

# 载人飞船空气动力学

## Manned Spacecraft Aerodynamics

国防工业出版社



赵梦熊 编著

# 载人飞船空气动力学

## Manned Spacecraft Aerodynamics

赵梦熊 编著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

载人飞船空气动力学/赵梦熊编著. - 北京:国防工业出版社,2000.1

ISBN 7-118-02106-7

I. 载… II. 赵… III. 载人航天器-空气动力学 IV.  
V476.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 05158 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)

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 5 117 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1-1500 册 定价:12.00 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，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. 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，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防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，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，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

#### IV

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，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工业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

做好气动工作

为发展载人航天服务

左逢甘

一九九八年十一月

## 序 言

人类的发展从陆地到海洋、到大气层、再到太空,这是历史发展的必然。21 世纪人类将进入开发利用空间资源的新时代。发展以永久性空间站为主体的载人航天体系已成为世界各大国的重要战略目标。实现这一目标的前提之一,是要发展经济、有效和可靠的天地往返运输系统。宇宙飞船是目前发射最多的天地往返运输系统。自 1961 年 4 月 12 日前苏联成功地发射了世界上第一艘载人飞船“东方”号以来,苏美两国已向太空发射了 160 多艘载人飞船。1986 年我国制定的《高技术研究发展计划纲要》中阐述了发展我国载人航天的必要性,要在世界航天高技术领域占有一席之地。

气动力和气动热研究是研制载人飞船工程的关键技术。载人飞船的外形特殊、飞行范围广、参数变化大,飞行马赫数  $0 \sim 30$ , 飞行高度  $0 \sim 500\text{km}$ , 经历了亚声速、跨声速、超声速和高超声速诸领域,跨越了连续流、过渡流和自由分子流各流区,形成了化学平衡流、非平衡流和冻结流各状态,存在着粘性效应、分离效应、低密度效应和真实气体等各种效应。航天飞行器的空气动力学问题非常广泛和复杂。

赵梦熊同志所写的《载人飞船空气动力学》在消化吸收了国外已成功的载人飞船气动资料基础上,系统地论述了载人飞船的空气动力学和气动热力学的各主要问题,既有理论计算,也有风洞试验和飞行试验的方法及其结果,并进行了分析研究。

国内目前还没有关于载人飞船空气动力学的专著。本书内容有创见,学术思想新,技术数据翔实,学术水平较高,是密切结合科

技现代化和国防现代化需要的高新技术专著,对航天事业发展有显著促进作用。

左逢甘

1998 年 11 月

## 前 言

航天技术是 20 世纪下半叶人类认识和改造自然进程中最活跃、最有影响的科技领域,也是人类文明高度发展的重要标志。从 1957 年 10 月 4 日前苏联第一颗人造地球卫星发射成功、1961 年 4 月 12 日前苏联航天员加加林乘“东方”号载人飞船进入太空,开创了人类航天飞行的新纪元,到 1981 年 4 月 12 日美国“哥伦比亚号”航天飞机发射成功,是航天运载系统从一次性使用进展到重复使用的质的飞跃。半个世纪以来,世界航天技术取得了划时代的成就,成为世界新技术革命的重要组成部分。

我国的航天事业始于 50 年代中期,于 1956 年 10 月 8 日成立国防部第五研究院始。1960 年 11 月 5 日我国第一枚近程地地导弹发射成功。1970 年 4 月 24 日发射成功“东方红一号”卫星。40 多年来,我国航天事业从无到有、从小到大,取得了举世瞩目的成就,现已具备了加速发展的坚实基础和巨大潜力。

80 年代以来,世界正在兴起以高技术为中心的新技术革命。航天技术是高科技中的一个重要领域。发展以大型空间站为主体的航天体系已成为各大国的重要战略目标。

1985 年任新民院士在谈到我国航天技术未来发展时指出,我国航天技术的下一个奋斗目标应该是在外层空间建立我国的空间站。在他的倡导下,1985 年 7 月航天部召开了首届太空站研讨会,这是我国载人航天预研工作的起步。

在任新民、庄逢甘、王永志、孙永成、钱振业等航天专家领导下,作者参与了载人航天技术的研究工作,并陆续发表了一些论文和专著,主要有:

- a. 主编《二〇〇〇年的中国空气动力学》专著;

b. 与庄逢甘院士合著《航天飞机空气动力学》系列论文,在1987~1989年的《气动》杂志上连载;

c.《载人飞船空气动力学》系列论文,在1994~1996年的《气动》杂志上连载;

d. 主编《“联盟”号返回舱空气动力学》专集等。

本书是在这些论文和专著的基础上编写而成的。本书的出版得到了庄逢甘、孙永成、崔尔杰、湛潜、李素循等研究员的指导、帮助和评价,国防科技图书出版基金评审委员会的支持和资助,作者谨向他们表示衷心的感谢。由于成书时间比较仓促,缺点和错误在所难免,敬请批评指正。

赵梦熊

1998年11月9日于北京

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 小升阻比载人飞船返回舱的外形设计            | 1  |
| § 1.1 返回舱形状选择                   | 5  |
| § 1.2 返回舱外形参数选择                 | 5  |
| 参考文献                            | 10 |
| 第二章 小升阻比载人飞船返回舱的空气动力特性          | 12 |
| § 2.1 球冠倒锥形返回舱的外形母线方程和特征点<br>参数 | 12 |
| § 2.2 返回舱再入气动力计算                | 18 |
| § 2.3 现有三种小升阻比返回舱的气动力性能比较       | 23 |
| 参考文献                            | 29 |
| 第三章 小升阻比载人飞船返回舱的配平气动特性          | 30 |
| § 3.1 飞行器的气动配平状态                | 30 |
| § 3.2 球冠倒锥形返回舱配平气动特性的风洞试验<br>结果 | 31 |
| § 3.3 返回舱再入配平气动特性的飞行试验          | 37 |
| 参考文献                            | 44 |
| 第四章 载人飞船返回舱的动稳定性                | 45 |
| § 4.1 试验数据的换算                   | 45 |
| § 4.2 返回舱的俯仰阻尼系数                | 48 |
| § 4.3 返回舱动稳定性的几个重要问题            | 53 |
| 参考文献                            | 56 |
| 第五章 载人飞船返回舱的压力分布                | 58 |
| § 5.1 载人飞船返回舱的再入轨道              | 58 |
| § 5.2 球冠倒锥形返回舱的再入流谱             | 60 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| § 5.3 球冠压力分布               | 61         |
| § 5.4 倒锥压力分布               | 64         |
| § 5.5 拐角圆环压力分布及其影响         | 67         |
| § 5.6 底部压力                 | 69         |
| 参考文献                       | 71         |
| <b>第六章 载人飞船返回舱的再入气动环境</b>  | <b>72</b>  |
| § 6.1 地球大气模型               | 72         |
| § 6.2 载人飞船返回舱的再入走廊         | 74         |
| § 6.3 返回舱再入的驻点参数           | 75         |
| § 6.4 气动相似参数               | 76         |
| § 6.5 离解和电离效应              | 79         |
| 参考文献                       | 81         |
| <b>第七章 载人飞船返回舱的气动热流率分布</b> | <b>83</b>  |
| § 7.1 半球头部驻点热流率            | 83         |
| § 7.2 零攻角半球头部热流分布          | 86         |
| § 7.3 零攻角球冠热流分布            | 88         |
| § 7.4 有攻角球冠热流分布            | 90         |
| § 7.5 倒锥热流分布               | 93         |
| 参考文献                       | 95         |
| <b>第八章 载人飞船返回舱的烧蚀防热</b>    | <b>97</b>  |
| § 8.1 防热方案、结构和材料的选择        | 97         |
| § 8.2 炭化材料的烧蚀机理、烧蚀模型和材料性能  | 100        |
| § 8.3 炭化烧蚀材料的防热性能计算        | 103        |
| § 8.4 计算与试验结果的比较           | 106        |
| 参考文献                       | 110        |
| <b>第九章 载人飞船逃逸飞行器的气动稳定性</b> | <b>111</b> |
| § 9.1 无喷流时逃逸飞行器的气动特性       | 112        |
| § 9.2 喷流干扰对逃逸飞行器气动稳定性的影响   | 113        |
| § 9.3 鸭翼对逃逸飞行器气动稳定性的影响     | 118        |
| § 9.4 栅格稳定翼对逃逸飞行器气动稳定性的影响  | 119        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| § 9.5 逃逸飞行器的动稳定性 .....            | 120        |
| 参考文献 .....                        | 123        |
| <b>第十章 载人飞船逃逸飞行器的分离气动特性 .....</b> | <b>124</b> |
| § 10.1 两体分离空气动力学特性 .....          | 124        |
| § 10.2 逃逸飞行器的分离气动力学特性 .....       | 129        |
| § 10.3 逃逸飞行器的飞行验证试验 .....         | 134        |
| 参考文献 .....                        | 137        |

# Contents

|                  |                                                                                                                                     |    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1</b> | <b>AERODYNAMIC CONFIGURATION</b>                                                                                                    |    |
|                  | <b>DESIGN OF MANNED SPACECRAFT</b>                                                                                                  |    |
|                  | <b>REENTRY MODULE</b>                                                                                                               | 1  |
| 1.1              | The Selective Method of Reentry Module Configuration                                                                                | 5  |
| 1.2              | Parameter Selection of Reentry Module Configuration                                                                                 | 5  |
|                  | References                                                                                                                          | 10 |
| <b>Chapter 2</b> | <b>AERODYNAMIC CHARACTERISTICS</b>                                                                                                  |    |
|                  | <b>OF MANNED SPACECRAFT REENTRY</b>                                                                                                 |    |
|                  | <b>MODULE</b>                                                                                                                       | 12 |
| 2.1              | The Equations in Generating Curve and the Parameters of Characteristic Points of Spherical Segment-Reversing Cone of Reentry Module | 12 |
| 2.2              | Aerodynamic Calculation of Reentry Module                                                                                           | 18 |
| 2.3              | Aerodynamic Characteristic Comparison Between Three Type Reentry Modules                                                            | 23 |
|                  | References                                                                                                                          | 29 |
| <b>Chapter 3</b> | <b>THE TRIM AERODYNAMIC CHARACTERISTICS</b>                                                                                         |    |
|                  | <b>OF MANNED SPACECRAFT REENTRY</b>                                                                                                 |    |
|                  | <b>MODULE</b>                                                                                                                       | 30 |
| 3.1              | The Trim Aerodynamic Attitude of Flight Vehicles                                                                                    | 30 |
| 3.2              | The Wind Tunnel Trim Aerodynamic Characteristics of Reentry Modules                                                                 | 31 |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3 The Flight Trim aerodynamic Characteristics of Reentry Modules .....                                       | 37        |
| References .....                                                                                               | 44        |
| <b>Chapter 4 THE DYNAMIC STABILITY CHARACTERISTICS OF MANNED SPACECRAFT REENTRY MODULE .....</b>               | <b>45</b> |
| 4.1 The Transformation of Test Data .....                                                                      | 45        |
| 4.2 The Pitch-Damping Parameter of Reentry Module .....                                                        | 48        |
| 4.3 Some Important Problem of Dynamic Stability Character of Reentry Module .....                              | 53        |
| References .....                                                                                               | 56        |
| <b>Chapter 5 THE PRESSURE DISTRIBUTIONS OF MANNED SPACECRAFT REENTRY MODULE .....</b>                          | <b>58</b> |
| 5.1 The Reentry Trajectories of Reentry Module .....                                                           | 58        |
| 5.2 The Reentry Flow Pattern of Spherical Segment-Reversing Cone of Reentry Module .....                       | 60        |
| 5.3 The Pressure Distributions of Spherical Segment .....                                                      | 61        |
| 5.4 The Pressure Distributions of Reversing Cone .....                                                         | 64        |
| 5.5 The Pressure Distributions of Comerred Toroidand It's Effect .....                                         | 67        |
| 5.6 Base Pressure .....                                                                                        | 69        |
| References .....                                                                                               | 71        |
| <b>Chapter 6 THE AERODYNAMIC AND AEROTHERMODYNAMIC CIRCUMSTANCES OF MANNED SPACECRAFT REENTRY MODULE .....</b> | <b>72</b> |
| 6.1 The Atmospheric Model of Earth .....                                                                       | 72        |
| 6.2 The Reentry Corridor of Reentry Module .....                                                               | 74        |
| 6.3 The Stagnation Parameters of Reentry Module .....                                                          | 75        |
| 6.4 The Aerodynamic Similarity Parameters of                                                                   |           |

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Reentry Module .....                                                                             | 76        |
| 6.5 The Effects of Dissociation and Ionization .....                                             | 79        |
| References .....                                                                                 | 81        |
| <b>Chapter 7 THE AERODYNAMIC HEATING</b>                                                         |           |
| <b>DISTRIBUTIONS OF MANNED</b>                                                                   |           |
| <b>SPACECRAFT REENTRY MODULE .....</b>                                                           | <b>83</b> |
| 7.1 The Stagnation Heat-Transfer Rates of<br>Semi-sphere Nose .....                              | 83        |
| 7.2 The Heating Distributions of Semi-sphere Nose at<br>Zero Angle Attack .....                  | 86        |
| 7.3 The Heating Distributions of Spherical Segment at<br>Zero Angle Attack .....                 | 88        |
| 7.4 The Heating Distributions of Spherical Segment at<br>Angle Attack .....                      | 90        |
| 7.5 The Heating Distributions of Reversing Cone .....                                            | 93        |
| References .....                                                                                 | 95        |
| <b>Chapter 8 ABLATIVE THERMAL PROTECTION</b>                                                     |           |
| <b>OF MANNED SPACECRAFT REENTRY</b>                                                              |           |
| <b>MODULE .....</b>                                                                              | <b>97</b> |
| 8.1 The Selection Version, Structure, and Material of<br>Thermal Protection .....                | 97        |
| 8.2 The Ablative Mechanism, Ablative Model, and<br>Material Character of Charring Ablators ..... | 100       |
| 8.3 The Calculated Method for Predicting the Thermal<br>Performance of Charring Ablators .....   | 103       |
| 8.4 The Numerical Calculated Results Compared with<br>The Wind Tunnel Testing .....              | 106       |
| References .....                                                                                 | 110       |
| <b>Chapter 9 AERODYNAMIC STABILITY CHARACTE-</b>                                                 |           |
| <b>RISTICS OF LAUNCH ESCAPE VEHICLES</b>                                                         |           |