 154440          | 09 Feb 2026 | 923356.0  | 2.376    | 0.160 | 7.949   |
| 160384          | 12 Feb 2026 | 1360742.3 | 2.341    | 0.057 | 7.361   |
| 224114          | 12 May 2026 | 600006.6  | 2.305    | 0.176 | 2.441   |
| 251584          | 15 Sep 2025 | 1377997.0 | 2.184    | 0.063 | 1.806   |
| 15120           | 02 Apr 2027 | 1447916.9 | 2.267    | 0.167 | 2.878   |
| 122697          | 16 Jun 2027 | 1323432.2 | 2.616    | 0.239 | 3.176   |

表 7 中  $t$  为接近时间,  $d$  为最近距离,  $a$ 、 $e$  和  $i$  表示小行星的轨道半长轴、偏心率和轨道倾角. 图 4 为航天器轨道和接近小行星示意图.

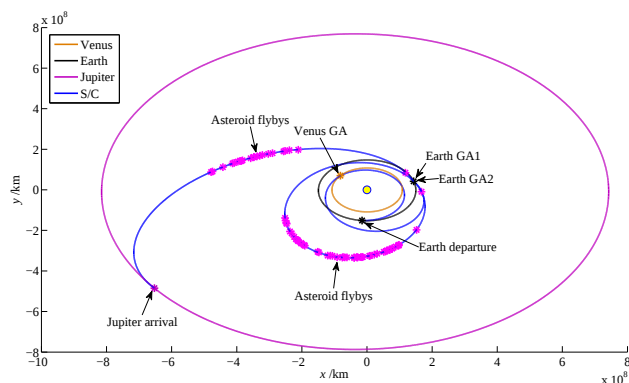


图 4 飞越小行星搜索结果示意图

Fig. 4 Search results of main-belt asteroid flyby

## 6.4 设计结果

从小行星飞越搜索结果中选择 251 584、151 598 和 122 697 作为飞越目标, 重新设计第 1 次地球引力辅助至木星的飞行轨道. 最终轨道示意图如图 5, 燃料消耗情况见表 8.

表 8 最终设计轨道燃料消耗情况

Table 8 Fuel consumptions of Jupiter exploration orbit

| $C_3$<br>( $\text{km}^2/\text{s}^2$ ) | $\Delta v_{\text{VGA}}$<br>( $\text{km/s}$ ) | $\Delta v_{\text{EGA1}}$<br>( $\text{km/s}$ ) | 251584<br>( $\text{km/s}$ ) | 151598<br>( $\text{km/s}$ ) | $\Delta v_{\text{EGA2}}$<br>( $\text{km/s}$ ) | 122697<br>( $\text{km/s}$ ) | $\Delta v_{\text{J}}$<br>( $\text{km/s}$ ) |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| 14.74                                 | 0                                            | 0.25                                          | 0.12                        | 0.36                        | 0.13                                          | 0.02                        | 1.08                                       |

以上结果是基于圆锥曲线拼接模型的轨道初步设计, 日心飞行段只考虑太阳的引力, 当航天器与小行星的日心位置相同时即认为是飞越小行星. 在轨道精确设计阶段, 应以初步结果为初值, 考虑观测、成像条件, 详细设计飞越小行星的轨道.

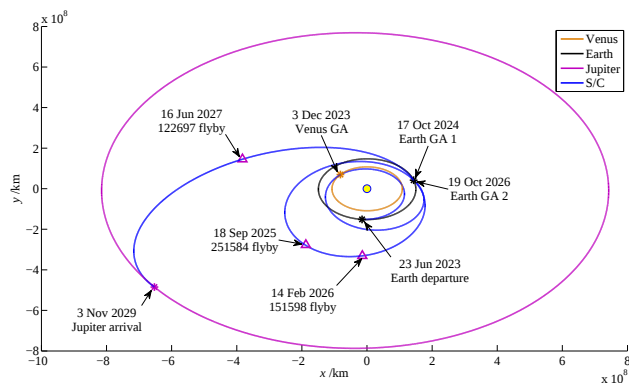


图 5 设计结果飞行轨迹

Fig. 5 Trajectory of the design result

## 7 结论与讨论

本文研究了与木星探测相关的轨道设计问题. 木星探测轨道相对于传统的火星、金星等类地行星探测轨道有两个重要不同点: 第一, 为了减少发射能量, 有必要利用行星引力辅助变轨技术. 另外, 向木星飞行过程中通常会结合深空多目标、多任务的探测. 本文针对木星探测轨道的这些特点进行了较系统的探讨. 首先, 建立近似模型, 分析了节省能量飞向木星需要组合使用多次行星引力辅助. 对 2020 年至 2025 年之间的各种不同行星引力辅助序列进行了搜索计算得到最省能量的发射窗口. 在地木转移轨道确定后, 对穿越主小行星带的轨道穷举确定可能的小行星飞越目标. 最后, 给出了一个木星探测轨道的详细设计结果.

本文得到的结论主要可以概括为以下几点:

(1) 以较低的发射能量向木星飞行不能仅使用一次行星引力辅助, 必须多次借力. 较好的引力辅助序列为金星 - 地球 - 地球引力辅助和金星 - 地球 - 火星引力辅助, 其中前者效果最佳.

(2) 环绕木星的任务轨道选择大椭圆轨道比较合适, 能够减少捕获所需燃料消耗.

(3) 飞向木星途中穿越小行星带时, 可以选择多颗小行星飞越探测.

## 参 考 文 献

- [1] Amario L A, Byrnes D V. AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting, Reno, Jan 10-13, 1983
- [2] Olds A D, Kluever C A. JSpRo, 2007, 44: 1060
- [3] 张旭辉, 刘竹生. 导弹与航天运载技术, 2008, 29: 1739
- [4] 乔栋, 崔平远, 徐瑞. 宇航学报, 2010, 31: 655
- [5] 尚海滨, 崔平远, 徐瑞, 等. 宇航学报, 2011, 32: 29
- [6] 列凡托夫斯基. 宇宙飞行力学基础. 北京: 国防工业出版社, 1974: 31
- [7] O' Neil W J, Mitchell R J. AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting, Reno, Jan 10-13, 1983
- [8] Curtis H D. Orbital Mechanics for Engineering Student. Burlington: Butter worth-Heinemann, 2005: 257-261
- [9] 刘瞰, 赵钧. 空间飞行器动力学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 60
- [10] Sims J A, Staugler A J, Longuski J M. JGCD, 1997, 34: 347

## Jupiter Exploration Mission Analysis and Trajectory Design

CHEN Yang   BAOYIN He-xi   LI Jun-feng  
(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084)

**ABSTRACT** The trajectory design for Jupiter exploration mission is investigated in this paper. The differences between Jupiter exploration trajectory and Mars or Venus exploration trajectory are mainly concerned about. Firstly, the selection of the Jupiter-centered orbit is analyzed based on the Galileo Jupiter mission. As for the Earth-Jupiter transfer orbit, the fuel consumption of the direct transfer is too large. So the energy-saving technologies such

as the planetary gravity assist should be used for the trajectory to the Jupiter. The different sequences of planetary gravity assist for the trajectory from the Earth to the Jupiter are examined by applying the Particle Swarm Optimization (PSO). According to the searching results, Venus-Earth-Earth gravity assist (VEEGA) is the most effective gravity-assist sequence for the Jupiter mission. During the Jupiter mission, the spacecraft will pass through the main asteroid belt which is between the orbits of Mars and Jupiter, and may encounter several asteroids. The Jupiter mission is able to combine with the main-belt asteroid flyby missions. The design method of the intermediate asteroid flyby trajectory is also considered. At last, an entire designed trajectory for the Jupiter mission launched in 2023 is presented.

**Key words** celestial mechanics, planets and satellites: general, space vehicles