

学

术

著

作

丛

书

*Development of Reusable
Launch Vehicle Technology*

可重复使用运载器研究进展

王振国 罗世彬 吴建军 编著

国防科技大学出版社

国防科技大学学术
专著专项经费资助出版

可重复使用运载器研究进展

王振国 罗世彬 吴建军 编著

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

可重复使用运载器研究进展/王振国,罗世彬,吴建军编著. —长沙:国防科技大学出版社,2004.12

ISBN 7-81099-148-5

I.可… II.①王…②罗…③吴… III.重复使用运载火箭—研究 IV.V475.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 121490 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:何晋 责任校对:黄煌

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:10.5 字数:289千

2004年12月第1版第1次印刷 印数:1-1200册

ISBN 7-81099-148-5/V·2

定价:28.00元

序

航天运载技术的发展,把人类的活动领域扩展到太空,使人类认识自然和利用外层空间的能力发生了质的飞跃。航天运载系统十分复杂,除了美国的航天飞机能够实现部分重复使用外,其余的航天运载系统(运载火箭)都是一次性使用的,致使航天运载费用十分高昂,阻碍了大规模航天应用的展开。倘若航天运载系统能够重复使用,那么航天运载费用就可以大幅度降低,因此发展可重复使用运载器势在必行。

可重复使用运载器的概念早在 20 世纪中叶就提出来了,但由于推进、材料、制造、回收等技术的限制,到目前为止还没有研制出完全可重复使用的运载器。在 50 多年的发展历程中,可重复使用运载器研究经历了几个阶段,取得了一系列研究成果。航天飞机是第一代可重复使用运载器,但只有部分部件可以重复使用,没能实现降低运载费用的初衷。“挑战者”号和“哥伦比亚”号航天飞机爆炸的惨痛悲剧,说明第一代可重复使用运载器的安全性亟待提高。目前各国正在开展第二代可重复使用运载器的研究,希望能够将单位质量有效载荷运载费用降低到目前的十分之一,同时运载器的安全性提高一百倍。这是一个很高的指标,充满了强大的吸引力,要实现它需要突破一系列的技术难题,还有较长的路要走。美国 NASA 的 X-33 等研究计划的下马,说明可重复使用运载器,尤其是单级入轨可重复使用运载器的关键技术所面对的风险依然存在。

目前国际范围内可重复使用运载器技术研究暂时处于低谷,各国正在重新调整研究方向,采取更为稳妥的研究策略,循序渐进

地突破可重复使用运载器的关键技术。“山重水复疑无路,柳暗花明又一村。”科学技术发展的历程,往往是螺旋式前进的。可重复使用是运载器发展的必然方向。有理由相信,在经历一段时间的沉寂之后,必将迎来可重复使用运载器的新一轮研究热潮,快速、可靠、廉价地进入空间的目标也一定能够实现。

可重复使用运载器技术是一门正在迅速发展的高技术,涉及的关键技术问题很多,目前还没有专门介绍可重复使用运载器技术的著作问世。本书系统地总结了各国可重复使用运载器技术的研究进展,重点从关键技术的确定、演示验证的途径和研究策略的角度进行分析,对有志从事之方面研究的学者和工程技术人员有很强的参考价值。本书在政策层面上的介绍较为详尽,而在技术层面上的探讨稍显薄弱,但作为第一本论述可重复使用运载器技术的著作,已难能可贵。

我国的可重复使用运载器技术研究刚起步,在某些技术方向还处于空白。无疑,本书的出版将有助于科技人才借鉴国外的研究经验,少走弯路。可重复使用运载器是一个全新的领域,本书将有利于吸引更多的科技人才投身到这个研究领域中来,迅速了解当前研究前沿,大胆创新,踏实钻研,为推动我国的可重复使用运载器技术发展做出贡献。

中国科学院院士

庄逢辰

2003年5月9日于长沙

前 言

目前使用的航天运载系统,除了航天飞机外(部分可重复使用),都是一次性使用的。一次性使用运载器的产品制造费用占发射总费用的很大比例。例如法国的阿里安火箭,产品制造费用占每次发射总费用的 81.4%,而发射操作费用只占 15%,其它费用占 3.6%。因此降低发射成本的一个最有效途径就是降低运载火箭的硬件成本。但是以目前的技术水平,要大幅度降低一次性使用运载器(ELV)的硬件成本是不可能的。即便是发展改进型一次性使用运载器(EELV)也不可能大幅度地降低硬件成本。如果运载器能够重复使用,那么就可以将运载器的硬件成本分摊到每次发射上,单次发射的硬件成本就降低了,从而也就实现了降低单次发射总费用的目标。从 20 世纪 50 年代起,就有航天专家提出要发展可重复使用运载器(RLV),以彻底降低高昂的空间运输费用。

在过去的 30 多年里,各国航天专家开展了大量的可重复使用运载器系统研究,一致认为可重复使用运载器是航天运载器发展的必然方向,研制和使用可重复使用运载器是大幅度降低进入空间费用最有效的手段,也是实现大规模航天应用的前提。当前,各国发展可重复使用运载器的一个重要目标是将单位质量有效载荷运载费用降低到目前的十分之一,甚至更低的水平,为大规模空间应用铺平道路。研制可重复使用运载器的技术难度很大,需要多方面的技术支持。在过去的十几年里,推进、结构材料、制造、操纵、制导、导航、回收等技术取得了显著的进展,使得研制可重复使用运载器接近实现的可能。

我们对可重复使用运载器技术进行了长时间的跟踪研究,收

集了国外在可重复使用运载器研究领域的大量文献资料,对该领域的最新进展和发展趋势给予了特别的关注。可重复使用运载器代表了运载器技术发展的必然方向,受到了各航天大国的高度重视,但同时该技术又是一个全新的高技术领域,其设计理论、研究方法都还没有形成成熟的理论,国内在可重复使用运载器技术领域开展的研究工作不多,很有必要广泛地了解世界各国可重复使用运载器研究进展,学习其有益经验。

国内目前还没有关于可重复使用运载器的著作,本书正好填补这个空白。本书在统一的框架下系统地论述了可重复使用运载器技术的研究进展,并逐一从各国发展可重复使用运载器的历史背景、发展战略、指导思想、技术途径、研究特点及发展趋势等方面进行了分析。在论证各国发展可重复使用运载器的技术途径时,着重分析了各国进行关键技术攻关,以及如何制定关键技术演示验证途径和策略的情况。

本书共分十章,第一章从全局上介绍了可重复使用运载器国外研究概况。第二章到第八章分别系统地介绍了美国、日本、欧空局、俄罗斯、法国、英国、德国的可重复使用运载器研究进展。第九章专门分析了商业公司开展可重复使用运载器研究的情况。第十章对本书研究内容进行了总结,并对我国开展可重复使用运载器研究提出了建议。

可重复使用运载器技术是一门正在迅速发展的高技术,它的研制涉及的关键技术问题很多,而且这些问题又都有其特定的先进性和复杂性。到目前为止,我们的研究才刚刚起步,对不少问题的认识还停留在比较肤浅的水平上。我们衷心希望本书能够起到抛砖引玉的作用,吸引更多的科技人才投身到这个研究领域中来,为推动我国可重复使用运载器技术的迅速发展做出贡献。

本书在编写过程中,得到了许多专家的指导和帮助,尤其是得到了航天同行的支持,在此一并表示感谢。

限于作者的学识水平,书中一定还有不少错误或欠完善之处,
敬请广大读者不吝指正。

王振国 罗世彬 吴建军

2001 年 3 月于长沙

目 录

第 1 章 可重复使用运载器国外研究概况

1.1 历史与现状	(1)
1.2 各国 RLV 研究的特点	(13)
1.2.1 美 国	(13)
1.2.2 日 本	(16)
1.2.3 欧空局	(17)
1.2.4 俄罗斯	(18)
1.3 RLV 研究发展趋势	(18)

第 2 章 美国可重复使用运载器研究

2.1 第一代到第四代可重复使用运载器介绍	(25)
2.1.1 第一代可重复使用运载器(航天飞机)	(25)
2.1.2 第二代可重复使用运载器	(30)
2.1.3 第三代可重复使用运载器	(38)
2.1.4 第四代可重复使用运载器	(43)
2.2 第一代可重复使用运载系统——航天飞机	(44)
2.3 NASP 计划及后续吸气式高超声速推进研究计划	(50)
2.3.1 NASP 计划简介	(50)
2.3.2 NASP 计划的起源、发展和失败	(51)
2.3.3 后续吸气式高超声速推进研究计划	(58)

2.4	美国发展 RLV 的相关政策及 RLV 计划	(64)
2.4.1	美国发展 RLV 的相关政策	(64)
2.4.2	RLV 计划	(65)
2.4.3	RLV 技术验证计划	(69)
2.5	DC-XA 技术验证计划	(70)
2.6	航天飞机技术试验台	(71)
2.7	X-33 技术验证计划	(73)
2.7.1	X-33 技术验证计划简介	(73)
2.7.2	X-33 先进技术验证机	(75)
2.7.3	X-33/“冒险之星”RLV 方案	(79)
2.7.4	NASA 实施 X-33/RLV 计划的背景	(80)
2.7.5	开展 X-33 计划的意义	(83)
2.7.6	NASA 选择洛克希德·马丁公司的 X-33 方案的原因	(86)
2.7.7	X-33/RLV 技术性能和参数	(88)
2.7.8	X-33 总体结构及配置	(90)
2.7.9	X-33 的气动设计	(91)
2.7.10	X-33 结构材料与防热系统	(92)
2.7.11	直排式气动塞式喷管发动机	(94)
2.7.12	X-33/RLV 计划的最新进展(首次试验飞行推迟情况)	(96)
2.7.13	X-33 验证机和“冒险之星”主要的技术困难	(102)
2.7.14	修正性能要求	(103)
2.7.15	设计 X-33 的改进型 X-33B	(105)
2.7.16	“冒险之星”用于支持国际空间站,NASA 面临的问题	(105)
2.7.17	“冒险之星”成员舱的要求	(105)
2.7.18	“冒险之星”对空间站性能的影响	(107)
2.7.19	X-33 计划的结果支持发展可重复使用运载器	(108)
2.7.20	小 结	(109)
2.7.21	评 估	(110)
2.8	X-34 小型技术验证机计划	(111)

2.8.1	X-34 小型技术验证机计划的背景及简介	(111)
2.8.2	X-34 计划的目标	(117)
2.8.3	X-34 技术验证机的关键技术	(118)
2.8.4	低费用的操作	(119)
2.8.5	技术说明	(119)
2.8.6	X-34 计划的技术目标	(120)
2.8.7	独特的系统构成及发射方式	(122)
2.8.8	飞行试验	(123)
2.8.9	小 结	(125)
2.9	X-37 计划	(126)
2.10	X-38 计划	(130)
2.11	Future-X 计划	(135)
2.11.1	Future-X 计划的背景	(135)
2.11.2	Future-X 计划简介	(136)
2.12	小型空间飞机计划(X-40A)	(143)
2.13	可重复使用的第一级	(144)
2.14	小 结	(147)

第3章 日本可重复使用运载器研究

3.1	日本天地往返运输系统(STS)研究情况简介	(152)
3.1.1	情况简介	(152)
3.1.2	日本的发展思路	(155)
3.1.3	日本的技术现状	(156)
3.2	日本重复使用技术验证过程	(157)
3.2.1	HOPE-X 计划	(159)
3.2.2	主要关键技术	(160)
3.2.3	重复使用火箭系统实验飞行器	(162)
3.2.4	方案系统研究	(162)
3.3	HOPE 计划	(162)

3.3.1 HOPE 计划简介	(162)
3.3.2 HOPE 计划的先期飞行试验	(163)
3.3.3 HOPE - X 飞行器	(167)
3.3.4 HOPE - X 计划的变更及设计改进	(172)
3.3.5 高速飞行验证机计划	(176)
3.3.6 小 结	(177)
3.4 NASDA 的火箭单级入轨方案研究	(178)
3.4.1 基本任务要求	(179)
3.4.2 方案研究	(179)
3.4.3 技术研究工作	(182)
3.5 NAL 在 RLV 方面的研究工作	(183)
3.5.1 NAL 在 RLV 推进系统方面的研究工作	(183)
3.5.2 NAL 的 SSTO 空天飞机方案	(185)
3.6 ISAS 在 RLV 方面的研究工作	(188)
3.6.1 可重复使用探空火箭方案	(188)
3.6.2 TSTO 型空天飞机方案	(189)
3.6.3 ATREX 发动机研制和飞行试验	(190)
3.7 小 结	(192)

第 4 章 欧空局可重复使用运载器研究

4.1 FESTIP 计划	(193)
4.1.1 FESTIP 计划简介	(193)
4.1.2 FESTIP 计划主要任务	(200)
4.1.3 FESTIP 系统研究的要求	(201)
4.1.4 系统方案研究	(202)
4.1.5 方案的预选	(204)
4.1.6 方案设计研究	(205)
4.1.7 方案选择准则、全局的对比和优选的一类方案	(210)

4.1.8 FESTIP 技术研究	(211)
4.1.9 选择方案	(212)
4.1.10 欧空局对可重复使用运载器的认识	(212)
4.1.11 推进系统	(214)
4.1.12 小 结	(217)
4.2 FLTP 计划	(218)
4.3 小 结	(218)

第 5 章 俄罗斯可重复使用运载器研究

5.1 俄罗斯可重复使用运载器研究简介	(219)
5.2 ORYOL 计划	(223)
5.2.1 ORYOL 计划简介及与欧空局 FESTIP 计划的合作	(223)
5.2.2 ORYOL 计划的目的	(225)
5.2.3 有发展希望的 RSTS 需要的性能	(226)
5.2.4 先进发动机和推进系统研究	(234)
5.2.5 关键问题研究	(236)
5.2.6 飞行试验	(237)
5.2.7 小 结	(237)
5.3 小 结	(238)

第 6 章 法国可重复使用运载器研究

第 7 章 英国可重复使用运载器研究

7.1 英国近期可重复使用运载器研究介绍	(260)
7.2 英国空天飞机方案研究情况介绍	(263)
7.2.1 英国的空天飞机方案	(264)
7.2.2 英国的升力体方案	(265)
7.2.3 英国的乘波体方案	(266)

第 8 章 德国可重复使用运载器研究

第 9 章 商业公司可重复使用运载器研究

9.1 Kistler 航宇公司的 K-1 可重复使用运载器	(276)
9.1.1 背景介绍	(276)
9.1.2 商业前景	(279)
9.1.3 K-1 可重复使用运载器概况	(281)
9.1.4 K-1 可重复使用运载器的设计思想	(285)
9.1.5 K-1 可重复使用运载器的研制进度安排	(293)
9.1.6 K-1 可重复使用运载器的推进系统	(296)
9.1.7 小 结	(297)
9.2 Kelly 空间技术公司的 Astroliner 可重复使用运载器	(299)
9.2.1 独特的空中拖曳发射方式	(299)
9.2.2 Astroliner 系统组成	(301)
9.3 Rotary 火箭公司的 Roton 可重复使用运载器	(304)
9.3.1 “旋子”(Roton)的结构布局	(305)
9.3.2 大气层试验飞行器	(307)
9.3.3 资金问题	(309)
9.3.4 “旋子”可重复使用运载器主要数据	(310)
9.4 Pioneer 火箭飞机公司的 Pathfinder 部分可重复使用 运载器	(311)
9.5 小 结	(311)
第 10 章 研究总结及建议	(314)
附 录	(319)

第 1 章 可重复使用运载器 国外研究概况

1.1 历史与现状

航天技术作为重要的高技术领域之一,不仅体现了一个国家的科技实力与工业基础,同时也是一个国家的政治地位与军事力量的有力象征,是国家综合国力的重要组成部分。21 世纪国与国的竞争必将是综合国力的较量,各航天大国在航天领域展开的激烈竞争,实际上都具有提高自己国家综合国力的意图。作为航天技术首要的和最基本的组成部分,航天运载器系统长期以来得到了各航天大国的充分重视。事实证明,几乎每一次航天史上的巨大成功,都是以运载器技术的新的进步作为背景和前提的。

进入 20 世纪 90 年代,随着前苏联的解体,“冷战”结束,世界的政治、军事格局发生了较大的变化,航天技术的竞争由追求“轰动效应”的发展模式逐步转向了理性化的综合能力的竞争。各航天大国都为能在国际航天技术舞台占有一席之地、抢占技术制高点而不断调整自己的发展计划,展开激烈竞争。新形势下,政治、军事、科技、经济等需求的变化,特别是军事航天应用的迅速发展,对航天运载器在经济性、可靠性和可操作性等方面提出了新的、更高的要求。

目前世界军事航天应用的发展正处在一个转折点,未来的高技术战争将从海、陆、空扩展到太空。而太空对战争的作用,将从单纯的空间支援逐步转向空间作战。美国已经认识到这一点,在

进入 21 世纪之前,美国先后出台了一系列新世纪空间发展战略。美国面向 21 世纪的空间军事战略是:在最大限度地发挥空间支援作战作用的同时,发展和利用空间的攻击与防御能力,以牢固控制空间,并以此来达到控制全球的目的。各航天大国都认识到:欲控制地球,必先控制太空。新的军事航天应用需求对航天运载系统所提出的新的、更高的要求是:快速、可靠、廉价地进入空间。

纵观目前世界上所有运行中的运载系统,除了美国的航天飞机能够部分重复使用外,其余的运载系统(运载火箭)都是一次性使用的,即每发射一次就要彻底地消耗掉一枚运载火箭。一次性使用运载器发射准备周期过长、可靠性低、发射费用过高,显然无法满足新时期对航天运载器快速、可靠、廉价地进入空间的总要求。鉴于一次性使用运载器存在的问题,各航天大国纷纷着手发展可重复使用运载器(以下简称 RLV)。RLV 能够重复使用,可以将运载器部件的成本分摊到每次发射上,从而达到降低每次发射费用的目的;RLV 的可靠性能够在多次使用中得到很好的检验,可以确保较高的可靠性;RLV 的运行和发射系统将大大简化,发射准备时间将大大缩短。由此可见,RLV 能够实现快速、可靠、廉价地进入空间的目标。

20 世纪中叶,冯·布劳恩和钱学森就提出过 RLV 概念。在过去的 30 多年里,许多航天专家开展了大量的 RLV 系统研究。各国航天专家一致认为,RLV 是航天运载器的发展方向,研制和使用 RLV 是大幅度降低进入空间费用最有效的手段,也是实现大规模航天应用的必要前提。当前各国发展可重复使用运载器的一个重要目标是将单位质量有效载荷运载费用降低到目前的 1/10,甚至更低的水平,为大规模航天应用铺平道路。虽然研制 RLV 的技术难度很大,但在过去的十几年里,推进、结构材料、制造、操纵、制导、导航、回收等技术的发展取得了显著的进步,使得研制 RLV 已接近实现的可能。

RLV 的众多优点,得到了各国军方的高度重视,美国 RLV 的发展一直得到军方的大力支持。RLV 能够为军方提供性能良好的空间信息平台、实时敌况侦察平台和空间快速武器攻击平台。其快速、可靠、廉价进入空间的能力能够保证在战时迅速可靠地将大量军用卫星送入太空,为未来高技术条件下的信息战赢得信息资源上的优势,对掌握战时的先机、改变战争敌我态势都具有明显而重要的作用。RLV 稍加改进就可以成为空间作战飞行器(SOV),SOV 的概念是美国军方在《美国航天司令部长期规划——2020 年设想》中首次提出的。SOV 所具有的特点主要有:极低的运输费用、快速反应能力和在轨操作能力,可以作为侦察平台、通信平台和武器平台,可以完成未来作战的大部分军事任务。所以,SOV 一提出,就引起了国内外航天界和军事界的广泛关注。将太空军事化,抢夺制天权成为美国等国家发展 RLV 的最大动因。但太空军事化一直是国际社会十分敏感的问题,美国政府和军方为了掩盖其企图,主要出资支持美国宇航局(NASA)以民用和商用旗号来发展 RLV,而军方则主要着手考虑如何利用和改进 RLV 为军用航天服务,军方有时还直接参与 NASA 的有关 RLV 计划。

1986 年 4 月 12 日,美国的“哥伦比亚”号航天飞机试飞成功,人类向 RLV 的研究和应用迈出了第一步。航天飞机是部分可重复使用运载器系统,被称为第一代 RLV。但由于航天飞机在技术上、运行上和原理方面都存在问题,尤其是没有充分认识到降低运营成本对降低运载器系统全寿命周期成本的重要性,致使航天飞机虽然实现了部分可重复使用,但其发射费用仍然很高,并没有能够实现降低发射费用的初衷。

各航天大国在总结航天飞机经验教训的基础上,积极开展 RLV 研究,并先后制定了各自的发展计划,提出了各种可重复使用运载器方案。例如,美国的国家空天飞机计划(NASP)、DC-XA 技术飞行试验计划、X-33 先进技术验证机计划、X-34 小型可重复