

普通高等教育“十五”国家级规划教材



气体动力学基础

主 编 王新月

QITI DONGLIXUE JICHU

西北工业大学出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

气体动力学基础

王新月 主编

王新月 胡春波 张堃元
陆利蓬 申振华

编著



西北工业大学出版社

【内容简介】 本教材主要介绍了可压缩流体动力学的基本概念、基本方程和求解方法。全书共 12 章,分别介绍了流体力学的基本理论和基础知识,重点阐述了可压缩流体的属性、气动函数、超声速流中的膨胀波、激波理论以及一维定常管流理论;介绍了理想流体多维流动的动力学理论和方法,黏性流体的基本方程和附面层理论;简要介绍了势流理论、相似理论和高超声速流动的特殊问题等内容。

本书可作为高等工科院校有关专业的专业基础课教材,也可供机械、能源、船舶和化工等部门的有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

气体动力学基础/王新月主编. —西安:西北工业大学出版社,2006.5
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 7-5612-2142-8

I. 气… II. 王… III. 气体动力学—高等学校—教材 IV. O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 114966 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:22.875

字 数:548 千字

版 次:2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

定 价:32.00 元

前 言

为了适应我国高等教育的改革和发展,满足培养面向 21 世纪高技术人才的需求,针对专业调整后的“飞行器动力工程”专业培养方案,我们将“流体力学基础”和“气体动力学基础”教学内容合并,以全面系统、结构合理、重点突出、例题丰富为原则,精心编写了本教材。其内容侧重介绍可压缩流体动力学的基本概念、基本方程和求解方法,故取名为《气体动力学基础》,它将为读者学习后续课程和从事本专业的工作提供扎实的基础知识。

本书首先讨论了流体动力学的基本概念、流体的基本属性,突出了气体的高温属性。在讨论静力学的基础上,突出了流体压强的测量方法。在对流体运动分析的基础上,一方面从一维运动和多维运动的雷诺输运定理出发,由浅入深地引出多维流动积分形式的基本方程,并将微分形式的基本方程放入单独一章(第八章)讨论,这样将重点和难点进一步分散,使得多维流动的基本方程更容易理解和学习。另一方面,由积分形式的基本方程很容易引出一维流动的基本方程,这样可以减少教学学时,更适合教学学时改革的需要。教材中详细讨论了超声速流动中的激波、膨胀波理论;详细讨论了可压一维定常管内流动。为了加强基础,拓宽专业知识面,用一章(第四章)的篇幅讨论不可压管内流动中的各种问题的处理方法和计算问题。在研究一维和二维流动的基础上,进一步讨论多维流动的流动规律、微分形式的基本方程、旋涡运动、无旋运动和势流叠加等内容,并在第十一章中介绍了量纲分析法,这是流体力学实验的基础。在此基础上,讨论了黏性流体力学的基本方程和附面层基础。最后介绍了高超声速流动的特点和有关特殊问题。

本教材配备有电子教案和电子教材(拟于 2007 年出版),以配合教师教学和学生学习的之用。在电子教案和电子教材中,有内容丰富、形式多样的与本教材结合紧密的动画素材和流动显示的配套内容,为气体动力学的教学

和学习提供了非常便利的条件。希望本书的出版为气体动力学教学内容和教学方法的改革提供有益的借鉴。

本书可作为高等工科院校的气体动力学课程(80~90学时)的教科书,适用于航空、航天工程,飞行器动力工程,工程热物理,民航工程等专业,也可供机械、能源、船舶和化工等部门的有关工程技术人员参考。

本书由西北工业大学王新月主编。书中第一、二、四、五、六、七章由王新月编写;第三、十章由北京航空航天大学陆利篷和王新月编写;第八章由南京航空航天大学张堃元和王新月编写;第九章由张堃元编写;第十一章由沈阳航空工业学院申振华编写;第十二章由西北工业大学胡春波编写。全书由西北工业大学廉小纯教授担任主审,提出了许多宝贵意见,在此向廉小纯教授表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,对于书中出现的缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

编著者

2006年2月

主要符号表

符 号	含 义
A	面积
a	加速度
c	声速
c_f	摩擦因数
c_p	比定压热容
c_v	比定容热容
D	扩散系数
d	直径
E	弹性模量, 总能量
e	单位质量流体的总能量
F	作用力, 气流的冲量
H	动量矩
h	单位质量流体的焓(比焓)
h_f	沿程能量损失
h_w	总能量损失
h_ζ	局部能量损失
k	比热比
M	外力矩, 偶极矩
m	质量
N	功率
p	压强
Q	热量
q	单位质量流体的热量
q_m	质量流量
q_v	体积流量
R	气体常数, 单位质量流体的质量力
s	单位质量流体的熵(比熵)
T	温度
u	热力学能(内能)
V	速度
V_x, V_y, V_z	笛卡尔坐标系速度分量
V_r, V_θ, V_z	圆柱坐标系速度分量
v	体积, 小扰动速度
V_*	摩擦速度

符 号	含 义
W	功,重力
Ma	马赫数
Re	雷诺数
Fr	弗劳德数
Eu	欧拉数
St	斯坦顿数
We	韦伯数
β	压缩系数,激波角,单位质量流体所具有的随流物理量
δ	壁面折转角,附面层厚度
δ^*	位移厚度
δ^{**}	动量损失厚度
Γ	速度环量
γ	重度
ε	湍流度
Ω	涡量
ω	旋转角速度
μ	动力黏度
ν	运动黏度
Φ	与流体质量有关的随流物理量,黏性耗散函数
φ	势函数
ψ	流函数
λ	速度因数,沿程损失因数,导热系数
ζ	局部损失因数
Δ	绝对粗糙度
χ	湿周长
σ	总压恢复因子
下标	
cr	临界状态参数
cs	控制面
cv	控制体
d	设计值
s	系统,激波,锥面上的参数,轴功
上标	
	脉动量
*	滞止状态参数(总参数)

目 录

绪 论	1
第一章 流体的物理属性及流动模型	3
1.1 连续介质模型	3
1.1.1 连续性假设	3
1.1.2 连续介质中一点处参数的定义	4
1.2 流体的压缩性与膨胀性	4
1.2.1 流体的压缩性	4
1.2.2 流体的膨胀性	5
1.3 流体的输运性质	6
1.3.1 流体的黏性	6
1.3.2 流体的导热性	9
1.3.3 流体的扩散性	10
1.4 高温气体的属性	10
1.5 流体流动模型简介	11
1.5.1 理想流体模型(无黏性流体模型)	11
1.5.2 不可压流动模型	12
1.5.3 绝热流动与等熵流动模型	12
小 结	12
思考与练习题	13
第二章 流体静力学基础与基本概念	15
2.1 作用在流体上的力及静压强的特性	15
2.1.1 作用在流体上的力	15
2.1.2 流体静压强及其特性	16
2.2 流体静平衡微分方程及其应用	17
2.2.1 流体静平衡微分方程	17
2.2.2 重力作用下流体内部的压强	19
2.2.3 大气结构与国际标准大气	20
2.3 流体的相对平衡	21
2.3.1 直线等加速运动	22

2.3.2 等角速度旋转容器中液体的平衡	23
2.4 静止流体对平面和曲面的作用力	24
2.4.1 静止流体对物体的作用力	24
2.4.2 静止流体对平面的作用力	25
2.4.3 静止流体对曲面的作用力	26
2.5 流体静压强的测量原理	29
2.5.1 绝对压强、相对压强和真空度	29
2.5.2 流体静压强的测量	29
小 结	32
思考与练习题	33
第三章 流体动力学基本方程和基本概念	36
3.1 描述流体运动的两种方法及基本概念	36
3.1.1 系统和控制体	36
3.1.2 描述流体运动的两种方法	37
3.1.3 随流导数	40
3.1.4 迹线、流线、流管和脉线	43
3.1.5 流体运动分类	46
3.2 流体微团运动分析	47
3.2.1 直角坐标系中流体微团的速度分解	47
3.2.2 流体微团的运动和变形	49
3.3 适合于系统的基本方程及雷诺输运定理	53
3.3.1 适合于系统的基本方程	53
3.3.2 雷诺输运定理	53
3.4 连续方程	56
3.5 动量方程	58
3.6 动量矩方程	64
3.7 能量方程	66
3.8 伯努利方程	69
小 结	76
思考与练习题	76
第四章 管道内的黏性流动与管路计算基础	79
4.1 管道中黏性流动的状态	79
4.2 圆管中充分发展的层流流动及沿程损失	82
4.3 圆管中充分发展的湍流流动及沿程损失	86
4.3.1 湍流流动的时均化及湍流度	86
4.3.2 圆管中湍流流动的切应力及速度分布	87

4.3.3 圆管内沿程损失的实验研究	90
4.3.4 压缩性对沿程损失因数的影响	93
4.4 管道内的局部阻力及损失计算	94
4.4.1 局部损失产生的原因及计算	94
4.4.2 减小和利用局部损失	98
4.4.3 流动损失叠加及当量长度法	99
4.4.4 进口起始段内的流动	100
4.5 管路设计与计算基础	101
4.5.1 串联管路的计算	102
4.5.2 并联管路的计算	104
4.5.3 管网计算基础	105
小 结	106
思考与练习题	107
第五章 滞止参数与气动函数	109
5.1 微扰动的传播及马赫数	109
5.1.1 微扰动的传播	109
5.1.2 声速	109
5.1.3 马赫数	111
5.2 几个气流的参考参数	112
5.2.1 气流的滞止参数	112
5.2.2 关于总压的讨论	115
5.2.3 极限速度和临界参数	119
5.2.4 速度因数	121
5.3 气体动力学函数及其应用	123
5.3.1 气动函数 $\tau(\lambda), \pi(\lambda), \epsilon(\lambda)$	123
5.3.2 流量函数 $q(\lambda), y(\lambda)$	124
5.3.3 冲量函数 $z(\lambda), f(\lambda), r(\lambda)$	128
小 结	132
思考与练习题	133
第六章 膨胀波与激波	135
6.1 微扰动在气流中的传播及马赫锥	135
6.2 膨胀波的形成及普朗特-迈耶流动	137
6.2.1 膨胀波的形成及特点	137
6.2.2 膨胀波的计算	138
6.3 膨胀波相交与反射	142

6.3.1	膨胀波在固体壁面上的反射与消波	142
6.3.2	膨胀波的相交	143
6.3.3	膨胀波在自由边界上的反射	143
6.3.4	膨胀波与压缩波的相交	144
6.4	激波的形成及传播速度	145
6.4.1	激波的形成	146
6.4.2	激波的传播速度	147
6.4.3	斜激波的形成	149
6.5	激波计算公式	149
6.5.1	激波前、后参数之间的关系	149
6.5.2	基本方程	150
6.5.3	激波计算公式	152
6.5.4	激波曲线和激波表	156
6.6	激波的相交与反射	159
6.6.1	激波在固体直壁上的反射	160
6.6.2	异侧激波相交	160
6.6.3	激波在自由边界上的反射	161
6.6.4	同侧斜激波的相交	162
6.7	锥面激波及其数值解	164
6.7.1	锥面激波的特点及与平面斜激波的比较	164
6.7.2	锥形流场数值计算方法	166
6.8	激波在超声速进气道及飞行器设计中的应用	170
6.8.1	激波与膨胀波的组合	170
6.8.2	超声速进气道的激波系	170
6.8.3	激波在乘波构形中的应用	173
小 结		174
思考与练习题		174
第七章	一维定常可压缩管内流动	178
7.1	理想气体在变截面管道中的流动	178
7.2	收缩喷管	182
7.3	拉伐尔喷管	187
7.4	内压式超声速进气道及其他变截面管流	196
7.4.1	内压式超声速进气道	196
7.4.2	其他变截面管流	202
7.5	等截面摩擦管流	204
7.6	气体在有热交换的管道内的流动	210

7.7 变流量加质管流	217
小 结	221
思考与练习题	222
第八章 理想流体多维流动基础	224
8.1 有旋流动	224
8.1.1 涡量、涡线、涡面和涡管	224
8.1.2 速度环量	225
8.1.3 速度环量与旋涡强度的关系	226
8.2 无旋流动和速度势	226
8.3 微分形式的连续方程	228
8.4 欧拉运动微分方程及其积分	230
8.4.1 微分形式的动量方程——欧拉运动微分方程	230
8.4.2 欧拉运动微分方程的积分	232
8.5 其他形式的运动微分方程	234
8.5.1 葛罗米柯方程	234
8.5.2 克罗克运动方程	235
8.5.3 速度势方程	237
8.5.4 二维定常流动中的流函数和流函数方程	238
8.6 微分形式的能量方程	243
8.6.1 一般形式的能量方程	243
8.6.2 其他形式的能量方程	244
8.7 可压缩理想流体动力学基本方程组	245
8.8 理想流体的初始条件与边界条件	246
8.9 凯尔文定理(汤姆逊定理)	247
小 结	248
思考与练习题	249
第九章 不可压缩流体的平面势流	250
9.1 不可压势流的势函数方程和流函数方程	250
9.2 平面势流叠加原理和几种简单的平面定常势流	251
9.2.1 势流叠加原理	251
9.2.2 均匀直线流动	252
9.2.3 点源和点汇	252
9.2.4 点涡(有势涡)	253
9.3 几种简单平面势流的叠加势流	254
9.3.1 螺旋流(点源或点汇+点涡)	254

9.3.2 偶极流(点源+点汇).....	254
9.4 不带环量的圆柱绕流(均匀直线流+偶极流).....	256
9.5 带环量的圆柱绕流和儒科夫斯基升力定理	258
小 结.....	259
思考与练习题.....	260
第十章 黏性流体动力学基础	261
10.1 微分形式的动量方程——N-S方程	261
10.2 微分形式的能量方程.....	265
10.3 初始条件和边界条件.....	267
10.4 雷诺方程和雷诺应力.....	269
10.4.1 常用的时均运算关系式.....	269
10.4.2 湍流运动的连续方程.....	271
10.4.3 雷诺方程.....	271
10.4.4 雷诺应力.....	272
10.4.5 普朗特混合长度理论.....	274
10.5 附面层基本知识.....	275
10.5.1 附面层的概念.....	275
10.5.2 附面层的转捩.....	277
10.6 附面层微分方程.....	278
10.6.1 层流附面层微分方程.....	278
10.6.2 湍流附面层微分方程.....	279
10.7 附面层积分方程.....	280
10.7.1 附面层的动量积分方程.....	280
10.7.2 速度分布应满足的边界条件.....	282
10.7.3 平板不可压层流附面层计算.....	283
10.7.4 光滑平板不可压湍流附面层计算.....	285
10.7.5 光滑平板混合附面层计算.....	286
10.8 附面层分离与控制.....	287
10.8.1 附面层分离.....	287
10.8.2 附面层控制.....	288
小 结.....	289
思考与练习题.....	289
第十一章 相似原理及量纲分析	291
11.1 相似原理.....	291
11.1.1 相似概念.....	291

11.1.2 相似原理·····	293
11.2 量纲分析法及 Π 定理的应用 ·····	295
11.2.1 量纲基本知识·····	295
11.2.2 量纲分析法——瑞利 (Rayleigh) 法 ·····	295
11.2.3 Π 定理·····	297
11.3 方程分析法·····	299
11.4 模型实验·····	300
11.4.1 全面力学相似·····	300
11.4.2 近似模化法·····	301
11.4.3 实验研究的基本要点·····	301
小 结·····	302
第十二章 高超声速流动的特殊问题 ·····	303
12.1 高超声速流动的基本特征·····	303
12.2 高超声速流动中的激波关系式及流场性质·····	307
12.2.1 平面斜激波前后参数的简化关系式·····	307
12.2.2 正激波前后参数关系式·····	309
12.2.3 高超声速小扰动情况·····	309
12.2.4 马赫数无关原理·····	311
12.3 高超声速流动中的气动力和气动热·····	313
12.3.1 高超声速流动中的气动力·····	313
12.3.2 高超声速飞行器的气动加热和热防护·····	315
思考与练习题·····	317
附 录 各种数值表 ·····	318
表 1 国际标准大气表 ·····	318
表 2(a) 一维等熵流气动函数表($k=1.40$) ·····	319
表 2(b) 一维等熵流气动函数表($k=1.33$) ·····	325
表 3 普朗特-迈耶函数表 ·····	331
表 4 正激波表 ·····	333
表 5 斜激波前后气流参数表 ·····	338
表 6 有摩擦的等截面直管道中绝热流动的数值表 ·····	348
表 7 几种常见平面相对于其几何中心 C 的惯性矩 J_C ·····	350
参考文献 ·····	351

绪 论

流体(气体和液体)动力学在现代科学技术中起着越来越重要的作用。无论在航空、航天、航海,还是在机械、建筑、化工、气象、海洋、生物工程和民用工程等各个领域都会涉及流体。特别是在流体机械中的应用更为广泛,例如吸气式发动机、火箭发动机、燃气轮机、风机和压缩机等都离不开流体。飞行器在大气层中的运动、船舶在海洋中的运动等都与流体息息相关。因此流体力学的内容已经涉及各个领域,它几乎是所有学科和工程技术的基础。

气体动力学的发展可分为四个阶段。

第一阶段——气体动力学的基础阶段:

19 世纪末,在气体动力学的基础发展阶段,是以工程应用背景为基础的研究阶段。该阶段是以蒸汽机和爆炸技术为背景,涉及气流的压缩性。1870 年朗金-雨贡纽导出了激波关系式;1882 年瑞典工程师发明了拉伐尔喷管;之后斯托道拉、普朗特和迈耶先后实验研究了拉伐尔喷管的流动特性。

第二阶段——可压缩流体动力学的发展阶段:

20 世纪初,随着飞机速度的不断提高,气体压缩性的影响变得更为严重,同时激波的研究也逐步成为热点。在该阶段,1908 年普朗特和迈耶提出了激波和膨胀波理论;1910 年瑞利和泰勒研究得出了激波的不可逆性;1933 年泰勒和马科尔提出了圆锥激波的数值解。之后相继出现了小扰动线化方法、特征线法等。这一时期的一系列研究成果由泰勒和马科尔于 1935 年总结为“可压缩流体动力学”,为气体动力学的基础奠定了基础。

第三阶段——气体热力学的发展阶段(20 世纪 30 年代中至 50 年代末):

1935 年召开了讨论关于航空中的高速流动问题的学术大会,表明了流体力学先驱者对高速问题的关注和重视。之后,由于以喷气飞机、涡轮喷气发动机、火箭发动机等为背景的工程问题发展的需求,将空气动力学与热力学相结合。这个时期为气体热力学的发展阶段。其特点是在完全气体假设下的气体动力学理论和实验逐渐成熟。

第四阶段——气体热化学和计算流体力学的发展阶段(20 世纪 50 年代末至今):

为了解决航天飞行器等超声速及高超声速飞行中的气动力和气动热问题,解决高温流动问题,必须将化学热力学、空气动力学、化学动力学及统计物理学等相结合。目前高超声速飞行器的研究仍然是世界各国研究的热点。从 20 世纪 60 年代以来,由于计算机的发展,计算方法和计算流体力学的发展更是突飞猛进,取得了举世瞩目的成就,解决了历史上遗留下来的一些难题,从而进一步研究解决与目前发展相适应的一系列复杂问题,例如湍流问题、非定常问题和磁流体问题等。

本书以流体为研究对象,主要研究流体的基本属性,流体的运动规律以及流体与物体之间

的相互作用;重点突出气体在高速流动条件下的流动特点、运动规律。

本教材的特点是:

(1)所阐述的基本概念、理论、方法等内容紧密结合气体在航空发动机各部件内流动的多种状况,同时也给出了较多有关工程计算的算例。

书中提供了大量的计算、求解气流在航空发动机内流动的例题和习题;有不少例题是作者精心拟定的,有些例题具有重要的工程应用背景,希望通过这些例题能够使读者达到融会贯通的目的。

(2)将多维流动积分形式的基本方程与微分形式的基本方程分开讲解,目的是将难点分散,有利于初学者掌握。

(3)书中的专业术语、符号及文字采用国家标准及规范汉字。例如,对于有量纲的系数称为系数,无量纲的系数称为因数,如“速度系数”改用“速度因数”(见 GB 3101—93);“粘性”改用“黏性”(见《现代汉语词典》第5版,商务印书馆,2005年)等。

第一章 流体的物理属性及流动模型

气体动力学是流体力学的一个分支,是研究气体的基本属性、可压缩气体的运动规律及其与周围物体相互作用的一门科学。按照传统的物质形态划分,气体和液体统称为流体。气体在一定的条件下,例如流速很低(气体速度比当地声速小得多)时,可以忽略其压缩性影响。

本章主要讨论流体的基本物理属性和流动模型。首先介绍连续介质模型;其次讨论流体的基本属性,主要涉及流体的压缩性、输运特性(黏滞性和导热性);最后讨论高温气体的基本属性。这些都是研究气体动力学所必须具备的基本知识。

1.1 连续介质模型

1.1.1 连续性假设

从分子物理学观点来看,任何实际流体都是由大量微小的分子或原子所组成的,而且每个分子都在不断地作无规则的热运动。对于流体运动来说,用微观的研究方法太烦琐。而流体(气体和液体)动力学则是研究流体宏观运动的,所以一般可以不考虑流体的微观结构,而把流体看做连续介质。这就是1753年物理学家欧拉提出来的连续性假设。按照这一假设,流体充满着一个容积时不留任何自由空隙,既没有真空的地方也没有分子的微观运动,即把流体看做是连绵不断的不留任何自由空隙的连续介质。这种假设称之为连续性假设。

连续介质假设带来的最大简化是:我们不必研究大量分子的微观瞬时状态,而只需研究描述流体宏观状态的物理量,如速度、压强和密度等。在连续介质中,可以把这些物理量看做是坐标和时间的连续函数,因此可以充分地应用连续函数和场论等数学工具。

连续性假设在一般的情况下都是合理的。因为气体分子的平均自由行程 l 很小,大约为几十纳米(10^{-8} m),它和所要研究的物体的特征尺寸 L 比较起来是极其微小的。即使用微米(10^{-6} m)的尺度来计量流体的特性,测得的仍然是大量分子统计平均的结果。只有到了地球的外层空间,例如在海拔120~150 km的高度上,空气分子平均自由行程与飞行器的特征尺寸处于同一数量级,即通常认为当 $l/L \geq 0.01$ 时,连续介质模型将不再适用。例如航天器在外层空间运行,由于那里的空气十分稀薄,分子运动的平均自由行程可能达几米以上,这时围绕航天器的流动空气就不能作为连续介质;再如在高真空泵中,气体分子之间的距离与真空泵的结构尺寸是可以相比拟的,这时也不能把气体看成是连续介质。本教材只讨论连续介质基础上的流体动力学问题。