

空间推进技术

周 伟 等◎编著



西北工业大学出版社

KONGJIAN TUIJIN JISHU

空间推进技术

周 伟 王学仁 李红霞 编著
李 剑 祈 鹏 杨月诚

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是关于空间飞行器推进技术及其应用的一部论著。全书共分为6章,从运载器推进技术以及姿轨控推进技术两方面对空间推进技术进行了分类,并对空间推进技术的具体应用进行了阐述。书中重点介绍了各种空间飞行器推进系统的基本组成、工作原理以及主要特点,同时对近年来推进技术的发展进行了描述。

本书可作为高等院校航空宇航推进理论与工程、兵器发射理论与技术专业以及其他相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

空间推进技术/周伟等编著. —西安:西北工业大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5612-4577-7

I. ①空… II. ①周* III. ①航天书—推进系统—研究 IV. ①V43

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第1892号



出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:兴平市博闻印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:13.875

字数:335千字

版次:2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

定价:39.00元

前 言

空间在科技进步、经济发展和国家安全等方面的战略作用变得越来越重要,已成为推动科技进步和发展国民经济的重要源泉,同时也成为维护国家安全的战略制高点。近年来,空间技术得到蓬勃发展,世界各国已经相继发射各种用途的航天器,包括人造卫星、空间探测器、航天飞机、各种空间站以及空天飞机等。“航天发展,动力先行”,航天器能否有效地进入和利用宇宙空间,在很大程度上取决于空间飞行器上动力装置所取得的成就。推进系统是航天器主要分系统之一,其性能好坏直接影响航天器的控制精度、寿命与可靠性。因此,世界航天大国都致力于发展质量轻、体积小、成本低、性能高和寿命长的航天器推进系统,从而推动了空间推进技术的进一步发展。

本书根据军事航天技术和航天器的发展,结合第二炮兵工程大学教学需求,在整理国内外先进航天器应用资料的基础上,全面系统论述空间推进理论与技术。全书共分6章,第1章简要叙述空间的定义、范畴及重要性,人类探索空间的历程,航天器系统组成和空间推进技术与分类;第2章重点介绍反作用推进技术基本原理和推力、总冲、比冲等推进系统主要性能参数;第3~5章从结构组成、工作原理、性能特点和应用发展等方面分别介绍典型空间推进系统关键技术:运载器推进技术、姿轨控推进技术、新概念推进技术;第6章重点介绍空间推进系统在卫星、空间站、航天飞机和空天飞机、宇宙飞船、深空探测器和空间攻防器上的应用情况。

全书由周伟和王学仁负责统稿,其中第1章由周伟编写,第2章由杨月诚编写,第3章由李钊编写,第4章由王学仁编写,第5章由祈鹏编写,第6章由李红霞编写,全书的审阅和整理工作由王学仁完成。本书的编写受到了第二炮兵工程大学杨月诚教授的悉心指导,并得到了西北工业大学毛根旺教授的热情支持和帮助,在此表示深深的谢意。另外,笔者还参阅了国内外许多同行专家、学者在空间火箭发动机研究领域的理论和试验研究文献及著作,在此谨向各位专家、学者表示衷心感谢。

在阅读本书之前,笔者认为读者已掌握了飞行器系统工程专业的有关知识,在叙述和推导中作了很多简化,需要时还需查阅有关专业书籍的内容。

鉴于学识水平有限,书中存在不妥之处,恳请读者不吝指正。

编 者

2014年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 空间的定义与范畴	1
1.2 空间的战略地位与作用	2
1.3 人类开展的主要空间探索历程	3
1.4 航天器技术	4
1.5 空间推进技术与分类	5
第 2 章 反作用推进技术基本原理	16
2.1 反作用推进原理	16
2.2 推进系统主要性能参数	16
2.3 理想飞行速度	20
2.4 反作用推进分类	23
第 3 章 运载器推进技术	25
3.1 液体火箭推进技术	27
3.2 固体火箭推进技术	34
3.3 固液混合火箭推进技术	38
3.4 冲压式反作用推进技术	39
第 4 章 姿轨控推进技术	44
4.1 概述	44
4.2 冷气姿轨控推进技术	45
4.3 液体姿轨控推进技术	51
4.4 固体推进技术	63
4.5 膏体(凝胶)推进技术	74
4.6 电推进技术	79
第 5 章 新概念推进技术	121
5.1 激光推进技术	121
5.2 核推进技术	132

5.3 太阳能推进技术	143
第6章 空间推进系统的应用	150
6.1 卫星	150
6.2 空间站	169
6.3 航天飞机和空天飞机	177
6.4 宇宙飞船	187
6.5 深空探测飞行器	195
参考文献	211

第1章 绪 论

我仰望星空,它是那样辽阔而深邃;
那无穷的真理,让我苦苦地求索追随。
我仰望星空,它是那样庄严而圣洁;
那凛然的正义,让我充满热爱、感到敬畏。
我仰望星空,它是那样自由而宁静;
那博大的胸怀,让我的心灵栖息依偎。
我仰望星空,它是那样壮丽而光辉;
那永恒的炽热,让我心中燃起希望的烈焰、响起春雷。

——温家宝《仰望星空》

1.1 空间的定义与范畴

自古以来,人类对神秘的天空充满着好奇,唐朝著名诗人韩愈在《南山诗》中提到:“天空浮脩眉,浓绿画新就”。古人更是对在其中运行的星星、太阳、月亮怀着许多好奇与想象,并赋予了流传亘古的神话。天空里到底有些什么呢?从20世纪50年代末期开始,随着航天技术的出现与发展,人们对着天空有了更为深刻的了解,逐渐地由认知走向了开发与利用。

“空间”一词与“时间”相对,原意是指四方上下,表现为长度、宽度、高度,用距离来衡量。在本书讨论的内容中特指地球大气层及其他天体之外的虚空区域。空间具有疆域广阔、位置高远、环境特殊、资源宝贵等特点,对解决人类社会面临的资源与环境问题,对科学探索以及国家新兴技术与产业的发展都具有十分重要的作用。

我们通常把日月星辰罗列的广大空间分为两个部分,也就是将地球大气层以外的空间称为“天”,将地球大气层以内的空间称为“空”。“天”和“空”本没有明确的界线,因为大气随着海拔增加而逐渐变薄。为了更好地认识和研究它们,国际航空联合会(FAA)定义将距地表100 km的高度设为卡门线,卡门线以下定义为“空”的范畴,以上则定义为“天”的范畴,从而明确了现行大气层和空间的界线。

“天”具体定义为地表上100 km以上空间,100 km是人造卫星、航天器等可以运行的最低高度,近些年来我国的一系列载人航天也是要把人送入这个高度以上的空间才算成功进入空间。“天”所涵盖的内容很广,环境特点也差别很大,通常距离地面100~65 000 km(约为10个地球半径)的地球外围空间,称为近地空间,是人类探索活动最为频繁的领域之一。此外的空间称为“深层空间”,简称“深空”(见图1-1)。

类似地,“空”的定义是指离地面有一定高度,但不高于100 km的范围,这也是一个国家领空的最高限度,具有很重要的军事与经济价值。0~20 km高度的空间是一般航空器活动的范围,称为通用航空空间;20~100 km高度的空间,由于空气密度很小,空间环境与通用航空

空间有截然不同的区别,因此单独划定此区域为临近空间。

著名科学家钱学森先生根据空间的不同特点,对人类空间活动给予了科学准确的定义。钱学森指出在距地面 100 km 以下,用人造的专门用于飞行的装置,由人发起、有人参与或由人控制的飞行活动应统称为“航空”活动;在距地面 100 km 以上,向外延伸至太阳系边缘,用人造的专门用于飞行或航行的装置,由人发起、有人参与或由人控制的飞行或航行活动,统称为“航天”活动;在太阳系以外,用人造的专门用于飞行或航行的装置,由人发起、有人参与或由人控制的飞行或航行活动,统称为“航宇”活动。当前人类正在加快“航天”步伐,向更遥远更深邃的空间开展“航宇”活动。

1.2 空间的战略地位与作用

随着航天技术在政治、经济、军事、文化等领域的广泛应用及国家对于空间的依赖性不断增强,空间在经济发展、国家安全和科技进步等方面发挥着日益重要的战略作用,已经成为发展国民经济与推动科技进步的重要源泉,同时也成了维护国家安全的战略制高点。进入信息时代,各类空间系统是国家政治、经济、科技和社会发展关键的信息基础设施,空间成为人类活动的重要领域,对繁荣国家经济、促进社会进步、提高国家竞争力具有其他领域难以比拟的优势和重要意义。

空间之所以具有十分重要的战略地位是因为其资源的唯一、有限与不可替代性。这里空间资源通常包括高远的位置资源、空间微重力环境资源、超高度真空、强宇宙粒子、辐射等。根据航天器空间运行的特点规律来看,每一个航天器都需要占据一定的位置(轨道)空间,而通常这些资源是有限甚至是唯一的,因此争夺关键轨道资源已经成为各国首要考虑的空间探索和开发问题。此外,利用空间微重力环境资源、超高度真空、强宇宙粒子、辐射等独特环境对开展科学研究、材料制备、生物培育都有很高的实用价值和意义。

使国家的战略空间范围延伸到外层空间,可形成天地一体化的、全球性的、多维的战略空间。外层空间作为新的战略空间,不专属于任何国家,每一个国家都有自由进入的权利。拥有强大空间力量的国家不仅能够大大拓展本国的战略空间,而且可利用其所具有的空间优势,取得在国际政治、经济、科技、军事以及外交斗争中的主动权,随着信息化建设步伐的加快,空间安全已逐渐发展成为国家安全的基石,面对新世纪国家安全出现的新情况、新特点,空间也将成为支撑未来战争的战略制高点。谁控制了太空,谁就拥有了制空权、制地权、制海权。

与宇宙空间相比较,地球只不过是沧海一粟。宇宙空间蕴含的资源品种和数量之多,远远

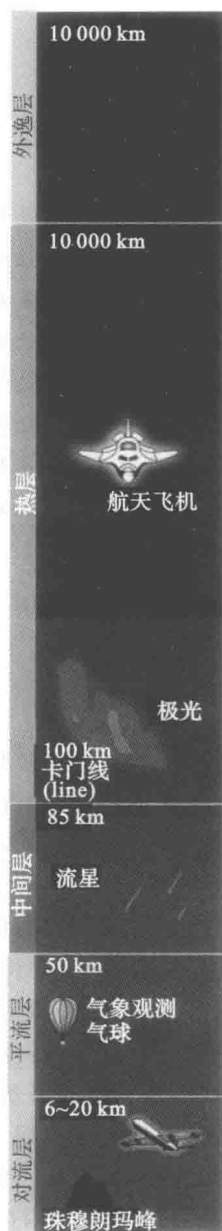


图 1-1

超过地球,人们渴望获得的许多宝贵资源,有望在宇宙空间得到满足。

为争夺新的战略空间,许多发展中国家,尽管经济、技术基础并不雄厚,但也在积极谋划本国的空间力量发展。美俄对空间的垄断已被打破,多极化格局正在形成,空间安全形势日趋复杂。空间技术和信息技术的发展及其在战争中的运用已经或正在改变着现代战争的形态。现代战争已经成为陆、海、空、天、电一体化战争。战场空间从陆地、海洋、空中延伸到了外层空间。在现代战争中,夺取制天权已经成为夺取制信息权,从而争得战争主动权的关键。航天装备作为现代战争的空间信息平台,具有实时精确的导航定位、高分辨率的遥感图像、高精度的天气数据、及时的导弹预警和可靠的大容量通信等能力,极大地增加了现代战场的“透明度”、拓宽了战场信息的“通道”,大大提高了战场指挥控制和综合作战的能力,使现代战争成为真正意义上的一体化战争。随着时间的推移,以空间为主要战场,以空间力量为主要作战力量,以攻击卫星、拦截弹道导弹为主要作战样式的空间作战,将在不久的将来出现。发展空间力量将成为提高国家防御能力,打赢未来高技术战争,保卫国家安全的重大战略举措。

1.3 人类开展的主要空间探索历程

自人类文明发展以来,开展的主要空间探索活动大致可以分为四个大的阶段。

第一阶段,古代萌芽期。翻看人类历史,都能清楚地显示出在古代人们对于他们头顶神秘天空的向往和猜测,古人甚至认为生命也是“上天”赐予的,因此人类对空间的认识是从纯粹的精神图腾开始的。通过对太阳、月亮、星图、气象等自然现象的观察,人类总结出了历时、天象、时辰等空间一般规律,并有意识地加以利用,创造了绚烂辉煌的古代文明。此后,人类又在实践中开展了大量的探索活动,如通过模仿禽类的某些特征,向往飞上天空,中国的风筝就是其典型代表,并一直流传至今。

第二阶段,初步的探索时期。初步探索时期从万户和哥白尼时代开始至19世纪末。14世纪末我国的万户进行了飞行试验,迈出了人类飞离地球的第一步。16世纪,波兰天文学家哥白尼在《论天球的运转》的著作中提出“日心说”,首次挑战传统,为人类较为准确地描绘了宇宙空间的图景;意大利科学家伽利略对重心、速度、加速度等运动概念进行了详尽研究,为航天动力学奠定了坚实的基础。19世纪,德国天文学家开普勒发现的行星运动三大定律,揭示了天体运行的自然规律。英国科学家牛顿提出了著名的“万有引力定律”,解决了天体运动的动力学问题。至此,经典力学和早期天体理论为开展宇宙航天奠定了坚实的基础。

第三阶段,现代航天理论形成和现代航天飞行初创时期。现代航天理论的形成始于20世纪初。俄罗斯航天先驱齐奥尔科夫斯基于1903年发表的论文提出了著名的齐奥尔科夫斯基公式,随后又相继发表了两篇重要论文,奠定了火箭和液体火箭发动机的理论基础。他提出了用火箭自带氧化剂和燃烧剂作为飞行动力并采用多级火箭环游宇宙的计划 and 梦想。

第四阶段,人类航天活动现代化时期。这一阶段主要指1957年至今人类航天活动的发展历程。1957年10月4日,苏联利用弹道导弹改装而成的运载火箭,成功发射了人类首颗人造地球卫星,开辟了人类探索外层空间活动的新时代。半个世纪以来,人类航天活动可谓由近至远、从无人飞行到载人飞行,取得了突飞猛进的发展。1961年4月2日,苏联航天员加加林完成了人类有史以来的首次太空飞行,人类实现了载人航天的历史性突破。1969—1972年,美

国的6批12名航天员登上了月球,创造了人类踏上地外天体的记录;他们在月球的不同区域累计停留305小时,取回了381.7 kg月球样品。

至今,全球已有400多位航天员进行了太空飞行,其中在太空一次生活最长时间达438天,累计时间最长的达748天。人类建造了可部分重复使用的航天飞机,至今航天飞机进行了117次发射,成为20世纪人类科技进步的象征。

截至目前,全球已研制80多种航天运载器,形成了30多个系列,可将航天器送往太空,巨型运载火箭可以将100多吨的航天器送入近地轨道;不仅可以从地面发射场进行航天发射,而且还能够从海上平台、空中飞机上发射不同的卫星;先后建造了礼炮号、和平号等多个空间站。目前由16个国家联合建造的大型国际空间站已经完成了多个舱段对接,国际空间站总质量达450 t,主结构长110 m、宽88 m,由36个舱段和构建组成,将用于开展各种空间试验。20世纪90年代发射的哈勃望远镜延伸了人类的“视线”,让人类看到了200多万光年以外的深空。

迄今,人类已经完成了120次成功或基本成功的深空探测活动,发射的探测器拜访了太阳系的7颗行星、太阳、彗星和小行星,实现了在火星、金星、土卫六等天体上的软着陆,2005年成功执行了撞击彗星的任务。目前人类制造的航天器已经飞到了太阳系的边缘。至今,各国发射了大约6000个航天器,包括通信、遥感、导航、科学实验等不同用途、运行在不同轨道的卫星,以及各种深空探测器。目前有800多颗卫星正在轨运行。人造卫星已经发展成为集成各种高、精、尖新技术的先进、复杂的卫星系统或卫星星座。

1.4 航天器技术

为了和平利用和发展空间,提升空间快速响应能力,确立国家安全战略的制高点,航天器技术的发展与应用是必不可少的。人类自古就有飞天的梦想,明朝的万户就曾制作了一种欲借助火箭一飞冲天的器械,只可惜囿于当时的自然科学水平而灾难性地失败了。第二次世界大战结束后随着火箭技术的发展,人类获得了挣脱地球引力的手段,从而让向太空发射人造机器成为可能。

航天器,又称空间飞行器、太空载具等,是指在地球大气层以外的宇宙空间中,基本按照天体力学的规律运动的各种飞行器。航天器与自然天体的不同之处在于其可以受控改变其运行轨道或进行回收。常见的航天器,如图1-2所示,包括人造卫星、空间探测器、航天飞机、各种空间站以及空天飞机等。无论是哪种航天器,推进系统在其中都占据着十分重要的地位和作用。以卫星为例,它主要包括有效载荷和公用平台两大部分。有效载荷是航天器完成特定航天飞行任务的一个最重要的分系统(可能含有多种仪器设备),卫星的特征和尺寸主要根据有效载荷的要求确定。

通常现代航天器平台主要包括七个分系统:①制导、导航与控制分系统(GNC),用于将航天器稳定在太空,并按照任务要求控制航天器的机动;②通信分系统,是卫星与地球或卫星与其他航天器之间联络的接口,正常工作时,通信分系统以特定的频率同时收发射频信号;③指令和数据处理分系统,用来接收航天器指令,并将其译码、处理和分配,它还采集航天器上测量仪器的遥测数据,将其格式化、存储并发送;④电源分系统(EPS),给航天器提供电能,并对其进行储存、分配和控制;⑤热控分系统(一般占干重的3%~4%,成本亦如此),目标是在任务

的各个阶段将航天器的所有部件都保持在它们需要的温度范围之内；⑥结构和机构分系统，为航天器的所有其他分系统提供机械支撑，把航天器安装到运载工具上，并为启动火工装置分离动作创造条件；⑦推进分系统，主要功能是为航天器的轨道机动和姿态变化提供所需要的力和力矩。其主要作用包括：将有效载荷从近地轨道送到高轨道或星际交会轨道，如轨道转移(OT)、离轨处理(EOL)、重新定位等；为航天器提供轨道调整和姿态控制的力和力矩，如阻力补偿、轨道调整、修正、姿态控制(俯仰、偏航和滚动)等；为航天器的交会对接提供推力；为航天员的舱外活动提供推力。

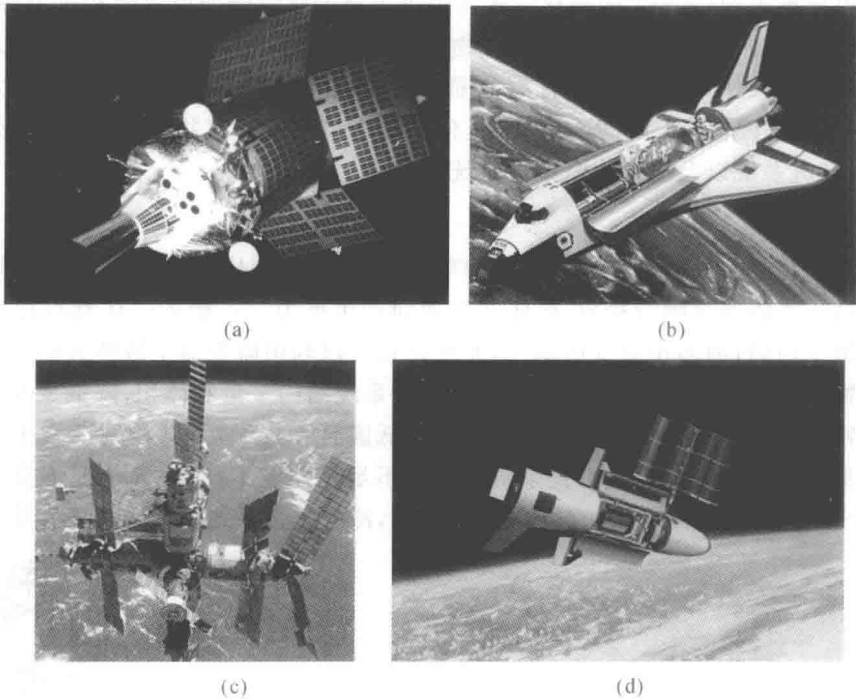


图 1-2 不同种类的航天器

(a) 侦察卫星； (b) 航天飞机； (c) 空间站； (d) 空天飞机

“航天发展，动力先行”，推进分系统是航天器公用平台中一个非常重要的组成部分。它无论是在体积和重量上，还是在成本方面均占公用平台的很大一部分。为了实现航天器需求的重量轻、体积小、成本低、性能高和寿命长的特点，必需研制相应的先进推进系统。

1.5 空间推进技术与分类

空间推进系统从广义上分主动控制式(大部分)和被动控制式(极少数)两大类。目前接触到的和航天器上应用的基本上都属于主动控制式推进系统；被动控制式推进系统靠重力或引力推进，现在深空探测任务中广泛应用。

主动控制式推进系统按照推进方式的不同可分为化学推进、电推进和新概念推进三种，统称为运载器推进技术。前两种已得到广泛的研究、应用与发展，其理论和技术都已成熟；新概

念推进在国际上还处于探索研究阶段,要达到实际应用还有相当长一段路要走。

1.5.1 化学推进系统

化学推进和电推进都属于喷气式推进系统范畴,都是利用发动机(推力器)中高温高压工质的高速喷出产生的动量变化而形成推力,但工作原理和主要特点有很大区别。

化学推进的能源系统与推进剂供给系统是完全一体的,它是利用固体或液体氧化剂和燃料的燃烧或单质推进剂(如肼)的催化分解将推进工质的化学能变成内能和压力势能,然后释放产生推力。化学推进排放的羽流是各种物质分子的混合物,属中性气体,与航天器相容性好。化学推进的最大特点是推力大,推力范围宽,可靠性高,特别适合于总冲要求大和快速机动的场合。按常温下推进工质的物理状态,化学推进可分为冷气推进系统、液体火箭推进系统、固体火箭推进系统以及混合火箭推进系统四种。

1. 冷气推进系统

冷气推进系统是空间姿控推力器中最简单、最古老的典型代表,如图 1-3 所示,它是利用储气瓶中的高压气体通过喷管释放、膨胀并加速而产生推力。一般的气体都可以作为冷气推进系统的推进工质,目前多用氮气或氦气,尤其是它可以利用航天器上液体火箭发动机的挤压气体或废弃物作为推进剂,这样可以大大减小推进系统结构重量和体积,降低成本。这种推进系统最大的特点是结构极其简单、性能可靠、成本低廉且无毒无污染,特别适合于航天器姿态控制和航天员的舱外活动。冷气推进系统最大的不足是性能不高,一般情况下真空比冲只有 50~70 s,若采用氢气作工质,比冲可达 200 s 左右,冷气推进系统具体内容将在第 4 章讲述。

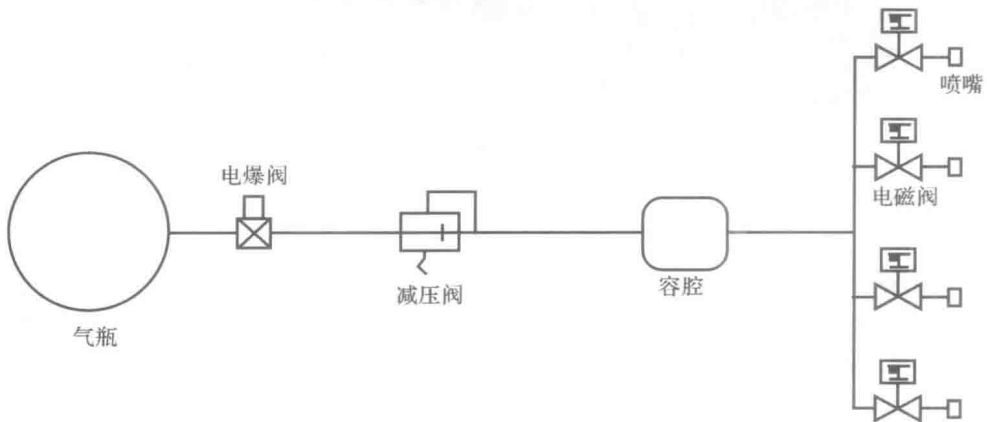


图 1-3 冷气推进系统示意图

2. 液体火箭推进系统

液体火箭推进系统也称液体推进剂火箭发动机系统,是使用液态化学物质(液体推进剂)作为能源和工质的化学火箭发动机。液体火箭发动机由推力室(由喷注器、燃烧室和喷管组成)、推进剂供应系统、推进剂贮箱和各种调节器等部分组成。

大多数液体火箭发动机使用的是双组元推进剂(即氧化剂组元和燃烧剂组元,它们分别贮存在各自的贮箱中)。这种发动机工作时,供应系统将两组元分别经各自的输送管道输送到发

动机头部,由喷注器喷入燃烧室中燃烧,生成高压和高温的燃烧气体。燃气经喷管膨胀加速后以高速排出,产生推动导弹或飞行器的推力。

推进剂供应系统是在要求的压力下,以规定的混合比和流量,将贮箱中的推进剂组元输送到推力室中的系统。推进剂供应系统包括输送系统和压力调节装置。根据输送系统完成推进剂输送方式的不同,液体火箭发动机又可分为挤压式液体火箭发动机和泵压式液体火箭发动机。图 1-4 和图 1-5 所示分别为典型的挤压式液体火箭发动机和泵压式液体火箭发动机的系统简图。

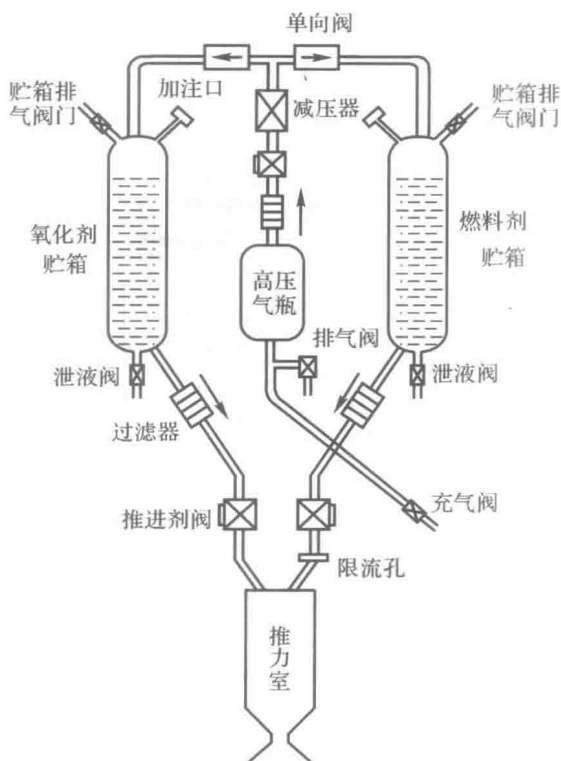


图 1-4 挤压式液体火箭发动机系统简图

在挤压式供应系统中,高压气体经减压后进入到氧化剂贮箱和燃料贮箱中,将氧化剂和燃料挤压到推力室中。挤压式火箭发动机通常应用于小推力发动机,即航天器、卫星的姿态控制、小规模空间机动、轨道修正、轨道保持等。

大推力发动机一般采用泵压式火箭发动机,这类发动机依靠涡轮泵给推进剂增压达到输送推进剂的目的,主要应用于运载火箭、大型导弹的主发动机,为飞行器提供较大的速度增量,产生飞行所必需的推力。

除了按供应系统的类型对液体火箭发动机分类外,还有其他多种分类方式。如按使用的推进剂组元数目不同可分为单组元液体火箭发动机、双组元液体火箭发动机和三组元液体火箭发动机;按使用的推进剂类型不同可分为可贮存推进剂液体火箭发动机、自燃和非自燃推进剂液体火箭发动机、低温推进剂液体火箭发动机;按完成任务形式可分为芯级液体火箭发动机、助推级液体火箭发动机、上面级液体火箭发动机和空间用液体火箭发动机;按推力大小可

分为大推力液体火箭发动机和小推力火箭发动机；按发动机的功能不同可分为用于发射有效载荷并使有效载荷的速度显著增加的主推进液体火箭发动机和用于轨道修正和姿态控制的辅助推进液体火箭发动机。

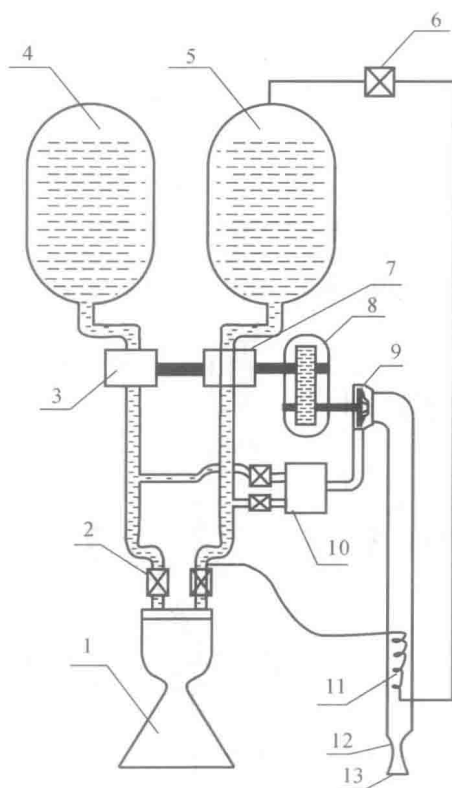


图 1-5 泵压式液体火箭发动机系统简图

1—推力室； 2—阀门； 3—燃料泵； 4—燃料贮箱； 5—氧化剂贮箱； 6—贮箱加压阀门； 7—氧化剂泵；
8—齿轮箱； 9—涡轮； 10—燃气发生器； 11—热交换器； 12—排气管道； 13—涡轮排气喷管

液体火箭发动机是液体弹道导弹、运载火箭及航天器的主要动力装置，是这些飞行器不可缺少的主要组成部分。世界各国的第一代战略导弹武器中都广泛采用了液体火箭发动机。由于其性能高、推力大、适应性强、技术成熟、工作可靠，故近代大型运载火箭、航天飞机等都以液体火箭发动机作为主要的动力装置。

3. 固体火箭推进系统

固体火箭推进系统也称固体推进剂火箭发动机系统，主要由燃烧室壳体、固体推进剂装药、喷管和点火装置等几部分组成。在固体火箭发动机中，燃烧用的推进剂经压伸或浇注制成所需形状的装药，直接装于燃烧室或发动机壳体内。它含有完全燃烧所需要的所有化学元素，通常是在药柱的暴露表面上按预定的速率缓慢平稳地燃烧。因为不具有像液体火箭发动机那样的输送系统或活门，所以固体推进剂火箭发动机结构通常比较简单(见图 1-6)。液体和固体推进剂以及使用它们的推进系统将分章讨论。

与液体火箭发动机相比，固体火箭发动机的突出特点是结构形状简单，所需的零部件少，

且一般没有运动件。上述特点使得固体火箭发动机具有可靠性高、维护和操作使用简便的特点。

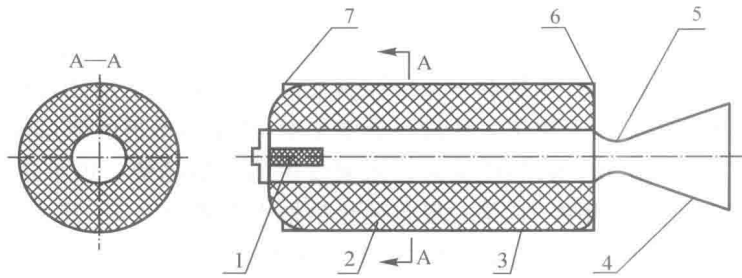


图 1-6 固体火箭发动机简图

1—点火器； 2—固体装药； 3—燃烧室壳体； 4—喷管； 5—喉衬； 6—后连接裙； 7—前连接裙

固体火箭发动机广泛应用于各类导弹，特别适用于各类导弹向小型、机动、隐蔽的方向发展，提高生存能力，因此在各类战术、战略导弹的动力装置中固体化的趋势已十分明显。固体火箭发动机还广泛应用于各种航天器和运载工具上。它可用作大型运载火箭的助推发动机，航天器的近地点、远地点加速发动机，变轨发动机和返回航天器的制动发动机。

4. 混合火箭发动机推进系统

混合火箭发动机是混合推进剂火箭发动机的简称，它使用的推进剂有固体和液体两种，一般把燃烧剂为固体、氧化剂为液体的称之为正混合，反之为逆混合。图 1-7 所示是一种典型的正混合固液火箭发动机简图。发动机启动时，高压气瓶中的高压气体通过减压器降低至所需的压强进入氧化剂贮箱；受挤压的液体氧化剂经阀门进入燃烧室，而后由燃烧室头部的喷注器喷入到燃烧剂药柱的内孔通道中。药柱点燃后，内孔药柱表面生成的可燃气与通道内的液体氧化剂射流互相混合并燃烧，产生的燃气从喷管排出，产生推力。

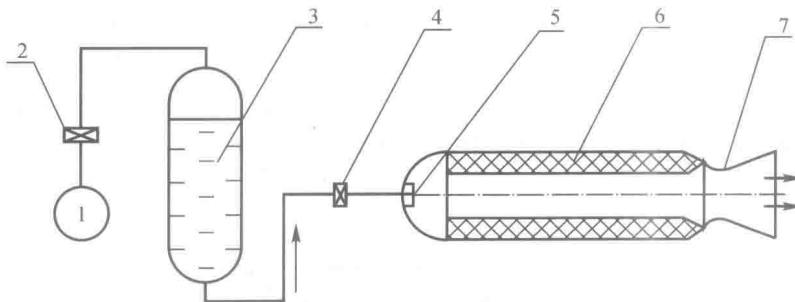


图 1-7 混合火箭发动机简图

1—高压气瓶； 2—减压器； 3—液体氧化剂； 4—阀门； 5—喷注器； 6—固体燃烧剂； 7—喷管

目前混合火箭发动机多数为正混合发动机，因为这种组合的推进剂可以提高推进剂的平均密度比冲。此外，燃料的体积通常都小于氧化剂的体积，所以正混合具有燃烧室尺寸小的优点。另一个重要原因是固体氧化剂都是粉末，要制成一定形状并具有一定机械强度的药柱比较困难。固体燃烧剂一般都选用贫氧推进剂而避免使用纯燃烧剂，这样有利于工艺成型以及点火和燃烧。

1.5.2 电推进系统

人类航天活动的一次次成功,极大地推动了化学推进技术研究与应用的大发展,但人们对其比冲低的不满也与日俱增,特别是对于深空探测来说,目前化学推进几百秒的比冲很难使航天器到达目标,更不用说采样返回了。从世界范围来看,纯化学推进的能量发挥已接近其理论极限,要再提高比冲非常困难,所以,电推进是未来发展的必然趋势。电推进利用电能加速工质形成高速射流而产生反作用推力,是一般传统化学推进方式的 1.5~25 倍。

电推进的最大特点是小推力和高比冲。受电功率限制,推进工质的流量不能太大,故推力一般很小,因而特别适用于失重情况下空间推进中要求控制精度高的情形。由于不断有外界电能供给,电推进比冲很高,比冲一般在 600~5 000 s 之间,所以完成同一飞行任务所需要的推进工质较少,这样便可大大增加有效载荷,或显著降低发射成本,或明显延长使用寿命。但并非比冲越高越好,在功率一定的条件下,比冲越高,推力越小,完成同一飞行任务的时间也就越长。因此在电推进设计中要综合考虑比冲、推力、功率、体积和重量等因素。能否得益和得益多少,需通过在轨运行计算确定。

按电能加热和加速推进工质的原理分类,电推力器可分为电热式、静电式和电磁式。电热式推进器是利用电能将气体加热使其膨胀做功产生推力,典型代表有电阻加热喷气推力器和电弧喷射推力器;静电式推进器是在静电力作用下将由推进剂电离得到的离子加速喷出,并中和外部的电子源,典型代表有离子发动机(ION);电磁式推进器是将推进剂电离,产生的离子在正交电磁场的作用下加速喷出,从而产生轴向推力,典型代表有霍尔效应推力器(HALL)、脉冲等离子体推力器(PPT)和磁等离子体发动机(MPD)。

1. 电阻加热喷气推力器

电阻加热喷气推力器使用电阻加热器将推力室中的液体加热、使之变为气体,再经过常规的喷管将气体喷出产生推力,如图 1-8 所示,采用的推进剂有肼、氨。电阻加热喷气推力器所能达到的比冲一般为 300~350 s,推力可达 500 mN。这种推力器最先用于 Intelsat-5 同步轨道卫星的南北位置保持。苏联的“流星 3”“资源”和 GOMS 等系列卫星的轨道修正也使用电阻加热发动机,而在铱星系统中有 66 个肼电阻加热喷气推力器用于轨道提升,基本上达到规模化生产水平。

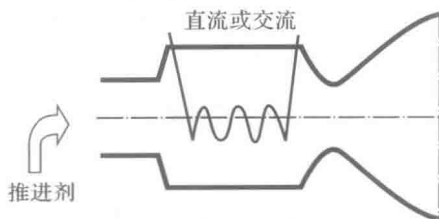


图 1-8 电阻加热式喷气推力器原理图

2. 电弧喷射推力器

电弧喷射推力器如图 1-9 所示,通过两电极间的电弧放电将电能转变成热能。工作流体

(如 NH_3 、 H_2 及肼)通过电弧被加热,温度上升到 $6\,000\sim 20\,000\text{ K}$ 。随后,高温气体经喷管膨胀加速以很高的速度($7\,600\sim 2\times 10^4\text{ m/s}$)排出。电弧喷射推力器比冲可以达到 $400\sim 1\,200\text{ s}$ 。这种推力器于 1993 年首次成功地在 Telestar - 4 卫星上作南北位置保持。Echostar、Asiasat - 2 和铱星等卫星也使用这种发动机。

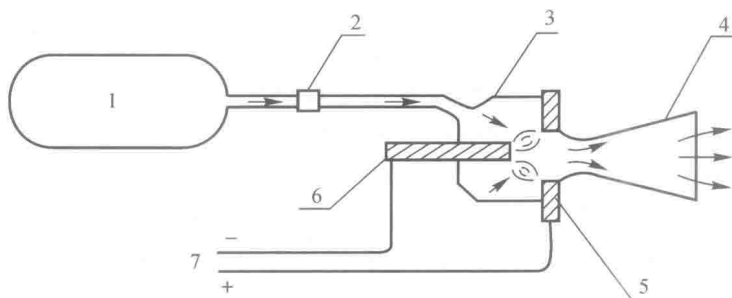


图 1-9 电弧喷射推力器示意图

1—工质； 2—泵； 3—两电极间的环形电弧； 4—喷管； 5—环形正极； 6—负极； 7—由电源来的低电压大电流电能

3. 离子发动机

离子发动机是在宇航中应用得最广的一种电推进装置,如图 1-10 所示。在离子发动机中,由阴极发射的电子撞击氙原子使之电离,在电离室通过偏转的略微扩张的磁场,使电离效率得以提高。然后,氙离子在静电场作用下被加速到非常高的速度($3\times 10^4\sim 10^5\text{ m/s}$),随后经中和成中性粒子后排出。离子发动机的比冲可达到 $2\,500\sim 5\,000\text{ s}$,为深空任务的最佳选择,在静止轨道卫星的南北位置保持、远地点到静止轨道转移方面也很有竞争力。目前,离子发动机已在日本的 ETS-6 和 COMETS 卫星上进行了飞行试验,并在休斯公司的 PAS-5 和 Galaxy8-1 卫星上投入使用。特别是在 1998 年末,离子发动机首次作为主推进器在“深空 1 号”探测器上使用。该离子发动机能够产生 0.09 N 的推力,比冲 $3\,300\text{ s}$,每天消耗 100 g 的氙推进剂,发动机总的工作时间超过了 $14\,000\text{ h}$ 。可见离子发动机虽然推力小,但能通过长时间的积累达到更高的总冲量,并最终达到更高的速度。

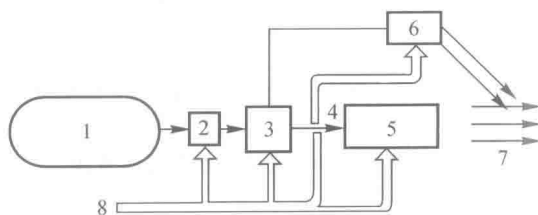


图 1-10 离子火箭发动机示意图

1—工质； 2—输送系统； 3—电离装置； 4—离子； 5—静电加速器； 6—电子发射器； 7—中性离子； 8—电能

4. 霍尔推进器

霍尔推进器又称为稳态等离子霍尔式推进器(Stationary Plasma Thruster, SPT),具有高可靠性、长寿命、高效率、喷流速度大等优点,是目前最先进和有效的电推进装置之一。霍尔推进器的功率范围在 $50\text{ W}\sim 50\text{ kW}$,推力范围在 $5\sim 1\,500\text{ mN}$,比冲可达到 $500\sim 1\,800\text{ s}$ 。

霍尔推进器是利用放电过程将推进剂(通常为氙气)电离生成等离子体,并利用外加电场