

木星系及行星际飞越探测的多次借力飞行 轨道设计研究

田百义 张磊 周文艳 朱安文

(北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

摘要 根据我国木星系及行星际穿越探测任务规划,瞄准工程方案可行,对使用多次借力的地木转移轨道及行星飞越飞行轨道进行了深入研究分析。首先,对星际飞越目标进行了探讨,明确了满足任务约束的星际飞越目标;其次,对行星际飞行序列进行了优选,从探测器发射日期、发射双曲剩余速度的平方(C3)、深空机动、木星到达 C3 和总的任务时间角度,对比分析了多个星际飞行序列,给出了最优序列设计结果;最后,基于工程约束,对探测器的连续发射机会进行了优化设计,给出了探测器连续 8 天、11 天和 16 天发射所需的发射 C3 和深空机动大小需求。研究表明:在 2029—2032 年期间,木星系及行星际穿越探测任务最优的深空飞行序列为地球-金星-地球-地球-木星-天王星,最优的发射日期集中在 2029 年 10 月份。

关键词 深空探测;木星系探测;行星际飞越;多次借力

中图分类号:V476.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1673-8748.2018.01.003

Research on Multiple Gravity Assist Trajectories for a Jovian System Exploration and Planet Flyby Mission

TIAN Baiyi ZHANG Lei ZHOU Wenyan ZHU Anwen

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Interplanetary transfer Trajectories with multiple gravity assists, are designed for a Jovian system exploration and planet flyby mission, which aimed at technical feasibility. Firstly, the target of planet interplanetary flyby is selected from Uranus and Neptune, with consideration of mission constraints which is suitable for the task. Secondly, the optimal trajectories exploiting the flybys of Venus, Earth (twice) and Jupiter to minimize the propellant consumption are designed, and the flight project is optimal compared with other strategies, in terms of by the launch date, launch C3 energy, deep space maneuver, arrival C3 energy and task periodmission length. Finally, the launch opportunities for the explorer probe are calculated, which lasted about 8 days, 11 days and 16 days continuously. The study shows that, from 2029 to 2032, the Earth-Venus-Earth-Earth-Jupiter sequence series is optimal, and the launch window appears about Oct 2029.

Key words: deep space exploration; Jovian system exploration; interplanetary transfer trajectory; multiple gravity assist

收稿日期:2017-11-17; 修回日期:2018-01-19

基金项目:国家重大科技专项工程

作者简介:田百义,男,工程师,从事航天器轨道设计工作。Email:tianbaiyi@163.com。

木星是太阳系从内向外的第五颗行星,是太阳系中体积最大、自转最快的行星。其公转轨道的半长轴约 7.7854×10^8 km,绕太阳公转的周期约 4332.59 天,约合 11.86 年。木星赤道地区的自转周期为 9 小时 55 分 30 秒,两极地区的自转周期稍慢一些,木星不同纬度自转周期的不同,说明木星表面是由流体组成的。此外,木星是迄今为止具有最多卫星的行星,已发现 66 颗天然卫星,因此常被称为木星系统。其中 50 颗直径小于 10 km 的卫星,是在 1975 年以后发现的。1610 年,伽利略最早用望远镜发现木星最亮的 4 颗卫星,被后人称为伽利略卫星,这 4 颗卫星环绕在离木星 $4 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^6$ km 的轨道带,由内而外依次为木卫一、木卫二、木卫三和木卫四,除四颗伽利略卫星外,其他卫星大多是半径几千米到 20 km 的岩石天体。

开展木星探测,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 4 颗伽利略卫星也极具科学价值。截至 2017 年 11 月,人类已发射了包括伽利略任务和朱诺任务在内的十余颗探测器已造访木星系统,已规划的木星系探测任务包括欧洲的“木星冰卫探测”(JUICE)任务(预计 2020 年)和美国的“快帆”任务(预计 2022 年)等,也将开展木星环绕探测,以及木星卫星的环绕或多次飞越探测。

本文根据我国木星系及行星际穿越探测任务规划,瞄准工程方案可行,对多次借力的地木转移轨道及木星借力后的星际飞行轨道进行优化设计,为我国木星系及行星际穿越探测任务的工程实施提供参考。

1 行星借力模型概述及任务约束分析

1.1 行星借力模型概述

当探测器在主天体引力场中近距离飞越第二个天体(第二天体在主天体引力范围内运行)时,第二个天体的引力将改变探测器在主天体引力场中的运行轨道。以星际飞行为例,主天体为太阳,第二天体为行星(如水星、金星、地球、火星、木星等八大行星),行星借力可用来改变探测器相对太阳的轨道能量或轨道倾角(或两者同时改变)。

以地球借力飞行为例,图 1 给出了两类地球借力飞行轨道:能量增加型和能量减小型。地球借力飞行的轨道相对地球而言,是一条以地心为焦点的双曲线轨道,探测器在地球影响球边界处相对探测器的速度为双曲线剩余速度 V_∞ ,在探测器自由飞行状态下,地球借力前后的 V_∞ 大小相等,即

$\|V_{\infty_{in}}\| = \|V_{\infty_{out}}\|$,因此探测器相对地球的轨道能量没有变化。地球借力的效果是造成了探测器 V_∞ 旋转了一个角度 θ ,称为“借力转角”。探测器借力的时间相对地球公转周期短的多,可认为探测器飞入/飞出地球影响球时的位置矢量不变。借力转角造成探测器飞出地球引力范围后,相对太阳的速度大小和方向发生了变化(见图 1),因此,探测器绕日飞行轨道能量也就发生了改变。

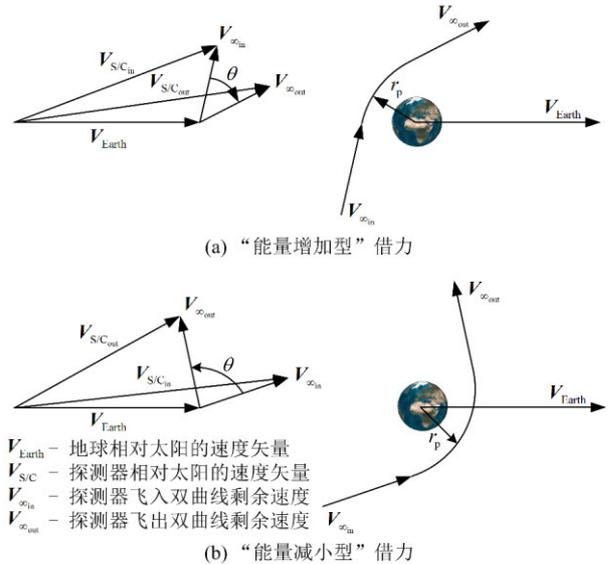


图 1 两类借力飞行轨道

Fig. 1 Two types of planet flybys

(1)“能量增加型”借力:探测器由地球后方飞越,地球借力之后 V_∞ 顺时针旋转,将 V_∞ 与 V_{Earth} 矢量相加,显然有 $V_{S/C_{out}} > V_{S/C_{in}}$,见图 1(a),因此地球借力增大了探测器相对太阳的轨道能量;

(2)“能量减小型”借力:探测器由地球前方飞越,地球借力之后 V_∞ 逆时针旋转,将 V_∞ 与 V_{Earth} 矢量相加,显然有 $V_{S/C_{out}} < V_{S/C_{in}}$,见图 1(b),因此地球借力减小了探测器相对太阳的轨道能量。

借力转角 θ 与探测器飞越地球的双曲线剩余速度 V_∞ 和近地点半径 r_p 具有如下关系:

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = 1/(1 + r_p V_\infty^2 / \mu_e) \quad (1)$$

式中: μ_e 为借力天体-地球的引力常数。

当借力天体为其他行星时,原理相同,此处不再赘述。

1.2 任务约束分析

根据我国目前航天技术发展现状和未来的航天任务规划,对木星系及行星际穿越探测任务提出如下约束:

(1)瞄准工程可行,飞行方案应满足运载系统发

射双曲剩余速度的平方(C3)、射向、滑行时间和落区安全等约束,以及满足发射场系统提出的连续多天发射条件;

(2)地木转移阶段,考虑地球(E)、地球-金星(EV)、金星-地球-地球(VVE)和金星-金星-地球(VVE)四种借力序列,择优选择;

(3)发射日期选择在 2030 年前后,木星借力之后的行星飞越目标选择天王星或海王星,且约束探测器在 2049 年之前飞越目标;

(4)探测器由木星系环绕器和行星际飞越器组成,总质量 5000 kg,其中木星系环绕器质量 4000 kg,行星际飞越器 1000 kg。

为实现整体任务的最优化设计,将地木转移段轨道与木星-天王星或海王星轨道进行联合优化。为满足木星系的探测任务需求,增加木星借力时的 C3 约束为:不大于 $50 \text{ km}^2/\text{s}^2$,以减小木星捕获时的速度增量需求。

2 行星飞越目标选择

2.1 天王星

探测器在到达木星之前,释放行星际飞越器,经过木星借力之后飞往天王星,因此,可根据木星-天王星的 C3 能量等高线图得到探测器适宜到达木星的时间情况。

图 2 给出了木星-天王星出发 C3 能量等高线图,图中每个点均代表了一条经木星借力后飞往天王星的轨道,同一颜色的线代表探测器飞越木星时的 C3 相同。由图 2 可知:满足 2049 年之前到达天王星且飞越木星 C3 小于 $50 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 的木星借力日期在 2036 年 10 月之前。而地木转移的轨道飞行时间一般为 3~7 年,因此,探测器从地球发射的日期应在 2033 年 10 月之前,满足探测任务的时间规划。

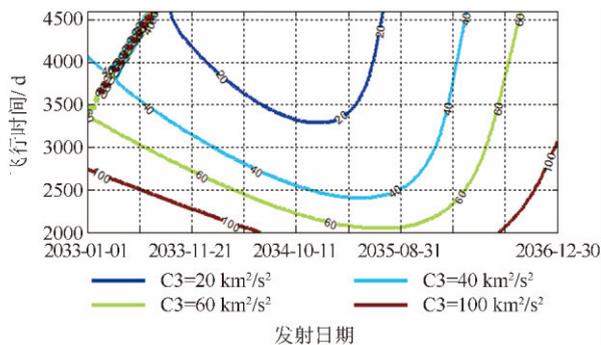


图 2 木星-天王星发射 C3 能量等高线图
Fig 2 Jupiter-Uranus launch C3 energy

综上所述,天王星飞越探测满足任务时间规划,是潜在可行的行星飞越探测目标。

2.2 海王星

与天王星为飞越目标的分析过程类似,图 3 给出了木星-海王星的出发 C3 能量等高线图。

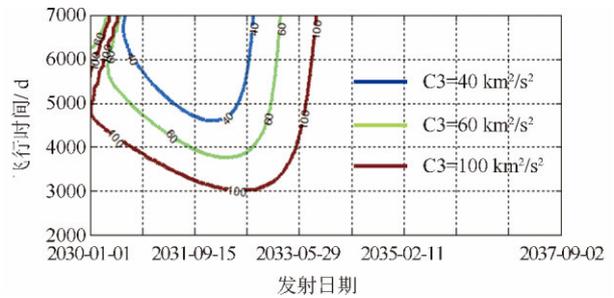


图 3 木星-海王星出发 C3 能量等高线图
Fig 3 Jupiter-Neptune launch C3 energy

由图 3 可知:满足 2049 年之前到达海王星且飞越木星 C3 小于 $50 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 的木星借力日期在 2032 年 10 月之前。而地木转移的轨道飞行时间一般为 3~7 年,因此,探测器从地球发射的日期应在 2029 年 10 月之前,不满足探测任务的时间规划。

综上所述,不适宜选择海王星作为行星飞越探测目标。

3 星际飞行序列的优选

根据上述分析,确定选择天王星作为后续行星飞越目标。为实现探测任务的整体最优性,采用差分进化算法,将地木转移段轨道与木星-天王星轨道进行联合优化。重点分析地球-地球-木星-天王星(EEJU)、地球-金星-地球-木星-天王星(EVEJU)、地球-金星-地球-地球-木星-天王星(EVEEJU)和地球-金星-金星-地球-木星-天王星(EVVEJU)4 种行星飞行序列。为减小借力时行星大气和磁场等环境因素对探测器的影响,结合探测器深空测定轨精度与热防护能力,一般要求类地行星借力飞越安全高度不低于 200 km,因此优化设计时增加行星借力高度约束如下:①金星借力高度 $\geq 300 \text{ km}$;②地球借力高度 $\geq 300 \text{ km}$;③火星借力高度 $\geq 300 \text{ km}$;④木星借力高度 $\geq 4R_j$ ($R_j = 71492.00 \text{ km}$ 为木星半径)。

表 1 给出了仅考虑运载发射 C3 约束情况下的四种序列星际飞行轨道优化设计结果。由于 EEJU 和 EVVEJU 两种序列无满足发射 C3 约束的最优解,因此,优化时适当地放宽了此两种序列的发射 C3 约束。根据表 1,综合考虑探测器发射日期、发

射 C3(或最大发射质量)、木星到达 C3、深空机动大小(燃料消耗)和总的任务时长满足任务情况(按优、良和差三种区分),得到四种序列的对比结果(见表 2),可见四种星际飞行序列的最优排序为:EVVE-

JU, EVEJU, EVVEJU, EEJU。其中 EVVEJU 和 EVEJU 两种序列满足工程需求,本文选取这两种序列进行优化对比分析。

表 1 四种序列的星际飞行任务轨道优化设计结果

Table 1 Optimal trajectories of 4 interplanetary flight series

行星际飞行序列	EEJU	EVEJU	EVVEJU	EVVEJU	
地球发射日期	2031-09-10	2031-08-01	2029-09-25	2030-01-01	
发射 C3(km ² /s ²)	36.00	18.00	14.18	23.30	
第 1 次借力	借力天体	地球	金星	金星	
	借力日期	2034-06-11	2032-01-14	2030-04-04	2030-06-03
	借力高度/km	300.00	2 524.72	6 011.35	4 474.93
	深空机动/(km/s)	1.78	0.00	0.00	0.00
第 2 次借力	借力天体	木星	地球	金星	
	借力日期	2036-06-03	2033-06-21	2031-02-18	2032-10-12
	借力高度/km	1 916 118.43	300.00	5 481.55	5 854.78
	深空机动/(km/s)	0.00	0.55	0.00	0.00
第 3 次借力	借力天体		木星	地球	
	借力日期		2035-11-08	2033-05-26	2034-04-20
	借力高度/km		300 000.00	1 385.59	440.82
	深空机动/(km/s)		0.20	0.00	0.00
第 4 次借力	借力天体			木星	
	借力日期			2035-12-23	2036-05-12
	借力高度/km			461 134.76	1 520 856.47
	深空机动/(km/s)			0.00	0.00
到达木星日期	2036-06-03	2035-11-08	2035-12-23	2036-05-12	
到达木星 C3/(km ² /s ²)	46.01	38.94	35.32	48.84	
到达天王星日期	2049-09-30	2043-12-12	2046-02-17	2047-06-24	
飞越天王星 C3/(km ² /s ²)	12.02	55.03	26.83	19.08	
地木转移时长/年	4.73	4.27	6.25	6.36	
总任务时长/年	18.06	12.37	16.41	17.48	
总的深空机动速度增量/(km/s)	1.78	0.75	0.00	0.00	
(按质量 5000 kg, 比冲 315 s 考虑, 对应的燃料消耗)	(2 192.00 kg)	(1 050.00 kg)	(0.00 kg)	(0.00 kg)	

表 2 四种序列的任务满足情况评价结果

Table 2 Evaluate results of 4 interplanetary flight series

星际飞行序列	EEJU	EVEJU	EVVEJU	EVVEJU
发射日期	优	优	良	优
发射 C3(最大发射质量)	差	良	优	差
木星到达 C3	差	良	优	差
深空机动(燃料消耗)	差	良	优	优
总的任务时长	差	优	良	差
发射窗口宽度		良	优	

4 连续发射日期优化分析

木星系及行星际穿越探测任务采用首次金星借力的星际飞行序列,因此,地球-金星的窗口即决定了整个探测任务窗口。图 4 给出了 2029—2033 年期间的地球-金星发射 C3 能量等高线图,由图可知:满足运载发射 C3 约束的探测器最优发射日期集中在 2029 年 10 月份和 2031 年 8 月份。其中 2029 年

10 月份窗口对应的星际飞行序列为 EVVEJU,2031 年 8 月份窗口对应的星际飞行序列为 EVEJU。

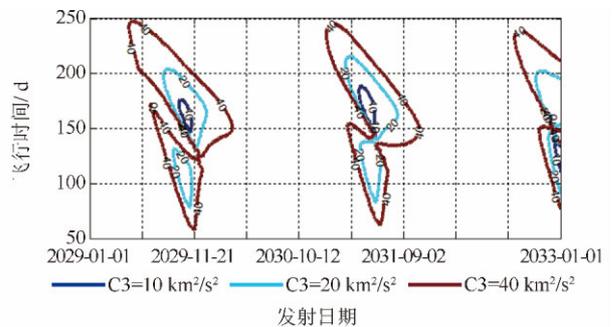


图 4 地球-金星发射 C3 能量等高线图(2029—2033 年)
Fig. 4 Earth-Venus launch C3 energy (2029—2033)

木星系及行星际穿越探测任务的发射窗口与我国运载水平紧密相关,表 1 的全局最优发射窗口和图 4 的连续发射日期,不一定满足我国运载的射向和滑行时间等约束,以及工程总体对连续发射日期

的需求,因此开展发射窗口优化设计时必须引入具体工程约束。

4.1 EVEEJU 飞行序列

以图 4 的窗口为初值进行连续发射窗口的优化设计,图 5 至图 7 分别给出了 EVEEJU 序列的探测器发射 C3、木星到达 C3 和深空机动大小随发射日期的变化情况,可知:探测器最优的发射日期集中在 2029 年 9 月 24 日—2029 年 10 月 09 日(连续 16 天),探测器发射所需的发射 C3 均小于 $16.0 \text{ km}^2/\text{s}^2$,木星到达 C3 约 $35.4 \text{ km}^2/\text{s}^2$,且深空机动需求不大于 200 m/s 。其中,9 月 26 日—10 月 6 日(连续 11 天)发射的深空机动小于 100 m/s ;9 月 28 日—10 月 5 日(连续 8 天)发射的深空机动小于 50 m/s 。

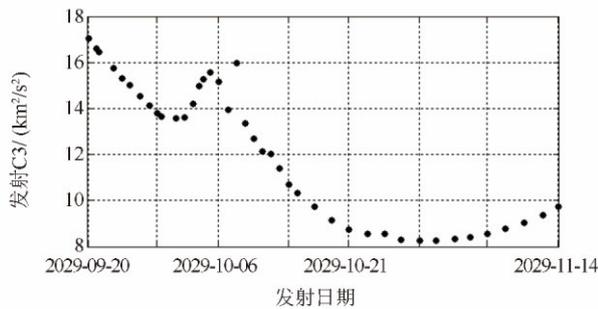


图 5 探测器发射 C3 随发射日期的变化情况(EVEEJU)
Fig. 5 Launch C3 energy for EVEEJU

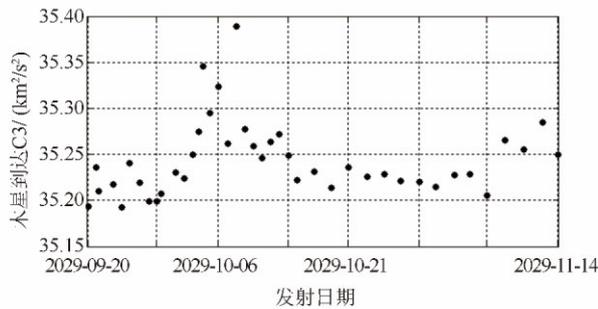


图 6 木星到达 C3 随发射日期的变化情况(EVEEJU)
Fig. 6 Jupiter arrive C3 energy for EVEEJU

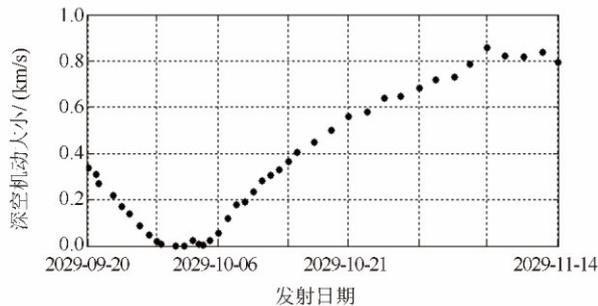


图 7 探测器深空机动大小随发射日期的变化情况(EVEEJU)

Fig. 7 DSM(Deep Space Maneuver) budget for EVEEJU

4.2 EVEJU 飞行序列

通过优化设计,图 8 至图 10 分别给出了 EVEJU 序列的探测器发射 C3、木星到达 C3 和深空机动大小随发射日期的变化情况,可知:探测器最优的发射日期集中在 2031 年 7 月 27 日—2031 年 8 月 16 日(连续 11 天),探测器发射所需的发射 C3 均在 $19 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 左右,木星到达 C3 约 $40.5 \text{ km}^2/\text{s}^2$,深空机动需求为 $840\sim 1140 \text{ m/s}$ 。

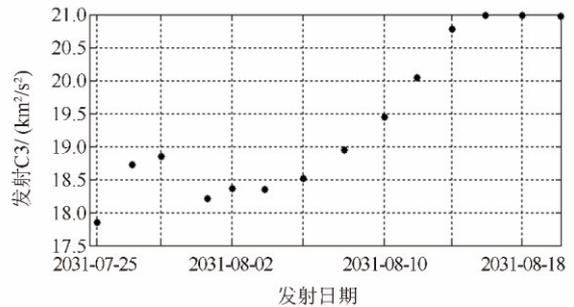


图 8 探测器发射 C3 随发射日期的变化情况(EVEJU)
Fig. 8 Launch C3 energy for EVEEJU

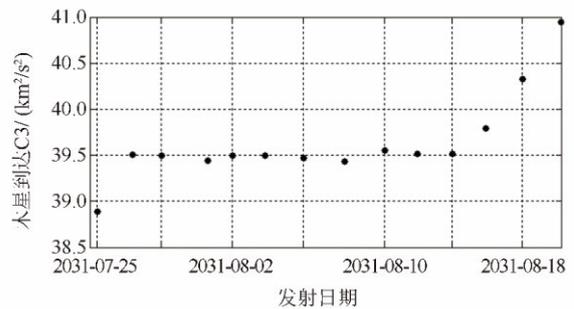


图 9 木星到达 C3 随发射日期的变化情况(EVEJU)
Fig. 9 Jupiter arrive C3 energy for EVEJU

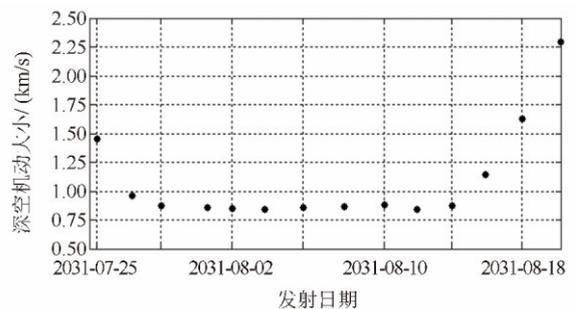


图 10 探测器深空机动大小随发射日期的变化情况(EVEJU)

Fig. 10 DSM budget for EVEJU

4.3 两种飞行序列的对比分析

根据 4.1 节和 4.2 节的分析,两种飞行序列对应的深空机动(星际飞行燃料消耗)、发射 C3(运载发射能力)和木星到达 C3(木星捕获燃料消耗)均具

有差异(假设探测器轨控发动机比冲为 315 s):

(1) 星际飞行燃料消耗。EVEJU 飞行序列较 EVEEJU 飞行序列深空机动增加约 700 m/s, 对应的燃料消耗量增加 1000 kg;

(2) 运载发射能力。EVEJU 飞行序列较 EVEEJU 飞行序列发射 C3 大 $3 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 左右, 对应的运载发射质量减小约 290 kg;

(3) 木星捕获燃料消耗。EVEJU 飞行序列较 EVEEJU 飞行序列的木星到达 C3 大 $5 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 左右, 对应的木星捕获燃料消耗增加约 50 kg。

综上, EVEJU 飞行序列的探测器干重预算较 EVEEJU 飞行序列减小近 1340 kg, 因此, EVEEJU 飞行序列具有更优的特性, 应为我国木星系及行星际穿越探测任务的首选。

5 结束语

本文以工程可行为目标, 针对木星系及行星际穿越探测任务的星际飞行方案进行了深入研究和分析, 研究结果表明:

(1) 天王星适宜作为我国首次木星系及行星际穿越探测任务的星际探测目标, 探测器可于 2045 年前后飞抵天王星;

(2) 2029—2032 年期间, 四种星际飞行序列的最优排序为: EVEEJU, EVEJU, EVVEJU, EEJU。EVEEJU 飞行序列具有最优的特性, 应为我国木星系及行星际穿越探测任务的首选;

(3) EVEEJU 飞行序列满足任务约束的发射日期集中在 2029 年 10 月份前后。

本文研究结果可为我国木星系及行星际穿越探测任务论证与规划提供参考, 后续可根据任务总体需求, 及我国未来运载火箭和航天器发展情况开展详细的轨道方案优化设计, 对星际飞行过程中涉及的能源、空间环境、通信弧段、天体遮挡等具体工程问题开展深入研究与分析, 为我国首次木星系及行星际穿越探测任务的工程实施提供技术保障。

参考文献 (References)

- [1] 中国科学院月球与深空探测总体部. 月球与深空探测 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2014: 434-436
Lunar and Deep Space Exploration Department of Chinese Academy of Sciences. Lunar and deep space exploration [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2014: 434-436 (in Chinese)
- [2] The JUICE Science Study Team. JUICE exploring the emergence of habitable worlds around gas giants [R]. Paris: ESA, 2011
- [3] Michael Meltzer. Mission to Jupiter: a history of the Galileo project, NASA SP-2007-4231 [R]. Washington D. C.: NASA, 2007
- [4] T Kowalkowski, J Johannesen, T Lam. Launch period development for the Juno mission to Jupiter [C]// AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Washington D. C.: AIAA, 2008: 1-13
- [5] L J Miller, J K Miller, W E Kirhofer. Navigation of the Galileo mission [C]// 21st Aerospace Sciences Meeting. Washington D. C.: AIAA, 1983: 1-19
- [6] Matteo Ceriotti. Global optimization of multiple gravity assist trajectories [D]. Glasgow: University of Glasgow, 2010
- [7] Betts J T. Survey of numerical methods for trajectory optimization [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(2): 193-207
- [8] 田百义. 小推力借力转移轨道设计与优化方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 30-45
Tian Baiyi. Design and optimization of low-thrust gravity-assist trajectories [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 30-45 (in Chinese)
- [9] 董捷, 孟林智, 赵洋, 等. 国外木星系环绕飞行任务规划研究 [J]. 航天器工程, 2015, 24(3): 85-92
Dong Jie, Meng Linzhi, Zhao Yang, et al. Demonstration of foreign Jovian system orbiting mission plan [J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(3): 85-92 (in Chinese)

(编辑: 张小琳)