



## Prospect of Aerospace Delivery Technology During Next 30 years

西北工业大学航天学院 果琳丽 谷良贤  
中国运载火箭技术研究院研究发展中心 蒋先旺 杨建民 王小军



果琳丽

高级工程师,在中国运载火箭技术研究院研究发展中心从事运载火箭发展规划和总体方案设计工作,作为集团公司推荐专家,多次参加战略论证工作,现为西北工业大学航天学院博士生。

作为航天技术的基础,运载技术代表着一个国家自由进出空间的能力,是发展利用空间技术、控制空间

未来30年内,以信息、通信与电子技术,先进材料技术、先进能源及动力技术、先进制造技术等为代表的一批基础科学技术将取得重大突破,这将直接推动航天技术的快速发展。随着以新一代大型运载火箭为代表的重大科技专项工程的顺利实施,以及各类基础科学技术不断取得突破进展,可以预测未来的30年(2010~2040年)将迎来我国航天运载技术迅猛发展的战略机遇期。

技术的基础和前提,因此世界各航天强国均把发展先进航天运载技术作为保持其领先地位的战略部署之一。未来30年内,以信息、通信与电子技术,先进材料技术、先进能源及动力技术、先进制造技术等为代表的一批基础科学技术将取得重大突破,这将直接推动航天技术的快速发展。随着以新一代大型运载火箭为代表的重大科技专项工程的顺利实施,以及各类基础科学技术不断取得突破进

展,可以预测未来的30年(2010~2040年)将迎来我国航天运载技术迅猛发展的战略机遇期。

### 国外航天运载技术的发展趋势

从以美、俄为代表的航天强国的发展历程来看,随着航天应用技术的迅猛发展,未来军事、经济、社会活动对航天技术的依赖程度将越来越高,航天技术除了要满足日常的军用、民

用及商用发展建设任务需求外,还要逐步满足直接支持军事行动的战术应用需求。当前,美国、俄罗斯、欧盟等航天强国基本上已形成了包括以一次性运载火箭、航天飞机、天地往返运输重复使用运载器、轨道转移飞行器、深空运输飞行器等综合的航天运输体系,通过对其未来30年的发展趋势总结分析,可以看出国外航天运载技术的发展趋势如下:

(1) 完善新型运载火箭型谱系列,积极发展上面级技术。

当今世界航天大国已经或即将完成一次性运载火箭的更新换代,新投入使用的主流运载火箭如欧空局的“阿里安5”、美国“宇宙神5”、“德尔塔4”、日本的“H2-A”等新型运载火箭,都采用了高可靠、低成本、大直径、少级数、使用无毒无污染推进剂的新型运载技术,以氢氧发动机或液氧煤油发动机作为主动力,这些新型运载火箭的近地轨道运载能力一般超过20t,地球同步转移轨道运载能力可达到10t以上,采用模块化的组合方式形成运载能力覆盖范围较广的新型运载火箭系列。

上面级是提高火箭性能和提高任务适应能力的有效途径之一,目前国外正在使用或新研制的运载火箭上面级有10多种型号,具有多次启动变轨能力及长时间在轨飞行能力,可以进行多星发射及轨道部署,以及执行MEO、GEO直接入轨任务。新投入使用的新型主流运载火箭都是通过组合不同的上面级,形成拥有各种运载能力、能执行多种任务的新型运载火箭系列。

(2) 发展经济、灵活且具备快速机动发射能力的小型运载火箭。

美国为了继续维持其全球霸主地位,提出具备全球快速精确打击能力。满足快速进入空间军事应用需求的小型运载火箭,不要求具有太高的运载能力,但是必须具备低成本、高可靠、机动能力强、操作简单等特

点。快速机动发射小型运载火箭目前主要集中于美俄两国,在役型号多是在战略导弹基础上改装或研制而成的,如美国的飞马座、金牛座、米诺陶,俄罗斯的起跑号、静海号、波浪号。新研制火箭多以液体和固液混合推进剂为主,如美国的法尔肯1、快速到达、风驰,俄罗斯的飞行号。发射平台以陆基和空基机动为主。其中空基发射运载火箭具有良好的机动性、灵活性和成本低等优点,已成为美俄实现快速进入空间的主要途径。目前,美国在已有飞马座空射火箭的基础上,正在研制快速到达空射小型运载火箭;俄罗斯在研的飞行号和依希姆系统等也均为空射小型运载火箭。

(3) 发展重型运载火箭技术,实现重返月球计划并最终建立月球基地。

美国为重返月球计划正在研制阿瑞斯1和阿瑞斯5两种运载火箭,用于载人登月并建立月球基地。其中,战神5为载货的重型运载火箭,采用人货分运、近地轨道对接的方式实现载人登月的目标。俄罗斯也在制定2040年前的航天发展计划,目标是在2025年以前派遣宇航员登上月球,为此考虑在新型安加拉运载火箭的基础上研制超重型运载火箭。欧洲、日本、印度也制定了相关的登月计划,并也将在该计划下进行重型运载火箭的研制工作。新研制的载人登月运载火箭更加重视的安全性和可靠性设计,将载人和运货分开,充分借鉴成熟的技术和产品,注重系统全生命周期的成本和风险控制。未来长距离的星际航行运输将依赖组合运输系统,轨道对接组装技术是发展星际载人运输技术的关键。

(4) 重复使用运载器技术难度较大,广泛开展关键技术攻关和演示验证。

美国航天飞机的失事和退役虽然给重复使用运载器的研发工作蒙上了阴影,但是各国重复使用运载器

的单项关键技术研发工作却更加热烈。重复使用运载器的发展途径是先进行关键技术攻关和演示验证,而后开展全尺寸飞行器的研制。按照循序渐进、逐步突破的原则,并注重中间成果的转换。通过小尺寸样机的飞行演示来验证总体方案的可行性和关键技术,并积累设计数据,针对暴露出来的问题,进一步完善设计,降低技术风险和投资风险。

当前重复使用运载器的技术重点是发展助推级或轨道级两级入轨部分重复使用运载器,近期内仍以火箭发动机为动力,远期向吸气式组合发动机为动力,美国提出最终发展成为可以2h内全球快速到达的空天作战飞机。此外美国一些私营公司也积极研制了亚轨道重复使用运载器,发展了“白色骑士”等亚轨道重复使用运载器,并以此带动了亚轨道空间旅游业的迅猛发展。

(5) 研制轨道转移飞行器,满足空间运输和在轨服务的需要。



随着在轨服务需求的不断增加,各航天大国均发展基于先进上面级技术的各种轨道转移运输飞行器,如俄罗斯的Fregat火箭和欧洲的ESC-B火箭,其所使用的发动机具有多次启动能力,轨道机动能力更强。这类轨道转移飞行器不仅能将有效载荷送入工作轨道,进行轨道转移飞行,满足不同轨道任务的需求,还能为有效载荷提供在轨服务和燃料加注补给,军事应用前景广泛。例如,美国计划在2015年后部署的轨道转移飞行器,通过对美国空间资源进行在轨服务,能显著提高这些空间资源的灵活性和作战能力。俄罗斯发展了“渡船号”空间拖船,用于空间站的在轨支持。欧洲和日本为支持国际空间站任务,研制了自动转移运输飞行器(ATV)和H-2A自动转移运输飞行器(HTV),用于向国际空间站运送所需物资。

### 我国航天运载技术面临的机遇和挑战

我国航天运载技术的发展起步于20世纪50年代,先后成功研制了长征一号、长征二号、长征三号、长征四号等15个型号的运载火箭,实现了从常温推进剂到低温推进剂,从串联到捆绑,从一箭单星到一箭多星,从发射卫星到发射载人飞船的跨越式

发展,组成了相对完备的运载火箭型谱,近地轨道运载能力达到8500kg,太阳同步轨道(SSO)运载能力达到6100kg,地球同步转移轨道运载能力达到5500kg,基本能够满足不同用户的需求。

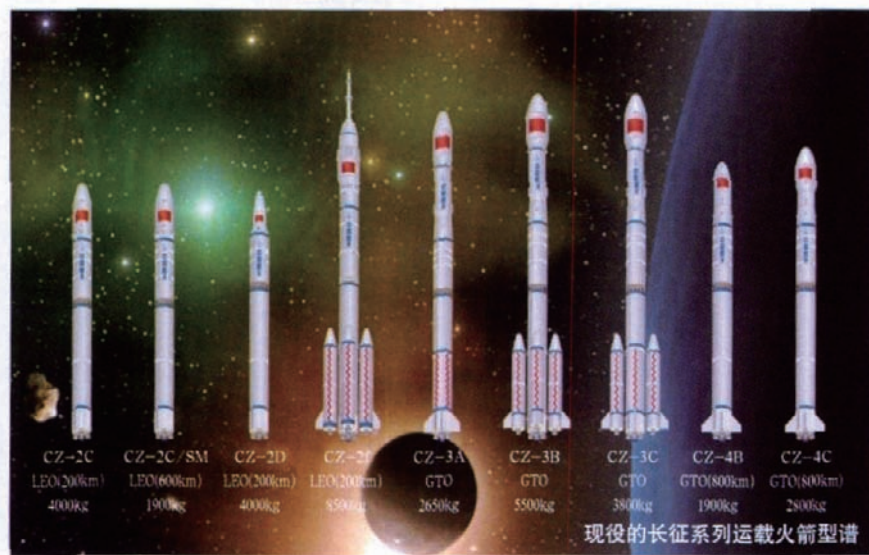
虽然我国航天运载技术取得了举世瞩目的成就,但与此同时我国长征运载火箭仍属于“家族式”发展模式,每个运载型号的发展都源于特定的需求,型号间技术状态差别较大,“三化”(通用化、系列化、组合化)程度不足,运载能力与现有国际主流运载火箭相比偏低且互相重叠,设计可靠性有待进一步提高,内陆航区安全性差,测试发射周期长,任务适应能力不足,相对于国外主流运载火箭和先进航天运载技术仍存在较大的差距,不能满足未来国防建设和国民经济的发展建设要求。与此同时,国内卫星应用需求日益旺盛,以二代导航二期工程、高分辨率对地观测工程、载人航天工程、月球探测工程等为代表的国家重大科技工程,以及未来可能的载人登月及其他深空探测任务等都对运载火箭的发展提出了迫切的需求<sup>[1,3]</sup>。因此无论是从技术推动发展还是应用需求牵引的角度来看,未来30年都将是我国航天运载技术发展的战略机遇期,其面临的机遇和挑战主要体现在以下几个方面:

(1)高密度的发射需求。可以预测未来30年内卫星技术的发展将以新一代大型地球静止轨道卫星平台和太阳同步轨道小卫星平台的发展为主,卫星总数量预计在200~300颗左右,考虑到搭载及一箭多星等多种发射模式,运载火箭年发射率将显著增加。

然而当前我国长征系列运载火箭的年发射率较低,同一型号运载火箭每发之间的技术状态变化较多,个别单机产品,如个别单机的生产制造周期偏长,成为研制任务的短板,导致运载火箭批量化的生产制造发射能力不足;此外,当前我国仅有西昌、太原、酒泉3个内陆发射场,每次发射任务间发射塔架的修复及状态转换周期较长;各类工业基础能力不足的情况将对提高运载火箭年发射率形成限制。

(2)大幅提高运载能力的需求。我国在役的长征火箭运载能力,目前进入空间运载能力低轨为8.5t,GT0为5.5t,对于大型和重型有效载荷的发射要求已难以通过进一步挖掘潜力来满足,不能满足大平台卫星及后续载人登月等任务的需求。因此必须发展新一代大型运载火箭技术,采用大直径结构、大推力发动机等先进技术,大幅度提高运载能力,使近地轨道最大运载能力满足20t级、地球同步转移轨道运载能力达到10t级。同时,面对未来可能的载人登月任务,要求运载能力达到近地轨道100t级,奔月轨道50t级,必须发展重型运载火箭技术。整体来看可以预计:未来30年内运载火箭的低轨运载能力需达到20~100t级,因此,迫切需要运载能力上一个新台阶。

(3)快速发射的需求。目前长征系列运载火箭发射准备周期一般在30~50天左右,且主要依赖固体塔架进行发射,应急快速发射能力不足。为满足民用应急减灾对快速发射的要求,需要发展新型具备快速响



应发射能力的小型运载火箭。依赖简易塔架发射的液体小运载需满足周发射,依赖车载机动发射的固体小运载需满足天发射,依赖空中发射的小型运载火箭需满足数小时发射的要求,逐步满足民用减灾对快速发射的需求<sup>[3]</sup>。

(4)多星发射及轨道机动的需求。我国目前运载火箭的上面级多星轨道部署和深空运输能力不足,难以满足 GEO、MEO 轨道直接进入、多星发射等任务需求。随着新一代大型运载火箭的研制成功,进入空间的能力大大增强,预计 2020 年后所执行的任务中将出现多星异轨部署和深空运输的要求,需要实现长期在轨的轨道部署能力,并实现以月球、火星为代表的星际航行运输能力。

(5)发展先进运载技术的需求。与国外先进航天运载技术相比,我国航天运载技术整体来看还落后 15~20 年。在先进运载技术领域如重复使用运载器技术、高超声速飞行器技术、在轨组装深空运输飞行器技术、基于先进推进技术运载器等方面都存在较大差距,仅停留在跟踪研究阶段,所需的基础技术和关键技术储备严重不足,如果现在不加大加快对先进运载技术的预研力度,30 年后技术差距将会进一步扩大,难以保持我国航天大国的地位和可持续发展空间。

### 未来重点发展方向预测

预计经过 30 年的快速发展建设后,我国航天运输系统将逐步建设成为包括一次性运载火箭、轨道转移运输飞行器、重复使用天地往返运输系统在内的综合航天运输体系,与国外先进航天运载技术的差距逐步缩小。预测发展的重点方向将包括以下几个方面:

(1)现役长征系列运载火箭持续改进。

当前国家正在实施的载人航天、二代导航二期、高分辨率对地观测及

探月等国家重大科技专项工程,相当一部分任务都是由现役的长征系列运载火箭来完成的。在新一代系列运载火箭投入使用之前,现役运载火箭至少还有 20 年的服役期,因此应该不断改进现役运载火箭,提高其可靠性及任务适应能力,拓宽任务适应范围,缩短靶场测试流程,满足国内外近期高密度发射任务的需求。

继续通过可靠性增长技术研究和试验,不断提高现有运载火箭的可靠性。针对现有运载火箭的研制生产、测试发射中暴露出来的薄弱环节,以及潜在的故障隐患,提出解决途径。对现有型号运载火箭持续进行“三化”设计改进,降低成本,提高适应性,提高我国运载火箭在国际卫星发射市场上的竞争能力。

此外,随着运载火箭发射次数的增加,内陆发射场的航区安全问题备受关注,通常运载火箭总体方案设计时为选择合适的落区及保证星箭测控条件,要牺牲掉部分运载能力。采用助推器落区可控回收技术后,可以有效解决落区安全问题,提高运载火箭的运载能力,并为重复使用助推器的研发积累技术基础。预计未来 30 年内,采用翼伞技术或有翼滑翔技术的大型捆绑式运载火箭液体助推器可控回收技术将取得突破性进展。

(2)加快发展新一代运载火箭系列。

新一代运载火箭作为我国现役长征系列运载火箭的更新换代产品,旨在全面提高中国运载火箭的整体水平和能力,保持我国运载技术在世界航天领域的地位。新一代运载火箭采用无毒、无污染推进剂,采用大

直径结构、大推力发动机等先进技术,大幅度提高运载能力,低轨最大运载能力达到 20t 级、GTO 最大运载能力达到 10t 级;实现型号的“三化”设计,具备低成本、高可靠、测试操作方便的优点,建成后的型谱化系列能适应发射不同有效载荷的要求。

我国新一代运载火箭按照“立



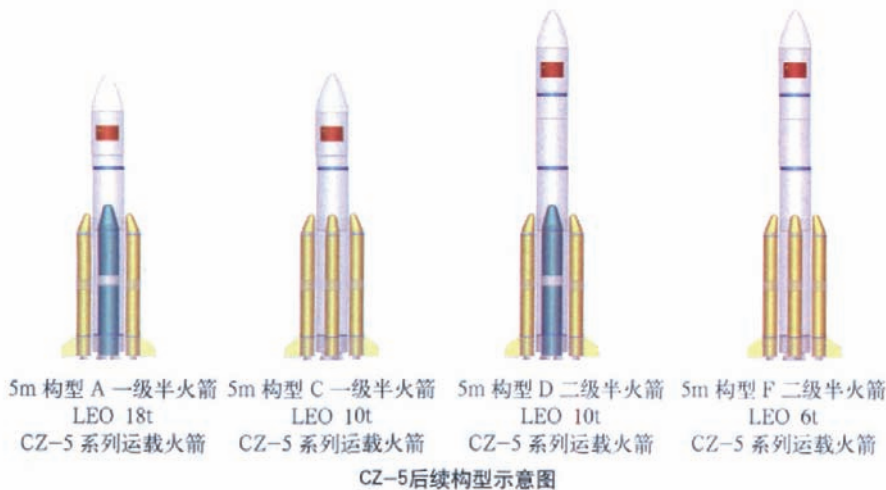
足长远、统筹规划、优先发展、分布实施”的发展原则,遵循“1 个系列、2 种发动机、3 个模块”的总体思路,通过模块化组合方式,可以形成包括 5m 直径大型运载火箭、3.35m 直径中型运载火箭和小型运载火箭在内的 6 种大型运载、6 种中型运载、2 种小型运载的火箭系列。为避免型谱间运载能力交叉重叠,初步选定新一代小型运载火箭、新一代中型运载火箭、新一代大型运载火箭三型运载火箭进行优先发展,同时配合先进上面级的研制,可以进一步提高新一代运载火箭系列的运载能力和任务适应性<sup>[2,4]</sup>。

新一代大型运载火箭的定位是用于发射载人航天工程空间站、月球探测第三期和低轨遥感大平台等特殊的大型航天器载荷,也可用于发射大型地球同步转移轨道卫星。目前优先发展的 CZ-5 运载火箭为低轨运载能力最大的两级半构型运载火箭,其芯一级采用 5m 直模块,安装 2 台 50t 级推力的氢氧发动机(YF-77),发动机双向摆动;芯二级采用改进

的 CZ-3A 三子级氢氧发动机(YF-75D)作为主动力,可以2次启动,发动机双摆;助推级采用4个3.35m直径模块,安装2台120t级推力的液氧煤油发动机(YF-100);整流罩直径5.2m,长约20m。全箭总长约62m,起飞重量802t,起飞推力约1066.8t,该构型火箭的地球同步轨道转移运载能力约为12t级,其综合性能指标将达到国际上主流运载火箭水平<sup>[3,4]</sup>。

未来可通过改变助推器模块来

在轨过程中需解决的热控、能源、数吨级推进剂的能量管理、低温推进剂的蒸发量控制等关键技术,具备多星发射能力,拓展对不同有效载荷发射任务的适应性;第二步是发展轨道机动飞行器,获取长期在轨、大机动、强自主空间运输平台技术能力。通过系统集成进行相关技术的飞行演示验证,逐步掌握空间机动平台技术、载荷技术,为实现轨道运输、在轨部署、空间服务等应用任务奠定基础<sup>[5]</sup>。



构成满足不同运载能力需求的 CZ-5 新一代大运载火箭系列。如以一级半构型为基础(即去掉芯二级),捆绑2个3.35m模块和2个2.25m模块,LEO运载能力可达18t;捆绑4个2.25m模块,LEO运载能力可达10t;以 CZ-5 二级半构型为基础,捆绑2个3.35m模块和2个2.25m模块,GTO运载能力可达10t,捆绑4个2.25m模块,GTO运载能力可达6t<sup>[2,4]</sup>。

(3)以研制先进上面级为切入点,逐步具备多星部署及轨道机动能力。

轨道机动能力是未来发展深空探测及空间轨道服务能力的基础。预计未来发展目标是具有较强的轨道机动能力,可以完成轨道转移、在轨服务、在轨驻留等空间任务。主要包括2个方面:第一步是研制先进上面级提高新一代运载火箭的任务适用范围,显著增强运载能力。通过研制先进上面级可以突破上面级长期

(4)针对特殊应用需求,发展重型运载火箭和小型固体运载火箭。

• 重型运载火箭。

为满足载人登月任务的需求,需要具备奔月轨道50t的运载能力。目前有2种技术途径,第一种方案可在新一代运载火箭技术条件的基础上,发展起飞重量1000t级的三级半构型的运载火箭超大型运载火箭,分3次或者2次将有效载荷送入环月轨道后对接后实施登月;第二种方案发展起飞重量3000t级的重型运载火箭,直接将有效载荷送入环月轨道。初步分析,由于空间多次对接组装技术难度较大、可靠性低、操作复杂,技术基础薄弱,然而国内在120t级液氧煤油发动机和50t级液氢液氧发动机的基础上,发展更大推力规模的液体火箭发动机技术基础较好,因此预计未来30年内我国将重点发展起飞重量为3000t级的重型运载火箭,将近地

轨道运载能力拓展到100t级以上<sup>[3]</sup>。

• 小型固体运载火箭。

小型固体运载火箭系统结构简单,射前免加注,操作灵活简单,因此较为适合应急快速发射的需求;但是受制于机动发射平台承载重量的限制,目前国内小型固体运载火箭的运载能力普遍偏低。在未来30年国内新一代大飞机等平台技术都将得到突破性进展,电气系统集成一体化技术、星箭快速测试发射技术等也将得到进一步应用和发展,为发展车载发射、空中发射等不同发射方式的小型运载火箭奠定技术基础,预测未来小型固体运载火箭的测试发射周期将缩短至小时,级运载能力将得到显著提高。

(5)以亚轨道重复使用运载器研制起步,逐步突破关键技术并开展演示验证。

重复使用运载技术是实现快速、机动、可靠、安全、廉价进出空间的重要手段,也是航天运输系统的发展方向。由于单级入轨技术难度较大,目前是以火箭动力为基础的亚轨道重复使用运载器为切入点,降低对发动机、先进结构和材料的技术要求。利用亚轨道飞行演示验证、在轨飞行演示验证逐步突破重复使用运载器的关键技术;对飞行试验成果进行评估,完成技术成果的转化,研制实用型的亚轨道重复使用运载器、轨道级重复使用运载器,重点突破重复使用运载器研制、运行使用与维护技术、健康监测与故障管理等。此外,通过重点发展通用再入飞行器,可对高超声速再入关键技术进行综合演示验证;通过发展高超声速巡航飞行器,可对吸气式发动机为动力的跨大气层飞行器技术进行牵引发展<sup>[5]</sup>。

(6)新概念飞行器有望得到持续关注和发展。未来的航天运载技术将更加体现出导弹与运载技术融合、卫星与运载技术融合、航空与航天技术融合发展的趋势。基于形状

记忆合金的智能材料技术与仿生扑翼飞行器控制技术的发展,将推动智能可变形飞行器的应用;基于核推进、电推进、离子推进等新型推进技术的新概念飞行器也将得到持续的关注和发展。

### 未来关键技术发展预测

未来30年内,以先进推进和动力技术、先进材料和结构技术、先进信息、通信与电子技术、先进制造技术为代表的一批基础和关键技术将取得重大突破,从而推动中国航天运载技术的快速发展。主要体现在以下几个方面:

#### (1) 先进推进和动力技术。

目前长征系列运载火箭主要使用的是基于四氧化二氮和偏二甲肼常规推进剂的液体火箭发动机,新一代系列运载火箭将主要使用120t的液氧煤油发动机和50t的液氢液氧火箭发动机。预计未来30年内,在运载器的主动力方面,以高性能高可靠大推力的液氧/烃和液氢液氧火箭发动机技术、低成本大直径大推力的固体火箭发动机技术、可重复使用液体火箭发动机技术、超燃冲压发动机技术、组合循环发动机技术为代表的主动技术有望获得工程化应用;在运载器的空间推进方面,以空间在轨加注技术、电推进技术、先进核动力技术等为代表的空间推进和动力技术等将取得重大突破;此外,在新概念推进方面,绳系推进、激光推进、微波束能推进、离子推进、太阳帆推进、反物质推进等一批基础科学技术将不断取得进展。

#### (2) 先进材料和结构技术。

发展先进的材料和结构技术是提高运载器运载系数、提高产品可靠性和质量、降低产品可靠性的关键因素,也是衡量航天运载技术发展水平的重要标志之一。预计未来30年,在轻质结构材料技术方面,高性能铝锂合金及轻质高性能贮箱和气瓶材

料技术有望广泛应用,运载火箭的结构重量预计可以减轻10%~15%;可重复使用轻质高性能铝锂合金及其贮箱、低温轻质高强复合气瓶技术将取得重大突破;在高性能金属结构材料技术方面,用于先进氢氧火箭发动机、液氧/烃发动机等先进液体火箭发动机壳体材料和结构技术将取得重大突破;在热防热材料与结构技术方面,针对重复使用运载器系统鼻锥、翼前缘及机身大面积等关键部位,可重复使用碳/碳、超高温陶瓷及陶瓷基复合材料、金属和陶瓷等非烧蚀热防护材料及结构技术将取得重大突破;在特种功能材料与结构技术方面,轻质高效的多功能结构技术、可重复使用的透波/隔热/承载材料及结构技术有望取得显著进展。

#### (3) 先进信息、通信及电子技术。

信息、通信及电子技术是发展最快、应用最广泛的航天技术之一。在运载器的天地信息处理与通信方面,预测未来30年,基于卫星数据中继和卫星导航技术的多种测控手段协同的天基测控技术、自由空间光通信技术、保密通信技术、高频率的3G宽带通信技术、箭载智能天线技术、天地一体信息处理和应用技术将得到工程化实质性应用;在航天运载器的电子技术方面,高精度、高可靠、集成化、自动化、一体化是未来的主要发展方向,预计未来30年在低成本高速率总线技术、高精度的惯性仪表技术、基于多模芯片的航天电子系统集成化技术、基于微机电系统(MEMS)的惯性导航技术、微纳传感器技术、可重复使用运载器的健康监测与故障诊断技术等方面将取得重大突破。

#### (4) 先进制造技术。

先进高性能运载器的设计必须以先进制造技术为基础才能实现。未来航天制造技术正在从常规制造、传统制造向非常规制造、绿色制造、极端制造方向发展。航天极端制造主要表现在巨结构制造和微细制造,

例如发展重型运载火箭所需的巨直径箭体制造技术,以及基于MEMS技术的微小型飞行器制造技术等;非常规制造主要是向采用高强镁合金及超高强铝合金等难成形材料的有翼升力体外形及可变外形飞行器制造技术等方面发展。预计未来30年在先进航天运载器的超精密和纳米加工技术、特种合金的精密铸造技术、高效精密去除性加工技术、先进连接技术、表面工程技术、无损检测技术、装配测试技术、关键工艺装备研制技术以及现代集成制造技术等方面将取得突破性进展。

### 结束语

未来30年是中国航天运载事业发展难得的战略机遇期,随着国家新一代运载火箭重大专项工程的顺利实施,我国的航天运载技术必将取得长足发展。在以市场需求为牵引,以技术进步为推动的发展模式指导下,可以预测:未来30年后我国的航天运输系统构成将进一步丰富,形成包括一次性运载火箭、轨道转移飞行器、天地往返运输重复使用运载器在内的综合航天运输体系,具备批量制造及高密度发射、大规模进入空间、按需快速发射、轨道机动运输及重复使用天地往返运输等能力,满足国防建设和国民经济迅猛发展的需求。

### 参考文献

- [1] 龙乐豪. 中国科学院科学与技术预见系列报告之二《技术预见报告2008》. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 李东, 程堂明. 中国新一代运载火箭的发展展望. 中国工程科学, 2006, 11.
- [3] 龙乐豪. 我国孕育新一代运载火箭20年完成更新换代. <http://www.gyyb.gov.cn/Article.asp?id=110418>, [2009-6-2].
- [4] 李东. 长征火箭的现状与展望. 科技导报, 2006 (3): 18.
- [5] 龙乐豪. 中国科学院科学与技术预见系列报告之二《技术预见报告2008》. 北京: 科学出版社, 2008.

(责编 淡蓝)