

2011 年载人运载器发展综述

2011 年,世界航天国家围绕载人航天共进行 14 次发射,其中美国 3 次,俄罗斯 9 次,欧洲和日本各 1 次。美国航天飞机完成谢幕飞行,标志着航天飞机时代的终结;美国进一步推进“月球以远”载人深空探索战略,新型重型运载火箭方案最终出炉。受资金和连续失利的影响,俄罗斯放弃新型运载火箭“罗斯”M 的研制。欧洲和日本分别成功发射了第二艘“自动转移飞行器”-2(ATV-2)和“H-2 转移飞行器”-2(HTV-2),积极储备载人航天技术。印度查明 2010 年底“地球同步轨道卫星运载火箭”(GSLV)故障原因,将继续推进低温上面级试验。

一、发射情况

世界主要航天国家围绕空间站建设与利用共进行了 7 次载人航天发射,其中美国航天飞机 3 次(任务执行情况详见 108 页,美国航天飞机完成最后三次空间飞行任务),俄罗斯“联盟”-FG 火箭 4 次,为国际空间站运送了长期考察组成员以及重要组件和货物。此外,俄罗斯“联盟”-U 火箭执行了 5 次、日本 H-2B 火箭和欧洲“阿里安”5ES 分别执行 1 次空间站载货任务(任务执行情况详见 112 页和 115 页,日本第二艘货运飞船和欧洲第二艘货运飞船到访国际空间站)。详细发射情况见表 1。其中,俄罗斯“进步”号货运飞船发射失败尤为引人关注。

2011 年载人运载器发展综述

表 1 2011 年载人航天活动发射情况

国家	运载器	发射日期	有效载荷	发射场	发射结果
俄罗斯	“联盟”U	2011 - 1 - 28	“进步”M - 09M 货运飞船/ARISSat 小卫星	拜科努尔	成功
		2011 - 4 - 27	“进步”M - 10M 货运飞船	拜科努尔	成功
		2011 - 6 - 21	“进步”M - 11M 货运飞船	拜科努尔	成功
		2011 - 8 - 24	“进步”M - 12M 货运飞船	拜科努尔	失败
		2011 - 10 - 30	“进步”M - 13M 货运飞船、Chibis - M 科研卫星	拜科努尔	成功
	“联盟”FG	2011 - 4 - 4	“联盟”TMA - 21 载人飞船	拜科努尔	成功
		2011 - 6 - 7	“联盟”TMA - 02 载人飞船	拜科努尔	成功
		2011 - 11 - 14	“联盟”TMA - 22 载人飞船	拜科努尔	成功
		2011 - 12 - 21	“联盟”TMA - 03 载人飞船	拜科努尔	成功
合计	9 次				
美国	“奋进”号	2011 - 5 - 16	AMS - 02 阿尔法磁谱仪/ELC - 3 空间站后勤组件	肯尼迪航天中心	成功
	“发现”号	2011 - 2 - 24	永久性后勤保障舱	肯尼迪航天中心	成功
	“亚特兰蒂斯”号	2011 - 7 - 8	“拉斐尔”多用途后勤舱、PSSC 试验平台	卡纳维拉尔角	成功
合计	3 次				
欧洲	“阿里安”5ES	2011 - 2 - 16	ATV - 2	库鲁	成功
日本	H - 2B	2011 - 1 - 22	HTV - 2	种子岛航天中心	成功
总计	14 次				

2011 年 8 月 24 日,俄罗斯“联盟”-U 运载火箭搭载着“进步”M - 12M 货运飞船从位于哈萨克斯坦的拜科努尔发射场点火升空。在火箭升空后约 325 秒时,地面与火箭和飞船失去通信联系。据莫

斯科任务控制中心消息,当火箭升空后约 325 秒时,箭上计算机飞行终止系统检测到火箭二子级的动力系统(发动机 РД0110)压力低于正常值,中止提供推力,致使发射失败。事故调查委员会的结论是,由于燃料输送管路堵塞造成燃气发生器故障所致,而导致燃料输送管路堵塞的原因是生产环节出现错误,因此建议加强火箭生产质量控制管理。此次发射是该型火箭 2011 年第 4 次发射“进步”号货运飞船,飞船上载有约 2.66 吨补给品。

“联盟”U 为二级运载火箭,主要用于发射卫星和载人/不载人航天器到近地轨道。“联盟”系列运载火箭从 1960 年开始研制,总体设计由科罗廖夫设计局(现为能源火箭航天集团)负责。“联盟”U 火箭自 1973 年 5 月 18 日进行首次飞行以来,共进行了 745 次发射,其中成功 724 次,失败 21 次,成功率为 97.2%。2011 年 8 月 24 日发射任务失败,使得“联盟”U 火箭及其载人型“联盟”FG 火箭的系列飞行任务一并推迟。

2011 年,“联盟”U 和“联盟”FG 火箭完成了 4 次载货和 4 次载人飞行,共将约 10 吨货物和 12 名航天员送上国际空间站。美国航天飞机退役后,俄罗斯的“联盟”火箭成为唯一能向国际空间站运送人员的运输工具。

二、新型运载器研制进展

(一) 美国重型运载火箭方案敲定

经过几轮推迟,NASA 最终于 2011 年 9 月 14 日正式公布了新一代重型运载火箭——航天发射系统(SLS)方案。SLS 的研制采取渐进式发展模式,其初始方案的近地轨道运载能力为 70 吨,改进后将达到 130 吨,以实现“月球以远”深空探测的任务需求。重型火箭预计耗资 120 亿美元,其首次研制飞行试验将于 2017 年底进行。

美国新型重型运载火箭由航天飞机衍生而来,采用两级结构,芯级直径 8.38 米,采用 5 台航天飞机主发动机 RS-25D/E(初始方

NASA 在公布 SLS 方案时并没有给出发射进度安排,但在 2011 年 7 月 27 日公布的“NASA 在预算受限条件下估算的时间表”中,基本体现了新一代重型运载火箭的研制计划。(见表 3)

表 3 美国新一代重型火箭初步发射计划表

任务	发射计划	火箭构型	任务类型
SLS - 1	2017 年 12 月	火箭采用两级半构型,芯级使用航天飞机 8.38 米直径外贮箱以及 3 台 RS - 25D 可重复使用航天飞机主发动机,捆绑两枚 5 段式固体火箭助推器,二子级采用 5 米直径的“德尔塔”4 火箭上面级	发射多用途载人飞行器 (MPCV), 进行无人绕月飞行
SLS - 2	2021 年 8 月*	火箭构型与 SLS - 1 任务相同	发射多用途载人飞行器 (MPCV), 进行载人绕月飞行
SLS - 3	2022 年 8 月	火箭构型与 SLS - 1 任务相同	—
SLS - 4	2023 年 8 月	火箭构型与 SLS - 1 任务相同	—
SLS - 5	2024 年 8 月	使用新的整流罩及经过竞争最后选出的捆绑助推器。此前,助推器的竞争是在固体和液体方案之间进行	新型号, 货运首飞
SLS - 6	2025 年 8 月	—	载人探索小行星
SLS - 7	2026 年 8 月	火箭主发动机改用一次性的 RS - 25E 航天飞机主发动机	货运任务
SLS - 8	2027 年 8 月	—	载人飞行
SLS - 9	2028 年 8 月	—	货运任务
SLS - 10	2029 年 8 月	—	载人飞行
SLS - 11	2030 年 8 月	火箭使用 5 台 RS - 25E 发动机	新型号, 货运任务
SLS - 12	2031 年 8 月	火箭构型与 SLS - 11 任务相同	载人飞行
SLS - 13	2032 年 8 月	完全改进的火箭构型, 芯级使用 5 台 RS - 25E 发动机, 上面级使用 J - 2X 发动机, 运载能力达 130 吨	新型号, 货运任务
* 根据 NASA 航天飞行网站 2011 年 9 月 30 日的报道, SLS 的第 2 次飞行可能提前到 2018 或 2019 年			

新一代重型运载火箭的构型方案虽然刚刚公布,但其核心部件的研制一直接计划进行。

助推器

新一代重型运载火箭前几次飞行将使用 5 段式航天飞机固体助推器。由于曾作为“阿瑞斯”1 火箭的第一级,设计研制工作早在 2005 年就开始进行,它由航天飞机 4 段式固体助推器改进而来,改进内容包括:(1)增加第 5 段,增大火箭的运载能力和动力;(2)改变推进剂药柱;(3)采用更大的发动机喷管;(4)采用先进的橡胶衬里隔热材料。NASA 与阿连特技术系统(ATK)公司分别于 2009 年 9 月 10 日、2010 年 8 月 31 日和 2011 年 9 月 8 日完成了 3 次 5 段式固体助推器的全尺寸、全工况静态点火试车,验证了固体发动机在 4.44℃~32.2℃环境温度范围内的性能。

按照研制计划,NASA 将在 2024 年 SLS 第 5 次飞行前选定最终的助推器方案,可能沿用已有的固体助推器方案,也有可能研制并采用液体助推器。目前 NASA 还在对多种备选方案进行论证研究,其中由航空喷气公司提出的液体助推器方案成为固体助推器的主要竞争对手,该方案采用 AJ-26 液氧/煤油发动机。AJ-26 发动机由苏联 N-1 登月火箭上的 NK-33 发动机改造而来,将用于轨道科学公司的“金牛座”2 火箭一子级。

上面级发动机

SLS 的上面级发动机也不是新的型号,而是沿用了“星座”计划下“阿瑞斯”5 火箭上面级的 J-2X 发动机,因此,其上面级动力系统的研制从 2006 年至今已经有 5 年的时间。其间 NASA 于 2007 年 7 月 16 日宣布授予普·惠公司价值 12 亿美元的合同用于 J-2X 发动机的设计、研制、试验和评估。2007 年 8 月,NASA 在斯坦尼斯航天中心完成了 J-2X 发动机新的试车台建造。该试车台高 91.44 米,采用开放式框架设计,可模拟不同高度进行发动机试车,通过产生 2096 千克/秒的蒸汽流量来降低发动机试车间的压力。2008 年 5

案的重型火箭采用 3 台)。上面级采用由“土星”5 火箭上面级发动机改进而来的 J-2X 低温发动机,初始方案的运载火箭将采用固体火箭助推器,改进方案采用固体或液体助推器。美国新一代重型火箭方案可归结为“一种火箭,两种状态”,NASA 可以根据具体任务需求选择火箭的不同状态。

与“星座”计划下“阿瑞斯”5 重型火箭构型方案相比,SLS 的构型方案采用了很多与之共用的技术。虽然“星座”计划被终止,但“阿瑞斯”5 重型火箭的许多技术成果可以直接用于新一代重型运载火箭的研制。表 2 列出了新一代重型运载火箭与“阿瑞斯”5 火箭的构型对比。

表 2 美国新一代重型运载火箭与“阿瑞斯”5 火箭构型对比

项目		“阿瑞斯”5	SLS 初始构型	SLS 最终构型
全箭	级数	两级半	两级半	两级半
	起飞质量/吨	3705	2495	2948
	起飞推力/千牛	52454	37365	40924
	起飞推重比	1.44	1.53	1.42
	高度/米	110	97.5	122
	LEO 运载能力/吨	160	70	130
	LTO 运载能力/吨	63	—	—
助推器	直径/米	3.7	3.7	3.7
	推进剂	固体	固体	固体
	助推器数量/个	2	2	2
	发动机型号	5 段式航天飞机助推器	5 段式航天飞机助推器	5 段式航天飞机助推器
芯一级	直径/米	10.06	8.38	8.38
	推进剂	液氢液氧	液氢液氧	液氢液氧
	发动机型号	RS-68	RS-25D	RS-25E
	发动机数量/台	6	3	5
	单台推力/千牛	3122	1779	1779
芯二级	直径/米	10.06	5	8.38
	推进剂	液氢液氧	液氢液氧	液氢液氧
	发动机型号	J-2X	RL10B-2	J-2X
	发动机数量/台	1	1	1

月8日,NASA和普·惠公司完成了J-2X发动机早期研发阶段的首批试验。2008年9月8日和2010年9月21日,普·惠公司完成两轮J-2X发动机燃气发生器试验。2011年9月14日,普·惠公司进行了J-2X发动机首次热点火试车,点火试车持续1.9秒,整个试验项目计划使用7台J-2X发动机,将完成多项验证及启动时序试验。2011年11月9日,普·惠公司又完成了一次工作时间近500秒的J-2X发动机热点火试车。

芯级贮箱

新一代重型运载火箭芯级贮箱基于航天飞机计划和“星座”计划取得的成果。2011年8月,波音公司的“探路者”号新一代重型运载火箭芯级缩比液氧贮箱在米丘德装配厂制造完成并通过测试。“探路者”液氧贮箱直径5.5米,采用轻质铝锂合金材料,作为“阿瑞斯”1火箭“上面级生产合同”的内容之一,用于验证先进的制造和焊接方法。这些先进的技术和工艺将应用于直径8.38米的SLS,实现了“星座”计划相关技术向SLS项目的转化。

“探路者”轻质铝锂贮箱包括1个旋压成型圆顶、1个锥面圆顶和1个自适应焊接的圆筒,其先进生产设备由波音公司与NASA和新奥尔良国家先进制造中心大学联合研制,提高了米丘德装配中心的贮箱制造效率。

发射设施

SLS的发射将在肯尼迪航天中心39B发射工位进行。为此,NASA计划投资20亿美元对肯尼迪航天中心的相关基础设施进行改造,包括一部“阿波罗”时代的履带式运输车和在“星座”计划下为“阿瑞斯”1火箭建造的移动发射平台。

“阿瑞斯”1火箭的移动发射平台造价5亿美元,主体结构于2010年1月完工,为新一代重型运载火箭进行的改造工作将于2016年完成。移动发射平台改造最大的变化在于平台的底座,其排气管道将比原来尺寸大2米²,并需加固周围结构。

为满足重型火箭的载重需求,NASA 对肯尼迪航天中心两部履带式运输车中的一部进行改造,重点在于提高其载重能力。经过改装后的履带式运输车 2 号,约 2721 吨,空车最高速度为 3.2 千米/小时,托运能力提高至 8165 吨,使用寿命延长 20 年。

(二) 商业轨道运输服务将开启美国航天探索新篇章

由于技术和资金等原因,NASA“商业轨道运输服务”合同下的发射任务被延缓,计划于 2011 年发射的“金牛座”2 火箭和“猎鹰”9 火箭被推迟。

轨道科学公司在 2011 财年政府预算开支议案的支持下,获得了 NASA 约 1 亿美元的补充拨款,用于在“金牛座”2 火箭+“天鹅座”飞船执行空间站对接演示验证飞行试验前,增加 1 次“金牛座”2 火箭的降低风险飞行试验(携带“天鹅座”质量模拟件)。但在 6 月 9 日进行的“金牛座”2 一子级主发动机 AJ-26 的验收试验中,发动机外部煤油管路泄漏,引发试验台起火,发动机严重损毁。起火发动机原计划在完成验收试验后运往发射场进行静态热点火试车,受此事故影响,该计划被迫推迟。为与“金牛座”XL 小型运载火箭区分开来,“金牛座”2 火箭被更名为“心大星”(Antares)火箭。

“猎鹰”9 火箭方面,NASA 于 2011 年 12 月正式批准 SpaceX 公司将商业轨道运输服务(COTS)计划下的第二次和第三次演示验证合并的建议,此次发射将进行“天龙座”飞船与国际空间站的对接演示验证。此外,SpaceX 公司在 4 月 5 日宣布,将建造近地轨道运载能力为 53 吨的“猎鹰”重型运载火箭(一子级由 3 个改进型“猎鹰”9 火箭一子级组成),计划于 2013 年进行首次验证飞行。该重型火箭除满足货运需求外,还设计用于载人飞行。

在商业载人近地轨道运输系统研制方面,NASA 于 2011 年 4 月 18 日向 4 家公司授予总价值 2.693 亿美元的商业载人航天发展计划项目第 2 阶段(CCDev-2)合同,用于支持其开展商业载人航天运输系统的设计和试验。其中,波音公司获 9230 万美元,用于载人

航天运输系统(CST-100)舱的研制,预计于2014年进行3次轨道飞行试验,2015年投入使用;内华达山脉公司获得8000万美元,用于其“追梦者”可重复使用运载器的研制,预计于2014年进行飞行试验;SpaceX公司获得7500万美元,用于研制一种具有全程逃逸能力的新型发射中止系统(LAS),逃逸方式由传统的逃逸塔拉动式改为LAS发动机推动式;蓝色起源公司获得2200万美元,用于完善其太空舱的设计,进一步推进逃逸系统和发动机试验,以支持其开展商业载人航天运输系统的设计和试验,加速研制进程,从而填补航天飞机退役后美国在近地轨道载人运输系统的空白。受2012财年NASA预算影响(商业轨道运输项目经费只有申请金额的一半,为4.06亿美元),NASA调整采购战略,于12月15日宣布第三阶段商业载人航天发展计划项目(CCDev-3)将依靠《空间行动协议》,而非原计划的固定价格合同。预算的锐减使商业载人航天发展计划项目的载人运载器投入使用时间至少推迟到2017年。

(三) 俄航天局决定放弃研制新型“罗斯”M运载火箭

“罗斯”M火箭是俄罗斯新一代载人运载火箭,用于替代“联盟”号系列运载火箭执行载人和货运飞船的发射任务,近地轨道运载能力为6.5吨~50吨,计划于2015年从远东阿穆尔州的东方发射场发射。按照原计划,俄罗斯联邦航天局将在2015年前将该机构超过37%的预算用于“罗斯”M运载火箭的研制。然而由于资金短缺等因素的影响,俄罗斯联邦航天局叫停了该项目,但研发新的航天运载工具仍在俄罗斯联邦航天局的计划之列。俄罗斯将不会放弃其在载人航天领域所处的领先地位。

(四) 日本制定载人航天发展路线图

日本制定了载人航天三步走的发展战略:第一步,将货物运送至国际空间站(ISS);第二步,将货物运送至ISS并返回;第三步,载人航天飞行并返回。随着JAXA利用H-2B火箭在2009年和2011年成功发射无人货运飞船HTV-1和HTV-2,日本已迈出了第一

步,并开始筹划实施下两步,将首次载人航天飞行确定为 2025 年。

目前,JAXA 计划与三菱重工业公司开展新型三级载人运载火箭 H-3 的研究工作,计划在 2020 年前实现首飞。该火箭将使用更为先进的技术和发动机,可将 6 吨的载人飞船送往国际空间站。该方案能够将 H-2A 发射价格降低 20%~30%,控制在 1 亿美元~1.4 亿美元之间。

此外,JAXA 的技术人员正在研发一种与美国 SpaceX 公司的“天龙座”飞船尺寸相当的飞行器——HRV,它将作为未来日本可返回货运飞船 HTV-R 的返回舱。目前,HRV 的初步研究工作已经完成。热防护材料的研制以及制导控制技术还需进一步攻关。如果进展顺利,HTV-R 将于 2018 年 4 月前实现首飞。

(五) 印度加速载人运载器研制

作为重要的新兴航天国家,印度加大了对航天领域的投入。在 2011 年 2 月 28 日发布的 2011 财年—2012 财年预算中,将航天领域经费的投入提高了 35%,以确保重大航天计划的顺利开展。

经过多次仿真试验后,印度于 2011 年 4 月公布了 2010 年 12 月 15 日 GSLV 发射失败的主要原因:由于位于俄罗斯低温上面级底部的防护罩存在设计缺陷,导致防护罩发生变形,致使用于传送计算机控制指令的电缆连接器脱落,从而导致失败。印方共向俄购买了 7 台低温上面级发动机,目前已有 6 台用于 GSLV-MK1 火箭的发射(6 次发射仅有 2 次完全成功),其中 3 次都因上面级问题(1 次因发动机提前关机,2 次因电缆连接器脱落)而未能取得成功。此外,印度在 2011 年 9 月 4 日完成 GSLV-MK3 火箭大型固体助推器的第二次静态点火试车。

三、结束语

美国航天飞机退出历史舞台,人类载人航天发展进入后航天飞机时代。如果验证成功,商业轨道运输服务将开始承担国际空间站

的货物运输。经过多次推迟的美国重型运载火箭方案出炉,最早于2017年投入使用。俄罗斯虽然放弃了新型载人运载器“罗斯”M的研制,但研发新的航天运载工具仍在俄罗斯联邦航天局的计划之列,将于2012年出台的《2030发展战略》有望明确俄罗斯未来载人航天发展走向。欧洲和日本都已具备国际空间站货物运输能力,并同时开展深空探测和载人技术研究,提升航天技术竞争力。印度将继续试验新型运载器的关键技术,推进新型号研制步伐,但低温上面级关键技术还有待进一步验证。

(北京航天长征科技信息研究所)