



“星舰”发射支持系统特点与分析

■ 北京中科宇航技术有限公司 冯国峰
 中国科学院力学研究所 杨毅强 胡小伟
 北京中科宇航技术有限公司 杨浩亮

2022年，太空探索技术（SpaceX）公司已建造完成了全新的着陆回收系统：在超重型助推器或“星舰”飞船返回着陆时，取消一级助推器着陆腿，通过机械臂采用“筷子夹”的方式把超重型助推器或“星舰”飞船接住，放回发射架。新的着陆回收系统可以有效缩短“星舰”飞船再次发射的周期。

一、“筷子夹”需求分析

超重型助推器在与“星舰”分离后，会像“猎鹰”9一样返回地面，“星舰”飞船继续完成入轨工作，驶向月球、火星等目的地。为了实现“星舰”飞船远航目标，需配合采用轨道停车太空加油的方式，同时，为实现超高速旅行和火星移民的目标，“星舰”每天需要执行多个航班，飞行间隔与飞机客机相当。

现有“猎鹰”9火箭着陆后需要运回火箭整修厂，翻新、更换、检测众多零部件，其中最关键环节之一就是整修着陆腿，整修工作需要大量时间。从发射周期考虑，“星舰”发射与回收采用了新的思路：剔除着陆腿，这样不仅能缩短周转时间，还可以大大减轻质量。“星舰”原始的方案是设计6条着陆腿，总质量约占整个火箭着陆时的10%。如果去掉着陆腿，唯一选项就是采用抓取火箭的方式，这需要极高的控制精度。与“猎鹰”9相比，超重型助推器一大优势是悬停能力，其配有32台“猛禽”发动机，可选的动力组合更加丰富，相比“猎鹰”9火箭，更容易将推重比稳定在1，这意味着可以在发射塔上保持悬停，并且有足够的时间调整飞行路径。SpaceX公司设想火箭靠近发射塔时，利用巨大机械臂抓住超重型助推器，将其放回发射架，然后准备下一次飞行。

超重型助推器的关键点是与抓取机械臂对接的栅格翼下方的承重点，需要承载整个助推器质量，并保证火箭的稳定。同时，通过火箭结构减负与安装在机械臂上的减震装置配合，实现稳定回收，避免重大整修。

二、“筷子夹”地面系统方案介绍

“星舰”着陆回收地面系统核心设施为星舰塔，星舰塔由轨道发射集成塔和轨道发射架两部分组成。

（一）轨道发射塔方案介绍

轨道发射集成塔高约145m，包括1个快速断开臂和由2个机械臂构成的抓取机械臂，抓取机械臂被称作“筷子”（Chopsticks）。发射塔有4根支撑柱，其中抓取机械臂的基座固定在靠近发射架的3根支撑柱上，占有2个面，同时是可升降的，不可升降的快速断开臂



图1 星舰塔与超重型“星舰”合体

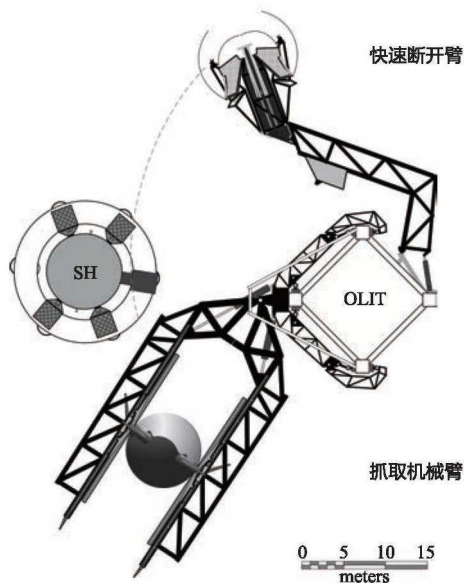


图2 轨道发射集成塔

则固定在余下的1个支撑柱上。

快速断开臂的作用是为“星舰”飞船加注推进剂，并充当助推器稳定器；快速断开臂上配置有快速断开（QD）装置，发射前与“星舰”飞船进行对接，进行发射前推进剂的加注。

抓取机械臂长36m，高18m，由2个机械臂配合开

展工作，从而接住“星舰”飞船或超重型助推器，经过水袋负重测试，机械臂最大负载可达700多吨。抓取机械臂通过塔底的一个超大型绞车系统驱动，可沿塔架上的轨道上下移动。同时，通过液压油缸的伸缩动作带动机械臂实现打开和合拢。另外，为保持稳定，机械臂安装了液压缓存机构，用于在提升或回收助推器和“星舰”飞船时，承载分散一部分冲击力。



(1) 快速断开臂



(2) QD 装置



(3) 抓取机械臂



(4) 机械臂液压油缸

图3 轨道发射集成塔组件

(二) 轨道发射架方案介绍

轨道发射架是整个“星舰”飞船在发射前的固定位置，用于支撑和装载“星舰”飞船和超重型助推器。发射架由一些重要部分组成，包括QD快速断开装置、压紧释放装置及喷水系统。发射架顶部设置了一个QD快速断开装置，在发射之前为助推器加注。QD快速断开装置将为助推器提供液态甲烷、液氧和氦气等，并在发射前提供外部电源，该装置将在发射时与助推器断开连接。QD快速断开装置包括各种重要的接口，液氧和液体甲烷的主加注和泄出口及备用加注口，氧气、甲烷、氮气、氦气口和电路口等。轨道发射架上设置有20个单独的释放装置，带有钳夹和可伸展的承托及小型的QD端头，这些释放装置连接到助推器的底部，用于静态点火测试和轨道发射。

为了“星舰”飞船有更多的运载能力，减轻助推器的质量，SpaceX去掉了助推器外圈20台发动机的自启动能力及所需的设备。而每台发动机发射前都需连接各种气体、推进剂和电源等，同时还应该在发射时断开，因此，除了发射台上的主QD装置，还在内圈设置了一圈专门针对外圈发动机的20个小型QD端头。

轨道发射架上配置有喷水系统，用于发射时降低噪音和突发情况下灭火，喷水系统喷出水柱经过高温高速燃气的吹气膨胀后，会形成很好的水雾环境，用来吸收声波能量。

(三) 对接与发射流程

1. 对接流程

发射塔将“星舰”飞船与助推器合体对接，具体



图4 轨道发射架



图5 发射塔提升“星舰”飞船

步骤可分为以下两步：

第一步，将超重型助推器放置在发射架上。助推器通过运输平台运输到指定位置，发射塔快速断开臂水平展开让出空间，抓取机械臂调整到合适高度，机械臂顶部对准助推器栅格翼下方两侧主承重点的托握结构，然后机械臂合拢；接着机械臂下方的两个延伸段延伸固定到助推器两侧的辅助稳定插口，实现四点支撑稳定箭体；稳定后，2个机械臂上升到一定高度，旋转对准发射架，将助推器放下。

第二步，完成“星舰”飞船与助推器对接。助推器稳定后，抓取机械臂打开并升高，然后侧转绕过助推器，对准旁边的“星舰”飞船，并下降到一定高度；当抓取机械臂达到“星舰”下方接近起重位置时，合拢托住“星舰”飞船，将“星舰”飞船升至高于助推器的高度。同时，快速断开臂旋转到指定位置，伸出稳定机构，辅助稳定助推器。接着抓取机械臂水平旋转，将“星舰”放置在助推器上方，完成“星舰”飞船和助推器的对接。由于“星舰”飞船的承重点与助推器不同，并非如助推器突出的托握点，而是两个带有调整区的圆孔，抓取机械臂两臂上方对应的是可翻转的定位销，定位销准确插入调整圆孔中，从而支撑稳定“星舰”飞船。

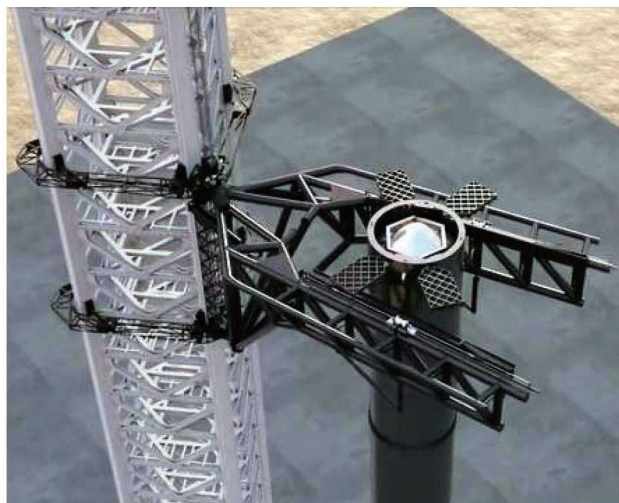


图6 抓取机械臂回收助推器

2. 回收过程

发射塔回收助推器时，抓取机械臂将旋转到发射架的另一侧。由于助推器并不直接降落在发射架上方，而是在发射架的侧面被抓取，这样可以避免因抓取失误而砸坏发射架。助推器着陆时将使用9台发动机，在大约800m的高空时将关闭6台发动机，留下3台发动机工作，这3台发动机将使助推器保持垂直姿态。在离地面大约65m的高度，将剩余的3台发动机关闭2台，当助推器2/3的部分落到机械臂之下时，助推器悬停，机械臂靠拢。机械臂将通过助推器栅格翼下突出的托握点和两侧的辅助稳定插口，从而稳定助推器。最后，机械臂旋转，将助推器放置到发射架上。“星舰”飞船回收过程与助推器回收过程相似，不再赘述。

三、结束语

SpaceX公司希望通过这套新型的着陆回收系统，缩减“星舰”飞船发射周期，使其可以接近飞机航班周期，降低发射成本，加快发射速度，从而实现星际移民。目前，这种新型着陆回收系统初次回收使用时间待定，如果未来这种新型地面着陆回收系统能够成功发挥作用，将是地面支持技术的一大突破。中国航天