

航天飞机 空气动力学分析

*Aerodynamics Analysis
of Space Shuttle*



顾 问 张涵信
主 编 张鲁民
副主编 叶友达 纪楚群 姜贵庆



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航天飞机 空气动力学分析

Aerodynamics Analysis of Space Shuttle

顾 问 张涵信
主 编 张鲁民
副主编 叶友达 纪楚群 姜贵庆

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航天飞机空气动力学分析/张鲁民主编. —北京:国防工业出版社,2009.5

ISBN 978-7-118-05655-6

I. 航... II. 张... III. 航天飞机-空气动力学-分析
IV. V411. V4 475.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 044177 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11¼ 字数 282 千字

2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 张涵信

序

人类到太空遨游的梦想随着宇宙飞船和航天飞机的相继升空而实现了,相信“真正的航天飞机”的出现,人们就可以随心所欲地到月球和其他星球旅行。

世界各国已研制成功的具有重大技术突破的航空航天飞行器,都与空气动力学有着密切的关系。同样,在研制航天飞机的全过程中,空气动力学是最重要的支撑技术之一。20世纪初建立的环量和升力理论是低速飞机设计基础;20世纪50年代后期,发展的可压缩性理论及跨声速面积律、后掠翼、超临界机翼、脱体涡和非线性涡升力等新概念、新技术突破了“声障”,实现了跨声速、超声速飞行。1957年10月4日苏联发射了第一颗人造地球卫星,被认为是空间时代的开始。此后,超声速和高超声速空气动力学得到迅速的发展,重点解决了高速气动加热引起的“热障”问题。1981年4月12日美国成功地发射了航天飞机,发展了现代空气动力学、气动热力学、稀薄气体动力学及再入物理等技术。为了研发航空航天飞行器,空气动力学专家积极研究有关超燃发动机的关键技术。由此可见,空气动力学的成果推动了现代飞行器的发展,同时,各类先进飞行器的研制又促使了空气动力学的创新,这些创新凝聚着空气动力学科技人员的智慧和奉献。

本书认真总结了航天飞机空气动力学的研究成果与丰富经验,总结了近20年来作者从事航天飞机空气动力研究的最新成果,其中第1章、第2章是在广泛调研国内外大量资料的基础上,进行了综合、归纳、分析、加工编写而成,能让读者全面深入地了解研发航天飞机的艰辛历程以及航天飞机空气动力学的全貌,为富

有创新精神的年轻一代设计我国未来的航空航天飞行器提供了很有价值的信息资料。

本书除了介绍传统的空气动力学内容(气动力、气动热)外,还增加了气动设计、气动数据库、鲁棒性设计等新内容。

气动设计是研发航天飞机的先行技术,是提出新概念、设计新布局、获得飞行器优良性能的关键技术。本书论述的气动设计思想新颖、内容具体、操作方便。希望从事这项研究的科技人员结合实际深入开拓,为了满足新一代航空航天飞行器的设计要求,更加完善气动设计技术。

信息资源已成为各个部门的重要财富,作为信息系统核心和基础的数据库技术得到越来越广泛的应用。在航空航天飞行器的各类专业的数据和信息管理方面,建立数据库系统是非常重要的,数据库是当代管理和使用数据最为先进的方法,能迅速、准确、灵活、高效地使用巨量数据(来自风洞试验、理论计算、飞行试验等),并能将型号研制部门宝贵的设计数据、信息资料保存下来,作为型号继续发展的有效工具。作者通过研发气动数据库所获得的成果,系统地论述了气动数据库建立的意义、功能、内容及结构等,在此基础上,探讨了“数据库-软件系统”在航天飞机气动设计中的重要性。借鉴美国投巨资发展航天飞机气动数据库的成功经验,高度重视各类型号的气动数据库建设是十分必要的,对于一个型号部门来说,气动数据库的规模、信息量多少和使用频度已成为衡量飞行器设计水平的重要标志。

回顾航天工程发展史,我们应当记住这样一个事件:2003年2月1日美国东部时间上午9时(北京时间22时)美国“哥伦比亚”号航天飞机就在结束为期16天的太空飞行返回地球着陆前16分钟失控解体,7名宇航员罹难,整个世界为之震惊,引起了广大航天工程技术人员在各自的专业范围内思索如何确保航天飞机的安全可靠问题。同样,在空气动力学专业范围内,也应当思索如何确保航天飞机的可靠性问题。对于航天飞机来说,不仅要强调“创新设计”,更要高度重视“稳健设计”,既要性能好、周期短、成

本低,更要可靠性高。第 10 章航天飞机气动性能鲁棒设计正是回答了上述问题,希望广大航天科研人员在此基础上,继续开展这方面的研究,创建各类航空航天飞行器鲁棒设计模型,探讨鲁棒设计方法,以适应 21 世纪我国航空航天技术创新的需求。

本书认真总结了世界上发展航天飞机空气动力学的研究成果,具有学术水平高、应用性强、内容有创新、填补了该领域的空白,对研发航天飞机及各类航空航天飞行器具有较大的推动作用。我相信具有“两弹一星”光荣传统的航天科技工作者,通过几代人的努力,中华民族在航天高科技领域一定能取得令世人瞩目的辉煌成就。

庄逢甘

2008 年 5 月 21 日

前 言

1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从肯尼迪航天中心冉冉升空,历时54h,于4月14日安全返回爱德华空军基地,截止统计到2006年底,美国航天飞机已进行了114次飞行,其中失败2次,成功率达98.25%,这标志着世界航天史迈进了一个崭新的航天飞机时代。航天飞机的气动外形比飞船返回舱、导弹更复杂,其气动力、气动热等空气动力学问题很多,难度也很大。航天飞机空气动力学对航天飞机的研制起重要支撑作用,它不仅在概念研究和预先研究阶段起先行作用,而且在方案研究、初样设计、正样设计及试飞阶段起重大关键性的作用。

本书总结了近20年来我们在航天飞机空气动力学方面研究的最新成果,论述了航天飞机重复使用运载器/轨道器(以下称航天飞机)的气动问题。它是一部有一定广度和深度的专著,可使读者了解该领域的全貌,拓展知识,并能用于解决工程中的气动问题。

全书共10章:

第1章航天飞机发展概述(杨勇、叶友达、王国辉执笔);

第2章航天飞机空气动力学概论(张鲁民、许光明、叶友达执笔);

第3章航天飞机气动设计(张鲁民、唐伟、马强执笔);

第4章航天飞机气动力预测方法(唐伟、马强、李志辉、张鲁民执笔);

第5章航天飞机气动力特性数值模拟(纪楚群、叶友达、刘伟执笔);

- 第6章 航天飞机气动加热预测(姜贵庆、王淑华执笔);
第7章 航天飞机热防护(姜贵庆、王淑华执笔);
第8章 航天飞机飞行稳定性(祝立国、马强、张鲁民执笔);
第9章 航天飞机气动数据库(杜涛、唐小伟、田锋、张鲁民执笔);
第10章 鲁棒设计技术(张勇、唐小伟、张鲁民执笔)。

全书由主编张鲁民教授统稿,并由张涵信院士主审,庄逢甘院士亲自作序。

在本书的编写过程中得到了庄逢甘院士、张涵信院士、童秉纲院士等的大力支持和帮助,还得到航天科技集团第一研究院研发中心以及中国空气动力研究与发展中心杨在山、潘梅林、张玉萍等人为本书提供的技术支持,张现峰对本书的文字和图表做了大量的勘校工作,对此表示衷心的感谢。本书在编写第1章和第2章的过程中,参考了大量国内外文献资料,在此,对原作者深表谢意,同时对本书所引用的参考文献作者表示感谢。本书的部分研究工作得到了国家自然科学基金委《空天飞行器的若干重大基础问题》重大研究计划的重点项目《高超声速、高升阻比气动构型研究》(批准号:90505016)的资助。

本书能够顺利出版,得益于国防科技图书出版基金的支持和资助,以及国防工业出版社王坡麟编审的具体指导,在此一并表示感谢。

希望本书能成为从事这一领域的工程师、研究人员、研究生的参考书,并对我国开展航天飞机的研究起推动作用,由于作者水平有限、书中的缺点和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编著者
2008年2月

目 录

第 1 章 航天飞机发展概述	1
1.1 概述	1
1.2 航天飞机发展回顾与展望	4
1.2.1 航天先驱者的不懈追求	4
1.2.2 航天飞机的研制历程	5
1.2.3 航天飞机的发展——新一代重复使用运载器	8
1.3 空气动力学——航天飞机研制的重要支撑技术	16
1.3.1 航天飞机轨道器	18
1.3.2 X-33 演示验证飞行器	20
1.3.3 X-34 演示验证飞行器	22
1.3.4 OREX、HYFLEX 和 HOPE-X 演示验证 飞行器	24
第 2 章 航天飞机空气动力学分析概论	27
符号	27
2.1 概述	28
2.1.1 航天飞机的再入飞行参数	28
2.1.2 研究气动问题的手段	30
2.2 航天飞机的气动问题	38
2.2.1 航天飞机气动问题的主要特点	38
2.2.2 航天飞机气动布局设计	39
2.2.3 航天飞机的气动力问题	40
2.2.4 航天飞机的气动热问题	50
2.3 解决航天飞机气动问题的技术途径	56
2.3.1 地面模拟试验	56

2.3.2	理论计算及工程计算	58
2.3.3	飞行模拟试验	59
2.3.4	解决气动问题的技术途径	60
2.4	未来航天飞机的气动问题	61
第3章	航天飞机气动设计	63
符号	63
3.1	概述	63
3.2	气动设计需要解决的基本问题及方法	65
3.3	气动设计回路及一体化设计系统	68
3.3.1	航天飞机气动设计回路	69
3.3.2	一体化设计系统基本内容	69
3.4	航天飞机气动布局设计	74
3.4.1	载人航天器的气动布局演变	76
3.4.2	关键气动布局参数及性能参数	80
3.4.3	气动布局优化设计方法	84
3.4.4	机翼外形优化设计	95
第4章	航天飞机气动力预测方法	100
符号	100
4.1	概述	101
4.2	坐标定义及外形几何处理	102
4.3	亚、跨、超、高超声速气动力预测方法	104
4.3.1	气动力基本公式	105
4.3.2	压力系数、导数及其修正量的计算	108
4.3.3	国外几种压力系数计算方法	112
4.3.4	控制面的几何参数和气动力	113
4.3.5	计算实例	115
4.4	横向喷流计算	122
4.4.1	工程计算模型	122
4.4.2	喷流干扰的工程计算方法	124
4.5	稀薄气体气动力预测方法	130

4.5.1	当地化计算方法原理	131
4.5.2	当地外形参数处理	133
4.5.3	气动动力系数的计算	134
4.6	小结	145
第5章	航天飞机气动力特性数值模拟	147
	符号	147
5.1	概述	148
5.2	欧拉方程数值模拟	148
5.2.1	简述	148
5.2.2	非定常欧拉方程及边界条件	149
5.2.3	数值模拟方法	150
5.2.4	网格生成方法	159
5.2.5	计算结果	162
5.3	航天飞机气动特性 N-S 方程数值模拟	169
5.3.1	简述	169
5.3.2	控制方程及边界条件	169
5.3.3	差分格式及边界处理	173
5.3.4	网格生成	177
5.3.5	计算结果	179
5.4	类升力体外形俯仰阻尼特性数值研究	183
5.4.1	简述	183
5.4.2	数值方法	184
5.4.3	计算网格	185
5.4.4	俯仰阻尼导数计算方法	186
5.4.5	计算结果	187
第6章	航天飞机气动加热问题	190
	符号	190
6.1	概述	190
6.2	气动加热工程计算方法	192
6.2.1	流动区域的划分	192

6.2.2	有限三角形面元的建立	193
6.2.3	压力计算	195
6.2.4	边界层外缘参数计算	197
6.2.5	气动加热预测	198
6.2.6	自由分子流区压力、热流预测	202
6.2.7	稀薄气体过渡区压力、热流预测	203
6.3	壁面辐射平衡温度预测	203
6.4	热流预测与试验结果比较	204
6.5	航天飞机气动加热预测实例	207
6.5.1	机身热流、平衡温度预测	208
6.5.2	机翼上热流、平衡温度预测	208
6.5.3	立尾翼上热流、平衡温度计算	211
6.6	小结	212
第7章	航天飞机热防护	214
	符号	214
7.1	概述	214
7.2	航天飞机热防护的特点与要求	217
7.3	航天飞机热防护系统	219
7.4	大面积防热与局部防热	221
7.5	防热材料内部热响应计算模型	224
7.5.1	一维热传导基本方程	224
7.5.2	基本方程的差分离散	225
7.5.3	基本方程的初始条件与边界条件	226
7.6	航天飞机防热材料温度分布计算实例	227
7.6.1	局部防热材料——碳-碳材料温度分布 计算	227
7.6.2	大面积防热——材料-陶瓷防热瓦温度 分布计算	229
7.7	航天飞机防热技术的发展	231
第8章	航天飞机飞行稳定性	233

符号	233
8.1 概述	234
8.2 航天飞机返回过程及运动特点	234
8.3 航天飞机稳定性分析	236
8.3.1 基本外形静稳定性导数	236
8.3.2 横/航向偏离预测判据	239
8.3.3 静稳定度控制增益的初步分析	243
8.3.4 动稳定性	244
8.4 Weissman 图的产生发展及应用	246
8.4.1 Weissman 图的产生及发展	246
8.4.2 Weissman 图在再入航天飞行器气动布局 设计中的应用	248
8.4.3 国内航天体轴坐标系下横/航向偏离参数 表达式	249
8.5 小结	250
第9章 航天飞机气动数据库	252
9.1 概述	252
9.1.1 航天飞机气动数据库的意义	253
9.1.2 航天飞机气动数据库经验对我国的现实 意义	255
9.2 航天飞机气动数据库	256
9.2.1 航天飞机气动数据库基本概念	256
9.2.2 航天飞机气动数据库管理的基本原则	259
9.2.3 Chrysler 公司的技术方案	261
9.2.4 DATAMAN 系统运行的方案	270
9.2.5 气动数据库管理的效能评估	277
9.2.6 气动数据库设计手册的建立	281
9.2.7 航天飞机气动数据库管理的经验教训	287
9.3 气动数据库发展的新特点	290
9.4 小结	307

第 10 章 鲁棒设计技术	308
10.1 概述	308
10.2 鲁棒设计方法	310
10.2.1 田口方法	311
10.2.2 响应面方法	312
10.2.3 基于鲁棒可行性的优化设计方法	313
10.2.4 基于随机规划的鲁棒设计	316
10.3 小型载人再入飞行器鲁棒设计	317
10.3.1 设计方法概要	317
10.3.2 设计因素试验设计	318
10.3.3 鲁棒设计	320
10.4 小结	323
参考文献	324