

2018 年国外载人航天发射场发展综述

2018 年，国外载人航天发射场建设发展的重点依然是美国的肯尼迪航天中心(KSC)和俄罗斯的东方航天发射场。KSC 进入了地面发射设施适应性改造工程的收尾阶段，并开始了相应的运行测试。东方航天发射场在顺利完成第一阶段各项发射任务的保障后，已启动了第二阶段建设工程。

一、美国肯尼迪航天中心进入改造收尾阶段并开始运行测试

NASA 和 KSC 在 2018 年首先进行了地面操作与发射设施适应性改造的收尾工程，但最主要的是开展地面设施的各项运行测试以发现和解决潜在的技术问题，同时完善和确定 EM-1 任务的地面操作与发射流程方案。

(一) 完成最后一个主脐带装置的安装

KSC 的探索地面系统(EGS)团队和 JP 建造工程公司完成了七个主脐带装置中的最后一个脐带的安装。该脐带主要用于为 SLS 火箭的过渡低温芯级(ICPS)提供推进剂、环境控制系统、气动装置和电子设备等的连接，并在发射前摆离火箭。此外在 SLS 火箭停留在发射台期间，该脐带还用于提供危险气体泄漏检测。EGS 与承包商在完成脐带部件安装后，按照验证与确认规程进行了相应的操作测试。

(二) 完成乘员进入臂的安装

NASA 和 KSC 在 2 月 26 日顺利地将乘员进入臂(CAA)安装到

活动发射平台 (ML-1) 上。新研制的 CAA 长约 20.42 m, 宽约 3.05 m, 高约 5.49 m, 设计重量约为 33.57 t, 包含一个可进入服务舱的低位平台。CAA 与 ML 脐带塔的连接点设在 82.30 m 高处, 操作人员可从 79.25 m 处进入 CAA。在完成 CAA 的安装检测后, 履带运输车 (CT-2) 则驮载 ML-1 驶出垂直总装厂房 (VAB), 行进至 39B 发射台, 进行匹配性测试, 然后再将 ML-1 运回 VAB 进行验证与确认测试。

(三) 完成 39B 发射台的新型导流器的安装

NASA/KSC 针对 SLS 火箭发动机呈直线型排列的设计特点, 沿用了阿波罗登月时期的导流器设计理念, 研制了可应用于 SLS 火箭和其他商业型火箭发射的通用型导流器。该型导流器形状类似于滑板的凸面斜坡, 能直接将 SLS 火箭主芯级和 SRB 的火焰全部从一个方向排放到导流槽的另一端, 即引导至北侧。该型导流器的表面压力能经受得住火焰排放后产生的高温, 且不会导致火焰羽烟回流。由于导流器的后部是开放式结构, 操作人员在发射后能易于进入到导流槽, 这种设计可使导流器的操作和维护更加简化高效。

(四) 活动发射平台 (ML-1) 出现倾斜和扭曲现象

在 ML-1 设备安装过程中, 塔体呈现倾斜和扭曲情况, NASA 表示, ML-1 的倾斜和扭曲情况不是缘于最初设计建造, 而是从战神火箭向 SLS 火箭的适应性改造所导致的, 从改造情况来看, ML-1 的倾斜符合先前预期。研制团队针对上述两个问题开展了建模, 对基于后续设备安装而增加的倾斜量进行预测, 并通过激光勘测数据对倾斜数值加以确定。模型预测数值与实际故障检测结果相一致, 这意味着研制团队充分了解和掌握了 ML-1 所产生的自然移动规律, 并确定无需采取任何修正措施。唯一需要修正的就是拆除塔体上的全部轻便型玻璃纤维格栅, 替换为现场焊接型钢质格栅, 以此使 ML 塔体更加强韧, 但同时也相应为

ML-1 增加 75 万磅的重量。

(五) 完成 39B 发射台水喷淋消声系统的三次测试

NASA/KSC 分别在 2017 年 12 月底、2018 年 5 月 24 日和 10 月 15 日对 39B 发射台的水喷淋消声系统进行了 3 次运行状态测试。在测试中，消声水系统需要发射台的水塔将 450000 加仑注入到经新研制和适应性改造后的管路和阀门、导流槽、导流器喷嘴以及活动发射平台接口立管中，以验证点火超压/消声系统(IOP/SS)的技术性能，其中水流高峰时，系统所喷射的水可超过发射台表面约 30 米。

(六) 完成改造后的履带运输车的 39B 发射台匹配测试

NASA/KSC 在 5 月 22 日对经适应性改造后的履带运输车 (CT-2) 进行了 39B 发射台的系统匹配性测试。测试人员对 CT-2 进行了 3 次提升操作演练，以验证系统接口位，确定活动发射平台的重量，然后再制定用于模态分析的基线。

(七) 完成改造后的 ML-1 的 39B 发射台行驶测试

NASA 于 8 月 30 日开始对改造后的 ML-1 进行 39B 简洁式发射台的行驶测试。经改造后的 2#履带运输车 (CT-2) 驮载 ML-1 于美国东部时间中午 12:38 时开始正式的发射台行驶。CT-2 与 ML-1 的组合体在水罐车的引领下，先绕着 VAB 稳进行驶，然后沿着正对 SpaceX 公司 39A 发射台的履带运输车行车道行驶，并在分岔口左拐，最后驶向 39B 发射台。地面系统研发与运营 (GSDO) 团队通过履带运输车的水平调节系统，使 ML-1 在坡道行驶过程中始终保持良好的水平状态。按原定计划，当 CT-2 与 ML-1 行抵发射台台座装置时，需通过激光泊位系统 (LDS) 对台座与 CT-2/ML-1 之间的对准线进行验证，然后再放置 ML-1。由于时间限制，没有采用 LDS，但 ML-1 的硬“着陆”的精确度在

1 英寸范围内，可称得上是一个非常了不起的成果。GSDO 团队在 ML-1 进入 39B 发射台后开展的一系列测试包括水喷淋消音系统、新造导流槽、推进剂加注设备以及气体压缩设备等。

在完成 ML-1 与发射台的系统关联性测试后，9 月 7 日 CT-2 驮载 ML-1 从 39B 发射台行驶 7.1 千米返回 VAB，以开展后续为期一年的多组件验证与确认测试及任务准备。返回 VAB 的后续测试项主要有：拆除大部分的脐带装置，然后安装一些垫片以解决脐带塔倾斜问题，减缓诸如乘员进入臂(CAA)等大型摆臂摆离固定勤务塔时所附加的应力；高跨间的工作平台测试；消防报警与绝缘测试；环境控制系统测试；激光泊位系统等。

(八) 完成 SLS 火箭发射倒计时程序模拟演练

NASA/KSC 针对 EM-1 任务的发射与飞行要求，于 3 月 29 日在发射控制中心(LCC)的 1 号点火控制间进行了一次发射倒计时程序模拟演练。此次模拟演练对发射操作团队尽早地了解 and 掌握火箭推进剂加注过程的特性、倒计时程序的时间线、新研制的控制操纵台、可能产生的各种问题以及开展后续的完善与改进是非常重要的。

(九) 确定 EM-1 任务地面操作与发射流程方案

NASA/EGS 针对 SLS 火箭和猎户座飞船不同部件的地面操作技术要求，逐步完善和确定相应的接收、组装、测试与发射等实施流程与方案。EGS 在 KSC 设立了两个技术管理团队分别负责火箭和飞船的地面操作与发射：飞船与离线操作团队负责猎户座飞船、SLS 火箭上面级(过渡低温推进芯级，ICPS)和飞船芯级适配器(OSA)等部件，而综合操作团队则负责 SLS 固体火箭助推器(SRB)和主芯级部件以及整个火箭在垂直总装厂房(VAB)内的组装(包括活动发射平台，ML)。在综合操作团队完成火箭 SRB 和主芯级的组装后，飞船与离线操作团队则将其负责完成的部件移交给综合操作团队，以完成火箭和飞船在 VAB 内的最后组装与测

试。在完成飞船、ICPS和OSA的处理、装配和电池充电后，将这些部件逐一移交给综合操作团队：首先是ICPS，然后是OSA，最后是飞船。火箭SRB、主芯级、芯级适配器(LVSA)的处理、组装与测试类似于航天飞机，且在完成每个部件的处理与组装后均会进行一些综合测试。同时，EGS还将在VAB进行火箭组装过程中增加包括部分组合体模态测试(PSMT)在内的两次动态测试。

在完成SLS火箭与猎户座飞船的整体组装后，进行1次类似PSMT的综合模态测试(IMT)、1次全系统综合测试与检测和1次动态行驶测试，以及在实施正式发射前进行2次发射台行驶：第一次行驶测试将持续2个星期，以关键设施设备发射前状态合练(WDR)为主，并首次在发射台加注低温推进剂；从WDR结束返回VAB并停留1.5个星期，完成相应的设备拆装、系统检查与测试后，进行第二次发射台行驶，并停留1个星期时间，最后实施发射。

(十) 开始征集第二座活动发射平台研制方案

NASA于6月29日发布了第二座活动发射平台(ML-2)研制建造的方案征集。此次方案征集将分成两个阶段实施，首先开始的是截至7月底的申请资格，然后NASA拟从中筛选出5家公司并于11月提交成熟、详细的技术方案。NASA在方案征集文件中指出，ML-2在结构框架和运行方案方面与目前正处于适应性改造中的第一座活动发射平台类似，但更具备灵活性和可扩展性(模块化)的技术特点，以便于为配置未来LEO运载能力可达130吨的SLS BLOCK 2型运载火箭而加以适应性改造。目前，SLS BLOCK 2型火箭的具体设计要求以及首次发射时间仍未确定。

NASA希望在2019年2月签订ML-2的建造合同，合同执行期不超过44个月，即在2022年年底全部完成ML-2的建造，随后将在2023年实施SLS BLOCK 1B型火箭的首飞任务。NASA目前没有给出建造ML-2的正式成本估算值。

二、美国商业载人航天企业陆续拓展发射场建设

(一) SpaceX 在 KSC 39A 发射工位改造工程几近完工

为保障 2018 年 2 月的猎鹰重型火箭首次验证任务完成，SpaceX 在猎鹰 9 火箭发射任务的检修期内对发射台设施进行了适应性改造。猎鹰重型火箭首次验证任务结束后，SpaceX 又将 39A 发射工位重新恢复到猎鹰 9 火箭发射任务配置状态。4 月初，将 RSS 全部拆除。为了更好地安装乘员进入臂(CAA)，SpaceX 在原航天飞机固定勤务塔(FSS)上距发射台表面约 217 英尺(约 66 米)的高度新增加了一层工作平台。该平台要比 CAA 高出 70 英尺(约 21 米)，与原航天飞机气体氧排放臂的高度平齐。8 月 20 日，完成 CAA 的安装。

SpaceX 运用在 CCAFS SLC-40 和 VAFB SLC-4E 改造工程中积累的各种经验，使得 39A 发射工位的任务操作流程更加简化、高效。例如，在 39A 发射台附近设置的一个配载全部燃料和电气管线且具备后撤功能的托架，由于其距火箭排焰口要比其他发射场(SLC-40、4E)的远，能够在火箭起飞之时快速向后倾倒，从而有效地缩短了两次发射任务之间的检修、周转时间。

(二) SpaceX 与 NASA 确定首次载人任务的发射操作方案

SpaceX 与 NASA 商业乘员项目部(CCP)确定 2019 年 4 月实施的首次载人飞行任务(Demo-2)的发射当日的操作方案，其时间线与 SpaceX 应用于商业补给和卫星发射任务的加注规程是相一致的。

CCP 和 SpaceX 正积极地完成重要的分析项和试验项并进行相关的评审。NASA 现已决定同意 SpaceX 所采取的在乘员就位后再对火箭进行加注的方案，但这只是双方同意将此方案作为

发射当日的基线性操作，最终实施仍将根据 NASA 的最后操作认证情况而定。与此同时，SpaceX 对猎鹰 9 火箭的各个系统和部件进行测试与验证，而 NASA 则将对火箭的各个分系统和部件以及整个发射系统进行评审、验证与鉴定，此外还将开展单独的分析与测试，以确保所确定的全部风险已采取相关措施加以减缓或达到可接受的范围。为开展这项分析决策，NASA 针对 SpaceX 的地面操作、火箭设计、逃逸系统以及运行历史进行了大量评审。安全性是技术团队开展此项分析工作的主要动因，而其最终的评估结果则表明所确定的操作方案面临的风险最小。NASA 和 SpaceX 还将对猎鹰 9 BLOCK 5 型火箭实施多次验证与演示任务，包括 5 次“乘员-加注”演示验证，而这些演示验证对于发射当日操作方案的最终认证是非常关键的。这些加注演示验证将确定飞行乘员构型和乘员-加注时间线。当达到发射飞行任务条件后，NASA 将对任一剩余风险进行评估，以决定发射系统能够用于乘员的飞行。

在发射当日，技术人员在乘员抵达发射台之前，将猎鹰 9 火箭的复合材料裹绕压力容器 (COPV) 注入氦气并确定其达到一个稳定状态，然后于发射前 2 小时在发射系统处于静止状态时让乘员进入龙飞船。当地面人员离开发射台后，约在起飞前的 38 分钟启动发射逃逸系统，然后约在发射前 35 分钟由 SpaceX 的控制人员开始加注煤油和液氧。发射倒计时程序和发射准备工作可在发射前的最后时间加以停止。在发射前后的任一时间点出现意外情况时，发射逃逸系统将能使乘员安全逃离发射台。

(三) SpaceX 拟对肯尼迪航天中心发射区进行扩建

在 NASA 于 4 月 11 日完成并公布的草案性环境评估报告中，SpaceX 在 KSC 地面发射设施区的扩建工程主要是新建一个助推器处理厂房及配套的发射控制中心、一个展示猎鹰火箭和龙飞船模型的火箭公园、一个安保办公室和一个公用设施区。

助推器处理厂房位于 39 号发射工位的西南面，用于处理着陆返回后的助推器芯级及回收后的有效载荷整流罩的工作区将达 12000 平方米，其中三分之二用于助推器处理，其余则用于整流罩处理。该厂房的核心是将达到世界一流水平的新发射控制中心。该中心设计结构独特、新颖，其配置的设施设备将能同时服务于卫星、货运和载人等各类发射飞行任务。该中心最突出的部分是一个 90 米高的控制塔，它将连同其他控制设施设备对发射、降落及相关操作活动实施控制。

NASA 环境评估报告指出，SpaceX 的发射设施扩建工程可以帮助发射操作人员针对目前可回收、可重复使用运载火箭项目开展相应的规划、处理与操作，从而能更好地提高航天发射飞行任务的效率与成本效益。该报告预测猎鹰重型火箭的年发射次数将达到 10 次，虽然没有给出猎鹰 9 火箭的年发射次数，但其预测该型火箭每年在卡纳维拉尔角和海上回收船的降落次数将达到 54 次。

(四) SpaceX 在西靶场实施猎鹰 9 火箭的首次着陆回收

SpaceX 于 10 月 8 日在范登堡空军基地(VAFB)的 4W 发射场利用猎鹰 9 BLOCK 5 型火箭为阿根廷航天局发射了 SAOCOM 1A 地球观测卫星，这是 SpaceX 首次在美国西海岸实施猎鹰 9 火箭一子级的返回与着陆。

SAOCOM 1A 卫星重约 1600 千克，非常符合猎鹰 9 BLOCK 5 型火箭的返回着陆能力要求。SpaceX 在 SLC-4W 设置的返回着陆区距离发射台只有 1400 英尺(约 426.7 米)，而其在卡纳维拉尔角空军基地(CCAFS)40 号发射场设置的返回着陆区(LZ-1)则距离发射台超过 5 英里(约 8.05 千米)。

(五) 蓝源公司继续开展卡角 36、11 号发射场的适应性改造

蓝源公司公布了长达 124 页、共分 8 个章节的“新格伦”火箭的有效载荷用户指南，其中介绍了该型火箭助推芯级的回收剖面：对于近地点高度为 250 千米的标准型地球同步转移轨道(GTO)任务，火箭助推芯级在 199 秒的任务航程时间(MET)启动发动机关机程序，使 BE-4 主发动机关机(MECO)，推力逐渐减弱直至 202 秒的 MET 时进行与第二芯级分离，随后重新定位助推芯级，开始其返回、着陆与回收。在完成海上回收后，火箭助推芯级就被运到卡纳维拉尔角海港，然后再转运到 CCAFS 的厂房进行整修和后续任务准备。

在即将完成“新格伦”火箭一系列测试的同时，还继续进行在卡纳维拉尔角空军基地(CCAFS)36 号发射场、11 号发射场(用作试验台)的适应性改造以及助推器着陆船的建造工程。36 号发射场的周边目前设置了蓝色围挡，仅能看到一些重型设备和塔吊，无法看到实际施工情况。11 月中旬一些用于存储火箭助推器燃料(甲烷)的 100000 加仑液化天然气(LNG)储罐通过铁路运抵发射场，蓝源公司准备陆续运送更多的液体甲烷、液氧、液氢储罐，以用于后续的 36 号发射场的发射和 11 号发射场的发动机试验。

基于“新格伦”火箭助推芯级的可重复使用性，蓝源公司将名为 Stena 的货船改建为浮置性着陆平台，目前将其停放在佛罗里达州 Escambia 郡的首府 Pensacola 海港。Stena 着陆平台是一个水动力稳定型设施，能在颠簸的海面上进行可靠的助推芯级回收。

(六) 进行 2 次发射场商业乘员医疗应急救护与撤离培训

NASA 分别于 6 月 19 日和 10 月 25 日与波音、联合发射联盟(ULA)和 SpaceX 在 KSC 的 39A 发射工位和 CCAFS 的 41 号发射场组织开展了发射任务医疗应急救护与撤离模拟培训，以确保各方

的技术团队能更好地应对发射任务过程可能出现的意外情况。NASA 负责模拟测试项目主任兼 CCP 发射综合项目负责人——史蒂文·佩恩表示，为了更好地开展载人空间探索任务，NASA 竭力采取一切方法在产品的设计研制过程将所有已知危险加以排除或控制，但是如果出现了意外情况，必须对此有所准备和响应。NASA 针对发射日当天可能出现的最坏意外情况，与商业乘员项目合作方和国防部共同制订相应的处置规程并加以演练，以确保飞行乘员和地面操作团队的安全。

由于 SpaceX 载人型龙飞船的 Draco 和 SuperDraco 反推火箭发动机使用了具有毒性和致癌性的单一甲基胍自燃燃料，故而此次模拟培训场景主要为：乘员进入飞船且在乘员进入臂缩回之前出现意外故障，随后发动机自燃燃料泄漏，乘员通过安装在固定勤务塔的应急逃逸系统(EES)的吊篮撤离到地面，并通过等候在发射台周围的 3 辆防爆装甲车(MRAP)运送到 39A 与 39B 发射工位之间的“8#救护区”。救护区配置 3 架直升飞机、应急服务设备和救护队，医护人员对因燃料泄漏导致受污染的乘员进行毒性气体模拟检测，并随后实施相应的污染清除救治。当受伤乘员病情稳定后，通过直升机将他们运送到若干个医院进行后续治疗及验证整个应对救治程序，模拟培训结束。

三、俄罗斯逐步完善和建造东方航天发射场地面设施

(一) 启动东方航天发射场第二阶段地面设施建造

俄罗斯联邦政府已批准 2017—2019 年每年划拨 250 亿~300 亿卢布(3.828 亿~4.59 亿美元)用于东方航天发射场建设。虽然第二阶段建设预算没有预期的多，但随着建造包括齐奥尔科夫斯基城和机场在内的新的大型地面基础设施，从 2020 年起，东方航天发射场的资金将会大幅增加，然而这仍会依据俄罗斯的经济状况而

有待确定。

2018 年 8 月底，俄罗斯国家航天集团公司与喀山建筑工程公司签订了东方航天发射场第二阶段建造施工合同，在 9 月初开始了场区的施工工作。此前的原计划是在 6 月份开始施工，因而在 8 月已将施工所需的各类工艺设备运抵发射场。东方航天发射场第二阶段的建造工程包括安加拉系列运载火箭的发射台，包括发射台主体、燃料塔、运输装置、加注与消防系统以及其他配套设施设备。

安加拉火箭发射台的建造时间可能需耗用 45 个月，完工时间初步定于 2022 年 12 月 31 日。安加拉火箭发射台的建造费用将约达 390 亿卢布(约 5.8 亿美元)，将分成两个阶段支付给建造承包商，2018 年约 64 亿卢布(约 9500 万美元)，2021 年约 323 亿卢布(约 4.8 亿美元)。按照普京总统的要求，东方航天发射场的基础设施建设应于 2021 年前完成，以便实施采用安加拉火箭的首次无人发射和 2023 年的首次载人发射任务。俄航天局计划每年从该发射台实施 10 次安加拉 A5 型火箭的发射任务。

(二) 超重型运载火箭的地面设施建设工程列入计划

俄罗斯国家航天集团公司已组成了各种设计团队，将参与超重型运载火箭的研发，以更好地推动俄罗斯空间探索和登月项目。能源火箭与航天公司已开始布置新型火箭助推器的技术设计等工作。东方航天发射场用于新型运载火箭的地面发射设施建设工程将始于 2026 年，2028 年实施首次发射。根据估算，超重型运载火箭的研制及发射设施的建造总费用将达 15000 亿卢布(约 225 亿美元)。

(三) 东方航天发射场拟从 2020 年起转入每月发射状态

俄罗斯齐奥尔科夫斯基宇航学院的院士亚历山大·热列兹尼亚科夫表示，如果能在东方航天发射场配置更多的装配与测试设

施设备，则该发射场可从 2020 年起转入每月发射状态。此前，俄罗斯国家航天集团公司 CEO 德米特·罗戈津曾在俄罗斯 RT TV 频道电视台的一次采访中表示，该集团公司计划将东方航天发射场从当前的每年两次发射状态转入每月发射状态。热列兹尼亚科夫认为，这项计划大约可在两年内就能正式实施，且从技术角度而言，每个发射台均可每月实施一次发射。但由于目前东方航天发射场现有的装配与测试设施设备数量以及操作场区面积对于每月发射一次的高密度发射要求而言存在着一定的差距，这将是需解决的一个重要问题。

热列兹尼亚科夫表示，在前苏联时期，拜科努尔与普列谢茨克航天发射场的最密集发射期的发射次数均超过了每月一次发射，而东方航天发射场目前发射台的设计布局与拜科努尔与普列谢茨克航天发射场的是相同的，因此在技术上是可行的。但他同时表示，俄航天局管理层要求达到如此高密度发射的预期应以国家性或商业性发射任务的订单量为基础，为了发射而发射是没有实际意义的。

东方航天发射场的发射任务数量的增加将可能减少拜科努尔航天发射场的发射任务，但俄罗斯将不会完全放弃使用该发射场，仍将继续在该发射场实施某些发射任务，如载人联盟 MS 飞船任务、新型联盟 5 中型运载火箭任务等。

四、俄哈两国开展拜科努尔航天发射场地面设施移交与新建

俄罗斯与哈萨克斯坦在 2018 年完成了拜科努尔航天发射场天顶-M 火箭发射工位的地面设施的移交。哈萨克斯坦国防与航空航天工业委员会表示，俄哈两国于 8 月 22 日在 2018 国际军事技术论坛上签订了有关建造拜特列克(Baiterek)发射工位的合作协议，其中哈萨克斯坦负责将目前的天顶-M 火箭发射工位进行现

代化改造，以为拜特列克发射工位在 2022 年实施发射任务做准备。与拜科努尔航天发射场的其他租赁性发射设施不同的是，拜特列克发射工位将完全属于哈方资产。此外，两国还考虑在拜科努尔镇设立一个特殊经济区，以吸引投资。

五、结语

一年来，美国和俄罗斯不断根据各自航天发展规划，各自加快完成对肯尼迪航天中心、东方航天发射场以及拜科努尔航天发射场地面设施系统的升级改造和新建工程，并相应取得了阶段性成果和发射任务的顺利实施，同时进一步明确了后续发展方向，这为推动未来空间探索目标奠定了良好的基础。

(北京特种工程设计研究院)