



记者走访上海航天技术研究院，听设计师讲述——

“玉兔”登月背后的上海故事

“玉兔号”释放分离示意图

新民图表 董春洁 制图
(资料来源 CFP)

巡视器转移机构

昨天，“月宫”迎来首位中国访客——经历地面发射、地月转移、环月和动力下降和与着陆器分离的过程，“玉兔号”月球车踏上月面，成功在月球着陆，它将完成月球探测、考察、分析样品等复杂任务。

这一小步，凝聚着中国航天人的心血与智慧。记者第一时间采访位于闵行航天城的上海航天技术研究院的月球车设计师，请他们讲述这一小步背后动人的上海故事。

月球车打开太阳翼，进入到工作状态。

1

放“吊桥”，留下首道车辙

月球车又叫月面巡视器，在地月旅程中，始终“绑定”在着陆器上，登月后如何“松绑”？

设计师设计了两根转移机构悬梯导轨，类似古时吊桥。着陆器降落后，放出悬梯，巡视器精确地将车轮行驶到两根导轨上，并保持稳定，即可安全到达月面。

放“吊桥”看似简单，做起来难。假如着陆在崎岖高地，或月尘松软不均处，月球车发生倾斜，“吊桥”变“跷脚”，怎么办？就算落在平面，放桥时万一车轮滑落，后果不堪设想。

为了提高稳定性，设计师提出筛网轮的设计构想，轮子采用网状材质，加入多个锯齿形结构，叫棘爪，就像龟爪上的指甲，与导轨棘齿咬合，助“玉兔”稳抓月面，跨过沟坎。

一个车轮比婴儿车的车轮还轻。筛网轮在地面没用过，遭国内轮载专家质疑。移动分系统主任设计师肖杰说：“我们反复测试挂钩牵引力、适应性、承载力等，用几万个试验数据证明我们选择正确。”

在月面留下第一道车辙，难度颇高。最怕遇到路障，如果月球车一侧被抬高，就可能倾斜甚至翻车。

“我们不断优化构型方案，就算单侧障碍高0.2米，月球车也能在差动机构和摇臂作用下被动适应月面地形，保证所有车轮接触月面。即使行进间某轮过度沉陷，其他独立驱动的车轮也能帮它摆脱陷阱，继续工作。”

2

过月夜，太阳翼当“被子”

打开太阳电池翼，是月球车登月后的重要步骤。这种新型电池翼，不仅提供动力，还能为航天器“腹腔”内的机电设备保温。

以往的航天器太阳翼两翼展开后就不动了，而月球车一翼展开后不动，另一翼却很忙。

月球车的生存环境恶劣，抛开超高真空、引力场、月尘等环境因素，仅是高达330℃的高低温差就是严峻考验。月昼时，月球车在月面从事科学探测，要求太阳电池翼展开，对日定向提供动力；月夜来临，月球车停工入睡，“腹腔”内的机电设备完全暴露在极寒温度下。太阳电池翼此时收拢一翼，犹如在“腹腔”上盖了一条被子，起保温作用。

太阳翼设计师与月球车总体配合做了几十次试验，京沪两地跑，确保太阳翼按设计方案运动至准确位置，为月球车保驾护航。

按科研人员的精心设计，“玉兔号”与人类作息相似，日出而作、日落而息，白天还要午休，只不过它工作一个白天，相当于地球上的14天，然后又会睡上14天。

入夜，“玉兔号”收起桅杆，扣上的太阳翼当“棉被”，起隔绝散热作用。当太阳再次升起，太阳高度角到5°时，它会被唤醒，重新投入新一天的工作。太阳翼还能调整角度对准太阳，提高能量转换效率。月昼时，一翼可竖起展开到90°为月球车遮阳，月夜时则收拢。

3

伸手臂，为月球“拍X光”

月球车上有一根长仅0.5米的机械臂，我们看到的每一份月球科学探测数据，就是由它搭载的X射线谱仪发回地球。这个“小个子”已成了名副其实的“中国外星球探测第一臂”，承载X射线谱仪运动到一定角度时就位探测。当月夜降临时，机械臂需运动至一定状态，使X射线谱仪的散热面靠近月球车生存装置的发热面。

月球车要从地球“飞越”38万公里到达月球，自然是越轻负担越小，所以机械臂首先要解决的就是“重量”和“体积”的难题。

传统工业机械臂都采用模块化设计，电、机产品分体组装，往往带来体积大、分量

重的弊端，增加“奔月”难度。经过充分调研和分析，设计师们决定采用机电一体化的设计来解决这个难题，却为此吃尽苦头。

模块化设计的电、机产品都是专业生产商提供的最终产品，而一体化设计收到的是一堆零配件。在组装、调试的过程中，出现了一个又一个问题。设计师们并不是机电方面的专家，就硬逼着自己钻研相关技术。白天在生产车间仔细摸索，晚上总边总结一边“啃”专业书籍，既做设计师，也当装配工。奋战几个月后，符合轻量化要求的机械臂产品终于诞生，结构机构设计师们也“磨”成了半个机电专家。

本报记者 叶薇

上海航天设计师详细解释——

月球车 3 大技术难关

“造月宫”

为了使月表综合形貌试验室最大程度地“复原”月壤环境，设计师们翻阅大量资料，比对多种火山岩，分析矿物组成、化学成分、相似的颗粒粒度、机械强度、密度和力学性能等物理特性，综合价格、运输条件等外部因素，最终选取长白山的火山岩制备模拟月壤。

模拟月壤干燥松散，容易迎风飞舞，所以试验室没装空调。但移动分系统的试验从未因酷暑或寒冬而耽搁。仅移动分系统能力件模拟月壤场地板能力试验，行驶里程就超20公里，总爬坡744次，总越障792次，设计师们一次又一次刷新了月球车的安全系数。

移动分系统主任设计师肖杰说：“试验室没空调，我们还要经常翻动模拟月壤保持其松散度，每次做完试验都是满身沙土。一般的防尘口罩难以完全挡住细微月尘，大家每次

做完试验后口鼻都会沾上月尘。”正是这样一群埋头苦干、甘于奉献的航天设计师，正是有了前期大量、扎实、充分的地面试验，才有了月球车造访“月宫”的精彩表现。

“瘦身”

月球车研制的每个环节都要严控重量。如何为月球车“瘦身”，挑战着各系统的设计师。

传统航天器靠运动控制类单机来实现运动控制，1台5公斤重的单机最多控制4个活动部件，月球车却只有1.6公斤，要控制17个活动部件。综合电子分系统专家魏然博士说：“传统单机明显做不到，必须研发新技术。”最终，他们采用3块B5纸大小，100页普通纸张厚度的集成电路板完成了这一设计。

月球车的“车厢”（结构子系统的舱体）内装有多种仪器设备，分上下两层，下舱体装有电源、机构控制与驱动机构组件等设备，上舱

体装有太阳翼、桅杆、太阳敏感器等设备。月球车主结构重量仅占整车的14%左右，其过载是一般航天器主结构的5至9倍。

约0.75立方米的小身板承载着自身重量6倍的大载荷，飞越38万公里造访月球，可谓“任重道远”。

“车厢”选什么材料能同时满足重量轻、刚度大、适应性强3个条件？结构设计师们成了复合材料公司的常客，有时一周要去浦江镇三四次。从闵行航天城出发，单程要花2个多小时才能到达，设计师们毫无怨言。经过三个月的反复论证和试验，最终选择了蜂窝夹层结构复合材料，作为月球车的舱体结构材料。

防尘

月球表面粒径小于1毫米的颗粒，被称为月尘。别看个儿小，破坏力却很强——吸附在太阳电池阵上会降低输出功率；吸附在巡视

器表面会减弱热控材料的散热性能；侵蚀到活动部件，会造成异常磨损，降低使用寿命。

从轻盈的塑料和橡胶入手，设计师翻阅大量月尘性能的相关资料，再联合材料研究院所，共同研制适应月球车活动关节的防尘密封圈。

确定密封圈原材料及配方颇有难度。每次新配比的材料要经过多种空间环境试验，还需经过硬度、磨损系数等多项测试，才终于找到了合适材料。

密封圈松紧度的精度要求很高，0.01毫米的误差也要不得。月尘颗粒直径不到1毫米，甚至只有几微米。如果密封圈稍松，月尘便会侵入，导致活动关节磨损或卡死。做得紧一点呢？也不行。密封圈过紧，不仅影响活动关节的摩擦阻力矩，还会降低耐磨性，一旦密封圈磨损，将直接影响月球车的使用寿命。

巡视器移动分系统、结构机构分系统有多种不同尺寸的活动关节需防尘密封，转速、力矩、安装尺寸和部位不同，设计师有针对性地细化了技术要求，再分别试验考察密封圈的高低温适应性、摩擦阻力矩、耐磨性、使用寿命等性能，不断优化改进。历经2年60多次试验，最终交出满意答卷。

本报记者 叶薇