

论我国重复使用运载器推进系统方案

丁丰年, 张恩昭, 张小平, 樊根民

中国航天科技集团公司第六研究院十一所

摘 要: 根据美国 NASA 的 X-33 计划的终止、2002 年 SLI 的改变等事实, 论述我国重复使用运载器分步走的发展思路, 探讨我国重复使用运载器推进系统方案, 阐述了我国首先发展两级重复使用运载器的优势和推进系统的关键技术。

关键词: 重复使用运载器; 推进系统; 关键技术

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2004)03-0013-06

1 引言

研制重复使用运载器的目的是降低单位有效载荷的发射费用。如何降低单位有效载荷的发射费用? 当然是研制高性能、低成本、高可靠性的火箭发动机, 开发高强度的轻型材料, 设计先进的总体结构, 运用精确的制导和入轨、再入技术……总而言之, 重复使用运载器应是性能高、可靠性高、可操作性好的新一代运载器。

在论证重复使用运载器时, 有一点却常常被人们所忽略, 那就是重复使用运载器论证的切入点是什么? 这个切入点应立足现实、立足实践、立足用户需求和国情。什么是国情? 就研制与论证重复使用运载器而言, 国情是整个国家的研制技术水平(包括研制经验与关键技术的攻关基础)、国家资金投入和使用需求的可能(包括投入与回报)等。

美国是最早提出和研制重复使用运载器的国家。从部分重复使用运载器——航天飞机的飞行、单级入轨运载器——X-33/冒险星的终止、航天运载计划(SLI)的提出到 2002 年 SLI 又有新的改变。这种变化为我国探索重复使用运载器提供了

极为宝贵的经验和教训。

2 美国 NASA 重复使用运载器方案的改变及其原因探讨

由于航天飞机的发射费用高、可靠性等问题, NASA 从 1996 年正式启动 X-33 单级入轨运载器的研制计划, 试图将发射费用降到最低, 并为此做了大量的预先研究。但由于存在难以克服的技术难度及经济回报问题, 2001 年 3 月在已花费大量金钱的情况下不得不终止。尽管如此, 美国并没有放弃重复使用运载器(RLV)计划, 只是把原来研制单级入轨修正为先研制两级入轨, 然后再研制单级入轨。NASA 于 1999 年开始执行的长期投资战略任务——综合航天运输计划(ISTP)包括航天飞机的改进和航天运载计划(SLI)。其中, SLI 开始于 2001 年 2 月, 但到了 2002 年 10 月 21 日 NASA 就宣布从当年 10 月 22 日起无限期推迟为 SLI 所做的系统评审(SRR)及与 RLV 有关的协议, 并在 2009 年前不再开展工作。还决定至少在 2009 年以前从 SLI 中削减 23.25 亿美元, 以支持一项新的轨道空间飞机(OSP)计划和下一代运载研制(NGLT)计划。

收稿日期: 2003-12-15; 修回日期: 2004-01-06。

作者简介: 丁丰年(1939 年—)男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机系统设计。

轨道空间飞机是由一次性运载火箭发射升空、为空间站设计的救生器，依靠现有技术，可安全往返空间站，并与航天飞机同时使用，以降低包括轨道空间飞机在内的未来可重复使用运载器试验系统的风险。

下一代运载器研制计划的目标是：

- (1) 确定新的、安全、低成本运输系统，首先要制定出一套整体技术计划。
- (2) 发展和完善一些关键技术，如推进技术、结构和运载器系统集成技术。

该计划将综合考虑 SLI 以前的研发成果和先进空间计划以提高美国下一代可重复使用运载器的安全性、可靠性并降低成本。该计划工作重点包括先前的第三代重复使用运载器的工作及吸气式高超声速推进系统的研究。其设计集中在液氧/煤油第一级，氢/氧第二级。当前，NASA 停止了 COBRA 氢/氧发动机的研制，转向液氧/煤油发动机的研制。其原因是 NASA 认为液氧/煤油发动机技术风险小、成本低，且得到了美国国防部的青睐。

由上可知，NASA 在重复使用运载器的论证和研制计划上做了大量工作，经历了很长时间，有宝贵的经验，也有可贵的教训。但归结起来是如何综合处理风险、费用和回报问题。风险主要是技术风险、技术方案本身的可行性，回报集中在投入、商业运作和需求。

3 美国重复使用运载器方案的发展

美国 NASA 于 20 世纪 70 年代初开始研制部分重复使用运载器——航天飞机。这种航天飞机由轨道器、一次性使用外贮箱和两台固体助推器组成。到目前为止，航天飞机 113 次飞行中发生了两次空难。因再次发射的维护费用高及可靠性问题，NASA 于 20 世纪 90 年代开始启动了单级入轨运载器的研制计划。到 2002 年，NASA 再次修正研制计划时，还提出了修改当前航天飞机的运行合同和方案，延长使用时间，实施减少成本、提高安全性和可靠性的航天飞机升级计划。

航天飞机的改进方案论证中，有一种方案是把航天飞机的固体助推器改为可重复使用的液体助推器，如果能将外贮箱收回再次使用的话，航天飞机就有可能变为两级完全重复使用运载器。

美国私人公司——凯斯勒航宇公司的重复使用运载器 K-1 火箭是典型的两级入轨重复使用运载器。为了加速 K-1 火箭的研制，NASA 在 2001 年 5 月与 22 家工业公司和大学签署第一批 SLI 的合同中，向 K-1 火箭的飞行试验投入了 1.354 亿美元以弥补资金的不足。由此可见，NASA 研制重复使用运载器的决心。

美国两级重复使用运载器的研制情况概括于表 1。

表 1 美国两级重复使用运载器方案的比较

项目	航天飞机改进型	K-1 火箭	计划研制下一代重复使用运载器
重复使用情况	完全重复使用	完全重复使用	完全重复使用
载人飞行情况	载人飞行	目前主要是卫星发射	载人与运货
起飞与降落方式	垂直起飞、水平降落	垂直起飞、降落伞降落	待定
推进系统	SSME; 液氧/煤油助推器; OME、RSC (有毒或无毒推进剂)	百吨级液氧/煤油高压补燃发动机; OME、RSC (无毒推进剂)	液氧/煤油一级发动机、氢/氧二级发动机均为高压补燃发动机
关键技术	改进型 SSME 和液体助推器	再入、隔热、控制、降落伞、气囊	再入、隔热、控制、重复使用高性能发动机
方案可行性	方案可行，只待投入资金	需做大型降落伞，没有难以突破的关键技术	需研制新的高性能发动机
发射费用	发射费用较高	发射费用最低	发射费用低
发展方向	助推器改进为液体发动机，以提高工作可靠性和减少发射费用	可捆绑重复使用的液体助推器，变为大型的完全重复使用运载器	为单级入轨运载器提供经验
计划投入情况	计划投入 16 亿美元进行航天飞机改进	投入 5 亿美元，研制 3 枚火箭，2001 年 NASA 投入 1.345 亿进行飞行试验	得到国防部青睐先研制液氧/煤油一级发动机，暂停对氢/氧发动机的投入

由表1可以看出:

(1) 根据美国重复使用运载器的最新发展和计划投入情况,最早使用的两级重复使用运载器是K-1火箭;

(2) 航天飞机继续使用与改进将进一步降低发射费用,并为未来运载器发展和改进提供了条件;

(3) 研制下一代可重复使用运载器的重点是采用价格低廉的液氧/煤油第一级和高空性能好的氢/氧级。

4 国内重复使用运载器预先研究概况

我国重复使用运载器的论证工作由来已久,最早可追溯到20世纪80年代中期。中国宇航学会航天运载专业委员会会议第1届第2次学术讨论会上,曾提出了研制部分重复使用运载器的设想,现已过去了17年,国内在重复使用运载器的论证工作上,历届“863”专家组基本上采用跟踪世界各国论证的策略,确定国内少量的概念性、探索性研究课题,下达并开展了“863”关键技术专题研究。

相比之下,国内重复使用运载器的发展,受经济发展及运载技术的约束,尚处于概念性研究与初步探索阶段。根据国情,并考虑到国外研究的经验与成果,适当选择我们自己的重复使用运载器的发展计划和重复使用运载器的方案是十分重要的。

国内重复使用运载器的发展,目前需要论证与探讨的主要问题大致有:

(1) 单级入轨、两级入轨或带有助推器的部分使用的方案;

(2) “全火箭”动力或带有吸气式发动机的“以火箭为基础的组合循环”方案;

(3) “全火箭”动力中采用的火箭发动机类型;

(4) 轨道器的其它问题,如结构方案、着陆与回收方法、热防护、入轨控制方案等等。

以上这些问题,在跟踪世界先进技术发展及结合本国国情的前提下,通过反复论证,采纳各方面的意见,特别就推进系统概念性研究上思路应更宽一些,并争取有所突破。

上面的观点是在当时受美国全面开展X-33计划的影响,国内大都倾向于研制单级入轨运载器的前提下提出的,而不是一味追求所谓的高性能单级入轨方案。我国重复使用运载器的研制应分步走:先研制两级入轨运载器,然后根据我国的国情及投入情况研制单级入轨运载器。国内有关人士也提出了两级入轨运载器的基本相同的方案设想。现在看来,这些想法符合我国的国情,也与现今美国X-33计划终止后的变化情况基本一致。事实告诫我们:亦步亦趋的跟踪、脱离实际的设想不利于我国重复使用运载器的研制。

重复使用运载器的目的是减少有效载荷发射费用,对于预研能力有限、技术基础存在较大差距的我国,依靠花费大量资金就想跳跃式地研制一种关键技术多、可靠性要求非常高的单级入轨运载器是很难实现的。接受教训,重新考量我国重复使用运载器发展思路,发挥自己的优势,采用分步走的策略,首先重点研制两级入轨重复使用运载器,才能促进我国航天运载的持续发展。

5 两级入轨重复使用运载器推进方案研究

5.1 国外两级入轨重复使用运载器推进系统方案

到目前为止,最早研制的两级入轨重复使用运载器K-1火箭是美国私人公司自行投资研制的。如上所述,美国NASA开始执行的SLI中有关两级入轨重复使用运载器的研究计划,有待经过充分论证后确定。如果把航天飞机助推器改为可重复使用液体推进也作为两级重复使用运载器的话,那么,这里所讨论的国外两级入轨重复使用运载器推进系统将包括K-1火箭、具有重复使用助推器的航天飞机和美国NASA的SLI两级入轨运载器推进方案(见表2、表3)。

由表2、表3可以看出:

(1) 两级重复使用运载器推进系统均采用无毒、高性能的补燃循环火箭发动机(氢/氧发动机和液氧/煤油发动机)。

(2) 发动机采用成熟的技术:其中包括K-1火箭直接运用俄罗斯的产品进行改进(包括发动机多次起动、摇摆机构、推进剂供应系统和贮箱增

压设计——高压氦气增压等的改进。主要组件有常平座、摇摆软管、机架、多次起动用三位阀、两种调节器的控制组件、伺服机构及其控制组件等)。航天飞机多次使用的液体助推器的方案直接运用 Aerojet 与俄罗斯联合改进的 K-1 液氧/煤油发动机的经验或采用 SSME 及一次性使用 F-1 液氧/煤油发动机的经验。SLI 新研制的 RS-83 和 COBRA 发动机均继承了各公司的技术优势

(RS-83 发动机运用 RS-68 发动机的设计方法,其预燃室是 RS-68 的改进型。COBRA 发动机运用了 P&W 公司为 SSME 研制的最先进的涡轮泵技术,并把为喷气发动机研制的健康诊断技术改进为用于火箭健康诊断系统,而 Aerojet 公司为发动机喷注器研制提供层板制造技术、扩散焊与光刻工艺)。

表 2 K-1 火箭推进系统

名 称	发动机种类			
	AJ26-58	AJ26-59	AJ26-60	OMS
级数与台数	一级, 2 台	一级, 1 台	二级, 1 台	二级, 1 台
推进剂	液氧/煤油	液氧/煤油	液氧/煤油	液氧/酒精
循环方式	补燃循环	补燃循环	补燃循环	挤压式
推力 (kN)	1510	1510	1755.4	3.78
比冲 (m/s)	3246	3246	3393.1	2922
摇摆方式	双向摇摆	双向摇摆	双向摇摆	双向摇摆
起动次数	1 次	2 次	1 次	多次
特点	由 NK-33 改进而成		由 NK-43 改进而成	与航天飞机改进型 OMS 相同

表 3 航天飞机改进型与 NASA 计划研制的两级重复使用运载器发动机

名 称	发动机种类				
	航天飞机助推改进器发动机方案		NASA 两级重复使用运载器计划采用的发动机方案		
	AJ-800	RS-76	RS-83	COBRA	RS-84
火箭级	助推级		芯级	芯级	芯级
推进剂	液氧/煤油		液氧/液氢	液氧/液氢	液氧/煤油
循环方式	补燃循环		补燃循环	补燃循环	补燃循环
推力(kN)	3558.6	4003.4	2891.3	2669	4500
研制公司	Aerojet	波音 洛克达因	洛克达因	Aerojet/ P&W	波音 洛克达因
特点	美、俄联合研制	继承 SSME, F-1 经验	采用 RS-68 经验及新技术新材料	两家公司优势, 涡轮泵并联	采用 RS-68 的经验; 涡轮泵串联
经费(美元)			6000 万	1.15 亿	3400+2400 万

有资料报道, NASA 两级重复使用运载器采用的发动机有以下特点: 单燃烧室、高压补燃富氧循环、单涡轮泵。实际上是使用俄罗斯的液氧/煤油发动机 NK-33 的技术。这种高性能、低费用、高可靠性液氧/煤油发动机是降低发射费用的主要保证之一。

RS-84 发动机已顺利完成初步设计评审。初步

设计评审的条件是完成 50% 发动机设计和 10% 发动机图样设计。

RS-84 发动机的煤油具有较高性能和高的密度, 使用维护费用低, 与氢相比燃料箱小, 可提供较高推力。其好处是发动机更紧凑、在地面处理更容易、各次发射之间的周转时间更短, 从而使空间飞行更便宜, 更具商业吸引力。

RS-84 的设计采用了先进的软件来监控和预测故障,借鉴了过去发动机的技术成果。在安全性、可靠性和较低使用费用方面提高了一个数量级。

RS-84 发动机设计评审完成后,下一个工作是“40K”预燃室试验,进行一系列全尺寸预燃室热试,预计 2007 年底之前进行全尺寸热试。

美国 SLI 研制的两级入轨重复使用运载器推进系统,由于有 SSME 成功的研制经验,关键技术不多,技术风险小。这种方案使 NASA 摆脱了 20 世纪 90 年代过早提出研制单级入轨运载器的不切实际目标的困境,也为中国制定重复使用运载器计划提供了借鉴。

(3) 两级重复使用运载器火箭发动机的研制情况如下:目前 K-1 火箭的发动机研制工作已基本结束, NASA 向其投入资金后即可进行运载器的飞行试验; NASA 计划将首先新研制高性能补燃循环液氧/煤油发动机。

(4) 两级重复使用运载器之所以十分看好液氧/煤油发动机呢,是因为这种发动机采用先进的高压补燃循环技术,发动机性能高、有成功的型号研制经验、技术难度小、推进剂价格低、密度高、综合比冲高。据粗略估算,用全液氧/煤油型火箭发射 12 吨空间实验室比采用常规的长征火箭发射 9.2 吨的有效载荷,仅推进剂一项就可节省费用数百万元。由此便不难理解为何两级重复使用运载器首选液氧/煤油发动机。

5.2 我国两级入轨重复使用运载器发展计划与方案设想

5.2.1 我国航天运载器研制的基本国情

我国航天运载器研制的基本国情是经过 40 余年的努力,已研制出了承担大中小型有效载荷发射任务的“长征”系列火箭。目前根据我国政府“航天白皮书”的精神,计划研制高性能、高可靠性、无毒、无污染的一次性使用的新一代运载火箭。这些将为我国 21 世纪研制低成本的重复使用运载器提供基本技术条件。

重复使用运载器是一种高投入、高风险的技术。鉴于我国航天运载技术基础与世界先进国家相比有明显的差距,仅推进技术的差距就包括:预研少、理论与研究与试验条件有限,发动机推力低、性

能差、品种少(包括循环方式与推进剂),缺少推力调节与多次使用经验,材料与工艺水平制约等。

可喜的是,我国根据“中国航天白皮书”发展无毒、无污染高性能航天运载的要求,正在积极开展液氧/烃类和液氢/液氧发动机研制,这将为研制我国两级重复使用运载器奠定基础。

我国是一个经济持续高速发展,却又是经济比较落后的发展中国家。为了加速国民经济的发展,不可能在短期内进行航天的高投入,而是根据国情逐步、分期投入。这也就决定了我国应采用逐步投入、分步研制的策略,发展我国的重复使用运载器。

5.2.2 重复使用运载器发展宜采用分步走战略

根据国外发展趋势和国情,建议我国重复使用运载器的发展战略分为两步走:先发展以火箭为动力的重复使用运载器,条件成熟后,发展吸气式组合发动机为动力的运载器。

实现以火箭为动力的重复使用运载器也应分步走:首先突破重复使用运载器的再入技术(即所谓的两级入轨方案);然后突破以火箭为动力的单级入轨技术。

以火箭为动力的重复使用运载器研制计划建议按下面步骤进行:

第一步,先研制部分重复使用两级入轨运载器:一、二级可在海上降落、回收、检验、鉴定能否使用,为第二步重复使用提供经验;

第二步,完全重复使用两级入轨运载器:运载器的基本方案与第一步相同,类似于 K-1 火箭,解决我国“有”的问题。这种运载器,根据设计要求可发射 LEO 约 4~5 吨的有效载荷,也可作为单级入轨的飞行验证机;

第三步,改进型完全重复使用两级入轨运载器:改进型方案采用全新的高压补燃循环发动机,运载器的性能大大提高,并使运载能力提高到 10~15 吨;

第四步,完全重复使用单级入轨运载器:采用先进的发动机(包括三组元发动机与氢/氧塞式喷管发动机的火箭发动机或以火箭和超燃相组合的吸气式发动机)和轻型结构材料。

按要求分阶段研制,先易后难,研制成功后,也可同时使用,以满足不同用户发射要求。

5.2.3 我国两级入轨重复使用运载器方案设想

5.2.3.1 方案应遵循的设计原则

- (1) 目标是发射单位有效载荷的费用低;
- (2) 可靠性高、安全性好、操作方便;
- (3) 借鉴国外成功的研制经验, 继承国内的研制成果;

(4) 方案选择应考虑我国的技术基础现状和经济实力的基本国情;

(5) 做好相应技术的预先研究, 要求重点突破几项关键攻关项目。

5.2.3.2 基本型方案设想

采用类似于 K-1 火箭方案(全液氧/煤油级火箭)。一级采用 5m 箭径(为了返回, 对称布置的一对发动机能 2 次起动); 一、二级发动机可以采用正在研制的两种液氧/烃类高压补燃发动机, 经相应改进, 使发动机可靠性得到更大提高, 用作两级重复使用运载器。此外, 应研制类似于 K-1 火箭的无毒、无污染推进剂的轨道机动发动机和姿控发动机。

这种运载器的回收和着陆装置可直接参考 K-1 火箭的经验与我国卫星回收技术成果。

基本型方案: 采用 K-1 火箭的设计方案; 继承我国大型运载火箭成功的研制经验; 采用改进的百吨级液氧/煤油发动机; 运用我国的卫星回收技术; 重点突破的关键技术主要有大型降落伞和气囊设计与工艺等。相对而言, 认为这种运载器研制难度不大, 运载器采用相同的推进剂, 大大简化了发射程序, 进一步提高可靠性, 还将使发射有效载荷的费用大大下降。

5.2.3.3 混合型方案设想

方案 1: 基本型方案中的二级改为氢/氧级。

方案 2: 采用 300 吨级液氧/烃类发动机并联成为一级, 氢/氧发动机组成芯二级。这两种发动机均为高压补燃循环发动机。

方案 2 有效载荷提高, 是一种全新的设计方案。

5.2.3.4 两种方案对比

基本型方案采用全液氧/煤油发动机与美国的 K-1 火箭相同, 发动机类型少, 关键技术少, 可靠

性相对较高, 发射费用最低。

混合型中的方案 2 需新研制两种高压补燃发动机。预计新的高压补燃发动机的研制将使我国的推进技术上一个更新的台阶, 适应我国重复使用运载器的推进要求, 大大缩短与国外的差距。

5.2.4 我国两级入轨重复使用运载器推进系统关键技术

(1) 提高发动机的可靠性

- 预压涡轮泵用喷射泵替代技术研究;
- 高转速大 DN 值流体静压轴承研究;
- 重复起动研究;
- 发动机动态仿真与故障诊断系统研究。

(2) 更大推力的高压补燃循环发动机

- 高压推力室冷却技术研究;
- 发动机可靠性研究;
- 大范围工况调节技术。

(3) 无毒推进剂轨道机动发动机与姿态控制发动机的关键技术研究

- 无毒推进剂(液氧/酒精、过氧化氢/煤油)轨道机动发动机研究;
- 无毒推进剂姿控发动机研究。

6 结论

根据美国 20 世纪末到 2002 年期间重复使用运载器的研制经验及教训和国内重复使用运载器的预先研究情况, 认为我国重复使用运载器的研制宜采用分步走的研制战略, 先研制两级重复使用运载器, 在条件成熟时, 再研制单级入轨运载器。

参考文献:

- [1] 张小平. K-1 火箭推进系统研制状况. 火箭推进, 2000(4).
- [2] 李宝荣. 用于航天飞机改进的助推器及液体推进系统方案选择. 火箭推进, 2001(5).