



航天科技图书出版基金资助出版



美国航天飞机的 设计与实现

彭小波 主编



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

美国航天飞机的设计与实现

彭小波 主编



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

美国航天飞机的设计与实现 / 彭小波主编. --北京:
中国宇航出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5159-0891-5

I. ①美… II. ①彭… III. ①航天飞机—设计—美国
IV. V423.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 023727 号

责任编辑 曹晓勇

封面设计 百思旭传媒

出版行 **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 北京画中画印刷有限公司

版次 2015 年 1 月第 1 版

2015 年 1 月第 1 次印刷

规格 787×960

开本 1/16

印张 25.25

字数 528 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0891-5

定价 169.00 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

《美国航天飞机的设计与实现》

编写人员

主 编 彭小波

副主编 朱永贵 张旭辉 蔡巧言

编 委 (按姓氏笔画排序)

马婷婷	王 飞	王宁宇	刘 欣	刘杰平
巩萌萌	邵秋虎	严 卿	杜朋飞	陈 亮
陈雪冬	张化照	张梦阳	张振兴	张广春
欧 峰	闻 悦	赵大海	郭鹏飞	郭金花
海尔瀚	徐国丽	董彦民	韩鹏鑫	霍 甲

序

人类自古以来就有着翱翔九天的梦想，并为之倾注了巨大的精力和热情，在一代又一代人前赴后继的不懈努力下，终于，莱特兄弟让人类看到了大气层内自由飞行的曙光，随后的齐奥尔科夫斯基进一步让人类摆脱了地球引力的束缚，使天地之间的自由往返成为可能。

随着人类活动疆域由传统的“陆、海、空”向“天”不断地拓展，空间逐渐成为人类生存与发展的一个新领域。各国开始意识到空间的重要战略地位，推出了一系列的空间政策，着力发展空间技术，建立空间优势。而进出空间能力作为实施空间战略的重要基础和前提备受各国关注。

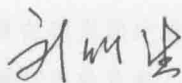
重复使用运载器是实现自由进出空间的重要技术途径之一，是大规模开发空间资源、建设空间基础设施的重要载体，也是国民经济发展的重要推动力量。近年来，随着航天技术的快速发展，重复使用运载器的概念越来越受到重视、作用也越来越突出。

鉴于重复使用运载器的潜在应用价值，美国很早就开展了这方面的探索研究，长期处于世界领先地位，从1945年至今通过X系列试验飞行器对各种先进航空航天技术的演示验证，先后创造了人类飞行史上的若干个“第一”，不断抢占着高科技的“制高点”。纵览美国最近半个世纪的航天发展历程，航天飞机在其往返空间的征程中起到了重要的技术推动作用，其意义不言而喻。作为重复使用运载器的典型代表，航天飞机首次实现了航天运输系统由一次性使用向重复使用的技术突破，将其称之为第一代重复使用运载器也正体现了其划时代的技术创举。作为目前为止唯一投入运行的重复使用运输系统，航天飞机在其近30年的运行生涯中，既取得了无数辉煌的成就，也背负着两次重大事故带来的惨痛经历。由于成本高、风险大以及政策上的转变等原因，航天飞机于2011年全部退役，至此美国的航天飞机计划正式谢幕。

尽管如此，航天飞机的研制与使用仍然是具有里程碑意义的重大历史事件，

航天飞机采用的许多技术目前仍保持着当代国际领先水平，值得我们深入研究和深刻解读。在航天飞机开始逐渐淡出人们视野的时候，系统回顾航天飞机的研制历程，深入研究和总结航天飞机的设计经验，对奋战在航天事业一线和关心航天事业的人们而言，将是一笔巨大的财富。《美国航天飞机的设计与实现》正是这样的一本书，它能够引导你顺着航天飞机设计者的足迹，逐渐揭开航天飞机那纷繁复杂的面纱，了解那段即将湮没于历史长河的昨日传奇。

国外关于航天飞机的科普读物或者专业著作并不少见，但介于科普读物与专业著作之间，从技术白描入手，实现技术引导作用的书籍，无论国内还是国外，均显贫乏。本书在这方面进行了一次有益的尝试，其意义将不仅限于技术本身，在书籍内容日益大众化和愈加专业化的今天，很期待这本著作能够带来一种新模式。



2014 年 12 月

前 言

本书在对国内外有关航天飞机文献广泛调研的基础上,系统研究总结了航天飞机的研制历程,重点分析了航天飞机轨道器总体设计方法以及主要分系统的总体方案与设计思路,并经系统梳理后编纂成书,期望能够为我国重复使用运载器的研究与发展提供有借鉴意义的参考。

航天飞机在学术界通常是指包含轨道飞行器(亦称轨道器)、外贮箱和固体助推器在内的一个完整系统,而人们泛指的航天飞机实际上仅是其中的一个组成部分——轨道器,主要原因即在于轨道器具有重复使用运载器的显著特征,也是航天飞机的核心组成部分。本文的主要论述对象主体也是轨道器,同时为保持全书的完整性,对外贮箱和固体助推器进行了简要介绍。全书共17章,其中3~5章为航天飞机轨道器总体设计内容,6~12章为航天飞机轨道器主要分系统的设计内容。

第1章概述,阐述了美国航天飞机的设计初衷与研制脉络,介绍了航天飞机的方案演变与应用情况;第2章航天飞机总体设计,介绍了美国航天飞机的飞行任务剖面、总体布局与总体参数,阐述了航天飞机的三大系统组成,重点介绍了轨道器的主要子系统构成;第3章航天飞机轨道器气动设计,主要介绍了航天飞机轨道器的气动布局设计,分析了轨道器的气动特性及操稳特性;第4章航天飞机轨道器再入轨迹设计,按照航天飞机轨道器再入返回阶段的划分,结合返回过程不同阶段的特点,分别介绍了初期再入段、能量管理段以及自动着陆段的轨迹设计方法;第5章航天飞机轨道器制导控制设计,概要介绍了航天飞机轨道器气动舵面与反作用控制系统等控制执行机构的配置,并系统总结了航天飞机轨道器再入返回全程的制导控制原理与制导控制方案;第6章航天飞机轨道器结构系统设计,系统梳理了航天飞机轨道器的结构设计准则,详细阐述了航天飞机轨道器的结构系统及主要结构部段和部件的结构形式,并简要介绍了航天飞机轨道器的制造过程;第7章航天飞机轨道器热防护系统设计,针对轨道器的热防护材料、

典型热防护系统设计方案及其研制进行了总结归纳；第8章航天飞机轨道器动力系统设计，对航天飞机轨道器的主推进系统、轨道机动系统与反作用控制系统的性能特点逐一进行了介绍，重点分析了主发动机的研制与改进历程；第9章航天飞机轨道器电气系统设计，对包括制导导航与控制系统、通信与跟踪系统、电源与配电系统和测量系统等在内的航天飞机轨道器电气系统设计进行了论述；第10章航天飞机轨道器健康管理系统设计，围绕航天飞机轨道器主发动机和热防护系统，介绍了健康管理技术的具体应用；第11章航天飞机轨道器环境控制与生命保障系统设计，对环控与生保系统设计所关注的环境控制要求、航天员生理需求等内容进行了探讨，介绍了航天飞机轨道器环控与生保系统设计方案；第12章航天飞机轨道器其他系统设计，对被动温控系统、辅助动力装置系统、液压系统、起落架系统、吹除、排气、排液系统、有效载荷释放和回收系统、警告与报警系统，烟雾监测和消防系统等航天飞机轨道器的其他子系统一并进行了介绍；第13章航天飞机运行使用与维护，基于一个完整的运行使用与维护周期，详细介绍了航天飞机轨道器返回并着陆停稳后，至进入再次发射程序前的运行与维护内容；第14章航天飞机设计与工程经验，总结了航天飞机研制与使用过程中的经验；第15章航天飞机重大事故与改进，分析了航天飞机史上的两次重大事故及其技术改进；第16章航天飞机研制费用统计与经济性分析，基于美国航天飞机总体及分系统历年研制费用的统计情况，以及采用航天飞机费用模型评估的分析结果，对航天飞机的经济性进行了系统全面的分析。

本书可为重复使用运载器相关研究领域的技术人员提供参考，对于高等院校相关专业的师生也有重要的参考价值。

由于水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者给予批评指正。

作者

2014年12月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 航天飞机设计历程	1
1.2 航天飞机应用历程	4
第 2 章 航天飞机总体设计	6
2.1 简介	6
2.2 航天飞机总体布局	6
2.2.1 航天飞机布局	6
2.2.2 主要总体参数	7
2.3 航天飞机主要分系统	10
2.3.1 轨道器	10
2.3.2 外贮箱	12
2.3.3 固体助推器	16
2.4 航天飞机飞行政序	21
2.4.1 发射倒计时	21
2.4.2 飞行政序设计	21
2.4.3 固体助推器回收	26
2.5 再次发射准备与重复使用情况	27
2.5.1 各分系统再次发射准备	27
2.5.2 航天飞机重复使用情况	27
第 3 章 航天飞机轨道器气动设计	30
3.1 简介	30
3.2 气动布局设计	31
3.2.1 气动布局概述	31
3.2.2 气动布局设计准则	31
3.2.3 气动布局发展演变	34

3.3 气动力	39
3.3.1 气动力分析方法	39
3.3.2 气动特性	39
3.4 气动热环境	52
3.4.1 气动热环境分析方法	53
3.4.2 哥伦比亚号航天飞机气动热环境数据分析	53
3.5 气动数据库	62
3.5.1 气动数据管理的严峻挑战	63
3.5.2 气动数据库管理基本原则	64
3.5.3 气动数据库管理效能评估	66
3.5.4 气动数据库设计手册	68
3.5.5 气动数据库管理经验	69
第4章 航天飞机轨道器再入轨迹设计	71
4.1 简介	71
4.2 初期再入段轨迹设计	71
4.2.1 再入走廊设计	72
4.2.2 再入走廊内参考轨迹设计	77
4.3 能量管理段轨迹设计	82
4.3.1 能量走廊	83
4.3.2 轨迹线设计方法	85
4.4 自动着陆段轨迹设计	88
4.4.1 自动着陆段下滑轨迹线	88
4.4.2 下滑轨迹线的几何描述和数学特征描述	90
第5章 航天飞机轨道器制导控制设计	96
5.1 简介	96
5.2 执行机构配置	97
5.2.1 气动舵面配置	97
5.2.2 反作用控制系统配置	97
5.3 初期再入段制导与控制系统	100
5.3.1 初期再入段制导系统	100
5.3.2 初期再入段控制系统	107
5.4 能量管理段制导与控制系统	116

5.4.1 能量管理方案的发展过程	116
5.4.2 能量管理段制导系统	116
5.4.3 能量管理段控制系统	121
5.5 自动着陆段制导与控制系统	122
5.5.1 自动着陆制导与控制结构	124
5.5.2 自动着陆制导与控制策略	128
第6章 航天飞机轨道器结构系统设计	130
6.1 简介	130
6.2 结构设计准则	130
6.2.1 设计系数	131
6.2.2 安全裕度	132
6.2.3 静弹性	132
6.2.4 动特性	133
6.2.5 使用寿命	135
6.3 航天飞机轨道器结构系统	137
6.3.1 前机身结构	137
6.3.2 中机身结构	141
6.3.3 后机身结构	146
6.3.4 翼面结构	149
6.4 航天飞机轨道器的制造过程	154
第7章 航天飞机轨道器热防护系统设计	156
7.1 简介	156
7.2 热防护系统方案设计流程	157
7.3 热防护系统设计要求	158
7.3.1 热防护系统的结构性能要求与完整性设计目标	158
7.3.2 热防护系统的基本结构性能要求	158
7.3.3 热防护系统的完整性设计目标	159
7.4 热防护系统材料技术特点	160
7.4.1 一般性描述	160
7.4.2 隔热材料	160
7.4.3 高温结构材料	161
7.4.4 表面涂层	163

7.5 航天飞机轨道器热防护系统方案设计	164
7.5.1 热防护系统方案概述	164
7.5.2 机头锥及翼前缘热防护设计	164
7.5.3 机身大面积区域热防护设计	168
7.5.4 低温推进剂贮箱热防护	174
7.5.5 间隙填充设计	176
7.6 热防护系统设计的灾难与改进	176
第8章 航天飞机轨道器动力系统设计	178
8.1 简介	178
8.2 动力系统组成与布局	178
8.2.1 动力系统组成	178
8.2.2 动力系统工作过程	179
8.2.3 动力系统布局	180
8.3 主发动机的性能特点与研制过程	180
8.3.1 主发动机工作原理	180
8.3.2 主发动机研制过程及改进	183
8.4 轨道机动系统与反作用控制系统的性能特点	190
8.4.1 轨道机动系统	190
8.4.2 反作用控制系统	192
8.4.3 推进剂交叉输送系统	194
第9章 航天飞机轨道器电气系统设计	197
9.1 简介	197
9.2 制导导航与控制系统	197
9.2.1 简介	197
9.2.2 制导系统	199
9.2.3 导航系统	200
9.2.4 控制系统	202
9.3 电源与配电系统	202
9.4 通信与跟踪系统	206
9.5 测量系统	208
9.5.1 正式运行测量系统	209
9.5.2 研制飞行测量系统	209

第 10 章 航天飞机轨道器健康管理系统设计	210
10.1 简介	210
10.2 系统组成	211
10.3 航天飞机主发动机健康管理设计	212
10.3.1 简介	212
10.3.2 实时振动监视	212
10.3.3 定量风险评估	214
10.3.4 广义似然比试验	221
10.3.5 贝叶斯置信网络	229
10.4 防热系统健康管理设计	237
10.4.1 简介	237
10.4.2 系统组成	238
10.4.3 传感器布置	238
10.4.4 设计与分析	240
10.5 碰撞损害预测健康管理设计	242
10.5.1 观察窗口的碰撞	243
10.5.2 撞击试验	245
10.5.3 BUMPER 结果	245
第 11 章 航天飞机轨道器环境控制与生命保障系统设计	247
11.1 简介	247
11.2 系统组成	247
11.3 环境控制系统设计	249
11.3.1 座舱压力制度	249
11.3.2 气体储存	250
11.3.3 供气调压	250
11.3.4 座舱大气净化	251
11.3.5 座舱温度控制	253
11.3.6 座舱湿度控制	258
11.4 生命保障系统设计	259
11.4.1 废物收集处理	259
11.4.2 座舱内环境应急措施	261
11.4.3 水管理	261
11.4.4 座舱火烟检测与防火灭火	262

11.4.5 航天员居住设施	262
11.4.6 气闸舱	262
11.5 环控生保系统设计反思与展望	265
第12章 航天飞机轨道器其他系统设计	267
12.1 简介	267
12.2 被动温控系统	267
12.3 辅助动力装置系统	267
12.3.1 系统概述	267
12.3.2 工作原理	270
12.4 液压系统	270
12.4.1 系统概述	270
12.4.2 液压动力系统	271
12.5 起落架系统	272
12.5.1 系统概述	272
12.5.2 前起落架和主起落架	273
12.5.3 制动装置和防滑系统	273
12.6 吹除、排气、排液系统	274
12.7 有效载荷释放和回收系统	276
12.8 警告与报警系统	277
12.9 烟雾探测和消防系统	279
第13章 航天飞机运行使用与维护	281
13.1 简介	281
13.2 航天飞机轨道器返回维护方案	281
13.2.1 安全维护检查	281
13.2.2 外观检查	283
13.3 航天飞机轨道器转运程序	285
13.3.1 转运前检查	285
13.3.2 转运准备工作	287
13.3.3 转运实施方案	293
13.4 航天飞机测试发射检查	297
13.4.1 防热系统检查	298
13.4.2 动力系统检查	298

13.4.3 机构系统检查	300
13.4.4 结构系统检查	300
13.4.5 电气系统检查	301
13.4.6 其他检查工作	301
13.5 航天飞机发射移交程序	302
第 14 章 航天飞机设计与工程经验	303
14.1 简介	303
14.2 航天飞机设计的影响因素	303
14.2.1 大气密度切变	303
14.2.2 夜光云的影响	304
14.2.3 高空气象电击影响	308
14.2.4 通信问题	310
14.2.5 全球定位卫星系统的运行问题	310
14.2.6 边界层的非对称转捩	312
14.3 航天飞机高超声速再入飞行的设计经验	313
14.3.1 气动设计经验	315
14.3.2 气动防热设计经验	315
14.3.3 返回控制设计经验	317
14.4 航天飞机工程经验	319
14.4.1 概述	319
14.4.2 航天飞机第一次飞行气动力异常	319
14.4.3 航天飞机 SRM 点火冲击波问题	321
14.4.4 固体火箭助推器入水冲击及回收问题	323
14.4.5 航天飞机尾裙失效	324
14.4.6 航天飞机起飞载荷	325
14.4.7 航天飞机性能裕度	327
14.4.8 航天飞机轨道器结构	328
14.4.9 航天飞机概念选择历史	329
14.4.10 SSME 的主要失效经历	330
14.4.11 51-L 挑战者号失败	338
14.4.12 航天飞机振动试验	340
14.4.13 SSME 旋转问题	341
14.4.14 外挂贮箱氢气消能器	344

14.4.15 外挂贮箱绝热发泡剂	345
第 15 章 航天飞机重大事故与改进	347
15.1 简介	347
15.2 航天飞机重大事故	347
15.3 航天飞机改进	350
15.4 暴露问题及经验教训	354
第 16 章 航天飞机研制经费统计与经济性分析	358
16.1 简介	358
16.2 费用统计	358
16.2.1 航天飞机费用演变情况	358
16.2.2 航天飞机初期方案的费用估算	359
16.2.3 航天飞机的研制费用	362
16.2.4 航天飞机的研制合同累计金额	369
16.3 航天飞机的费用模型与分析	369
16.3.1 航天飞机的费用模型	369
16.3.2 航天飞机的研制费用分析	376
16.4 航天飞机经济性分析	378
第 17 章 总结	380
参考文献	383