# 走近"玉兔号"

刑琰 北京控制工程研究所研发中心

"金乌西坠,玉兔东升",月宫里那只可爱的玉兔寄托着我们对遥远月球的美好向往。2013年12月,这个美丽的中国梦想终于成为现实!由我国航天五院牵头研制的第一台月球车——嫦娥三号巡视器"玉兔号",随着陆器远赴38万公里外的月球,开始了为期三个月的月面巡视探测。下面让我们一起走近玉兔,看看这只集中了航天人智慧和汗水的"玉兔",究竟是什么样的。

## 1、"玉兔号"的任务要求

嫦娥三号巡视器"玉兔号"是我国首次执行 地外天体表面巡视探测的航天器,其工作环境和 任务要求相对地球轨道航天器有很大不同。

(1)嫦娥三号探测器着陆区选择在虹湾地区,附近属于月海地形。月面岩石在崎岖月海区域分布较多(参见图1),根据统计数据,10m×10m内月面岩石的分布,高度大于200mm的石块数目约为4.4个。而且月面覆盖着厚度不等的月壤层,给地形的识别带来很大困难。因此巡视器要实现在月面的远距离行驶,安全到达指定位置,并保障自身的安全和稳定工作移动探测,一方面需要巡视器具有良好的自主导航控制能力,包括自主识别障碍、避障规划和多轮协调运

动控制等;另一方面需要移动机构具有良好的通 过性、机动性以及地形适应性。

- (2)月表的月尘也是对巡视器设计的一大挑战。着陆激起的扬尘若沉积在巡视器表面,会导致设备功能性能的下降。如月尘吸附在相机表面,会影响成像效果;吸附在光学敏感器表面,会导致测量性能下降甚至丧失;月尘的积累导致巡视器表面热控材料的性能下降,影响巡视器的温度分布;月尘的积累导致太阳电池阵光电转换效率的降低;月尘侵蚀至巡视器的活动部件,导致机构的磨损或卡滞。因此巡视器在设计时必须考虑对月尘的防护措施。
- (3)月球的重力、温度、光照、辐射等环境与一般地球轨道航天器不同。月球表面光照条件变化大,昼夜温差变化大,月面温度变化范围从-180°C至+120°C。月昼需要进行高温散热,而长达14天的月夜则需要有效保温,以保证巡视器上的各种工作设备能够正常存储。为了极限温度下的安全考虑,月夜期间巡视器需要合拢活动机构,关闭电子设备,进入休眠状态,第二个月昼再进行自主唤醒。此外巡视器在奔月到月面工作各阶段期间遭遇的空间带电粒子辐射环境也与地球环境不同,需要进行特别的抗辐射设计。

(4)巡视器在复杂月面环境中要自主生存并 完成巡视探测,特别是适应长达14天的月夜低温 环境,需要具备复杂的功能和组成。但整个任务 对巡视器总质量及包络空间具有严格的约束,因 此在满足功能、性能和可靠性要求的前提下,巡 视器必须采用轻小型化、一体化和集成化设计减 轻整器质量。

# 2、"玉兔号"的组成

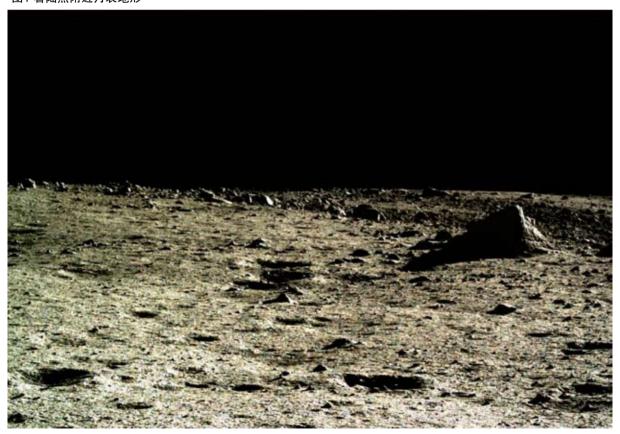
"玉兔号"虽然个头不大,但功能齐备(图2 所示为"玉兔号"的试验现场照片)。"玉兔" 号身上共有八个分系统,分别是移动分系统、结 构与机构分系统、制导导航与控制分系统(简称 GNC分系统)、综合电子分系统、电源分系统、

热控分系统、测控数传分系统和有效载荷分系 统。

移动分系统采用轮式、摇臂悬架方案, 由车 轮、摇臂和差动装置等组成, 具备在月面前进、 后退、转向(原地转向和行进间转向)、爬坡和 越障能力。6个车轮采用独立驱动方式并利用四个 角轮实现转向, 悬架分布在结构本体两侧, 通过 差动装置与结构本体相连,以使所有的车轮均与 地面保持接触。

结构与机构分系统由结构和机构两部分组 成。结构采用箱板式主承力方案,具备足够的精 度、强度和刚度,能承受任务过程中遇到的各 种载荷。机构包括太阳翼机械部分、桅杆和机 械臂。结构与机构分系统决定了"玉兔号"的





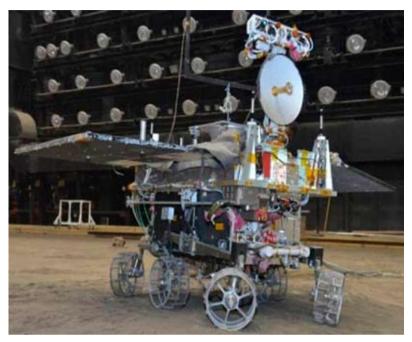


图2 "玉兔号"在试验场

身形, 当左右双翼和桅杆均收拢时, 玉兔号只有 1.5m(长)×1m(宽)×1.1m(高),如果左右 双太阳翼展开,宽度可以达到2.4m以上;桅杆展 开后,高度可以达到1.6m以上。

GNC分系统和综合电子系统是"玉兔号" 最聪明的部分,相当于人的五官和大脑。其中制 导、导航控制系统配备了导航相机、避障相机、 惯性敏感器、太阳敏感器和激光点阵器共五类八 台敏感设备,并根据这些敏感器信息自主实现位 置、速度、姿态及航向确定,对所处的环境进行 感知与建模, 进行障碍识别、局部路径规划、车 轮驱动及转向的协调控制等, 使"玉兔号"能在 月面上安全行驶到指定的目标上。综合电子分系 统集成了所有电子电路部分的功能, 通过电缆连 接到各个敏感和执行部件。这个大脑要根据制导 导航与控制系统的要求,实现信息采集、处理以 及复杂的制导导航控制运算,并将控制指令发送 给全身各个部分。此外实现遥 测、遥控、程控、数据管理、移 动与机构的驱动控制、火工品控 制与各分系统供配电管理, 提供 器上时间基准以及时间校正等功

电源分系统在月昼期间为 "玉兔号"提供系统工作所需的 电能, 热控分系统为全身进行温 度调节, 在寒冷的月夜中保温, 在酷热的月昼降温。这两个分系 统对"玉兔号"进行生存保障。

测控数传分系统在地球和月 球之间建立通讯链路。"玉兔 号"在着陆月面后工作,与地面

建立测控数传链路,并提供与着陆器之间的通信 链路, 以实现遥测参数和探测数据下传。

有效载荷是科学家们在"玉兔号"身上配备 的探测仪器,包括全景相机、测月雷达、粒子激 发X 射线谱仪、红外成像光谱仪,以实现月表形 貌与地质构造调查、月表物质成分和资源勘察、 月表浅层内部结构探测等。

# 3、"玉兔号"的智慧

"玉兔号"来到月面后,为了实现巡视探 测,最重要的是解决三个问题:①我在哪儿?② 我要去哪儿? ③我怎样去到那儿? GNC分系统使玉 兔具备了自主解决这些问题的智慧。

#### 3.1 我在哪儿

确定"玉兔号"当前的位置、航向和倾斜姿 态是回答"我在哪里?"的问题,这是"玉兔号" 能够实现巡视探测的根本。月面具有低重力、弱 磁场、真空和辐射等环境, 在地面移动车辆上应 用成熟的磁罗盘、GPS和倾斜仪等导航手段都不 可用,再加上巡视器有严苛的重量和功耗约束, 采用何种导航手段成为GNC分系统设计的首要问 题。"玉兔号"的GNC设计师经过充分的调研 论证,给"玉兔号"配备了太阳敏感器、光纤陀 螺和加速度计等测量设备,太阳敏感器可以观测 太阳,从而确定"玉兔号"当前的航向;加速度 计可以观测当地月表引力方向,从而确定"玉兔 号"的姿态;而光纤陀螺能够敏感"玉兔号"的 角速度信息,使"玉兔号"能在移动过程中时刻 了解自己的姿态和航向,一旦发生倾斜过大或偏 离预定航向的情况,则停止移动保持安全姿态。

### 3.2 我要去哪儿?

知道"我在哪儿"之后,下一个问题就是确 定"我要去哪儿"了。GNC分系统给玉兔号配备 了两组明亮的"眼睛",一组叫"导航相机", 另一组叫"避障相机",分别左右成对安装。导 航相机和避障相机是按照功能来命名的。其中左 右导航相机安装在桅杆上,桅杆立起后视线离地 高度大约1.6m, 且可以随着桅杆进行上下俯仰和 左右180度旋转移动,能够对巡视器四周进行全景 成像。由于站得高看得远,因此这对"眼睛"的 功能主要是为"玉兔号"提供大范围地形信息, 以便在进行探测前先进行长距离导航,因此定名 为"导航相机"。而"避障相机"安装在"玉兔 号"前胸的位置, 离地高度只有0.6m左右, 虽 然视线比较低,但避障相机采用了鱼眼镜头,上 下和左右视场范围都可以达到120度,这对"眼 睛"看得近但看得宽,因此在玉兔号进行移动探 测时,依靠这对眼睛实时识别障碍、进行路径规 划以安全避开障碍,因此这对"眼睛"被称之为 "避障相机"。

月面上布满岩石和陨石坑, 而且由于太阳照 射高度比较低,因此月面上有很多阴影,如果要 在阴影区进行探测,单纯依靠相机就无法清晰成

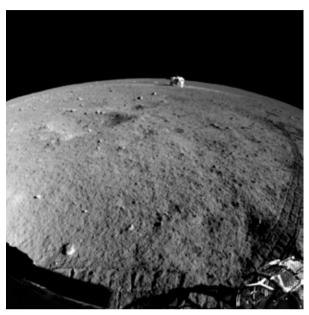
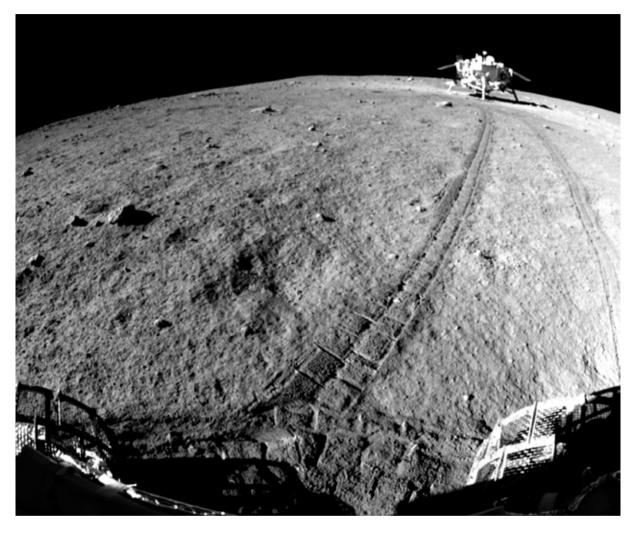




图3 避障相机图像

(上:激光点阵器未开启,下:激光点阵器开启)



像了。因此, GNC分系统又给"玉兔号"设计了 一款特别的装备:激光点阵器。激光点阵器是在 我国"玉兔号"上首次采用的敏感器,它能投射 出16条激光光束,从而在月面上投射出16个激光 点,这16个激光点的强度相当于5倍的太阳光,在 月面上清晰可见。避障相机对这16个激光点可以 清晰成像,经过图像处理,可以准确获得这16个 点的三维坐标, 并据此判断出前方是否有凸起或 凹陷的障碍。16个点的布局是根据月面地形特殊 设计的,可以保证不会漏过"玉兔号"无法通过 的障碍。与激光扫描仪、激光三维仪相比,激光

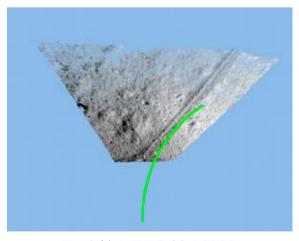


图4 避障相机原图及路径规划结果

点阵器结合被动视觉的探测方式简便可行,能源消耗低,正适合小巧精致的"玉兔"。拥有了两对"眼睛"和激光点阵器,玉兔号不但在阳光下看得清晰,在阴影里也能准确地辨别障碍,因此能够准确地找准探测目标,解决"要去哪儿"的问题。图3所示为激光点阵器关闭和开启时的避障相机图像。

## 3.3 怎样到达目标?

目标确定了,怎样才能到达目标呢?我们有 了清晰的眼睛,可以看清地形,那如何才能找到 安全的路径? 地面机器人的路径规划方法大多针 对结构化的已知环境, 野外机器人配备了多重安 全防护能力,还有导航地图的帮助。巡视器只能 自食其力, 自主寻找脚下安全之路。设计师们结 合巡视器的视觉特点和运动能力,提出了自己的 路径规划方法,在茫茫月面上找到了通往目标的 安全道路(图4所示为避障相机原图及相应的路 径规划结果)。有了路,还要能够准确沿路行驶 的控制能力。巡视器采用了六轮摇臂式的移动 装置, 六个轮子可以独立驱动, 其中四个角轮 还具有转向能力。巡视器运动控制要控制各轮协 调运动, 使巡视器能沿规划之路安全行驶到目标 位置。巡视器控制律设计是多目标多约束控制问 题, 既要考虑月面松软月壤下的轮土接触力学关 系、减少滑移和侧滑等现象发生,还要考虑巡视 器自身运动能力约束。设计师们从十多种运动控 制律中经过充分仿真验算,优选了六轮驱动和四 轮转向协调控制的控制方法,实现了对规划路径 的准确跟踪控制。

GNC分系统带给"玉兔号"的聪明智慧还不止于月面探测,其实"玉兔号"还有一个本领,那就是不依靠地面指路,自己边看路边判断,从着陆器上行驶下来。也就是说,如果着陆月面上后,地面无法和玉兔号通讯,"玉兔号"也可以

自主移动到月面上。

## 4、"玉兔号"的成绩及展望

"玉兔号"已经在月面经历了三个严酷的月昼月夜的考验,嫦娥三号探测器成功落月后,巡视器自主安全驶离着陆器来到月面,导航相机和避障相机对月面进行清晰成像,仅第一个月昼就传回了300余幅有价值的图像,使人们对月面的地形地貌有了更深的认识。在第二个月昼期间,"玉兔号"的电机控制功能出现异常,使其无法实施巡视探测,只能维持原地探测,但其他功能均正常,完成了嫦娥三号巡视探测的预定任务,也为后续火星等地外天体表面巡视探测奠定了技术基础。