基于蒙特卡罗法的月球探测器着陆稳定性分析

宋顺广 王春洁

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 为了验证月球探测器的软着陆性能,建立了月球探测器着陆过程多体动力学仿真分析模型. 由于探测器着陆地点及初始着陆条件的不确定性,采用蒙特卡罗法对探测器的着陆稳定性进行了研究. 为了提高蒙特卡罗模拟的效率,采用了基于均值估计相对误差的蒙特卡罗模拟终止准则,从而在保证精度的前提下减少计算成本. 通过着陆仿真试验,获得了探测器在给定坡度的月面上着陆时,各着陆性能参数的分布均值、方差及相应的置信区间等统计学结果,并计算了探测器安全着陆的可靠度.

关 键 词: 月球探测器; 着陆动力学; 着陆稳定性; 蒙特卡罗法; 着陆可靠度

中图分类号: V 476.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1192-05

Landing stability analysis of the lunar lander based on Monte Carlo approach

Song Shunguang Wang Chunjie

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A multi-body touchdown dynamics simulation model was established for predicting landing performances of the lunar lander. Because of the uncertainty of the landing site and initial landing conditions of the lander at touchdown, a Monte Carlo dynamic analysis was performed to study the landing stability of the lunar lander. A stopping rule based on the relative error of the mean estimate was adopted for determining the run length of the Monte Carlo simulation. Through the landing simulation experiments on the lunar surface with a certain slope, statistical results of the landing performance parameters such as the means, variances and corresponding confidence intervals were obtained and the reliability for stable landing was finally computed.

Key words: lunar lander; touchdown dynamics; landing stability; Monte Carlo; landing reliability

为了防止火箭羽焰激起的月球表面物体击中探测器以及避免火箭喷口堵塞爆燃,月球探测器在接近月球表面时通常要关闭所有发动机,在月球重力作用下做自由落体运动降落至月球表面,然后经过着陆冲击直至停稳[1]. 月球探测器在关机着陆的过程中,将承受较大的冲击载荷,因此必须采取一定的缓冲措施以防止其自身结构和所载仪器设备等产生破坏,并保证探测器不发生翻倒.

着陆稳定性研究是探测器研制阶段的一项重要工作,文献[2-7]通过确定性方法研究了在给定初始条件下探测器的着陆稳定性,但是由于探测器的着陆工况较为复杂,采用确定性方法无法涵盖所有的着陆工况,同时探测器着陆初始时的位置、姿态、速度以及着陆面特性等参数都表现出较大的随机性. 为此,文献[8-10]提出了基于蒙特卡罗法的探测器着陆稳定性分析方法,从而使稳定性研究更为全面,并能反映实际着陆工况的不确定性. 然而上述研究在进行蒙特卡罗模拟时均选取了固定数目的抽样点,导致统计结果的精度难以保证. 本文基于均值估计的相对误差,动态的进行蒙特卡罗模拟次数的选择,从而既保证了模拟精度,又提高了模拟效率.

收稿日期: 2012-10-08; **网络出版时间**: 2012-11-29 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121129.1104.003.html

作者简介: 宋顺广(1984-),男,辽宁庄河人,博士生,songshunguang@me.buaa.edu.cn.

1　月球探测器着陆动力学仿真

1.1　月球探测器构成

本文所研究的探测器对象由探测器本体结构和 4 套均布于本体结构周围的软着陆机构构成,每套软着陆机构又包括主支柱、辅助支柱和足垫,如图 1 所示. 主、辅支柱主要用于吸收着陆冲击能量,维持着陆过程中探测器的姿态稳定,并作为着陆后探测器的支撑部件;足垫用来增大探测器与月球表面的接触面积,防止着陆时探测器过度下陷.

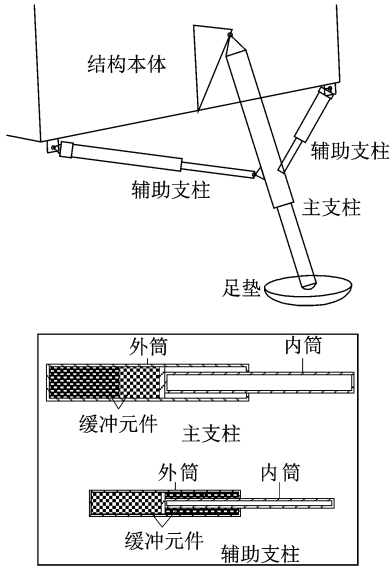


图 1　软着陆机构组成

主、辅支柱又分别由外筒、内筒和铝蜂窝缓冲元件组成. 铝蜂窝缓冲元件安装于外筒和内筒之间,当内、外筒产生相对运动时,铝蜂窝缓冲器受压产生变形,从而吸收冲击能量. 铝蜂窝承受静压力时,初始产生弹性变形,载荷与变形近似成正比;当载荷增大到一定值时,蜂窝将被压溃而发生永久变形,此时载荷基本保持为恒定值,不随变形的增大而变化.

1.2　着陆动力学仿真模型[11]

采用多体动力学仿真分析软件 ADAMS 建立月球探测器着陆动力学仿真模型. 本体结构与主、辅支柱外筒之间分别以万向节副相连,主、辅支柱的外筒与内筒之间分别以滑移副相连,主支柱外筒与辅助支柱的内筒之间以球副相连,主支柱内筒与足垫之间以球副相连,整套软着陆机构(不包括足垫)构成单自由度空间机构.

铝蜂窝缓冲力简化为着陆腿支柱外筒与内筒之间的作用力与反作用力,其大小依据蜂窝受压时的静载特性曲线,表示为外筒与内筒之间相对行程的函数,同时考虑冲击的影响,当相对速度达到 0.9 ~ 3.6 m/s 时,蜂窝力可在静载特性的基础上增加 10%[12].

足垫和月面的接触作用力分解为法向碰撞力和切向摩擦力两部分,法向碰撞力简化为非线性弹簧阻尼模型,切向摩擦力采用库仑摩擦模型进行计算.

2　着陆初始条件及稳定性判据

2.1　着陆初始条件

影响探测器着陆稳定性的因素较多,本文仅探讨着陆初始条件对探测器着陆稳定性的影响,主要参数包括着陆初始时的竖直速度(v_v)、水平速度(v_h)、水平速度与 z 轴之间的夹角(α_v)、着陆初始时探测器的姿态角(θ_x,θ_y,θ_z)和角速度(ω_x,ω_y,ω_z),如图 2 所示.

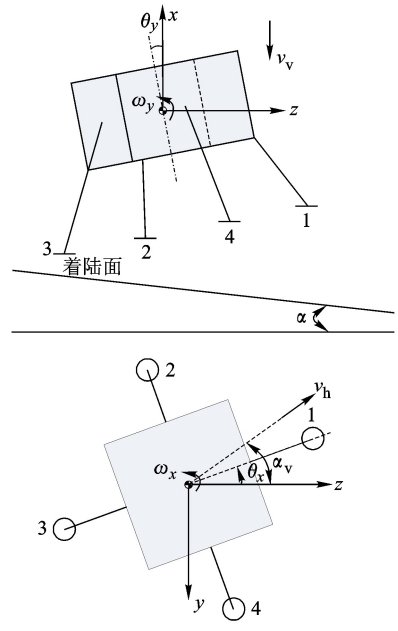


图 2　着陆初始条件参数示意图

2.2　着陆稳定性判据

探测器欲实现在月面上的安全着陆,要求软着陆机构能够完全吸收着陆冲击能量,并保证探测器在着陆过程中不翻倒,同时还需为结构本体底端的发动机尾喷管预留一定的间距. 据此,提出探测器着陆稳定而不失效的 4 个判据如下:

1)着陆过程中探测器不翻倒;

2)主支柱最大缓冲行程不超出设计范围;

3)辅助支柱最大缓冲行程不超出设计范围;

4)着陆停稳后,探测器结构本体最底端至着陆面的距离不小于允许值.

其中,衡量探测器翻倒性能的参数定义为探测器质心至通过任意两个相邻足垫中心的竖直平

面的最小距离($D_{\min}$)[13],此值越小,表明探测器越容易翻倒,当 $D_{\min} \leqslant 0$ 时,则判定探测器已翻倒.

3 蒙特卡罗模拟

应用蒙特卡罗法进行探测器着陆稳定性分析的步骤为:根据着陆初始条件参数的概率分布规律,随机抽取样本点进行着陆动力学仿真,经过一定次数的模拟,对各项着陆性能参数进行统计,得到随机变量的分布规律,最终计算探测器稳定着陆的可靠度.

3.1 模拟终止准则

模拟次数的选择对于蒙特卡罗模拟的精度和效率有很大影响. 本文采用基于均值估计相对误差的终止准则,从而在保证精度的前提下减少计算成本.

设随机变量 X 具有有限的数学期望 μ 和方差 σ^2,$X_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为来自总体的一组样本,则样本均值和方差可分别由式(1)、式(2)计算得到:

$$\bar{X}(n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i \tag{1}$$

$$S^2(n)=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}[X_i-\bar{X}(n)]^2 \tag{2}$$

根据矩估计法可知,样本均值和方差分别为总体均值和方差的无偏点估计量.

定义随机变量 Z_n 和 t_n 如式(3)所示:

$$\left.\begin{aligned}Z_n&=\frac{\bar{X}(n)-\mu}{\sqrt{\sigma^2/n}}\\ t_n&=\frac{\bar{X}(n)-\mu}{\sqrt{S^2(n)/n}}\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

根据中心极限定理,当抽样点数 n 趋于无穷大时,随机变量 Z_n 服从标准正态分布 $N(0,1)$. 在实际应用中,由于总体方差通常是未知的,因此常采用样本方差代替总体方差. 而当样本量充分大时,样本方差将收敛于总体方差,并且随机变量 t_n 近似的服从标准正态分布,从而对于给定的置信水平 $1-\alpha$,有下式成立:

$$P\left[\left|\frac{\bar{X}(n)-\mu}{\sqrt{S^2(n)/n}}\right|\leqslant z_{1-\alpha/2}\right]\approx 1-\alpha \tag{4}$$

于是得到总体均值 μ 的 $100(1-\alpha)\%$ 置信区间近似为

$$\bar{X}(n)\pm z_{1-\alpha/2}\sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \tag{5}$$

其中,$z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态分布的双侧分位点,式(5)右侧称为置信区间半长,用 $\delta(n,\alpha)$ 表示.

为了提高参数估计的精度,希望估计量的置信区间越小越好,由此定义模拟精度 $\gamma(0<\gamma<1)$ 如式(6)所示:

$$\gamma=\frac{\delta(n,\alpha)}{|\bar{X}(n)|} \tag{6}$$

从而有下式成立[14]:

$$1-\alpha\approx P\left(\frac{|\bar{X}(n)-\mu|}{|\bar{X}(n)|}\leqslant\frac{\delta(n,\alpha)}{|\bar{X}(n)|}\right)=$$

$$P(|\bar{X}(n)-\mu|\leqslant\gamma|\bar{X}(n)|)\leqslant$$

$$P(|\bar{X}(n)-\mu|\leqslant\gamma(|\bar{X}(n)-\mu|+|\mu|))=$$

$$P\left(\frac{|\bar{X}(n)-\mu|}{|\mu|}\leqslant\gamma(1-\gamma)\right) \tag{7}$$

式中 $|\bar{X}(n)-\mu|/|\mu|$ 称为均值估计的相对误差,因此可以说总体均值的估计值大约有 $1-\alpha$ 的概率具有至多不超过 $\gamma/(1-\gamma)$ 的相对误差. 据此可以确定蒙特卡罗模拟所需的最少次数为

$$N=\min\left\{n:\frac{z_{1-\alpha/2}\sqrt{\dfrac{S^2(n)}{n}}}{|\bar{X}(n)|}\leqslant\gamma\right\} \tag{8}$$

3.2 着陆稳定可靠度计算

探测器着陆可看作一项随机试验,且只有两个可能的结果:稳定或失效. 着陆稳定可靠度即为探测器能够安全稳定的着陆而不发生失效的概率. 设着陆稳定的概率为 p $(0<p<1)$,而着陆失效的概率为 q $(q=1-p)$,将探测器着陆试验独立的重复进行 n 次,并令随机变量 S 为稳定着陆发生的次数,则 S 服从参数为 n,p 的二项分布,并且参数 p 的一个无偏点估计为

$$\hat{p}=\frac{S}{n} \tag{9}$$

当 n 足够大、且式(9)中的估计值接近于 1 时,参数 p 的近似 $100(1-\alpha)\%$ 置信区间上、下限分别为[15]

$$p_{\mathrm{L}}=\frac{n+S-\frac{1}{2}\chi^2_{1-\alpha/2}[2(n-S)+2]}{n+S+\frac{1}{2}\chi^2_{1-\alpha/2}[2(n-S)+2]} \tag{10}$$

$$p_{\mathrm{U}}=\frac{n+S+1-\frac{1}{2}\chi^2_{\alpha/2}[2(n-S)]}{n+S+1+\frac{1}{2}\chi^2_{\alpha/2}[2(n-S)]} \tag{11}$$

式中 $\chi_a(v)$ 表示自由度为 v 的 χ^2 分布的 a 分位数.

4　仿真分析结果

探测器主要结构参数如图 3 所示,着陆质量为 1 000 kg,着陆过程在月球重力环境下进行. 为考察探测器软着陆性能的极限适应能力,本文选取一种较为恶劣的着陆环境进行探测器的着陆稳定性研究:设着陆面坡度为 10°,且足垫与月面接触时,其在着陆平面内的运动将完全受到限制,即足垫不可沿月面滑移.

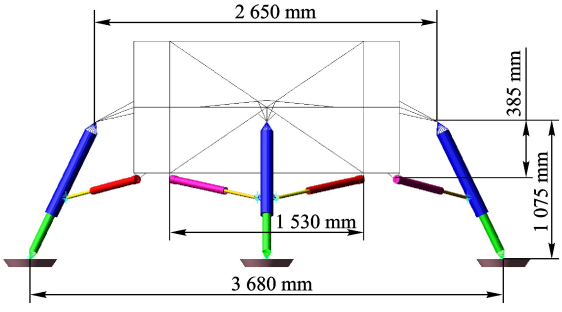


图 3　探测器主要结构参数

给定置信水平 $1-\alpha=0.99$ 和均值估计的相对误差 $\gamma'=0.06$,根据式(7)可得相应的模拟精度 $\gamma=\gamma'/(1+\gamma')=0.057$. 通过蒙特卡罗模拟,确定探测器质心至翻倒平面的最小距离($D_{\min}$)、主支柱最大缓冲行程(S_P)、辅助支柱最大缓冲行程(S_S)以及结构本体底端至月面的距离(D_C)等着陆性能参数的分布规律,同时计算探测器安全着陆的可靠度. 各初始条件参数的概率分布规律和相应的分布参数如表 1 所示.

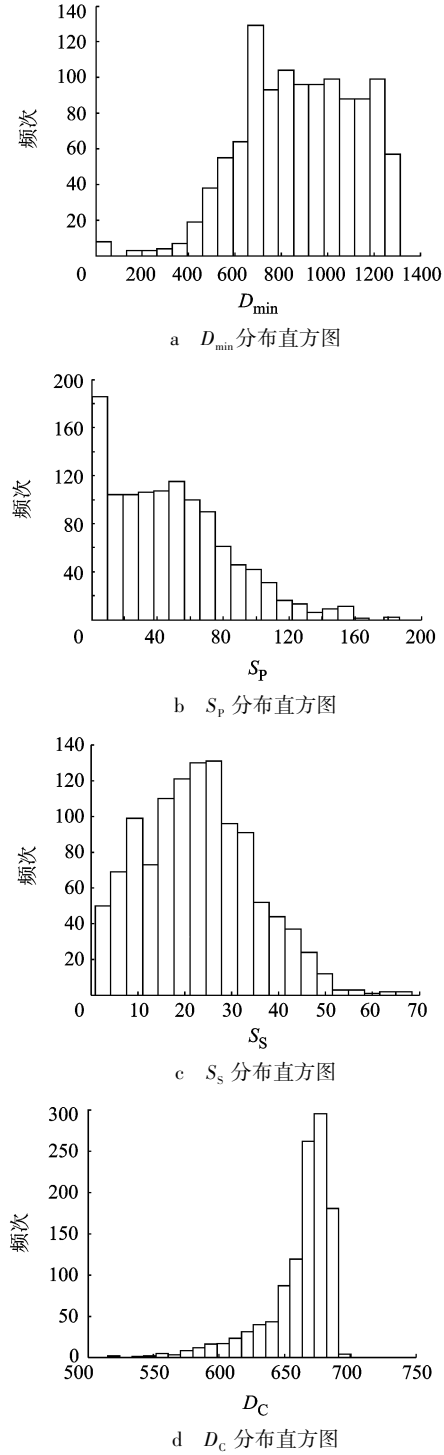
表 1　着陆初始条件参数概率分布[9]

参数	分布形式	分布参数
$v_v/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	威布尔分布	$\alpha=2.8,\beta=3.2$
$v_h/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	威布尔分布	$\alpha=0.3,\beta=1.5$
$\alpha_v/(°)$	均匀分布	[0,180]
$\theta_x/(°)$	均匀分布	[0,90]
$\theta_y/(°)$	正态分布	$\mu=0.0,\sigma=1.25$
$\theta_z/(°)$	正态分布	$\mu=0.0,\sigma=1.25$
$\omega_x/((°)\cdot\mathrm{s}^{-1})$	正态分布	$\mu=0.0,\sigma=0.25$
$\omega_y/((°)\cdot\mathrm{s}^{-1})$	正态分布	$\mu=0.0,\sigma=0.4$
$\omega_z/((°)\cdot\mathrm{s}^{-1})$	正态分布	$\mu=0.0,\sigma=0.4$

按照表 1 所示的各参数的概率分布规律进行蒙特卡罗随机抽样和着陆动力学仿真,并记录仿真分析结果. 当蒙特卡罗模拟运行每间隔 50 次时,对各着陆性能参数结果进行一次统计,同时按照公式(12),对每个性能参数分别计算各自的 $\gamma(n,\alpha)$:

$$\gamma(n,\alpha)=z_{1-\alpha/2}\sqrt{\frac{S^2(n)}{n}}\Big/|\bar{X}(n)| \quad (12)$$

当所有的 $\gamma(n,\alpha)$ 均小于或等于 γ 时,则终止蒙特卡罗模拟. 最终经过 1 150 次模拟,达到给定的模拟精度,各着陆性能参数的统计结果如图 4 和表 2 所示. 在 1 150 次着陆仿真试验中,探测器着陆失效共发生了 8 次,所有失效模式均为探测器翻倒,根据式(9)~式(11),计算得到探测器稳定着陆的可靠度的估计值为 0.993,相应的 99% 置信区间为[0.983 9,0.997 8]. 仿真结果表明,探测器具有良好的着陆缓冲性能,即使在较为恶劣的工况下着陆,依然具有较高的着陆稳定可靠度.



a　$D_{\min}$ 分布直方图

b　S_P 分布直方图

c　S_S 分布直方图

d　D_C 分布直方图

图 4　着陆性能参数分布直方图

表2 着陆性能参数分布统计

参数	样本方差/mm²	样本均值/mm	99%置信区间/mm	模拟精度
D_{min}	61 248.8	882	[863.2,900.8]	0.021
S_P	1 260.9	48.2	[45.5,50.9]	0.056
S_S	139.65	22.9	[22,23.8]	0.039
D_C	695.5	661.5	[659.5,663.5]	0.003

5 结 论

基于所建立的着陆动力学仿真模型,通过蒙特卡罗模拟对月球探测器在随机初始着陆条件下的着陆性能进行了分析和验证,得到了探测器在给定着陆场环境下着陆时,各项着陆性能参数的统计学结果,以及安全着陆的可靠度.在模拟过程中,采用基于均值估计相对误差的模拟终止准则,在保证精度的前提下提高了蒙特卡罗模拟效率.

参考文献(References)

[1] 褚桂柏,张熇.月球探测器技术[M].北京:中国科学技术出版社,2007:123-131
Chu Guibai, Zhang He. Lunar probe techniques[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2007:123-131(in Chinese)

[2] Hilderman R A, Mueller W H, Mantus M. Landing dynamics of the lunar excursion module[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1966, 3(10):1484-1489

[3] 朱汪,杨建中.月球着陆器软着陆机构着陆稳定性仿真分析[J].宇航学报,2009,30(5):1792-1796
Zhu Wang, Yang Jianzhong. Touchdown stability simulation of landing gear system for lunar lander[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5):1792-1796(in Chinese)

[4] Briere M, Weber J. Robotic lunar lander development project: three dimensional dynamic stability testing and analysis[R]. NASA/CP-2011-215873, 2010

[5] Ponnusamy D, Maahs G. Development and testing of leg assemblies for robotic lunar lander[C]//Ouwehand L. Proceedings of the 14th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Noordwijk: ESA Communications, 2011:485-492

[6] Cole T J, Bassler J, Cooper S, et al. The challenges of designing a lightweight spacecraft structure for landing on the lunar surface[J]. Acta Astronautica, 2012, 71:83-91

[7] 林轻,聂宏,徐磊,等.月球着陆器软着陆稳定性关键影响因素分析[J].南京航空航天大学学报,2012,44(2):152-158
Lin Qing, Nie Hong, Xu Lei, et al. Analysis on key influence factors of soft-landing stability in lunar lander[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(2): 152-158(in Chinese)

[8] Lavender R E. Monte Carlo approach to touchdown dynamics for soft lunar landings[R]. NASA-TN-D-3117, 1965

[9] Merchant D H, Sawdy D T. Monte Carlo dynamic analysis for lunar module landing loads[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1971:8(1):48-55

[10] Lu Yuntong, Wang Chunjie, Zeng Fuming, et al. A Monte Carlo analysis of lunar lander dynamics at touchdown[C]//CSAA. Proceedings of 2010 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010:481-484

[11] 逯运通,宋顺广,王春洁,等.基于刚柔耦合模型的月球着陆器缓冲试验动力学仿真分析[J].北京航空航天大学学报,2010,36(11):1348-1352
Lu Yuntong, Song Shunguang, Wang Chunjie, et al. Dynamic analysis for lunar lander based on rigid-flexible coupled model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(11):1348-1352(in Chinese)

[12] Rogers W F. Apollo experience report-lunar module landing gear subsystem[R]. NASA-TN-D-6850, 1972

[13] Zupp G A, Doiron H H. A mathematical procedure for predicting the touchdown dynamics of a soft-landing vehicle[R]. NASA-TN-D-7045, 1971

[14] Law A M. Simulation modeling and analysis[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009:494-500

[15] GB/T 4088-2008 数据的统计处理和解释二项分布参数的估计与检验[S]
GB/T 4088-2008 Statistical interpretation of data-estimation and hypothesis test of parameter in binomial distribution[S]

(编 辑:文丽芳)