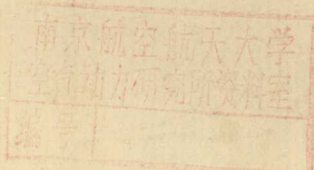


高超音速空气动力学

(上册)

尹协远 夏南 编



中国科学技术大学近代力学系

一九八二年三月

上册目录

第一章 结 论

§ 1—1	高超音速空气动力学的提出及其研究方法.....	6
§ 1—2	高超音速流动的物理图案.....	7
§ 1—3	高超音速流动的一般特点.....	10

第二章 一些简单流动

§ 2—1	高超音速一维定常等熵流.....	12
§ 2—1—1	高超音速一维定常等熵流.....	12
§ 2—1—2	高超音速小扰动的非线性性质...	15
§ 2—2	激 波.....	17
§ 2—2—1	高超音速斜激波关系.....	17
§ 2—2—2	高超音速小扰动情况.....	22
§ 2—2—3	超音速、高超音速小扰动量级比较.....	25
§ 2—2—4	曲面激波.....	27
§ 2—3	普朗特—迈叶膨胀波.....	30
§ 2—3—1	膨胀波的一般关系.....	30
§ 2—3—2	高超音速情况.....	30
§ 2—4	高超音速平板绕流.....	36
§ 2—5	高超音速细长圆锥绕流.....	
§ 2—5—1	圆锥绕流流场基本特征.....	4
§ 2—5—2	高超音速细长圆锥轴对称绕流近似解.....	41

第三章 牛顿理论及其推广

§ 3—1	牛顿公式及修正的牛顿公式.....	49
§ 3—1—1	牛顿气体撞击理论及牛顿公 式	49
§ 3—1—2	修正的牛顿公式.....	53
§ 3—1—3	牛顿公式和修正的牛顿公式 与实验的比较.....	55
§ 3—2	牛顿公式的应用.....	58
§ 3—2—1	气动力系数的一般表达式...	58
§ 3—2—2	牛顿公式应用举例.....	63
§ 3—2—3	高超音速流动时的最小阻力 旋成体.....	72
§ 3—3	布兹曼修正公式.....	78
§ 3—4	内伏牛顿流方法.....	83
§ 3—5	切楔法和切锥法.....	88

第四章 小扰动理论

§ 4—1	引 言.....	93
§ 4—2	小扰动简化方程.....	94
§ 4—2—1	基本方程及边界条件.....	94
§ 4—2—2	小扰动假设及量级估计.....	97
§ 4—2—3	高超音速小扰动简化方程...	101
§ 4—3	尖薄体高超音速绕流的相似律.....	104
§ 4—4	平面截面原理.....	107

§ 4—5	高超音速小扰动方程的解.....	111
§ 4—5—1	牛顿细长体理论.....	111
§ 4—5—2	范戴克的数值积分解.....	113
§ 4—6	最简形式的相似运动解.....	115
§ 4—6—1	一维不定常运动方程的拉格朗日形式.....	115
§ 4—6—2	最简形式的相似运动解.....	120
§ 4—7	楔、锥、幕次体的绕流解(平面切面律的应用).....	125
§ 4—7—1	绕楔流动.....	125
§ 4—7—2	圆锥绕流.....	127
§ 4—7—3	幕次体绕流.....	129

第五章 激波膨胀波法

§ 5—1	引言.....	134
§ 5—2	二维激波膨胀波法.....	135
§ 5—3	反射波扰动的影响.....	143
§ 5—4	激波膨胀波法在旋成体绕流中的推广.....	147
§ 5—5	二次激波膨胀波法.....	150

第六章 薄激波层理论

§ 6—1	引言.....	157
§ 6—2	钝头体驻点附近的流动.....	158
§ 6—2—1	钝头前缘各物理量量级估计及基本假设.....	159

§ 6-2-2	基本方程和边界条件.....	161
§ 6-2-3	二维流动情况.....	164
§ 6-2-4	轴对称流动.....	169
§ 6-3	边界层方法.....	175
§ 6-3-1	基本方程及边界条件.....	175
§ 6-3-2	量级估计和小参数展开...	179
§ 6-3-3	零级近似解.....	183
§ 6-3-4	一级近似解.....	185
§ 6-3-5	应用讨论.....	188
§ 6-4	空心截头圆锥的绕流.....	189
§ 6-4-1	概述.....	189
§ 6-4-2	零级近似.....	190
§ 6-4-3	一级近似.....	190
§ 6-4-4	压力系数、阻力系数和 熵.....	191

前 言

本讲义是为我校近代力学系学生编写的专业课讲义。整个讲义分为上下两册。上册共六章。内容包括。绪论、一些简单流动、牛顿理论及其推广、小扰动理论、激波膨胀波法、薄激波层理论等。下册共四章。内容包括。钝头细长体高超音速流、钝头体超音速绕流数值解、高温空气的特性、真实气体流动等。

本讲义主要参考林同骥教授编著的“高超音速空气动力学”(1962年科大讲义)及尹协远、夏南编写的“高超音速空气动力学”(1976年科大讲义)及有关著作文献重新组织编写而成。由于时间仓促。错误在所难免。欢迎给予批评指正。

尹协远

夏 南

1982年3月



30896570

上册目录

第一章 结 论

§ 1—1	高超音速空气动力学的提出及其研究方法.....	6
§ 1—2	高超音速流动的物理图案.....	7
§ 1—3	高超音速流动的一般特点.....	10

第二章 一些简单流动

§ 2—1	高超音速一维定常等熵流.....	12
§ 2—1—1	高超音速一维定常等熵流.....	12
§ 2—1—2	高超音速小扰动的非线性性质...	15
§ 2—2	激 波.....	17
§ 2—2—1	高超音速斜激波关系.....	17
§ 2—2—2	高超音速小扰动情况.....	22
§ 2—2—3	超音速、高超音速小扰动量级比较.....	25
§ 2—2—4	曲面激波.....	27
§ 2—3	普朗特—迈叶膨胀波.....	30
§ 2—3—1	膨胀波的一般关系.....	30
§ 2—3—2	高超音速情况.....	30
§ 2—4	高超音速平板绕流.....	36
§ 2—5	高超音速细长圆锥绕流.....	
§ 2—5—1	圆锥绕流流场基本特征.....	4
§ 2—5—2	高超音速细长圆锥轴对称绕流近似解.....	41

第三章 牛顿理论及其推广

§ 3—1	牛顿公式及修正的牛顿公式.....	49
§ 3—1—1	牛顿气体撞击理论及牛顿公 式	49
§ 3—1—2	修正的牛顿公式.....	53
§ 3—1—3	牛顿公式和修正的牛顿公式 与实验的比较.....	55
§ 3—2	牛顿公式的应用.....	58
§ 3—2—1	气动力系数的一般表达式...	58
§ 3—2—2	牛顿公式应用举例.....	63
§ 3—2—3	高超音速流动时的最小阻力 旋成体.....	72
§ 3—3	布兹曼修正公式.....	78
§ 3—4	内伏牛顿流方法.....	83
§ 3—5	切楔法和切锥法.....	88

第四章 小扰动理论

§ 4—1	引 言.....	93
§ 4—2	小扰动简化方程.....	94
§ 4—2—1	基本方程及边界条件.....	94
§ 4—2—2	小扰动假设及量级估计.....	97
§ 4—2—3	高超音速小扰动简化方程...	101
§ 4—3	尖薄体高超音速绕流的相似律.....	104
§ 4—4	平面截面原理.....	107

§ 4—5	高超音速小扰动方程的解.....	111
§ 4—5—1	牛顿细长体理论.....	111
§ 4—5—2	范戴克的数值积分解.....	113
§ 4—6	最简形式的相似运动解.....	115
§ 4—6—1	一维不定常运动方程的拉格朗日形式.....	115
§ 4—6—2	最简形式的相似运动解.....	120
§ 4—7	楔、锥、幕次体的绕流解【平面切面律的应用】.....	125
§ 4—7—1	绕楔流动.....	125
§ 4—7—2	圆锥绕流.....	127
§ 4—7—3	幕次体绕流.....	129

第五章 激波膨胀波法

§ 5—1	引言.....	134
§ 5—2	二维激波膨胀波法.....	135
§ 5—3	反射波扰动的影响.....	143
§ 5—4	激波膨胀波法在旋成体绕流中的推广.....	147
§ 5—5	二次激波膨胀波法.....	150

第六章 薄激波层理论

§ 6—1	引言.....	157
§ 6—2	钝头体驻点附近的流动.....	158
§ 6—2—1	钝头前缘各物理量量级估计及基本假设.....	159

§ 6-2-2	基本方程和边界条件.....	161
§ 6-2-3	二维流动情况.....	164
§ 6-2-4	轴对称流动.....	169
§ 6-3	边界层方法.....	175
§ 6-3-1	基本方程及边界条件.....	175
§ 6-3-2	量级估计和小参数展开...	179
§ 6-3-3	零级近似解.....	183
§ 6-3-4	一级近似解.....	185
§ 6-3-5	应用讨论.....	188
§ 6-4	空心截头圆锥的绕流.....	189
§ 6-4-1	概述.....	189
§ 6-4-2	零级近似.....	190
§ 6-4-3	一级近似.....	190
§ 6-4-4	压力系数、阻力系数和 熵.....	191

第一章 绪 论

§ 1-1 高超音速空气动力学的提出及其研究方法

高超音速空气动力学是空气动力学的一个重要分支。它是以现代火箭导弹和宇航飞行器为主要研究对象。研究这些飞行器以高超音速运动时与周围介质（空气）的相互作用。

术语“高超音速”首先是由钱学森（1946）提出的。它表明飞行速度比周围空气的音速大得很多的情况。当然在超音速流动和高超音速流动之间并没有一个严格的界限。事实上高超音速流动的特征是逐渐显示出来的。而且它是随着飞行器的几何特性、周围气体介质的属性而变化的。我们一般把飞行速度大于音速五倍的飞行叫做高超音速飞行。

高超音速空气动力学从产生至今也才只有四十年的历史。随着现代火箭和宇航技术的蓬勃发展。这一年轻的科学得到了迅速的发展。并不断产生出一些新的学科分支。

虽然在早期也有少数孤立的文章处理过高马赫数的流动。但它和大部分理论和实验研究是在第二次世界大战后发展起来的。从德国 V-2 火箭用于战争开始。在以后短短的几十年内。中程和洲际导弹相继出现。使导弹达到了更高的速度和更远的距离。1957 年第一颗人造卫星发射成功。1969 年人类首次登月飞行的成功。标志着人类已冲出地球。进入了宇宙航行的新时代。这一切都促使高超音速空气动力学获得迅猛的发展。例如洲际导弹或人造卫星及宇宙飞船返回地面时要经过稠密的大气层。它们的速度达到音速的十倍甚至二十倍以上。此时周围气体的温度高达几千度甚至上万度。这时不仅需要考虑高速飞行时流场的特征。而且需要考虑高温下空气

性质的变化。同时。高温会导致飞行器烧毁。防热问题显得非常突出。所有这些现象远比起音速飞行时要复杂得多。

高超音速空气动力学是同工程技术和生产实践紧密联系的。它的发展有效地帮助解决了一系列实验和飞行器设计中的关键问题。促进了火箭和宇航技术的迅速发展。在研究高超音速空气动力学理论时。高速高温引起的绕流特性和气体性质变化等复杂现象常需要实验验证和提供精确的数值结果。因此理论分析。实验技术。计算技术这三者相结合是研究高超音速空气动力学的重要途径和方法。

在我国。自五十年代以来。在高超音速理论和实验研究方法有了很大的发展。在原来几乎是空白的领域内开展了大量的工作。在党的领导下。我国的科技工作者努力奋斗。于1970年4月24日成功地发射了第一颗人造卫星。1980年我们首次向太平洋发射远程导弹成功都标志着我国宇航事业的发展已经进入了一个新的纪元。尽管如此。我们目前在高超音速理论方面和实验研究方面的水平还远远不能适应我国飞快发展的宇航事业的需要。还有许多新的课题需要我们去研究解决。我们应当奋发图强。迎头赶上。

§ 1—2 高超音速流动的物理图案

图1—1为高超音速绕钝头体的流动。在飞行器头部的前方有一脱体的弓形激波。在激波和物体头部之间有一狭窄的亚音速区域。气流由驻点沿着物面逐渐加速。通过音速线后。气流被加速到超音速。因此。在钝头头部附近的流场是“混合型”的流场。在超音速区。由于物面膨胀波系的干扰。头部激波形状弯曲成弓形。通过激波后各条流线上熵的变化不同。激波后流场熵的横侧梯度很大。流

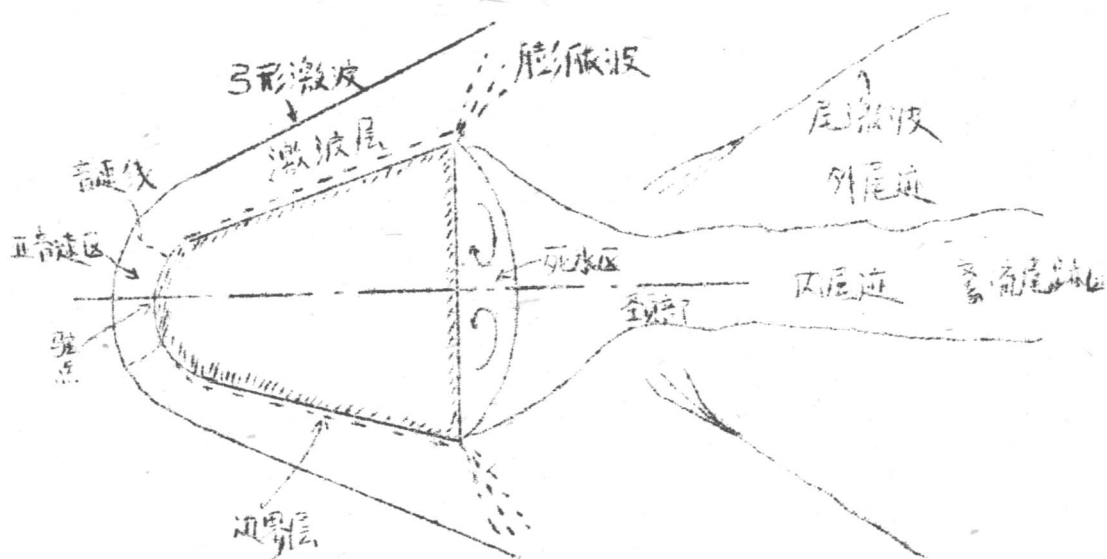


图 1—1 高超音速飞行时钝头体周围的流动图景

场是有旋的。弓形激波与物面十分靠近。两者之间的流场区域称为激波层。气流通过激波层流向物体后方，形成一个有旋尾迹区。特别是正对物体尾部后方有一条狭长区域，是由于边界层中粘性作用而形成粘性尾迹区。尾迹的形状是先开始略有收缩，然后再扩张，形成一个“颈缩”。由于尾迹区向外扩张正对全部气流，还会形成尾激波。在紧靠物体底部还会形成一个死水区。在物体棱角处，有膨胀波系产生。

此外，在有些外形物体，由于肩部过度膨胀后再收缩，在激波层内还会出现二次内伏激波。

总之，可以看出，这种绕流图案要比一般超音速绕流复杂得多。

图 1—2 是小攻角下高超音速绕尖头细长体的流动。气流的速度 M 数为 9.6。激波是附体的，非常贴近物面。由于激波倾角很小，激波较弱。气流穿过激波后，在整个激波层内仍然是高超音速的。由

于物体有很小的攻角。使流场在横向上有点非对称性。在物体上侧



图 1—2 高超音速绕尖头细长体
流动图象

边界层略有分离。在分离点出现激波。在物体下侧发生边界层过渡。物体后部的尾迹区显然远不如钝头体绕流时强烈、明显。

实际上，真正的尖头细长体是不存在的。由于制造工艺及结构上的原因，同时在高超音速飞行时高温气体往往使尖头迅速熔化。所以实际的细长体都是小钝头的。研究这种钝头细长体是很不实际意义的。因为目前导弹弹头大都为这种小钝头细长体。由于头部强激波后的气流熵的增长比激波其他部分熵的增长来得大。这层高熵的气流沿物面流向下游。在物面附近成一层低密度高温的高熵层。随着向下游发展。熵层厚度越来越薄。但熵梯度却很大。同时粘性边界层也会在熵层内发展起来。熵层对粘性边界层的发展有重要影响。因此必须研究薄激波层。熵层和边界层之间的相互干扰。

此外。在高超音速流动中如有攻角绕流和不对称物体的横向流现象也值得注意。有攻角时绕流现象有受压面与背风面的区别。在受压面上激波和物面之间的夹角变化不大。而在背风面产生膨胀波。出现真空区。

§ 1—3 高超音速流动的一般特点

从上一节高超音速流动的物理图案中可以看出高超音速流动具有许多特点。

第一个特点是由于高超音速飞行时速度非常大。马赫数很高。激波已不能简化为马赫波。线性假设不再成立。需要考虑非线性性质。所以高超音速激波后的流场从本质上来说是非线性和非均匀的。非等熵的。有旋的。这就使问题的解大为复杂化。

但是。由于高超音速流时。激波非常贴近物面。因此可以应用牛顿撞击理论及其半经验方法。并且可引进薄激波层的概念使得研究得到简化。此外。由于高超音速时激波前后密度比是小量。可以做出小密度比假设。

高超音速流的第二个特点是由于高速引起的高温。因此必须考虑因高温引起的气体的物理和化学性质的变化。例如振动能的激发。气体的离解。复合电离等对流场特性的影响。同时还应考虑由于振动松弛和化学反应速率的大小出现的非平衡流动问题。此外。辐射。热传导。扩散现象。热力学函数和输运系数的变化等问题。传热。冷却。烧蚀等问题都需要深入研究。

第三个特点是由于高超音速飞行范围很广。从稠密的大气层一直到高空大气层。所以还有高空引起的低密度效应。

此外。由于激波层很薄。激波和边界层的干扰效应也必须重视。特别是高空密度很低时。边界层增长较厚。干扰影响会更严重些。有时甚至可以把整个激波层看做为粘性激波层。所以。有粘。无粘干扰是高超音速流动的另一特点。

由上所述。可以看出由于飞行器高超音速运动问题的复杂性。为了适应宇航技术迅速发展的需要。随着高超音速空气动力学理论

的发展,又派生出许多新的分支。例如,研究高温气体性质的高温气体力学。处理高空飞行气体介质不连续的稀薄气体力学,讨论电离气体运动性质的电磁流体力学等。涉及飞行器轨道、操纵稳定性和外形设计的飞行力学在高超音速流动特点下又需作新的、进一步的研究。

本课程仅仅涉及无粘高超音速流动问题。学习本课程的主要参考书籍如下;

- [1] Г. Г. черный, течения газа с большой сверхзвуковой скоростью, 1959
- [2] W. D. 海斯, R. F. 普洛布斯坦, 高超音速流理论, 第一卷无粘流, 科学出版社, 1979年。
- [3] R. N. Cox, L. F. Crabtree, Elements of hypersonic aerodynamics, 1965.
- [4] R. W. Truitt, Hypersonic aerodynamics, 1959.

第二章 一些简单流动

与超音速流动时的情况一样。一维定常等熵流, 激波和膨胀波等同样也是高超音速流动中经常遇到的基本流动现象。同时, 对这些流动的研究。尤其是对其在高超音速条件下流动特性的研究, 是我们进一步研究高超音速下复杂流动的基础。

§ 2-1 高超音速一维定常等熵流动

气体沿流管或变截面管道如拉伐尔喷管定常流动时，若不考虑粘性和热传导，也不考虑横截面上物理参数的变化，各物理量不随时间变化，流动是连续的，流场中无间断发生，则流动可以近似地看作为一维定常等熵流动。本节从一维定常等熵流的基本方程及各物理量之间的关系出发，利用高马赫数的特性得出高超音速下等熵流各物理量的简化表达式，最后讨论高超音速小扰动的非线性性质。

§ 2-1-1 高超音速一维定常等熵流

由空气动力学中我们知道在定常情况下，一维等熵流动的质量、动量和能量方程的微分形式为：

$$d(\rho v A) = 0 \quad (2-1-1)$$

$$dp + \rho v dv = 0 \quad (2-1-2)$$

$$dh + v dv = 0 \quad (2-1-3)$$

积分形式为：

$$\rho v A = \rho^* v^* A^* \quad (2-1-4)$$

$$h + \frac{1}{2} v^2 = h_0 \quad (2-1-5)$$

$$s = s_0 \quad (2-1-6)$$

式中 P ， ρ ， v 分别表示气体的压力、密度和流动速度。 h 和 s 表示单位质量气体的焓和熵。 A 表示流管或喷管的横截面积。角标“*”表示临界条件。“0”表示滞止参数或驻点参数。应