



# 揭秘我国首次“奔火”之旅的“上海担当”

## “天问”奔火示意图



## “天问一号”环绕器系“上海制造”

# 今日启程 我护你问天

我国首次自主火星探测任务探测器“天问一号”搭载长征五号遥四运载火箭，12时41分于文昌航天发射场成功发射。

“天问一号”包括环绕器、着陆器和巡视器三部分，分别装载不同的科学探测载荷，目标为一次发射实现“绕、着、巡”三个探测任务，这在国际上尚属首例。

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介绍，根据任务分工，中国航天科技集团有限公司八院(上海航天技术研究院)承担本次火星探测任务中的环绕器总体设计与研制工作。环绕器在“天问一号”中扮演什么角色?研制过程中要突破哪些关键技术?听上海航天专家讲述“上海制造”不同寻常的“奔火”之旅。

### “飞通探”三功能兼备

首次火星探测任务探测器系统副总师兼环绕器总设计师王献忠介绍，火星环绕器设计寿命3年，采用“外部六面柱体+中心承力锥筒”构型，满足5个飞行阶段和11种飞行模式的设备布局需求。火星环绕器携带着陆巡视器，主要完成地火转移、火星制动捕获、轨道调整等任务，为火星车提供3个月的中继支持服务，通过携带的高分辨率相机、中分辨率相机、次表层探测雷达等有效载荷对火星开展约一个火星年的科学探测，实现对火星全球普查和局部详查。

环绕器具备三大功能：飞行器、通信器和探测器。约七个月的飞行过程中，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，为着陆器建立与地球之间中继通信链路；通信工作结束后，环绕器作为科学探测器对火星进行遥感探测。

环绕器不仅任务繁重，其难度也是空前的——

飞行时间长：此次地火飞行路径超过4亿公里，在漫长的7个月里任何一个环节出问题，都将前功尽弃。

面临环境差：由于器地距离远，导致通信时延大，当地球与探测器相距最远时，单向通信时延将达到22分钟，一来一回通信时延44分钟；同时，因为空间信号衰减，环绕器接收到的信号非常微弱，环绕器要克服巨大的信号衰减、传输时延和外界干扰等因素。

控制要求高：环绕器需要具备很强的自主姿态控制能力才能确保探测器的安全。同时由于我国对火星空间和行星际空间的复杂环境还很不陌生，很多步骤只能依

靠自主判断来完成，挑战很大。

空间动作繁：环绕器不仅在不同阶段扮演不同角色，在扮演同一角色时还要同步完成多项操作，动作复杂意味着更多的不确定性。

### 关键“一刹”被火星捕获

环绕器此次任务涉及五个主要环节：地火转移、火星捕获、离轨着陆、中继通信、科学探测。

■ **地火转移段** 环绕器需要进行4-5次中途修正和一次深空机动修正飞行路径，走过超过4亿公里的路径，才能逐渐靠近火星。

■ **火星捕获段** 发射约200天后，探测器将被火星捕获，此时距离地球近1.93亿公里，通信时延约11分钟，只能通过自主管理制动点火进入火星捕获轨道，这一脚“刹车”风险非常高：踩早了，速度降得过低就会坠入大气层撞击火星；踩晚了，就不能被火星引力捕获，从而飞离火星。

■ **离轨着陆段** 进入捕获轨道后，环绕器将调整至停泊轨道，完成着陆巡视器预选落区的探测和进入点位置调整动作。确认着陆条件满足要求后，将择机降轨释放着陆器，着陆器分离后环绕器再抬轨回到停泊轨道。

■ **中继通信段** 环绕器将再次进入中继轨道，为地球与着陆器提供为期3个月的中继通信服务，为它们搭建起沟通的桥梁。

■ **科学探测段** 中继任务结束后，环绕器将再次进行降轨进入科学探测轨道，并利用7种有效载荷，对火星轨道空间、火星表面开展科学探测，获取火星表面图像、地质构造和地形地貌、表层结构、矿物组成和分布、空间磁场环境、近火星空间环境粒子特征及其变化规律。

### “太空芭蕾”靠精准制导

在火星探测任务的所有阶段，上海航天所承担的制导、导航及控制(GNC)分系统都发挥着至关重要的作用。

由于火星探测器在地球飞往火星过程中长时间处于无动力飞行，微小位置速度误差会逐渐累计和放大，所以必须在合适的时机进行中途轨道修正，以保证探测器最终能够准确地进入制动捕获的轨道窗口，这就需要GNC分系统完成精确的飞行轨道计算和中途修正控制。

火星探测器进入火星引力范围后，需要对探测器进行制动控制，以消除探测器

过快的飞行速度。火星探测过程中需要根据发动机参数、制动时间长度、制动控制精度要求等工程目标，选择合适、可靠的制动捕获策略，使探测器能够“一次成功”形成环绕火星飞行状态。

为了保证着陆器着陆点的范围要求，探测器通过推力减速，降低至撞击火星轨道后，在预定时刻完成环绕器与着陆器的分离。分离动作完成后，环绕器需要迅速升高轨道以避免真正撞向火星，着陆器则飞往火星表面，完成软着陆后释放巡视器开展火星表面巡视探测，同时环绕器继续留在火星环绕轨道进行火星遥感探测。这一系列太空芭蕾般的动作都依靠GNC分系统的自主、准确、正常地工作。

### 浴“火”奋战解研发难题

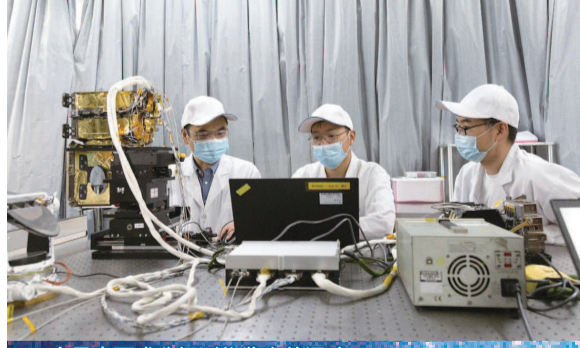
八院812所火星环绕器总装团队在1000多个日夜里长期奔波于上海、北京和文昌三地，平均连续出差时间都超过200天。这样一支以党员为骨干的团队挥洒汗水、默默付出，他们渴望浴“火”重生，是火星环绕器众多默默的缔造者之一。

火星环绕器的12套机构和各式花样展开，由812所首次独立承担，而向天线展开项目是难中之难，面对全新的挑战，火星环绕器总装团队用航天人的智慧将难题迎刃而解。火星环绕器上的定向天线由于口径很大，大大压缩了其下方压杆安装的可操作空间。身为主任工艺师的张则梅细心地发现了这个问题，为了降低总装操作人员的操作难度和质量风险，她主动与操作人员一同探讨。经过一系列模拟演练和实战演习，她大胆创新，成功为操作人员量身定制了辅助工艺装备，化解了安装难题。

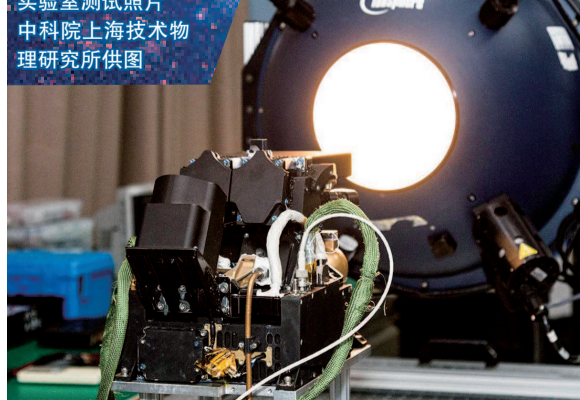
环绕器总装就像雕刻一件艺术品，不仅要有点石成金的技术功底，还要有孜孜不倦的奋斗精神。定向天线需要同时安装在3个不同角度的平面上，且3个平面的安装点间隔较远，安装过程中这3个面还要同时保持贴合状态，这在812所卫星总装历史上尚属首次，操作人员反复调整均无功而返。型号指挥曹勇立即组建临时工艺攻关小组。专业工艺师侯鹏带领技术人员日夜奋战，在总装工位上一待就是十几个小时，通过三维模拟尝试了多种操作方法，利用激光跟踪仪的精度测量，反复调整安装位置，终于在48小时后将定向天线精准装星，保证了任务顺利进行，同时将工艺方法和流程固化沉淀下来，为其他型号提供借鉴和指导。 本报记者 叶薇



中国科学院上海天文台 VLBI 中心 本报记者 孙中钦 实习生 华天择 摄



▲ 火星表面成分探测仪鉴定件调试 实验室测试照片 中科院上海技术物理研究所供图



## 中科院上海天文台 VLBI 测轨分系统让“天问”寂寞旅途“不偏航”

中国首次自主火星探测任务“天问一号”顺利发射升空，正式拉开我国行星探测的大幕。奔向最远时距离地球4亿公里的火星，“天问一号”的旅程是一场黑暗中的漫长“马拉松”。“飞到哪里了?”“飞向哪里去?”……这是，它需要时时“自省”的重要问题。由中科院上海天文台牵头负责的甚长基线干涉测量(VLBI)测轨分系统，则可以帮助“天问一号”清晰地定位自我、瞄准方向，寂寞旅途“不偏航”。

### “火星之旅”实时测轨

火星是全球最为热门的行星“旅行地”。为了更好地探测火星，各国都陆续发射了不少的火星探测器。截至目前，美国成功地向火星发射了探测器并着陆，阿联酋火星探测器前不久也顺利升空。紧随其后，我国今夏正式加入“火星俱乐部”——继载人航天工程、探月工程之后，这是我国首

次开展地外行星空间环境探测活动。

从“天问一号”发射开始，VLBI测轨分系统将参加地火转移、火星捕获、离轨着陆、环火探测等各阶段的测定轨任务。“特别是，实时任务持续到2021年，对于VLBI测轨的精度要求更高。”中科院上海天文台研究员洪晓瑜告诉记者，VLBI测轨分系统由北京站、上海站、昆明站和乌鲁木齐站，以及位于上海天文台的VLBI指挥调度和数据处理中心组成。这样一个网所构成的望远镜分辨率相当于口径为3000多千米的巨大的综合口径射电望远镜，测角精度可以达到百分之几角秒，甚至更高。

对中国航天来说，VLBI测轨分系统是重要的“导航装备”之一，从探月开始“加入编队”，已圆满完成嫦娥一号、嫦娥二号、嫦娥三号、嫦娥四号和嫦娥五号再入返回飞行试验器等VLBI测定轨任务。它使我国航天测控网从传统测距测速技术拓展为测距测速+VLBI高精度测角系统，大幅提高探测器测定轨测定位能

## 四亿公里 我为你导航

力，对我国的月球和深空探测产生深远影响。

### 精度大大提高

到火星去，要比“嫦娥奔月”的路途，遥远上千倍。这对VLBI系统提出了更高精度的要求。“在测轨中1纳秒的VLBI时延误差，到月球上是几十米的差距，放大到火星轨道上就是几十公里的偏差。”中科院上海天文台研究员刘庆会说，从月球到火星对VLBI的精度要求，是真正的“差之毫厘，谬以千里”。“所以，用于火星探测VLBI测轨分系统，比月球探测时，精度大幅提高。”

据介绍，为了提高VLBI测定轨的精度，VLBI测轨分系统共研发了数十套软件和硬件，分别布置于4个测站和VLBI中心，如VLBI中心的火星探测VLBI数据处理系统和定轨定位系统，4个测站的致冷接收机、前置型数据采集终端、基准信号锁相传输系统、GNSS接收机、氢原子钟、水汽辐射计等。“这些

软件和硬件的研发，能够进一步提高观测装置的测量精度和可靠性。大气和电离层时延的改正精度，更好地完成火星探测器的VLBI测定轨任务。”

随着“天问一号”顺利升空后，位于佘山脚下的上海天文台VLBI数据处理中心将迎来异常忙碌的半个多月。每天深夜，伴随着“天马”望远镜每几分钟在“天问一号”探测器 and 河外射电源来回“摆头”，指挥大厅里灯火通明，几十位测轨人员目不转睛地注视着实时传回来的信号，尽全力精确计算出“天问一号”在中国境内上空中的精准位置。

在外场，还有近百位技术人员日夜难寐，守护VLBI测轨分系统的顺利运行。“上海天文台把火星探测VLBI测定轨定为今年的一号任务予以重点保障，组建了一支133位技术人员组成的试验队，为首次火星探测任务VLBI测定轨任务的顺利完成提供着坚实保障。”洪晓瑜说。 本报记者 马亚宁

## 中科院上海技物所两大载荷将带回火星“深度讯息”

# 神秘火星 我帮你看清

到火星去!中国首次火星探测之旅，是2020年最令人期待的空间任务之一。火星上有什么，是否有过生命的出现，是不是也像地球一样蕴含矿物“宝藏”?由中科院上海技术物理研究所研制的两大载荷，搭载在火星车上的火星表面成分探测仪，以及轨道器上的火星矿物光谱分析仪，将替我们到火星去寻找与发现。

2020年是火星探测活动的窗口期。“天问一号”将实现对火星的“环绕、着陆、巡视”三个目标，起点高、难度大。为此，中国火星探测器“备齐”了造访火星的“双驾马车”——环绕器、着陆巡视器。其搭载的13种有效载荷中，火星表面成分探测仪是“火星车”上的主要有效载荷之一，勘查火星地表情况是它的专长。

火星表面覆盖尘埃，想要准确获取火星尘埃之下的物质成分，必须剥去尘埃或者进行破坏从而深入岩层取样。搭载在火星车头部位置的火星表面成分探测仪，足足重15.7千克。“它就像火星车‘车头’，占火星车总载荷重量的一半，用激光探测火星表面的物质成分。”中科院上海技物所研究员徐文明告诉记者，中国火星车采用的表面成分探测技术，与此前美国技术的不同，主要包括主动激光诱导击穿光谱探测和被动短波红外光谱探测技术。它们都能对着陆区的火星表面元素、矿物和岩石开展高精度的科学探测，对研究火星的形成、地质的长期演变过程等具有重要的科学意义。

特别是主动激光诱导击穿光谱探测，上海技物所副所长舒峰研究员将它的工作状态比作给火星表面“针灸”。“激光在极短时间内汇聚在直径0.2毫米的小圆点上，瞬时迸发出巨大能量。高达上千摄氏度的瞬间温度，能将火星表面物质激发出等离子体。等离子体呈现出的状态，犹如一个微小的白色火花。通过探测火花的成分、气体成分等，可以高精度地分析出火星表面元素成分。”

这一切要在夜晚极寒的火星上顺利完成，是整个项目最大的挑战。据介绍，中国“火星车”采用太阳能驱动，而火星表面的太阳光只有地球的40%，能源“先天不足”。同时，火星昼夜温差巨大，尤其晚上到达-130℃的极低温度。所以，科研人员给火星表面成分探测仪穿了许多层厚衣服防寒，以保证仪器设备不被冻坏，而且，进一步提高太阳能的能源利用效率，

让探测仪能在“低温模式”下自如运转。“探测仪可以实现每300毫秒主动诱导激发一次，所得数据存储在火星车里。等到火星运行到距离地球较近的位置时，再将数据传回地面。”

而另一台“沪产”载荷，火星矿物光谱分析仪，则是在轨道器中完成任务。“光谱仪通过获取火星表面可见至中波红外宽波段(400nm-3400nm)的光谱成像数据，为调查分析火星表面物质成分的科学探测任务提供科学数据。”为适应轨道器中的“腾空”工作状态，上海技物所研究员何志平带领团队，采用推帚式成像、多元实时动态融合的总体技术方案，突破了红外背景抑制、高效自由曲面-光栅分光组件、器上太阳及灯组合定标等关键技术，同步实现了设备轻量化、低功耗与高性能的三合一。

今年春节前后，新冠疫情告急，也正是火星探测载荷最后冲刺的实验期。两大载荷团队的每位成员心里牢记“火星计划”，积极主动调整原定的个人计划，尽全力保证重大项目进度不受影响。火星矿物光谱分析仪团队里，有位湖北籍技术骨干，本计划回乡过年，但担心不断发展的疫情可能给项目带来风险，自驾车刚开到家乡又马上掉头千里奔袭返回上海。

最终，两大团队打出一系列精准管控和灵活调整的配合“组合拳”，从去年底到今年初，两台关键载荷按照原计划顺利完成一系列定标测试后交付北京总装，并顺利完成与其他设备的联机测试。待明年“天问一号”进入火星轨道，火星车顺利着陆后，来自中科院上海技术物理研究所的两大火星载荷将开始启用，睁大眼睛“看清”火星，为我们带回火星的“深度讯息”。

本报记者 马亚宁

## 上海航天为长征五号提供 90%以上推力

# 长五升空 我助你起飞

长征五号运载火箭在文昌航天发射场点火升空，成功将“天问一号”火星探测器送入预定轨道，发射取得圆满成功。中国航天科技集团有限公司第八研究院院长张宏俊介绍，其中八院承担长征五号助推器以及火星环绕器的总体设计与研制工作。

长征五号运载火箭芯级直径达5米，捆绑4个3.35米助推器，起飞推力超过1000吨，具备近地轨道25吨、地球同步转移轨道14吨的运载能力。

中国航天科技集团有限公司第八研究院党委书记宗文波告诉记者，长征五号4个助推器为火箭提供了90%以上的起飞推力，是长征五号运载火箭起飞的主要动力源。

长征五号是我国首个采用助推器支撑的

捆绑火箭，4个直径3.35米助推器迄今为止都是国内最大的低温液体助推器。助推器五脏俱全，相当于一枚单级运载火箭。每个助推器安装了2台120吨液氧煤油发动机，并为全箭提供竖立状态的支撑。此外，长征五号助推器采用的气动外形良好的斜头锥是国内最大的偏置集中力舱体。

长征五号系列火箭作为新一代大型运载火箭，肩负着我国探火、探月、载人空间站等国家重大科技工程的发射任务，在加速推进航天强国建设的过程中，八院长征五号研制团队将面临“多任务同时开展、多地域同步作战”的新形势。海南发射、天津维护、交付总体、天津转运、北京桌面联试、上海总装总测等几乎是并行开展。 本报记者 叶薇

## 火星之旅中更多上海元素

### 中科院上海光机所 为探测火星表面成分“打光”

中国科学院上海光学精密机械研究所与中国科学院上海技术物理所紧密合作，负责火星表面成分探测仪中激光器的研制。其中，上海光机所负责研制的激光发射光源，是火星表面成分探测仪的关键组件。通过近3年攻关，上海光机所设计并研制了国际首台大温度范围工作的激光器，将为火星等表面成分探测提供强有力支撑。

### 中科院上海硅酸盐研究所 火星探测中的“材料大师”

中国科学院上海硅酸盐研究所承担耐高温多层隔热材料、导电型低吸幅比柔性薄膜二次表面镜(穿孔)、防静电低吸幅比柔性薄膜二次表面镜、铝合金钎合金微弧氧化、铝合金黑色阳极氧化、铝合金钎合金、钎合金化学镀镍、钎合金化学氧化等关键材料的研制；参与火星巡视器太阳帆板除尘的前期工作；还为关键材料开展空间环境适应性(真空-紫外辐照)考核试验，确保关键材料在型号上的可靠应用。

### 中科院上海有机化学研究所 给航天器穿上“控温服”

航天器在太空工作的空间环境非常极端，外表必需使用不同太阳吸收率和热辐射率的涂层，来调节其热平衡温度达到控制。其中，有一类涂层——有机热控涂层，就是由中国科学院上海有机化学研究所研制和生产的。有机热控涂层就像能调控温度的衣服，穿在航天器和仪器的外表面。嫦娥系列卫星就使用了上海有机所研制生产的有机热控涂层，为航天器的正常工作温度保驾护航。此次出征火星，有机热控涂层再次为火星探测器穿上了“能调控温度的衣服”。 本报记者 马亚宁



■ 位于松江的65米天马望远镜是VLBI观测网的“主力军” 记者 孙中钦 摄