

工程流体力学

(第二版)

归柯庭 汪 军 王秋颖 编



科学出版社

工程流体力学

(第二版)

归柯庭 汪 军 王秋颖 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是工科大学使用的流体力学教材,力求反映“高等教育面向 21 世纪教学改革计划”的成果,与国际发展趋势一致,突出重点、强化基础、联系实际、学以致用,本书主要内容有流体及其物理性质,流体静力学,流体流动特性,流体动力学分析基础,量纲分析与相似原理,不可压缩黏性流体的内部、外部流动和无黏流动,可压缩流体的流动,计算流体力学简介等,每章均附有习题,供读者练习。

本书可供大学工科土建、机械、环境、能源、动力等专业本科学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/归柯庭,汪军,王秋颖编. —2 版. —北京:科学出版社,2015. 2

ISBN 978-7-03-042647-5

I. ①工… II. ①归…②汪…③王… III. ①工程力学-流体力学-高等学校-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 280772 号

责任编辑:王 刚 昌 盛/责任校对:邹慧卿

责任印制:霍 兵/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>

三河市骏志印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 2 月第 二 版 印张:21

2015 年 2 月第十三次印刷 字数:497 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

日月如梭,光阴似箭.转眼间本书出版已十年了.承蒙出版社的鼎力推荐与广大读者的厚爱,本书出版十年来,年年加印,使其拥有大量的读者,不少高校还将其作为研究生入学考试的参考教材,这对我们编者是莫大的鼓舞与鞭策.

虽然流体力学是一门成熟的学科,不像信息、生物类学科那样突飞猛进、日新月异,但近十年来,在其他新兴学科的影响下,也有不少发展变化.将流体力学的最新发展概况呈现给读者,是我们对该教材进行修改再版的初衷之一.初衷之二,就是在这几年的教学实践中,感到虽然本书起点较高,理论系统比较完整,但作为面向工科学生的工程流体力学,工程两字还强调不够,希望能在新版的教材中充实工程应用的实例,使读者加强工程应用的训练,满足工科学生学习的需要.

正是在这两个初衷的驱动下,我们对本书进行了修改.增加了计算流体力学新进展一节,介绍当今流体力学的若干最新研究成果.在工程应用方面,增加了一定数量的例题与习题,特别是例题由原来的 51 个增加到 82 个.通过这些例题,可以使读者一方面巩固所学的知识,另一方面也能熟悉在工程中如何应用这些知识,培养应用基础理论分析问题、解决问题的能力,从而为今后从事工程实践打下基础.

本书的修改再版工作,主要由汪军、王秋颖两位老师完成.其中,汪军完成第 6~10 章的修改,王秋颖完成第 1~5 章的修改,并由归柯庭审核定稿.自本书编写出版至今十年间,汪军、王秋颖两位老师一直在教学一线从事工程流体力学的教学工作,积累了丰富的教学经验,也发现了原教材中的一些问题,纠正这些问题,反映教与学两方面的心得体会,并使书中各物理量的表述都符合国家标准,这也是本书修改再版的第三个初衷.

虽然经过这次修改再版,本书的质量有了较大的提高,但按照东南大学的校训——止于至善,质量的提高永无止境,我们殷切期待广大读者的批评与建议.

归柯庭

2014 年 9 月

第一版前言

流体力学是人类在利用流体过程中逐步创建的一门学科,它的发展始终与人类的生产实践紧密相连.从水利工程中的大坝建设到土建施工中的给水、排水、采暖、通风;从机械工业中的液压传动、润滑冷却到动力工程中的各类热工机械;从金属冶炼中金属的熔融到石化工业中油、气、水的流动;从飞机、导弹在空中的飞行到船舶、潜艇在水中的航行;从海洋中的波浪、潮汐到大气环流,只要涉及流体的流动和流体与固体的相互作用,都离不开流体力学的知识.因此,流体力学在水利、机械、动力、化工、石油、土建、冶金、航空、航海、气象、环境等工程技术中,都有广泛的应用.在这些专业中,都把流体力学作为主干技术基础课程.

长期以来,我国高等教育受计划经济影响,专业划分过细.与此相对应,已有的工科类流体力学教材大多是围绕各专业需要分别编写的,课程体系过分强调为专业服务,对流体力学的基本理论和基本方法介绍不够.随着我国经济体制由计划经济向社会主义市场经济转变,各高校纷纷拓宽专业口径,减少专业设置,加强对学生基本理论的教育和创新能力的培养.本教程正是为适应我国高等教育的这一历史性转变而编写的,力求反映“高等教育面向 21 世纪教学改革计划”的成果,与国际上流体力学的发展趋势一致,做到突出重点、强化基础、联系实际、学以致用.其特点是:

1. 突出流体力学三种基本分析方法(即控制体分析、微分分析、量纲分析)的介绍.让读者通过举一反三,掌握流体力学的基本分析方法和基本理论.

2. 采用知识点互补对比的编排方式.即通过黏流与无黏流、内部流动与外部流动、可压缩流与不可压缩流等内容的对比分析,使读者对各种流态的条件、特点以及流动规律有较深入的了解,为应用这些基本理论分析、解决实际问题打下基础.

3. 将简单的工程应用实例穿插进教学内容.让读者得到分析、计算工程问题的训练,培养工程应用能力.

4. 将应用计算机求解流体力学问题引入教学内容.除专门列出一章简单介绍计算流体力学的方法外,还在其他章节内穿插一些计算机解题框图,使读者受到用计算机求解流体力学问题的基本训练,提高计算机应用能力.

本教程由归柯庭(3,4,6,7章)、汪军(8,9,10章)、王秋颖(1,2,5章)编写,由归柯庭统稿.南京理工大学袁亚雄教授详细审阅了本书并提出了许多宝贵意见,在此深表谢意.

限于编者水平,书中肯定有错误和不妥之处,恳请读者批评指正.

编者

2002年8月

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 流体及其物理性质	1
1.1 流体的定义和特征	1
1.2 流体力学发展简史	2
1.3 流体的连续介质假设	4
1.4 国际单位制	5
1.5 流体的密度	7
1.6 流体的压缩性和膨胀性	9
1.7 流体的黏性.....	12
1.8 液体的表面张力.....	20
习题一	24
第 2 章 流体静力学	27
2.1 作用在流体上的力.....	27
2.2 流体平衡微分方程式.....	30
2.3 流体静力学基本方程式.....	32
2.4 静压强的计量和液柱式测压计.....	37
2.5 在非惯性坐标系中液体的相对平衡.....	42
2.6 静止流体对壁面的压力.....	48
习题二	58
第 3 章 流体流动特性	68
3.1 流场及其描述方法.....	68
3.2 流体流动的描述.....	69
3.3 流体微团的运动分析.....	74
3.4 黏性流体的流动形态.....	81
3.5 流体流动分类.....	83
习题三	86
第 4 章 流体动力学分析基础	89
4.1 系统与控制体.....	89
4.2 雷诺输运定理.....	90
4.3 流体流动的连续性方程.....	92

4.4	理想流体的能量方程	95
4.5	不可压缩理想流体一维流动的伯努利方程及其应用	96
4.6	动量定理	103
4.7	角动量方程	110
4.8	微分形式的守恒方程	115
4.9	定常欧拉运动微分方程的积分求解	129
	习题四	132
第5章	量纲分析与相似原理	139
5.1	量纲分析	139
5.2	相似原理	147
5.3	模型试验	153
5.4	方程分析法	159
	习题五	161
第6章	不可压缩黏性流体的内部流动	164
6.1	流动阻力	164
6.2	圆管内层流	167
6.3	平板间的层流	170
6.4	管内湍流	177
6.5	沿程阻力系数和局部阻力系数	185
6.6	管内流动的能量损失	191
6.7	管路计算	200
	习题六	208
第7章	不可压缩黏性流体的外部流动	212
7.1	边界层	212
7.2	绕平板流动边界层的近似计算	217
7.3	绕曲面流动及边界层的分离	226
7.4	黏性流体绕小圆球的蠕流流动	231
7.5	黏性流体绕流物体的阻力	238
	习题七	241
第8章	不可压缩流体的无黏流动	243
8.1	速度环量	243
8.2	流函数与速度势	248
8.3	基本平面势流	252
8.4	基本平面势流的简单叠加	257
8.5	平行流绕圆柱体的流动	262
	习题八	269
第9章	可压缩流体的流动	270
9.1	音速与马赫数	270

9.2 气体一维定常等熵流动	273
9.3 喷管中的等熵流动	277
9.4 有摩擦的绝热管流	281
9.5 超音速气流的绕流与激波的形成	284
9.6 激波前后气流参数的关系	287
9.7 喷管在非设计工况下的流动	294
习题九	297
第 10 章 计算流体力学简介	298
10.1 离散化方法	298
10.2 流动问题数值求解例	303
10.3 计算流体力学新进展	309
习题答案	313
参考文献	321
中英文术语对照表	322

第 1 章 流体及其物理性质

从生产到生活,流体与我们密切相关.自然界中,从包围着整个地球的大气到江河湖海中的水,都是流体.可以说,人类生活在一个被流体包围着的世界里.流体力学是力学的一个分支,它专门研究流体在静止和运动时的受力情况与运动规律,研究流体在静止和运动时的压强分布、流速变化、流量大小、能量损失以及与固体壁面之间的相互作用力等问题.为了全面、透彻地理解这些流体力学的基本知识,本章首先介绍流体的定义和物理性质以及用于流体力学研究的基本简化假设,包括流体的三大特性——易流动性,可压缩性和黏性;流体的连续介质假设;气液相接触时的表面特性等.

1.1 流体的定义和特征

流体是能流动的物质.从其力学特征看,流体是一种受任何微小剪切力作用都能连续变形的物质.只要这种力持续作用,流体就将持续变形,直到外力停止作用为止.固体则不同,当受到剪切力作用时,仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形也就不再变化.由此可见,易流动(易变形)性是流体的一大特征.

流体和固体具有上述不同性质是由组成物质的分子结构和分子间的作用力不同造成的.流体分子间的作用力小,分子运动强烈,决定了流体具有易流动、不能保持一定形状的特性.流体本身并没有特定的形状,能够被装进任何形状的容器中,就像风和河流一样,能够自由流动.

流体按其状态不同又可分为液体和气体,如图 1-1 所示.液体和气体除具有上述流体的共同特性外,还具有以下不同特性:

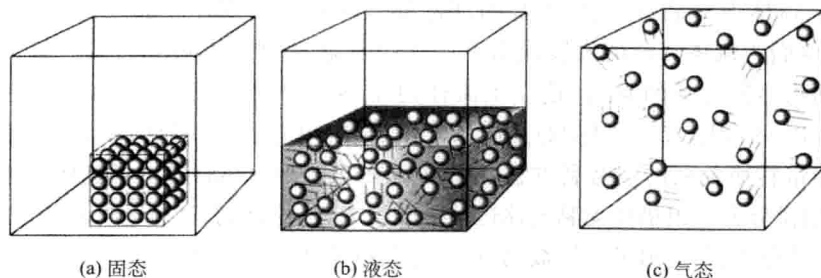


图 1-1 物质的三种形态

(1) 气体的分子间距较大,在 0°C 、1 个标准大气压下,气体的平均分子距约为 $3.3 \times 10^{-9} \text{ m}$,其分子平均直径约为 $2.5 \times 10^{-10} \text{ m}$,分子距比分子平均直径约大十倍,所以

气体分子间的吸引力很小,气体分子可以自由运动,故气体极易变形和流动.此外,气体既没有一定的体积,也没有一定的形状,总是充满容纳它的容器,如图 1-1 (c)所示.

(2)液体的分子间距和分子的有效直径差不多相等,约为气体分子距的 1/10 左右,故分子间的吸引力较大,所以,液体分子不能像气体分子那样自由运动,液体的流动性不如气体.此外,液体具有一定的体积,并取容器的形状.当容器的容积大于液体的体积时,液体不能充满容器,在重力的作用下,液体总保持一个自由表面(液面),如图 1-1 (b)所示.

1.2 流体力学发展简史

和许多其他学科一样,流体力学的发展经历了漫长的岁月.人类最早对流体的认识是从供水、灌溉、航行等方面开始的.远在两三千年前,在同自然界的长期斗争中,人们已经开始建造了水利工程和最简单的水利机械.例如,中国有大禹治水的传说;秦朝李冰父子领导修建了都江堰水利工程,用于防洪和灌溉;隋朝时期开凿了贯通中国南北的大运河.此外,古代还发明了一些简单的水力机械,用作碾米、磨面等.由于没有相应的数学和机械知识,那时关于流体的认识,只是些从实践中总结出来的经验性的东西.然而,正是这些经验的积累,为流体力学的发展奠定了基础.

流体力学的最早文献中记载着阿基米德(Archimedes, 285~212 B. C.),他是古希腊的数学家和发明家,在公元前 250 年发表的《论浮体》中,精确地给出了“阿基米德定律”,从而建立了包括浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的基础.文献中还记载着罗马人在公元前 4 世纪修筑的复杂的供水管道系统.但在其后的 1000 多年中,即在漫长的中世纪,流体力学研究几乎没有新的进展.

15 世纪初,伴随着欧洲的文艺复兴,流体力学研究又一次繁荣兴起.达·芬奇(Da. Vinci, 1452~1519)研究了水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题,并设计建造了一座小型水渠;伽利略(Galileo, 1564~1642)在流体静力学中应用虚位移原理,提出运动物体的阻力随着流体介质密度和速度的增加而增大;帕斯卡(Pascal, 1623~1662)提出了密闭流体能传递压强的帕斯卡原理.

到了 18 世纪,由于欧洲资本主义蓬勃兴起,自然科学的发展突飞猛进,流体力学也有了长足进步.流体力学最基本、最主要的理论都是在这一时期建立起来的,并涌现出一批杰出人物,他们为流体力学的发展做出了巨大的贡献.牛顿(Newton, 1642~1727)研究了流体中运动物体所受到的阻力,建立了流体内摩擦定律,为黏性流体力学奠定了理论基础;伯努利(Bernoulli, 1700~1782)从能量守恒出发,建立了反映流体位势能、压强势能和动能之间能量转换关系的伯努利方程;欧拉(Euler, 1707~1783)提出了流体的连续介质模型,建立了用微分方程组描述无黏流体运动的欧拉方程;拉格朗日(Lagrange, 1736~1813)论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念,为分析流体的平面无旋运动开辟了道路;亥姆霍兹(Helmholtz, 1821~1894)提出了表征旋涡基本性质的旋涡定理等.上述研究是从理论上或数学上研究理想的、无摩擦的流体运动,采用将流体及其受力条件理想化的方法,忽略次要因素,建立描写流体运动的方程式,称为流体动力学(hydrodynamics).

19 世纪,工程师们迫切需要解决带有黏性影响的工程问题.纳维(Navier, 1785~

1836)和斯托克斯(Stokes, 1819~1903)提出了著名的描述黏性流体基本运动的纳维-斯托克斯方程(N-S方程),为流体动力学的发展奠定了基础.然而N-S方程数学复杂,不能满意地解决工程问题,所以人们采取实验先行的办法,对理论不足部分反复实验,总结规律,得到经验公式和半经验公式用于实践,形成了以实验方法来定制经验公式的流体水力学(hydraulics).弗劳德(Froude, 1810~1879)提出了船模试验的相似准则数—— Fr 数,建立了现代船模试验技术的基础;雷诺(Reynolds, 1842~1912)用实验证实了黏性流体的两种流动状态,为流动阻力的研究奠定了基础.

在流体动力学和水力学空前发展的条件下,人们试图将二者结合来解决实际问题.1904年,普朗特(Prandtl, 1875~1953)提出了流体边界层的概念,即在流体接近固体边界的一薄层(边界层)内,摩擦力起主要作用;在边界层以外,流体运动更像无摩擦的理想流体.这个相当简单的概念为形成理论与实践并重的现代流体力学奠定了基础.所以人们称普朗特为现代流体力学之父.

此后,流体动力学和水力学进一步发展,因而更具科学性.一些描述流体运动的基本方程式以及当时验证的一些实验结果至今仍在使用.1933年尼古拉兹(Nikuradze)公布了他对砂粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果——尼古拉兹曲线;科勒布鲁克(Colebrook)1939年提出了过渡区阻力系数计算经验公式;1944年穆迪(Moody)绘制出实用管道阻力系数图——穆迪图.至此,有压管流的水力计算已渐趋成熟.

20世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展.儒科夫斯基(Joukowski, 1847~1921)找到了翼型升力和绕翼型环流之间的关系,为近代高效能飞机设计奠定了基础;卡门(Kármán, 1881~1963)提出了卡门涡街,并在紊流边界层理论、超音速空气动力学、火箭及喷气技术等方面作出了巨大的贡献.同时,以普朗特等为代表的一批科学家,建立了以无黏性流体为基础的机翼理论,阐明机翼受到升力,所以空气能把很重的飞机托上天空.机翼理论的正确性,使无黏性流体的理论被人们重新认识,它的工程设计指导作用也得到了肯定.空气动力学为流体力学在20世纪迅速发展开辟了新的道路.

机翼理论和边界层理论的建立是流体力学发展史上的一次重大飞跃.20世纪40年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,实现了航天飞行;关于炸药或天然气等介质中发生爆炸形成的爆炸波理论,为研究原子弹、炸药等起爆后,激波在空气或水中的传播奠定了基础.

从20世纪50年代起,电子计算机不断完善,计算技术被引入流体力学领域,使以前因计算过于繁杂而影响进一步探讨的流体力学问题逐步得以解决,计算流体力学在今天已成为研究流体力学的重要方法.同时,流体力学与其他学科相互渗透,形成了许多边缘学科,如,生物流体力学、地球流体力学、化学流体力学、液压流体力学、电磁流体力学、高温气体动力学、两相流体力学、流变学等.这些新型学科的出现和发展,使流体力学这一古老学科更富有活力.

从流体力学的发展过程可以看出,它的产生和发展,始终是与生产实践紧密地联系在一起.只要工程中涉及流体的运动及流体和固体的相互作用,就要以流体力学为基础来进行分析和研究,所以在水利工程、机械、动力、化工、石油、建筑、冶金、交通运输、航海、航空、气象、生物、医学等许多领域,流体力学都有广泛的应用.

流体力学既是一门重要的应用技术学科,又有很强的基础学科性质.许多近代科学的重大成就都源于流体力学研究.国家自然科学基金委员会《自然科学学科发展战略调研报告》中指出:“……由流体力学中发现的规律,逐渐渗透到其他科学领域并最终形成具有普遍意义的理论的科学发展道路,今后仍将在整个自然科学的发展中继续起着重要作用”.

1.3 流体的连续介质假设

从微观角度看,流体和其他物质一样,都是由大量分子组成的,分子之间存在着间隙,因此流体并不是连续分布的物质.但是,流体力学所要研究的并不是个别分子的微观运动,而是研究由大量分子组成的流体的宏观运动.

流体的宏观运动由大量分子运动的统计平均值来体现.正因为如此,在流体力学中,取流体质点来代替流体的分子作为研究流体的单元.所谓流体质点,是一块体积为无穷小的微量流体,流体质点虽小,却包含有为数众多的分子,因而它能反映大量分子运动的统计平均值.所以从微观角度看,流体质点应为无穷大.另外,流体质点在宏观上应为无穷小,即与所研究的整个流动空间相比,流体质点应是无穷小,应能通过流体质点及其所属物理量在空间的变化来反映流体的运动.所以流体质点简单来说,就是宏观无穷小、微观无穷大的微量流体.对于流体质点而言,我们假定它们之间没有间隙,在空间连续分布,所以将流体视为由无数连续分布的流体质点所组成的连续介质.这就是流体的连续介质假设.

把流体看成是由连续介质组成的物质,即由微观无穷大、宏观无穷小的流体质点组成的连续介质,流体质点间没有空隙地、连续地充满其所在的空间.这样,只要我们在研究流体运动时所取的质点足够小,但它包含了足够多的分子,就可使各个物理量的统计平均值有意义,我们就可以不去研究无数分子的瞬时状态,而只研究由流体质点代表的描述流体宏观运动的某些属性.此外,将流体视为连续介质来处理,则表征流体宏观属性的物理量(如密度、速度、压强、温度、黏度、应力等)在流体中也是连续变化的.这样,可将流体及其各物理量看成是时间和空间坐标的单值连续可微函数,从而可以利用微分方程等数学工具来研究流体的平衡和运动规律.

例如,我们定义流体密度 $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$, 其中, Δm 是微元体积 ΔV 内的流体质量.这里的

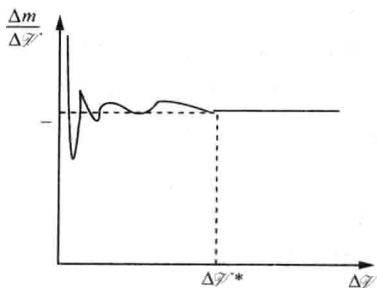


图 1-2 连续介质中任一点的流体密度

$\Delta V \rightarrow 0$ 必须符合流体质点的“微观无穷大、宏观无穷小”的特点.如果 ΔV 太小,会使 ΔV 中的流体质量起伏不定,不能反映物理量的统计平均特性,如图 1-2 所示.实际上,密度定义式中的 $\Delta V \rightarrow 0$ 应换成 $\Delta V \rightarrow \Delta V^*$, 如果低于 ΔV^* , 连续介质假设不再成立.

连续介质假设是流体力学的根本假设之一,我们依据这个假设,才能把微观问题转化为宏观问题来处理.对于大部分工程技术中的流体力学问题,该假设都是适用的.例如,在标准状况下, 1mm^3 的空气中

2.7×10^{16} 个分子,若取 $1 \mu\text{m}$ 作为流体质点的特征尺寸,则在体积为 $1 \mu\text{m}^3$ 的流体质点中,还包含有 2.7×10^7 个空气分子,完全能得到与个别分子运动无关的统计平均值.另外, $1 \mu\text{m}$ 相对于一般工程问题又是一个非常小的量,完全可以将其视为一宏观无穷小量.但对一些特殊问题,该假设不适用.例如,火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及高真空技术中,由于分子间距与有效尺寸到了可以比拟的程度,故必须舍弃宏观的连续介质的研究方法,代之以分子动力论的微观方法.

本书只研究连续介质的运动规律.

1.4 国际单位制

单位,是人为赋予的比较同类物理量大小的符号.

在我们日常生活中,会碰到各种单位制,如英美的尺-磅-秒制(f-p-s制),物理上用的厘米-克-秒制(cm-g-s制)以及工程技术上采用的米-千克(公斤力)-秒制(m-kg-s制)等.随着世界科学技术的迅猛发展,国际交流日益频繁,迫切需要一个可应用于各个领域的统一的单位制,来替代旧的各种单位制.1960年第11届国际计量大会通过了国际单位制(International System of Units),“SI”为其国际符号.它是在米制基础上发展起来的比较完善、科学、实用的单位制,目前绝大多数国家都已宣布采用.1977年我国国务院及教育部都已先后指示应在教材中逐步采用国际单位制.所以本书采用国际单位制.

国际单位制有7个基本单位,如表1-1所示,其他物理量的单位均可由这7个基本单位导出,称为导出单位.例如,速度的单位(m/s)可以用长度的单位(m)除以时间的单位(s);密度的单位 kg/m^3 可以用质量的单位(kg)除以体积单位(m^3).有些SI导出单位具有专门名称.例如,力的单位可按牛顿第二定律 $F=ma$ 导出,因而力可由质量的单位(kg)和加速度单位(m/s^2)的乘积($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)表示,它的专门名称是牛顿,用符号N表示.SI制中常用的工程流体力学单位如表1-2所示.

表 1-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长 度	米	m
质 量	千克[公斤]	kg
时 间	秒	s
电 流	安[培]	A
物质的量	摩[尔]	mol
热力学温度	开[尔文]	K
发光强度	坎[德拉]	cd

表 1-2 常用的工程流体力学单位

量	符号	类别	单位名称	SI		用基本 单位表示
				中文代号	国际代号	
长度	L	基	米	米	m	m
质量	m	本	千克	千克	kg	kg
时间	t	单	秒	秒	s	s
热力学温度	T	位	开尔文	开	K	K
面积	S		平方米	米 ²	m ²	m ²
角度	θ		弧度	弧度	rad	m · m ⁻¹
体积	V		立方米	米 ³	m ³	m ³
流量	Q		立方米每秒	米 ³ /秒	m ³ /s	m ³ · s ⁻¹
速度	V		米每秒	米/秒	m/s	m · s ⁻¹
加速度	a		米每秒平方	米/秒 ²	m/s ²	m · s ⁻²
角速度	ω	导	弧度每秒	弧度/秒	rad/s	rad · s ⁻¹
力	F	出	牛顿	牛	N	m · kg · s ⁻²
压强	p	单	帕斯卡	帕	Pa	m ⁻¹ · kg · s ⁻²
切应力	τ	位	牛顿每平方米	牛/米 ²	N/m ²	m ⁻¹ · kg · s ⁻²
表面张力系数	σ		牛顿每米	牛/米	N/m	kg · s ⁻²
力矩	M		牛顿米	牛 · 米	N · m	m ² · kg · s ⁻²
功(能)	$W(E)$		焦耳	焦	J	m ² · kg · s ⁻²
功率	P		瓦特	瓦	W	m ² · kg · s ⁻³
密度	ρ		千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³	m ⁻³ · kg
动力黏度	μ		帕秒	帕 · 秒	Pa · s	m ⁻¹ · kg · s ⁻¹
运动黏度	ν		平方米每秒	米 ² /秒	m ² /s	m ² · s ⁻¹

在应用 SI 单位制时,在不同的科学领域内,有可能对同一物理量使用的单位尺度相差万千倍,因而允许有些单位在规定的基礎上再增加倍单位和分单位.采用在主单位的符号前加上词冠,组成分单位或倍单位的符号.例如,“mm”表示 10⁻³米,即毫米.SI 制的词冠列于表 1-3.

除国际单位制外,一些过去曾使用过的单位制,在某些地区、某些场合还会继续使用一段时间.表 1-4 列出与国际单位制并用的一些单位.在目前 SI 制还没有完全替代其他单位制的情况下,尤其应注意各种单位制之间的换算,本书中的题解,其单位都用 SI 制表示.

表 1-3 SI 制词冠

因数	词冠	代号		因数	词冠	代号	
		国际	中文			国际	中文
10^{18}	艾克萨(exa)	E	艾	10^{-1}	分(dec)	d	分
10^{15}	拍它(peta)	P	拍	10^{-2}	厘(centi)	c	厘
10^{12}	太拉(tera)	T	太	10^{-3}	毫(mili)	m	毫
10^9	吉(giga)	G	吉	10^{-6}	微(micro)	μ	微
10^6	兆(mega)	M	兆	10^{-9}	纳诺(nano)	n	纳(毫微)
10^3	千(kilo)	k	千	10^{-12}	皮可(pico)	p	皮(微微)
10^2	百(hect)	h	百	10^{-15}	飞母托(femto)	f	飞
10^1	十(deca)	da	十	10^{-18}	阿托(atto)	a	阿

表 1-4 与国际单位制并用的单位

量	单位名称	代号	折合成 SI 制
时间	分	min	=60s
	时	h	=3600s
	日	d	=86 400s
平面角	度	°	$=\frac{\pi}{180}\text{rad}$
	[角]分	'	$=\left(\frac{1}{60}\right)^\circ = \frac{\pi}{10\ 800}\text{rad}$
	[角]秒	"	$=\left(\frac{1}{60}\right)'\ = \frac{\pi}{648\ 000}\text{rad}$
体积(容积)	升	l	$=10^{-3}\text{m}^3$
长度	海里	n mile	=1852m
面积	公顷	hm ²	$=10^4\text{m}^2$
质量	吨	t	$=10^3\text{kg}$

1.5 流体的密度

1.5.1 流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一,它所表征的是流体在空间某点质量的密集程度。若某点的体积为 δV ,其中的流体质量为 δm ,则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1-1)$$

式中, ρ 表示单位体积流体所具有的质量(kg/m^3).

这里 $\delta V \rightarrow 0$, 应从物理上理解为体积缩小为无穷小的流体质点, 从宏观角度看, 该点的体积同整个流场的流体体积相比是完全可以忽略不计的; 但从微观角度看, δV 内必须包含足够多的分子, 而不失去把流体当成连续介质处理的基础.

假如流体是均匀的, 那么流体密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中, m 为流体的质量(kg); V 为流体的体积(m^3).

表 1-5 列出了水、空气和水银三种最常用流体在标准大气压下不同温度时的密度. 表 1-6 列出了在标准大气压下几种常用流体的密度.

表 1-5 不同温度时水、空气和水银的密度 (单位: kg/m^3)

流体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.37
空气	1.292	1.247	1.204	1.127	1.060	1.000	0.946
水银	13 600	13 570	13 550	13 500	13 450	13 400	13 350

表 1-6 常用流体的密度

流体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (kg/m^3)	流体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (kg/m^3)
水	4	1000	氧气	0	1.429
海水	15	1020~1030	氮气	0	1.251
润滑油	15	890~920	氢气	0	0.0899
酒精	15	790~800	烟气	0	1.34
水银	0	13600	二氧化碳	0	1.976
水蒸气	0	0.804	一氧化碳	0	1.25
空气	0	1.292	二氧化硫	0	2.927

1.5.2 流体的相对密度

工程上, 流体的相对密度通常是指某流体的密度与标准大气压下 4°C 时纯水的密度之比, 用 S 表示, 即

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1-3)$$

式中, ρ 为流体的密度(kg/m^3); ρ_w 为 4°C 时纯水的密度(kg/m^3).

例如,水银的相对密度 $S_{\text{Hg}} = 13600/1000 = 13.6$,即水银的质量是同体积水的质量的13.6倍.工程实际中,人们发现这种无量纲数比实际的各种流体密度数值更容易记忆.在以前的教科书上,常将流体的重量与标准大气压下 4°C 时纯水的重量之比,定义为流体的比重.可见,流体的比重与相对密度是同一概念.

1.5.3 流体的比体积

流体密度的倒数称为比体积,即单位质量的流体所占有的体积,用 v 表示.

$$v = 1/\rho \quad (1-4)$$

它的单位为 m^3/kg .

1.5.4 混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算,即

$$\rho = \rho_1\alpha_1 + \rho_2\alpha_2 + \cdots + \rho_n\alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i\alpha_i \quad (1-5)$$

式中, ρ_i 为混合气体中各组分气体的密度; α_i 为混合气体中各组分气体所占的体积百分数.

例 1-1 已经测得锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为 $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.6\%$, $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.4\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 4.2\%$, $\alpha_{\text{N}_2} = 75.6\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 6.2\%$, 试求烟气的密度.

解 由表 1-6 查得在标准状态下 $\rho_{\text{CO}_2} = 1.98\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{SO}_2} = 2.93\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{O}_2} = 1.43\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.25\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804\text{kg}/\text{m}^3$. 将已知数值代入式(1-5), 得烟气在标准状态下的密度.

$$\begin{aligned} \rho &= 1.98 \times 0.136 + 2.93 \times 0.004 + 1.43 \times 0.042 + 1.25 \times 0.756 + 0.804 \times 0.062 \\ &= 1.34 \text{ (kg}/\text{m}^3\text{)} \end{aligned}$$

1.6 流体的压缩性和膨胀性

1.6.1 流体的压缩性

在一定的温度下,流体的体积随压强升高而缩小的性质称为流体的压缩性,如图 1-3 所示.流体压缩性的大小用体积压缩系数 β_p 来表示,它表示当温度保持不变时,单位压强增量所引起的流体体积变化率,即

$$\beta_p = -\frac{1}{\delta p} \frac{\delta V}{V} \quad (1-6)$$

式中, β_p 为流体的体积压缩系数 (m^2/N); δp 为流体压强的增加量 (Pa); V 为流体原有的体积 (m^3); δV 为流体体积的缩小量 (m^3).

由于压强增加时,流体体积减小, δp 与 δV 异号,故在上式右侧加负号,以使体积压缩系数 β_p 永为正值.式(1-6)表明,对于同样的压强增量, β_p 值大的流体,其体积变化率大,