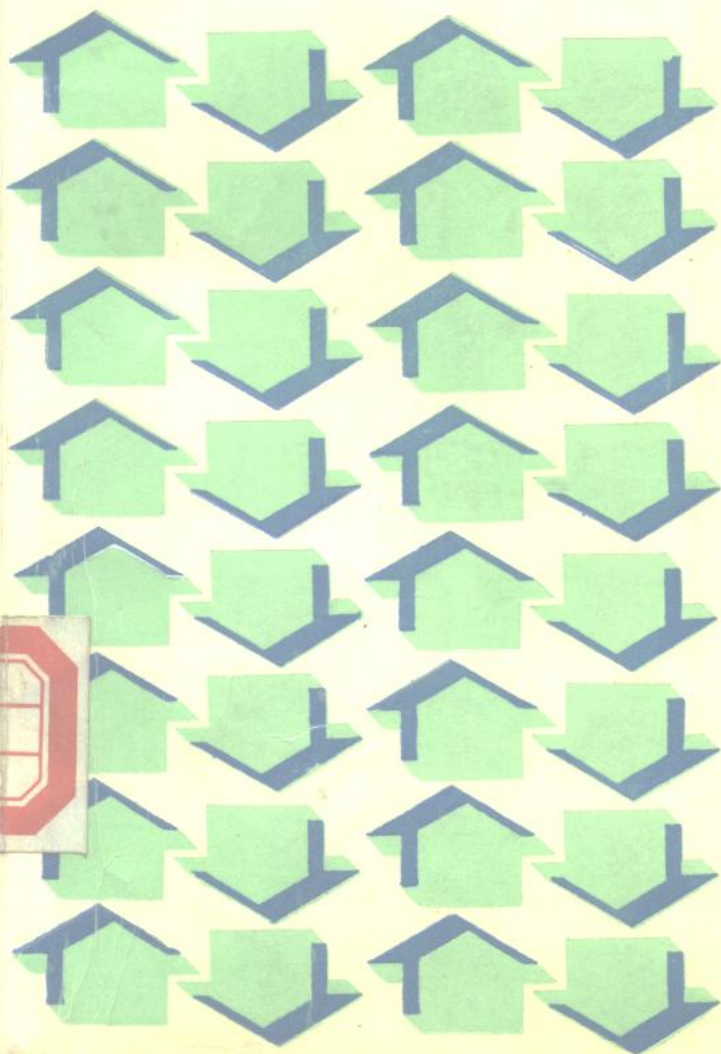


流体力学

茅春浦 编著



上海交通大学出版社

LIXUE

流 体 力 学

茅春浦 编 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是为工程力学专业本科生编写的流体力学教材,也可作为有关专业的教学参考书。

书中系统地阐述了流体力学的基本内容和求解流体力学问题的基本方法。全书共分11章,分别介绍了流体的物理性质、流体静力学、流体运动学、流体动力学、流体的旋涡运动、理想流体平面无旋流动、理想流体空间流动、水波的理论基础、粘性流体动力学、边界层理论和气体动力学基础。每章编有大量的演示例题和训练习题,内容丰富,并着重于基本概念、基本定律的掌握和运用能力的训练。

流 体 力 学

出版:上海交通大学出版社

(上海市华山路 1954 号 邮政编码: 200030)

发行: 新华书店上海发行所

印刷: 浙江上虞科技外文印刷厂

开本: 850×1168 (毫米) 1/32

印张: 18.375 字数: 476000

版次: 1995 年 12 月 第 1 版

印次: 1995 年 12 月 第 1 次

印数: 1—1100

ISBN 7-313-01578-X/TK·042

定价: 17.10 元

前 言

本书是根据理工科大学工程力学系流体力学课程教学大纲要求编写的,力求在如下三个方面作出改进:

(1) 在教材内容的选择上,对流体力学的基本概念、基本现象和基本规律作了充分介绍,加强了对流体力学理论基础和物理概念的叙述,并尽量结合专业需要,增添了应用实例,强调流体力学的基本理论和基本方法的训练。

(2) 重视教材内容的叙述方式,力求由浅入深,循序渐进,做到物理概念清楚,数学表达简明,文字叙述确切 重点难点突出,分析讨论深入,方便于阅读思考。

(3) 对流体力学中求解各类问题的微分方程及边值条件的应用增配了例题,加强了应用环节的分析讨论。书中编有例题 93 道,通过算例的分析讨论可让学生经受较多的求解问题和分析问题的基本训练,有利于增强学习兴趣和提高对流体力学中各类微分方程的掌握和运用能力。

本书出版前已在上海交通大学工程力学系本科生中试用多年,效果很好。现经修改书中既吸收了兄弟院校的经验,也总结了上海交通大学工程力学系流体力学数学实践积累的经验。

在本书最后附有参考书目。在编写过程中从这些参考书中得到不少启发和帮助,有一些例题即出自这些参考书中。在此,特向有关作者表示感谢。

在本书的编写和出版过程中,得到了校系领导和流体力学教研組同事的热情支持和帮助。在此一并表示衷心感谢。

由于本人水平有限,编写时间匆促,书中有缺点和错误之处,恳请广大读者和专家批评指正。

作者

1995.3

目 录

前言

1 流体的物理性质	1
1.1 流体力学的研究任务和研究方法	1
1.2 流体的连续介质模型	3
1.3 流体的易流性	7
1.4 流体的粘性	8
1.5 流体的压缩性	11
习题 1	13
2 流体静力学	15
2.1 作用在流体上的力	15
2.2 静止流体的应力特征	17
2.3 流体静力学基本方程	20
2.4 重力场中静止流体的压强分布	25
2.5 非惯性坐标系中的静止流体	32
2.6 静止流体作用在物面上的合力及合力矩	36
2.7 大气的平衡规律	47
习题 2	49
3 流体运动学及连续性方程	56
3.1 描述流体运动的两种方法	56
3.2 迹线、流线和流管	65
3.3 流体微团运动分析	71
3.4 流体运动的分类	81
3.5 无旋流动的性质和速度势 φ	83
3.6 给定旋度分布和散度分布的流场的求解方法	89

43504

1

3.7	有散无旋流动的速度场	95
3.8	流体的系统与控制体	101
3.9	体积分的随体导数	103
3.10	流动连续性方程	106
	习题 3	117
4	流体动力学	122
4.1	运动流体的应力状态	122
4.2	理想流体的运动方程	127
4.3	伯努利方程及其应用	139
4.4	非惯性坐标系中的理想流体运动方程	152
4.5	理想流体动力学问题的求解条件	167
4.6	动量定理和动量矩定理的应用	177
4.7	压力冲量作用及速度势的动力学解释	189
	习题 4	194
5	理想流体旋涡运动	203
5.1	有旋流动的一般性质	203
5.2	凯尔文速度环量定理	207
5.3	拉格朗日旋涡定理	209
5.4	赫姆霍兹涡线和涡管强度保持定理	211
5.5	旋涡的形成	218
5.6	有旋无散流动的速度场	224
	习题 5	234
6	理想流体平面无旋流动	237
6.1	流函数及其性质	237
6.2	不可压理想流体平面流动的流函数方程	241
6.3	不可压理想流体平面无旋流动的复势和复速度	245
6.4	几种简单流动的复势	248
6.5	圆柱绕流	258
6.6	镜像方法	266

6.7	求解任意物体绕流场的保角变换方法	272
6.8	儒可夫斯基变换及其翼型的绕流问题	277
6.9	定常绕流中物体的受力计算	288
6.10	求解多角形区域中流动的许瓦兹-克里斯托菲尔变换方法	294
6.11	柱形物体运动引起的无界流场	303
6.12	不可压无旋运动流体的动能公式	309
	习题 6	313
7	理想流体空间流动	320
7.1	定常轴对称流动的流函数及其性质	320
7.2	定常轴对称无旋流动的基本方程和边界条件	324
7.3	几种简单轴对称流动的 φ 和 ψ	327
7.4	圆球绕流	333
7.5	任意轴对称体的零攻角绕流场	337
7.6	圆球在无界静止流体中运动	340
7.7	有限物体在无界静止流体中运动时的受力计算	348
	习题 7	358
8	理想流体波浪运动	363
8.1	波浪运动的基本方程及其边值条件	363
8.2	小振幅水波速度势 φ 的一般解	369
8.3	无限深水域中的水波	374
8.4	有限深水域中的水波	385
8.5	波群与群速度	390
8.6	两种液体分界面上的平面行波	393
8.7	波能和波阻	398
8.8	长波理论	404
	习题 8	410
9	粘性流体动力学	412
9.1	粘性流体的本构关系	412

9.2	粘性不可压缩流动的基本方程和边界条件	414
9.3	粘性流动的基本性质	422
9.4	粘性流动的层流和湍流	424
9.5	层流流动的精确解	426
9.6	粘性流体的湍流流动	435
9.7	圆管内粘性流动的能量损失	448
9.8	流动相似原理与量纲分析法	465
9.9	小雷诺数流动	476
	习题 9	481
10	边界层理论	489
10.1	边界层概念	489
10.2	边界层微分方程组及边界条件	493
10.3	平板层流边界层的精确解	499
10.4	边界层动量积分关系式	507
10.5	边界层的近似解	510
10.6	边界层分离与压差阻力	523
	习题10	532
11	气体动力学基础	534
11.1	可压缩气流场的基本概念	534
11.2	小扰动传播的物理过程	538
11.3	一维等熵气流的基本方程	541
11.4	能量方程	545
11.5	变截面管道中的等熵流动	552
11.6	定常激波	559
11.7	激波前后的气流参数关系	562
11.8	激波绝热压缩及机械能的损失	573
	习题11	576
	参考文献	579

1 流体的物理性质

本章将简要地介绍流体力学的任务和研究方法，主要讨论流体的连续介质模型和流体的惯性、粘性及压缩性等物理性质。

1.1 流体力学的研究任务和研究方法

力学是研究物体进行机械运动以及它与其他运动形态相互作用的科学，其中除了研究物体的普遍运动法则的一般力学以外，又分别根据物态的差异而建立了固体力学和流体力学。流体力学是力学科学的一个重要分支，它的主要任务是：（1）研究流体的运动规律；（2）研究流体与物体之间的相互作用。

流体力学和物理学中其他学科一样，其研究方法有理论和实验两种。流体力学就是在不断总结生产实践和开展科学研究的基础上发展起来的，人们总是通过实验研究和理论研究的方法来总结和发展流体力学理论，并应用所获得的流体力学理论去解决工程实际中的问题和解释自然界中的有关现象。

理论研究方法在流体力学中包括下列几个步骤：（1）建立力学模型。通过实验和观察对流体的物理性质及运动特征进行分析研究，根据具体问题分析哪些是主要因素，哪些是次要因素，然后抓住主要因素忽略次要因素对所研究的问题建立起合理的力学模型。力学模型是经过提炼过的实际物体的理论形象，它能正确地反映对物体运动起决定作用的那些主要因素，而不是实际事物的重复。（2）对于所建立的力学模型，根据物理上的普遍规律以及有关实验公式，再建立描述流体运动规律的方程组以及相应的初始条件和边界条件。（3）利用各种数学计算工具准确地或近似地求

解所建立的方程组。(4)对所得方程组的解还须进行分析,以揭示解是否合理,是否符合实际,并且将它和实验比较确定所得解的准确度和适用范围。理论研究方法的特点在于科学的抽象,从而能够应用数学方法求出理论结果,揭示出物质运动的内在规律。

实验研究方法在流体力学中有极重要的地位,被广泛采用。因为一切理论最后必须经过科学实践的考验,能否符合实验事实是理论真伪的最终判决。实验研究方法的主要特点在于它能在与所研究的问题完全相同或大致相同的条件下进行实际观察测量。因此,通过实验得出的结果一般说来是十分可靠的。对于复杂现象,实验常常可以提供有益启迪。

理论研究和实验研究这两种方法是相辅相成,相互促进的,因此两者都不可缺少。实验可检验理论结果的正确性和可靠性,并能提供建立运动规律和理论模型的根据。这样的作用不管理论发展得多么完善都是不可替代的。当然,理论能指导实验,它能使实验进行得更科学更完善,并能帮助推广实验结果的正确运用。

由于在许多生产部门和自然现象中存在着大量的与流体运动有关的问题,可以这么说,目前已很难找一个实际技术部门,它的发展可以与流体力学没有任何联系。如航空、航海、水利、冶金、化工、动力机械、建筑、能源、环境等技术部门都有重要的流体力学问题待开发研究,因此,流体力学在生产部门中有着非常广泛的应用。近年来,由于科学技术的迅速发展,流体力学和其他许多相邻学科相互渗透,形成了许多新的边缘学科。例如化学流体力学、高温气体力学和生物流体力学,天体演化,太阳风等等。流体力学具有强的基础性,同时又有非常广泛的应用性,两者相辅相成,互相促进,使流体力学学科得到迅速发展。

1.2 流体的连续介质模型

1.2.1 连续介质模型假设

对于流体物质的研究,可以从宏观的角度去研究,也可以从微观的角度去研究。

处于流体状态的物质,无论是液体还是气体,都是由大量运动着的分子所组成的。从微观的角度来看,这些分子都在作无休止地不规则运动,由于分子之间存在着间隙,并且分子内部的质量分布也不连续,因此,流体的物理量在空间的分布是不连续的,同时,由于分子运动的随机性,将导致在任一空间点上的流体物理量对于时间的分布也是不连续的。这样,从微观上看,流体是由大量分子组成的离散体,其物理量的分布在空间和时间上都是不连续的。

因此,从微观的角度看,为了求得流体分子的运动规律,可以在一定的初始条件及边界条件下,按照牛顿运动规律建立流体分子运动的微分方程组,解出这组微分方程后即可得任一分子质点在任一时刻的运动状况。但是流体分子的数量之多,相互间碰撞频繁,因此在数学上要解出这样一组非常复杂的微分方程实际上是办不到的。实际上也并不须要知道每个分子的微观运动规律,因为流体力学研究目标是流体的宏观运动规律及其与固体间的相互作用力。只须研究微观量的统计平均值,以求取大量分子运动的宏观总体运动规律。

由于在流体力学中,所讨论的问题的特征尺寸远大于流体的分子平均自由程,人们感兴趣的是流体的宏观特性,即为大量分子的统计平均特性。故重视从宏观的角度来研究流体的运动规律。这样,有理由不以流体分子作为研究对象,而引进流体的连续介质模型,并把流体连续介质模型作为研究对象,所谓连续介质模型即假设流体运动的空间是由流体物质连续地无空隙地充满着,已摆脱流体的分子结构,把流体视为连续介质,认为流体完全充满它所

占有的空间,不存在任何间隙,也不出现真空现象,流体是连续分布于空间的整体。将流体连续地无间隙地分布于它所占有的空间的假设称为流体的连续介质模型假设。

为了建立连续介质模型的概念,可观察一个很有启发性的试验。如图1.1所示,取包含 p 点的微元体积 $\Delta\tau$,在此体积内的流体质量为 Δm ,显然,体积 $\Delta\tau$ 内的流体平均密度 $\bar{\rho} = \Delta m / \Delta\tau$,现在绕着 p 点取大小不同的微元体积 $\Delta\tau$,并测出其中的流体质量 Δm ,再计算出其中的流体平均密度 $\bar{\rho}$,所测结果如图1.2所示。

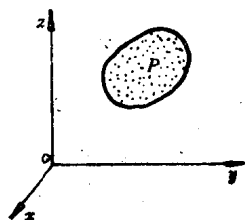


图1.1

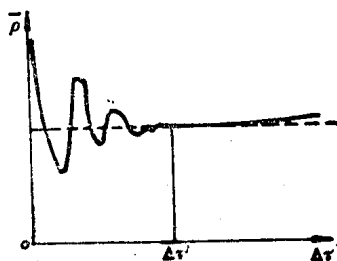


图1.2

在包含 p 点的微元体积 $\Delta\tau$ 向 $\Delta\tau'$ 逐渐收缩时,其平均密度逐渐趋于一个确定的极限值 $\bar{\rho}$,而且当体积 $\Delta\tau$ 适当改变时,其平均密度并不变化,说明此时分子的个性并未显示出来。但是,当体积 $\Delta\tau$ 收缩到比 $\Delta\tau'$ 更小时,由图1.2可见,此时平均密度值波动。这是因为此时体积 $\Delta\tau$ 中的分子数已减少到这样的程度,随机进出此体积的分子数已不能随时平衡,因此引起体积 $\Delta\tau$ 中的流体平均密度随机波动。

由此可见, $\Delta\tau'$ 是一种特征体积,它是几何尺寸很小的但又包含足够多的分子的体积,在此体积中,流体的宏观特性就是其中分

子的统计平均特性。可把微元体 $\Delta\tau'$ 中的所有流体分子的总体称作流体质点。由此, $\Delta\tau'$ 中的平均密度为

$$\bar{\rho} = \lim_{\Delta\tau \rightarrow \Delta\tau'} \frac{\Delta m}{\Delta\tau},$$

即为流体质点的密度,并视作为 p 点上的流体密度。利用定义的流体质点这个概念,可以假设流体是由连续分布的流体质点所组成的,视流体为连续介质模型。

流体的连续介质假设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,所研究的流场的特征尺寸远远大于流体分子运动的自由程,而且任何一个宏观体积中所包含的分子数目是非常之多的,例如,一般气体在 0°C 和 1 个大气压下, 1cm^3 空气体积中含有 2.69×10^{19} 个分子。即使再缩小 1000 倍,在 10^{-9}cm^3 体积中仍含有 2.69×10^{16} 个分子。对于同样体积的液体,其包含有的分子数还要多。由这么多分子是足以可得到与分子数无关的分子统计平均特性。

但是,当研究问题的特征尺寸接近或小于质点的特征尺寸时,连续介质的模型将不再适用。例如,在高空稀薄气体中飞行的火箭,由于空气稀薄,相应的质点间的特征尺寸较大,以致于它与火箭的特征尺寸具有相同的量级,这时必须考虑分子的运动特性,而不能再把它视为连续介质了。

1.2.2 流体物理量

现在只讨论作为连续介质假设的流体。流体是由大量连续的流体质点所组成,每个流体质点无间隙地,连续地分布在所占据的体积之中,而且每一个流体质点在任何时刻都具有确定的物理量,如密度、速度、压强和温度等等。因此,描述流体运动的这些宏观物理量都可表示为空间位置和时间的连续函数。如密度这个物理量,流体在 $\Delta\tau'$ 中的平均密度 $\bar{\rho}$ 就视为流体密度 ρ , 由于特征体积 $\Delta\tau'$ 非常小,以致在宏观上可认为这是一个没有几何尺寸的点,因

而这样定义的流体密度是合理的。根据连续介质模型，流体中每一点都被相应的流体质点所占据。因此所谓空间任一点上的流体密度，即是指位于该点上的流体质点的密度，因而在流体中给定点上的流体密度即可定义为

$$\rho = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta \tau} = \frac{dm}{d\tau} \quad (1.2.1)$$

在任意时刻，空间任意点上的流体质点的密度都具有确定的值，从连续介质假设确定的流体密度 ρ 是空间坐标和时间的连续函数，即

$$\rho = \rho(x, y, z, t)。$$

流体密度代表着单位体积中含有流体质量的大小，表达了流体物质的惯性，密度的单位在国际单位制中为 kg/m^3 ，通常压强在 1 个大气压，温度在 4°C 时，蒸馏水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，而空气的密度为 $1.273\text{kg}/\text{m}^3$ ，几种常见流体的密度列于表 1.1。

表 1.1 几种常见流体的密度

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	0	999.87	空气	0	1.29
水	10	999.73	空气	10	1.24
水	20	999.23	空气	20	1.20
海水	15	1025	润滑油	15	905
汽油	15	725	水银	0	13300
石油	15	885	水蒸汽	0	0.804

另外在流体力学中还用到流体物质的比重，所谓比重是指该物质的密度与 4°C 的水的密度之比，也称为相对密度。用 δ 表示，即

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{4^\circ\text{C水}}} \quad (1.2.2)$$

流体的比重是一个无量纲的物理量。

密度或相对密度只是流体许多宏观物理量中的一个，从场的

观点来看,它是一个标量场。类似地,还可以给出流体的温度场和速度场等等物理量场,即

$$T = T(x, y, z, t), \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, z, t)。$$

显然,温度场也是一个标量场,而速度场是矢量场。

顺便指出,虽然已建立了流体的连续介质模型,认为流体物理量是空间位置和时间的连续可微函数,但也允许在孤立的点、线、面上存在不连续性。

1.3 流体的易流动性

流体的特征是它的形状极易改变,通常称能流动的物质为流体,从力学的角度来分析,流体与固体的主要差别在于它们对于外力的抵抗能力不同。固体有能力抵抗一定大小的拉力、压力和剪切力,当外力作用于固体时,固体将产生一定程度的相应变形以抵抗外力,只要作用的外力保持不变,则固体相应的变形也不变。如当固体受到切向作用力时,在一般情况下沿切线方向固体将发生微小变形,而后就长期保持平衡状态。因此,固体在静止状态时,既可承受法向应力又可承受一定的切向应力。与此相反,流体则不然,流体在静止状态时既不能承受拉力又不能承受切向应力,不管作用于流体切向力多么微小,都将使流体产生连续不断的变形,这就是流体的易流动性,只有当作用的切向力消失时,流体的变形运动才会停止。流体不能在切应力作用下保持平衡。因此流体在静止时只有法向应力而没有切向应力。流体在切向力作用下发生连续不断的变形运动的宏观特性称为流体的易流动性。由于流体的易流动性,所以流体并没有固定的形状。而且,流体在流动中能与外界发生各种传输作用。

1.4 流体的粘性

当两块板沿接触面相对滑动时，它们之间有阻止滑动的摩擦力。在流体中，当相邻两层流体之间有相对运动时，也会产生平行于接触面的切应力。运动快的流层对运动慢的流层施以拖力，运动慢的流层对运动快的流层施以阻力。这一对力称为流体层之间的内摩擦力，流体力学中称它为流体中的粘性切应力。流体所具有的抵抗两层流体相对滑动速度或抵抗变形的性质称为粘性，粘性的大小依赖于流体物质的性质，并明显地随温度变化。

通常当流体形状发生改变时，在流体内部抵抗形状改变的力是比较小的，故流体的粘性一般均比较小。当然不同的流体，其粘性大小差别很大，例如水的粘性要比油的粘性小，而空气的粘性又要比液体的粘性更小。为了理解好粘性切应力与相对滑动速度间的关系，下面来观察一个牛顿平板实验。

如图1.3所示，有两块距离为 h 的平板，在其间充满了所讨论的粘性流体。设平板面积足够大，以致可以忽略平板四周边界的影响。若上板以速度 U 沿 x 轴方向运动，而下板固定不动。由于流体的粘性，与上板接触的流体

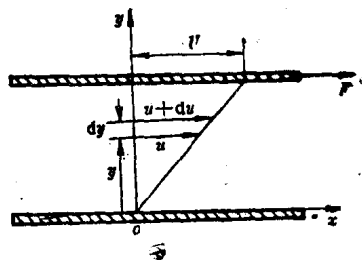


图1.3

粘附于上板，并与上板同速运动，而与下板接触的流体将粘附于下板固定不动。它们之间的流体速度呈图1.3所示的线状分布。这就是说，各相邻流层之间都有相对速度差，必定会产生切向应力。若拖动上平板以速度 U 运动的作用力为 F ，实验表明作用力 F 与流体的粘性系数 μ 以及相对速度有如下关系：

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h},$$

式中的 A 为平板面积。流体单位接触面积上所受的切应力称为粘性切应力, 以 τ 表示, 并且, 由于平板间的流速呈线性分布, 所以流体的粘性切应力为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.4.1)$$

这就是牛顿粘性定律。式中粘性系数 μ 是由流体本身性质决定的量, 粘性系数 μ 便是反映流体粘滞性大小的物理量, 若在相同的切应力作用下, 粘性系数大的流体要比粘性系数小的流体的相对滑动速度小, 在国际单位制中, μ 的单位为 $\frac{Ns}{m^2}$ 。在 $15^{\circ}C$ 时水的粘性

系数为 $1.14 \times 10^{-3} \frac{Ns}{m^2}$, 而空气的粘性系数为 $1.8 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2}$ 。在一个大气压下, 几种常见流体的粘性系数列于表 1.2。

表 1.2 几种常见流体的粘性系数 (1 大气压下)

流体名称	温度 $^{\circ}C$	粘性系数 $\frac{Ns}{m^2}$	流体名称	温度 $^{\circ}C$	粘性系数 $\frac{Ns}{m^2}$
水	0	1.792×10^{-3}	空气	0	1.71×10^{-5}
水	10	1.308×10^{-3}	空气	10	1.76×10^{-5}
水	20	1.005×10^{-3}	空气	20	1.81×10^{-5}
汽油	20	0.31×10^{-3}	润滑油	60	4.17×10^{-3}
甘油	20	14.91×10^{-3}	水银	20	1.55×10^{-3}

另外, 流体的粘性系数 μ 与同温度下该流体密度 ρ 的比值称为流体的运动粘性系数, 并用 ν 表示之

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.4.2)$$

在国际单位制中, ν 的单位是 m^2/s , 在 1 个大气压下温度为 $20^{\circ}C$ 水的运动粘性系数为 $0.1 \times 10^{-6} m^2/s$, 空气的运动粘性系数为 $0.15 \times 10^{-4} m^2/s$ 。