

飞行器动力工程专业系列教材

Fluid Dynamics

# 流体力学

◎ 张堃元 金志光 编著



科学出版社

飞行器  教材

# 流体力学

张堃元 金志光 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

全书共 11 章,第 1~6 章是一般流体力学基础,包括流体的基本物理性质、流体静力学、流体运动学、流体动力学、相似原理、湍流基础和边界层基本概念。第 7~10 章为气体动力学部分,介绍了膨胀波、压缩波、激波理论及解法、一维定常可压缩管流和经典的超声速流场特征线算法。第 11 章介绍了气体动力学在工程中的一些典型的应用案例。

本书以动力类专业的本科生为主要读者对象,也可作为能源、民航、水利、机械、车辆、舰船、石化等专业本科生、研究生和青年科技工作者的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

流体动力学/张堃元,金志光编著. —北京:科学出版社,2017.4

飞行器动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-03-052445-4

I. ①流… II. ①张… ②金… III. ①流体动力学—教材 IV. ①O351.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 056816 号

责任编辑:胡 凯 李涪汁 丁丽丽/责任校对:郑金红

责任印制:张 倩/封面设计:徐 瑞

**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>

**新科印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 4 月第一次印刷 印张:22 1/2

字数:533 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《飞行器动力工程专业系列教材》编委会

主 编: 宣益民

副主编: 宋迎东 张天宏 黄金泉 谭慧俊 崔海涛

编 委: (按姓氏笔画排序)

王 彬 毛军逵 方 磊 吉洪湖 刘小刚

何小民 宋迎东 张天宏 陈 伟 陈 杰

陈茉莉 范育新 周正贵 胡忠志 郭 文

姚 华 崔海涛 韩启祥 葛 宁 温 泉

臧朝平 谭晓茗



# 前 言

流体动力学(含气体动力学)课程是飞行器动力工程专业和其他动力类专业重要的专业基础课。本书使用对象以动力类专业的本科生为主,也可作为能源、民航、水利、机械、车辆、舰船、石化等专业本科生、研究生和青年科技工作者的参考书使用。

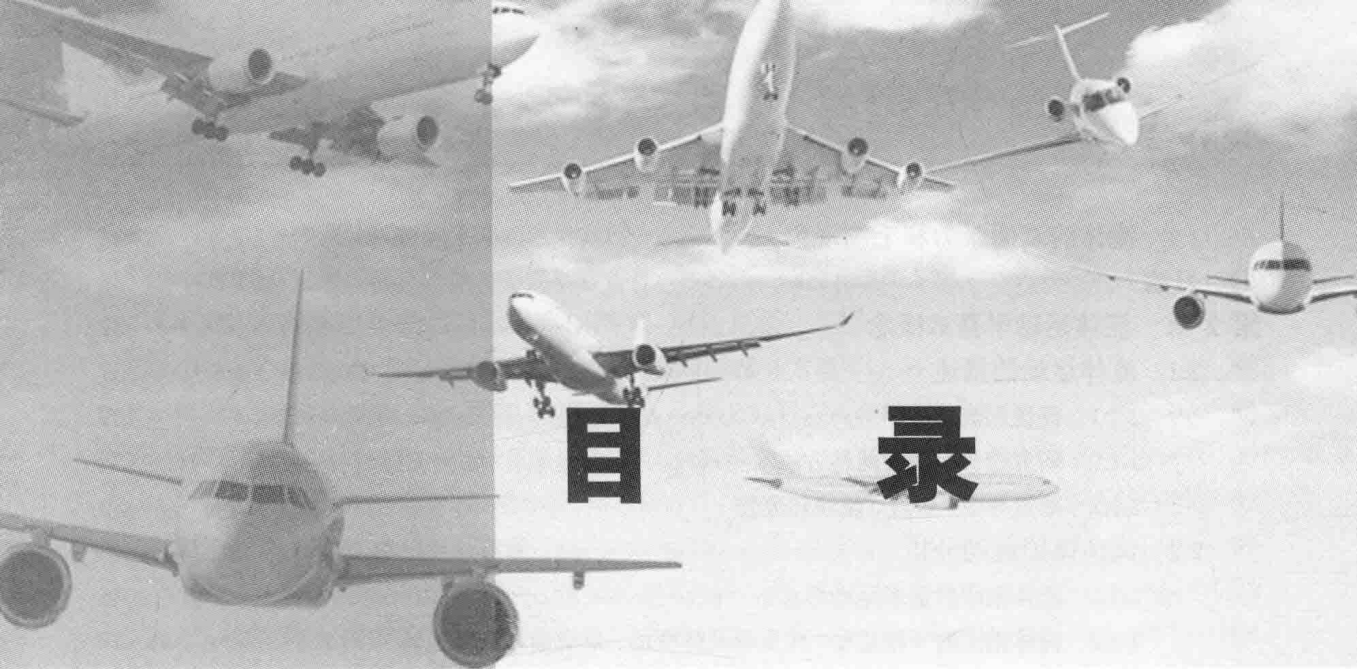
面对国家对飞行器动力的强烈需求,尤其是对创新性高层次人才的迫切需求,本书力求做到深入浅出,物理概念准确、清晰。从提高学生跨学科的综合素质和能力培养方面出发,本书强调基础、强调物理概念的理解、强调理论联系实际、强调知识创新,注意安排各章节的内容深浅和叙述方式,使得新书易于为学生所接受,以加强学生分析、解决实际问题的能力。

本书突出了航空航天和国防特色,例如从气动原理出发介绍进气口、扩压器、尾喷管等基本概念。增加专门章节,介绍流体动力学在工程中的应用实例和设计、使用方法,使新书更好地为培养国防建设和经济建设人才服务。

全书共 11 章,前 6 章包括流体的基本物理性质、流体静力学、流体运动学、流体动力学、相似原理、湍流基础和边界层基本概念,是一般流体力学基础。第 7~10 章涵盖气体动力学的主要部分,以可压缩性为主线,介绍了扰动波、激波概念、各种一维定常管流和经典的流场计算特征线法。第 11 章则介绍了气体动力学的工程应用。

张堃元教授、徐惊雷教授、谭慧俊教授、钟易成副教授、汪明生副教授、金志光副教授参与了本书的编写。其中第 1 章、第 7 章由徐惊雷编写;第 5 章、第 6 章由谭慧俊编写;第 2 章、第 4 章由钟易成编写;第 3 章、第 10 章由汪明生编写;第 11 章由金志光编写;第 8 章、第 9 章由张堃元编写;全书的大部分附图由金志光负责绘制,张堃元负责全书的统稿,统稿中调整和重新改写了部分章节中的内容。全书经河海大学王惠民教授的认真审阅,提出了不少建设性建议,编者在此深表谢意。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,敬请批评、指正。



# 目 录

## 前言

第 1 章 流体的物理性质	1
1.1 流体的力学特征和连续介质假设	1
1.1.1 流体特性及其连续介质假定	1
1.1.2 密度、比容、相对密度和重度	2
1.1.3 流体压缩性、可压流与不可压流	3
1.1.4 黏性、有黏流和无黏流	5
1.2 作用在流体上的力：质量力和表面力	10
1.2.1 作用在流体上的力	10
1.2.2 单位与量纲	10
1.3 欧拉平衡方程和等压面	11
1.3.1 流体静压强及其特性	11
1.3.2 流体平衡微分方程及其积分，等压面	13
1.4 重力作用下大气压强随高度的变化	16
1.4.1 气体等温状态下的平衡规律	17
1.4.2 国际标准大气	17
1.5 静止流体对固体壁面的作用力	18
1.5.1 作用在平面上的总压力	18
1.5.2 流体对曲面的作用力	24
1.6 绝对压强，相对压强，真空度，压强的测量	27
1.6.1 绝对压强，相对压强，真空度	27
1.6.2 压强的测量	28
1.7 流体的输运性质	32
1.7.1 热能输运——热传导现象	32
1.7.2 质量输运——扩散现象	33

1.8	流体的表面张力和毛细现象	34
	习题	35
<b>第 2 章</b>	<b>流体运动学基本概念</b>	<b>37</b>
2.1	流体运动的描述	37
2.1.1	流场和流体微团	37
2.1.2	研究流体运动的两种方法	38
2.1.3	随流导数、迹线、流线和流管	39
2.2	流体微团运动分析	45
2.2.1	流体微团的基本运动形式	46
2.2.2	流体微团的平移运动、线变形及体变形、角变形和旋转运动	47
2.3	流体运动分类	53
2.3.1	定常流和非定常流	53
2.3.2	一维流、二维流、三维流	54
2.3.3	有旋流与无旋流	54
2.3.4	绝热流动、等熵流动和均熵流动	58
2.4	势函数与流函数	58
2.4.1	势函数 $\varphi$	58
2.4.2	平面流的流函数 $\psi$	59
2.4.3	流函数 $\psi$ 的性质	60
2.4.4	势函数方程和流函数方程——拉普拉斯方程	61
2.4.5	等势线和等流函数线的正交性	62
2.5	几种简单平面势流及其叠加势流	63
2.5.1	均直流	63
2.5.2	点源、点汇	64
2.5.3	点涡	64
2.5.4	势流的叠加原理	65
2.5.5	螺旋流和偶极流	66
2.5.6	无环量的圆柱绕流	68
2.5.7	有环量的圆柱绕流——儒科夫斯基升力理论	70
	习题	71
<b>第 3 章</b>	<b>流体动力学基本方程</b>	<b>73</b>
3.1	经典力学的基本定律与雷诺 (Reynolds) 输运定理	73
3.1.1	经典力学的基本定律	73
3.1.2	雷诺输运定理	74
3.2	连续方程	76
3.2.1	用于控制体积的积分形式连续方程	76
3.2.2	微分形式的连续方程	78
3.3	理想流体动量方程	80

3.3.1	控制体积的积分形式动量方程	80
3.3.2	理想无黏流体微分形式动量方程——Euler(欧拉) 运动方程	85
3.4	实际有黏流体动量方程: N-S(纳维-斯托克斯) 方程	86
3.4.1	实际有黏流体的应力和应力形式的运动微分方程	86
3.4.2	N-S(纳维-斯托克斯) 方程组	88
3.4.3	N-S 方程的一个经典解析解——Couette 流动	90
3.5	不可压和可压流伯努利方程	92
3.5.1	不可压流伯努利方程	92
3.5.2	可压流伯努利方程	93
3.6	伯努利方程的应用	94
3.6.1	伯努利方程的扩展	94
3.6.2	伯努利方程的应用举例	95
3.7	动量矩方程	99
3.8	能量方程	102
3.8.1	积分形式的能量方程	102
3.8.2	微分形式的能量方程	106
	习题	106
<b>第 4 章</b>	<b>相似原理</b>	<b>111</b>
4.1	相似现象	113
4.1.1	几何相似	113
4.1.2	运动相似	114
4.1.3	动力相似	115
4.2	相似理论——相似三定理	115
4.2.1	相似第一定理	115
4.2.2	相似第二定理	117
4.2.3	相似第三定理	117
4.3	相似准则的确定	118
4.3.1	方程分析法	118
4.3.2	量纲分析法	120
4.3.3	常用相似准则的物理意义	124
4.4	流体动力学的模型试验研究	125
4.4.1	全面力学相似的模型试验	125
4.4.2	近似相似的模型试验	125
4.4.3	试验研究的基本要点	126
	习题	131
<b>第 5 章</b>	<b>湍流基础与不可压管流损失</b>	<b>133</b>
5.1	层流、湍流和流动损失分类	133
5.1.1	雷诺实验和层流、湍流	133



5.1.2	流态的判别	134
5.1.3	水头损失与流速的关系	136
5.2	湍流基础	137
5.2.1	湍流的一般定义和描述	137
5.2.2	湍流的统计平均和半经验理论	138
5.3	圆管中的流速分布及沿程损失计算	143
5.3.1	充分发展的等直圆管层流流动	143
5.3.2	充分发展的圆管湍流流动	146
5.4	局部损失	154
5.4.1	典型局部损失区域的流动特征及损失计算	154
5.4.2	减少管内局部损失的方法	159
5.4.3	局部损失的利用——迷宫式篦齿封严	160
5.5	管路计算基础	161
5.5.1	同径串联管路	161
5.5.2	异径串联管路	162
5.5.3	并联管路	162
5.5.4	枝状管网系统	163
5.5.5	环状管网系统	163
5.6	湍流射流的基本特性	167
5.6.1	自由沉没射流的结构	168
5.6.2	自由沉没射流的参数分布规律	169
	习题	173
<b>第 6 章</b>	<b>边界层理论基础</b>	<b>176</b>
6.1	边界层理论的历史背景	176
6.2	边界层的基本概念	177
6.2.1	边界层的形成	177
6.2.2	边界层的发展	178
6.2.3	边界层厚度参数的定义和形状因子	179
6.3	边界层微分方程	182
6.4	边界层的动量积分方程	184
6.5	边界层的求解	186
6.5.1	边界层的相似解法	186
6.5.2	边界层的数值解法	187
6.5.3	边界层的近似解法	187
6.5.4	平板边界层近似求解	187
6.6	边界层的分离及控制	191
6.6.1	边界层的分离现象描述	191
6.6.2	分离前后边界层内的速度分布	192

6.6.3	湍流边界层的分离	193
6.6.4	边界层的控制	193
6.7	高超声速流边界层简介	197
	习题	199
<b>第 7 章</b>	<b>气体动力学的基本概念</b>	<b>201</b>
7.1	微弱扰动在气流中的传播	201
7.1.1	声速和马赫数	201
7.1.2	微弱扰动在气流中的传播规律	202
7.1.3	亚声速气流和超声速气流的差别	203
7.2	理想气体流动的基本方程组和边界条件	204
7.2.1	基本方程	204
7.2.2	熵方程和声速方程	205
7.2.3	状态方程	206
7.2.4	气体动力学方程	206
7.2.5	初始条件和边界条件	206
7.3	几个重要的气流参数	207
7.3.1	滞止参数	207
7.3.2	极限速度	210
7.3.3	临界参数	210
7.3.4	速度系数	211
7.4	气体动力学函数及其应用	212
7.4.1	函数 $\tau$ 、 $\pi$ 、 $\epsilon$	213
7.4.2	流量函数	214
7.4.3	冲量函数	216
	习题	220
<b>第 8 章</b>	<b>膨胀波、压缩波和激波</b>	<b>221</b>
8.1	超声速气流中的扰动波	221
8.2	膨胀波、压缩波的形成及其特点	222
8.2.1	几何边界产生的膨胀波	222
8.2.2	压力边界产生的膨胀波	223
8.2.3	等熵压缩波	224
8.3	普朗特-梅耶 (Prandtl-Meyer) 膨胀波的计算	224
8.4	膨胀波的反射和相交	228
8.4.1	膨胀波在固体壁面上的反射	229
8.4.2	异族膨胀波的相交	230
8.4.3	膨胀波在自由边界上的反射	232
8.4.4	膨胀波和压缩波的相交	233
8.5	激波的形成和正激波	235

8.5.1	激波的形成	235
8.5.2	激波的分类	236
8.5.3	正激波的计算	236
8.6	斜激波前后参数的计算	240
8.6.1	斜激波和正激波的关系	240
8.6.2	斜激波的激波角 $\beta$ 和气动参数计算	241
8.7	激波的反射和相交	243
8.7.1	斜激波在固体壁面上的反射	244
8.7.2	斜激波在自由边界上的反射	244
8.7.3	异族斜激波的相交	246
8.7.4	同族斜激波的相交	247
8.8	锥形激波	249
8.8.1	锥形激波的特点	250
8.8.2	锥形激波气动参数的计算	251
	习题	252
<b>第 9 章</b>	<b>一维定常可压缩管流</b>	<b>256</b>
9.1	变截面管流	256
9.1.1	截面变化对气流参数的影响	257
9.1.2	喷管和扩压器	259
9.2	收缩喷管	260
9.2.1	喷管出口流速 $V_e$ 及临界压强比 $\beta_{cr}$	260
9.2.2	收缩喷管三种流态 (亚临界、临界、超临界)	262
9.2.3	收缩喷管流动壅塞状态	265
9.3	拉瓦尔 (Laval) 喷管	266
9.3.1	拉瓦尔喷管等熵流面积比与马赫数的关系	266
9.3.2	压强比对拉瓦尔喷管流动的影响	267
9.4	等截面摩擦管流	273
9.4.1	摩擦对等截面管流气流参数的影响	274
9.4.2	摩擦管流气流参数的计算	275
9.4.3	摩擦壅塞	279
9.4.4	反压对摩擦管流影响	280
9.5	等截面换热管流	281
9.5.1	换热对气流参数的影响	281
9.5.2	换热管流气流参数计算	283
9.5.3	加热壅塞	285
9.5.4	反压对加热管流的影响	285
9.5.5	冷凝波	286
9.6	变流量管流	287

9.6.1	变流量管流基本方程	287
9.6.2	流量变化对气流参数的影响	288
9.6.3	变流量超声速喷管	288
9.6.4	垂直于主流的变质量流	289
习题		292
<b>第 10 章</b>	<b>二维定常超声速流特征线法与基本概念</b>	<b>295</b>
10.1	特征线理论的引入	295
10.1.1	气体动力学中特征线的物理背景	295
10.1.2	数学上的特征线概念	296
10.2	特征线理论基础	297
10.2.1	气体动力学中常用的拟线性偏微分方程	297
10.2.2	气体动力学常用的拟线性偏微分方程一般形式	298
10.3	二维定常无旋超声速气流的特征线法	299
10.3.1	控制方程	299
10.3.2	特征线方程	300
10.3.3	相容方程	301
10.4	二维定常平面有旋超声速气流的特征线法	305
10.4.1	基本方程	305
10.4.2	二维定常平面有旋超声速气流的特征线	306
10.5	二维定常无旋超声速气流特征线法的数值计算	308
10.5.1	用特征线法计算流程的基本思路	308
10.5.2	典型单元过程	310
习题		317
<b>第 11 章</b>	<b>气体动力学的某些工程应用</b>	<b>319</b>
11.1	流场静压强 (简称静压) 测量	319
11.1.1	壁面静压测量	319
11.1.2	空间静压探针测量	320
11.2	流场总压测量	322
11.3	气流方向测量	323
11.3.1	低速气流方向测量	323
11.3.2	热线风速仪测量气流速度与方向	325
11.4	孔板流量计、文丘里管流量计及米字耙测流量	327
11.4.1	孔板 (orifice plate) 流量计	327
11.4.2	文丘里管 (Venturi tube) 流量计	328
11.4.3	“米”字耙测流量	330
11.5	风洞	331
11.5.1	低速风洞	331
11.5.2	跨声速风洞	332

11.5.3 高超声速风洞	332
11.6 进气道	334
11.6.1 亚声速进气道	334
11.6.2 超声速进气道	334
11.7 引射器	337
11.8 尾喷管	338
11.9 气动激光窗	339
11.10 航空发动机试车台	340
11.10.1 地面试车台	341
11.10.2 高空试车台	341
11.10.3 飞行试车台	342
11.11 超燃冲压发动机地面自由射流试验台	342
习题	343
主要参考文献	345



# 第1章

# 流体的物理性质

## 1.1 流体的力学特征和连续介质假设

流体力学的研究对象是流体。那什么是流体? 简言之, 在外力作用下可以流动的物质就是流体。通常情况下, 流体是液体和气体的总称。本节主要叙述流体的物理性质, 它和固体的物理性质有许多不同之处, 例如, 流体可以随其容器形状的不同而改变其形状; 流体一般都比固体容易压缩, 流体有抵抗角变形的性质, 这种性质称为黏性。这些都是流体重要的物理性质, 将在以后有关章节中进行讨论。

### 1.1.1 流体特性及其连续介质假定

流体是相对于固体而言易于流动的物质。它和固体的主要区别在于其分子间的内聚力很小, 所以在任何微小的剪应力作用下都能产生持续不断的变形。

流体是液体和气体的总称, 可以随其容器形状的不同而改变自身形状。液体和气体的区别是: 液体在相当大的外力作用下, 几乎不改变其原有的体积, 故通常称为不可压缩流体。液体与其他流体形成的分界面称为自由表面。气体则具有很大的压缩性和膨胀性, 如果对气体施加外力(压力), 则其体积很容易缩小, 反之, 如果外力无限减小, 则气体可无限地膨胀, 充满容纳它的空间, 所以它没有自由表面, 故通常称为可压缩流体。但是流体的可压缩性与不可压缩性都是相对于具体情况而言的, 并不是所有液体在任何情况下都可以作为不可压缩流体来看待, 亦不是所有气体都必须作为可压缩流体来处理。例如当研究水击现象时, 则需要考虑其压缩性, 而气体在低速流动时(在第7章要叙述的马赫数  $Ma < 0.3$  时), 则可认为它服从于不可压缩流体的运动规律。

从物理学可知, 一般流体都是由运动着的分子所组成的, 分子之间有一定的间隙。因此, 从微观方面来考虑流体问题, 就需要从分子运动论来研究。但流体力学所研究的不是个别分子的微观运动, 而是从流体的宏观特性, 即大量分子的统计平均特性来考虑, 把流体当作充满于其所占有空间, 其间没有间隙存在的介质, 也就是说, 是把流体作为连续介质来研究的。

根据上面的分析,我们可以引进流体的连续介质模型:流体是由大量的流体质点所组成的,每一个流体质点无间隙地、连续地分布在所占据的空间之中,而且每一个流体质点在任一时刻都具有确定的物理参量(密度、速度、压强、温度等),因此,描述流体运动的这些宏观物理量都可以表示为空间坐标  $(x, y, z)$  与时间  $t$  的连续函数,从而也就可以利用连续函数这个有力的数学工具来进行分析研究。

流体的连续介质假定在绝大多数的流体力学问题中都是适用的,这是因为在通常情况下,任何一个宏观体积中所包含的分子数目都是非常多的。例如,在正常情况下,  $1\text{mm}^3$  的水里含有  $3.3 \times 10^{19}$  个分子,而  $1\text{mm}^3$  的气体中也含有  $2.7 \times 10^{16}$  个分子,因此只要在同一种流体中,任取一微小的体积来看,其特性将是完全相同的。由此可知,从宏观看,把流体作为连续介质来研究是合理的。

当然,流体的连续性假定对某些特殊问题就不再适用了,例如,高空中或实验室的高真空条件下的稀薄气体。如果所研究物体的特征尺度与分子平均自由程相当时,流体力学的连续性假设失效,这就属于稀薄气体的研究范畴。本书只讨论连续介质流体,而不涉及稀薄气体的问题。

### 1.1.2 密度、比容、相对密度和重度

在均质流体中取体积为  $\Delta V$  的流体,其中包含有  $\Delta M$  的质量,则  $\Delta M$  与  $\Delta V$  的比值称为  $\Delta V$  体积的密度,以  $\rho$  表示,即  $\rho = \Delta M / \Delta V$ 。对于均质流体,流体密度为常数。

对于非均质流体,可应用数学中取极限的方法来求得  $\rho$ ,即所谓点密度,亦即当  $\Delta V$  趋于 0 时,  $\Delta M / \Delta V$  比值的极限称为该点的密度:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1-1)$$

因此密度是单位体积内所具有的流体质量。在国际单位制(SI)中,密度的单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

应当指出,上式是点密度的数学定义,从物理上来理解,在连续介质内对某一点取极限时,把这点取得极小但却包含有足够多的分子,使其不失去连续介质的特性而有确定的物理值,这个点称为流体质点。采用上述表达式是利用数学分析的工具来确定流体质点的物理值。

在热力学中已知比容是单位质量流体所占有的体积,所以比容与密度互为倒数,即  $v = 1/\rho$ ,单位是  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

对于液体来说,密度(或比容)随温度不同略有变化,而压强变化对它的影响不大,因此在一般情况下,可近似认为液体的密度是常数。而对于气体来说,则其密度受压强和温度的影响均大。对于完全气体来说,它们之间的关系是:  $pv = RT$ ,或者  $p = \rho RT$ ,式中  $p$  为作用在气体上的绝对压强,压强  $p$  的单位是 Pa,即帕斯卡,简称帕,  $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ ,除了 Pa 以外,还常用 kPa、MPa 等压强单位。 $v$  为比容, $T$  为绝对温度, $R$  为气体常数,对于不同的气体它有不同的值,空气的气体常数  $R$  为  $287.06\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

工程上经常用到相对密度的概念。某液体的相对密度是指该液体的密度与在 1 个大气压下  $4^\circ\text{C}$  水的密度 ( $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ) 之比。某气体的相对密度是指该气体的密度与在 1 个大气压下  $0^\circ\text{C}$  的空气(不含  $\text{CO}_2$ ) 之比。可见,相对密度是一个无量纲量。在工程单位制中还经常用到重度  $\gamma$ ,它与密度的关系为  $\gamma = \rho g$ , $g$  为重力加速度。

按我国国家标准 GB1920—80 规定, 在海拔高度  $H = 0$ , 温度 288.15 K 时的气压  $p = 101\,325\text{ Pa}$  作为一个标准大气压, 它与美国国家标准 USSA—1962 相同, 也与国际标准一致。

### 1.1.3 流体压缩性、可压流与不可压流

当作用在流体上的压强增加时, 流体的体积将减小, 称为流体的压缩性, 常用体积压缩系数  $\beta_p$  来表示。它表示当流体温度保持不变, 每增加一个单位压强时体积  $V$  的相对变化率。由于压强增加, 流体的体积缩小, 故冠以负号:  $\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$ , 它的单位是  $1/\text{Pa}$ 。体积压缩系数的倒数是体积弹性模数  $E_v$ , 即  $E_v = 1/\beta_p = -V dp/dV$ , 它的单位是  $\text{Pa}$ 。

液体的体积压缩系数一般都很小, 或体积弹性模数都非常大, 因此液体的压缩性一般都可以忽略不计。

对于气体来说, 它的密度随压强的变化与热力过程有关, 气体的体积弹性模数随气体状态变化的不同而变化。例如, 在等温压缩过程中:  $pv = \text{const}$ , 微分后得

$$p dv + v dp = 0, \quad dv/v = -dp/p$$

说明等温过程中, 气体比容的相对减小率等于压强的相对增加率, 将此式代入体积弹性模数表达式  $E_v = -\frac{v}{dv} dp$ , 即可得到

$$E_v = \frac{p}{dp} dp = p \quad (1-2)$$

说明气体作等温压缩时, 其体积弹性模数等于作用在气体上的压强。

再比如, 当气体作理想绝热压缩时, 则

$$pv^k = \text{const}$$

式中,  $k$  为气体的绝热指数, 将上式微分后得到

$$pkv^{k-1} dv + v^k dp = 0 \Rightarrow dv/v = (-1/k) dp/p$$

将上式代入  $E_v$  表达式, 可得

$$E_v = \frac{kp}{dp} dp = kp \quad (1-3)$$

可知气体作理想绝热压缩时, 其体积弹性模数等于绝热指数乘以作用在气体上的压强。例如空气在一个标准大气压下进行绝热压缩时:

$$E_v = kp = 1.4 \times 1.013 \times 10^5 = 1.419 \times 10^5 \text{ Pa}$$

而在常温下, 水的体积弹性模数  $E_v = 2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ , 可见气体的体积弹性模数要比液体小得多, 即气体的压缩性比液体要大得多。因为气体状态发生变化, 其密度变化是剧烈的, 因此在一般情况下, 必须考虑气体压缩性影响。以后还会证明,  $dp/d\rho$  等于声速的平方, 所以, 气体的压缩性决定于它的密度和当地声速。

对于气体, 当气体流速变化时, 会引起气体的压强和密度发生变化。在绝能 (无热量和功的交换) 流动中, 当气体以低速流动时, 由于气流速度变化而引起的气体密度的相对变化



量很小,可以把气体看做不可压缩流体来处理;而对高速气流,压缩性的影响就不能忽略,必须按可压缩流体来处理。气体在喷气发动机中的流动,一般都是高速流动。本教材的重点是研究可压缩流动。

由前面可知,流体的压缩性可表述为在外力作用下流体的体积或密度变化而引起流体压强变化的性质。实际流体都有可压缩的性质,相对来说,气体的可压缩性比较大,而液体的可压缩性比较小。

表 1-1 给出了水的一些基本物理性质,从表 1-1 可查得水的体积弹性模数值,将它与式 (1-3) 值比较,可知空气的可压缩性要比水的大得多,其他的气体和液体的情况亦是如此。

表 1-1 水的物理性质

温度/°C	重度 $\gamma$ / ( $\times 10^3 \text{N/m}^3$ )	密度 $\rho$ / ( $\text{kg/m}^3$ )	动力黏度 $\mu$ / ( $\times 10^3 \text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )	运动黏度 $\nu$ / ( $\times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$ )	弹性系数 $E_v$ / ( $\times 10^{-6} \text{N/m}^2$ )	表面张力 $\sigma$ / ( $\text{N/m}$ )
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.075 6
5	9.807	1 000.0	1.518	1.519	2.06	0.074 9
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.074 2
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.073 5
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.072 8
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.072 0
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.071 2
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.069 6
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.067 9
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.066 2
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.064 4
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.062 6
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.060 8
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.058 9

根据流体压缩性影响的大小,可以将流体分为可压缩流体与不可压缩流体两大类。对于大多数流体力学问题来说,因为液体的体积弹性模数很大,压缩性很小,难以被压缩,所以通常情况下可以认为液体是不可压缩流体,例如压强从 101 kPa 增加到 101 MPa 时,水的体积改变量还不到 5%,因此在研究静止液体或流动液体时,通常认为它们是不可压缩的。只有在特殊的情况下,液体才有明显的密度变化,例如研究水中爆破、液压冲击和高压领域等问题时,液体的可压缩性才显示出它的影响(见例 1-1)。

对于气体而言,无论是静止气体或者是运动气体,它的密度随压强和温度的改变而改变,尤其是压强对密度的影响显著,因此气体是可压缩流体。由于描写可压缩流体的运动方程要比不可压缩流体复杂,为了简化流动问题的处理,往往将流速较低的运动气体(速度大致小于 0.3 倍的声速)简化为不可压流体,在允许的精度范围内看作是不可压流体。

**【例 1-1】** 温度 20°C, 一个标准大气压条件下, 在一等截面柱状容器内一米高水柱顶部自由表面上, 分别施加三种不同的压强(均为表压):  $P_1 = 10 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $P_2 = 100 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $P_3 = 1000 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 求该水柱的压缩量分别是多少?