

小行星捕获轨道优化研究综述

宝音贺西^{*,1)} 包长春^{†,2)}

^{*} (清华大学航天航空学院, 北京 100084)

[†] (内蒙古工业大学航空学院, 呼和浩特 010051)



宝音贺西, 清华大学航天航空学院教授, 博导, 国家杰出青年基金获得者。1999 年哈尔滨工业大学飞行器设计专业博士毕业, 后在日本、英国等地工作。2005 年回国后于清华大学工作, 开展航天器动力学与控制基础理论和重大航天工程中的应用研究。2014—2018 连续五年进入 Elsevier 公布的中国高被引学者榜单 (航天工程方向)。获国防科技进步一等奖、上海市科技进步一等奖; 其小行星捕获、空间碎片发动机等成果两度被 *MIT tech Review* 评论, 引起国际广泛关注。攻克载人航天远距离最优导引的关键技术, 研究成果应用于我国交会对接工程。AIAA 终身高级会员、*Astrodynamics* 主编、*Science China (Technology)*、《航天器环境工程》《飞控与探测》《动力学与控制学报》等编委。培养的博士生 5 人获得清华大学优秀博士论文奖, 2 人获得全国优秀博士论文奖。

摘要 小行星捕获对研究行星起源、地球生命来源、防御小行星撞击地球和开采行星矿产资源具有重要的意义。由于现有的推进器能力不足, 小行星捕获任务中优化小行星捕获所需要的速度增量是任务成败的关键。本文分别从利用引力辅助轨道优化、连续小推力轨迹优化、小行星捕获任务轨道优化设计及小行星临时捕获等 4 个方向介绍小行星捕获轨道优化方面国内外研究进展及现状。基于对上述研究现状的分析, 尝试展望小行星捕获轨道优化研究的未来发展趋势。

关键词 小行星捕获, 引力辅助, 共振轨道, 连续小推力

中图分类号: V412.4 文献标识码: A doi:10.6052/1000-0879-19-106

REVIEW ON OPTIMIZATION OF ASTEROID CAPTURE ORBITS

BAOYIN Hexi^{*,1)} BAO Changchun^{†,2)}

^{*} (School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[†] (Aviation College, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract The asteroid is of great significance for studying the formation of planets, the origin of life on the Earth, the defense against the collision of asteroids to the Earth and the mining on asteroids. Due to the insufficient capacity of the existing propulsion technology, the velocity increment needed to optimize the asteroid capture is the key for a successful capture mission. This paper reviews the capture orbit optimization method for asteroid and the extended capture period with the impulse thrust and low-thrust propulsions, including the strategy to capture asteroids by the gravity assisted and resonant orbital techniques, the continuous low thrust and temporary asteroid capture, and the scheme of extending the capture period.

Key words asteroid capture, gravity assisted, resonant orbits, continuous low-thrust

本文于 2019-03-19 收到。

1) E-mail: baoyin@tsinghua.edu.cn

2) E-mail: imut007@163.com

引用格式: 宝音贺西, 包长春. 小行星捕获轨道优化研究综述. 力学与实践, 2019, 41(5): 511-519

Baoyin Hexi, Bao Changchun. Review on optimization of asteroid capture orbits. *Mechanics in Engineering*, 2019, 41(5): 511-519

小行星是太阳系中数量最多的一类天体,90%以上小行星分布于火星与木星之间,部分分布于地球附近,近日距离小于1.3 AU (天文单位, $1 \text{ AU} = 1.49597870 \times 10^{11} \text{ m}$) 的轨道上,称其为近地小行星,因其轨道接近地球,成为最为引人关注的一类天体。截止目前,发现的近地小行星数目约2万颗。

小行星捕获探测具有重要的科学意义,例如:可能为地球生命起源及恐龙灭绝提供线索^[1-2]。近地小行星在长期的行星及太阳摄动下,可能改变其轨道撞击地球而毁灭地球文明^[3]。根据小行星探测器观测到的小行星构成、成分以及采样返回和地球陨石分析可知,小行星上有稀缺资源^[4]。将来技术成熟后可开采小行星资源,缓解地球资源面临枯竭的局面^[5]。

随着航天技术的发展,小行星探测成为深空探测的热点。近20年来,美国、欧洲、日本成功实施了小行星飞越、绕飞、着陆和采样返回探测任务。1991年美国发射的Galileo号探测器在探测木星的途中飞跃了Gaspera和Ida小行星,较近距离观测了小行星大小、形状、陨击坑,分析其表面物质及环境特征^[6]。NASA于2016年发射的OSIRIS-REX探测器对近地小行星1999RQ36进行了近距离绕飞、接近和采样返回等探测活动^[7]。ESA在2005年启动了Don Quijote任务,通过撞击小行星验证小行星轨道技术,研究小行星表面形成的陨石坑,同时在小行星上进行了成分分析等试验^[8]。2014年11月,ESA罗塞塔探测器抵达67P彗星,并释放菲来着陆器实现着陆。日本于2003年发射的Hayabusa探测器,对近地小行星Itokawa进行了近距离形状测绘、引力测试和表面碎石块成分分析等试验,并在2010年带着该小行星表面样本返回地球。2014年,日本发射了Hayabusa2探测器,目前正在对小行星Ryugu进行小天体探测活动^[9]。

与美、日、欧相比,我国的深空探测起步晚、起点高、发展快。经过嫦娥三期任务,我国在月球地貌测绘、表面土壤分析、月面软着陆和日地拉格朗日点L2轨道设计与控制等技术方面取得了突破性进展,为进一步载人登月及深空探测任务奠定了良好的基础^[10]。嫦娥二号探测器,完成为期几个月的既定任务后,利用剩余燃料于2011年6月奔向150万千米外的日地L2点环绕轨道,我国首次对月球外的太空

开展探测。又于2012年12月,在距离地球700万千米处,以小于1 km的距离,相对速度10.73 km/s飞越了近地小行星图塔蒂斯(4179),并传回该小行星图片^[11]。

2013年美国提出小行星重定向计划(asteroid redirect mission, ARM),出于种种原因,2017年取消了该计划。ARM计划分析了两种方案,即捕获整个小行星或从目标小行星表面取一块矿石^[12],方案分四步:第一步,根据探测器能提供的最大功率、任务时间、接近地球时刻、小行星结构成分类型及整个捕获过程需要速度增量等约束条件,确定捕获目标和捕获质量;第二步,探测器从地面发射到近地球轨道,在探测器自带40 kW电推进器的推动下,将探测器轨道远地点缓慢提高到月球高度,并在月球引力辅助下进入逃逸地球轨道,随后在电推进器推动作用下奔向目标小行星;第三步,探测器接近目标小行星之后,开展为期90天的小行星近距离探测,获取高精度自旋状态和详细的形状尺寸,之后进行消旋机动捕获;第四步,电推进器将捕获体推到地月系统,通过月球引力辅助将C3降低到小于零的绕地高轨道,此轨道不稳定。因此,月球引力辅助之后经过4个月时间将小行星捕获到绕月逆向稳定轨道,等待载人探测器开展着陆探测。

探测捕获到地球或月球轨道上的小行星,任务周期更短、技术要求更低,其上可开展各种相关科学试验,甚至为人类移民外太空做预先研究。小行星捕获任务还可验证探测器的小行星附着、小行星结构特征识别、小行星撞击后尘埃分析和小行星附近机动等小行星防御的关键技术。小行星捕获任务可验证小行星能源利用与矿物资源开采等技术,研究太阳系的起源与演化、水的存在可能与生命活动等。本文将结合我国未来小行星探测任务计划的背景,综述国内外小行星捕获轨道优化及其相关研究现状及发展动态。

1 行星引力辅助轨道优化

深空探测与地球附近的航天任务不同,探测目标为太阳系内其他行星或小行星。深空探测任务一般具有飞行时间长、轨道转移所需能量大等特点,所以对探测器推进系统、测控、导航和控制要求高。为了节约发射成本和提高探测器有效载荷能力,多数深空探测器考虑借助天体引力辅助提高飞行能力。

小行星捕获任务中合理地利用引力辅助技术可大大节省燃料或达到捕获更大质量小行星的目的。

引力辅助是在深空探测过程中有意设计探测器轨道经过行星附近并利用行星引力来实现减速、加速或转向,使探测器奔着目标方向前进。相比探测器的飞行时间,引力辅助时间很短,可认为引力辅助瞬间完成,因此,可将引力辅助简化为脉冲变轨,表述为探测器轨道经过引力辅助天体附近时,其相对日心惯性系的位置保持不变而速度产生突变的过程。

1973年美国发射的水星探测器 Mariner-10 在行星探测任务中首次验证了引力辅助技术。Mariner-10 经过一次金星引力辅助后到达了水星^[13]。Koblik 等^[14]研究了经过地球、金星和水星引力辅助来实现太阳帆探测器近距离探测太阳活动的方案,结果表明金星引力辅助对增加探测器轨道偏心率、减少近日点距离效果最为明显。Sims^[15]提出基于引力辅助的 V_{∞} 杠杆方法,并用该方法设计了探测金星和小行星的低能量发射轨道。Strange 等^[16]提出了基于轨道能量的行星引力辅助序列图解法,在太阳系行星探测任务初级设计阶段使用该图解法能快速找出可行的引力辅助序列。Niehoff^[17]分析了太阳系行星引力辅助在行星探测任务中的影响,经分析得到,金星和火星引力辅助在木星探测任务中作用很大,木星引力辅助作用最为明显;在土星及天王星探测任务中,使用木星引力辅助可极大地减少到达时间。Casalino 等^[18]研究了利用火星引力辅助来探测主带小行星任务和利用金星及木星引力辅助优化小推力探测逃逸太阳系的方法。Vasile 等^[19]提出了一种使用多次引力辅助轨迹优化方法,并用算例验证了该方法的有效性。

国内学者在利用引力辅助深空探测轨迹优化方面也做了大量的工作。Chen 等^[20]研究了利用 Tisserand 图确定火星引力辅助来探测直径大于 100 km 的主带小行星方案。Qi 等^[21]在平面圆限制性三体模型内推导了月球引力辅助机制。Yang 等^[22]研究了利用多次引力辅助的小行星之间转移轨道优化方法。Xu 等^[23]设计了使用地球引力辅助从近地小行星采样返回方案。崔平远等^[24]采用多次引力辅助方法评价了小行星可接近性,得到了具有科学价值与工程可实现兼备的目标星。侯艳伟等^[25]采用基于等高线图的引力辅助方法设计了借助金星引力辅助的火星探测方案。杨洪伟等^[26]比较了引力辅助简化

等效模型与精确动力学模型的引力辅助结果,发现引力辅助脉冲等效模型精度较高。乔栋等^[27]考虑引力辅助改变的速度量跟行星质量相关的因素,提出了一种气动加引力辅助方案,给出使用该方案的轨道设计拼接条件,并采用该方案设计了探测 Ivar 小行星的转移轨道,验证了该算法的有效性。谭高威等^[28]研究了采用多次引力辅助的深空探测全局优化方案,并用地球到火星、木星和土星的算例验证了此方法的有效性。

对于那些发射要求高的深空探测任务,采用一次引力辅助所提供的速度增量有限。因此,可采用多颗天体序列辅助或在同一个行星上采用两次或两次以上的共振引力辅助来提高引力辅助的效果。共振轨道方案已多次应用在深空探测任务中。NASA 发射的 Galileo 探测器采用的引力辅助序列中有两次采用了地球共振轨道。第一次地球引力辅助之后探测器进入两倍于地球轨道周期的共振轨道,两年后再次返回地球采用地球引力辅助提高了其能量奔向木星^[29]。Sanchez 等^[30]根据阿莫尔型近地小行星特点,采用地球共振轨道技术分析了其捕获可行性。Vaquero 等^[31]研究了采用共振轨道原理的地月系统平衡点之间转移轨道设计方法。李小玉等^[32]在基于圆锥曲线拼接模型内,推导了引力辅助之后的轨道周期、倾角和偏心率的解析表达式,给出共振轨道在提高轨道倾角与能量方面的实例。刘林^[33]系统地分析了天体力学中轨道共振问题,并介绍了几种轨道共振的动力学模型。

2 连续小推力轨迹优化

在深空探测的初期,多数任务采用化学推进作为主要的变轨手段。化学推进器特点是推力大、作用时间短,因此,在轨道设计过程中将其认为是脉冲变轨。但是,化学推进的比冲小,难以满足多目标探测等新兴深空探测任务的要求。在此背景下,高比冲电推进技术蓬勃发展。电推进比冲大,效率高,在小行星捕获任务中采用电推进方案可节省燃料消耗,目前主流电推进技术持续产生的推力为 10~500 mN 的量级。随着深空探测任务要求多样化,越来越多地倾向于使用连续小推力推进技术。连续小推力提供的推力小、比冲大、持续时间长,单位质量燃料所提供的速度增量大。因此,对于使用连续小推力的深空探测任务,通常选择其任务时间和消耗燃料作为优

化指标。由于连续小推力作用下的动力学方程没有解析解,只能采取数值积分来求解轨迹。因此使用连续小推力的轨迹优化成为深空探测任务设计中的关键技术问题,国内外许多学者都致力于开发有效的小推力轨迹优化方法。

1998年美国发射的Deep Space-1探测器首次验证了连续小推力深空转移技术。该任务的成功奠定了小推力技术在深空探测任务中应用的基础。Haberkorn等^[34]提出了基于同伦算法的连续小推力燃料最优地球轨道探测器转移方法。Zhang等^[35]研究了基于流形的日地与地月系统间小推力转移轨道。McConaghy等^[36]提出了一种结合连续小推力与引力辅助的深空探测轨道优化方案,并用实例验证了该方法的有效性。Mantia等^[37]采用间接法优化了探测器从地球影响球到地球低轨道燃料最优转移轨道方案。

国内学者也开展了大量连续小推力优化研究工作。李俊峰等^[38]总结了国内外相关领域内连续小推力深空探测轨迹优化方法。Jiang等^[39]针对间接法优化轨迹收敛速度慢、对协态变量初值敏感性等特点,提出了一种间接优化方法,该方法对协态变量归一化处理之后从能量最优同伦过渡到燃料最优,提高了算法的收敛性,并用实例验证了该方法的收敛稳定性。唐高等^[40]提出了一种在分段轨迹优化的基础上进行整体轨迹优化的方法,采用该方法对第七届国际深空探测轨迹优化竞赛前五名的结果进一步优化,结果表明,该算法能将优化指标提高5%。尚海滨等^[41]给出了一种基于高斯伪光谱配点的快速优化算法,并以太阳能电推进探测火星和金星为例,验证了该算法的有效性。潘迅等^[42]基于同伦方法在限制性三体模型内研究了地球同步轨道到地月拉格朗日1点的小推力转移轨迹。郭铁丁^[43]研究了连续小推力轨迹优化间接法和伪谱法。

3 小行星捕获方案

小行星捕获任务可分为发现捕获目标、识别目标小行星内外部结构及轨道参数、捕获小行星和推动目标小行星到地球轨道等四个步骤。由于大部分燃料消耗在小行星推到地球轨道过程中,因此,小行星捕获轨道优化设计决定着捕获任务的成败。

3.1 小行星捕获推进系统

自从Baoyin等^[44]提出将小行星捕获至地球附近进一步探测概念之后,相关领域学者对小行星捕获任务进行了广泛而深入的研究。NASA对小行星重定向计划开展了全面的可行性分析,探测器配备50kW太阳能电推进器后,可将直径7m左右,质量约500t的小行星整体捕获到地月系统内。对于小行星捕获任务,人们深入研究了不同推进器的捕获方案。Sanchez等^[45]从利用小行星资源角度出发,在圆锥曲线拼接模型内研究了用脉冲机动捕获近地小行星方案,并得到了在一定速度增量阈值内能捕获到的地球附近的小行星资源分布图;开采月球资源速度增量要比月球逃逸速度大,因此,开采捕获的小行星资源成本相比开发月球资源要低。Massonnet等^[46]为了防御小行星撞击地球目的,提出了在一个直径为20~40m小行星上安装抛石机,不断抛出小行星表面碎石来改变小行星速度的方案,并验证了使用该方案将小行星捕获到日地拉格朗日点的技术可行性。Fast^[47]为了验证小行星开采技术,提出将一个直径2m的小行星捕获到国际空间站的计划。Brophy等^[48]研究了配有40kW电推进器的探测器将一个直径2m质量约10t的近地小行星捕获到国际空间站的可行性。Ross^[49]以近地小行星为目标,评估了小行星资源开采、轨迹优化、星上就地开采及小行星开采的可行性。Sanchez等^[50]提出了基于多脉冲机动解析模型,从开普勒轨道参数空间内筛选出目标行星的方法,并采用该方法选出5个目标小行星验证了捕获小行星过程。Bazzocchi等^[51]对离子束引导器、探测器推进器、引力拖车、激光烧器和抛石器等五种捕获小行星方案的系统质量、系统体积、技术成熟度、速度增量、任务风险度、任务经济支出、任务需要平均功耗、任务自动化程度、目标选择难度和长远期价值等十个方面进行了充分比较,考虑到任务的十个方面的标准得出了离子束引导器、探测器推进器和引力拖车优于激光烧器和抛石器方案的结论。

3.2 双小行星捕获

目前观测到的小行星当中,有些小行星自带围绕主星的小卫星,也有质量相当的两个小行星绕其公共质心运动,即双小行星系统。由于其自身特有动力学特性,当双小行星质心轨道接近地球或其他行

星时,存在其中之一被地球或其他行星捕获的可能性。Borum 等^[52]对双小行星参数进行分析后认为双小行星质心相对地球的速度和其质量是影响双小行星捕获的主要因素,并对 1999HF1 双小行星捕获的过程进行了数值仿真。Tsui^[53]在行星、卫星和双小行星组成的四体系统内研究了双小行星靠近主卫星时的捕获情况。Liu 等^[54]基于平面抛物线限制性三体模型研究了双小行星系统的捕获可能性,研究中考虑了两种方案,一种为将双小行星初始状态提前放置在可捕获区域内;另一种为在双小行星离地球最近点施加一个脉冲将其包裹在零速度曲面内。

3.3 低能量转移小行星捕获轨道

限制性三体模型内拉格朗日点附近的稳定流形和不稳定流形无限接近与其相切的周期轨道,在深空探测任务中这类流形常用来实现低能量轨道转移。Tan 等^[55]提出了结合地球引力辅助和气动阻力来捕获小行星的策略,首先给小行星施加了一个脉冲推力,在地球引力辅助和气动阻力共同作用下将小行星速度减小,在日地拉格朗日点附近稳定流形处再施加一次脉冲,让其顺着流形捕获到拉格朗日点附近稳定轨道上。研究结果表明,该方法与直接流形捕获相比,大大缩短了捕获时间。Tan 等^[56]研究了用动量交换方法捕获小行星的方案。在该方案中,首先在一个小行星上施加一个脉冲,让其撞击另一个大的小行星而改变其轨道之后奔向地球,在日地拉格朗日点稳定流形处施加一个脉冲,捕获到拉格朗日点附近周期轨道上。此方法虽然理论上可行,但是,由于小行星撞击过程中存在质量、形状和材料属性等因素的不确定性,需要大量前期准备工作。Mingotti 等^[57]研究了采用日地与地月双三体模型内流形拼接方法将小行星捕获到地月系统拉格朗日点周期轨道方案。Yárnoz 等^[58]在限制性三体模型内采用低能量转移轨道方法研究了将小行星捕获到拉格朗日点附近 Lyapunov 及 Halo 轨道方案。该方案中,首先施加一次脉冲让小行星偏离原始轨道,在小行星轨道与稳定流形交点处再施加一次脉冲让其顺着稳定流形进入最终捕获轨道,用该方案计算得到 12 个捕获速度增量小于 500 m/s 的目标小行星,捕获小行星 2006RH120 至 Halo 轨道的速度增量最小,仅需要 58 m/s。Tan 等^[59]研究了直接法和间接法捕获小行星到地月拉格朗日点的方案。直接法

实施过程为,在太阳、地球、月球和小行星构成的四体模型内施加两次脉冲将小行星轨道切入到地月系统稳定流形中,最终将它捕获到地月拉格朗日点附近周期轨道;间接法实施过程为,利用日地和日月双三体模型内流形拼接法捕获小行星到拉格朗日点附近周期轨道。分析结果表明,直接法相比于间接法捕获需要时间更短。Ceriotti 等^[60]分析了用低能量流形将小行星捕获到拉格朗日点附近周期轨道的可控性,结果表明,捕获小行星的质量对于推力值一定的控制起关键性作用,捕获轨道和周期轨道的稳定性是影响整个任务可控性的主要因素。Tang 等^[61]研究了连续小推力捕获小行星轨道优化方案,先采用两点 Lambert 转移问题优化方法得到目标小行星初始转移时刻及转移时间,再以该值为初值连续小推力优化了初始时刻到接入日地拉格朗日点附近周期轨道稳定流形的转移轨道。

3.4 引力辅助小行星捕获轨道

小行星捕获任务中合理的设计引力辅助可达到节省发射能量、降低速度增量的目的。He 等^[62]以中国第六届空间轨道设计竞赛题目为背景,研究了探测器从 200 km 地球圆轨道前往小行星采样返回任务。研究中采用了月球共振轨道引力辅助方法,降低了探测器发射能量和采样返回地球捕获速度增量。Bao 等^[63]研究了分别采用地球、月球和地一月引力辅助的小行星捕获轨道优化方案。结果表明,月球引力辅助对小行星捕获轨道优化作用最明显,采用月球引力辅助捕获小行星 2000SG344 速度增量为 78.75 m/s,相对地球速度小于 1.8 km/s 的小行星用一次月球引力辅助就可被地球捕获。Gong 等^[64]提出了在地球、月球和小行星构成的限制性三体模型内分析了月球引力辅助捕获小行星的雅可比常数需要满足的条件,根据满足捕获条件的雅可比常数得到了小行星捕获轨道分布空间。Qi 等^[65]在平面四体模型内研究了短时捕获小行星问题。以小行星进入地月系统影响球边界位置与影响球切线夹角为空间参数,进入影响球时刻的月球位置为时间参数,研究了不同雅可比常数下空间和时间参数与小行星在影响球内停留时间的关系,得到了月球引力辅助即时间参数对小行星停留时间起关键作用的结论。Gong 等^[66]在太阳、行星、卫星和第四体构成的平面四体模型内推导了第四体进入卫星影响球内时的能

量交换表达式。结果表明,能量交换量与第四体相对卫星的双曲线轨道形状与方向有着直接关系,当行星-卫星和第四体双曲线轨道拱线夹角小于 180° 时能量交换量减小。Lladó等^[67]研究了连续小推力将小行星捕获到日地拉格朗日2点的轨道优化方法,该优化方法首先采用微分演化算法得到离散化的轨道位置和速度量,再以打靶方法进一步优化得到最终光滑轨道。Hasnain等^[68]在双二体圆锥曲线拼接模型内研究了小行星捕获方案,首先将近地小行星按轨道偏心率、轨道倾角和靠近地球距离筛选出23个候选目标小行星,在日星二体模型内持续小推力推动小行星进入地球影响球,在地球影响球内近地点施加脉冲将其捕获到绕地球圆轨道,23颗候选目标中捕获速度增量最小的为700 m/s。Baoyin等^[44]在限制性三体模型内利用小行星雅可比能量 $C > C_1$ 时其零速度面封闭的特性,计算了捕获小行星需要的速度增量,采用该方法捕获2009BD需要最小速度增量为410 m/s。

4 临时捕获小行星

临时捕获小行星是小行星靠近行星的一段时间内,相对捕获行星其二体能量小于零,其运动范围在3倍希尔半径内的小行星^[69]。由于其临时捕获特性,为地面观测或进一步开展研究小行星提供了好机会。研究临时捕获小行星的轨道特性对临时捕获期间延长其捕获时长具有现实意义。

近年来一些学者研究了用地面的光学设备或发射探测器近距离探测这些临时捕获小行星的方案^[70]。Vieira等^[71]在限制性三体模型内研究了木星临时捕获小行星在稀薄空气阻力作用下成为木星卫星的可能性。研究认为仅考虑空气阻力的情况下临时捕获小行星成为木星卫星的可能性小,如果考虑到临时捕获小行星在绕木星运动中碰撞木星周围的小碎片,它成为木星卫星的可能性则大大增加。Fedorets等^[72]研究了地月系统内临时捕获小行星的轨道参数及其质量分布情况。对于已临时捕获的小行星,Chyba等^[73]研究了地球静止轨道到临时捕获小行星的燃料最优小推力转移轨道。Haapala等^[74]研究基于流形的探测临时捕获小行星轨迹的方法。Urrutxua等^[75]研究了延长临时捕获小行星捕获时长的方案。他们以小行星2006RH120为研究目标,分析了在其近地点附近施加小推力之后,

小推力持续时间与延长的捕获时长之间的关系。结果表明,对于2006RH120施加持续6个月的0.27 N小推力可获得32 m/s速度增量,能将小行星捕获时长延长至5年以上。Anderson等^[76]分别采用圆型限制性三体模型和椭圆型限制性三体模型来分析2006RH120临时捕获期间的混沌性,通过比较不同模型中的计算结果后得到地球偏心率在临时捕获过程中起到关键作用的结论。

5 结束语

自从20世纪60年代人类迈出探测外太空的第一步,深空探测活动越来越频繁,探测的对象从近地空间发展到太阳系各大行星及小行星。本文以当前小行星探测热点为背景,主要综述了小行星捕获任务的目标选择、轨道优化、临时捕获小行星的轨道特点及延长其捕获时长等问题,考虑到小行星捕获质量大及现有推进器技术发展状况,值得开展更深入研究的工作有如下几个方面:

(1) 共振轨道序列方法。可根据工程约束条件利用图解法设计出不同共振比序列的方案。但是,此过程主要依靠穷举法来找出最优共振比序列。为了自主地找出最优共振比序列,基于图解法的自主算法将成为工程上亟待解决的问题。

(2) 高精度模型中临时捕获小行星的必要条件。由于临时捕获小行星自身特征,它将成为最低成本的捕获目标,为了得到更精准的临时捕获小行星的筛选条件,进一步考虑在地球轨道偏心率和第三体摄动的高精度模型内,分析临时捕获小行星轨道的特征分布,获得更精确的临时捕获小行星必要条件将变得更有价值与意义。

(3) 多个连续小推力推进器轨道优化方案。考虑到小行星捕获任务的捕获质量大、轨道转移时间长和冗余设计目的,将来的小行星捕获任务可采取多个连续小推力推进器协同工作的方案,这将给研究人员带来新的轨道优化设计的难度,将成为小行星捕获轨道优化中值得研究的问题。

参 考 文 献

- 1 Cottin H, Kotler JM, Bartik K, et al. Astrobiology and the possibility of life on Earth and elsewhere. *Space Science Reviews*, 2017, 209(1-4): 1-42
- 2 Brusatte SL, Butler RJ, Barrett PM, et al. The extinction of the dinosaurs. *Biological Reviews*, 2015, 90(2): 628-642

- 3 Rumpf C, Lewis HG, Atkinson PM. Global impact distribution of asteroids and affected population. 2015 IAA Planetary Defense Conference, Frascati, Roma, 2015
- 4 Lindsay SS, Marchis F, Emery JP, et al. Composition, mineralogy, and porosity of multiple asteroid systems from visible and near-infrared spectral data. *Icarus*, 2015, 247: 53-70
- 5 Wilkerson JJ. Celestial gold mines: mining for natural resources on asteroids. *J. Animal & Envtl. L.*, 2017, 9: 116
- 6 Johnson TV, Yeates CM, Young R. Space science reviews volume on Galileo mission overview. *Space Science Reviews*, 1992, 60(1-4): 3-21
- 7 Lauretta DS, Balram-Knutson SS, Beshore E, et al. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1-2): 925-984
- 8 Gálvez A, Carnelli I. ESA's Don Quijote Mission: an opportunity for the investigation of an artificial impact crater on an asteroid. 25th International Symposium on Space Technology and Science, Kanazawa, Japan, 2006
- 9 Fujiwara A, Kawaguchi J, Yeomans DK, et al. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa. *Science*, 2006, 312(5778): 1330-1334
- 10 崔平远. 深空探测: 空间拓展的战略制高点. 人民论坛·学术前沿, 2017(5): 13-18
Cui Pingyuan. Deep space exploration: the strategic apex of spatial expansion. *Frontiers*, 2017(5): 13-18 (in Chinese)
- 11 叶培建, 黄江川, 孙泽洲等. 中国月球探测器发展历程和经验初探. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 543-558
Ye Peijian, Huang Jiangchuan, Sun Zezhou, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe. *Science China Technological Science*, 2014, 44(6): 543-558 (in Chinese)
- 12 Strange N, Landau D, McElrath T, et al. Overview of mission design for NASA asteroid redirect robotic mission concept. The 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, DC, 2013
- 13 Shirley DL. The mariner 10 mission to venus and mercury. *Acta Astronautica*, 2003, 53(4-10): 375-385
- 14 Koblik V, Polyakhova E, Sokolov L. Controlled solar sail transfers into near-sun regions combined with planetary gravity-assist flybys. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2003, 86(1): 59-80
- 15 Sims JA, Longuski JM, Staugler AJ. V_{∞} leveraging for interplanetary missions: Multiple-revolution orbit techniques. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1997, 20(3): 409-415
- 16 Strange NJ, Longuski JM. Graphical method for gravity-assist trajectory design. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(1): 9-16
- 17 Niehoff JC. Gravity-assisted trajectories to solar-system targets. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1966, 3(9): 1351-1356
- 18 Casalino L, Colasurdo G. Mars gravity assist to improve missions towards main-belt asteroids. *Acta Astronautica*, 2003, 53(4-10): 521-526
- 19 Vasile M, Pascale PD. Preliminary design of multiple gravity-assist trajectories. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(4): 794-805
- 20 Chen Y, Baoyin H, Li J. Accessibility of main-belt asteroids via gravity assists. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(2): 623-632
- 21 Qi Y, Xu S. Mechanical analysis of lunar gravity assist in the Earth-Moon system. *Astrophysics and Space Science*, 2015, 360(2): 55
- 22 Yang H, Li J, Baoyin H. Low-cost transfer between asteroids with distant orbits using multiple gravity assists. *Advances in Space Research*, 2015, 56(5): 837-847
- 23 Xu R, Cui P, Qiao D, et al. Design and optimization of trajectory to near-Earth asteroid for sample return mission using gravity assists. *Advances in Space Research*, 2007, 40(2): 220-225
- 24 崔平远, 乔栋, 崔祐涛等. 小行星探测目标选择与转移轨道方案设计. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(6): 677-685
Cui Pingyuan, Qiao Dong, Cui Hutao, et al. Target selection and transfer trajectories design for exploring asteroid mission. *Science China Technological Science*, 2010, 40(6): 677-685 (in Chinese)
- 25 侯艳伟, 岳晓奎, 张莹. 基于脉冲机动的引力辅助深空探测轨道设计. 西北工业大学学报, 2012, 30(4): 491-496
Hou Yanwei, Yue Xiaokui, Zhang Ying. Design of gravity-assist trajectory based impulsive maneuver. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2012, 30(4): 491-496 (in Chinese)
- 26 杨洪伟, 陈杨, 李俊峰. 精确动力学模型中的行星引力辅助轨道设计. 中国空间科学技术, 2013(2): 1-6
Yang Hongwei, Chen Yang, Li Junfeng. Trajectory design of gravity assist in the high-fidelity dynamic model. *Chinese Space Science and Technology*, 2013(2): 1-6 (in Chinese)
- 27 乔栋, 崔祐涛, 崔平远等. 气动-引力辅助转移轨道研究及在星际探测中的应用. 宇航学报, 2005, 26(5): 541-546
Qiao Dong, Cui Hutao, Cui Pingyuan, et al. Study of aerogravity assist transfer trajectory and application in interplanetary exploration missions. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(5): 541-546 (in Chinese)
- 28 谭高威, 高扬, 杨新. 深空探测器多次引力辅助转移轨道全局搜索. 航天器工程, 2012, 21(2): 18-27
Tan Gaowei, Gao Yang, Yang Xin. Global search of multiple gravity assist transfer trajectories for deep space probes. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(2): 18-27 (in Chinese)
- 29 Diehl R, Kaplan D, Penzo P. Satellite tour design for the Galileo mission. 21st Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1983
- 30 Sanchez Cuartielles JP, Alessi EM, Garcia Yarnoz D, et al. Earth resonant gravity assists for asteroid retrieval missions. 64th International Astronautical Congress, Beijing, China, 2013
- 31 Vaquero M, Howell KC. Leveraging resonant-orbit manifolds to design transfers between libration-point orbits. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(4): 1143-1157
- 32 李小明, 郑建华. 太阳中纬度探测共振借力轨道设计. 北京航空航天大学学报, 2013(5): 574-579

- Li Xiaoyu, Zheng Jianhua. Resonant gravity-assist trajectory design for Sun's middle latitude exploration. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013(5): 574-579 (in Chinese)
- 33 刘林. 轨道共振问题. *天文学进展*, 1986(1): 43-52
Liu Lin. Orbital resonance. *Progress in Astronomy*, 1986(1): 43-52 (in Chinese)
- 34 Haberkorn T, Martinon P, Gergaud J. Low thrust minimum-fuel orbital transfer: a homotopic approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 27(6): 1046-1060
- 35 Zhang P, Li J, Baoyin H, et al. A low-thrust transfer between the Earth-Moon and Sun-Earth systems based on invariant manifolds. *Acta Astronautica*, 2013, 91: 77-88
- 36 McConaghy TT, Debban TJ, Petropoulos AE, et al. Design and optimization of low-thrust trajectories with gravity assists. *Journal of spacecraft and rockets*, 2003, 40(3): 380-387
- 37 Mantia ML, Casalino L. Indirect optimization of low-thrust capture trajectories. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(4): 1011-1014
- 38 李俊峰, 蒋方华. 连续小推力航天器的深空探测轨道优化方法综述. *力学与实践*, 2011, 33(3): 1-6
Li Junfeng, Jiang Fanghua. Survey of low-thrust trajectory optimization methods for deep space exploration. *Mechanics in Engineering*, 2011, 33(3): 1-6 (in Chinese)
- 39 Jiang F, Baoyin H, Li J. Practical techniques for low-thrust trajectory optimization with homotopic approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 35(1): 245-258
- 40 唐高, 蒋芳华. 多小行星探测的连续小推力轨迹优化研究. 北京力学学会第二十二届学术年会, 北京, 2016
- 41 尚海滨, 崔平远, 徐瑞等. 基于高斯伪光谱的星际小推力转移轨道快速优化. *宇航学报*, 2010(4): 1005-1011
Shang Haibin, Cui Pingyuan, Xu Rui, et al. Fast optimization of interplanetary low-thrust transfer trajectory based on Gauss pseudospectral algorithm. *Journal of Astronautics*, 2010(4): 1005-1011 (in Chinese)
- 42 潘迅, 泮斌峰. 基于同伦方法三体问题小推力推进转移轨道设计. *深空探测学报*, 2017, 4(3): 270-275
Pan Xun, Pan Binfeng. Optimization of low-thrust transfers using homotopic method in the restricted three-body problem. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(3): 270-275 (in Chinese)
- 43 郭铁丁. 深空探测小推力轨迹优化的间接法与伪谱法研究. [博士论文]. 北京: 清华大学, 2012
Guo Tieding. Study of indirect and pseudospectral methods for low thrust trajectory optimization in deep space exploration. [PhD Thesis]. Beijing: Tsinghua University, 2012 (in Chinese)
- 44 Baoyin H, Chen Y, Li JF. Capturing near earth objects. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10(6): 587
- 45 Sanchez JP, McInnes C. Assessment on the feasibility of future shepherding of asteroid resources. *Acta Astronautica*, 2012, 73: 49-66
- 46 Massonnet D, Meyssignac B. A captured asteroid: our David's stone for shielding earth and providing the cheapest extraterrestrial material. *Acta Astronautica*, 2006, 59(1-5): 77-83
- 47 Fast L. Capture a 2 m diameter asteroid, a mission proposal. AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition, Long Beach, California, 2011
- 48 Brophy JR, Gershman R, Landau D, et al. Feasibility of capturing and returning small near-Earth Asteroids. 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, 2011
- 49 Ross SD. Near-Earth asteroid mining. Space Industry Report, 2001
- 50 Sanchez Cuartielles JP, Garcia Yarnoz D, McInnes C. Near-Earth asteroid resource accessibility and future capture mission opportunities. Global Space Exploration Conference, Washington, DC, 2012
- 51 Bazzocchi M, Emami MR. A systematic assessment of asteroid redirection methods for resource exploitation. *Journal of Texture Studies*, 2013, 15(2): 173-178
- 52 Borum A, Burns J, Wentzel P, et al. Capturing near-Earth asteroids using a binary exchange mechanism. Virginia Space Grant Consortium Student Research Conference, Williamsburg, VA, 2012.
- 53 Tsui KH. Satellite capture in a four-body system. *Planetary and Space Science*, 2002, 50(3): 269-276
- 54 Liu X, McInnes C, Ceriotti M. Strategies to engineer the capture of a member of a binary asteroid pair using the planar parabolic restricted three-body problem. *Planetary and Space Science*, 2018, 161: 5-25
- 55 Tan M, McInnes CR, Ceriotti M. Low-energy near Earth asteroid capture using Earth flybys and aerobraking. *Advances in Space Research*, 2018, 61(8): 2099-2115
- 56 Tan M, McInnes CR, Ceriotti M. Low-energy near-Earth asteroid capture using momentum exchange strategies. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 41(3): 632-643
- 57 Mingotti G, Sánchez JP, McInnes CR. Combined low-thrust propulsion and invariant manifold trajectories to capture NEOs in the Sun-Earth circular restricted three-body problem. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2014, 120(3): 309-336
- 58 Yárnoz DG, Sanchez JP, McInnes CR. Easily retrievable objects among the NEO population. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2013, 116(4): 367-388
- 59 Tan M, McInnes CR, Ceriotti M. Direct and indirect capture of near-Earth asteroids in the Earth-Moon system. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2017, 129(1-2): 57-88
- 60 Ceriotti M, Sanchez JP. Control of asteroid retrieval trajectories to libration point orbits. *Acta Astronautica*, 2016, 126: 342-353
- 61 Tang G, Jiang F. Capture of near-Earth objects with low-thrust propulsion and invariant manifolds. *Astrophysics and Space Science*, 2016, 361(1): 10
- 62 He S, Zhu Z, Peng C, et al. Optimal design of near-Earth asteroid sample-return trajectories in the Sun-Earth-Moon

- system. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, 32(4): 753-770
- 63 Bao C, Yang H, Barsbold B, et al. Capturing near-Earth asteroids into bounded Earth orbits using gravity assist. *Astrophysics and Space Science*, 2015, 360(2): 61
- 64 Gong S, Li J. Asteroid capture using lunar flyby. *Advances in Space Research*, 2015, 56(5): 848-858
- 65 Qi Y, de Ruiter A. Low-energy transfers to long-term capture in the Earth-Moon system. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 836-849
- 66 Gong S, Li J. Planetary capture and escape in the planar four-body problem. *Astrophysics and Space Science*, 2015, 357(2): 155
- 67 Lladó N, Ren Y, Masdemont JJ, et al. Capturing small asteroids into a Sun-Earth Lagrangian point. *Acta Astronautica*, 2014, 95: 176-188
- 68 Hasnain Z, Lamb CA, Ross SD. Capturing near-Earth asteroids around Earth. *Acta Astronautica*, 2012, 81(2): 523-531
- 69 Granvik M, Vaubaillon J, Jedicke R. The population of natural Earth satellites. *Icarus*, 2012, 218(1): 262-277
- 70 Jedicke R, Bolin B, Bottke WF, et al. Small asteroids temporarily captured in the Earth-Moon system. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2015, 10(S318): 86-90
- 71 Vieira Neto E, Winter OC. Gravitational capture of asteroids by gas drag. *Mathematical Problems in Engineering*, 2009, 2009: 11
- 72 Fedorets G, Granvik M, Jedicke R. Orbit and size distributions for asteroids temporarily captured by the Earth-Moon system. *Icarus*, 2017, 285: 83-94
- 73 Chyba M, Granvik M, Jedicke R, et al. Time-minimal orbital transfers to temporarily-captured natural Earth satellites. *Optimization and Control Techniques and Applications*, 2014, 86: 213-235
- 74 Haapala AF, Howell KC. Trajectory design strategies applied to temporary comet capture including Poincaré maps and invariant manifolds. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2013, 116(3): 299-323
- 75 Urrutxua H, Scheeres DJ, Bombardelli C, et al. Temporarily captured asteroids as a pathway to affordable asteroid retrieval missions. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(11): 2132-2145
- 76 Anderson BD, Lo M. Dynamics of asteroid 2006 RH120: temporary capture phase. 2018 Space Flight Mechanics Meeting, Kissimmee, Florida, 2018

(责任编辑: 胡 漫)