

# 上面级发展现状及趋势分析

马 昆, 郭 武, 关 嵩, 马志滨, 李同玉

(中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076)

**摘要:** 上面级作为航天运输系统的重要组成部分, 越来越受到各航天大国的重视, 其发展的核心问题是提高运载火箭多任务适应能力, 解决多次启动、长期在轨、自主飞行等问题。通过对国内外上面级发展脉络进行分析, 研究其发展特点, 总结其发展趋势, 提出中国上面级发展的相关建议。

**关键词:** 上面级; 发展现状; 趋势分析

**中图分类号:** V475

**文献标识码:** A

## Development Status and Trend Analysis of Upper Stages

Ma Kun, Guo Wu, Guan Song, Ma Zhibin, Li Tongyu

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

**Abstract:** As an important part of aerospace transportation system, the upper stage has got more and more attention from aerospace powers. The core problems to develop upper stage are to improve the multitask adaptability of launch vehicle, and to realize multiple restart, long term on-orbit and self-determinative flight. The developmental history of domestic and foreign upper stages is analyzed, the developmental characteristics are investigated, and the development trend is summarized in the paper. Then advice of developing China's upper stage is put forward.

**Key Words:** Upper stage; Development; Trend analysis

## 0 引言

发展上面级是增强运载火箭适应能力, 满足不断发展的有效载荷对航天运输系统要求的有效途径, 是提高各国综合国力和国防实力、促进科技进步和经济发展的有力举措, 是充分利用空间环境资源、探索地外奥秘的技术基础。本文对上面级发展现状和技术特点进行分析, 以期找出一些趋势性、规律性的结果, 为中国上面级后续发展提供借鉴和参考。

## 1 上面级定义

上面级作为航天运输系统的重要组成部分, 由基础级运载器发射进入准地球轨道或地球轨道, 能够进一步将有效载荷从准地球轨道或地球轨道送入预定工作轨道或预定空间位置, 是具有自主独立性的飞行器, 能够完成轨道转移、空间部署等任务。

上面级一般具有以下技术特点:

a) 任务性质介于运载器与航天器之间, 兼具运载

器与航天器的技术特点;

b) 工作时间长于运载火箭的几十分钟, 可以达到数小时、数天乃至数十天 (但相对于航天器为短期), 经历与航天器相近的空间环境;

c) 以自主导航为主, 地面测控方式为辅;

d) 发动机可多次启动, 任务适应性强;

e) 相比航天器采用大推力发动机, 轨道机动能力强;

f) 强调使用灵活性和通用性, 一般具备独立的电气系统。

## 2 上面级发展现状

20 世纪 50 年代, 以美国和苏联为代表的世界航天强国开始了上面级的研究和发展, 先后研制出了数十种类型各异、功能多样的上面级, 以满足多种航天任务的需要。其中, 以美国阿金纳上面级、半人马座上面级、惯性上面级, 苏联质子号上面级、Fregat 上面

收稿日期: 2013-02-20; 修回日期: 2013-03-25

作者简介: 马 昆 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事宇航型号项目管理与市场开发

级、微风上面级、KVRB 上面级以及欧洲阿里安 5 上面级、织女火箭上面级为代表。

20 世纪 90 年代以来,中国先后成功研制了 FP、SM、SMA 固体上面级,并在多次飞行试验及发射服务任务中得到成功应用,奠定了上面级技术发展的基础。在国家某重大专项工程的需求牵引下,目前正在开展基于常规液体推进剂的远征系列上面级研制,计划“十二五”末首飞。

## 2.1 美国

### 2.1.1 阿金纳上面级

阿金纳上面级是美国研制的第 1 种具有三轴稳定、多次启动和轨道机动能力的上面级,同时也是发射世界上第 1 颗极地轨道卫星、首次完成一箭八星发射、首次执行载人交会对接任务的运载器。

阿金纳系列上面级自 1959 年 2 月首飞到 1987 年 2 月退役,先后形成了 A、B、C、D 等 4 种构型,与大力神、宇宙神、德尔它系列等多种运载火箭组合共发射 359 次,成功率 95.8%,是美国发射次数最多、服役时间最长的一种上面级。

### 2.1.2 半人马座上面级

半人马座上面级是在美国发展高轨预警、地球监测、通信和气象卫星的背景需求下,以液氢技术为主研制的一种低温上面级。

半人马座上面级于 20 世纪 60 年代初研制成功,是世界上第 1 种以液氧/液氢为推进剂的高能上面级,投入使用后先后形成了半人马座 D、D1-A、D1-T、G-1、II、IIA、III 和通用型等 8 种构型,至今,通用型半人马座还在服役。半人马座上面级与宇宙神、大力神等基础级火箭组合使用,广泛应用于各类航天器发射任务,大幅提高了美国空间运输能力,在美国空间计划中占有突出地位。

### 2.1.3 惯性上面级

惯性上面级(IUS)是 1976 年由美国空军委托波音公司研制的一种惯性制导三轴稳定固体上面级,主要用于航天飞机发射任务需求。

惯性上面级研制成功后,除了满足航天飞机发射需求外,还与大力神 3、大力神 4 基础级火箭组合使用,具备 2.268 t 地球同步轨道卫星和 1.5 t 空间探测器的运载能力,先后参与了跟踪和数据中继卫星、伽利略号探索木星计划、麦哲伦号研究金星计划、尤利西斯太阳极轨飞行等空间飞行任务。

## 2.2 苏联/俄罗斯

### 2.2.1 质子号上面级

质子号上面级最初是为探月火箭设计,之后主要

用于与质子号 K 火箭组合形成 4 级运载火箭。

质子号上面级的应用使苏联具备发射地球同步轨道有效载荷的能力。1967 年 3 月 10 日,质子号上面级首飞并成功将宇宙-146 号卫星送入近地轨道,此后陆续参与发射了月球号、火星号、金星号等探测器。质子号上面级先后形成了 D、D-1、D-2、DM、DM1、DM-2、DM-2M、DM2、DM3、DM4 和 DM-5 等 11 种构型,目前大部分型号已经退役,仅有少数还在服役,最具代表性的是 DM3 上面级。

### 2.2.2 Fregat 上面级

为进一步提高联盟号火箭的运载能力,苏联拉沃什金设计局研制了 Fregat 上面级。

Fregat 上面级采用模块化结构设计,具有自主飞行、灵活机动等特点。2000 年 2 月,Fregat 上面级成功首飞,其后与联盟号、天顶号等运载火箭多次组合使用,采用一箭一星、一箭双星、一箭多星等方式执行各种轨道飞行任务,是俄罗斯目前现役主力空间运输系统平台产品。

### 2.2.3 微风 M 上面级

微风 M 上面级是苏联赫鲁尼契夫国家航天研究与生产中心设计的一种先进的上面级,它由微风 K 上面级改进而来。

微风 M 上面级采用模块化结构设计,外挂环形贮箱可以分离,采用先进的姿态和热控技术,带有备份点火系统。2001 年 4 月 7 日,微风 M 上面级成功实现首飞,其主要与安加拉火箭和质子号火箭组合使用,主要执行对地静止轨道(GEO)发射任务。

### 2.2.4 KVRB 上面级

KVRB 上面级是赫鲁尼契夫国家航天研究与生产中心目前正在设计研制的一种高性能低温上面级,真空比冲达到 4 522 m/s(约 461.43 N·s)。KVRB 上面级主要与质子号 M、安加拉 A5 等运载火箭组合使用,可大幅提高基础级火箭运载能力。如与质子号 M 运载火箭组合发射,地球同步转移轨道运载能力达到 6.6 t,比使用微风 M 上面级的运载能力提高 20%。

## 2.3 欧洲

### 2.3.1 阿里安 5 常温上面级

阿里安 5 常温上面级是针对商业发射市场和近地轨道开发利用研制的一种上面级,采用挤压式发动机。

阿里安 5 常温上面级于 1996 年成功首飞,截至 2007 年 6 月,共进行了 31 次发射,主要用于中、高轨卫星发射任务,近地轨道发射哥伦布无人照料自由飞行平台,并计划为支援国际空间站定期发射欧空局的使神号航天飞机。

2.3.2 阿里安 5 低温上面级

在阿里安 5 运载火箭改进计划推动下，欧空局研制了新型阿里安 5 低温上面级，以进一步提高阿里安火箭地球同步转移轨道运载能力。

阿里安 5 低温上面级包括 ESC-A 和 ESC-B 两个型号，与阿里安 5 火箭组合使用，具备地球同步转移轨道单星 10.9 t(ESC-A)和 12 t(ESC-B)的运载能力。2005 年 2 月 12 日，ESC-A 型上面级首飞成功，截至 2007 年 6 月，共进行了 10 次发射。ESC-B 型上面级目前尚在研制中。

2.3.3 织女火箭上面级

2007 年，德国宇航局和 EADS 公司联合启动了维纳斯(Venus)项目，旨在为织女火箭研制一种新型可贮存推进剂上面级，提升织女火箭的运载能力，同时满足小型有效载荷更加便捷、廉价的发射需求。

织女火箭上面级主要用于有效载荷直接入轨、提高入轨精度、进行轨道机动和有效载荷分离等任务。2012 年 2 月 13 日，织女火箭上面级成功将 9 颗卫星送入预定轨道，首次发射取得圆满成功。

2.4 中国

2.4.1 固体上面级

20 世纪 90 年代，为完成铱星组网发射任务，中国

成功研制了首个固体 FP 上面级，并实现技术突破和应用发射。1997~1999 年，CZ-2C/FP 火箭成功完成 7 次发射，将 2 颗模拟星和 12 颗铱星送入预定轨道。

此后，基于中科院探测双星发射任务，又专门研制了固体自旋稳定 SM 上面级。2003 年和 2004 年，CZ-2C/SM 火箭成功完成 2 次发射，分别将中欧合作的空间探测赤道星和极地星送入预定轨道。

2006 年，基于中国环境卫星发射任务需求，在 FP 上面级基础上又新研了串联双星分配器 SMA 上面级。2008 年，CZ-2C/SMA 火箭完成首飞并成功将环境 A、B 双星送入预定轨道，2012 年又成功完成实践 9 号 A、B 双星发射任务。

2.4.2 远征上面级

为完成后续中圆轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星发射任务，2009 年，中国启动了基于常规推进剂的远征系列上面级研制，主要包括远征 1 号和远征 2 号两种构型。

远征系列上面级采用产品化设计，分别与 CZ-3A 系列和 CZ-5 火箭组合承担一箭一星、一箭双星和一箭四星直接入轨发射任务，在轨时间 6.5 h，具备 2 次启动能力，远征 1 号上面级计划 2015 年前首飞。

表 1 主要上面级性能参数及应用情况

| 国家/地区 | 型 号             | 组合火箭              | 推进剂            | 推力<br>kN     | 比冲<br>m·s <sup>-1</sup> | 启动<br>次数 | 设计<br>寿命    | 主要任务                  |
|-------|-----------------|-------------------|----------------|--------------|-------------------------|----------|-------------|-----------------------|
| 美国    | 阿金纳上面级          | 大力神、宇宙神、<br>德尔它系列 | 红烟硝酸/<br>偏二甲肼  | 71.1         | 2795                    | ≥3       | 不少于<br>20 天 | 多星发射、交会对接、深空探<br>测    |
|       | 半人马座<br>上面级     | 大力神、宇宙神           | 液氢/液氧          | 99.2         | 4418                    | ≥3       | 不少于<br>6 h  | 月球探测、深空探测、中高轨<br>直接入轨 |
|       | 惯性上面级           | 航天飞机、大力神          | 固体             | 78.1         | 2976.3                  | 1        | 150 s       | 深空探测、中高轨直接入轨          |
| 俄罗斯   | 质子号上面级          | 质子号               | 液氧/煤油          | 83.5         | 3449.6                  | 7        | 不少于<br>8 h  | 月球探测、深空探测             |
|       | Fregat 上面级      | 联盟号、天顶号           | 四氧化二氮/<br>偏二甲肼 | 19.85        | 3243.8                  | 20       | 不少于<br>48 h | 中高轨直接入轨、月球探测、<br>深空探测 |
|       | 微风上面级           | 质子号、安加拉           | 四氧化二氮/<br>偏二甲肼 | 19.62        | 3189.9                  | 8        | 不少于<br>24 h | 中高轨直接入轨               |
|       | KVRB 上面级        | 质子号、安加拉           | 液氢/液氧          | 102.9        | 4522                    | 5        | —           | 近地、中高轨直接入轨            |
| 欧洲    | 阿里安 5 常温上<br>面级 | 阿里安 5             | 四氧化二氮/<br>一甲基肼 | 30           | 3158                    | 5        | 不少于<br>6 h  | 月球探测、深空探测、中高轨<br>直接入轨 |
|       | 阿里安 5 低温上<br>面级 | 阿里安 5             | 液氢/液氧          | 64.8/<br>180 | 4369/<br>4560           | 2/5      | 不少于<br>6 h  | 月球探测、深空探测、中高轨<br>直接入轨 |
|       | 织女火箭<br>上面级     | 织女火箭              | 四氧化二氮/<br>偏二甲肼 | 2.45         | 3092                    | 5        | 667 s       | 多星直接入轨发射              |

续表 1

| 国家/地区 | 型 号             | 组合火箭       | 推进剂            | 推力<br>kN | 比冲<br>$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 启动<br>次数 | 设计<br>寿命 | 主要任务        |
|-------|-----------------|------------|----------------|----------|--------------------------------------|----------|----------|-------------|
| 中国    | FP/SM 固体<br>上面级 | CZ-2C 火箭   | 端羟基聚丁二<br>烯    | 100      | 2803                                 | 1        | 56 min   | 低轨直接入轨发射    |
|       | SMA 固体<br>上面级   | CZ-2C 火箭   | 端羟基聚丁二<br>烯    | 10       | 2814                                 | 1        | 56 min   | 低轨直接入轨发射    |
|       | 远征 1 号<br>上面级   | CZ-3A 系列火箭 | 四氧化二氮/<br>偏二甲肼 | 6.5      | 3092                                 | 2        | 6.5 h    | 中高轨多星直接入轨发射 |
|       | 远征 2 号<br>上面级   | CZ-5 火箭    | 四氧化二氮/<br>偏二甲肼 | 6.5      | 3092                                 | 2        | 6.5 h    | 中高轨多星直接入轨发射 |

3 上面级技术优势分析

上面级可大大提高基础级运载器的性能和任务适应能力，一般具有多次起动、长时间工作、自主飞行、多任务适应性、低成本等特点。其核心优势在于：

- a) 为进入空间提供了一种灵活的实施方案。  
与传统发射模式相比，采用“基础级火箭+上面级”的组合发射方式，一方面可以将有效载荷直接送入中、高轨工作轨道，简化航天器入轨程序，减轻地面测控压力；另一方面，可以一次发射多种有效载荷，实现快速轨道部署。
- b) 充分利用和拓展基础级火箭的运载能力。  
与传统发射模式相比，采用“基础级火箭+上面级”的组合发射方式可最大程度发挥基础级火箭的运载能力，在满足主发射任务的前提下，可充分利用富余能力实现其它有效载荷的组合发射，特别是对大、中型运载火箭优势明显。

- c) 提高发射效率，降低任务成本。  
与传统发射模式相比，采用“基础级火箭+上面级”的一箭多星发射方式，可以有效提高发射效率，减少发射组织次数，降低任务成本，满足日益增长的航天高密度发射需求。

- d) 为短期在轨应用提供了一种相对灵活和廉价的通用平台。

上面级具有短期在轨工作能力，可为有效载荷提供能源、控制、数据传输等基础服务。相对于航天器，成本较低，轨道机动能力强，可作为空间技术试验的通用平台，也可拓展在轨服务、空间攻防等远期任务。

4 国外上面级发展趋势分析

综合国外主流上面级产品和技术发展脉络，上面级发展趋势体现在以下 5 个方面：

- a) 不断提高发动机的性能及启动次数，推进新型

动力应用，以提升上面级的整体性能。  
以**阿金纳**上面级为例，先后形成了 A、B、D 和上升型 4 种构型。其中，**阿金纳 A** 是该系列的基本型；**阿金纳 B** 换用了贝尔公司 8096 型发动机，真空推力有所增加，并具备二次启动能力，工作时间增加 1 倍；**阿金纳 D** 进一步改进结构、减轻质量，并具备多次启动能力。随着航天技术的发展，采用新型动力以进一步提升性能已成为上面级发展的主要趋势。如美国正在研制中的太阳能轨道转移飞行器以太阳能热推进动力取代目前使用的化学燃料推进系统，而机动和轨道转移飞行器（MOTV）则采用混合动力技术。

- b) 由单一的型号产品向系列化发展，逐步构建多种类、多系列的上面级产品型谱。  
美国**半人马座**上面级投入使用后，广泛应用于**宇宙神**系列火箭，形成了 8 种型号。俄罗斯**质子号 D** 系列上面级技术上不断地改进，性能逐步提高，先后形成 11 种构型产品，目前少数型号还在使用，最具代表性的是 **DM3** 上面级。欧空局**阿里安 5** 上面级则先后发展了常规上面级、低温上面级 2 个系列、4 型产品，以满足不同任务需要。

- c) 上面级与基础级火箭从固定、单一的组合向灵活、多样的组合应用发展。  
一方面，上面级可以与不同的基础级火箭组合使用，形成不同的基础级运载火箭/上面级系列，如美国的**阿金纳**系列上面级可分别与**雷神**、**宇宙神**、**大力神**火箭组合，**半人马座**上面级可分别与不同模块的**宇宙神**、**大力神**、**德尔它**火箭组合，**Fregat** 上面级可与**联盟号**、**天顶号**火箭组合；另一方面，基础级火箭可以与不同的上面级进行组合，如**质子号 M** 火箭可以与**质子号 D** 系列上面级、**微风 M** 上面级组合，**安加拉**火箭可以与已得到飞行考验的**微风**系列上面级以及新研制的 **KVRB** 上面级组合使用。

d) 不断提高整体性能,成为覆盖整个近地空间和深空运输任务的基础平台。

以半人马座上面级为例,半人马座 D 上面级真空比冲为 4 354.2 m/s,随着关键技术的不断突破,性能得到不断的提升,目前通用半人马座上面级真空比冲已达 4 418 m/s,同时正在开展低温推进剂在轨蒸发量控制技术的研究,以期延长在轨工作时间。阿里安 5 火箭低温上面级 ESC-A 采用阿里安 4 的第 3 级发动机 HM-7B,平均推力为 6.5 t,可一次启动;ESC-B 采用芬奇发动机,真空推力为 18 t,具有多次点火能力。欧空局正在开展将改进后的 ESC-A 或 ESC-B 直接将有效载荷送入 GEO 轨道的方案研究,此时低温上面级具备大于 6 h 的在轨工作能力。

e) 作为可短期在轨的通用空间运输平台,不断拓展应用领域。

以 Fregat 上面级为例,既可与天顶号、联盟号等运载火箭组合使用执行各种轨道任务,也可经过同型串联组合使用以提升运载能力,还可以配置太阳能帆板以执行深空探测等更长时间的空间运输任务。转移轨道级(TOS)是轨道科学公司在 20 世纪 80 年代研制的一种可与航天飞机或大力神 3 火箭组合使用的固体上面级,用户既可以选用单个转移轨道级执行地球同步转移轨道或星际逃逸发射任务,也可以把转移轨道级和远地点机动级(AMS)组合使用承担地球同步轨道发射任务。

## 5 中国上面级发展及设想

中国的上面级研制起步较晚,目前已完成固体 FP、SM、SMA 上面级研制,并在多次飞行试验及发射服务任务中得到成功应用。通过上述上面级的成功研制和应用发射,中国对于航天运输器在空间环境、长时间在轨、热环境控制、空间粒子防护等方面开展关键技术攻关,积累了一定工程经验,为后续上面级技术发展奠定了基础。

中国的上面级均基于某一特定任务需求研制,工作时间较短、任务适应性和产品通用性较差,对基础级火箭运载能力的拓展有限,无法满足日益增长的发射任务需求。

纵观上面级技术发展历程及发展趋势,上面级技术的发展主要有 3 条主脉络:

a) 从任务特点来看,从早期的专用上面级逐步向通用上面级以及可短期在轨应用的多任务空间平台方向发展;

b) 从在轨时间来看,在轨时间越来越长,从早期

的数百秒发展到目前的数小时、数天,远期则要实现不小于 1 年的短期在轨;

c) 从动力系统来看,早期多采用固体发动机,后期逐渐开始采用可贮存液体动力及氢氧高能动力,远期则向电推进、核推进、离子推进、太阳帆推进等高能先进动力方向发展。

统筹考虑上述三条发展主脉络,中国的上面级技术可划分为以下 4 个发展阶段:

第 1 阶段:固体专用上面级,在轨时间不小于 1 h,包括 FP、SM、SMA 上面级,主要目标为完成具体工程任务,开启上面级技术发展的先河。

第 2 阶段:液体专用上面级,采用可贮存液体动力,在轨时间 10 天至 3 个月,在完成远征上面级研制首飞的基础上,重点围绕多次启动、长时间在轨进行适应性改进设计,主要目标为形成基础产品系列,奠定上面级技术发展的基础。

第 3 阶段:液体通用上面级,采用高能低温液氢液氧动力,在轨时间不小于 5 天,主要目标为进一步完善上面级产品型谱,大幅提升技术性能。

第 4 阶段:2020 年后,短期在轨应用的多任务空间平台,采用电推进、核推进、离子推进、太阳帆推进等高能先进动力,在轨时间不小于 1 年,主要目标为构建先进的空间运输系统多功能基础平台。

## 6 结束语

主要航天大国均在积极发展上面级技术,以满足日益增长的航天运输任务需求。上面级的发展具有多样性的特点,并呈现通用化、系列化的趋势。提高上面级的综合性能和任务适应性,发展可多次启动、长期在轨、可靠性高、环境友好的上面级,是满足不断发展的有效载荷对航天运输系统要求的有效途径,对于进入空间、利用空间和控制空间具有重大的战略意义。

### 参考文献

- [1] 《世界航天运载器大全》编委会. 世界航天运载器大全(第 2 版)[M]. 北京:宇航出版社,2007.
- [2] Kroncke G T. Benefits of a reusable upper stage orbital maneuvering vehicle[R]. AIAA 85-351, 1985.
- [3] Ravet L, Durand J. Ariane 5 launcher improvements[R]. IAF-00-V.1.01, 2000.
- [4] 李东. 长征火箭的现状与展望[J]. 科技导报, 2006,24(3): 59-60.
- [5] 果丽琳,等. 未来 30 年航天运载技术发展预测[J]. 航空制造技术, 2009: (18): 27-30.