

丛书序



航天科技与工程是我国科技强国征程的一颗耀眼明珠。导航卫星、载人飞船、空间站、探月工程、火星探测等重大任务顺利实施,体现了航天强国建设的巨大成就!

航天技术是一个国家综合实力的重要体现。西方发达国家对中国在航天技术领域实行了严厉的封锁政策。航天发展,动力先行。动力系统一直承载着人类进入太空、探索宇宙的梦想,被称为人类空间探索事业发展的基石。航天技术的日趋成熟,在很大程度上取决于动力技术的发展。事实证明,航天发动机技术领域要不断取得突破,跻身世界先进行列,必须依靠自主创新,掌握核心技术,实现自主可控。

航天发动机技术,作为人类探索宇宙奥秘、开拓太空领域的基石,其研制历程充满困难与挑战,是一部孕育智慧与勇气的史诗。在液体火箭发动机的轰鸣声中,运载火箭一次次成功将卫星、空间站等载荷送入太空;固体火箭发动机的迅猛发展,让导弹与小型运载火箭的发射更加便捷高效;空间电推进技术的悄然兴起,为航天器的长期驻留与深空探测铺设了高效节能的航道;而组合动力技术的创新探索,更是开启了航天动力及航天运输多元化发展的新纪元。

液体火箭发动机以其高能量密度、推力可调及可重复使用等优势,始终是航天发射领域的核心动力。从早期的有毒、小推力发动机到如今的绿色、大推力、高性能型号,科研人员不断突破技术瓶颈,提升发动机性能,为航天器的成功发射与运行提供了坚实保障。

固体火箭发动机则以其结构简单、反应迅速、维护方便等特点,在导弹武器系统大放异彩。随着材料科学与制造工艺的进步,固体火箭发动机的推力与燃烧效率不断提升,为快速响应与高效发射提供了有力支撑。

空间电推进技术的出现标志着航天动力技术的革命性飞跃。通过电场或磁场加速离子或电子,产生持续而稳定的推力,空间电推进技术显著降低了航天器的燃

料消耗,延长了其在轨运行时间,为深空探测与星际旅行奠定了基础。

组合动力技术则是航天发动机技术发展的又一重要方向。通过将不同类型的发动机进行优化组合,实现优势互补。组合动力技术为航天任务提供了更加灵活、高效的动力解决方案,将极大地拓展航天器的任务范围与适应能力,推动航天事业迈向新的高度。

科技人才是航天发动机技术自主创新和发展的主体,知识的传承和发扬至关重要。在此背景下,科学出版社邀请中国航天推进技术研究院牵头,联合国内知名院所和高校,组织召集了相关型号总师及高校教授、科研院所专业人士等知名专家共同编写一套“航天发动机技术丛书”。丛书围绕“航天发动机”这一主题,既从理论高度关注航天动力基础科学问题,又密切结合航天动力领域发展的前沿成果,更难得的是融入了行业专家的工程设计经验,具有很高的理论和工程价值。丛书突出航天动力系统的特色,体现学科交叉融合,确保具有前瞻性、原创性、专业性、学术性、实用性和创新性。

丛书于2021年正式启动,入选了“十四五”国家重点出版物出版规划项目。丛书涉及火箭发动机总体设计、部件设计、结构与材料、推进剂、燃烧学、空间特种动力及相关基础和前沿成果,凝聚了众多学者和科研人员的智慧,希望通过系统全面总结我国航天发动机技术及其相关领域近二十年成果,吸收及融合当前技术发​​展成果,阐述航天动力的新型交叉技术和设计方法,形成一套完善的知识体系,促进航天人才培养和技术创新发展,为我国航天强国之路奠定坚实基础!

是为序!

丛书专家委员会

2024年7月

本书序



20 世纪末以来,我国航天事业进入了一段高速发展的“黄金时期”,通过自主创新、系统布局和国际合作,实现了从追赶者到领跑者的历史跨越。其中,上海空间推进研究所先后承担了武器、运载火箭、卫星等空间飞行器和以载人航天工程、探月工程、火星探测为代表的国家重大工程的推进系统研制工作,为我国航天事业作出了突出贡献。传统化学推进曾为我们叩开了空间时代的大门,然而,面对日益拓展的探测疆域、持续升级的任务需求,以及对更高效率、更低成本、更长寿命的不懈追求,传统技术的局限性也逐渐显现。发展更先进、更多元、更智能的空间特种推进技术,成为突破任务局限的新要求。

空间特种推进技术兼具多学科交叉性与前沿性,涵盖电推进、帆推进、聚变推进等十余类技术路线,其原理差异显著、工程实现复杂度高,系统梳理、前瞻展望这一领域,对于把握航天动力技术未来发展方向、抢占空间科技战略制高点,具有至关重要的意义。而长期以来行业内缺乏系统的技术体系梳理与实践经验总结,导致技术研发中常面临路线选型模糊、关键瓶颈突破方向不明确等问题,制约了特种推进技术的工程化应用与迭代升级。

《空间特种推进技术》以“系统梳理、兼顾前沿”为核心,汇集了该领域近年来的重要研究成果与发展脉络,从借助粒子加速原理的电推进,到利用空间环境资源的太阳帆推进,从基于高能物理过程的定向能与聚变推进设想,到融合新概念、新材料的各种创新方案,详细解析了特种推进技术的原理、现状与关键技术,展现出一个庞大而富有层次的技术谱系,为行业构建了清晰的技术认知框架。

本书不仅是航天专业技术人员开展特种推进研发、工程设计的实用指导手册,也为科研机构、高校相关领域的研究与人才培养提供了全面的知识载体,其出版将

有助于深化对特种推进技术内涵的理解,启发创新思路,促进学科交叉,并最终为我国航天动力技术的自主创新与跨越发展注入新的活力。

上海空间推进研究所所长 

2026 年 3 月

前 言



空间推进是从冷气和化学推进开始起步的,经历多年的发展和应用,已经相当成熟。随着空间技术的不断进步,人类探索空间、开发和利用空间的需求日益增强,传统的空间推进技术的局限性逐步显现出来。特别是随着空间探索深度和广度的不断拓展,以及任务规模的扩大和要求的提高,传统的空间推进技术无论是工作方式、运行环境,还是功能和性能等方面,已经越来越不适应新型任务要求和人们对高效率的追求。这就促使人们针对新需求和新变化寻求更优的空间动力解决方案,从而催生出种类繁多的空间特种推进技术。

空间特种推进技术发展至今,已经形成了较为庞大的族谱,展示出诱人的应用前景和发展潜力。随着未来需求牵引的持续加载,以及科学技术本身发展的不断推动,再加上物理学、化学、能源、材料等领域重大创新和突破的支撑,空间特种推进技术将会迎来更加宽广的发展局面。为了系统总结空间特种推进技术的发展成果,特组织编写了本书。全书共 10 章,其中第 1 章为绪论,概括性介绍空间特种推进技术的内涵、特点、分类和发展展望;第 2~9 章分别介绍空间电推进、空间帆推进、空间热推进、空间绳系推进、空间定向能推进、空间聚变推进、空间特种裂变推进、空间特种化学推进等技术的原理、现状、关键技术和发展展望等;第 10 章介绍尚处于发展萌芽阶段的一些创新推进概念,涉及光波纳米推进、反物质推进、吸气式推进、静电颗粒推进、无工质推进等。

本书的结构框架、内容范围由康小录提出,并主笔和校审全书文稿。其中,第 1、2 章主要内容 by 康小录编写;第 3、4 章主要内容 by 田雷超编写;第 5、8、10 章主要内容由于博编写;第 6、7 章主要内容 by 赵震编写;第 9 章主要内容 by 刘俊编写。田雷超负责全书文稿的整理和排版。

感谢中国航天科技集团推进技术研究院科技委朱智春副主任和上海空间推进研究所魏青所长对本书选题和编写给予的支持和指导。本书撰写过程中引用了许多专家学者的著作、论文和劳动成果,在此一并表示谢意。

由于作者的水平有限,书中难免有不足之处,恳请专家和读者批评指正。

作者

2025 年 3 月于上海

目 录

第1章 绪 论

1.1 空间特种推进技术的内涵	001
1.2 空间特种推进技术的功能	003
1.3 空间特种推进技术的发展路径	004
1.4 空间特种推进技术的分类	005
1.5 空间特种推进技术的特点	007
1.6 空间特种推进技术的发展展望	010
参考文献	013

第2章 空间电推进技术

2.1 引言	015
2.2 电热推进	017
2.2.1 电阻加热推力器	018
2.2.2 电弧加热推力器	020
2.2.3 电磁感应及辐射加热推力器	023
2.3 静电推进	023
2.3.1 离子推力器	025
2.3.2 场发射电推进	029
2.3.3 胶体静电推进	031
2.4 电磁推进	032
2.4.1 磁等离子体动力推力器	032
2.4.2 霍尔推力器	036
2.4.3 可变比冲磁等离子体电推进	042

2.4.4 脉冲等离子体推力器	044
2.5 电推进发展展望	046
参考文献	048

第3章 空间帆推进技术

3.1 引言	051
3.2 太阳帆推进	052
3.2.1 工作原理	052
3.2.2 研究现状	053
3.2.3 关键技术	058
3.2.4 发展展望	061
3.3 磁帆推进	062
3.3.1 工作原理	063
3.3.2 研究现状	066
3.3.3 关键技术	067
3.3.4 发展展望	067
3.4 电帆推进	069
3.4.1 工作原理	069
3.4.2 研究现状	071
3.4.3 关键技术	074
3.4.4 发展展望	078
参考文献	079

第4章 空间热推进技术

4.1 引言	081
4.2 核热推进	082
4.2.1 工作原理	084
4.2.2 研究现状	089
4.2.3 关键技术	093
4.2.4 发展展望	094
4.3 太阳能热推进	095
4.3.1 工作原理	096

4.3.2 研究现状	098
4.3.3 关键技术	107
4.3.4 发展展望	109
参考文献	110

第5章 空间绳系推进技术

5.1 引言	113
5.2 绳系的工作原理	114
5.2.1 动量交换绳系	114
5.2.2 电动力绳系的降/升轨原理	117
5.2.3 绳系的展开、回收和控制的工作原理	119
5.3 发展现状	121
5.3.1 绳系动力学的理论模型	122
5.3.2 绳索的生存能力	124
5.3.3 绳系的控制策略	127
5.3.4 电子发射装置	130
5.3.5 电子收集装置	132
5.4 关键技术	136
5.5 发展展望	137
参考文献	140

第6章 空间定向能推进技术

6.1 引言	142
6.2 激光推进	143
6.2.1 工作原理	143
6.2.2 研究现状	147
6.2.3 关键技术	150
6.3 微波推进	152
6.3.1 工作原理	152
6.3.2 研究现状	155
6.3.3 关键技术	158
6.4 发展展望	161

参考文献	162
------------	-----

第7章 空间聚变推进技术

7.1 引言	164
7.2 惯性约束聚变推进	166
7.2.1 工作原理	166
7.2.2 研究现状	169
7.2.3 关键技术	171
7.3 磁约束聚变推进	172
7.3.1 工作原理	172
7.3.2 研究现状	181
7.3.3 关键技术	188
7.4 磁惯性约束聚变推进	191
7.4.1 工作原理	191
7.4.2 研究现状	197
7.4.3 关键技术	204
7.5 发展展望	205
参考文献	205

第8章 空间特种裂变推进技术

8.1 引言	208
8.2 工作原理	209
8.2.1 初代裂变碎片推进技术	209
8.2.2 基于尘埃等离子体的裂变碎片推进技术	209
8.3 研究现状	210
8.3.1 DPFFRE 推进装置的设计	211
8.3.2 中子密度的控制	211
8.3.3 磁场设计	212
8.3.4 热负荷控制	213
8.3.5 推进性能设计	214
8.3.6 裂变反应的试验技术	215
8.4 关键技术	216

8.5 发展展望	216
参考文献	217

第9章 空间特种化学推进技术

9.1 引言	218
9.2 高能量密度固体推进技术	218
9.2.1 基本组成和工作原理	219
9.2.2 技术特点	221
9.2.3 关键技术	221
9.2.4 技术现状与发展	222
9.3 高能量密度液体推进技术	225
9.3.1 基本组成和工作原理	225
9.3.2 技术特点	225
9.3.3 关键技术	226
9.3.4 技术现状与进展	228
9.4 HAN 和 ADN 绿色单元无毒推进技术	231
9.4.1 基本组成和工作原理	231
9.4.2 技术特点	234
9.4.3 关键技术	234
9.4.4 技术现状与发展	236
9.4.5 ADN 发动机发展现状	241
9.5 NOFBX 基绿色单元无毒推进技术	242
9.5.1 基本组成和工作原理	242
9.5.2 技术特点	246
9.5.3 关键技术	246
9.5.4 技术现状与发展	247
9.6 固液混合推进技术	250
9.6.1 基本组成和工作原理	250
9.6.2 技术特点	253
9.6.3 关键技术	254
9.6.4 技术现状与发展	257
9.7 空间特种化学推进的发展趋势	260
参考文献	260

第 10 章 空间新概念推进技术

10.1	引言	262
10.2	光波纳米推进技术	262
10.2.1	工作原理	263
10.2.2	研究现状	264
10.2.3	发展前景	271
10.3	反物质推进技术	272
10.3.1	工作原理	272
10.3.2	研究现状	274
10.3.3	发展前景	278
10.4	吸气式推进技术	279
10.4.1	工作原理	279
10.4.2	研究现状	281
10.4.3	发展前景	285
10.5	静电颗粒推进技术	285
10.5.1	工作原理	286
10.5.2	研究现状	289
10.5.3	发展前景	294
10.6	无工质推进技术	295
10.6.1	工作原理	295
10.6.2	研究现状	297
10.6.3	发展前景	300
	参考文献	301

第 1 章

绪 论

1.1 空间特种推进技术的内涵

在论述空间特种推进技术之前,需要先明确空间推进技术的内涵。“空间推进”一词在航天领域各种场合应用较多,但含义并不相同,主要涉及两方面的含义:①以“空间”作为目的,可以理解为用于探索空间的推进技术,即航天推进,对应英文 space propulsion;②以“空间”作为位置场景,可以理解为工作于空间的推进技术,或者称为空间(在轨)推进技术,也有作者称为航天器(卫星)推进技术,对应英文 in-space propulsion。由上述定义可以看出,中文都称为空间推进,但含义有明显差异,对应的英文也是不同的,前者定义涵盖了后者的内容,本书所涉及的空间推进概念是指后者。

按照上述界定,结合“空间”和“推进”两个名词的内涵,空间推进(in-space propulsion)应是指在地球大气层以外(卡门线之上)对物体(人造的或天然的)的运动状态(位置、速度、姿态等)实施改变技术的统称。从这个角度来看,只要在地球大气层以外改变物体运动状态的技术都属于空间推进的范畴,主要包括以下几类:

(1) 在地球轨道、其他星球轨道或者宇宙空间,通过主动喷出物质产生反作用力的技术,如冷气推进技术、化学推进技术、电推进技术、核热推进(nuclear thermal propulsion, NTP)技术等。

(2) 在地球轨道、其他星球轨道或者宇宙空间,不是通过主动喷出物质,而是借助其他物理原理实现物体运动状态改变的技术,如帆推进技术、绳系推进技术等。

(3) 航天器在地外星球着陆和起飞等所需要的动力技术,这些技术大部分与类别(1)和类别(2)中的技术相同。但对于从较大星球表面起飞的航天器,由于星球引力较大,航天器从较大星球起飞需要较大的动力,这类动力技术与从地球发射航天器到太空的运载动力相当,甚至更大。这类动力技术与类别(1)和类别(2)中的技术有明显差异(这也恰恰是前面所述两种空间推进定义的不同所在)。

(4) 通过星球引力、重力等对物体(人造航天器)运动状态施加作用的技术

(如引力弹弓),大多数深空探测航天器的轨道控制都会用到这种技术。

上述定义涉及的范围相当宽泛,特别是第四类技术总是与航天器的轨道控制紧密结合,是一种被动的航天器轨道调控技术,一般不包含在推进技术专业范畴之列。人们通常所说的空间推进技术是比较狭义的概念,主要限定为航天器在轨道上的主动推进技术。除不包括上述第四类通过星球引力等非主动手段实施推进之外,还将第三类中从地外较大星球表面发射航天器脱离星球引力进入空间的动力技术也排除在空间推进之外(主要是因为这类推进技术基本上是地球上的运载火箭动力技术的翻版,而运载动力由于工作于大气层之内,已被排除在空间在轨推进之外)。也就是说,本书所称的空间推进更贴切的说法应该是指主动空间在轨推进技术(active in-space propulsion),主要涵盖上述广义空间推进定义(3)中的部分及(1)和(2)的全部内容。

因此,严格意义上的空间推进(in-space propulsion)是指航天器与运载火箭上面级分离之后,实现航天器主推进、反作用控制、位置保持、精确定位、轨道机动等功能所采用的动力技术[这一定义与美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的技术路线图 TA2: in-space propulsion technologies 一致]。其中,主推进所采用的推进装置主要提供用于航天器轨道转移、星际航行、外星球着陆和起飞等所需要的推力。反作用控制和轨道机动所采用的推进系统主要提供用于航天器轨道维持、姿态控制、位置保持等所需要的推力。

当前,普遍采用的空间推进技术主要有冷气推进技术、液体和固体化学推进技术等。这些技术从航天发展初期就进入角色,经历了数十年的发展和完善,已经可以非常成熟地应用在空间在轨推进的诸多领域,为人类探索空间提供了必需的动力来源^[1]。

随着空间探索任务的深度和广度的不断拓展,以及任务规模的扩大和要求的提高,传统的空间推进技术已经越来越不能满足任务要求和人们对高效率的追求,从而催生出各种各样的新型空间推进概念和技术,如近年来已经逐渐进入应用领域的空间电推进技术^[2]及其他正在发展的新概念推进技术等。这些空间推进技术原理概念新颖、应用前景广阔,但普遍存在技术成熟度(technology readiness level, TRL)较低、试验验证不充分、空间飞行应用经验欠缺等问题,是空间推进领域次成熟和欠成熟的新技术。在英文表述中,通常将次成熟和欠成熟的新技术命名为 advanced technologies(如 NASA 将技术成熟度低于 3 的技术定义为 advanced technologies),其本意是强调处于技术成熟之前的状态,有预先研究或前期的含义。若按照字面直译为“先进”,则与中文“先进”的含义有较大出入,容易产生歧义,而译为“特种”似乎更贴近本意。

在本书中,空间特种推进技术是相对于传统空间推进技术而言的,将空间推进领域除传统的冷气推进、固体和液体化学推进之外新型的适用于空间应用的推进

技术统称为空间特种推进技术(advanced in-space propulsion)。空间特种推进技术主要包括电推进技术、帆推进技术、热能推进技术、定向能推进技术、核聚变推进技术、特种裂变推进技术、绳系推进技术、特种化学推进技术、其他新概念推进技术等。

1.2 空间特种推进技术的功能

空间特种推进属于空间推进的范畴,因此其功能与空间推进相同。空间推进作为航天器的动力分系统,其作用是为航天器提供轨道控制和姿态控制所需要的动力^[3]。具体到所执行的空间推进任务,主要包括以下几方面:

(1) 航天器由运载火箭发送至初始轨道后,为航天器提供由初始轨道到工作轨道的轨道转移动力。例如,地球同步轨道卫星由运载火箭送入大椭圆轨道后与运载分离,通过空间推进动力实现卫星到达同步轨道并实施卫星的最终定点。

(2) 航天器与运载分离后,配合控制系统为实现航天器对太阳、地球、火星的捕获提供所需的动力。

(3) 为深空探测航天器提供远距离飞行所需的动力。例如,火星探测器由运载火箭送入地球轨道后,接下来的奔火星飞行、近火星制动、火星轨道控制等动力需求全部由空间推进提供^[4]。

(4) 为深空探测航天器提供在地外星体上着陆和起飞等所需要的动力,如火星探测器着陆火星的反作用推进动力、返回器的起飞动力等。

(5) 为轨道上工作的航天器提供维持轨道所需的动力。例如,低轨航天器因大气阻力导致轨道衰减,需要为其提供补偿轨道衰减所需的动力^[5,6];高轨卫星因星球引力、地球摄动和太阳光压等导致航天器轨道倾角变化、经度漂移等,需要为其提供位置保持所需的动力^[7,8]等。

(6) 为航天器轨道变换提供所需的动力。例如,遥感卫星为提高遥感精度而进行的轨道下降和上升反复动作,需要空间推进系统提供轨道变换所需的动力。

(7) 为航天器提供高精度动力。例如,为基础物理、地球科学和天体物理研究而开展的引力波探测、重力梯度测量、天基天文望远镜阵列等而开展的高精度科学探测任务,对航天器平台的稳定性提出了非常苛刻的要求,需要空间推进提供高精度的动力^[9,10](包括推力范围及推力分辨率和推力噪声等)。

(8) 为工作寿命终结(报废)航天器提供离轨(由工作轨道转移到坟墓轨道)所需的动力。例如,地球同步轨道卫星寿终之后,为了腾出有限的轨道资源,需要将卫星推到高于同步轨道 300~400 km 的坟墓轨道,这一工作需要卫星上的空间推进系统来完成。

(9) 为姿态控制、飞轮卸载提供控制力矩^[11]。

(10) 其他空间轨道需要动力的场合。

1.3 空间特种推进技术的发展路径

纵观空间特种推进技术的发展历程可以看出,驱动其创新和发展的诱因主要来自两个方面:一方面是对降低完成空间任务成本的追求(涉及提高现有推进系统性能、创造新的推进方式等);另一方面是利用现有推进技术(包括在不考虑成本的极限情况下)使得无法实现的新型空间任务成为可能。

关于第一个方面,在发射成本(如 10 000 美元/kg)一定的前提条件下,通过减少航天器的总重量(主要是推进剂)来降低进入空间的成本(主要是指航天器由运载火箭送入空间后的在轨运输活动)。为达到这一目标,可以通过研发效率和性能(如比冲)更高的推进系统来实现,或者通过降低航天器干重和任务的速度增量等措施来减小对推进剂的需求。

第二个方面就是使空间推进装置具备完成先前“不可能”实现空间任务的能力。典型的例子就是较大规模的星际航行任务,针对这样的任务,无论化学推进装置有多大,或集成了多少子级,都无法简单地采用化学推进装置达到实际星际航行所需要的速度(典型情况速度超过 10% 的光速)。更普遍的表述为:当一项空间任务的速度增量 ΔV 大于所选用推进装置喷气速度(或者等效为比冲 I_{sp})的数倍(如 2~3 倍)时,完成这项空间任务将是不现实的。

上述驱动空间推进发展的两方面诱因实际上给出了空间特种推进发展的两条主要技术途径,通过下面对推进装置性能受限于火箭方程的分析可以看得更加清晰。

通常,推进装置都遵循如下火箭方程,则推进装置的性能也就受制于该方程:

$$\frac{M_0}{M_b} = e^{\frac{\Delta V}{I_{sp}}} \quad (1-1)$$

$$M_0 = M_p + M_b \quad (1-2)$$

$$M_b = M_{dry} + M_{payload} \quad (1-3)$$

式中, M_0 为航天器的初始质量(湿重); M_b 为航天器消耗完推进剂的最终质量(干重); ΔV 为航天器所获得的速度增量; I_{sp} 为推进系统的比冲; M_p 为航天器所带推进剂的质量; M_{dry} 为推进系统的干重(不包含推进剂); $M_{payload}$ 为航天器有效载荷的质量(除推进系统干重和推进剂之外的所有重量之和)。

由火箭方程可以看出,航天器的湿重(M_0)与推进系统的比冲(I_{sp})和任务所需的速度增量(ΔV)呈指数关系,而航天器的干重(M_b)主要取决于推进系统的干重

(M_{dry})。因此,从特种推进技术的发展历程来看,正是基于火箭方程,一直在强调提高推进系统比冲这条技术路线。例如,空间推进装置的比冲从化学推进(I_{sp} 为 200~500 s)到电推进(I_{sp} 为 1 000~10 000 s),再到核推进(裂变推进 I_{sp} 为 1 000 s,反物质推进 I_{sp} 为 10^7 s),数值在不断刷新。另外,通过降低推进系统的干重(M_{dry})也相当于提高比冲(I_{sp}),如采用可充气结构、微型推进组件,或者采用推进装置能源来自航天器之外的定向能推进技术,都可以达到降低推进系统干重的目的。

另一条技术路线是通过采用某些技术来“规避”火箭方程的前提条件,从而突破火箭方程对推进系统的固有限制。例如,火箭方程假设所有消耗的推进剂均由航天器携带,但可以打破这一基本前提条件,类似于航空发动机仅携带部分燃料,在飞行中利用大量空中“免费”空气完成推进任务。同样地,航天器在宇宙空间飞行也可以收集空间能量(如太阳热和太阳电推进系统等)、动量(如太阳帆)和质量(如通过月球或星球资源制造推进剂)等空间资源来完成推进任务。这些资源不是由航天器发射入轨时所携带的,而是在飞行过程中收集的,因此打破了火箭方程的固有限制,使得航天器的推进性能大幅提升。

由火箭方程可以看出,还有一条技术路线就是减小对推进系统提供总的 ΔV 的需求。这可以通过轨道动力学方法(动力学辅助)进行优化,或者通过引力辅助对航天器进行加速。另外,部分 ΔV 可以通过弹射入轨或者系绳,由航天器转移到地基、空基或天基系统。这条技术路线按照 1.1 节的定义不属于空间特种推进的范畴,后续章节将不再涉及。

1.4 空间特种推进技术的分类

按照 1.1 节对空间特种推进技术的定义,空间特种推进技术所涉及的种类繁多,并且随着人类航天活动不断拓展的任务牵引及科学技术本身的发展和进步,越来越多的新型空间推进技术将会不断涌现,极大地丰富了空间特种推进的技术型谱^[12]。

从目前在用或正在发展的各种空间特种推进技术来看,所涉及的物理原理五花八门,所利用的能量形式各式各样,所带来的推进效果各有千秋,所处的技术成熟状态也是千差万别。但从另一个角度来看,任何推进装置都可以看成一种形式的换能器,其核心功能是将一种形式的能量转换为推进动能。以推进装置最前端(输入端)能量来源的形式为主线对其进行分类,空间特种推进技术可以大致划分为以下几种:

(1) 特种化学能推进,这是相对于常用的传统化学推进而言的^[13],是指传统化学推进之外的采用化学能的空间推进技术。主要包括高能量密度液体推进技术、高能量密度固体推进技术、固液混合推进技术、绿色无毒推进技术等。

(2) 电能推进(电推进),即利用电能实现推进效果的推进装置。主要包括电热推进、静电推进、电磁推进三大类。其中每一类又包括很多子类,如电热推进包括电阻加热推进、电弧加热推进、微波加热推进等;静电推进包括离子推进、场发射静电推进、胶体静电推进等;电磁推进包括磁等离子体动力推进、霍尔推进、脉冲等离子体推进、可变比冲磁等离子体推进等。

(3) 太阳能推进,即利用太阳能或太阳光子实现推进效果的装置。主要包括太阳光帆推进^[14,15]、太阳热推进^[16,17]、太阳光纳米推进^[18,19]等。其中,太阳光帆推进根据帆的结构形式又包括方形太阳帆推进、充气式太阳帆推进、等离子体磁帆推进等。

(4) 核能推进,即利用核能实现推进效果的装置。主要包括核裂变推进^[20,21]、核聚变推进^[22,23]等。其中,核裂变推进主要包括核裂变热推进(nuclear fission thermal propulsion, NFTP)、裂变碎片推进、裂变脉冲等离子体推进等;核聚变推进主要包括惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)推进、磁约束聚变(magnetic confinement fusion, MCF)推进、磁惯性约束聚变推进等。

(5) 动能传输推进,即将具有动能的物体的动能(或力)通过接触或非接触的方式传递到目标物体上实现推进效果的系统。此类推进方式最具代表性的是空间绳系推进^[24,25],即用绳子或电缆连接两个或多个物体(航天器),使动能或力在物体之间传输,达到推进的目的。绳系推进主要包括动量交换绳系推进、电磁绳系推进等。

(6) 其他形式的能量推进,即利用上述推进形式之外的其他形式能量实现推进效果的系统。主要包括激光能推进^[26,27]、微波能推进^[28,29]、反物质推进^[30,31]等。

除按照能量形式进行分类外,还有其他分类方式。例如,按照是否采用推进工质来分类,空间特种推进技术可以分为有工质推进和无工质推进,有工质推进包括先进化学推进、电推进、核推进等,无工质推进包括帆推进、定向能推进等;按照推进系统的工作模式进行分类,空间特种推进技术可以分为稳态工作推进和脉冲工作推进;按照技术成熟情况进行分类,空间特种推进技术可以分为成熟应用类推进和非成熟应用类推进等。

但是,无论按照哪种方式进行分类,都很难将空间特种推进技术族谱梳理得非常清晰。相对而言,上面按照换能器最前端(输入端)能量来源形式对空间特种推进技术进行的分类,基本上可以涵盖目前已知的特种空间推进概念,但也存在无法将一些颠覆性新型推进技术纳入族谱的缺点。另外,按此分类进行论述会带来概念混杂和原理重复等问题,导致论著章节布局不够均匀,相关论述不易协调。因此,本书按照空间特种推进装置后端(能量转换系统的末端)形成推进效果的物理原理进行分类,并考虑到能量形式的差异,形成的空间特种推进技术主要大类及其子类分布如下。

(1) 空间电推进技术:① 电热推进技术;② 静电推进技术;③ 电磁推进技术。

(2) 空间帆推进技术:① 太阳帆推进技术;② 磁等离子体帆推进技术;③ 电

帆推进技术。

(3) 空间热能推进技术: ① 核热推进技术; ② 太阳热推进技术。

(4) 空间定向能推进技术: ① 激光推进技术; ② 微波推进技术。

(5) 空间绳系推进技术: ① 动量交换绳系推进技术; ② 电磁绳系推进技术。

(6) 空间聚变推进技术: ① 惯性约束聚变推进技术; ② 磁约束聚变推进技术; ③ 惯性静电约束聚变推进技术。

(7) 空间特种裂变推进技术: ① 裂变碎片推进技术 (fission fragment rocket engine, FFRE); ② 外部脉冲等离子体推进技术。

(8) 空间特种化学能推进技术: ① 高能量密度固体推进技术; ② 高能量密度液体推进技术; ③ 绿色无毒推进技术; ④ 固液混合推进技术。

(9) 空间新概念推进技术: ① 光波纳米推进技术; ② 反物质推进技术; ③ 空间吸气式推进技术; ④ 静电颗粒推进技术; ⑤ 无工质推进概念。

1.5 空间特种推进技术的特点

由 1.4 节空间特种推进技术的分类可以看出,与已经在空间大量成熟应用的传统空间推进(如冷气推进和化学推进等)技术相比,空间特种推进技术无论是从物理原理和工作过程来看,还是从推进效果和应用前景来看,都与传统空间推进技术存在相当大的区别,是传统空间推进技术的补充、完善和拓展。

空间特种推进技术所涉及的范围很宽,普遍属于近年来新发展的技术。与传统的空间推进技术及 1.1 节定义的广义空间推进技术相比,其特点主要表现为如下。

1) 前景广阔

作为传统空间推进技术的补充和完善,空间特种推进技术所承担的任务与传统空间推进技术本质上没有太大差别,都是为航天器的轨道变换与保持及指向变换与保持提供力和力矩,也就是为航天器轨道控制与姿态控制提供力和力矩。但是,推进装置性能的优劣直接关系到航天器轨道和姿态的控制精度,也关系到航天器飞行距离的极限和承载有效载荷的能力,从这个角度来看,不同推进装置的效果和前景必然会因此而异。

传统的空间推进技术比冲等性能较低,大大限制了航天器的能力,特别是深空探测航天器的探测距离,也使得航天器有效载荷难以满足许多大型任务的需求,导致有些航天任务尚未有可用的空间推进装置如载人火星或更远的深空探测任务。现有的空间推进技术几乎不可能实现任务设计,从而需要开发更高效、更先进的新型空间推进技术。这些恰恰就是空间特种推进技术的使命,即将现在的“不可能”变成将来的“可能”。因此,从这一角度来看,空间特种推进技术的应用前景相当广阔,特别是随着航天器需求的持续牵引和推进技术专业的不断发展,新型空间推

进技术将不断涌现,必将开辟空间特种推进技术的广阔应用前景。

2) 种类繁多

传统的空间推进技术主要是指化学推进技术,包含单组元液体推进技术、双组元液体推进技术及固体推进技术这几个有限的类型。空间特种推进技术是除传统化学推进技术之外能够实现空间推进功能的所有空间推进技术的总称,不但包含传统化学推进的改进拓展型(特种化学推进技术),还包含大量的新型空间推进概念,如通过电能实现推进工质电离和加速的电推进技术,通过大面积帆实现动量交换的各种帆推进技术,通过系绳牵引实现动量和力传递的绳系推进技术,通过热能、定向能和核能等变换为推进动能的各种推进技术等。随着技术的不断发展,还会不断有新的空间推进种类涌现,使得空间特种推进技术的种类持续丰富。

3) 能量形式多样

传统的空间化学推进利用推进剂的化学能产生推进动能,而空间特种推进所利用的能量除化学能之外,涉及的能量形式多样,如太阳能、电能、核裂变能、核聚变能、反物质湮灭能、激光能、微波能、动能、热能等,几乎涵盖自然界已知的大部分能量形式。

空间特种推进所利用的能量形式多种多样,使得基于不同能量形式转换为推进动能的措施千差万别,极大地丰富了空间推进的内涵和外延,从而造就了空间特种推进技术类别的多样性。

4) 工作原理各异

传统的化学推进是通过推进剂的化学反应(燃烧)产生高温高压燃气,燃气通过拉瓦尔喷管高速喷出产生反作用推力。它的工作原理可以简单描述为两个主要过程,如图1-1所示。第一个过程发生在燃烧室,推进剂的化学能通过化学反应(燃烧)释放出来,以高温高压燃气这种势能(内能)的形式存在;第二个过程发生在拉瓦尔喷管,高温高压燃气(势能)通过拉瓦尔喷管的收缩-膨胀转换为高速喷射的气体(动能)。两个过程的结合,实现了化学能首先转换为势能,然后势能最终转换为推进动能的目标。

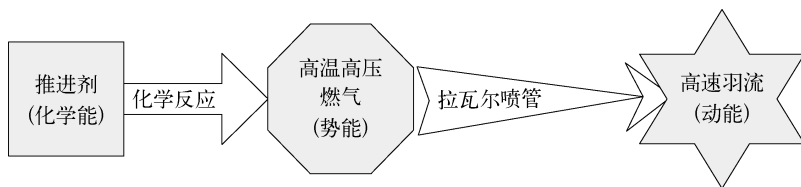


图 1-1 化学推进原理示意图

由于空间特种推进利用的能量形式多种多样,要将不同形式的能量转换为推进动能,不能沿用图1-1所示的化学推进原理,必须基于不同形式能量的特点采

取对应的能量转换方法,从而出现了各种各样的空间推进原理。

为了将不同的能量转化为航天器所需要的推进动能,需要针对所利用的能量形式确定能量变换的方式。例如,静电推进的原理就是通过电能将推进剂(工作介质)转化为可以用静电场进行加速的带电粒子,然后通过静电场使带电粒子高速喷出产生反作用推力,如图1-2所示。由图可以看出,静电推进的原理也涉及两个主要过程,第一个过程是利用电能将工质气体转化为带电的等离子体(势能),第二个过程是利用电能(通过离子光学系统)提高等离子体中离子的速度(动能)。从表面上看,第二个过程似乎也是将势能转换为动能,但实际上并非如此。静电推进的电能是通过两处分别施加到介质流中的,最终的动能并不是由势能转换而来的(提高工质势能仅是便于静电场起作用),而是由电能转换而来的。类似静电推进这样的空间电推进与传统化学推进的本质区别在于,化学推进的能量与工作介质(推进剂)是共存的,而电推进的能量与工作介质是分离的,电能是外加到介质流之中的。

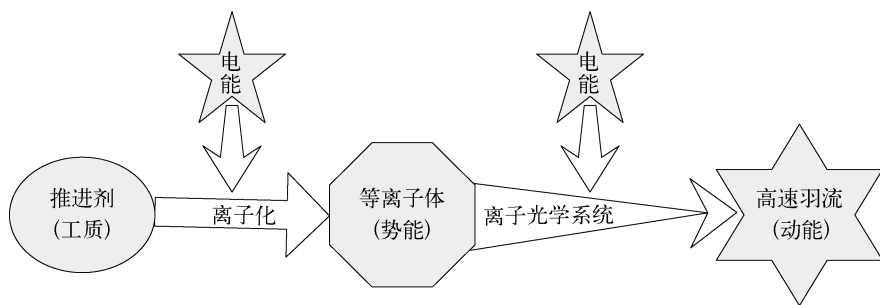


图 1-2 静电推进原理示意图

上述空间电推进与传统化学推进在实现推进的具体原理和方式上有相当大的区别,但都属于喷气推进的范畴。而许多其他空间特种推进技术,如帆推进和绳系推进等不再采取喷气推进的原理,而是通过动量交换和传输的方式实现推进效果。另外,还有一些颠覆性的推进概念,完全不同于人们对推进技术的认知,而是利用时-空效应、引力场、量子真空、惯性系,以及其他一些物理现象和原理实现航天器运动状态的改变,达到推进的效果。

总体来看,空间特种推进技术由于类别的多样性、能量来源的差异性和工作方式的新颖性,必然使不同种类的空间特种推进技术的工作原理千差万别。

5) 技术成熟度较低

自1926年美国人首次研制成功以液氧/汽油为推进剂的液体火箭发动机以来,传统的化学推进技术已经走过了近百年的发展历程,其理论体系和应用技术已经相当成熟。与传统的化学推进技术相比,空间特种推进技术的成熟度普遍较低,

也缺少空间飞行应用的经验。有些推进技术尚处于概念提出和完善的研发初期,如反物质推进等新概念推进技术,其技术成熟度只有2级左右,还有一些颠覆性推进尚处于概念萌芽阶段,其技术成熟度更低,也有一些技术成熟度较高的特种推进技术,如中功率霍尔电推进技术和离子电推进技术等,已经逐渐应用于各种航天器的空间推进领域,其技术成熟度已超过6级。

空间特种推进技术的成熟度较低是与其定义相对应的。通常情况下,一项推进技术的成熟度达到较高水平之后,随着空间应用经验的不断积累和完善,原则上也就不再属于特种推进,应将其纳入常规推进的范畴。因此,随着各项特种推进技术的进步和成熟应用,将会有越来越多的特种推进技术被纳入常规推进技术的范畴,这也正是特种推进技术发展的最终目标。

6) 存在不确定性

对于技术尚处于概念提出和可行性探索阶段的空间特种推进技术,由于认知水平限制和基础理论的欠缺,有些技术可能面临中止或者需要中途更改方案等困境。例如,磁帆推进包含太阳风等离子体流和磁场之间的大规模相互作用,截至目前还没有对其进行直接演示^[32]。通过计算机模拟预测了其性能,并进行了小尺寸原型样机的试验,实现了微型磁层膨胀到离线圈几英尺的位置,但仍然无法确定在太空中具有类似配置的真实尺寸模型膨胀距离能否扩大到几十千米,面临许多不确定性。另外,对于某些新概念推进技术,随着研究工作的不断深化,也可能出现原有概念和理论被实验证伪的情况,出现推进概念的完全颠覆。

7) 推力普遍较小

空间特种推进属于空间推进的范畴,与从较大星球将航天器发射入轨的运载火箭主推进相比,其推力普遍较小。通常运载火箭主推进发动机的推力在15~10 000 kN,而空间特种推进的推力通常在毫牛到几十千牛量级范围,有时上限会突破到百千牛量级,而下限会拓展到微牛甚至纳牛量级。

8) 推进性能普遍较高

比冲是衡量推进系统性能的重要指标。传统的空间化学推进的比冲通常在200~350 s,基于其物理原理、所采用的推进剂和各种约束条件,比冲极限最高一般也不会超过500 s。而空间特种推进的比冲普遍较高,如已经成熟应用的空间静电推进技术,其比冲通常在3 000~4 000 s,比化学推进高一个数量级。核聚变推进和反物质推进等的比冲甚至可达到10 000 s以上。另外,对于无工质空间推进,如果沿用比冲的概念,那么其比冲更是达到无穷大。

1.6 空间特种推进技术的发展展望

总而言之,空间特种推进技术发展至今已经形成了较为庞大的族谱,展示出诱