

图1 猎鹰9运载火箭形态

Fig.1 Different status of Falcon 9

表1 猎鹰9火箭状态说明

Tab.1 Status description of Falcon 9

状态	v1.0(已退役)	v1.1(已退役)	FT(已退役)	Block4(已退役)	Block5(服役中)
一级发动机	9× Merlin 1C	9× Merlin 1D	9× Merlin 1D+	9×Merlin 1D+	9×Merlin 1D+
二级发动机	1× Merlin 1C 真空版	1× Merlin 1D 真空版	1×Merlin 1D 真空版+	1×Merlin 1D 真空版++	1×Merlin 1D 真空版++
高度/m	53	68.4	70	70	70
直径/m	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66
起飞推力/t	388.2	600	693.8	770	770
起飞质量/t	约333	506	549	570	570
整流罩直径/m	—	5.2	5.2	5.2	5.2
LEO 运力/t (卡纳维拉尔角发射)	10.45	13.15	≥22.8(一次性)、≥17.4(回收)	≥22.8(一次性)、≥17.4(回收)	≥22.8(一次性)、≥17.4(回收)
GTO 运力/kg	4.54	4.85	8.3(一次性)、约5.3(回收)	8.3(一次性)、约5.5(回收)	≥8.3(一次性)、≥5.5(回收)
成功率	5/5	14/15	24/24	12/12	359/360
发射服务报价/ 万美元	5 950	6 120	6 200	6 200	6 700(一次性)/5 000(回收)
使用时间	2010-06-04— 2013-03-01	2013-09-29—2016-01-17	2015-12-22—2018-02-22	2017-08-14— 2018-06-29	2018-05-11—2024-12-31
主要改进	—	总体:箭体高度从53 m加长至68 m;运载能力提升60%;一级级发动机从3×3布局改成中心1台周围8台的布局;近地轨道运载能力从10 t提升至13 t; 结构:安装着陆支架;安装栅格舵; 动力:发动机从Merlin-1C升级为Merlin-1D,推力提升60%	总体:提高助推器可用性,可执行2~3次发射任务;箭体结构高度从68 m加长至69.8 m;正式放弃二级复用计划;采用过冷推进剂,增加推进剂加注量; 结构:采用钛合金栅格舵替代铝合金栅格舵; 动力:提升发动机推力;改进复合材料增压气瓶	总体:FT和Block5之间的过渡版本; 动力:进一步提升发动机推力	最终构型;更改的重点为提高生产速度和重复使用效率; 结构:提高可重复使用性,可重复使用10余次;简化射前检查流程、简化检修维护工作;底部热防护用铬镍铁合金替代烧蚀热防护,实现重复使用;进一步提升钛合金栅格舵的防热性能;级间段、着陆支架、管路隧道增加热防护涂层;着陆支架展开后可回收;底部的八边形发动机推力支架从焊接改为螺栓连接

注:Block4为FT状态到Block5状态的过渡型号,主要进行了发动机推力提升;Block4及更早版本中的助推器都已退役、消耗或损毁。

2 运载火箭重复使用指标体系

2.1 指标体系

为量化研究运载火箭重复使用发展过程，参考相关研究成果^[6]，尝试构建运载火箭重复使用指标体系，如图2所示，共分为一类、二类和三类指标参数，具体如下。

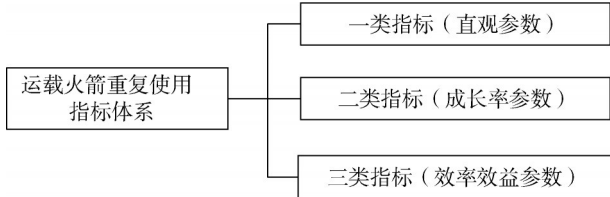


图2 运载火箭重复使用指标体系

Fig.2 Index system of reusable launch vehicle

2.2 一类指标

一类指标为直观参数，具体定义如下：

总发次 Π (指标1)：总发射任务次数，其中包含使用全新一级和回收一级的发射任务，同时也为二子级生产数量。

新箭发次 N (指标2)：使用全新一级的发射次数，同时也为一子级生产数量。

旧箭发次 O (指标3)：使用回收一级的发射次数。

其中， $\Pi=N+O$ 。

总回收发次 R (指标4)：一子级执行回收的任务次数。猎鹰9火箭的伞降试验和受控返回试验均为回收方式的探索试验，不列入回收发次的统计。

回收成功发次 S (指标5)：一子级回收成功的任务次数。

回收失败发次 F (指标6)：一子级回收失败的任务次数。

其中， $R=S+F$ 。

2.6 使用规则

指标1~10可通过上下标区别年份和状态，例： Π_i 为*i*年*j*状态的总发次。若按照区分年份、不区分状态统计，可得到重复使用火箭在时间维度发展规律情况，如2024年的总发次可记为 Π^{2024} ；若按照区分状态、不区分年份统计，可得到重复使用火箭在状态维度发展规律，如Block5状态的总发次可记为 Π_{Block5} ；若既区分年份又区分状态，则可得到不同状态在时间维度上的发展变化规律，如Block5状态在2024年的总发次可记为 Π_{Block5}^{2024} ， $\Pi^{2021-2024}$ 为2021—2024年火箭总发

2.3 二类指标

二类指标为成长率参数，由直观参数计算得到，具体定义如下：

回收率 α (指标7)：总回收发次与总发次比值，即 $\alpha=R/\Pi$ 。

回收成功率 β (指标8)：回收成功任务次数与总回收发次比值，即 $\beta=S/R$ 。

旧箭使用率 γ (指标9)：使用回收一级的发射次数与总发次比值，即 $\gamma=O/\Pi$ 。

2.4 三类指标

三类指标为效率效益参数，具体定义如下：

复用周转周期 T (指标10)：再次复用一子级发射时间与上一次发射时间差。

单子级累计使用次数 n (指标11)：某一子级累计使用次数。

最大累计使用次数 n_{max} (指标12)：所有一子级累计使用次数的最大值， $n_{max}=\text{Max}\{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 。

平均累计使用次数 \bar{n} (指标13)：所有一子级累计使用次数的平均值，即 $\bar{n}=\sum \Pi / \sum N$ 。

2.5 指标分析

一类指标 (Π 、 N 、 O 、 R 、 S 、 F) 作为直观参数，可直接与重复使用火箭发射和重复使用统计次数相对应。二类指标 (α 、 β 、 γ) 作为成长率参数，代表着重复使用技术不断递进发展的过程，体现回收和复用水平的“成长”，只有3个指标依次到了较高的水平，才代表重复使用火箭技术的成熟。三类指标 (T 、 n 、 n_{max} 、 \bar{n}) 作为效率效益参数，主要是周期和次数，对重复使用火箭成本有直接影响。 T 为重复使用火箭的周转率，周期越短、周转率越高； n 为重复使用火箭的成本水平，次数越多，新箭生产的固定成本分摊到每次发射的值越低，收益越大。 T 越小， n 越大，重复使用火箭效率越高，经济效益越大。射次数。

指标11~13为使用次数指标，具有累计效应，因此只能统计截至到某一时间点前的指标情况，例： n_{B1061}^{2024} 为代号为B1061的一子级从首飞到2024年底的累计使用次数， $n_{max}^{2024}(Block5)$ 为Block5状态所有一子级截止到2024年底的最大使用次数， \bar{n}_{Block5}^{2024} 为Block5状态截止到2024年底的平均使用次数。

综上，可得到如表2所示的运载火箭重复使用指标体系。

表2 运载火箭重复使用指标体系

Tab.2 Index system of reusable launch vehicle

指标序号	指标名称	字母代号	计算公式	含义	指标类型
指标1	总发次	Π	$\Pi=N+O$	总发射任务次数,其中包含使用全新一级和使用回收一级的发射任务,同时也为二子级生产数量	一类
指标2	新箭发次	N	—	使用全新一级的发射次数,同时也为一子级生产数量	一类
指标3	旧箭发次	O	—	使用回收一级的发射次数	一类
指标4	总回收发次	R	$R=S+F$	执行回收的任务次数	一类
指标5	回收成功发次	S	—	一子级回收成功的任务次数	一类
指标6	回收失败发次	F	—	一子级回收失败的任务次数	一类
指标7	回收率	α	$\alpha=R/\Pi$	总回收发次与总发次比值	二类
指标8	回收成功率	β	$\beta=S/R$	成功回收任务次数与总回收发次比值	二类
指标9	旧箭使用率	γ	$\gamma=O/\Pi$	使用回收一级的发射次数与总发射次数比值	二类
指标10	复用周转周期	T	—	再次复用一子级的发射时间与上一次发射时间差	三类
指标11	单子级累计使用次数	n	—	某一子级累计使用次数	三类
指标12	单子级最大累计使用次数	n_{max}	$\text{Max}\{n_1, n_2, \dots, n_n\}$	所有一子级累计使用次数的最大值	三类
指标13	平均累计使用次数	\bar{n}	$\bar{n} = \sum \Pi / \sum N$	所有一子级累计使用次数的平均值	三类

3 猎鹰9火箭重复使用发展规律

射回收和复用数据,得到如表3所示猎鹰9火箭2010—2024年回收复用发展情况统计。

3.1 时间维度统计结果

按照只区分年份、不区分状态统计猎鹰9火箭发

表3 猎鹰9火箭2010—2024年回收复用发展情况统计

Tab.3 Statistics on the development of Falcon 9 rocket recovery and reuse from 2010 to 2024

年份	年发射数量	星链任务次数/次	星链以外任务次数/次	年新箭使用发次/次	年旧箭使用发次/次	年回收发次/次	年回收成功发次/次	年回收率,%	年回收成功率,%	年旧箭使用率,%	累计发射数量	累计新箭生产数量	复用周转周期/天				平均累计使用次数/次	一子级最多使用次数/次
													最小值	最大值	平均值	中值		
2010年	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	2	2	—	—	—	—	1	1
2011年	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	—	—	—	—	0	0
2012年	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	4	4	—	—	—	—	1	1
2013年	3	0	3	3	0	0	0	0	0	0	7	7	—	—	—	—	1	1
2014年	6	0	6	6	0	0	0	0	0	0	13	13	—	—	—	—	1	1
2015年	7	0	7	7	0	3	1	43	33	0	20	20	—	—	—	—	1	1
2016年	8	0	8	8	0	8	5	100	63	0	28	28	—	—	—	—	1	1
2017年	18	0	18	13	5	15	15	83	100	28	46	41	160	356	227	195	1.1	2
2018年	20	0	20	9	11	11	10	55	91	55	66	50	72	275	157	124	1.3	3
2019年	11	2	9	3	8	10	10	91	100	73	77	53	82	264	156	135	1.5	4
2020年	25	14	11	5	20	25	23	100	92	80	102	58	51	231	99	81	1.8	7
2021年	31	17	14	2	29	31	30	100	97	94	133	60	27	224	94	62	2.2	11
2022年	60	34	26	4	56	58	58	97	100	93	193	64	21	951	95	61	3	15
2023年	91	63	28	4	87	91	91	100	100	96	284	68	25	205	56	48	4.2	19
2024年	132	95	37	5	127	130	129	98.5	99	96	416	73	14	166	46	40	5.7	24

注:2024年星盾任务统一计入星链任务。

图3为猎鹰9火箭年发射次数变化曲线,除2019年发射次数出现下降,其余各年呈逐年上升趋势,尤其是2020年后,几乎成倍增长。

2019年,星链任务处于起步阶段,火箭需求总量少,同时星链以外任务未出现增长,此时猎鹰9火箭

出现了短暂性的发射能力过剩。2020年后,猎鹰9年发射次数随星链快速部署而逐年攀升,两者上升幅度基本相同。可见,通过星链任务需求牵引,猎鹰9火箭发射能力得到了充分发挥。

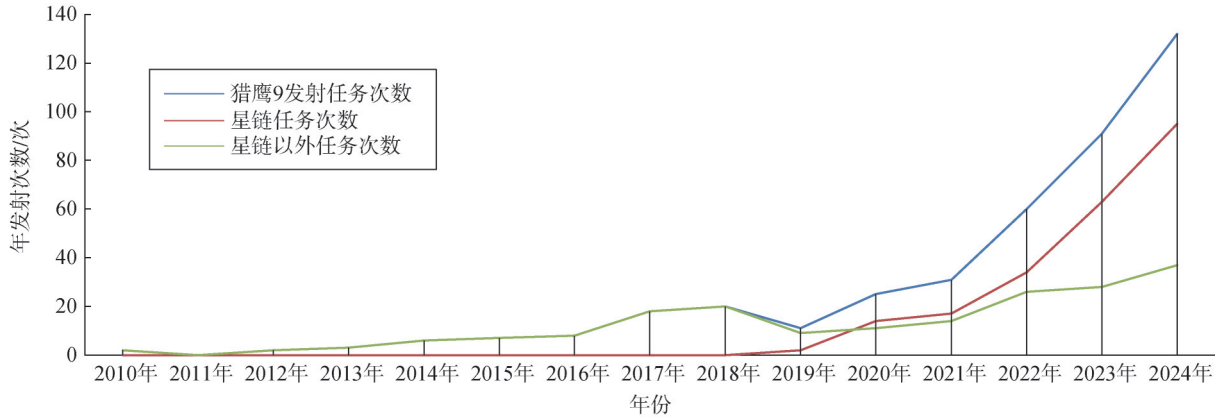


图3 猎鹰9火箭2010—2024年年度发射总次数统计

Fig.3 Statistics on the total number of Falcon 9 rocket launches from 2010 to 2024

猎鹰9火箭年度回收率、回收成功率和旧箭使用率变化情况如图4所示，具体分析如下：

回收率 α ：从2015年开始回收（回收元年），到2016年首次实现了100%回收率，在经历2017年、2018年回收率轻微回落后，后续基本保持在90%以上，实现了一子级基本都回收的目标。

回收成功率 β ：2015年回收成功率为33%，2016年达到63%，2017年达到100%。回收成功率以每年约36.7%增速提升，在2017年后基本维持在95%以上，实现了一子级回收基本都成功的目标。

旧箭使用率 γ ：2015年第一枚一子级回收成功后，2017年才开始使用旧箭（复用元年），2017年

旧箭使用率28%，2018年达到55%，2019年达到73%，2020年达到80%，2021年达到94%。旧箭使用率以每年约18.8%增速提升，在2021年后基本维持在90%以上，实现了九成任务使用“二手一子级”的目标。

2017年、2018年回收率下降的主要因素，一是2017—2018年猎鹰9火箭执行的多次GTO、MEO等高轨任务中，重复使用运力不够，因此一子级不安装着陆腿和栅格舵，按照一次性火箭使用；二是2017—2018年主要为FT、Block4状态，其设计为使用次数不超过2次，因此在2017—2018年故意不回收，同时也为新状态的Block5状态腾出空间。

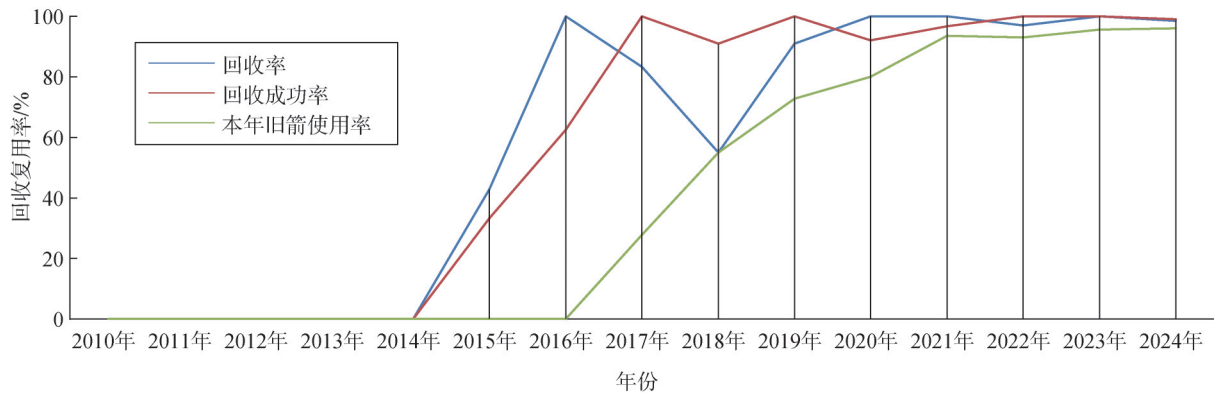


图4 猎鹰9火箭2010-2024年回收复用比率变化情况

Fig.4 Changes in the recovery and reuse ratio of Falcon 9 rockets from 2010 to 2024

通过总结时间维度分析得出结论，猎鹰9在需求牵引下快速发展，2020年以来，随着星链任务需求的增长，猎鹰9发射次数基本同幅上升，在4年内年发射数量增加了4.28倍；回收复用能力逐步发展，猎鹰9回收率、回收成功率、旧箭使用率依次逐年提升，这代表了重复使用发展的客观规律，回收技术和

复用技术需要逐步成熟。

3.2 状态维度统计结果

按照只区分状态、不区分年份统计发射回收和复用数据，得到猎鹰9火箭5种状态火箭回收复用情况统计结果如表4、图5所示。

表4 猎鹰9火箭5种状态回收复用发展情况统计表

Tab.4 Statistics on the development of Falcon 9 rocket recovery and reuse in five states

构型	v1.0	v1.1	FT	Block4	Block5	
首飞时间	2010-06-04	2013-09-29	2015-12-22	2017-08-14	2018-05-11	
末次飞时间	2013-03-01	2016-01-17	2018-02-22	2018-06-29	2024-12-31	
使用时间/天	1 001	840	793	319	2 426	
总发次/次	5	15	24	12	360	
总回收发次/次	0	3	19	6	354	
回收成功发次/次	0	0	17	6	349	
新箭发次/次	5	15	17	7	29	
旧箭发次/次	0	0	7	5	331	
回收率/%	0	20	79	50	98	
回收成功率/%	0	0	89	100	99	
旧箭使用率/%	0	0	29	42	92	
平均累计使用次数/次	0	0	1.4	1.7	12.4	
最大累计使用次数/次	0	0	2	2	24	
复用周转周期/天	最小值	—	—	160	72	14
	最大值	—	—	356	270	951
	平均值	—	—	227.6	173.8	68
	中值	—	—	195	172	52

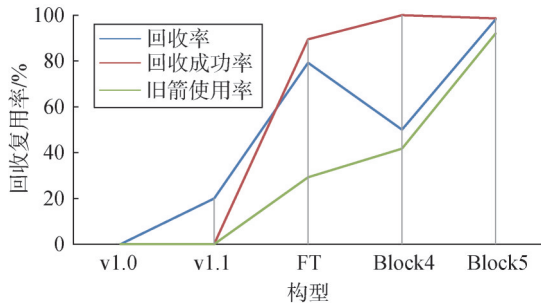


图5 猎鹰9火箭5种状态火箭回收复用情况

Fig.5 Falcon 9 rocket recovery and reuse status in 5 states

随着状态的更新，回收率 α 基本逐渐提高，但 Block4 有所降低，下降原因与 2017、2018 年度回收率下降原因相同。FT、Block4 状态为动力回收、重复使用的探索状态，是最早同时实现成功回收、成功复用的两个状态，最初被设计为只执行两次任务，即只回收复用一次，在 2017、2018 年相应任务中被消耗并退役。通过 17 个 FT 状态一子级、7 个 Block4 状态一子级的发展过渡，SpaceX 公司最终确定了 Block5 状态。

通过总结状态维度分析得出结论：首飞成功后并未固化状态，而是一直迭代更新，以提高重复使用技术水平；随着状态的更新，成长率参数和效率效益参数均显著提升；每次状态更新后，最多约有半年过渡期，旧状态火箭均快速退役；v1.0 和 v1.1 状态完成了回收方式的探索，FT 和 Block4 状态通过回收、复用

技术的发展，最终收敛到 Block5 状态，重复使用技术达到了成熟应用水平。

3.3 综合维度统计结果

图 6 为猎鹰 9 火箭 5 种状态生命力情况。如表 5、图 7，根据猎鹰 9 发射情况，计算得到一子级、二子级和发动机的生产数量变化情况，随着重复使用技术的进步，回收的一子级不断积累，到 2024 年仅需新投 5 个新的一子级即可实现 132 次发射。重复使用技术的进步降低了对火箭生产能力的要求，在生产能力未出现跨越式提升的情况下，火箭重复使用使大规模进入空间成为了可能。

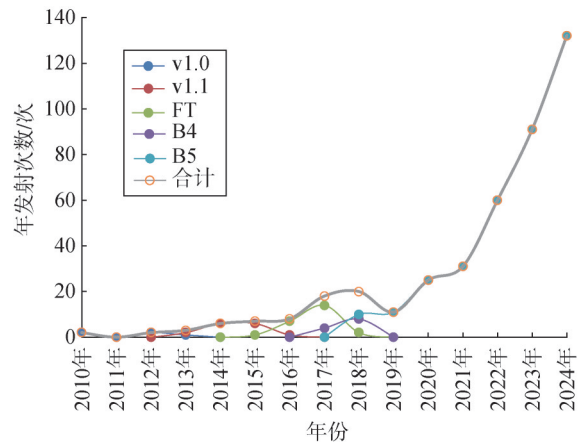


图6 猎鹰9火箭5种状态生命力情况

Fig.6 Falcon 9 rocket vitality in 5 states

表5 猎鹰9火箭2010—2024年生产任务统计

Tab.5 Falcon 9 rocket production mission statistics from 2010 to 2024

年份	一子级首飞(生产)数量/台						二子级生产(年发射)数量/台						发动机新生 产总台数
	v1.0	v1.1	FT	Block4	Block5	合计	v1.0	v1.1	FT	Block4	Block5	合计	
2010年	2	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	2	20
2011年	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012年	2	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	2	20
2013年	1	2	0	0	0	3	1	2	0	0	0	3	30
2014年	0	6	0	0	0	6	0	6	0	0	0	6	60
2015年	0	6	1	0	0	7	0	6	1	0	0	7	70
2016年	0	1	7	0	0	8	0	1	7	0	0	8	80
2017年	0	0	9	4	0	13	0	0	14	4	0	18	135
2018年	0	0	0	3	6	9	0	0	2	8	10	20	101
2019年	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	11	11	38
2020年	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	25	25	70
2021年	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	31	31	49
2022年	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	60	60	96
2023年	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	91	91	127
2024年	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	132	132	177
合计	5	15	17	7	29	73	5	15	24	12	360	416	1 073

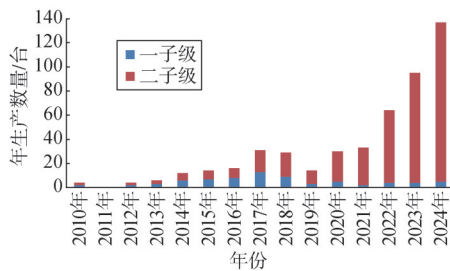


图7 猎鹰9火箭子级生产数量变化

Fig.7 Changes in the number of Falcon 9 rocket sub-stage production

图8为猎鹰9火箭5种状态一子级最大使用次数发展曲线，由图8可知：猎鹰9火箭在v1.0、v1.1均为一箭一飞；FT状态在2017年前为一箭一飞，2017、2018年为一箭两飞；Block4状态在2017年为一箭一飞，在2018年为一箭两飞；Block5状态在2018年首飞，当年即实现了一箭三飞，从2019年开始，一子级最多使用次数以每年3~4次的加速度增加，实现重复使用质的突破。

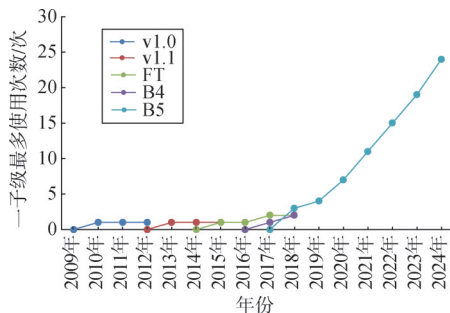


图8 猎鹰9火箭5种状态一子级最多使用次数

Fig.8 Falcon 9 rocket 5 states maximum number of times a sub-stage can be used

由表6和表7可知，复用周转中Block5状态占94.4%，因此主要对Block5状态的复用周转周期进行研究。复用周转周期最小值更能体现复用水平和复用能力的进步，最大值受任务匹配等因素影响较多。

表6 猎鹰9火箭3种状态复用周转周期统计

Tab.6 Statistics on the turnover cycle of the Falcon 9 rocket in three states

状态	复用发次	复用周转周期/天			
		最小值	最大值	平均值	中值
FT	7	160	356	228	195
Block4	5	72	270	174	172
Block5	204	14	951	68	52

表7 猎鹰9火箭Block5状态复用周转周期统计

Tab.7 Statistics on the Falcon 9 Block 5 status reuse cycle

年份	复用发次	复用周转周期/天			
		最小值	最大值	平均值	中值
2018年	4	75	118	99	102
2019年	8	82	264	156	135
2020年	20	51	231	99	81
2021年	29	27	224	94	62
2022年	56	21	951	95	61
2023年	87	25	205	56	48
2024年	127	14	166	46	40

针对2024年及之前复用次数超过10次的Block5状态一子级进行深入分析，得到表8和图9，可发现，Block5状态在第9~11次使用后会有150天左右的长周期，在第16~17次后有第2次150天以上的长周期。针对2021年6月以后首飞的新箭，未再出现

150天左右的大修。Block5 状态一子级早期版本被设计为在第10次飞行后进行定期维护整修；经过重新设计后，每个一子级可在15次，甚至20次后再进行

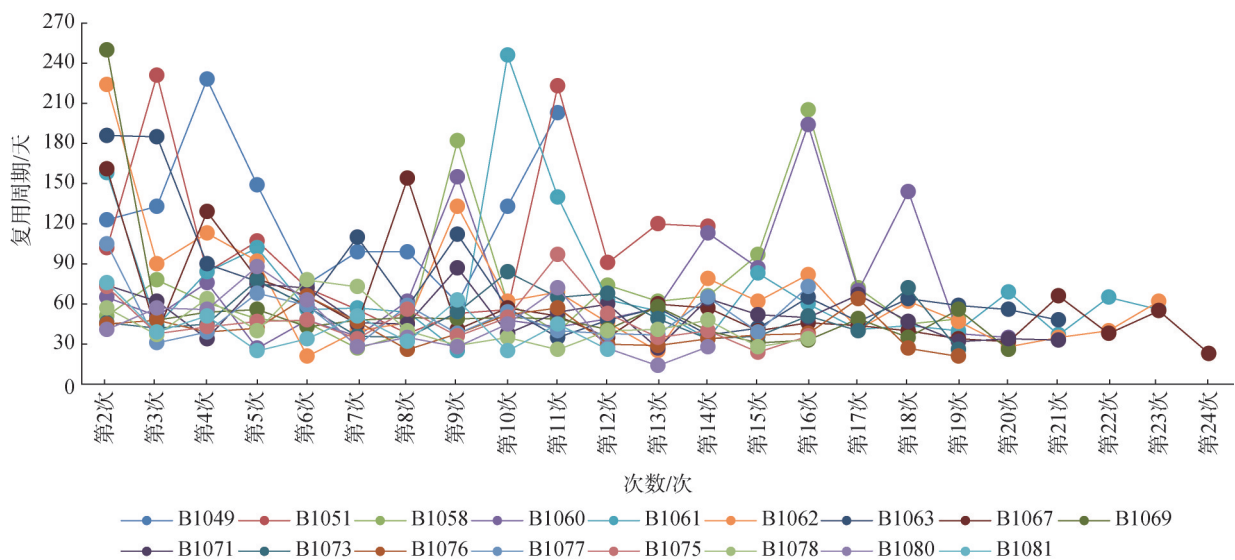
定期维护整修^[1,9]。

4 重复使用运载火箭发展规律研究

表8 猎鹰9火箭Block5复用情况(2024年及之前复用超过10次一子级模块)

Tab.8 Falcon 9 Block 5 reuse status (reuse of the first stage module more than 10 times before 2024)

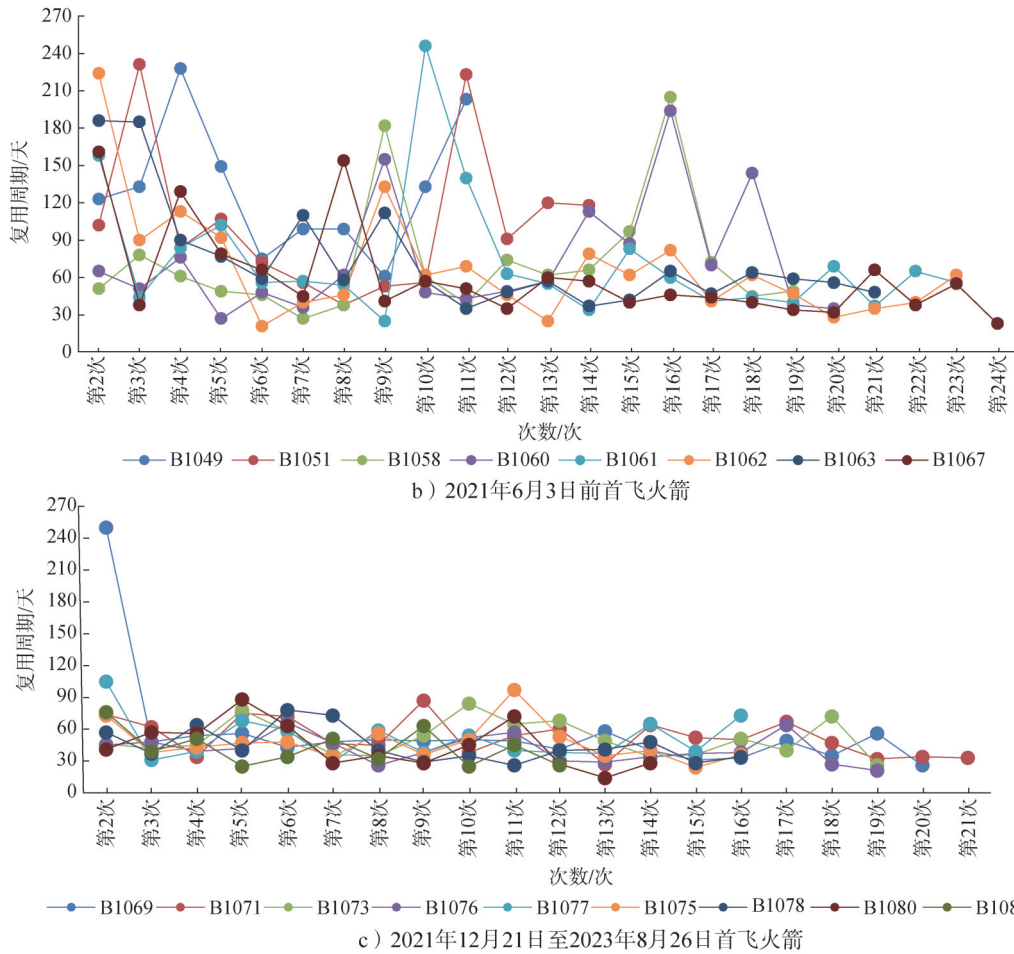
首飞时间	一子级代号	第n次使用复用周转周期/天																							
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
2018-09-10	B1049	123	133	228	149	75	99	99	61	133	203	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2019-03-02	B1051	102	231	84	107	72	56	38	53	56	223	91	120	118	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2020-05-30	B1058	51	78	61	49	46	27	38	182	61	39	74	62	66	97	205	72	45	49	—	—	—	—		
2020-06-30	B1060	65	51	76	27	48	36	62	155	48	43	49	57	113	87	194	70	144	38	35	—	—	—		
2020-11-16	B1061	158	44	84	102	56	57	54	25	246	140	63	55	34	83	60	41	44	40	69	37	65	56		
2020-11-05	B1062	224	90	113	92	21	40	46	133	62	69	46	25	79	62	82	41	62	47	28	35	40	62		
2020-11-21	B1063	186	185	90	77	59	110	58	112	57	35	48	57	37	42	65	47	64	59	56	48	—	—		
2021-06-03	B1067	161	38	129	79	66	45	154	41	57	51	35	60	57	40	46	44	40	34	32	66	38	55	23	
2021-12-21	B1069	250	48	54	56	43	48	50	49	50	49	41	58	40	31	33	49	35	56	26	—	—	—		
2022-02-02	B1071	74	62	34	75	72	46	45	87	38	54	60	27	64	52	50	67	47	32	34	33	—	—		
2022-05-14	B1073	46	42	45	78	58	36	35	54	84	65	68	49	34	36	51	40	72	26	—	—	—	—		
2022-11-26	B1076	45	48	39	42	66	47	26	38	52	57	30	29	34	37	38	64	27	21	—	—	—	—		
2022-10-05	B1077	105	31	39	68	59	29	59	38	54	40	38	37	65	39	73	—	—	—	—	—	—	—		
2023-01-19	B1075	73	38	43	47	48	34	56	36	50	97	53	35	40	24	36	—	—	—	—	—	—	—		
2023-03-02	B1078	57	37	64	40	78	73	40	29	35	26	40	41	48	28	34	—	—	—	—	—	—	—		
2023-05-21	B1080	41	57	56	88	63	28	35	28	45	72	27	14	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2023-08-26	B1081	76	39	51	25	34	51	32	63	25	45	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		



a) 2024年12月31日前首飞火箭

图9 猎鹰9火箭Block5状态复用情况

Fig.9 Reuse status of Falcon 9 Block 5



续图9

4.1 猎鹰9重复使用演变发展阶段划分

根据以上时间维度、状态维度参数的变化和分析情况，可将猎鹰9火箭回收复用技术发展的演变过程分为3个阶段，如表9所示。

各阶段发展特点如下：

a) 回收技术/方式探索阶段（2010—2014年）。

在该阶段先后开展了伞降、动力回收技术/方式的探索，可细分为伞降回收探索期（2010—2012年）和动力回收探索期（2013—2014年）。

1) 伞降回收探索期（2010—2012年）主要为该阶段以复用1次、提升火箭能力为目标，为重复使用技术成熟和产品定型奠定了基础，可细分为动力回收发展期（2015—2016年）和复用技术发展期（2017—2018年）。

1) 动力回收发展期（2015—2016年）主要为

2) 复用技术发展期（2017—2018年）主要为FT和Block4状态，共38发任务，开展回收26次，回收成功25次，使用旧箭16次，掌握了动力回收技术，基本掌握复用技术，平均复用周期约6个月，一子级平

v1.0状态，共4发任务，开展伞降试验2次，均失败，该回收路线探索失败。在该探索期，回收率 $\alpha=0$ ，回收成功率 $\beta=0$ ，旧箭使用率 $\gamma=0$ 。

2) 动力回收探索期（2013—2014年）主要为v1.1状态，共9发任务，开展受控返回试验4次，初步探索了动力回收技术。在该探索期，回收率 $\alpha=0$ ，回收成功率 $\beta=0$ ，旧箭使用率 $\gamma=0$ 。

b) 重复使用技术/产品发展阶段（2015—2018年）。

v1.1和FT状态，共15发任务，开展回收11次，回收成功6次，未使用旧箭，初步掌握动力回收技术。在该发展期，回收率 $\alpha=73\%$ ，回收成功率 $\beta=55\%$ ，旧箭使用率 $\gamma=0$ 。

均累计使用次数1.3次，最大累计使用次数突破3次。该发展期，回收率 $\alpha=68\%$ ，回收成功率 $\beta=96\%$ ，旧箭使用率 $\gamma=42\%$ ， $\bar{n}^{2018} = 1.3$ ， $n_{\max}^{2018} = 3$ ， $\bar{T}^{2017-2018} = 179$ 。

c) 重复使用技术/产品成熟阶段（2019—

2024年)。

该阶段重复使用火箭逐渐定型成熟,使用次数显著增加,全部为Block5状态。该阶段可细分为重复使用成熟期(2019—2020年)和重复使用高度成熟期(2021—2024年)。

1) 重复使用成熟期(2019—2020年)共36发任务,开展回收35次,回收成功33次,使用旧箭28次,掌握动力回收技术、复用技术,平均复用周期达到约4个月,一子级平均累计使用次数1.8次,最大累计使用次数突破7次。该成熟期,回收率 $\alpha=97.2%$,回收成功率 $\beta=94.3%$,旧箭使用率 $\gamma=77.8%$, $\bar{n}^{-2021}=1.8$, $n_{\max}^{-2021}=7$, $\bar{T}^{2019-2021}=115$ 。

2) 重复使用高度成熟期(2021—2024年)共314发任务,开展回收310次,回收成功308次,使用旧箭299次,动力回收技术、复用技术高度成熟,平均复用周期达到约2个月,一子级平均累计使用次数5.7次,最大累计使用次数突破24次。该成熟期,回收率 $\alpha=99%$,回收成功率 $\beta=99%$,旧箭使用率 $\gamma=95%$, $\bar{n}^{-2024}=5.7$, $n_{\max}^{-2024}=24$, $\bar{T}^{2021-2024}=63$ 。

4.2 中国重复使用火箭发展预测

根据猎鹰9火箭重复使用发展规律研判,针对中国垂直回收的重复使用运载火箭未来发展进行预测,得到如表10所示结果。

表9 猎鹰9重复使用运载火箭发展规律

Tab.9 The development law of Falcon 9 reusable launch vehicle

发展阶段	分阶段	时间跨度	总发次/次	总回收发次/次	回收成功发次/次	旧箭发次/次	回收率/%	回收成功率/%	旧箭使用率/%	平均累计使用次数/次	一子级最多使用次数/次	平均复用周期/天	状态
回收技术/方式探索阶段	伞降回收探索期	2010—2012年	4	0	0	0	0	0	0	1	1	—	主要为v1.0状态
	动力回收探索期	2013—2014年	9	0	0	0	0	0	0	1	1	—	主要为v1.1状态
重复使用技术/产品发展阶段	动力回收发展期	2015—2016年	15	11	6	0	73	55	0	1	1	—	主要为v1.1/FT状态
	复用技术发展期	2017—2018年	38	26	25	16	68	96	42	1.3	3	178.7	主要为FT/Block4状态,平均复用周期达到6个月
重复使用技术/产品成熟阶段	重复使用成熟期	2019—2020年	36	35	33	28	97	94	78	1.8	7	115	全部为Block5状态,平均复用周期达到3个月以下
	重复使用高度成熟期	2021—2024年	314	310	308	299	99	99	95	5.7	24	63	全部为Block5状态,复用周期下降至2个月

表10 中国重复使用运载火箭发展预测

Tab.10 Forecast of Chinese reusable launch vehicle development

发展阶段	分阶段	任务数量	时间
回收技术/方式探索阶段	伞降回收探索期	1~3发	0.5~1年
	动力回收探索期	1~3发受控返回试验	0.5~1年
重复使用技术/产品发展阶段	动力回收发展期	6~12发掌握动力回收技术	1~2年
	复用技术发展期	6~12发掌握快速复用技术,更新火箭状态	1~2年
重复使用技术/产品成熟阶段	重复使用成熟期	重复使用成熟期	2年
	重复使用高度成熟期	重复使用高度成熟期	2年

回收技术/方式探索阶段(1~2年):中国垂直回收重复火箭不需要再进行伞降回收探索,但需要0.5~1年(约1~3发任务)保证首飞成功、固化状态,并需要0.5~1年(约1~3发任务)开展受控返回试验,为垂直回收打下基础。若两个分阶段并行开展,可将时间缩短至0.5~1年。

重复使用技术/产品发展阶段(2~4年):预计需要1~2年(约6~12发任务)掌握回收技术,实现回收率 $\alpha>0$ 、回收成功率 $\beta>0$;再需要1~2年(约6~12发任务)掌握复用技术,实现回收率 $\alpha>0$ 、回收成功率

$\beta>0$ 、旧箭使用率 $\gamma>0$;实现6个月平均复用周期,突破一箭两飞。若两个分阶段可并行开展,可将时间缩短至1~2年。

重复使用技术/产品成熟阶段(4年):预计利用2年时间,实现回收率 $\alpha>95%$,回收成功率 $\beta>90%$,旧箭使用率 $\gamma>75%$,实现3个月以下的平均复用周期,突破一箭10飞;预计再利用2年时间,实现回收率 $\alpha>99%$,回收成功率 $\beta>99%$,旧箭使用率 $\gamma>95%$,实现2个月的平均复用周期,突破一箭20飞。

按照以上规律预测,保守估计10年后,中国的

垂直回收重复使用火箭可达到猎鹰9火箭2024年水平。若回收技术/方式探索阶段并行发展,重复使用技术/产品发展阶段中回收技术和复用技术并行发展,最快需约5.5年可达到猎鹰9火箭在2024年的水平。

5 发展启示

通过分析猎鹰9火箭发展过程、发展数据和发展规律,获得3点启示:

a) 一级重复使用是大规模进出空间现实可行的途径之一。SpaceX公司通过一子级重复使用技术实现猎鹰9火箭年发射次数近百次、年入轨质量超千吨的目标,掌握了大规模进出空间能力,证明了一级重复使用技术实现大规模进出空间的可行性,对中国运载火箭的未来发展具有重要的借鉴意义。

b) 分步发展,快速迭代,最终达到重复使用最终构型:先快速开发,以最短的周期研制出产品;再不断试错,需求驱动,快速迭代,优化方案设计;最后优化升级,状态固化,达到最终构型。中国想要在5.5年内实现一级重复使用高度成熟应用,必须走分步发展、快速迭代的研制道路。

c) 需求和能力互相牵引、星箭匹配发展,才能发挥重复使用火箭的效率和效益。一级重复使用具备实现大规模进出空间的能力,但需要巨量任务需求才能发挥其潜力。与星链类似的低轨大规模组网任务与一级重复使用要互相牵引,协调、匹配发展,才能发挥出重复使用火箭的效率和效益。

6 结束语

猎鹰9火箭从2010年首飞,经历13年发展,重复使用技术已高度成熟,在重复使用技术方面取得了巨大的进步和伟大的成就。本文针对猎鹰9火箭2024年底前发射任务,尝试建立了重复使用指标体系,在时间维度和状态维度等方面进行统计分析,初步得到了猎鹰9火箭重复使用技术的发展规律。通过对发展规律的分析,将猎鹰9火箭回收复用技术发展演变过程分为探索、发展和成熟3个阶段。最后,对中国垂直回收重复使用火箭的发展进行了初步预测,预计5.5~10年,中国垂直回收重复使用火箭可达到猎鹰9现有水平。中国垂直回收重复使用火箭应尽快发展,快速迭代状态,争取早日达到猎鹰9火箭今日的水平。

参 考 文 献

- [1] WebWikipedia. Falcon 9[EB/OL]. [2024-12-31] <http://en.m.wikipedia.org/wiki/Falcon9>.
- [2] 张明江,刘博.美国“猎鹰”9火箭一子级重复使用影响分析[J].中国航天,2017(6):18-20.
ZHANG Mingjiang, LIU Bo. Impact analysis of reusable first stage of the US Falcon 9 rocket[J]. China Aerospace, 2017(6): 18-20.
- [3] 于维妹.“猎鹰”9火箭发射60颗“星链”试验星[J].中国航天,2019(7):48-53.
YU Weishu. Falcon 9 rocket launches 60 starlink test satellites[J]. China Aerospace, 2019(7): 48-53.
- [4] 王芳,程洪玮,彭博.“猎鹰9”运载火箭海上平台成功回收的分析及启示[J].装备学院学报,2016,27(6):69-74.
WANG Fang, CHENG Hongwei, PENG Bo. Analysis and enlightenment of the successful retrieval of the Falcon 9 rocket on offshore platform[J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(6): 69-74.
- [5] 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.
LIU Jie, DING Jie, LI Xiangyu, et al. Analysis of launch costs and pricing strategies for the Falcon 9 rocket[J]. China Aerospace, 2022 (12): 34-37.
- [6] 牟宇,孙翼伟,秦旭东.猎鹰9火箭Block5构型首次飞行任务解析[J].宇航总体技术,2018(5):7.
MOU Yu, SUN Jiwei, QIN Xudong. The analysis of the Falcon 9 rocket Block5's mission flight configuration[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018(5): 7.
- [7] 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(1):20-27.
LIU Minhua. Analysis of Falcon 9 launch and booster reuse[J]. Astro-nautical Systems Engineering Technology, 2024(1): 20-27.
- [8] 朱雄峰,刘阳,刘鹰,等.中国运载火箭型谱发展[J].科技导报,2023,41(19):16-28.
ZHU Xiongfeng, LIU Yang, LIU Ying, et al. Study on launch vehicle spectrum programming of China[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(19): 16-28.
- [9] Baylor, Michael. With Block5, SpaceX launch cadence and lower prices[EB/OL]. (2018-05-17) [2024-10-15]. <https://www.nasaspaceflight.com/2018/05/block-5-spacex-increase-launch-cadence-lower-prices/>.

作 者 简 介

王儒文(1991—),男,工程师,主要研究方向为飞行器设计与航天项目管理。

关嵩(1980—),男,研究员,主要研究方向为航天项目管理。

马昆(1979—),男,高级工程师,主要研究方向为市场开发与航天项目管理。

马晓宇(1984—),男,高级工程师,主要研究方向为航天项目管理。

王玉林(1989—),男,高级工程师,主要研究方向为航天项目管理。