

NASA 新一代发射场指挥与控制系统研发进展

摘要：本文主要论述了美国国家航空航天局(NASA)为新一代“航天发射系统”火箭和“猎户座”飞船的未来空间探索任务而研发的新一代发射场指挥控制系统，介绍了系统的研发背景、最新进展、主要组成，概述了系统的主要特点以及系统研发目前面临的主要问题，分析了发射场指挥与控制系统的未来发展趋势，以为我国航天发射场的指挥控制系统设计实施提供借鉴。

自美国国家航空航天局(NASA)在肯尼迪航天中心(KSC)实施首次运载火箭发射任务之时起，发射场指挥与控制系统的研制与可持续应用就一直成为空间探索任务与发射场建设发展过程中最重要的一部分。

一、历史发展

(一) 20 世纪 60 年代

“水星-红石”任务时期，由于各个操作系统相对简单，早期指挥与控制系统主要采用人工控制方式，控制人员通过配置专用人员接口的硬件系统来进行每项发射操作。“阿波罗”项目时期，由于载人飞行任务需要大型、复杂的运载火箭，各项操作的数量也随之增加，这些操作之间的时间控制愈加重要，这就要求研制“土星”火箭自动化地面操作系统。

(二) 20 世纪 80 年代

“阿波罗”项目的后期至航天飞机项目的初期，小型计算机系统已普遍应用，1980 年投入使用的航天飞机发射操作系统(LPS)具有自动化程度高、标准化和模块化的硬件和软件、通用性、多用途、高密度和非专用型的操作控制台、采用与测试工艺相关的应用编程语言以及能快速地获取有关的计划和技术工艺信息等特点。

(三) 20 世纪 90 年代

结合数字数据处理和通信技术的快速发展、航天飞机发射任务对发射操作要求的不断提高以及 KSC 发射控制中心所使用的大部分硬件和软件有近 20 年没有得到换代的现实状况，NASA 于 1996 年开始着手研制新型测试与发射控制系统(CLCS)来取代日益老化的 LPS，希望通过对指挥控制系统的核心设备进行软硬件的同步设计，以此消除 LPS 逐段改造过程中产生的各种问题。但由于该系统的研制经费大大超过预算要求而于 2002 年被终止，但部分设计理念被运用到 LPS 的后续局部改造项目中。

(四) 21 世纪初以来

由于 KSC 原有的发射体系与硬件完全是针对航天飞机的发射任务而设计的，特别是发射软件的专项化特点使其兼容空间非常小。LPS 的运行程序所采用的高级地面操作航天语言(GOAL)严重制约用于高级处理操作(如采用频域交互作用进行控制；运用高级聚类或集合理论进行系统状态分析)的复杂软件演算的研发。同时鉴于此前曾耗资 5 亿多美元对 KSC 原有指挥控制系统进行两次大规模的升级改造，均因无法达到设计目标而缩减规模或取消研制。因此进入 21 世纪以后，随着美国国家航天政策的调整、航天飞机的退役以及新型空间运输系统(“战神”系列运载火箭与“猎户座”载人飞船)的研制，NASA 于 2005 年 6 月开始研发一套无需对原系统进行升级改造就能够兼容未来各种不同发射协议和运载

火箭发射要求的航天中心指挥与控制系统(SCCS)。虽然 2010 年“星座”探月计划取消,但 SCCS 从 2011 年起继续成为地面系统研发与运营部(GSDO)开展“21 世纪航天发射设施计划”的一部分。

二、系统的主要架构组成与特点

SCCS 主要由地面与控制系统、发射控制系统(LCS)以及地面-飞行应用软件等三部分组成,但其基础与核心部分是发射控制系统,主要为发射操作提供端点单元指挥、测量与遥测信息处理,数据记录与检索的控制、连接及相关功能,并通报 SCCS 的总体状态。

NASA 在总结过去 50 多年发射历程、汲取相关经验教训并通过一系列概念性论证后,决定采用一种标准化结构体系方法进行 SCCS 的研发,在 SCCS 中尽可能多地应用商业现货(COTS)产品,并根据实际需求为不同 COTS 软件数据包之间的数据转换而编写一种称为“胶合型”代码,以便将整个系统中的所有 COTS 产品融合为一体,这与原航天飞机项目的 LPS 全部由 NASA 技术人员进行专项研发有着很大差别。图 1 为 SCCS 的软件结构体系组成。

(一) 系统核心部分——发射控制系统

1. LCS 前端结构体系

LCS 的前端结构体系由图形用户接口框架以及可生成用户自定义的指挥与自动脚本组成,采用应用服务框架(ASF)和显示服务框架(DSF)并与综合发射操作应用(ILOA)进行联合研制。ILOA 主要指发射场点火控制间内的发射技术团队。

NASA 采取了迭代法发布信息来实施 LCS 的设计(图 2),而不是待整个 LCS 前端结构的设计与测试完成后再移交给综合发射操作应用,即在每个迭代期将 LCS 的设计特性进行发布,然后 ILOA 开始各自端项的研发与测试,而无需耗用数月或数年代 LCS 的各个部分完成后再开始设计。这种迭代式发布信息的方法可以

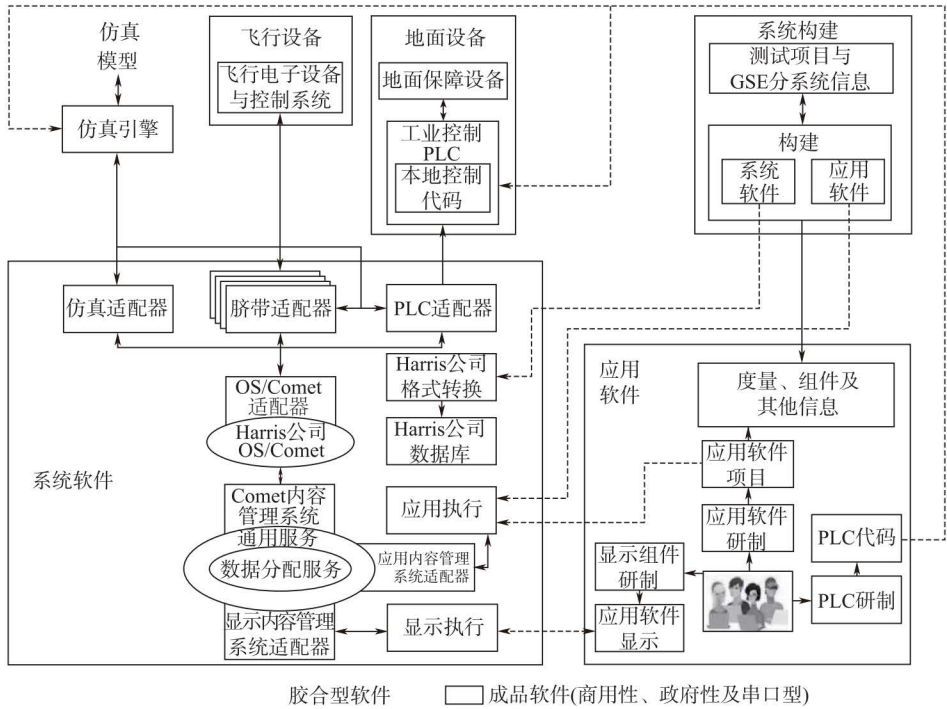


图 1 SCCS 的软件结构体系组成示意

缩短研制周期，并能提前测试 LCS 的各部分，但对于设计人员要求较高，以确保每个迭代期发布的信息与不同时期软件版本相兼容。

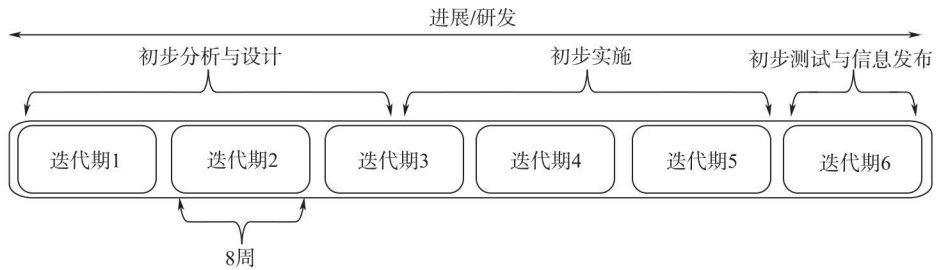


图 2 LCS 的迭代式研发过程示意图

2. LCS 显示服务框架与编辑器

新一代 LCS 的设计将生成显示内容的工作从软件研制人员移交给 ILOA 团队，但无需其具备丰富的编程经验(如能够修改飞行显示的视图、软件数据包访问等)，而由 DSF 团队进行显示编辑器程序的生成与维护。与维护数百项不同的显示内容相比，显示编辑器程序所耗用的时间和操作要减少很多，这样可降低成本并使软件研制人员转而开发其他事项。由于这些显示内容都是独立的，适用于不同的发射指令与协议，且非常便捷，不同的商业发射公司都能够生成整个可在发射期间进行调用的图形系统。

3. 应用服务框架与航天器指令语言

为使发射操作脚本更具模块化，NASA 在研发新一代 LCS 时，将脚本编写工作交给 ILOA 团队。NASA 采用一种由 SRA 国际公司(美国政府信息技术服务和解决方案的供应商)研发的商业化语言——航天器指令语言(SCL)取代地面操作航天语言，这是一项具有决定性的改变，因为与地面操作航天语言相比，SCL 更近似于英语，对无编程经验的人员也易于掌握和使用。

SCL 目前在许多航空航天工业中广泛应用，因此，NASA 的软件研发人员与 ILOA 团队在学习如何使用 SCL 时非常容易。对于其中的显示系统，虽然需要解决一些如何全面应用于发射任务的障碍，但这可由 ASF 团队来处理。

(二) 系统主要应用特点

1. 采用了更多的 COTS 产品

NASA 认为，当通过 COTS 产品实现每个系统组件的功能时，整个 SCCS 也就自然成为一个 COTS 产品，特别是在 NASA 使用私营航天公司的运载器时，可同时购入相应的商业成品软件数据包并集成到 SCCS 中。由于大多数 COTS 产品数据包的主要功能都能满足 NASA 的要求，因此，NASA 只需在购置产品数据包后，

保留其大部分的基本功能，以此展开产品的顶层研发，而无需再做最基础性的设计研发。此外，NASA 无需再耗用资金、设计人员及相关资源进行软件维护，这部分工作将由提供软件的公司负责。

2. 采用“胶合型”代码揉合 COTS 产品

虽然采用 COTS 产品可减少 NASA 软件设计人员的时间与资源，但由于 COTS 产品之间通常无法直接进行数据交换，且在实际应用中须按照航天发射任务的要求进行一定程度的适用性修改与拓展。因此，NASA 的设计人员必须为不同 COTS 软件数据包之间的数据转换而编写一种称为“胶合型”代码，其作用是对大部分 COTS 产品对这些软件进行严格测试与程序修正，并对潜在问题进行鉴别，从而能将整个系统中的所有 COTS 产品集成为一体。目前，大多数企业级产品都会提供一个软件开发工具包(SDKs)，以允许外部用户(如 NASA)按需对所购置的软件进行修改。

3. 更加注重系统功能强大、模块化和安全性

新研发的 SCCS 将更加注重功能强大、模块化和安全性，设计上不仅能确保发射操作过程中的安全性与稳定性，而且还可在软件系统的任一部分发生故障时能够提供故障失效防护与恢复机制。系统的模块化设计便于增加、修改、更换或拆除其任一部件，以满足不同发射协议的要求；良好的通用性且操作功能强大，能使发射技术人员在无需考虑适用性的情况下，对系统进行全面控制与感知，有助于提高航天发射与飞行任务的可利用性、安全性以及目标实现。

三、相关设施设备改造与研发进程

(一) 设施设备的适应性改造

为了更好地满足 SLS 火箭和“猎户座”飞船的发射飞行任务

以及 SCCS 配装与运行的实际需求，NASA 在“星座”探月计划时期对 KSC 发射控制中心(LCC)内的 1# 点火控制室(亦称扬·克里平发射控制室)进行改造的基础上继续进行适应性调整。由于安全性与可靠性一直是 NASA 实施其航天任务过程中最为关注的问题，因此，点火控制室改造工程的重要内容就是按照新的工艺设计标准拆除旧式控制台、电气与数据线缆、地板及相应的管道，安装新型商业成品式控制台、即插即用型线缆，以实现通过灵活、多功能化的手段满足不同、多项任务需求的发展目标。

改造后的控制室突出简洁实用性，在控制室的中央设有一个马蹄型的控制台，面向玻璃窗，可临近看到发射工位；在其后部设有两排控制台，可观看马蹄型控制台的操作内容。点火控制室内的控制台数量为 60 个，发射团队规模将比航天飞机项目时期减少一半，约 100~150 人左右，指挥控制人员可通过任何一个控制台访问目标网络，对不同型号火箭和飞行器的发射任务进行操控。

此外，为了更好地在发射与飞行任务中应用 SCCS，NASA 还将同期适应性改造后的 3# 控制室作为新型发射控制系统(LCS)研制的测试试验室。

(二) 系统的研发版本与进程

NASA 及地面系统研发与运营项目技术团队相继研发了 4 个迭代版本的 SCCS，即 1.0、2.0、3.0 和 4.0，每个版本还均包括含有其他内容的不同编译版。SCCS 4.0 是 NASA 应用于 EM-1 任务中的软件版本。2015 年底时，地面系统研发与运营部只完成了 1.0 和 2.0 版，而 3.0 版本仍处于研发状态。

SCCS 3.0 版本包括 4 个编译版——3.1、3.2、3.3 和 3.4，主要涉及 KSC 地面保障设备的危险性测试与操作所需的全部软件要求以及马歇尔航天飞行中心(MSFC)软件集成实验室展开测

试所需的 SLS 火箭网关。SCCS 3.1 主要供地面保障人员使用，在多有效载荷操作厂房(MPPF)内进行远程测试；SCCS 3.2 主要用于 MPPF 单个危险性测试与操作分系统的保障；SCCS 3.3 主要用于 MPPF 多个危险性测试与操作分系统的保障以及为 MSFC 软件集成实验室展开地面与飞行应用软件的研发与测试提供所需的 SLS 火箭网关；SCCS 3.4 主要用于 39B 发射台燃料储罐的加注控制。

SCCS 4.0 版本包括 2 个编译版——4.0 和 4.1，主要包含运载火箭处理与发射操作所需的最后软件部分，此外还为设在科罗拉多州丹佛市的集成测试实验室展开测试提供所需的其余 SLS 火箭网关、第三方电气地面保障设备的集成项以及软硬件。

四、系统研发面临的主要问题

世界各国的航天发射场中没有任何一个指挥与控制系统是十全十美的，NASA 新研发的 SCCS 目前仍然面临着许多影响其未来应用的问题。

(一) 研发成本大幅增加

NASA 总监察长办公室(OIG)和审计办公室在 2016 年完成的 SCCS 研发审计报告指出，仅 LCS 一项的预算研发成本就从 2012 年 1.117 亿美元增加至 2015 年的 2.074 亿美元(见表 1)，而据 NASA 最新的预算资料显示，2016 年的 SCCS 使用资金将三倍于原定数量，2017 年则达到四倍。

表 1 发射控制系统研发的计划预算拨付一览表

预算授权		PPBE13	PPBE17
财年 (单位: 百万美元)	2012*	17.5	15.0
	2013*	12.8	26.2
	2014*	11.9	24.0
	2015*	11.8	27.0
	2016	10.8	30.6
	2017	4.9	23.6
	2018	5.4	15.3
	2019	7.1	11.5
	2020	5.5	8.1
	2021	8.4	5.9
	2022	3.9	4.8
	2023	5.2	4.9
	2024	5.1	4.9
	2025	7.0	5.6
	总计	117.3	207.4

注: ① PPBE-NASA 的年度规划、设计安排进度、预算与执行流程;
② 2012—2015 的费用为实际财年美元。

(二) 系统功能项的取消与弱化

从 SCCS 研发之起, 地面系统研发与运营部就一直不停地对软件功能进行优先排序、重新规划、简化或取消, 以在技术功能与研发成本和进度之间进行权衡。已取消或暂缓研发的一些系统

功能包括：为任务系统提供地面系统数据以及检测与隔离故障通知的功能、限制访问某类航天员健康和其他敏感数据的数据保护功能、自动检测具体失效主因(无此功能，将使控制人员和技术人员了解、快速诊断和解决问题的难度加大)等。总监察长办公室认为，虽然这些系统功能对于 EM-1 任务是重要的，但取消和暂缓研发将减少了在载人飞行任务实施之前验证这些系统功能的机会。尽管 NASA 官方表示 SCCS 没有这些系统功能仍能安全运行，但总监察长办公室认为这些取消或暂缓研发的系统功能可能会对发射操作过程中出现意外事件的反应能力产生影响，继而影响到发射进度，而 NASA 对此是非常清楚的。

(三) 研发进度大大滞后

根据 NASA 总监察长办公室和审计办公室在 2016 年完成的 SCCS 研发审计报告，目前 SCCS 的研发进度已从 2016 年 7 月推迟至 2017 年 9 月，即有 14 个月的延后。但截止本文编写的时间，仍未有关于 SCCS 4.0 版本发布的最新资料。表 2 为 SCCS 的各版本研发与实际进度一览表。

表 2 SCCS 的各版本研发与实际进度一览表

版本	功能	年 度				
		2012	2013	2014	2015	2016
1	基础性指挥与控制	2011. 11	2013. 05	2013. 07 [*]		
2	非危险性指挥与控制			2014. 08	2014. 09 [*]	
3 ^a	危险性指挥与控制			2015. 07	2015. 08	2016. 06
4 ^b	运行软件			2016. 07	2016. 10	2017. 09

注：^{*}—实际交付日期；a—泛指 3.0~3.4；b—泛指 4.0~4.1。

总监察长办公室认为，造成 SCCS 研发成本增加、进度滞后以及某些系统功能项的取消与弱化的主要原因是项目团队为实现

该系统软件架构体系而确定的“独立研发或购买商业成品”决策问题。“独立研发”方式的优势在于唯一性、质量可控、人员技术熟练及可保护专利技术等，而“购买商业成品”方式的优势在于可减少软件代码编制、降低研发成本、缩短研发时间以及可使用户利用最新技术。

最终 NASA 决定以“购买商业成品”方式为主研发 SCCS，并自行设计“胶合型”代码对这些 COTS 软件进行揉合集成，主要基于两方面因素：一是不希望只通过一家企业提供所需的整个软件系统，如果该企业出现财政困难或停止提供技术保障，则会严重影响到 NASA 的未来空间探索发展目标；二是该项决策是在 2006 年 6 月做出的，项目团队认为对各种 COTS 软件进行集成是不太会耗用大量时间及导致技术的复杂性。

然而 NASA 及地面系统研发与运营部均低估了各 COTS 软件产品集成所形成的技术复杂性、大量商业化产品应用与集成增加了出现故障的可能性以及降低整体系统质量等问题。实际上，由于各 COTS 产品之间通常无法直接进行数据交换，而且大型软件数据包的 COTS 产品是由数百个程序员编写的，本身会存在某些错误并随时间发生变化，NASA 设计人员需耗用大量时间对这些软件进行严格测试与程序修正，并会同软件供应方对潜在的不合格问题进行鉴别，这无疑均增加了原先预期的工作难度，最终导致了整体研发进度的延后和研发成本的增加，同时出于研发进度和成本的压力而不断取消或暂缓研发一些系统功能。

NASA 正在按照总监察长办公室的建议对 SCCS 的研发工作开展独立性评估，并采取必要的措施来降低后续研发成本、进度以及技术性能问题面临的风险，如考虑购置商业化指挥与控制系统以替换正在研发的某一部分或全部系统。

五、结语

SCCS 的设计主要遵循三个主要体系架构原则：一是系统需持续应用 40 年；二是系统为标准化研制，不能只与一个承包商绑定；三是系统具备一定的灵活性与兼容性，可支持未来的运载火箭与航天器。尽管 SCCS 的研发目前面临着一些难题，但其设计理念体现出未来指挥与控制系统的发展趋势：更加注重强大功能、模块化和安全性，通用框架设计，面向多样化发射服务，持久性应用等。

(北京特种工程设计研究院)