

◎ 唐军刚 陈塞崎 陈益 刘欣

## 一、引言

世界各国运载火箭的发展进程大致可分为三个阶段：初期发展阶段、应用发展阶段、产业化发展阶段。我国运载火箭的发展历程与其他航天大国基本一致，最初是从弹道式导弹的基础上发展起来的。20世纪六七十年代，我国的运载火箭技术主要是以验证科研目标和技术手段为目的。到80年代后期，我国运载火箭的发展步入应用发展阶段：1984年4月，长征三号将中国第一颗通信卫星送入预定轨道；1990年4月，长征三号又将亚洲一号通信卫星送入太空，标志着我国运载火箭成功跻身国际商业发射服务市场；90年代末，我国的运载火箭已从初期的科学试验、单一型号、一

箭一星、简单轨道发展到以应用为目的，系列化火箭型谱，具备一箭多星发射能力，基本覆盖高、中、低不同轨道发射要求的航天运输系统；21世纪的头10年，在国家的高度重视下，中国航天迎来了前所未有的大发展，产业化、规模化逐步成为新时代中国航天的主题。

2011年，中国实现了19次航天发射，位居世界第二，但商业发射仅有3次，目前在国际商业发射服务市场中仅占3%~5%的份额，这主要是因为西方国家的制约，但也要客观地看到我国运载火箭发展中的技术瓶颈。经过对发射任务、市场、需求的分析发现，目前国际商业发射中欧美等航天巨头多采用上面级实施一箭多星发射，以此来降低发射成本，提高火箭任务适应性，从而满足用户多样的发射需求，提高

火箭竞争力。与之相比,我国运载火箭的上面级技术、多星发射技术尚不能适应国际市场需求,因此必须认真分析形势,制定发展策略,攻克技术难关,为打开国际市场,支持中国航天产业化、规模化发展奠定扎实的基础。

上面级是在基础级火箭或重复使用运载器上面增加的相对独立的一级或多级,其工作段通常已经进入地球轨道,可将一个或多个航天器直接送入预定工作轨道或预定空间位置,一般具有多次起动、短期在轨工作、自主飞行、多任务适应性等特点,是提高火箭性能和任务适应能力的有效途径。

## 二、国外发展现状

### 1、美国



图1 美国的典型上面级

美国早在上世纪50年代末就开始了上面级的研制,到70年代中期总共研制出了10多种上面级,包括固体上面级、液体上面级和固液混合上面级三类,用来发射中小型及中大型有效载荷,比较典型的有“阿金纳”和“半人马座”等;80年代以后,美国又研制出了多种新型上面级,如“轨道转移级/远地点机动级”(TOS/AMS)、“有效载荷助推舱”(PAM)、“惯性上面级”(IUS)、“先进上面级”(AUS)、“宽机身半人马座”等;近年来,考虑到未来高性能上面级的需求,先后提出了多种轨道转移飞行器,如改进型AMS、“高性能推进组件”(HPPM)、“太阳能轨道转移飞行器”(SOTV)、“机动和轨道转移飞行器”(MOTV)、“轨道机动飞行器”(OMV)和“轨道转移飞行器”(OTV)等等,不断丰富和完善上面级产品系列,其中OMV和OTV可以实现重复使用。美国在研制上面级的过程中,非常注重上面级的通用性,其研制的上面级大多数既可用于一次性运载火箭,又可用于航天飞机,并且新研制的上面级都强调自主式,有独立的制导、控制和导航系统以及电源、遥测、跟踪和指令系统。

### 2、俄罗斯

俄罗斯继承了前苏联在上面的研究,虽然一段时期内受国家经济形势影响,发展有所停滞,但依靠其雄厚的技术储备仍然发展了多款上面级产品,通过和质子号、联盟号、“第聂伯”等火箭组合使用,极大地提升了其火箭的任务适应性和竞争力,同时凭借固有的高可靠、低价格的竞争优势在国际商业发射服务市场中仍占有大约30%左右的份额。

前苏联/俄罗斯先后发展过质子号D级、和风M、KVRB、KVTK、弗雷盖特等上面级,其中以和风M、弗雷盖特和KVRB上面级最为

著名。

和风M上面级是赫鲁尼切夫国家科研生产航天中心设计的一种先进上面级，可以执行静止地轨道（GEO）发射任务，能够长时间在轨飞行，具有先进的姿态控制和热控系统，采用了模块化结构设计，外挂环形贮箱可以分离，可与安加拉火箭、质子号火箭配合使用。

和风M上面级高2.61m，最大直径4.1m，由中央舱（CPT）、环形外挂推进剂贮箱（APT）、下转接框三部分构成，加外挂贮箱后最多可携带19.8t燃料（ $\text{N}_2\text{O}_4/\text{UDMH}$ ）。其推进系统由1台泵压式主发动机、4台游机和12台姿态控制发动机组成，主机推力19.62kN，可摇摆，能够重复启动8次，并且带有备份点火系统，能够在主点火程序失败的情况下启动；制导控制系统包括箭载数字计算机、三轴陀螺稳定平台和导航系统，飞行期间既可使用GLONASS、也可使用GPS进行制导控制；温控系统主动与被动控制相结合，主动温控系统可使上面级组件保持在给定的温度范围内，并将多余的热量辐射至太空，被动温控系统利用调温涂层、恒温器、热阻和真空隔热屏使上面级和外部的热交换保持在确定的范围内。

2001年4月7日，质子M/和风M火箭成功执行了首次发射任务，这个组合是质子号火箭中运载能力最大的型号，主要用于国际商业发射服务。

弗雷盖特上面级是一种能够自主飞行的、灵

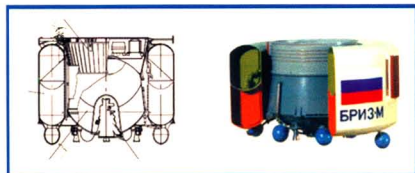


图2 和风上面级

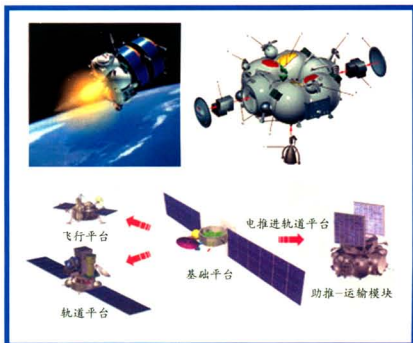


图3 弗雷盖特上面级

活的上面级，采用模块化结构设计，可与联盟号等运载火箭组合使用执行各种轨道发射任务。

弗雷盖特上面级高1.5m，直径3.35m，结构质量1180kg，可携带6300kg燃料（ $\text{N}_2\text{O}_4/\text{UDMH}$ ）。动力系统采用一台单燃烧室的S5.92发动机，设计可重复点火20次，目前已飞行验证了6次，工作时间900s。其摆动控制由两台电动液压作动器完成；控制系统具有三重冗余结构，可提供两种三轴稳定定向模式和旋转稳定模式，飞行控制由主发动机和姿控喷管控制俯仰和偏航姿态，姿控喷管使用12台以肼为燃料的50N小推力器，分成4组安装于球形贮箱的顶部。弗雷盖特上面级还可增加太阳能帆板以执行更长时间的空间探测任务。

KVRB上面级是一种高性能液氧/液氢上面级，与质子M、安加拉A5等运载火箭配合使用。与质子M运载火箭配合使用时，能大幅度地提升火箭的运载能力（地球同步转移轨道（GTO）的运载能力将达到6.6t，地球同步轨道（GSO）的运载能力将达到3.6t），与使用和风上面级相比，GSO与GTO的运载能力将增加20%。

俄罗斯上面级的研制应用使其质子号、联



盟号等火箭不但能满足俄罗斯联邦政府的发射任务需求,而且可以为商业用户提供强大的发射服务能力。

### 3、欧洲

目前国际商业发射服务市场中,欧洲的阿里安5火箭占有一半以上的份额,且绝大部分发射任务采用一箭双星发射方式。为提高阿里安5火箭的任务适应性,欧空局先后研制了可贮存液体上面级EPS以及低温上面级ESC-A和ESC-B。

EPS改进型在2001年投入使用,这种上面级在双星发射任务中可以把7.3t有效载荷送入GTO轨道,在单星发射任务中可以把8t有效载荷送入GTO轨道,并且可以把12t有效载荷送入太阳同步轨道(SSO)。

EPS位于芯级和仪器舱之间,为截锥形结构,包括主结构件、推进系统、热防护系统、电气系统等,最大直径5.4m,高3.355m,总质量8144kg,加注量7.2t。其主动力装置采用一甲基肼和四氧化二氮作推进剂,推进剂供给模式为挤压式,发动机额定推力27.5kN,具有

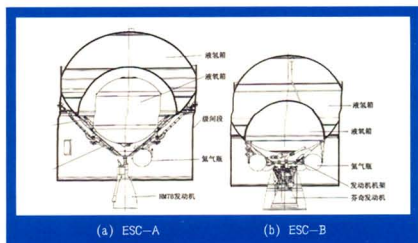


图5 ESC-A及ESC-B上面级

多次启动能力,可双向摆动 $\pm 8^\circ$ 。EPS采用多层热防护系统来保护上面级在飞行期间免受外部热载荷影响;姿控系统有两组肼推力器,每组3台,推力各为400N,安装在仪器舱中,在上面级工作期间提供滚动控制,发动机关机后提供三轴姿态控制并可使上面级在完成功能后脱离轨道。

EPS使发射准备活动具有高度的灵活性,加注好推进剂的上面级在放置45天后仍能用于发射任务。欧空局在研制EPS时,对其通用性也进行了考虑,尽可能采用通用部件和模块化设计,包括动力系统也具有通用性。

阿里安5火箭还研发了两种低温液体上面级,即ESC-A和ESC-B,均采用液氢/液氧推进剂,双星发射任务中可以把10t的有效载荷送入GTO轨道(采用Sylda多星分配系统),单星发射任务中可以把11~12t的有效载荷送入GTO轨道。ESC-A加注量约14t,最大直径5.4m,高4.71m,总质量17.9t,采用阿里安4的三级发动机HM-7B,平均推力6.5t,仅具备一次点火能力。ESC-A上面级于2005年首飞成功。ESC-B加注量为28.2t,最大直径5.4m,高5.62m,总质量32.1t,采用“芬奇”发动机,真空推力180kN,具有多次点火能力,与ESC-A上面级相比,可将GTO轨道运载

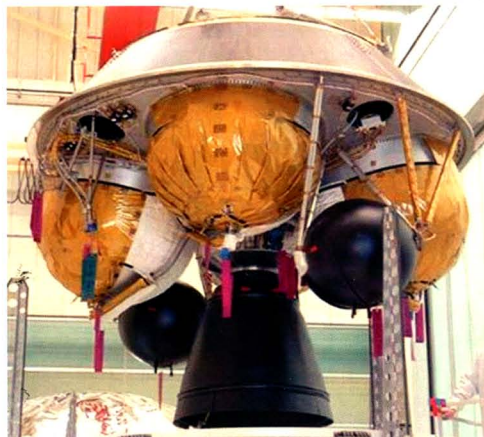


图4 EPS上面级



入了1.5亿欧元，主要用于研制新型的“芬奇”发动机和电气系统的升级换代，而我国在前期技术研发过程中受任务性质、基础条件等制约投入较少，技术储备不足，一些关键技术仍未突破。另外，我国的上面级研制、生产、试验条件还比较落后，特别是生产和试验条件受基础工业水平影响与欧美强国相比存在较大差距，在一定程度上制约了我国上面级技术的发展。

#### 四、启示和建议

从国外上面级的发展情况可看出上面级的发展具有如下趋势：

(1) 上面级技术具有适应性强、灵活多变等优势，特别是商业发射中具有较强的竞争力，因此上面级发展的种类较多，呈多样化发展趋势，以液体上面级为发展主流，特别是低温推进剂类型以其突出的性能优势成为上面级的未来发展方向。

(2) 各型上面级与特定的运载火箭组合，以完成不同的轨道发射任务。发展热点正从单纯轨道转移逐渐扩展到深空探测、在轨服务等领域。

(3) 目前以商业发射服务为目的的上面级技术主流发展趋势是大运载能力和多元任务适应能力。

通过对国外上面级技术发展现状进行分析，结合我国上面级技术发展的现状，面对日益激烈的国际竞争局面，对于我国上面级技术的未来发展提出如下几点建议：

##### 1. 紧跟需求、兼顾长远、奠定基础

现阶段应紧密依托我国的全球卫星导航定位系统、月球探测工程等国家重大空间工程开展上面级、轨道转移飞行器的工程研制，尽快突破关键技术，为今后参与国际商业发射竞争、在轨服务、深空探测等方面的应用奠定良

好的基础。

##### (2) 技术先行、继承创新、打造精品

正确处理技术继承与创新的关系，积极吸收和借鉴国外上面级技术发展的思路和技术途径，积极促进与美国、俄罗斯、欧洲以及日本在上面级技术上的合作，适当引进并消化相关关键技术。以多种任务需求为背景进行技术储备，在现有产品基础上实现技术跨越，打造具有国际竞争优势的产品。

##### (3) 构建体系、面向市场、寻求突破

逐步构建“上面级+运载火箭”的商业发射服务模式以适应多种任务需求。以市场为导向，通过产品化、通用化等手段，提高上面级的经济性和适应性，以扎实的技术、可靠的产品、一流的服务在国际竞争中寻求突破。

#### 五、结束语

据预测，今后10年全球发射卫星数量为1000颗左右，其中商用卫星将占70%。目前在美、欧、俄三方基本垄断商业发射服务市场的情况下，日本、印度等国家也在伺机抢占一定的市场份额。中国航天产业化、规模化的发展仅仅依靠国内的需求是不足的，必须积极参与到国际竞争中，开拓国际市场。目前，我国正在加快新型基础级火箭的研制，并将在2015年左右形成发射能力，这将为上面级技术发展、进军国际市场提供强有力的依托。总之，上面级在航天运输系统中具有极其重要的作用和特殊的地位，发展具备多次起动、长时间工作、自主飞行等技术特点的上面级可以极大地提升我国运载火箭的任务适应能力和国际竞争力。因此，需要加大先期投入，突破并掌握未来发展所需的核心技术，持续不断地推陈出新，研制出既能满足国家需求，又具有市场竞争力的上面级产品。 ■ 中国航天