

# 猎鹰9号火箭发射及箭体复用的分析

刘敏华<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学, 西安 710072;  
2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 猎鹰9号火箭截至2023年年底已完成286次发射。对猎鹰9号火箭特别是Block5版本火箭的发射情况进行了完整梳理统计, 重点分析了一级箭体的复用情况以及发射、回收的相关能力保障, 对火箭的经济性和未来前景作了预测。

**关键词:** 猎鹰9号火箭; 一级箭体; 重复使用

中图分类号: V475

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 01-0020-08

## Analysis of Falcon 9 Launch and Booster Reuse

LIU Minhua<sup>1,2</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Falcon 9 has completed 286 launches by the end of 2023. In this paper, the launch situation of Falcon 9, especially Block5, is completely sorted out and statistically analyzed, focusing on the reuse of the stage-1 booster, as well as the relevant capability guarantee of launch and recovery. The economy and future prospects of the rocket are predicted.

**Key words:** Falcon 9; Stage-1 booster; Reuse

### 0 引言

天地往返重复使用是航天技术发展的重要方向, 从技术路线上来看, “垂直起降”“垂直发射、水平着陆”“水平起降”等几种技术途径都在并行开展研究和实践应用, 其中猎鹰9号火箭所发展的一级箭体“垂直起降”发射回收复用技术, 已最为成熟, 并多次应用于火箭重复使用发射任务中, 在重复使用工程应用方面走在了前面, 积累了经验和大量可供分析的数据子样。基于此, 本文以猎鹰9号火箭作为目标研究对象, 以期对重复使用研究和应用工作有所借鉴和帮助。

### 1 猎鹰9号火箭及状态演变

猎鹰9号火箭自研制以来, 已发展演变了5个版本的火箭。

#### (1) 猎鹰9号1.0版(已退役)

猎鹰9号1.0版为两级火箭, 第一级搭载了9台Merlin 1C发动机(采用九宫格布局), 第二级搭载了一台Merlin 1C真空版发动机, 均为液氧煤油发动机, 第一级不可回收。LEO运载能力10450 kg, GTO运载能力4540 kg。1.0版火箭共进行了5次发射, 4次完全成功, 1次部分成功。2010年6月4日首次发射, 2013年3月1日发射CRS-2任务后退役不再使用。

#### (2) 猎鹰9号1.1版(已退役)

相比1.0版, 猎鹰9号1.1版火箭长度增加到68.4 m, 一级发动机改为9台Merlin 1D发动机(采用圆形布局), 可实现节流调节能力, 发动机推重比也大幅提高<sup>[1]</sup>。LEO运载能力提高到13150 kg。1.1版共进行了15次发射, 2013年9月29日首次发射, 除2015年6月28日发射CRS-

收稿日期: 2023-12-01; 修订日期: 2023-12-29

作者简介: 刘敏华(1974—), 男, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。

7 任务失败外，其他主线任务都取得成功。

### (3) 猎鹰 9 号全推力版 Block3 (已退役)

猎鹰 9 号全推力版 Block3 火箭长度增加到 70 m，发动机升级到 Merlin 1D+ 发动机，通过冷凝处理技术提高液氧煤油的加注量，LEO 运载能力提高到 22 800 kg，GTO 运载能力 8 300 kg，一级完全可回收。共进行了 25 次发射，2015 年 12 月 22 日首次发射 OG-2 任务，一级箭体 B1019.1 首次成功回收。除 AMOS-6 任务在发射前意外爆炸，其他发射均成功，实现了 16 次成功回收。

### (4) 猎鹰 9 号 Block4 (已退役)

猎鹰 9 号 Block4 为过渡版本，采用钛合金栅格舵取代铝合金的栅格舵。2017 年 8 月 14 日首次发射，共进行了 12 次发射，在猎鹰 9 号火箭第 57 次发射后退役不再使用。

### (5) 猎鹰 9 号 Block5 (现役)

猎鹰 9 号 Block5 采用了全新设计的上面级，重复使用能力大幅提升。2018 年 5 月 11 日首次发射，截至 2023 年 12 月 31 日，已完成 229 次发射，全部取得了成功。

## 2 猎鹰 9 号火箭 (Block5 型) 的发射统计分析

### 2.1 按年度的统计分析

自 2018 年 Block5 版本火箭成功首飞以来，按年度 (统计见表 1) 来看，猎鹰 9 号火箭的年度发射次数呈持续上升态势，并且取得了全部成功。2023 年，更是以 15 枚在役一级箭体的多次复用，支撑了全年 91 次的火箭发射，一级箭体年平均复用次数达到 6.06 次。

表 1 按年度的统计

Tab. 1 Statistics by year

	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	合计
发射次数	10	11	26	31	60	91	229
箭体个数	6	6	11	10	14	15	
年平均次数	1.67	1.83	2.36	3.1	4.29	6.06	

### 2.2 按任务的统计分析

Block5 版本火箭按任务来源统计数据见表 2，分析如下。

1) 星链任务：详见 2.3 节，是当前猎鹰 9 号火箭高密度发射的主要任务来源，发射次数总占比已达 57%，2023 年度占比更是达到 69%。

2) NASA 科学任务：个位数，任务相对较少。

3) 军方国防任务：主要为 GPS III 卫星、NROL 侦察卫星和太空发展局 SDA 卫星。

4) 国际空间站 ISS 货运和载人任务：相对稳定，每年任务次数为 4~5 次。

5) 国内用户：主要为国内通信公司。

6) 国外用户：随着猎鹰 9 号火箭不断成熟与可靠，国外用户的数量持续增加，以通信卫星/星座发射为主，目前已成为排在星链发射任务之后的第二大发射任务。

7) 拼单发射服务：瞄准小卫星市场，持续推出了 1 次一箭多星和 9 次 Transporter 拼单发射服务。

8) 商业太空飞行任务：目前主要形式包括亚轨道飞行和轨道级飞行，经过多年的探索，在 2021 年实现了集中突破和爆发。2021 年，维珍银河 1 号载

人亚轨道飞行成功，蓝色起源载人亚轨道飞行成功，同年 Space X 的轨道级载人也发射成功。截至 2023 年年底，Space X 通过猎鹰 9 号火箭，已成功发射实施了 3 次轨道级商业太空飞行任务，分别为 2021 年的 Inspiration4 载人任务 (4 名乘员、约 2 亿美元成本和 3 天轨道飞行)、2022 年的 AX-1 任务 (4 名乘员、约 2 亿美元成本、与 ISS 对接和 10 天周期往返) 和 2023 年的 AX-2 任务 (4 名乘员、约 2 亿美元成本、与 ISS 对接和 10 天周期往返)，搭载了 12 名乘员进入空间或空间站。

### 2.3 星链任务的统计分析

从 2018 年发射星链卫星以来，截至 2023 年 12 月 31 日，通过猎鹰 9 号火箭，星链卫星已累计发射了 5 650 颗卫星 (具体统计见表 3)，其中包括 2 颗 Tintin 测试卫星、60 颗 V0.9 版卫星、1 678 颗 V1.0 版卫星、2 974 颗 V1.5 版卫星和 936 颗 V2 Mini 版卫星。

## 3 一级箭体的复用分析

### 3.1 整体生产和库存情况

猎鹰 9 号火箭一级箭体的编号，采用了

表 2 按任务来源的统计  
Tab. 2 Statistics by task source

任务来源	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	合计
星链	—	2	14	17	34	63	130
NASA	—	—	—	2	1	—	3
美国军方	1	—	3	1	2	3	10
国际空间站 ISS	1	4	5	5	4	5	24
美国公司	1	1	1	1	3	3	10
外星	6	4	3	2	12	12	39
拼单发射	1	—	—	2	3	4	10
商业太空飞行	—	—	—	1	1	1	3

表 3 星链任务的发射统计  
Tab. 3 Launch Statistics for the Starlink Mission

任务	任务轨道	实际发射数量	状态
Tintin-A/B 卫星	514 km×97.5°	2	试验卫星
V0.9 版卫星	440~500 km×53°	60	V0.9 (单星 227 kg)
拼单发射两批卫星	550~560 km×97.5°	13	V1.0 (单星 260 kg)
轨道层 G1	550 km×53°	1 665 (28 批次)	V1.0 (单星 260 kg)
轨道层 G2	570 km×70°	408 (8 批次)	V1.5 (单星 295 kg)
轨道层 G3	560 km×97.6°	230 (5 批次)	V1.5 (单星 295 kg)
轨道层 G4	540 km×53.2°	1637 (32 批次)	V1.5 (单星 295 kg)
轨道层 G5	530 km×43°	699 (13 批次)	V1.5 (单星 295 kg)
轨道层 G6	525~559 km×43°	765 (35 批次)	V2 Mini (单星 790 kg)
轨道层 G7	525 km×53.05°	171 (8 批次)	V2 Mini (单星 790 kg)
总计		5 650	

Booster 首字母 B 加序列数字的编号形式。

B0001~B0007 (7 个), 是用于技术验证与演示猎鹰 9 号, 也被称为 V1.0 版。其中 B0001 和 B0002 用于测试, 其他 5 枚箭体用于发射。

B1001~B1018 (18 个), 被称为 V1.1 版。其中 B1001、B1002、B1009 用于测试, 其他 15 枚用于发射。

B1019~B1038 (20 个), 被称为完全推力版本。其中 B1027 用于测试, 其他用于发射。

B1039~B1045 (7 个), 属于 Block4 版本。

B1046 开始, 为 Block5 版本, 快速稳定生产。截至 2023 年年底, 有 B1060、B1061、B1062、B1063、B1064、B1065、B1067、B1069、B1071、B1073、B1075、B1076、B1077、B1078、B1080、B1081 等一级箭体在服役。

生产的部分一级箭体用于猎鹰重型火箭的助

推和芯级, 详见表 4。

### 3.2 一级箭体 (Block5 型) 复用的统计情况与能力评价

通过表 5 的数据, 对当前复用能力的评价, 从以下 3 个指标进行分析。

1) 可复用次数  $S$ : 代表箭体在回收维护后能够正常使用的能力, 目前表征的最大次数是 19 次。

2) 平均复用率: 表征的是一枚箭体在一段时间内重复使用的频率, 从能力角度它主要与维修维护及周转间隔时间  $D$  有关。不同一级箭体的年平均复用率在不断提高, 已从最开始 B1046 箭体的 1.8 次/年, 逐步增加到 B1076 箭体的 8 次/年。

一级箭体的周转间隔时间  $D$  与箭体所处的维护状态和维护等级有关。重复使用火箭的检测维修, 一般采用三级维护维修<sup>[2]</sup>。猎鹰 9 号火箭关注复用准则的探索, 通过振动试验验证重要部件的

表 4 猎鹰重型火箭发射及其一级箭体使用情况

Tab. 4 Falcon Heavy rocket launch and its usage of the stage-1 booster

序号	发射时间	发射任务	箭体（助推/芯级）
1	2018-02-06	Roadster+Starman	全回收，B1023.2、B1025.2/B1033.1（回收失败）
2	2019-04-11	沙特通信卫星 Arabsat 6A	全回收，B1052.1、B1053.1/B1055.1（回收损毁）
3	2019-06-25	STP-2 任务	全回收，B1052.2、B1053.2/B1057.1（回收失败）
4	2022-11-01	USSF-44	助推回收，B1064.1、B1065.1/B1066.1（不回收）
5	2023-01-16	USSF-67	助推回收，B1064.2、B1065.2/B1070.1（不回收）
6	2023-04-30	Viasat-3 通信卫星	全不回收，B1052.8，B1053.3/B1068.1
7	2023-07-28	Jupiter-3 通信卫星	助推回收，B1064.3、B1065.3/B1074.1（不回收）
8	2023-10-13	NASA Psyche 任务	助推回收，B1064.4、B1065.4/B1079.1（不回收）
9	2023-12-29	X-37B OTV-7 任务	助推回收，B1064.5、B1065.5/B1084.1（不回收）

表 5 一级箭体使用情况

Tab. 5 The usage of the stage-1 booster

箭体	用途	首飞时间	当前状态	使用次数	最后一次	最短周转间隔天数	平均年复用率（次年）
B1046	F9 一级	2018-05-11	2020-01-19 消耗	4	不回收	88	1.8
B1047	F9 一级	2018-07-22	2019-08-07 消耗	3	不回收	117	2
B1048	F9 一级	2018-07-25	2020-03-18 损毁	5	回收失败	75	2.4
B1049	F9 一级	2018-09-10	2022-11-23 消耗	11	不回收	62	2.4
B1050	F9 一级	2018-12-05	2018-12-05 损毁	1	回收失败		
B1051	F9 一级	2019-03-02	2022-11-12 消耗	14	不回收	37	3.6
B1052	F9H 助推级 和 F9 一级	2019-04-11	2023-04-30 消耗	8	不回收		
B1053	F9H 助推级	2019-04-11	2023-04-30 消耗	3	不回收		
B1054	F9 一级	2018-12-23	2018-12-23 消耗	1	不回收		
B1055	F9H 芯级	2019-04-11	2019-04-11 损毁	1	回收损毁		
B1056	F9 一级	2019-05-04	2020-02-17 损毁	4	回收失败	63	3.8
B1057	F9H 芯级	2019-06-25	2019-06-25 损毁	1	回收失败		
B1058	F9 一级	2020-05-31	2023-12-27 损毁	19	回收损毁	28	5
B1059	F9 一级	2019-12-05	2021-02-15 损毁	6	回收失败	58	4.2
B1060	F9 一级	2020-07-01	检修	17		27	4.9
B1061	F9 一级	2020-11-15	检修	17		24	5.2
B1062	F9 一级	2020-11-05	检修	17		22	5.2
B1063	F9 一级	2020-11-21	检修	15		36	4.7
B1064	F9H 助推级	2022-11-01	检修	5			
B1065	F9H 助推级	2022-11-01	检修	5			
B1066	F9H 芯级	2022-11-01	2022-11-01 消耗	1	不回收		
B1067	F9 一级	2021-06-03	检修	15		35	5.8
B1068	F9H 芯级	2023-04-30	2023-04-30 消耗	1	不回收		
B1069	F9 一级	2021-12-21	检修	12		41	5.5
B1070	F9H 芯级	2023-01-16	2023-01-16 消耗	1	不回收		
B1071	F9 一级	2022-02-02	检修	13		27	6.6
B1073	F9 一级	2022-05-14	检修	11		35	6.7

续表

箭体	用途	首飞时间	当前状态	使用次数	最后一次	最短周转间隔天数	平均年复用率(次年)
B1074	F9H 芯级	2023-07-28	2023-07-28 消耗	1	不回收		
B1075	F9 一级	2023-01-19	检修	8		34	7.5
B1076	F9 一级	2022-11-26	检修	9		26	8
B1077	F9 一级	2022-10-05	检修	9		29	6.9
B1078	F9 一级	2023-03-02	检修	6		37	6.7
B1079	F9H 芯级	2023-10-13	2023-10-13 消耗	1	不回收		
B1080	F9 一级	2023-05-21	检修	4		40	7.1
B1081	F9 一级	2023-08-26	检修	3		39	6.3
B1084	F9H 芯级	2023-12-29	2023-12-29 消耗	1	不回收		

疲劳寿命能覆盖 4 倍于 15 次飞行任务的工作时长，建立了 3 个级别的复用检测维护准则，即每次任务后都进行的 A 级检测，执行 6~7 次飞行任务后的 B 级定期维修，发射次数最多（13 次以上）和执行载人任务需进行的 C 级彻底维护。同一一级箭体的最快周转间隔时间为 B1062 箭体创造的 22 天。

3) 发射频率：表征一段时间内发射的次数规模，可用年发射次数或年平均发射间隔时间来表征。它是一个综合的结果指标，与发射需求  $M$ 、箭体库存量  $K$ 、箭体可复用次数  $S$ 、周转间隔时间  $D$  以及与之相匹配的二子级生产率、发射台与回收船周转率等因素有关。2023 年度，猎鹰 9 号火箭实现了年发射 91 次，或者是平均每 4 天发射一次的频率。

由于猎鹰 9 号火箭的二子级不可重复使用，为匹配适应火箭高发射频率的要求，二子级的生产率已提高到年产百发产品的水平，后续还将进一步提高。

### 3.3 一级箭体复用及退役策略的分析

从统计数据来看，一手新火箭除个别火箭用于发射星链任务外，优先用于国际空间站载人/货运任务和高价值载荷任务。

一级箭体的退出，一种是通过计划中的不回收方式销毁，还有一种方式就是回收失败或损毁。而对于计划中的不回收，可能是用于特定试验（如 B1046.4 开展的 IFA 测试），或者是用户要求全推进剂工作于投送载荷（如 B1047.3、B1051.14、B1054.1）。

## 4 发射台和着陆回收的统计分析

### 4.1 整体情况

猎鹰 9 号火箭的发射台目前有 3 个：东部卡纳维拉尔角太空军基地的 SLC-40、肯尼迪航天中心

的 LC-39A 以及西部范登堡空军基地的 SLC-4E。近期 Space X 公司对卡纳维拉尔角的 SLC-40 发射台进行了改造，安装了宇航员空中廊桥，改造完成后具备支持载人龙飞船发射的能力，这是继肯尼迪航天中心的 LC-39A 之后，Space X 公司拥有的第二个可用于发射载人航天任务的发射设施。同时为满足后续更大的发射需求，Space X 公司已租下范登堡空军基地的 SLC-6 工位，作为西海岸第二个发射台。未来发射布局会更加全面优化、分工明确，西海岸主要用于极轨发射，东海岸主要用于载人航天、中低倾角 LEO、GTO、GEO、跨月、日心等轨道的发射。

一级箭体的回收，目前有陆上回收和海上回收两种方式。陆上着陆区，包括卡纳维拉尔角的 LZ-1、LZ-2 和范登堡空军基地的 LZ-4。海上回收采用海上回收船 ASDS 进行回收，海上回收船目前有 3 艘在役。

1) JRtI (Just Read the Instructions)：第一艘服役 6 个月后于 2015 年退役，目前在役的为第二艘，2017 年 1 月 14 日部署铱星 NEXT-1 时，首次成功回收一级火箭。2015—2019 年在西海岸服役，维修后部署调整到东海岸，2020 年 6 月 4 日复出执行任务。

2) OCISLY (Of Course I Still Love You)：2016 年 3 月 4 日首次尝试回收一级火箭（B1020 发射 SES-9 任务），结果失败。2016 年 4 月 8 日 B1021.1 发射 CRS-8 龙飞船，一级火箭成功降落在海上平台。2015 年 12 月至 2021 年 6 月期间部署在东海岸卡纳维拉尔港，2021 年 7 月转至西海岸加州长滩港。

3) ASoG (A Shortfall of Gravitas)：部署在东海岸卡纳维拉尔港，2021 年 8 月首次回收

B1061.4 箭体。

#### 4.2 发射台的使用周转分析

2023 年是猎鹰 9 号火箭发射的历史高峰年，以该年发射任务情况来分析。在其 3 个发射台中：卡纳维拉尔角 SLC-40 发射台年度发射最多，最为繁忙，2023 年共发射了 55 次，年平均 6.6 天发射一次，最快周转周期 3 天，最长周转周期 12 天；范登堡空军基地的 SLC-4E 发射台次之，共发射了 28 次；肯尼迪航天中心 LC-39A 最少，只有 8 次，加上猎鹰重型的 5 次发射，共发射了 13 次。

SLC-40 发射台能够实现高的使用频率，与猎

鹰 9 号火箭采用“三平”（水平总装、水平测试、水平整体转运）测试发射模式和发射台采取简化与箭地一体化设计等因素有关。“三平”测试发射模式极大减少了发射区的占位时间和保障需求<sup>[3]</sup>。

#### 4.3 回收方式的选择与使用周转分析

猎鹰 9 号火箭一级箭体回收方式的选择，主要取决于投送的载荷质量与轨道（参见表 6）。以 2023 年度来看，对于拼单、SDA 卫星和商业乘组等投送质量相对较小的低轨载荷任务，猎鹰 9 号火箭的一级箭体均实施陆地着陆进行回收。2023 年度陆地回收共计 13 次，占比 14%。

表 6 不同轨道和回收方式对应的载荷能力（开源数据）

Tab. 6 Payload capacity for different orbits and recovery methods (open source data)

	LEO 运力（部署高度 200 km、 倾角 28.5°）	GTO 运力（地球同步转移轨道）
RTLS（陆地着陆）	13.68 t（运力削减 40%）	—
ASDS（海上着陆）	18.24 t（运力削减 20%）	5.5 t
Expendable（消耗）	22.8 t（运力 100%）	8.3 t

对于承担主要回收方式的海上回收，2023 年度回收占比达 86%。其中西部只部署了一条船“OCISLY”，2023 年回收 21 次，最快周转周期 8 天。在东部则部署有两条船“JRtI”和“ASoG”，交替进行回收，2023 年回收 57 次，最快周转周期也均为 8 天。

### 5 猎鹰 9 号火箭的拼单发射服务

从 2021 年开始，猎鹰 9 号火箭针对小卫星发射市场需求，推出了 Transporter 系列拼单发射服务，截至 2023 年 12 月底已先后发射了 9 次，累计将 785 个卫星载荷送入轨道。

综合表 7 和其他开源信息，可以看出：

1) 拼单发射服务部署的轨道主要选择面向太阳同步轨道或极地轨道，这对于种类繁多的小卫星领域，相对容易拼单发射。拼单发射提供了 5 种载荷配置形式，包括位于分配器顶端的“蛋糕顶”舱位、1/4 舱位、1/2 舱位、全舱位、加大版全舱位。

2) 对于卫星载荷发射服务，Space X 公司的猎

鹰 9 号火箭既可提供直接发射入轨服务，也可通过载荷分包模式，即通过集成部署器或轨道转移飞行器 OTV（可用于提升卫星轨道、调整倾角）来部署小卫星。美国 Spaceflight、德国 Exolaunch、意大利 D-orbit 等公司作为分包商先行购买猎鹰 9 号火箭的载荷堆栈接口，每个接口 100 万美元、可搭载 200 kg 载荷，分包商之后再分配给卫星客户。如在 Transporter-1 任务中，Spaceflight 公司的 Sherpa-FX OTV 搭载了 13 颗小卫星，Exolaunch 公司包揽了 30 颗卫星，意大利 D-orbit 公司包揽了 20 颗卫星。

3) 精细成本控制。小卫星的拼单发射任务，卫星数量虽大，但载荷总质量仍较小，相较猎鹰 9 号火箭的低轨运载能力余量较大。为此发射时二级采用了短喷管版的真空梅林发动机以节约成本，一级则直接返回发射场附近进行陆地着陆。

4) 价格优势。目前猎鹰 9 号火箭的拼单发射价格虽已涨至 5 500 美元/kg，但相比火箭实验室的电子火箭发射报价 38 000 美元/kg SSO，仍具有非常大的价格优势。

表7 拼单发射服务情况

Tab. 7 Joint order for the launch service

任务代号	一级箭体及发射时间	部署轨道	载荷
Transporter-1	B1058.5 2021.1.24	550 km/97°	143 颗卫星：约 5 t，包括轨道转移飞行器 SHERPA-FX、36 颗 SuperDove、10 颗星链极地轨道卫星等
Transporter-2	B1060.8 2021.7.1	525 km/97°	88 颗卫星：约 5 t，包括 Spaceflight 承揽的 38 颗、Exolaunch 承揽的 29 颗小卫星，以及 3 颗极地轨道星链卫星等
Transporter-3	B1058.10 2022.1.13	525 km/97.5°	105 颗卫星：包括 Planet 承揽的 44 颗、D-orbit 的 ION-SCV 立方星部署器、乌克兰 Sich2-1 小型遥感卫星等
Transporter-4	B1061.7 2022.4.2	先极轨 650 km 后极轨 500 km	40 颗卫星：EnMAP (1 t) 和两颗小卫星进入 650 km 轨道，其他 37 颗卫星进入 500 km 轨道
Transporter-5	B1061.8 2022.5.26	525~535 km/97.5°	59 颗卫星：包括 5 颗商用 ICEYE 雷达探测卫星，4 颗阿根廷光学成像卫星等
Transporter-6	B1060.15 2023.1.3	525 km/97.5°	114 颗卫星：包括 36 颗 SuperDove、Launch1 的首个太空拖船 OrbiterSN1 等
Transporter-7	B1063.10 2023.4.15	505 km/97.41°	51 颗卫星：最大一颗为土耳其高分遥感卫星 iMECE (800 kg)，阿根廷 4 颗 NuSat 卫星等
Transporter-8	B1071.9 2023.6.12	535 km/97.5°	72 颗卫星：包括美国军方的 4 颗黑杰克卫星、3 颗小型试验卫星、4 颗 ICEYE 雷达探测卫星和 4 颗阿根廷光学成像卫星等
Transporter-9	B1071.12 2023.11.11	530 km/97.5°	113 颗卫星：约 5 t，90 颗直接部署，23 颗稍后从轨道转移飞行器上部部署

## 6 猎鹰 9 号火箭的经济性与前景预测

### 6.1 猎鹰 9 号火箭的成本与经济分析

2020 年以来猎鹰 9 号火箭成本构成及占比见表 8。全新猎鹰 9 号火箭的发射服务报价 6 200 万美元 (2022 年上调至 6 700 万美元)，复用型火箭发射服务报价 5 000 万美元，1 次全新火箭发射和 1 次复用火箭发射的利润为  $(6\ 200+5\ 000-5\ 000-1\ 500)$  万美元 = 4 700 万美元，即接近一枚新火箭的制造成本。

理想情况，按照一级执行 12 次、整流罩执行 6

次来计算，发射 12 次的成本为： $(5\ 000+1\ 500 \times 11+500)$  万美元 = 22 000 万美元，发射收入为  $(6\ 200+5\ 000 \times 11)$  万美元 = 61 200 万美元，利润高达 39 200 万美元。

实际过程中，Space X 公司为使市场接受复用型火箭执行发射服务，采取了自降利润、返还合同款、免费提供附加服务等措施。正是在这些措施激励和猎鹰 9 号火箭复用技术不断成熟的情况下，美国军方逐渐放宽并取消了对一级回收和复用的限制。

表 8 2020 年以来猎鹰 9 号火箭成本构成及占比 (万美元，开源数据)<sup>[4]</sup>Tab. 8 The cost composition and proportion of the Falcon 9 since 2020 (Ten thousand dollars, open source data)<sup>[4]</sup>

		全新火箭成本 (占比)	复用火箭成本 (占比)
基本硬件	一级	3 000 (60%)	
	二级	1 000 (20%)	1 000 (66.6%)
	整流罩	500 (10%)	
服务维护	推进剂	40 (0.8%)	40 (2.6%)
	发射测控、回收翻修等费用	460 (9.2%)	460 (30.6%)
总计		5 000	1 500

### 6.2 未来前景预测

(1) 未来一段时间，猎鹰 9 号火箭仍将进一步提高发射频率和重复使用率

Space X 公司已宣布 2024 年将实施 144 次发射，达到平均每 2.53 天发射一次的高密度。从发射任务需求来看，猎鹰 9 号火箭不缺任务，星链任务仍将是未来一段时间内的主力，Space X 公司已

经获批部署 12 000 颗星链卫星, 目前约有 5 000 颗星在运营。

从发射的角度分析也是可行的。猎鹰 9 号火箭在东部有两个发射台和两个海上回收船, 短板在船的周转周期, 即使按 8 天考虑, 东部发射/海上回收预估可达到 90 次。在西部有一个发射台和一个海上回收船, 西部发射/海上回收预估可达到 45 次, 再加上陆地回收和猎鹰重型的发射, 144 次的发射次数完全是可实现的。后续随着西海岸新增的 SLC-6 发射台投入使用后, 预计 2025 年的年发射总数将达到 200 次规模。

对于一级箭体的最大可复用次数能力, 目前已达到 19 次水平, 未来肯定将进一步向前探索推进, 突破 20 次、30 次甚至更多。一级箭体的年平均复用率目前已经达到 8 次/年的水平, 受维修维护周期影响, 后续再提高的空间有限, 10 次/年可能会是上限。

(2) 长远看, 猎鹰 9 号火箭的主力地位将被完全重复使用的超重星舰系统所取代

超重星舰系统目前已开展了两次综合飞行试验, 虽然尚未取得成功, 但在技术上已实现了重大突破。超重星舰系统具有的超大运载投送能力, 使得低轨的目标投送价格低至 10 美元/kg, 远低于猎鹰 9 号火箭的 5 000 美元/kg。超重星舰系统的未来应用前景广泛, 包括服务于“阿尔忒弥斯”计划, 助力美国载人深空探索活动。加快“二代星链”的部署。打造全球一小时“点对点”运输系统, 支撑物资/人员快速投送。发射大型空间设施及载荷, 大幅拓展空间探索和空间利用水平等。

## 7 结束语

重复使用是运载火箭/飞行器未来发展的大趋势和方向, 要实现高的重复使用率和发射频率, 也是个体系统化的工程, 离不开紧密耦合的 3 方面因素: 一是庞大发射任务的需求牵引, 二是运载火箭/飞行器自身要具备的快速多次复用能力(包括复用部分和非复用部分), 三是与之相匹配的发射、回收等支持系统的保障能力。猎鹰 9 号火箭之所以能够实现较高的重复使用率和发射频率, 与同时满足这 3 方面因素要求是分不开的。

对重复使用的相关分析评估, 应该注意区分能力指标和综合结果指标的差异性。

猎鹰 9 号火箭能够和已经实现了一级箭体和整流罩的多次复用, 技术上得益于 Merlin 发动机和重复使用设计, 在复用策略上, 面对多样化发射服务需求可谓“精打细算”。

猎鹰 9 号火箭已经实现的多次重复使用对航天发展来说是一项重大进步, 但仍属于部分重复使用的系统。Space X 公司正在研制的完全重复使用的超重星舰将是未来投入的方向和重点。

## 参考文献

- [1] 张雪松. 猎鹰火箭的基础: 不断升级的梅林发动机[J]. 卫星与网络, 2017(6): 40-41.
- [2] 王珏, 蔡巧言, 王飞, 等. 重复使用航天运输系统发射运维需求分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(3): 1-7.
- [3] 张志成, 崔展鹏, 刘俊林, 等. 国外新型主力火箭测试发射模式分析及启示[J]. 中国航天, 2023(7): 20-27.
- [4] 刘洁, 丁洁, 李翔宇, 等. “猎鹰”9 火箭的发射成本与价格策略分析[J]. 中国航天, 2022(12): 34-37.

引用格式: 刘敏华. 猎鹰 9 号火箭发射及箭体复用的分析[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(1): 20-27.

Citation: Liu M H. Analysis of Falcon 9 launch and booster reuse[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(1): 20-27.