



航天科技图书出版基金资助出版

可重复使用新型 航天飞行器结构设计

彭小波 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

可重复使用新型 航天飞行器结构设计

彭小波 著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

可重复使用新型航天飞行器结构设计 / 彭小波著

. --北京:中国宇航出版社,2016.8

ISBN 978-7-5159-1172-4

I. ①可… II. ①彭… III. ①航空航天器—结构设计

IV. ①V414.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 212302 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2016 年 8 月第 1 版
2016 年 8 月第 1 次印刷

规格 787×1092

开本 1/16

印张 20

字数 487 千字

书号 ISBN 978-7-5159-1172-4

定价 168.00 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的发展。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 20~30 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

序

可重复使用新型航天器是现代卫星和载人飞船技术、运载火箭技术和航空技术综合发展的产物。但是,这种可重复使用新型航天器的设计思想却由来已久。早在20世纪30年代初,奥地利的维也纳人赫费特、瓦里尔和桑格尔等就曾提出用火箭发动机作动力装置的飞机,试图使用这种火箭在高空甚至空间进行高速飞行,并形成以这种飞行器进行空间飞行的设计思想。这也可以看作是新型航天器的早期设计思想的萌芽。这种飞行器只能使用一次,后来相当多的科学家在可重复使用新型航天器上提出了相关设想,可惜这些设想由于技术条件的限制当时根本无法实现,不过发展一种可重复使用的新型航天器,作为自由进出宇宙空间的思想,却从来没有被放弃过,研究工作也从未间断过。20世纪中期,冯·布劳恩和钱学森就明确提出了重复使用天地往返运输系统的概念。可重复使用新型航天飞行器是指可以重复使用的、能够迅速穿越大气层、自由地往返于地球表面与太空之间的多用途航天器。

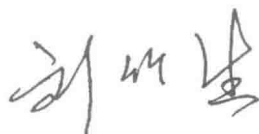
第二次世界大战以来,以美国X系列飞行器为代表的飞行器研究异常活跃,进行了多次飞行演示验证试验,取得了重大技术突破。到本世纪初,以X-37B为代表的轨道机动飞行器已经成功发射和返回多次,标志着新型航天器的技术水平已经日趋成熟,从此面向空天一体、自由进出空间为特征的新型航天器正式成为世界航天新的关注热点和新的科技领域。新型航天器结构系统是十分重要的分系统,结构设计专业是一门主要学科,它所涵盖的知识面很宽,涉及系统工程、力学、材料、工艺等,是一门多学科交叉综合和工程性很强的学科。

为更好地普及航天科技知识,促进新型航天器事业的发展,总结新型航天器结构设计经验,出版一本介绍新型航天器结构知识的科技读物是十分必要的。

本书编著者是老、中、青三代航天科技工作者,长期从事航天技术研究和结构设计一线工作,多次参加我国各类型航天器的方案论证与研制工作。在编著过程中,充分融合了中国航天50多年的结构设计经验和新型航天器的结构特点,收集了大量资料,通过认真分析、严密推敲完成了全书的编写工作,并把自己丰富的知识和经验很好地融入到本书

中。本书对新型飞行器国内外研究进展、结构构型、结构设计、结构分析、制造仿真等众多方面作了详细的介绍，内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。文笔流畅，内容深入浅出，是一部具有知识性和资料性的航天科技基础技术读物。它不仅有助于航天器结构设计工程技术人员夯实设计基础、提高设计水平、解决实际问题、积累设计经验，同时对其他航天科技、管理人员也是一部很有学术水平和工程应用价值的参考资料。

祝贺《可重复使用新型航天飞行器结构》一书成功出版，希望它为我国航天科学与技术的发展做出贡献！



2015年6月

前 言

结构系统是航天飞行器中一个较大的分系统，其对保证航天飞行器任务的完成有很重要的作用。随着世界航天的关注点由传统轨道到轨道/亚轨道/大气层空间一体化的转变，新型航天飞行器技术研究方兴未艾。传统航天飞行器结构技术虽然已经非常成熟和完善，但是还不能满足面向空天一体、可重复使用新型航天飞行器的技术发展需求。因此，目前需要对新型航天飞行器结构技术进行全面系统的总结与技术剖析。由于国内尚没有专门介绍新型航天飞行器结构技术的书籍，因此本书的出版有助于弥补这方面的缺憾，期望能对我国可重复使用航天飞行器结构技术的研究与发展提供思路与参考。

新型航天飞行器结构技术涉及范围较广，包括材料、设计、分析、仿真、制造和环境等相关内容，本书仅一般性地说明上述内容，重点阐述新型航天飞行器的结构特点、基本要求、新材料、新技术和设计方法等。本书共分7章。第1章为概论，介绍可重复使用新型航天飞行器结构的基本概念、特点、研制阶段和发展历程；第2章为可重复使用新型航天飞行器典型结构介绍和国外发展现状；第3章为可重复使用新型航天飞行器结构设计完整性要求，包括设计目标、设计特性、使用寿命和设计验证；第4章为可重复使用新型航天飞行器结构设计，介绍了包括材料、结构特点、结构构型、结构件、结构连接等方面的相关要求和研究经验；第5章为可重复使用新型航天飞行器机构设计，包含传动机构和空间机构；第6章为可重复使用新型航天飞行器结构疲劳和损伤容限设计；第7章为可重复使用新型航天飞行器结构设计与制造一体化，介绍了当前结构数字化设计、智能化制造和虚拟仿真等方面的内容。

本书在编写过程中，查阅了以美国X-37B为代表的可重复使用新型航天飞行器新技术应用情况，书中有不少图片或者文字内容来源于互联网公开信息，供读者参考。

本书引用了一些相关专著的资料，作者在此向这些专著的作者表示衷心的感谢。

长期以来，刘竹生院士始终如一地关心、帮助和指导作者的研究工作。在撰写本书过程中，中国运载火箭技术研究院刘信和、李兴泉研究员及中航工业沈阳飞机设计研究所李贵文研究员给予了大力帮助，提出了许多指导性意见，在此一并向他们致以最衷心的感谢。

谢。另外在本书的编写过程中，得到了航天飞行器结构机构设计、分析、制造及试验等各方面专家的支持和帮助；本书的出版得到了航天科技图书出版基金的资助，在此一并表示感谢。

本书在总结过去国内外新型航天飞行器结构研制经验的基础上，力求全面准确地介绍新型航天器结构研制的相关技术。但是随着世界新型航天器的快速发展，结构技术水平也在不断更新和完善，加之编者的专业水平和专业范围有限，书中难免有不足和错误之处，敬请广大读者批评指正。

本书主要面向航天飞行器结构研制的工程技术人员，也可供从事其他飞行器结构设计相关专业工作的技术人员参考，还可作为高等院校师生教学或培训教材。

彭小波

2015年6月

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 可重复使用新型航天飞行器结构基本概念	1
1.2 可重复使用新型航天飞行器发展历程及关键技术	2
1.2.1 可重复使用新型航天飞行器发展历程	2
1.2.2 可重复使用新型航天飞行器关键技术	7
1.3 可重复使用新型航天飞行器结构特点	9
1.3.1 承受载荷	9
1.3.2 安装设备	9
1.3.3 提供构型	10
1.4 可重复使用新型航天飞行器结构研制	10
1.4.1 可行性论证阶段	10
1.4.2 概念设计阶段	11
1.4.3 样机研制阶段	12
参考文献	14
第 2 章 典型航天飞行器结构介绍及国外发展现状	15
2.1 航天飞机结构系统概述	15
2.1.1 前机身结构	15
2.1.2 中机身结构	19
2.1.3 后机身结构	22
2.1.4 翼面结构	24
2.2 航天飞机轨道飞行器的制造过程	29
2.3 X-37B 结构方案概述	31
2.3.1 X-37B 飞行器概述	31
2.3.2 X-37B 结构选材	32
2.3.3 X-37B 结构总体传力分析	32
2.3.4 X-37B 结构系统技术特点	35

2.4 云霄塔 (SKYLON) 飞行器结构方案概述	35
2.4.1 SKYLON 飞行器概述	35
2.4.2 SKYLON 结构系统	37
2.4.3 SKYLON 起落架系统	40
2.5 IXV 结构方案概述	41
2.5.1 IXV 飞行器概述	41
2.5.2 IXV 结构系统	43
2.5.3 IXV 机构系统	46
2.6 追梦者 (Dream Chaser) 结构方案概述	47
2.6.1 Dream Chaser 飞行器概述	47
2.6.2 Dream Chaser 飞行器结构发展历程	49
2.6.3 Dream Chaser 飞行器的创新性	55
参考文献	56
第3章 可重复使用新型航天飞行器结构设计完整性要求	57
3.1 可重复使用新型航天飞行器结构的设计目标	57
3.1.1 质量	57
3.1.2 工艺性	57
3.1.3 简易性	57
3.1.4 维护性	57
3.1.5 可达性	57
3.1.6 互换性	58
3.1.7 维修性	58
3.1.8 贮箱适用性	58
3.1.9 费用	58
3.1.10 各项要求的相容性	58
3.2 可重复使用新型航天飞行器结构的设计特性	58
3.2.1 可重复使用新型航天飞行器结构的环境条件	59
3.2.2 可重复使用新型航天飞行器结构的载荷	64
3.2.3 热特性	70
3.2.4 材料特性	71
3.2.5 其他特性	75
3.3 使用寿命	78
3.3.1 安全寿命	78

3.3.2 破损安全	78
3.3.3 材料特性	79
3.3.4 载荷谱	79
3.3.5 循环载荷	79
3.3.6 持续载荷	79
3.4 设计验证	80
3.4.1 文件	80
3.4.2 分析	81
3.4.3 确定载荷、压力 and 环境的试验	82
3.4.4 材料特性试验	83
3.4.5 研究性试验	85
3.4.6 鉴定试验	86
3.4.7 验收试验	91
3.4.8 飞行试验	92
3.4.9 特殊试验	93
参考文献	95
第4章 可重复使用新型航天飞行器结构设计	96
4.1 可重复使用新型航天飞行器结构材料	96
4.1.1 复合材料	97
4.1.2 轻质金属材料	100
4.1.3 其他金属材料	102
4.1.4 结构材料工艺选择	103
4.2 可重复使用新型航天飞行器结构设计的特点	103
4.2.1 结构轻质化	104
4.2.2 结构多功能集成化	106
4.2.3 设计和制造数字化	107
4.2.4 结构可重复使用性	108
4.3 可重复使用新型航天飞行器结构构型	109
4.3.1 硬壳/半硬壳结构	109
4.3.2 杆系结构	110
4.3.3 复合材料整体结构	111
4.4 可重复使用新型航天飞行器结构件	117
4.4.1 梁	119

4.4.2 壁板	132
4.4.3 夹芯结构 (夹层结构)	140
4.4.4 贮箱	157
4.5 可重复使用新型航天飞行器结构连接	175
4.5.1 对接接头	175
4.5.2 铆钉连接	181
4.5.3 金属的胶接与胶焊连接	185
4.5.4 复合材料连接	192
参考文献	198
第5章 可重复使用新型航天飞行器机构设计	199
5.1 概述	199
5.2 传动机构	199
5.2.1 传动机构功能	199
5.2.2 传动机构设计	200
5.2.3 传动机构的负载力矩	203
5.2.4 传动机构活动关节	203
5.2.5 伺服传动器	206
5.2.6 传动机构与机身结构的连接设计	207
5.2.7 传动机构设计考虑因素	208
5.3 空间机构	209
5.3.1 有效载荷舱门结构与机构	209
5.3.2 太阳能电池阵机构	215
参考文献	219
第6章 可重复使用新型航天飞行器结构疲劳和损伤容限设计	220
6.1 疲劳设计	220
6.1.1 材料疲劳性能曲线	220
6.1.2 疲劳特性图	221
6.1.3 影响疲劳强度的因素及相应措施	223
6.1.4 疲劳设计准则	230
6.1.5 疲劳设计原理	231
6.1.6 疲劳寿命估算方法	231
6.2 损伤容限设计	241
6.2.1 基本概念	241

6.2.2 与安全寿命设计方法的区别	243
6.2.3 与断裂力学的关系	244
6.2.4 损伤容限设计的内容和方法	245
6.2.5 结构剩余强度分析	249
6.3 复合材料结构的耐久性/损伤容限设计	253
6.3.1 复合材料结构损伤、断裂和疲劳的特点	254
6.3.2 复合材料结构耐久性/损伤容限设计要求	256
6.3.3 复合材料结构耐久性/损伤容限设计方法概述	259
6.3.4 复合材料结构耐久性/损伤容限的设计选材和材料设计	260
6.3.5 提高复合材料结构耐久性/损伤容限的特殊设计技术	262
参考文献	264
第7章 可重复使用新型航天飞行器结构与制造一体化	265
7.1 概述	265
7.2 结构设计制造一体化设计平台	265
7.2.1 设计制造一体化设计平台总体架构	265
7.2.2 基于 FiberSIM/VPM 搭建复合材料设计制造一体化设计平台	266
7.2.3 复合材料结构快速优化设计	268
7.2.4 制订基于 MBD 的装配体设计规范	269
7.2.5 实现总装过程的有效管理	269
7.2.6 构建复合材料设计基础资源库	270
7.3 基于 MBD 的结构设计	271
7.3.1 基于 MBD 的产品结构定义方式	272
7.3.2 MBD 技术工程应用关键技术	272
7.3.3 基于 MBD 的产品数据管理系统集成技术	273
7.3.4 基于 MBD 的产品设计	273
7.3.5 基于 MBD 的三维设计规范	274
7.3.6 预期效果	275
7.4 自动化制造技术	275
7.4.1 自动铺层技术及设备	276
7.4.2 热塑性复合材料自动化成型技术及自动化设备配套	280
7.4.3 复合材料零件自动化生产流水线	281
7.4.4 复合材料自动化检测技术	284
7.5 低成本制造技术	285

7.5.1 低温固化复合材料技术	285
7.5.2 RTM	286
7.5.3 RFI	286
7.5.4 辐射固化技术	287
7.6 基于MBD数字化设计与制造	287
7.6.1 流程设计	288
7.6.2 自动下料	290
7.6.3 激光投影	291
7.7 虚拟装配技术	291
7.7.1 需求与国内外研究状况	291
7.7.2 关键技术	298
7.7.3 研究方法及途径	300
参考文献	303

第1章 概 论

人类探索和利用宇宙的脚步从来不曾停止，随着技术的发展，人类势必将越来越频繁地从地球表面进入宇宙空间，虽然传统的一次性火箭对人类进入宇宙空间起到了不可替代的作用，但是其也存在一定的缺陷。为了更好地实现空天往返运输计划，各个航天大国积极地对可重复使用新型航天飞行器进行研究，并且取得了长足的进展。

20 世纪中期，冯·布劳恩和钱学森就提出了重复使用空天往返运输系统的概念。可重复使用新型航天飞行器是指可以重复使用的、能够迅速穿越大气层、自由地往返于地球表面与太空之间的多用途航天飞行器^[1]。其既可以快速、方便地向太空运送有效载荷，也可以较长时间在轨停留和在轨机动，完成各种太空任务，完成任务后还可以安全、准确地降落在地面。因此，其是航天航空技术高度融合的结晶。也可以说，可重复使用新型航天飞行器是今后人类往返于太空的高速巴士。从航天飞机到空天飞机，从空天飞机到以火箭发动机为动力的单级入轨重复使用航天飞行器，再到多级入轨重复使用航天飞行器，可重复使用新型航天飞行器发展是与人类科学技术的进步和对关键技术的认知相适应的。

通常要求可重复使用新型航天飞行器像火箭一样可将有效载荷迅速送入空间轨道，同时在完成任务后又能够像航空飞行器一样安全准确地返回地面基地，并且要求可重复使用新型航天飞行器能够廉价、迅速、机动且可靠地完成天地往返运输任务。对比一次性运载火箭，可重复使用新型航天飞行器具有以下几个特点：

1) 发射成本大幅度降低。如何降低发射费用是当前整个航天工业界面临的主要挑战之一，航天运载器实现可重复使用就是降低航天运输成本及提高运载能力的重要措施之一。由于可重复使用新型航天飞行器的全部或部分部件可以重复使用，因此可以极大地减少运载工具的研究和生产费用，只需担负其后期维护费用。

2) 发射周期缩短。传统的运载火箭，从研制到发射可能需要一年甚至几年的时间，而可重复使用新型航天飞行器由于无须重新研制和生产，所以大大缩短了发射周期。一般而言，可重复使用新型航天飞行器可以在数周内实现再次发射。

3) 能够更为灵活地完成任务。可重复使用新型航天飞行器作为运载工具，既可载物，也可以搭载乘员；作为天地往返的工具，其还可以做较长时间的在轨停留和在轨机动。因此，其可以方便地为空间站予以补给、进行太空作业以及进行科学试验，最后安全地返回地面。

1.1 可重复使用新型航天飞行器结构基本概念

可重复使用新型航天飞行器结构系统是飞行器各系统和有效载荷的综合系统平台，需

保证安装的连接强度和刚度及安装精度,同时为热防护系统提供支撑,并具有一定的耐温能力,可承受飞行器在运输、操作、发射、在轨、再入和着陆等环境产生的各种动、静和热载荷,确保飞行器结构的完整性。其品质直接关乎飞行器总体性能,决定着飞行器的使用寿命和维护费用。

对可重复使用新型航天飞行器而言,因为其所使用环境的错综复杂以及自身结构的约束,导致其结构设计是一个庞大的、综合的系统,包括结构几何学、材料学、力学及制造工艺等多个学科,设计结构还应满足轻质性、安全性及可维护性等要求。

针对可重复使用性要求,结构应具备以下具体功能:

1) 具有承受来自诸如疲劳、意外损伤和环境恶化所造成结构退化的能力,这种结构能力使得结构退化可以被经济且可接受的维护与检测程序加以控制;

2) 若结构存在疲劳、腐蚀或意外损伤,在这个损伤通过检查被测定出来或进行结构修理之前,结构仍然具有足够的剩余强度;

3) 与常规飞行器相比,可重复使用新型航天飞行器在材料选择时,应重点关注材料的热性能和热相容性问题。与一次性使用的传统航天飞行器相比,可重复使用新型航天飞行器结构材料需有较好的可重复使用性。

1.2 可重复使用新型航天飞行器发展历程及关键技术

1.2.1 可重复使用新型航天飞行器发展历程

美国、欧洲及日本等国家和国际组织竞相开展可重复使用新型航天飞行器的研究与飞行试验验证工作^[2]。

(1) 美国

自20世纪60年代开始,美国国家航空航天局(NASA)先后执行了多项可重复使用飞行器的研究计划,包括基斯特勒宇航公司的K-1、先锋火箭公司的探路者、波音公司的两级入轨运载器、轨道科学公司的太空的士,以及NASA负责的X系列飞行器,如国家空天飞行器(X-30/NASP)、X-33、X-37、X-40A及X-43等。这些计划的开展始终围绕着两条主线,一是以火箭发动机为动力的可重复使用运载器的研制,在这方面的典型型号有:X-15、X-20、航天飞行器、X-33、X-34、X-37、DC-X/XA、OSP、RASCAL和HLV等;另一条主线是以吸气式发动机为动力的航天运载器,主要包括X-30/NASP、X-43A高超声速技术验证机和FALCON计划下的高超声速巡航飞行器(HCV)等。上述计划中只有航天飞行器投入了实际使用,其他计划有的进行了演示验证飞行(如X-15、DC-X/XA、X-43A),有的已经停止(如X-20、X-30、X-33、X-34、OSP、RASCAL),有的处于暂停状态(如HLV),还有的正在执行中(如X-37B)。

自1996年美国相继制定了空军《2020远景规划》和《空军转型飞行计划》,出台了最

新《航天运输政策》和《国家空间政策》，强调发展快速进入空间和使用空间的能力，确保美国在空间行动的自由，并持续开展核心技术研发计划，使下一代航天运输系统实现快速、可靠、低成本的目标。

2001年，美国国防部提出了“作战快速响应空间”（ORS）概念并逐步推进。快速响应航天运输是实现ORS的重要基础，其发展途径可分三步实现：近期发展快速机动小型运载火箭；中期发展部分可重复使用的航天运载器；远期实现完全可重复使用的航天飞行器。

空间作战飞行器（SOV）是一种能够快速发射的可重复使用飞行器，可将上面级送入低地轨道或亚轨道，是军用航天飞行器（MSP）系列中的主要飞行器，是集发射、操作、侦察与作战于一体的平台。美国空军在2003年11月发布的《空军转型飞行计划》中明确提出，空军要从以平台为基础的驻防部队转变为以能力为基础的远征部队，具备信息优势、空天优势、精确作战、全球打击、快速全球机动和敏捷的作战保障6个方面的16种能力，实现空天一体化作战。在这个计划中还提出，应该研制全新的空间作战武器系统，执行进入空间和空间作战任务。这个系统包括亚轨道飞行器（SRLV）、空间机动飞行器（SMV）、模块化入轨级（MIS）、通用再入飞行器（CAV）和轨道转移飞行器（OTV），详情见图1-1。

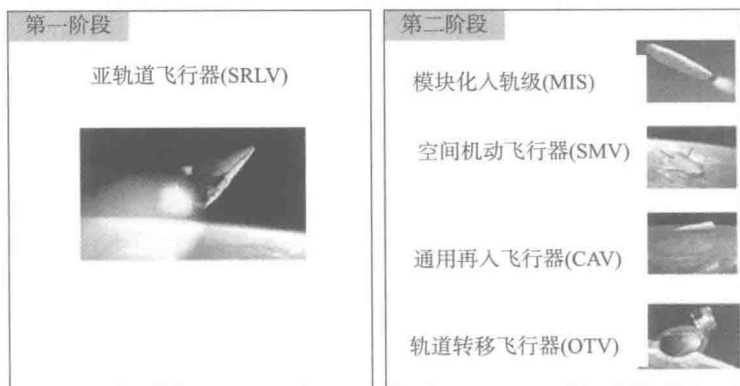


图 1-1 美国太空作战武器系统构想

英文字母 X 有“试验”之意，同时也蕴涵着“未知的”的深层含义。在飞行器设计领域，未知的技术障碍与难题比比皆是，即使是通过风洞、模拟器和计算机也只能构建出一个理想状态下的模型而已，所以必须研制出专门的试验机去探索那些未知领域。

为了探索众多航空航天领域的未知因素，美国开始了 X 系列试验飞行器的研究工作，并以“更高、更快”作为其发展目标。1945 年年初，世界上第一架火箭动力试验机 XS-1（后来命名为 X-1）在美国军方的资助下首飞成功。直至今日，美国已经研发了 50 多种 X 系列试验飞行器（图 1-2），其中最新的 X-51A 验证机已经完成多次飞行试验。2010 年 4 月 22 日美国完成了 X-37B 飞行器的首次发射，X-37B 对飞行器设计与气动技术、无人轨道机动技术、长时间在轨运行能力、制导控制技术、先进防热技术及自主进场与着