

明亮的眼睛 灵巧的双臂 聪明的大脑

“天问一号”这样开始“独立生活”

□ 刘宇 科普时报记者 操秀英 付毅飞

2021年5月15日7时18分，我国首个火星探测器“天问一号”着陆巡视器，成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区。我国首次火星探测任务着陆火星取得圆满成功。

“天问一号”目前距离地球约3.2亿公里，通讯单向时延超过15分钟。与生活在地球系摇篮里的航天器不同，这一去一回的半个小时，使得地面不能给“天问一号”提供实时无微不至的帮助。要想走出摇篮，走入未知的深空，“天问一号”必须学习“独立生活”。

中国航天科技集团八院控制所火星环绕器导航、制导与控制分系统（GNC）研制团队，给“天问一号”装备了明亮的眼睛、灵巧的双臂和聪明的大脑，使“天问一号”具有了自己观察、自我判断和自主执行的能力。

多双眼睛：感知方向和锁定位置的保证

要想去火星，“天问一号”要先知道自己朝向哪里（探测器飞行姿态）和自己处在哪儿（探测器轨道位置）。与我们在黑夜里寻找北极星来确定方向类似，深空中满布各个方向的恒星，可以帮助“天问一号”确定自己的飞行姿态。

“天问一号”上装配有多台星敏感器，它们自身都存储着导航星表，如同一双明亮眼睛一样，星敏感器始终紧盯深空中的恒星，通过对比自身看到的恒星与导航星表中恒星的相对姿态，就知道自己朝向何方了。然而，系外恒星相对于探测器的距离都是无穷远，也就是说，无论“天问一号”飞离了地球多远，这几亿公里的距离对于那些恒星来说完全可以忽略，因此利用恒星来精确计算探测器飞行姿态的时候，却无法得知探测器自己的位置。

“天问一号”飞行过程主要依靠地面测定轨数据，定期更新探测器自身递推计算的轨道，为了提高探测器的自主导航能力，还需要借助另一双慧眼——光学导航敏感器和红外导航敏感器。这两款导航敏感器将火星作为导航的“灯塔”，从图像中计算火星几何中心的位置和火星视半径的大小，结合火星的星历和导航滤波算法，就能计算出“天问一号”相对于火星的位置和速度。

三头六臂：精准计算和可靠决策的秘诀

“天问一号”地火转移飞行过程中，要确保探测器姿态指向的稳定、太阳翼对日定向保证能源、定向天线指向地球保证数据通讯链路，在环绕火星飞行期间还需要增加中继天线指向火星车的任务要求，这些任务的准确、可靠执行都由环绕器GNC分系统完成。



图片由中国航天科技集团五院、八院联合制作。

为此，环绕器GNC一方面需要获取每双眼睛的数据，完成相应的姿态和轨道计算；另一方面则根据姿态和轨道的计算结果，调整探测器飞行指向，实现两翼太阳翼、两维定向天线驱动和两维中继天线驱动等控制。这些任务的执行都要依靠环绕器的大脑——GNC单元。它采用三套独立CPU同步计算、三机相互诊断的方式进行。

“天问一号”飞行姿态测量和控制、轨道修正、制动捕获等功能必须兼顾精度、可靠性和自主性的三重要求。为此，环绕器的这台三机模式同步运行的大脑，首先设计了精确的时间对准机制，保证三

台独立的CPU可以实现复杂运算过程的同步计算和结果输出、彼此数据的同步交互和故障诊断，以及控制模式的同步转换；其次尽可能地缩短对存储区进行检错纠错的时间周期，使得存储区每个地址的数据受到空间粒子影响而发生“翻转”时可以及时、准确地被纠正。一台CPU运行不正常或计算结果不正确时可以被及时隔离，从而确保这个关键大脑的准确可靠运行。

三省吾身：自主运行和完成任务的法宝

我的状态还好吗？了解自己是第一步。

这些年奔向火星的探测器

□ 郑永艾 科普时报记者 操秀英 付毅飞

火星探测是人类开展深空探测的关键性步骤，必然成为继月球之后的深空探测热点。自20世纪60年代起，人类进行火星探测的历程中成功的不足一半，但这也阻挡不了人类对这颗红色星球的热情。本文选取3个著名的探测器进行介绍。

火星勘测轨道器（MRO）是最著名的火星探测器之一，其主要任务是研究火星表面、次表面和大气，并为未来的火星探测任务寻找可能的着陆点。该探测器于2005年8月12日发射，目前仍然在环火轨道正常运行，获取了大量科学数据。

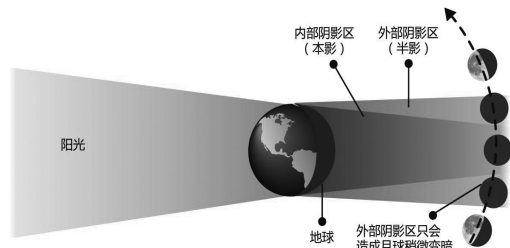
火星勘测轨道器发射质量约2180千克，由运载火箭直接发射入地火转移轨道，经过约6个月的飞行后到达火星实施制动捕获。它是一个采用“大气制动”减速技术来缓慢进入环火工作轨道的探测器，其原理就是利用探测器在火星大气层中飞行时受到的大气阻力，不断降低轨道高度。经过6个月的大气制动，探测器最终进入255千米×320千米的极地科学探测轨道，轨道周期为112分钟。

火星大气与挥发演化探测器（MAVEN）的主要科学目标是利用其携带的载荷，通过测量火星大气逃逸速率和相关过程，确定火星大气消失的历史，从而得到火星气候演化的相关答案。它是第一个以研究火星大气为主要任务的轨道飞行器。

火星大气与挥发演化探测器，2013年11月19日发射，于2014年9月到达火星并成功完成环火。在到达火星的两年时间内（2014年10月至2016年4月），火星大气与挥发演化探测器至少5次通过轨道调整从距离火星表面仅124千米的高度掠过，这意味着它可以直接与火星大气层“亲密接触”，从而采集大气样本进行分析。它在完成探测任务的同时，还可在火星表面执行探测任务的火星车提供数据中继服务，其对地传输数据速率可达10Mbps。

火星科学实验室（MSL）的主要科学目标是：挖掘火星土壤，钻取火星岩石粉末，对岩石样本进行分析，探测火星过去、现在是否具有支持微生物生存的环境，从而确定火星表面是否具有可居住性。该探测器于2011年11月26日发射。

火星科学实验室携带著名的“好奇号”火星车。在火星科学实验室任务着陆火星过程中，首先利用锥形气动外壳进行气动减速，接下来使用降落伞进行减速，最后首次使用“空中起重机”新型着陆技术在火星上软着陆，对火星表面高精度着陆技术进行验证，为后续的采样返回和载人火星探测提供技术支撑。针对火星上的恶劣环境，“好奇号”采用多任务竞争性同位素热电堆来进行供电，而非传统太阳能电池供电方式，避免了在火星沙尘暴中被沙尘覆盖失去发电能力的风险。

月食成因示意图。（天体大小、位置未按比例）
北京天文馆 张一洁 绘

5月26日，全球即将迎来一次月全食，在亚洲东部、印度洋东部、大洋洲、太平洋、北美洲西部、南美洲西部、南极洲可见，在亚洲东部和东南部可见带食月出——被地影遮挡的“红月亮”从地平线升起。

此次全球月食开始于北京时间5月26日17时45分，此时月面开始缺蚀（初亏），到19时9分，月球完全进入地影（食既），19时19分达到最大遮挡（食甚）。19时28分月亮开始重现光芒（生光），20时53分月面走出地影（复圆）。我国除西藏西部、新疆西部以外地区看不到月食外，其他地方都能看到月亮“带食而出”，越往东的地区，看到的月食越完整，全食持续时间也更长一些。

月全食露面

我们知道，当月球运行到地球和太阳之间，并且三者几乎成一条直线时，月球进入到地球的影子里，就发生月食。这时的月亮是满月，也就是农历的十五前后。由于月球的绕地轨道和地球的绕日轨道并不存在同一个平面上，而是存在着5° 09'的夹角，满月经常会在日地连线上方一点儿或下方一点儿经过，不会被地球影子遮挡，所以并不是每个十五都有月食。

发生月食的时候，对着月亮的这半个地球上的人们，都可以观赏到它。月食的整个过程，就像是大自然给我们上的一堂免费天文课，而参与的人数超过几十亿！古希腊天文学家阿里斯塔克就是通过观测月全食，求出了地球影子和月球直径的比值，并进一步估算出了地月距离。

月食包括月全食、月偏食和半影月食三类。当月球完全被地球本影笼罩时，发生月全食；当月亮表面只有一部分被地球本影遮挡时，发生月偏食；当月球只经过地球的本影区时，发生半影月食，这时月亮的亮度变化很小，肉眼几乎分辨不出来。在所有月食中，月全食约占35%，月偏食约占29%，半影月食约占36%。

“红月亮”现身

观测月全食时，最值得注意的是月亮的颜色变化。偏食阶段的月亮半白半暗，可以看到它从暗黄白色变成橙色、古铜色、红褐色。进入全食阶段，月亮也不会消失不见，我们还能看到一轮暗如紫铜的红色满月。这时大部分月面都是饱和度很低的红黑色，在环形山较多的月面南部区域则因反照率较高而呈较亮的橙红色，十分特别。地球大气中尘埃和云量的不同，也会让每次月全食都呈现出不同的颜色。

现在由于大气污染，“红月亮”其实已屡见不鲜了，但这主要是由于雾霾所致，或可叫做“霾月亮”。这是发生“瑞利散射”的结果：月光穿过地球大气时，会被大气分子和小颗粒污染物散射，波长越短散射得越厉害。地平附近的月亮，和它位于高处时相比，月光穿过的大气要厚上几倍，波长较短的蓝光几乎被散射殆尽，波长较长的红光部分虽然也因散射而强度大减，但仍足够抵达人眼。这时的月亮就呈红色或暗褐色。

月全食时的月亮，才是天文爱好者们眼中“正宗”的“红月亮”。此时地球挡住了太阳射向月亮的光芒，阳光中的蓝光被地球大气散射，一部分红光可以穿过大气抵达月面，再被月亮反射回来，形成暗红色的满月。“红月亮”比“霾月亮”更暗，也比超级月亮更加罕见，在同一地方差不多每5年能见到两次。下一次，我国境内可见的月全食，要到2022年11月8日，再下一次则要等到2025年9月8日了。

“超级月亮”加持

“超级月亮”并不是一个天文学术语，可以算作一种俗称，指的是运行到近地点附近的满月。月球在一个椭圆轨道上围绕地球（准确地说是地球质心）公转，当它运行到远地点时，视直径为29'22"左右；而当它位于近地点时，视直径可达33'26"，比远地点大14%，面积大了约30%。如果此时恰逢满月，我们就会见到又大又亮的“超级月亮”。根据月相的变化周期（称为朔望月，平均长度为29.53059日），以及月球经过近地点的周期（称为“近点月”，平均长度为27.55455日），可以看出“超级月亮”也是个周期性事件，而且周期并不算长，为413天左右，约等于15个近点月和14个朔望月，也就是说，每14次满月中，就会出现一次“超级月亮”。

5月26日的“红月亮”，视直径达33'26"，相当值得期待。晚上19点10分左右，在我国东北最东部和东南沿海地区，例如厦门将看到一轮黯淡的红色圆月贴着地平线出现在东偏南方向的低空，不过此时大气消光比较厉害，加上全食阶段的月亮本身更暗，大家不妨挑战一下，看看能否捕捉到它。

（作者系北京天文馆副研究员，“大手拉小手”科普志愿者）

“祝融号”火星车成功着陆的秘密

(上接第1版)

我国首次采用了基于配平翼的弹道-升力式进入方案，降低了火星大气参数不确定性带来的着陆风险，提高了探测器的适应能力。在气动减速阶段展开配平翼，目的是减少探测器的晃动，给后续打开降落伞创造更好的条件。

四是伞降减速。在着陆巡视器距离火星约11公里时，打开携带的超音速降落伞，使着陆巡视器的速度下降到每秒100米以下。在这90秒时间里，火星大气层中风的强度和方向，对落“火”的精度影响很大，有些时候甚至影响落“火”安全。着陆巡视器降落时首次使用了超音速锯齿形盘缝降落伞，采用了一项主降落伞、一次性充气展开减速的方案。伞的顶部是盘，接着有一圈缝，下面是带，带的尾部做成了锯齿形，有利于升力和确保稳定性。首次使用了一些新研制的特种材料，并在伞绳连接等环节首次使用了插接工艺，相比缝制工艺连接强度显著改善。

五是动力减速。当着陆巡视器的速度降至100米/秒时，降落伞基本完成使命，此后把大底和背罩抛掉，露出着陆平台和火星车。平台上的7500牛变推力降落发动

机开始点火工作，进一步减小着陆巡视器的下降速度。它用80秒把速度减小到3.6米/秒，同时保持姿态稳定，对地雷达随机开机，并展开着陆缓冲机构的4条着陆腿。

六是悬停避障、缓速下降。着陆巡视器在距离火星高度100米的时候，借助降落发动机进行悬停，同时对火面进行成像，然后挑选相对平坦的区域进行降落。

七是着陆缓冲。在最后的落“火”瞬间，垂直速度小于3.6米/秒，水平速度小于0.9米/秒，它利用4条着陆腿里的缓冲吸能材料，把着陆时的冲击力缓冲掉，确保着陆巡视器平稳落在火星表面。

“祝融号”火星车采用了哪些黑科技？

“天问一号”着陆巡视器登陆火星后，“祝融号”火星车将依次开展对着陆点全局成像、自检等，然后驶离着陆平台并开展巡视探测。

为了保证“祝融号”在复杂的火星环境中顺利完成预定任务，采用了不少新技术。“祝融号”火星车采用了一种新型隔热保温材料——高性能纳米气凝胶，它用于应对“极热”和“极寒”两种严酷环

境，并且密度可以做到比空气还轻，极大地减小了火星车的负担。它可阻隔火星表面低至-120℃的极寒环境，也能阻隔着陆发动机产生高达1200℃的高温热流，保护着陆平台的正常功能。

“祝融号”火星车除装有太阳能电池板外，在其顶部还装有一个像双筒望远镜样子的设备，叫作集热窗，它可以直接吸收太阳能，然后利用一种叫作正十一烷的物质储能。白天，火星温度升高，这种物质吸热融化；到了晚上温度下降，这种物质在凝固的过程中释放热能，效率可以达到80%以上。

针对火星地形复杂，既有松软的沙地，又有密集分布的石块，为了提高火星车的通过能力，我国打造出人类第一辆主动悬架火星车。它在遇到复杂地形时可以把整车底盘抬高，便于越过障碍。使用六轮转向之后，火星车还可以蟹行运动，即可以实现横着走。

“祝融号”火星车还能根据火星表面环境状况，阳光是否充足，采用不同的工作模式。例如，阳光最好的午后，可以采用正常工作模式，并存储一些电；阳光不好时，或有沙尘暴时，可减少一些工作设备；阳光很

差时，或进入夜晚后可进入安全模式。

历史上火星探测取得了哪些重大成果？

近20年来，探测火星取得了多项成果。研究发现，火星是一颗老年期的行星，曾有足够的内部热能、地质构造活动强烈、具有全球性内禀偶极子磁场、岩浆一火山作用活跃，形成了太阳系最高的火山山峰（奥林帕斯山）和太阳系最长的峡谷（水手大峡谷）。

火星曾有比现在浓密得多的大气层，表面存在过液态水，火星表面观测到干湿的水系、湖泊和海洋盆地，火星有过适宜生命繁衍的环境，并可能蕴藏过生命。

火星存在小天体撞击形成巨大撞击坑和洪水冲刷的痕迹。现今的火星表面是干旱、寒冷的世界，没有液态水，大气成分以二氧化碳为主，大气稀薄，小于1大气压，沙尘暴肆虐。

目前，全球内禀偶极磁场已消失，成为区域性的多极子弱磁场；构造和岩浆活动已基本平息，水体可能转入地下。

（作者系全国空间探测技术首席科学传播专家）

热水墓群族属之谜有望被解开

——2018血渭一号墓印章出土手记（下）

□ 韩建华

2020年的工作是从考古大棚的建设开始的。考古大棚是国家文物局标准化考古工地的重要指标，目的是为更好地保护遗址本体。大棚中安装了吊车，跨度49米，可谓是考古发掘的创举。

墓阶状墓道上撒满了各种遗物，墓道与墓坑间有很高的照墙分隔，墓道内相对封闭。

金像出土的那天，是临近下午下班时。考古队队员赵孟林和郭迎光需要给台阶上的遗物打点测量时，用手铲刮出倒扣的金像，刚出土时还没认出是什么，经过简单拼对发现是金像，大家都兴奋起来。对我来说，这些金器固然重要，但我心里清楚，对于墓葬，出土表明墓主人身份的文字更重要。在清理甬道时，我希望在墓门后面有墓志出土，那将是一件大快人心的事。

一天，我在办公室接到电话：“韩队，出印章了，你赶紧上来。”考古人员在棺板下发现印章。我看了看印章出土位置，询问了测量、照相的情况后，才发现这是一枚方形钮的方形印章。

我戴上手套，小心翼翼地捧起印章，反过来看印面，由于锈蚀严重，几乎看不到什么。我掏出随身带的手电筒用侧光看，发现几道不太明显的凹痕，好像是篆文，但还不敢确定——尽管文字不能识读，但印章能表明墓主人的身份，无论如何是件值得高兴的事情，我脑子里首先想到的是可以解决墓主的族属，将是学术界一件重大发现。

晚上，工作人员就对印章进行清理，当拂去泥土在灯光下仔细观察，发现主纹饰是一头骆驼，在现场看到的凹痕，是骆驼的双腿。骆驼纹外有界格，界格外有藏文，但首要的工作是把印章的印面清晰地呈现出来，第二天先做了拓片，还不清楚。在现场负责装箱提取的刘勇博士建议拿回北京，做探伤（即X射线）。于是，我马上给青海省文物考古研究所所长武国龙汇报，在得到允准后并出具公函，印章顺利带回北京。

探伤结果很不理想，刘勇经过多方联系，得知可通过工业CT扫描，在无损的情况下获得图像。中科院高能物理所有自

主研发的三维CT和平板CT，经过一个多星期的试验，最终获得了一张清晰的印面图片，骆驼外的藏文也很清晰。

拿到图片的当天下午，我就把图片发给了张建新，这位著名的西藏考古专家15分钟后就发回微信，告知了西藏文物考古研究所夏格旺堆副所长的藏文释读——“外甥阿荣王哈亚加”，应是吐谷浑王印，是墓葬里出土的最为重要的遗物。听到这个结果时，我赶紧把消息发到考古队的微信群里，我要让辛苦了三年的伙伴们也分享此刻的快乐。

这是大伙儿奢望了好久的快乐和结果，天遂人愿。吐谷浑王，与墓葬的规格也匹配，我们发掘了吐谷浑王墓！

回到考古队驻地，大家仍处在兴奋状态。当冷静下来时，我多少还有一些担心，孤证不立，这个结果靠谱吗？还是得多找几位专家来释读，我辗转找到中国藏学研究中心近年近八旬的陈庆英先生，并把图片发给他。半个小时后，陈庆英微信回复“有个别地方有残缺，不过可以认为藏文就是这样子的”，意思是“外甥阿夏

（退浑）王之印”。那就是吐谷浑王了，我的心里终于踏实了。

可以确信，我们三年来发掘的墓葬就是吐谷浑王墓，明确的族属信息，这是热水墓群40年考古的第一次。

40年来，热水墓群的族属，是困扰学术界的大问题。根据树木年轮的测年，2018血渭一号墓的年代是744±35，明显是吐蕃统治时期，印章和敦煌吐蕃古藏文卷子上的印藏风格完全一致，由动物图像和藏文组成。外甥的身份，说明了吐蕃与灭国后留在本土的吐谷浑的政治联姻。在墓葬发掘时，墓葬形制的多个方面都和新旧唐书中吐蕃赞普的葬制相吻合，显然这是吐蕃化的表现，但在葬俗方面还是保留着吐谷浑的特色。

在民族融合地区，墓葬的葬制与葬俗，如何理解其与墓主人的国家认同和族属认同，是考古学给我们提出的新问题。

（作者系中国社会科学院考古研究所副研究员，都兰热水墓群2018血渭一号墓考古发掘负责人）