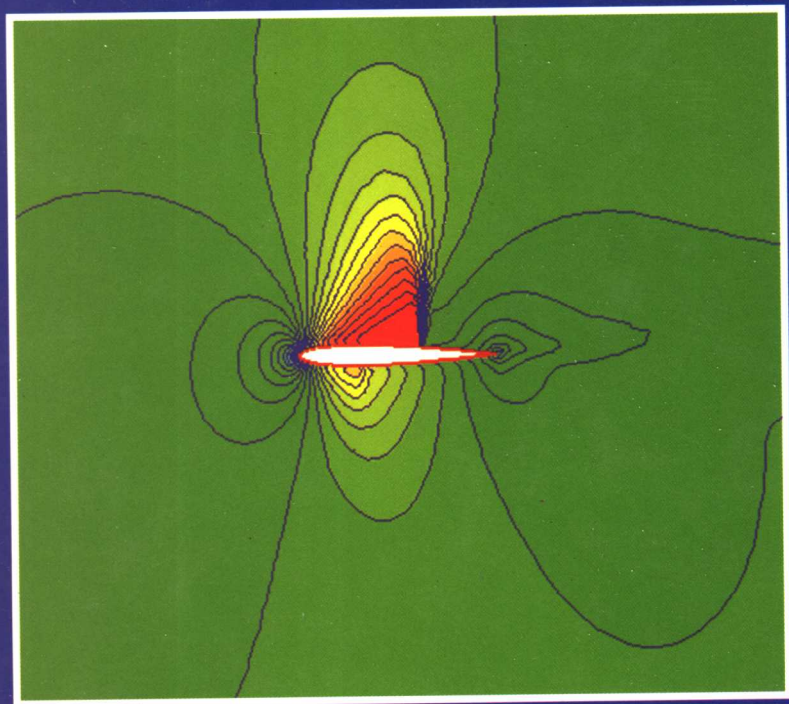


《近代空气动力学丛书》

跨声速空气动力学

Theory of Transonic Aerodynamics

伍贻兆 杨岷生 著



国防工业出版社

跨声速空气动力学

Theory of Transonic Aerodynamics

伍贻兆 杨岍生 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

跨声速空气动力学 / 伍贻兆, 杨岷生著. —北京: 国防工业出版社, 2004.11

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-03411-8

I. 跨... II. ①伍...②杨... III. 跨声速空气动力学 IV. V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 007551 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 10 $\frac{1}{2}$ 265 千字

2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 35.00 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

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,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

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 崔士义 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

序

有书应有序,序者必须说明为什么要写书,写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是 1994 年开始酝酿的,等书出齐肯定是下一世纪了。这是一套跨世纪的丛书,当然我们希望它能有跨世纪的意义。20 世纪初始有飞机出现,莱特(W. Wright, O. Wright)兄弟于 1903 年发明了飞机。到 30 年代,低速飞机的设计已日趋成熟,而空气动力学研究为此做出了突出的贡献。1934 年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W. F. Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)及卡门(T. von Kármán)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在 40 年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的,它强调的是一个一个专题的理论基础,是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后,人类很快进入了超声速时代,卡门和钱学森等人在 40 年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书,这就是由查雷(J. Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书,这套丛书直到 50 年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入 50 年代,洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在 1957 年 10 月 4 日发射了世界上第一颗人造地球卫星,显示了苏联有发射洲际导弹的能力;1961 年 4 月 12 日,世界上第一位航天员加加林(Ю. А. Гагарин)乘“东方”1 号飞船实现了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划,并于 1969 年

7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世纪性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指引下,由于国内空气动力

学部门和全国有关单位的大力协同,以及气动力学工作者的努力奋斗,在钱学森和郭永怀的率领下,不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统,而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下,抓住空气动力学总体,促进各学科之间的交叉,使我国的空气动力学在过去 40 多年的时间里得到了迅速的发展,可以说从无到有接近和达到国际先进水平,并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄,应该很好地加以总结,使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的,但是是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展,并且对世界航空航天事业也有所贡献。

庄逢甘

1999 年 9 月 9 日

近代空气动力学丛书编辑委员会 组 成 人 员

主 任 委 员 庄逢甘

副 主 任 委 员 张涵信 崔尔杰 贺德馨 张仁杰

委 员 王承尧 王政礼 邓学鋈 田 震

(按姓氏笔画为序) 乔志德 邬华谟 刘官德 安复兴

杨其德 杨岍生 李椿萱 吴芝萍

吴望一 沈 青 沈孟育 苗瑞生

范洁川 俞鸿儒 蒋 范 程厚梅

舒 玮 童秉纲

前 言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学,是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中,空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就,广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展,迎接新世纪挑战。总结经验,培养人才,更好地为航空航天事业和国民经济服务,特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由 20 多种单本专著组成,分理论和实验两部分。理论部分包括:跨声速空气动力学理论,无黏性高超声速空气动力学理论,稀薄气体动力学,计算流体力学——差分方法的原理与应用,计算流体力学谱方法,流体力学的有限元方法,高速气流传热与烧蚀热防护,多相湍流反应流体力学,高温非平衡空气绕流,湍流,旋涡与分离流动结构的分析,风工程与工业空气动力学,飞机设计空气动力学,发射气体动力学等。实验部分包括:风洞实验,风洞天平,风洞实验干扰与修正,脉冲风洞,近代流动显示技术等,丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性:丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性:丛书分成若干单本,每一单本仅涉及一个专门领域,是专著性丛书。近代性:丛书不仅重视学科已有的成就,而且重视近代的发展。系统性:每一单本专著,均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性:丛书的各单本专著联合在一起,基本覆盖了近代空气动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著,组成了以庄逢甘院士为主任委员的编辑

委员会,负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后,由国防工业出版社列选出版。

本书主要研究跨声速定常和非定常绕流的空气动力特性。跨声速流场中,存在激波及激波与附面层相互干扰,并导致跨声速阻力发散、升力下降甚至发生激波诱导流动分离、跨声速抖振与操纵面嗡鸣等复杂流动现象。本书共分8章,力求系统阐述跨声速绕流理论及其主要分析方法并充分反映近年来该领域国内外的研究成果,包括跨声速复杂流动现象的物理成因,改善跨声速绕流特性的措施,描述跨声速流场的物理模型与支配方程,跨声速混合流的理论分析及其有效的主要数值方法等重要内容。

本书的第3、4、5章由杨岙生教授编写,第1、2、6、7、8章由伍贻兆教授编写。

作者在此感谢《近代空气动力学丛书》编委会主任委员庄逢甘院士和副主任委员张涵信院士对本书的关心和支持;感谢清华大学沈孟育教授和西北工业大学乔治德教授对本书初稿的评审和宝贵建议;同时感谢参加本书出版工作的王江峰博士等。

由于著者水平限制,不当之处难免,敬请读者批评指正。

作者

2003.11.5

内 容 简 介

本书详细介绍了跨声速空气动力学发展的历史过程,系统地总结了跨声速流动的基本原理、跨声速绕流的渐近展开理论、跨声速速度图理论、绕翼型无激波跨声速流、跨声速激波—附面层干扰、跨声速非定常流和跨声速绕流数值解法特点等方面的主要经典理论,以及近年来跨声速流动分析的最新的重要研究成果。

本书适合于从事空气动力学研究的教师、工程技术研究人员和研究生阅读参考。

This book begins with a detail introduction on the developing history of the transonic aerodynamics on different periods, and then the typical theories about transonic aerodynamics, including the fundamental principles, the asymptotic expansion theory and hodograph theory of the transonic aerodynamics, the shock-free transonic flow around airfoils, the interaction of shock-boundary layer, unsteady transonic aerodynamics and the numerical solutions of transonic flow, as well as the new developments on transonic aerodynamics are systematically presented.

This book is propitious to teachers, researchers and post-graduate students in aerodynamics.

目 录

第 1 章 跨声速空气动力学发展的历史	1
1.1 1945 年以前跨声速空气动力学	1
1.2 1945 年—1960 年的跨声速空气动力学	3
1.3 1961 年—1975 年的跨声速空气动力学发展	16
1.4 1975 年以后的跨声速空气动力学	27
1.4.1 数值模拟方法的进展	27
1.4.2 实验模拟技术的进展	28
第 2 章 基本原理	31
2.1 基本方程组和基本关系式	31
2.2 激波和熵突跃	32
2.3 跨声速激波极线图	44
2.4 非平面激波后的涡量	49
2.5 跨声速绕流的特点	51
2.5.1 临界马赫数	51
2.5.2 翼型跨声速定常绕流特征	53
2.5.3 阻力发散马赫数	56
2.6 跨声速马赫数冻结原理	56
第 3 章 跨声速渐近展开理论	59
3.1 定常翼型和机翼绕流的跨声速渐近展开过程	59
3.1.1 薄翼型线性理论的渐近展开	59
3.1.2 薄翼型的跨声速定常绕流的渐近展开和跨 声速非线性小扰动近似方程	64
3.1.3 三维薄翼跨声速绕流的渐近展开	68
3.2 跨声速相似律	69

3.3 细长体绕流的跨声速渐近展开	73
3.3.1 细长旋成体不可压缩绕流的渐近展开	74
3.3.2 细长体跨声速绕流的渐近展开	78
3.4 细长体的升力、波阻力计算和面积律	94
3.5 跨声速流的远场性质	103
3.5.1 来流马赫数 $Ma_{\infty} = 1$ 时的远场特性	103
3.5.2 来流马赫数 $Ma_{\infty} > 1 (K < 0)$ 时跨声速远场 特性	106
3.5.3 来流马赫数 $Ma_{\infty} < 1 (K > 0)$ 时跨声速远场 性质	110
3.6 跨声速小扰动流场翼型头部的奇性	112
3.7 跨声速小扰动流场激波在物面附近的性质	114
第4章 跨声速速度图理论	122
4.1 二维可压位流的速度图方程	122
4.2 速度图方程的特解	124
4.3 物理平面到速度图平面的变换	126
4.3.1 流线的变换	126
4.3.2 任意曲线的 λ 变换	127
4.4 速度图平面到物理平面变换之间的奇性	129
4.4.1 极限线	129
4.4.2 歧线	135
4.5 跨声速流的近似处理和 Tricomi 混合型方程	139
4.5.1 跨声速小扰动源流	141
4.5.2 跨声速小扰动旋涡流动	143
4.5.3 绕半平面的跨声速小扰动流——跨声速 小扰动 Ringleb 流	144
4.6 Tricomi 方程的特解	147
4.7 对称翼型跨声速绕流的特解叠加法	152
第5章 绕翼型的无激波跨声速流	160
5.1 绕翼型无激波跨声速流的存在性问题	160

5.2	Morawetz 理论	161
5.3	无激波跨声速流对非定常扰动的稳定性	169
5.3.1	准一维跨声速管流的稳定性	169
5.3.2	二维无激波跨声速位流的稳定性	174
5.4	翼型无激波跨声速绕流的实验	179
第 6 章	跨声速激波 - 附面层干扰	184
6.1	跨声速激波 - 附面层干扰的物理结构	184
6.2	跨声速激波 - 层流附面层干扰的渐进展开分析	192
6.3	跨声速激波 - 紊流附面层干扰的渐进展开分析	194
6.4	跨声速激波诱导附面层分离的分析	196
第 7 章	非定常跨声速流	199
7.1	定常流与非定常流的关联	199
7.2	振荡翼型跨声速附着绕流的激波振荡运动和类型	199
7.3	刚性翼型上跨声速激波诱导分离的非定常流和压力脉动	207
7.4	非定常激波和涡的干扰	210
7.5	翼型和机翼的跨声速抖振	215
7.6	操纵面的跨声速嗡鸣	222
7.7	非定常跨声速流的基本方程及其近似	230
7.7.1	流动现象描述	230
7.7.2	跨声速流的基本方程	230
7.7.3	边界条件	237
第 8 章	跨声速绕流数值解法特点	238
8.1	定常跨声速位流方程的差分方法	238
8.1.1	引言	238
8.1.2	二维定常跨声速小扰动方程的差分解法	238
8.2	定常和非定常跨声速位流方程的积分方程解法	245
8.2.1	引言	245
8.2.2	二维定常跨声速位流的标准积分方程解法	245

8.2.3 关于二维对称翼型的扩展积分方程解法	249
8.2.4 二维非定常跨声速位流的积分方程解法	252
8.3 关于跨声速位流方程解的非惟一性问题	265
8.4 跨声速无粘阻力的数值计算	270
8.4.1 引言	270
8.4.2 跨声速小扰动理论的展开过程	270
8.4.3 阻力积分	277
8.4.4 数值分析	282
8.4.5 算例	286
8.5 跨声速 Euler 方程的有限元解法	290
8.5.1 引言	290
8.5.2 二维定常跨声速 Euler 方程的有限元 解法	291
8.6 关于 Euler 方程解的非惟一性问题	302
参考文献	304
主题词索引	313