



装备学院·学术专著

先进航天推进技术

洪延姬 金星 崔村燕 窦志国 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

V43
1017



NUAA2012040999

V43
1017-1

本书得到总装备部“1153”人才工程资助

先进航天推进技术

洪延姬 金星 崔村燕 窦志国
王广宇 李倩 文明 叶继飞 编著
李修乾 阿荣 王宇 李兰



国防工业出版社

· 北京 ·

2012040999

内 容 简 介

本书从原理与技术的角度对当前的先进航天推进技术进行了较为系统的论述,目的是为将来从事航天推进研究的工程人员奠定广泛的理论基础。主要内容包括先进化学推进、激光推进、微波推进、核推进和反物质推进、电推进、微推进、帆推进以及系留推进等先进的推进技术和原理。

本书可作为航天测试发射工程、航空宇航推进理论与工程、兵器发射理论与技术专业和其他相关专业的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

先进航天推进技术 / 洪延姬等编著. —北京: 国防工业出版社, 2012. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 08029 - 2

I. ①先... II. ①洪... III. ①航天推进 IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 048360 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 13½ 字数 240 千字

2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

航天技术是一门用来探索、开发和利用外层空间及地球以外天体的综合性工程技术,它用航天运载器将航天器送入太空,借以完成各项任务。随着进入空间、利用空间和控制空间需要的不断增加,航天任务越来越多样化,如行星轨道提升、火星探测、深空行星货运、月球和火星运载以及星际航行等,对推进技术提出了高比冲、低成本、高可靠、机动灵活等新的需求。各航天大国一方面不断地完善和提高化学火箭发动机的推进性能,另一方面投入越来越多的人力和财力满足新的航天推进技术的需求。

随着科学技术的发展,在物理学、能源、材料、高密度推进剂等方面取得了重大突破,为形成先进推进技术奠定了基础。先进航天推进技术特指应用新原理或使用新能源,在技术上有重大突破与创新,在性能上有突出特点并在航天领域有应用前景的先进推进技术。

先进航天推进技术的种类很多,有些种类的推力器已经研制出样机,进入航天应用领域,如核推进、电推进和微推进;有些种类的推力器还处于科学研究和航天应用的探索阶段,如定向能推进、光压推进和弹射推进等。本书主要介绍先进化学推进、激光推进、微波推进、核推进和反物质推进、电推进、帆推进、系留推进等航天推进技术。

本书由洪延姬、金星、崔村燕和窦志国负责制定编写大纲和写作方案。本书内容是集体智慧的结晶,主要编写者有洪延姬、金星、崔村燕、窦志国、王广宇、李倩、文明、叶继飞、李修乾、阿荣、王宇、李兰等。全文插图由叶继飞、李南雷、柯发伟和史宏略绘制。

本书编写组成员在从事的相关科研项目研究基础之上,进行了大量的调查研究,数易其稿,形成此书。尽管如此,由于水平有限,恳请同行专家和广大读者提出宝贵的意见。

作者

2011年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 先进航天推进技术的发展背景	1
1.2 火箭推进基本原理	4
1.3 火箭推进基本性能参数	5
1.4 先进航天推进技术简介	7
参考文献	9
第 2 章 先进化学推进	11
2.1 引言	11
2.2 高能量密度的化学推进	12
2.2.1 高能量固体推进剂	12
2.2.2 高能量液体推进剂	13
2.3 轻质贮箱	14
2.4 精确的推进剂控制和混合技术	16
参考文献	17
第 3 章 激光推进	19
3.1 引言	19
3.2 主要推进性能参数	20
3.3 连续激光推进	22
3.3.1 连续激光推进的工作原理	22
3.3.2 连续激光推进存在的问题	24
3.3.3 双流连续激光推进	26
3.3.4 分子吸收连续激光推进	27
3.4 脉冲激光推进	28
3.4.1 脉冲激光推进的工作原理	28

3.4.2	高重频脉冲激光推进	35
3.5	换热式激光推进	42
3.6	激光推进的关键技术	43
3.7	激光推进的发展现状	44
3.7.1	理论研究	45
3.7.2	推进剂设计	46
3.7.3	推力器构型设计	48
3.8	激光推进的应用前景	50
3.8.1	单级发射微小卫星	50
3.8.2	在轨卫星的姿轨控	51
3.8.3	临近空间激光动力飞行器	52
3.8.4	高超声速飞行器减阻	52
3.8.5	空间碎片清除	52
	参考文献	54
第4章	微波推进	58
4.1	引言	58
4.2	微波推进基本原理	59
4.3	微波推进的关键技术	61
4.3.1	高能微波源技术	61
4.3.2	高能微波传输频率设计技术	62
4.3.3	天线技术	63
4.3.4	相控阵技术	65
4.3.5	腔体设计技术	65
4.3.6	喷管设计技术	66
4.4	微波推进的发展现状	67
4.4.1	美国 MET 的发展	68
4.4.2	美国 MPT 的发展	70
4.5	微波推进的应用前景	71
	参考文献	75
第5章	核推进与反物质推进	77
5.1	引言	77
5.2	裂变推进	78

5.2.1	固体堆芯推进	79
5.2.2	液氧增益推进	81
5.2.3	粒子床推进	82
5.2.4	液体堆芯推进	83
5.2.5	气体堆芯推进	83
5.2.6	放射性同位素推进	84
5.2.7	核热/核电混合推进	85
5.2.8	裂变碎片推进	86
5.2.9	核爆炸脉冲推进	87
5.3	聚变推进	88
5.3.1	惯性约束聚变推进	89
5.3.2	磁约束聚变推进	92
5.3.3	惯性静电约束聚变	93
5.4	反物质推进	94
5.4.1	反物质基本概念	94
5.4.2	反物质推力器概念	95
5.4.3	反物质推进的应用	97
	参考文献	98

第6章 电推进

6.1	引言	100
6.2	电推进的性能描述	102
6.3	电热式推进	104
6.3.1	电阻加热推力器	105
6.3.2	电弧加热推力器	106
6.4	静电式推进	109
6.4.1	静电式推进基本原理	109
6.4.2	电子轰击离子推力器	111
6.4.3	接触离子推力器	113
6.4.4	微波离子推力器	113
6.4.5	射频离子推力器	113
6.4.6	等离子体离析离子推力器	113
6.4.7	放射性同位素离子推力器	113
6.5	电磁式推进	114

6.5.1	电磁式推进基本原理	114
6.5.2	霍尔推力器	115
6.5.3	脉冲等离子体推力器	118
6.5.4	磁等离子动力学推力器	119
6.5.5	脉冲感应推力器	121
6.5.6	电子回旋共振推力器	122
6.6	电推进的发展与应用	123
6.6.1	电推进应用范围	123
6.6.2	电阻加热推力器的发展	125
6.6.3	电弧加热推力器的发展	125
6.6.4	静电推进的发展	127
6.6.5	霍尔推力器的发展及应用	129
6.6.6	脉冲等离子体的发展	132
6.6.7	磁等离子体推力器的发展	133
	参考文献	133
第7章	微推进	136
7.1	引言	136
7.2	基于 MEMS 技术的微卫星和微推进	138
7.2.1	基于 MEMS 技术的微卫星发展	138
7.2.2	基于 MEMS 技术的微推进系统的优势	140
7.2.3	基于 MEMS 技术的微推进系统的局限性	142
7.3	冷气微推力器	143
7.4	场发射微推力器	145
7.4.1	场发射微推力器的基本原理	145
7.4.2	Cs-FEEP 的发展	147
7.4.3	In-FEEP 的技术水平及应用	148
7.5	胶体微推力器	152
7.5.1	胶体微推力器的基本原理	152
7.5.2	胶体微推力器的发展	154
7.6	脉冲等离子体微推力器	157
7.6.1	触发设计	157
7.6.2	自击穿设计	158
7.6.3	三电极设计	159

7.6.4	推进剂构型设计	160
7.6.5	推进剂烧蚀问题	160
7.6.6	脉冲等离子体微推力器的发展	161
7.7	激光烧蚀微推力器	161
7.7.1	毫秒脉宽激光烧蚀微推力器	162
7.7.2	纳秒脉宽激光烧蚀微推力器	167
7.8	固体推进剂微推力器	169
7.9	微推进的应用前景	171
7.9.1	LISA 计划	171
7.9.2	DARWIN 任务	173
	参考文献	174
第 8 章	帆推进	177
8.1	引言	177
8.2	帆推进的基本原理	177
8.3	帆推进的分类	179
8.3.1	太阳帆	179
8.3.2	激光/微波帆	181
8.3.3	磁帆	182
8.4	帆推进的关键技术	183
8.4.1	帆的材料	184
8.4.2	帆的展开和稳定技术	184
8.4.3	激光器能量及光学系统设计	186
8.4.4	磁帆的热控制、结构等技术	186
8.5	帆推进的发展	188
8.6	帆推进的应用前景	192
8.6.1	星际航行	192
8.6.2	改变小行星轨道	193
8.6.3	人造月亮	193
	参考文献	193
第 9 章	系留推进	194
9.1	引言	194
9.2	系绳的结构	195

9.3	系留推进的发展	196
9.4	系留推进的应用前景	198
9.4.1	系留拖曳高空探测	198
9.4.2	轨道转移	198
9.4.3	直接入轨或轨道提升	200
9.4.4	系留弹射	201
9.4.5	电动系绳在发电和推进的应用	201
9.4.6	库仑力系留	202
	参考文献	203



第 1 章

绪 论

1.1 先进航天推进技术的发展背景

传统推进技术是利用化学能将运载器送入预定空间轨道和实现航天器在轨机动的技术,主要是指液体和固体化学推进。从 1926 年美国戈达德研制成以液氧/汽油为推进剂的液体火箭发动机至今,化学推进已经有近百年的发展历史,目前其理论体系和应用技术基本成熟,发射基地和地面测控系统等配套设施健全。化学推进最突出的特点是可以提供大推力,一直以来是航天领域使用最多的推进技术(目前世界上 100% 的运载工具和 95% 以上的航天器采用化学推进技术),而且在可预见的将来也是最重要的航天推进技术。

虽然传统的化学火箭推进技术在功能性、安全性和可靠性方面都能满足目前发射任务的需求,但是随着商业发射任务的剧增及太空探索任务的拓展,对于发射成本、发射周期及有效载荷能力都有新的要求。先进航天推进技术的目标是从根本上降低有效载荷入轨,减轻轨道保持和轨道机动动力系统的质量,缩短近地轨道(LEO)向地球同步轨道(GEO)转移的时间,从而增强人类星际探索的能力。航天推进技术的发展趋势如图 1-1 所示。

在本书中,先进航天推进技术是相对于传统化学推进技术而言的,把利用新能源或新机理(不同于传统化学火箭推进)的航天推进技术称为先进航天推进技术,主要包括先进化学推进、激光推进、微波推进、核推进与反物质推进、电推进、微推进、帆推进和系留推进等航天推进技术。

以美国为代表的航天大国在“战略规划—研究开发—型号应用”各个层次上都高度重视,他们往往按照“走一步、看一步、想一步”的三步曲发展,即利用成熟技术做当前之事,大力开发下一步的先进技术,同时还要想到更远的需求以便制定技术发展的战略规划。

美国 NASA 先进航天推进实验室、马歇尔航天飞行中心、Glenn 研究中心、



图 1-1 航天推进技术的发展趋势

喷气推进实验室、空军 Phipps 实验室、Brookhaven 国家实验室、Los Alamos 国家实验室、Lawrence Livermore 国家实验室、费米实验室等，俄罗斯高能物理研究所等，欧空局、欧洲核研究组织、德国宇航研究院，还有日本等主要航天大国都在先进航天推进技术领域做了大量的研究开发工作。美国空军 2025 年计划、美国航天司令部 2020 年长期规划等都把先进航天推进技术研究放在很重要的位置，如图 1-2 所示。

NASA 对包括激光推进和微波推进的定向能推进技术研究工作信心十足。从图 1-3 中可以看出，他们认为以激光推进为代表的定向能推进研究工作属于基础技术研究领域，与其他先进航天推进技术相比较，几乎不需要太多的技术突破。按照这一发展规划，激光推进技术在 2020 年左右将逐步走向实用化。

总之，基于未来需求牵引的战略规划对于先进航天推进技术的研究起到了直接的指导作用，更激发了各国对先进航天推进技术的研发热情，奥地利学者 Paul A. Murad 甚至利用爱因斯坦场方程组推出未来的航天器的推进速度可以超过光速。

1.1 先进航天推进技术的发展背景

光学系统	NGST(6m) 目镜 (25m衍射)	NNGST(25m) TOPS大干涉计	50m光圈的激光 传输和中继光学 系统	帆光学系统原型 机(3m×50m)	帆光学系统成 品(100m×50m)
太阳帆	太阳帆样机	太阳帆位置 保持样机	太阳帆位置保持		
激光器	SBL(~1MW、化 学激光器)	MW级用于空 间能源光束的 样机	100MW级用于 推进的激光器 样机	用于太阳帆的激 激光器原型机 (1GW)	太阳帆激光器 成品(10×5GW)
太阳能 卫星	SPS样机 kW级	SPS原型机 MW级	第一个工作样机 SPS-GW级	SPS成品 若干GW/年	用于太阳帆的 SPS
激光推进	激光热推进地面测 试激光电推进样机 (~1kW)	激光热推进空 间样机 (~1MW)	用于探月的MW 级工作样机	用于火星任务和 ISP任务的工作 样机	帆束,集成, 发射测试
磁帆	磁帆电缆	磁帆/M2P2 样机	微帆耦合样机	原型机测试 (20年)	
帆光学 系统	微帆的发展	微帆加速度 样机	微帆导航样机	帆光学系统样机	星际探测发射
	2002年	2010年	2020年	2030年	2040年 2050年

图 1-2 美国的先进航天推进技术研究规划

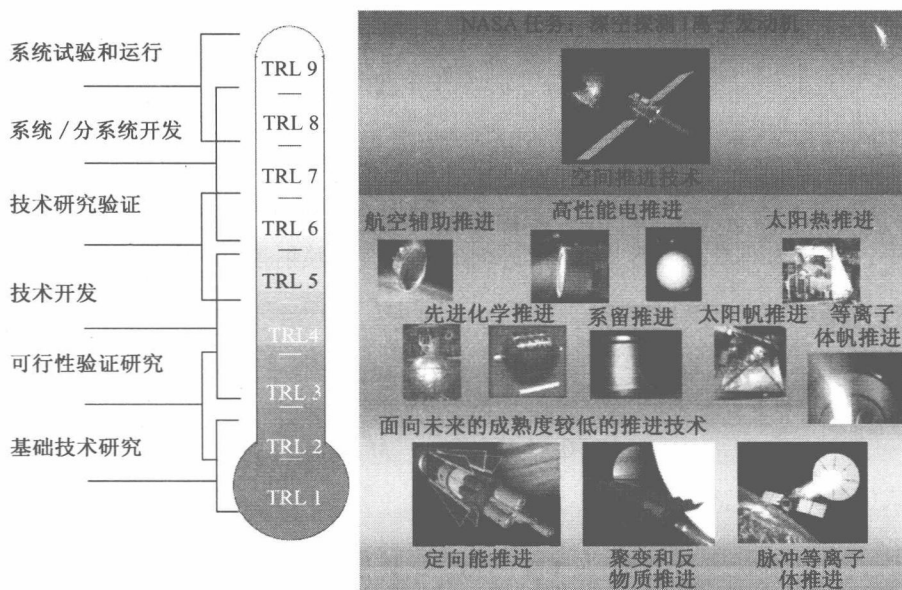


图 1-3 各种先进航天推进技术储备水平

1.2 火箭推进基本原理

1903 年俄国学者齐奥尔科夫斯基发表了名为《利用喷气式工具研究宇宙》的论文,指出火箭是到达星际空间的唯一运输工具,阐明了火箭飞行的理论,提出了液体火箭发动机的设想和原理图,并建立了火箭最大理想飞行速度公式——齐奥尔科夫斯基公式,即火箭方程,为近代火箭推进技术的发展奠定了理论基础。

假设火箭沿一条直线运动,其运动示意图如图 1-4 所示,在 t 时刻,火箭质量为 M ,运动速度为 V ,而在 $t + \Delta t$ 时刻,火箭向后排出质量为 ΔM 的气体,其绝对速度为 u ,此时火箭的质量变为 $M - \Delta M$,其速度变为 $V + \Delta V$ 。

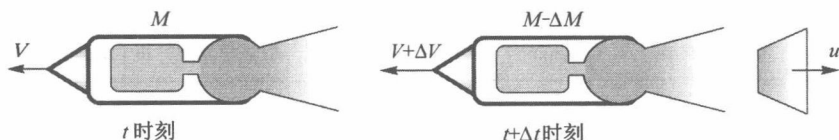


图 1-4 火箭运动示意图

根据动量定理,火箭运动方程为

$$M \frac{dV}{dt} = [u - (V + \Delta V)] \frac{dM}{dt} \quad (1-1)$$

令

$$V_E = (V + \Delta V) - u \quad (1-2)$$

式中: V_E 称为有效排气速度,即推进剂的平均有效喷射速度,则式(1-1)变为

$$\frac{dV}{dt} = - \frac{V_E}{M} \frac{dM}{dt} \quad (1-3)$$

应用初始条件:

$$t = 0, \quad V = V_0, \quad M = M_0 \quad (1-4)$$

对式(1-3)积分,得

$$\Delta V = V(t) - V_0 = V_E \ln \frac{M_0}{M(t)} \quad (1-5)$$

式(1-5)就是齐奥尔科夫斯基公式,即火箭在自由空间的速度增量方程。用比冲 I_{sp} 代替有效排气速度,式(1-5)为

$$\Delta V = gI_{sp} \ln \frac{M_0}{M_E} \quad (1-6)$$

式中: g 为当地重力加速度。对于给定的火箭, ΔV 只是火箭瞬时质量的函数。为了确定 ΔV (或 V) 随时间的变化, 必须先确定火箭质量随时间的变化。假设推进剂的质量流量为 $\dot{m}$, 则

$$\frac{dM}{dt} = -\dot{m} \quad (1-7)$$

对式(1-7)积分, 可得

$$M = M_0 - \int_0^t \dot{m} dt \quad (1-8)$$

由此看出, 质量与速度随时间的变化都与质量流量的时间历程有关。

如果火箭携带的可用推进剂总质量是 M_p , 则关机时的质量(干质量)为

$$M_E = M_0 - M_p \quad (1-9)$$

燃烧时间 t_b 由下式决定

$$M_p = \int_0^{t_b} \dot{m} dt \quad (1-10)$$

定义火箭质量比 Λ 为

$$\Lambda = \frac{M_0}{M_E} \quad (1-11)$$

于是关机时的速度增量为

$$\Delta V_{id} = gI_{sp} \ln \Lambda \quad (1-12)$$

这个速度增量称为火箭的理想速度。它只是比冲和质量比的函数, 但与推力一时间历程无关。

1.3 火箭推进基本性能参数

火箭推进基本性能参数主要包括冲量、比冲、推进剂质量分数和推重比等。

(1) 冲量 I 为推力 F (可随时间变化) 对工作时间 t 的积分, 即

$$I = \int_0^t F dt \quad (1-13)$$

(2) 比冲 I_{sp} 为消耗单位质量推进剂产生的总冲, 表达式为

$$I_{sp} = \frac{\int_0^t F dt}{g \int \dot{m} dt} \quad (1-14)$$

(3) 推进剂质量分数 ζ 指可用推进剂总质量 M_p 在初始质量 M_0 中所占的比例。

(4) 推重比 F/M_0 表示发动机单位质量所产生的推力(用地表重力加速度的倍数表示)。对于恒定的推力,因为飞行器的质量随推进剂的消耗而减小,最大推重比或最大加速度出现在发动机工作刚结束前。

从式(1-6)和式(1-12)可以看出,火箭质量比 Λ 和比冲 I_{sp} 与火箭关机时的速度增量成正比,是推进系统的两个重要性能参数,直接关系到发射任务的成败及发射成本。因化学推进剂能量密度低,使得推进系统需要携带大量的推进剂。目前液体和固体化学火箭发动机所携带的燃料要占到总重量的90%以上,而有效载荷只占1%~1.5%。这使得传统化学火箭近地轨道入轨的成本在10000美元/kg~20000美元/kg,而地球同步轨道入轨成本则高达60000美元/kg~120000美元/kg。

同样由于能量密度低,目前化学火箭的喷气速度已接近极限,比冲一般为200s~500s,必须有2级~3级火箭持续加速才能将航天器送入轨道。而未来的星际探测任务要求航天器的比冲为10000s~3000000s,即便是单级入轨到地球同步轨道,也大大超出了传统化学推进技术的性能范围,必须发展具有更高推进性能,尤其是具有更高比冲的新型推进技术。

在各种先进航天推进技术中,电推进的比冲为1000s~10000s,核裂变推进的比冲为1000s左右,反物质推进的比冲为10000s左右,这些让学者们看到了先进航天推进技术的巨大发展空间。

除增大比冲外,还有几种获得较大速度增量的方式。其一为降低推进系统的干质量,如使用充气式结构、微推进组件、定向能推进(激光推进和微波推进,这种推进方式中,能源系统与飞行器系统是分离的)等;其二是减小必须通过推进系统本身提供的速度增量,如利用空气动力来减速,或者利用气动引力来加速,也是获得较大速度增量 ΔV_{id} 的有效方式,或者是速度增量 ΔV 的一部分可以从飞行器本身转移到地基或者空基系统,如弹射和系留发射方式就可以做到这一点。

这里需要指出的是,火箭方程中假设所有推进剂都是飞行器自身携带的,而实际情况并不是完全如此。如喷气式发动机携带的燃料很少,因为它可通过吸入大量“自由”空气作为工质。同样,在太空中也可以利用一些外在的能量(如

太阳能)、冲量(太阳帆)或者推进剂(从月球或者火星的资源中获得),以获得更好的推进效果。这样我们可设想一个推进系统在起飞的时候不携带任何推进剂,在其“太空旅行”过程中利用外在源源不断的能量、物质等,就可以出色完成推进任务,这将是人类航天发展的最理想阶段。

先进航天推进技术的分类见表1-1。

表1-1 先进航天推进技术的分类

类 型	提高比冲	降低系统干质量	获得初速度	利用太空资源
先进化学推进	√	—	—	—
核推进	√	—	—	—
电推进	√	—	—	—
微推进	—	√	—	—
激光推进	—	√	—	—
微波推进	—	√	—	—
帆推进	—	—	—	√
气动引力助推	—	—	√	—
系留	—	—	√	—
外层空间资源利用	—	—	—	√
新理论	—	—	—	√

1.4 先进航天推进技术简介

先进航天推进技术是相对于传统的化学推进技术而言的,目前世界各国正在竞相研究各种先进航天推进技术,以满足未来太空探索的需要。

1. 激光推进——把航天器“照”入太空

激光推进是航天器接受远距离发射出的高能激光,经聚焦使能量集中,用以加热工质,利用热膨胀原理产生推力的先进航天推进技术。

与传统的化学推进相比,激光推进最突出的优点是能源与工质分离。作为能源的激光器无需航天器自身携带,航天器在大气层中飞行时,吸入空气作为工质,在穿越大气层后,只需少量工质即可工作。这将极大地简化推进系统的结构,增强安全可靠,提高有效载荷比。激光推进的有效载荷大于15%,发射费用仅为数百美元/kg。

2. 微波推进——把能量传给航天器

微波推进技术是依赖于微波发生器产生的微波能量作为推进器所需能源。