

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材

空气动力学

闫再友 陆志良 王江峰 编著



科学出版社

飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材

空气动力学

闫再友 陆志良 王江峰 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分为相对独立而又有机结合的空气动力学基础和飞行器空气动力学两篇。上篇包括第1~5章,分别介绍空气动力学基础知识、流体运动基本方程和基本规律、不可压无黏流、低速黏流和边界层流动基础、高速可压流动。下篇包括第6~10章,分别介绍低速翼型和机翼的气动特性、亚声速翼型和机翼的气动特性、超声速线化理论及跨声速与高超声速流初步知识、计算流体力学初步知识。

本书可作为飞行器设计专业本科生教材,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/闫再友,陆志良,王江峰编著. —北京:科学出版社,2018.8
飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材

ISBN 978-7-03-058228-7

I. ①空… II. ①闫…②陆…③王… III. ①空气动力学-高等学校-教材 IV. ①V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 152124 号

责任编辑:余 江 任 俊 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年8月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:443 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书主要为航空院校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。

本书以陈再新等编写的《空气动力学》(航空工业出版社,1993)和陆志良等编写的《空气动力学》(北京航空航天大学出版社,2009)为基础,结合当前的教学需要和专业发展而编写。与以往不同的是,本书对全书的符号使用进行了更统一的规定,增加了流体力学基本方程微分形式的推导,部分公式的数学推导更加详细,部分章节根据教学进程的需要进行了必要的调整。

全书共10章,分为空气动力学基础和飞行器空气动力学两篇。上篇包括第1~5章,为空气动力学基础部分,可供流体力学基础或空气动力学基础课程使用;下篇包括第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,也为部分学习了空气动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章介绍空气动力学基础知识、基本概念及相关准备知识;第2章介绍流体运动的基本方程和基本规律;第3章介绍不可压理想流体理论、拉普拉斯方程的基本解以及基本解叠加;第4章介绍低速黏流和边界层的基本概念;第5章介绍高速可压流动的基础知识。第6章介绍低速翼型的气动特性、薄翼型理论;第7章介绍低速机翼的气动特性、升力线理论;第8章介绍亚声速翼型和机翼的气动特性;第9章介绍超声速线化理论及跨声速、高超声速流初步知识;第10章介绍计算流体力学初步知识。

感谢南京航空航天大学周春华教授、董昊副教授和王成鹏副教授审阅了本书初稿。由于作者水平有限,不当之处在所难免,敬请读者予以批评指正。

作 者

2018年4月于南京航空航天大学

符 号 表

a	声速
a_0	总声速或驻点声速
α	迎角, 读音为 alpha
α_a	绝对迎角
α_e	有效迎角
α_0	零升迎角
$\alpha_{0\infty}$	翼型或翼剖面的零升迎角
β	角度、激波角、亚声速压缩性修正因子, 读音为 beta
c	弦长
c_0	翼根弦长
c_1	翼尖弦长
c_A	机翼的平均气动弦长
c_d	翼型或翼剖面上的阻力系数
c_{di}	机翼剖面的诱导阻力系数
c_l	翼型或翼剖面上的升力系数
c_l^α	翼型的升力线斜率
c_{m_z}	翼型或翼剖面上的前缘力矩系数
$c_{m_{z0}}$	翼型或翼剖面上的零升力矩系数
$c_{m_{z1/4}}$	翼型或翼剖面上对 1/4 弦长点的力矩系数
$c_{\text{平均}}$	机翼的平均几何弦长
C_D	机翼的阻力系数
C_{D0}	机翼的零升阻力系数
$C_{D\text{升}}$	机翼的升致阻力系数
$C_{D\text{黏压}}$	机翼的黏性压差阻力系数
C_{Di}	机翼的诱导阻力系数
C_L	机翼的升力系数
C_L^α	机翼的升力线斜率
C_f	当地摩擦应力系数
C_F	摩擦阻力系数
C_M	机翼的力矩系数

C_{M_z}	机翼的前缘力矩系数
$C_{M_{z0}}$	机翼的零升力矩系数
C_p	压强系数
c_p	比定压热容
c_v	比定容热容
D	阻力
D_i	机翼的诱导阻力
D_∞	单位展长翼型或翼剖面上的阻力
$D_{\infty i}$	机翼剖面上的诱导阻力
δ	边界层厚度、机翼非椭圆速度环量分布下洗角修正系数, 读音为 delta
δ^*	边界层位移厚度
δ^{**}	边界层动量损失厚度
$\Delta\alpha_i$	下洗角
e	内能
E	体积弹性模量、流体微团的总能量
ε	流体微团的角速度矢量, 读音为 epsilon
η	根梢比, 读音为 eta
f	单位质量上的彻体力
$\bar{f}$	翼型的相对弯度
ϕ	位函数或势函数, 读音为 phai
$\phi_{\text{扰}}$	扰动位函数或扰势函数
φ	角度, 读音为 phai
$\varphi_{\text{扭}}$	机翼的几何扭转角
γ	比热比、涡密度, 读音为 gamma
γ_j	第 j 个马蹄涡的无量纲涡强
γ_z	流体微团在 xOy 平面的角变形率
Γ	速度环量, 读音为 gamma
Γ_0	点涡强度、机翼对称面上的最大速度环量
h	焓
h_0	总焓或驻点焓
k	导热系数
κ	涡管强度, 读音为 kappa
Kn	克努森数
χ	机翼的后掠角, 读音为 kai
χ_0	机翼的前缘后掠角
χ_1	机翼的后缘后掠角

$\chi_{1/n}$	机翼的 $1/n$ 弦线后掠角
l	机翼的展长
L	升力
L_∞	单位展长翼型或翼剖面上的升力
LE	前缘 (leading edge)
λ	速度系数、展弦比、分子的平均自由程, 读音为 lambda
$\dot{m}$	质量流量
$\dot{m}_A$	质量通量密度
m	质量、偶极子强度
M	当地马赫数
M_∞	直匀来流的马赫数
M_{z_∞}	单位展长翼型或翼剖面上对前缘点之矩
$M_{z_{1/4\infty}}$	单位展长翼型或翼剖面上对距前缘 $1/4$ 弦长处的弦点之矩
μ	动力黏度、马赫角, 读音为 miu
$\mathbf{n}$	表面的法向单位矢量、封闭曲面的外法向单位矢量
∇	梯度算子, 读音为 nabla
ν	运动黏度、控制体的体积, 读音为 niu
ω	流体微团的旋度, 读音为 omega
p	压强
p_0	总压强或驻点压强
$\mathbf{P}$	应力张量
p_0	总压或驻点压强
p_n	(外) 法向为 $\mathbf{n}$ 的作用面上的应力
p_∞	直匀来流的压强
ψ	流函数, 读音为 psai
Q	体积流量
$\dot{q}$	热流密度
$\dot{q}_e$	热流密度矢量
$\dot{q}_r$	热辐射或其他原因传入单位质量流体的热功率
q_∞	直匀来流的动压
R	气体常数
$\bar{R}$	普适气体常数
R_∞	单位展长翼型或翼剖面上的气动力合力
Re	雷诺数
ρ	密度
ρ_0	总密度或驻点密度
ρ_∞	直匀来流的密度

s	熵
σ	总压损失比, 读音为 sigma
t	时间
τ	黏性应力、后缘角、机翼非椭圆速度环量分布诱导阻力修正系数, 读音为 tau
τ	黏性应力张量
τ_n	(外) 法向为 n 的作用面上的黏性应力
τ_w	壁面切向黏性应力
T	温度、时间间隔
T_0	总温度或驻点温度
$\bar{t}$	翼型的相对厚度
TE	后缘 (trailing edge)
u	流速在笛卡儿坐标系 x 轴方向的分量
U	重力位能函数
v	流速在笛卡儿坐标系 y 轴方向的分量
v_i	下洗速度
V	流速的大小
V	流速
V_e	有效速度
V_n	法向速度
V_∞	直匀来流的速度矢量
w	流速在笛卡儿坐标系 z 轴方向的分量
$\bar{x}$	翼型的弦向无量纲坐标
$\bar{x}_c$	翼型相对弯度的弦向位置
x_{cp}	翼型上压力中心在弦线上的位置
x_F	翼型上焦点在弦线上的位置
$\bar{x}_t$	翼型相对厚度的弦向位置
$\bar{y}_c$	翼型的弯度分布无量纲函数
$\bar{y}_t$	翼型的厚度分布无量纲函数

目 录

上篇 空气动力学基础

第 1 章 空气动力学基础知识 2

1.1 空气动力学简介 2

1.1.1 空气动力学的基本任务 2

1.1.2 空气动力学的研究方法 3

*1.1.3 空气动力学的发展概述 3

1.2 流体介质 4

1.2.1 连续介质假设 5

1.2.2 控制体 5

1.2.3 流体微团 5

1.2.4 常用流体参数的定义 6

1.2.5 气体的状态方程 7

1.2.6 压缩性、黏性和传热性 7

1.2.7 流体的模型化 10

1.3 气动力和气动力矩 12

1.3.1 升力、阻力和力矩 12

1.3.2 气动力系数 15

1.4 矢量和积分知识 17

*1.4.1 矢量代数 17

*1.4.2 典型的正交坐标系 18

*1.4.3 标量场和矢量场 20

*1.4.4 标量积和矢量积 20

1.4.5 梯度算子 21

1.4.6 标量场的梯度 22

1.4.7 矢量场的散度 23

1.4.8 矢量场的旋度 23

1.4.9 线积分 24

1.4.10 面积分 24

1.4.11 体积分 25

1.4.12 三个积分定理 25

*1.5 爱因斯坦求和约定 25

*1.5.1 指标与求和约定 25

*1.5.2 克罗内克 δ 符号 26

*1.5.3 排列符号 26

1.6 物质导数 27

1.7 速度散度的物理意义 29

习题 31

第 2 章 流体运动基本方程和基本规律 33

2.1 连续方程 33

2.1.1 微分形式的连续方程 33

2.1.2 积分形式的连续方程 34

2.2 动量方程 38

*2.2.1 微分形式的动量方程 39

2.2.2 积分形式的动量方程 41

2.3 能量方程 44

*2.3.1 微分形式的能量方程 46

2.3.2 积分形式的能量方程 50

*2.4 N-S 方程和两种特殊的流动 52

*2.4.1 N-S 方程 52

*2.4.2 两种特殊的流动 53

2.5 流体微团运动分析 57

2.5.1 流场的迹线和流线 57

2.5.2 角速度和角变形率 60

2.5.3 流函数和速度位 64

2.6 旋涡运动 68

2.6.1 涡线、涡管以及旋涡强度 69

2.6.2 速度环量和斯托克斯定理 69

2.6.3 毕奥-萨伐尔定律及直线涡 的诱导速度	72	4.2.5 流动分离	108
*2.6.4 亥姆霍兹旋涡定理	73	4.3 边界层流动	112
习题	74	4.3.1 边界层内压强分布特点	112
第3章 不可压无黏流	76	*4.3.2 平面边界层流动的 方程	112
3.1 伯努利方程及其应用	76	*4.3.3 低速平板边界层	113
3.1.1 无旋流动中的积分	76	4.3.4 边界层分离	118
3.1.2 有旋流动中的积分	80	习题	120
3.2 不可压无旋流动的控制方程	81	第5章 高速可压流动	121
3.3 拉普拉斯方程的基本解	83	5.1 热力学基础	121
3.3.1 直匀流	83	5.1.1 内能和焓	121
3.3.2 点源	83	5.1.2 热力学第一定律和比热	122
3.3.3 点涡	84	5.1.3 热力学第二定律和熵	123
3.3.4 偶极子	85	5.2 一维等熵绝热流	124
3.4 基本解叠加	87	5.2.1 声速	124
3.4.1 直匀流叠加点源	87	5.2.2 能量方程	125
3.4.2 直匀流叠加轴向逆流的 偶极子	90	5.2.3 参数间的基本关系式	125
3.5 绕圆柱的有环量流动和库塔- 茹科夫斯基升力定理	92	5.3 马赫波与膨胀波	128
3.5.1 绕圆柱的有环量流动	92	5.3.1 小扰动与马赫锥	128
3.5.2 库塔-茹科夫斯基升力 定理	94	5.3.2 马赫波	129
习题	98	5.3.3 膨胀波	131
第4章 低速黏流和边界层流动 基础	100	5.4 正激波	135
4.1 边界层概念	100	5.4.1 正激波与基本方程组	135
4.1.1 雷诺数	100	5.4.2 普朗特激波公式	135
4.1.2 边界层	100	5.4.3 正激波前后流动参数的 关系式	136
4.2 黏流的基本特性	103	5.4.4 兰金-于戈尼奥方程	137
4.2.1 物面上无滑移	103	5.5 斜激波	138
4.2.2 黏性摩擦阻力和黏性压 差阻力	104	5.5.1 平面斜激波前后流动参数 的关系式	138
4.2.3 机械能耗散和黏滞气 动热	105	*5.5.2 激波图线及其用法	139
4.2.4 层流和紊流	105	*5.5.3 弱斜激波的熵增及参数 近似关系式	142
		5.6 高速可压边界层初步知识	144
		*5.6.1 Crocco 流	144
		*5.6.2 物面恢复温度和复温 系数	146

5.6.3 激波与边界层的相互 干扰	148
5.7 拉瓦尔喷管与超声速风洞	149
5.7.1 马赫数随管流截面面积的 变化	149
5.7.2 拉瓦尔喷管	150
5.7.3 超声速风洞	152
习题	153

下篇 飞行器空气动力学

第 6 章 低速翼型的气动特性

6.1 翼型的几何参数	156
6.1.1 几何弦长	156
6.1.2 翼型表面无量纲坐标	157
6.1.3 弯度	157
6.1.4 厚度	157
6.1.5 前缘钝度与后缘尖锐度	157
6.1.6 常用低速翼型编号法 简介	158
6.2 低速翼型绕流的特点和 启动涡	159
6.2.1 低速翼型绕流的特点	159
6.2.2 启动涡	161
6.3 速度环量的确定和库塔- 茹科夫斯基后缘条件	163
6.4 薄翼型理论	164
6.4.1 流动的分解	165
6.4.2 迎角-弯板问题	167
6.4.3 厚度问题	174
*6.5 任意翼型位流解法	176
*6.5.1 保角变换法	176
*6.5.2 面元法	177
6.6 低速翼型的一般气动特性	179
6.6.1 翼型表面压强分布	179
6.6.2 翼型升力特性	179
6.6.3 翼型力矩特性	181

6.6.4 翼型的压心和焦点	182
6.6.5 翼型的阻力特性	183
习题	184

第 7 章 机翼的低速气动特性

7.1 机翼的几何参数	185
7.1.1 平面形状和平面几何 参数	185
7.1.2 几何扭转角 $\varphi_{\text{扭}}$	186
7.1.3 上(下)反角 ψ	187
7.2 机翼的自由尾涡	187
7.3 大展弦比直机翼绕流的气动 模型与升力线理论	188
7.3.1 气动模型和升力线假设	188
7.3.2 升力线理论	189
*7.4 升力面理论及涡格法	200
*7.4.1 升力面理论	200
*7.4.2 涡格法	203
7.5 低速机翼的一般气动特性	205
7.5.1 剖面升力系数展向分布 $c_l(z)$	205
7.5.2 升力特性	205
7.5.3 纵向力矩特性	206
7.5.4 阻力特性	207
习题	210

第 8 章 亚声速翼型和机翼的气动 特性

8.1 速度位方程	212
8.2 小扰动线化理论	213
8.2.1 速度位方程的线化	214
8.2.2 压强系数的线化	215
8.2.3 边界条件的线化	216
8.3 亚声速流中薄翼型的气动 特性	217
8.3.1 线性方程的变换	217
8.3.2 边界条件的变换	218

8.3.3 相应薄翼型之间的变换·····	218	9.3.4 有限翼展薄机翼的绕流特性·····	247
8.3.4 翼型上对应点压强系数之间的关系·····	219	*9.3.5 锥形流场概念·····	248
8.3.5 薄翼型的气动特性·····	219	9.4 跨声速绕流·····	249
8.4 亚声速薄机翼的气动特性及 M_∞ 对气动特性的影响·····	220	9.4.1 翼型的临界马赫数·····	249
8.4.1 相应机翼形状之间的变换·····	220	9.4.2 薄翼型绕流的气动特性·····	250
8.4.2 薄机翼的升力和俯仰力矩特性·····	220	9.4.3 机翼主要几何参数对气动特性的影响·····	253
8.4.3 M_∞ 对机翼气动特性的影响·····	225	*9.4.4 机翼气动特性的相似参数·····	256
习题·····	226	9.4.5 超临界翼型·····	256
第9章 超声速线化理论及跨声速、高超声速流初步知识·····	228	9.5 高超声速流初步知识·····	257
9.1 超声速薄翼型绕流·····	228	9.5.1 高超声速绕流的新特征·····	258
9.2 超声速薄翼型线化理论·····	229	*9.5.2 高超声速无黏流的激波关系式·····	262
9.2.1 一级近似理论压强系数分析·····	232	习题·····	265
9.2.2 一级近似理论压强系数的叠加法·····	233	第10章 计算流体力学初步知识·····	266
9.2.3 一级近似理论薄翼型的气动特性·····	235	10.1 网格生成技术简介·····	266
9.2.4 二级近似理论简述·····	242	10.1.1 结构网格·····	267
9.3 薄机翼超声速绕流的基本概念·····	243	10.1.2 非结构网格·····	271
9.3.1 前马赫锥与后马赫锥·····	243	*10.1.3 直角坐标网格·····	274
9.3.2 前缘、后缘和侧缘·····	244	*10.2 N-S 方程数值解法基础·····	275
9.3.3 二维流区与三维流区·····	246	*10.2.1 有限差分方法·····	275
		*10.2.2 有限体积方法·····	275
		*10.2.3 有限元方法·····	276
		*10.2.4 算例·····	277
		习题·····	278
		参考文献·····	279



上篇 空气动力学基础



达·芬奇简介



牛顿简介



丹尼尔·伯努利简介



欧拉简介



达朗贝尔简介



拉格朗日简介



库仑简介



拉普拉斯简介



纳维简介



泊肃叶简介

第 1 章 空气动力学基础知识

本章首先介绍空气动力学的基本任务、研究方法和流体力学与空气动力学的发展概述；其次介绍流体介质，引入流体微团和控制体的概念；然后介绍气动力系数、矢量运算和爱因斯坦求和符号的基础知识；最后介绍物质导数的概念和速度散度的物理意义。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 空气动力学简介

1.1.1 空气动力学的基本任务

从流体力学的角度出发，所有的物质都只有两种状态：流体和固体。二者的本质区别是固体可以通过产生有限的静变形承受剪切应力，而流体不能。换句话说，流体在剪切力作用下一定会发生运动。

流体力学（fluid mechanics）是研究流体的平衡，流体与物体之间的相对运动以及流体与物体之间相互作用力的科学。研究流体的平衡属于流体静力学（fluid statics）范畴，研究流体的运动属于流体动力学（fluid dynamics）范畴。流体力学的研究对象主要是水和空气。研究水为主的流体动力学称为水动力学（hydrodynamics）；研究空气为主的流体动力学称为空气动力学（aerodynamics）。水动力学中通常不考虑流体的可压缩性，而空气动力学中常常要考虑流体的可压缩性。本书的侧重点是空气动力学。

空气动力学是研究空气的运动规律及空气与物体之间的相互作用力的科学。它是现代流体力学的一个主要分支。空气动力学的研究与飞机的出现和发展紧密相连。研究涉及飞机的飞行性能、稳定性和操纵性等问题。因此，“空气动力学”是飞行器设计与工程学科不可或缺的一门课程。当然，空气动力学研究所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、导弹表面和螺旋桨叶片表面等；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，如都遵守质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律和热力学第二定律等。

研究空气动力学的基本任务，不仅要认识这些流动现象的基本实质，找出这些流动现象共性的基本规律在空气动力学中的表达，而且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 空气动力学的研究方法

同物理学各个分支的研究方法一样,空气动力学有三种研究方法:实验研究、理论分析和数值模拟。

实验研究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,实验研究往往也受到一定的限制,如受到模型尺寸的限制和实验设备边界的影响等。此外,实验测量本身也会影响所得到结果的精度,而且实验往往要耗费大量的人力和物力。因此这种方法在实际应用中常常会遇到困难。

理论分析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,忽略次要因素,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,建立描述问题的数学方程,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求解方程;

(4) 对结果进行分析、判断,并通过必要的实验检验与修正。

理论分析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,由于数学发展水平的限制和理论模型抽象的简化,理论分析方法常常无法满足研究复杂实际问题的需要。

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(如有限差分法、有限元法和有限体积法等)的发展,计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)作为流体力学的一个分支取得了蓬勃发展,数值模拟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,数值模拟方法研究所需费用比较少。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。当然数值模拟方法也有其局限性,有时数值模拟结果精度较差,这也是近年来CFD研究的重点。

这三种研究方法各有利弊。它们不是相互排斥,而是相互补充的,可以共同推动空气动力学研究的深入和发展。

*1.1.3 空气动力学的发展概述

流体力学是在人类同自然界做斗争和生产实践中逐渐发展起来的。对流体力学学科的形成作出贡献的首先是古希腊的阿基米德(公元前287年—公元前212年)。他奠定了流体静力学的基础。此后千余年间,流体力学没有重大进展。

空气动力学是现代流体力学的一个主要分支,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。丹尼尔·伯努利(Daniel Bernoulli)在1738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,即伯努利方程。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”或“达朗贝尔佯谬”就是他在 1744 年提出的。拉格朗日(Lagrange)改进了欧拉、达朗贝尔的方法,并发展了流体力学的解析方法。拉普拉斯(Laplace)于 1785 年提出了著名的拉普拉斯方程。关于气流对物体的作用力的研究,最早是牛顿(Newton)于 1726 年提出了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 年解决了绕球的无旋流动问题。兰金(Rankine)提出了理想不可压流体运动的位函数和流函数,并于 1868 年提出了将直匀流叠加到源(汇)、偶极子等流动上,以构成所谓的奇点法。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:黏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 年导出了黏性流体的运动方程。斯托克斯(Stokes)于 1845 年在另一个国家也独立地导出了黏性流体运动方程,现在被称为 N-S 方程。雷诺(Reynolds)在 1876~1883 年研究黏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;兰金于 1870 年,于戈尼奥(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,茹科夫斯基(Joukowski)发表了著名的升力公式,奠定了二维机翼理论的基础,并提出了以他的名字命名的翼型。1903 年 12 月,莱特(Wright)兄弟在美国飞机试飞成功,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)导出了翼型的超声速线化理论;1939 年,格特尔特(Göthert)提出了亚声速三维机翼的相似法则。1944 年冯·卡门(Von Kármán)和钱学森采用速度图法,研究和导出了比普朗特-格劳特(Glauert)法则更为精确的亚声速相似定律公式;1946 年钱学森首先提出了高超声速相似律。

上面所叙述的无黏空气动力学发展的同时,黏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黏流动和黏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黏性流动;1925 年普朗特又提出了实用的边界层混合长度理论;1938 年冯·卡门和钱学森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,计算机飞速发展,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,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。

1.2 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，如可压缩性、黏性和传热性等。因此，本节介绍流体介质的各项物理属性。

1.2.1 连续介质假设

由于流体是由大量做随机运动的分子组成的，所以从微观来看，流体是不连续的或者离散的。分子和相邻分子碰撞之前的平均距离定义为分子的平均自由程 λ 。例如，空气分子平均直径约为 $3.7 \times 10^{-8} \text{cm}$ ，它的平均自由程约为 $6 \times 10^{-6} \text{cm}$ 。

当流体与物体表面接触时，如果 λ 远小于物体的特征尺寸 l ，那么从宏观来看，流体就是近似连续的。此时，流体分子频繁地碰撞物体表面，以至于根本无法区分单个分子的碰撞，物体表面感觉到的是流体如同连续不断的介质。这种流动称为连续流(continuum flow)。例如，对于直径为 d 的圆柱绕流，如果 $\lambda \ll d$ ，则绕圆柱的流动就可以看作连续流。

如果 λ 和物体特征尺寸 l 的量级相同，此时，流体分子分布很稀薄，分子与物体表面的碰撞不是很频繁，以至于物体表面能清楚地感觉到单个分子的碰撞。这种流动称为自由分子流(free molecular flow)。例如，最外层大气的密度很小，以至于 λ 和太空飞船的特征尺寸是同一量级，因此载人航天飞行的太空飞船在最外层大气飞行时就会产生自由分子流。

还有介于这两者之间的情形，流动既表现出连续流的特征，又有自由分子流的特征。这种流动通常称为低密度流(low-density flow)。

这些流动类型可以用克努森数(Knudsen number)来进行区分。克努森数定义为

$$Kn = \lambda/l$$

当 $Kn \leq 0.1$ 时，流动为连续流；当 $0.1 < Kn \leq 10$ 时，流动为低密度流；当 $Kn > 10$ 时，流动为自由分子流。

到目前为止，绝大多数实际的空气动力学应用都是关于连续流的。低密度流和自由分子流只是整个流体动力学领域的一小部分。因此，本书中处理的都是连续流问题，采用连续介质假设(continuum hypothesis)，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。

1.2.2 控制体

如图 1.1 所示，想象在流场中存在一个有限的封闭区域，于是这个封闭区域就定义了一个控制体(control volume) v ，控制体 v 的封闭边界定义为控制面(control surface) S 。控制体是固定在流场中的有限空间区域，流体在流动时从控制体中穿过。控制体的特点是它的体积和形状始终保持不变。采用控制体模型以后，只要把注意力局限在控制体的有限区域内，而不必同时研究整个流场。体积趋于微元的控制体称为微元体。

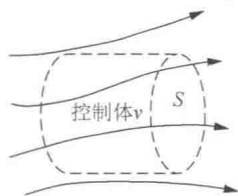


图 1.1 控制体

1.2.3 流体微团

如图 1.2 所示，想象流场中有一个小小的流体团，这个小小的流体团就定义了一个流体微团，其体积为 dv 。在微分运算中， dv 是一个小量，但它内部含有足够多的分子，仍然可