

Analysis of New Glenn Launch Vehicle and its Comparison with Falcon Heavy

“新格伦”火箭简析及其 与“猎鹰重型”火箭的对比

■ 胡冬生 郑杰 吴胜宝 （中国运载火箭技术研究院研究发展中心）



随着航天技术的不断发展和成熟，全球发射市场对低成本商业运载工具的需求越来越迫切。在21世纪商业航天迅猛发展的背景下，美国涌现出了多家私营航天企业，其中的佼佼者除了伊隆·马斯克的太空探索技术公司（SpaceX）之外，要属由亚马逊公司CEO杰夫·贝索斯于2000年9月投资创立的蓝源公司（Blue Origin）了。该公司在2015年11月到2016年10月之间用同一枚“新谢泼德”（New Shepard）运载器成功实施了5次飞行和回收试验，并计划在2020年前发射“新谢泼德”亚轨道载人飞船。同时，蓝源公司也在研制可重复使用轨道火箭，承担轨道旅游以及商业、政府载荷的发射业务。2016年9月，蓝源公司正式公布了其正在研制的“新格伦”（New Glenn）运载火箭系列，以美国第一个进入地球轨道的航天员约翰·格伦命名；2017年3月，蓝源公司又公布了“新格伦”火箭的更多细节，包括运载能力和火箭重复使用次数等，并透露已经与欧洲通信卫星公司（EUTELSAT）签署了一份2021年的卫星发射合同。

1 “新格伦”火箭方案

总体方案概述

“新格伦”火箭包括两级与三级构型，高度分别为82.3m和95.4m，箭体直径7m，可用于执行近地轨道或更远轨道的商业卫星发射和载人飞行任务。两型火箭的一子级均采用7台BE-4液氧/甲烷发动机，地面总推力为1743t；二子级采用1台真空型BE-4发动机，喷管更长；三级构型火箭的三子级采用一台真空型BE-3发动机，推力为68t。该火箭两级构型可将45t载荷送入近地轨道，三级构型可将13t载荷送入地球同步转移轨道。

火箭一子级在发射分离后可垂直返回至海上驳船并回收使用，设计重复使用次数可达100次，二子级和三子级均为一次性使用。该火箭于2012年开始设

计工作，2016年9月完成缩比模型的风洞试验，预计2020年左右开展飞行试验。

“新格伦”火箭研制完成后，将从位于佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地的36号发射台发射，该发射台1962-2005年主要用于“宇宙神”（Atlas）运载火箭发射。“新格伦”火箭制造基地已开始动工，占地 $7\times 10^4\text{m}^2$ 。

发动机方案

蓝源公司的发动机产品系列主要有BE-1~4，分别配套于自主研发的戈达德（Goddard）缩比验证机、“新谢泼德”运载器和美国联合发射联盟公司（ULA）的“火神”（Vulcan）火箭等。应用于“新格伦”火箭的是BE-3、4发动机。

“新格伦”火箭的主发动机BE-4于2011年开

“新格伦”火箭主要参数			
项目	一子级	二子级	三子级
箭体直径/m	7		
发动机	BE-4	BE-4（真空型）	BE-3（真空型）
发动机数量	7	1	1
推进剂类型	液氧/液态甲烷	液氧/液态甲烷	液氧/液氢
地面推力/t	7×249	—	—
真空推力/t	—	>300	68



两级 三级 可回收
构型 构型 一子级

▲ 最早公布的“新格伦”系列火箭



▲ “新格伦”火箭一子级在海上驳船垂直回收

始研发。该发动机的最大特点是采用液态甲烷作为燃料，循环方式为富氧分级燃烧，燃烧室压力13.4MPa。液态甲烷价格实惠，与煤油等其他火箭燃料不同，其可对火箭的推进剂贮箱进行自生增压，而无需使用昂贵且复杂的增压系统，如氢气增压系统，并且也不会产生煤油燃烧后的副产物，可简化发动机重复使用时的处理程序。BE-4发动机同时也是美国“火神”火箭一级发动机的首选方案，将替代目前宇宙神-5火箭使用的俄制RD-180发动机，预计2017年具备飞行试验条件，可满足“火神”火箭2019年首飞的要求，“新格伦”火箭二子级发动机是其真空状态。BE-4发动机研制成功后，将成为世界上第一款投入工程应用的采用液氧/甲烷推进剂的火箭发动机。

三级BE-3发动机推进剂为液氢和液氧，发动机地面推力50t，可多次点火及重复使用，具备18%~100%的节流能力，相关技术已在“新谢泼德”运载器上得到了成功验证。用在“新格伦”火箭三子级上的是其真空状态，需针对真空飞行及一次性使用的需求进行适应性改进。2016年1月，美国空军向轨道-ATK公司拨付资金，用于为BE-3真空状态发动机研制可延伸喷管，从而增强其在真空的工作性能。



▲ 首台组装完毕的BE-4发动机

2 “新格伦”火箭方案特点

继承已有研制经验以加快研制进度

蓝源公司自成立以来，先后研制了数款发动机和亚轨道运载器，并进行了多次飞行试验，尤其是“新谢泼德”运载器的5次成功飞行和回收，为“新格伦”火箭的方案设计及研制提供了重要参考。在“新格伦”火箭的各系统中，BE-4作为美国联合发射联盟公司“火神”火箭的首选发动机，正在进行各类测试试验；BE-3发动机已成功应用于“新谢泼德”运载器；一子级所采用的子级回收及重复使用技术与“新谢泼德”运载器类似，已经得到了数次飞行试验的验证。所有这些研制经验，都将有助于推进“新格伦”火箭的研制进度。

一子级重复使用以降低成本

为了有效降低火箭成本，“新格伦”火箭一子级BE-4发动机采用了液态甲烷燃料，并对一子级进行回收重复利用的方案设计。甲烷推进剂获取方便，价格低廉，同时燃烧较少结焦，易于维护和再次使用。此外，火箭一子级多达100次的重复使用次数，可有效均摊火箭的研制费用，降低发射成本。

简化动力方案以降低研制难度

“新格伦”火箭主要采用BE-3、4两型发动机。其中BE-4发动机用于一子级和二子级，分别采用地面状态7台并联和真空状态单台工作，从而以一种发动机型号实现了两级火箭构型，这与太空探索技术公司猎鹰-9（Falcon-9）火箭的设计理念是相同的。该方案一方面有利于降低大推力发动机的研制难度，另一方面在一子级垂直返回过程中更容易实现较小的推力，以精确控制落点位置。同时，一、二子级使用基本相同的动力系统有利于实现火箭制造、测试及发射工作的产品化和标准化，可降低火箭成本。根据具体任务需求，BE-3可选配作为末级发动机，有助于提高火箭的任务适应能力。

3 “新格伦”火箭与“猎鹰重型”火箭对比分析

从火箭运载能力及子级重复使用方式等方面来看，在世界各国现役及在研的运载火箭型谱中，与蓝源公司“新格伦”火箭最具有可比性的是太空探索技术公司的“猎鹰重型”（Falcon Heavy）火箭。整体上来看，两种火箭方案各有优劣，但均是基于各自公司的研制基础和发展理念。正是由于多种方案的并行研发和相互竞争，世界航天技术才能得到不断创新和发展。

火箭总体方案对比

“猎鹰重型”火箭是太空探索技术公司基于猎鹰-9火箭技术研制的超大型运载火箭，采用了3个通用芯级并联加二子级的构型，通用芯级直径为3.66m，采用液氧/煤油推进剂，起飞时共有27台发动机点火。而“新格伦”火箭采用两级或三级构型，一子级直径为7m，采用液氧/液态甲烷推进剂，起飞时共有7台发动机点火。

就构型而言，“新格伦”火箭的方案更为简化，一子级发动机BE-4的推力是灰背隼-1D的2.9倍，因而起飞时所用的发动机台数远少于“猎鹰重型”火箭，且不需要通过芯级并联来实现大推力。这



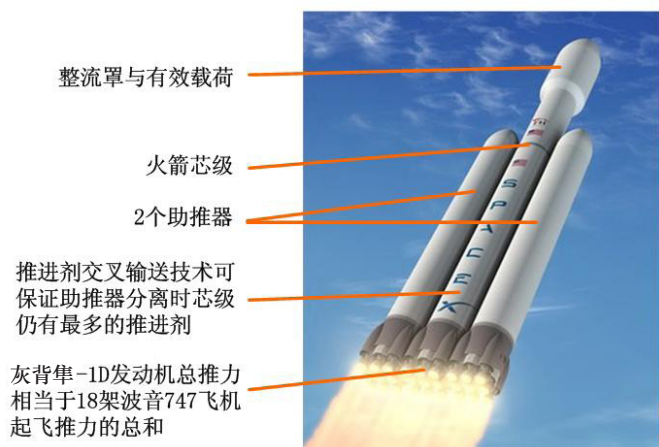
▲ 美欧主要运载火箭对比图

样有助于降低火箭动力系统的复杂程度，提高全箭的可靠性，但需要研制大推力发动机。

“新格伦”火箭采用液氧/液态甲烷推进剂，可实现自生增压，不必另外配置一套昂贵且复杂的增压系统，从而降低了系统的复杂度。但液态甲烷的密度远小于煤油，造成“新格伦”火箭燃料箱的尺寸较大，直径是“猎鹰重型”火箭芯级的2倍多，一子级的长度也更大，其全箭长度甚至接近美国阿波罗登月所使用的土星-5（Saturn-5）火箭，直径也更接近

“新格伦”火箭与“猎鹰重型”火箭总体方案对比

项目	“新格伦”火箭	“猎鹰重型”火箭
构型	两级或三级	通用芯级+二子级
芯级直径/m	7	3.66
全箭长度/m	82.3/95.4	70
主要推进剂	液氧/液态甲烷	液氧/煤油
一级发动机单台推力/t	249（BE-4）	86（灰背隼-1D）
全箭起飞推力/t	1743	2328
全箭起飞质量/t	未公布	1421
起飞推重比	未公布	1.638
子级返回方式	垂直返回	垂直返回



▲ “猎鹰重型” 运载火箭

于美国新一代重型火箭“航天发射系统”（SLS）。由此带来的弊端是生产、工艺、运输等方面的难题，而目前“新谢泼德”的箭体直径不超过4m，因此蓝源公司还需要跨越较大的技术门槛。

从起飞推重比来看，“猎鹰重型”火箭的起飞推重比高达1.638，远大于一般液体火箭的推重比，其性能还有进一步挖掘的空间。但由于“猎鹰”火箭的箭体直径仅为3.66m，加大火箭推进剂质量将引起火箭长细比变大，动力学耦合严重，带来控制方面的难题，这也是小直径箭体的一个天然劣势。

子级重复使用技术对比

为了实现子级重复使用，“新格伦”火箭与“猎鹰重型”火箭均采用一子级垂直返回的回收方式，甚至都可在位于大西洋的驳船上进行垂直回收。蓝源公司从最初的“戈达德”（Goddard）缩比样机，到实现“新谢泼德”运载器的连续5次试验成功，太空探索技术公司则先后依托于“蚱蜢”（Grasshopper）验证机、猎鹰-9重复使用验证飞行器（F9R-Dev）验证机和猎鹰-9火箭开展了数十

次演示验证试验，两家公司最终对发动机深度节流及多次点火、子级高精度返回控制、着陆支架等子级垂直返回涉及到的关键技术进行了验证，证明了箭体安全垂直回收乃至重复使用的工程可行性，为“新格伦”火箭和“猎鹰重型”火箭的子级重复使用奠定了坚实的基础。

此外，“新格伦”火箭采用液氧/液态甲烷推进剂，造成一子级尺寸较大，结构偏重，给箭体返回及回收带来了不小的困难。而“猎鹰重型”火箭通过3个芯级并联，每个芯级分离后单独返回着陆场，这样回收的箭体要远小于“新格伦”火箭，技术成熟度更高，且相同的技术已在猎鹰-9火箭上得到了数次飞行试验验证。因此，“新格伦”火箭若要实现一子级的垂直返回乃至重复使用还有相当长的路要走。

动力系统对比

蓝源公司自成立以来先后研制了过氧化氢/煤油、液氧/液氢、液氧/液态甲烷等发动机，在“新格伦”火箭上选择液氧/液态甲烷发动机，不仅因为甲烷来源丰富、价格便宜，而且燃烧无结焦，发动机回收后维护使用简单，对于重复使用运载器来说无疑是一种优良的动力系统。太空探索技术公司在未来的载人火星探索规划中也使用了液氧/甲烷发动机，并已成功进行了原理样机的试车，美国联合发射联盟公司的“火神”火箭结合BE-4发动机设计了伞降减速然后空中回收发动机舱段的方案，而欧洲航天局（ESA）也已于2016年12月确定资助法国的“普罗米修斯”液氧/甲烷可重复使用发动机项目，用以支撑空客集团（Airbus Group）的“艾德琳”（Adeline）发动机部段带翼飞回重复使用方案，充分说明了该种动力在重复使用方面具有强大的生命力。

通过研制猎鹰-1、9火箭，太空探索技术公司在液氧/煤油发动机上积累了丰富的经验，在不断的改进和完善中，实现了子级的安全回收和液氧/

煤油发动机回收后的再次试车,并在2017年3月30日成功实施了一枚“二手火箭”的再次发射,这表明太空探索技术公司已经逐步掌握了液氧/煤油发动机回收后的检测、维护等技术,开拓了液氧/煤油动力系统重复使用的方向。因此,在重复使用方面,液氧/甲烷动力及液氧/煤油动力很可能将并行发展,主要取决于各公司的研制基础及发展规划。

运载效率对比

在运载能力方面,液氧/液态甲烷推进剂组合的比冲要略高于液氧/煤油(约大12s),但并不意味着“新格伦”火箭的运载效率会高于“猎鹰重型”火箭。最关键因素在于,“猎鹰重型”火箭的通用芯级并联构型在采取推进剂交叉输送技术后将有效提升运载能力,而“新格伦”火箭在该方面不具有优势。

“猎鹰重型”火箭的助推器与芯级采用相同模块,助推器和芯级拥有独立的贮箱和发动机。在飞行初始阶段,助推器贮箱可以为芯级贮箱提供推进剂,助推器和芯级分离后,火箭大幅减少了结构质量,同时芯级拥有较多的推进剂,从而极大提高了运载能力。在不使用推进剂交叉输送技术的情况下,“猎鹰重型”火箭近地轨道运载能力约为45t,与“新格伦”火箭相同。而太空探索技术公司目前公布的运载能力为54.4t,推进剂交叉输送技术的应用使得运载能力提升幅度可达20%左右,运载效率达到了3.8%。正是由于具备了较大的运载能力,“猎鹰重型”火箭才能在通过一级回收和重复使用来降低成本的情况下,仍然能够执行重型载荷的发射任务。但另一方面,推进剂交叉输送技术也将带来一些弊端,提高了动力系统及控制系统的复杂程度和发生故障的概率,其可靠性还有待进一步提升。

4 思考与建议

美国蓝源公司与太空探索技术公司结合自身优势,开展了“新格伦”火箭和“猎鹰重型”火箭的研

制,并进行了多项技术创新,对世界运载火箭技术的进步具有一定的推动作用。结合我国运载火箭发展情况,提出以下几点思考:

1) 火箭发动机在运载器研制中占据重要位置,发动机技术的积累对航天运输领域的装备及技术发展具有重要的支撑作用;同时,运载器总体的规划和方案论证也可对发动机技术的发展注入强劲“动力”,推动发动机的研制和应用。因此,应加强谋划布局我国的航天运输发展战略,做好运载火箭型谱完善及重复使用运载器的规划和方案论证,加大火箭总体对动力技术的牵引力度,加快研发发动机技术,不断提升进入空间、开发空间的能力。

2) 重复使用是降低火箭发射成本的有效途径之一。在一次性运载火箭基础上实现可重复使用,有不同的技术路线,包括伞降回收、垂直返回等。为此,应密切关注国外可重复使用技术的进展,充分结合我国实际,在多方案对比、多种途径探索的基础上,确定重复使用技术发展路线,加大重复使用技术的研究力度。

3) 运载火箭重复使用是航天技术的重要发展方向,但其技术超前、难度大,蓝源公司、太空探索技术公司等均采取了分步验证、稳扎稳打的发展策略。在重复使用技术等重大领域方向的推进过程中,应重视样机验证及演示试验验证,采取分步实施的策略,注重关键技术攻关和积累,不断取得技术的新发展和新突破,为重复使用技术未来发展奠定坚实基础。

在当前的世界商业航天发展大潮中,美国私营航天公司依托于政府的政策和技术支持以及自身灵活的管理和创新体制,设计开发了性能优异、成本低廉的航天运载火箭,用于支撑公司的业务开拓和远期发展。在此基础上,应从顶层规划我国的航天运输发展战略,加强技术储备,加大火箭总体对动力技术的牵引力度,同时制定重复使用技术发展路线并分步实施,为我国航天强国战略的实施奠定强有力的基础。