

猎鹰重型火箭方案及其技术特点分析

摘要：2018年2月7日，美国空间技术探索公司(SpaceX)成功发射了首枚猎鹰重型火箭，还在任务中成功通过陆地回收了两枚助推器，使其成为目前世界上运载能力最大的运载火箭，该任务引起了国内外的广泛关注。本文对此次任务、猎鹰重型火箭方案及其技术特点进行了总结分析。

2018年2月7日，美国空间技术探索公司(SpaceX)从位于卡纳维拉尔角的肯尼迪航天中心39A发射台发射了首枚猎鹰重型火箭，使其成为目前世界上运载能力最大的运载火箭，开创了历史。

一、首次验证飞行情况

美国东部时间2018年2月6日15:45(北京时间2月7日4:45)，SpaceX公司发射了首枚猎鹰重型火箭，将一辆改装过的红色特斯拉发射升空，虽然最终这辆车并未被送入预定的地火转移轨道，但任务中火箭仍然较为成功地实现了大部分验证目标。

另外，首飞任务中对芯级、两枚助推器进行了回收，其中两枚助推器完成工作后与芯级分离，随后掉头飞回位于卡纳维拉尔角的着陆平台，并呈编队方式几乎同时着陆。芯级在与二子级分离后，瞄准部署在大西洋上的海上平台“OF COURSE I STILL LOVE YOU”进行回收。芯级在返回过程中，原计划应该有3台发动机重启，但实际仅有1台成功点火启动，芯级最后以480km/h

的速度落在海面上，落点距离海上回收平台大约 100m，未能实现回收。

首飞猎鹰重型火箭捆绑的两枚助推器为此前 SpaceX 回收的猎鹰 9 火箭一子级，分别是 2016 年 5 月 27 日 Thaicom-8 通信卫星发射任务中通过海上回收的 B1023.2，以及 2016 年 7 月 18 日 CRS-9 国际空间站任务中通过陆地回收的 B1025.2。为了实现与芯级的连接，两枚助推器分别加装了鼻锥和前、后安装点，同时芯级为了承受额外的应力做了重新设计，增加了结构强度。但未使用此前宣称的交叉输送技术。

据《汽车与驾驶》杂志报道，作为此次有效载荷的特斯拉 Roadster 的重量约为 1250kg，长度将近 3.9m，宽约 1.7m。特斯拉敞篷跑车的重量和尺寸远远低于猎鹰重型火箭的运载能力和整流罩空间。

猎鹰重型的首次试验飞行一推再推，由原定的 2013 年推迟至今，其研制进展并不一帆风顺，艾伦·马斯克曾承认构建重型火箭的困难远超出他们的想象，有许多技术无法在地面试验中进行验证，导致其首飞时间比最初的计划推迟了几年。在发射任务结束后的发布会上，马斯克表示因研制难度过大，公司曾 3 次尝试取消猎鹰重型项目。后来重新设计了火箭芯级和格栅舵。同时，马斯克称猎鹰重型火箭的研制投入大约为 5 亿美元。

表 1 猎鹰重型火箭任务飞行时序

时间	倒计时事件
-01: 28: 00	SpaceX 发射指挥确认推进剂加注通行
-01: 25: 00	煤油 (RP-1) 加注
-00: 45: 00	液氧加注
-00: 07: 00	发动机预冷

猎鹰重型火箭方案及其技术特点分析

续表

时间	倒计时事件
-00: 01: 00	飞行指挥中心开始最终射前检测
-00: 01: 00	贮箱增压
-00: 00: 45	SpaceX 发射指挥确认发射通行
-00: 00: 05	发动机指挥命令启动助推级发动机点火时序
-00: 00: 03	发动机指挥命令启动芯级发动机点火时序
00: 00: 00	猎鹰重型火箭发射
时间	飞行及火箭一子级回收
00: 01: 06	最大动压
00: 02: 29	助推级发动机关机(BECO)
00: 02: 33	助推级与芯级分离
00: 02: 50	助推级返推点火
00: 03: 04	芯级发动机关机(MECO)
00: 03: 07	芯级与二子级分离
00: 03: 15	二子级发动机启动
00: 03: 24	芯级返推点火
00: 03: 49	整流罩分离
00: 06: 41	助推级再入点火
00: 06: 47	芯级再入点火
00: 07: 58	助推级着陆
00: 08: 19	芯级着陆
00: 08: 31	二子级发动机关机(SECO-1)

续表

时间	飞行及火箭一子级回收
00: 28: 22	二子级二次点火
00: 28: 52	二子级发动机关机(SECO-2)
	此后, 经过一段较长的滑行段, 二子级再次点火, 最终将有效载荷送入目标轨道

二、猎鹰重型火箭技术方案及特点

(一) 火箭方案概述

猎鹰重型火箭是在猎鹰9火箭基础上研制的, 该研制项目于2011年4月正式启动, 其设计目标是将每磅有效载荷送入轨道的成本从10000美元降低到1000美元(目前SpaceX公司官网公布的发射价格见表2), 原本计划可满足载人飞行的要求, 能够发射SpaceX公司自行研制的“天龙座”飞船, 用于载人旅行及深空探索。不过在首飞任务时, 公司透露将取消猎鹰重型火箭的载人飞行方案。

猎鹰重型采用二级结构, 捆绑两枚助推器, 火箭全长70m, 最大直径12.2m, 起飞推力22819kN, 火箭的LEO运载能力63.8t, GTO运载能力26.7t, 是NASA航天飞机运货能力的2倍。它不仅能将卫星送入轨道, 还可以往火星运送物资。猎鹰重型火箭的标称运载能力随着其研制的推进而不断演变, 具体历程见表3。猎鹰重型火箭的具体参数参见表4。

表 2 猎鹰 9 和猎鹰重型的发射单价对比

	发射价格	GTO 运载能力	发射价格对应的 GTO 运载能力	GTO 单价
猎鹰 9	6200 万美元	8.3t	5.5t	1.13 万美元/kg (约 5085 美元/磅)
猎鹰重型	9000 万美元	26.7t	8t	1.13 万美元/kg (约 5085 美元/磅)

表 3 猎鹰重型标称运载能力演变历程和猎鹰 9 火箭运载能力对比

目标	猎鹰重型			猎鹰 9
	2013.8—2016.4	2016.5—2017.3	2017.4 至今	目前
LEO (28.5°)	53t	54.4t	63.8t	22.8t
GTO (27°)	21.2t	22.2t	26.7t	8.3t
GTO (27°)回收	6.4t	6.4t	8t	5.5t
火星	13.2t	13.6t	16.8t	4.02t
冥王星	—	2.9t	3.5t	—

表 4 猎鹰重型运载火箭技术参数

项目	技术参数
长	70m
芯级直径	3.66m
发射质量	1420t
级数	2
助推器	2 枚

续表

项目	技术参数		
最大直径	12.2m		
LEO 运载能力(倾角 28.5°)	63.8t		
GTO 运载能力(倾角 27°)	26.7t		
火星运载能力	16.8t		
冥王星运载能力	3.5t		
发射费用(8t GTO)	9 千万美元		
	芯级	助推级	二子级
长, m	~41.50	~48.00	~15.5
直径, m	3.66	3.66	3.66
起飞质量, t	~456.45	~912.90	~111.9
推进剂质量, t	434.71	869.42	108.67
发动机	隼 1D	隼 1D	隼 1D 真空
推进剂	液氧/煤油	液氧/煤油	液氧/煤油
总推力(海平面), kN	7607.4	15214.8	934.1
比冲(海平面), N·s/kg	2829	2829	3413
燃烧时间, s	161.6	161.6	397
总冲量(真空), MN·s	1330.1	2660.2	370.9

1. 一子级

猎鹰重型火箭的一子级由 3 个改进型猎鹰 9 一子级捆绑组成, 即采用芯级加 2 枚捆绑助推器的构型。芯级和每枚助推器都使用 9 台改进型隼 1D 发动机。主要技术参数见表 5。

隼 1D 发动机是在隼 1C 基础上研制的, 为执行未来载人任务采用结构和热防护安全设计, 应用于猎鹰 9 火箭一子级和猎鹰重

型火箭的芯级及助推级。改进型隼 1D 发动机使用了先进的制造技术和材料，具备很好的耐久性和很高的余量，允许其在更高的推力、压力、温度条件下运行。改进之后，用于一子级的隼 1D 发动机最大海平面推力达到 756kN，真空推力达到 825kN，比隼发动机初始型提升 16%。

表 5 隼 1D 发动机技术参数

项目	技术参数
面积比	21.4
混合比	2.36
海平面推力	756kN
真空推力	825kN
海平面比冲	288.5s
真空比冲	312s
工作时长	162s
推进剂	液氧/煤油

2. 二子级

猎鹰重型火箭二子级采用 1 台隼 1D 真空发动机，基本状态与隼 1D 发动机类似，但为了适应真空飞行工况，采用面积比达到 117:1 的大喷管。这使得该发动机比冲高达 348s，推力也提高到了 934kN。此发动机具备多次点火的能力，大大增强了其对于任务的适应能力。

表 6 隼 1D 真空发动机技术参数

项目	技术参数
面积比	117

续表

项目	技术参数
混合比	2.38
真空推力	934kN
真空比冲	348s
工作时长	397s
推进剂	液氧/煤油

3. 整流罩

猎鹰重型火箭的整流罩与猎鹰9火箭整流罩一致。采用两瓣式构型，使用蜂窝铝芯材料和碳纤维面板制造。整流罩高13.1m，直径5.2m，重约2.5t。纵向连接采用机械锁机构锁紧，接收到分离指令后，高压氦气驱动机械锁，解除纵向连接，高压氦气继续驱动推冲器(4个)直至将两瓣整流罩推开。

(二) 技术特点

1. 采用重复使用技术

为从根本上解决航天发射成本高、效率低的问题，2011年SpaceX公司宣布在现有猎鹰9火箭基础上，分阶段验证可重复使用技术。公司总裁格温·肖特维尔称，重复使用技术的经济可行性可通过快速复用才能体现。复用一子级的成本不到新造一子级的一半，并且未来随着维修阶段的翻新工作不断减少，有望节省更多的成本。

目前，SpaceX公司已实现猎鹰9火箭一子级的可重复使用，在此次猎鹰重型火箭首飞任务中也成功完成了2枚助推器的回收。不过作为试验验证飞行任务，未能成功实现芯级的回收。但猎鹰重型从整体上大幅提升重复使用率，以发动机数量而言，全箭28台发动机中有27台能够实现复用，复用率达到了96%。

另外，SpaceX 公司还在探索整流罩的重复使用技术，整流罩的成本约 600 万美元。在任务结束后的发布会上，马斯克表示整流罩的回收难度比较大，希望在未来半年时间内解决这一难题。

猎鹰重型火箭投入使用后，以其强大的运载能力，再利用重复使用技术，将能够为 NASA 的深空探索和发展目标提供能力支撑，对经济可承受性产生实质性的影响。

2. 采用新研的自主飞行安全系统

为了实现猎鹰重型火箭的回收任务，采用了新研发的“自主飞行安全系统”(AFSS)。在猎鹰重型火箭发射任务中，芯级和 2 枚助推器都会垂直受控返回地面，实现重复使用，即猎鹰重型火箭发射后，将有 3 枚火箭子级同时返回。但是受设备限制，负责卡纳维拉尔角发射测控跟踪任务的美国空军第 45 航天联队只能同时跟踪 2 个飞行目标。而采用“自主飞行安全系统”则不会受到跟踪目标数量的限制，依靠箭上的 GPS 来判断火箭是否偏离了预定的安全飞行路线，如果出现了偏离情况且火箭必须要进行自毁，该系统就会自行下达自毁指令。

这种自主化的跟踪技术不仅可以大幅降低发射成本，而且还可以缩短发射时间。该系统只需要 82 名工作人员，且可以简化大部分地面设施，而旧系统则需要 245 名工作人员。在显著降低发射成本的同时，有效缩短了空军用来准备发射的时间。

此外，和传统跟踪系统相比，“自主飞行安全系统”还能够扩展跟踪的飞行范围。该系统下达指令的速度更快，相比人工操作，自主化操作方式能够提前数秒完成火箭的自毁。如果应用到载人火箭上，该系统的运作方式大致相同，但在火箭自毁之前，将为乘员逃离留出时间。

3. 采用全箭冷分离技术

鉴于火箭回收的需要，猎鹰系列火箭摒弃了机构低成本、结构简单、工作可靠的火工分离技术，而采用全箭无损的冷分离技

术，包括：冷氮喷射和机械式推杆等，主要应用于火箭的整流罩分离、级间分离以及着陆腿的展开过程中。目前猎鹰系列火箭已经执行超过 60 次发射，从未出现因分离机构失效而导致的事故，因此其事实可靠性达 100%。并且通过首飞验证了助推器侧向分离，对于未来运载火箭分离结构的设计有着相当的借鉴意义。

4. 具备高安全性的冗余设计

猎鹰重型运载火箭继承了猎鹰 9 火箭的冗余设计，能够在多台发动机发生故障的情况下继续工作并完成发射任务，结构安全余量设计达 40%，而其他不载人火箭的安全余量为 25%。除满足货物运输的发射需求外，也能够满足载人航天飞行的要求。

该设计在猎鹰 9 火箭上得以验证。2012 年 10 月 7 日，猎鹰 9 火箭在执行国际空间站任务中，火箭飞行约 79s 后，一子级 1 台发动机突然失压，发动机关机。随后，为保护一子级发动机和其他发动机，发动机舱开始释放压力，故障发动机未发生爆炸，并能持续收到其数据，其他 8 台发动机工作正常。在这种情况下依然成功完成了主要任务，证明火箭的冗余设计的有效性。

三、小结

猎鹰重型火箭首次验证飞行任务虽然最终未将有效载荷送入预定轨道，但任务中火箭仍然较为成功地实现了大部分验证目标，使之成为现役火箭中运载能力最强的火箭。该火箭在充分利用已有的猎鹰 9 火箭成熟技术的基础上，通过采用可重复使用技术降低发射成本；采用新研的自主飞行安全系统扩大跟踪范围，缩短了射前准备时间；为实现复用摒弃传统火工分离而采用全箭无损的冷分离技术；具备高安全性的冗余设计，能够在多台发动机发生故障的情况下继续工作并完成发射任务。

目前，猎鹰重型火箭手握 3 份商业卫星发射和 2 份美国空军发射合同，已知最大有效载荷质量约为 6.4t。未来，该火箭将目

标瞄准大型载荷、多任务飞行和执行深空探索任务等，并参与竞争美国国家安全载荷发射任务，凭借低成本优势，为美国政府提供重要发展机遇，帮助其实现经济可负担的和可持续的空间探索发展目标，推动运载器技术领域的良性竞争，并对未来商业发射市场态势产生重大影响。

(北京航天长征科技信息研究所)