小行星探测动力学与控制专题·编者按

2018年中国科学院文献情报中心课题组受国家自然科学基金委政策局委托,编写了学科发展态势评估系列研究报告《力学十年: 中国与世界》(Mechanics 2006–2015: China in the world). 在第3.5节航天动力学中列举了这十年国内外进展相对较快、成果较多的三个方向: 不规则引力场中的轨道理论、连续推力轨迹优化、无燃料推进. 前两个方向都和探测小行星/小天体密切相关,也正是由于小行星/小天体探测研究的驱动而快速发展的. 我国在这些方向上的研究也非常活跃,在航天工程和天体力学相关杂志均有大量高水平的学术论文发表.

为了展示我国小行星/小天体探测动力学与控制的近期成果,特别组织了这个“小行星探测动力学与控制”专题,包括11篇文章,其中有1篇综述和10篇研究论文,内容涉及小行星物理性质与地质结构、YORP效应、探测任务设计与操作以及工程设计其他相关问题.

小行星/小天体上蕴含着丰富的稀有矿物资源,并保存着太阳系形成初期的原始成分,是研究太阳系起源和演化历史的活化石. 近二十年来,对小行星的研究已从轨道、形状、旋转状态和光谱类型,扩展到结构演化机制和外力响应特性. 小行星的碎石堆结构概念的提出,为已观测到的小行星物理性质和天文现象提供了合理解释,同时也对小行星探测动力学与控制提出了诸多挑战. 综述文章《小行星的物理性质与结构演化研究进展》从小行星的轨道和物理性质分布出发,分析小行星结构的演化过程,说明大部分等效直径大于300 m的小行星应为碎石堆结构;结合颗粒材料的力学性质,阐明碎石堆小行星的结构特点和动力学响应特性,评述当前主要研究方法,特别是离散动力学数值模拟.

对小行星地质结构的研究表明,大多数小行星的质量分布不对称、不规则,这对准确建模提出了挑战. 论文《基于多项式级数的小天体表面参数化表征方法》给出了适用于任意小天体外形的参数化表征方法: 利用同时控制长度失真和面积失真的CALD算法将小天体的样本点数据映射到单位球面上,得到小天体表面与单位球面之间的双射关系,应用多项式级数形式的基函数表征双射关系,利用LSMR算法求解得出小天体表面模型的表征形式.

不规则小行星表面再辐射热量的反冲力对小行星产生净力矩,导致小行星自转状态发生改变. 研究YORP效应应有助于了解小行星的演化历史、双星系统的形成以及太阳系的起源和发展. 论文《YORP效应机理研究与小行星自转状态演化仿真》推导了一维热传导的YORP力矩计算公式和自转状态演化公式,探究了热惯量对表面温度和反冲力的影响,计算了多颗小天体的YORP曲线和自转状态,对揭示小行星的演化驱动力等具有借鉴意义.

为了降低任务成本、增加科学回报,多目标、多模式的小天体探测是研究热点. 论文《小天体多目标多模式探测任务设计》以我国未来的多目标、多模式小天体探测任务为背景,针对摄动敏感、约束复杂、推力幅值变化等设计难题,研究了地球准卫星2016 HO3采样返回以及主带彗星133P交会探测任务的转移轨道设计,研究方法和结果可为我国未来的深空探测任务提供参考.

探测器接近小行星后开展的逼近、伴飞/绕飞和悬停等一系列近轨操作,是实现小行星采样返回等任务活动的前提和关键. 论文《小行星探测近轨操作的轨道动力学与控制》结合我国未来小行星探测任务构想,以弱引

引用格式: 李俊峰. 小行星探测动力学与控制专题·编者按. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 084501

Li J F. Special topic: Dynamics and control for asteroid exploration (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 084501, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0156](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0156)

力、快自旋小行星2016HO3为背景, 研究近轨操作过程中的轨道动力学与控制.

在表面软着陆是探测小行星的重要方式, 论文《考虑碰撞与黏滑的小天体表面软着陆模型与轨迹设计》采用软球离散元填充多面体、覆盖多面体表面, 模拟不规则小天体的不规则几何外形、引力环境、表面碰撞与弹跳, 指出小天体表面软着陆的核心问题是碰撞弹跳与黏滑效应, 小天体表面软着陆应尽量选择非赤道面、平坦区域或凹区域.

人类第一个在彗星上着陆的探测器“菲莱”, 是彗星探测任务“罗塞塔”的重要组成部分, 备受关注. “菲莱”着陆彗星67P时经历了3次反弹才停在一个悬崖底部, 光照严重不足, 在电量耗尽后无法继续工作, 与地面(以及“罗塞塔”轨道器)失去了联系. 论文《彗星着陆器“菲莱”的下降弹跳轨迹》建立了“菲莱”在67P附近轨道运动和表面运动的数学模型, 复现“菲莱”自轨道器“罗塞塔”分离至停止运动的轨迹, 并与欧空局 Science Operations and Navigation Center (SONC)复现的轨迹进行了对比. 对弹跳轨迹进行参数化仿真, 改变第一次触地点的切向和法向恢复系数, 分析其对“菲莱”表面弹跳运动的影响.

火星的卫星是人们比较关注的小天体之一, 论文《环绕火卫一的稳定准卫星轨道搜索与分析》考虑火星卫星的轨道偏心率和不规则引力场, 利用数值方法遍历搜索起始于火卫一两个赤道惯量主轴的稳定准卫星轨道并分析其稳定性, 研究了初始速度误差、全球地面覆盖、最小/最大轨道高度的影响.

间接法是小行星探测轨迹优化的常用方法, 但也存在协态初值敏感和难收敛等问题, 特别是对于太阳帆轨迹优化. 论文《太阳帆轨迹间接优化技术收敛性分析》以太阳帆交会探测小行星为背景, 研究轨迹优化中协态变量归一化、同伦等方法与收敛性的关系, 指出同伦法的初值估计准确度最高、收敛性也最好.

针对深空探测任务中电推进系统需要设置多个工作点、推力分级输出的需求, 论文《面向工程约束的小推力转移轨道设计与优化》研究了多模式电推进约束下的小行星探测转移轨道优化设计, 分析推力分档对转移轨道的影响, 建立小推力转移轨道动力学模型及优化模型, 引入粒子群算法搭配SQP算法提高初值的搜索效率和解的全局最优性, 通过一次火星借力交会颍神星为例进行仿真分析.

针对小行星探测器在实际工程任务中对天文自主导航能力的需求, 论文《基于天文测角测速组合的小行星探测器自主导航方法》给出天文光谱测速结合天文图像测角的组合自主导航方案, 实现小行星探测器连续自主、实时高精度导航, 以主带小行星谷神星探测任务为背景, 分析该组合导航方法的可观测性.

上述文章反映了我国学者在小行星探测动力学与控制方向的最新研究结果, 可供同行学者参考.

李俊峰

清华大学航天航空学院, 北京 100084