

专业指导委员会推荐教材
高校建筑环境与设备工程学科



普通高等教育土建学科专业
“十五”规划教材

PUTONG
GAODENG
JIAOYU
TU JIAN XUEKE
ZHUANYE
SHIWU
GUIHUA
JIAOCAI

流体力学

龙天渝 主编
蔡增基

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

流 体 力 学

龙天渝 蔡增基 主编

中国建筑工程出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/龙天渝, 蔡增基主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2004

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

ISBN 7-112-06157-1

I. 流… II. ①龙…②蔡… III. 流体力学—高等学校—教材 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 003852 号

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材
高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

流 体 力 学

龙天渝 蔡增基 主编

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 $\frac{1}{4}$ 字数: 452 千字

2004 年 5 月第一版 2004 年 5 月第一次印刷

印数: 1—10000 册 定价: 26.00 元

ISBN 7-112-06157-1

TU·5424 (12170)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书是为全国普通高等学校建筑环境与设备工程专业流体力学课程(80~100学时)编写的教材,是普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材。全书包括流体静力学,一元流体动力学,理想和黏性流体动力学,管流阻力,孔口和管路计算的基本理论,气体射流,相似性原理和因次分析等内容。每章均附有习题,书末有部分习题答案。

本书由浅入深,通俗易懂,注意加强基础理论和能力的培养,力求体系完整,思路清晰,物理概念明确,物理意义透彻。本书不仅可作为建筑环境与设备工程专业本科生教材,而且还可作为土木、环境、动力等有关专业本科生的教材或教学参考书。

* * *

责任编辑:姚荣华

责任设计:崔兰萍

责任校对:王金珠

前 言

本书是为全国普通高等学校建筑环境与设备工程专业流体力学课程（80~100学时）编写的教材，是普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材。本书也可作为土木、环境、动力等专业相应课程的教材或教学参考书。

本书是在原教材《流体力学泵与风机（第四版）》（蔡增基 龙天渝 主编）上篇“流体力学”的基础上修订而成。《流体力学泵与风机》自1979年首版至今已二十多年，在建筑环境与设备工程专业（原供热通风空调工程和燃气工程专业）以及纺织、交通、冶金、陶瓷等专业中广泛使用，对各专业的发展起了积极的作用，为适应目前建筑环境与设备工程专业课程体系的调整，特编写本教材。

本书根据专业的需要，介绍了工程流体力学的基本概念、基本原理、基本方法。书中采用一元流动到三元流动的体系，由浅入深，循序渐进。在编写过程中，作者注意加强基础理论和能力的培养，力求体系完整，思路清晰，通俗易懂，物理概念明确，物理意义透彻。

本书主要采用国际单位制，主要物理量的符号使用国标《量和单位》（GB 3100~3102—93）给出的符号。

由于各院校的学时数不同，要求不完全一样，因此，任课教师可根据具体情况，对某些章节进行取舍。

本书由重庆大学龙天渝、蔡增基主编。编写分工：龙天渝教授编写2、3、7、8章，蔡增基教授编写1、4、10章，西安建筑科技大学陈郁文教授编写5、6、9章。

由于作者水平所限，不妥之处恳请读者及专家批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 作用在流体上的力	1
第二节 流体的主要力学性质	3
第三节 流体的力学模型	11
习题	12
第二章 流体静力学	14
第一节 流体静压强及其特性	14
第二节 流体静压强的分布规律	16
第三节 压强的计算基准和量度单位	21
第四节 液柱测压计	24
第五节 作用于平面的液体压力	27
第六节 作用于曲面的液体压力	31
第七节 流体平衡微分方程	35
第八节 液体的相对平衡	38
习题	44
第三章 一元流体动力学基础	51
第一节 描述流体运动的两种方法	51
第二节 恒定流动和非恒定流动	52
第三节 流线和迹线	53
第四节 一元流动模型	54
第五节 连续性方程	56
第六节 恒定元流能量方程	58
第七节 过流断面的压强分布	61
第八节 恒定总流能量方程式	64
第九节 能量方程的应用	67
第十节 总水头线和测压管水头线	71
第十一节 恒定气流能量方程式	74
第十二节 总压线和全压线	77
第十三节 恒定流动量方程	80
习题	84
第四章 流动阻力和能量损失	90
第一节 沿程损失和局部损失	90
第二节 层流与紊流、雷诺数	91

第三节	圆管中的层流运动	95
第四节	紊流运动的特征和紊流阻力	99
第五节	尼古拉兹实验	103
第六节	工业管道紊流阻力系数的计算公式	106
第七节	非圆管的沿程损失	113
第八节	管道流动的局部损失	116
第九节	减小阻力的措施	125
习题	.....	127
第五章	孔口管嘴管路流动	132
第一节	孔口自由出流	132
第二节	孔口淹没出流	134
第三节	管嘴出流	137
第四节	简单管路	140
第五节	管路的串联与并联	144
第六节	管网计算基础	146
第七节	有压管中的水击	150
习题	.....	153
第六章	气体射流	157
第一节	无限空间淹没紊流射流的特征	157
第二节	圆断面射流的运动分析	161
第三节	平面射流	166
第四节	温差或浓差射流	167
第五节	旋转射流	172
第六节	有限空间射流	176
习题	.....	179
第七章	不可压缩流体动力学基础	181
第一节	流体微团运动的分析	181
第二节	有旋流动	185
第三节	不可压缩流体连续性微分方程	188
第四节	以应力表示的黏性流体运动微分方程式	191
第五节	应力和变形速度的关系	192
第六节	纳维—斯托克斯方程	195
第七节	理想流体运动微分方程及其积分	199
第八节	流体流动的初始条件和边界条件	202
第九节	不可压缩黏性流体紊流运动的基本方程及封闭条件	203
习题	.....	205
第八章	绕流运动	206
第一节	无旋流动	206
第二节	平面无旋流动	210

第三节	几种简单的平面无旋流动	214
第四节	势流叠加	218
第五节	绕流运动与附面层基本概念	225
第六节	附面层动量方程	227
* 第七节	平板上层流附面层的近似计算	229
* 第八节	平板上紊流附面层的近似计算	231
第九节	曲面附面层的分离现象与卡门涡街	233
第十节	绕流阻力和升力	234
习题	.....	239
第九章	一元气体动力学基础	241
第一节	理想气体一元恒定流动的运动方程	241
第二节	声速、滞止参数、马赫数	245
第三节	气体一元恒定流动的连续性方程	250
第四节	等温管路中的流动	252
第五节	绝热管路中的流动	256
习题	.....	259
第十章	相似性原理和因次分析	261
第一节	力学相似性原理	261
第二节	相似准数	263
第三节	模型律	268
第四节	因次分析法	271
习题	.....	275
部分习题答案	.....	277
中英文索引	.....	284
主要参考文献	.....	290

第一章 绪 论

液体和气体，统称为流体。

流体力学是力学的一个分支，它研究流体静止和运动的力学规律，及其在工程技术中的应用。

流体在供热通风和燃气工程中应用得非常广泛。热的供应，空气的调节，燃气的输配，排毒排湿，除尘降温等等，都是以流体作为工作介质，通过流体的各种物理作用，对流体的流动有效地加以组织来实现的。学好流体力学，才能对专业范围内的流体力学现象作出合乎实际的定性判断，进行足够精确的定量估计，正确地解决专业范围内的流体力学的设计和计算问题。

学习流体力学，要注意基本理论、基本概念、基本方法的理解和掌握，要学会理论联系实际地分析和解决工程中的各种流体力学问题。

本书主要采用国际单位制 (SI Units)，基本单位是：长度用米，符号为 m；时间用秒，符号为 s；质量用千克，符号为 kg；力为导出单位，采用牛顿，符号为 N。1N = 1kg·m/s²。

由于我国长期采用工程单位，专业设备上某些量有时仍表为工程上习惯单位，学习者必须注意两种单位的换算。

第一节 作用在流体上的力

我们研究流体运动规律，首先必须分析作用于流体上的力，力是使流体运动状态发生变化的外因。根据力作用方式的不同，可以分为质量力和表面力。

一、质量力

质量力是作用在流体的每一个质点（或微团）上的力。

设在流体中 M 点附近取质量为 Δm 的微团，其体积为 ΔV ，作用于该微团的质量力为 $\Delta \vec{F}_B$ 则称极限

$$\lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta \vec{F}_B}{\Delta m} = \vec{f}$$

为作用于 M 点的单位质量的质量力，简称为单位质量力。用 $\vec{f}$ 或 (X, Y, Z) 表示。设 $\Delta \vec{F}_B$ 在 x, y, z 坐标轴上的分量分别为 $\Delta F_{Bx}, \Delta F_{By}, \Delta F_{Bz}$ ，则单位质量力的轴向分力可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bx}}{\Delta m} \\ Y &= \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{By}}{\Delta m} \\ Z &= \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bz}}{\Delta m} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

在国际单位制中,质量力的单位是牛顿, N。单位质量力的单位是 N/kg, 其因次与加速度的因次相同, 是 LT^{-2} 。

流体力学中碰到的普遍情况是流体所受的质量力只有重力。由于重力 $\vec{G}$ 的大小与流体的质量 m 成正比, $G = mg$, 所以流体所受的单位质量力的大小等于重力加速度的量值, $G/m = g$ 。当采用惯用的直角坐标系时, Z 轴铅垂向上为正, 重力在各向的分力为 G_x , G_y , G_z , 单位质量重力的轴向分力为

$$\left. \begin{aligned} X &= G_x/m = 0 \\ Y &= G_y/m = 0 \\ Z &= G_z/m = -g \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

即 $(X, Y, Z) = (0, 0, -g)$ 。

在研究流体的相对平衡时, 例如盛装液体的容器作直线加速运动或旋转运动等, 也将流体运动的惯性力看成是作用在流体上的质量力。

二、表面力

表面力是作用在所考虑的流体(或称分离体)表面上的力。尽管流体内部任一对相互接触的表面上, 这部分和那部分流体之间的表面力是大小相等, 方向相反, 相互抵消的, 但在流体力学里分析问题, 常常从流体内部取出一个分离体, 研究其受力状态, 这时与分离体相接触的周围流体对分离体作用的内力又变成了作用在分离体表面上的外力。总之, 表面力是就所研究的流体系统而言的。它可能是周围同种流体对分离体的作用, 也可能是另一种相邻流体对其作用, 或是相邻固壁的作用。例如, 敞开容器内的液体, 如把整个液体作为研究系统, 则它仅受到自由面上的大气和相接触的容器壁面的作用; 若把和固壁接触的自由面附近的部分液体取作分离体, 则上述三种表面力都存在。

流体力学中研究流体的运动时, 正确地分析作用在所考虑的流体系统上的表面力是极其重要的。

质量力的表达形式常用单位质量力的坐标分量来表示, 类似地, 表面力常采用单位表面力的切向分力和法向分力来表示。

设在流体分离体的表面上, 围绕任意点 A 取一面积 ΔA , 一般地, 可将作用在该面上的表面力 $\Delta \vec{F}_s$ 分解为表面法线方向的分力 ΔP 和切线方向的分力 ΔT 。因为流体内部不能承受拉力, 所以, 表面法线方向的力只有沿内法线方向的压力。因此, 表面应力可分解为

$$\left. \begin{aligned} \bar{p} &= \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \bar{\tau} &= \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$\bar{p}$ 称为面积 ΔA 上的平均正应力或平均压强, $\bar{\tau}$ 称为面积 ΔA 上的平均切应力。如果令面积 ΔA 无限缩小至 A 点, 则

$$\left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

p 称为 A 点的压强或法向应力或正应力, τ 称为 A 点的切应力。正应力和切应力的因次均为 $ML^{-1}T^{-2}$ 。在国际单位制中, 单位是帕斯卡, 以 Pa 表示。1Pa = 1N/m²。

(1-1) 式中的单位质量力 $\vec{f}$ 是空间坐标 x, y, z 和时间 t 的函数, 即

$$\vec{f} = \vec{f}(x, y, z, t)$$

它是质量力在空间中的分布密度; 而 (1-4) 式中的压强 p 和切应力 τ 不仅有赖于空间位置和时间, 同时也与作用面的方位有关, 因此被称为是作用面上的分布密度。中学物理讲述的往往是分布密度“均匀”的情况。

第二节 流体的主要力学性质

在生产和生活中, 有许多流体流动现象, 如水在河中流动, 风从门窗流入, 燃气从喷嘴喷出等等。这些现象表明了流体不同于固体的基本特征, 就是它的流动性。

和固体比较, 固体存在着抗拉、抗压和抗切三方面的能力。如果要将某一固体拉裂、压碎或切断, 或使其产生很大变形, 必须加以足够的外力, 否则是拉不裂、压不碎、切不断的。但是, 流体则不相同, 如要分裂、切断水体, 几乎不需什么气力。流体的抗拉能力极弱, 抗切能力也很微小, 静止时不能承受切力, 只要受到切力作用, 不管此切力怎样微小, 流体都要发生不断变形, 各质点间发生不断的相对运动。流体的这个性质, 称为流动性, 这是它便于用管道、渠道进行输送, 适宜作供热、供冷等工作介质的主要原因。流体的抗压能力较强, 这个特性和流动性相结合, 使我们能够利用水压推动水力发电机, 利用蒸汽压力推动汽轮发电机, 利用液压、气压传动各种机械。

现在阐述与流体运动有关的几个物理性质。

一、惯性

惯性是物体维持原有运动状态的能力的性质。表征某一流体的惯性大小可用该流体的密度。对于均质流体, 单位体积的质量称为密度, 以 ρ 表示:

$$\rho = m/V \quad (1-5)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——该质量流体的体积, m^3 。

各点密度不完全相同的流体, 称为非均质流体。非均质流体中某点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——某点流体的密度;

Δm ——为微小体积 ΔV 内的流体质量;

ΔV ——为包含该点在内的流体体积。

在计算中常用的流体密度如下:

水的密度

$$\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$$

汞的密度

$$\rho_{\text{Hg}} = 13595 \text{kg}/\text{m}^3$$

干空气在温度为 290K, 压强为 760mmHg 时的密度为 $\rho_a = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$

二、黏性

流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力 (内力) 以反抗相对运动的性

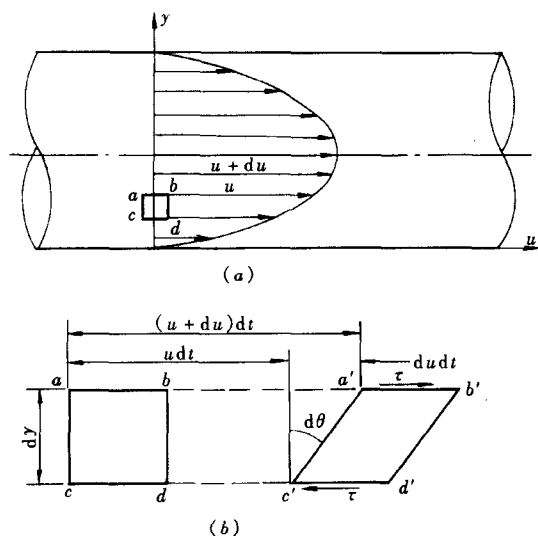


图 1-1 流体质点的直角变形速度

产生了相对运动，从而产生内摩擦力以抗拒相对运动。在流体作层流（层流和紊流的概念，将在第四章讲述）剪切流动时，内摩擦力（或切力） T 的大小，经过无数的试验证明：

- (1) 与两流层间的速度差（即相对速度） du 成正比，和流层间距离 dy 成反比；
- (2) 与流层的接触面积 A 的大小成正比；
- (3) 与流体的种类有关；
- (4) 与流体的压力大小无关。

内摩擦力的数学表达形式可写成

$$T \propto A \frac{du}{dy}$$

或

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

这就是牛顿内摩擦定律。若以 τ 代表单位面积上的内摩擦力，称切应力。则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 就是常用的黏滞力的计算公式。现对各项阐述如下：

(1) $\frac{du}{dy}$ ——称速度梯度。表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率，单位为 s^{-1} 。为了理解速度梯度的意义，我们在图 1-1 (a) 中垂直于速度方向的 y 轴上，任取一边长为 dy 的流体小方块 $abcd$ 。为清楚起见，我们将它放大成图 1-1 (b)。由于小方块下表面的速度 u 小于上表面的速度 $(u + du)$ ，经过 dt 时间后，下表面所移动的距离 $u dt$ ，小于上表面所移动的距离 $(u + du) dt$ ，因而小方块 $abcd$ 变形为 $a'b'c'd'$ 。也就是说，两流层间的垂直连接线 ac 及 bd ，在 dt 时间中变化了角度 $d\theta$ 。由于 dt 很小，因此， $d\theta$ 也很小。所以

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

故

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-9)$$

质，叫做黏性。此内摩擦力称为黏滞力。在流体力学研究中，流体黏性十分重要。

为了说明流体的黏性，现以流体在管中流动为例，如图 1-1。当流体在管中缓缓流动时，紧贴管壁的流体质点，粘附在管壁上，流速为零。位于管轴上的流体质点，离管壁的距离最远，受管壁的影响最小，因而流速最大。介于管壁和管轴之间的流体质点，将以不同的速度向右移动，它们的速度将从管壁至管轴线，由零增加至最大的轴心速度。图 1-1 (a) 就是黏性流体在管中缓慢流动时，流速 u 随垂直于流速方向 y 而变化的函数关系图，即 $u = f(y)$ 的函数关系曲线，称为流速分布图。由于各流层的速度不相同，因而各质点间便产生

可见，速度梯度就是直角变形速度。这个直角变形速度是在切应力的作用下发生的，所以，也称剪切变形速度。由于流体的基本特征是具有流动性，在切应力的作用下，只要有充分的时间让它变形，它就有无限变形的可能性，因而只能用变形速度来描述它的剪切变形的快慢。所以，牛顿的内摩擦定律也可以理解为切应力与剪切变形速度成正比。

(2) τ ——称切应力，因次为力/面积。常用的单位为 Pa。切应力 τ 不仅有大小，还有方向。现以图 1-1 (b) 小方块变形后的 $a'b'c'd'$ 来说明它的方向的确定：上表面 $a'b'$ 上面的流层运动较快，有带动较慢的 $c'd'$ 流层前进的趋势，故作用于 $a'b'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相同；下表面 $c'd'$ 下面的流层运动较慢，有阻碍较快的 $a'b'$ 流层前进的趋势，故作用于 $c'd'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相反。对于相接触的两个流层来讲，作用在不同流层上的切应力，必然是大小相等，方向相反。这里顺便指出：内摩擦力虽是流体抗拒相对运动的性质，但它不能从根本上制止流动的发生。因此，流体的流动性，不因有内摩擦力的存在而消失。当然，在流体质点间没有相对运动（在静止或相对静止状态）时，也就没有内摩擦力表现出来。

(3) μ ——称动力黏度，简称黏度，单位为 $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，以符号 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 表示。不同流体有不同的 μ 值，同一流体的 μ 值愈大，黏性愈强。 μ 的物理意义可以这样来理解：当取 $\frac{du}{dy} = 1$ 时，则 $\tau = \mu$ ，即 μ 表征单位速度梯度作用下的切应力，因此，它反映了黏性的动力性质。

在流体力学中，经常出现 μ/ρ 的比值，用 ν 表示。即

$$\nu = \mu/\rho \tag{1-10}$$

式中， ρ 为流体的密度； ν 的因次为 $\text{L}^2 \text{T}^{-1}$ ，单位为 m^2/s 。如果考虑密度就是单位体积质量，则 ν 的物理意义，也可以这样来理解： ν 是单位速度梯度作用下的切应力对单位体积质量作用产生的阻力加速度。这样，由于在 ν 的因次中没有力的因次，只具有运动学要素，故称 ν 为运动黏度。流体流动性是运动学的概念，所以，衡量流体流动性应用 ν 而不用 μ 。

表 1-1 中，列举了在不同温度时水的黏度。

在表 1-2 中，列举了压强为 98kPa（一个大气压）时，不同温度时空气的黏度。

水的黏度 表 1-1

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

压强为 98kPa (一个大气压) 时的空气的黏度

表 1-2

t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

从表 1-1 及表 1-2 中还可看出：水和空气的黏度随温度变化的规律是不同的，水的黏性随温度升高而减小，空气的黏性随温度升高而增大。这是因为黏性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果。温度升高，分子间吸引力降低，动量增大；反之，温度降低，分子间吸引力增大，动量减小。对于液体，分子间的吸引力是决定性因素，所以液体的黏性随温度升高而减小；对于气体，分子间的热运动产生动量交换是决定性的因素，所以气体的黏性随温度升高而增大。

通常的压强对流体的黏性影响不大，可以认为，流体的动力黏度 μ 只随温度而变化。例如，气体在小于几个大气压的压强作用下，就可以认为它们的动力黏度 μ 与压强无关。但是，在高压作用下，气体和液体的动力黏度都将随压强的升高而增大。

牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，它对某些特殊流体是不适用的。为此，将在作纯剪切流动时满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。如水和空气等，均为牛顿流体。而将不满足该定律的称为非牛顿流体。如泥浆、污水、油漆和高分子溶液等。本书仅限于研究牛顿流体。对非牛顿流体，可参阅有关的专门著作。

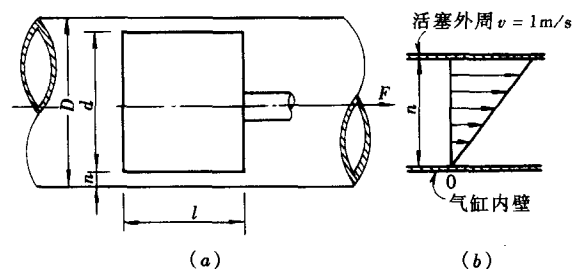


图 1-2 活塞运动的黏性阻力

最后，还需指出，如果流体的流动是非纯剪切流动，那么，即使是牛顿流体，一般地也不满足 (1-7) 式或 (1-8) 式。对于在一般的三元流动情况下，是否是牛顿流体的判别式则是广义牛顿公式，将在第七章第五节中讲述。

【例 1-1】 在图 1-2 (a) 中气缸内壁的直径 $D = 12\text{cm}$ 、活塞的直径 $d = 11.96\text{cm}$ ，活塞的长度 $l = 14\text{cm}$ ，活塞往复运动的速度为 1m/s ，润滑油的 $\mu = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，试问作用在活塞上的黏滞力为多少？

【解】 因黏性作用，粘附在气缸内壁的润滑油层速度为零，粘附在活塞外沿的润滑油层与活塞速度相同，即 $v = 1\text{m/s}$ 。因此，润滑油层的速度由零增至 1m/s ，油层间因相对运动产生切应力，故用 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 计算。该切应力乘以活塞面积，就是作用于活塞上的黏滞

力 T 。

我们将间隙 n 放大，绘出该间隙中的速度分布图 1-2 (b)。由于活塞与气缸的间隙 n 很小，速度分布图近似认为是直线分布。故

$$\frac{du}{dy} = \frac{v}{n} = \frac{1\text{m/s}}{\frac{1}{2} \times (0.12 - 0.1196)\text{m}} = 5 \times 10^3 \text{ 1/s}$$

由牛顿内摩擦定律，有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s} \times 5 \times 10^3 \text{ 1/s} = 5 \times 10^2 \text{ N/m}^2$$

$$\text{接触面积} \quad A = \pi dl = \pi \times 0.1196\text{m} \times 0.14\text{m} = 0.053\text{m}^2$$

$$\text{所以} \quad T = A\tau = 0.053\text{m}^2 \times (5 \times 10^2)\text{Pa} = 26.5\text{N}$$

三、压缩性和热胀性

流体受压，体积缩小，密度增大的性质，称为流体的压缩性。流体受热，体积膨胀，密度减小的性质，称为流体的热胀性。

(一) 液体的压缩性和热胀性

液体的压缩性，一般用压缩系数 α_p 来表示。设某一体积 V 的流体，密度为 ρ ，当压强增加 dp 时，体积减小，密度增大 $d\rho$ ，密度增加率为 $d\rho/\rho$ ，则 $d\rho/\rho$ 与 dp 的比值，称为流体的压缩系数。即

$$\alpha_p = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{dp} \quad (1-11)$$

α_p 值愈大，则流体的压缩性也愈大。 α_p 的单位为 Pa^{-1} 。

流体被压缩时，其质量并不改变，即

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + Vd\rho = 0$$

所以

$$d\rho/\rho = -dV/V$$

故体积压缩系数又可以表示为

$$\alpha_p = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-12)$$

压缩系数 α_p 的倒数称为流体的弹性模量，以 E 表示。即

$$E = \frac{1}{\alpha_p} = \frac{dp}{\frac{d\rho}{\rho}} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-13)$$

式中， E 的单位为 Pa 。

表 1-3 列举了水在温度为 0°C 时，不同压强下的压缩系数。

水的压缩系数 (0°C 时) m^2/N

表 1-3

压强 (kPa)	490	980	1960	3920	7840
α_p	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

液体的热胀性，一般用体膨胀系数 α_v 来表示，与压缩系数相反，当温度增加 dT 时，液体的密度减小率为 $-d\rho/\rho$ ，则体膨胀系数为

$$\alpha_v = -\frac{\frac{d\rho}{\rho}}{dT} \tag{1-14}$$

α_v 值愈大，则液体的热胀性也愈大。 α_v 的单位为 T^{-1} 。

同理，体膨胀系数亦可表示为

$$\alpha_v = dV/V/dT \tag{1-15}$$

表 1-4 列举了水在压强为 98kPa（一个大气压）时，不同温度时的密度。

压强为 98kPa（一个大气压）时水的密度				表 1-4	
温 度 (℃)	密 度 (kg/m ³)	温 度 (℃)	密 度 (kg/m ³)	温 度 (℃)	密 度 (kg/m ³)
0	999.9	15	999.1	60	983.2
1	999.9	20	998.2	65	980.6
2	1000.0	25	997.1	70	977.8
3	1000.0	30	995.7	75	974.9
4	1000.0	35	994.1	80	971.8
5	1000.0	40	992.2	85	968.7
6	1000.0	45	990.2	90	965.3
8	999.9	50	988.1	95	961.9
10	999.7	55	985.7	100	958.4

从表 1-3 及表 1-4 看出：压强每升高 98kPa（一个大气压），水的密度约增加二万分之一。在温度较低时（10~20℃），温度每增加 1℃，水的密度减小约为万分之一点五；在温度较高时（90~100℃），水的密度减小也只有万分之七，这说明水的热胀性和压缩性是很小的，一般情况下可忽略不计。只有在某些特殊情况下，例如水击、热水采暖等问题时，才需要考虑水的压缩性及热胀性。

（二）气体的压缩性及热胀性

气体与液体不同，具有显著的压缩性和热胀性。温度与压强的变化对气体密度的影响很大。在温度不过低，压强不过高时，气体密度、压强和温度三者之间的关系，服从理想气体状态方程式。即

$$\frac{p}{\rho} = RT \tag{1-16}$$

式中 p ——气体的绝对压强，Pa；
 T ——气体的热力学温度，K；
 ρ ——气体的密度，kg/m³；
 R ——气体常数，单位为 J/（kg·K）。对于空气， $R = 287$ ；对于其他气体，在标准

状态下, $R = 8314/n$, 式中 n 为气体的分子量。

在温度不变的等温情况下, $T = C_1$ (常数), 所以 $RT = \text{常数}$ 。因此, 状态方程简化为 $p/\rho = \text{常数}$ 。写成常用形式

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_1}{\rho_1} \quad (1-17)$$

式中, p_1 、 ρ_1 为原来的压强及密度; p 、 ρ 是其他情况下的压强及密度。式 (1-17) 表示在等温情况下压强与密度成正比。也就是说, 压强增加, 体积缩小, 密度增大。根据这个关系, 如果把一定量的气体压缩到它的密度增大一倍时, 则压强也要增加一倍; 相反, 如果密度减小一倍, 则压强也要减小一倍。这一关系与实际气体的压强和密度的变化关系几乎是一致的。但是, 如果把气体压缩, 压强增加到极大时, 气体的密度则应该变得很大, 并且根据公式的关系, 似乎可以计算出在某个压强下, 气体可以达到水、汞等的密度。这是不可能的, 因为气体有一个极限密度, 对应的压强称极限压强。若压强超过这个极限压强时, 不管这压强有多大, 气体的密度再不能压缩得比这个极限密度更大。所以只有当密度远小于极限密度时, 式 (1-17) 与实际气体的情况才是一致的。

在压强不变的定压情况下, $p = C_2$ (常数), 所以 $\frac{p}{R} = \text{常数}$ 。因此, 状态方程简化为 $\rho T = \text{常数}$ 。写成常用的形式

$$\rho_0 T_0 = \rho T \quad (1-18)$$

式中, ρ_0 是热力学温度 $T_0 = 273.16\text{K} \approx 273\text{K}$ 时的密度; ρ 、 T 是其他某一情况下的密度和温度。式 (1-18) 表示在定压情况下, 温度与密度成反比。即温度增加, 体积增大, 密度减小; 反之, 温度降低, 体积缩小, 密度增大。这一规律对各种不同温度下的一切气体都是适用的, 特别是在中等压强范围内, 对于空气及其他不易液化的气体相当准确。只有在温度降低到气体液化的程度, 才有比较明显的误差。

表 1-5 中, 列举了在压强为 101.325kPa (标准大气压——海平面上 0℃ 时的大气压强, 即等于 760mmHg) 下, 不同温度时的空气密度。

压强为 101.325kPa (标准大气压) 下空气的密度

表 1-5

温 度 (℃)	密 度 (kg/m ³)	温 度 (℃)	密 度 (kg/m ³)	温 度 (℃)	密 度 (kg/m ³)
0	1.293	25	1.185	60	1.060
5	1.270	30	1.165	70	1.029
10	1.248	35	1.146	80	1.000
15	1.226	40	1.128	90	0.973
20	1.205	50	1.093	100	0.947

【例 1-2】 已知压强为 98.07kPa, 0℃ 时的烟气密度为 1.34kg/m³, 求 200℃ 时的烟气密度。

【解】 因压强不变, 故为定压情况。用 $\rho T = \rho_0 T_0$ 计算密度。

气体热力学温度与摄氏温度的关系为