

轨道转移推进系统及其发展趋势

李自然, 陈小前, 郑 伟, 周 进

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 根据轨道转移系统的应用分类(包括上面级类、空天飞机类、卫星类、飞船类和新概念类), 对各类型典型飞行器的推进系统进行了综合评述, 分别总结了相关的技术方案和应用特点, 并针对当前的研究热点, 简要论述了未来的发展趋势, 最后给出了几点结论。

关键词: 轨道转移系统; 推进技术; 发展趋势

中图分类号: V43

文献标识码: A

文章编号: (2005)05-0025-07

The orbit transfer propulsion systems and the trend of their development

Li Ziran, Chen Xiaoqian, Zheng Wei, Zhou Jin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to the classification of the orbit transfer systems including the upper stage class, the space plane class, the satellite class, the spaceship class and the new concept vehicle class, the characteristics of the typical types of the propulsion systems are presented. The technical schemes and the application traits are summarized respectively. The active research fields are pointed out and their future development trend is discussed. Some investigation conclusions are offered at the end of the paper.

Key words: orbit transfer systems; propulsion technology; development trend

1 引言

随着航天技术的发展和人类在空间活动的日益频繁, 出现了许多需要在不同轨道之间进行物

质和能量转移的任务, 各种轨道转移系统应运而生。

轨道机动能力、自主飞行控制能力、有效载荷承载能力、在轨驻留和相对位置保持能力等是轨道转移系统的核心能力, 而无论是进入空间轨

收稿日期: 2005-04-30; 修回日期: 2005-06-16。

作者简介: 李自然 (1977—), 男, 博士研究生, 研究领域为先进火箭推进技术与工程。

道、轨道间机动,还是航天器姿态调整、交会对接、轨道高度保持、编队飞行相对位置维持,都需要相应的推进系统保障。

迄今为止,人类在空间得到应用和在研的轨道转移系统共有上面级类、空天飞机类、卫星类、飞船类和其它新概念飞行器等五大类型,每一类型都有其特定的任务需求和功能界定,相应的推进系统也具有各自不同的性能和技术特点。根据这些推进系统担负的功能,可分为主推进系统和姿轨控系统;根据推进剂工质的类型,可分为固体、液体、气体和混合推进系统;根据推力产生方式,又可分为常规的化学推进系统,以及电、激光、核等非常规推进系统。

本文按照轨道转移系统的分类,分别介绍了各自有代表性的飞行器的推进系统,对其主要的性能特点和关键技术进行了分析,并讨论了未来的发展前景和趋势。

2 轨道转移推进系统设计方案

2.1 火箭上面级类

这类方案以运载火箭和航天飞机上面级、轨道转移飞行器(OTV)、轨道机动飞行器(OMV)、空间机动飞行器(SMV)等为代表。主要执行轨道运输、空间服务、空间作战等任务。

美国的PAM-D上面级,采用一个带有推进剂装载装置的单固体火箭发动机,推力为76kN; IUS上面级由一个第一级固体火箭发动机(推力184.9kN)、一个中间级、一个第二级固体火箭发动机(推力78.22kN)和一个设备支承段组成。第二级发动机采用延伸式喷管,延伸部分在发射过程中处在收起状态,待一级工作完毕并分离后伸出;半人马座上面级采用液氢/液氧燃料的RL10A-3-B发动机,总推力为133kN,真空比冲为4312N·s/kg,装在宇宙神3B和宇宙神5运载火箭上的加长半人马座上面级使用一台或两台RL10A-4-2发动机,单机推力为99.2kN,比冲为4419.9N·s/kg,此外还装有几台小型推力器,作为反推控制系统(RCS)的一部分,用于控制火箭的飞行方向;TOS上面级采用一个与IUS第一级发

万方数据

动机基本相同的固体火箭发动机;能再次起动的双组元推进剂上面级——阿金纳B和D都采用了1台RL10B-2液氢/液氧发动机,该发动机是具有36年飞行历史的RL10发动机的改进型。为提高可靠性、降低重量和成本,RL10B-2发动机采用了机电式作动器。

欧洲的阿里安5火箭的上面级采用可贮存液体推进系统,此推进系统主要是由四个推进剂贮箱和一台可多次点火工作的发动机组成。推进剂为四氧化二氮和一甲基肼,推力为27.3kN。姿控发动机采用肼推进剂,真空推力为2.4kN。

俄罗斯的微风M上面级采用1台R2000型发动机,最大真空推力可达22kN。

目前美国大多数化学轨道转移飞行器(COTV)方案采用液氢/液氧推进剂,但也有少数方案采用可贮存推进剂或其它复合推进剂(例如肼类和四氧化二氮),典型的推进剂质量比为0.87~0.89。

美国研究的OMV上装有三套推力器,即主推进、主要的反作用控制系统和冷气反作用控制系统。主推进系统用于轨道机动飞行,携带3175公斤的双组元可贮存推进剂(一甲基肼和四氧化二氮);主要的肼反作用控制系统用于姿态控制和有效载荷要求的低加速轨道转移;在敏感的有效载荷附近和交会对接时则可采用冷氮气推力器进行低污染的推进。

美国SMV采用的是高性能过氧化氢/JP-5发动机,其技术验证机X-40和X-37采用的则是相对低性能的成熟的AR2-3过氧化氢/JP-10发动机。该类型推进系统包括便于储存的无毒推进剂、使用90%~98%过氧化氢的反应控制推进器和过氧化氢RCS推进器,是一种先进的低成本可重复使用火箭发动机技术。通过采用先进浇注方法、制作工艺和燃烧室材料,该推进系统显著地超越了现有的技术水平。

2.2 空天飞机类

这类轨道转移系统主要以各种可重复使用天地往返运输飞行器为代表,包括现役的航天飞机,已经下马的NASP空天飞机、X-33“冒险星”以及各国众多的空天飞机方案,具有强大的任务执

行能力,其推进系统的典型特征是发动机可重复使用,推力可控制,能在空中多次启动等。

航天飞机轨道器主发动机为可重复使用高性能分级燃烧循环液氢/液氧发动机(SSME),两次大修之间可重复使用55次(或累积工作7.5小时)。在外贮箱丢弃后,两个轨道机动系统(OMS)取代主发动机,提供入轨、变轨、轨道转移、交会及离轨所需的推力。该系统使用10.8t一甲基肼和四氧化二氮自燃化合物,每台发动机产生27kN的推力,可重复使用100次,寿命10年,最长累积工作时间为15小时。分装在发动机舱内和前部鼻锥处的反推控制系统用于空间及再入过程中的姿态控制,并可用于交会对接,提供入轨、在轨和再入过程中轴向变速及姿控所需的推力。系统包括38台双组元主推力器和6台游机推力器。这些推力器共使用3.3t的四氧化二氮和一甲基肼,并可从OMS中提取所需的推进剂。

在美国国家空天飞机计划(NASP)、X-33“冒险星”、跨大气层飞行器(TAV)等计划中采用了新构思的吸气式发动机——超音速冲压喷射发动机技术,提出并研究了塞式喷管技术、发动机/机身一体化设计技术等先进设计。虽然NASP等计划最终因为种种原因而中断执行,但这些未来构建空天一体化飞行器所需的关键技术已获得广泛而深入的研究。

德国Sänger II空天飞机第一级采用吸气式液氢涡轮冲压发动机,第二级采用液氢/液氧发动机,有两种状态:一种是载人的三角型飞机HORUS级;另一种是运货的一次性使用的火箭CARGUS级。HORUS级采用的是一种高压补燃氢氧火箭发动机,CARGUS级则由阿里安5的主级演变而来。

印度Avatar空天飞机采用一项独特的、能自行生产氧化剂的技术。其主要特点是起飞时不带液氧,火箭飞行需要的21t液氧将在起飞后在大气层巡航一小时过程中制造出来。Avatar在大气层以8倍音速飞行,先吸进空气,然后把氧气分离出来并将其液化储存。飞行过程中,先使用涡扇冲压式组合发动机(TBCC),发动机达到10km的巡航高度,然后由低温火箭发动机接替推进。

2.3 卫星类

这一类飞行器以各种应用卫星技术为基础,通过携带必要的推进剂,增加卫星的空间机动能力。可对自主交会对接、伴飞/绕飞、空间机器人操作等关键技术进行演示验证,进一步可应用于在轨服务、空间信息监测和执行反卫星等任务。

Astro是美国“轨道快车”计划的追踪星,其推进系统携带72kg肼单元推进剂,其中37kg作为燃料输送给目标星(NextSat),采用电推进方式来改变轨道。

美国试验航天器系统中的XSS-10卫星推进系统由双组元单体推进剂模块、压力舱模块、转移推进器和姿态控制推进器组成。根据推进器的作用又分为两部分:一部分为4个轨道转移推进器,采用双组元推进剂(四氧化二氮和一甲基肼),分别以90度相隔安装在星体四周;另一部为8个姿态控制推进器,采用加压氮气,分别控制三轴姿态。

日本的工程试验卫星ETS-7由追踪星和目标星两部分组成,都使用喷气RCS作为控制系统的执行机构。整个交会对接过程速度增量小于170m/s,燃料消耗约150~160kg。

卫星类的轨道转移系统还包括以美国的KH-12和俄罗斯“琥珀”返回型卫星为代表的大机动侦察卫星,其推进系统类似于飞船类,其中有的机动卫星可通过在轨加注燃料的方式延长任务寿命,提升轨道转移能力。

此外,作为未来的反卫星手段之一,美国和俄罗斯/前苏联都发展了空间反卫星武器,其中部分需要在执行攻击任务时通过轨道转移的方式接近目标星,以美国的“智能卵石”与俄罗斯的“天雷”系统为代表。这类系统由于任务比较单一,事先在目标周围潜伏,攻击时需要的能量较小,因此推进系统一般较为简单,多采用固体推进剂。

2.4 飞船类

这类飞行器主要执行轨道飞行器、空间站和地面之间的人员和物资的运输任务,轨道机动能力和驻轨能力较大,不从地面发射入轨,也无需满足可重复使用条件。

代表飞行器除各国的宇宙飞船外,还包括乘

员返回飞行器(CRV)、乘员运输飞行器(CTV)、自动转移飞行器(ATV)和H-II火箭运输飞行器(HTV)等。另外,俄罗斯提出的具轨道转移能力的空间战斗站和多功能平台也是在成熟的飞船和空间站技术上发展来的。

在各国载人或运货飞船系统中,用于轨道转移的主推进系统大多可重复启动,同时还装有数台姿控发动机。例如俄罗斯的联盟TMA,用于轨道转移和变轨机动的主发动机系统位于飞船后端的非密封段,其喷口位于服务舱底部中央。该发动机推进剂采用二氧化氮/偏二甲肼,推进剂总装载量约900kg,平均推力为3920N。在飞船内还安装有备份的双燃烧室发动机,喷口分别位于主发动机的两侧。数台采用过氧化氢燃料的小型姿控控制发动机分布于服务舱的四周。

美国CRV的推进系统将不使用任何有毒化学品,以保障飞行器乘员的安全,其姿控系统使用氮气作为单元推进剂。

欧洲ATV的推进系统使用四氧化二氮和偏二甲肼作为燃料。在整个任务阶段,总共有24个推力器用于提供推力和力矩。其中4个490N的推力器用于飞行器的转移机动、对接和离轨等操作,每个发动机的比冲大于3041.1N·s/kg;12个220N的推力器用于姿控和精确机动;另外8个220N的推力器安装在货舱上,用于离轨和再入期间的简单和快速横向移动。再助推分系统使用混合的氧化氮及一甲基肼。

欧洲的空间拖船采用氙离子推进系统,以稳定慢速接近服务卫星。该发动机所需空间较小,利用太阳能面板提供的能量使氙气体放电,然后通过喷管喷出离化的粒子以产生推力。

2.5 新概念类

这类飞行器的轨道转移主推进系统采用非常规推进模式,包括空间系绳、太空电梯、核动力火箭、太阳能推进飞行器、反物质推进飞行器、激光束能推进飞行器等多种类型,具有区别于传统飞行器的不规则外形,普遍具有较高的性能和效费比,由于存在一定的技术难度和工业制造瓶颈,在空间得到广泛应用尚需时日,但无疑是空间轨道转移推进系统的重要发展方向。

万方数据

在美国和俄罗斯/前苏联均得到广泛研究的空间系绳是由高强度挠性元件组成的细长绳索,不使用推进剂,它是一种新型空间结构。其中动量交换系绳通过从飞行器上释放系绳,或者通过沿着系绳运动的升降机和一端连有系绳的传动杆,实现在空间轨道附近的小范围机动;电动系绳则通过自身在地磁场中高速运动切割地磁力线,收集等离子层中的电子,形成闭环电路,产生洛伦兹磁力,用于航天器的空间推进。

关于核动力火箭,一种方案是利用核反应堆加热水,使之变成蒸汽,然后高速喷射,形成反作用力推进。但该方案需要自带大量工质,同时从水到蒸汽的转换过程浪费热量较多,并且由于不能对放射区进行分隔,从核发动机中喷射出来的蒸汽必然是高放射性的,从而对空间环境造成污染。

另一种方案采用氢气作为核动力火箭的加热工质,由于目前超小型核反应堆技术已经趋于成熟,且简单到只有一个质子的氢核不容易产生感生放射,可采用较薄的屏蔽层,同时目前正在研制的超音速冲压喷气发动机也为加热的氢气高速喷出提供了一个很好的借鉴,因此这种方案可能是目前技术条件下最好的核动力火箭推进方案。

此外,采用磁约束达到高温的“托卡马克”装置近来也取得了较大的进展。虽然该装置较庞大,而且需要超导磁体来产生强磁场,但如果考虑用于未来几千吨级或更加庞大的星际飞船,也未尝不可。相较于激光核聚变反应堆中,燃料烧完后必须停止工作才能重新装填而言,该装置最大的好处是易于长时间高负荷连续工作。

2.6 小结

表1列出了上述主要轨道转移推进系统的设计方案。

通过该表可以看出各国根据自身的科研实际,在推进方案的选择上有所侧重,其中美国型号最多,研究领域最广,且因为有航天飞机的研制和运营经验,结合其第二代、第三代可重复使用运载器(RLV)计划,在新型的可重复使用轨道转移发动机的研究方面形成了一枝独秀的局面。俄罗斯、欧洲、日本等国家和地区,则根据

自身的现实需求和科研特点，对轨道转移推进系统开展了有选择性的研究。

表 1 各国主要轨道转移推进系统设计方案
Tab.1 Orbit transfer propulsion systems of different countries

飞行器		国别	主推进系统	姿轨控系统
上面级类	COTV	美国	液氢/液氧或可贮推进剂发动机	
	OMV	美国	一甲基肼/四氧化二氮双组元发动机	肼反作用控制系统和冷氮气推力器
	SMV	美国	过氧化氢/JP-5 发动机	过氧化氢 RCS 推进器
	先进上面级	美、俄、欧	大多采用液氢/液氧或一甲基肼/四氧化二氮发动机	
空天飞机类	航天飞机	美国	可重复使用高性能分级燃烧循环液氢/液氧发动机（SSME）	一甲基肼和四氧化二氮双组元主推力器
	NASP	美国	超音速吸气式冲压发动机	
	Sänger II	德国	第一级：吸气式液氢 TBCC； 第二级：高压补燃氢氧火箭发动机	
	Avatar	印度	空中制氧式 TBCC	
卫星类	轨道快车	美国	肼单组元发动机	电推进系统
	XSS-10	美国	一甲基肼/四氧化二氮双组元发动机	加压氮气推进器
	ETS-7	日本		喷气反作用控制系统
	反卫星小卫星	美国 俄罗斯	固体发动机	
飞船类	联盟 TMA	俄罗斯	偏二甲肼/四氧化二氮发动机	过氧化氢小型发动机
	CRV	美国	无毒主发动机系统	加压氮气推进器
	ATV	欧洲	偏二甲肼/四氧化二氮发动机	一甲基肼/氧化氮混合物发动机
	空间拖船	欧洲	氙离子推进系统	
新概念类	空间系绳	美国 俄罗斯	绳索结构推进或者电动系绳推进系统	
	核动力火箭	美国	核裂变加热水蒸气或氢气发动机	

3 轨道转移推进系统的研究热点和趋势分析

现有轨道转移系统的主发动机较多地采用了有毒的可贮存自燃推进剂，由此导致了环境污染和人员危害问题，增加了研制和运行成本。因此，目前今后的轨道转移推进系统趋于采用无毒可存贮推进剂或非常规能源系统。其中无毒可存贮推进剂发动机系统的主要研究内容包括：过氧化氢/

煤油发动机、液氧/煤油（酒精）发动机、无毒单组元推进系统、推进系统先进控制和燃料供给技术、变推力液体火箭发动机、数值模拟技术（CFD）、地面试验及测量技术、飞行试验和演示验证技术等。

同时，与其它航天器的增压输送系统相比，轨道转移系统需要具有大范围的机动能力，相应的增压输送系统等推进剂辅助系统需要进一步降低系统结构质量，对推进剂的管理和温度控制也

提出了全新的要求。主要研究内容包括:超临界氮增压技术研究、大容积复合材料低温气瓶研究、新型低温阀技术研究、轻质材料管路系统研究、推进剂在轨管理与排放技术等。

在国外已有或在研的轨道转移飞行器中,亦有选择电推进、核推进、太阳能推进、空间系绳等推进方案的。在这些新型推进系统中,技术相对成熟、现阶段大力发展的主要是各种类型的电推进技术,如霍尔效应推力器、脉冲等离子体推力器和离子推力器等,这些电推进系统能够更有效地使用燃料,延长飞行器的在轨寿命。目前,相对成熟且性能适宜的汞或氙离子推进将是美国电轨道转移飞行器(EOTV)的首选,而使用氢的电弧加热等离子推力器则是EOTV的另一种选择。考虑到电推进系统推力较小等局限性,发展的近期目标是电推进辅助化学推进的轨道转移飞行器系列。此外,太阳能推进和核动力火箭技术也是大有潜力的发展方向。但是,由于这些新概念推进系统或者技术上还不够成熟,或者适用范围有限,或者在应用上尚存在一定的障碍,作为轨道转移平台的主推进系统近期内得到广泛应用的可能性不大。新概念轨道转移推进系统的主要研究内容包括:推进方案选择研究、能量转化技术、推进工质配置与优化、推力产生机理研究、点火与电离电路设计、推力测量与实验技术、推进器结构参数配置技术、羽流与尾焰诊断与分析技术等。

另外,各国为降低发射使用成本,更加重视可重复使用发动机的研制。新一代重复使用低温推进剂发动机的关键技术包括:高度补偿喷管技术(如直排塞式喷管)、全流量分级燃烧循环技术(采用气相燃烧和全部驱动涡轮)、重复启动变推力技术、低温复合贮箱技术、高压推力室热结构和发汗冷却技术、涡轮泵长寿命高可靠性轴承和密封技术,以及耐高温、抗氧化、高比强轻质结构材料(如高温复合材料、陶瓷等)技术等。在这方面,美国近期的研发目标是以火箭发动机为基础的火箭-冲压喷气组合循环发动机(RBCC)或采用效能更高的超燃冲压发动机,这类推进系统所包括的关键技术涉及进气道、燃烧控制等新技术。俄罗斯则在“鹰”计划支持下,对未来轨道转

万方数据

移推进系统开展了深入研究,包括三组元发动机、液体空气循环发动机、液体空气冲压发动机、吸气式涡喷发动机以及组合推进系统。除此之外,印度吸气式空天飞机 Avatar 采用的空中制氧技术,也是一种独特的推进剂利用方案。

最后,某些用于完善基本发动机的功能,提高发动机适用性的技术领域也需要进一步开展广泛而深入的研究,例如健康管理系统、具有自动防止故障特性的冗余组件、模块化发动机设计和免维修的发动机等。

4 结束语

外层空间作为人类发展的新领地,必将不断地彰显其在国民经济、国家安全、社会生活和科研探索等领域的重要性。在空间进行的各项活动都需要进出轨道和轨道间转移技术的保障,且随着人类开发空间的力度逐渐加大,对轨道转移能力的需求也会更加强烈。针对这种需求,各航天大国均投入大量的人力物力开展了对轨道转移系统的研究。作为这类飞行器的核心保障和关键技术领域,推进技术是在研究过程中所必须面对的主要攻关方向。

纵览国外轨道转移推进系统的研究进程和技术方案,可以得出以下的启示:

(1) 轨道转移系统是一体化的空间系统中的重要一环,推进系统是保障其实施轨道进入和空间机动的核心保障,涉及发动机结构和材料、推进剂选择和利用方案、推力产生和作用机理、推进产物分析与诊断等关键技术。

(2) 各国的轨道转移系统主要包括空天飞机类、飞船类、上面级类、卫星类和新概念类,根据各国的工业基础,重点考虑推进系统的继承性和研究开发能力,有选择性的重点发展较易实现的飞行器。

(3) 轨道转移推进系统的主要任务包括轨道进入、空间机动和姿态轨道控制等,分别需要不同性能指标的发动机系统。

(4) 根据所执行的任务,通过控制推进剂质量的装填和流量,灵活配置轨道转移推进系统的机动能力;轨道转移和机动能力的提升可通过采用高比冲发动机、减小飞行器质量和增加推进剂质

量来实现。

(5) 推进系统目前可选择化学推进、冷气推进和离子推进系统,其中主推进系统大多选用氮氧化合物和肼类推进剂,今后重点发展无毒推进剂;冷气推进主要采用氮气,用作反作用控制系统;离子推进系统主要用作飞行器的近程导引和小范围轨道机动。

(6) 针对目前常规推进系统的不足,空间系绳、核动力火箭、太阳能帆船、激光束能和反物质推进等新概念推进模式也获得了航天大国的关注和重视,并作为技术储备开展了深入的研究,其中,部分设计方案有望在近期进行空间飞行试验或投入实际运作。

参考文献:

- [1] 王向阳. 美国上面级的研制概况[J]. 中国航天, 1993, (2).
- [2] 林来兴. XSS-10 和 XSS-11 技术和空间飞行演示[J]. 863 航天航空技术, 2004, (5).
- [3] Amadiou P, Heloret J Y. The automated transfer vehicle[J]. ESA Bulletin 96, 1998, (11).
- [4] Charles R Gunn. United states orbital transfer vehicle programs[J]. Acta Astronautica, 1991, (25).
- [5] Ramon Chase, Ming Tang. The quest for single stage earth-to-orbit:TAV, NASP, DC-X and X-33 accomplishments, deficiencies, and why they did not fly[R]. AIAA2002-5143.
- [6] 褚桂柏主编. 航天技术概论 [M]. 北京: 宇航出版社, 2002.
- [7] 徐福祥主编. 卫星工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2002.
- [8] 李晓航编著. 星际快帆[M]. 北京: 解放军出版社, 2004.
- [9] Schierman J D, Hull J R, Ward D G. Adaptive guidance with trajectory reshaping for reusable launch vehicles[R]. AIAA2002-4458.
- [10] 殷兴良, 申世光. 构造快速进入空间和应用空间的能力[J]. 中国航天, 2002, (2).
- [11] 刘红军. 新概念推进技术及其应用前景[J]. 火箭推进, 2004, 30(4).
- [12] 罗建军, 周文勇, 袁建平. 通用空天飞行器军事应用与关键技术分析[J]. 863 航天航空技术, 2004, (10).
- [13] 吴汉基, 将远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势[J]. 推进技术, 2003, (5).
- [14] 陈茂良, 徐捷. “轨道快车”计划及其启示[J]. 国际太空, 2002, (10).
- [15] Harry Karasopoulos, Richard T Cervisi, John Anttonen, John T Fuller. Space maneuver vehicle development by the mini-spaceplane technology program[R]. AIAA98-4149.
- [16] Crocker A M, Olds J R, Charania A C. An introduction to the ROSETTA modeling process for advanced space transportation technology investment[R]. AIAA 2001-4625.

(编辑: 陈红霞)