



“十二五”国家重点图书出版规划项目
航空航天精品系列

FUNDAMENTALS OF GAS DYNAMICS

气体动力学基础

● 陈浮 宋彦萍 陈焕龙 刘华坪 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

014013392

0354
21



“十二五”国家重点图书出版规划项目
航空航天精品系列

FUNDAMENTALS OF GAS DYNAMICS

气体动力学基础

● 陈浮 宋彦萍 陈焕龙 刘华坪 编著



0354
21



北航

C1700298



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

0140103335

内容提要

本书主要阐述了可压缩流体动力学的基本概念、规律和计算方法。全书特别注意将矢量分析、场论等方法引入到气体动力学基本方程的推导中,以实现数学描述、物理内涵与力学原理三者之间较为严格的统一,始终贯穿了基础、严谨、实用的方针,力图做到深入浅出。

本书可作为高等工科院校热能与动力工程、飞行器动力工程等专业的基础教材,也可供从事飞行器设计、航空动力等气体动力学相关专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

气体动力学基础/陈孚等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.1

ISBN 978-7-5603-4258-0

I. ①气… II. ①陈… III. ①气体动力学-高等学校-教材 IV. ①O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 240778 号

策划编辑 杜 燕 赵文斌

责任编辑 刘 瑶

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 27.5 字数 632 千字

版 次 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4258-0

定 价 58.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

本书以作者近年来为哈尔滨工业大学能源科学与工程学院热能与动力工程专业、飞行器动力工程专业的本科三年级学生讲授的“气体动力学”课程讲义为基础,以系统全面、突出重点、概念清晰、推导严谨、内容实用等为原则而编写,尤其注重将矢量分析、场论等方法引入到气体动力学基本方程的推导过程中,力图实现数学描述、物理内涵与力学原理三者之间较为严格的统一,使学生能够较为扎实地掌握气体动力学基础理论。

本书首先回顾了流体力学(含气体动力学)、热力学的基础知识及基本概念,并应用矢量分析、场论等方法着重描述了表征流体属性的各种物理量的内涵以及相应的表达形式。接着,从随体导数、雷诺输运定理出发,推导了较为完整的流体三维运动基本方程组的积分及微分形式,并引申得到上述方程组在一维定常流动假设下的不同形式,从而为后面的气体动力学基本理论、流动特性等的理解和分析打下良好基础。其后,书中依次详细讨论了滞止参数及气体动力学函数概念、膨胀波与激波、一维定常可压缩管道流动、小扰动线性化理论、超声速流动的特征线法、气体的高超声速流动等,最后对黏性流体力学范畴的层流及湍流附面层理论做了介绍。

本书可作为高等工科院校热能与动力工程专业、飞行器动力工程专业等高年级本科生的气体动力学课程(80~90学时)的教材,也可供从事飞行器设计、航空及船舶动力、能源等气体动力学相关专业的科技人员参考。

本书由哈尔滨工业大学陈浮、宋彦萍、陈焕龙、刘华坪执笔。书中第1、2、6章由陈浮执笔,第3、4章由宋彦萍执笔,第5、7、8、9章由陈焕龙、刘华坪执笔。此外,博士研究生俞建阳、李得英、王云飞、崔可、刘雷等帮助作者完成了本书的插图描绘、数据表格计算及部分文字录入等工作,在此表示感谢。

全书由王仲奇院士担任主审,并在审阅过程中提出了许多宝贵意见,在此谨致谢意。在本书的撰写过程中,作者参考、采纳了众多国内兄弟院校相关教材、讲义的章节内容,在此也一并表示诚挚的谢意。

由于作者的水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者和专家们批评指正。

本书的出版获得国家自然科学基金委创新研究群体项目《热辐射传输与流动控制》(51121004)资助,在此深致谢意。

作 者

2013年1月

主要符号表

符 号	含 义	符 号	含 义
A	有向曲面 反对称张量	i, j, k	笛卡儿坐标系单位矢量
A	翼型轴向力	k	比热比
a	加速度矢量	L	翼型升力
a	声速	l	有向曲线
b	翼型的厚度	M	力矩
c	翼型的弦长	m	质量
c_d	阻力系数(二维)	$\dot{m}$	质量流量
C_f	摩擦阻力系数	Ma	马赫数
c_l	升力系数(二维)	N	翼型法向力
c_m	力矩系数(二维)	n	法向单位矢量
c_p	气体的质量定压热容	P	应力张量
C_p	压强系数	p	压力
c_v	气体的质量定容热容	p_a	大气压强
c_x	阻力系数	p_b	环境压强或背压
D	速度导数张量	p_e	出口截面压强
D	翼型阻力	p_n	作用于以 n 为法向的单位面积上的应力
E	体积弹性模量 内能	$p_{xx}, p_{yy}, p_{zz},$ p_{xy}, p_{yz}, p_{zx}	应力张量的分量
e	比内能	Q	热量
e_r, e_θ, e_z	圆柱坐标系单位矢量	$\dot{Q}$	单位时间内外界对系统加热量
f	单位质量流体的质量力	q	热传导矢量
f	翼型的弯度	$\dot{q}$	单位质量流体所吸收的热量
$f(\lambda)$	气动函数	$q(\lambda), q(Ma)$	流量函数
g	重力加速度	R	气体常数
H	焓	R	矢径 合力
h	比焓	$r(\lambda)$	气动函数

续 表

符 号	含 义	符 号	含 义
S	面积 熵	χ	折合管长
$\mathbf{S}$	面积矢量 应变率张量	δ	楔形半顶角 折转角 附面层名义厚度
s	比熵	δ^*	附面层位移厚度
T	温度	δ_c	圆锥半顶角
U	速度 质量力势函数	$\varepsilon(\lambda), \varepsilon(Ma)$	静密度与等熵滞止密度之比 气动函数
$\mathbf{V}$	速度矢量	$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz},$ $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$	应变率张量的分量
V	容积 速度的模	Φ	耗散函数 总速度势
v	比容	ϕ	速度势函数 流量系数
v_x, v_y, v_z	笛卡儿坐标系的速度分量	Γ	环量矢量
v_r, v_θ, v_z	圆柱坐标系的速度分量	Γ	环量
W	功	γ	热膨胀系数
$\dot{W}$	单位时间内系统对外界做功量	φ	某标量函数 小扰动速度势函数 马赫波极角
$\dot{W}_s$	旋转机械与系统间交换的机械功率	λ	热导率 第二黏度系数 速度系数 特征线斜率
$\dot{w}_s$	单位质量流体对外界所作的机械功	μ	动力黏度 马赫角
w_f	摩擦损失功	ν	运动黏度
$\gamma(\lambda)$	气动函数	$\nu(\lambda), \nu(Ma)$	普朗特-迈耶函数
$z(\lambda)$	气动函数	$\pi(\lambda), \pi(Ma)$	静压强与等熵滞止压强之比 气动函数
α	攻角	θ	角度 附面层动量损失厚度
β	可压缩系数 激波角	$\theta(\lambda), \theta(Ma)$	气动函数
β_{cr}	临界压强比	ρ	密度

续 表

符 号	含 义	符号(角标)	含 义
τ	应力张量中与黏性有关的分量	b	边界或壁面
τ	微小体积 切应力	cr	临界参数
$\tau(\lambda), \tau(Ma)$	静温度与等熵滞止温度之比气动函数	f	流体
δ_3	附面层能量损失厚度	max	最大速度状态参数
Ω	涡量 速度矢量的旋度	w	壁面
ω	旋转角速度	s	激波
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	旋转角速度的分量	*	无量纲量 气流滞止参数或总参数
ψ	流函数	∞	无穷远

目 录

第1章 流体力学、热力学基础知识及场论初步	(1)
1.1 气体动力学发展概况	(1)
1.1.1 研究对象、特点及方法	(1)
1.1.2 流体力学与气体动力学的发展简史	(2)
1.1.3 气体动力学的分类	(5)
1.2 气体的基本属性	(5)
1.2.1 连续介质模型及流体物理量	(5)
1.2.2 气体的压缩性及输运性质	(7)
1.2.3 标准大气	(11)
1.3 矢量分析及场论初步	(13)
1.3.1 标量场、矢量场与张量场	(13)
1.3.2 标量场的梯度	(14)
1.3.3 矢量场的散度	(16)
1.3.4 矢量场的旋度	(18)
1.3.5 高斯公式和斯托克斯公式	(20)
1.4 作用于流体上的力、一点应力及应力张量	(21)
1.4.1 流体微团的运动分析	(21)
1.4.2 作用于流体上的力	(24)
1.4.3 流体中任一点的应力、应力张量	(25)
1.4.4 静止流体及无黏流体中的应力张量	(27)
1.4.5 应力张量与应变率之间的关系	(28)
1.5 描述流体运动的方法和基本概念	(29)
1.5.1 描述流体运动的两种方法	(29)
1.5.2 随体导数	(32)
1.5.3 系统与控制体	(35)
1.5.4 雷诺输运定理	(36)
1.5.5 迹线、流线、流面及流管	(39)
1.6 热力学基础知识	(40)
1.6.1 热力学系统及热力学状态、特性、过程	(40)
1.6.2 内能、热力学第一定律、焓及比热容	(42)
1.6.3 热力学第二定律、熵	(43)

1.6.4	完全气体、气体状态方程	(45)
1.6.5	等熵关系	(47)
1.7	流体的理论模型	(47)
第2章	流体运动基本方程组	(55)
2.1	连续方程	(56)
2.1.1	连续方程的积分形式及其应用	(56)
2.1.2	连续方程的微分形式及其应用	(58)
2.1.3	一维定常流动的连续方程形式	(59)
2.2	动量方程	(61)
2.2.1	动量方程的积分形式及其应用	(61)
2.2.2	动量方程的微分形式及若干简化形式	(64)
2.2.3	伯努利积分和拉格朗日积分	(69)
2.2.4	一维定常流动的动量方程形式	(72)
2.3	动量矩方程	(74)
2.3.1	动量矩方程的积分和微分形式	(74)
2.3.2	一维定常流动的动量矩方程形式	(75)
2.4	能量方程	(76)
2.4.1	能量方程的积分形式及其应用	(76)
2.4.2	能量方程的微分形式	(81)
2.4.3	一维定常流动的能量方程形式	(86)
2.5	熵方程	(87)
2.6	N-S 方程的定解条件及定解问题的适定性	(88)
2.6.1	初始条件	(89)
2.6.2	边界条件	(89)
2.6.3	N-S 方程组定解问题适定性的讨论	(91)
2.7	黏性流体动力学的相似律	(92)
2.7.1	N-S 方程组和边界条件的无量纲化处理	(92)
2.7.2	两个流体运动相似的充要条件	(97)
第3章	滞止参数与气动函数	(98)
3.1	声速与马赫数	(98)
3.1.1	声速	(98)
3.1.2	马赫数	(101)
3.2	滞止参数及临界参数	(103)
3.2.1	滞止状态、滞止参数及其应用	(103)
3.2.2	关于总压的讨论	(107)
3.2.3	极限状态、临界状态及速度系数	(109)
3.3	气体动力学函数及其应用	(111)

3.3.1	气动函数 $\tau(\lambda)$, $\pi(\lambda)$ 及 $\varepsilon(\lambda)$	(112)
3.3.2	流量函数 $q(\lambda)$ 及 $y(\lambda)$	(113)
3.3.3	冲量函数 $z(\lambda)$, $f(\lambda)$ 及 $r(\lambda)$	(116)
第4章	膨胀波与激波	(119)
4.1	弱扰动在气流中的传播与马赫波	(119)
4.1.1	运动扰动源	(119)
4.1.2	气流流过静止扰动源	(121)
4.2	普朗特-迈耶(P-M)流动	(124)
4.2.1	膨胀波、弱压缩波的形成及其特点	(124)
4.2.2	P-M 波的计算及 P-M 函数	(128)
4.3	激波及激波前后气流参数的基本关系式	(134)
4.3.1	激波的形成及其传播	(136)
4.3.2	激波前后气流参数关系的基本方程式	(141)
4.3.3	朗金-雨贡纽关系式	(142)
4.3.4	普朗特关系式	(143)
4.3.5	激波前后气流参数的基本计算公式	(144)
4.3.6	经过斜激波的气流折转角及激波曲线	(148)
4.3.7	激波图表及其计算	(153)
4.3.8	锥面激波及乘波体飞行器	(156)
4.4	膨胀波、激波的反射与相交	(160)
4.4.1	膨胀波、激波在直固壁面上的反射	(160)
4.4.2	膨胀波、激波在自由边界上的反射	(162)
4.4.3	膨胀波、激波的相交	(162)
4.5	一些具体的超声速流动问题中的波系分析	(166)
4.5.1	超声速进气道的激波系	(166)
4.5.2	超声速气流绕流翼型的激波系	(175)
4.5.3	压气机、涡轮中的激波与膨胀波	(176)
第5章	一维定常可压缩管道流动	(182)
5.1	一维定常流理论	(182)
5.1.1	问题描述及制约因素物理意义分析	(182)
5.1.2	几个制约因素同时作用时的基本方程	(184)
5.2	变截面管道流动	(186)
5.2.1	变截面一维等熵流动	(186)
5.2.2	收缩喷管	(189)
5.2.3	拉伐尔喷管	(194)
5.3	等截面摩擦管流	(200)
5.4	等截面换热管流	(206)

5.5	变流量加质管流	(212)
第6章	小扰动线性化理论	(215)
6.1	势函数、势函数方程及流函数、流函数方程	(215)
6.1.1	势函数及势函数方程	(215)
6.1.2	流函数及流函数方程	(219)
6.2	小扰动线性化方程及边界条件、压强系数公式	(221)
6.2.1	速度势方程的线性化	(222)
6.2.2	边界条件的线性化	(225)
6.2.3	压强系数的线性化	(227)
6.3	沿波形壁流动的二维精确解	(230)
6.3.1	亚声速流动	(230)
6.3.2	超声速流动	(233)
6.4	亚声速绕薄翼型定常流动的相似法则	(236)
6.4.1	速度势方程、边界条件、翼型几何参数及压强系数的变换	(236)
6.4.2	薄翼型气动参数的定义	(238)
6.4.3	亚声速气流绕薄翼型流动的相似法则	(240)
6.5	超声速气流绕薄翼型流动	(243)
6.5.1	物理模型与数学模型的建立	(243)
6.5.2	求解方法	(244)
6.5.3	气动力参数的计算	(246)
6.5.4	翼型升力及阻力系数的叠加计算	(248)
第7章	超声速流动的特征线法	(251)
7.1	特征线的一般理论	(251)
7.1.1	特征线的数学意义	(251)
7.1.2	定常二维超声速流中特征线的物理意义	(254)
7.1.3	两个偏微分方程的方程组的特征线法	(255)
7.2	定常二维超声速无旋流动的特征线法	(258)
7.2.1	控制方程、特征线方程及相容方程	(258)
7.2.2	特征线法数值计算的有限差分方程	(264)
7.2.3	不同单元的处理过程	(265)
7.2.4	已知几何形状的喷管内流动分析	(269)
7.3	定常二维等熵有旋超声速流动的特征线法	(271)
7.3.1	控制方程、特征线方程及相容方程	(271)
7.3.2	特征线法数值计算的有限差分方程	(274)
7.3.3	不同单元的处理过程	(275)
7.4	无黏、定常三维等熵超声速流动的特征线法	(278)
7.4.1	特征曲面及一般相容性方程	(279)

7.4.2	流特征面及沿流面的相容关系	(280)
7.4.3	波特征面及沿双特征线的相容关系	(281)
第8章	气体的高超声速流动	(284)
8.1	高超声速流动的基本特征	(284)
8.2	高超声速流动的斜激波关系及膨胀波关系	(288)
8.2.1	高超声速流的基本激波关系式	(288)
8.2.2	高超声速小扰动时的激波关系	(289)
8.2.3	高超声速流动时的 P-M 波	(291)
8.3	高超声速流动的无黏流动分析	(292)
8.3.1	马赫数无关原理	(292)
8.3.2	小扰动理论的高超声速相似律	(294)
8.4	高超声速流动的牛顿流模型及其修正	(298)
8.5	高超声速飞行器的气动加热及防护	(300)
第9章	层流与湍流附面层	(303)
9.1	附面层的基本知识	(304)
9.1.1	附面层的概念	(304)
9.1.2	附面层内的两种流态	(305)
9.1.3	附面层的特征量	(307)
9.2	层流附面层微分方程及其相似解	(310)
9.2.1	附面层微分方程及其边界条件	(310)
9.2.2	二维层流附面层方程的相似解及其存在条件	(313)
9.2.3	平板附面层方程的布拉修斯解	(316)
9.2.4	其他层流相似解	(319)
9.3	湍流基础及湍流附面层的物理特征	(321)
9.3.1	层流流动稳定性与转捩	(321)
9.3.2	湍流平均运算、湍流强度及相关概念	(323)
9.3.3	雷诺方程及雷诺应力	(326)
9.3.4	普朗特混合长度理论	(329)
9.3.5	湍流附面层方程及其物理特性	(332)
9.4	附面层积分方程	(336)
9.4.1	卡门动量积分方程的推导	(337)
9.4.2	平板层流与湍流附面层的流动特性与计算	(338)
9.5	附面层的分离及其与激波的相互干扰	(342)
9.5.1	附面层分离	(343)
9.5.2	附面层与激波的相互作用	(347)
附表	.....	(350)
附表1	空气和水的物理属性	(350)

(08)	附表 2 标准大气的物理属性	(351)
(18)	附表 3 一维等熵流气动函数表($k=1.4$)	(353)
(48)	附表 4 气体动力学函数表($k=1.4$)	(364)
(48)	附表 5 二维超声速等熵流函数表($k=1.4$)	(373)
(88)	附表 6 正激波前后气流参数表($k=1.4$)	(377)
(88)	附表 7 斜激波前后气流参数表($k=1.4$, δ 取整数)	(384)
(08)	附表 8 等截面绝热摩擦管流($k=1.4$)	(418)
(18)	附表 9 附加流量垂直于主流($k=1.4$)	(421)
	参考文献	(426)

(282)	.....	1.2.8
(294)	.....	2.2.8
(298)	.....	4.4
(300)	.....	2.8
(303)	.....	章 4
(304)	.....	1.9
(304)	.....	1.1.9
(305)	.....	2.1.9
(307)	.....	2.1.9
(310)	.....	2.9
(310)	.....	1.2.9
(313)	.....	2.2.2
(316)	.....	2.2.3
(318)	.....	2.2.4
(321)	.....	2.3
(321)	.....	1.3.1
(323)	.....	2.3.2
(326)	.....	2.3.3
(329)	.....	2.3.4
(332)	.....	2.3.2
(336)	.....	4.9
(337)	.....	2.4.1
(338)	.....	2.4.2
(342)	.....	2.2
(343)	.....	1.2.9
(347)	.....	2.2.2
(350)	.....	表 4
(353)	.....	1.2.4

第1章 流体力学、热力学基础知识及场论初步

本章将简要介绍气体动力学所涉及的一些基础知识及概念,其中包括气体的基本性质、热力学及热力学基本定律,研究流体运动的基本方法和概念等,尤其是应用矢量分析、场论等方法描述表征流体属性及流体运动特性的各种物理量的内涵,并给出相应的表达形式。

1.1 气体动力学发展概况

1.1.1 研究对象、特点及方法

气体动力学是流体力学的一个重要分支。其研究的对象是具有显著可压缩效应的气体。其研究的主要内容是气体与物体之间有相对运动时,尤其是气体高速运动时的基本规律,并揭示气体运动对物体所施加的作用力及力矩的复杂机制。

本书1.2节中给出的气体可压缩系数与气体压力、密度的变化量间的关系式 $\beta dp = \frac{dp}{\rho}$ 表明,由于气体低速运动时压力变化较小,因而引起的气体密度的变化也相对较小,通常可忽略气体的压缩性。然而,当气体做高速(或非定常)运动时,其压力将发生显著变化,并导致密度也随之出现明显改变,此时气体必须按照可压缩流体来处理。本书3.1节中给出的气流马赫数与气流的速度、密度相对变化量间的关系式 $-Ma^2 \frac{dV}{V} = \frac{dp}{\rho}$ 进一步表明,气体低速运动时($Ma \leq 0.3$),气流速度的相对变化量所引起的密度相对变化量较小,一般可忽略,即认为气流是不可压缩的。但是当 $Ma > 0.3$ 时就必须考虑气流的压缩性了。因此,考虑高速气流的可压缩效应,是气体动力学的重要特点和任务。由于压力、密度既是描述气体宏观运动的变量,也是描述气体热力学状态的变量,因而它们把气体的动力学问题和热力学问题耦合在一起。从真实的物理现象中也可以发现,可压缩气体的运动过程总是伴随着热力学过程的发生。例如,气体在收缩喷管中做亚音速运动时,气流速度增加,而压强、密度、温度下降(热焓减少)。因此,研究可压缩气体的流动问题是以流体动力学与热力学中的一些基本物理定律为基础的,其控制方程组包括四方面内容。

- (1) 运动学方面:质量守恒定律。
- (2) 动力学方面:牛顿第二定律(即动量定理)。
- (3) 热力学方面:能量守恒定律(即热力学第一定律)和熵方程(即热力学第二定律)。

(4) 气体的物理和化学属性方面:如气体状态方程、气体组元间的化学反应速率方程、气体的输运性质(黏性、热传导及组元扩散的定律)等。

上述四方面内容组成的控制方程组是非线性的和强相互耦合的,再加上给定求解域上气体物理量所应满足的初值、边值条件(即定解条件),使得它在数学上的解析求解和数值求解变得极为困难。

如同物理学其他各个分支的研究方法一样,实验、理论分析与数值方法(或称数值模拟、数值仿真)是气体动力学的主要研究手段。这三种研究手段的共同出发点是被研究对象所遵循的气体动力学基本理论和描述所研究对象的微分方程组及其定解条件,但是它们所采用的方法却各不相同,具有各自的特点,而且是相互依赖、相互促进的。

实验研究是最先使用、应用广泛的气体动力学问题研究的方法,其主要手段是利用风洞、水洞、气动部件或整机实验台架、测试系统等进行模型或原型实验。实验研究的优点是可以提供大量的实验数据,使得研究者能从定量、定性的资料中发现、分析流动中的(新)现象或(新)原理,尤其是它的结果可作为校验其他两种研究方法所得结论是否正确的依据。其缺点是实验结果的普适性和精度受限于模型尺寸、实验条件及测试系统精度等诸多因素,而且往往需要消耗大量的人力、物力和财力。

理论分析是继实验方法之后出现的研究方法,限于气体动力学非线性控制方程组解析求解的困难性以及所研究物理现象的复杂性,理论分析需要根据所研究问题的特点,选取主要因素,忽略次要因素,应用基本概念、定律和数学工具建立某种简化、抽象的数学模型(包括控制方程组及其定解条件),并利用解析求解的方法获得问题的解析解,解析结果的精度、适用范围等需要通过必要的实验研究验证或修正。理论分析的优点是能够利用数学方法求得解析的结果,益于揭示问题的内在规律,可明确给出各物理量之间的变化关系,有较好的普适性。但是,受到数学发展水平的限制,能够获得解析解的理论模型数量较少且多数局限于较简单的物理问题,远不能满足实际流动问题研究的需要。

计算流体力学(CFD)的出现、发展及其在气体动力学研究中的作用、地位的不断提高,与20世纪中叶以来计算机技术的迅猛发展密切相关。其基本步骤是:

(1) 基于某种数值方法改写或简化气体动力学控制方程组及其定解条件。

(2) 作离散化处理并编写计算程序并计算。

(3) 获得数值计算结果,并与实验或其他精确结果对比以验证其计算精度。

数值模拟或仿真的优点是可以获得某些无法进行实验或难以作出理论分析的问题的数值解(即流场中速度、压力、密度等未知量的时空分布信息),而且研究费用较少。其缺点是对于复杂而又缺乏完善数学模型的气体动力学问题无能为力,有时计算精度较差,这也是近年来CFD研究的重点。

1.1.2 流体力学与气体动力学的发展简史

作为流体力学的分支之一,气体动力学是从流体力学发展而来的。

从17世纪末开始,流体力学进入了它的创建与发展时期,逐渐建立和形成了流体力学的理论与实验方法。1686年,牛顿通过实验与分析,首先提出了黏性流体的剪切应力公式,即牛顿内摩擦定律,这为建立黏性流体运动方程组奠定了基础。其后,他还于1726

年基于孤立质点(或粒子)的运动力学原理,提出了一种计算物体在流体中运动时所受阻力的近似理论,即牛顿撞击理论,虽然由于没有考虑流体的流动性(或者说粒子间相互作用的影响)而导致其预测结果与实际偏差较大,但对于高超声速流动,该理论却可以给出较好的预测结果。1738年,伯努利建立了定常不可压流体的压强、高度与速度间的关系式,即伯努利方程。1752年,达朗贝尔建立了质量守恒方程,即连续方程,他还提出了“达朗贝尔佯谬”,即根据无黏不可压缩流体无旋流动理论,一个有限大小的物体在无边际的流体中匀速运动时,只要是附体流动、没有分离,则无论物体的形状如何,都不会受到阻力。但实验结果表明,流速较高时物体所受阻力大致与流速成正比。1775年,欧拉提出了流体运动的描述方法和理想流体的运动方程,即欧拉方程,奠定了连续介质力学基础,被称为理论流体力学的奠基人。

从19世纪开始,随着工业革命的发展,流体力学步入了全面发展与日趋完善时期。与牛顿内摩擦定律相对应,1822年傅里叶提出了傅里叶导热公式,1855年菲克提出了菲克第一扩散定律,为研究流体力学的传热、传质问题奠定了基础。1826年,泊松解决了关于绕球体的无旋流动问题。1827年,拉普拉斯提出了拉普拉斯方程,兰金则指出理想不可压流体运动的势函数与流函数均满足拉普拉斯方程,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奇点法。1845年,亥姆霍兹引进了一系列关于旋涡的基本概念,提出了旋涡运动定理,他还于1860年将流体质点运动分解为平动、转动与剪切变形三种形式,从而成为无黏有旋运动研究的创始人。1823年,纳维从分子相互作用的某些假设出发,1845年斯托克斯则经过较为严密的数学推导,分别得到了真实(黏性)流体运动微分方程,即纳维-斯托克斯方程(简称N-S方程),从而奠定了黏性流体力学的理论基础,欧拉方程就是N-S方程的黏性极限(即黏度趋于0的极限)形式。1872年,玻耳兹曼提出了气体分子运动论基本方程,即玻耳兹曼方程,可用于描述稀薄气体流动,N-S方程就是玻耳兹曼方程的流体力学极限形式。此外,1842年迈尔在几十位相关学者工作的基础上,提出了能量守恒定律,其后焦耳、亥姆霍兹等也独立发现了这一定律。19世纪末关于湍流的研究也在发展之中。1883年,雷诺通过实验发现了流动的两种状态,即层流和湍流,得到了判断流态的雷诺数,1894年,他又引进了雷诺应力的概念,应用时均方法建立了湍流运动基本方程,即雷诺方程,为湍流的理论研究奠定了基础。

19世纪下半叶至20世纪30年代是气体动力学的初步奠基时期,其工程应用背景是蒸汽机、炮弹及爆炸技术所涉及的气体流动的可压缩性问题。1808年泊松、1848年斯托克斯分别研究了等温气体中的简单波和间断面,后者根据质量、动量守恒定理建立了间断面前后流动参数所应满足的关系式,这是对可压缩气体运动理论研究的开始。1870年兰金、1887年雨贡纽分别提出了激波前后气体参数间的关系式。1887年,马赫研究了抛射体以超声速运动时产生的波,得到了马赫角关系式。1929年,阿克莱将流速与声速之比定义为马赫数。1891年,兰彻斯特提出了速度环量产生升力的概念,为建立升力理论创造了条件,他也是首位提出有限翼展机翼理论的人。1902年库塔、1906年儒可夫斯基分别提出了库塔-儒可夫斯基定理与假定。1910年,布拉休斯、恰普雷金分别提出了一般二维物体受力公式。上述工作使得二维升力理论得以完善。这一时期一项具有重要意义的理论是普朗特于1904年提出的附面层理论,他认为流场可以分为两个区域分别处理:

远离物面区域用无黏理论处理,而黏性仅在贴近物面的薄层流体(即附面层或边界层)内才是必须加以考虑的,这种将实际流体的黏性效应限制在附面层内的研究方法使得N-S方程得以简化,为气体动力学中黏性理论的研究开辟了新的道路。20世纪初,随着飞行器飞行速度的不断提高,气体的可压缩性影响及激波研究逐渐成为热点。1882年拉伐尔发明了收缩-扩张形喷管即拉伐尔喷管,并由斯多道拉(1903年)、普朗特和迈耶(1908年)观测了这种喷管的流动特性。1908年普朗特和迈耶提出了激波与膨胀波理论。1910年瑞利和泰勒研究了激波的不可逆性。1928年布泽曼、1933年泰勒和马可尔提出了圆锥激波的图解法和数值解。此外,小扰动线性化方法、特征线方法、速度图法等也在20世纪初相继提出。这一时期的研究成果由泰勒和马可尔在《可压缩流体力学》一文中加以总结,为气体动力学研究奠定了基础。

20世纪30年代至50年代是气体动力学的飞速发展阶段。1935年在罗马召开了讨论航空中高速流动问题的学术会议,众多流体力学先驱者的参加使得这次会议成为通向近代气体动力学的里程碑。其后,随着涡轮喷气发动机、火箭发动机等的出现及发展,飞行器的飞行速度持续提高且逐渐接近并突破了声速,实现了超声速飞行。1925年阿克莱提出了超声速翼型的线性化理论。1930年普朗特提出了可在亚声速范围内修正翼型升力压缩性影响的相似准则。1944年冯·卡门和钱学森采用速度图法得到了更为准确的亚声速相似律公式。与此同时,由于高推重比涡轮喷气发动机的推力不断增加,叶轮机械内气体流动的速度也逐渐由亚声速向跨声速、超声速发展,从而促进了内流气体动力学的发展。这一时期的气体动力学与热力学的结合越来越紧密,也被称为气动热力学的发展阶段,其特点是完全气体假设下的气体动力学理论和实验越加成熟。

20世纪50年代至今是气动热化学动力学、高超声速气体动力学与计算流体力学的发展阶段。自从1949年美国的两级火箭飞行实验实现了世界上首次高超声速飞行以来,高超声速飞行技术以及高超声速飞行中的气动力和气动热问题研究始终是世界各国航空航天领域的研究热点。介质性质在高温条件下的物理、化学变化(如气体分子的电离化、飞行器头部烧蚀层的气化及其与气体分子的化学反应等)使得气体动力学必须与化学热力学、统计物理、化学动力学结合,研究者不仅关注所研究对象的气动力特性,而且还包括高温气流的传热率及温度分布。自1946年第一台电子计算机问世以来,随着计算机技术的迅猛发展,逐渐形成了计算流体力学这一新的分支,基于先进数值求解方法和高性能计算机的数值仿真技术,已经可以实现飞行器部件、组合体甚至整机的复杂绕流或内流流场的计算,而且计算结果的精确度与可靠性也随着计算机、计算机技术及气体动力学知识、实验验证技术的进步与完善而不断提高,并可直接应用于飞行器的气体动力学设计中,从而大大缩短了新型飞行器及其气动部件的研制周期,并大幅度降低研制成本。可以预见,计算流体力学将进一步发展并在实际气体动力学问题研究中发挥越来越大的作用。

自20世纪以来,实验技术也在迅速发展,热线风速仪(HWA)、激光测速仪(LDV及PIV)、高精度的压力及温度传感器、高速数据采集及处理系统等为研究气体非定常三维流场细微结构创造了良好条件,也为各种先进的流场测试技术及显示技术提供了丰富而准确的流场信息,加深了研究者对复杂流动物理机制及流动图画的认识。实验技术的发展将为气体动力学的发展起到重要的推动作用。