

# 月面巡视区域地形与巡视器通过性统计分析

李静文\*

北京信息科技大学经济管理学院, 北京 100192

\* E-mail: nanshan1919@sina.com

收稿日期: 2014-05-27; 接受日期: 2014-11-14

北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(批准号: 71A1511115)资助项目

**摘要** 在国内外月球地形地貌的研究成果综述的基础上, 利用“嫦娥三号”巡视器获得的巡视区域地形信息, 对月岩和撞击坑等典型地形特征的分布进行了统计分析, 构建了描述分布规律的数学模型。对巡视器的通过性进行了研究, 得到了不同通过能力对应的平均自由程等分析结果, 作为巡视器路径规划及运动模式选择的基础, 也可以作为后续软着陆任务地形特征建模的参考。

**关键词**  
 地形地貌  
 嫦娥三号  
 巡视器  
 地形特征分布  
 通过性  
 平均自由程

## 1 引言

星球表面的地形地貌既是科学探测的重要内容, 也是探测器工程设计中需要重点关注的因素, 着陆区的选择、着陆器的安全着陆、两器的释放分离、巡视器的月面安全行驶, 都与地形地貌密切相关。因此在我国“嫦娥三号”探测器中, 着陆器上安装了降落相机、地形地貌相机、监视相机, 巡视器上安装了全景相机、导航相机、避障相机等仪器设备, 从不同的关注角度, 获得了月面形貌信息<sup>[1]</sup>。

本文对“嫦娥三号”探测器成功实现软着陆以来获得的图像数据进行了分析, 特别是对巡视器巡视区域的月岩、坑、坡度等地形特征的分布规律进行了统计分析, 建立了巡视区域的地形特征描述模型, 并在此基础上得到了巡视器通过能力与平均自由程等参数间的关系, 分析的结果可以作为巡视器探测区域选择、路径规划、运动模式选择的基础, 也可以作为后续月面软着陆任务中地形特征估计的参考。

## 2 研究背景

### 2.1 国外研究情况

整个月球表面总体上可分为月海和高地两大地理单元。月海是比较平整的平原, 有很少的山脉和较少的熔岩、撞击坑, 地形比较平缓; 相反, 高地则有更多更大的熔岩, 且布满了复杂的相互交叠的撞击坑。

“阿波罗”载人登月前, 苏联、美国发射了多个系列无人月球探测器, 进行了绕月和月球表面观测, 对地形进行测绘, 获得了月面地形环境的第一手资料。美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory)、美国地质勘探局(United States Geological Survey)及艾姆斯航空中心(Ames Research Center)根据获得的图像数据, 对月面地形进行了研究, 得出了月面坡度分布模型以及撞击坑、月岩等典型地貌的统计分布模型<sup>[2]</sup>。

阿波罗登月期间对月球进行了近距离探测, 获得了月面地形信息, 进一步完善了月面地形模型<sup>[3]</sup>。

**引用格式:** 李静文. 月面巡视区域地形与巡视器通过性统计分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 773–778  
 Li J W. Statistic analysis of exploration area topography and rover trafficability (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 773–778, doi: 10.1360/N092014-00170

1994 年发射的美国“Clementine”号航天器对月球进行了详细的地形测绘。其安装的激光测高仪得到了  $75^{\circ}\text{S} \sim 81^{\circ}\text{N}$  地区内的高度数据<sup>[4]</sup>。欧空局发射的“Smart-1”号航天器除了应用可见光谱段进行月面遥感外, 还进行了 6 个红外频段的月面摄像。

月面地形数据可以分为两个尺度层面, 分别适用于不同的场合。一种是大尺度全月低分辨率地形数据, 例如美国“Clementine”号、月球轨道勘测器(LRO)等绕月探测器的激光测高仪和高分辨率摄像机以及在地面利用雷达干涉测量法获得的数据, 目前已经通过这些数据获得了全月的月面高程图, 这对于选择有价值及可行的着陆区域有非常重要的参考价值, 但缺点是分辨率不高。另外一种是小尺度局部高分辨率地形数据, 探测器软着陆后获得的近距离月面图像数据以及由此得出的月面地貌统计模型, 这些数据虽然存在不连续、区域性的缺点, 但是数据分辨率高, 可以分析细致的月面地形, 对于探测器着陆性能评估和月面巡视探测器性能分析具有很大实用价值。

## 2.2 国内研究情况

结合“嫦娥一号”、“嫦娥二号”环月探测获得的数据, 对地形地貌进行了研究<sup>[5]</sup>。采用分辨率为 30 m 的 DEM 数据计算 90 m 基线的坡度, 坡度小于  $8^{\circ}$  的区域占整个虹湾着陆区的 97.17%。虹湾着陆区最小坡度为  $0^{\circ}$ , 最大值为  $46.7^{\circ}$ , 平均值为  $2.218^{\circ}$ , 标准差为  $3.16^{\circ}$ 。

虹湾着陆区内的月岩(通过 1.5 m 分辨率的“嫦娥二号”影像识别)大多围绕其成因撞击坑呈圆形发散的群状分布。根据“嫦娥二号”数据, 虹湾地区 97% 以上的撞击坑深度/直径比小于 1:10, 小于 NASA 报告中平均比率 1:6。通过撞击坑深度/直径比同地质年代的对应关系判断, 虹湾地区的撞击坑以年老坑与成熟坑为主, 坑内部比较平缓, 坡度较小。

服务于“嫦娥三号”工程设计需要, 通过对以虹湾地区为代表的着陆区探测数据的分析, 提出了月面数字仿真地形的构造方法, 并将研究结果应用在数学仿真和地面验证中<sup>[6]</sup>。

“嫦娥三号”巡视器在月面开展的地形地貌探测, 使得我国拥有了月球表面精细的地形地貌信息, 本文对巡视区域的地形特征分布进行了分析、建模, 对巡视器的通过性进行了统计分析。

## 3 巡视器地形地貌探测

### 3.1 巡视器简介

“嫦娥三号”探测器于 2013 年 12 月 14 日在月球表面虹湾地区附近( $19.51^{\circ}\text{W}, 44.12^{\circ}\text{N}$ )成功实现软着陆, 工程目标与科学探测任务圆满完成。

“嫦娥三号”探测器包括月球软着陆探测器(简称着陆器)和月面巡视探测器(简称巡视器)2 个部分。“嫦娥三号”巡视器包括移动、结构与机构、综合电子、GNC、热控、电源、测控与数传、有效载荷等 8 个分系统<sup>[7]</sup>; 月昼期间, 在能源、热控和测控通信的保障下, 开展月面巡视探测, 利用全景相机、测月雷达、红外成像光谱仪、粒子激发 X 射线谱仪开展科学探测工作; 月夜期间, 巡视器进入月夜休眠模式, 利用同位素热源(RHU)和两相流体回路, 实现月夜生存, 巡视器在月面工作的情况见图 1。

### 3.2 地形地貌探测结果

软着陆后, “嫦娥三号”巡视器开始工作, 在完成释放分离过程后, 到达月面, 获得了包括地形地貌信息在内的大量科学探测数据。迄今, 巡视器在月面上已经移动了 114.8 m, 已经拍摄的巡视区域图像中, DEM 分辨率优于 20 mm 的区域面积为  $1158 \text{ m}^2$ , 如图 2 所示。

识别过程中, 首先对相机拍摄的不同空间分辨率的立体图像进行图像拼接、立体匹配, 形成巡视区的 DEM; 根据 DEM 中的地形变化, 结合灰度、纹理信息, 完成特征识别, 标记月岩、撞击坑等地形特征; 最后确定特征的几何参数, 包括月岩的长度、宽度、高度, 以及撞击坑的直径等, 为保证分析的精度, 对没有获得稠密恢复结果的区域或者恢复结果精度低

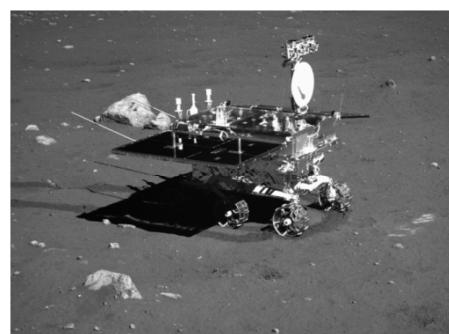


图 1 “嫦娥三号”巡视器

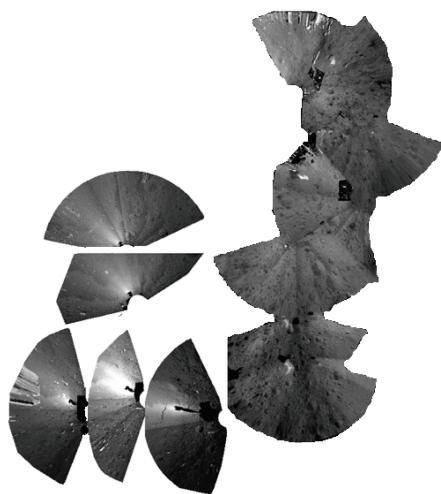


图 2 “嫦娥三号”巡视区域

于 1 cm 的区域采取去除处理。局部区域的识别结果如图 3 所示。

在巡视区域内, 共识别出 113 块月岩、97 个撞击坑。对巡视区域内的月岩几何参数进行辨识, 其特征直径分布如图 4 所示。其中直径 1 m 以上月岩 1 块, 直径 0.8 m 以上月岩 2 块, 直径 0.5 m 以上月岩 8 块, 直径 0.2 m 以上月岩 60 块(即“嫦娥三号”巡视器无法跨越的月岩)。

月岩的形状覆盖了一个很宽的范围。一个标准的月球岩石的形状被认为是它的最小尺度和最大尺度的比值介于 1:1 和 1:5 之间。从巡视区域月岩的形状看, 比值接近 1:1 的月岩数量占大部分, 最大比值为 1:7.8。

对 97 个撞击坑的特征直径分布情况进行统计, 如图 5 所示。其中直径 1 m 以上的撞击坑 8 个, 直径 0.5 m 以上的撞击坑 53 个。对撞击坑的深度进行统计, 最大深度 0.2 m, “嫦娥三号”巡视器均可以通过。

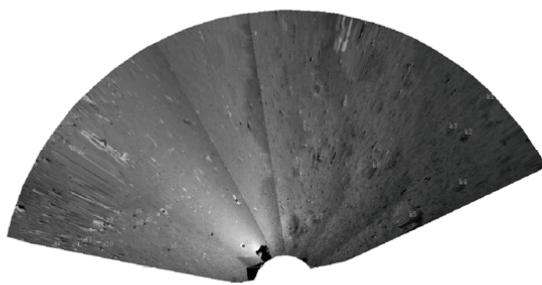


图 3 巡视区域局部

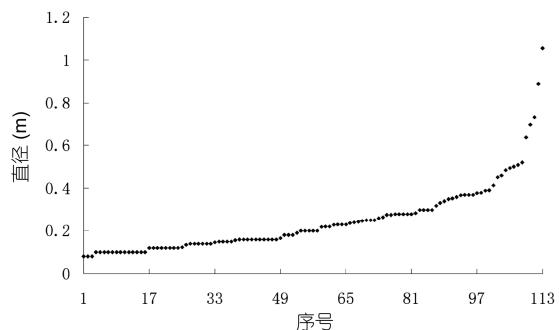


图 4 月岩特征直径

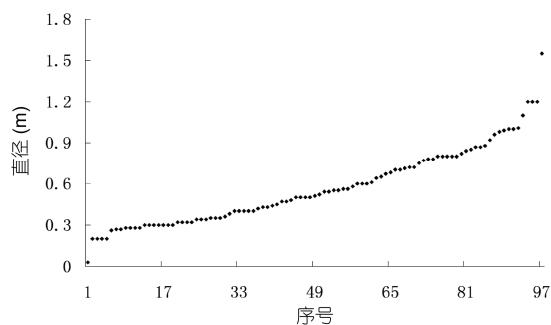


图 5 撞击坑直径

对撞击坑的类型进行统计<sup>[3]</sup>, 深度/直径比大于 0.2 的新鲜坑只有 3 个; 深度/直径比在 0.15~0.2 的年轻坑 5 个, 成熟坑与老年坑占绝大多数。

以巡视器特征尺寸 1 m 为坡度分析的基线, 月面坡度的测量结果共 1165 组, 如图 6 所示, 从数据中可以看出: 对南北方向而言, 南向坡度最大值 5.2°, 北向坡度最大值为 5.7°, 平均值为北向 1.1°; 对东西向而言, 东向坡度最大值 6.5°, 西向坡度最大值为 5.7°, 平均值为东向 2.7°; 区域内最大坡度为 8.1°, 呈东北坡向; 区域平均坡度为 3.8°, 也是东北坡向。与虹湾地区整体西北坡向不同, 呈局部地形特征的特殊性。

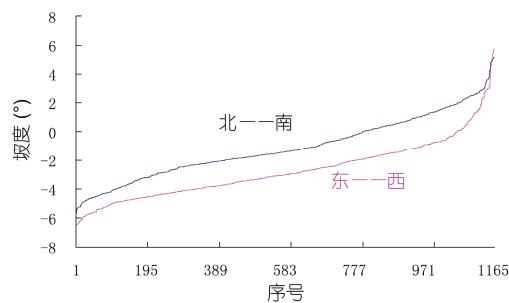


图 6 (网络版彩图)坡度数据

“嫦娥三号”巡视器坡上移动时，可以适应的坡度为 $20^\circ$ ，上述坡度均可通过。

这样在巡视区域内，“嫦娥三号”巡视器不可通过的地形面积为 $4.1 \text{ m}^2$ ，只占总面积的 $3.5\%$ ，与巡视器移动能力分析时，不可通过的区域低于总面积 $1\%$ 的要求是吻合的。

## 4 巡视区域地形地貌分布模型

### 4.1 月岩分布模型

对月岩和撞击坑的分布规律的分析通常采用同样的公式进行描述。对月岩，单位面积内超过某一直径 $D$ 的月岩数目 $N_s(D)$ 通常满足：

$$N_s(D) = aD^b, \quad (1)$$

式中， $a$  和  $b$  为系数，直径  $D$  量纲为 m。

通过月岩数目的分布函数，可以推导出月岩数目的分布密度，设月岩直径为  $D$  的数目为  $n_s(D)$ ，那么根据(1)式的定义有

$$N_s(D) = \int_D^\infty n_s(D) dD. \quad (2)$$

则月岩数目的分布密度为

$$n_s(D) = -abD^{b-1}. \quad (3)$$

可以通过月岩数目的分布密度计算直径范围为  $D_1$  和  $D_2 (D_2 > D_1)$  之间的月岩数目

$$\int_{D_1}^{D_2} n_s(D) dD = aD_1^b - aD_2^b. \quad (4)$$

单位面积内直径大于  $D_0$  的月岩所占的面积  $S(D_0)$  可以通过直径大于  $D_0$  的月岩的数目来计算

$$S(D_0) = \int_{D_0}^\infty -\frac{\pi D^2}{4} abD^{b-1} dD = \frac{\pi abD_0^{b+2}}{4(b+2)}. \quad (5)$$

对“嫦娥三号”巡视器获得的月岩数据进行统计分析， $a, b$  分别为  $1.248 \times 10^{-3}, -2.141$ 。

作为比对，文献[3]NASA 设计准则 SP-8023 中，给出的平坦月海地区月岩分布模型中， $a, b$  分别为  $4.023 \times 10^{-4}, -2.589$ ，在崎岖月海地区分别为  $5.848 \times 10^{-3}, -3.057$ 。在 Apollo 15 着陆点附近的统计结果为  $1.4 \times 10^{-4}, -2.65$ 。将直径  $D_0$  以上月岩数目统计结果、拟合结果与其它分布模型比较，如图 7 所示。

可以看出，采用本文拟合的结果与原始数据相关关系良好，巡视区域的月岩数量比 Apollo 15 着陆区高近一个数量级。“嫦娥三号”巡视区域的月岩分布

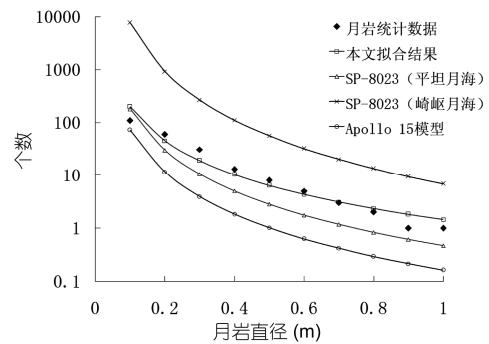


图 7 月岩分布函数

数量位于文献[3]给出的平坦月海、崎岖月海月岩分布模型之间，偏平坦月海，这与对该地区地质演化历程的分析一致。

### 4.2 撞击坑的分布模型

类似地，巡视区域单位面积内超过某一直径  $D$  的撞击坑数目  $N_c(D)$  满足：

$$N_c(D) = 8.573 \times 10^{-3} D^{-1.829}. \quad (6)$$

作为比对，文献[3]中给出的月海地区撞击坑分布模型中， $a, b$  分别为  $0.1, -2.01$ ，在 Apollo 15 着陆点附近的统计结果为  $0.024, -2.06$ 。将直径  $D_0$  以上撞击坑数目统计结果、拟合结果与其它分布模型比较，如图 8 所示。

可以看出，采用本文拟合的结果与原始数据相关关系良好，撞击坑数量比 Apollo 15 着陆区撞击坑数量低，比文献[3]给出的估计更是低了一个数量级。

## 5 巡视器通过性分析

### 5.1 平均自由程

平均自由程表示的是巡视器行驶时遇到不可通

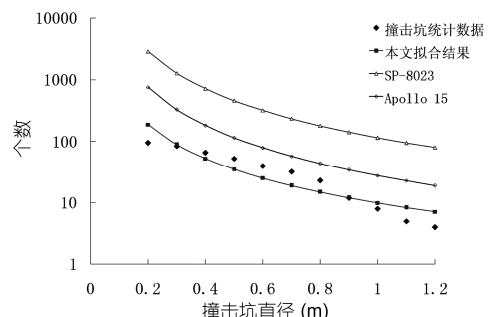


图 8 撞击坑分布函数

过的障碍物时移动的平均距离, 通常采用平均自由程来描述特定环境下巡视探测器的移动能力。当对平均自由程作无量纲处理时, 将平均自由程除以巡视器的转向半径, 称为“平均自由程系数”。如果平均自由程系数远大于 1, 表示该地形对于该巡视器而言没有危险, 大多数情况下可以自由行驶, 在设计巡视器的避障算法时就可以简化, 提高巡视器的工作效率。当平均自由程系数接近 1 时, 该地形对于给定的巡视器而言, 很难通过, 随时都可能遇到障碍物, 需要在导航与控制方面考虑针对性的避障算法, 才能保证巡视器顺利地通过该区域。

对于巡视器的设计而言, 应尽可能地提高巡视器的通过能力, 这样在给定的区域中, 就可以获得较大的平均自由程, 从而提高探测任务的效率。

## 5.2 概率方法计算平均自由程

假设巡视器初始的位置是没有障碍物的, 障碍物随机分布且相互独立。假设巡视器长度为  $L$ , 宽度为  $W$ , 向前直线运动了距离  $x$ , 到达直径为  $D$  的障碍物。图 9 给出了平均自由程计算方法示意。

按照平均自由程的定义有

$$\int_{D_0}^{\infty} (x + D/2)(W + D)n(D)dD = 1, \quad (7)$$

式中,  $n(D)$  代表直径为  $D$  障碍物的数量,  $D_0$  为巡视器可通过的障碍物特征尺寸。

通过上式, 可以计算得到巡视器的平均自由程为

$$x = \frac{1 - \frac{W}{2} \int_{D_0}^{\infty} Dn(D)dD - \frac{1}{2} \int_{D_0}^{\infty} D^2 n(D)dD}{W \int_{D_0}^{\infty} n(D)dD + \int_{D_0}^{\infty} Dn(D)dD}. \quad (8)$$

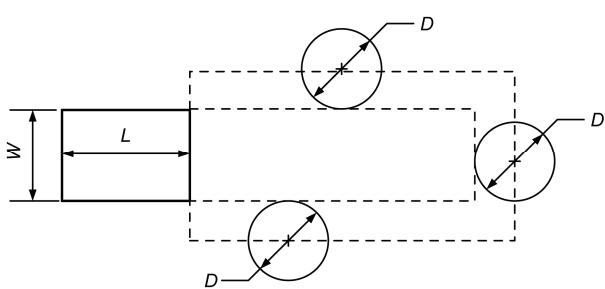


图 9 平均自由程分析

更一般地, 考虑到巡视器转向能力, 得到按照半径  $R$  转向时的平均自由程  $x(R)$  为

$$x(R) = \frac{1 - \frac{1}{2} \int_{D_0}^{\infty} DQ(D)n(D)dD}{\int_{D_0}^{\infty} Q(D)n(D)dD}, \quad (9)$$

其中

$$Q(D) = \sqrt{\left(R + \frac{W}{2} + \frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \left(R - \frac{W}{2} - \frac{D}{2}\right). \quad (10)$$

巡视器宽度为 1 m, 越障能力为 0.2 m, 原地转弯半径约为 0.9 m 时, 如果巡视区域的地形与(1)和(6)式所表示拟合函数的特征分布规律一致, 计算可知直线运动时巡视器月面平均自由程为 63.5 m, 平均自由程系数为 70。巡视区域的平均自由程计算结果见图 10, 可以看出随着越障能力的提高, 巡视器的平均自由程显著提高, 例如宽度为 1 m 时, 越障能力 0.05 m 对应的平均自由程为 4.73 m, 而越障能力提高到 0.3 m 时平均自由程为 125 m。平均自由程与宽度  $W$  相关, 但受之影响较小, 越障能力为 0.2 m 时, 宽度从 1 m 增加到 2 m, 平均自由程从 63 m 降到 40 m。转弯时, 平均自由程与巡视器长度相关, 但影响也较小, 例如巡视器按照 1.5 m 半径转弯时, 巡视器长度为 1.5 m 对应的平均自由程为 59.2 m, 长度为 2 m 时, 平均自由程减少到 56.4 m。

在巡视器的设计中, 应综合考虑巡视器的几何尺寸、地形条件, 综合确定越障能力等技术指标。

## 6 结束语

对“嫦娥三号”巡视器在月面探测获得的巡视区域月岩、撞击坑、坡度等地形特征的分布规律进行了

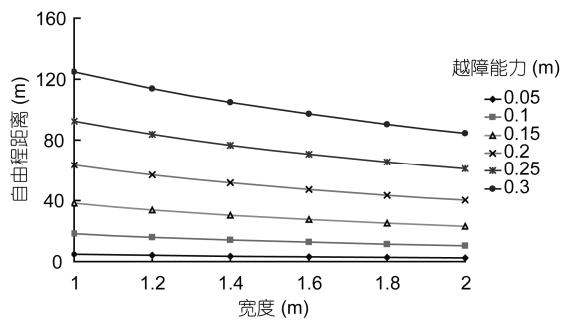


图 10 平均自由程

统计分析，建立了巡视区域的地形特征描述模型，并在此基础上得到了巡视器越障能力、几何参数与平均自由程间的关系，分析的结果可以作为巡视器探测

区域选择、路径规划、运动模式选择的基础，地形特征描述模型也可以应用于后续月面软着陆任务中月海地区地形特征估计。

## 参考文献

---

- 1 Sun Z Z, Jia Y, Zhang H. Technological advancements promotion roles of Chang'e-3 lunar probe mission. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 2702–2708
- 2 Rowan L C, McCauley J R. Lunar terrain analysis. *Lunar orbiter-image analysis studies report*. US Geological Survey Report, 1965–1966. 89–129
- 3 NASA Marshall Space Flight Center. *Lunar surface models NASA space vehicle design criteria /Environment/*, NASA Space Vehicle Design Criteria (Environment). SP-8023, 1969
- 4 Cook A C, Watters T R, Robinson M S, et al. Lunar polar topography derived from Clementine stereoimages. *J Geophys Res*, 2000, 105: 12023–12033
- 5 赵葆常, 李春来, 黄江川, 等. 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机在轨图像分析. *航天器工程*, 2012, 21: 1–7
- 6 张伍, 党兆龙, 贾阳. 月面数字地形构造方法研究. *航天器环境工程*, 2008, 25: 301–305
- 7 贾阳, 陈建新, 张熇, 等. 月面巡视探测器关键技术分析. *航天器工程*, 2006, 15: 54–58

## Statistic analysis of exploration area topography and rover trafficability

LI JingWen

*School of Economics and Management, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China*

Based on the reviews of foreign and domestic research results on lunar topography and the exploration results by Chang'e-3 lunar rover, the distribution of lunar rocks and craters were statistically analyzed and the mathematical models of lunar rocks and craters were also built. The trafficability of Chang'e-3 lunar rover was studied and used for the computation of mean free paths for the Chang'e-3 lunar rover. The results of mean free paths can be used for the path planning and motion modes of planetary rover and can be reference to the models of terrain feature for the mission of soft landing in the future.

**topography, Chang'e-3, rover, distribution of terrain feature, trafficability, mean free path**

doi: 10.1360/N092014-00170