深空探测学报(中英文)
Journal of Deep Space Exploration

# “玉兔二号”复杂月背环境休眠与唤醒控制方法

张　宽，卢　皓，李立春，于天一，张　辉，谢剑锋

# A Control Method of Sleep-Reboot in the Complex Lunar Far-Side Environment of Yutu-2

ZHANG Kuan, LU Hao, LI Lichun, YU Tianyi, ZHANG Hui, and XIE Jianfeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210054

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

环月轨道交会的载人登月任务轨道与窗口规划

Study on Mission Planning and Window Design for Manned Lunar Far-Side Exploration

深空探测学报(中英文）. 2017, 4(5): 471-476

月面巡视器路径规划方法研究

Study on Path Planning Method of Lunar Rover

深空探测学报(中英文）. 2019, 6(4): 384-390

近月空间带电粒子环境——“嫦娥1号”“嫦娥2号”观测结果

The Lunar Charged Particle Environment by Chang'E-1 and Chang'E-2

深空探测学报(中英文）. 2019, 6(2): 119-126

月面巡视探测器任务规划顶层设计与实现

Top Design and Implementation of the Lunar Rover Mission Planning

深空探测学报(中英文）. 2017, 4(1): 58-65

深层月壤钻取冗余绕组电机控制方法

Control Method of Redundant Winding BLDC for Deep Lunar Soil Drilling

深空探测学报(中英文）. 2021, 8(3): 259-268

在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究

Key Technologies of Very Low Frequency Radio Observations on the Lunar Far-Side

深空探测学报(中英文）. 2017, 4(2): 150-157

关注微信公众号，获得更多资讯信息

# “玉兔二号”复杂月背环境休眠与唤醒控制方法

张 宽，卢 皓，李立春，于天一，张 辉，谢剑锋
（北京航天飞行控制中心，北京 100094）

**摘 要**：针对复杂地形与中继通信等多约束条件下“玉兔二号”巡视器休眠与唤醒控制问题，提出了复杂月背环境休眠与唤醒规划控制方法。通过巡视器单目相机序列成像的天际线感知方法实现了周围地形的遮挡情况分析，基于巡视器姿态预测方法计算了巡视器给定位置的可休眠姿态及控制策略，提出了可休眠性指标与可视化综合分析方法以辅助寻找备选休眠点，并设计了休眠唤醒在轨工作模式。将其应用到“玉兔二号”在轨控制中，实施情况说明了控制方法的正确性和工作模式的有效性。

**关键词**："玉兔二号"巡视器；休眠与唤醒；复杂月背环境；多约束控制；天际线计算

**中图分类号**：V448.2 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9287(2021)06-0555-09

**DOI:**10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210054

**引用格式**：张宽，卢皓，李立春，等. “玉兔二号”复杂月背环境休眠与唤醒控制方法[J]. 深空探测学报（中英文），2021，8（6）：555-563.

**Reference format:** ZHANG K，LU H，LI L C，et al. A control method of sleep-reboot in the complex lunar far-side environment of Yutu-2[J]. Journal of Deep Space Exploration，2021，8（6）：555-563.

## 引 言

“嫦娥四号”探测器于2019年1月3日着陆于月球背面南极–艾特肯盆地冯卡门撞击坑内，此后着陆器开展了月面就位探测，“玉兔二号”巡视器开展月面巡视勘察，实现了人类首次月背软着陆和巡视探测[1-2]。

月球上存在月昼和月夜，各约14 d。巡视器进入月夜与近地飞行机器进入地球或月球阴影的情况相似，但其又具有特殊性，主要体现在：①持续时间长，月夜时间约为14个地球日，这期间没有光照，太阳翼无电能输出，受整器质量限制所配置的蓄电池组容量有限，不能提供月夜期间所需的能量；②缺少空间红外辐射热流，由于地月距离远，在月夜期间地球背影辐射对巡视器的加热作用几乎为0，月球表面在月夜期间温度最低可以达到–196°C，电子设备无法工作；③月面的影响作用大，巡视器与月球表面直接接触，与月面还存在不规则的热传导，月夜期间月面温度的降低，对巡视器的温度分布影响作用明显[3-4]。

国外深空探测器主要采用$^{238}$Pu、$^{210}$Po等放射性同位素温差电池（Radioisotope Thermoelectric Generator，RTG）提供能源[5-7]，放射性温差电池结构紧凑、可靠性高，与其它化学电源相比，寿命长且不受环境影响。我国首辆月球巡视器“玉兔号”从技术基础、探测器质量、经济成本等方面综合考虑，未采用同位素温差电源，而是采用太阳翼和的锂离子蓄电池组联合供电。与“玉兔号”巡视器状态一致，“玉兔二号”月昼期间由太阳翼和蓄电池组联合供电月昼期间太阳翼和蓄电池组联合供电，可满足工作需求；月夜期间太阳翼无法供电，蓄电池组无法独立满足连续约14个地球日的基本工作保障需求。为增强适应月表恶劣环境的生存能力，“玉兔二号”在月夜时进入月夜休眠模式，除相关热控设备工作外，其他所有设备断电，不进行科学探测任务，等待下次月昼来临后由光照再唤醒[8]。

与“玉兔号”在月球正面工作相比，“玉兔二号”需运行在L2点附近的“鹊桥号”中继星作为天地唯一测控接口[9-10]；此外，着陆区周围整体地势崎岖复杂，“玉兔二号”在月球工作时存在光照和通信遮挡的可能[11]。中继通信和地形遮挡等新任务特点对于“玉兔二号”的休眠唤醒控制产生了重要影响。

本文首先分析了“玉兔二号”与“玉兔号”休眠唤醒的技术状态区别，给出了休眠唤醒约束条件；在明确

收稿日期：2021-06-17 修回日期：2021-10-09
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目（62003025）；国家自然科学基金资助项目（61972020）

控制约束的基础上，提出了关键问题及其解决途径，设计了休眠唤醒控制实施流程，并结合在轨实施情况对休眠唤醒控制方法的有效性进行了说明。

# 1 “玉兔二号”休眠与唤醒分析

## 1.1 “玉兔号”休眠与唤醒控制技术状态

“玉兔号”的休眠控制过程主要包括寻找休眠点和休眠设置两大部分。根据“玉兔号”月夜休眠唤醒时热控及供电的约束，巡视器休眠前应依据地形情况找到合适的位置，保持满足约束的标称姿态[4]：①巡视器+$X$轴相对正南方向航向角为–10°～0°（车头偏西为正）；②巡视器车体俯仰角度为0°～15°（车体前高后低为正）；③巡视器车体侧倾角度为–3°～1°（车体左高右低为正）。

休眠前，当太阳高度角为20°～15°并且在可见弧段内，依次进行下述操作，准备进入月夜：①地面发送指令关闭除综合电子、电源（电源控制器）、测控数传（应答机、固放不关闭）外的其它设备；②地面发送指令将电源分系统唤醒使能/禁止开关闭合；③地面发送指令将容错管理模块设置为唤醒功能；④地面发送延时指令将测控应答机断电，测控固放断电；⑤断开一次电源母线开关；⑥断开蓄电池组放电开关；⑦电源控制器二次电源断电。

月夜结束后光照来临时，–$Y$侧太阳翼输出功率达到唤醒阈值$W_s$，触发巡视器唤醒过程，巡视器进入月夜转月昼模式。“玉兔号”太阳翼分别安装在车体的± $Y$侧（如图1所示），+ $Y$侧太阳翼采用单轴驱动，能在运动范围内任意位置定位和保持，实现一维对日定向；–$Y$侧一次展开到位后通过锁定机构完成锁紧动作，此后不再运动。

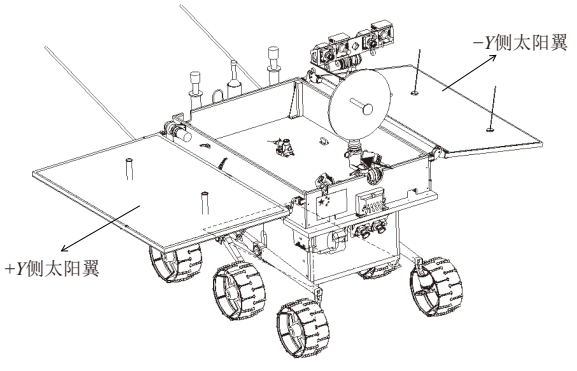



图 1 太阳翼示意图

Fig. 1 Solar array diagram

## 1.2 “玉兔二号”休眠与唤醒技术状态

1）标称姿态方式不完全满足唤醒约束

巡视器唤醒时，为确保蓄电池组可靠放电，需利用太阳升起后的阳光对蓄电池组预热一段时间。在标称姿态下存在地形遮挡光照的情况时，太阳出山后若太阳翼输出功率达到唤醒要求但蓄电池尚未完成预热，将对唤醒过程及整器安全产生重大影响。为避免该情况发生，只能通过调整车体航向实现唤醒热控约束。车体航向可调，各休眠唤醒控制参数均需计算确定，无法采用“玉兔号”设定标称值的方式实施。

2）增加延时自主休眠功能模式

巡视器休眠时需要进行相关状态的设置，为适应地形复杂可能导致的休眠时中继全向天线通信遮挡，在保持地面控制休眠模式的基础上新增了延时自主休眠功能模式。地面控制模式下，地面在测控支持下于休眠时刻上行发令控制巡视器休眠；延时自主休眠模式下，由于在休眠时刻地面没有测控支持，休眠时刻前地面上注休眠时刻等控制信息，在休眠时刻巡视器自行完成休眠。

3）中继数传支持休眠与唤醒设置

由于休眠姿态不确定和增加了自主休眠模式设置，各类控制参数均需规划计算并进行上注，上注结果判断只能通过中继定向天线数传通道下传数据检查。因此，在巡视器休眠与唤醒设置时，需要巡视器定向天线对中继星指向有解。

## 1.3 “玉兔二号”休眠与唤醒问题求解思路

根据1.2节中“玉兔二号”休眠与唤醒技术状态变化的分析可知，“玉兔二号”的休眠与唤醒控制是复杂地形与中继通信等多约束条件下的控制问题，其约束条件如表1所示。

通过对表1中的约束满足方法分析可知，“玉兔二号”休眠与唤醒问题求解本质上是在已知周围环境地形条件下寻找到可休眠的月面位置和车体航向以满足上述所有约束条件，因此需要解决以下3个问题：

1）对周围环境进行感知，用于分析光照与通信的遮挡情况；

2）给定位置的可休眠姿态预测，根据周围环境遮挡情况和局部地形信息预测可休眠姿态，给出车体航向，用于计算给定车体位置的可休眠性及休眠与唤醒控制参数；

3）可休眠区分析，根据感知局部地形内所有点的可休眠性情况，进行可休眠区分析，支持休眠点选择。

表 1　休眠唤醒约束

Table 1　Sleep-reboot’ constraints

| 序号 | 约束名称 | 约束说明 | 约束满足方法 |
|---|---|---|---|
| 1 | 休眠后防误唤醒约束 | 在有地形遮挡的情况下，存在巡视器休眠后进入月夜前可能被误唤醒的风险，需要确保–*Y*侧太阳翼输出功率小于唤醒阈值$W_s$ | 调整车体姿态和休眠流程启动时刻，车体姿态通过根据环境光照遮挡情况调整车体位置和航向实现 |
| 2 | 休眠防过热约束 | 由于休眠状态下收拢+*Y*侧太阳翼并接通两相流体回路引入核源热量，为防止车体过热，需要在太阳高度角小于阈值$h_s$时启动休眠流程 | 调整休眠流程启动时刻 |
| 3 | 休眠测控可见性约束 | 若在理论休眠时刻前后一段时间有测控遮挡，则采用自主方式休眠，否则采用地面控制方式 | 可见性由环境的通信遮挡情况决定 |
| 4 | 休眠后热控约束 | 为保证月夜期间两相流体回路顺利工作，要求俯仰角要大于阈值$\theta_{\text{pitch}}$ | 调整车体位置和航向 |
| 5 | 唤醒后蓄电池组工作温度约束 | 为确保蓄电池组能在巡视器唤醒时可靠供电，要保证蓄电池能够从月夜低温升到工作温度，但同时也要避免舱内其它设备温度过高，需要合理设计整器唤醒前预热时长，要求预热时长处于[$t_{\text{wmin}}$，$t_{\text{wmax}}$]之间且$t_{\text{wmax}}$–$t_{\text{wmin}}$有小时级的上限要求 | 调整车体姿态，通过根据环境光照遮挡情况调整车体位置和航向实现 |
| 6 | 唤醒后整器能源约束 | 巡视器唤醒+*Y*侧太阳翼展开到位后$\theta_{+Y}$，整器发电功率要大于基础功耗，且尽可能高效率发电 | 调整车体姿态，通过根据环境光照遮挡情况调整车体位置和航向实现 |
| 7 | 休眠与唤醒前后中继星可见性约束 | 在巡视器休眠与唤醒设置期间，巡视器定向天线在限幅范围内对中继星指向有解以保证设置状态数据能够下传 | 调整车体姿态和+*Y*侧太阳翼，通过根据环境通信遮挡情况调整车体位置、航向和+*Y*侧太阳翼角度实现 |

## 2　休眠唤醒控制技术

### 2.1　天际线计算

目前月面环境感知主要通过获取月面图像并进行三维地形重构实现，按照使用图像数据又可分为两类：一是使用月球的遥感图像数据，可获得月球表面大范围较高精度的光学图像和三维地形数据，如“嫦娥一号”任务获取了月球表面三维立体影像，“嫦娥二号”任务获得了7 m高分辨率全月图；另一类是使用巡视器安装的立体视觉相机获取周围局部环境高精度光学图像和三维地形数据，为任务规划、路径规划、可视化显示等提供基础地形数据。基于探测区域大范围的三维地形计算探测器位置对周围环境的通视性可分析光照和通信的遮挡情况，但其计算精度由巡视器位置精度和三维地形数据精确共同决定，无法满足表1中约束5预热时长有较高精度控制的要求。

天际线[12-14]明确了空间背景与月面实体的分界线，可用于刻画地形遮挡情况，分界线以上的目标（如太阳、中继星）与成像点位置具备通信与光照可见性，但当目标位于分界线以下时，目标与成像点不具备通信与光照可见性。因此，可以使用巡视器当前位置点的天际线对地形的遮挡情况进行感知与分析。

巡视器在当前位置使用单目相机对周围环境进行视觉序列成像，利用边缘检测、特征提取等图像处理方法提取图像中天际线点的图像坐标，引入云台参数、桅杆转角和车体姿态等信息，计算天际线点在当地水平坐标系下的空间指向，最后将序列图像进行归一化处理，获取所有航向角度范围内的天际线高度角，进而评估其遮挡情况[14]，如图2所示，天际线计算方法如表2所示。

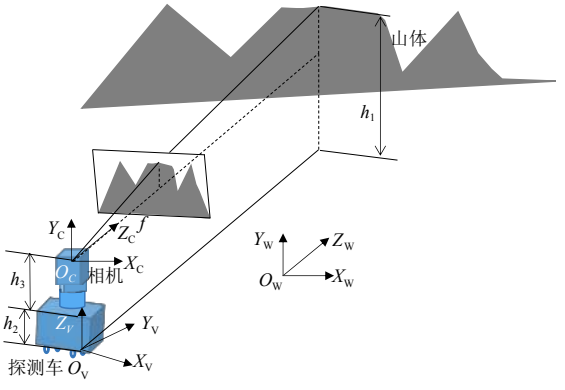



图 2　天际线测量示意图

Fig. 2　The diagram of skyline measurement

表 2　天际线计算方法

Table 2　The algorithm of skyline recognition

| |
|---|
| 输入：天际线的相机成像；拍摄图像时桅杆云台等活动机构的位置信息；相机内外参数 |
| 计算步骤：<br>1）利用边缘检测、特征提取等图像处理方法，提取图像中天际线点的图像坐标；<br>2）基于天际线图像坐标计算相机坐标系下每个天际线点对应的空间射线指向；<br>3）引入云台参数、桅杆转角、车体姿态，计算天际线点在当地水平坐标系下的空间指向，获得光心点（$X_c$，$Y_c$，$Z_c$）在航向角度范围内（$A_{\text{Yaw1}}$～$A_{\text{Yaw2}}$）之间的天际线高度角度$AH_i$（$i$=1，…，$N$）；<br>4）将序列图像中每幅图像光心的所对应偏航范围内天际线高度角度进行归一化处理，得到车体位置所有航向角度范围内的天际线高度角$AH_j$（$j$=1，…，$M$）。 |

基于巡视器当前位置点的天际线对复杂地形产生的光照和通信遮挡进行分析，是一种非基于三维地形重构技术的环境感知方法，其计算的误差来源包括巡视器位置测量误差、桅杆与云台等转角测量误差等。桅杆与云台等转角测量精度较高，该方法的综合误差能够满足任务要求。

## 2.2 可休眠姿态预测及休眠与唤醒控制参数计算

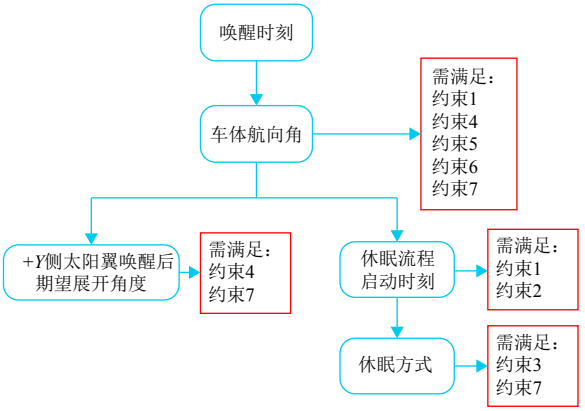
“玉兔号”采用标称姿态法进行休眠，其方法主要将车体视为刚体并将航向设置为固定值放于从局部三维地形数据获取的某处地形上，以预测评估车体姿态是否满足休眠姿态，若满足则该位置处可休眠，否则不可休眠。因此，其休眠与唤醒策略制定本质上是月面合适位置点的选择。

“玉兔二号”休眠唤醒策略计算，不仅需要考虑局部地形信息，还需结合周围天际线和其它多类约束条件与控制要求，计算巡视器在某月面位置下的可休眠航向角和更为复杂的控制参数，控制参数参见表3，由表1中多类约束条件满足方法和实际控制需求，各控制参数之间依赖关系如图3所示。

**表 3 策略参数及影响约束**

**Table 3 Strategy parameters and influence constraints**

| 序号 | 参数名称 | 参数含义 | 影响约束 |
|---|---|---|---|
| 1 | 唤醒时刻$t_{\text{wake}}$ | 为次月昼−$Y$侧太阳翼发电功率约升到$W_s$，巡视器由月夜转月昼开始时刻 | 1） 唤醒后温度约束 |
| 2 | 车体航向角$\phi_{\text{wake}}$ | 满足$t_{\text{wake}}$时刻巡视器休眠唤醒的车体航向角 | 1）唤醒时刻$t_{\text{wake}}$；2） 休眠后热控约束 |
| 3 | +$Y$侧太阳翼唤醒后期望展开角度$\theta_{+Y}$ | 巡视器唤醒时+$Y$侧太阳翼自主展开的角度 | 1）车体航向角$\phi_{\text{wake}}$；2） 唤醒后能源约束 |
| 4 | 休眠流程启动时刻$t_{\text{start}}$ | 控制休眠序列首指令执行时刻 | 1）车体航向角$\phi_{\text{wake}}$；2） 休眠后防误唤醒约束；3） 休眠温度约束 |
| 5 | 休眠方式$tp_{\text{sleep}}$ | 自主方式休眠还是地面控制方式 | 1）休眠流程启动时刻$t_{\text{start}}$；2）车体航向角$\phi_{\text{wake}}$；3） 休眠时是否有测控支持（含对中继指向有解） |




注：约束编号同表1。

图 3 各策略参数之间的依赖关系

Fig. 3 The dependence between parameters

上述各控制参数中唤醒时刻可设定为太阳可见时刻$+(t_{\text{wmin}}+t_{\text{wmax}})/2$，因此，针对每个月昼其取值可以固定。

车体航向角计算是在给定某月面位置的地形信息情况下，将车体视为刚体并置于地形上，给定任意航向角就可以计算相应的俯仰角和滚动角，遍历所有航向角获得满足表1中约束1、4、5、6、7的航向角，由于唤醒时刻确定，其解最多有两组，可根据休眠后热控约束选解获取可休眠姿态。

车体航向角计算使用的地形主要基于月面高精度三维地形数据获取，如“玉兔号”进行路径规划时根据三维地形信息预测到运动过程中和到位后的姿态。由于车体与月壤之间存在交互作用，在轨实际获得巡视器在某个位置处的姿态数据后可基于车地匹配方法进行航向角计算，即根据巡视器当前姿态对所处局部地形进行平面拟合并进行车体航向计算。获取可休眠姿态后，其他控制参数可以按照相关约束进行求解，休眠唤醒策略计算方法如表4所示。

可休眠姿态预测方法是一种可变航向角的多约束策略计算方法，其综合考虑了天际线、局部地形和其他多类约束条件与控制要求，通过调整车体航向角实现各类复杂月面环境下休眠与唤醒策略的计算。与“玉兔号”标称姿态法相比，可休眠姿态预测方法能适应复杂的月面环境。

## 2.3 休眠区可视化综合分析

巡视器休眠前需要对周围环境进行可休眠性分析，寻找目标休眠点。选择休眠点时除需考虑目标点的可休眠性外，还需具备可达性。若休眠前未能到达可休眠点，可能危及巡视器的安全。因此，休眠唤醒控制并非仅仅是休眠策略的计算求解问题，还包括了巡视器移动实施等地面决策问题，即需要建立一个实现可休眠与可达性评估的综合分析模型。

**表 4　休眠唤醒策略计算方法**

**Table 4　The algorithm of sleep-reboot's strategy calculation**

输入：天际线计算结果；某位置点三维地形数据或车体在该点处的姿态数据；太阳及中继星星历数据

输出：唤醒时刻$t_{wake}$；车体航向角$\phi_{wake}$；$+Y$侧太阳翼唤醒后期望展开角度$\theta_{+Y}$；休眠流程启动时刻$t_{start}$；休眠方式$tp_{sleep}$

计算步骤：

1）首先根据天际线计算结果和太阳星历数据，计算唤醒时刻$t_{wake}$ = 太阳可见时刻 +($t_{wmin}+t_{wmax}$)/2；

2）获取某位置点地形信息（若为车体姿态需拟合生成局部地形），计算在$t_{wake}$唤醒时刻–$Y$侧太阳翼发电功率为$W_s$时的车体航向$\phi_{wake}$，车体航向可能会有多解，可根据休眠后热控约束选解；

3)对车体航向为$\phi_{wake}$时车体姿态进行预估，根据唤醒后能源约束要求，计算+$Y$侧太阳翼唤醒后期望展开角度$\theta_{+Y}$；

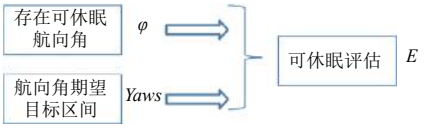
4）根据车体航向为$\phi_{wake}$时车体预估姿态信息、天际线信息、太阳星历信息和休眠后防误唤醒约束、休眠防过热约束，计算休眠流程启动时刻$t_{start}$；

5）根据车体航向为$\phi_{wake}$时车体预估姿态信息、休眠流程启动时刻$t_{start}$、天际线信息、中继星星历信息，计算测控遮挡情况，若遮挡则为自主休眠，否则为地面控制休眠。

“玉兔号”任务中路径规划采用月面综合环境图模型[15-16]实现。月面综合环境图综合考虑月面实际物理环境中提取的坡度坡向、月面粗糙度、月面阶梯、月面通信、太阳光照、地月通信等维度特征信息，将所有特征信息叠加在地形图上，以实现恢复巡视器所在位置附近的月面环境，然后可在此基础上生成相应路径规划结果。月面综合环境图已实现了可达性分析和路径规划功能，采用可视化方法实现高效的人机协同。

为实现可休眠性分析，须建立可休眠量化分析指标。影响可休眠性的因素很多，基于2.2节建立的可休眠姿态预测方法可知车体航向角确定后其他控制参数也相应确定，因此基于车体航向角建立可休眠性分析指标。

可休眠姿态预测方法是以电池预热时长中间值作为唤醒时刻计算航向角，图4中$Int$（）函数表示基于预热可行时长区间计算获取的航向角区间，$Yaws$表示地面期望的航向角区间，$Int_{min}$表示最小重合度，若计算获取的航向角区间与地面期望的航向角区间重合区间长度大于$Int_{min}$则评估为可休眠，否则不可休眠。




$$E=[Int(\varphi)\cap Yaws]\geqslant Int_{min}$$

图 4　可休眠性分析指标

Fig. 4　Sleepability analysis index

在原有的综合环境图模型中增加休眠特征信息，建立休眠区可视化综合分析模型，即可实现可休眠性与可达性评估的综合分析。考虑休眠特征信息的月面综合环境图建立方法如表5所示。

**表 5　考虑休眠信息的月面综合环境图建立方法**

**Table 5　The algorithm of building comprehensive lunar environment map considering sleep information**

输入：数字高程图（DEM）；天际线计算结果；巡视器外包络参数及机构运行能力限制；测控资源分配结果和相关预报结果（太阳及中继星星历数据）；规划时间

计算步骤：

1）获取指定的数字高程图（DEM）文件，获取设置的图像分辨率、栅格大小、指定时段、时段步长；

2）对DEM图进行栅格化处理，得到栅格网络以及每个栅格的二维坐标；

3）对每个栅格的地形可通行性进行评估，计算代价值，得到地形可通行性代价图；

4）结合指定时段内的太阳高度角/方位角，评估每个栅格单元内的光照强度适宜性，计算代价值，得到光照适宜性代价图；

5）结合星历计算结果评估每个栅格单元是否处在通信盲区，计算代价值，得到通信可见性代价图；

6）根据第3～5步计算结果确定各类障碍，然后合并人工指定障碍得到综合障碍图；

7）加权叠加第3～5步中各类代价计算结果，得到综合代价图；

8）对DEM中各点进行休眠策略计算，得到可休眠区分布图。

休眠区可视化综合分析模型基于车体航向角建立了可休眠行量化评估指标，并在月面综合环境图的基础上增加可休眠行评估信息，提供了一个人机协同解决休眠点寻找复杂问题的有效途径。

## 3　休眠唤醒实施工作模式

整个休眠与唤醒过程除要进行休眠与唤醒设置，还需进行休眠点寻找、充电等行为，实施流程设计为休眠区分析、寻找休眠点、充电、休眠和唤醒等5个环节，如图5所示。

### 3.1　休眠区分析

休眠区分析是基于考虑休眠特征信息的月面综合环境图，挑选目标休眠区域的过程。在寻找休眠点前，基于已掌握的地形信息建立综合环境图对可休眠区进行预先分析，挑选目标休眠区，规划从当前点到目标区域路线，并给出理论休眠时刻$T_1$（$T_1$定义为巡视器断电休眠时刻），$T_1$根据流程启动时刻$t_{start}$和实施程序耗时计算获取。

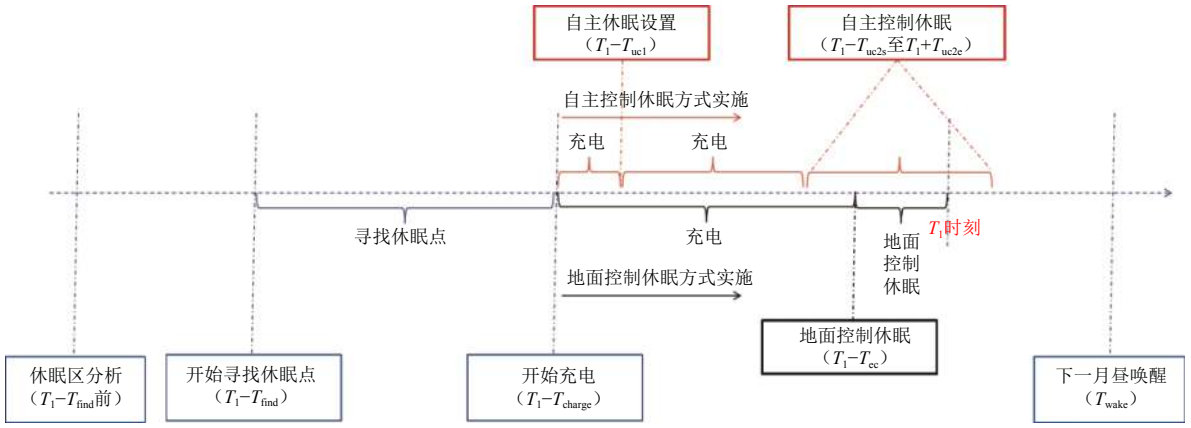



图 5 休眠唤醒工作模式

Fig. 5 Sleep-reboot working mode

### 3.2 寻找休眠点

寻找休眠点环节主要是在休眠前找到适宜的休眠位置并调整至休眠姿态，该环节预计在$T_1$−$T_{find}$开始实施，具体过程为

1）判断当前位置是否满足休眠条件，如果巡视器当前位置满足策略要求则在当前位置进行休眠；否则转到步骤2；

2）根据预先分析结果，对下一可休眠位置进行双目立体视觉相机成像获取地形信息，基于新获取的地形信息重新进行休眠分析，若存在可休眠点，则规划移动路径并控制巡视器移动至目标休眠位置；

3）若在步骤2到达可休眠点，则进行步骤4；否则再次进行步骤1和步骤2寻找可休眠点；

4）到达可休眠点后，根据实际地形情况重新计算巡视器休眠唤醒策略；

5）调整巡视器运动至目标休眠姿态。

### 3.3 休眠前充电

休眠前充电环节主要在休眠前对巡视器充满电，以确保其在顺利展开+$Y$侧太阳翼前蓄电池留有足够电量。该环节在$T_1$−$T_{charge}$时刻实施。若休眠方式为自主休眠，则地面在 $T_1$− $T_{uc1}$时刻进行自主休眠设置。

### 3.4 休眠实施

地面控制方式休眠，则在$T_1$−$T_{ec}$时刻（即$t_{start}$）以地面控制方式进行休眠设置，若此过程中存在出测控区，则等待进入测控区再进行休眠设置。器上自主方式休眠，器上根据地面上注的自主休眠时刻及器上自主判断逻辑进行休眠。

### 3.5 唤醒实施

唤醒采用整器自主唤醒的方式。即在次月昼$t_{wake}$左右−$Y$侧太阳翼发电量大于$W_s$时，光照唤醒电路启动，电源控制器开关闭合、蓄电池组放电开关闭合、一次电源母线开关闭合，综合电子单元、X频段应答机和X频段固态放大器加电工作，之后+$Y$侧太阳翼按照预定的逻辑自主展开并运动。

建立前返向链路后，地面发送指令设置巡视器进入初始工作状态，包括移动与机构电机加电、机构零位标定、桅杆运动、GNC敏感器加电工作、热控流体回路调整、中继定向下传重要数据等动作。

## 4 “玉兔二号”工程在轨验证

目前“玉兔二号”已经顺利完成了历次休眠唤醒控制，说明了各项关键控制的正确性和实施工作模式的有效性。

### 4.1 天际线计算结果与分析

“玉兔二号”使用桅杆上的导航相机对天际线进行了成像，成像覆盖范围为当地正北方向±90°的地形情况，某月昼天际线计算结果如图6所示，多月昼天际线计算结果间差异如图7所示。

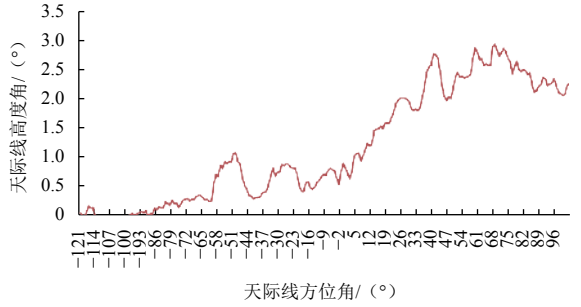



图 6 天际线计算结果

Fig. 6 The skyline recognition results

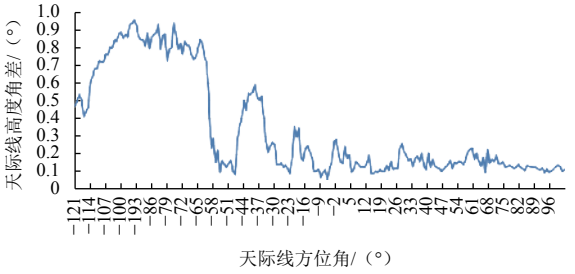



图 7　各月昼天际线计算结果差异

Fig. 7　The differences among skylines of several months

1）“玉兔二号”周围天际线最大高度角为2.9°，当地正东侧高度角平均为2.3°，正西侧高度角平均为0.5°。着陆点位于冯卡门撞击坑东南侧，距离东部坑体边缘较近（参见图8），与计算结果一致。

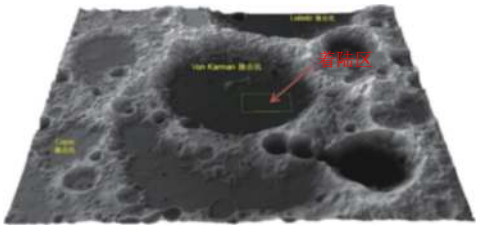



图 8　“玉兔二号”着陆区示意图

Fig. 8　The landing area of Yutu-2

2）各月昼天际线相同方位角下高度角相差最大为0.95°，影响唤醒的东侧相差最大则不超过0.14°，整体看来西侧最大差值高于东侧。“玉兔二号”移动的距离远远小于其到冯•卡门撞击坑体边缘的距离，因此，各月昼的天际线计算结果基本一致。

3）由于中继星高度角远大于2.9°，“玉兔二号”在休眠唤醒时一般不会产生测控遮挡。

### 4.2　可休眠姿态预测及控制策略计算结果与分析

根据天际线计算结果分析周围地形对“玉兔二号”的遮挡影响较小，按照休眠航向与“玉兔号”朝当地南向状态尽量保持一致原则设置可休眠指标中的相关计算参数，各月昼实际休眠车体航向角均为161°～169°（见图9），其与“玉兔号”的休眠要求航向差异基本一致（不大于10°且航向更偏东）。+*Y*侧太阳翼展开角度约为141°，较“玉兔号”135°展开稍大，在保证能源平衡的基础上，更有利于测控（不会产生遮挡）。

西侧天际线不超过0.5°，基本不产生任何遮挡，161°～169°之间的航向条件下在太阳高度角为9°时休眠可满足各项约束要求，休眠方式也均为地面控制休眠。

由于计算唤醒时刻存在天际线、太阳星历、航向控制、太阳入射角与输出功率对应模型误差等误差源，“玉兔二号”实际唤醒时刻与理论计算时刻有一定偏差。连续多个月昼的计算偏差结果如图10所示。

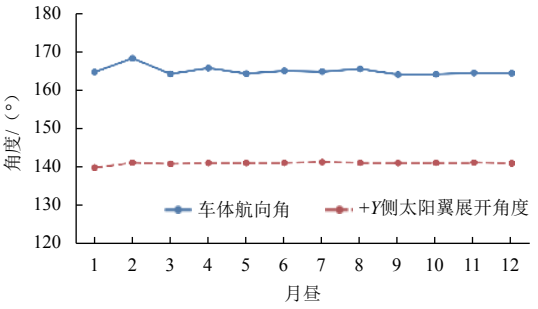



图 9　多月昼车体航向角和+*Y*侧太阳翼展开角度

Fig. 9　Azimuths of rover and + *Y* solar wing deployment angles of several months

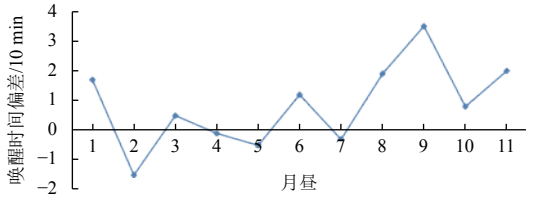



图 10　各月昼理论唤醒时刻与实际唤醒时刻偏差计算

Fig. 10　Differences between theoretical reboot time and actual reboot time of several months

各月昼实际唤醒时刻与理论计算时刻偏差平均为12.7 min，最大约为35 min，小于小时级的允许偏差。“玉兔二号”在轨实施时实际唤醒时刻与采用标称姿态方法计算的理论时刻偏差约为1 h，远大于“玉兔二号”的计算偏差，说明可休眠姿态预测方法计算精度远高于标称姿态法，主要是可休眠姿态预测方法将车体航向要求放开，并基于各类约束条件进行车体航向寻优，更能适应复杂的月球背面复杂环境。

### 4.3　休眠区可视化综合分析示例

以某月昼可休眠区分析为例说明休眠区可视化综合分析情况，如图11所示。

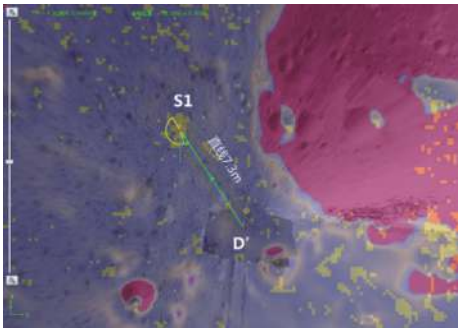



图 11　休眠区分析示例

Fig. 11　The example of sleep area analysis

图11中红色区域表示障碍区，黄色区域表示可休眠区，“玉兔二号”在D'点。“玉兔二号”东北区域为撞击坑不适宜休眠，东南区域虽然存在休眠区域，但地

形复杂、休眠风险较大。西北区域存在较多可休眠区域，且地形平坦、可通过性较好。可休眠区域选择必须同时考虑可休眠性和可达性，选择西北方向作为寻找休眠点方向。

为确保寻找到休眠点工作效率，应按照最少移动原则选择备选休眠点。图11结果显示S1点处可休眠点较为集中，且距离巡视器较近，既方便尽快移动到S1点、也方便若S1点处不适宜休眠而快速到达其它备选休眠点，将S1点作为首先备份休眠点。图11中D'与S1之间的连线表示规划的移动路径，说明可实施一步移动从D'到达S1。休眠区可视化综合分析模型将休眠区分析与路径规划工作相综合，实现了移动目标点选择与移动策略的一体化设计，提升了在轨工作实施效率。

## 5 结 论

本文面向解决“玉兔二号”巡视器复杂月背环境下的休眠唤醒控制问题，分析了其与“玉兔号”技术状态的区别，明确了“玉兔二号”的休眠唤醒多类约束条件，在此基础上提炼出天际线计算、多约束休眠唤醒策略计算、休眠区可视化综合分析等关键技术，最后设计了休眠唤醒工作模式，有效地解决了“玉兔二号”多约束条件下的休眠唤醒控制难题。“玉兔二号”在轨实施情况说明了休眠控制技术的正确性和工作模式的有效性，为稳妥实施“玉兔二号”长期在轨运行提供了有力支撑。

## 参 考 文 献


[1] 吴伟仁，王琼，唐玉华，等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. 深空探测学报(中英文)，2017，4(2)：111-117.
WU W R，WANG Q，TANG Y H，et al. Design of Chang’e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration，2017，4(2)：111-117.

[2] LI C，LIU D，LIU B，et al. Chang’E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials[J]. Nature，2019，569(7756)：378-382.

[3] 褚桂柏，张熇. 月面探测器技术[M]. 北京：中国科学技术出版社，2007.

[4] 周建亮，吴凤雷，高薇. 月面遥操作技术[M]. 北京：国防工业出版社，2017.

[5] CARR G A，JONES L，MORENO V. Mars Science Laboratory(MSL) power system architecture[C]//10th International Energy Conversion Engineering Conference. Washington DC：AIAA，2012.

[6] JENSEN H，LAURSEN J. Power conditioning unit for Rosetta/Mars express[C]//Proceedings of the 6th European Space Power Conference. Paris：ESA，2002.

[7] LOCHE D. Mars express and Venus express power subsystem in-flight behavior[C]//Proceedings of the 8th European Space Power Conference. Paris：ESA，2008.

[8] 彭松，温博，金晟毅，等. 玉兔二号月球车休眠唤醒设计及在轨实现[C]//月球和深空探测国际学术研讨会论文集. 北京：中国空间技术研究院，2019.
PENG S，WEN B，JIN S Y. Sleep-reboot design and on-orbit performance of Yutu-2 lunar rover[C]//International Symposium on Lunar and Deep Space. Beijing：China Academy of Space and Technology，2019 .

[9] 叶培建，孙泽洲，张熇，等. 嫦娥四号探测器系统任务设计[J]. 中国科学：技术科学，2019，49：124-137.
YE P J，SUN Z Z，ZHANG H，et al. Mission design of Chang’e-4 probe system[J]. Scientia Sinica Techologica，2019，49：124-137.

[10] 张立华，熊亮，孙骥，等. 嫦娥四号任务中继“鹊桥”技术特点[J]. 中国科学：技术科学，2019，49：20-28.
ZHANG L H，XIONG L，SUN J，et al. Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Chang’e-4 lunar farside exploration mission[J]. Scientia Sinica Techologica，2019，49：20-28.

[11] 杨眉，刘德成，李飞，等. 嫦娥四号着陆器月面工作遮挡应对策略研究[C]//月球和深空探测国际学术研讨会论文集. 北京：中国空间技术研究院，2019.
YANG M，LIU D C，LI F，et al. Research on the Countermeasures of lunar working occlusion of Chang'e-4 Lander[C]//International Symposium on Lunar and Deep Space. Beijing：China Academy of Space and Technology，2019.

[12] MCGEE T G ，SENGUPTA R ，HEDRICK K . Obstacle detection for small autonomous aircraft using sky segmentation[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando：IEEE，2005.

[13] MIHAIL R P，WORKMAN S，BESSINGER Z，et al. Sky segmentation in the wild：an empirical study[C]//2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). Lake Placid：IEEE，2016.

[14] 李立春，于天一，程肖，等. 天体表面探测中基于天际线成像的地形遮挡计算[C]//第6届全国航天飞行动力学技术研讨会. 昆明：中国宇航学会，2018.
LI L C，YU T Y，CHENG X，et al. Terrain occlusion calculation based on Skyline imaging in body surface detection[C]//The 6th National Symposium on Space Flight Dynamics. Kunming：Chinese Society of Astronautics，2018 .

[15] 周建亮，谢圆，张强，等. 月面巡视器遥操作中的任务规划技术研究[J]. 中国科学：信息科学，2017，44：441-451.
ZHOU J L，XIE Y，ZHANG Q，et al. Research on mission planning in teleoperation of lunar rovers[J]. Scientia Sinica(Informationis)，2017，44：441-451.

[16] 谢圆，周建亮，王永. 面向月球车任务规划的环境建模技术[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2010，40：292-296.
XIE Y，ZHOU J L，WANG Y，et al. Environment modeling for mission planning of lunar rovers[J]. Journal of Southeast University，2010，40：292-296.



作者简介：

**张宽**(1984– )，男，高级工程师，主要研究方向：航天测控总体。

通讯地址：北京 5130 信箱 104 号(100094)

电话：(010)66363122

E-mail：280910234@qq.com

**谢剑锋**(1972– )，男，研究员，主要研究方向：航天测控总体、轨道控

制。**本文通讯作者。**
通讯地址：北京 5130 信箱 104 号（100094）　　电话：（010）66363008
E-mail：jianfengxie@126.com

# A Control Method of Sleep-Reboot in the Complex Lunar Far-Side Environment of Yutu-2

ZHANG Kuan，LU Hao，LI Lichun，YU Tianyi，ZHANG Hui，XIE Jianfeng
（Beijing Aerospace Control Center， Beijing 100094， China）

**Abstract**：A control method of sleep-reboot in complex lunar far-side environment is proposed in this paper for solving Yutu-2 lunar rover sleep-reboot control problem under contraints conditions of complex terrain and relay communication. A skyline sensing method based on the sequence imaging of the monocular camera is proposed to realize the occlusion analysis，a lunar attitude prediction method is proposed to realize the calculation of sleepable attitude and control strategy for a given location，a sleepability analysis index and a visualization comprehensive analysis method are proposed to assist in finding alternative sleep locations. Finally，the implementation mode of sleep-reboot on-orbit is designed and presented. The Yutu-2 on-orbit implementation performance proves the validity of the control method and the effectiveness of the process.

**Keywords**：Yutu-2 lunar rover；sleep-reboot；complex far-side lunar environment；multi-constraint control；skyline recognition

**Highlights：**

- A lunar environment perception method not based on 3D terrain reconstruction technology is proposed to realize the occlusion analysis.
- A multi-constraint sleep-reboot strategy calculation method with variable azimuth is proposed to adapt to the complex lunar far-side environment.
- A sleepability quantitative analysis index is proposed to assist in finding alternative sleep locations.
- A sleep-reboot control mode of Yutu-2 in the complex lunar far-side environment is established.

[责任编辑：宋宏，英文审校：刘勇]