

美国肯尼迪航天中心的现代化改造

进入 21 世纪以来，空间作为确保国家安全与实现国家利益的战略“制高点”，其发展越来越受到航天国家的高度重视，各国都在调整航天发展战略政策，突破关键技术，以获得更多利用和探索空间的权利。美国、俄罗斯、法国等航天大国加速推进载人航天技术发展的动向表明，载人航天活动在航天技术领域的战略地位更加突显。为了适应新型航天器、运载火箭发展的需要，以美国为首的航天大国纷纷改建或新建了一些航天发射场，为未来载人空间探索任务做准备。

一、实施背景

肯尼迪航天中心(KSC)目前是美国唯一的载人航天发射中心。随着航天飞机的退役，美国将丧失其载人航天发射能力。为了应对这一局面，美国国家航空航天局(NASA)从“星座”探月计划开始对 KSC 进行了适应性的现代化改造，总体目标是通过一种及时、低成本、高效用的手段，实施不同公司的各型号运载火箭的多类型发射任务(载人或载货)，以满足所有用户的需求。2009 年奥巴马政府取消“星座”计划后，NASA 拟从 2011 年起实施“21 世纪航天发射设施计划”。

在 NASA 公布的 2011 财年预算中，涉及 KSC 现代化改造的主要有四个方面的内容。

(1)商业乘员和货物近地轨道运载能力发展

在 KSC 设立新的项目办公室，计划在 2011—2015 财年投资 58 亿美元，以鼓励私营航天公司开展近地轨道发射服务。

(2)发射场地面设施设备的改造

项目办公室计划在 2011—2015 财年投资 19 亿美元进行各类

地面设施设备的升级改造,以提高操作效率,降低 NASA 以及其他用户的发射成本。

(3)主要关键技术的研发与演示验证

2011—2015 财年投资 60 亿美元,资助相关的主要关键技术的研发与演示验证。

(4)航天飞机后续发射任务与退役

2011 财年用于航天飞机项目的投资为 9.89 亿美元,2012 财年仍提供 8600 万美元的投资,以支持航天飞机余下的 5 次发射任务以及项目工作人员与设施转型需求。

二、主要改造工程项目

KSC 位于美国佛罗里达州布里瓦德县的梅里特岛上,靠近卡纳维拉尔角,占地面积约为 567 平方千米。KSC 场区内大约有 900 余种发射设施设备。在近半个世纪的载人航天飞行任务实施过程中,从 20 世纪 60 年代的“土星/阿波罗”、70 年代的“阿波罗/联盟”号到 80 年代的航天飞机,KSC 经历了多次改造。为了实现美国“21 世纪空间探索战略”,从 2007 年起,NASA 根据小布什政府和奥巴马政府有关载人航天发展战略以及未来空间运输系统的要求,陆续对 KSC 的地面发射设施进行适应性改造,主要改造内容包括:垂直总装厂房、39B 发射工位、活动发射平台、AF 机库、发射控制中心、场区相关配套保障系统以及相应的实施发射标准。

(一)地面发射设施的改造

1. 垂直总装厂房

KSC 最核心的部分就是高大的垂直总装测试厂房(VAB),主要用于轨道飞行器的分级、整体装配和测试。该厂房长 218 米,宽 158 米,高 160 米,由 4 个高跨区和 1 个低跨区组成,是目前世界上最大的垂直总装测试厂房。

目前,VAB 只进行 3 号高跨区的局部改造。由于“阿瑞斯”-1 火

箭以及未来研制的载人运载器的长度将大于航天飞机的长度(航天飞机全长 56.14 米,“阿瑞斯”-1 火箭为 94.2 米),因此,对厂房内的工作平台进行了适应性调整。

2. 活动发射平台

(1) 现有活动发射平台改造

KSC 共建有三个活动发射平台,用于实施“土星”-V 运载火箭和航天飞机的发射任务。1981 年首次启用的 1 号活动发射平台改造后用于“阿瑞斯”-1 火箭发射试飞任务。其结构基本不变,在履带运输现有保障条件下,行驶过程中不再使用脐带塔和减振器。

主要改造:一是在发射平台右侧的固体火箭助推器孔内安放 20 个夹具,固定水袋来减缓火箭起飞后产生的冲击效应以及保护火箭不受到损坏。二是在发射平台上安装用于控制地面检测和发射设备的地面控制系统,以及用于与飞行电子设备和控制系统连接的地面控制、指挥和通信设备。

在完成“阿瑞斯”-1 火箭试飞任务后,该活动发射平台将被拆除,启用新研制的活动发射平台。

(2) 新研制的活动发射平台

现有活动发射平台的自重为 3992 吨,新设计的脐带塔重 1800 吨,如果加上携带燃料的“阿瑞斯”-1 载人火箭和未来航天运输系统及其他组件的重量,履带运输车将无法承载如此大的重量。因此,NASA/KSC 决定为“阿瑞斯”-1 火箭设计一个新式轻型活动发射平台。新活动发射平台的制造合同总额达 2.64 亿美元。

新研制的活动发射平台为 10 段式钢结构体,总高 118.8 米,其中脐带塔高 105.1 米,主要由基座、脐带塔和地面保障设备(电力、通信、空调、冷却水及点火过压保护装置)组成。2010 年完成了该发射平台第一阶段的建造工程。

3. 1 号发射控制间

NASA/KSC 对发射控制中心的 1 号发射控制间进行了适应性改

造,并在“阿瑞斯”-1 火箭首次试飞任务中启用。新改造的 1 号发射控制间的突出特点是简洁实用。

在控制间的中央设有一个马蹄型的控制台,面向玻璃窗,可看到发射工位;在其后部设有两排控制台,可观看马蹄型控制台的操作系统。在“阿瑞斯”-1 火箭首次试飞任务中,1 号发射控制间的操作人员只有 26 人,正式任务时会达到 100 人,与航天飞机发射任务所需的 200 人相比,则减少了一半。

为了表彰航天飞机 STS-1 任务中指挥长约翰·扬和飞行员罗伯特·克里平的突出贡献,NASA/KSC 于 2006 年将 1 号发射控制间更名为扬·克里平发射控制间。

4. 发射工位

为了满足原“星座”计划的“阿瑞斯/猎户”空间运输系统以及未来新研制的航天运输系统的需求,NASA/KSC 首先对 39B 发射工位进行了适应性改造:在“阿瑞斯”-1 火箭试飞任务期间,改造旋转勤务塔(RSS)、固定勤务塔(FSS)和原供航天飞机使用的气态氧排气臂,增加入舱工作平台、环境控制系统、运载器稳定系统和避雷塔系统;在完成“阿瑞斯”-1 火箭的全部试飞任务后,39B 发射工位内的航天飞机发射硬件将全部拆除,只保留液氢液氧贮存设施和水喷淋消音系统,发射台将恢复成 1977 年时的“简洁”式发射台。目前主要的改造内容包括:

(1)上面级入舱臂

改造原气态氧排气臂,使其成为通过级间段进入上面级模拟器(USS)的内部通道并使环境控制系统(ECS)与 USS 相连。

(2)一子级环境控制系统脐带

一子级环境控制系统脐带是可伸缩与扩展的,能将环控管道从 FSS 传送到一子级的 ECS。

(3)一子级电子设备与控制系统舱入舱臂

一子级电子设备与控制系统舱(FSAM)入舱臂是设在 RSS 上的

一个平台,由此可进入一子级的第五段,进行 FSAM 在发射台的操作以及一子级 ECS 的对接与拆分。

(4)环境控制系统吹除

在 FSS 设有两根 ECS 吹除管道,主要用于降低电子设备与控制系统和地面操作人员进行运载火箭操作时的温度。其中一根用于 USS,另一根用于一子级和 FSAM。

(5)运载器稳定系统

为了增加运载器在发射台的稳定性,避免受到大风的影响而产生位移,在 39B 发射工位的固定勤务塔上设置了一个运载器稳定系统。

该系统由 4 套稳定装置组成,主要有钢结构件、两个运载器固位接口(掣卡)和 4 个弹簧减震器(类似汽车的悬挂系统)。

东/西侧的稳定装置(也称 Y 轴减震装置)通过液压制动的掣卡与运载器直接相连,同时与南/北侧的稳定装置(称 Z 轴减震装置)相扣,由此可使运载器南/北向的水平移动力量被传送到 Z 轴稳定装置上。

(6)避雷系统

由于“阿瑞斯”火箭及未来新研制的载人运载器的长度都大于航天飞机,NASA/KSC 拆除了原设在固定勤务塔上的避雷针,设计建造了与卡纳维拉尔角空军基地 37 号和 41 号发射场相同的避雷系统,工程总造价 2791.5 万美元。

新建的 39B 发射工位避雷系统包括 3 座大约 184 米高的自立式避雷塔,以及由塔尖伸出的、9 条接地电缆组成的接地网。塔间距为 24 米,在发射台平面上形成一个呈等边三角形的避雷系统。每座避雷塔的钢结构部分高 161 米,塔顶伸出的 23 米为玻璃纤维圆锥体,用于避免钢结构直接遭受雷击。三座塔上都按标准要求装备了电梯、手扶爬梯、电气和通信系统,并安装美国联邦航空局规定的照明系统。

5. 发射设备测试厂房

在经过 4 年的升级改造后,KSC 的发射设备测试厂房(LETF)于 2010 年 8 月 27 日竣工,工程总造价为 3500 万美元。该厂房建于 20

世纪 70 年代,位于 KSC 操作与检测厂房的南面、低温测试实验室的北面,总面积约 185800 平方米。主要用于进行关键性的地面保障系统和设备(如轨道器入舱臂、外储箱气态氧排气臂、外储箱排气管线、尾部服务塔与脐带系统、固体火箭助推器牵制杆等)测试。该厂房可以模拟运载火箭操作过程中的各类现象,如在风中的摆动、轨道器点火与起飞、太阳加热与低温收缩的影响等。在改造后的高跨间外的钢制场地上安装了 1 个 600 吨重的、用于张力与压力测试的测试装置,1 个用于阀门、泵与流量计测试的水流测试循环装置,2 个发射模拟塔以及 2 个 56775 升的低温塔,其中最引人注目的是新研制的运载火箭活动模拟装置,它能够模拟火箭从驶出厂房直到发射全过程的活动状态。此外,该厂房还增加了用于实施先进样机研发的制造车间。目前,该测试厂房已通过液氮和液氢测试操作的资格认证,也是 KSC 内唯一通过液氢操作认证的场所。

(二)场区配套设施的新建与改造

除了对地面发射设施进行适应性改造外,NASA/KSC 还新建和改造了场区内的相关配套设施,包括:新建了 2 个太阳能电站,功率分别为 1 兆瓦和 10 兆瓦;从 2010 年 9 月开始,耗资 610 万美元实施为期 2 年的配电系统修复工程;改造场区内的饮用水/废污水处理系统;新建了推进剂管理与维护北厂房;

将 KSC 工业园区改建成一个中心综合设施区;以及新建探索工业园等。

1. 场区中心综合设施区

该综合设施区将对原 KSC 工业园区的多功能设施进行集中。整个项目将拆改约 67000 平方米的旧设施,建造约 57600 平方米的新设施,全部改造费用为 2 亿美元。改建的中心综合设施区内的主要设施包括:KSC 总部大楼(39968.9 平方米)、中心测量厂房(12362.5 平方米)、数据库操作大楼(1859 平方米)、电磁实验室(883 平方米)、培训馆(883 平方米)、职业健康大楼(1673 平方米)、环境健康

大楼(1022.5 平方米)、工业园区保障厂房(1440.7 平方米)、技术记录资料中心(1310.6 平方米)以及共用服务区(5577 平方米)。该建设项目还涉及当地的基础设施,包括铁路、供电系统、供水系统、污水采集系统、天然气、通信、消防、冷却水等若干方面。

2. 推进剂管理与维护北厂房

2010 年 12 月,在 KSC 新建的推进剂管理与维护北厂房正式对外开放,投入营运。该厂房主要是用于未来航天器加注和低温燃料转换设备存储的场所。它的设计方位与发射控制中心在同一朝向,可以观看到 39A 和 39B 发射工位。这个厂房可以说是 NASA 最环保的场区建筑,所有建造用料都选自方圆 800 千米范围内的废弃物料,其中 95%源自 KSC 场区本身。

3. 探索工业园

在奥巴马总统要求 NASA 针对航天飞机退役规划新的美国航天发展方向之前,KSC 的管理机构就开始了让商业公司进驻 KSC 的实施工作。2010 年 6 月 23 日,与生命科学实验室相比邻的 KSC 探索工业园破土动工(如图 1)。

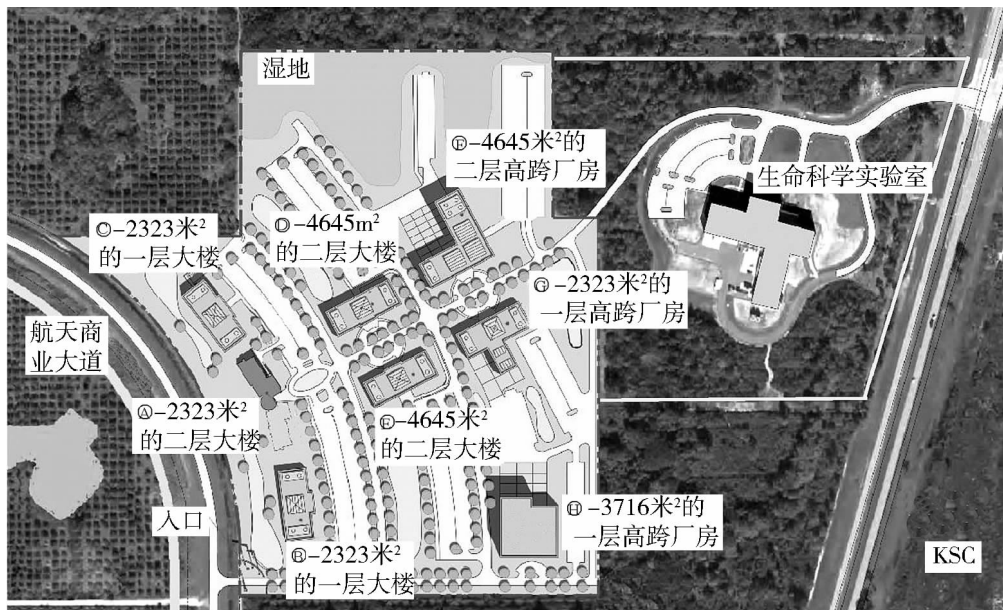


图 1 探索工业园区第一阶段规划

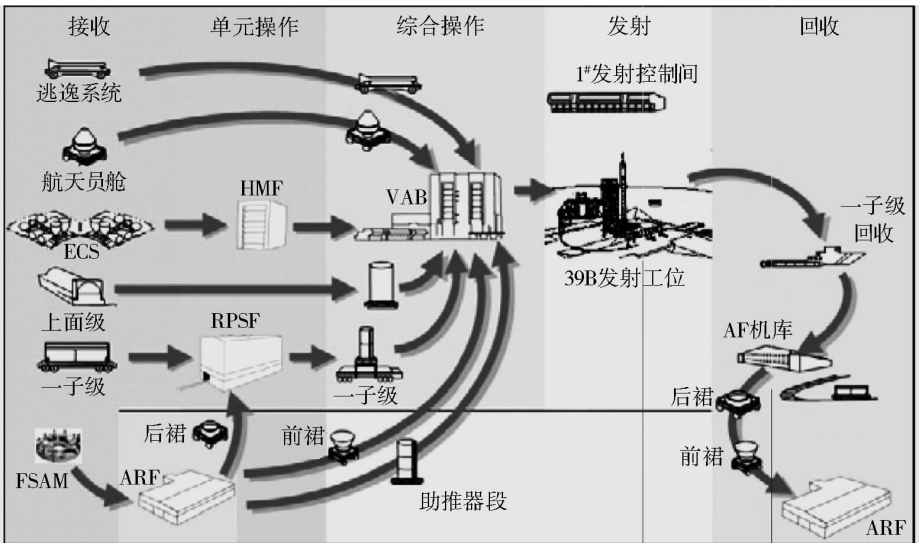
该工业园是由佛罗里达州航天机构与 NASA 合作实施的项目，两者签署了一个为期 60 年的租赁协议，使用 KSC 约 0.25 平方千米的土地，主要目标是希望能使更多的高新技术公司入驻东部航天港，有效地开展能为 NASA、其他政府机构以及美国商业航天工业部门的航天活动提供相应技术支持的研发工作，同时为东部航天港提供新的工作机会。这些公司大部分主要从事环保能源的研发，还有一些从事未来航天器的制造与装配，可为航天飞机退役后的相关人员提供 1700 个工作岗位。

三、实施发射的操作程序与标准

航天飞机退役后，KSC 将转向发射一次性运载火箭，相应的发射操作流程、倒计时程序、发射放行标准、天气限制条件等都将与航天飞机有较大区别。

(一)发射操作流程

虽然沿用了现有航天飞机的垂直操作模式，但由于“阿瑞斯/猎户座”运输系统以及未来即将研制的载人运输系统为一次性运载火箭系统，因此，其地面操作流程与目前航天飞机的有一定的区别(如图 2)。



ARF-组装与整个厂房;RPSF-旋转操作与缓冲厂房;HMF-自燃燃料维护厂房;

图 2 “阿瑞斯”火箭的地面操作流程

(二)天气限制条件

(1)发射前 7 天

从 VAB 驶向发射台。当天风力不超过 56.3 千米/小时,履带运输车以不超过 1.29 千米/小时的速度行驶,以免出现超压。在风力值达到 119 千米/小时的情况下,火箭可在发射台停留 30 天。

(2)发射前 3 天 8 小时

安装火工品。但若出现闪电,则必须将所有火工品断开,并进行系统测试。

(3)发射前 2 小时

运载器稳定系统缩回并处于安全状态。在此倒计时程序节点下,风力应不超过 37 千米/小时,直至发射。

(4)发射前 1 小时

周围环境最高温度应不超过 35℃,最低温度不低于 2.22℃,以便使火箭滚动控制系统阀保持在一个可操作的范围内。

(5)其他天气限制条件

- 如在飞行路线 18.5 千米范围内发生闪电,30 分钟内不得发射;
- 应避免积云靠近火箭飞行路线,防止形成降雨;
- 应避免砧状云靠近火箭飞行路线,以减少可能产生的闪电放电。

(三)发射放行标准

KSC 拟使用的新发射放行标准于射前 4 小时启动,直至一子级固体火箭发动机点火时为止。

(1)T-4 小时之前

在该时段,启动发射放行标准将与倒计时程序同时进行,出现发射操作故障或问题时进行修复,否则将暂停 T-4 小时程序直至故障或问题修复,或取消发射。

(2)T-4 小时~T-4 分

在该时段,启动发射放行标准将与倒计时程序同时进行,出现

发射操作故障或问题时进行修复,否则将暂停 T-4 小时程序直至故障或问题修复,或取消发射。

(3)T-4 分~T-0

进入倒计进 4 分钟后,如果出现任何问题,将重复进行倒计时 4 分钟程序,直至解决全部问题。

发射放行标准启动使用过程中将监测如下系统单元:

- 一子级:热控制系统、一子级电子测量仪器、推力向量控制、飞行安全系统;
- 电子设备与控制系统:电力系统、飞行控制系统、运载火箭状态监测系统、地面通信指挥与控制系统;
- 滚动控制系统:推进剂系统、推力发动机系统;
- 地面系统:地面控制系统、地面火工品点火装置控制员、消音系统;
- 综合系统:飞行测量仪器、照相光学控制系统、遥测系统。

(四)倒计时程序

KSC 用于“阿瑞斯”-1 火箭首次试飞任务的倒计时程序(从发射前 7 小时至起飞后 6 分钟)见表 1。

四、发射场现代化改造的主要特点

虽然目前“星座”探月计划被取消,但对 KSC 的现代化改造仍在进行。在其建设改造过程中有许多经验与教训值得我们借鉴。

(一)发射场的建设发展具有一定跳跃性。

从 20 世纪 60 年代初起,KSC 历经了无数次的改造,特别是从“阿波罗”计划到航天飞机、“星座”计划直至未来商业空间运输系统,每一次美国国家空间探索战略调整都导致 KSC 的 39 号发射工位进行较为彻底的改造,这反映出美国在其航天技术领域发展过程中,为了实现其称霸空间的野心,过于强调其技术的先进性,而忽略技术发展的连贯性和继承性,从而造成了人力、物力和财力的浪费。

表 1 KSC“阿瑞斯”-1 火箭首次试飞任务的发射倒计时程序

T-7 小时	释放第 1 个气象气球,采集大气温度参数
T-4 小时 30 分	技术人员移去为火箭提供冷却空气的外部环境控制系统
	箭载导航装置开始进行系统校正
	其他分系统完成测试,并保持加电状态
	一子级电子设备与控制系统的入舱平台缩回
T-3 小时 30 分	再次释放 6 个气象气球,测定天气条件能否适于飞行
T-3 小时	容错惯性导航装置(FTINU)完成校正,开始导航测试
T-2 小时 30 分	C 波段信标应答机加电,并测试其作用范围
	完成靶场安全系统信息漏失验证
	为系统正常状态进行辅助供电装置的验证
T-2 小时	VSS 缩回并处于安全状态
	地面控制站(GCS)系统开始监测来自发射控制中心的指令
	消音水控制切换到 GCS
	检测视频、操作飞行仪器(OFI)以及试制飞行仪器(DFI)
T-1 小时 45 分	安保人员开始实施发射台的保护
T-1 小时 15 分	地面指挥、控制与通信系统启动发射放行标准监测
	移除在 DFI 的防护罩
	对 FTINU 进行最后的校正
T-1 小时	所有人员撤离 39B 发射台,转移到安全场所
	靶场核验全部“起飞/不起飞”接口
T-43 分钟	启动飞行中止系统,并设定至“安全”状态
T-30 分钟	DFI(除照相机外)加电并记录

T-4 分钟	进入 10 分钟内部牵制(运载器在该状态下可保持 4 小时)
	6 台摄像机和小功率发送机加电
	核验遥测系统并进入发射准备状态
	靶场安全部门发布清场公告
	启动倒计时钟的自动计时
T-3 分 55 秒	核验消音系统的压力、水位和电源
	飞行中止系统和固体火箭发动机点火进入准备状态
	中止电子设备和控制系统风扇电源
	箭载数据记录仪开始记录数据
T-1 分 40 秒	飞行控制系统处于准备飞行状态
	惯性测量分系统实施最后校正
T-1 分 20 秒	飞行控制系统接收启动计数
	将信号传送到 OFI 和 DFI 的数据流,以同步接收
T-35 秒	飞行控制系统从校正模式切换至导航模式
	核验惯性和导航数据,以求其精确性
	启动辅助电源装置的开始程序
T-21 秒	通过每个轴进行约 1.5 度的摇摆和翻转,对可重复使用固体火箭发动机(RSRM)推力向量控制(TVC)万向架进行测试
T-16 秒	地面控制站发布消音指令,打开活动发射平台的泄水阀门(水流峰值可达到每分钟 34065000 升)
T-0	RSRM 点火,牵制螺栓点燃
T+0.225 秒	起飞
	火工品点燃,释放牵制运载火箭的脐带
T+6 秒	运载火箭离开发射塔
	消音系统处于安全状态
T+20 秒	滚动控制系统每隔 10 秒关停 1 秒(这主要是为了标识运载火箭的滚动转矩特性)

T+34 秒→44 秒	在上升段对火箭实施第一次测试操纵（这主要是为了确定飞行动态特性,以达到对运载器进行验证控制的目标）
T+50 秒	释放最后一个气象气球至 17975.3 米高度
T+1 分 33.6 秒	针对结构模式验证实施最后的测试操纵
T+1 分 55 秒	程序装置开始查看 RSRM 熄火状态（当滤除后的加速度以每秒 2.18 米的速度下降时）
T+2 分钟	规定的 RSRM 熄火
	将保险装置处于安全状态
T+2 分 1 秒→2 分 3 秒	DFI 从上升视频状态切换至回收视频状态
	飞行中止系统关闭并停止供电
	禁用滚动控制系统
	关闭辅助供电装置
T+2 分 3 秒	安装在一子级后裙的助推器减速发动机点火, 减缓一子级速度, 以便与上面级模拟器(USS)分离
T+2 分 3.04 秒	USS 与一子级在约 39606.7 米高度分离
	USS 继续其飞行轨迹, 并降落在大西洋
T+2 分 6 秒	一子级助推器翻滚发动机点火（主要目的是降低速度以进行安全回收）
T+2 分 33 秒	打开回收控制装置(RCU)的保险, 以实施高度操作(RCU 是一个可实施各种指令的计算机, 以确保对一子级进行安全成功的回收)
T+5 分 3 秒	RCU 测定到 4874.7 米~5179.3 米高度, 抛射防护罩, 以展开领航伞
T+5 分 33 秒	RCU 测定到 1279.6 米~1401.5 米高度, 分离前裙扩展部分, 以展开领航伞
T+6 分 9 秒	RCU 终止一子级喷嘴工作, 准备实施溅落

这对于我们来说不可取的。

(二)整体建设规划留有发展空间。

KSC 占地面积大约为 567 平方千米，但目前只开发了 9% 的土地。进入 21 世纪以来，NASA/KSC 根据发展需求，通过不同的运营方式，对 KSC 场区的各类设施进行改建或扩建，这样既可充分利用现有的技术力量、设施和设备等，又可节省大量的资金。在 2010 年 3 月的 KSC 总体发展规划中，不仅有垂直操作模式区，还将建造水平操作模式区。此外，场区内还建有大量有关空间探索、航天教育、科研试验以及旅游的设施，将随着科学技术的快速发展与应用而不断地加以扩充与强化。

(三)发射中心的技术创新能力日趋强化。

随着人类的深空探测活动快速向前迈进，航天工程的高风险、高成本特点日益突出。从 KSC 未来总体发展规划中可看出，其场区内增建或改建了多处综合性的科研试验设施，目的是为了集成各种技术手段，强化技术创新能力，提高相关设施设备的利用率，节约大量经费，降低发射成本，提高有效载荷的处理能力，增强该中心的商业航天发射能力。这样就使得航天发射场不再是仅用于发射的、功能单一的场所，而是同时具备了研制试验能力，由此提高了发射场的总体经济效益。

(四)注重场区环境保护。

KSC 除了作为载人航天发射的场所外，还是野生动物的重要庇护地，主要有莫斯科托泻湖、印第安河、梅里特岛国家野生动物保护区和卡纳维拉尔国家海滨公园。NASA/KSC 在为了实施“星座”计划对 KSC 实施现代化改造之初，就相关改造工程对周围环境的潜在影响进行了非常详细的环境评估，并提出了相应的减缓措施，其目的是将航天发射场与自然资源保护之间的独特关系进行和谐细致地维护，以此保证减少冲突而到达两者均衡发展的最终目标。

五、结束语

虽然美国国会对 NASA 提交的 2011 财年预算进行了大幅削减，但 KSC 的现代化改造进程并没有放慢脚步。KSC 发射团队在 2010 年共完成了 5 次发射任务：2 次一次性运载火箭发射和 3 次航天飞机发射。2011 年，KSC 将执行最后两次航天飞机发射任务。随着航天飞机的退役，肯尼迪航天中心将迎来其载人空间探索的新篇章。