

Hypersonic and
High-Temperature Gas Dynamics

Second Edition

高超声速和 高温气体动力学

(第2版)

(美)小约翰·D. 安德森(John D. Anderson Jr.) 著

杨永李栋 译

宋文萍 译审



航空工业出版社

AIAA EDUCATION SERIES

013071474

V211
52

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

高超声速和高温气体动力学

(第2版)

(美) 小约翰·D. 安德森 (John D. Anderson Jr.) 著

杨永李栋译

宋文萍 译审



北航

C1680413

航空工业出版社

北京

V211

52

内 容 提 要

本书较系统地阐述了高超声速和高温气体动力学的基本知识,全书分为3部分,共计18章,并含有8个设计实例,分别介绍了无黏高超声速流动、高超声速黏性流动以及高温气体动力学的基本知识,全书内容详尽,语言生动,并紧跟时代前沿,对不同层次的读者均有一定的参考价值。

本书可供工程院校相关专业高年级本科生和研究生,以及专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高超声速和高温气体动力学:第2版/(美)安德森
(Anderson, J. D.)著;杨永,李栋译.--北京:航空
工业出版社,2013.9

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文: Hypersonic and High - Temperature Gas
Dynamics, Second Edition

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0142 - 9

I. ①高… II. ①安… ②杨… ③李… III. ①高超音
速空气动力学②高温气体-气体动力学 IV. ①
V211②O354.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第047300号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2011-2803

Translated from the English language edition: *Hypersonic and High - Temperature Gas Dynamics, Second Edition*, By John D. Anderson Jr. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978 - 1 - 56347 - 780 - 5. Copyright©2006 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

高超声速和高温气体动力学(第2版)

Gaochaoshengsu he Gaowen Qiti Donglixue (Di 2 Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013年9月第1版

2013年9月第1次印刷

开本:710×1000 1/16

印张:44.5

字数:895千字

印数:1—3000

定价:200.00元

《AIAA 航空航天技术丛书》 审委会

顾 问：(按姓氏笔画排列)

尹泽勇 冯培德 石 屏 关 桥 刘大响 宋文聪 张彦仲
李 天 李 明 杨凤田 陆孝彭 陈一坚 陈祥宝 赵振业
唐长红 顾诵芬 曹春晓 颜明皋

主 任：林左鸣

副 主 任：谭瑞松 顾惠忠 吴献东 张新国

委 员：(按姓氏笔画排列)

王之林 王向阳 王 坚 王英杰 王润孝 卢广山 刘春晖
刘选民 华 俊 曲景文 吴 松 李晓红 杨圣军 汪亚卫
陈元先 陈灌军 庞 为 郭思明 都本正 彭卫东 葛子干
蔡 毅 魏金钟

《AIAA 航空航天技术丛书》 编委会

主 任：张新国

副 主 任：王英杰 魏金钟

委 员：(按姓氏笔画排列)

丁文强 丁全心 尹红顺 牛文生 王永庆 王永明 王明皓
王聪梅 车 宏 邓景辉 冯子明 帅朝林 田 泽 白晓东
艾俊强 刘永泉 孙 聪 巩水利 朱知寿 朱荣刚 江和甫
严成忠 何胜强 吴希明 吴良斌 吴学仁 宋笔锋 张 弘
张明习 张 波 张继高 李文正 李东杰 李孝堂 李宏新
李周复 杨 伟 杨 旭 杨朝旭 杨 超 沈锡钢 苏炳君
陆志东 陆虎敏 陈聪慧 周自全 欧阳绍修 罗安阳 范彦铭
侯敏杰 姚 华 赵 霞 徐华胜 桑建华 益小苏 聂海涛
袁 立 郭德伦 陶春虎 曹奇凯 梁相文 梁晓庚 章怡宁
黄传跃 黄 佑 强宝平 曾元松 曾 军 童明波 董建鸿
蒲小勃 褚林塘 廖志忠 臧 军 樊会涛

编委会办公室

主 任：刘 鑫

副 主 任：史晋蕾 李苏楠

成 员：(按姓氏笔画排列)

安玉彦 李金梅 郭 玮 郭倩旒

丛书序（一）

中国航空工业要融入世界航空产业链，进行国际化开拓，参与国际合作和竞争，与世界航空航天企业共谋发展，需要的是强大的技术支撑。构建先进的技术研发平台，加速推进前沿科学技术的研究，加速推进航空发动机技术和航空先进材料技术领域的基础及应用技术研究、新产品研发与技术创新，关键是要有一批具有高水平、高素质的航空航天专业人才。而人才的培养离不开知识的传承，这套《AIAA 航空航天技术丛书》就为我们提供了一个很好的资源。

习人之长，补己之短，正视不足，奋发崛起，社会发展规律普遍如此。从这套书中，我们不仅能读到长久以来人类在探索天空的过程中积跬步而形成的基础的、科学的、先进的专业知识和技术，以及崭新的思维方式和解决问题的技巧及方法，更重要的是能在学习这些成功经验的同时，多注意看看前车之鉴，避开陷阱。在这里我想要与大家共勉的是，即使是在百科全书中也不能找到所有问题的答案，科学发展永无止境，航空航天业的进步带动着社会高精尖技术的发展，其中还有很多领域及问题需要我们去探索和解决，因此，我们要抱着虚心的态度去学习，勇于探索的态度去思考，用好这些书，读好这些书。

科技的进步是整个社会的进步。愿我们的科技工作者、科研管理人员和广大的院校师生，既能够从中学习到知识、寻找到答案，更能够汲取精华，并能积极探索，与自身的知识、技术和经验相结合，在中国航空工业整翼飞升之时，迸发出更加绚丽的思想火花。

林右鸣

中国航空工业集团公司董事长

丛书序（二）

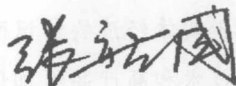
航空航天业是关系国家安全和国民经济命脉的战略性新兴产业，是高投入、高附加值的技术密集型产业。由于其技术含量高、产业链长、带动性强，其发展对我国经济结构调整、实现产业优化升级、提高综合国力具有重要意义。金融危机之后，全球对于实体经济的认识回归到正确的轨道上来，重振制造业已成大家共识。而依靠高新技术和高产品附加值的高端制造业，被认为是推进工业转型升级的突破口。航空航天业作为高端制造业的重中之重，如何发挥其“火车头”作用引领制造业拥有强大竞争优势，成为当务之急。而解决这一问题的关键，就是突破核心技术，加强自主创新。

相比欧美等发达国家，我国并没有系统地经历科学革命和工业革命的洗礼。科学技术和工业基础落后，是导致我们高端制造业发展缓慢的原因之一。科学技术的进步非一朝一夕之力。通常来讲，一个产业发展所依托的先进技术至少需要10~20年的储备周期。以前的飞机材料都是单一金属的，现在随着材料技术、制造技术的进步，发展到铝合金、铝镁合金、钛合金以及碳纤维材料。这种科学技术的进步改进了飞机的性能和功能，包括后期出现的预警机、加油机、空天飞机等，其背后凭借的也是飞机的电子设备、任务系统、功能系统等的不断升级，依靠的是一系列科学技术的积累。

夯实技术基础并谋求创新，除了依靠自身积极探索、不断积累技术成果，还要吸纳国外先进的技术成果和经验，建立开放式的科学技术发展架构。

着眼于此，中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）从美国航空航天学会（AIAA）的专业出版物中选择优秀图书引进翻译出版为中文版，推出了这套《AIAA 航空航天技术丛书》。熟悉 AIAA 的同行们都知道，AIAA 的出版物专注于航空航天领域，包括专业图书、期刊、会议论文和标准等，是为航空航天业提供信息服务的重要组成部分。AIAA 的图书工作委员会及其严格的审查制度保证了其图书具有较高的学术水平和技术含量。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》涵盖飞行器的结构技术、材料技术、制造技术、气动技术、推进技术、试验技术、控制技术、航电系统和武器系统等方面,是对国内有关专业领域的有益补充。这次引进翻译出版工作所涉及的专业领域较多,工作繁杂,难度很大,需要协调的事情也很多,衷心希望最终能够达到预期目的,真正为促进国际化的交流与合作、为培养高素质的航空航天专业人才、为前沿科学技术的探索和创新起到应有的作用。



中国航空工业集团公司副总经理

给 AIAA 中文版丛书的序言

美国航空航天学会 (AIAA) 由成立于 1930 年的美国火箭协会和成立于 1932 年的美国航空科学学会于 1963 年合并而成。自此, AIAA 就作为最早的平台服务于美国及全球航空航天技术的创新者、卓越者和引领人。广为人们所熟悉的奥维尔·莱特, 尼尔·阿姆斯特朗, 弗兰克·惠特爾, 凯利·约翰逊, 西奥多·冯·卡门和沃纳·冯·布朗都是 AIAA 的会员, 而每 6 名 AIAA 的会员中就有超过 1 名会员来自美国以外的国家或地区。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》是 AIAA 和中航出版传媒有限责任公司 (航空工业出版社) 良好合作的硕果。这种合作关系使得 AIAA 与中国航空学会之间以及 AIAA 与中国宇航学会之间的合作相得益彰。作为世界上最大的服务于航空航天业的技术学会, 由我们来推进 AIAA 图书中文版及双语版的出版和促成我们会员之间的交流是极为恰当之事。

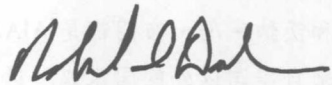
我们的合作最早是由中航出版传媒有限责任公司所提出的, 最初主要关注在对 AIAA 技术图书的翻译上, 采用译注的形式使得英文技术词汇有限的学生能够掌握图书阐述的概念。正如你们所看到的这套丛书, 现在它已不仅限于最初的目的和形式。我们不会忘记我们的宗旨, 而当我们展望未来时, 我们感到非常高兴的是这套 AIAA 中文版图书包含了 AIAA 所出版的所有类别的图书: 教育系列 (大学教材)、航空航天进展系列 (科技) 以及飞行图书馆系列 (大众爱好)。

另外, 最近几年里, AIAA 的所有图书、期刊文章和技术会议论文都已进行电子版存档, 我们也希望我们的国际会员和合作伙伴能够很方便地访问这个强大的航空航天信息图书馆。

由最初在出版上的合作开始, AIAA 已增强了其与中国的合作关系, 包括代表团互访和交流等活动。这些互惠活动使美国和中国的航空航天团体之间的联系纽带更加牢固, 也使双方收获了重要的友谊。各种开拓性的互动将使我们的国家间拥有更好的相互理解与合作关系。AIAA 非常感谢中国航空工业集团公司的张新国副总经理、中航工业经济技术研究院王英杰院长、中航出版传媒有限责任公司的刘鑫总经理和李苏楠主任为此次合作所做出的努力。

AIAA 致力于服务广大会员和航空航天业。如今, AIAA 有许多来自中国的会员, 随着更多的学生和专业人士通过这套丛书、AIAA 的其他出版物和直接的交流而对 AIAA 有更多的了解, 我们希望来自中国的会员数量将会不断增多。而对于如何改善我们的服务, 我们认为最好的想法是来自于我们的读者和会员。欢迎你们提出建议, 并且我相信中航出版传媒有限责任公司会将你们提出的建议转达给 AIAA。

我们期待着未来长期且富有成效的合作。



罗伯特·迪克曼
美国航空航天学会主席

To sarah - allen, Katherine, and Elizabeth Anderson, for all their

Love and understanding

感谢萨拉 - 艾伦, 凯瑟琳和伊丽莎白·安德森付出的所有爱和理解

原 版 序

我本人以非常愉悦的心情，欢迎小约翰·D. 安德森 (John D. Anderson) 先生编写的第2版《高超声速和高温气体动力学》列入《AIAA 教育系列丛书》。我与约翰先生相识多年，以至于超出了他或者是我所能忆及的岁月，本人一直觉得他的思维非常敏捷深刻。由麦格劳-希尔 (McGraw-Hill) 出版的本书第1版受到了广泛的认可，对所涉及的相关内容进行了深入的分析，并于2000年由AIAA再次出版。第2版对一些内容做了更新和范围扩充，我们相信，第2版将会受到同样的欢迎，特别是自从人们对高超声速研究重新燃起激情。该版内容分3个部分共18章。

约翰是该书的唯一作者，第一是因其在该领域宽广深厚的专业水平；第二是他对内容的把握非常到位，善于对内容进行合理组织和清晰展现；此外，约翰的写作手法极具可读性，受到了学生和专业技术人员的普遍欢迎；最后，在包括学术著作和杂志等AIAA的出版活动中，约翰一直起着关键和领导作用。这也使我们更加欣慰地将此书作为AIAA的头牌。

《AIAA 教育系列丛书》旨在通用航空航天领域涵盖非常宽泛的主题，包括基本理论、应用和设计。完整的书目表可在 <http://www.aiaa.org> 网站内找到。该系列的宗旨是建立一套可用于大学课程设置、继续教育参考文献以及专业发展课程，同时也可用于自学的基础教材。我们非常欢迎有关的新主题以及对作者的建议。

《AIAA 教育系列丛书》总编辑 约瑟夫·A. 舍尔茨

第2版前言

本书自第1版面世，已经过了20年的历程。在这20年的时间里，高超声速和高温气体动力学的研究进展卓著，主要在现代复杂计算流体力学方法的广泛应用以及重要飞行装备的研发等方面有所体现。但是，无论高超声速、高温气体动力学的研究怎样进步，其数理基础却是始终如一的。

这本书正是对那些不变的数理基础的阐释。所以，当前版本的目录和内容几乎完全沿用第1版的相关安排。现在，我们暂时停下，并来阅读第1版的序言再好不过——那里的每一句说明都对本书的第2版有效。例如，本书对于那些有意从基础开始学习高超声速、高温气体动力学的读者们，始终是一本完备、自足而有效的教学工具。本书不对读者在任何学科上的熟练程度存在门槛。如果你从未研究过高超声速或高温气体动力学，或者你对该领域的工作知之甚少，那么，这本书就是为你而打造的。另外，若你曾在该领域工作，并/或正在进行该领域的研究工作，而你希望对基本原理进行一个集中呈现，或对重要理论和科学方法做出一些拓展，或在物理的层面讨论所得的突出成果，或在研究的领域展示当前的想法与思路……那么，这本书，也必会成为协助你工作的利器。

和本书的第1版一样，第2版的写作方式依旧是诙谐而口语化的。读书的时候，这本书仿佛在和你说说话，就好像你和我坐在同一张桌上，讨论现在学习的课程一样。我希望你在学习这些内容的时候，心中能够充满开心和愉悦感。这并非什么难事，因为高超声速、高温气体动力学的领域本来就充满了趣味无穷、振奋人心的现象和应用。

那么，第2版比第1版有什么新增的东西么？很多啊！有很多材料被新增到这本书里，为了完成两个目的——第一，让本书紧跟时代前沿；第二，将帮助读者学习这一教学性目标提升到新的高度。例如：

1. 在过去20年里，这一知识领域又涌现了很多新的文献。这一新的版本借鉴了这些新的文献，以使书中的介绍与展示和当今同步。虽然这并不是关于最新技术发展的书——它是阐述基础知识的，但是最新技术发展却能用来为基础知识的完备添砖加瓦。

2. 关于激波的部分：激波的交互作用，尤其是最为重要的第4种交互影响，被作为一个新的小节增加到了第5章。

3. 尽管本书重点强调的是基础理论部分，现代高超声速和高温气体动力学也

正在愈来愈多地倾向于朝目标系统设计的方向发展。因此,这一版相对于第1版,增添了一种关于设计的叙述方式。在一些章节的末尾部分,新增了几个设计的例子,它们说明了这些基础理论的现实应用,或者阐释一些设计的方法。其中一些设计算例集中于考虑高超声速乘波飞行器设计的不同侧重方面。而在第1版里,并没有涉及乘波飞行器的有关内容。因为乘波飞行器拥有能应用于未来超声速飞行器研究的有趣布局,关于它们的内容在第2版被广泛地涉及。

4. 在每章的开始部分,增添了本章概述。本章概述是指导性的教学工具,使读者了解每章大致介绍的内容,并告诉读者材料的重要性。这些概述都以一种非常自然而随意的叙述方式呈现,用通俗而口语化的谈话来帮助读者对本章的详细内容产生兴趣与灵感。在这些概述里,我斗胆承认,我是想给读者们带来一些乐趣。

5. 在每章的开始部分,还增加了每章的知识路线图,以引导读者清楚本章知识材料的来龙去脉。同样,知识路线图也是为提高本书对于自学者的可读性而设的又一教学性工具。

在这里,我要特别感谢 AIAA 的罗杰·威廉斯 (Rodger Williams),你给了我建议和鼓励,并承担了第2版的出版工作,和你在一起工作的时光充满了乐趣,同时也感谢整个 AIAA 出版集团的人们,你们总让我觉得我是你们当中的一员。同样感谢苏珊-坎宁安 (Susan O. Cunningham),在20年前你就打印了这部书第1版的原始手稿,而如今第2版完成,你又再次答应我的要求,补充新增的材料。

最后,特别地,我诚挚地感谢鲁道夫·埃兹 (Rudolph Edse),我在俄亥俄州立大学学习时的导师和顾问,你给了我对这些基础的知识最原始而真实的欣赏与感知。还有约翰·D. 李教授以及俄亥俄州立大学航空宇航工程系在20世纪60年代的所有其他同仁,是你们向我传授了所有关于高超声速流动的知识。

小约翰·D. 安德森

2006年7月

第1版前言

作为一部自成体系的工具书，本书专门为有兴趣学习高超声速流动和高温气体动力学的读者而编写。本书不要求读者对各章节内容有预先的了解。如果你以前从没有学习过高超声速和/或高温气体动力学，且从未广泛地从事此领域的工作，那么此书就是为你量身定制的。另外，如果你从事过并/或正在进行该领域的研究工作，且希望有一个基础知识的集中呈现，重要理论和技术的拓展，从物理特征方面对突出成果的讨论，以及对该领域最新想法的描述，那么此书仍然是为你量身定制的。换句话说，本书致力于起到两个作用：①作为有效的课堂教材，它可以让教师方便地使用，同时让学生轻松地理解；②对于其工作涉及高超声速和/或高温气体流动的所有工程师、科研工作者，以及管理人员，本书可以作为他们案头现成的专业工具书。

对部分读者来说，只需要具备本科流体力学基本知识，其中包括可压缩流动基本理论课程，即可读懂本书。也就是说，希望读者对作者以前所著的两本书的类似内容有所了解，即《空气动力学基础》（麦格劳-希尔，1984）和《现代可压缩流动：结合历史的展望》（麦格劳-希尔，1982）的前半部分。实际上，本书中常常引用这两本书中的基本内容。最后，本书主要针对高年级大学生和一年级研究生水平，并且作为此阶段高超声速和高温气体动力学课程的主要课堂教材。为了加强教学指导作用，本书中大部分章的最后都准备了章后习题。

高超声速空气动力学是整个飞行包线中的一个重要部分，阐述着包线中的极限速度区域。对高超声速空气动力学的研究兴趣是在20世纪50年代和60年代面临高超声速返回大气层问题时被激发起来的，特别是以“水星”号、“双子座”号和“阿波罗”号为代表的有人太空计划。今天，许多包括高超声速飞行的新奇飞行器概念正在日新月异地发展，并且在某种意义上极大地激发了人们对高超声速空气动力学的兴趣。第1章中对这些新概念做了说明。本书为新一代工程师及研发人员提供了高超声速和高温气体动力学的基本教育，并以现代的观点呈现该领域的基本内容。在1966年之前，有关高超声速流动的书籍共出版了6本，本书是其第1本可用于基本课堂教学的书籍。所以，本书力图弥补其间20年的空隙，在对基本理论进行详尽讨论的同时，提供一个在高超声速和高温气体动力学领域内的现代教育。

为加深读者的理解,并激发他们的兴趣,本书沿袭了作者以前编写教材的风格,编写中有意识地融入了非正式交谈的形式。作者希望读者在学习这些主题中感受到乐趣。达到这一点也不是多难,因为高超声速与高温气体动力学蕴含着许多有趣并新奇的现象和应用。

本书分3个部分。第1部分涉及无黏高超声速流动,着重强调当马赫数增大时的纯流体力学效应。高温效应没有涉及。第2部分涉及黏性高超声速流动,着重强调在马赫数增大的同时,包含黏性传输和热传导现象的纯流体力学效应。高温效应没有涉及。最后,第3部分涉及高温对无黏和有黏流动的影响。以此方式,并以各种主导高超声速空气动力学问题的物理现象整合引导读者。为进一步增强内容的整体性,图1-24所示的“路线图”用以在逐步讨论过程中对学生的思路进行引导。

在对该书的撰写伊始,作者本想编入一个第4部分,涉及各种重要的,有关低密度流动、高超声速试验,以及结合高超声速飞行器设计的应用空气动力学主题。在本书的写作过程中,作者很快就发现,如果加入第4部分,将会使本书篇幅大大超过限制。所以,上面所提到的内容没有在这里做任何提及。这不是说这些内容不重要,而是为了努力强调目前本书所涉及的基本知识。所以,前3部分也就足够了,这3部分构成了高超声速和高温气体动力学必备基础知识的精华。缺省的第4部分的纳入尚需时日。

本书的目录在一定程度上借鉴了作者在马里兰大学讲授这些内容的经验。同时也借鉴了作者讲授为时3天的高超声速空气动力学导论培训课的经验,近年来作者有幸在10个不同实验室、大学讲授了这些培训课程。通过这些经验,作者对本书内容进行了精心梳理,以满足读者所需和所思。

作者诚挚地感谢一些机构和人士为本书所做的前期准备工作。首先,作者对史密森尼学会的美国国家航空航天博物馆怀有特别的感激之情,在那里,作者从1986—1987年作为查尔斯·林德伯格教授在该所航空部度过了获益良多且轻松的时光。本书重要的部分都是在这段舒心时光中于博物馆内撰写的。其次,作者感谢马里兰大学为促成学术性项目所提供的益智氛围。同时,感谢在马里兰大学高超声速空气动力学计划中作者的研究生们——感谢诸多关于高超声速和高温气体动力学本质的启迪性讨论。在本书原稿的至臻准备过程中,作者借助了自己的名叫苏珊·O.坎宁安(Susan O. Cunningham)的文字处理软件——这是一个真的叫做“人”的人,她以极高的专业水准完成了原稿的录入。最后,作者再一次感谢安德森全家给予的支持,他们让作者将此书的写作放在首要位置,他们与作者一起共享了完成此书过程的酸甜苦辣。

本人还要感谢在此书定稿期间提出许多有益的意见建议的同事们，特别感谢麻省理工学院的贾德森·R. 巴伦 (Judson R. Baron)，斯坦福大学的丹尼尔·伯沙德 (Daniel Bershader)，俄亥俄州立大学的约翰·D. 李 (John D. Lee)，以及俄克拉何马大学的莫里斯·L. 拉斯马森 (Maurice L. Rasmussen)。

小约翰·D. 安德森

1987年10月

目 录

第 1 章 一些基础思想	(1)
1.1 高超声速飞行——一些历史上的第一次	(1)
1.2 高超声速流动——为什么如此重要?	(4)
1.3 高超声速流动——是什么?	(12)
1.4 气动力和气动加热的根本来源	(21)
1.5 高超声速飞行轨迹: 速度—高度图	(24)
1.6 小结	(26)
习题	(28)

第 1 部分 无黏高超声速流动

第 2 章 高超声速激波—膨胀波关系式	(31)
2.1 引言	(31)
2.2 高超声速激波基本关系式	(32)
2.3 以高超声速相似参数给出的高超声速激波关系式	(37)
2.4 高超声速膨胀波关系式	(39)
2.5 小结	(41)
习题	(42)
第 3 章 当地表面斜度法	(44)
3.1 引言	(45)
3.2 牛顿流动	(46)
3.3 修正的牛顿理论	(52)
3.4 牛顿理论的离心力修正	(54)
3.5 牛顿理论的真实含义	(59)
3.6 切楔法和切锥法	(67)
3.7 激波—膨胀波法	(70)
3.8 小结	(73)