考虑碰撞与黏滑的小天体表面软着陆模型与轨迹设计

姜宇^{1,2*}, 李恒年^{1,2}

1. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043;

2. 中国西安卫星测控中心, 西安 710043

*联系人, E-mail: jiangyu_xian_china@163.com

收稿日期: 2018-10-12; 接受日期: 2018-11-30; 网络出版日期: 2019-05-17

国家自然科学基金(编号: 11772356)和中国博士后科学基金(编号: 2018T110092)资助项目

摘要 在考虑碰撞与黏滑效应的情况下, 针对小天体表面软着陆过程进行了研究. 首先采用多面体模型分析了小天体表面的不规则外形与地形地貌. 采用软球离散元模型填充多面体模型及覆盖多面体模型表面的方法来模拟不规则小天体的不规则几何外形、引力环境、表面碰撞与弹跳等. 分别考虑了无效软着陆和软着陆成功两种不同情形下的着陆器动力学参数计算结果, 分析了达到预定软着陆区域和未达到预定软着陆区域的算例的不同. 研究表明, 小天体表面软着陆的核心问题则是碰撞弹跳与黏滑效应. 如果软着陆初始条件选取不佳, 着陆器可能弹跳后继续形成环绕轨道运动、或者未弹跳直接形成平衡点附近的拟周期轨道、或者最终着陆区域远离预定软着陆区域而导致任务失败. 小天体表面软着陆应尽量选择非赤道面、平坦区域或凹区域进行软着陆.

关键词 小天体, 软着陆, 碰撞运动, 弹跳运动, 黏滑效应

PACS: 96.25.De, 96.25.Nc, 96.30.Ys

1 引言

2003年发射的日本隼鸟号(Hayabusa)探测器于2005年登陆小行星25143 Itokawa并采样后于2010年返回地球, 这是人类首次登陆小行星. 欧洲太空局(欧空局)于2004年发射的罗塞塔号(Rosetta)于2008年飞越了小行星2867 Steins, 2010年飞越小行星21 Lutetia, 2014年到达彗核67P/Churyumov-Gerasimenko附近形成绕

飞轨道, 2014年11月释放的着陆器“菲莱”在着陆彗核67P/Churyumov-Gerasimenko的时候发生了明显观测到的2次弹跳, 也就是说“菲莱”进行了3次观测到的着陆^[1,2]. “菲莱”的3次着陆彗核时间分别为协调世界时(UTC)2014年11月12日15:34:04, 17:25:26和17:31:17(北京时间2014年11月12日23:34:04, 13日01:25:26和13日01:32:17). 着陆器“菲莱”在彗核表面首次着陆时刻后, 经过近2 h, 才最终静止于彗核表面. 软着陆第一次

引用格式: 姜宇, 李恒年. 考虑碰撞与黏滑的小天体表面软着陆模型与轨迹设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 084504

Jiang Y, Li H N. Impact and stick-slip dynamics in the soft-landing on minor celestial bodies (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 084504
doi: [10.1360/SSPMA2018-00350](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00350)

碰撞彗核表面后的弹跳高度大约为1 km, 最终软着陆位置距离事先设计好的位置数百米, 彗核67P/Churyumov-Gerasimenko的大小仅是由4.1 km×3.3 km×1.8 km的较大部分和2.6 km×2.3 km×1.8 km的较小部分通过脖颈连接, 因此, 最终软着陆位置的相对误差是极大的. 绝大多数的小行星和彗星都具有不规则的外形^[1,2], 这是因为其质量没有大到使其物质之间的万有引力足以克服应力而达到流体静力学平衡, 这就决定了针对小行星和彗星这样的小天体的探测和大行星的探测有所不同. 小天体的引力场模拟一般不能采用大行星引力场模拟所使用的球谐函数方法. 小天体附近的平衡点、周期轨道等动力学问题的内涵也同大行星有所不同. 此外, 小天体表面的软着陆也与大行星表面的软着陆有所不同, 小天体表面软着陆需要考虑着陆器与小天体表面的碰撞弹跳以及黏滑效应^[3].

不规则小天体表面的跃迁与软着陆需要考虑碰撞与弹跳过程^[3-6], 当颗粒或着陆器不再弹跳, 而着陆器固定在小天体表面运动而不再弹跳时, 还需考虑黏滑效应; 为此提出了一种软球离散元模型来计算颗粒跃迁和着陆器软着陆的碰撞与黏滑动力学综合计算方法, 该方法通过大小不同的软球来分别填充和覆盖小天体的多面体形状模型, 采用N-body模型来计算小天体对着陆器的引力作用, 采用软球离散元模型来计算着陆器和小天体表面接触时的碰撞、弹跳与黏滑. 本文以典型外形的小行星6489 Golevka作为算例, 分析了不规则小天体的引力环境、表面局部地形地貌与引力有效势分布等. 介绍了着陆器不再弹跳后固定在表面上运动的3种不同的模型, 讨论了小天体表面碰撞与弹跳的计算方法, 使用不规则小天体表面颗粒运动与探测器软着陆综合计算方法, 计算并分析了不规则小天体表面的软着陆问题, 通过计算并分析对比表面无效软着陆和软着陆成功的几种不同结果, 得出了若干重要的结论. 指出实际的软着陆运动状态同软着陆初始着陆位置、导航与制导误差等密切相关, 如果软着陆初始条件选择不当, 则可能导致着陆器未接触小天体表面而直接形成环绕小天体的轨道运动、或者同小天体表面碰撞并弹跳1次或几次后形成环绕轨道运动, 也可能虽然着陆器最终静止于小天体表面, 但最终软着陆的位置远离初始期望的软着陆位置而导致任务失败或部分失败. 如果导航与制导误差无法做到非常精确, 则在选择小天体表面软着陆时应尽量避开小天

体赤道附近的区域和表面凸区域.

2 小天体引力场模型与地形地貌

考虑小天体不规则几何外形及其引力场. 其不规则的外形和引力场物理模型使用多面体模型数据进行计算, 其引力势^[7,8]为

$$U(\mathbf{r}) = \frac{1}{2}G\sigma \sum_{e \in \text{edges}} \mathbf{r}_e \cdot \mathbf{E}_e \cdot \mathbf{r}_e \cdot L_e - \frac{1}{2}G\sigma \sum_{f \in \text{faces}} \mathbf{r}_f \cdot \mathbf{F}_f \cdot \mathbf{r}_f \cdot \omega_f, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{r}=[x, y, z]^T$ 是探测车所在位置在小天体本体坐标系的位置矢量, $U(\mathbf{r})$ 是小天体的引力势, $G=6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 为引力常数, σ 为小天体密度; $\mathbf{r}_e$ 和 $\mathbf{r}_f$ 分别为表面边上和表面场点到固定点的矢量; $\mathbf{E}_e$ 和 $\mathbf{F}_f$ 分别为边和面的张量参数, L_e 为积分因子, ω_f 为符号角度.

小天体对探测车的引力由下式计算:

$$\nabla U = -G\sigma \sum_{e \in \text{edges}} \mathbf{E}_e \cdot \mathbf{r}_e \cdot L_e + G\sigma \sum_{f \in \text{faces}} \mathbf{F}_f \cdot \mathbf{r}_f \cdot \omega_f. \quad (2)$$

选取小行星6489 Golevka为例来计算小天体的引力场环境及不规则表面的地形地貌等. 小行星6489 Golevka的自旋周期为6.026 h, 密度为2.7 g cm⁻³, 尺寸为0.35 km×0.25 km×0.25 km^[9], 物理模型采用2048个顶点和4096个面^[10].

图1给出了小行星6489 Golevka的表面地形地貌及表面整体引力环境分布. 由于小行星6489 Golevka是一个非凸的小行星, 其表面不仅有局部凸的区域, 也有凹区域和平坦区域. 这一点从图1(a)中就可以明显地看出. 以小行星质心为原点, 计算表面高度, 得到的表面高度最大值为394.68 m, 最小值为159.26 m, 表面高度最大值几乎是最小值的2倍. 从这一数值及图1(a)可见该小行星具有强不规则的几何外形. 由于表面引力的计算未包含小天体旋转带来的科氏力效应, 其表面引力的分布图, 即图1(c)与(a)和(b)中表面高度的分布在外形上比较接近, 而数值上相反, 即表面高度较大的位置其引力值较小, 而表面高度较小的位置其引力值较大. 但表面软着陆过程中, 着陆器未接触表面时相对小天体所受的力包含旋转引起的效应, 力的数值为有效势的梯度, 也即有效引力. 图1(d)和(e)给出了小天体表面的有效势分布. 从图中可见, 表面有效

图 1 (网络版彩图)小行星6489 Golevka的表面地形地貌及表面整体引力环境分布. (a) 表面地形地貌立体图; (b) 表面地形地貌等高线图; (c) 表面引力; (d) 表面有效势; (e) 表面有效势等高线图

Figure 1 (Color online) The topography, geomorphology, and gravitational environment of asteroid 6489 Golevka. (a) A perspective view of surface topography and geomorphology; (b) the contour map of surface topography and geomorphology; (c) surface gravitation; (d) surface effective potential; (e) the contour map of surface effective potential.

势的分布和引力的分布有所不同, 不论是数值最大值、最小值的位置还是个数, 甚至局部分布的外形也有所不同. 着陆器在小天体表面接触小天体时的受力不仅包括有效引力, 还包括碰撞时的径向和法向接触力.

3 表面黏滑及碰撞弹跳

本节考虑着陆器在小天体表面运动时的动力学方程. 由于小天体表面是非光滑的, 首先假定摩擦系数为恒定的. 令表面局部法向的单位矢量为 $\mathbf{N}_\perp$, 而着陆器所受的摩擦力方向的单位矢量为 $\mathbf{N}_\parallel$. 当着陆器在小天体表面滑动或滚动时, 小天体本体坐标系中着陆器的动力学方程为

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{r}} = -2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} - \frac{\partial V(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}} - \mu \Theta \mathbf{N}_\parallel + \lambda \nabla W, \\ W(\mathbf{r}) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{\omega}$ 为小天体的旋转角速度矢量,

$$V(\mathbf{r}) = -0.5(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + U(\mathbf{r}),$$

$W(\mathbf{r})$ 是表面几何形状函数, μ 为摩擦系数, 法向压力为 $\mathbf{N}_f = (\nabla U^* \cdot \mathbf{N}_\perp) \mathbf{N}_\perp$, 其中 $\nabla U^* = \nabla V + 2m\boldsymbol{\Omega} \times \dot{\mathbf{r}}$, 记 $\Theta = \nabla U^* \cdot \mathbf{N}_\perp$, 则摩擦力为 $\mathbf{f}_{\text{fric}} = \mu |\mathbf{N}_f| \mathbf{N}_\parallel = \mu \Theta \mathbf{N}_\parallel$.

考虑不规则小天体表面的黏滑作用(Stick-Slip Effect), 则需要计算运动时的阻尼力(Damping Forces)和弹性力(Spring Forces). 颗粒的黏滑动力学(Stick-Slip Dynamics)方程^[3]为

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{r}} = -2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} - \frac{\partial V(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}} - \eta_{\text{damp}} \dot{\mathbf{r}} - k(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \\ - \mu \Theta \mathbf{N}_\parallel + \lambda \nabla W, \\ W(\mathbf{r}) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

当着陆器弹起后, 着陆器相对于小天体体固连坐标系的轨道动力学方程^[11]为

$$\ddot{\mathbf{r}} = -2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} - \frac{\partial V(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}}. \quad (5)$$

着陆器着陆过程处理为软接触, 即接触过程有弹

性作用和阻尼作用.

采用精确的自旋周期、密度与不规则几何外形模型数据来计算引力与地形地貌, 采用软球离散元模型来计算着陆器软着陆时的碰撞接触过程、弹跳过程及表面黏滑的动力学行为. 为了有效地计算, 整个计算过程全部采用离散元模型, 包括引力场的计算也采用离散元模型^[3]. 通过多面体模型生成不规则小天体的几何外形, 再由足够多个(记为 N)球体来填充不规则小天体, 这样就可以通过 N -body模型来模拟不规则小天体的引力场了; 但表面的碰撞与黏滑的计算需要更精细的颗粒, 因此在已经由 N 个球体填充的不规则小天体的表面用更小的小球来覆盖, 这样需要的小球数量记为 M , 则 M 远大于 N . 小天体表面软着陆过程中在接近小天体表面释放的着陆器一般都会经过若干次碰撞才可能静止于小天体表面. 事实上, 足够小的小球覆盖小天体的表面甚至能够很好地模拟表面的碎石与土壤环境. 取垂直的弹性恢复系数为0.5, 滑动和滚动摩擦系数分别为0.5和0.55^[12]. 考虑摩擦力时表面着陆点的稳定性, 采用不同的小天体形状模型和摩擦模型计算出来的结果会有所区别. 一般来说, 采用 N -body模型来模拟不规则小天体+软球离散元模型计算碰撞接触可以考虑更加精细的摩擦和表面作用, 因此比多面体模型+摩擦力计算出来的要更加精确.

本节给出6489 Golevka表面着陆器软着陆过程的模拟. 为了详细分析不同的着陆初始拟接触表面位置、不同的碰撞速度、不同的软着陆关机位置等情况引起的不同结果. 本文特别选取了2个成功软着陆算例和3个不同的未达到软着陆的算例进行分析, 以揭示小

天体表面软着陆的关键动力学机制.

4 无效软着陆的计算与分析

选取不同的软着陆区域和初始条件, 可以得到不同的计算结果. 上一节的结果很好地印证了这一点. 本节我们选取3个不同的算例来分析无效软着陆的主要原因, 由此可以从动力学机理的角度为小天体软着陆的目标区域设计、轨迹设计等提供有价值的参考. 使得人们在进行小天体表面软着陆轨迹设计、软着陆区域选择、碰撞弹跳的动力学模型考虑、表面运动时的黏滑效应分析等方面可以知道需要规避那些参数和软着陆区域以及需要选择那些参数和软着陆区域.

本节的3个算例分别为弹跳1次后形成环绕轨道运动、未弹跳直接形成平衡点附近的拟周期轨道运动和未弹跳直接进入逃逸轨道. 这3个算例反映了着陆器在小天体无效软着陆中比较典型的可能运动状态.

4.1 弹跳2次后形成环绕轨道运动

图2给出了在小行星6489 Golevka表面无效软着陆的一种可能类型. 着陆器在软着陆过程中并非不与小行星表面接触, 而是接触后发生了弹跳, 此后发生第二次弹跳, 继而形成了绕小行星运行的轨道运动. 从图2(a)可见弹跳及发生弹跳后着陆器相对于小行星的运动轨迹. 着陆器与小行星表面首次接触位置位于小行星赤道面附近; 第二次接触的位置在小行星的南半部分, 即接触位置的 z 轴坐标为负, 此外, 第二次接触的位置在小行星表面凸区域上. 从图2(b)中的着陆

图2 (网络版彩图)小行星6489 Golevka的表面软着陆过程中着陆器碰撞后形成环绕轨道的碰撞、黏滑与动力学行为计算结果. (a) 着陆器相对小天体的运动轨迹; (b) 着陆器相对于表面的速度大小; (c) 着陆器在小天体质心固连坐标系三轴速度分量

Figure 2 (Color online) The impact and stick-slip dynamical behaviours of the lander during the soft-landing on asteroid 6489 Golevka, the lander's motion becomes orbital motion after one or more impacts and hoppings. (a) The trajectory of the lander relative to the minor celestial body; (b) the speed of the land in the body-fixed frame; (c) the velocity of the lander in the body-fixed frame.

器速度大小图像中可见, 着陆器相对小行星表面的速度发生了2次突变, 这2次突变发生在着陆器与小行星碰撞的时刻. 从图2(b)和(c)中可以看出在2次弹跳后, 着陆器做轨道运动, 速度大小和速度矢量不在发生突变, 速度大小和速度矢量分量的曲线比较光滑.

4.2 未弹跳直接形成平衡点附近的拟周期轨道运动

图3给出了在小行星6489 Golevka的表面无效软着陆的另一种可能类型. 着陆器在运动过程中并未与小行星表面接触, 而是进入了绕小行星6489 Golevka稳定平衡点运行的拟周期轨道. 小行星6489 Golevka体外的4个平衡点之中有2个是稳定的. 预先选定的软着陆区域和其中1个稳定平衡点有比较接近的经纬度. 由于

着陆器并未与小行星发生碰撞, 也并未逃逸, 只是运行轨道发生了变化, 一般来说, 这种无效软着陆有补救的可能. 从图3(b)和(c)可见, 着陆器在绕稳定平衡点运行时, 速度大小的变化和速度矢量分量的变化间隔都是有一定周期的, 由于变化周期前后的位置和速度轨迹并不重合, 这种运动不是周期运动, 而是拟周期运动.

4.3 未弹跳直接进入逃逸轨道

图4给出了在小行星6489 Golevka的表面无效软着陆的一种后果比较严重的可能类型. 着陆器在运动过程中不仅未与小行星表面接触, 还发生了逃逸. 通常来说, 着陆器在软着陆前会在环绕小行星飞行的轨道上运行, 其速度未达到逃逸速度. 而在软着陆过程中一般也不会出现着陆器相对小行星的速度达到逃逸

图3 (网络版彩图)小行星6489 Golevka的表面软着陆过程中着陆器未与小行星表面碰撞即形成轨道运动的动力学行为计算结果. (a) 着陆器在小天体附近的运动的轨迹; (b) 着陆器相对于表面的速度大小; (c) 着陆器在小天体质心固连坐标系三轴速度分量

Figure 3 (Color online) The impact and stick-slip dynamical behaviours of the lander during the soft-landing on asteroid 6489 Golevka, the lander's motion becomes orbital motion without impacts. (a) The trajectory of the lander around the minor celestial body; (b) the speed of the land in the body-fixed frame; (c) the velocity of the lander in the body-fixed frame.

图4 (网络版彩图)小行星6489 Golevka的表面软着陆过程中着陆器未与小行星表面碰撞即逃逸的动力学行为计算结果. (a) 着陆器相对小天体的运动轨迹; (b) 着陆器相对于表面的速度大小; (c) 着陆器在小天体质心固连坐标系三轴速度分量

Figure 4 (Color online) The impact and stick-slip dynamical behaviours of the lander during the soft-landing on asteroid 6489 Golevka, the lander's motion becomes orbital motion without impacts. (a) The trajectory of the lander relative to the minor celestial body; (b) the speed of the land in the body-fixed frame; (c) the velocity of the lander in the body-fixed frame.

速度的可能, 因此这种类型出现的可能性很小.

5 软着陆过程中碰撞与黏滑的计算

在2个成功软着陆算例中, 其中一个软着陆算例的最终着陆区域距离目标软着陆区域较远, 未达到预定的软着陆任务目标. 由此来进行对比分析. 本节算例为在小行星6489 Golevka的较为凸的区域和较为平坦的区域附近进行首次碰撞的软着陆算例, 分别如图5和6所示. 首次碰撞点在目标软着陆点附近.

5.1 未达到预定着陆区域的软着陆算例

图5给出了在小行星6489 Golevka的赤道附近较为凸的区域处进行软着陆的算例, 虽然成功着陆在小行星的表面, 但最终着陆区域距离预先希望着陆的区域很远, 未达到预定着陆区域, 基本可判定着陆任务

实施失败. 首次碰撞后, 着陆器弹起并多次与小行星表面碰撞, 再继续弹跳, 经过若干次碰撞最终静止于小行星6489 Golevka的表面. 如果此时在6489 Golevka附近有轨道器实时监视着陆器的运动, 且观测分辨率为5 m, 则可观测到6次弹跳; 如果观测分辨率为20 m, 则可观测到3次弹跳.

由图5(a)中可见, 着陆器在首次接触小行星表面后, 弹起后继续做轨道运动, 轨道运动与接触运动交替进行, 绕小行星6489 Golevka赤道面附近3/4圈后最终静止于小行星表面. 从图5(b)可见, 着陆器软着陆过程中首次接触小行星表面发生碰撞, 继而弹跳后, 又发生了若干次碰撞, 并且弹跳高度衰减很慢. 从图5(c)也可看到着陆器相对于小行星表面的速度大小在前 2.35×10^4 s时衰减很慢, 此后才迅速衰减. 至 2.68×10^4 s时静止于小行星表面. 由图5(d)中着陆器相对于小行星本体固连坐标系的三轴速度突变也可以看出碰撞的

图 5 (网络版彩图)小行星6489 Golevka表面成功软着陆过程中的碰撞与黏滑动力学行为计算结果. (a) 着陆器在小天体表面碰撞、弹跳与表面运动的轨迹; (b) 首次碰撞后的弹跳高度示意图; (c) 着陆器相对于表面的速度大小; (d) 着陆器在小天体固连坐标系三轴速度分量

Figure 5 (Color online) The impact and stick-slip dynamical behaviours of the lander during the successful soft-landing on asteroid 6489 Golevka. (a) The trajectory of the lander, including the impact, hopping and surface motion; (b) the height of the lander after the first impact; (c) the speed of the land in the body-fixed frame; (d) the velocity of the lander in the body-fixed frame.

图 6 (网络版彩图)小行星6489 Golevka的表面成功软着陆过程中的碰撞与黏滑动力学行为计算结果. (a) 着陆器在小天体表面碰撞、弹跳与表面运动的轨迹; (b) 首次碰撞后的弹跳高度示意图; (c) 着陆器相对于表面的速度大小; (d) 着陆器在小天体质心固连坐标系三轴速度分量

Figure 6 (Color online) The impact and stick-slip dynamical behaviours of the lander during the successful soft-landing on asteroid 6489 Golevka. (a) The trajectory of the lander, including the impact, hopping and surface motion; (b) the height of the lander after the first impact; (c) the speed of the land in the body-fixed frame; (d) the velocity of the lander in the body-fixed frame.

时刻和碰撞前后三轴速度的变化情况.

从软着陆开始到最终静止总耗时为7.44 h. 从软着陆开始直至前6.53 h范围内着陆器相对小行星表面的速度衰减较慢, 此后逐渐加快.

5.2 达到预定着陆区域的软着陆算例

图6给出了在小行星6489 Golevka的平坦区域处进行软着陆的算例, 最终不仅成功着陆在小行星的表面, 而且最终着陆区域在预先希望着陆的区域内, 最终着陆点距离预先希望着陆的点很近. 此外, 从图6(a)可见, 着陆器在着陆过程中的轨迹有向回拐弯的现象, 这导致最终着陆区域在预先希望着陆的区域内, 也说明选定的着陆区域是软着陆的稳定区域. 由此可知着陆任务实施成功. 从图6(a)和(b)可见, 着陆器在首次碰撞小行星表面以后, 也发生了多次弹跳和再碰撞的过程, 此后才开始在小行星表面运动. 如果此时在6489

Golevka附近有轨道器实时监视着陆器的运动, 且观测分辨率为5 m, 则可观测到7次弹跳; 如果观测分辨率为20 m, 则可观测到3次弹跳.

由图6(a)可见, 着陆器在首次接触小行星平坦区域后, 弹起后做一段很短的轨道运动后与平坦区域再次碰撞, 碰撞后并未沿着原先的方向弹跳, 而是几乎反向弹跳, 此时如果继续沿着原先的方向弹跳, 则会运动至小行星的凸区域附近, 而凸区域是不稳定的软着陆区域, 这也解释了着陆器能限制在平坦区域弹跳的现象. 同时也应该注意到, 小行星的表面平坦区域虽然是软着陆的稳定区域, 但接触碰撞的初始相对速度也不可过大, 否则会超出稳定域的限制.

从图6(b)可见, 着陆器软着陆过程中首次接触小行星表面并发生碰撞, 继而弹跳后, 又发生了若干次碰撞的弹跳高度衰减都很快. 从每次弹跳的最大高度来看, 衰减曲线类似于指数衰减的曲线. 从图6(c)也可

看到着陆器在 9.85×10^3 s时静止于小行星表面. 也就是说, 从软着陆开始到最终静止耗时2.74 h. 将图6(d)和5(d)进行对比可见, 两个软着陆算例的速度矢量变化完全不同, 图2(d)中的速度矢量分量的变化较为平缓光滑, 而图6(d)中的速度矢量变化较为剧烈, 且在非碰撞时刻对应的时间段中, 图6(d)中速度矢量的分量的变化曲线几乎为直线段, 而图5(d)中速度矢量的分量的变化曲线则弯曲较为明显. 研究对象的形状、密度、自旋速率以及接触碰撞的系数不同时, 计算出来的结果会有所不同, 其共同特点是成功软着陆的目标位置通常需要选择在非赤道面、平坦区域或凹区域.

6 结论

本文分析了不规则小天体表面软着陆过程中的碰

撞与黏滑动力学行为. 分析了小行星6489 Golevka的表面地形地貌及表面整体引力环境分布. 研究了计算小天体表面软着陆过程中考虑小天体不规则外形、表面碰撞与黏滑情况下, 着陆器的弹跳运动、轨道运动与黏滑运动. 研究表明: 如果软着陆初始条件选取不佳, 着陆器可能弹跳后继续形成环绕轨道运动、或者未弹跳直接形成平衡点附近的拟周期轨道甚至逃逸轨道. 此外, 在小天体赤道附近的软着陆效果差于中纬度附近的软着陆效果. 两极的凹区域或平坦区域也是较好的软着陆目标区. 如果着陆器软着陆过程中执行机构的控制精度不是很高, 则应当尽量不选取小天体赤道附近的平坦区域或凸区域进行软着陆. 即使着陆器最终能着陆于小天体表面, 但着陆位置选取不佳或控制器执行效果较差, 着陆器最终静止的位置也可能距离最初设计的软着陆位置较远. 在特殊任务需求情况下, 赤道面附近的凹区域也可以作为备选的目标着陆区域.

参考文献

- 1 Sierks H, Barbieri C, Lamy P L, et al. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, 2015, 347: aaa1044
- 2 Accomazzo A, Lodi S, Companys V. Rosetta mission operations for landing. *Acta Astronaut*, 2016, 125: 30–40
- 3 Jiang Y, Zhang Y, Baoyin H. Surface motion relative to the irregular celestial bodies. *Planet Space Sci*, 2016, 127: 33–43, arXiv: 1605.06194
- 4 Cheng B, Yu Y, Baoyin H. Asteroid surface impact sampling: Dependence of the cavity morphology and collected mass on projectile shape. *Sci Rep*, 2017, 7: 10004
- 5 Bazzocchi M C F, Emami M R. Formation of multiple landers for asteroid detumbling. *Adv Space Res*, 2018, 62: 732–744
- 6 AlandiHallaj M A, Assadian N. Soft landing on an irregular shape asteroid using multiple-horizon multiple-model predictive control. *Acta Astronaut*, 2017, 140: 225–234
- 7 Werner R A. The gravitational potential of a homogeneous polyhedron or don't cut corners. *Celestial Mech Dyn Astr*, 1994, 59: 253–278
- 8 Werner R A, Scheeres D J. Exterior gravitation of a polyhedron derived and compared with harmonic and mascon gravitation representations of asteroid 4769 Castalia. *Celestial Mech Dyn Astr*, 1997, 65: 313–344
- 9 Mottola S, Erikson A, Harris A W, et al. Physical model of near-earth asteroid 6489 Golevka (1991 JX) from optical and infrared observations.. *Astron J*, 1997, 114: 1234
- 10 Neese C. Small Body Radar Shape Models V2.0. EAR-A-5-DDR-RADARSHAPE-MODELS-V2.0. NASA Planetary Data System, 2004
- 11 Yu Y, Baoyin H. Modeling of migrating grains on asteroid's surface. *Astrophys Space Sci*, 2015, 355: 43–56
- 12 Schwartz S R, Richardson D C, Michel P. An implementation of the soft-sphere discrete element method in a high-performance parallel gravity tree-code. *Granular Matter*, 2012, 14: 363–380

Impact and stick-slip dynamics in the soft-landing on minor celestial bodies

JIANG Yu^{1,2*} & LI HengNian^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China;

² China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China

The soft-landing on the surface of minor celestial bodies has been investigated with considering the impact and stick-slip effect. The polyhedron model is used to analyze the irregular shape and topography and geomorphology of minor celestial bodies. The soft-sphere discrete element method is used to fill the irregular minor celestial body's polyhedron model and cover the surface of the body; and then the irregular shape, the gravitational environment, as well as the impact and hopping with the surface can be calculated precisely. The dynamical parameters of failed soft-landing and successful soft-landing are calculated and analyzed. In the cases of successful soft-landing, there are two obviously different kinds: firstly, the final position of the lander is near the target position; secondly, the final position of the lander is far from the target position. The difference of these two kinds of results is discussed. This research shows the major dynamical behavior of soft-landing on minor celestial bodies includes impact, hopping, as well as stick-slip effect. If the initial positions of soft-landing are improper chosen, the lander may become orbital motion around minor celestial body after one or more impact and hopping, or turn to quasi-periodic motion around equilibrium points without impact, or perhaps be static far from the initial position after several times of impact and hopping and leads to the failure of the deep space mission. For the successful soft-landing process, after several times of landings on the surface during the soft-landing process, the lander will finally settle on the surface of the minor celestial body. The results show that the soft-landing region should be selected as a flat area or concave region, which is far from the equatorial plane of the minor celestial bodies.

minor celestial bodies, soft-landing, impact motion, hopping motion, stick-slip effect

PACS: 96.25.De, 96.25.Nc, 96.30.Ys

doi: [10.1360/SSPMA2018-00350](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00350)