



航天科技图书出版基金资助出版

先进的推进系统与技术： 从现在到2020年

[意] 克劳迪奥·布鲁诺 编
[法] 安东尼奥·G·阿塞图拉 译
侯晓 等



AIAA



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

先进的推进系统与技术： 从现在到 2020 年

[意] 克劳迪奥·布鲁诺
[法] 安东尼奥·G·阿塞图拉

编

侯晓 等 译



中国宇航出版社

· 北 京 ·

Translated from the English language edition:
Advanced Propulsion Systems and Technologies, today to 2020
Edited By Claudio Bruno and Antonio G. Accettura
Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
ISBN 978 - 1 - 56347 - 929 - 8
Copyright © 2008 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
All rights reserved.

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行, 未经出版者书面许可, 任何个人或组织不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。
著作权合同登记号: 图字 01-2012-6560

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

先进的推进系统与技术: 从现在到 2020 年 / (意) 布鲁诺 (Bruno, C.), (法) 阿塞图拉 (Accettura, A. G.) 编; 侯晓等译. --北京: 中国宇航出版社, 2012.9

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0291 - 3

I. ①先… II. ①布… ②阿… ③侯… III. ①推进系统—研究
IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 216708 号

责任编辑 曹晓勇 彭晨光 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版社	中国宇航出版社	
社址	北京市阜成路 8 号 (010)68768548	邮 编 100830
网 址	www.caphbook.com	
经 销	新华书店	
发行部	(010)68371900 (010)68768541	(010)88530478(传真) (010)68767294(传真)
零售店	读者服务部 (010)68371105	北京宇航文苑 (010)62529336
承 印	北京画中国画印刷有限公司	
版 次	2012 年 9 月第 1 版	2012 年 9 月第 1 次印刷
规 格	880 × 1230	开 本 1/32
印 张	19.5	字 数 538 千字
书 号	ISBN 978 - 7 - 5159 - 0291 - 3	
定 价	128.00 元	

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

**谨以此书祝贺中国航天固体动力事业创建
暨航天科技集团第四研究院建院 50 周年！**

译 序

本书源自 1999 年欧洲空间局提出的一项计划，旨在预测未来 20 年中哪种类型的推进系统是最具潜力的。欧洲空间局给该计划命名为“推进计划 2000”，由菲亚特公司 [现在的艾维欧 (Avio)]、罗马大学机械与航空系 (MDA)、德国航空航天中心 (DLR)、法国的欧洲咨询公司 (Euroconsult)、意大利的 Centropazio [现在的奥塔 (Alta)]、英国的 EDOTEK 以及俄罗斯克尔德什 (Keldysh) 研究中心等机构共同开展研究。2003 年 2 月该计划结束后，有关该计划的研究报告相继在美国航空航天学会 (AIAA) 和国际宇航联合会议上发表。2005 年底，在征得欧洲空间局同意后，由美国航空航天学会将本计划的研究工作出版成书。

本书共分为 17 章，每章由一个或多个机构的人员合作编写。书中介绍了一些重要和先进的专题，如：先进的固体火箭发动机、先进的低温发动机、绿色推进剂、微推进系统、太阳能热推进技术、电推进系统、核推进技术、激光推进系统、就地资源利用技术等，这些专题对于从事推进技术研发的科研人员具有重要的参考价值，是推进领域非常有价值的技术专著。

在未来 10~20 年间，推进技术的发展仍主要在运载工具方面。从动力系统来看，运载火箭都采用起飞级和主发动机两级或三级结构。液氧/煤油发动机和固体发动机常用作起飞级，液氧/液氢发动机用作主级和上面级。在实际航天活动中大量应用的是中型运载工具。其中，西方工业发达国家受美国影响，都采用了固体助推器为起飞级，液氧/液氢发动机为主级的模式，如美国的航天飞机、大力神-IVB、宇宙神-5、德尔它-4，法国的阿里安-5，日本的 H2-B

等。俄罗斯和中国的运载工具大多采用传统的捆绑液体助推器。俄国的联盟号、质子号、安加拉，中国的长征-5，都采用液氧/煤油为起飞级，液氧/液氢为主级的动力模式。

随着登月和探索火星活动的开展，重型运载火箭的研制已提上日程。可称为重型运载工具的，只有当年美国阿波罗登月计划中的土星-5 火箭和苏联能源号火箭。土星-5 的低地球轨道（LEO）有效载荷达到 100 t 以上，其动力系统模式采用以 700 t 级的液氧/煤油发动机 F-1 为起飞级，100 t 级的 J-2 液氧/液氢发动机为主级的模式。

世界航天活动的发展历史表明，大推力液氧/煤油发动机和液氧/液氢发动机是航天运载火箭的主力。美国在液氧/液氢发动机技术方面领先，率先研制成功土星-5 火箭的液氧/液氢主发动机 J-2 和航天飞机主发动机（SSME）。俄罗斯（苏联）则在液氧/煤油高压补燃发动机技术方面领先，相继研制成功了 150 t 级的 NK-33、800 t 级的 RD-170 和 400 t 级的 RD-180 发动机，并提出了低地球轨道运载能力 125 t 级的阿穆尔重型运载火箭方案。近年来，美国、中国、欧洲、印度、日本和韩国相继引进了俄罗斯液氧/煤油高压补燃发动机技术。中国有关院所也提出了研制重型运载工具大推力运载火箭的 600 t 级液氧/煤油发动机和 200 t 级的液氧/液氢发动机的设想。

2011 年 9 月 14 日，美国国家航空航天局宣布了新的航天发射系统（SLS）方案。它采用航天飞机技术和土星-5 改进型方案，即以航天飞机固体发动机或 AJ-26（NK-33）液氧/煤油发动机为起飞级，液氧/液氢为主级的方案。低地球轨道运载能力 130 t。预计 2025~2030 年飞向火星。

美国和欧洲自 20 世纪 60 年代起发展大型分段式固体助推器，应用于航天飞机、大力神-34D、阿里安-5 等型号。当前，经济技术发达国家的航天运载工具大都采用整体式碳纤维壳体固体助推器，如宇宙神-5、德尔它-4 和 H2-A、B 等。它减轻了壳体质量，避免了

分段式的工艺和技术问题，提高了发动机性能。因为对于地面状态的固体发动机，可以用提高工作压强、加大喷管扩张比的方法来提
高比冲。而这一措施只有采用高强碳纤维壳体才能实现。这时不但
提高了比冲，同时减轻了结构质量，因而得到广泛应用。

2012年2月13日，采用三级固体发动机的织女星运载火箭发射
成功。其中，第一级发动机P80采用了碳纤维复合材料壳体等多项
先进技术。总质量95 t，推进剂质量88 t，是当前装药量最大的碳纤
维整体式固体发动机。

以上各项技术在本书第1章到第7章中有详细论述。本书的写
作已有十年，但由于航天技术的继承性和连续性，其内容并不老旧。

在微推力发动机方面，其主要应用在深空探测方面。例如，核
推进的鲁比亚（Rubbia）发动机是一个能进行长时间飞行的有效推
进系统，有希望用于火星飞行。

当前美国重点发展“超燃冲压发动机技术”计划，其中，吸气
式推进技术和超高速远程巡航导弹（X51A）引人关注，有兴趣的读
者可参考有关超燃冲压发动机技术专著。

阮崇智

2012年5月

译者前言

航天是人类在 20 世纪所取得的巨大成就之一，借助航天技术，人类实现了人造卫星、载人航天和载人登月等辉煌壮举，航天技术已经和人们的日常生活密不可分。以化学能为代表的航天动力技术为这些成就的取得发挥了巨大的推动作用，但对进一步探索茫茫宇宙而言，现有的火箭或空间飞行器仍显得力不从心，距人们希望飞得更远、飞得更快、飞行更经济还有差距。航天科技人员并没有满足已取得的成绩，而是在人类迈向 21 世纪之时，深入思考航天动力未来怎么发展。

本书就是欧洲空间局为寻找未来 20 年最有前途的动力技术，组织多家欧洲航天研究机构历时 3 年进行研究所取得的一系列成果汇编。其研究的航天动力技术包括固体火箭发动机、液体火箭发动机、组合动力、电推进、核推进和太阳能推进，涵盖了当前人类所能认识的航天动力全部技术，讨论了各种动力技术未来发展方向，同时就不同航天任务下采用的动力选择方案进行了比较。因此，本书是从事航天动力技术研究人员一本难得的优秀参考书。

本书由中国航天科技集团公司第四研究院第四十七研究所组织翻译、校对和审核工作。参加翻译的人员有：侯晓（第 1、第 2 章）、吕耀辉（第 4、第 12 章）、孟雅桃（第 6、第 7 章）、王伟平（第 8 章）、霍菲（第 9 章）、姚彦君（第 10 章）、蒋晓琼（第 11 章）、林志远（第 13 章）、宋春霞（第 15 章）、陈怡（第 16 章）、吴智慧（第 17 章），另外第 3 章、第 5 章和第 14 章是由多人合译。校对人员有：雷宁、姚彦君、闫大庆。全书由中国航天科技集团第四研究院副院长侯晓研究员总审定，并由雷宁、孟雅桃最后统稿。

本书的翻译出版得到我国航天界著名老专家叶定友研究员的大力推荐，航天动力老专家阮崇智研究员给予了热情指导并为本书作序，师经国研究员对本书的出版工作给予了热情支持。

这里我们对四十七所的王照斌、徐丹丹、薛金星、吕硕、赵春来、刘静宇以及所有关心和帮助本书中文版翻译出版的同行表示诚挚的谢意。我们还要特别感谢中国宇航出版社促成了本书的翻译出版。

由于我们水平有限，在翻译中难免有错误之处，恳请读者指正。

译 者

2012 年 7 月

前 言

不可能有比空气更重的飞行装置。

——开尔文爵士

许多读者可能会想：为什么需要先进的推进技术？目前的推进系统对于现有的任务来说似乎能够胜任、很安全并且相当可靠。它们将有效载荷送入低地球轨道和同步轨道，还将轻质低动力星际探测器发射入空。但是未来呢？性能、响应，尤其是成本又会怎么样呢？

由于运载火箭会消耗掉很多推进剂，人们意识到推进系统既是进入太空的一个重要手段，也是进入太空的瓶颈。目前，可选择的方案有两种，一种是大推力和低比冲（如化学系统），另一种是高比冲和很低推力（如电推进），因此，先进的（即广泛意义上的）推进技术对经济和任务需求来说都很重要，它最终将降低把有效载荷送入轨道的成本。就欧洲国家来说，这项工作已经开展，在先进推进系统方面的投资能够使得欧洲获得经验，掌握生产技术并处于领先地位。

实际上，该书是应欧洲空间局（ESA）1999年发布的意见征询请求而编写的，设想哪种推进类型在未来20年中是最有希望的、最便利的，包括其对太空市场的影响。因而，其最终的目标是给研究机构和工业部门提示投资领域。两个主要的竞争团队采用了竞标方式，竞标的获胜方是由意大利的艾维欧公司、罗马大学的机械与航空系、德国航空航天中心、法国的欧洲咨询公司、意大利的奥塔责任公司、英国的EDOTEK以及俄罗斯克尔德什研究中心等构成的联合体。欧洲空间局给出的该计划的官方名称为推进计划（Propul-

sion) 2000; 在 2003 年 2 月完成了该项计划后, 各方开始讨论这项工作中得出结论的意义和重要性, 相关的论文在美国航空航天学会和国际宇航联 (IAF) 会议上已得到发表; 最后, 在 2005 年末, 两位编者向欧洲空间局的 YPA 和 TEC—MP 部门提出将这项工作成果出版的请求, 在审议后, 欧洲空间局慷慨表示同意; 与此同时, 美国航空航天学会同意作为该书的出版商, 这就是此书的来历。

本书中每个主题章节由上述的一个或多个机构的人员合作编写, 由编者核对, 并进行了适当的修改。各位作者都努力避免将属于各自机构的专利技术过于强调或“促销”, 在这种意义上, 编者向每位作者表示感谢, 感谢他们良好愿望及努力, 也感谢他们简洁的文字工作。事实上, 这本书可能很容易变成推进技术方面的专著, 但这并不是该项目时间框架内要实现的目标, 也不是美国航空航天学会所追求的。

推进计划 2000 所涉及的范围从战略意义上看是很雄心勃勃的: 探索先进的推进系统, 确认关键技术, 定义任务方案, 进行市场调查和折中研究, 并且为未来 20 年确定最有前途的推进系统。编者们希望通过这本书至少可达到其中一些目标。最后, 还要感谢美国航空航天学会教材咨询委员会的领导乔·舍特茨 (Joe Schetz)、美国航空航天学会航空航天进展系列的总编辑弗兰克·鲁 (Frank Lu), 感谢他们对本书的支持和鼓励, 还要感谢罗杰·威廉斯 (Rodger Williams) 在原稿准备期间的长期关心和帮助。

安东尼奥·G·阿塞图拉

法国阿里安航天公司事务经营经理

克劳迪奥·布鲁诺

意大利罗马智德大学航天工程学院教授

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 推进系统概论	2
1.2 任务方案	6
1.3 适用性分析矩阵	11
1.4 折中分析	18
1.5 结果	26
1.6 结论与经验	30
参考文献	33
第 2 章 先进的固体火箭发动机	34
2.1 方案	34
2.2 市场需求/预计任务	38
2.3 系统分析	40
2.4 关键技术和技术成熟度	42
2.4.1 新型推进剂系列	42
2.4.2 替代型原材料	42
2.4.3 低环境冲击的先进固体推进剂	49
2.4.4 连续浇注	50
2.4.5 半连续浇注工艺	51
2.4.6 连续浇注工艺	53
2.4.7 固体火箭发动机的复合材料壳体	54
2.4.8 固体火箭发动机复合材料壳体设计与发展	55
2.4.9 复合材料壳体技术	57

2.5 预期研制验证的成本和时间框架	57
2.6 技术路标	59
参考文献	62
第 3 章 先进的低温发动机	64
3.1 引言	64
3.2 总体方案	65
3.2.1 运载火箭方案	65
3.2.2 推进方案	66
3.2.3 优势	69
3.3 发动机性能及相关技术	69
3.3.1 发动机循环	69
3.3.2 启动技术	70
3.4 技术分析	72
3.4.1 技术可行性	72
3.4.2 碳纤维增强碳推力室衬层发汗冷却	72
3.4.3 隔热涂层	75
3.4.4 燃烧室衬层优化	78
3.4.5 先进喷管	79
3.5 燃烧室技术总结	81
3.5.1 采用碳纤维增强碳发汗冷却	81
3.5.2 隔热涂层	82
3.5.3 喷涂成型	82
3.5.4 燃烧室衬层优化	82
3.5.5 先进喷管	83
3.6 其他液体火箭发动机关键技术：低温贮箱和涡轮泵	83
3.6.1 低温贮箱技术	85
3.6.2 涡轮泵技术	92
3.7 液体火箭发动机系统分析	99
3.7.1 设计和基本要求	100

3.7.2 分级燃烧循环	103
3.8 发动机水平总结	109
参考文献	114
第4章 助推器和上面级用先进液氧/烃发动机	120
4.1 方案	120
4.1.1 液氧/煤油发动机	120
4.1.2 液氧/甲烷发动机	121
4.2 市场需求与预计任务	123
4.3 系统分析	123
4.4 设计和工作要求	131
4.4.1 助推器/主发动机	131
4.4.2 上面级	132
4.5 关键技术和技术成熟度	135
4.6 能力	136
4.7 预期研制验证的成本和时间框架	137
4.8 结论与建议	143
4.9 路线图	145
参考文献	148
第5章 俄罗斯液氧/烃发动机	151
5.1 俄罗斯运载级用液氧/烃液体发动机	151
5.1.1 引言	151
5.1.2 俄罗斯运载级用液氧/烃发动机回顾——简述、主要 结构及操作要求	152
5.1.3 液氧/液烃发动机主要问题及其解决途径	163
5.1.4 发动机循环评估	165
5.1.5 发动机成本估算	167
5.1.6 发动机研制的主要阶段	167
5.1.7 运载级液体火箭发动机进展展望	169

5.1.8 结论	172
5.2 俄罗斯上面级用液氧/烃发动机	172
5.2.1 引言	172
5.2.2 俄罗斯上面级液氧/烃发动机回顾——描述、主要设计 标准及操作要求	173
5.2.3 液体火箭发动机研制主要问题及其解决途径	188
5.2.4 发动机循环评估	190
5.2.5 发动机成本估算	192
5.2.6 发动机研制的主要阶段	192
5.2.7 上面级液体火箭发动机的研制前景	193
5.2.8 结论	194
参考文献	196
第 6 章 绿色推进剂	198
6.1 背景	198
6.2 市场需求和计划任务	201
6.3 设计和操作需求	201
6.4 关键技术和技术成熟度	203
6.5 能力	203
6.6 预期的发展、验证成本及时间框架	204
6.7 结论与建议	204
6.8 未来的发展蓝图	205
参考文献	207
第 7 章 俄罗斯的绿色推进剂	209
7.1 环保型绿色推进剂的定义	209
7.1.1 环保型氧化剂的物理化学性能和操作特性	210
7.1.2 环保型燃料的物理化学性能和操作特性	213
7.2 过氧化氢液体火箭发动机的方案和设计实例	215
7.3 绿色推进剂的应用领域	216

7.4 结论	217
参考文献	218
第8章 微推进系统	220
8.1 引言	220
8.2 微推进系统选择	221
8.3 自由分子微型电阻加热电离式发动机	224
8.4 化学推进	227
8.5 冷气推进器	230
8.6 α 推进器	233
8.7 场发射电推进	236
8.8 技术问题	240
8.8.1 微型阀	240
8.8.2 微型阀技术方案	242
8.9 微推进方案	242
8.9.1 任务	243
8.9.2 微推进系统和任务	245
8.9.3 技术现状和开发商及制造商	246
8.9.4 集成	249
8.9.5 市场	250
8.10 关键研发领域和结论	252
参考文献	254
第9章 上面级用太阳能热推进技术	257
9.1 引言	257
9.2 总体方案	258
9.2.1 聚光器	259
9.2.2 吸收器/接收器	260
9.2.3 性能	261
9.3 主要应用	261
9.3.1 轨道转移级	261