



高等院校力学教材
Textbook in Mechanics for Higher Education

空气动力学 (下册)

吴子牛 主编

Wu Ziniu

王兵 周睿 徐珊姝 编著

Wang Bing Zhou Rui Xu Shanshu



清华大学出版社



Springer



高等院校力学教材
Textbook in Mechanics for Higher Education

空气动力学 (下册)

吴子牛 主编

Wu Ziniu

王兵 周睿 徐珊姝 编著

Wang Bing Zhou Rui Xu Shanshu



清华大学出版社
北京



Springer

内 容 提 要

本书分为上、下两册,涉及空气动力学的经典内容和一些非经典内容。经典内容包括升力产生的无粘与粘性机制,低速翼型与机翼空气动力学,一般亚、跨、超音速空气动力学和粘性流动的一些内容。非经典内容包括非定常空气动力学,高超音速流动及相关技术和大气环境与大气飞行器。除飞行器本身的空气动力学外,还较多地介绍了一些其他飞行物包括昆虫所涉及的空气动力学现象。本书兼顾了空气动力学的规范内容和趣味性内容。

本书配套出版了教学用电子教案和习题分析与解答。

本书可作为流体力学专业背景的本科生和研究生学习空气动力学的教材,也可供从事相关工作的各类专业人员学习参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

空气动力学.下册/吴子牛主编;王兵,周睿,徐珊姝编著. —北京:清华大学出版社, 2008.4

(高等院校力学教材)

ISBN 978-7-302-16744-0

I. 空… II. ①吴… ②王… ③周… ④徐… III. 空气动力学—高等学校—教材 IV. V211.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第001883号

责任编辑:石磊·赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地址:北京清华大学学研大厦A座

邮编:100084

邮购:010-62786544

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:三河市金元印装有限公司

经销:全国新华书店

开本:175×245 印张:41.75

字数:838千字

版次:2008年4月第1版

印次:2008年4月第1次印刷

印数:1~3000

定价:69.80元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:027492-01

引 言

1. 空气动力学在航空航天中的重要地位

空气动力学是航空航天最重要的科学技术基础之一。著名空气动力学家吴镇远教授在他 1981 年的学术论文中提到,从 19 世纪末开始,预测作用在运动物体上的空气作用力和力矩成为空气动力学研究的主题。正是由于该焦点问题,才使得空气动力学有别于理论流体力学的其他分支。当然,研究流体相对于物体的运动是流体力学的基本问题之一,但在大多数空气动力学应用中,对相对运动的研究不是最终目的,最终目的是揭示这样的机制:正是流体的运动对物体施加了力和力矩。一般情况下,很难获得描述一般粘性流体运动的方程的解析解。于是,过去人们尽量绕开粘性流动的细节,寻求一些间接方法获得气动力计算的表达式。例如,在 20 世纪初,人们把运动物体在空气中所受的升力与绕物体的环量联系起来,建立了升力理论,从而奠定了低速飞机设计基础,使重于空气的飞行器成为现实。

关于空气动力学的发展,2005 年由国家自然科学基金委员会数理部力学处流体力学调研组撰写的“流体力学学科发展调研报告”中,有较为详细的描述。报告这样写道:20 世纪 40 年代中期至 50 年代,可压缩空气动力学理论的迅速发展,特别是跨音速面积律的发现和后掠翼新概念的提出,帮助人们突破音障,实现了跨音速和超音速飞行,使得 20 世纪 50 年代中期研制成功了性能优越的第一代战斗机。第二次世界大战期间,军事航空的需求以及导弹武器的出现和投入使用,促使人们向更高的速度冲击。20 世纪 50 年代以后,开始了超音速空气动力学发展的新时期,发展了第二代性能更为先进的战斗机。1957 年苏联发射了第一颗人造地球卫星,1961 年第一艘载人飞船“东方号”升空,被认为是空间时代的开始。航天方面的重点放在高超音

速和再入飞行器的气动力与推进系统问题,特别是如何克服由于高超音速飞行和弹头再入大气层严重气动加热引起的“热障”问题。航空方面的重点则放在了发展高性能作战飞机、超音速客机、垂直短距起落飞机和变后掠翼飞机。这一时期空气动力学研究方面的一项重要成就是“超临界机翼”新概念的提出,它可以显著提高机翼的临界马赫数。20世纪70年代后,脱体涡流型和非线性涡升力的发现和利用,是空气动力学的又一重要成果,它导致了第三代高机动性战斗机的产生。高超音速空气动力学经历了20世纪70年代的沉寂,进入80年代后出现了复苏。由于军事需求的强力推动,美、俄两国都开始加紧研制第四代战斗机和高超音速飞行器以及跨大气层飞行器,其中最有代表性的是1981年美国发射的航天飞机,由此形成了现代空气动力学发展的新时期。目前正在发展的第四代战斗机,将高机动性、敏捷性、超音速巡航能力、高隐形能力、更大的高度/速度范围等诸多优异性能集于一身,对空气动力学、动力推进、电子、控制和材料、工艺等技术提出了更高要求。

2. 空气动力学的生命力

下面介绍的三部分(存在相互部分交叉的)内容很难从单一一本空气动力学专著或教材中全面介绍,经常被当作其他内容单列出来。而传统空气动力学只是这些内容的基础。

(1) 传统空气动力学的后续课程内容。高性能飞行器的研制,对空气动力学发展提出了许多具有挑战性的课题,如:边界层转捩、湍流、大攻角流动分离、旋涡、非定常流、流动控制、增升减阻、喷流干扰与推力转向、气动/电磁隐身、先进气动布局与优化、地面效应、低雷诺数流动与微流体力学、高温气体动力学与气动热防护等。这些复杂流动涉及高度非定常和非线性问题,包括物理/化学变化效应引起的时空瞬变流,等等。

(2) 临近空间带来的新空气动力学问题。临近空间(near space)是20~100 km的空天过渡区,是航空航天相结合的区域,是21世纪航空航天发展的热点区域。平流层飞艇、高高空无人机、高空气球、高超音速巡航飞行器以及亚轨道飞行器已经引起各国航空航天界的高度重视。平流层飞艇和高高空无人机已经进入样机研制阶段,高超音速巡航飞行器已经列入未来发展规划。在这一区域,将提出一系列新的空气动力学问题,包括超燃冲压发动机内流空气动力学和平流层飞艇空气动力学问题(如柔性体空气动力学问题,升力-浮力一体化设计问题)。对于高超音速巡航飞行器,由于飞行轨道奇特,因此必须考虑空气动力学尤其是稀薄气体动力学与轨道动力学的耦合。

(3) 飞行器以外的空气动力学问题。空气动力学对一系列其他领域,如能源、交通、建筑、环保等关系到21世纪经济和社会可持续发展的领域,同样起着十分重要的作用。例如,可再生能源中的风能利用;地面高速交通关键技术中的减阻、稳定、降

噪;大型建筑、桥梁的抗风能力;大气污染和水污染的有效防治等,都存在许多需要空气动力学研究的课题。另外,空气动力学在体育(如球类运动)、自然现象(如森林中的风、雪花、树叶与种子飘落)等方面也有应用。

随着计算机技术的发展以及计算流体力学的日臻完善,人们已经能够用数值方法直接求解飞行器流场。在这样一种大背景下,似乎有这样一种趋向,飞行器的气动力计算已经不再需要太多的空气动力学基础知识。其实,这种争辩不单是对空气动力学,对许多其他学科也是如此。人们会有一些相似的方法批驳这种不需要理论基础的观点。最简单的理由莫过于两条:①不懂基础会错误地使用软件,不知如何判断结果是否正确;②最糟糕的是不知如何创新,尤其不知如何发现新问题和解决新问题。其实,作者还想补充一条:③如果不懂理论基础,面对同样的即使是工程问题,也会因存在盲目性而付出太多的代价,尤其在面对数据、曲线与云图时,感觉不到规律存在,因而毫无深入探究的乐趣。

3. 空气动力学的学科定义

空气动力学作为学术研究内容,属于流体力学的一个分支。但作为在航天航空领域的应用,空气动力学的地位甚至超过流体力学本身。人们常说,空气动力学是飞行器设计的先行官,是航空航天领域的最重要的专业之一。按学科方向分类,空气动力学、气体动力学、粘性流体力学、计算流体力学等都是流体力学的内容。任何一本书或教材都力求全面,导致了它们越来越交叉,越来越相互覆盖,以致内容之间的区分越来越模糊。其实,如果我们认定它们之间有共同的基础即流体力学基本知识,那么它们之间的区别就会明显一些,混淆就会少一些。当然无论如何,它们之间有覆盖。比如说,有些内容既属于空气动力学问题,又属于粘性問題,因而就可能在两种书中都出现。但下面的区分还是很严格的:

(1) 空气动力学是研究空气运动规律及其与物体发生作用的科学,既包含不可压缩(低速)空气动力学,也包含可压缩(高速)空气动力学。

(2) 气体动力学是研究可压缩气体运动规律的。这里的气体可以是空气,也可以是其他气体,但必须是高速即可压缩的。

(3) 粘性流体力学研究考虑粘性作用的流体力学问题,主要凸现粘性作用,如附面层、粘性导致的涡运动、流动稳定性等。

(4) 计算流体力学则主要进行计算方法的研究。它是针对不可压缩、可压缩、粘流和无粘流的偏微分方程的计算。

4. 本书的目的与内容安排

很明显,如果我们在学习以上几门课程之前,假设它们共性的东西都学过,那么再学这几门课就方便多了。为此,我们假设读者已经学过流体力学基本知识,需要学

习空气动力学。这样就可以集中空气动力学的本质的、传统的内容,这就是编写本书的目的。如果读者事先没有学习过基本的流体力学知识,可以一边学习本书的内容,一边自学相关的流体力学基础知识。

空气动力学也存在基础的内容和侧重不同方向的专门内容。本书主要介绍空气动力学的基础内容,但也涉及一些比较深奥的内容和趣味内容,供读者自学。

本书主要是针对学过一些流体力学知识(如流体力学基本方程,无旋流理论,可压缩等熵流动,正激波,不可压缩附面层,等等)的读者编写的,分为上、下两册,共7章及4个总附录。其中前4章为上册内容,余下部分安排在下册。此外,还将配套出版电子教案供教师使用及《部分习题分析与解答》供读者参考。具体内容安排如下。

首先,着重介绍空气动力学最经典的内容——儒可夫斯基升力定理。我们采用复变函数方法来描述不可压缩无旋流升力产生的机制。这对没有学过复变函数的读者来说稍微有点困难,但作为空气动力学最核心的内容之一,使用复变函数可以使内容更严谨,因而是必要的。因此未学过复变函数的读者务必自学一些这方面的知识。另外,第1章也介绍升力产生的粘性机制,主要应用对象是球类运动。

其次,机翼和翼型是飞行器产生升力的部件,是空气动力学的核心对象之一。低速翼型与机翼的空气动力学理论,构成了整个飞行器空气动力学的基础。翼型与机翼低速空气动力学,是第2章要介绍的内容。

可压缩空气动力学包括亚音速空气动力学、超音速空气动力学和跨音速空气动力学,涉及的内容很多。需要了解可压缩流描述的基本方法,以及超音速流、跨音速流和亚音速流之间的区别。这是第3章介绍的内容。

本书第4章介绍与空气动力学相关的粘性流体力学知识。读者可能从不同途径,如流体力学基础或专门的粘流课程,已经学习过一些粘性流体力学知识,但该章介绍的粘流知识可能更贴近飞行器空气动力学的需要。

我们单独用一章来介绍运动物体与非定常空气动力学的内容。带旋转与加速的物体引起的流动,是现代空气动力学关注的重要内容。第5章介绍部分这方面的知识,虽然不够全面,但至少可以看到与定常空气动力学的区别。另外,该章也介绍运动结构(如激波膨胀波)的理论,以及复杂运动非定常粘性升力机制(包括微型鸟类与昆虫产生升力的机制)。

高超音速技术是受到国内外航空航天领域广泛关注的技术。高超音速流动与一般流动存在本质区别,因此有必要单独作为一章(第6章)介绍。

另外,学完空气动力学后,应该对大气环境与相关飞行器的知识有所了解,对空气动力学的应用范围有所了解。这样可以进一步理解所学知识的重要性以及体会自己原有知识的不足,从而增强进一步获取空气动力学知识的决心。为此,在第7章介绍大气环境和相关飞行器的知识,包括飞行器气动部件作用、飞行器设计以及飞行器和昆虫的大量有用数据。

在可压缩流尤其是高超音速流理论中,大量用到热力学、统计热力学以及动力学的一些基础知识。这些内容在总附录 A 中给出。

空气动力学主要是针对飞行器研究发展起来的。自然、建筑、体育、生物等领域也涉及不少空气动力学现象,飞行器以外的空气动力学现象趣味性可能更强。在总附录 B 中介绍空气动力学尽可能多的应用范围,供读者参考。

风洞是空气动力学的重要研究工具,在总附录 C 中,对风洞作了简介。

随着航空航天技术的发展,飞艇特别是高空飞艇越来越受到人们的关注。本书将用一章的篇幅集中介绍飞艇的空气动力学,以附录 D 的形式作为全书的结尾。

5. 编写原则说明

从传统上看,编书有 3 种目的。第一种总是针对成熟内容讲述基本原理,对象主要是没有系统学习过相关内容的读者,属于教材型。第二种是为了讲述最新研究成果,尤其是作者的成果,属于专著类型。第三种是为了实用,相关参数、数据、图表列写得详细和规范,可以为设计部门使用,属于手册型。一般要求对第一种采用演绎思维编写;对第三种采用归纳方式编写;对第二种,一般采用以点带线、以线带面的发散方式编写。

然而,现在对学生的培养强调厚基础与宽口径,学科之间也强调交叉的重要性。因此,对于像空气动力学这样的重要方向,为了满足读者可能存在的复合需求,我们以演绎方式为主,但涉及应用时,适当采用一些归纳,而涉及相关知识或最新成果时,适当采用发散模式。

空气动力学相对于流体力学基础,除了必要的严格的数学演绎外,更需要粗线条的推理。这些粗线条的推理建立在对实验结果的归纳基础之上。另外,我们在不少地方会穿插一些具有实际意义的相关内容,这些相关内容可能超出所在章节的知识范围。穿插的内容可能与仿生流体力学、稀薄气体动力学和飞行器设计等相关。只有密切与相关知识进行接口,才能正确地理解每一部分内容的使用范围。

从不同资料来源摘录的知识,尤其是数学公式,可能存在一些印刷或其他错误,我们力求将许多理论重新推导一遍,以尽量减少错误。我们在一些非原始文献上摘录资料、重新推导时,经常发现无法得出资料所给的结果,这迫使我们寻找更原始的文献。这导致两方面的问题。首先,许多古老的文献很难找到,重新推导耗费了大量时间。其次,即使找到了原始文献,也因不同时代习惯不一样,统一起来很困难。有的原始文献也存在一些错误。例如第 5 章介绍的旋转椭圆问题的受力分析,最原始的文献甚至给出了物体所受的力与环量变化率相关的结论。为了更正这些错误,我们不得不大量补充相关推导,因此使得本书越来越厚。补充相关内容并进行重新推导,重复的或新导致的错误在所难免,希望能得到读者的指正,以便再版时及时修正。在力求将尽可能多的论述给出足够详细推导的同时,也保留一些需要太多数学基础

而无法给出细节的例外。如果这样,我们尽量给出原始参考文献,如果没有来源,则以习题形式留给读者去完成。

6. 资料来源说明

由于国内外有了不少空气动力学教材,所以重新写教材,很难做到比已有教材或专著更好。为此,我们在保持整体思路有所取舍的同时,尽量吸纳一些整理得非常好的材料。这样,部分段落的材料,直接来自于某些现成的教科书。这些让我们得益的教科书或专著是:徐华舫的《空气动力学》,童秉纲、孔祥言、邓国华编写的《气体动力学》,张兆顺与崔桂香编写的《流体力学》,陈再新、刘福长、龚定一、周鼎义编写的《飞行器空气动力学》,瞿章华、刘伟、曾明、柳军编著的《高超声速空气动力学》,黄志澄编写的《高超声速飞行器空气动力学》,Anderson的《空气动力学基础》以及《高超声速与高温气体动力学》,等等。此外采用了一些参考书上的习题或例题,其中第3章大量采用了童秉纲、孔祥言、邓国华编写的《气体动力学》中的习题。还有不少其他参考书我们也从中得益不少,这里无法一一列举。由于电子资源很丰富,我们有不少介绍性材料来自一些网站。由于网站内容没有列出参考文献,因此很难保证这些内容是否直接由其他文献转抄过来。也有这样的情况,我们在某一时段撰写内容时,可能从网站上获得了一些介绍性资料尤其是图片,但在给参考文献时,可能找不回网站地址。由于这些原因,可能某些资料应该出现在一些专著中我们没有看到,而被误认为是网站材料,导致正确的资料没有被引用。还可能存在这样的情况,在编写初期,我们一直在参考一些文献撰写某些内容,在当时没有列举参考文献,在最后列参考文献时,某些参考文献存在被遗忘的可能性。由于内容十分多,所以这种遗忘在所难免。

由于这些原因,我们无法保证文献或资料来源引用会达到完全准确无误的程度,虽然我们尽量争取做到这样。如果相关作者发现存在这种疏漏,希望及时指正,以便再版时补上。

在本书各章节中,有一些具体内容需要引用出处,此时我们按引用顺序列在该章的末尾。但也有一些参考书或文献被大量参考,此时列在本书总的参考文献中。但两类参考文献的区别有时也不是绝对严格。总的来说,列在章末的文献,主要涉及的内容是:①公式的推导不适合放在本书中,所以直接给出来源;②某些局部介绍性内容在摘录时,在文献的基础上改动不大,列举文献表明是文献作者的思路;③某些比较新的知识。

除了利用已有资料外,我们也编写了不少自己的研究内容,这些新编内容来自于我们的科研成果。

7. 致谢与本书作者说明

在本书撰写过程中,我陆续将一些零散初稿或全稿发给或寄送给部分空气动力学家或流体力学专家。国家 CFD 实验室张涵信院士、航天部十一院崔尔杰院士、科学院研究生院童秉纲院士、航空 601 所李天院士、清华大学张兆顺教授、许春晓副教授、北京航空航天大学孙茂教授、国家 CFD 实验室叶友达研究员等阅读了该书初稿并及时提出了宝贵意见或鼓励。北京航空航天大学武哲教授在初稿修改过程中,将全书通读一遍,并提供了第 7 章第 5 节(飞行器隐身设计),让我深受感动。美国田纳西大学吴镇远教授看了本书部分初稿后,充分肯定该书的风格。在编写本书过程中,北京大学吴介之教授也一直非常关注并且给予支持。

我的学生庄礼深除了参与部分材料的录入外,还参与编写了本书 6.5.3 节,田中伟撰写了部分飞艇空气动力学内容,王晓欣提供了本书介绍的升力定理的证明,并撰写了部分复变函数内容。在此一并表示感谢。

吴子牛

2006 年 8 月 1 日

约 定

积分路径与旋转量的符号：环路积分、角速度、环量等均以逆时针为正，力矩和点涡以顺时针为正。

主要符号约定^①(有些符号在不同地方代表不同含义，但很少在同一地方代表不同含义)：

a, b	圆柱半径
c	翼型或机翼弦长或组分质量浓度
c_v	比定容热容
c_p	比定压热容
d	分子直径
e	内能
f	翼型厚度、自由能或者一般函数
g	自由焓或者一般函数
h	焓(无下标表示静焓, 下标 0 表示总焓, 下标 e 表示边界层外缘静焓, 下标 ∞ 表示来流静焓)
k	湍动能
l	展长或湍流含能尺度、积分尺度
p	压力或压强(下标 w 表示壁面值, 下标 e 表示边界层外缘值, 下标 ∞ 表示来流值, 下标 s 表示驻点的值)
q	热流量(下标 w 表示壁面热流量)

^① 个别地方可能有例外, 但不致引起混淆。

r	半径
s	熵
t	时间
u	x 向速度(下标 i 或 j , 表示 i 或 j 方向的速度, 下标 e 代表边界层外缘的值, 下标 ∞ 表示来流值)
v	y 向速度
w	z 向速度(三维问题)或复势(二维问题)
u_x, u_y, u_z	小扰动理论中, 流体扰动速度的三个分量
x, x_1	横向坐标
y, x_2	纵向坐标
z, x_3	展向坐标(三维问题)或复数平面的点(二维问题, 第 1 章与第 5 章)
D	阻力或扩散系数
E	总能或埃克特数
H	总焓
L	升力或特征长度
M	力矩
Ma	马赫数
M_x, M_y, M_z	横滚、偏航与俯仰力矩
R	曲率半径(下标 s 表示驻点曲率半径)
Re	雷诺数, 下标 ∞ 表示来流雷诺数, 下标 x 表示以 x 距离为特征长度的当地雷诺数或气体常数
S	机翼面积或熵
T	温度(下标 ∞ 表示来流值, 下标 w 表示壁面值, 下标 e 表示边界层外缘值, 下标 0 表示总温, 下标 r 或者 aw 表示恢复温度, 上标 $*$ 表示参考温度)
U	速度(一般指 x 方向的速度, 下标 ∞ 表示来流速度)或混合气体速度
V	速率或速度
V_x, V_y, V_z	小扰动理论中, 流体速度的三个分量(第 3 章)
X	阻力
Y	升力
α	攻角
β	激波角或者膨胀系数
γ	比热比或涡强
λ	展弦比(第 2 章)、分子平均自由程(第 6 章)、特征值(第 3 章)或湍流的泰勒尺度(第 4 章)

δ	边界层厚度(下标 t 表示温度边界层厚度)
ϕ	势函数
θ	物面倾角、流线折转角或无量纲温度
φ	小扰动势函数
ψ	流函数(第 1 章)或上下反角(第 2 章)
χ	后掠角
ξ	x 方向的变换坐标
η	y 方向的变换坐标或耗散尺度
ζ	z 方向的变换坐标
μ	动力粘性系数(下标 e 代表边界层外缘的值)
ν	运动粘性系数
U	复速度
κ	热传导系数或者卡门常数或波数
ρ	密度(下标 e 代表边界层外缘的值)
ω	涡量、角速度
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	涡量的三个分量
σ	应力张量
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	正应力
$\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$	剪应力
τ	雷诺应力或剪(切)应力张量
S	应变率张量
ϵ	湍流耗散率
Γ	环量
Ω	角速度
Ω	涡量
\Re	恢复因子(复温因子)
Φ	耗散函数

目 录

第 5 章 非定常空气动力学	1
5.1 非定常流动与坐标系的选择	1
5.1.1 非定常流动分类	1
5.1.2 绝对静止系与非惯性运动系的关系	3
5.1.3 绝对静止系与惯性运动系	9
5.1.4 惯性运动系流动求解与动力学过程	13
5.1.5 圆柱加速运动	15
5.1.6 附加惯性系数的一般求法	18
5.2 物体作刚体运动引起的流动	21
5.2.1 物体作任意运动在惯性运动系中引起的势函数	21
5.2.2 运动物体的勃拉休斯定理	24
5.2.3 运动椭圆所受的力和力矩	26
5.3 纸片与椭圆的下落运动	27
5.3.1 纸片模化处理: 运动椭圆问题	28
5.3.2 有涡脱落的情况	29
5.4 可压缩非定常流动	32
5.4.1 特征线方法	33
5.4.2 简单波与一维膨胀波	38
5.4.3 运动激波关系式	45
5.4.4 黎曼问题	52
5.4.5 波的反射与相互作用	57

5.5	不可压缩与可压缩非定常流动的本质区别	64
5.5.1	小扰动传播规律	65
5.5.2	大扰动问题	66
5.5.3	粘流问题	66
5.5.4	不可压缩流动的真正意义	68
5.6	特征线差分法与现代计算流体力学简介	70
5.6.1	特征线差分法	70
5.6.2	现代计算流体力学方法	74
5.6.3	计算流体力学无量纲参数 CFL 数,数值稳定性	76
5.7	复杂运动非定常粘性升力机制简介	78
5.7.1	运动物体引起的非定常流动动量定理及其应用	78
5.7.2	涡量守恒定理	82
5.7.3	用主力矩计算气动力的吴镇远定理	84
5.7.4	吴镇远定理的分析与应用、集中涡	88
5.7.5	Weis-Fogh 的非定常高升力机制	94
5.7.6	鸟类和昆虫的运动学与气动特性简介	101
附录 VIII	附加惯性张量的性质	108
附录 IX	任意运动物体合力表达式	109
附录 X	任意运动物体力矩表达式	111
附录 XI	椭圆作任意运动所受的合力和力矩	112
附录 XII	纸片下落问题的背景与研究现状简介	120
	XII.1 背景与概述	120
	XII.2 研究现状	120
	本章习题	124
	本章参考文献	128
第 6 章	高超音速及相关技术概述	131
6.1	高超音速流动的基本特征	131
6.1.1	薄激波层	133
6.1.2	强粘性效应	134
6.1.3	高熵层	135
6.1.4	高温真实气体效应	135
6.1.5	低密度效应与低雷诺数效应	136
6.1.6	小结	137
6.2	高超音速无粘流基本知识	138

6.2.1	马赫数无关原理	139
6.2.2	牛顿流模型	141
6.3	高超音速粘流基本知识	144
6.3.1	驻点热流	144
6.3.2	粘性效应与粘性相互作用简介	146
6.4	高温真实气体效应	151
6.4.1	高温空气的性质	152
6.4.2	化学与振动非平衡	154
6.4.3	非平衡流动、平衡流动和冻结流动概念及其模型	158
6.4.4	空气平衡流动计算模型举例	164
6.4.5	激光与太阳能热推进的冲量耦合系数与比冲	171
6.5	低密度(稀薄)效应	173
6.5.1	流动分区	173
6.5.2	不同流动区域的计算模型	175
6.5.3	自由分子流区的气动力计算、与 DSMC 方法的比较	179
6.6	空气热力学效应	186
6.6.1	空气热力学的重要性	186
6.6.2	高速边界层与转捩	188
6.6.3	激波反射与激波干扰现象	189
6.6.4	高超音速飞行器激波干扰现象分析	197
6.7	高超音速相关技术概述	201
6.7.1	实验中如何获得高马赫数	201
6.7.2	高超音速再入飞行的飞行力学问题	202
6.7.3	高超音速再入气动热问题	206
6.7.4	乘波体简介	209
6.7.5	高超音速飞行器若干关键技术分析	211
6.8	吸气式发动机工作原理分析	218
6.8.1	超音速飞行对发动机的要求	218
6.8.2	涡喷与涡扇发动机简介	220
6.8.3	冲压发动机简介	223
6.8.4	冲压发动机工作原理分析	224
6.8.5	均匀混合气体燃烧波理论	232
6.8.6	超燃冲压发动机关键技术简介	235
6.8.7	减阻问题	238
	本章习题	240

本章参考文献·····	244
第 7 章 空气动力学与大气飞行器 ·····	247
7.1 飞行空间与大气环境 ·····	247
7.1.1 飞行空间·····	247
7.1.2 大气结构·····	249
7.1.3 大气的成分·····	251
7.1.4 标准大气的数学模型·····	252
7.1.5 大气物理特征·····	254
7.2 飞行器气动部件及其作用 ·····	270
7.2.1 翼型升力、阻力与失速特性 ·····	270
7.2.2 机翼特性·····	273
7.2.3 尾翼·····	286
7.2.4 副翼、扰流片与减速板 ·····	291
7.2.5 涡流发生器·····	293
7.2.6 边条翼·····	296
7.2.7 翼身融合·····	299
7.2.8 高升力装置(增升装置)·····	301
7.3 飞行器气动布局及性能 ·····	304
7.3.1 飞机气动布局·····	305
7.3.2 飞机飞行性能的一般性概述·····	311
7.3.3 飞机的平衡、稳定性与操纵性 ·····	318
7.3.4 飞机的机动性·····	325
7.3.5 高超音速飞行器的再入飞行力学·····	330
7.3.6 典型飞机及其特点·····	336
7.3.7 飞行动物与微型扑翼飞行器·····	344
7.3.8 现代气动布局飞机——飞翼设计分析举例·····	353
7.4 飞机数据综合比较 ·····	361
7.4.1 气动数据比较·····	361
7.4.2 飞行性能数据比较·····	366
7.4.3 几何形状数据比较·····	370
7.4.4 整体性能数据比较·····	374
7.5 一体化设计中的气动隐身设计与飞机综合概念设计 ·····	378
7.5.1 隐身与雷达散射截面积·····	379
7.5.2 飞行器总体布局和外形隐身设计·····	384
7.5.3 飞行器隐身/气动一体化设计 ·····	393