



全国高技术重点图书·航天技术领域

高超声速飞行器 空气动力学

黄志澄 编著

国防工业出版社

高超声速飞行器空气动力学

黄志澄 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高超声速飞行器空气动力学/黄志澄编著. —北京:国防工业出版社, 1995. 12

ISBN 7-118-01510-5

I. 高… II. 黄… III. 高超音速飞行器-高超音速空气动力学 IV. ①V211 ②V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 12674 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{1}{2}$ 363 千字

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 20.20 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主 任:朱丽兰

副主任:刘 杲 卢鸣谷

委 员:(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	王守武	牛田佳	卢鸣谷	叶培大
刘 仁	刘 杲	朱丽兰	孙宝寅	师昌绪	任新民
杨牧之	杨嘉墀	陈芳允	陈能宽	张钰珍	张效祥
罗见龙	周炳琨	欧阳莲	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜
龚 刚	梁祥丰				

总干事:罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书·航天技术领域》 编审委员会

主 任:任新民

委 员:(以姓氏笔划为序)

王永志	刘琯德	吴大观	胡文瑞	顾诵芬
黄志澄	屠善澄			

序

高超声速空气动力学是空气动力学中最活跃的一个分支,它的诞生与发展和高超声速飞行器的发展紧紧相连。50年代至今,已陆续有不少高超声速空气动力学的书籍问世,但从高超声速飞行器的发展的需求作为主线来讲述高超声速空气动力学的书籍却不多见。作者长期从事高超声速理论和实验研究工作,近10年来,又以主要精力从事新型高超声速飞行器的概念研究工作,并在有关高等院校,系统地讲授过高超声速空气动力学的课程,使得作者有条件来完成高超声速飞行器空气动力学的编写工作。本书可以认为是作者近36年来从事高超声速研究工作的总结,在不少章节中,还介绍了作者自己的研究成果。

理论和实际结合与瞄准世界前沿是本书的两大特色。本书从高超声速空气动力学的基本理论出发,循着气动计算和气动设计两个方面,系统地总结了高超声速飞行器空气动力学的近代成果。在气动计算方面,近年来由于计算流体力学的发展,已经发展了较成熟的数值计算方法,但是在高超声速飞行器的概念研究和初步设计阶段,工程计算方法仍然是很重要的设计工具。本书除了以较大的篇幅介绍了高超声速无粘流动和粘性流动的数值计算方法和工程计算方法外,还介绍了诸如湍流模型、边界层转换、真实气效应、高精度高分辨率差分计算格式等高超声速空气动力学关键课题的近代进展。在气动设计方面,本书针对不同任务使命的高超声速飞行器,叙述了它们构形设计的特点和方法,并重点介绍了机体与发动机的一体化设计问题。在这部分中,本书也介绍了乘波外形和超燃冲压发动机气动设计等关键课题的近代进展。无疑,本书的

出版,将十分有利于我国的高超声速飞行器空气动力学的研究和教学工作。

在世界范围里,高超声速飞行器空气动力学是当今空气动力学研究工作的一个热点。为了设计出效费比更高的高超声速飞行器,各国航空航天界都制定了明确的研究计划,建造必要的实验设备,开展预先研究工作。除此之外,世界各国都十分重视加强国际间的学术交流和合作。本书的出版,也有利于高超声速飞行器空气动力学的国际学术交流。

庄逢甘

一九九四年十月三日

前 言

1994年年底,我终于完成了《高超声速飞行器空气动力学》的手稿。我心头的感觉——如释重负。

如今,“Hypersonic”已变成一个时髦的名词。在我的记忆里,我国杰出的科学家钱学森先生在1945年发表的著名论文《高超声速流动的相似率》中就用的是这个名词。是他,开创了高超声速空气动力学的研究领域;是他,和郭永怀先生、庄逢甘先生一起领导了我国高超声速空气动力学的研究工作。我有幸在这些杰出的科学家身边工作了一小段时间,亲聆他们的教诲,使我的一生获益匪浅。我这本书是对他们给我的教导的一个回报。郭先生和一些给我引路的老师,如陆士嘉先生,林同骥先生都已经故去,这本书也是对他们的一个纪念。

本书的第一章概述了高超声速空气动力学的兴起、迅速发展、停滞、复苏和出现新高潮的历史。学科的发展大体上都是这样波浪起伏地进展。我36年的工作经历正好伴随着上述的历程。1959年庄逢甘先生让我去北京大学听苏联专家讲的高超声速空气动力学课,半年的课程给了我高超声速动力学的启蒙。1962年钱学森先生在他的《星际航行概论》中提出了如今的所谓空天飞机的概念,吸引我1963年在北京空气动力学研究所组织了一个高超声速机翼空气动力学的课题。在这个课题组中,我们研究了高超声速机翼的气动力计算方法、有益干扰概念和包括乘波(Waverider)在内的高超声速构形。但好景不长,在设计革命化中,该课题作为麻雀被解剖,罪名是理论脱离实际,这个课题9个月就夭折了。在以后的多次运动中,还要为这个课题算老帐。从此,我的工作转入了火箭

和再入飞行器的空气动力学研究。作为这方面工作的开始,先要摸清这些飞行器存在的气动问题。1965年受钱学森先生和庄逢甘先生之托,在中国航空学会召开的第一次空气动力学学术讨论会上,我作了《弹道式导弹的气动问题》的特邀报告。为了能够在实现这个报告提出的目标中做一些贡献,我花了20多年的心血。做规划、搞建设、下农场、钻山沟。等再从事我心爱的研究工作时,已人到中年。1985年初,我又从绵阳市重返山沟,带领几个年轻人,艰难地开始航天飞机的空气动力学研究。1987年,我奉命参加第一届国家高技术航天领域专家委员会的工作,有机会结合工作在业余时间重新拣起1962年我从事过的课题,也算有幸和有缘了。

80年代,我在几个学报上发表的有关高超声速空气动力学的论文,特别是从1991年到1994年,我在《气动实验与测量控制》刊物上发表了12篇有关空天飞机空气动力学的评论(1993年7月23日钱学森先生曾来信对这组评论给予了鼓励),为完成这本书奠定了基础。

1982年,我受国防科技大学的邀请,拟在1983年给该校空气动力学专业开设高超声速粘性空气动力学课程,为讲授这个课程我编写了教材,也就是这本书的雏形。1983年春节,庄逢甘先生给我写信,要我暂停这项工作,全力投入再入飞行器回收方案的研究。我当然只能从命了。1986年,我在中国空气动力学研究中心超高速空气动力研究所讲授空气动力学基础时,写了高超声速无粘流动的教材。这以后,在我担任兼职教授和研究员的国防科技大学、中国科技大学、北京航空航天大学、西北工业大学、中国科学院力学研究所等单位,作过高超声速空气动力学的发展述评的报告。在中国宇航学会、中国航空学会、中国空气动力学学会联合组织的几次高超声速学术讨论会上,也作过这方面的报告。1992年和1993年,我在北京航空航天大学为本科生教授过两年高超声速空气动力学课程。通过这些活动,使本书的条理更加清晰,逐渐成形。在我教过的学生中,有些还继续从事空气动力学的研究工作,相当部分已经转业到其他领域。这本书的出版,无疑是对那些有志以毕

生精力从事高超声速空气动力学研究的学生、特别是对我那些在山沟里继续从事这方面研究的学生们的鼓励。但愿这本书能在他们今后的研究工作中,伴随他们渡过艰苦的岁月。

在编写这本书的时候,我希望该书具有两个特色:一是理论联系实际。本书既注意了学科的完整性,也注意了高超声速空气动力学应该与高超声速飞行器的气动计算和气动设计密切结合。非常遗憾,由于篇幅和时间的限制,本书没有包括高超声速实验设备和实验方法。二是尽可能反映学科前沿的发展。本书是否具备这两点,只有等读者来检验了。在这里不免要说一句老话:错误在所难免,恳请批评指正。

感谢我爱人对我生活的支持,感谢我的助手对本书出版做出的贡献。这是我送给他们的最好的礼物。

目 录

第一章 概论	1
1.1 高超声速飞行器空气动力学的兴起	1
1.2 高超声速流动的主要特征	2
1.3 天地往返运输系统的发展	5
1.4 高超声速飞行器空气动力学的新高潮	13
1.5 高超声速飞行器空气动力学的研究方法	16
第二章 高超声速飞行器的飞行特性	21
2.1 引言	21
2.2 火箭飞行器上升段的飞行特性	22
2.3 空天飞机上升段的飞行特性	26
2.4 再入段的飞行特性	30
第三章 气体动力学基本方程	40
3.1 引言	40
3.2 纳维-斯托克斯方程	40
3.3 基本方程的守恒形式	46
3.4 几种近似方程	49
第四章 高超声速无粘流动分析	53
4.1 引言	53
4.2 高超声速流动中的激波与膨胀波	53
4.3 高 Ma 数时的极限规律	59
4.4 高超声速小扰动方程	62
4.5 高超声速相似律	66
4.6 非定常比拟	69
4.7 自相似解	73

4.8 爆炸波理论	75
第五章 高超声速气动力的工程预测方法	79
5.1 引言	79
5.2 牛顿理论	80
5.3 波兹曼公式	85
5.4 切楔/切锥方法	88
5.5 激波膨胀方法	90
5.6 内伏牛顿理论	95
5.7 薄激波层方法	100
5.8 高超声速飞行器气动力的工程预测方法	104
第六章 高超声速无粘流数值计算方法	117
6.1 引言	117
6.2 有限差分方法的基本概念	118
6.3 变换和网格	124
6.4 典型的显式差分方法	129
6.5 高超声速钝体绕流问题	133
6.6 空间推进方法	143
6.7 有限体积方法	149
第七章 高超声速粘性流动分析	160
7.1 引言	160
7.2 高超声速边界层方程	162
7.3 可压缩层流边界层的相似性解	166
7.4 平板绕流的相似性解	171
7.5 驻点绕流的相似性解	178
7.6 局部相似性方法	183
7.7 层流的稳定性	186
7.8 高超声速边界层转换	192
7.9 可压缩湍流边界层	195
第八章 高超声速气动热的工程预测方法	203
8.1 引言	203
8.2 可压缩边界层的积分方法	204
8.3 参考焓方法	207

8.4	典型的高超声速气动热工程预测方法	209
8.5	边界层外缘条件的确定和工程预测的结果分析	212
8.6	可压缩粗糙壁湍流边界层工程计算方法	216
8.7	高超声速边界层转换的工程预测方法	221
8.8	高超声速粘性干扰的工程计算方法	224
8.9	激波—边界层干扰	232
8.10	激波—激波干扰	236
8.11	航天飞机热环境的预测	241
第九章	高超声速粘性流动的数值计算方法	248
9.1	引言	248
9.2	高超声速边界层的数值计算方法	249
9.3	隐式差分格式的绝对稳定	253
9.4	时间相关问题的隐式差分方法	257
9.5	数值耗散	262
9.6	守恒迎风格式	268
9.7	TVD 格式	272
9.8	再入飞行器粘性流动的数值计算	274
9.9	航天飞机粘性流动的数值计算	280
9.10	飞船粘性流动的数值计算	286
第十章	真实气体效应	294
10.1	引言	294
10.2	高温气体的输运特性	296
10.3	高温气体的化学反应	301
10.4	表面多相动力学	308
10.5	平衡流和非平衡流中的激波	310
10.6	平衡流动中飞行器的气动特性	315
10.7	非平衡流动中飞行器的气动力特性	320
10.8	表面催化对飞行器表面热流的影响	322
第十一章	高超声速内部流动	332
11.1	引言	332
11.2	高超声速内流的一维流动分析	333
11.3	高超声速进气道的气动设计	339
11.4	高超声速进气道的流场分析	345

11.5	超燃冲压发动机燃烧室的气动设计	349
11.6	超燃冲压发动机燃烧室的流场分析	254
11.7	最大推力喷管设计方法	356
11.8	最小长度喷管设计方法	359
11.9	超燃冲压发动机喷管的气动设计	362
11.10	高超声速喷管的流场分析	367
第十二章 高超声速飞行器的气动设计		373
12.1	引言	373
12.2	高超声速飞行器对气动性能的要求	374
12.3	弹道式再入飞行器的气动设计	377
12.4	垂直起降天地往返运输系统的气动设计	381
12.5	垂直起飞水平降落天地往返运输系统的气动设计	389
12.6	航天飞机机翼的优化	394
12.7	水平起降天地往返运输系统的气动设计	399
12.8	空天飞机的机体-发动机一体化设计	406
12.9	乘波构形的基本概念	411
12.10	乘波构形的优化	416
12.11	乘波构形与超燃冲压发动机的一体化设计	420
12.12	升力体构形	423

第一章 概 论

1.1 高超声速飞行器空气动力学的兴起

高超声速飞行器空气动力学是研究气体和高超声速飞行器相对运动时产生的力、热和其他物理现象的科学。高超声速飞行器既包括其飞行轨道具有穿越大气层的发射、上升段,在大气层外飞行的轨道飞行段,再入大气层的再入、返回段的航天飞行器(Space Vehicle),如卫星、飞船、航天飞机、空天飞机(Aerospace Plane)和弹道式导弹;也包括在大气层内以高超声速飞行的飞机和导弹。研究高超声速飞行器空气动力学的目的,是为了确定高超声速飞行器的气动特性和为高超声速飞行器的气动设计提供理论和方法。高超声速飞行器在它的飞行全过程中,要遇到各种速度范围,包括从亚声速、跨声速、超声速到高超声速范围内的气动问题。但那些较低速度范围内的气动问题有许多是和以较低速度飞行的飞行器遇到的气动问题是类似的,而影响高超声速飞行器气动性能的主要气动问题还是在高超声速范围内的气动问题。因此,本书的重点是讨论在高超声速范围内的气动问题,当然,也包括一些较低速度范围内的特殊气动问题。

高超声速空气动力学的兴起是与火箭、导弹、卫星、载人飞船的发展密切相关的。1942年10月,纳粹德国进行3V-2火箭的发射试验。由于火箭可以达到很高的速度,许多火箭专家开始注意高超声速气动问题。当时在美国加州理工学院喷气推进实验室工作

的我国著名科学家钱学森先生也研究了高超声速气动问题,他在1945年发表了著名的《高超声速流动的相似律》的论文^[1],与此同时,美国和前苏联的一些空气动力学家研究了高超声速无粘流动的一些基本规律,奠定了高超声速无粘流动的理论基础。1949年2月,美国用V-2火箭加上WAC下士(Corporal)火箭组成两级火箭进行了飞行试验,飞行高度达到392.6km,飞行速度达到8286km/h。这是世界上第一个以高超声速的速度飞行的飞行器^[2]。1957年10月,前苏联发射了第一个人造地球卫星。1961年4月,前苏联航天员加加林乘东方号飞船,实现了人类首次绕地球低轨道的飞行。1961年2月,美国空军的试验飞机X-15首次试飞,飞行 Ma 数超过5.3。为了解决火箭、导弹、载人飞船在高超声速飞行时,特别是弹头和飞船在再入大气层时,遇到的复杂的气动力和气动热问题,在这期间,高超声速空气动力学发展得很快。形成了高超声速飞行器空气动力学发展的第一个高潮。在50年代末期,已经基本上形成了高超声速空气动力学的理论体系。1959年,美国出版了海斯(Hayes)和普洛斯坦(Probstein)合著的《高超声速流理论》^[3],同年,前苏联出版了契尔内依(Г. Г. Черный)的《高超声速气体流动》^[4]。这两本书,系统地总结了前一阶段关于高超声速空气动力学的研究成果。除此以外,在40至50年代,还相继提出了一系列关于高超声速风洞的概念。在50至60年代,建成了一批常规高超声速风洞、激波风洞、炮风洞(Gun Tunnel)、热射风洞(Hot Shot Tunnel)和电弧风洞,并在这些风洞中进行了广泛的实验研究^[5]。

1.2 高超声速流动的主要特征

什么叫高超声速流动?概括地说,就是当飞行器的飞行 Ma 数增加时,某些物理现象变得愈来愈重要的流动。这些现象也就是区分超声速流动和高超声速流动的主要特征。这些现象包括由于流动 Ma 数很高而产生的高度非线性的流体动力学特性和由于流动

能量很大而引起的高温物理化学特性。具体来说,有以下现象存在。

一、薄的激波层

飞行器在超声速飞行时,飞行器与气流相遇的前缘将产生激波,激波与飞行器表面之间的流场,叫做激波层。当飞行器的飞行 Ma 数很高时,激波层就很薄。例如当 Ma 数为 36 时,完全气体(比热比为 1.4)绕过一个楔角为 15° 的尖楔,由气体动力学的斜激波理论可知,激波角只有 18° 。假若考虑真实气体效应(Real Gas Effects),激波角就更小。根据高超声速流动的激波层很薄这个特征,建立了包括牛顿理论在内的高超声速无粘流动的近似分析方法。另一方面,也正是激波层很薄,在 Re 数较低时,由于粘性边界层很厚,就必须在整个激波层内都考虑粘性。

二、钝体的弓形激波引起很大的熵梯度

高超声速飞行器的前缘一般都是钝的,而钝体在超声速气流中要产生弓形激波。在前缘的轴线附近,激波角接近 90° 。经过这段激波的流线,在激波后的熵值增加很多。往下游时,激波角逐渐减小。经过这段激波的流线,在激波后的熵值增加较少。因此在飞行器接近前缘的一段区域内,在垂直于飞行器表面的方向,存在很大的熵梯度。这种熵梯度很大的区域叫做熵层。由克罗柯(Crocco)定理可知,熵层也是涡量很大的区域。在这种情况下,采用经典的边界层理论,就难于确定边界层外缘条件。

三、无粘流与边界层之间存在相互干扰

在高超声速时,气流流动的很大动能在边界层中转换成内能,使得高超声速边界层内的温度很高。由于温度增高,从而使粘性系数增加,使得边界层增厚。另外,在垂直于飞行器表面的方向,边界层内的压力不变。温度的增加,引起密度减小。由质量守恒定律可知此时边界层的厚度就增加。因此,在高超声速时,沿飞行器表面的边界层要比较低速度时要厚得多。厚的边界层将使外部的无粘流动产生很大变化,而无粘流的变化又影响边界层的发展,这种无粘流和边界层的相互干扰叫做粘性干扰。进一步,当边界层不断增

厚,使得边界层和激波层完全融合时,就不能再用边界层的概念,而必须在整个激波层内,都要考虑粘性。

四、真实气体效应

高超声速飞行器前缘弓形激波后的高温 and 飞行器表面边界层中的高温,可以激发气体分子的振动,引起离解甚至产生电离。假若飞行器表面采用烧蚀防热,烧蚀产物进入边界层,形成复杂的化学反应。上述种种现象都使气体偏离完全气体的假设。在空气动力学的书籍中,通常把这些现象叫做真实气体效应。具体来说,当空气的温度超过 800K 时,可以激发分子振动的能量。此时质量定压热容 C_p 和质量定容热容 C_v 都将是温度的函数,从而比热比也将是温度的函数。当温度进一步增加时,将发生一系列化学反应。对于平衡化学反应, C_p 和 C_v 将是温度和压力的函数。因此, $\gamma = f(P, T)$ 。对于空气,在 1 个大气压时,当温度增加到 2000K 时,开始发生氧分子的离解 ($O_2 \rightarrow 2O$)。当温度增加到 4000K 时,氧分子基本上都离解了,而且在这个温度时,氮分子开始离解 ($N_2 \rightarrow 2N$)。当温度增加到 9000K 时,氮分子基本上都离解了。当温度高于 9000K 时,开始发生电离 ($N \rightarrow N^+ + e^-$, $O \rightarrow O^+ + e^-$),此时空气就变成等离子体了。

假若在流动中,发生振动和化学反应的时间与气体流过流场的时间相比要快得多,则这种流动叫做平衡流动。反之,则叫做非平衡流动。

真实气体效应对高超声速飞行器的气动力有重要的影响,特别是对于复杂外形的飞行器,影响很大。另一方面,真实气体效应对高超声速飞行器的气动加热,将产生十分显著而又十分复杂的影响。除此以外,由于电离而产生的自由电子,可以吸收电磁波,使得电磁波既不能传进飞行器内部,也不能从飞行器内部传出来。这种现象通常叫做“通信中断”。

关于高超声速流动,我们还要作几点说明:

(1) 究竟流动 Ma 数超过何值时才算是高超声速流动? 对于这个问题不能笼统地回答。实际上对于不同的气体和飞行器的不同