彗星着陆器“菲莱”的下降弹跳轨迹

温童歌¹, 曾祥远^{1*}, 王蜀泉²

1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081;

2. 中国科学院太空应用重点实验室, 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;

*联系人, E-mail: zeng@bit.edu.cn

收稿日期: 2018-10-12; 接受日期: 2018-11-27; 网络出版日期: 2019-05-17

国家自然科学基金青年基金(编号: 11602019)、中国科学院太空应用重点实验室开放基金(编号: LSU-KFJJ-2018-01)和中国科协青年人才托举工程(编号: 2016QNRC001)资助项目

摘要 彗星探测对了解地球生命起源和早期太阳系演化等具有重要意义. 着陆器“菲莱”(Philae)是彗星探测任务“罗塞塔”(Rosetta)的重要组成部分, 作为人类历史上第一个登陆彗星的着陆器, 具有里程碑式的意义. 本文将“菲莱”看作质点, 建立了“菲莱”在67P附近自由轨道运动和表面弹跳运动的动力学模型, 重建了“菲莱”在67P附近和表面运动的轨迹. 由于第一次触地的情况较为复杂, 对轨道运动和弹跳运动这两个阶段分段仿真, 复现了“菲莱”自“罗塞塔”探测器分离至停止运动的轨迹, 并与欧空局SONC复现的“菲莱”运动轨迹进行对比分析. 最后, 对“菲莱”在67P表面的弹跳轨迹进行参数化仿真, 改变第一次触地点TD1的切向和法向恢复系数, 分析恢复系数对“菲莱”表面弹跳运动的影响.

关键词 菲莱, 彗星探测, 着陆轨迹, 表面弹跳

PACS: 96.12.Kz, 96.30.Cw, 96.25.Pq

1 引言

彗星是太阳系内的神秘天体, 纪录了46亿年前太阳及太阳系演化初期所发生的物理和化学过程; 彗星撞击还为早期的地球带来了丰富的有机物, 与生命的起源有着密不可分的关系^[1], 因此, 开展彗星探测显得尤为重要. 人类过去主要依靠地面望远镜设备观测彗星的形态、结构、光度和光谱. 现在尽管依靠空间望远镜和高空卫星可以观测到彗星的远紫外、X射线、

红外信息, 测定彗星的物质成分等^[2], 但这些认识依然很有限, 人类渴望采集彗星表面及内部的样本, 进一步探讨彗星物质的来源与演变.

欧洲航天局“罗塞塔”(Rosetta)任务的着陆器“菲莱”(Philae)是人类历史上第一颗飞抵彗星的着陆器, 在人类深空探测的历史中具有里程碑式的意义. “罗塞塔”探测器于2004年3月搭载Ariane 5号火箭发射. 经过10年的航行抵达67P/Churyumov-Gerasimenko彗星^[3]. 2014年8月6日, “罗塞塔”飞抵67P附近, 以30–10 km的

引用格式: 温童歌, 曾祥远, 王蜀泉. 彗星着陆器“菲莱”的下降弹跳轨迹. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 084503

Wen T G, Zeng X Y, Wang S Q. The descent and rebound trajectory of comet lander Philae (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 084503, doi: 10.1360/SSPMA2018-00349

距离绕飞彗星. 基于“罗塞塔”携带相机传回的图片, 为“菲莱”选择了一个理想的着陆地点^[4]. 2014年11月12日, “菲莱”与“罗塞塔”分离并飞往彗星表面. 在长达7 h的下落之后, “菲莱”终于抵达67P的表面.

因为将“菲莱”固定在彗星表面的两个“鱼叉”装置并没有弹出, 冷气推进系统也未能正常工作, 后续研究表明选定的着陆地点可能也并非松软多孔的砂石, 在砂石下面约0.2 m处存在硬质层^[5], 所以“菲莱”第一次着陆后未能成功附着在彗星表面, 经历了3次反弹才停留在了一个悬崖底部, 光照严重不足, 在主电量耗尽后无法继续运转, 与地面(以及“罗塞塔”探测器)失去了联系.

“菲莱”在67P表面的弹跳运动较为复杂, 研究其与彗星表面相互作用可为下一次表面探测任务提供重要参考. 目前已有许多学者和研究单位对“菲莱”下降和反弹时的姿态进行重建. Heinisch等人^[6]提出了一种利用“罗塞塔”探测器上搭载的RPC-MAG (ROSETTA Plasma Consortium Magnetometer)和“菲莱”上搭载的ROMAP (Rosetta Lander Magnetometer and Plasma Monitor)观测“罗塞塔”和“菲莱”周围磁场从而确定着陆器姿态的方法, “菲莱”真实的姿态与重建的姿态之间误差不超过5°左右, 具有较好的精度. Heinisch等人^[7]还提出通过测定飞轮的旋转速率来确定着陆器姿态的方法. 文献中利用不同的方法获取飞轮旋转频率, 对“菲莱”触地后旋转频率和姿态的变化进行了详细的论述. Baranyai等人^[8]借助太阳能电池板提供的数据, 推测太阳辐射的方向, 从而对着陆器的下降和着陆的轨迹进行拟合, 并重建了着陆器的旋转运动.

但是, 现有的文献中针对“菲莱”下降、弹跳轨迹的相关研究较少. Biele等人^[5]详细论述了RMOC (Rosetta Mission Operations Center, Flight Dynamics)和SONC (the Lander Science Operations and Navigation Centre)两个团队对于着陆器弹跳轨迹的重建对比. 从“分离”到“碰撞”两个团队的仿真是一致的, 第一次碰撞之后在彗星表面弹跳的轨迹不一样, 但两组仿真所得轨迹的最终着陆区域是一致的, 即着陆器都在Abydos附近停止运动. 导致表面弹跳轨迹重建差异的原因主要是两个团队使用的67P模型不同, 且RMOC使用了“菲莱”搭载的广角相机(Wide-angle Camera, WAC)于2014年11月12日16:45和17:20所拍摄的两幅图片进行约束, 而未对“菲莱”第三次弹跳的位置和速度进行约

束. SONC则依据CONSERT (Comet Nucleus Sounding Experiment by Radio-wave Transmission)测量的结果约束“菲莱”运动的终点来进行弹跳轨迹的重建. Hockman等人^[9]提出采用蒙特卡罗仿真构造先验概率(即“菲莱”反弹后速度), 再利用贝叶斯概率公式计算局部重力对“菲莱”弹跳轨迹进行约束的方法. 考虑到彗星表面附近引力场的不确定性以及最后一部分弹跳轨迹缺少数据观测值, 这些初步重建的弹跳轨迹结果已经较为成功.

与现有的研究不同, 本文未采用“菲莱”着陆器上科学载荷采集的数据, 而从动力学的角度对“菲莱”的下降和弹跳轨迹进行重建, 仅通过“菲莱”受到来自67P的引力、离心力、摩擦力和支持力等约束其弹跳轨迹. 本文第2节将“菲莱”抽象为一个质点, 将“菲莱”的运动分为两个阶段: 轨道运动和表面运动, 建立动力学模型. 第3节与ESA复现的菲莱轨迹进行对比分析. 第4节对“菲莱”第一次触地的TD1点设置不同的能量衰减系数开展参数化讨论. 第5节总结全文.

2 “菲莱”运动的动力学方程

2014年11月12日8:35:00, “菲莱”在距离67P/Churyumov-Gerasimenko彗星质心22.38 km的地方与“罗塞塔”探测器分离, 做轨道运动降落至67P的表面. 作为彗星表面探测器运动行为的初期研究, 本文将“菲莱”抽象成一个质点, 相对于67P质心的矢径为 $\mathbf{r}$, 在惯性系中, 只考虑67P对“菲莱”的引力, 忽略其他摄动力, 则质点的运动方程可以表示为

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\nabla U. \quad (1)$$

由绝对导数和相对导数的关系可得着陆器在67P本体坐标系中运动方程:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \ddot{\mathbf{r}} + 2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}. \quad (2)$$

考虑到67P处于定轴转动状态, 且在较短时间内角速度变化十分缓慢, 可视作均匀自旋, 因此令 $\dot{\boldsymbol{\omega}} = 0$, 则:

$$\ddot{\mathbf{r}} + 2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = -\nabla U. \quad (3)$$

引入有效势:

$$V = -\frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + U. \quad (4)$$

则式(3)可简化为

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

由式(5)可得“菲莱”在67P表面做自由轨道运动时的运动方程.

当“菲莱”与67P表面相互接触时, 仍将“菲莱”简化为质点, 除了67P对“菲莱”的引力之外, 还应当考虑67P表面对“菲莱”的支持力和摩擦力, 可得“菲莱”的表面运动方程为^[10]

$$\ddot{\mathbf{r}} + 2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} = -\nabla V + N\hat{\mathbf{n}} - \mu_k N\hat{\mathbf{r}}, \quad (6)$$

其中, N 为67P对质点的支持力幅值, $\hat{\mathbf{n}}$ 表示接触点的单位外法线方向, μ_k 为动摩擦系数. “菲莱”若以足够大的速度碰撞彗星表面, 则会发生反弹, 引入法向恢复系数 ε_n 和切向恢复系数 ε_t . 碰撞前的相对速度为 $\dot{\mathbf{r}}^-$, 碰撞后的相对速度为 $\dot{\mathbf{r}}^+$, 则碰撞前后的速度关系满足:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}^- &= \dot{\mathbf{r}}_n^- + \dot{\mathbf{r}}_t^-, \\ \dot{\mathbf{r}}^+ &= -\varepsilon_n \dot{\mathbf{r}}_n^- + \varepsilon_t \dot{\mathbf{r}}_t^-. \end{aligned} \quad (7)$$

若“菲莱”以较小的速度碰撞彗星表面, 则以满足运动方程(6)的形式做表面运动. 由于小天体的引力场较弱, 探测器或质点在引力场中的轨道运动和表面运动之间并没有明显界限. 若在一定的地形条件下, 表面运动的滑动速度大于起飞的临界速度, “菲莱”会在67P表面翻跳, 若“菲莱”的速度进一步增大, 便会离开67P的表面而以运动方程(5)的形式绕67P做轨道运动(或弹跳运动), 甚至逃离67P的引力场.

3 “菲莱”运动轨迹仿真分析

对于从8:35:00–15:34:03(文中均为UTC时间)“菲莱”做轨道运动这一阶段, SONC采用的是OSIRIS相机提供的多面体彗星形状模型, 重建了一条较为精确的着陆轨迹. 对于15:34:03–17:31:17时段“菲莱”在67P表面做弹跳运动的这一阶段, 由于“菲莱”着陆后未能锚固在67P表面, 发生了翻跳, 科学载荷记录数据存在缺失, SONC采用优化算法Nelder-Mead算法搜索出了6条可能的弹跳轨迹¹⁾, 如图1所示. 6条重建的轨迹中, TD1点(第一次触地点)在同一位置, TD2点则均不相同, 最大偏差有275 m.

图1 (网络版彩图)SONC重建“菲莱”在67P表面的6条弹跳轨迹

Figure 1 (Color online) SONC reconstructed 6 trajectories of Philae rebounding on comet 67P.

本文与SONC重建的“菲莱”8:35:00–15:34:03这一时段着陆轨迹对比如图2所示, 实线(红色)是本文重建的“菲莱”从与“罗塞塔”探测器分离后至第一次接触67P表面(TD1)的运动轨迹, 虚线(蓝色)是SONC重建的轨迹.

本文重建了“菲莱”仅在67P引力作用下做自由轨道运动降落至彗星表面上的着陆轨迹. 仿真选取OSIRIS相机提供的多面体彗星模型, 多面体的顶点数为24877, 面数为49748. 对与“罗塞塔”探测器分离时“菲莱”的位置和速度进行了约束, 并未约束其终点的位置和速度.

如图2所示, 北京理工大学动力学与先进控制实验室重建的“菲莱”在67P的第一次触地点(简称TD1)与SONC重建的TD1之间存在大约74 m的偏差. 该误差来

图2 (网络版彩图)“菲莱”着陆轨迹(实线是本文重建的轨迹, 虚线是SONC重建的轨迹)

Figure 2 (Color online) The landing trajectory of Philae (the solid line comes from this paper, the dashed line comes from SONC).

1) <ftp://spifto.esac.esa.int/data/SPICE/ROSETTA/>

源的可能原因如下:“菲莱”在下降段有姿态调整和微小的轨道调整,而本文仿真时仅为自由下落的轨迹;文中还忽略了一些摄动力对“菲莱”的影响;“菲莱”上面所携带的科学载荷(飞轮等)也会对其下降段的轨迹造成影响;这些都是利用质点建模体现不出来的;同时,67P彗星多面体模型假设其密度为常值,不够准确.

图3是本文重建的“菲莱”在67P表面的弹跳轨迹.文中对“菲莱”在TD1之后的位置和反弹速度进行了约束,采用了SONC的核算结果.

由于着陆器“菲莱”第一次触地并不是弹性碰撞^[11],本文未对“菲莱”在TD1之前的速度进行约束,研究表明,“菲莱”第一次触地之前的入射速度方向沿着TD1的法线方向(大约4°偏差),反弹速度方向几乎与入射速度的方向正交.着陆时,“菲莱”绕其Z轴旋转,起落架的3只脚顺次接触地面,将垂直速度(相对于局部法线)转换为切向速度,且入射速度的2/3由阻尼管和起落架通过与地面的接触耗散,仅依靠质点表面运动的动力学模型显然无法仿真分析上述复杂过程.为此,在本文基础上还需引入刚体姿态动力学方程和更多表面碰撞处理等来进一步深入研究.

文中将TD2处理为弹性碰撞^[11],由于67P的土壤力学性质未知,调整TD2的法向和切向恢复系数,得到一条与SONC重建的最为相近的轨迹.本文选取法向恢复系数 ε_n 为0.08,切向恢复系数 ε_t 为0.92,速度几乎没有被耗散,且入射速度和反弹速度的方向之间具有较大

的角度.本文重建的轨迹和SONC重建的6条轨迹相比,在TD2点最小的偏差为36.6 m(图3 TD2/A),最大的偏差为195.2 m(图3 TD2/B).本文重建的“菲莱”弹跳轨迹与SONC重建的6条轨迹的终点全部都落在Abydos区域.实际上,“菲莱”在小行星上经过了3次反弹才停在了最终位置,其中第3次反弹到“菲莱”停止运动之间的时间不足6 min,运动范围估计在10 m量级.作为初期对比研究,本文将“菲莱”第3次触地的TD3作为最终位置,由于本文将“菲莱”抽象为一个质点,仅能够处理“菲莱”在67P表面弹跳运动,而对“菲莱”在67P表面翻滚滑动至停止运动,不能给予很好的解决方案.为了简便起见,设置TD3的法向恢复系数 ε_n 和切向恢复系数 ε_t 均为0.

4 弹跳轨迹参数化讨论

假设“菲莱”在TD1点的碰撞是弹性的,本文选取ESA重建的“菲莱”下落至67P表面附近的位置和速度作为初值,改变TD1处的法向恢复系数和切向恢复系数,来研究菲莱在其表面可能的弹跳轨迹.

若假设TD1点是弹性碰撞,改变TD1点的切向恢复系数和法向恢复系数,仿真所得“菲莱”弹跳轨迹与ESA重建的弹跳轨迹有明显改变.这也印证了第2节中TD1点不是弹性碰撞的结论. TD1点处取不同的切向和法向恢复系数时,表面运动轨迹如图4和5所示.由

图3 (网络版彩图)“菲莱”弹跳轨迹对比图(实线是本文重建的轨道,其余两条虚线是SONC重建的轨道)

Figure 3 (Color online) The rebound trajectory of Philae (the solid line is reconstructed by this paper, the others are from SONC).

图 4 (网络版彩图)取法向恢复系数为0.5, 切向恢复系数从0.3–0.9变化, 步长为0.1

Figure 4 (Color online) The normal coefficient of restitution at TD1 is 0.5, and the tangential restitution changes from 0.3 to 0.9, with a step size of 0.1.

图 5 (网络版彩图)取切向恢复系数为0.7, 法向恢复系数从0.1–0.6变化, 步长为0.1

Figure 5 (Color online) The tangential coefficient of restitution at TD1 is 0.7, and the normal restitution changes from 0.1 to 0.6, with a step size of 0.1.

图可知, 切向和法向恢复系数变化对出射速度的方向影响较小. 增大切向恢复系数或法向恢复系数时, “菲莱”在TD1的出射速度、反弹高度和飞行时间也在随之增大. 如图5所示, 固定切向恢复系数, 当法向恢复系数依次增大时, “菲莱”出射速度的偏转角度也在增大. 当法向恢复系数为0.6左右时, “菲莱”绕67P转过一周后附着在其表面, 进一步增大法向恢复系数, “菲莱”就会逃离小行星表面做轨道运动.

图6所示为“菲莱”在TD1反弹后逃离67P引力场束缚的临界切向和法向恢复系数, 随着切向恢复系数从0逐渐增大, 临界法向恢复系数始终稳定在0.6左右. 由

图 6 (网络版彩图)“菲莱”在TD1反弹后逃离67P引力束缚的临界切向和法向恢复系数

Figure 6 (Color online) Philae's critical tangential and normal coefficient of restitution for escaping from 67P after rebound from TD1.

此观之, 在TD1处, 法向恢复系数决定了“菲莱”在法向方向的速度, 对“菲莱”能否在67P成功着陆并附着在其表面起决定性作用, 而切向恢复系数则对“菲莱”的影响较小. 因此, 为了安全着陆, 应当选取法向恢复系数尽可能小的着陆区域. 并采取一定的措施减小触地的法向速度或者将法向速度转化为切向速度.

5 结论

本文研究了67P/Churyumov-Gerasimenko彗星着陆器“菲莱”自“罗塞塔”探测器分离后的自由轨道运动和触地反弹后的表面运动. 将“菲莱”抽象为一个质点, 建立了轨道运动和表面运动的动力学方程. 从动力学的角度, 仅通过“菲莱”受力约束及其初始位置和速度, 而未采用“菲莱”科学载荷测量的数据, 复现了“菲莱”的运动轨迹.

SONC复现的“菲莱”从与“罗塞塔”探测器分离到第一次触地(TD1)的着陆轨迹较为精确, 由于本文仅考虑“菲莱”做自由轨道运动降落至TD1, 重建的着陆轨迹与SONC复现轨迹TD1点相差约74 m. 由于67P表面地形复杂, 第1次触地点TD1和第2次触地点TD2之间的土壤力学性质不同, 通过调节TD2的切向和法向恢复系数得到一条与SONC重建轨迹相似的弹跳轨迹. 本文重建的TD2与SONC重建的6条弹跳轨迹的TD2之间, 最小距离为36.6 m, 最大距离为195.2 m(ESA重建的6条轨迹间TD2点最大偏差约275 m), 初步重建轨迹

的结果较为理想. 实际上, “菲莱”与彗星67P表面的相互作用十分复杂, 抽象为一个质点会造成重建轨迹的结果存在较大的误差, 后续应当引入刚体姿态动力学方程深入研究.

文中假设“菲莱”在TD1点是弹性碰撞, 进行了参数仿真, 发现仿真的弹跳轨迹与实际弹跳轨迹明显不

同, 进一步验证了在TD1点不是弹性碰撞的结论. 同时, 对TD1参数仿真还发现法向恢复系数是决定“菲莱”能否成功附着在彗星表面的重要影响因素. 为了使得着陆器能够安全着陆, 应当选取法向恢复系数尽可能小的着陆地点, 并尽可能采取措施减小触地的法向速度或者将法向速度转化为切向速度.

参考文献

- 1 Matthews C N, Minard R D. Hydrogen cyanide polymers, comets and the origin of life. *Faraday Discuss*, 2006, 133: 393
- 2 Xu W B, Hu Z W. On the scientific objectives of space exploration to comets. *J Nanjing Univ-Nat Sci Ed*, 2006, 1: 1–10
- 3 Werner R A. The gravitational potential of a homogeneous polyhedron or don't cut corners. *Celestial Mech Dyn Astr*, 1994, 59: 253–278
- 4 Jurado E, Martin T, Canalias E, et al. Rosetta lander Philae: Flight dynamics analyses for landing site selection and post-landing operations. *Acta Astronaut*, 2016, 125: 65–79
- 5 Biele J, Ulamec S, Maibaum M, et al. The landing(s) of Philae and inferences about comet surface mechanical properties. *Science*, 2015, 349: aaa9816
- 6 Heinisch P, Auster H U, Richter I, et al. Attitude reconstruction of ROSETTA's Lander PHILAE using two-point magnetic field observations by ROMAP and RPC-MAG. *Acta Astronaut*, 2016, 125: 174–182
- 7 Heinisch P, Auster H U, Plettemeier D, et al. Reconstruction of the flight and attitude of Rosetta's lander Philae. *Acta Astronaut*, 2017, 140: 509–516
- 8 Baranyai T, Várkonyi P L, Balázs A. Rotational motion of the spacecraft philae during landing on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *J Spacecraft Rockets*, 2017, 54: 554–565
- 9 Hockman B, Reid R G, Nesnas I A, et al. Gravimetric localization on the surface of small bodies. In: IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2018. 1–12
- 10 Yu Y. Orbital dynamics in the gravitational field of small celestial bodies (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2014 [于洋. 小天体引力场中的轨道动力学研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2014]
- 11 Ulamec S, Biele J, Blazquez A, et al. Rosetta lander—Philae: Landing preparations. *Acta Astronaut*, 2015, 107: 79–86

The descent and rebound trajectory of comet lander Philae

WEN TongGe¹, ZENG XiangYuan^{1*} & WANG ShuQuan²

¹ School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Comet exploration is one of the focuses of the deep space exploration. It is of great significance for understanding the origin of the Earth's life and the evolution of the early solar system. The lander Philae is an important part of the Rosetta mission. As the first lander landing on the comet 67P, Philae stands out as one of the notable landmarks in the progress of space exploration. Firstly, this paper derives the mathematical model of Philae for its orbital motion and surface motion. Due to the complexity of the first touchdown, the simulation is divided into two stages, i.e., the orbital motion stage and the surface motion stage. In this study, Philae's descent and rebound trajectory are reconstructed by comparing with those reconstructed by ESA. Finally, a parametric study of the rebound trajectory is made by varying tangential and normal restitution coefficients of the first touch point TD1. The influence of the restitution coefficient on the surface rebound trajectory of Philae is analyzed.

Philae, comet exploration, landing trajectory, surface rebound

PACS: 96.12.Kz, 96.30.Cw, 96.25.Pq

doi: [10.1360/SSPMA2018-00349](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00349)