



国防特色教材·航空宇航科学与技术

空气动力学

KONGQI DONGLI XUE

——○ 陆志良 等编著 ○——

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨工业大学出版社
西北工业大学出版社



国防特色教材·航空宇航科学与技术

空气动力学

陆志良 等编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



本书为航空航天、兵器、空军等国防院校的本科生《空气动力学》教材。全书共 10 章,内容分为流体力学基础和飞行器空气动力学,这两部分相对独立但又有机结合。

第 1~5 章为流体力学与空气动力学的基础部分。主要介绍的是流体力学基础知识、流体运动基本控制方程和基本规律、低速位流理论、高速可压流的基础知识和粘流与边界层基础。

第 6~10 章为飞行器空气动力学部分。主要介绍的是低速翼型和低速机翼的空气动力特性;亚声速、超声速、跨声速流中的翼型与机翼气动特性及跨声速、高超声速流初步知识;计算流体力学初步知识。

本书供飞行器设计专业本科生使用,也可供涉及流体力学、空气动力学的有关专业学生使用,还可供从事空气动力学相关工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气动力学/陆志良等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.8

ISBN 978-7-81124-860-9

I. 空… II. 陆… III. 空气动力学 IV. V211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 128767 号



陆志良 等编著

责任编辑 张冀青

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpess@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×960 1/16 印张: 19.5 字数: 437 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷 印数: 3 000 册

ISBN 978-7-81124-860-9 定价: 38.00 元

前 言

本教材以 1993 年航空工业出版社出版的陈再新等老师编写的《空气动力学》教材为基础,结合当前的教学需要和专业发展而重新编写。与已有教材不同,本书主要内容调整为流体力学基础和飞行器空气动力学相对独立而又成有机结合的两大部分。流体力学基础部分介绍了矢量和积分知识,控制方程变为以积分形式为主;飞行器空气动力学部分则以翼型、机翼空气动力学为主,并直接以 $N-S$ 方程为例介绍了 CFD 初步知识。

全书共 10 章,第 1~5 章为流体力学(空气动力学)的基础部分,可供流体力学基础或空气动力学基础课程使用;第 6~10 章为飞行器,特别是飞机空气动力学部分,供飞行器空气动力学等课程使用,也为部分学习了流体力学基础知识而不再修飞行器空气动力学课程的学生进一步学习提供方便。

第 1 章主要介绍流体力学基础知识、基本概念及相关准备知识;第 2 章介绍流体运动基本控制方程和基本规律;第 3 章主要介绍不可压无粘流理论、基本解及叠加;第 4 章介绍气体动力学的高速可压无粘流的基础知识;第 5 章介绍粘流及边界层的基本概念。

第 6 章为低速翼型的空气动力特性,主要介绍薄翼型理论。第 7 章为低速机翼的空气动力特性,重点介绍升力线理论;第 8 章为亚声速翼型与机翼的空气动力特性;第 9 章为超声速线化理论及跨声速、高超声速流初步知识;第 10 章为计算流体力学初步知识。

本教材主要为航空航天、兵器、空军等国防院校的飞行器设计大类的本科生编写,适用于空气动力学基础、空气动力学、飞行器空气动力学、流体力学基础等课程,也可作为工程流体力学等相关专业学生的教材或科技人员的参考书。

本书由南京航空航天大学空气动力学系编写。由陆志良教授规划和统稿,陆志良教授、陈红全教授、王江峰教授、李甘牛副教授完成了主要的编著工作。另外,周春华教授、夏健副教授、闫再友副教授等老师也参加了编著工作。

感谢北京航空航天大学王晋军教授、南京航空航天大学赵宁教授对本书进行了详细的审阅。

编 者

2008 年 11 月

目 录

第 1 章 流体力学基础知识	1
1.1 流体力学的基本任务和研究方法	1
1.1.1 基本任务	1
1.1.2 研究方法	1
1.2 流体力学以及空气动力学的发展概述	2
1.3 流体介质	4
1.3.1 连续介质假设	4
1.3.2 流体的压强、密度、温度和速度	4
1.3.3 气体的状态方程	6
1.3.4 压缩性、粘性和传热性	6
1.3.5 流体的模型化	9
1.4 气动力和力矩	11
1.4.1 升阻力和力矩	11
1.4.2 气动力及力矩系数	13
1.4.3 压力中心	14
1.5 矢量和积分知识	16
1.5.1 矢量代数	16
1.5.2 典型的正交坐标系	17
1.5.3 标量场和矢量场	19
1.5.4 标量积和矢量积	20
1.5.5 标量场的梯度	21
1.5.6 矢量场的散度	22
1.5.7 矢量场的旋度	22
1.5.8 线积分	23
1.5.9 面积分	24
1.5.10 体积分	24
1.5.11 线积分、面积分和体积分之间的关系	25
1.6 控制体和流体微团	25
1.6.1 控制体	25

1.6.2 流体微团	26
1.6.3 速度散度的物理意义	26
1.6.4 物质导数	27
复习思考题	29
第2章 流体运动基本方程和基本规律	31
2.1 连续方程	31
2.2 动量方程	35
2.3 能量方程	39
2.4 方程的基本解法	42
2.4.1 方程的理论解	42
2.4.2 数值解——计算流体力学	43
2.5 微团运动分析	44
2.5.1 流场的迹线、流线	44
2.5.2 角速度、旋度和角变形率	47
2.5.3 流函数、速度位以及相互关系	51
2.6 旋涡运动	55
2.6.1 涡线、涡管以及旋涡强度	55
2.6.2 速度环量和斯托克斯定理	56
2.6.3 毕奥-萨伐尔定理及直线涡的诱导速度	59
2.6.4 亥姆霍兹旋涡定理	60
复习思考题	61
第3章 不可压无粘流	63
3.1 伯努利方程及应用	63
3.1.1 无旋流中的积分	63
3.1.2 有旋流中的积分	66
3.2 拉普拉斯方程	66
3.3 拉普拉斯方程的基本解	67
3.3.1 直匀流	68
3.3.2 点源	68
3.3.3 点涡	69
3.3.4 偶极子	70
3.4 基本解叠加	72

3.4.1 直匀流加点源	72
3.4.2 直匀流加轴向逆流的偶极子	73
3.5 库塔-儒科夫斯基升力定理	75
3.5.1 绕圆柱的有环量流动	75
3.5.2 库塔-儒科夫斯基定理	77
复习思考题	78
第4章 高速可压无粘流	80
4.1 热力学基础	80
4.1.1 完全气体的状态方程、内能和焓	80
4.1.2 热力学第一定律和比热	81
4.1.3 热力学第二定律和熵	82
4.2 一维等熵绝热流	83
4.2.1 一维等熵绝热流的能量方程	83
4.2.2 一维定常绝热流的参数间的基本关系式	84
4.3 马赫波与膨胀波	87
4.3.1 小扰动与马赫锥	87
4.3.2 马赫波	88
4.3.3 膨胀波	90
4.4 正激波	93
4.4.1 正激波与基本方程组	93
4.4.2 普朗特激波公式	94
4.4.3 正激波前后流动参数的关系式	95
4.4.4 兰金-许贡纽方程	96
4.5 斜激波	96
4.5.1 平面斜激波前后流动参数的关系式	96
4.5.2 激波图线及其用法	98
4.5.3 弱斜激波的熵增及参数近似关系式	102
4.6 喷管及超声速风洞	103
4.6.1 马赫数随管流截面的变化	103
4.6.2 拉瓦尔喷管及流量公式	104
4.6.3 超声速风洞	105
复习思考题	107

第 5 章 粘流和边界层流动	108
5.1 粘流的基本特性	108
5.1.1 物面上无滑移	108
5.1.2 粘性摩擦阻力和粘性压差阻力	109
5.1.3 机械能耗散和粘滞气动热	110
5.1.4 层流和紊流	110
5.1.5 流动分离	113
5.2 边界层流动	117
5.2.1 边界层概念	117
5.2.2 边界层的厚度	118
5.2.3 边界层内沿物面法线方向压强不变	120
5.2.4 平面边界层流动的方程	120
5.2.5 低速平板边界层及摩擦阻力计算	121
5.2.6 边界层的分离	127
5.2.7 高速边界层	128
复习思考题	134
第 6 章 低速翼型的气动特性	135
6.1 翼型的几何参数	135
6.1.1 几何弦长	135
6.1.2 翼型表面无量纲坐标	135
6.1.3 弯 度	136
6.1.4 厚 度	136
6.1.5 前缘钝度与后缘尖锐度	137
6.1.6 常用低速翼型编号法简介	137
6.2 低速翼型流动特点及启动涡	138
6.2.1 低速翼型绕流的特点	138
6.2.2 启动涡	141
6.3 环量的确定和库塔-儒科夫斯基后缘条件	142
6.4 薄翼型理论	144
6.4.1 流动的分解	144
6.4.2 迎角-弯度问题	147
6.4.3 厚度问题	154

6.5 任意翼型位流解法	156
6.5.1 保角变换法	156
6.5.2 数值算法——面元法	157
6.6 低速翼型的一般气动特性	158
6.6.1 翼型表面压强分布	159
6.6.2 翼型升力特性	159
6.6.3 翼型力矩特性	161
6.6.4 翼型的压心和焦点	162
6.6.5 翼型的阻力特性和极曲线	162
复习思考题	163
第7章 机翼的低速气动特性	165
7.1 机翼的几何参数	165
7.1.1 平面形状和平面几何参数	165
7.1.2 几何扭转角 φ_m	166
7.1.3 上(下)反角 ψ	167
7.2 机翼的自由尾涡	167
7.3 升力线理论	168
7.3.1 气动模型和升力线假设	168
7.3.2 升力线理论	169
7.4 升力面理论及涡格法	180
7.4.1 升力面理论	180
7.4.2 涡格法	182
7.5 低速机翼一般气动特性	184
7.5.1 剖面升力系数展向分布 $C'_y(z)$	184
7.5.2 升力特性	184
7.5.3 纵向力矩特性	186
7.5.4 阻力系数	187
复习思考题	190
第8章 亚声速翼型和机翼的气动特性	191
8.1 速度位方程	191
8.2 小扰动线化理论	192
8.2.1 速度位方程的线化	193

8.2.2	压强系数的线化	194
8.2.3	边界条件的线化	195
8.3	亚声速流中薄翼型的气动特性	196
8.3.1	线性方程的变换	196
8.3.2	边界条件的变换	197
8.3.3	相应薄翼型之间的变换	197
8.3.4	翼型上对应点压强系数之间的关系	198
8.3.5	翼型的亚声速气动特性	199
8.4	亚声速薄机翼的气动特性及 Ma_∞ 对气动特性的影响	199
8.4.1	相应机翼形状之间的变换	199
8.4.2	亚声速薄机翼的升力和俯仰力矩特性	200
8.4.3	亚声速流时 Ma_∞ 对机翼空气动力特性的影响	205
	复习思考题	206
第 9 章	超声速线化理论及跨声速、高超声速流初步	207
9.1	超声速薄翼型的绕流	207
9.2	超声速薄翼型线化理论	210
9.2.1	一阶近似理论压强系数计算公式及与实验的比较	211
9.2.2	线性理论压强系数的叠加法	212
9.2.3	一级近似理论薄翼型的空气动力特性	215
9.2.4	超声速翼型二级近似理论简述	223
9.3	薄机翼超声速绕流的基本概念	224
9.3.1	前马赫锥与后马赫锥	224
9.3.2	前缘、后缘和侧缘	225
9.3.3	二维流区与三维流区	226
9.3.4	有限翼展薄机翼的超声速绕流特性	228
9.3.5	锥形流场概念	229
9.4	跨声速翼型绕流	230
9.4.1	翼型的临界马赫数	230
9.4.2	薄翼型的跨声速绕流图及翼型气动特性	232
9.4.3	机翼主要几何参数对跨声速空气动力学特性的影响	235
9.4.4	跨声速机翼气动特性的相似参数	237
9.4.5	一种适用于跨声速流的超临界翼型	237
9.5	高超声速流初步	238

9.5.1 高超声速绕流的新特征	239
9.5.2 高超声速无粘流的激波关系式	242
复习思考题	246
第 10 章 计算流体力学初步	247
10.1 网格生成技术简介	247
10.1.1 结构网格	248
10.1.2 非结构网格	252
10.1.3 直角坐标网格	256
10.2 N-S 方程数值解法基础	256
10.2.1 N-S 方程的微分形式	256
10.2.2 几种特殊的流动	257
10.2.3 N-S 方程的基本解法	262
10.2.4 算 例	265
复习思考题	267
附录 A 常用气动表	268
附录 B 主要符号表	285
附录 C 名人简介	288
参考文献	296

第1章 流体力学基础知识

本章首先介绍流体力学的基本任务、研究方法以及流体力学与空气动力学的发展概述。然后介绍流体介质、气动力系数及矢量运算的基础知识。最后引入控制体、流体微团及物质导数等概念。这些基础知识为流体力学和飞行器空气动力学具体知识的学习做准备。

1.1 流体力学的基本任务和研究方法

1.1.1 基本任务

流体力学,是力学学科的分支之一,其研究的对象是流体,例如水和空气等;其研究的内容是,当流体与物体之间相对运动时,流体运动的基本规律以及流体与物体之间的相互作用力。

空气动力学,是一门研究空气运动规律及空气与物体之间相互作用力的科学,因此,是现代流体力学的一个分支。然而,空气动力学是和飞机的出现、发展联系在一起的,涉及飞机的飞行性能、稳定性和操纵性等问题。在这个意义上,空气动力学又是飞机设计和工程学科不可或缺。当然,空气动力学研究涉及的领域远不限于飞机或航空器。

流体相对物体的运动,可以在物体的外部进行,像空气流过飞机表面、导弹表面和螺旋桨表面等;也可以在物体的内部进行,像空气在管道、风洞和进气道内部的流动。在这些外部流动或内部流动中,尽管空气的具体运动和研究这些运动的目的有所不同,但都有一些共同的流动现象和一些共同的流动规律,例如质量守恒、牛顿第二定律、能量守恒、热力学第一定律和第二定律等。

研究流体力学或空气动力学的基本任务,不仅是要认识这些流动现象的基本实质,找出这些共性的基本规律在空气动力学中的表达,而且还要研究如何应用这些基本规律能动地解决飞行器的空气动力学问题和与之相关的工程技术问题,并预测流动的新情况、新进展。

1.1.2 研究方法

空气动力学研究是航空航天科学技术研究的重要组成部分,是飞行器研究的“先行官”。其研究方法如同物理学各个分支的研究方法一样,有实验研究、理论分析和数值计算三种方法。这些不同的方法不是相互排斥,而是相互补充的。通过这些方法的综合运用,以寻求最佳的飞行器气动布局形式,确定整个飞行范围内作用在飞行器的力和力矩,以得到其最终性能,

并保证飞行器操纵的稳定性。

实验研究方法在空气动力学中有着广泛的应用,其主要手段是依靠风洞、水洞、激波管以及测试设备进行模拟实验或飞行实验。其优点在于,它能在所研究的问题完全相同或大致相同的条件下,进行模拟与观测,因此所得到的结果较为真实、可靠。但是,实验研究的方法往往也受到一定的限制,例如受到模拟尺寸的限制和实验边界的影响。此外实验测量的本身也会影响所得结果的精度,并且实验往往要耗费大量的人力和物力。因此这种方法亦常常遇到困难。

理论分析的方法一般包括以下步骤:

- ① 通过实验或观察,对问题进行分析研究,找出其影响的主要因素,忽略因素的次要方面,从而抽象出近似的、合理的理论模型;
- ② 运用基本定律、原理和数学分析,建立描写问题的数学方程,以及相应的边界条件和初始条件;
- ③ 利用各种数学方法准确地或近似地解出方程;
- ④ 对所得解答进行分析、判断,并通过必要的实验检验与修正。

理论分析方法的特点在于它的科学抽象,能够用数学方法求得理论结果,以及揭示问题的内在规律。然而,往往由于数学发展水平的限制,又由于理论模型抽象的简化,因而无法满足研究复杂的实际问题的需要。

自 20 世纪 70 年代以来,随着大型高速计算机的出现,以及一系列有效的近似计算方法(例如有限差分方法、有限元素法和有限体积法等)的发展,使得计算流体力学(CFD)数值方法在空气动力学研究方法中的作用和地位不断提高。与实验方法相比,其研究所需要的费用比较少。对有些无法进行实验、更不能作出理论分析的问题,采用数值模拟方法进行研究可以得到解决。当然数值方法也有局限性,有时数值计算结果精度较差,这也是近年来 CFD 研究的重点。

实验研究、理论分析和数值模拟三种方法各有利弊,但相互促进可以共同推动空气动力学研究的深入和发展。

1.2 流体力学以及空气动力学的发展概述

空气动力学是现代流体力学的一个分支,它是从流体力学发展而来的。

18 世纪是流体力学的创建阶段。伯努利(Bernoulli)在 1783 年发表的《流体力学》一书中,建立了不可压流体的压强、高度和速度之间的关系,即伯努利公式。欧拉(Euler)在 1755 年建立了理想流体运动的基本方程组,奠定了连续介质力学的基础。达朗贝尔(D'Alembert)提出了著名的达朗贝尔原理;“达朗贝尔疑题”就是他在 1744 年提出的。拉格朗日(Lagrange)改善了欧拉、达朗贝尔的方法,并发展了流体力学的解析方法。关于研究气流对物体的作用

力,最早是牛顿(Newton)于1726年提出关于流体对斜板的作用力公式,它实际上是在碰撞理论的基础上提出来的,没有考虑流体的流动性。

19世纪是流体力学基础理论全面发展的阶段。泊松(Poisson)于1826年解决了一个空间流动——关于绕球的无旋流动问题。拉普拉斯(Laplace)于1827年提出著名的拉普拉斯方程。兰金(Rankine)提出理想不可压流体运动的位函数和流函数,分别满足拉普拉斯方程,并于1868年提出将直匀流叠加到源(汇)、偶极子等流动上,以构成所谓奇点法。亥姆霍兹(Helmholtz)创立了旋涡运动理论。

19世纪形成了流体力学的两个重要分支:粘性流体动力学和空气-气体动力学。

纳维(Navier)从分子相互作用的某一假设出发,于1826年导出粘性流体的运动方程。斯托克斯(Stokes)于1845年在另一个国家也独立地导出了粘性流体运动方程,现在被称为N-S方程。雷诺(Reynolds)在1876—1883年验证粘性流体在小直径圆管中的流动时,发现了流体运动的层流和紊流两种流态;1895年他导出了雷诺平均N-S方程。

空气-气体动力学是在流体力学、热力学和声学发展的基础上发展的。空气-气体动力学的基本方程组出现在1850年前后。兰金(Rankine)于1870年,许贡纽(Hugoniot)于1887年分别提出了激波前后气体压强、速度和温度之间的关系。

20世纪创建了空气动力学完整的科学体系,并取得了蓬勃的发展。

19世纪后半叶的工业革命,蒸汽机的出现和工业叶轮机的产生,使人们萌发了建造飞机的想法。

1906年,儒科夫斯基(Joukowski)发表了著名的升力公式,奠定了二维机翼理论的基础,并提出以他的名字命名的翼型。1903年12月,莱特(Wright)兄弟在美国实现了飞机试飞成功,从此开创了飞行的新纪元,人类征服天空的愿望得以实现。之后的100年间,飞机的飞行速度、高度和航程急剧递增,乃是空气动力学促进航空事业,而航空实践本身推动了空气动力学的迅速发展的时期。

1918—1919年,普朗特(Prandtl)提出了大展弦比机翼的升力线理论;1925年阿克莱特(Ackeret)导出翼型的超声速线化理论;1939年,戈泰特(Göthert)提出了亚声速三维机翼的相似法则。1944年,冯·卡门(von Karman)和钱学森采用速度图法研究和导出了比普朗特-葛劳渥(Glauert)法则更为精确的亚声速相似定律公式;1946年,钱学森首先提出高超声速相似律。

与上面所叙述的无粘空气动力学发展的同时,粘性流体力学也得到了迅猛的发展。普朗特于1904年首先提出划时代的边界层理论,从而使流体流动的无粘流动和粘性流动科学地协调起来,在数学和工程之间架起了桥梁。1921年波尔豪森(Pohlhausen)将普朗特的边界层微分方程通过积分,得到边界层动量方程应用于解决不可压有逆压梯度的粘性流动。1925年普朗特又提出了实用的边界层混合长理论;1938年冯·卡门和钱学森采用边界层动量方程解决了可压流平板边界层问题;1945年林家翘发展了边界层稳定性理论,并在1955年发表了著名

的《流体动力学稳定性理论》。

1946 年出现了第一台计算机以后,由于计算机飞速的发展,同样给流体力学-空气动力学以巨大的影响。从 20 世纪 60 年代开始,研究流体力学-空气动力学的数值计算方法蓬勃发展起来,逐渐形成了计算流体-空气动力学这门崭新的学科,并推进到一个新的阶段。

1.3 流体介质

物体和流体做相对运动时,物体会受到流体对它的作用力和力矩。这些力和力矩的分布情况及其合力,不仅取决于物体的形状(包括运动时的姿态)和相对运动速度,而且还取决于流体的具体属性,如密度、粘性、弹性、传热性和流动性等。因此,本节介绍流体介质的各项物理属性。

1.3.1 连续介质假设

考虑绕物体的流动,比如直径为 d 的圆柱绕流。由于流体是由单个分子组成的,这些分子绕圆柱做随机的运动。分子(空气分子平均直径约为 3.7×10^{-8} cm)和相邻分子碰撞之前的平均距离定义为分子平均自由程 λ (空气分子平均自由程约为 6×10^{-6} cm)。如果 λ 的量级比物体特征尺寸 d 小许多,对圆柱而言,流体就近似连续。流体分子频繁地碰撞物体表面,以致于根本无法区分单个分子的碰撞,表面感觉到的是流体如同连续不断的介质。这种流动被称为连续流(continuum flow)。另一个极端就是 λ 和物体尺寸的量级相同;气体分子分布很稀薄,气体分子平均距离很大(相对 d 而言),与物体表面的碰撞不是很频繁,物体表面能清楚地感觉到单个分子的碰撞。这种流动被称为自由分子流(free molecular flow)。例如,最外层大气的空气的密度很小,以至于空气的平均自由程 λ 和太空飞船的尺寸是同一个量级,此时绕太空飞船的流动就是自由分子流。还有介于这两者之间的情况,流动既表现出连续流的特征,又有自由分子流的特征;这种流动通常被称为低密度流动(low-density flow)。到目前为止,绝大多数实际的空气动力学应用是关于连续流动的。低密度流和自由分子流只是整个空气动力学领域的一个小部分。因此,这本书中处理的都是连续流,采用连续介质假设,即始终把流体看成连绵不断、没有间隙、充满整个空间的连续介质;同时,将这种流体流过的空间称为流场。

1.3.2 流体的压强、密度、温度和速度

任何一门科学都有用来描述其概念和现象的专业术语。空气动力学中最常用的术语有:压强、密度、温度和流动速度。

首先考虑流场中的一个面,这个面可以是真实的物面,例如管道固壁或物体表面,也可以是流场中的一个想象的面;另外,必须注意到流体分子在运动过程中是连续的。压强就是气体分子在碰撞或穿过取定表面时,单位面积上所产生的法向力。压强通常定义在流场中的一个点上,或者是固体表面的一个点上。为了弄清楚这个点,取流场中的任一点 B ,并且设

$$dA = B \text{ 点所在元素的面积}$$

$$dF = \text{压强在 } dA \text{ 一侧产生的力}$$

于是流场中 B 点的压强定义为

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dF}{dA}$$

其中,压强 p 是单位面积上的受力的极限形式,即 B 点的面积趋于零(严格地说, dA 不能取其极限零,因为这样一来在 B 点就没有分子了。上式极限中分母 dA 在宏观上趋于零,在微观上比分子的平均自由程大得多)。显然,压强是某个点的特性,流场中各点的压强值可以不同。

密度定义为单位体积流体的质量。与压强的论述相似,密度是点的特性,流场中各点的密度可以不同。下面考虑流场中一点 B ,并且设

$$dV = \text{绕 } B \text{ 点的微元体积}$$

$$dm = dV \text{ 内的流体质量}$$

于是流场中 B 点的密度定义为

$$\rho = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{dm}{dV}$$

由此可知密度是单位体积内质量的极限形式。

温度在高速空气动力学中起着十分重要的作用。温度 T 与气体分子平均动能成比例,如果 E_k 是分子平均动能,那么温度就由 $E_k = \frac{3}{2} kT$ 给出,其中 k 是玻耳兹曼常数。因此定性分析可以得知:高温气体的分子和原子高速随机碰撞,而在低温气体中,分子的随机运动相对缓慢些。温度也表示一个点的特性,流场中各点的温度可以不同。

空气动力学研究的是运动流体,因此流体速度是一个非常重要的概念。与固体相比,速度的概念没有那么直接和明显。比如,某固体物以 30 m/s 的速度做平移运动,那么该物体的所有部分同时以 30 m/s 的速度运动。然而,流体是没有固定形态的物质,对于运动的流体,其中一部分的运动速度可能与另一部分的运动速度不同,为此采用如下方法描述。

图 1.1 考虑的是绕翼型的流场。

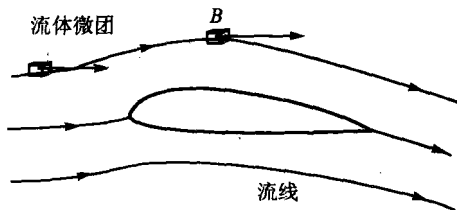


图 1.1 流动速度示意图

已知流场中的某个微小单元(称为流体微元),观察该流体微元随时间的运动情况。当微元从一个点运动到另外一个点时,其速率和方向都是变化的。现在,观察空间某一固定点 B ,如图 1.1 所示,流动速度可以定义为:流体在空间某固定点 B 的速度就是流体微元通过点 B 时的速度。流动速度 $\vec{V}$ 既有大小,又有方向,它是一个矢量。流动速度 $\vec{V}$ 的大小通常用 V 表示。速度也是点的特性,在流场中各点的速度可以不同。

1.3.3 气体的状态方程

任何状态下,气体的压强、密度和温度之间都存在着一定的函数关系,即

$$p = p(\rho, T)$$

这个函数关系式称为气体的状态方程。

完全气体是气体分子运动论中所采用的一种模型气体。它的分子是一种完全弹性的微小球粒,内聚力十分小,可以忽略不计,彼此只有在碰撞时才发生作用,微粒的固有总体积和气体所占空间相比较可以忽略不计。远离液态的气体基本符合这些假设,通常状况下的空气也符合这些假设,可以看作完全气体。对于完全气体,其状态方程形式特别简单,如下所示

$$p = \frac{\bar{R}}{M_r} \rho T \quad (1.1)$$

式中, M_r 为气体的相对分子质量; T 为绝对温度; $\bar{R}$ 为普适气体常数,其数值为 $8\,315 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ 。如果将 $\bar{R}/M_r$ 用符号 R 表示,则式(1.1)可以写为

$$p = \rho RT \quad (1.2)$$

式中, R 为气体常数,各种气体的气体常数各不相同。空气是多种组分构成的混合物,按其组分的质量比例计算,得其气体常数为 $287.053 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ 。

1.3.4 压缩性、粘性和传热性

1. 压缩性

对气体施加压强,气体的体积会发生变化。具有一定质量的气体的体积或密度随压强变化而改变的特性,叫做压缩性(或称弹性)。

气体压缩性大小通常可以用体积弹性模数度量,其定义为产生单位相对体积变化所需要的压强增大,即

$$E = - \frac{dp}{dV/V}$$

式中, E 为体积弹性模量; V 为一定质量气体的体积。