中国空间站再添“新房”

——问天实验舱技术亮点解读

■韩阜业　温永至　谭仁炜

7月24日14时22分，搭载问天实验舱的长征五号B遥三运载火箭，在我国文昌航天发射场准时点火发射。约495秒后，问天实验舱与火箭成功分离并进入预定轨道，发射取得圆满成功。

7月25日3时13分，问天实验舱成功对接于天和核心舱前向端口。

几代中国航天人、千千万万中国人梦想中的“天宫画卷”，正在缓缓拉开帷幕。神舟、天舟、天和、问天……伴随着一次次颇具诗意的浪漫出发，中国航天人也在向世界传达着这样一个决心：“在星辰大海的征途上，中国航天永不止步。”

比天和核心舱更高、更大、更重，“体型”大致相当于一节地铁车厢

7月25日10时03分，神舟十四号飞行乘组成功开启问天实验舱舱门，顺利进入问天实验舱。

问天实验舱的舱体总长17.9米，直径4.2米，发射重量达23吨，相关指标高于天和核心舱，“体型”大致相当于一节地铁车厢，是全世界现役在轨最重的单舱主动飞行器。

对在轨的3位航天员来说，问天实验舱的到来可谓是“新房上线”。结构上，问天实验舱由工作舱、气闸舱及资源舱3部分组成。其中，工作舱用来完成科学实验，气闸舱用来支持太空出舱，资源舱用来储备上行物资。

工作舱长达9米，是目前我国航天器中体型最大、承载最重的密封舱。这里，还是航天员的生活工作场所。完成对接后，中国空间站的“床位”数增加到6个，静候神舟十四号、神舟十五号两乘组6名航天员的“太空会师”。

为了打造舒适安全的“太空之家”，航天科技集团五院空间站结构与机构设计团队在工作舱研制过程中，开展了大量人性化设计——通过可翻转式柜门设计，使储物效率更高；3个独立“卧室”自带防辐射舷窗，让航天员能安心欣赏舱外风景；独立卫生区进一步提升了私密性……此外，为了让密封舱更加坚固耐用，能够按照在轨设计寿命稳定运行，设计人员还在舱壁上设计了如同“金丝软甲”一般的防护结构。

问天实验舱携带8个实验机柜、22个舱外载荷适配器，仿佛把一个大型科学实验室搬到了太空。航天员出了“卧室”就能“上班”，可以在太空开展大规模的空间科学实验。

为了更好地开展空间科学实验，问天实验舱搭载了我国首台“太空冰箱”。不到0.5平方米的空间内，高密度集成3个冷冻冷藏区，其中包括一个温度可达零下80摄氏度的深冷环境。

据了解，空间站对设备材料的选择有严格要求，这就导致很多地面常用的降噪材料不适用于空间站。因此，在问天实验舱内，“太空冰箱”的降噪问题成了一个难题。

为了给问天实验舱营造安静的环境，科研人员在消声室内搭建了一个测试平台，攻克了复杂系统带来的传递路径繁琐这一问题。在千丝万缕的关联中，科研人员找到了几个关键环节。他们对泵机进行了开创性设计，保证制冷效率的同时，将声能输入降至最低。与此同时，他们选用新型附着材料，提升结构的阻尼，改良箱体的声辐射效率……就这样，每个细节都做到极致，每个设计都想到极限，“航天冰箱”在不改变体积的情况下，噪声指标竟然降低了近20分贝。

除了试验载荷功能，问天实验舱还与天和核心舱互为备份，关键平台功能一致，在需要的时候可以完全覆盖空间站组合体工作要求。同时，问天实验舱提供了专用气闸舱和应急避难场所，让中国空间站的在轨运行风险更加可控，在轨长寿命运行更加可靠。

发射前，科研人员正在测试问天实验舱。　图片由航天科技集团五院提供

用四两拨千斤的“中国功夫”，让问天实验舱在太空中平稳“翱翔”

空间站三舱虽统一设计，但每个舱段“各有千秋”。作为集“主动交会追踪、组合体跨舱融合管理、大型能源供给、舱内外载荷高效支持”等诸多功能为一体的舱段，问天实验舱有着强大的能源管理系统。

在外形上，问天实验舱与天和核心舱有明显不同——前者尾部有一对巨大的“翅膀”，也就是太阳帆板或称柔性太阳电池翼。

问天实验舱配置的是目前国内研制的最大面积可展收柔性太阳翼，单翼全展开状态下最长达27米，展开面积可达110平方米。

两个硕大的太阳帆板一起工作，平均每天的太阳能发电量将超过430度。在地面，这足够一个普通家庭用上一个半月。无论是展开面积还是供电能力，这对“翅膀”都达到了天和核心舱太阳翼的两倍多，双翼超万瓦级的供电让空间站基本实现了“用电无忧”。

问天实验舱的太阳帆板面积大、柔性大，带着这样一对又大又软的“翅膀”进行交会对接，控制难度之高堪称空前。

问天实验舱与空间站组合体交会对接时，两只“翅膀”全部张开。为了避免对接产生的碰撞冲击损伤“翅膀”，此次太阳翼的展开分“两步走”共7个步骤进行，中间还会有一次“中场休息”，全程历时80分钟。展开、锁紧、再展开、再锁紧，凭借其“高可靠可重复展收”的硬核技术，问天实验舱太阳翼在太空中收放自如、刚柔并济，时刻确保电力“在线”。

此外，在半刚性太阳帆板控制基础上，航天科技工作者研制出抑制柔性太阳帆板振动的方法，用四两拨千斤的“中国功夫”，让问天实验舱在太空中平稳“翱翔”。

此前，我国航天器大多使用半刚性太阳帆板，2021年发射的空间站核心舱首次使用了柔性太阳帆板。半刚性太阳帆板的固有频率范围窄，算法简单易控制；柔性太阳帆板非常软，固有频率范围很宽，航天器上稍有同样的控制频率与它的固有频率重合，帆板就会被激发而振动起来。如果控制不好，每次“温柔一振”都可能对航天任务造成致命影响。

这就好比两个人用扁担挑水——会挑水的人，健步如飞的同时巧妙调整身体起伏频率和幅度，进而控制肩上扁担的颤动，令水桶里的水只泛起微小波纹。不会挑水的人，则没有掌握控制扁担的技巧，致使扁担上下抖动严重，水桶晃动厉害，行走速度也受扁担影响而忽快忽慢。回到家时，本来装满水的水桶，可能就只剩下半桶水了。

专家们就是通过类似的原理，控制航天器的姿态来抑制振动。虽然调整的幅度很小，发挥的作用却很大。首先，他们通过摄像机观察等手段，识别柔性太阳帆板的振动参数。然后，计算机通过相应的算法来确定航天器需要做出的姿态调整，并将命令下达给负责调整航天器姿态的执行机构。

虽然研制人员对国外抑制太阳帆板振动的技术细节知之甚少，但从实际控制效果来看，我们自主创新设计的这种控制方法，更适合中国航天器的“体质”。

空间站在轨建造完成后，天和核心舱的一个太阳帆板将转移到问天实验舱资源舱的尾部。这样一来，天和核心舱将“专心致志”进行空间站管理工作，问天实验舱将成为名副其实的“主发电站”，为组合体源源不断地供电送能。

问天实验舱舱内配置了多种科学实验设施，就像把一个大型科学实验室搬到了太空

问天实验舱的一大特点，就是配置了全新的出舱气闸舱。

在问天实验舱中，气闸舱的视觉效果十分独特。外方内圆的它，是空间站系统唯一一个看上去是方形的舱体。里面的圆柱状结构，是航天员开展出舱活动时的“更衣间”，航天员在这里作出舱准备和舱外返回时，可以更舒展、更从容。

未来，这里将成为整个空间站系统的主要出舱通道。

出舱气闸有一个直径达1米的大门。航天员从这里进进出出，不仅更加方便，而且还能携带大个头的设备出舱工作，舱外工作能力大大提升。

问天实验舱是空间站系统中舱外活动部件最多的舱体，大量的舱外设施设备更好地保障了出舱活动，也为更精细的舱外操作提供了支持。

出舱气闸外面的方形外壳，是舱外暴露实验平台，上面配置了22个标准载荷接口。未来，空间站搭载的科学实验载荷，可以通过机械臂精准“投送”到自己对应的标准载荷接口位置，“即插即用”，航天员不需要出舱进行人工操作了。

实施精准“投送”的机械臂，是问天实验舱携带的一套5米长的“小臂”。这套有着7自由度的机械臂小巧、精度高，方便抓取中小型设备，进行更为精细的操作。“小臂”还可以与核心舱的“大臂”联成15米长的组合臂，便于覆盖空间站的各个位置，开展更多舱外操作。届时，组合臂能够在空间站天和、问天、梦天三舱组合体之间活动，能控制的舱外范围更大。

以天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱为基本构型的天宫空间站完成建造后，意味着国家太空实验室将正式建成，并将开展长期、多领域、大规模空间科学与应用研究。

载人航天工程空间应用系统副总师、中科院空间应用中心研究员吕从民介绍，问天实验舱以生命科学和生物技术研究为主，在空间生命科学与生物技术、微重力流体物理、空间材料科学、空间应用新技术试验等领域规划部署了研究主题。通过这些科学项目的实施，关注生命生长发育和人的健康，探索人类长期太空生存所面临的一系列科学问题。

问天实验舱的舱内配置了生命生态实验柜、生物技术实验柜、科学手套箱与低温存储柜、变重力科学实验柜等科学实验设施，就像把一个大型科学实验室搬到了太空。

其中，两个生命科学实验柜和变重力科学实验柜是开展科学实验的场所；科学手套箱为航天员精细操作科学样品提供安全、高效的支持；低温装置用于实验样品在轨存储。

空间站里还会“种草”“养鱼”。吕从民说，生命生态实验柜以多种类型的生物个体为实验样品，将开展拟南芥、线虫、果蝇、斑马鱼等生物的空间生长实验，揭示微重力对生物个体生长、发育、代谢的影响，促进人类对生命现象本质的理解。

在轨期间，问天实验舱将上演一场惊心动魄的“太空泊车”大片

此次发射是中国空间站进入建造阶段后的第三次发射，也是这一阶段首次在有人状态下迎接航天器来访。

7月17日，天舟三号货运飞船完成全部既定任务，撤离空间站组合体。天舟三号撤离前停靠的对接端口，是空间站核心舱的前向对接口，也是问天实验舱的对接口。所以问天实验舱发射之前，天舟三号就要从组合体撤离，让出对接口，迎接问天实验舱的到来。

问天实验舱入轨后，顺利完成状态设置，于7月25日3时13分，成功对接于天和核心舱前向端口，这是我国两个20吨级航天器首次在轨实现交会对接，也是我国空间站有航天员在轨驻留期间首次进行交会对接。

如此大场面，“身经百战”的对接机构依然“驾轻就熟”。由于设计先进、安全可靠，对接机构完全可以适应未来空间站建造8吨到180吨各种吨位以及各种方式的对接。

整个交会对接过程历时约13小时。对接完成后，我国空间站以庞大的身躯继续在轨飞行，“养精蓄锐”迎接下一次大动作。

据介绍，在轨期间，问天实验舱将完成我国首次在轨大惯量转位动作——通过平面转位90度，让原本对接在节点舱前向对接口的问天实验舱转向节点舱的侧向停泊口并再次对接，从而腾出核心舱的前向对接口，为梦天实验舱的到访做好充分准备。

这将是我国首次航天器在轨转位试验，也是国际上首次以平面式转位方案进行航天器转位的探索尝试。转位过程中，问天实验舱将上演一场惊心动魄的“太空泊车”大片。

问天实验舱转位成功，是后续梦天实验舱发射的前提。梦天实验舱就位后，空间站运营阶段任务才能随之开启，天宫空间站才能真正宣告成功。

据航天科技集团五院空间站任务总设计师杨宏介绍，天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱，整体呈T字构型。也就是说，三舱位于同一平面，两个尺寸、质量特性大体一致的实验舱对向布置，形成“T”字的一横。

利用每个实验舱自身近20米长的结构，结合各自配置的双自由度太阳翼驱动机构，两对大型太阳翼成为“T”字一横远端的两个“大风车”。不管空间站以何种姿势飞行，太阳翼都能高效发电。两个实验舱的气闸舱分别位于“T”字一横的端头，正常工作泄压或异常隔离时均不影响其他密封舱段构成连贯空间，保证了安全性。

作为“T”字那一竖的核心舱，在这个对称关系中仍然保持着前、后、下三向对接的能力——后向对接货运飞船，使得组合体可以直接利用货运飞船的发动机进行轨道机动；前向、径向两个对接口不仅可以接纳两艘载人飞船实现轮换，而且可让载人飞船在轨道面内沿飞行方向和沿轨道半径方向直接对接，无需对接后再转换对接口。

对于航天任务流程而言，这样的“百变金刚”既美观又安全。

独家原创　第一视角

34号军事室