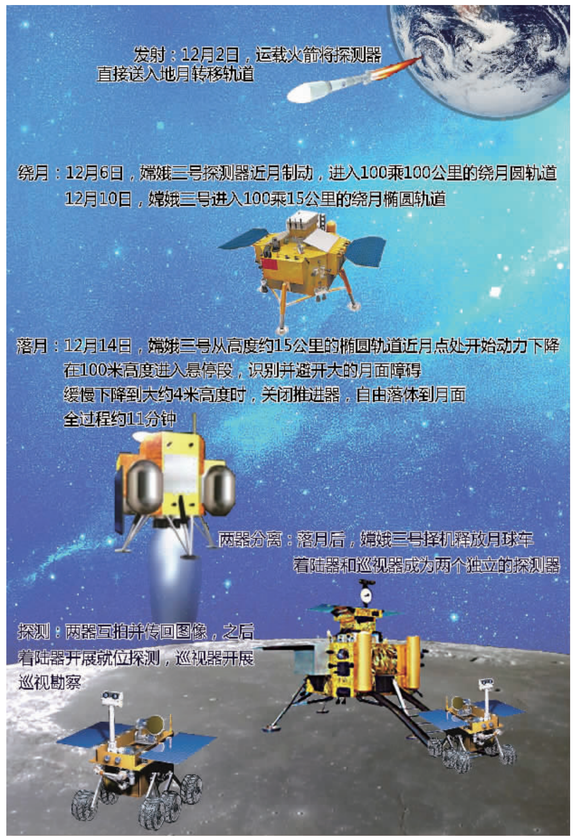


嫦娥三姑娘：落月之舞惊艳四方

本报记者 余惠敏

14日晚间9时许，地球上中国国土的夜晚，正是月球上虹湾地区的白昼。

15公里，不到半个马拉松长度的路程，就是嫦娥三号探测器飞越地月之间38万公里征程的最后一段，也是最为关键的一程。

虹湾地区是嫦娥三姑娘为自己选定的落月舞台。在椭圆轨道的近月点上，距离虹湾地区月面约15公里的上空，嫦娥三号正翩然而至。此前的绕月飞行中，她已经对预定着陆点进行过勘察测量，以确认着陆点没有月坑或大的石头。

随后便是惊心动魄的660秒——在短短11分钟里，嫦娥三姑娘要以一往无前的姿态，采用动力下降，踏过垂直高度15公里、飞行距离数百公里的最后一段月面软着陆旅程。

为了这惊艳一舞，她已经作出很多努力。

为了完成好这支只能在月球上跳一次的舞蹈，三姑娘提前很久就在地球上“彩排”过。嫦娥三号的研究人员在地球上构建了模拟月面环境的仿真验证系统，低温、高温、月尘、六分之一重力……这些复杂的月面环境，都被人们一一“高仿”，验证过三姑娘在其中的行动力。嫦娥三号探测器系统总设计师孙泽洲说，仅仅为了做悬停避障机缓冲实验，他们就搭建了一个高达一百多米的塔架。

为了舞姿轻盈而又矫健，三姑娘在奔月之前还进行了“瘦身”和“健身”。整个探测器系统都进行了小型化和集成化的设计，同时应用一些功能互用等设计方法，让一些功能互为备份，保证系统整体的可靠性。

……

很多努力都来不及一一道来，事实上，落月正是验证这些努力的舞台。

嫦娥三姑娘来了，她开始下降了！

“月球上没有大气，无法用降落伞减速，嫦娥三号必须靠自身的推进系统，把速度减小为零。”孙泽洲说，这需要大量推进剂和全新推进系统，需要变推力发动机。

嫦娥三号使用的，正是我国科研人员自主研发的、达到国际领先水平的7500牛变推力发动机，它能提供1500牛到7500牛的可调节推力。

“7500牛变推力发动机将与一组马力较小的姿控发动机配合，帮助嫦娥‘三姑娘’轻盈落月。这是变推力发动机在我国探月工程乃至我国航天事业中的首秀。”火箭发动机专家、中国航天科技集团公司第六研究院院长谭永华说。

720秒的落月之舞并不是垂直于月面的下降，嫦娥三号与月面呈一定角度倾斜下落。

她一边落一边看。高精度测速测距敏感器就是嫦娥三号着陆器的“眼睛”，它能够准确判读出嫦娥三姑娘相对于月球的速度与距离。

她一边看一边想。GNC计算机系统是嫦娥三号的“大脑”，通过储备在其中的大量软件和风险预案，三姑娘能够快速处理、应对各种突发问题的考验，并沉着冷静作出正确的处理。

她一边想一边舞。在7500牛变推力发动机和其他助推发动机的帮助下，嫦娥三姑娘能在月球上空实现快飞、慢飞、悬停、平移等一系列高难度“舞蹈”动作。

“之前的太空之旅，嫦娥三号入轨、变轨，都可以由地面测控系统给予支持。但在着陆段，嫦娥三号就需要完成自主导航与控制了。”孙泽洲说，整个下降过程只有700多秒，靠地面支持显然来不及应对各种突发情况，主要还得靠嫦娥三号自己。在这12分钟内如果发现月面还有障碍，比如坡度比较陡，或有陨石坑、大石头等等，嫦娥三号可以自主躲避。“嫦娥三号将利用微波测距敏感器、激光测距敏感器进行对月测距测速；利用光学成像敏感器在接近段进行粗避障；利用激光三维成像敏感器在悬停段进行精避障，实现安全区软着陆。”

“往哪里落、以多快的速度落”都由着陆器自己说了算，这不是彩排好的舞姿，而是嫦娥三姑娘的即兴发挥之舞。

当然，这场即兴的自由舞步，也早就经过精心的分段。如今，嫦娥三姑娘正在将每一段的工作目标一一完成。

从15公里到100米，嫦娥三号探测器精准完成主减速段、快速调整段、接近段的主要减速任务和粗略避障任务，嫦娥三姑娘的下降速度开始变得稳定和缓慢，相对速度从1.7公里/秒逐渐减为0。

100米高度的悬停段到了，嫦娥三姑娘在空中静止悬停了短暂的时间，最后一次从上空静静凝望月面。她用随身携带的相机对月面进行拍照，打算在方圆约半个足球场大小的月面上为自己挑选一块平坦的地方，作为未来的“新家”。

接下来是避障段，从100米到4米，嫦娥三姑娘缓缓下降，并进行最后的调整和避障。

在4米高度，嫦娥三姑娘关闭了她的推进器，自由落体。这是软着陆的最后一小段。

“软着陆对嫦娥的落地姿态有严格要求，倾斜度不能超过15度角，否则就可能导致任务失败。”嫦娥三号探测器系统总设计师孙泽洲说，这需要有一套着陆缓冲机构系统，以保证探测器的稳定性和落月姿态的正确无误。

例如，着陆器缓冲拉伸杆，就是着陆器的缓冲吸能部件，主要任务是吸收着陆时的冲击功，确保探测器安全着陆。

21时11分，嘭，嫦娥落月了。她的舞姿轻盈至极，而且落得十分端正。月面19.51° W 44.12° N，紧挨着虹湾地区的雨海区西北角，迎来了即将在此常住的嫦娥三姑娘。

成功了！

嫦娥三号就此成为我国第一个成功在月面软着陆的探测器！而中国，也就此成为继美俄之后，第三个成功实施月球软着陆的国家！

嫦娥三号成功着陆后，将择机完成月球车释放。“玉兔”将从着陆器顶部通过转移装置驶离着陆器，这是“两器分离”。它们将会互拍照片，传回地面，这是“两器互拍”。“两器分离”和“两器互拍”完成，就标志着嫦娥三号任务的圆满成功。

安装着地形地貌相机、降落相机、月基光学望远镜和极紫外相机的着陆器，将停留在嫦娥三姑娘的落月地点，原地进行大约一年的科学探测。

而她释放出的“玉兔号”月球车，在抵达月面后，将以大约每小时200米的速度，在月面上进行巡视勘察。只要它不发生技术故障，成掉进深的月坑里，配备了全景相机、测月雷达、红外成像光谱仪和粒子激发X射线谱仪的玉兔，预计能工作的时间会超过三个月，行程可超过10公里。

嫦娥落月一舞，惊艳四方来贺。

而她和玉兔的科学探测工作，就从这舞姿定格之后开始！

推得精 飞得稳 变得妙 落得准

嫦娥：有一颗强健心脏

本报记者 董碧娟

嫦娥奔月，一定要“内心”强大。“嫦娥三号”要登上月球就必须依靠发动机动力——这颗强健心脏。这个决定整个落月探测任务成败的关键产品的研究重任，交给了中国航天科技集团公司六院来完成。尽管六院的动力系统在“嫦娥一号”、“嫦娥二号”的绕月飞行中表现十分优秀，但因“三姑娘”要从“绕月”变成“落月”，就要求推得精、飞得稳、变得妙、落得准，这无疑给动力推进系统科研带来了全新考验。

作为“嫦娥三号”的关键分系统之一，推进分系统由1台7500N变推力轨控发动机、若干台150N大姿控发动机和若干台10N小姿控发动机组成。“三姑娘”落月，不仅要求推进分系统在15公里到100米高度精准完成主减速任务，还要在100米到4米高度开始稳定和缓慢下降，在有效实施悬停避障后，在4米高度实施关机，保证探测器能够安全平稳完成落月任务。

发动机专家、航天六院十一所副所长陈烨介绍说，落月过程是发动机通过推力的不断变化过程。传统发动机无法达到所需的深度节流能力，7500N变推力发动机是专为落月而研制的我国首台可大范围变推力工作能力的液体火箭发动机，可满足完成月球着陆探测器中途修正、近月制动、动力下降、悬停段等软着陆一系列任务。

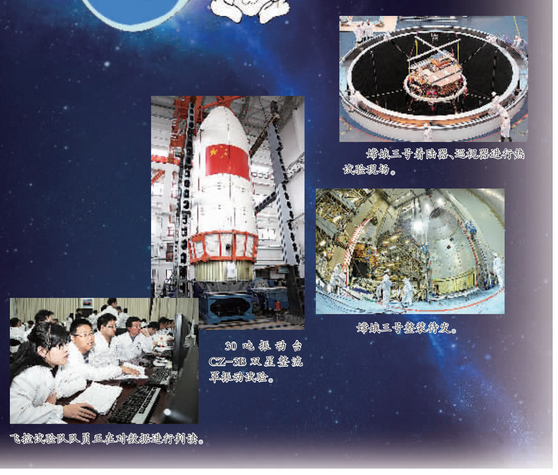
强大“内心”的修炼并不容易。“高性能”和“长寿命”向来在发动机研制中难以两全，可要“三姑娘”落月，必须要实现两者兼顾。怎么办？研制队伍从发动机的核心组件——推力室着手，在国内首次将特殊结构的喷注器应用于发动机推力室，它的独特结构可使发动机在较大推力范围内保持较高性能。同时，采用了创新的冷却方式，既保证了发动机的高性能，又为发动机长程、可靠工作提供了有效保障。

由于试车耗资大且受测量精度限制，所有方案不可能全部依靠试车来完成。研制队伍为此创新开发了一种针对特殊结构喷注器的燃烧仿真计算模型，相当于设计人员电脑上组织发动机热试车，而且能够对发动机的性能机理进行分析，进而为下一步优化改进提供参考。

研制过程中，即便是0.01毫米的孔径大小，都会对发动机结构状态产生较大影响。这就需要设计人员全程介入，及时了解掌握生产试验现场所遇到的问题，认真详细记录数据，并反复调节、校正、测试。因为液流试验常常要干到凌晨甚至通宵，年轻的设计人员笑着说：每次接到“液流”试验，就意味着要“夜留”。

短短5年时间，六院科研人员迎难而上、攻坚克关，解决了变推力调节、高低工况性能优化、燃烧室可靠冷却、大喷管成型与制造等设计、工艺关键技术，填补了国内空白，达到了国际先进水平。

尽管“三姑娘”成功落月，但航天人的创新步伐依然不会停止。火箭发动机专家、航天六院院长谭永华说：“探月工程绕、落、回三步走的任务，我们已经完成了前两项，如何保证中国的月球探测器能够大范围地球，我们正在对动力系统实施研制攻关。不久的将来，我们还要实现载人登月的梦想，对航天人来说，更加任重道远。”



看得清 辨得明 走得正

玉兔：两只眼睛六条腿

本报记者 董碧娟

经历长途跋涉的“玉兔”终于登上了陌生的月球表面。那里环形山星罗棋布，月壤松软、月尘满地。人们不禁好奇，“人生地不熟”的“玉兔”该如何看得清、辨得明、走得正？早在10年前，中国航天科技集团公司五院巡视器制导、导航与控制（GNC）分系统的设计师们，就踏上了我国第一套巡视探测GNC系统的研制征程。

作为我国一类全新的地外航天器，月面巡视探测器的导航控制技术与卫星和飞船完全不同，唯一可以参考的只有国外寥寥几篇模棱两可的技术文档。摆在航天五院科研人员面前的，是一场从无到有的创新攻关。

怎样为“玉兔”安上一双“慧眼”，成为设计师们首先要攻克的难题。经过反复查阅资料和验证，他们最终确定了由两对相机组成的双目立体视觉系统方案，并针对阴影情况，设计了基于激光点阵的主动结构光设备，让巡视器不但在阳光下看得清晰，在阴影里也能准确辨别障碍。

万事开头难。在对硬件产品的性能不甚了解的情况下，在试验室作为预先研究的算法和工程的结合产生了不协调问题，集中表现在算法问题凸显，影响障碍的自主识别，无法实现安全行走。研发团队不畏难题，果断出击，紧急研制了简化算法，实现了简单障碍的自主规避。紧接着，他们集中力量对双目立体视觉自主避障算法进行攻关。通过大量翻阅文献、不停地仿真验证，一遍遍讨论修订，终于在2007年初，算法研究取得了突破性成果，“玉兔”之眼研究迈上了一个新台阶。

新的挑战再次出现。因为相机是成对使用，与之前单个使用的星敏感器标定方法不同，又是近景成像，并且需要新的测试方法。研制人员只能针对新的相机研究了新的标定安装方法，研制了新的设备进行新性能的测试，并最终在2009年完成模样产品，2011年完成初样产品，2013年初提交了满足各项指标的正样产品。自此，“玉兔”的慧眼终于长成！

能够看路，还得需要行路。“玉兔”采用了六轮摇臂式的移动装置，六个轮子可以独立驱动，其中四个角轮还能转向。要控制这几条“腿”协调运动，使“玉兔”沿规划之路安全行驶到目标位置不是个简单事。航天五院相关专家介绍，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，还要考虑巡视器自身运动能力约束。面对这一难题，设计师们设计了10多种运动控制律，经过了上千次的仿真验算，最终确定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，这意味“玉兔”可以灵活地路上月球了！

在“玉兔”巡视器GNC系统研制过程中，航天五院的设计师们还研制成功了我国最大的多自由度分谱段平行光照模拟方阵，我国最大的月面高仿真沙盘……当一台台令人叹服的试验设备陆续出现在巡视器GNC试验室时，每一个受邀前来的参观者都为之惊叹：你们用最少的资金，建立了最有效的巡视器GNC试验室，难能可贵！

当我国第一台月面巡视器在GNC系统的控制下行走在美丽的月球之上时，航天五院的科研人员们早已忘记了十年中无数个在办公室和试验场度过的节假日，忘记了凌晨才走出办公室的疲惫，忘记了久别亲人奔赴工作岗位的不舍和心酸，他们的心里只装着一个梦，那就是：向月球进发！

嫦娥“瘦身”记

嫦娥舒广袖，没有曼妙的身姿可不行。软着陆特点决定了“嫦娥三号”减重难。如何在“瘦身”的同时还保持“健康”，这让“三姑娘”面临一个不小的考验。

嫦娥三号推进系统副指挥李和军介绍说：“基于嫦娥三号重量、构型的特殊要求，为推进系统‘瘦身’无疑成为首要课题。”研制人员将目光锁定在贮箱、气瓶、7500N及150N发动机等的减重设计上。他们成功研制轻质、大容积复合材料缠绕式金属膜片贮箱；利用无焊缝铝合金内衬复合材料缠绕气瓶设计制造技术有效对气瓶减重；连在系统中占比不高的自锁阀也不“放过”，进行小型化改进……一系列突破有效解决了“嫦娥三号”推进系统的减重问题。

为了减轻“三姑娘”的瘦身压力，搭载“嫦娥三号”的长征三号乙运载火箭也分担了减重任务。在此前的发射任务中，长三乙火箭都是使用铁合金气瓶，设计师们经过反复验证发现，新型复合材料不仅在强度上能够满足需求，重量也要轻于钛合金。于是此次长三乙火箭上装载了新型复合材料气瓶，不仅减重10千克左右，还提高了容量。研制人员还通过改进火箭贮箱壁板生产加工工艺，让贮箱壁板更加轻薄，在强度满足指标要求的前提下成功减重约10千克。此外，重新设计火箭燃料箱体里的防晃板也为火箭减重10千克。

不仅“嫦娥三号”在减重，它背后的研制团队也在“瘦身”。以推进系统研制为例，嫦娥三号推进系统行政指挥戴德海说：“以往成熟型号的飞行任务，团队里老、中、青‘混搭’，这次无论是从事管理还是技术岗位的人员，只要参与嫦娥三号推进分系统研制，必须经过培训和考核，持证上岗，挑选精兵强将，缩小队伍规模，全是‘老搭档’，最大限度地消除了‘新手’和‘新单位’参与的风险，使整个研制队伍的‘可靠性’大大提高了。”

嫦娥的“瘦身”过程，也是技术优化、创新升级的过程。这些“瘦身”的新技术新方法，将为我国后续深空探测任务提供宝贵的技术积累。随着我国探月工程进入新阶段，“嫦娥”瘦身之路还将继续。 （文/碧 娟）

探月随想

改变，你也可以

□ 余惠敏

今夜落月，嫦娥三号探测器和她携带的玉兔号月球车，成为全球关注的焦点。外媒在向公众介绍“嫦娥”和“玉兔”时，直接按汉语拼音译为“Chang’e”、“Yutu”。嫦娥和玉兔都是中国神话传说中的形象，外国没有，这样的名字按惯例来说，一般直接音译。不过，与以往不同的是，这一次按惯例的音译，译出了一句有趣的谐音。Change在英语中是一个单词，意为“改变”；Yu-tu的读音，又跟英语短语“you too”一样，意为“你也可以”。这样，当“嫦娥”、“玉兔”联名排列在外媒的新闻稿中时，就被许多外国人念成了：“Change，you too!”也就是：“改变，你也可以！”

这是一个十分有趣的巧合，也是一个颇具深意的暗示。

嫦娥探测器和玉兔月球车，本身就集成了很多具有创新意义的改变。探测器系统总设计师孙泽洲在接受记者采访时曾说，嫦娥三号探测器80%的产品和技术都是新的。从嫦娥三号工程的探测器这个分系统来讲，自主研发比例接近100%。即使具体到元器件，自主研发比例也能达到80%到90%。

事实上，嫦娥和玉兔的创新，不仅是探测器系统的事情。为了实现预定的科学目标，嫦娥三号工程的探测器、运载火箭、发射场、测控、地面应用五大系统，都作出了各自富于创新意义的改变。

实现我国航天器在地外天体首次软着陆，突破多窗口、窄宽度的发射技术和高精度的入轨技术，首次研制我国大型深空站并初步建成覆盖行星际的深空测控中心，研制、建设一系列特种试验设施，集成了一系列先进实验方法……这些是已经经受住考验的创新。

首次实现我国航天器在地外天体巡视探测；首次实现对月面探测器的遥控操作；首次在月面开展多种形式科学探测；首次在我国航天器上采用同位素热源和两相流体回路技术，来实现探测器在月夜这样的极低温度环境下生存……这些是即将或者正在接受考验的创新。

创新，当然伴随着风险。因此，改变也就意味着勇气。

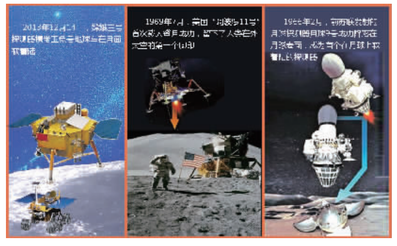
月球是距离地球最近的天体，也是人类开展深空探测的起点。正在进行的“嫦娥三号”探测，是地球上人类对于月球的第130次探测活动。有人因此质疑“嫦娥工程”的创新程度，但事实上，嫦娥工程并不是半个世纪前美苏登月的简单重复，而是集成了大量现代最新科技创新成果的富有勇气的改变。

美国太空政策研究院院长、原美国宇航局官员斯科特·佩斯在评价中国的嫦娥工程时说，其他国家登上过月球并不意味着中国不是先驱者，中国正在培训新一代的工程师和科学家，并且正在通过探月任务给予他们宝贵的太空飞行经验。

在嫦娥携玉兔落月的今晚，当我们仰望夜空、寻找那轮明月时，请不要忘记那些正在为之奋斗的科技工作者们。他们不因为缺乏勇气而拒绝改变，也不因为惧怕风险而停止创新。正是因为他们的勇气和智慧，嫦娥玉兔才得以登月。

从改变中受益的不仅仅是嫦娥玉兔。探月工程应用的各种高精技术，很多都可以作为民用。为着陆缓冲机构研制的新型合金具备很好的柔韧性，可用于汽车防碰撞等民用领域。对月球车的遥控操作技术，可用于智能机器人。月球车采用的视觉图像处理软件，也可能在未来装进我们的电脑……

如果未来有一天，你享受到了嫦娥玉兔带来的这些便利，请不要忘记对自己说一声：改变，你也可以！



玉兔“体检”录

“玉兔”首次登月，可一定要保证它“体格”健壮。中国航天科技集团公司五院总装与环境工程部的科研工作者们通过一系列跨越式创新，让“玉兔”能够进行严格优质的体检。

总环部科研人员们研制出月面重力模拟设备，用于模拟巡视器在月球表面的1/6重力环境，通过抵消巡视器的5/6重力，实现在动态和静态情况下各车轮与地面的接触压力与其在月面上各车轮与地面的接触压力相当，同时所带来的于扰力和力矩不应对试验性能产生影响。

月面重力模拟设备在嫦娥三号地面专项综合试验中发挥了巨大作用。“玉兔”在铺设800多平方米模拟月壤的室内模拟试验场内共完成了10次约200个工况的大型综合专项验证试验。相关专家表示，月面重力模拟技术在嫦娥三号专项试验中的应用，标志着总环部在深空探测领域的专项试验技术上实现了零突破，为探月任务作出贡献。

为了研究和评价月尘环境对“玉兔”的影响，总环部月尘环境项目组在3年内进行了一系列技术攻关。微米级的模拟月尘颗粒在抽真空过程中会产生沙尘暴一样的扬尘现象。为克服这一难题，项目组自主研发的模拟月尘综合环境模拟器采取了特殊工艺，保证抽真空时不会产生一点扬尘现象。

模拟月尘试验中还要求在工件上均匀淋洒月尘，每平方米20克，相当于要把半勺盐均匀地洒在1平方米的地方，这是一件特别难的事。总环部项目组设计的模拟月尘淋洒装置，实现了在1平方米均匀淋洒0.1g的模拟月尘。另外，模拟月尘制备装置能够生产出形状接近真实月尘几何形状的颗粒，并可根据型号试验需要配制出任意比例的模拟月尘。

此外，项目组还为型号试验配备了粒子高速摄像仪、在线粒度分析仪等先进的分析测试仪器，用于监控、测量试验过程中的粒子参数。这一系列创新突破最终为嫦娥三号产品包括雷达天线、望远镜以及相机等5件有效载荷部件完成了月尘环境摸底试验。如此一来，经过严格全面“体检”的玉兔终于可以活力四射地拜访月球了。

（文/碧 娟）

本版编辑 陈建辉 殷立春 制图 余惠敏