

不走寻常路的美国太空探索技术公司

The Development Road of SpaceX

■ 廖忠权/中国航发研究院

这个世界所有的思想、范式、规条和经验都是人创造出来的。而那些固有的思想、范式、规条和经验存在的意义或许就是用来被突破的。美国太空探索技术公司便是这样一个擅长突破的创新者。

美国太空探索技术公司 (SpaceX) 的“猎鹰重型” (Falcon Heavy) 火箭于2月7日, 在美国佛罗里达州卡拉维拉尔角肯尼迪航天中心发射平台发射升空。该火箭是世界上现役火箭中运力最强的, 其近地轨道运载能力63.8 t, 地球同步轨道运载能力26.7 t, 火星轨道运载能力16.8 t, 冥王星轨道运载能力3.5 t; 而且还是“可回收”的重型运载火箭, 3个芯级并联的第一级火箭助推器实现了回收, 其中两个侧芯能再次使用, 但中心芯级受到损坏; “猎鹰重型”火箭的目标是能够成为人类前往月球或火星的主要手段。

“猎鹰重型”火箭的巨大成功引发了全球热议。这不是SpaceX公司第一次吸引全球的目光, 自2002年公司创建以来, 就持续引发着全球的关注。

SpaceX是第一家涉足载人航天, 为国际空间站提供天地货物运输的私营公司, 其目标是以低成本火箭发射与由国家主导的航天机构竞争, 获取并拓展航天商业发射市场。2012年5月, SpaceX公司用其“猎鹰”9火箭成功发射“龙”飞船, 为国际空间站运送货物, 这是全球



“猎鹰重型”火箭矗立在发射台上

首次商业飞船与空间站对接; 2013年12月, SpaceX公司用其“猎鹰”9火箭成功发射了一颗通信卫星, 这是公司首次进行商业卫星发射活动。自此之后, 公司启动了“开挂”模式。

国家为后盾

SpaceX的成功固然是私营商业航天服务商改变游戏规则的重大成功, 但其实处处离不开政府的支持。事实上, 由国家把控的大型航天项目如果没有政府的支持和放手, 私营商业航天发射企业根本不会有生存的空间。

美国鼓励商业航天发展由来已

久。1984年, 国会通过《商业航天发射法案》, 允许私人发射火箭。同一年, 美国国家航空航天局 (NASA) 修订宪章文件《政策与宗旨》新增了一项: 美国的总体福祉要求NASA尽最大可能寻找和鼓励商业航天的发展。1994年, NASA又推出了“技术转移计划”, 并将每年预算的20%用来支持商业合作伙伴协助研发新技术, 其中包括可重复使用的航天器方案, 降低进入太空的成本, 同时也开创出了商业航天这一新市场。

在政策的允准和支持下, 美国诞生了联合发射联盟公司 (由

波音和洛克希德-马丁公司合资)、SpaceX公司、轨道科学公司、蓝源公司等一批商业航天服务商。2015年11月10日，美国国会通过《美国商业太空发射竞争法案》，25日奥巴马签字同意，法案正式生效。法案规定，未来8年政府将陆续给国内商业航天公司派发执照，允许私营航天企业进入外太空探索，以便促进商业航天发展、开发新能源，对自己带回来的矿物质将保留所有权和使用权。法案提出了很多“重商”措施，例如，增加了保护私营航天公司“免受有害干扰”的原则，保护他们的探测行动免于美国政府、其他国家或其他竞争对手的监控或恶性干扰等。正是在这些政策的护航下，美国商业航天企业得以放开手脚，创造出一个个奇迹。这其中，SpaceX当然也是美国国家政策支持的最大受益者。

鉴于载人航天工程耗资巨大，让美国政府头疼不已，经过反复研究和论证，美国最终决定在其航天飞机退役之后，采用商业轨道运输的模式完成国际空间站的天地往返任务，而NASA则采用“打的”租用模式进行天地往返，以降低天地运输成本。具体到SpaceX，NASA在对其授予天地往返运输项目合同的同时，还对其提供技术、资金和发射场等方面的支持，这无处不体现政府对私营服务商的支持。

马斯克之“野望”

SpaceX创立的目标就是要实现人类低成本进入太空，为此，公司采取了一系列创新的思维和理念，进而采用了诸多创新的设计、技术和管理方式，并广纳贤才。总之，

SpaceX本身就是从无到有，不被各种条条框框所束缚，很有击穿各种下限的倾向，以创新贯彻始终。

技术创新

SpaceX技术上的创新，主要是围绕低成本、高可靠和快速响应这三方面展开。低成本是SpaceX公司始终孜孜追求的技术目标。“猎鹰”系列火箭的经济性极为突出。对SpaceX而言，低成本的原则很简单，其中之一就是：尽可能在内部一个综合厂房中，采用现代化的设施完成大部分组件的生产，以避免冗繁的供应链，比如传统设计商、承包商和“成本加成”计费等等。

SpaceX为降低成本，可谓不遗余力。当公司发现用赛车安全带来绑定航天员要比专门定制的高价绷带更舒适更便宜时，马斯克便让真人进入到太空舱模型中进行测试，以确保航天员可以在舱内移动，而没有采用计算机模拟的方式。“猎鹰”火箭采用了高可靠性工业执行元件，而没有采用成本高5倍的航天级元

件。又如，使用与自动提款机类型相同、价格仅5000美元的计算机，而不是选择总价可能高达100万美元的专用计算机。NASA官员迈克·霍克恰克(Mike Horkachuck)说：“SpaceX的工程师会讨论成本问题，一个价值5万美元的部件，他们会觉得太贵，会在自己的工厂里用2000美元生产这个产品；而在NASA，我几乎从来没有听到过哪个工程师会关心零件的成本。”

此外，SpaceX没有采用旧有的研制方式，而是一切从头开始，完全自主研发了“猎鹰”系列火箭和“龙”飞船。而且SpaceX的团队还在全世界率先突破了“脑洞大开”的火箭回收技术，让以往发射后就抛弃的造价极为昂贵的火箭能够定向回收并再次利用，从而颠覆性地解决了火箭发射最主要的成本问题。

不仅如此，公司的“龙”飞船同样采用了创新设计和技术。“龙”飞船分载货型和载客型两种，除了乘员舱的逃逸系统、生命保障系统



SpaceX公司的“猎鹰”9火箭

和允许利用飞行计算机控制太空舱的船载控制系统外，其乘员舱和货运舱的结构几乎完全相同，因此可以很快在两种功能间快速切换，实现客货两用。而且，“龙”飞船也是可以重复使用的，不像其他公司的飞船只能使用一次。

SpaceX一直把自己看作是一家科技公司，不断迭代优化设计，不断通过测试来改进原型。而传统的生产方式则要制订一个强大的计划来执行，免不了要庞大的开支。SpaceX的工程师大卫·吉格(David Giger)说：“我们不会坐在那里分析某个产品分析好几年，SpaceX是建立在测试基础上的。我们边飞行边测试。”

SpaceX的降本增效措施成效显著。“猎鹰重型”火箭的单次发射费用为9000万美元，比之前的“猎鹰”9运载能力提高了2.8倍，但成本只增加了45%，而SpaceX的竞争对手——联合发射联盟——的单次发射成本则高达4.22亿美元。“猎鹰”系列火箭的经济性比其他种种火箭都不能比拟的。

在高可靠性方面，SpaceX将每一阶段的产品均送到田纳西州进行系统级试验。此外，快速反应能力也是公司关注的重点之一。“猎鹰”1、“猎鹰”9火箭的发射周期为两周，而其他公司的火箭准备周期则是2~4个月，而且“猎鹰”火箭能够满足各种发射任务之所需。

文化和管理创新

马斯克认为，传统航天工业的低效率是导致航天成本高昂的主要原因。他认为通过重新开始、回归基础，进入太空可以被更加低廉地实现。此外，公司还有一个特点是组建由优秀成员构成的精英团队，



载货型“龙”飞船

马斯克认为发展高薪、精英成员组成的小型团队更为有效率。整个团队被安置在生产场地的同一层或至少安置在同一场所，通过这种方法有效地促进了相互协调。SpaceX打造了一支极具凝聚力的团队，并负有交叉培训和多种功能性职责，团队中每个人都可以更多地参与开发过程。公司采用的理念也很“别致”，除了采用扁平化管理结构以压缩管理层级、提高效率外，企业还实现了高度一体化，有意识地模糊部门的界限以促进信息交流，员工经常在工作场所进行小范围交流讨论。

广纳贤才

SpaceX作为一家私营航天企业，最开始并不被认可和看好，很难招募到优秀人才。马斯克2017年9月在澳大利亚的国际航空航天大会(IAC)上说，“我们最开始只有几个人，并不知道怎么制造火箭……我最终成为首席工程师或首席设计师的原因并不是我想这么做，而是因为我招不到人，优秀的人都不愿意加入，所以我只能亲自来做”。而今，SpaceX发展到拥有几千人的规模，

得益于其随着企业的不断壮大而四处招揽贤才。

今天，除马斯克外，SpaceX公司的主要负责人主要来自NASA、洛克希德-马丁、波音、诺斯罗普-格鲁门等航空航天机构和企业，他们都是有着丰富行业经验的精英人才。例如，SpaceX公司的联合创始人、梅林发动机的设计师汤姆·穆勒(Tom Mueller)，原本是NASA一家供应商——美国天合(TRW)公司——研制氢氧发动机的资深专家，曾在TRW公司工作15年，后因故被解聘。穆勒还是美国最大的业余火箭俱乐部的成员。该俱乐部成员多来自附近的航天公司，他们在洛杉矶定期聚会研制火箭。2001—2002年，穆勒在一位朋友的仓库研制出世界最大的液体燃料火箭发动机，设计和动手能力可谓极强。2002年，穆勒和马斯克在朋友的仓库相遇，马斯克看着穆勒的火箭发动机，问穆勒一个简单的问题：“你能造更大的东西吗？”然后，穆勒接受了SpaceX的聘任。这只是马斯克四处延揽、不拘一格降人才的一个典型案例。事实上，SpaceX从NASA和



“猎鹰重型”一级的27台发动机

美国的各大航空航天企业都吸收了不少顶尖人才。

SpaceX之“倔强”

在“猎鹰重型”火箭成功的道路上，SpaceX公司付出不少失败的代价。在过去的十多年里，SpaceX的“猎鹰”多次发射失败，但公司都坚持了下来。“猎鹰重型”火箭采用芯级并联的结构形式，芯一级采用27台发动机，这相当于18架波音747飞机的动力。而这种芯级并联形式，曾被苏联采用过。苏联时期研发的N-1火箭，芯一级采用30台发动机，但4次发射均告失败。因此，长期以来火箭行业皆不主张采用“蜂窝”式发动机机构筑大推力系统，因为这样的结构对发动机可靠性提出了极高的要求，即使是一台发动机出现故障，都会对火箭的成功发射构成严重威胁。而“猎鹰重型”火箭恰恰采用这种结构形式并最终成功，这是SpaceX长久坚持和勇于创新成果。

“猎鹰重型”的成功很大程度上得益于其梅林发动机，而梅林发动机的设计也是剑走偏锋，另辟蹊径。

梅林发动机结构非常简单，比其竞争对手联合发射联盟的德尔它IV型火箭的发动机要简单得多，自身具有高度可靠性，进而大幅增加了总体可靠性。此外，梅林发动机推力可以在大范围内调整。“猎鹰”9火箭的9台发动机即便发射时一台发动机出现故障，其他几台发动机也可以自动增加推力补偿；在度过了发射初期的最关键时刻后，哪怕有两台发动机失效也无妨。所以，即便其一级安装了多达9台发动机，“猎鹰”9仍然保持了较高的可靠性。2012年10月，“猎鹰”9火箭发射“龙”飞船向国际空间站运送货物时，其第一级的9台发动机就曾有一台发动机因故障停机，而其他8台发动机补偿了推力损失，并精准地将“龙”飞船送到了预定轨道。

“猎鹰重型”由“猎鹰”9火箭发展而来，一级使用3个芯级并联组成，并都可回收利用；二级使用相同的梅林发动机，结构材料相同。“猎鹰重型”也像“猎鹰”9一样，可以允许在数台发动机出现故障的情况

下完成发射任务，可谓是重大的创新，完美地解决了一台发动机失效就可能导致发射失败的难题。而且，“猎鹰重型”是世界上首个由两侧助推器或侧芯对中心芯级进行交叉推进剂供应的火箭，这可使中心芯级在两侧助推器分离后仍携带大量燃料，从而使火箭的性能能与3级火箭相媲美。

过去10多年来，SpaceX的团队都在努力做好的一件事：不断完善梅林发动机以及围绕该发动机所打造的核心产品“猎鹰”火箭，并随着技术的成熟而不断降低成本。可以说，“猎鹰”系列火箭及梅林发动机处处想人所不能想，但实际证明又确实可行，让人耳目一新。而这一切与SpaceX的技术自信、长久坚持和勇于探索密不可分。

启示

SpaceX迄今取得的成功极大程度上归功于深厚的美国航空航天技术积淀和国家的大力支持，这是其生存发展的重要支柱。但更要看到的是SpaceX团队的特有的不屈不挠、创新开拓的精神，这种创新是人类积极开拓太空的一种重要精神品质。具体到发动机上，其实SpaceX的梅林发动机就其技术而言，并不是当今最先进的，但SpaceX却将其性能发挥到极致，创造出别样的奇迹。这是值得世界航空航天行业学习和借鉴的。智慧的中国人从来不缺乏开拓进取的品质和勇于创新的精神，相信未来中国的航空航天工业也会有自己的独到展现。

航空动力

(廖忠权，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机前沿技术探索和产业发展研究。)