月球着陆器着陆安全分析方法

苏庆华 赵 剡

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 月球着陆器软着陆地点选择及安全着陆实现是探月二期的关键问题. 采用不考虑着陆器着陆过程中发动机控制、着陆姿态控制和动力学性能,在计算机上依据低精度月面数据和已有月面典型地形特征分布/形状模型仿真生成高精度着陆区域;根据着陆器的结构尺寸和着陆安全要求对每个安全参数进行计算、比较、判断得到单次着陆安全性,利用蒙特卡洛方法计算多次在仿真地形上的着陆安全概率. 试验结果表明:采用这种方法时,着陆器的结构尺寸相同分析结果才有意义. 在计算机上仿真生成着陆区域、设置着陆器结构尺寸和安全参数,使其可以用于地面系统的仿真实验,也可在月面软着陆过程中实时分析选定区域的着陆安全概率.

关 键 词: 着陆器; 着陆区域; 着陆安全

中图分类号: V 11

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1522-05

Analysis method for lunar landers landing safety

Su Qinghua Zhao Yan

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In the lunar exploration program Ⅱ, the lunar lander to a safelanding site selection and realize safelanding is the key issues. Without considering engine control, attitude control and dynamic property, a high-definition landing territory was simulated on computer based on the low-definition data and known characteristic models of lunar surface. One times landing security can be obtained by computing and analyzing lander profiles and landing safety requirement. The landing safety possibility of this terrain can be obtained by computing many times landing only under the condition of same lander profiles. The landing territory, lander profile and safety parameters were simulated on computer by this method can be applied to both ground simulation experiments and real-timely analyzing possibility of landing safety during soft landing on the lunar surface.

Key words: lander; landing area; landing safety

我国当前正在进行第二、第三期月球探测的研制、实验. 探月二期工程最终目标是实现探测器在月球表面软着陆[1-2]. 其中着陆器软着陆地点选择和安全着陆的实现是关键,它直接影响和决定着后续的探测任务. 当前着陆器软着陆的研究主要集中在:①着陆器发动机控制研究[3];②着陆器的姿态控制研究[4];③着陆器结构的力学研究[5];④着陆器结构部件的动力学研究[6];⑤着陆器的静态稳定性研究[7]. 这些研究都是针对软着陆过程中的具体细节,不对预选着陆区域的着陆安全概率进行分析,更不能确定着陆点.

为解决上述问题,提出一种着陆器着陆安全分析方法,此方法能对不同区域,不同结构月球着陆器进行着陆安全分析,着陆区域地形数据越真实,着陆器结构尺寸越接近实际尺寸分析结果越有意义.

收稿日期: 2011-07-31; **网络出版时间**: 2012-11-16 11:08

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121116.1108.009.html

基金项目: 航空科学基金资助项目(20100818018)

作者简介: 苏庆华(1979-),女,山西临汾人,博士生,qinghuasu@126.com.

1　着陆区域地形仿真

着陆区域应该既能满足科学探测的需要,又具有实现可行性. 具体选择原则[2]:①利于实现科学探测目标;②利于工程的实施;③利于与地球的通信联系;④卫星轨道可达;⑤充分考虑着陆区域的热环境. “嫦娥三号”选定的 5 个候选区分别为阿里斯基尔撞击坑、开普勒撞击坑、酒海、湿海和虹湾. 首选着陆区域为虹湾区,地形如图 1.

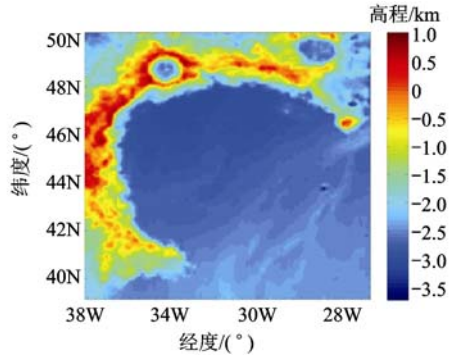


图 1　低精度虹湾地形图

最精确的虹湾区月球表面的图像数据是由嫦娥二号的 CCD(Charge Coupled Device)摄像机获取,精度为 1.3 m. 这一精度的图像数据仍不能满足软着陆时对月面地形精度要求,因此,分析时需要将预选着陆区地形处理为能满足着陆安全分析需要的地形.

地形处理的方法:①直接由低精度的地形数据内插得到高精度的地形;②通过对低精度的地形数据进行趋势面拟合,运用月球地形模型仿真生成高精度的地形数据,将结果逐点进行叠加得到高精度月面地形数据. 分析时采用第②种方法仿真生成安全着陆区域. 通过该种方法可以根据要求快速生成着陆安全区域;可获取着陆区域内撞击坑、石块的信息;可获取着陆区域内每一点的高程值;可比较真实的反映月面地形. 以虹湾着陆区域为例说明着陆安全分析区域的仿真生成.

虹湾位于月海、月陆、高地的交界,利用低精度虹湾数据进行趋势面分析,结合实际虹湾影像和已有低精度高程数据,确定采用的月面特征(月海/高地)分布模型和形状模型. 仿真时采用的分布模型[8]如下. 月海撞击坑分布模型为

$$\left.\begin{aligned}\log N &= -1.015 - 2.017\log D \quad D < 38\ \text{m}\\ \log N &= -1.187 - 1.914\log D\\ &\qquad 38\ \text{m} < D < 1\,000\ \text{m}\\ \log N &= +1.007 - 2.651\log D \quad D > 1\,000\ \text{m}\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

石块分布模型为

$$\left.\begin{aligned}\log N &= -2.177 - 2.059\log D \quad D < 0.02\ \text{m}\\ \log N &= -3.599 - 2.57\log D\\ &\qquad 0.02\ \text{m} < D < 10\ \text{m}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

其中,D 为撞击坑/石块直径;N 为每平方米上撞击坑/石块的个数.

虹湾内部撞击坑的形状大都为碗状,仿真时采用碗状的撞击坑形状模型为

$$z(x,y) = 2C_{\text{h}}r\left[\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{2r}\right)^2 - 1\right] \tag{3}$$

石块形状模型选用半圆模型为

$$z(x,y) = 2B_{\text{h}}r\left[1 - \left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{2r}\right)^2\right] \tag{4}$$

其中,x 为撞击坑/石块模型上各点 x 轴(经度)向值;y 为撞击坑/石块模型上点 y 轴(纬度)向值;r 为撞击坑/石块的半径;C_{h} 为坑深与坑直径的比例系数;B_{h}为石块暴露在外的高度与石块直径的比例系数;$z(x,y)$为每一点的高程值.

采用上述的统计分布规律和形状模型,生成 100 m×100 m,分辨率为 0.01 m 的局部虹湾地形,如图 2.

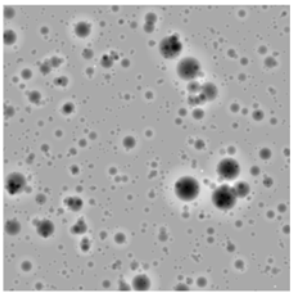


图 2　分辨率为 0.01 m 的虹湾局部仿真地形图

2　着陆器结构

在仿真生成着陆区域上采用蒙特卡洛方法[9]进行着陆安全分析时,显然不同的着陆器在同一区域着陆的安全性不同,分析选定区域着陆安全概率,需要考虑着陆器的结构和尺寸. 国外已发射和已研制的着陆器的结构和尺寸各不相同. 我国月球着陆器1 ∶1模型如图 3[10],从着陆器的

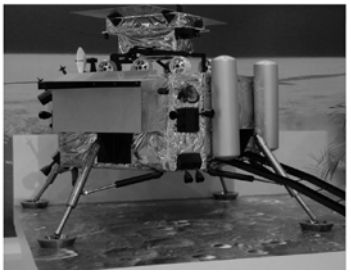
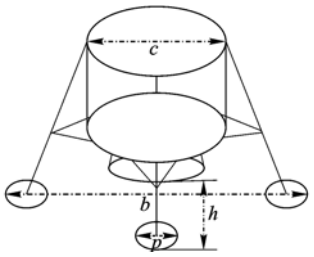


图 3　着陆器的实物图

外观可以看出,着陆器是属于框架式,四腿可伸缩. 着陆安全分析时,将着陆过程中的着陆器当作刚体,仅考虑着陆器的结构几何尺寸(如图 4).



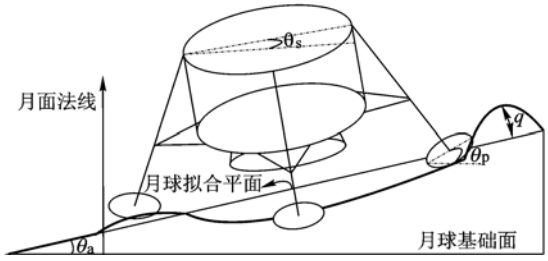
b—着陆器包络尺寸(基座跨距);c—推力发动机的几何大小;
h—推力发动机尾管距离地面的高度;p—着陆器腿掌的大小.

图 4 着陆器的结构示意图

3 着陆安全分析

在仿真生成着陆区域上采用蒙特卡洛方法[9]进行着陆安全分析中,着陆器着陆安全的定义需考虑着陆器着陆过程中发动机、结构部件和所携带相关仪器的工作条件. 着陆安全首先必须满足着陆器着陆在已知地形上不会翻倒损坏,同时还要保证着陆器携带的各种仪器能够正常工作[11].

着陆器姿态及地形如图 5.



θ_a—着陆区域坡度;θ_s—着陆器倾斜角度;
q—不平度;θ_p—脚掌的倾斜角.

图 5 着陆器着陆姿态及地形图

若整个着陆区域的平均平面坡度非常陡峭,超出了安全着陆所能接受的范围,着陆器降落在上面容易倾斜、滑移甚至翻倒[12];若着陆地点为平均平面坡度,虽然能够使着陆器不倾斜和翻倒,但该坡度超出了着陆器携带的各种仪器所能够正常工作的范围,也不安全;若着陆区域分布有比较突兀的石块或内壁较陡峭的撞击坑,使得着陆器的缓冲支架无法正常接触月面从而无法平稳着陆,会出现碰撞、翻倒等危险[13]. 考虑上述因素,着陆安全分析需考虑的安全参数应该有:θ_a,θ_s,q,θ_p,着陆器尾喷管距离月面高度 h,着陆区域内大于某一直径 D_c 的撞击坑的个数 C_c,着陆区域内大于某一直径 D_r 的石块的个数 R_c,着陆区域内撞击坑深度阈值 C_{hl} 和着陆区石块高度阈值 R_{hl}.

着陆安全概率计算的关键是在单次着陆过程中对每个安全参数的计算;与设定临界安全参数数值的比较.

3.1 撞击坑/石块

仿真生成选定着陆区域时,存储每一撞击坑/石块的位置大小信息,随机选定着陆点的位置后,根据着陆器的包络尺寸大小进行搜索,获取设定尺寸的撞击坑/石块的个数、最深撞击坑的深度、最高石块的高度.

3.2 坡 度

坡度计算的具体方法是由已有低精度月面数据拟合着陆区地形的平均平面,在此基础上定义月球表面地形粗糙度和坡度的概念[14]如图 5. 在蒙特卡洛分析单次仿真试验中,需要选取着陆器的随机落点[15],根据此落点选取出单次仿真的分析区域,以典型的四腿式着陆器(如图 4)为例,为了简化分析可将其投影,则可以确定出单次着陆的区域如图 6. 采用蒙特卡洛伪随机数随机生成的着陆点为投影的中心点. 以着陆点为圆心,着陆器腿的对角距离为直径,获得一个圆形区域,此即认定为最小着陆单元(着陆器包络尺寸).

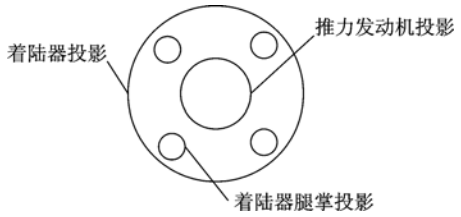


图 6 着陆器投影简化图

平均坡度的计算以着陆器倾斜角计算说明. 着陆区的平均坡度、着陆器脚掌坡度的计算采用相同的计算方法.

根据仿真生成的月面地形分辨率和软着陆器的安全要求,假设着陆区(100 m×100 m),根据着陆器的包络尺寸确定着陆器在着陆区域上的投影,令其大小为最小着陆单元. 用 N_{ij} 标记最小着陆单元所包含的地形数据点,其中 i 和 j 分别代表最小着陆单元所包含地形数据的行数和列数,即最小着陆单元覆盖 N_{ij} 个地形数据点. 每个数据点格式为(横坐标、纵坐标、高程)即 (x,y,z). 采用最小二乘法拟合出最小着陆单元的平均平度.

定义拟合平面的方程为

$$k_1x + k_2y + k_3z = 1 \tag{5}$$

其中,k_1,k_2 和 k_3 为待拟合的参数. 最小着陆单元中的 N_{ij} 个地形数据点记为 $(x_{N_{ij}},y_{N_{ij}},z_{N_{ij}})$ $(N=1,2,\cdots,N_{ij})$. 按照最小方差原则,求得拟合参数为

$$n = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{g} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{A}$ 为利用数据点的坐标,构造 $N_{ij}\times 3$ 的矩阵;$\boldsymbol{g}=[1 \quad 1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1]^{\mathrm{T}}$ 为 N_{ij} 维列向量.

由平面方程易知拟合平面的法向量为 $\boldsymbol{n}$. 于是便可求得拟合平面的倾角 θ_{s},即着陆器倾斜角:

$$\theta_{\mathrm{s}} = \arccos\left[\frac{|\boldsymbol{n}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{t}|}{\|\boldsymbol{n}\| \cdot \|\boldsymbol{t}\|}\right] \tag{7}$$

其中,$\boldsymbol{t}=[0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}}$ 为垂直向量.

平面拟合的残差 r_{e}:

$$r_{\mathrm{e}} = \sqrt{\frac{1}{N_{ij}}\sum_{m=1}^{N_{ij}} d_m^2} \tag{8}$$

其中,$d_m = \dfrac{|k_1x_m+k_2y_m+k_3z_m-1|}{\sqrt{k_1^2+k_2^2+k_3^2}}$ 为第 m 个数据点到拟合平面的垂直距离.

若利用残差定义地形粗糙度会忽略一些布有尖锋或陡峭撞击坑障碍的危险地形,为避免忽略这些不安全地形,可将不平度定义为

$$q = \max d_m \tag{9}$$

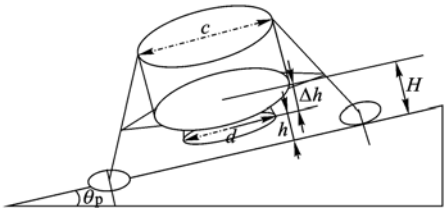
3.3　推力发动机尾管距月面高度

着陆时的还应考虑的安全因素:推力发动机能否安全工作,因此需要计算推力发动机距离月面高度.

图 7 是尾管距离地面高度示意图. 由几何关系,易知推力发动机尾喷管下端距离月面高度为

$$h = \frac{1}{2}(H_1 + H_2) - d(\Delta h\cos\theta_{\mathrm{p}} + \frac{c}{2}\sin\theta_{\mathrm{p}}) \tag{10}$$

其中,H_1,H_2 为着陆器两对角距离月面高度.



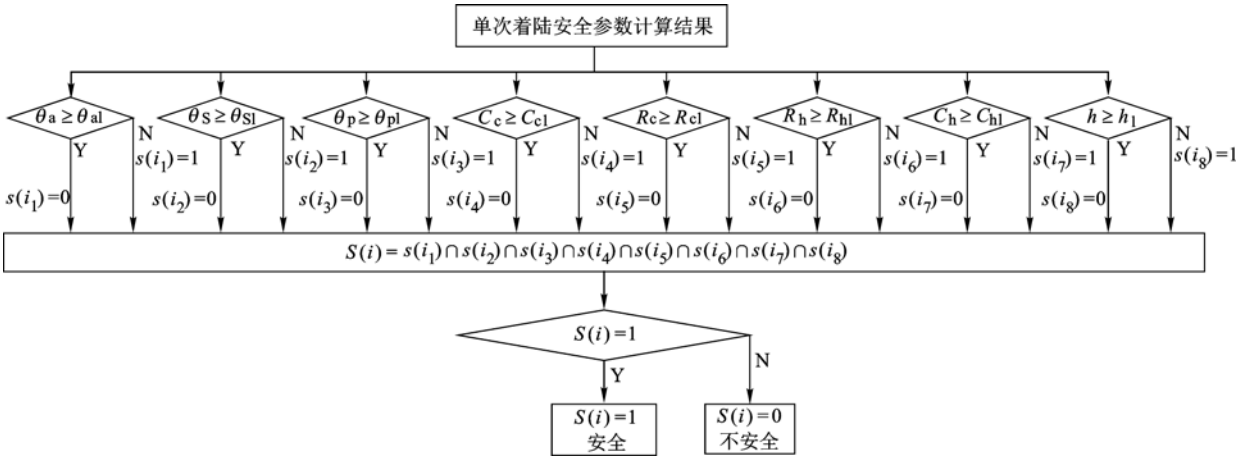
H—假设着陆器底面距离月面的高度;d—尾管直径;
h—推力发动机尾管距月面高度;Δh—尾管突出高度.

图 7　尾喷管距月面高度示意图

3.4　安全概率计算

蒙特卡洛方法在着陆安全分析中的应用之一是随机确定着陆器在仿真着陆地形上的着陆点;应用之二为根据单次着陆判断结果,分析多次重复试验. 根据设置的着陆器结构尺寸、着陆安全阈值和着陆点的地形信息判定单次着陆是否安全如图 8 所示.

随机多次重复在同一选定区域内进行单次试验,假设总着陆次数为 S_n,其中安全着陆的次数为 s_n,则选定区域着陆安全概率的估计值为:$P = s_n/S_n$ 即为着陆器(设定着陆器结构尺寸)在选定着陆区域的着陆安全概率.



θ_{al}—着陆区域坡度设置阈值;θ_{sl}—着陆器倾斜角度设置阈值;θ_{pl}—脚掌倾斜角设置阈值;C_{cl}—着陆区内撞击坑个数设置阈值;R_{cl}—着陆区域内石块个数设置阈值;R_{h}—实际着陆区域内石块最高高度;h_{l}—推力发动机尾管距月面高度设置阈值;$s(i_i)$—单个安全判断结果;$S(i)$—单次安全着陆判断结果.

图 8　单次着陆安全性判断

4　仿真试验

采用上述的月面地形仿真方法,仿真生成虹湾中 100 m×100 m,精度为 0.01 m 的地形;在该地形上进行着陆安全分析,着陆器的结构尺寸默认值:b 为 6 m,c 为 2 m,h 为 1 m,p 为 1 m;判断安全条件默认值:θ_{a} 为 25°,θ_{s} 为 20°,θ_{p} 为 30°,D_{c} 为 1 m 的 C_{c} 为 3 个、D_{r} 为 0.2 m 的 R_{c} 为 20 个、C_{hl} 为 1.5 m 和 R_{hl} 为 0.3 m. 重复进行 1000 次仿真实验,安全着陆概率的值为 0.84.

为检验该方法,在同一着陆区域上,着陆器结构尺寸、安全判断条件为默认设置,不同着陆器结

构参数 b 对应的着陆安全概率 P_b 如表 1;不同着陆器结构参数 c 对应的着陆安全概率 P_c 如表 2;不同着陆器结构参数 p 对应的着陆安全概率 P_p 如表 3;不同着陆器结构参数 h 对应的着陆安全概率 P_h 如表 4.

表 1 b 对着陆安全概率影响

b/m	3	3.5	4	4.5	5	5.3	5.5	6
P_b	0.822	0.822	0.858	0.856	0.838	0.838	0.85	0.834

表 2 c 对着陆安全概率影响

c/m	2	2.4	2.6	3	3.4	3.8	4	4.2
P_c	0.834	0.846	0.824	0.838	0.798	0.822	0.806	0.806

表 3 p 对着陆安全概率影响

p/m	0.6	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
P_p	0.794	0.83	0.818	0.834	0.856	0.868	0.870	0.871

表 4 h 对着陆安全概率影响

h/m	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6
P_h	0.838	0.838	0.84	0.846	0.846	0.848	0.856	0.856

从表 1 ~ 表 4 可以看出,不同结构尺寸的着陆器在同一区域内的着陆安全概率不同. 因此,在采用该方法对着陆预选区域进行着陆安全分析时,先应设置统一的着陆器结构尺寸,在此条件下着陆安全分析的结果才有意义.

5 结 论

试验分析时着陆区域可选,着陆器结构尺寸、安全参数阈值可设置,使得采用该方法可在地面仿真实验从软着陆侯选区中确定着陆安全性最高的区域,选定最佳着陆点. 同时,未来在实际月面软着陆过程中,也可采用该方法实时分析选定区域的着陆安全概率.

参考文献 (References)

[1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社,2005:251-306
Ou'yang Ziyuan. Overview of the moon[M]. Beijing: Astronautics Press,2005:251-306(in Chinese)

[2] 孙宏金. 嫦娥一号探月卫星揭秘[M]. 北京:中国青年出版社,2007:238-261
Sun Hongjin. Lunar orbiter revelation of Chang'e-1 [M]. Beijing: China Youth Press,2007:238-261(in Chinese)

[3] Mueller E, Bilimoria K D, Frost C. Effects of control power and inceptor sensitivity on lunar lander handling qualities [J]. Journal of Spacecraft and Rockets,2011,48(3):454-466

[4] Ploen S R, Seraji H, Kinney C E. Determination of spacecraft landing footprint for safe planetary landing[J]. Journal Transactions on Aerospace and Electronic systems,2009,45(1):3-16

[5] 曾福明,杨建中,朱汪,等. 月球着陆器着陆缓冲性能研究[J]. 航天器工程,2010,19(5):43-49
Zeng Fuming, Yang Jianzhong, Zhu Wang, et al. Research on landing impact attenuation performance of lunar lander [J]. Spacecraft Engineering,2010,19(5):43-49(in Chinese)

[6] 王闯,刘荣强,邓宗全,等. 月球着陆器着陆过程动力学分析[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(4):381-385
Wang Chuang, Liu Rongqiang, Deng Zongquan, et al. Dynamics analysis of lunar lander's landing process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2008,34(4):381-385(in Chinese)

[7] 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)

[8] Batterson S, Benson H, Gault D, et al. NASA space vehicle design criteria(environment) lunar surface models[R]. NASA, 1969

[9] Solver T, Amelin M. State duration based Monte Carlo simulation model with independent failures for distribution system reliability analysis [C]//9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH . Stockholm, Sweden: 2006 1-8

[10] 网易新闻. 中国探月二期工程月球着陆器模型亮相[OL]. [2010-11-16]. http://war.news.163.com/photoview/4CA50001/11855.html#p=6LJO8T2G4CA50001

[11] Cheatham D C, Bennett F V. Apollo lunar module landing strategy[R]. Apollo Lunar Landing Symposium,1966

[12] Zupp G A. A mathern atical procedure for predicting the touchdown dynamics of a soft-Landing vehicle [R]. NASA, 1971

[13] Blanchard U J. Full-scale dynamic landing-impact investigation of a prototype lunar module landing gear[R]. NASA,1969

[14] Lafontaine J de, Ulitsky A, Tripp J W, et al. LAPS the development of a scanning lidar system with GNC for autonomous hazard avoidance and precision landing[C]// Proceedings of SPIE de Lafontaine. 2004,5418:81-93

[15] Robert E L, George C. Monte Carlo approach to touchdown dynamics for soft lunar landing[R]. NASA,1965

(编 辑:刘登敏)