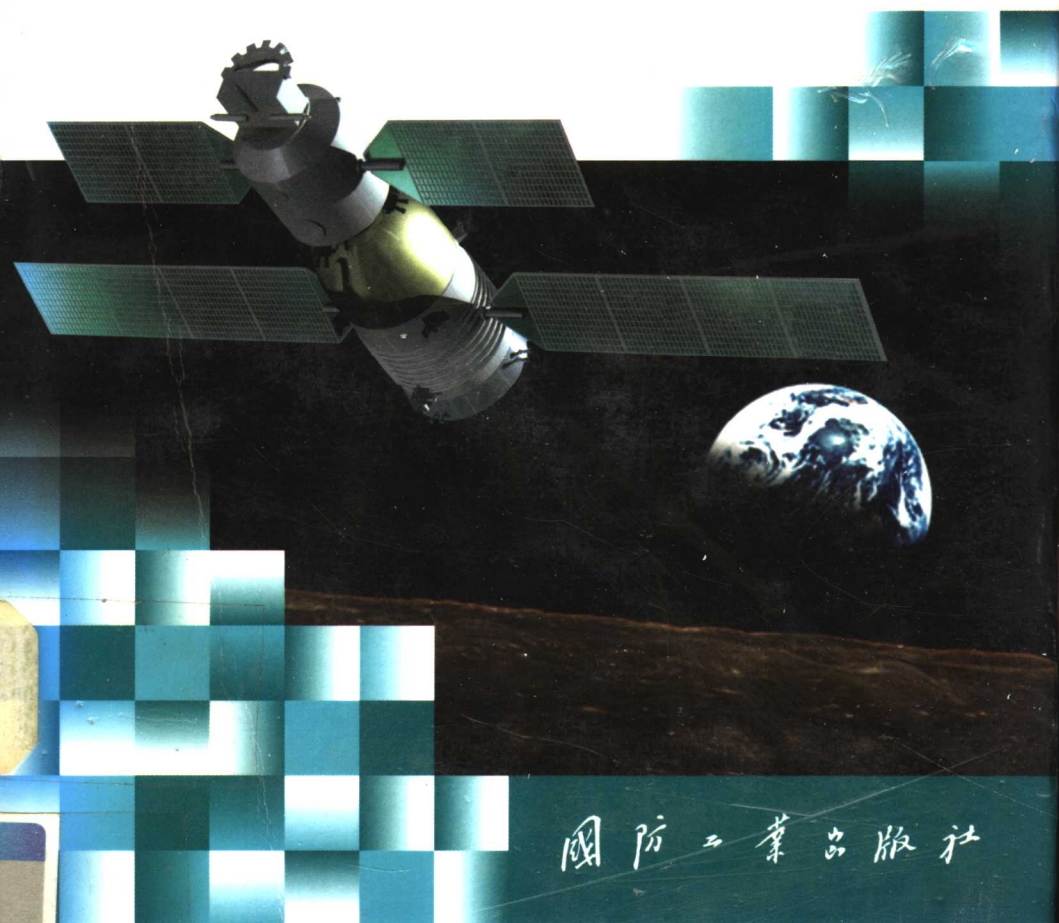


载人飞船返回舱空气动力学

Reentry Capsule Aerodynamics

主编 张鲁民 副主编 潘梅林 唐 伟

顾问 张涵信 贺德馨

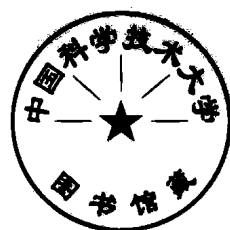


国防工业出版社

载人飞船返回舱空气动力学

Reentry Capsule Aerodynamics

主 编 张鲁民
副主编 潘梅林 唐 伟
顾 问 张涵信 贺德馨



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

载人飞船返回舱空气动力学/张鲁民主编. —北京:
国防工业出版社, 2002. 6

ISBN 7-118-02778-2

I. 载... II. 张... III. 载人航天器 - 再入体 - 空气动力学 IV. V476.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 004510 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 197 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

序

1992年,我国开始研制载人飞船。1999年11月20日6时30分,“神舟”一号成功发射升空,绕地球飞行约21h后于21日3时41分飞船返回舱按预定程序安全着陆。这一辉煌成就揭开了中国人即将进入宇宙的新篇章。在研制飞船返回的全过程中,空气动力学是重要的支撑技术之一,它不仅在概念研究和预先研究阶段起到先行作用,而且贯穿于研制过程的各个阶段。这本专著的技术内容充分说明空气动力学在航天飞行器研制中的突出地位。

在载人航天工程的牵引和推动下,中国空气动力研究与发展中心的研究工作者和全国航天气动研究工作者一起,为我国载人飞船的研制成功,建立并发展了返回舱气动力学、气动热力学和气动物理学等方面的理论计算方法,为返回舱的气动设计、性能评估提供了大量有效数据。在此基础上,作者系统总结了这些研究成果,从返回舱气动问题的主要特点出发,研究分析了返回舱的气动布局,论述了气动力特性计算、再入热环境和热防护计算,介绍了通信中断,研讨了飞行稳定性问题,最后对气动特性、飞行性能的评估方法及内容作了详细的讨论。上述内容大都应用在载人航天工程中,说明该书技术内容具有理论与实际相结合的突出特点。

长期坚持在航天气动事业的岗位上默默无闻地献身于航天事业的科技工作者,将他们的研究成果撰写成专著出版,这是一件值得支持和鼓励的好事。这本专著对航天飞行器气动设计及航天气动研究工作者有重要参考价值。

翱翔太空,遨游宇宙是人类美好的梦想。自第二次世界大战以后,世界各航天大国展开了激烈的竞争。1961年苏联的加加林乘坐“东方”号飞船首次进入太空;1969年美国的“阿波罗”11号飞船完成了人类首次登月。新中国成立以来,中国人民经过几代人的艰苦奋斗,依靠自己的力量,在当时经济和科学技术比较落后的条件下,成功地研制了“两弹一星”,取得了令世人瞩目的辉煌成就。

21世纪是中华民族振兴的新时代,中华儿女有雄心壮志,要在航天高科技领域牢固地占有一席之地。我国在载人航天方面的研究工作正以坚实的步伐前进,任重道远,热诚希望年青一代航天科技工作者继承和发扬老一代航天科技工作者研制“两弹一星”的光荣传统,在最短的时间内,不仅赶上而且超过国外的科学成就。让我们共同努力,为极大地增强我国的国防实力、提高我国国际地位而奋斗。

庄逢甘

2001年7月

前 言

载人飞船返回舱与导弹、航天飞机的气动布局有所不同,其气动力、气动热及再入物理等方面有其自身的特点。返回舱返回地面时,要穿越高马赫数、低雷诺数的非连续流区,然后进入高超声速、超声速、跨超声速、低超声速的连续流区,其空气动力学问题很多,且难度大。因此,返回舱空气动力学对返回舱的研制起着先导的制约作用,并贯穿于返回舱研制和发展的全过程。

本书以作者在载人飞船返回舱气动问题研究领域所获得的研究成果为基础,较全面地论述了载人飞船返回舱空气动力学各个方面。全书共分八章,第一章为概论,简单明了地介绍了载人飞船返回舱气动问题的主要特点(执笔张鲁民、许光明);第二章介绍载人飞船返回舱的气动布局设计(执笔唐伟、张鲁民);第三章是载人飞船返回舱气动特性研究(执笔张鲁民、唐伟);第四章和第五章分别讨论了载人飞船返回舱的再入热环境和返回舱热防护问题(执笔潘梅林);第六章介绍通信中断问题(执笔曹文祥);第七章介绍飞船返回舱的飞行稳定性特性(执笔张鲁民、唐伟);第八章讨论载人飞船返回舱气动特性、飞行性能的评估方法(执笔唐伟、张鲁民)。参加本书编写的还有杨在山、谢砚儒、彭治雨、何开锋、王安龄。

本书在编写过程中得到庄逢甘院士、张涵信院士、童秉纲院士等的大力支持和帮助,并提出了许多宝贵意见,还得到了中国航天科技集团第五研究院第五〇一设计部飞船返回舱气动设计师周其成、方方的大力支持,此外还有中国空气动力研究与发展中心的研究人员如王喜荣、徐翔、张勇、唐小伟、马强、刘强、李志晖以及国防

科技大学刘伟等为本书提供了技术支持,在此表示衷心的感谢。

希望本书能够对我国开展载人航天飞行器的研制起推动作用,并希望本书能够对航天气动工作者、气动专业研究生及大专院校学生有所帮助。由于作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,诚恳地欢迎读者批评指正。

编者

2001年10月20日

目 录

第一章 概 论	1
符号.....	1
1.1 概述	2
1.2 载人飞船返回舱气动问题的主要特点	5
1.3 气动布局设计	7
1.4 气动力问题.....	11
1.5 热环境、热防护、温度分布和热应力问题.....	15
1.6 飞行稳定性问题.....	17
1.7 通信中断问题.....	18
1.8 研制裁人飞船各阶段中返回舱的气动问题 研究内容.....	19
1.9 解决返回舱气动问题的关键技术.....	20
第二章 载人飞船返回舱的气动布局设计	22
符号	22
2.1 概述.....	23
2.2 气动布局研究.....	27
2.3 外形参数对其气动特性影响的分析.....	28
2.4 气动布局优化设计.....	29
2.4.1 优化设计的基本思想.....	30
2.4.2 优化设计模型.....	34
2.5 优化气动布局算例.....	36
第三章 载人飞船返回舱气动特性研究	40
符号	40
3.1 概述.....	42

3.2 亚、跨、低超声速气动力插值拟合计算方法·····	43
3.3 高超声速气动力、静、动导数计算方法·····	44
3.3.1 工程近似计算方法·····	44
3.3.2 数值计算方法·····	50
3.3.3 计算结果及分析·····	67
3.4 稀薄气体气动力计算·····	71
3.4.1 当地化方法·····	71
3.4.2 直接模拟蒙特卡罗方法·····	78
3.4.3 小结·····	82
第四章 载人飞船返回舱的再入热环境 ·····	84
符号 ·····	84
4.1 概述·····	86
4.2 返回舱的外形和热环境·····	87
4.3 返回舱特征点热环境工程预测方法·····	91
4.3.1 零攻角驻点热流·····	91
4.3.2 有攻角驻点热流·····	92
4.3.3 肩部峰值热流·····	95
4.3.4 倒锥迎风母线上热流·····	96
4.4 返回舱大面积热环境计算方法·····	97
4.5 边界层外缘条件 ·····	101
4.5.1 理想气体 ·····	101
4.5.2 平衡气体 ·····	103
4.6 边界层厚度 ·····	105
4.7 化学非平衡加热 ·····	107
4.7.1 冻结边界层的壁面催化特性 ·····	110
4.7.2 冻结边界层的壁面加热 ·····	113
4.8 自由分子流和稀薄过渡区加热 ·····	116
4.8.1 流动区域的划分 ·····	116
4.8.2 自由分子流加热 ·····	117
4.8.3 稀薄过渡区加热 ·····	119

4.9 返回舱再入热走廊	120
4.10 地面实验数据的天地换算	122
第五章 载人飞船返回舱的热防护	123
符号	123
5.1 概述	124
5.2 碳化材料的烧蚀机理	128
5.3 表面的热化学烧蚀	130
5.4 低密度碳化材料内部热响应的物理模型	134
5.4.1 热解区模型的基本方程	135
5.4.2 热解面模型的基本方程	143
5.4.3 简化模型的基本方程	144
5.4.4 算例	145
5.5 国外飞船的防热结构	148
第六章 载人飞船返回舱通信中断问题	153
符号	153
6.1 概述	154
6.2 通信的目的和意义	157
6.2.1 话音信道	157
6.2.2 遥测信道	158
6.2.3 指令信道	159
6.2.4 电视信道	161
6.2.5 其它信道	161
6.3 再入等离子鞘	162
6.3.1 等离子鞘的形成	162
6.3.2 等离子鞘计算	163
6.4 电磁波在等离子体中传输	168
6.4.1 等离子体参数	168
6.4.2 电磁波传输	171
6.4.3 电磁波衰减工程计算	174
6.5 返回舱通信中断评估	176

6.5.1 通信波段	176
6.5.2 通信中断预估	178
6.6 减轻通信中断技术	182
6.6.1 提高电磁波频率	182
6.6.2 喷射液体亲电子物质	183
6.6.3 改善防热材料	185
6.6.4 其它减轻通信中断技术	187
第七章 载人飞船返回舱的飞行稳定性研究	189
符号	189
7.1 概述	191
7.2 返回过程及其运动特点	194
7.3 稳定性问题的研究方法	196
7.3.1 理论研究方法	196
7.3.2 试验研究方法	203
第八章 载人飞船返回舱气动特性、飞行性能评估	214
8.1 概述	214
8.2 评估系统的构成及内容	214
8.2.1 评估系统的构成	214
8.2.2 评估系统的内容	215
8.3 评估系统的要求	217
8.4 气动特性分析与评估	218
8.4.1 绕流特点	218
8.4.2 气动力分析与评估	219
8.4.3 气动热及热防护分析与评估	222
8.4.4 通信中断分析与评估	228
8.5 结论	228
参考文献	230

Contents

Chapter 1	Generality	1
Notation		1
1.1	Introduction	2
1.2	Main Features of Aerodynamic Problems for the Capsule of Manned Spacecrafts	5
1.3	Aerodynamic Configuration Design	7
1.4	Aerodynamic Problems	11
1.5	Heat Environment, Heat Protection, Temperature Distribution and Heat Stress Problems	15
1.6	Flight Stabilization Problems	17
1.7	Communication Blackout Problems	18
1.8	Aerodynamics Research Contents in Various Stages of the Capsule Development	19
1.9	Key Techniques for Solving Aerodynamic Problems for the Capsule	20
Chapter 2	Aerodynamic Configuration Design for the Capsule of Manned Spacecrafts	22
Notation		22
2.1	Introduction	23
2.2	Aerodynamic Configuration Study	27
2.3	Analysis for Effects of Configuration Parameters on Aerodynamics Characteristics	28
2.4	Optimization Design of the Aerodynamic Configuration	29

2.4.1	Basic Idea Design of Optimization	30
2.4.2	Optimization Design Models	34
2.5	Research Examples for the Optimized Configuration	36
Chapter 3 Research on Aerodynamic Characteristics		
	of the capsule of Manned Spacecrafts	40
	Notation	40
3.1	Introduction	42
3.2	Interpolation Fitting Methods of Aerodynamic Characteristics for Subsonic, Transonic and Hypersonic Flows	43
3.3	Prediction Methods of Aerodynamics, Static and Dynamic Derivatives for Hypersonic Flows	44
3.3.1	Engineering Prediction Methods	44
3.3.2	Numerical Computation Methods	50
3.3.3	Computational Results and Analysis	67
3.4	Calculation of Aerodynamics for the Rare Gas	71
3.4.1	Localization Method	71
3.4.2	Monte – Carlo Direct Simulation Method	78
3.4.3	Concluding Remarks	82
Chapter 4 Entry Heat Environment for the Capsule		
	of Manned Spacecrafts	84
	Notation	84
4.1	Introduction	86
4.2	Configuration and Heat Environment for the Capsule	87
4.3	Engineering Prediction Method of Heat Environment for the Specific Points	91
4.3.1	Heat Flux of Stagnation Point at a Zero-Angle-of-Attack	91
4.3.2	Heat Flux of Stagnation Point with	

an Angle of Attack	92
4.3.3 Peak Heat Flux at the Shoulder	95
4.3.4 Heat Flux along a Windward Meridian Line on an Inverse Cone	96
4.4 Method for Surface Heat Flux Prediction	97
4.5 Outer Edge Condition of the Boundary Layer	101
4.5.1 Perfect Gas	101
4.5.2 Equilibrium Gas	103
4.6 Boundary Layer Thickness	105
4.7 Chemical Non-equilibrium Heating	107
4.7.1 Wall Catalyzing Characteristics of a Freezing Boundary Layer	110
4.7.2 Wall Heating of a Freezing Boundary Layer	113
4.8 Heating in Free Molecule Flow and Rare Transition Region	116
4.8.1 Division of Flow Regions	116
4.8.2 Free Molecule Flow Heating	117
4.8.3 Heating for the Transition Region	119
4.9 Reentry Heat Corridor for the Capsule	120
4.10 Correlation of Ground Experiment Data with Flight Data	122
Chapter 5 Heat Protection for the Capsule of Manned Spacecrafts	123
Notation	123
5.1 Introduction	124
5.2 Ablation Mechanism for Charring Materials	128
5.3 Thermochemistry Ablation on Surfaces	130
5.4 Physical Model of Inner Heat Response for Low Density Charring Materials	134
5.4.1 Basic Equations for the Pyrogenation Region	