

★ 高等院校“十五”规划教材 ★

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

李文科 编著

工程流体力学

GONGCHENG LIUTI LIXUE

中国科学技术大学出版社

中国工程教育认证协会
CHINESE ASSOCIATION OF ENGINEERING EDUCATION
CAEE

中国工程教育认证协会

工程流体力学

GOH HEE CHENG DI LIU TI LI XUE

中国工程教育认证协会

高等院校“十五”规划教材

工程流体力学

李文科 编著

中国科学技术大学出版社

2007·合肥

内 容 提 要

本书是根据“热能与动力工程专业”和“建筑环境与设备工程专业”《工程流体力学》课程教学大纲的基本要求编写而成。内容包括流体及其物理性质、流体静力学、流体动力学基础、流体的有旋流动和无旋流动、黏性流体的流动阻力与管路计算、黏性流体绕物体的流动、相似原理与因次分析、可压缩流体的流动、紊流射流、喷射器与烟囱等。重点强调对基本概念、基本理论和基本计算方法的理解、掌握和应用。各章中附有大量的例题和习题,便于自主学习。

本书为“热能与动力工程专业”以及“建筑环境与设备工程专业”本科生主干专业基础课程教材,也可作为冶金、机械、化工、环境、仪器仪表类等相关专业的参考教材,以及有关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/李文科编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2007.2
ISBN 978-7-312-02042-1

I. 工… II. 李… III. 工程力学:流体力学-高等学校-教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 012121 号

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮政编码:230026)
中国科学技术大学印刷厂印刷
全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:25.125 字数:611 千
2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷
印数:1—3000 册
定价:38.00 元

前 言

本书是在校级“十五”规划教材《工程流体力学》的基础上,根据“热能与动力工程专业”和“建筑环境与设备工程专业”《工程流体力学》课程教学大纲的基本要求重新编写而成。本书是“热能与动力工程专业”以及“建筑环境与设备工程专业”本科生主干专业基础课程教材,也可作为冶金、机械、化工、环境、仪器仪表类等相关专业的参考教材,以及有关工程技术人员参考书。

本书共分十章,第一章介绍了流体的概念及其物理性质,第二章和第三章主要介绍了流体静力学、流体运动学和流体动力学的基本概念、基础理论和基本的计算方法,着重分析了理想流体三维至一维的欧拉平衡方程、欧拉运动方程、连续性方程、伯努利方程、动量方程和动量矩方程的意义和工程应用。第四章介绍了理想流体的有旋运动和无旋运动,对流体微团运动进行了分析,重点论述了有势流场中流函数和速度势函数的概念和性质,以及有势流动的叠加原理等。第五章重点介绍了黏性流体在管内的流动规律,流动阻力产生的原因和计算方法,流体经孔口和管嘴的流出计算,管路及管路计算等。第六章介绍了黏性流体的绕流运动,主要论述了黏性流体的运动微分方程,附面层的概念和特征、黏性流体绕流平板、圆柱体、圆球体以及不规则形状物体的阻力计算问题。第七章介绍了相似原理和因次分析方法以及模型实验的研究方法。第八章论述了可压缩流体的流动规律,重点分析了可压缩流体的一维等熵流动、摩擦管的绝热流动、摩擦管的等温流动的规律和计算,对激波和膨胀波的概念、形成过程以及气流参量的变化等也做了简要的分析。第九章和第十章分别论述了紊流自由射流、旋转射流以及半限制射流等流场的结构特征和参量的变化规律;喷射器和烟卤的结构、工作原理和设计计算等。

本书的主要特点之一就是循序渐进,深入浅出,通俗易懂。重点强调对基本概念、基本理论和基本计算方法的理解、掌握和应用。同时,题材新颖、系统性强,理论联系实际。每章中附有大量的例题和习题,便于同学们自主学习。

另外,本书在选材上兼顾到“热能与动力工程专业”和“建筑环境与设备工程专业”等各专业不同专业方向对实际内容的不同需求,学习中可根据各自专业的需要对个别章节作适当的取舍。

本书由安徽工业大学热能与动力工程系李文科教授编著,作者的几名研究生参与了文字和插图的整理工作。刘勋赛教授、刘燕春教授以及祝立萍教授等审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。限于水平,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者
2006年8月

目 录

前言	(I)
第一章 流体及其物理性质	(1)
第一节 流体的定义和特征	(1)
第二节 流体作为连续介质的假设	(2)
第三节 流体的密度和重度	(2)
第四节 流体的压缩性和膨胀性	(5)
第五节 流体的黏性及牛顿内摩擦定律	(8)
第六节 液体的表面性质	(16)
习 题	(18)
第二章 流体静力学	(20)
第一节 作用在流体上的力	(20)
第二节 流体的静压力及其特性	(21)
第三节 流体平衡微分方程和等压面	(23)
第四节 流体静力学基本方程	(26)
第五节 绝对压力、相对压力和真空度	(29)
第六节 大气浮力作用下气体的静力学基本方程	(30)
第七节 液柱式测压计原理	(31)
第八节 液体的相对平衡	(35)
第九节 静止液体作用在平面上的总压力及压力中心	(42)
第十节 静止液体作用在曲面上的总压力	(47)
习 题	(49)
第三章 流体动力学基础	(56)
第一节 流体流动的起因	(56)
第二节 流场的特征及分类	(56)
第三节 迹线与流线	(62)
第四节 流管、流束、流量和平均流速	(65)
第五节 流体的连续性方程	(67)
第六节 理想流体的运动微分方程	(72)
第七节 理想流体沿流线的伯努利方程及其应用	(76)
第八节 沿流线非稳定流动的伯努利方程	(81)
第九节 沿流线主法线方向速度和压力的变化	(83)
第十节 动量方程和动量矩方程	(85)
习 题	(91)

第四章 流体的有旋流动和无旋流动	(97)
第一节 流体微团运动的分析	(97)
第二节 涡线、涡管、涡束和旋涡强度	(103)
第三节 平面流与流函数	(106)
第四节 势流与速度势函数	(109)
第五节 几种基本的平面有势流动	(114)
第六节 有势流动的叠加	(119)
习 题	(127)
第五章 黏性流体的流动阻力与管路计算	(130)
第一节 流体的流动状态	(130)
第二节 黏性流体总流的伯努利方程	(132)
第三节 流动阻力的类型	(136)
第四节 圆管内流体的层流流动	(137)
第五节 圆管内流体的紊流流动	(140)
第六节 沿程阻力的计算	(150)
第七节 局部阻力的计算	(158)
第八节 孔口及管嘴流出计算	(162)
第九节 管路计算	(168)
习 题	(175)
第六章 黏性流体绕物体的流动	(184)
第一节 黏性流体的运动微分方程	(184)
第二节 附面层的基本特征	(189)
第三节 层流附面层的微分方程式	(191)
第四节 附面层的动量积分方程式	(192)
第五节 附面层的位移厚度、动量损失厚度和能量损失厚度	(194)
第六节 平板层流附面层的计算	(196)
第七节 平板紊流附面层的近似计算	(203)
第八节 平板混合附面层的近似计算	(206)
第九节 曲面附面层的分离现象	(208)
第十节 黏性流体绕圆柱体的流动	(211)
第十一节 黏性流体绕球体的流动	(215)
习 题	(221)
第七章 相似原理与因次分析	(224)
第一节 概 述	(224)
第二节 相似的概念	(225)
第三节 有因次量和无因次量	(230)
第四节 描述现象的微分方程及单值条件	(234)

第五节 相似三定理·····	(236)
第六节 相似准数的导出·····	(241)
第七节 瑞利因次分析法及伯金汉 π 定理 ·····	(247)
第八节 相似准数的转换·····	(252)
第九节 模型实验研究方法·····	(254)
习 题·····	(260)
第八章 可压缩流体的流动 ·····	(263)
第一节 热力学的基本参量和定律·····	(263)
第二节 弱扰动波传播的物理过程·····	(267)
第三节 弱扰动波在运动流场中的传播特征·····	(268)
第四节 可压缩理想流体一维稳定流动的基本方程·····	(271)
第五节 亚音速流动与超音速流动的差异·····	(276)
第六节 完全气体的一维等熵流动·····	(279)
第七节 可压缩流体经收缩形喷管的流动特征·····	(289)
第八节 喷管的计算·····	(291)
第九节 激 波·····	(298)
第十节 膨胀波·····	(310)
第十一节 激波及膨胀波的反射和相交·····	(313)
第十二节 可压缩流体经拉瓦尔喷管的流动特征·····	(317)
第十三节 等截面有摩擦绝热管道中流体的流动·····	(319)
第十四节 等截面无摩擦非绝热管道中流体的流动·····	(327)
第十五节 等截面有摩擦非绝热管道中流体的等温流动·····	(332)
习 题·····	(337)
第九章 紊流射流 ·····	(340)
第一节 自由射流·····	(340)
第二节 温差射流和浓差射流·····	(349)
第三节 旋转射流·····	(355)
第四节 半限制射流·····	(361)
第五节 环状射流与同心射流·····	(364)
第六节 超音速射流·····	(366)
习 题·····	(369)
第十章 喷射器与烟囱 ·····	(371)
第一节 喷射器·····	(371)
第二节 烟 囱·····	(379)
习 题·····	(387)
习题参考答案 ·····	(388)

第一章 流体及其物理性质

第一节 流体的定义和特征

物质存在的形态有三种:固体、液体和气体,我们通常把能够流动的液体和气体统称为流体。从力学角度来说,流体在受到微小的剪切力作用时,将连续不断地发生变形(即流动),直到剪切力的作用消失为止。所以,流体可以这样来定义:在任何微小剪切力作用下就能够连续变形的物质叫做流体。

流体和固体由于分子结构和分子间的作用力不同,因此,它们的性质也不同。在相同体积的固体和流体中,流体所含有的分子数目比固体少得多,分子间距就大得多,因此,流体分子间的作用力很小,分子运动强烈,从而决定了流体具有流动性,而且流体也没有固定的形状。

概括起来说,流体与固体相比有以下区别:

(1)固体既能够抵抗法向力——压力和拉力,也能够抵抗切向力。而流体仅能够抵抗压力,不能够承受拉力,不能抵抗拉伸变形。另外,流体即使在微小的切向力作用下,也很容易变形或流动。

(2)在弹性限度内,固体的形变是遵循应变与所作用的应力成正比这一规律(弹性定律)的;而对于流体,则是遵循应变速率与应力成正比的规律。

(3)固体的应变与应力的作用时间无关,只要不超过弹性极限,作用力不变时,固体的变形也就不再变化,当外力去除后,形变也就消失;对于流体,只要有应力作用,它将连续变形(流动),当应力去除后,它也不再能恢复到原来的形状。

液体和气体虽都属于流体,但两者之间也有所不同。液体的分子间距和分子的有效直径相当。当对液体加压时,只要分子间距稍有缩小,分子间的排斥力就会增大,以抵抗外压力。所以液体的分子间距很难缩小,即液体很难被压缩。以致一定质量的液体具有一定的体积。液体的形状取决于容器的形状,并且由于分子间吸引力的作用,液体有力求自己表面积收缩到最小的特性。所以,当容器的容积大于液体的体积时,液体不能充满容器,故在重力的作用下,液体总保持一个自由表面,通常称为水平面。

气体的分子间距比液体的大,在标准状态(0°C , 101325 Pa)下,气体的平均分子间距约为 $3.3 \times 10^{-6}\text{ mm}$,其分子平均直径约为 $2.5 \times 10^{-7}\text{ mm}$ 。分子间距比分子平均直径约大十倍。因此,只有当分子间距缩小得很多时,分子间才会出现排斥力。可见,气体是很容易被压缩的。此外,因气体分子间距与分子平均直径相比很大,以致分子间的吸引力很微小,而分子热运动起决定性作用,所以气体没有一定的形状,也没有固定的体积,它总是能均匀地充满容纳它的容器而形成不了自由表面。

第二节 流体作为连续介质的假设

众所周知,任何流体都是由无数的分子组成的,分子与分子之间具有一定的空隙。这就是说,从微观的角度来看,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宏观流体在外力作用下的机械运动。我们所测量的流体的密度、速度和压力等物理量,正是大量分子宏观效应的结果。因此,在流体力学中,取流体微团来代替流体的分子作为研究流体的基本单元。所谓流体微团是指一块体积为无穷小的微量流体。由于流体微团的尺寸极其微小,故可作为流体质点来看待。这样,流体就可以看成是由无限多的连续分布的流体质点所组成的连续介质。这种对流体的连续性假设是合理的。因为在流体介质中,流体微团虽小,但却包含着为数众多的分子。例如,在标准状态下,1 mm³的气体中含有 2.7×10^{16} 个分子;1 mm³的液体中含有 3×10^{19} 个分子。可见,分子之间的间隙是极其微小的。因此,在研究流体的宏观运动时,可以忽略分子间的空隙,而认为流体是连续介质。

当把流体看作是连续介质以后,表征流体属性的各物理量在流体中也应该是连续分布的(例如流体的密度、速度、压力、温度等物理量在流体中都应是连续分布的)。这样,就可将流体的各物理量看作是空间坐标和时间的连续函数,如密度 $\rho = \rho(x, y, z, \tau)$ 等,从而可以引用连续函数的解析方法等数学工具来研究流体的平衡和运动规律。

把流体作为连续介质来处理,对于大部分工程技术问题都是正确的,但对于某些特殊问题则是不适用的。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,其分子间距与设备尺寸可以比拟,不再可以忽略不计。这时不能再把流体看成是连续介质来研究,而需要运用分子运动论的微观方法来研究。

第三节 流体的密度和重度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度。它表示流体质量在空间分布的密集程度。

对于流体中各点密度相同的均匀流体,其密度为

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

式中: ρ ——流体的密度(kg/m³);

m ——流体的质量(kg);

V ——流体的体积(m³)。

对于各点密度不同的非均匀流体,在流体的空间中某点取包含该点的微小体积 ΔV ,该体积内流体的质量为 Δm ,则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

单位体积流体所具有的重量,即作用在单位体积流体上的重力称为流体的重度。它表

示流体重量在空间分布的密集程度。

均匀流体的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

式中： γ ——流体的重度(N/m^3)；

G ——流体的重量(N)；

V ——流体的体积(m^3)。

对于各点重度不同的非均匀流体,某点的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-4)$$

式中： ΔV ——包含某点的微小体积；

ΔG ——该体积内的流体重量。

在地球的重力场中,流体的密度和流体的重度之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

注意:流体的密度 ρ 与地理位置无关,而流体的重度 γ 由于与重力加速度 g 有关,所以它将随地理位置的变化而变化。

还应该注意,不要把流体的重度和流体的比重混淆起来。在工程上,液体的比重是指液体的密度或重度与标准大气压下 4°C 纯水的密度或重度之比,用 S 表示。即

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1-6)$$

它是一个无因次量。

至于气体的比重,是指某气体的密度或重度与在某给定的压力和温度下空气或氢气的密度或重度之比。它没有统一的规定,必须视给定的条件而定。

流体密度的倒数称作比容,即单位质量的流体所占有的体积,用 v 来表示,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-7)$$

表 1-1 列出了在标准大气压下一一些常用液体的物理性质。表 1-2 列出了一些常用气体在标准状态下的密度和重度值。表 1-3 是在标准大气压下水、空气和水银的密度随温度变化的数值。

表 1-1 标准大气压下常用液体的物理性质

液体种类	温度 t ($^\circ\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	重度 γ (N/m^3)	比重 S	动力黏度 $\mu \times 10^4$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
纯净水	4	1000	9806.65	1.00	15.65
海水	15	1020~1030	10000~10100	1.02~1.03	10.6
20%盐水	20	1149	11268	1.15	—
酒精	15	790~800	7747~7845	0.79~0.80	11.6
苯	20	895	8777	0.90	6.5
四氯化碳	20	1594	15631	1.59	9.7

附录 1-1

液体种类	温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	重度 γ (N/m^3)	比重 S	动力黏度 $\mu \times 10^4$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
氟利昂 12	20	1335	13092	1.34	—
甘油	20	1258	12337	1.26	14900
汽油	15	700~750	6865~7355	0.7~0.75	2.9
煤油	15	790~820	7747~8041	0.79~0.82	19.2
原油	20	850~920	8336~9022	0.85~0.92	72
润滑油	20	890~920	8728~9022	0.89~0.92	—
水银	15	13600	133370	13.60	15.6
熔化生铁	1200~1280	6800~7000	66685~68647	6.8~7.0	—
液氢	-257	72	706	0.072	0.21
液氧	-195	1206	11827	1.206	2.8

表 1-2 标准状态下常用气体的密度和重度

气体种类	密度 ρ (kg/m^3)	重度 γ (N/m^3)	气体种类	密度 ρ (kg/m^3)	重度 γ (N/m^3)
空气	1.293	12.68	二氧化碳	1.976	19.40
氧气	1.429	14.02	一氧化碳	1.250	12.27
氮气	1.251	12.28	氦	0.179	1.75
氢气	0.0899	0.881	氩	1.783	17.49
甲烷	0.716	7.02	饱和水蒸气*	0.804	7.88

*为便于计算,水蒸气的数值已推算到 0°C 时的数值。

表 1-3 不同温度下水、空气和水银的密度 (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	958.38
空气	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.9465
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

我们经常见到的煤气和烟气等都是混合气体,混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数来计算,即

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-8)$$

式中: $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——混合气体中各组分气体的密度;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ ——混合气体中各组分气体所占的体积百分数。

例 1-1 某烟气成分为 $\alpha_{\text{CO}_2} = 12.8\%$, $\alpha_{\text{CO}} = 9.4\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 3.6\%$, $\alpha_{\text{N}_2} = 69.8\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 4.4\%$, 试求标准状态下烟气的密度。

解 由表 1-2 查得标准状态下烟气各组分的密度分别为 $\rho_{\text{CO}_2} = 1.976 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{CO}} = 1.250 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{O}_2} = 1.429 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.251 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804 \text{ kg/m}^3$, 将已知数值代入式(1-8)得烟气密度为

$$\begin{aligned}\rho &= 1.976 \times 12.8\% + 1.250 \times 9.4\% + 1.429 \times 3.6\% + 1.251 \times 69.8\% + 0.804 \times 4.4\% \\ &= 1.33 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

第四节 流体的压缩性和膨胀性

一、流体的压缩性

在一定的温度下,流体的体积随压力升高而缩小的性质称为流体的压缩性。流体压缩性的大小用体积压缩系数 β_p 表示。它表示当温度保持不变时,单位压力增量所引起的流体体积的相对缩小量,即

$$\beta_p = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-9)$$

式中: β_p ——流体的体积压缩系数(m^2/N);

dp ——流体的压力增量(Pa);

dV/V ——流体体积的相对变化量;

$d\rho/\rho$ ——流体密度的相对变化量。

由于压力增加时,流体的体积缩小,即 dp 与 dV 的变化方向相反。故在上式中加一负号,以使体积压缩系数 β_p 保持正值。

液体的体积压缩系数都很小。表 1-4 列出了 0°C 时水在不同压力下的 β_p 值。

表 1-4 0°C 时水在不同压力下的 β_p 值

压力(10^5 Pa)	4.90	9.81	19.61	39.23	78.45
压缩系数 β_p ($10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$)	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数,或称体积弹性模量,用 E 表示,即

$$E = \frac{1}{\beta_p} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-10)$$

工程上常用体积弹性系数来衡量流体压缩性的大小。式(1-10)表明,对于同样的压力增量, E 值小的流体,其体积变化率大,较易压缩; E 值大的流体,其体积变化率小,较难压缩。 E 的单位与压力相同,为帕或牛/米²。

二、流体的膨胀性

在一定的压力下,流体的体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。流体膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_T 来表示,它表示当压力保持不变时,温度升高 1 K 所引起的流

体体积的相对增加量。即

$$\beta_T = \frac{dV/V}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-11)$$

式中: β_T ——流体的体积膨胀系数, 也称温度膨胀系数或热膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$);

dT ——流体温度的增加量 (K)。

其他符号同前。由于温度升高, 流体的体积膨胀, 故 dT 与 dV 同号。

液体的体积膨胀系数也很小。表 1-5 列出了在一定压力作用下水的体积膨胀系数与温度的关系。

表 1-5 水的体积膨胀系数 β_T ($1/\text{K}$)

压 力 (MPa)	温 度 (K)				
	274~283	283~293	313~323	333~343	363~373
0.0981	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
9.807	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
19.61	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	—
49.03	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
88.26	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

流体的体积膨胀系数 β_T 还决定于压力。对于大多数液体, β_T 随压力的增加稍有减小。但水的 β_T 值在 50°C 以下时, 随压力的增加而增大, 在 50°C 以上时, 也是随压力的增加而减小。

三、理想气体状态方程

气体的压缩性和膨胀性要比液体大得多。这是由于气体的密度随温度和压力的改变将发生显著的变化。对于理想气体, 其密度与温度和压力之间的关系可用理想气体状态方程式来表示, 即

$$pv = RT \quad (1-12a)$$

或写成

$$p = \rho RT \quad (1-12b)$$

式中: p ——气体的绝对压力 (Pa);

v ——气体的比容 (m^3/kg);

R ——气体常数 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$);

T ——热力学温度 (K), $T = t^\circ\text{C} + 273$;

ρ ——气体的密度 (kg/m^3)。

状态方程说明, 气体的密度同绝对压力成正比, 而同热力学温度成反比。

当气体在运动过程中压力变化不大时, 其绝对压力可视为常数, 此时, 气体的密度可按等压过程来计算。由 $\rho_0 T_0 = \rho_t T$ 得

$$\rho_t = \frac{\rho_0 T_0}{T} = \frac{\rho_0 T_0}{T_0 + t} = \frac{\rho_0}{1 + \frac{t}{T_0}} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (1-13)$$

式中: ρ_0 ——温度为 0°C 时气体的密度 (kg/m^3);

ρ_t ——温度为 t °C 时气体的密度 (kg/m^3);

T_0, T ——分别为 0 °C 和 t °C 时的热力学温度 (K);

β ——气体的体积膨胀系数, $1/273(1/\text{K})$ 。

同理可以得到气体的体积在等压过程中随温度的变化关系式为

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (1-14)$$

式中: V_t ——温度为 t °C 时的气体的体积 (m^3);

V_0 ——温度为 0 °C 时的气体的体积 (m^3)。

例 1-2 体积为 5 m^3 的水, 在温度不变的情况下, 压力从 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 增加到 $4.9 \times 10^5 \text{ Pa}$, 体积减小了 10^{-3} m^3 , 求水的体积弹性系数。

解 将上述实测数据代入式 (1-10), 可得

$$E = -\frac{V dp}{dV} = -\frac{5 \times (4.9 - 0.98) \times 10^5}{-10^{-3}} = 1.96 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^2$$

例 1-3 某膨胀水箱内的水温升高了 50 °C, 体积增大了 0.2 m^3 , 求水箱内原有水的体积 (水的体积膨胀系数为 $0.0004/^\circ\text{C}$)。

解 由式 (1-11) $\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$

$$\text{则} \quad V = \frac{dV}{\beta_T dT} = \frac{0.2}{0.0004 \times 50} = 10 \text{ m}^3$$

四、可压缩流体和不可压缩流体

由上述可知, 压力和温度的变化都会引起流体密度的变化。即任何流体, 不论是气体还是液体都是可以压缩的, 只是可压缩的程度不同而已。这就是说, 流体的压缩性是流体的基本属性。

液体的压缩性都很小, 随着压力和温度的变化, 液体的密度仅有微小的变化, 在工程上的大多数情况下, 可以忽略压缩性的影响, 认为液体的密度不随压力和温度的变化而变化, 是一个常数。于是通常把液体看成是不可压缩流体。例如, 可在通常的压力和温度变化范围内, 取一个标准大气压下 4 °C 时水的最大密度 $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 作为计算值。这样并不影响工程上的精度要求, 而且使工程计算大为简化。

气体的压缩性都很大, 从热力学中可知, 当温度不变时, 理想气体的体积与压力成反比 (波义耳定律), 压力增加一倍, 其体积减小为原来的一半; 当压力不变时, 气体的体积与热力学温度成正比 (盖·吕萨克定律), 温度升高 1 °C, 气体的体积就比 0 °C 时的体积膨胀 $1/273$ 。所以, 通常把气体看成是可压缩流体, 即它的密度不能作为常数, 而是随压力和温度而变化的。

把液体看作是不可压缩流体, 把气体看作是可压缩流体, 这都不是绝对的。在实际工程中, 要不要考虑流体的压缩性, 要视具体情况而定。例如, 在研究管道中的水击现象 (水击现象是指在有压管流中, 由于某种原因, 流速突然发生变化时, 引起管内液体压力交替升降并在整个管长范围内传播的现象。) 和水下爆炸等问题时, 水的压力变化较大, 而且变化过程非常迅速, 这时水的密度变化就不可忽略, 即要考虑水的压缩性, 把水当作可压缩流体来处理; 又如, 在加热炉或锅炉尾部的烟道和通风管道中, 气体在整个流动过程中, 压力和温度的变化都很小, 其密度变化也很小, 可作为不可压缩流体处理; 再如, 当气体对物体流动的相对速度比音速小得多时, 气体的密度变化很小, 可近似地看成是常数, 也可当作不可压缩流体来

处理。

气体的可压缩性通常用马赫数来度量,马赫数定义为

$$M = \frac{u}{a} \quad (1-15)$$

式中: M ——马赫数,无因次量;

u ——气体的流速(m/s);

a ——在该气体温度下,声音在气体内的传播速度,即当地音速(m/s)。

当 $M < 0.3$ 的情况下,流体的密度变化约在4%以内,因此,对于以 $M < 0.3$ 流动的气体,可按不可压缩流体处理。以空气为例,标准状态下的空气,当 $M = 0.3$ 时,其速度约相当于100 m/s,这就是说,在标准状态下,若空气流速 $u < 100$ m/s,就可以不考虑压缩性的影响。

对于流体的可压缩性,也有人直接采用流体密度的变化率来度量,即当流体在流动过程中,其密度变化小于3%~5%时可作为不可压缩流体来处理,否则,将作为可压缩流体处理。

第五节 流体的黏性及牛顿内摩擦定律

一、流体的黏性和黏性力

所谓流体的黏性是指流体在流动时,流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力,以抵抗其相对运动的性质。自然界中所存在的各种流体内部都有阻碍流体流动的作用,即都具有黏性。但是,不同的流体其黏性的大小是不相同的。流体的黏性是由流体分子之间的内聚力和分子不规则热运动的动量交换综合构成的。流体与不同相的表面接触时,黏性表现为流体分子对表面的附着作用。

由于流体的黏性作用,在流体的流层之间所产生的阻滞其流动的作用力,称为内摩擦力或称黏性力。现通过实验来进一步说明:将两块平板相隔一定的距离水平放置,其间充满某种流体,并使下板固定不动,上板以某一速度 u_0 向右平行移动,如图1-1所示。由于流体与平板间有附着力,紧贴上板的一薄层流体将以速度 u_0 随上板一起向右运动,而紧贴下板的一薄层流体将和下板一样静止不动。两板之间的各流体薄层在上板的带动下均作平行于平板的运动,且其速度均匀地由下板的零变化到上板的 u_0 ,即在这种情况下,板间流体流动的速度是按直线变化的。可见,由于各流层的速度不同,流层间就有相对运动,因而必定产生

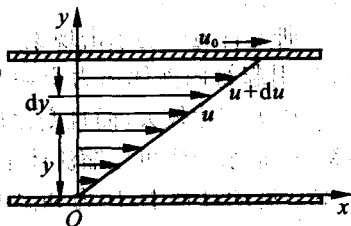


图 1-1 流体黏性实验示意图

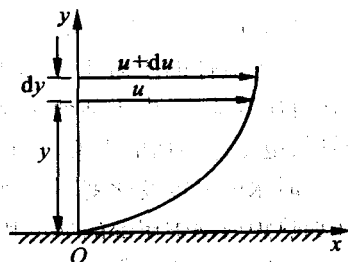


图 1-2 黏性流体的速度分布

切向阻力,即内摩擦力。作用在两个流体层接触面上的内摩擦力总是成对出现的,它们大小相等而方向相反,分别作用在相对运动的两流体层上。速度较大的流体层作用在速度较小的流体层上的内摩擦力 T ,其方向与流体流动的方向相同,使速度较小的流体层加速,而速度较小的流体层作用在速度较大的流体层上的内摩擦力 T' ,其方向与流体流动的方向相反,阻碍流体流动,使速度较大的流体层减速。

应该指出,在一般情况下,流体流动的速度并不按直线的规律变化,而是按曲线规律变化的,如图 1-2 所示。

二、牛顿内摩擦定律

根据牛顿实验研究的结果得知,运动的流体所产生的内摩擦力(即黏性力)的大小与垂直于流动方向的速度梯度成正比,与接触面的面积成正比,并与流体的物理性质有关,而与接触面上压力的关系甚微,这就是牛顿内摩擦定律,也叫牛顿黏性定律,其数学表达式为

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-16)$$

式中: T ——流体层接触面上的内摩擦力(N);

A ——流体层间的接触面积(m^2);

$\frac{du}{dy}$ ——垂直于流动方向上的速度梯度($1/s$);

μ ——与流体的物理性质有关的比例系数,称为动力黏性系数或动力黏度,简称为黏度,有时也称为绝对黏度。在一定的温度和压力下,动力黏度为一常数。它的单位为帕·秒或千克/米·秒、牛·秒/米²。

流体的动力黏性系数 μ 是衡量流体黏性大小的物理量。从式(1-16)可知,当速度梯度 $\frac{du}{dy} = 0$ 时,内摩擦力等于零。所以,当流体处于静止状态或以相同的速度流动(各流层之间没有相对运动)时,流体的黏性就表现不出来。

式(1-16)中所用的正负号的意义是:当速度梯度 $\frac{du}{dy} < 0$ 时取负号;当 $\frac{du}{dy} > 0$ 时取正号,使 T 始终保持为正值。然后根据坐标轴的方向决定 T 值的正负,当 T 的方向与坐标轴的方向相同时则为正,与坐标轴的方向相反时则为负。

流体层之间单位面积上的内摩擦力称为内摩擦切应力或称黏性切应力,用 τ 表示,其表达式为

$$\tau = \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-17)$$

式中符号同上。

在研究流体流动问题和推导流体运动规律的公式时,常常同时存在黏性力和惯性力,黏性力与动力黏度 μ 成正比,而惯性力与流体的密度 ρ 成正比,因此比值 $\frac{\mu}{\rho}$ 经常出现在公式中。为了计算方便起见,常以 ν 来表示其比值,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-18)$$

式中: ν ——称为流体的运动黏性系数或称运动黏度(m^2/s)。