

专题报告

中国液体火箭发动机如何进入21世纪

王 桁

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

[摘要] 液体火箭发动机是宇航推进家族的重要成员, 将会成为下一个历史时期使有效载荷达到第一宇宙速度的唯一推进手段, 是制约航天发展速度的最关键因素。发展运载系统, 动力必须先行。中国在21世纪初必须推出能与世界先进国家相当的大型运载火箭。这些火箭不能建立在用原有的发动机增加数量以加大推力的基础上, 必须研制单台推力更大、更先进、无污染的新型发动机, 同时还需开展火箭航天飞机及其发动机使用的气动塞式喷管的预先研究, 以火箭航天飞机为突破口, 赶上世界先进水平。

[关键词] 动力先行; 液体火箭发动机; 大型运载火箭; 火箭航天飞机

液体火箭发动机是宇航推进家族中最重要的成员。

20世纪初在美国、俄国及前苏联已经开始进行液体火箭发动机的基础研究工作。1926年美国戈达德发射了世界第一支以液体火箭发动机为动力的火箭。1940年10月2日, 德国V-2火箭发射成功, 开创了液体火箭发动机实际应用的先例, 奠定了现代液体火箭发动机的基础。二战以后, 由于液体火箭发动机技术的进步, 出现了洲际弹道导弹、大型人造卫星运载火箭、航天穿梭机, 把众多的卫星送到各种不同的空间轨道, 把人送到月球并安全返回。

推进技术是决定运输工具分类及功能的根本因素。蒸汽机结束了帆船与马车时代; 内燃机问世才有了汽车, 出现了内燃机火车, 航空事业应运而生。装有吸气式喷气发动机的飞机称为喷气飞机, 可以进行超音速飞行。火箭发动机推进的运载器直接称为火箭, 它使人类实现了克服地心引力、冲出地球、飞向宇宙的梦想。这些进步的取得是由于推进技术的革新。推进技术的进步也带动了其它技术的同步发展, 如空气动力、自动控制、导航、材料、燃料化工、机械制造工艺等等。如果没有推进

技术的革命性变革(如火箭发动机的出现), 靠其它技术无论如何是不能冲出地球的, 人类只能望天长叹!

运载手段的革新和进步意味着效率、活动范围、能力的提高和扩大, 它能改变人类的生活方式, 是文明和实力的表现和重要组成部分, 因此世界各国都不遗余力地发展各种现代化的运载工具, 从地面、水面到空中和太空, 竞争无处不在。而推进系统(发动机)的改进和发展首当其冲, 谁发展快, 谁就在先进运载器的竞争中领先。这就叫发展运载, 动力先行。

中国现代运载火箭的发展始于1956年, 通过引进并仿制中近程地-地弹道导弹掌握火箭制造技术。到1960年底, 终于制造出第一种属于中国自己的导弹东风一号。接着便开始了自行开发新火箭的工作。在党和国家领导人的英明决策、坚决支持和亲切关怀下, 在全国人民大力支援下, 通过航天系统自身的艰苦奋斗, 终于在1966年定型了我国自己发展的第一种运载火箭——东风二号导弹。同年10月27日, 东风二号运载一枚核弹头, 在我国本土进行了两弹结合试验。导弹飞行正常, 精确击中目标, 实现了核爆炸, 举世震惊, 中国进入了拥

有导弹核武器的国家行列。

从1960年11月5日东风一号发射成功到1966年9月东风二号定型飞行试验完成,历时6年。早在1962年3月21日东风二号就进行了首次试飞。由于控制系统没有修正火箭箭体的弹性振动的影响,导致控制失稳。同时,发动机强度不足,起飞后21秒因导管断裂起火,随即推力消失。导弹留空仅68秒,坠落在发射台附近。1964年6月29日改进后的火箭再次试飞,控制系统的问题已经解决。但发动机强度问题仍然没有完全解决,只得采取降低推力的方法以换取较长的工作寿命和提高可靠性,保证了飞行试验成功,及时验证了火箭总体与控制系统的改进成果。发动机推力的降低使火箭的射程比要求短了许多。研制任务并没有完成。直至1965年,发动机的问题才最终获得解决,年底进行了七次飞行试验均获成功,为1966年的定型验收飞行试验打下了基础。由于发动机的问题导致东风二号比预计的成功时间晚了两年多,发动机研制过程中发生的各种问题和攻关过程的艰难,给人们留下深刻的印象,深深感到预先研究不足,起步太晚,要想使火箭按计划上天,动力(发动机)必须先行,这是东风二号研制工作给予我们最重要的经验。因此,一批更为先进的、推力更大的液体火箭发动机,在东风二号发动机研制的同时就开始了预先研究,并加大了投入的力量。它们先后研制成功,确保了60年代末我国中程、中远程地-地导弹的成功和1980年洲际弹道导弹的成功。同时发展了长征系列运载火箭,1970年发射了我国第一颗人造地球卫星,1990年进入国际卫星发射市场。动力先行的思想深入人心是取得这些成就的关键因素。

上面所说的发动机都是液体火箭发动机。从作战需求看,它们不能满足现代战争机动、快速、隐蔽的要求。由于固体火箭发动机没有及早突破技术难关,无法采用,液体火箭发动机只好免为其难,承担了第一代战略武器的重任。随着固体火箭发动机技术的突破,第一代战略导弹已逐步被装有先进的固体火箭发动机的第二代导弹代替,液体火箭发动机作为主推进系统已经退出了这个领域。但在导弹的末速修正、弹头的机动飞行等方面,小型液体火箭发动机(姿控、轨控、末速修正发动机)仍是不可取代的。

液体火箭发动机的效率高、操控和调节性能优

良,可以制造出推力从几克到数百吨级的各种发动机,可随时启动和关机并多次重复使用;可以做到无毒害、无污染;它是宇宙航行的最重要推进手段,并将成为使有效载荷在冲破地球引力阶段的唯一推进手段。因此,液体火箭发动机已成为制约航天发展速度的最关键因素。

我国用70年代中期以前研制成功的各种推力的常规推进剂发动机,组成了长征一号、二号系列火箭,发射了各种近地轨道卫星。80年代中期研制成功以液氢液氧为推进剂的低温高性能上面级发动机,与已有的大推力常规发动机组成长征三号运载火箭。1984年4月8日发射成功我国第一颗同步定点通讯卫星——东方红二号,再次受到世人瞩目。美国宇航局长致函中国航天部长说,“你们完全可以为中国航天计划中的这一重要技术里程碑感到自豪,仅有少数几个国家达到了这次发射显示的技术能力”。90年代,更先进的氢氧上面级发动机研制成功,长征三号家族又增加了长征三号甲、乙两个成员,它们的同步转移轨道运载能力分别达到2.6 t和5.1 t,在现有世界大型运载火箭之林中占有重要地位,再次体现出推进技术的关键作用。

以长征三号乙为代表的长征系列火箭,是中国航天业在20世纪取得的重大成就,其中一些品种将会继续使用很多年,因此,也是21世纪中国航天的重要基础。

在21世纪即将到来之际,回顾过去,展望未来,确定我们今后的奋斗目标,大有必要。我们是靠这些成就坐享其成,还是利用这些成就为我们争取到的一点点时间,尽快前进一大步,赶上世界先进国家的水平,继续占有一席之地,对此,必须作出明确回答。

与先进国家相比,中国的运载火箭需要尽快向前发展。现有长征系列火箭的助推器和一、二级是在70年代完成的发动机基础上组成的。通过并联、捆绑,充分发挥了发动机的效能,90年代运载能力已达到与先进国家基本相当的水平。但与此同时,火箭的复杂性增加,可靠性提高的难度加大。任何事物的发展都有一个量的限度。继续使用现有发动机去提高运载能力及可靠性并降低成本已超过了限量,难度极大,得不偿失。以长征三号乙为例,4个助推火箭各使用一台推力75 t发动机;一级火箭使用4台75 t发动机并联;二级火箭使用一台75 t大推力发动机和一台4喷管的游动发动

机；第三级火箭使用两台推力 8 t 的氢氧发动机和一台多喷管姿控发动机：共计 13 台发动机，分别安装在七个单级火箭内。运载能力提高了，但却成为当今世界少数几种最复杂的火箭之一，如果没有更大推力的发动机，进一步提高其运载能力的可能性很小。假定要将其近地轨道运载能力提高到接近 15 t，用两级火箭状态发射，则助推火箭要增加一倍，加上一、二级共使用 14 台发动机。若要发射高轨道卫星，再加第三级，共使用 17 台发动机。以今日的国际水平衡量，这种假设的方案是不能成立的。

前苏联的载人登月火箭，使用推力 150 t 的发动机组合，以达到数千吨的起飞推力，使用的发动机超过 20 台，由此引起的可靠性降低是无法弥补的，两次试验均以失败告终。美国土星-V 火箭第一级使用 5 台推力 680 t 的发动机，第二级使用 5 台推力 91 t 的氢氧发动机，第三级使用 1 台推力 91 t 的氢氧发动机，保证了运载能力和极高的可靠性，取得了载人登月的成功。前苏联在登月竞赛中失败的根本原因是没有及早研制出推力足够大的液体火箭发动机。看来动力先行的问题不仅是中国的经验，而且是世界普遍规律。

运载火箭是国力的象征也是商业发射的工具，历来竞争激烈。运载火箭的研制，耗资巨大，研制周期长，5~10 年磨一“箭”是正常的。因此，其服役期很长，一种型号可以使用 30 年以上。这些特点决定，在其方案论证阶段就要考虑到今后技术进步的情况。如果一个火箭在它研制成功时就是不先进的，用不了几年就要被淘汰，或是由于设计方案不先进或技术问题不能解决而中途“下马”，就像前苏联的登月火箭那样，由此给国家的威望、研制队伍的信心和经济造成的损失是难以估量的，必须坚决避免其发生。

随着载人航天的发展，商用卫星的大型化，21 世纪对大运载的需求是迫切的。20 世纪 80 年代，许多国家已经开始这方面的研制了。他们普遍重视发动机的关键作用。在新火箭的总体设计方案中，主动要求使用大推力、高性能、高可靠的新发动机取代六七十年代的原有发动机，以减少发动机数量，提高可靠性，降低运营成本。这是非常有远见的明智之举。在这世纪之交，一批由新发动机组成的新型大运载火箭已经或即将研制成功，大大增强了他们的竞争能力和实力。

日本和欧洲的 100 t 氢氧发动机 LE-7、HM-60 的成功，使 H-II 火箭和阿里亚娜-5 只用一台这种发动机加上两台固体助推器组成一级半形式的火箭，就可以把重型卫星送入近地轨道，再加一个由一台氢氧发机构成的上面级，就可以发射高轨道卫星，可靠性高，进一步增加运载能力的潜力也很大^[1]；俄罗斯与乌克兰开发的液氧煤油推进剂发动机 RD170，推力 800 t，RD120 推力 85 t，各用一台，分别装于天顶号火箭的一、二级，可将 15 t 有效载荷送入近地轨道^[1]；美国出资由俄罗斯研制的 RD170 发动机的改型产品 RD180，推力 400 t，用于改进 Atlas（宇宙神）火箭^[2~5]；美国自行研制的 RS-68 氢氧发动机，推力约 330 t，用于对德尔它火箭进行改造^[6]。美国还收购了前苏联生产的用于登月火箭的剩余发动机 NK-33 液氧煤油发动机，并准备重新生产，推力为 150 t，美国代号为 AJ26-NK-33A，用作可回收运载火箭 Kistler 第一级的主发动机^[7]。这三种火箭已进入飞行试验阶段。所有这些火箭经过进一步改进，很容易将近地轨道运载能力提高到 20 t 以上，同步转移轨道运载能力提高到 5~13 t，成本较低，可以承担向国际空间站运送舱段，以较合理的价格发射大型通讯卫星或一次发射多个较小的通讯卫星等任务^[8~12]。因此，我国长征运载火箭在 21 世纪初所面临的形势是极其严峻的。我们必须尽快推出更大、更先进的运载火箭才能走出困境，而最关键的是必须使用新的、更大推力的高性能发动机。企图利用 20 世纪 80 年代前的老发动机拼凑出一个大火箭应付几年的想法是没有出路和十分危险的。

从我国国情及世界的发展趋势看，推力为 100~150 t 的液氧煤油助推发动机，推力为 50~100 t 的液氢液氧主发动机是 21 世纪开始就应研制的两项关键产品。用它们组成的运载火箭系列，采用模块化的组合设计方法，可以拼组成能发射 10 t、20 t 和更大的近地轨道有效载荷的火箭；增加一个上面级，可以发射 5~10 t 的同步轨道通信卫星。应力争 2006 年可以达到开始飞行试验的研制阶段，2010 年可以达到商业发射的水平。

21 世纪的航天运载系统，重点是要解决能力和成本问题，并且需要加强国际合作，共同开发空间，这样才有可能用各国国民经济可以承受的投资，去创建一个空间产业，造福人类。而最根本的降低费用方法是创造完全可重复使用的运载工具，

像班机一样往返于地球和空间站之间。当前有两种较现实的办法：一是直接把完成运载任务的火箭用降落伞回收，用气囊或旋翼防止触地时碰撞并损坏火箭的结构，以便再次使用；另一种方法是完全可重复使用的火箭航天飞机。从发展眼光看，航天飞机是一条必由之路和长期依靠的手段。以火箭发动机为唯一动力的航天飞机将最先获得实用。高超音速吸气式发动机在突破其技术关键后，可能用于航天飞机起飞后的加速直至冲出稠密大气层的一段航程中，这种组合式（火箭发动机加吸气发动机）的推进系统，可以提高推进剂的利用率，比单独用火箭发动机更为经济。但这种方案在技术上尚有许多未知数，21世纪50年代前能否实现，任何人不敢肯定。因此，引入吸气式发动机的技术方案的开发顺序应排在单一火箭发动机方案之后，已成为人们的共识。

美国正在研制可完全重复使用火箭航天飞机。为了考查其技术方案的可行性和运行的经济性，首先发射缩比验证机——X-33。它不久将开始试飞。这是一个单级火箭飞机，垂直起飞，最大速度希望达到 $Ma = 15$ （约 17 600 km/h），高度 75 km，飞行 1 500 km 后在普通机场水平降落。这样的高度和速度将能够完全模拟下一步将研制的、真正可以进入围绕地球轨道的航天飞机将会遇到的各种环境条件，为真实的航天飞机设计获取必要的设计数据。最引人注目的是 X-33 的发动机第一次使用了一种与机身尾部外形协调的直列式气动塞式喷管。这种喷管大大改善了飞机的气动特性和布局，更重要的是它能使喷管由地面到真空都保持较高的性能，提高了发动机的平均比冲，是火箭航天飞机成功的关键技术。而发动机的其余系统则全部来自一台已有的 J-2 发动机。如果 X-33 能够达到预期的目的，真正完全重复使用的航天飞机将正式开始研究，取名为冒险星（Venturestar）^[13]。

就中国的技术条件而言，吸气式发动机的水平相对世界先进国家差距甚大，而火箭发动机则较为接近。先火箭发动机后吸气火箭组合发动机的发展顺序更是属于常理。只要有决心和一定的投资，重点突破气动塞式喷管技术，可以在不长的时间内研制出供单级入轨火箭飞机的缩比试验样机使用的氢氧气动塞式喷管发动机，并按计划研制出这个试验样机。利用试验样机的技术成果与前文提到的为大运载研制的 50~100 t 氢氧发动机的成果相结合，

就能很快研制出为实用型单级入轨航天飞机所需的发动机，中国航天飞机的问世便指日可待了。利用我们的技术优势，研制火箭推进单级入轨航天飞机，是我国航天运载工具迎头赶上世界先进水平的突破点，也是我国液体火箭发动机在 21 世纪的又一项重任，应该下定决心，不失时机地展开工作，争取在 21 世纪 20 年代中后期使中国进入航天飞机时代是完全可能的。

简要总结

(1) 发动机是决定运载工具分类属性的根本因素。

(2) 发动机研究先行一步，是运载工具快速发展的普遍规律。

(3) 发动机推力大小与火箭的规模应匹配，由过多的小推力发动机组成大推力推进系统的技术路线已被证明是错误的；用 20 世纪 70 年代推力较小的发动机装备新研制的较大火箭的想法不可取。

(4) 保持我国航天发展势头，立足于先进航天大国之林，在航天市场占有一席之地，参加国际空间站的合作开发，成为公认的必不可少的一员；这些目标是最重要的“型号牵引”，呼唤着中国大运载火箭的早日上天。

(5) 发展运载动力优先，当前液体火箭发动机最重要的几件事是：

① 尽快研制出一台推力 50~100 t 的液氢液氧发动机；

② 尽快研制出一台推力 100~150 t 液氧煤油发动机；

③ 利用成熟的氢氧发动机为基础研制气动塞式喷管发动机；

④ 利用①、③的成果相结合，研制出单级入轨火箭航天飞机的主发动机。

(6) 火箭总体设计部门应有远见，要主动提出对大推力、高性能发动机的要求，促进中国航天运载的发展。

中国航天运载技术一定要在 21 世纪前半叶的某个时刻赶上世界先进水平。这个目的一定能达到。

本文所有观点均系作者个人看法，不代表任何组织、团体和政府机构。

参考文献

- [1] 王丹阳. 世界航天运载器大全 [M]. 北京: 宇航出

- 版社, 1962
- [2] 美俄成立火箭发动机合营公司 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1997, (13): 2
- [3] NRO 选择宇宙神-3A 发射卫星 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1998, (25): 7~8
- [4] 宇宙神-3 芯级样机成功进行点火试验 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1998, (52): 4
- [5] 首枚宇宙神-3 运载火箭运至发射场 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1999, (14): 2~3
- [6] Wood B K. RS-68: What and how [R]. AIAA, 98-3208
- [7] Hulka J, Forde J S, Werling R E, et al. Modification and verification testing of a Russia NK-33 rocket engine for reusable and restartable applications [R]. AIAA, 98-3361
- [8] 洛克希德·马丁公司命名宇宙神-5 运载火箭 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1999, (10): 6~7
- [9] 卫星发射市场分析 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1999, (10): 8~12
- [10] 日本运载器研制现状 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1998, (26): 2~4
- [11] 阿里安空间公司面临的挑战和应对措施 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1998, (26): 4~5
- [12] 阿里安-5 之后的改进计划 [J]. 刘兴武译. 航天快讯, 1998, (28): 2~3
- [13] Powell R W, Lockwood M K, Cook S A. The road from the NASA access-to-space study to a reusable launch vehicle [R]. IAF-98-V.4.02

Exploration of the Development Road

for Chinese Liquid Rocket Engine in 21st Century

Wang Heng

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

[Abstract] Liquid rocket engine is an important member of the space propulsion family and the only propelling means to bring payloads to the first universe velocity in the next historical period, which has vital effects on advancement of space technologies. Propulsion must enjoy priority in research and development of launch vehicles. In the early part of 21st century, China should successfully develop its heavy lift launch vehicles equivalent to that of other advanced countries in the world. We won't allow them to set up on the bases of simply increasing number and thrust magnitude of existent engines and must develop new types of engine which are more powerful, more advanced and without contamination. Meanwhile, we should begin preliminary researches on rocket spaceplane and aerospike nozzle adopted by it's propulsion. Along this way, we can finally catch up with the world's advanced level.

[Key words] propulsion having top priority; liquid rocket engine; heavy lift launch vehicle; rocket spaceplane

*

*

*