

小天体附近轨道动力学与控制研究现状与展望*

崔平远 乔 栋[†]

北京理工大学宇航学院, 北京 100081

飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081

摘 要 小天体探测是未来深空探测的重点领域之一, 而小天体附近轨道动力学与控制问题是小天体探测任务迫切需要解决的关键问题. 该问题涉及形状不规则小天体附近的动力学环境建模与小天体附近轨道动力学机理. 本文从不规则形状小天体引力场的建模、小天体附近的自然轨道动力学、小天体附近的受控轨道动力学 3 个方面综述了小天体附近轨道动力学与控制的研究现状与发展趋势, 并分析了小天体附近轨道动力学所面临的挑战与难题, 最后对我国未来小天体探测任务可能涉及的轨道动力学与控制问题的发展方向进行了展望.

关键词 小天体探测, 动力学与控制, 不规则引力场, 自然轨道动力学, 受控轨道动力学

中图分类号: V412.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.6052/1000-0992-13-061

1 引 言

小天体探测作为人类了解太阳系形成与演化、生命起源与进化以及防御外来天体撞击的重要途径, 将是二十一世纪深空探测活动的主要内容之一. 小天体因蕴含丰富的太阳系原始物质, 而被称为太阳系的“化石”. 开展对小天体的探测, 获取科学数据, 可为研究太阳系的起源、行星的演化、小天体的撞击与防御等重大基础科学问题提供原始资料. 同时, 也为验证深空探测新技术、提升空间技术研究能力提供有效途径.

对小天体的近距离探测始于 20 世纪 90 年

代, 伴随着空间技术水平的快速提高, 探测方式也由飞越探测向绕飞、着陆、采样返回发展. 近年来, 小天体探测已经成为人类深空探测的重点领域之一, 其中具有代表性的小天体探测任务包括美国的“近地小行星探测 (NEAR)”任务、“星尘 (Stardust)”任务、“深度撞击 (Deep Impact)”任务、日本的“Hayabusa”任务和欧空局的“罗塞塔 (ROSETTA)”任务等, 而这些任务中尤以首次实现小行星环绕与着陆的 NEAR 任务和首次实现附着与采样返回的 Hayabusa 任务最具代表性.

美国的 NEAR 探测器是人类第一颗小行星探测器, 也是迄今唯一实现对小行星绕飞和着

收稿日期: 2013-09-02, 修回日期: 2013-09-19

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB720000); 国家自然科学基金 (11102020); 北京理工大学科技创新团队项目资助.

[†] E-mail: qiaodong@bit.edu.cn

引用格式: 崔平远, 乔栋. 小天体附近轨道动力学与控制研究现状与展望. 力学进展, 2013, 43(5): 526-539 (Cui PY, Qiao D. Research progress and prospect of orbital dynamics and control near small bodies. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(5): 526-539)

陆的探测器. 2000 年 2 月 14 日, NEAR 探测器实现了对形状似马铃薯、尺寸为 $34.4\text{ km} \times 11.2\text{ km} \times 11.2\text{ km}$ 的 433 Eros 小行星的绕飞, 并成功在 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$, $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ 和 $35\text{ km} \times 35\text{ km}$ 的任务轨道上稳定飞行, 验证了 433 Eros 小行星的引力场模型以及小行星附近“冻结轨道”的稳定性. 同时, NEAR 探测器通过对改变轨道倾角和轨道半径实现了对 Eros 小行星表面的全面探测. 2001 年 2 月 12 日, 在完成所有探测任务后, NEAR 探测器着陆在 Eros 小行星表面的鞍状区域. NEAR 任务引发了美国加州理工学院喷气推进实验室 (JPL)、美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室 (APL) 等国际著名机构对不规则形状小天体的精确建模、小天体附近探测器运动机理、弱引力复杂空间环境的动力学机理等基础理论问题的研究和探讨.

日本的 Hayabusa 探测器是人类迄今唯一实现附着与采样返回的小行星探测器. 2005 年 11 月, Hayabusa 探测器实现了对不规则细长形, 尺寸为 $0.535\text{ km} \times 0.294\text{ km} \times 0.209\text{ km}$ 的 25143 Itokawa 小行星的附着和采样. 由于 Itokawa 小行星的尺寸和质量较小, 若无主动控制, 难以形成环绕轨道, 则该任务以悬停方式实现了对小行星的探测. 悬停运动是弱引力小天体附近自然扰动力与主动控制力相结合产生的一种运动形态. Hayabusa 任务作为小天体探测的另一典型代表, 引发了日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 等对小天体附近空间环境力与主动控制力相结合的动力学机理的研究兴趣.

此外, 欧空局推出的登陆彗星的“罗塞塔 (ROSETTA)”任务, 经过长达 10 年的星际飞行, 将于 2014 年中到达 67P / Churyumov-Gerasimenko 彗星 (该彗星形状类似海星, 直径约 4 km). 根据探测任务, 罗塞塔探测器到达彗星后将通过轨道机动进入针对彗星的环绕轨道, 对该彗星进行长期全面观测, 并释放着陆器

(Philae) 对表面进行相关的科学探测. 彗星在飞向近日点的过程中, 彗尾不断增大, 产生大量的气体和尘埃. 这些气体和尘埃将对探测器的环绕和着陆轨道产生重要的影响, 该问题引发了欧空局 (ESA) 的先进概念实验室 (ACT)、美国加州理工学院喷气推进实验室 (JPL) 等机构对彗尾的演化、彗星产生气体和尘埃的动力学及其对附近轨道稳定性的影响等基础问题的研究和探讨.

未来小天体探测任务的开展与实施, 将从简单的飞越向复杂的环绕、着陆、采样返回以及更为复杂的载人小天体探测过渡. 而在此过程中, 小天体附近的轨道动力学与控制问题将成为影响任务成败的关键问题. 本文将从不规则形状小天体引力场的建模、小天体附近的自然轨道动力学、小天体附近的受控轨道动力学 3 个方面综述小天体附近轨道动力学与控制的研究现状与发展趋势及面临的挑战与难题, 并对我国未来小天体探测任务可能涉及的轨道动力学与控制问题的发展方向进行展望.

2 不规则形状小天体引力场的建模问题

引力场建模是研究和分析小天体附近轨道运动特性的基础. 小天体形状各异、形态复杂, 这为小天体精确引力场模型的建立提出了挑战. 常用的引力场建模方法大致可分为两类: (1) 级数逼近法, 此类方法主要是通过采用无穷级数来逼近引力势能, 进而完成引力场建模. 主要有球谐函数模型和椭球谐函数模型; (2) 三维模型逼近法, 此类方法主要是通过采用简化的三维模型来逼近不规则形体, 采用数值计算得到引力势能, 进而完成引力场建模. 主要有三轴椭球体模型、多面体模型和质点群模型.

2.1 球谐函数模型

早在 19 世纪末就有学者提出采用傅立叶

级数来逼近天体引力势函数的方法,但因该方法复杂且收敛速度慢,而未得到广泛应用.1936年,MacMillan等提出采用勒让德多项式逼近引力势函数的方法.由于勒让德多项式具有良好的收敛性,因而在地球、火星等类球形大行星的引力场建模中得到了广泛应用.1966年,在前人研究的基础上,Kaula与Heiskanen建立了球谐函数模型理论(Kaula 2000; Sharma et al. 2007).通过球谐函数来描述天体的引力场,形式简单,计算量小,引力势能易于解析表达,而且可根据探测器在轨飞行数据进一步确定中心天体的各阶次球谐系数,便于高精度引力场的建模.同时,球谐函数模型还可分析中心天体非球形引力项对探测器轨道的影响,甚至可求解出受摄轨道运动的解析解.正是基于以上优点,球谐函数模型在天体力学和航天器轨道动力学的研究中得到了广泛应用.

同样,球谐函数模型也存在缺点,正是因为这些缺点的存在,致使其在研究小天体附近运动时,出现了失效.这些缺点概括起来可以分为两个问题:(1)截断误差问题.理论上中心天体的引力势能需要无穷级数来逼近,但实际计算中仅能取到有限项,这必然导致实际计算结果与理想值之间存在误差.Rossi研究了在小天体引力场估算中的这种截断误差问题.结果表明,此截断误差随样本点与小天体间距离的减小而增大,该现象将导致采用球谐函数对小天体引力场建模时,在小天体附近区域存在较大误差(Rossi 1999).(2)收敛问题.基于勒让德多项式的球谐函数只能在布里渊球(Brillouin sphere)之外收敛.该问题对于近似球体的大行星引力场建模影响较小,而对于形状不规则的小天体,则影响较大,因为形状不规则的小天体附近相当一部分区域都可能位于布里渊球范围之内,如图1所示.

当探测器位于小天体布里渊球之内时,无论多少阶次的球谐函数展开式,都无法准确逼

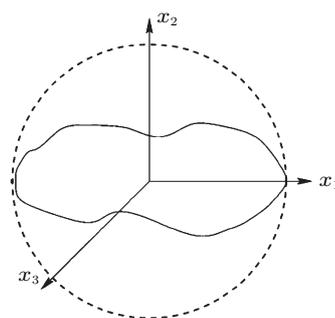


图1 小天体布里渊球 (Garminer & Barriot 2001)

近小天体的引力势函数,这将对小天体的近距离绕飞、悬停以及着陆等轨道动力学分析、轨道设计与控制带来困难.为解决此问题,椭球谐函数模型被引入小天体的引力场建模中.

2.2 椭球谐函数模型

20世纪中叶,Hobson提出了采用Lamé多项式来逼近中心天体引力势函数的椭球谐函数模型.该模型可通过椭球谐系数来描述中心天体的不规则形状,进而建立相应的引力场模型(Hobson 1955; Walter 1969).在前人研究的基础上,1973年Pick等创建了椭球谐函数理论(Pick et al, 1973).与球谐函数模型相比,椭球谐函数模型可使得小天体表面附近的收敛域显著增大.对于形状不规则的小天体,其布里渊椭球(Brillouin ellipsoid)如图2所示.

由图2可以看出,小天体布里渊椭球可以逼近到小天体表面附近区域,可有效解决球谐函数在形状不规则小天体附近区域无法收敛的问题.2001年Garmier等应用椭球谐函数模型设计了着陆Wirtanen彗星的轨道,并对该轨道进行了仿真分析(Garmier & Barriot 2001).结果表明椭球谐函数模型可用于形状复杂的小天体着陆轨道设计,但缺点是该模型算法复杂、计算量较大,椭球谐系数求解困难(William 1997).为了简化算法,便于获得椭球谐系数,2002年,Dechambre等从比较容易求解的球谐系数出发,

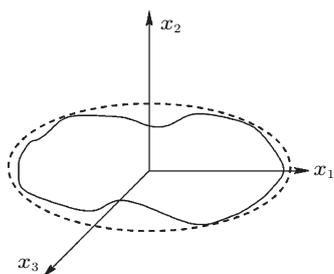


图 2 小天体布里渊椭球 (Garminer & Barriot 2001)

提出了一种球谐系数与椭球谐系数的转换方法 (Dechambre & Scheeres, 2002). 该方法简化了椭球谐系数的求解, 为椭球谐函数模型的应用和推广奠定了基础.

2.3 三轴椭球体模型

采用三维形状模型逼近是不同于函数模型逼近的一种引力场建模方法. 该方法中比较典型且应用广泛的是三轴椭球体模型. 该模型采用三轴椭球体来逼近小天体的形状, 通过椭球积分求得三轴椭球体的引力势函数, 进而得到小天体的近似引力场模型. 三轴椭球体模型通常采用可包络小天体的最小长方体的长、宽、高作为椭球体模型的 3 个主轴, 该模型如图 3 所示.

由于三轴椭球体建模时所需的信息可由天文观测获得, 计算简便, 并可大致反映出小天体引力场的基本特征, 所以该方法在研究中被广

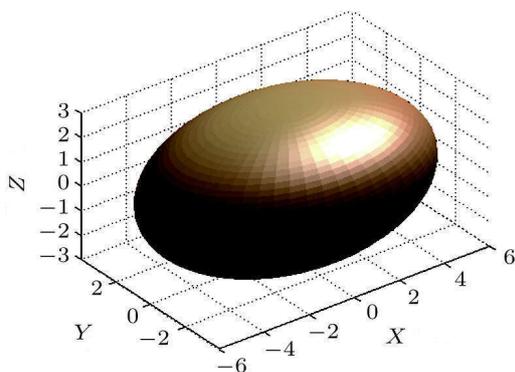


图 3 三轴椭球体模型

泛使用. 当然, 该方法的缺点也显而易见, 形状不规则是小天体的主要特征, 采用三轴椭球体近似形状不规则的小天体必然引起误差.

2.4 多面体模型

为了获得更为精确的引力场模型, 众多学者对此进行了研究, 其中比较经典的就是多面体模型和质点群模型. 多面体模型就是通过采用空间几何形体来逼近不规则天体的形状, 通过线积分和面积分求得引力势能, 进而建立该天体的引力场模型. 该模型于 1994 年由 Werner 提出 (Werner 1994), 并发展成比较完备的引力场建模方法 (Werner 1996; Werner & Scheeres 1997). 基于多面体模型的 216 Kleopatra, 6489 Golevka 小天体模型如图 4 和 5 所示.

质点群法可通过采用不同密度的微小球体或立方体单元来构建和逼近小天体的不规则形状和不同的质量分布, 进而实现对质量分布或密度分布不均匀的不规则小天体实现较高精度的建模. 该方法可认为是多面体模型法的一种拓展.

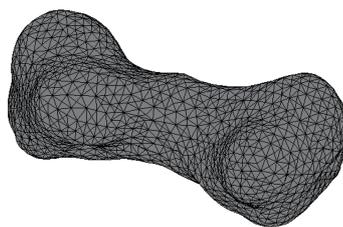


图 4 小天体 216 Kleopatra 的多面体模型

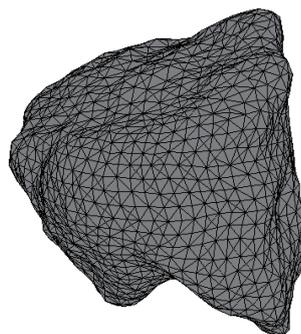


图 5 小天体 6489 Golevka 的多面体模型

综上所述可以看出:对于小天体引力场的建模,两类方法(级数逼近法和三维模型逼近法)的优缺点都较为突出.球谐或椭球谐函数模型对于不规则形状的小天体引力场建模精度不高,但可以给出相关的解析表达,甚至是小天体附近运动的解析描述(一般仅限于低阶),便于定性和定量的理论分析;三轴椭球体和多面体模型对于不规则形状的小天体引力场建模精度较高,但无法给出势能函数的解析表达,仅能通过数值计算分析小天体附近可能的运动区域及运动特性,不便于在轨实时的计算与应用.如何将这两类方法结合,建立既精确又便于运动特性分析的不规则形状小天体引力场模型将是未来研究的重要方向.

3 小天体附近的自然轨道动力学

探测器在小天体附近的运动形态极其丰富,其运动特性受小天体形状、自旋等物理参数影响较大.根据探测器在小天体附近的运动是否受控,小天体附近的轨道可以分为两类,即自然运动轨道与受控运动轨道.自然运动轨道是指在小天体附近运动的探测器或质点在小天体自身质点引力、非球形摄动及其他自然力扰动下形成的周期或拟周期的运动轨道.受控运动轨道是指小天体附近运动的探测器在自然力和控制力共同作用下形成的周期或拟周期的运动轨道.

对于小天体附近自然运动的轨道,主要分为环绕中心天体运动的绕飞轨道和环绕中心天体动力学平衡点的周期或拟周期轨道,下面将详细介绍这两类轨道的研究进展及存在的问题.

3.1 小天体环绕轨道动力学

对于质量较大的小天体,在其附近可能形成环绕轨道,但环绕小天体运动的轨道与环绕大行星的轨道存在较大差别.在小天体不规则

形状摄动和自旋的作用下,探测器轨道的能量和角动量可能在较短时间内发生较大的变化,而这种变化可能使得探测器的轨道变得不稳定,甚至与小天体发生碰撞或逃逸.因此,小天体附近环绕轨道的存在性和稳定性是小天体环绕轨道动力学与控制研究领域的重点问题.针对该问题,众多学者开展了相关的研究工作,这些研究工作可根据所采用的引力场模型的不同,划分为3类:(1)基于球谐或椭球谐函数模型的环绕轨道动力学研究;(2)基于三轴椭球体模型的环绕轨道动力学研究;(3)基于精确多面体模型的环绕轨道动力学研究.

3.1.1 基于球谐与椭球谐函数模型的小天体环绕轨道动力学

在基于球谐与椭球谐函数模型的轨道动力学研究中,二阶二次模型是一种典型的引力场模型.针对该模型,Scheeres和胡维多等做了大量的研究工作.首先研究了在非自旋二阶二次均质椭球体的引力场中,质点的运动类型,并进行了定性分析,结果表明,在该引力场中质点运动的轨道平面将静止或沿中心引力体的最小或最大惯量轴发生进动,并给出了解析的描述(Scheeres 1999; Scheeres & Hu 2001).随后,又进一步研究了均匀慢自旋引力场中质点的运动问题,推导了针对该系统的平均拉格朗日行星运动方程,并结合雅克比积分,给出了轨道运动的完整描述.研究发现慢自旋可能引起轨道面的1:1共振,且该共振存在一个临界值,当自旋速度大于临界值时,共振运动消失(Hu & Scheeres 2002).

在运动稳定性方面,Scheeres和胡维多基于均匀自旋的假设,提出了二阶二次引力场中运动稳定性的判据,并采用该判据评估了近圆赤道轨道的稳定性,给出了稳定与不稳定运动的区域,同时发现了平均运动与小天体自旋速率的共振关系(Hu & Scheeres 2004).2008年,他

们又进一步研究了均匀自旋二阶二次引力场中的周期轨道, 给出了该引力场模型中的 4 个平衡点和平面运动的 5 个基本周期轨道族, 讨论了不同自旋角速度下这些周期轨道族的存在性和稳定性 (Hu & Scheeres 2008).

以上研究已经对二阶二次引力场模型中的基本运动有了比较清晰和全面的认识. 在此基础上, 2009 年, 胡维多等对小天体引力场中探测器轨道的运动进行了初步总结, 分析了小天体附近动力学环境对环绕小天体探测器轨道的影响, 并以二阶二次引力场和 Castalia 小行星为例, 阐述了小天体附近轨道动力学的特点和研究所得的相关结论 (胡维多等 2009).

3.1.2 基于三轴椭球体模型的小天体环绕轨道动力学

三轴椭球体模型是小天体天文观测建模中常用的模型. 基于该模型的研究并不多, 但比较有代表性. 1994 年, Scheeres 首先研究了自旋三轴均匀椭球体引力场中探测器的轨道动力学问题. 根据形状和自旋速度等将三轴椭球体分成两类, 研究发现, 这两类的所有同步轨道都是不稳定的, 而拟同步轨道或类同步轨道的稳定性与三轴椭球体的分类有关, 并以 Vesta 和 Eros 小行星为例, 采用三轴椭球体模型, 分析和验证了部分结论 (Scheeres 1994a & 1994b). 2004 年, 崔祜涛等从小行星的角度, 研究了可用三轴椭球体近似建模的小行星附近的运动问题, 给出了零速度曲线, 分析了探测器的可能运动区域, 提出了探测器不碰撞小行星的边界条件. 针对绕飞慢自旋小行星的情况, 分析了小行星扁率和椭率对探测器轨道的摄动影响, 并给出了几族冻结轨道及其稳定条件 (崔祜涛等 2004a). 同时, 基于以上理论研究, 又以 Ivar 小行星 (中国首个小行星探测任务构想的目标星 (Cui et al. 2010) 为例, 给出了 Ivar 小行星的零速度曲线 (如图 6 所示) 和探测器不碰撞 Ivar 小行星的边

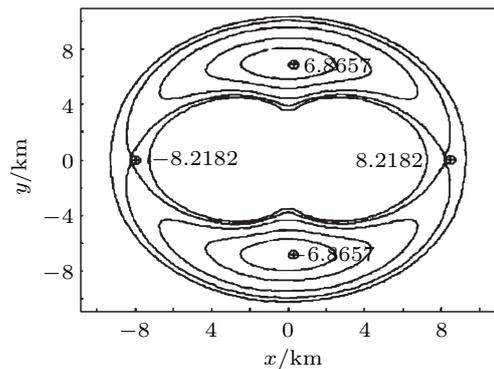


图 6 Ivar 小行星的零速度曲线 (崔祜涛等 2004b)

界条件, 分析了 Ivar 小行星扁率和椭率对环绕轨道的影响 (崔祜涛等 2004b). 2007 年, Byram 等基于三轴椭球体建立了慧核的引力场模型, 研究了彗星附近探测器的轨道动力学问题. 同时, 也提出了一种彗发的圆锥喷气模型, 分析了彗星形状和彗发气体阻尼作用对环绕彗星探测器轨道的影响 (Byram et al. 2007).

通过以上分析, 可以看出三轴椭球体引力场模型附近轨道动力学的研究框架已经基本建立起来, 其中包括三轴椭球体模型的分类、模型与特殊轨道类型稳定性的关系、可用三轴椭球体近似的小行星附近的运动以及彗星附近的运动. 同时, 也可以看出对于三轴椭球体引力场模型附近轨道运动规律的研究还有待于进一步深入. 三轴椭球体引力场附近周期与拟周期轨道族的存在性问题、运动稳定性边界等问题将是未来该方向研究的重点.

3.1.3 基于精确多面体模型的小天体环绕轨道动力学

多面体模型和质点群模型是目前最为精确的小天体模型. 这两种建模方法的发展和完善使得学者们对小天体附近轨道动力学问题有了更加准确和深入的研究, Scheeres 等在该方面做了大量的研究工作, 而这些研究都与具体的小行星相关.

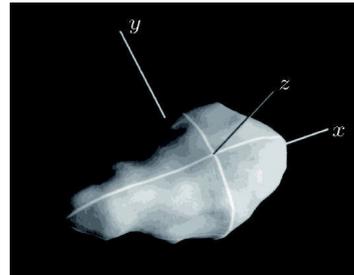
1996 年, Scheeres 等基于地面雷达观测数据, 建立了 4769 Castalia 小行星的多面体模型, 并研究了其附近的轨道动力学问题. 研究发现 Castalia 小行星附近存在周期轨道, 进一步分析表明 Castalia 小行星 3 倍平均直径以内的所有同步轨道和顺行轨道都是不稳定的, 而且容易与小行星发生碰撞或逃逸. 通过数值分析给出了从 Castalia 小行星附近逃逸与捕获的条件和区域 (Scheeres et al. 1996). 该研究揭示出了 4769 Castalia 小行星附近运动的基本规律, 可为未来的近距离环绕探测奠定基础.

曾作为嫦娥二号飞越探测目标的 4179 Toutatis 小行星也得到了广泛关注 (黄江川等 2013, 胡寿村等 2013, 乔栋等 2013a, 2013b). 1998 年, Scheeres 等基于地面雷达观测数据, 建立了 4179 Toutatis 小行星的多面体模型 (如图 7(a) 所示), 并通过该模型研究了 Toutatis 这个非主轴自旋小天体附近的轨道动力学问题. 研究表明, 该系统是哈密顿系统, 并具有哈密顿系统的所有特性, 但不存在雅克比常数, 同时零速度曲面也不能用于分析系统的运动行为. 通过该系统的拉格朗日行星运动方程, 发现了拟周期的“冻结轨道” (如图 7(b) 所示), 这些轨道中有部分是稳定的, 特别是“冻结轨道”中逆行轨道族具有较好的稳定性 (Scheeres et al. 1998). Toutatis 是比较典型的非主轴自旋小天体, 该研究具有一定的代表性, 但是否所有的非主轴自旋小天体都具有这些运动特性, 还是一个值得探讨的问题.

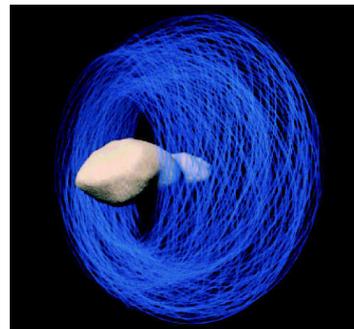
在小天体附近的轨道运动中, 周期轨道及其稳定性一直备受关注. 近来, Yu 等以 216 Kleopatra 小行星的多面体模型为背景, 通过对周期轨道做拓扑学分类来区分和研究环绕小天体附近的三维周期轨道的稳定性和动力学行为. 发现了 Kleopatra 小行星附近存在的 29 族基本周期轨道, 并通过数值分析揭示了这些轨道的运动特性和稳定性演变特征 (Yu & Baoyin

2012a), 同时, 还研究了 Kleopatra 小行星附近的共振轨道族 (Yu & Baoyin 2013). Lara 等运用数值方法研究了小天体附近三维轨道运动的稳定边界问题, 分析了小天体附近区域一些三维周期轨道族的稳定性, 并给出了相关的稳定区域, 同时, 还讨论了轨道共振等问题 (Lara & Scheeres 2002). 此外, 一些学者还提出了终结轨道 (Terminator orbits) 的概念 (Broschart 2010). 终结轨道就是在弱引力、非球形摄动、太阳光压等力的综合作用下产生的具有强鲁棒性的轨道 (Scheeres 1999, Bellerose et al. 2010, Scheeres 2012a, Scheeres 2012b). 该类轨道对于要求长时间在小天体附近稳定运动的任务而言, 非常理想. 这些研究为小天体附近扰动力的应用提出了一种新的思路.

通过以上分析, 不难发现小天体附近存在的“冻结轨道”、“终结轨道”、周期轨道以及这



(a) Toutatis 小行星的多面体模型



(b) Toutatis 小行星的冻结轨道

图 7 Toutatis 小行星示意图 (Scheeres et al. 1998)

些轨道的稳定性和稳定边界是基于精确小天体模型的轨道动力学研究中的热点问题,也是难点问题,因为形状、自旋等物理参数差异较大,目前尚无普适性的规律可循。

3.2 不规则形状小天体的抽象模型与其附近平衡点和周期轨道

小天体附近的动力学平衡点通常包括由第三体引力产生的动力学平衡点(拉格朗日点)和由不规则形状产生的动力学平衡点。本文重点介绍由不规则形状产生的平衡点。不规则形状产生的平衡点是小天体独特动力学环境的产物,是由小天体不规则形状和自旋引起的。这些平衡点附近也存在着丰富的周期与拟周期轨道族。对于该方面的研究,最大的困难来自于不规则形状,因为不同形状的小天体,其平衡点的分布和稳定性是不同的,进而影响其附近的轨道族。为了探求和发现小天体附近的一些普适性的规律,一些学者将小天体的不规则形状抽象为可变形的理想模型,通过研究理想模型的普适运动规律,进而推广和扩展到一般小天体附近运动规律的发现。

在该方面, Liu 等从理想模型的角度,拓展了前人对于长条、圆环、环面等形状体附近轨道动力学的研究,提出了均质旋转立方体,并研究了该模型动力学平衡点的位置和稳定性,分析了连接不同平衡点附近周期轨道的异宿轨道,如图 8 所示 (Liu et al. 2011a)。之后, Liu 等又进一步研究了围绕固定均质立方体的周期轨道问题。基于庞加莱截面和同伦法,得到了更广泛的周期轨道,周期轨道也广泛的存在于固定立方体的对称面内,同时,也存在于包含规则六面体截面的不对称平面内 (Liu et al. 2011b)。这些研究有助于对可被分割成多个立方体的不规则形状小天体附近动力学的研究。

2012 年, Yu 等从多面体精确模型的角度,研究了 216 Kleopatra 小行星附近的动力学平

衡点及周期轨道族。通过特定雅可比积分下的零速度曲面,找到了 Kleopatra 小行星的 4 个动力学平衡点,分析表明其均为非线性不稳定。同时找到了 6 个主要的周期轨道族,这些轨道族也表现出了不稳定性 (Yu & Baoyin 2012b)。

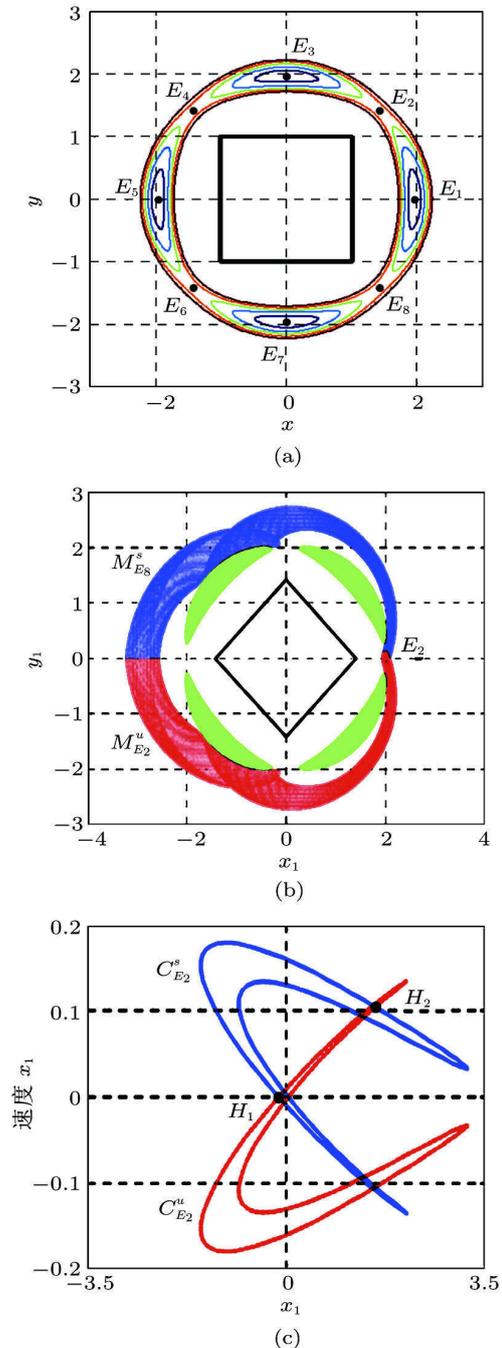


图 8 均质旋转立方体的平衡点及异宿连接轨道连接 (Liu et al. 2011a)

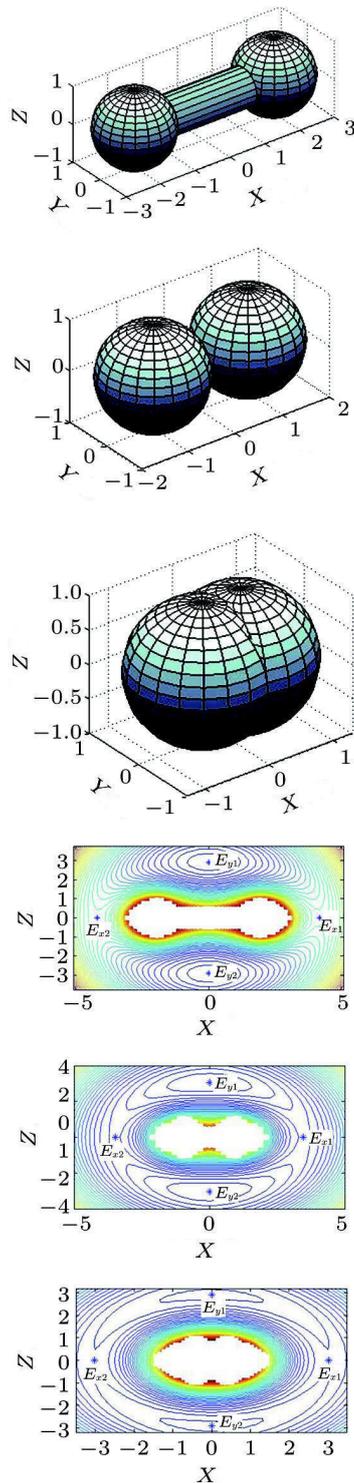


图 9 长径比分别为 2, 1 和 0.3 时哑铃形状的变形体及动力学平衡点的分布 (Li et al. 2013)

在前人的研究基础上, Li 和 Qiao 等将 216

Kleopatra 小行星的模型抽象, 提出了哑铃形状体, 并深入研究了该模型的动力学平衡点及其稳定性、周期轨道等相关的运动特性. 同时, 通过长径比的变化将哑铃形状体演化成双球冠等形体, 如图 9 所示, 并研究了动力学平衡点及其稳定性的变化 (Li et al. 2013). 该研究将对不规则形状体附近运动特性的研究从单形体拓展到组合体, 促进了不规则形状小天体附近轨道动力学的发展和研究.

由以上分析, 可以看出不规则形状小天体的动力学平衡点及其附近可能存在的周期和拟周期轨道对于未来小天体探测具有独特的意义和价值. 而该方面研究的最大困难来自于不规则形状无法普适性表述, 从而导致无法获得动力学平衡点分布及其附近周期轨道的普适性规律.

4 小天体附近的受控轨道动力学

小天体附近的探测器在小天体质点引力(二体轨道动力学)、不规则形状摄动力、环境干扰力和主动控制力的共同作用下可形成悬停、盘旋等特殊运动现象. 小天体的弱引力特性使得其附近的自然运动轨道多数处于不稳定状态, 但该特性同样也使得探测器可通过采用主动控制提高其在小天体附近的机动能力, 而悬停运动就是主动控制产生的一种运动形式 (Eros 小行星附近的悬停轨道如图 10 所示). 从基本轨道动力学而言, 该类运动属于连续受控运动, 不同于轨道修正或轨道保持. 下面将详细介绍这类轨道的动力学与控制的研究进展及存在的问题.

在该方面, Sawai 等先后研究了均匀自旋和非均匀自旋小天体附近探测器的悬停轨道控制及稳定性问题. 针对非均匀自旋的小天体, 给出了小天体附近存在稳定和不稳定的悬停点, 讨论了探测器进行平动运动的可能性. 同时, 也发现了小天体的自旋与探测器的运动可能产生共

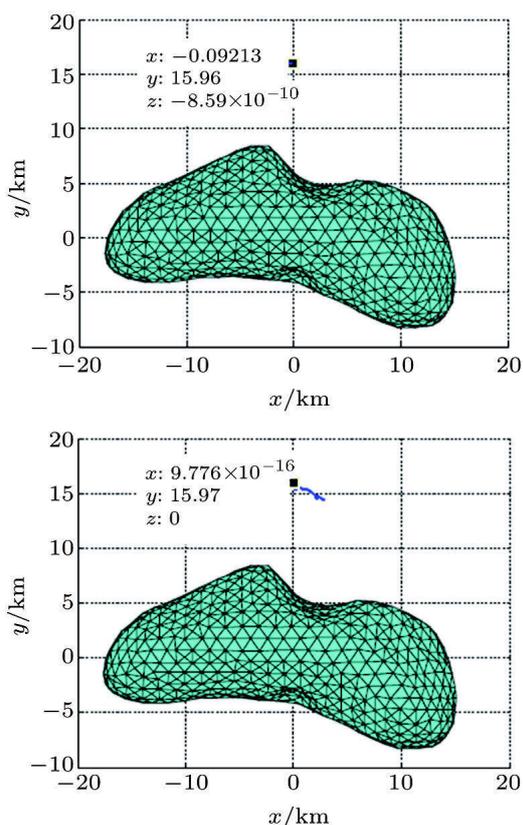


图 10 Eros 小行星体固连系下基于不同控制律的悬停轨道 (Winkler 2013)

振的现象, 这种现象将会对小天体附近的悬停运动带来不稳定性 (Sawai & Scheeres 2001). 针对均匀自旋的小天体, 分析了稳定悬停轨道的闭环控制策略, 基于小天体表面的高度信息, 给出了能够产生稳定悬停轨道的控制方法, 并将该方法应用于均匀自旋球形和椭球形小天体, 以及 Castalia 小行星附近悬停轨道的控制 (Sawai et al. 2002).

悬停轨道的稳定性是悬停轨道动力学与控制领域研究的重要课题. Broschart 等提出了一种可用于分析悬停运动稳定性的数值分析方法, 并采用该方法研究了小天体体固连系和惯性系下悬停运动的稳定性和稳定区域. 研究发现在小天体固连系下共振半径内的区域, 悬停运动是稳定的, 而在惯性系下, 共振半径外的所有区域是稳定的 (Broschart & Scheeres 2003). 随

后, Broschart 等进一步验证了小天体固连系和惯性系下悬停控制律的稳定性和悬停推力解的可靠性, 并以 Itokawa 小行星为例, 分析了悬停区域的稳定性 (Broschart & Scheeres 2005).

太阳帆是未来深空任务中具有较好应用前景的推进系统, 该系统仅靠太阳光压的作用产生动力或控制力, 从而节省了大量的星载能源. Morrow 等提出了通过太阳帆产生控制力, 进而实现在小天体附近悬停的想法, 并通过研究找到了不同尺寸小天体引力场中太阳帆探测器的悬停点和悬停轨道. 同时也发现, 对于质量较小的小天体, 太阳帆所能产生的控制力要大于悬停运动所需的控制力, 通过限制控制力的大小和方法, 仍可找到稳定的悬停轨道 (Morrow et al. 2001).

由以上分析, 可以看出悬停是小天体探测任务中的一种重要的轨道类型, 而对于该问题的研究既与小天体附近的动力学环境相关, 也与探测器所能提供的控制力相关, 这些因素决定了该问题研究的复杂性和多样性. 如何找到一种最优的控制策略使得探测器的悬停轨道既满足任务要求, 又具有良好的稳定性, 是未来发展的主要方向.

5 我国未来小天体探测轨道动力学与控制发展展望

我国在绕月探测工程成功实施之后, 已开展了相关的小天体探测论证与研究. 小天体附近轨道动力学与控制问题作为小天体探测中的关键问题, 得到了广泛的关注. 我国未来小天体探测轨道动力学与控制技术的发展, 将可能面临以下问题:

(1) 小天体动力学环境的建模与评估问题

未来的小天体探测任务多数集中在环绕飞行、着陆探测和采样返回. 对于这些任务而言, 精确可靠的动力学环境至关重要. 如何在探测前通过地基观测对小天体的质量、形状、引力

场和自旋状态等关键物理参数进行全面、系统的评估和建模,并在探测中利用探测器轨道与导航数据快速修正小天体动力学模型参数将是该方面未来发展的主要方向.

(2) 多种扰动力共同作用的动力学机制问题

小天体弱引力的特性必然导致太阳光压、太阳潮汐以及其他天体扰动力的效应增强.深入研究这些扰动力的动力学机理及联合作用的效能,充分利用这些扰动力的联合效应,得到满足任务要求的稳定长期周期任务轨道将是未来研究的主要方向.

(3) 弱引力小天体中的伴飞、悬停与盘旋轨道动力学与控制问题

尽管与大行星相比,小天体的质量小了很多,但小天体的质量也有大小之分.对于质量很小的小天体,仅凭其引力很难形成绕飞轨道.若要对这类小天体的伴飞、环绕、悬停等探测,就需要深入研究太阳、小天体、扰动力之间的动力学关系,剖析和提出形成特殊轨道的条件与判据,这将是未来需要探讨的主要问题.

(4) 小天体双星体中的轨道动力学与控制问题

据天文观测估算,大约 10% 的近地小行星是双星体系统.对于双星体系统中,探测器基本运动规律的探究将是未来小天体附近轨道动力学与控制中的重要研究内容.双星体系统的轨道动力学既不同于经典的二体问题,也不同于三体问题,在该问题中,两个天体及探测器的质量都不能忽略,而且运动相互影响.对该问题的研究对于未来小天体的探测具有重要的理论意义和应用价值.

6 结束语

小天体附近轨道动力学与控制是实现小天体环绕与着陆探测的关键技术之一.本文首先阐述了国外小天体探测任务的发展与小天体附

近轨道动力学与控制研究的必要性;随后,对国内外不规则形状小天体引力场的建模、小天体附近的自然轨道动力学、小天体附近的受控轨道动力学等方面的发展情况进行了归纳与总结,并重点分析了小天体环绕轨道动力学与控制、小天体动力学平衡点附近周期与拟周期轨道和受控悬停轨道动力学与控制;最后,对中国未来小天体探测可能涉及到的轨道动力学与控制发展进行了展望.

目前,国内外对小天体附近轨道动力学与控制问题已经进行了大量的研究,提出了一些具有较好应用价值的轨道族,并在部分任务中进行应用和尝试.随着未来小天体探测任务的深入开展,环绕轨道、平衡点附近的周期轨道以及悬停轨道将成为小天体附近探测任务轨道的主要选择.中国已经实现了首次小天体的飞越探测,未来还将计划和实施小天体的环绕、着陆与采样返回任务.小天体数量庞大、形态各异、动力学环境复杂,且存在诸多未知因素,研究和分析小天体附近的轨道运动状态和运动特性还面临着诸多基础理论难题,因此,有必要对小天体附近轨道动力学机理等问题进行更为深入和系统的研究,为我国未来小天体探测提供必要的理论储备.

参 考 文 献

- Bellerose J, Yano H, Scheeres D J. 2010. Solar radiation pressure perturbations at binary asteroid systems. *Advances in the Astronautical Sciences*, 135: 747-764.
- Broschart S B, Scheeres D J. 2005. Control of hovering spacecraft near small bodies: Application to Asteroid 25143 Itokawa. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 28: 343-354.
- Broschart S B, Scheeres D J, Villac B F. 2010. New families of multi-revolution terminator orbits near small orbits. *Advances in the Astronautical Sciences*, 135: 1685-1702.
- Broschart S B, Scheeres D J. 2003. Numerical solution to the small-body hovering problem. *Advances in the Astronautical Sciences*, 114: 875-894.

- Byram S M, Scheeres D J, Combi M R. 2007. Models for the comet dynamical environment. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 30: 1445-1454.
- Cui P Y, Qiao D, Cui H T, Luan E J. 2010. Target selection and transfer trajectories design for exploring asteroid mission. *Science China Technological Sciences*, 53: 1150-1158.
- 崔祐涛, 史雪岩, 崔平远, 栾恩杰. 2004a. 绕飞慢自旋小天体的航天器运动分析. *航空学报*, 25: 16-20 (Cui H T, Shi X Y, Cui P Y, Luan E J. 2004a. Spacecraft motion analysis about slowly rotating small body. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 25: 16-20 (in Chinese))
- 崔祐涛, 史雪岩, 崔平远, 栾恩杰. 2004b. 航天器绕小行星 Ivar 的运动分析. *宇航学报*, 25: 251-255 (Cui H T, Shi X Y, Cui P Y, Luan E J. 2004b. Motion analysis of spacecraft around the asteroid Ivar. *Journal of Astronautics*, 25: 251-255 (in Chinese))
- Dechambre D, Scheeres D J. 2002. Transformation of spherical harmonic coefficients to ellipsoidal harmonic coefficients. *Astronomy & Astrophysics*, 387: 1114-1122.
- Garmier R, Barriot J P. 2001. Ellipsoidal harmonic expansions of the gravitational potential: Theory and application. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 79: 235-275.
- Hobson E. 1955. *The Theory of Spherical and Ellipsoidal Harmonics*. New York: Chelsea Publishing Company.
- 黄江川, 王晓磊, 孟林智, 饶炜, 李克行, 乔栋, 黄昊, 周文艳. 2013. 嫦娥二号卫星飞越 4179 小行星逼近策略及成像技术. *中国科学 (技术科学)*, 43: 478-486 (Huang J C, Wang X L, Meng L Z, Rao W, Li K X, Qiao D, Huang H, Zhou W Y. 2013. Approaching strategy and imaging technique for CE-2 flyby 4179 asteroid mission. *Science China (Technological Sciences)*, 43: 478-486 (in Chinese))
- 胡寿村, 季江徽, 赵玉晖, 孟林智. 2013. 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. *中国科学技术科学*, 43: 506-511 (Hu S C, Ji J H, Zhao Y H, Meng L Z. 2013. Orbit determination and precision analysis of Toutatis asteroid for CE-2 flyby asteroid mission. *Science China Technological Sciences*, 43: 506-511 (in Chinese))
- Hu W D, Scheeres D J. 2004. Numerical determination of stability regions for orbital motion in uniformly rotating second degree and order gravity fields. *Planetary and Space Science*, 52: 685-692.
- Hu W D, Scheeres D J. 2008. Periodic orbits in rotating second degree and order gravity fields. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 8: 108-118.
- Hu W D, Scheeres D J. 2002. Spacecraft motion about slowly rotating asteroids. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 25: 765-775.
- Hu W D, Scheeres D J, Xiang K H. 2009. The characteristics of near asteroid orbital dynamics and its implication to mission analysis. *Progress in Astronomy*, 27: 152-166 (in Chinese).
- Kaula W M. 2000. *Theory of Satellite Geodesy: Applications of Satellites to Geodesy*. Mineola: Dover Publications. 4-8.
- Lara M, Scheeres D J. 2002. Stability bounds for three dimensional motion close to asteroids. *Journal of the Astronautical Sciences*, 50: 389-409.
- Li X Y, Qiao D, Cui P Y. 2013. The equilibria and periodic orbits around a dumbbell-shaped body. *Astrophysics and Space Science*, DOI 10.1007/s10509-013-1592-1.
- Liu X D, Baoyin H X, Ma X R. 2011a. Equilibria, periodic orbits around equilibria, and heteroclinic connections in the gravity field of a rotating homogeneous cube. *Astrophysics Space Science*, 333: 409-418.
- Liu X D, Baoyin H X, Ma X R. 2011b. Periodic orbits in the gravity field of a fixed homogeneous cube. *Astrophysics Space Science*, 334: 357-364.
- Morrow E, Scheeres D J, Lubin D. 2011. Solar sail orbit operations at asteroids. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 38: 279-286.
- Pick M, Picha J, Vyskocil V. 1973. *Theory of the Earth's Gravity Field*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 223-245.
- 乔栋, 黄江川, 崔平远, 饶炜, 姜晓军, 孟林智, 黄昊, 黄晓峰. 2013. 嫦娥二号卫星飞越探测小行星的目标选择. *中国科学技术科学*, 43: 602-608 (Qiao D, Huang J C, Cui P Y, Rao W, Jiang X J, Meng L Z, Huang H, Huang X F. 2013. Selection target for CE-2 flyby asteroid mission. *Science China Technological Sciences*, 43: 602-608 (in Chinese))
- 乔栋, 黄江川, 崔平远, 饶炜, 王晓磊, 黄昊, 孟林智, 周文艳. 2013. 嫦娥二号卫星飞越 Toutatis 小行星转移轨道设计. *中国科学 (技术科学)*, 43: 487-492 (Qiao D, Huang J C, Cui P Y, Wang X L, Huang H, Meng L Z, Zhou W Y. 2013. Trajectory design of CE-2 flyby Toutatis asteroid mission. *Science China (Technological Sciences)*, 43: 487-492 (in Chinese))
- Rossi A, Marzari F, Farinella P. 1999. Orbital evolution around irregular bodies. *Earth Planets Space*, 51: 1173-1180.

- Sawai S, Scheeres D J, Broschart S B. 2002. Control of hovering spacecraft using altimetry. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 25: 786-795.
- Sawai S, Scheeres D J. 2001. Hovering and translational motions over small bodies. *Advance in the Astronautical Sciences*, 108: 781-796.
- Scheeres D J. 1999. The effect of C22 on orbit energy and angular momentum. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 73: 339-348.
- Scheeres D J. 1994a. Dynamics about uniformly rotating tri-axial ellipsoids applications to asteroids. *Icarus*, 110: 225-238
- Scheeres D J. 1994b. Satellite dynamics about asteroids. *Advances in the Astronautical Sciences Series Spaceflight Mechanics*, 87: 275-292.
- Scheeres D J, Ostro S J, Hudson R S, Werner R A. 1996. Orbits close to asteroid 4769 Castalia. *Icarus*, 121: 67-87.
- Scheeres D J, Ostro S J, Hudson R S, DeJong E M, Suzuki S. 1998. Dynamics of orbits close to asteroid 4179 Toutatis. *Icarus*, 132: 53-79.
- Scheeres D J. 1994. Satellite dynamics about triaxial ellipsoids. in: *Proceedings of Advances in Nonlinear Astrodynamics*, Belbruno E. Ed., Geometry Center No.GCG65, 1-28.
- Scheeres D J, Hu W D. 2001. Secular motion in a 2nd degree and order-gravity field with no rotation. *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy*, 79: 183-200.
- Scheeres D J. 1999. Satellite dynamics about small bodies: averaged solar radiation pressure effects. *Journal of the Astronautical Sciences*, 47: 25-46.
- Scheeres D J. 2012. Orbit Mechanics about asteroids and comets. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 35: 987-997.
- Scheeres D J. 2012. Orbital mechanics about small bodies. *Acta Astronautica*, 72: 1-14.
- Sharma A K, Narasaiah M L. 2007. *Dynamics of Rigid Bodies*. New Delhi: Discovery Publishing House, 89-97.
- Walter H G. 1969. *Dynamics of Satellites*. Berlin: Springer Heidelberg, 28-35.
- Werner R A. 1996. On the gravity field of irregularly shaped celestial bodies. [Ph.D. Thesis] Austin: University of Texas, 36-52.
- Werner R A. 1994. The gravitational potential of a homogeneous polyhedron. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 59: 253-278.
- Werner R A, Scheeres D J. 1997. Exterior gravitation of a polyhedron derived and compared with harmonic and mascon gravitation representations of asteroid 4769 castalia. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 65: 313-344.
- William B. 1997. Comment on a formula for the gravitational harmonic coefficients of a triaxial ellipsoid. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 67: 107-110.
- Winkler T M. 2013. Fuel-efficient feedback control of orbital motion around irregular-shaped asteroids. [Master Thesis] Iowa: Iowa State University, 36-37.
- Yu Y, Baoyin H X. 2012a. Generating families of 3D periodic orbits about asteroids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427: 872-881.
- Yu Y, Baoyin H X. 2012b. Orbital dynamics in the vicinity of asteroid 216 Kleopatra. *The Astronomical Journal*, 143: 62-71.
- Yu Y, Baoyin H X. 2012. Resonant orbits in the vicinity of asteroid 216 Kleopatra. *Astrophysics Space Science*, 343: 75-82.

(责任编辑: 胡更开)

State-of-the-art and prospects for orbital dynamics and control near small celestial bodies*

CUI Pingyuan QIAO Dong[†]

School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing 100081, China

Abstract Small celestial body exploration is one of the key areas of deep space exploration in the future. The orbital dynamics and control problem near small celestial bodies is crucial in such explorations, and urgent to be treated. This problem involves the modeling of dynamics environment around an irregular-shaped small celestial body, and the orbital dynamics mechanism near the small celestial body. In this paper, we survey the gravitational field modeling of irregular-shaped small celestial body, natural orbital dynamics and control, and controlled orbital dynamics near small celestial body. We introduce state-of-the-art and trends for the development of orbital dynamics and control near small celestial bodies. The challenges and difficulties encountered are analyzed. Finally, we discuss the prospects for the development direction and key issues of orbital dynamics and control for Chinese future mission for exploring small celestial bodies.

Keywords small body exploration, dynamics and control, gravitational field of irregular-shaped body, natural orbital dynamics, controlled orbital dynamics



崔平远, 博士生导师. 1983年毕业于哈尔滨工业大学控制工程系, 1990年获哈尔滨工业大学一般力学专业博士学位, 1993年任哈尔滨工业大学教授. 现任北京理工大学宇航学院教授, 深空探测技术研究所所长, 小天体探测与防御实验室主任, 机械与运载学部副主任委员; 兼任 863 计划主题专家组成员, 973 计划项目首席科学家.



乔栋, 1979年生, 副教授, 博士生导师. 2007年毕业于哈尔滨工业大学飞行器设计专业, 获工学博士学位. 2009年获得全国优秀博士论文提名. 主要从事深空探测轨道动力学与控制、轨道设计与优化方面的研究工作. 发表论文 40 余篇, 被 SCI、EI 收录 30 余篇. 与导师崔平远教授合著出版专著《深空探测轨道设计与优化》一部 (国家科学技术学术著作出版基金资助)、获省部级二等奖 2 项. 2013 年入选教育部新世纪优秀人才支持计划和北京市青年英才计划. 担任中国宇航学会深空探测技术专业委员会办公室主任兼学术秘书.

* The project was supported by the National Basic Research Program of China (2012CB720000), National Natural Science Foundation of China (11102020) and Beijing Institute of Technology Innovation Team Project.

[†] E-mail: qiaodong@bit.edu.cn