探测器安全着陆风险评估与敏感性分析

李 涛 杨 军 费思邈

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 探测器安全着陆是行星探测的关键环节,而目前着陆成功率偏低,进行安全着陆风险研究有着非常现实的工程需求. 为此,首先分析探测器结构与着陆方式,梳理行星表面影响安全着陆的主要因素,明确着陆安全判据,然后基于蒙特卡罗思想,模拟行星表面地貌和探测器着陆方式,给出了探测器在盲降下安全着陆概率估计的仿真方法. 在此基础上,考虑探测器尺寸和着陆区域面积,对探测器安全着陆概率进行敏感性分析,结果表明探测器的尺寸对安全着陆概率有显著影响.

关 键 词: 探测器; 着陆; 风险评估; 敏感性分析

中图分类号: V 448.22

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1461-04

Risk assessment and sensitivity analysis of detector safety landing

Li Tao Yang Jun Fei Simiao

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Safe landing of detector is the key of planetary exploration, but the success probability of landing is still low, and the study of landing risk is very important in practical engineering. The detector's structure and landing way were analyzed, and the main influence factors of the safety landing were concluded, then the criterions of safe landing were given. Based on Monte Carlo theory, the planet surface landform and detector landing way were simulated, and the probability of safety landing under blind landing was given by simulation method. Furthermore, consider the detector size and landing area, the sensitivity analysis of the probability of safety landing was carried out, and the results show that the detector size has significant influence on the probability of safety landing.

Key words: detector; landing; risk assessment; sensitivity analysis

随着月球探测等行星探测活动的深入开展,探测器安全着陆作为成功开展科学探测的第 1 步,关乎探测任务的成败,但当前行星探测的着陆成功概率仍然较低,据统计美苏在上世纪 60 – 70 年代进行的 20 次月球登陆探测中,出现 6 次失败,成功概率仅为 70%,而火星探测的成功概率更低,文献[1]指出,火星探测任务成功着陆的概率仅为 46.7%. 因此,开展探测器安全着陆风险评估与敏感性分析具有重要而现实的工程价值.

在探测器着陆过程中,影响安全着陆的因素主要是探测器的结构、着陆方式和行星表面的地形地貌等. 关于探测器的结构,文献[2]总结了国内外探测器的结构形状;文献[3]综述了月球探测器软着陆机构及工作原理. 至于着陆方式,文献[4]研究了月球探测器的着陆过程及方式;而文献[1]则讨论了火星探测器的着陆过程和着陆缓冲方式. 最后,在行星表面的地形地貌中,星球表面的障碍物对探测器的安全着陆危害很大;文献[5]研究了月球的地形地貌和月壤的物理机械性质;文献[6 – 7]综合阐述了月球表面的环境因

收稿日期: 2010-07-12; **网络出版时间**: 2011-11-23 15:06; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111123.1506.008

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111123.1506.008.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11001005); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(领航基金)(YWF-10-01-A11)

作者简介: 李 涛(1984 –),男,河北武安人,硕士生,buaatao@163.com.

素;文献[8]给出了月球表面的撞击坑和石块的数学模型. 当然,探测器的着陆安全评价标准是进行安全着陆风险评价的关键;文献[9-11]研究了火星着陆点的选择评价方法;文献[12-16]分别研究了探测器安全着陆条件、安全着陆区域选择与危险辨识和规避技术等.

综上所述,关于探测器的结构、着陆方式和行星表面的地形地貌等已有相当多的研究,而探测器的着陆安全风险评估问题的研究较少. 因此,本文在梳理归纳行星表面地貌与探测器结构及着陆方式基础上,明确安全着陆判据,采用仿真方法给出了在盲降条件下探测器着陆安全概率的估计,这里,"盲降"指探测器在着陆过程中没有采取规避障碍措施的着陆方式;进一步,考虑探测器的尺寸与着陆区域的大小,进行敏感性分析,分析结果表明,探测器尺寸对着陆安全概率具有显著的影响.

1 探测器安全着陆风险评估

1.1 探测器的结构与着陆方式

探测器的结构对于其安全着陆风险的评估是非常重要的,月球探测器主要由探测器主体和软着陆机构组成. 探测器主体主要搭载有效载荷,而软着陆机构发挥缓冲与支撑作用[1]. 目前,软着陆机构普遍采用 4 支撑杆构型,因此,本文以 4 支撑杆构型的探测器为研究对象.

探测器着陆方式对于模拟探测器的着陆过程非常重要,探测器的着陆方式是:探测器沿击中轨道向行星飞行,在接近行星时,先在某一高度将其速度基本减至零,然后利用小推力发动机把相对行星的速度保持在很小的范围之内[5],即探测器在到达行星表面上空后垂直于行星表面缓慢降落. 这时,影响探测器能否落地后保持直立的姿态基本上依赖于着陆表面的粗糙程度.

1.2 行星表面障碍物情况

宇宙中行星的地形地貌的海拔跨度非常大,例如,月球是非常凹凸不平的,月球有月坑、山脊、月面沟纹、圆丘、悬崖等地形特征[8],月球表面的撞击坑总数在 33 000 个以上,尤以月球高地更为密集[6],它们会严重影响探测器的安全着陆,因此,探测之前要收集着陆星球的地貌信息,选择较为平坦的区域进行着陆,这时,较大的坡、撞击坑和石块是影响安全着陆的主要危险因素.

1.3 探测器安全着陆判据与安全着陆概率估计

1.3.1 安全着陆判据

为了使探测器能够稳定降落在行星表面即探测器在降落到行星表面后可以保持直立姿势,要求探测器着陆区域内不能存在较大的危险因素,例如直径 1 m 的岩石等,文献[12]提出着陆点处障碍物高度必须小于探测器能够容忍的最大障碍物高度 $h_{\max}$,撞击坑深度必须小于探测器能够允许的最大撞击坑深度 $d_{\max}$. 假设探测器着陆点区域内存在石块的高度 h_i,撞击坑深度 d_i,则探测器的安全着陆判据为

$$\left.\begin{aligned} h_i &\leqslant h_{\max} \quad i = 1,2,\cdots,u \\ d_j &\leqslant d_{\max} \quad j = 1,2,\cdots,v \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中,u 为探测器预着陆区域内的石块个数;v 为探测器预着陆区域内的撞击坑个数.

1.3.2 探测器安全着陆概率估计方法

在已选定的着陆区域内,模拟探测器形状和探测区域的地貌信息,针对该地形,在探测区域内随机选择探测器降落区域,多次模拟探测器的着陆过程,判断每次是否成功,最后由模拟成功的比例得到探测器安全着陆概率的估计.

1) 模型假定:选定着陆区域为 S;探测器结构模型:平面矩形,尺寸:$a \times b$;危险障碍物结构模型:实心圆;探测器着陆点:探测器随机降落在探测区域内任何地方;

2) 着陆安全判定方法:判断 $a \times b$ 矩形是否与高于 $h_{\max}$的石块、深度超过 $d_{\max}$的撞击坑接触,以探测器中心为圆心,以探测器对称线为 X 轴、Y 轴,建立石块或撞击坑与探测器是否相交判别图,如图 1 所示,具体可归纳为以下 9 种情况:

① 判断石块或撞击坑是否在矩形区域内,其判断公式为

$$\left.\begin{aligned} -\frac{a}{2} < x < \frac{a}{2} \\ -\frac{b}{2} < y < \frac{b}{2} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中,x,y 为石块或撞击坑坐标;a,b 为探测器尺寸大小.

若石块或撞击坑不在矩形区域内,其判断公式为

$$\left.\begin{aligned} x > \frac{a}{2} \text{ 或 } x < -\frac{a}{2} \\ y > \frac{b}{2} \text{ 或 } y < -\frac{b}{2} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

② 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器下边界相交,其判别公式为

$$(y - z_1)^2 < r^2 \tag{4}$$

式中,z_1 是探测器下边界点的纵坐标;r 为石块或撞击坑的半径.

③ 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器边界点 C 相交,其判别公式为

$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 < r^2 \tag{5}$$

式中,x_C,y_C 是探测器边界点 C 的坐标.

④ 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器右边界相交,其判别公式为

$$(x - z_2)^2 < r^2 \tag{6}$$

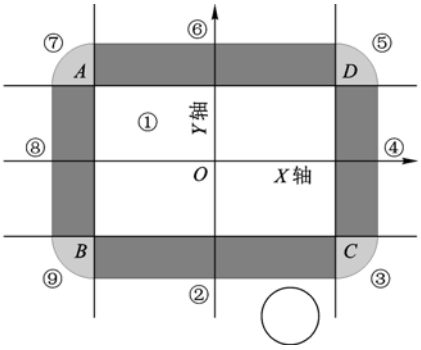


图 1　石块或撞击坑与探测器是否相交判别图

式中,z_2 是探测器右边界点的横坐标.

⑤ 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器边界点 D 相交,其判别公式为

$$(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 < r^2 \tag{7}$$

式中,x_D,y_D 是探测器边界点 D 的坐标.

⑥ 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器上边界相交,其判别公式为

$$(y - z_3)^2 < r^2 \tag{8}$$

式中,z_3 是探测器上边界点的纵坐标.

⑦ 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器边界点 A 相交,其判别公式为

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 < r^2 \tag{9}$$

式中,x_A,y_A 是探测器边界点 A 的坐标.

⑧ 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器左边界相交,其判别公式为

$$(x - z_4)^2 < r^2 \tag{10}$$

式中,z_4 是探测器左边界点的横坐标.

⑨ 若石块或撞击坑不在矩形区域内,判断其是否与探测器边界点 B 相交,其判别公式为

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 < r^2 \tag{11}$$

式中,x_B,y_B 是探测器边界点 B 的坐标.

只要上述 9 种情况有一种发生,则认为探测器着陆失败;如果上述 9 种情况均未发生,即矩形区域与所有的石块或撞击坑均没有相交,则认为探测器能够安全着陆.

探测器安全着陆概率估计方法归纳如下:

首先,模拟行星表面着陆区域内石块或撞击坑的平均个数、直径分布和位置;

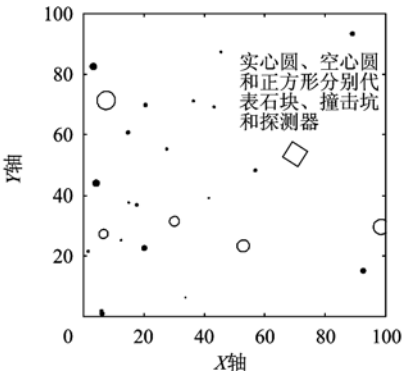
其次,在着陆区域内,探测器随机选择某着陆点降落,根据着陆安全判定方法判定着陆是否安全,若安全,记为成功,成功总次数加 1,对该过程重复仿真 n 次,并记下成功总次数 c 次;

最后得到探测器安全着陆概率为

$$P = c/n \tag{12}$$

1.4　算　例

探测器着陆区域大小设定为 $S = 100\ \text{m} \times 100\ \text{m}$,探测器尺寸设定为 $a = b = 6\ \text{m}$,探测器可容忍的最大障碍物尺寸设定为 $h_{\max} = 0.5\ \text{m}$,$d_{\max} = 0.5\ \text{m}$. 首先利用软件随机生成着陆区域内超过 0.5 m 的石块和撞击坑的分布情况,其次探测器随机选择着陆区域内某一点降落(图 2 是探测器某次着陆示意图),根据式(2)~式(11)判别探测器是否能够安全着陆,保持地形不变,模拟探测器着陆 10 000 次,记录成功次数 8 471 次,最后根据式(12)计算得到探测器安全着陆概率为 $P = 0.8471$.



X 轴,Y 轴—着陆区域的长和宽.

图 2　某次探测器着陆仿真示意图

2　探测器安全着陆概率敏感性分析

为更好地改进探测器的结构设计,提高探测器软着陆成功概率,对探测器的安全着陆概率进行敏感性分析. 在第 1 节的算例基础上,首先保持探测器尺寸 $a = b = 6\ \text{m}$ 不变,把正方形着陆区域的边长从 6 m 变化到 200 m,计算相应的安全着陆概率,绘制安全着陆概率随着陆区域边长变化曲线,如图 3 所示;其次,保持着陆区域边长 50 m 不变,把探测器尺寸从 1 m 变化到 10 m,计算相应的安全着陆概率,绘制安全着陆概率随探测器尺寸变化曲线,如图 4 所示.

由图 3、图 4 的变化曲线对比可知,着陆区域面积大小对安全着陆概率的影响较小,探测器尺寸对安全着陆概率的影响较大. 因此,为了提高行星探测的成功率和生存率,在不影响科学考察的前提下,探测器的设计应尽量小型化.

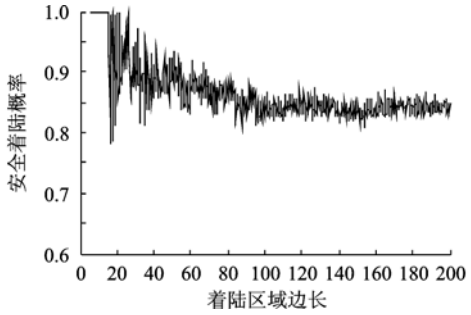


图 3 安全着陆概率随着陆区域边长的变化曲线

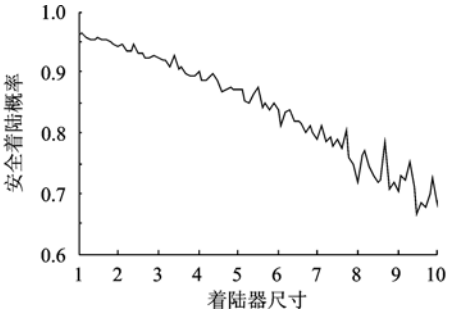


图 4 安全着陆概率随探测器尺寸的变化曲线

3 结论与展望

针对行星探测中探测器的着陆成功率问题,给出了探测器在盲降情形下的安全着陆概率估计,并对影响安全着陆概率的探测器尺寸和着陆区域面积大小进行了敏感性分析,其结果对探测器着陆点的选择和探测器的结构设计具有重要参考意义. 在具有同样科学探测价值的几个区域,以安全着陆概率最大为最佳着陆点,为了提高安全着陆概率,应尽量缩小探测器尺寸.

由于探测器和地面站之间存在着较长的通讯延迟,加之着陆的过程持续时间相对较短,现在的行星探测器一般都具有自主导航、制导与控制的能力,因此,在采取导航与控制技术避障的情况下,探测器的成功率应该如何评估以及怎样进行敏感性分析等,有待于进一步研究.

参考文献(References)

[1] 王海涛,付丽璋,蒋万松. 凤凰号火星探测器着陆过程[J]. 航天返回与遥感,2009,30(3):8 - 15
Wang Haitao, Fu Lizhang, Jiang Wansong. The landing process of mars phoenix lander[J]. Spacecraft Recovery &Remote Sensing, 2009,30(3):8 - 15(in Chinese)

[2] 王闯,邓宗全,高海波,等. 国内外月球着陆器研究状况[J]. 导弹与航天运载技术,2006(4):31 - 36
Wang Chuang, Deng Zongquan, Gao Haibo, et al. Development status of lunar landers[J]. Missiles and Space Vehciles, 2006 (4):31 - 36(in Chinese)

[3] 胡亚冰,孙毅. 月球探测器软着陆机构[J]. 上海航天,2010 (1):43 - 50
Hu Yabing, Sun Yi. Soft lander of lunar lander[J]. Aerospace Shanghai, 2010(1):43 - 50(in Chinese)

[4] 蔡艳芳. 月球探测器软着陆制导控制方法研究[D]. 西安:西北工业大学航天学院,2006
Cai Yanfang. A study of the guidance and control strategy in lunar soft-landing[D]. Xi'an: College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, 2006(in Chinese)

[5] 樊世超,贾阳,向树红,等. 月面地形地貌环境模拟初步研究[J]. 航天器环境工程,2007,24(1):15 - 19
Fan Shichao, Jia Yang, Xiang Shuhong, et al. A preliminary study on simulation of lunar surface terrain[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007,24(1):15 - 19(in Chinese)

[6] 石晓波,李运泽,黄勇,等. 月球表面环境综合模拟系统的设想[J]. 中国工程科学,2006,8(11):48 - 52
Shi Xiaobo, Li Yunze, Huang Yong, et al. The conceptual design of lunar surface environment simulation system[J]. Engineering Science, 2006,8(11):48 - 52(in Chinese)

[7] Hine B, Spremo S, Turner M, et al. The lunar atmosphere and dust environment explorer mission[C]//Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2010:1 - 9

[8] 张玥,李清毅,许晓霞. 月球表面地形数学建模方法[J]. 航天器环境工程,2007,24(6):341 - 344
Zhang Yue, Li Qingyi, Xu Xiaoxia. Mathematical modeling of lunar surface terrain[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007,24(6):341 - 344(in Chinese)

[9] Golombek M P, Arvidson R E, Bell J F, et al. Assessment of Mars exploration rover landing site predictions[J]. Nature, 2005,436: 44 - 48

[10] Grant J A, Matthew P G, Timothy J P, et al. Selecting landing sites for the 2003 Mars exploration rovers[J]. Planetary and Space Science, 2004,52:11 - 21

[11] Douglas S A. Phoenix Mars scout landing risk assessment[C]// Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2008:1 - 7

[12] 冯军华. 月球软着陆障碍检测与规避控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学飞行器动力学与控制研究所,2007
Feng Junhua. Research on obstacle detection and avoidance control for moon soft landing[D]. Harbin: Spacecraft Dynamics and Control Institute, Harbin Institute of Technology, 2007(in Chinese)

[13] Brady T, Robertson E, Epp C, et al. Hazard detection methods for lunar landing[C]//Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2009:1 - 8

[14] Alan L S, Andrew E J. Terrain hazard detection and avoidance during the descent and landing phase of the lunar lander altair mission[R]. AIAA-2010-7722, 2010

[15] Jill L P, Prasun N D, Eric M Q, et al. Mars phoenix entr-y, descent, and landing simulation design and modeling analysis [R]. AIAA-2008-7507, 2008

[16] Prasun N D, Jill L P, Eric M Q, et al. Entry, descent, and landing performance of the Mars phoenix lander[R]. AIAA-2008-7346, 2008

(编 辑:娄 嘉)