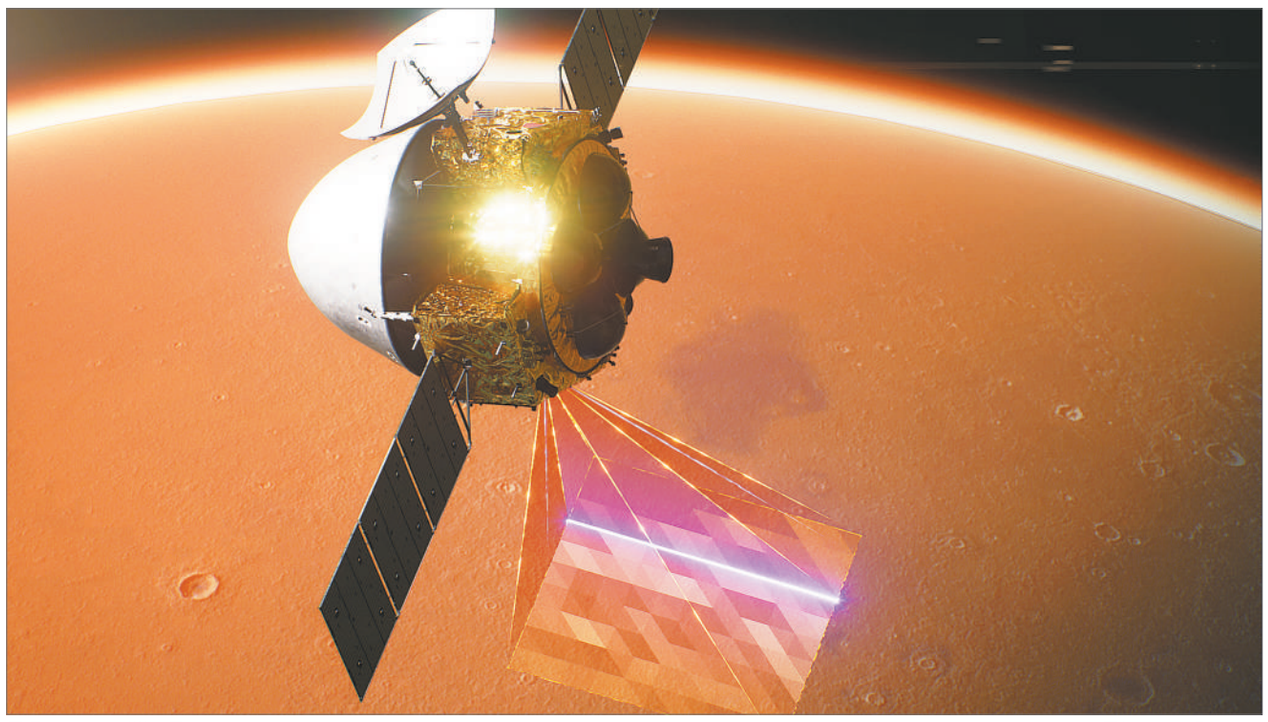
编者按

这个春节，中国首次火星探测任务再度引发关注。2月10日，天问一号探测器抵达火星轨道，成为我国第一颗人造火星卫星。2月12日，天问一号从遥远的火星轨道传来新春祝福，其火星捕获过程影像公开。2月15日，天问一号成功实施捕获轨道远火点平面机动。在天问一号环绕火星成功实现“绕、着、巡”第一步“绕”的目标之际，本版推出专题解读。

第一作者

只为火星上空那一抹中国红

——“十年磨一剑”打造我国首颗人造火星卫星



天问一号制动捕获效果图。 中国航天科技集团八院供图

中青报·中青网记者 邱晨辉

在刚刚过去的春节假期，中国首次火星探测任务动作频频，接连走进公众视线——

先是2月10日晚，天问一号探测器抵达火星轨道，成为我国第一颗人造火星卫星，实现“绕、着、巡”第一步“绕”的目标，环绕火星获得成功。

接着是2月12日，天问一号从遥远的火星轨道传来新春祝福：其火星捕获过程影像公开，太阳翼、定向天线、火星大气层及表面形貌清晰可见。

最近一次则是2月15日，天问一号成功实施捕获轨道远火点平面机动。后续，它还将通过数次轨道调整，进入火星停泊轨道，计划于5月至6月择机实施火星着陆。

至此，天问一号探测器系统之环绕器副总设计师朱新波悬着的心，终于放了下来。他告诉中青报·中青网记者：“为了这一天，整个环绕器研制团队历经千锤百炼，足足等了10年！”

8名院士联名上书

如今回过头来看，天问一号的研制论证起点是2010年。那一年，我国刚刚发射第三颗北斗导航卫星，在月球探测上也刚迈出“绕、落、回”的第一步。外界很难想象，就是在这一年，中国航天人已经把目光投向火星。

中国首次火星探测任务探测器系统副总指挥兼环绕器总指挥张玉花说，2010年，在8名院士联名上书的推动下，我国深空探测重大专项论证拉开帷幕。自那时起，她所在的八院火星团队就开始全程参加我国深空探测的重大专项论证。2013年，根据分工，八院火星团队转入对火星环绕器的总体论证。

论证一开始，就遭遇一只只“拦路虎”：机会唯一的制动捕获如何踩刹车？过程复杂的两器分离如何设计？遥测遥控中断30天的“日凌期”如何度过？数亿公里外的火星探测器如何开展自主管理？

“面对这些难题，我们没有退缩，关键技术是环绕器的核心，绝不能假手于别人！”张玉花告诉记者，我国是深空探测领域的后来者，对深空探测所需的技术积累有限，为实现深空探测工程的目标，必须攻克一系列关键技术。

在攻克环绕器自主管理难题方面，朱新波带领团队组建了一个“敢啃硬骨头”的青年攻关小组。

这可不是一个只会坐在办公室伏案实验的“秀才团队”。朱新波告诉记者，为了更好地发挥协作优势，团队里的青年设计师频繁往返京沪之间，不断完善项目建议书和任务书，边论证边调研。

他举了一个例子：给火星轨道控制带来巨大挑战的是通信延时。由于探测器距离地球太过遥远，要踏入环火轨道的天问一号，与地球的通信延迟超过了10分钟，这意味着地面上的航天人无法对火星捕获情况进行实时监控、快速应对。

朱新波说，面对这样一段“视觉盲区”，轨道设计团队协同控制系统进行了近千种故障工况的分析，确定了关键参数及阈值，保证火星探测器在地面无法实时控制的情况下，对可能发生的情况进行恰当的判断和反应。

“凭着‘初生牛犊不怕虎’的干劲，我们才拿下深空探测自主管理与控制关键技术等课题，取得重大突破，才让后来的天问一号有了聪明‘大脑’。”朱新波说。

不过到这里，这场科研攻关大戏才刚刚开始。

唯一一次成功机会

天问一号在抵达火星轨道前，需要把握住唯一的机会，对火星进行“制动捕获”。作为中国首次火星探测任务中技术风险最高、技术难度最大的环节之一，这一动作被形象地称为“踩刹车”。

“为什么说只有一次机会？如果点火时间过长，探测器就会一头撞上火星；如果点火时间过短，探测器就会飞离火星。这对环绕器姿轨控分系统提出了极高要求。”朱新波说。

他打了一个比方：开车的人都知道，在高速公路下匝道需要让车速降下来，才能安全经过弯道。类似的，对于以高速度向着火星靠近的探测器来说，要想被火星引力所捕获，也必须在“捕获窗口”对应的轨道弧段，精准、自主可靠地完成“刹车”。

从理论上说，给探测器一个反向推力，即可把它的速度降下来。但在工程实施过程中，仍会遇到不少问题：火星引力的“捕获窗口”有限，要求探测器在10分钟内将速度降低约每秒1公里。此外，由于通信延时，探测器必须完全依靠自身完成发动机点火和关机，克服发动机点火期间的扰动，实现点火方向和点火时长的精确控制。

难题摆在面前，年轻的研制团队再一次出手了。

环绕器团队总体设计师谢攀告诉记者，为了解决这一难题，他和同事不断进行脑力碰撞，提出成百上千个方案。最终，他们决定采用捕获时“开机时长”和“速度增量”两个指标来控制发动机的“双关机策略”。如此，环绕器还可以自主生成二次捕获策略，以最大限度保证任务的成功。

2016年，我国首次自主火星探测任务正式启动立项，在这之后的几年里，谢攀所在的研制团队接连攻克了火星制动捕获、超远距离通信、长时间在轨自主管理、深空光学自主导航等多项关键技术。

谢攀说，过去4年，研制团队不知经过了多少次试验，失败了重新再来，成功了就再重复验证，其目的都是为了确保可靠、精准完成这一脚高难度“刹车”。

千分之三不容忽视

在地面的一次半物理仿真试验中，天问一号捕获制动精度与指标要求有了明显偏差，这让朱庆华的心一下子提到了嗓子眼儿。

这位环绕器技术副总设计师疑惑道：方案已考虑了探测器燃料消耗引起的质量变化，也考虑了推力方向偏心造成的姿态干扰等多种可能的因素，为什么精度还是不够？

研制团队随即对捕获制动这一过程再次进行深入分析，最终发现，制动前的“沉底”时间过长，对捕获控制的速度增量产生了约0.3%的影响。

所谓“沉底”，就是在主发动机推力减速前，先启动维持探测器姿态控制的小推力器工作，通过姿态控制推力器产生的加速度，使燃料集中到贮箱底部，便于主发动机工作。

朱庆华告诉记者，研制团队很快对这一过程进行精确分析，将沉底工作过程的推力减小一倍，并将沉底过程对速度增量的影响引入到主发动机关机时机的计算中，通过方案优化和进一步仿真验证，捕获制动精度有了显著提升。

一个细节暴露了问题，那么其他细节会不会也有类似的问题？

研制团队开始“举一反三”：承担着指挥控制任务的GNC单元，采用了三模冗余方案。在团队多轮设计、仿真及验证工作下，3台计算机可确保“步调一致”并实现“民主表决”，即运算时刻和初始数据始终保持一致，进而通过少数服从多数的原则，确保计算结果准确无误。

朱庆华说，为了确保这次“刹车”可靠完成，研制团队在4年的研制过程中，不断进行着发动机推力方向和大小、发动机推力干扰力矩、太阳电池阵挠性振动、推进剂液体燃料晃动等各参数的正常范围、极限拉偏测试，分析测试和试验中GNC系统的表现，对异常现象迅速定位并对方案进行优化完善。

“我们运用自己的算法，对一些知名的火星探测任务进行仿真，仿真结果与国际上公布的数据非常吻合。”环绕器GNC分系统产保师刘宇说。

截至目前，具备自主控制能力的天问一号已成功实施捕获制动。刘宇告诉记者，他期待天问一号在火星的上空，能够带来更多探火新发现。

每一个脚印都在创造历史

2020年，一场突如其来的新冠肺炎疫情，打乱了火星环绕器正样产品的出厂步伐。

朱新波告诉记者，为了降低人员流动风险，团队决定分双线并行推进工作：一支队伍在京完成与北京飞行控制中心的无线1：1联试，另一支队伍负责在上海完成整器出厂评审准备工作。

测控数传分系统是天问一号探测器最重要的分系统之一，该系统不仅要进行整器的各项试验，同时还要进行各测控站、应用站的对接。朱新波说，对接工作时间跨度大、协同距离远，需要长期保持多地同时工作。

北到佳木斯的深山老林，西到喀什的茫茫戈壁，南到文昌的湿热海岛，东到上海的佘山脚下……在进行我国首台高灵敏度数字化深空应答机的测控应用对接任务时，研制团队在短短几个月时间里，辗转八地，披星带月，奔赴数万公里。

2020年7月，天问一号成功发射后，需要研制人员同时在北京、上海两地进行飞控。环绕器副总指挥褚英志告诉记者，在天问一号奔赴火星的星际旅途中，团队成员每天“两班倒”，一路遥遥“相伴”。

进入2021年2月火星制动捕获的关键节点，研制团队更是全员奔赴北京飞控。总体主任设计师牛俊坡告诉记者，全体成员抵京后，开展飞控文件的最终确认，与北京飞行控制中心开展一遍又一遍的协同演练。

第一时间得知天问一号成功进入环火轨道，牛俊坡缓缓松了一口气，写下了这段话：“好奇是隐藏人类心中的神秘种子，热情是蕴含人们体内的无穷力量，深空是等待人们探索的未知领域，梦想是激励我们前进的灼灼明灯。我们所做的每一件事、踩下的每一个脚印，都在创造历史！”

他告诉记者，10年的问天之路，火星环绕器研制团队奉献的是青春和智慧，扛住的是责任与压力。

截至目前，火星探测研制团队已经持续开展了200多天的在轨飞行控制任务，完成了4次中途修正和一次深空机动，开展了各种自检和功能验证工作，对探测器的测控通信能力、能源保障能力、姿轨控能力、自主管理能力等进行了测试。

他们现在最期待的，就是5月至6月的落火时刻。

“疫情时期又赶上研制的收尾阶段，乘坐人生中第一次20多个小时的大巴奔京，希望疫情赶紧过去，探火顺顺利利，更希望这一年在外的时间不要超过前一年的天数。”

——当火星环绕器测控数传主任设计师王民建在京沪大巴上发完这条朋友圈后，他怎么也不会想到，在天问一号抵达火星轨道，成为我国第一颗人造火星卫星后，他的出差天数再次刷新了。

天问一号，这个来自中国的火星使者，还要绕着火星继续转下去。而王民建，这位年轻航天人的探火之旅，同样也在路上。

揭开天问一号火星环绕器神秘面纱

零距离

中青报·中青网记者 邱晨辉

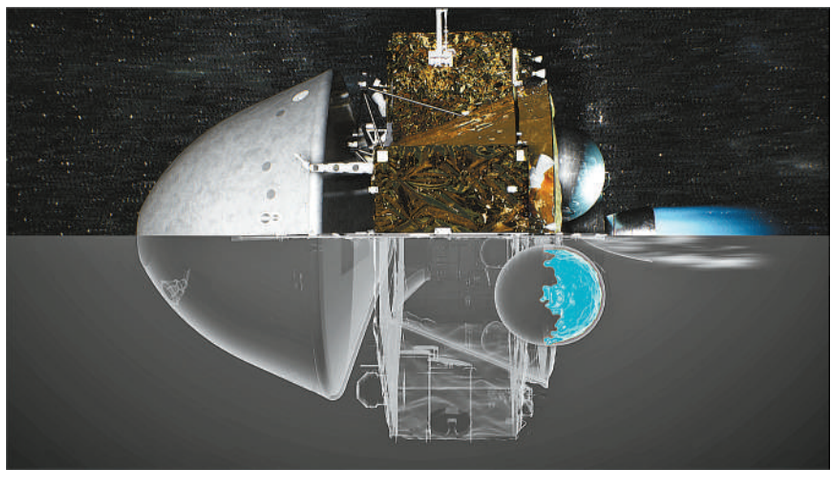
伴随天问一号成功被火星引力捕获，其环绕器结构也揭开了神秘面纱。天问一号探测器由环绕器和着陆巡视器组成。这其中，“太空多面手”环绕器“一器分饰多角”，具备三大功能：飞行器、通信器和探测器。

中国首次火星探测任务探测器系统副总指挥兼环绕器总指挥张玉花表示，在近7个月的飞行过程中，天问一号环绕器首先作为飞行器，将着陆巡视器送至火星着陆轨道。待成功释放着陆巡视器后，环绕器作为通信器，为着陆巡视器建立与地球之间的中继通信链路。通信工作结束后，环绕器作为探测器对火星进行科学探测。

“减肥瘦身”

据中国航天科技集团八院天问一号环绕器结构团队杜冬博士介绍，为了克服地球的强大引力、奔向火星，天问一号探测器总重量不能超过5000公斤，但为了到达遥远的火星，它又至少需要携带2500公斤的推进剂，除去着陆巡视器占去的1300公斤重量份额，环绕器自身干重被严格限制在1200公斤以内。

“环绕器的1200公斤包含结构和其他各种设备的重量，还要兼顾2.5米可展开驱动天线、太阳电池阵、高分辨率相机等多种大体积设备的安装要求。”杜冬说，如何在重量有限的情况下实现高效的承载和设备安装，成为了环绕器结构团队面前的一只“拦路虎”。



天问一号制动捕获效果图。 中国航天科技集团八院供图

环绕器结构主任设计师王建炜说，对于航天器来说，质心越低、重量越轻，发射成本就越小，所以结构构型设计的目标就是要尽量降低质心，优化重量，同时兼顾设备安装需求。围绕着这个核心原则，结构团队先后开展了多轮结构构型论证。

“探测器多一克的重量，付出的发射成本将远超一克黄金。”杜冬说，为了继续“减重”，环绕器结构团队还把目光投向重量最大的结构核心部件——中心承力筒，并创新采用了“全复合材料主承力结构”，在材料上下功夫，使得环绕器在苛刻限重的条件下实现高效承载。

“火眼金睛”

天问一号探测器飞近火星的过程中，如何靠自己找到火星？

中国航天科技集团八院光学导航专家郑循江告诉记者，天问一号探测器上配置的光学导航敏感器，可以利用拍摄的恒星与火星图像，精确计算出自身的飞行姿态、位置与速度，实现相对火星的自主导航。

“光学导航敏感器就好比天问一号火星探测器自动驾驶过程中的‘眼睛’。”郑循江说。据他介绍，在飞近火星的过程中，探测器靠这双“眼睛”实时观测火星的距离和方向，让飞控团队可以更直观地确认飞行轨道和姿态，计算图像中火星的几何中心和视半径，天问一号也就可以通过最优估计算法，来自主获取实时的位置和速度信息。

郑循江说，7年来，在2500多个日日夜夜的攻关期间，研制团队不是在做试验，就是在去做试验的路上。正是有了广泛的试验数据加持，团队完成了设计方案的多轮优化，最终完成了最恶劣条件下的全部功能及性能的验证。

“这是我国首次在行星际转移飞行过程中应用光学自主导航技术。”郑循江说，国内并无先前的工程经验可参考，研制团队一点点摸索，设计了大大小小百余个试验项目，最终使中国成为世界上第二个掌握并在轨验证了火星光学自主导航技术的国家。

“最强大脑”

综合电子分系统被称为天问一号环绕器的“最强大脑”，负责环绕器全部信息的管控。

张玉花说，在天问一号环绕器对火星进行探测的过程中，器上的各科学仪器都会产生大量的科学数据，这些数据必须要发回地面由科学家们进行研究，此外，环绕器上的光学导航敏感器和红外导航敏感器数据也需要发送回地面进行进一步的分析，综合电子分系统负责对这些原始数据进行处理、储存，并在合适的时机传输回地球。

据她介绍，通常情况下，环绕地球运行的卫星都是由地面控制中心根据卫星的实时状态和任务要求进行控制的。但与地球卫星不同，火星环绕器由于器地距离远，通信时间延迟长，往往来不及依靠地面指令对探测器进行实时处理。

此外，深空探测器与地面站通信存在独特的“日凌”现象，即当探测器、地球和太阳位置处于同一直线时，太阳辐射会干扰地火之间的射频信号传输，导致通信中断。因此，“日凌”期间，环绕器必须“自己照顾好自己”。

张玉花说，针对这些情况，环绕器综合电子分系统的研制团队进行了一系列技术攻关，设计了深空探测长时间无上行指令自主管理机制、整器断电再恢复功能等，让环绕器在必要时能“自己照顾好自己”，实现了环绕器在轨自主运行大于60天的能力。

她告诉记者，从环火开始，天问一号就正式成为火星的卫星。后续，天问一号还要进行一次轨道调整和两次近火制动，届时天问一号离火星最近距离只有265公里。之后，天问一号探测器会边环绕边完成拍照任务，开展预选着陆区探测，计划于2021年5月至6月择机实施火星着陆。

“高清摄影师”

2月12日，国家航天局对外发布天问一号抵达火星轨道过程中的影像。实施此次拍摄任务的工程测量分系统，就是火星捕获大片背后的“摄影师”，由中国航天科技集团八院509所设计研制。

张玉花表示，为做好天问一号在轨工作状态的可视化监视，火星环绕器工程测量团队专门设计了一套由多个“质量小、个头小、能耗小”的“小块头”组成的工程测量分系统，包括固连遥测探头、近距离遥测探头和国旗，而实施此次捕获过程拍照的，便是其中的固连遥测探头的两个固连测量传感器。

在飞向火星的旅程中，固连遥测探头一路监测天问一号的状态，完成了太阳翼展开过程、定向天线展开监测，在定向天线展开到位的同时拍摄到了地球。

张玉花说，自我国首次自主火星探测工程立项以来，如何做好天问一号在轨飞行可视化监测就成为了研制团队面对的重要任务之一。火星环绕器工程测量团队结合全飞行过程，设计了太阳翼展开、定向天线展开、地月拍照、太空自拍、火星拍照、器器分离过程等监测任务。

她告诉记者，在接下来的飞行中，火星环绕器工程测量分系统将继续开展任务，持续监测太阳翼、定向天线的运行情况监测，实施器器分离过程可视化监测，继续为天问一号的探测之旅保驾护航。

来自天问一号的家书

征途漫漫 惟有奋斗

□ 邱晨辉

亲爱的家人们：

离家200余天，跋涉4.75亿公里，此时，我终于在距离火星400公里处成功“刹车”，进入了环火轨道。回首遥望地球家园，已相距2亿公里。家人们一切还好吗？

我知道，现在家乡已经是立春之后了，感慨万千。我在2020年7月的烈日下出发，地球上的你们历经炎炎夏日，飒飒金秋，瑟瑟寒冬，一路精心守护陪伴着我到春回大地。从我奔火启程的那一天起，家人们就日夜对我的状态进行细致判读，一路上4次中途修正，一次深空机动，两次状态自检，让我的旅程温暖而踏实。

这次近火制动，我更是信心满满，有上百位家人在飞控中心集同工作，24小时连续跟踪；更有航天科技集团五院飞行控制的“最强天团”坐阵，他们中有叶培建院士等16名技术专家和顾问、5名两总、61名各个岗位的飞控人员，谢谢你们！

我终于进入环绕火星的轨道，可以好好看一看这个红色星球了。此时此刻，你们与我分享着进入火星轨道的喜悦，我也在和你们共同品味着新春的吉祥。借此机会在这里给家人和全国人民拜年！祝大家牛年大吉！

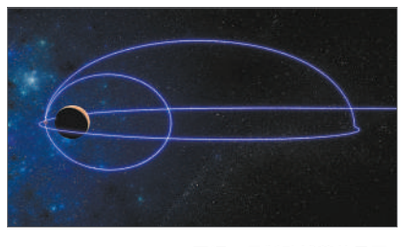
“日月安属？列星安陈？”中华民族仰望星空留下的种种好奇与疑惑，一直激励着我去找寻答案，现在家人们最常说的一句话是“征途漫漫，惟有奋斗”。

从环火开始，我这颗中国制造的航天器就正式成为火星的卫星啦。接下来，我还要进行一次轨道面调整和两次近火制动，这样，我离火星最近的距离就只有265公里啦，之后就是边完成环绕拍照任务，边为3个月后的着陆巡视做好准备。

我将全力以赴，等待我的好消息吧！

天问一号探测器

2021年2月



天问一号制动捕获效果图。
中国航天科技集团八院供图