

回收火箭的重要意义与关键技术

庞之浩

北京空间科技信息研究所 北京 100086

2015年12月22日,美国太空探索技术公司(Space-X)用猎鹰-9火箭成功发射了轨道通信公司的11颗小型通信卫星。这不仅是猎鹰-9火箭自2015年6月28日发射失败以来的首次发射以及升级版猎鹰-9火箭的首次使用,更重要的是猎鹰-9火箭在世界上首次成功进行第一级有动力垂直回收(图1),从而在人类历史上率先验证了轨道运载火箭的回收技术,为未来打造可重复使用运载火箭,大大降低运载火箭发射成本奠定了重要技术基础。



图1 升级版猎鹰-9火箭的第一级成功着陆

回收火箭意义重大

众所周知,目前的运载火箭都是一次性使用的,长久以来航天发射成本居高不下,发送质量1 kg物质上天的成本约为1~2万美元,大大影响了人类开发太空的规模和效益。比如,作为目前世界上最便宜的猎鹰-9火箭总造价约为5000多万美元,而其推进剂的成本只有20万美元。因此,如能够回收火箭,经过简单维修后再重复使用,则可以极大降低发射成本。Space-X自设计之初就一直在研究如何回收以及重复使用猎鹰-9

火箭的有关技术。如果能回收并可低成本重复使用猎鹰-9火箭的第一级,可降低火箭成本80%;如果第一二级火箭都能回收并低成本重复使用,则可降低火箭成本的99%。Space-X总裁马斯克曾表示,可重复使用火箭将使空间探索成本降低两个数量级。

另外,回收火箭还能保障地面人员和财产的安全,避免火箭残骸落入民居损坏财物甚至伤人。如果最终能够研制出低成本的可重复使用火箭,也意味着届时可以设计出比现在便宜得多的卫星,而不必再花费大量资金来确保其长寿命的工作状态——如果卫星坏

了,再发射一颗填补空缺便是。

美国政府在“三角快帆”等垂直起降重复使用验证机相继失败后,更多地关注试验性太空飞机-1等带翼水平返回的重复使用技术方案。此次Space-X在这一技术方案上的成功可能会很大程度上影响到未来重复使用技术发展的方向。

当然,首次成功回收火箭第一级是研制可重复使用火箭的第一步,以后还需多次试验,由成功变为成熟;接着,还要突破和掌握回收第二级技术;最后是突破和掌握经过低成本维修后的重复发射技术。

至今,载人航天最大瓶颈之一就是成本太高,因而限制了进入太空的人数。从长远看,如果低成本可重复使用的火箭技术取得实用性进展,就能大大加速人类进入太空的步伐,使人类探访甚至移居其他星球的梦想成真。

猎鹰-9的升级改进

猎鹰-9火箭由Space-X从2002年开始研制,设计理念是简化结构,将故障消除或最少化;主要特点是高可靠、低成本和快响应;最终目标是打造成世界第1种二级可重复使用运载火箭。

它是一种采用液氧/煤油作为推进剂的两级火箭,总高68.4 m,直径3.7 m,有3种构型,一种安装5.2 m直径整流罩,用于发射卫星;第2种用于发射“龙”飞船;第3种是大型运载火箭,即在猎鹰-9的基础上捆绑2台液体助推器(由猎鹰-9第一级改进而成),用于发射大型航天器。猎鹰-9系列火箭的近地轨道运载能力9.9~32 t,地球同步转移轨道运载能力4.9~19.5 t。

该火箭的第一级安装了9台隼-1C发动机,目的是在第一级火箭飞行过程

中,即使单台发动机从始至终未能点火工作,或在第一级工作末期多台发动机关机时,猎鹰-9火箭仍能完成发射任务,这是一大创新,并已被实践证明是可行的。

Space-X的发射操作原则是显著地减少操作人员以及在发射场消耗的时间,所以发射猎鹰-9火箭时操作既简单又高效,并具有较高的成本效率。其标称的发射操作时间为16天(从火箭运抵发射场开始)。

该火箭不仅已用于发射“龙”货运飞船,还用于发射多种商业卫星。由于价格便宜、可靠性高,能以每次5000~6000万美元的发射价格支持航天发射任务,所以猎鹰-9火箭现已获得大量航天器发射订单,供不应求,甚至将发射美国军用卫星。

2015年12月22日发射的是首枚升级版猎鹰-9,其主要改进的地方是:第一级增加了液氧箱和煤油箱的长度,提高了推力;第二级延长了0.5 m,用于增加推力,减轻第一级的工作负担,以便回收第一级;火箭总高度增加了约1.5 m,达到70 m;第一级发动机改用推力增加了16%的隼-1D,每台隼-1D海平面推力为756 kN,真空推力为825 kN;第二级发动机改用推力增加了17%的隼-1D Vac,其真空推力为935 kN;加注的液氧温度降低到了-207℃(比液氧的沸点-183℃还要低)通过降温提高推进剂密度,可以将液氧的加注量提高8%~15%,从而提高了火箭的运载能力;煤油的温度也从室温降至-7℃,在粘度不影响燃料特性的前提下,其密度提高2.5%~4%;火箭第一级和第二级之间的级间连接也进行了改进,以容纳新型发动机真空喷嘴,具有一个中心推杆,以辅助级间分离;火箭总推力提升了约30%;使火箭可将更重的通信卫星送至地球同步转移轨道,并仍留有足够的推进剂以执行着陆回收试验。

火箭回收的3种方案

火箭的回收方式一般有3种方案。

第1种是降落伞垂直下降方案,即在火箭分离后先进行空中制动变轨进入返回地球大气层的返回轨道,接着在低空采用降落伞减速,最后打开气囊或用缓

冲发动机着陆。这种方案与回收飞船返回舱和返回式卫星类似。

第2种是动力反推垂直下降方案,其空中变轨制动同第1种,但在低空采用发动机反推减速,以垂直下降方式降落地面,美国猎鹰-9火箭采用的就是这种方案。

第3种是滑翔飞行水平降落方案,即箭体采用翼式飞行体,在变轨制动后,火箭像飞机一样水平降落返回地面。这种方案又分为有动力和无动力两种,后者完全依靠翼身的气动力滑翔飞行(与美国航天飞机着陆类似),而前者是采用装有涡喷发动机的翼式飞行体,在返回地面过程中启动涡喷发动机进行巡航机动飞行,可实现更大范围的回收区选择(与苏联暴风雪号航天飞机着陆类似)。

中国运载火箭技术研究院也一直致力于火箭回收技术的研究。2015年11月下旬,该院成功完成了运载火箭子级回收群伞空投试验,这标志着我国运载火箭在部段回收技术上取得了新的进展,离实现可重复使用又近了一步。中国运载火箭技术研究院拟采用降落伞垂直下降方案来回收火箭。未来,火箭的芯一级还将增加“返航”设计,通过携带供自身返回的燃料,自主飞回预定区域,以备重复利用,从而降低运载火箭的发射成本。

美国航天飞机是目前世界上唯一实现可回收并能部分重复使用的航天运输器。它由助推器、轨道器和外贮箱3大部分组成。助推器相当于运载火箭的第一级,它在分离后飞行速度不大,所以没进行空中变轨制动,回收采用降落伞垂直下降方案。轨道器相当于运载火箭第二级,飞行速度较大,在返回地球大气层之前进行了变轨制动来降低飞行速度并改变飞行方向(调整姿态返回),航天飞机轨道器是翼式飞行体,回收采用无动力滑翔飞行水平降落方案,它能像飞机一样水平滑翔降落于预定回收地点的机场跑道上。外贮箱是一次性使用,不回收。虽然美国航天飞机在回收技术上取得了巨大成功,但风险大、费用高。

其实,在航天活动中进行回收的思路和做法并不新鲜,人类已经进行过大量的回收活动。航天飞机和宇宙飞船都

是回收的,因为载人航天必须回收。美国曾发射过135架次航天飞机,成功回收133架次,苏联也回收过1次无人暴风雪号航天飞机。美苏都多次回收过大量载人飞船,只失败过2次,我国成功回收了所发射的10艘载人飞船。货运飞船大部分是不回收的,只有美国的“龙”飞船是回收的,因为它要带回一些实验样品来。

各类返回式卫星也是回收的,美苏都多次回收过返回式卫星,我国曾成功回收过22颗返回式人造卫星。返回式遥感卫星现在用得很少,目前主要用传输式遥感卫星,但是现在又有人提出研制可重复使用返回式卫星,因其会大大降低成本。返回式卫星可用于科学实验,有些生命科学实验等在太空停留时间不能太长,要在空间站上进行,返回一次时间比较长,所以这种短期实验用返回式卫星比较合适。

但是,由于尺寸、外形等原因,回收火箭的难度要远大于航天飞机、宇宙飞船和返回式卫星的回收。因为火箭外形细长,不好控制其姿态。

火箭回收的关键技术

早在20世纪90年末,美国麦道公司就开始用“三角快帆”(图2,又叫“德尔他快帆”)飞行器试验动力反推垂直下降技术。“三角快帆”是世界上第1个以火箭发动机为动力、垂直起降的完全重复使用运载器。它进行了4次飞行试验,最大飞

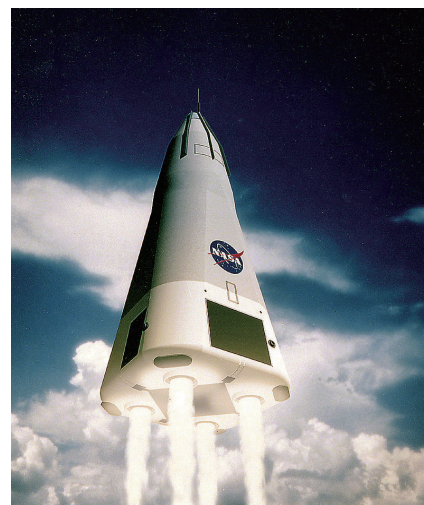


图2 世界上第1个以火箭发动机为动力、垂直起降的完全重复使用运载器“三角快帆”

行高度3155 m,然后像直升机一样,用4台小发动机反推减速,最终达到平稳着陆的目的。后来由于在第4次飞行试验中“三角快帆”被烧毁,使该计划提前结束。不过,“三角快帆”的垂直起降试验表明,火箭采用动力反推垂直下降技术是可行的。然而,要实现火箭的动力反推垂直下降,需攻克几项关键技术。

一是控制火箭姿态和落点精度技术。火箭在返回过程中,需要对其姿态不断进行控制,这对火箭的可操控性和稳定性要求都很高。越是细长的东西,越不好控制其姿态,要使细长的箭体垂直精确着陆在指定地点就更难。其主要表现是:在返回过程中,火箭各级再入速度大,在5~20 km高度经过“大风区”时,会受到较大干扰。即使火箭具备控制能力,“大风区”的干扰对子级返回过程的姿态控制仍然是一个挑战。克服了来自“大风区”的干扰,火箭在着陆前的垂直姿态控制仍是难点。在火箭着陆前,姿态控制系统需要将火箭调整为垂直姿态,尽量减少各种干扰对着陆过程造成的影响。

在返回过程中,猎鹰-9通过箭上的液氮推力器来调整姿态,以应对气动扭矩和旋转的影响,使其几乎没有任何滚转,在降落过程中一直与地面保持垂直状态。有人形容其难度犹如“在狂风中让一根扫帚平稳地直立手掌上”。其箭体上有4个可展开的栅格翼,在起飞时保持收起并在再入大气层时打开。它用于增强火箭返回地球时的稳定性,通过GPS卫星制导来协助控制火箭朝着陆地降落,使其最终落地的精度在10 m左右。每个栅格翼的滚转通道和倾斜通道都是相互独立的,通过开式液压系统作动,液压油从高压贮箱流经作动机构后直接排出箭体外部,可以在大气飞行过程中利用气动力进行姿态稳定控制,以控制滚转、俯仰和偏航,协助控制火箭在平台上精确着陆。

二是火箭发动机推力可调和多次启动技术。为了动力反推,火箭要多带一些燃料。在第一级返回的不同高度,火箭质量会随着燃料快速消耗而明显减小,所以其反推发动机需要采用不同大小的推力,以实现软着陆。大范围调节

发动机的推力,对发动机燃烧、涡轮泵、阀门等各组件要求较高,需要实现较宽范围推力调节的发动机系统配置。发动机推力调节范围以及偏差要求与调节阀门的动作精度直接相关。此外,阀门还必须适应较高的混合比偏差控制。猎鹰-9是通过部分主发动机3次点火制动来减速的。在火箭主发动机的控制软件中设置了矢量推力点,它能控制火箭的下落速度。

三是再入隔热技术。运载火箭外形为圆柱体,不是流线形,所以在再入返回时会比流线型设计的飞船和返回式表面温度更高,空气流会在火箭表面摩擦产生大量热能,这就要求火箭的材料要具备耐超高温和气流冲刷的特性。由于返回过程时间长,气动热很容易进入火箭内部,对内部各种仪器设备的热防护措施提出了严峻考验。未来,对于要求回收速度更快、飞得更高的第二级火箭,其隔热技术是个严峻挑战。

四是着陆支架技术。在火箭回收过程中,必须使用着陆支架来减缓着陆时的冲击过载,使火箭稳定着陆。着陆支架要有很好的强度和缓冲功能以及倾斜姿态及水平速度适应技术,从而保证着陆的稳定性。由于着陆支架靠近火箭发动机,因此,它还需具有较高的热防护性能要高。

本次猎鹰-9第一级的具体回收过程如下:

当猎鹰-9火箭第一级发射约3分钟(约80 km高)与第二级分离,速度为10马赫,它滑行至140 km的最高点。分离后,第二级发动机点火持续约7分钟,以达到轨道速度,然后与有效载荷分离。与此同时,分离后的第一级采用低温氮气推力器进行姿态控制,使第一级摆脱第二级的尾焰羽流,并使48 m高的第一级调转方向,从而使第一级发动机保持正确的点火方向,以返回着陆场。

在发射后4.5分钟,第一级第一次重启部分主发动机,以降低第一级的降落速度,并控制与着陆点之间的距离,使其能够降落到距离在距发射场不到10 km处。进入大气层后,第一级进行第二次点火,持续大约20秒,高度约为70 km。通过点火反推和大气层的阻力,速度从

1300 m/s降至250 m/s。在再入大气层过程中,由于第一级底部较重(带有发动机),会保持发动机向下的姿态,而发动机热防护罩经过处理能够经受住再入的热环境。在着陆之前,第一级的中心发动机进行第3次点火,将第一级速度降至2 m/s。另外,在第一级着陆前10秒,安装在第一级底部的四个着陆支架要打开,它由碳纤维材料和铝合金蜂窝板制成,高约7.62 m,总质量为2.1 t,跨度约为21.336 m,带有液压减震器,可进一步减少垂直着陆时的巨大冲击,从而在回收平台上软着陆。在飞行过程中,支架收起附着在箭体上并覆盖了气动外壳降低阻力。在着陆时,支架展开以提高稳定性,减缓冲击。支架的展开动作依靠高压氮气作动的气动系统实现。着陆后8秒内,箭上计算机仍要不断传回信号,直至第一级呈现水平状态时为止。在再入开始阶段,第一级火箭会用4个栅格翼进行滚转、俯仰和偏航控制,保持第一级的稳定。

值得注意的是,采用动力反推垂直下降来回收火箭是需要增加一些成本和损失一些发射航天器质量为代价的。另外,回收后是否能够只需经过简单维修和加注燃料就可再次发射是一个更大的挑战。如果维修成本太高,就达不到大大降低火箭发射成本的目的,可部分重复使用的美国航天飞机就是一个典型例子。

航天飞机的轨道器可重复使用100次,轨道器上的主发动机可重复使用50次,航天飞机的固体助推火箭可重复使用20次,其外贮箱是一次性使用的。美国原设想通过航天飞机轨道器和固体助推器的重复使用,使航天飞机的每次发射费用降至3000万美元,但航天飞机每次飞行回来后要耗费巨资维修才能重新上天,使其每次发射费用高达4亿美元之上,没能降低成本,不得不提前退役。

它也表明,能够回收运载火箭不代表一定可以重复使用运载火箭,重复使用运载火箭不代表一定可以降低成本。因此,未来还要攻克另一大难关,即火箭回收后只需经过简单低成本维修和加注燃料就能重复使用才行。目前的运载火箭发动机都是一次性使用的,所以必须

研制出可重复使用的火箭发动机,且每次回收后的维修成本和时间必须很少才行,这是极大的挑战。火箭发动机能够重复使用10次比较合算。重复使用次数太多,总成本降低得不太明显,但技术难度会显著增加。

猎鹰-9为什么能够成功

2015年1月和4月Space-X回收猎鹰-9第一级火箭的试验都宣告失败。2015年1月10日,猎鹰-9火箭在向“国际空间站”的货运任务中试验回收火箭第一级技术。第一级火箭在发射后,落向大西洋海上着陆平台(图3),虽然准确命中目标,但由于下降速度过快,导致火箭在甲板上发生爆炸。

2015年4月14日,猎鹰-9火箭在向“国际空间站”的货运任务中试验回收火箭第一级技术,虽然第一级火箭准确着陆在海上回收平台甲板上,但由于横向速度过大,火箭未能在甲板上稳稳站立,最终导致倾覆爆炸。

不过这些都没影响Space-X尤其是马斯克继续试验的决心。上述2次试验失败的原因分别是火箭的栅格翼用光了液压控制油以及节流阀响应滞后,使48m(约14层楼高)的火箭第一级没有受到充分控制,在着陆时翻倒并撞向海上回收平台,但火箭的第一级在从太空返回地面时能够得到精确控制,着陆时的精度在10m以内。该平台全称为“自主航天港无人驾驶船”(ASDS),面积为91m×52m,备有压载水舱和经改造的水下推进器,以保持其在大西洋中的位置。这个在深海石油钻井平台基础上改进而成的平台即使遇到风暴,其位置保持精度也能控制在3m以内。

为了确保成功,2015年12月的回收试验中又进行了多项改进。例如,采用了升级版猎鹰-9执行发射任务,它比此前的猎鹰-9增加了30%的动力,从而可在发射有效载荷后,仍有较大动力使火箭第一级在着陆平台上降落并回收。放弃了之前在海上回收平台上回收的做法,改为在陆地上回收,因为陆地回收面积大,回收精度要求低,且稳定不晃动,气象条件更好,能明显降低回收难度,但由于距离较远,火箭回收时所消耗的燃

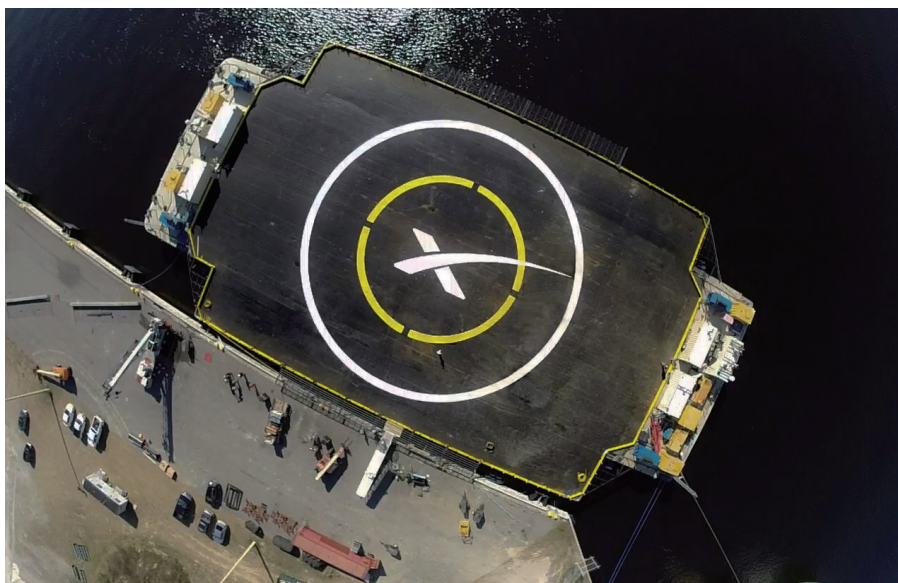


图3 回收猎鹰-9火箭第一级的海上浮动回收平台

料较多,使成本增加。回收着陆场是Space-X从美国空军租赁的卡纳维拉尔角已退役的发射场,该着陆场在过去被称为发射综合设施-13,Space-X将其重新命名为着陆综合设施-1。固定平台已标记上X标志,作为着陆点。

这次猎鹰-9第一级回收成功与美国另一家民营航天企业蓝色起源公司有一定关系,因为蓝色起源公司的“新谢泼德”亚轨道运载火箭于2015年11月23日率先实现了回收。对比传统一次性火箭,“新谢泼德”推进段增加了环形和鳍形稳定翼,多个减速板和液压系统驱动的尾翼,尤其是尾翼可在约4马赫的高速下工作,保证下降过程中的稳定性。

不过,从技术角度来看,猎鹰-9的回收比“新谢泼德”复杂得多,因为猎鹰-9又细又长(有助于减少火箭飞行时的阻力),达48m,而“新谢泼德”显得身材粗壮,只有20m长,长细比越大,控制难度就越大;猎鹰-9是用于发射宇宙飞船和人造卫星的轨道火箭,而“新谢泼德”只是一种类似探空火箭的亚轨道火箭,没有发射航天器进入轨道的能力,主要用于开展亚轨道商业太空旅游体验,所以猎鹰-9比“新谢泼德”在推力、速度和高度等高许多(飞行高度高2倍,推力大15倍)。马斯克指出:进入太空与进入轨道是不同的,“新谢泼德”进入太空只需3马赫左右的速度,猎鹰-9进入地球同步转

移轨道则需要30马赫左右的速度。二者的能源需求也大不相同,进入太空需要9个单位的能量,进入地球同步转移轨道需要900个单位的能量。即使这样,“新谢泼德”的回收成功也给Space-X带来了前所未有的压力,迫使Space-X对猎鹰-9的回收进行了较大改进,降低回收难度,最终获得了成功。

有关回收运载火箭以及最终研制重复使用火箭一直存在争议。例如,有些人担心猎鹰-9重蹈航天飞机覆辙。当年研制航天飞机的初衷也是通过研制可重复使用航天器来降低费用,然而航天飞机技术和维护的极度复杂性让这种成本节约的初衷成为泡影。欧洲咨询公司的维兰认为:“火箭发射市场的客户们并不关心火箭的可重复使用性,他们要的是在尽可能便宜的情况下实现高可靠的发射服务。”她说:“可重复使用性是服务提供方面面临的问题,而不是客户面临的问题。卫星运营方一般而言只有3个大的要求:按时、保质、价格合理。”美国洛马公司发射服务部主管克利夫表示,回收火箭是一个天方夜谭。因为回收火箭涉及材料科学、控制,还涉及运行效率。关键是要回收任何物质,就得把更多的物体和重量发射入轨。这必须对物理定律做更多研究才能做到。

而马斯克有十分远大而坚定的梦想,百折不挠的强大意志力,终于使

Space-X 回收运载火箭的试验迈出了坚实的第一步,成功地搅动了火箭工业界。其实,即使不重复使用,猎鹰-9的发射成本也很低,并可提供全套的发射服务,包括任务综合费用、发射场费用和附加费用。这些已让传统火箭发射的供应商感到威胁,为此欧洲已决定开始研发下一代新型火箭阿里安-6,以提供具有竞争力的价格,但该火箭仍是一次性使用的。如果今后猎鹰-9可以重复使用了,那么一切都不在话下。回收火箭究竟是天方夜谭还是一种可以实现梦想呢?也许现在是天方夜谭,将来未必。

Space-X 的未来计划

2016年1月,猎鹰-9将把SES-9卫星送往较高的地球同步转移轨道,这要求火箭携带更多的燃料。因为燃料余量的关系,到该火箭的第一级很可能仍在距离较近的海上回收平台上进行回收试验。相较于在陆上着陆,海上着陆的情况要复杂得多,能否成功再次回收很难说。

2016年第2季度,Space-X将发射近地轨道运载能力达53 t的首枚“猎鹰重型”(图4),并进行第一级火箭与助推器的回收试验。这对未来耗资巨大的载人火星飞行、地外星球表面火箭重复利用等至关重要,因为如果回收成功并能低成本重复使用,则可以大幅降低载人火星任务的成本,将总开支降低1~2个数量级。

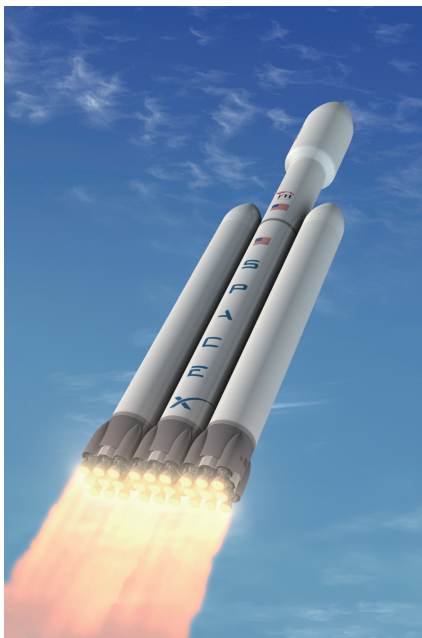


图4 将于2016年发射的“猎鹰重型”示意图

一旦“猎鹰重型”火箭成功发射并回收,Space-X可能会在2016年公布其载人火星计划。相比美国航空航天局公布的2035年实现载人火星登陆,Space-X要抢先一步,在2025年实现载人登火星,马斯克本人也想登陆火星。

今后,Space-X还将试验回收猎鹰-9火箭第二级的技术。其第一级由亚轨道垂直返回,由于第二级飞得高,速度更快,回收再入大气层时需要热防护系统保护才行,所以回收难度更大。另外,第二级只有一台发动机,回收是否合算也需考虑。

在研制“猎鹰重型”火箭成功后,Space-X还将研制更为强大的火箭——“超级猎鹰”,其运载能力将是“重型猎鹰”的3倍,达170多吨。借助这种火箭,无论是重返月球、进军火星或者其他更远天体都没有问题。

Space-X正在采用创新设计和技术研制可以客货两用的“龙”飞船,这样设计的好处是可以降低风险、节约成本。因为该公司可先通过发射多艘载货型“龙”飞船来掌握飞船的主要技术,降低研载人型“龙”飞船的研制难度和风险,并及早获得商业利益(它还是目前唯一可以返回的货运飞船,因而能带回一些空间站上的实验样品等)。然后以此为基础,花较少的费用和时间就能研制出载人型“龙”飞船。为了确保“龙”飞船能快速从货运舱转换成乘员舱,除了乘员逃逸系统、生命保障系统和允许乘员利用飞行计算机控制船载控制系统外,载货型“龙”飞船的货舱和载人型“龙”飞船的乘员舱在结构上几乎是相同的。另外,未来的“龙”飞船另一大特点是不像目前的飞船只能使用1次,而是可重复使用10次。载人型“龙”飞船将于2017年为“国际空间站”提供商业乘员运输业务。

马斯克在2015年宣布要做由4000多颗小卫星组成的太空互联网,以满足全球所有人的移动通信需求。虽然能否实现还不得而知,但这种敢想敢做的科学探索精神很值得钦佩。

(责任编辑 李娜)