

高等纺织院校教材

# 工程流体力学

纺织工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍流体静力学、运动学、动力学的基本规律及气体高速运动的基本概念。对纺织工艺、纺织机械及空气调节工程中常见的管内流动、管路计算、缝隙流动、旋涡运动、气体射流、两相流动及模型试验方法等作了较为详细的介绍，还编入了流体参数测量等内容。各章均有一定数量的例题和习题。

本书是为纺织工程、纺织机械以及纺织厂供热通风专业编写的高等学校试用教材，也可供纺织工程技术人员、染整、环境保护等专业师生参考。

高等纺织院校教材

工程流体力学

翟荣祖 主编

纺织工业出版社出版

(北京东长安街12号)

河北省供销合作联社保定印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

787×1092毫米 1/16 印数：21,415 字数：511千字  
1987年12月 第一版第一次印刷

印数：1—5,000 定价：3.55元

统一书号：15041·178

## 编者的话

本教材是根据一九八三年底部分纺织院校制定的工程流体力学教学大纲所编写的。

在编写本教材过程中首先注意了保持本学科的系统性及理论水平。全书共十二章，可分为三部分。第一部分（第一～十章）介绍流体性质，不可压缩流体的平衡规律，理想和粘性不可压缩流体的一元和二元流动；第二部分（第十一章）介绍可压缩流体运动的基本概念；第三部分（第十二章）介绍测量流体参数的基本方法。这样编排既体现学科的系统性，又符合认识规律，因而便于引导学生自学。书中对流体的基本规律（平衡规律）、基本方程（连续性方程、欧拉方程、纳维——斯托克斯方程）均按一般分析方法（三元分析法）来处理。这就给学生以分析问题、解决问题的理论方法，以利于加强基础理论。其次，适当地结合专业，联系实际。本书在引出某些概念时，尽量以实践为基础，从感性认识入手，使学生便于理解。此外还编入了纺织工程中常见的缝隙流动、气体射流及两相流动等内容，这有助于培养学生解决专业实际问题的能力。

本教材第四章编入了利用电子计算机计算管道的程序，以适应形势发展的需要。最后，编入了流体测量，可帮助解决工作中测量流动参数的问题。各章均选编了一定数量的例题和习题，用以培养学生解决实际问题的能力。

本教材由北京纺织学院邴冬英（绪言）、武汉纺织工学院潘宏根（第一、三章）、无锡轻院纺织分院李溢曾（第四、六章）、山东纺织工学院孙载正（第五、八章）、天津纺织工学院陶术林（第七章）王世金（第十一章）、西北纺织工学院魏俊民（第二章）翟荣祖（第九、十章）康永（第十二章）编写。全书由翟荣祖担任主编，西安交通大学吴达人担任主审。

由于编者学识有限，编写时间仓促，书中缺点错误在所难免，恳切希望各院校师生和读者批评指正。

编者

一九八五年十月

# 目 录

绪言	( 1 )
<b>第一章 流体及其特性</b>	( 3 )
第一节 流体特性、连续介质模型	( 3 )
第二节 流体的主要力学性质	( 4 )
第三节 作用在流体上的力	( 14 )
思考题和习题	( 15 )
<b>第二章 流体静力学</b>	( 16 )
第一节 流体静压力及其性质	( 16 )
第二节 流体静力学方程式	( 17 )
第三节 压力的计量与单位	( 22 )
第四节 流体的相对平衡	( 23 )
第五节 静止流体作用在固体壁面上的总压力	( 27 )
思考题和习题	( 33 )
<b>第三章 流体动力学基础</b>	( 35 )
第一节 研究流体运动的两种方法	( 35 )
第二节 流动的分类	( 38 )
第三节 流线与迹线	( 40 )
第四节 流管、流束、流量	( 42 )
第五节 一元流动的连续性方程	( 43 )
第六节 理想流体一元流动的运动微分方程	( 45 )
第七节 伯诺里方程及其应用	( 47 )
第八节 气流能量方程	( 57 )
第九节 动量方程及其应用	( 59 )
第十节 动量矩方程及其应用	( 64 )
思考题和习题	( 67 )
<b>第四章 相似原理及模型试验方法</b>	( 70 )
第一节 流动现象相似的基本概念	( 70 )
第二节 相似准则	( 72 )
第三节 量纲分析与 $\pi$ 定理的应用	( 77 )
第四节 模型试验方法	( 82 )
思考题和习题	( 88 )
<b>第五章 管内流动及管路计算</b>	( 90 )
第一节 实际流体与理想流体流动的差别	( 90 )

第二节	实际流体的两种流动状态——雷诺实验	( 92 )
第三节	圆管内的层流运动	( 94 )
第四节	圆管内的紊流运动	( 97 )
第五节	沿程阻力系数	( 103 )
第六节	局部阻力	( 111 )
第七节	管路计算	( 117 )
	思考题和习题	( 127 )
<b>第六章</b>	<b>缝隙流动</b>	( 129 )
第一节	斜板间的缝隙流动	( 129 )
第二节	两平行平板间的缝隙流动	( 135 )
第三节	层流起始段的影响	( 141 )
第四节	两平行圆盘缝隙的压差流动	( 142 )
	思考题和习题	( 145 )
<b>第七章</b>	<b>理想流体的有旋和无旋流动</b>	( 148 )
第一节	流体微团运动的分析	( 148 )
第二节	流体流动的连续性方程	( 151 )
第三节	理想流体的运动微分方程	( 153 )
第四节	平面势流、速度势和流函数	( 161 )
第五节	几种简单的平面势流	( 165 )
第六节	势流迭加原理和几种简单势流的迭加	( 173 )
第七节	有旋流动及其守恒定理	( 184 )
第八节	新型纺纱几种加捻器气流运动的分析	( 191 )
	思考题和习题	( 194 )
<b>第八章</b>	<b>边界层与流体绕物体的流动</b>	( 197 )
第一节	实际流体的运动微分方程(纳维——斯托克斯方程)	( 197 )
第二节	边界层的概念	( 202 )
第三节	边界层微分方程	( 203 )
第四节	边界层动量方程	( 205 )
第五节	平板边界层计算	( 207 )
第六节	曲面边界层分离	( 213 )
第七节	绕流物体的阻力	( 215 )
	思考题和习题	( 222 )
<b>第九章</b>	<b>自由射流</b>	( 223 )
第一节	紊流射流的形成、结构及特征	( 223 )
第二节	圆截面射流的运动分析	( 227 )
第三节	平面射流运动分析	( 234 )
第四节	温差、浓差射流	( 236 )
第五节	大气中的水射流	( 241 )

思考题和习题 .....	( 243 )
<b>第十章 气固两相流动 .....</b>	<b>( 244 )</b>
第一节 两相流动概述 .....	( 244 )
第二节 两相流动的基本原理 .....	( 245 )
第三节 物料的性质 .....	( 251 )
第四节 单个物料的悬浮运动 .....	( 255 )
第五节 物料群在管内的运动 .....	( 263 )
第六节 输料管的压力损失 .....	( 266 )
第七节 输送速度 .....	( 269 )
第八节 气动输送系统的设计计算 .....	( 272 )
思考题和习题 .....	( 274 )
<b>第十一章 气体动力学基础 .....</b>	<b>( 276 )</b>
第一节 可压缩流体一元恒定等熵流动的基本方程 .....	( 276 )
第二节 音速和马赫数 .....	( 279 )
第三节 滞止参数、临界参数 .....	( 283 )
第四节 气流速度与流道截面积的关系 .....	( 289 )
第五节 收缩喷管和缩放喷管 .....	( 290 )
第六节 喷管中的正激波 .....	( 294 )
第七节 等截面管中有摩擦的绝热流动 .....	( 301 )
思考题和习题 .....	( 306 )
<b>第十二章 流体测量简介 .....</b>	<b>( 307 )</b>
第一节 压力测量 .....	( 307 )
第二节 气流速度和方向的测量 .....	( 314 )
第三节 流量的测量 .....	( 322 )
第四节 激光多普勒测速简介 .....	( 326 )
思考题和习题 .....	( 327 )
<b>附录表 1 一元等熵气流参数表 .....</b>	<b>( 328 )</b>
<b>附录表 2 正激波表 .....</b>	<b>( 330 )</b>
<b>附录表 3 法定单位与工程单位换算表 .....</b>	<b>( 331 )</b>
<b>主要参考书 .....</b>	<b>( 332 )</b>

# 绪 言

流体包括液体和气体。流体力学是研究流体在外力作用下的平衡和运动规律的一门学科。它研究流体平衡时的条件及压力分布规律；研究流体流动的基本规律；研究流体流过某通道或绕过某一物体时的速度分布、压力分布、能量损失及流体与固体之间的相互作用。

流体力学是理论力学的自然延续，它是力学的一个重要分支。固体力学是力学的另一分支。流体力学与固体力学不同，流体在运动时具有连续不断地变形的特性，因而，它的运动规律又是很复杂的。

流体力学在生产中有着非常广泛的应用。甚至可以说，很难找到一个工业部门在技术上与流体力学没有一点联系。诸如在水利、造船、航空、电力、机械、冶金、化学、土木建筑及石油工业部门中，流体力学已经成为重要的基础理论之一。

近代纺织科学技术的发展中，由于生产实践和科学研究的需要，流体力学的应用引起了纺织工程技术人员的高度重视。

在生产实践中，已经广泛应用气流开棉、气流配棉（毛），减轻了工人的劳动强度，提高了劳动生产率；在梳理过程中，人们合理地控制和利用气流的运动以减少纤维的散失，增加除杂效率和条干均匀度，提高半制品的质量；络筒机上的气流捻接器和细纱机上的断头吸棉（毛）装置，是利用气流接头和气流吸除飞花，减少疵点，提高纱线质量；纱线上浆后的烘燥过程，是由管道将高温干燥空气送往烘房烘燥的；空气调节过程更与流体力学有着密切的关系。

近年来，工程技术人员应用流体力学基本原理研制了新工艺、新技术和新机器，使纺织工业迅速向现代化发展。例如国内外的纺织科技人员已研制了用气流纺纱的新型纺纱方法：转杯纺纱、静电纺纱、涡流纺纱、尘笼纺纱、平网吸附纺纱、包缠纺纱、喷气纺纱以及空气变形纱等；还研制了喷气引纬、喷水引纬等新型织机，实现了高速高产。由此可见，流体力学的进一步应用将成为纺织工程技术现代化的重要内容之一。

本教材不可能讲述以上列举的各种流动规律，而只能介绍那些基本的共同的流动规律。

学习本课程时，应当着重掌握流体力学的基本概念、基本原理以及基本的计算方法和实验技能，为在纺织工程技术中进一步应用流体力学理论，开发新技术、新设备打下坚实基础。

流体力学的研究方法有理论、计算和实验三种方法。

理论方法的主要步骤是：

一、通过实验和观察，对流体的物理性质和运动特性进行分析。抓住主要特性对流体或运动进行简化和近似，设计出合理的理论模型。

二、根据物理学已知的普遍定律（如牛顿定律、热力学定律等）及有关流体性质的实验

公式，建立描述流体运动的封闭方程组及相应的初始条件和边界条件。

三、利用各种数学工具（如常微分方程、偏微分方程、复变函数、数值计算等）精确地或近似地解出方程组。

四、对方程组的解进行分析，将解所揭示的物理量变化规律与观测所得的资料比较，以确定解的准确度和适用范围。

计算方法就是利用电子计算机，应用各种有效的数值计算方法（如有限差分法、有限元法、有限基本解方法等）研究解决更复杂、更符合实际的流动问题。这种方法的特点是迅速且精确度较高。

实验研究方法就是在风洞、水洞、激波管、水槽、水电比拟等各种实验设备中进行模型试验或实物试验。这种方法的特点是在与所研究的问题大体相同的条件下进行观测。因此，实验结果一般很可靠，但要受模型尺寸的限制，其结果往往不能完全阐明流动的一般特性。

上述三种方法各有利弊，相互促进，相互补充。实验方法用来检验理论和计算结果的正确性及可靠性，并能提供建立流动规律和理论模型的依据；理论方法则能指导实验和计算，使它们进行得更有效，并可把部分实验结果推广到一些没有做过实验的现象中去；而计算方法则可以弥补理论和实验方法之不足，对一系列复杂的流动，进行速度既快、精度又高的研究。

理论、计算和实验三种方法如此密切配合，成为流体力学这门学科得以飞速发展的原因之一。

用理论分析与实验研究相结合的方法，研究流体的平衡、运动和流体与固体相互作用的力学规律，并将这些规律用于工程实际之中，这就是工程流体力学的任务。

本教材全部使用法定计量单位。书中对工程实际中经常遇到的某些参数（如压力）的工程单位与法定计量单位的换算关系也作了介绍。



# 第一章 流体及其特性

本章的中心内容是阐述流体的概念及其主要物理性质，分析作用在流体上的力。连续介质模型和流体的粘性是本章的重点。

## 第一节 流体特性、连续介质模型

### 一、流体特性

流体（液体和气体）不同于固体，它是一种在任何微小剪切力作用下都能连续变形的物质。只要这种剪切力继续作用，流体就将连续变形（流动）；仅当外力停止作用，变形才会停止。流动性是流体的主要力学特性。对于固体则不同，当剪切力作用时，它仅产生一定程度的变形。由材料力学可知，在流变限以下，外力不变时，固体变形不再变化。

流体所以具有流动性，从内部结构上看，由于流体与固体相比较，分子间距大，排列松散，分子内聚力较小，运动强烈，因而不能保持一定形状。

液体和气体除具有流动性这一共同特征外，各自还具有不同的特点。水分子的有效直径约为 $2.72 \times 10^{-8} \text{cm}$ ，分子间距与直径同量级。当对液体加压时，由于分子距稍有缩小，就产生较大的斥力以抵抗外来压力，因而液体压缩性小，可以认为液体具有一定体积。当一定量的液体注入容器，它保持体积但不保持形状，因而液体取容器的形状。另外，由于分子内聚力的作用，液体有力图使自身表面积收缩到最小的特征。当液体与气体接触时会出现液体与气体的交界面，此交界面称为自由表面。

一般说来，气体的分子距很大。例如常温常压下空气的分子距约为 $3 \times 10^{-7} \text{cm}$ ，而分子有效直径氧气（ $\text{O}_2$ ）为 $3.57 \times 10^{-8} \text{cm}$ ，氮气（ $\text{N}_2$ ）为 $3.74 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。可见分子间距比分子有效直径大得多。气体分子内聚力小，因而在压力作用下，分子距要缩小很多时，才会出现分子斥力。通常称气体为可压缩流体。另外，由于分子内聚力小，气体分子可以自由运动，故它极易变形与流动，既没有确定形状又没有确定的体积，总是充满它能够达到的全部空间。

### 二、流体作为连续介质的假设

众所周知，任何物质都由分子构成。流体也是由无数分子组成的。流体的分子与分子之间是有空隙的，这就是说，从微观上看，流体并不是连续分布的物质；流体的分子在永恒不息地运动，这种运动是随机的。研究单个分子的运动既极其困难，在一般工程问题中又很少实用价值，并且由实验测量到的宏观物理量（如压强、速度、密度等）都是大量分子的行为和作用的平均效果，因而流体力学并不研究微观的分子运动，而研究由大量分子组成的宏观流体在外力作用下引起的机械运动。

欧拉 (Euler) 首先用“连续介质”作为宏观流体的模型, 即将真正的流体看成由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质。也就是说, 在研究流体的宏观运动中, 所取的最小流体微元是“体积无穷小但包含有充分多分子”的流体质点, 这种“无穷小”是为物理量无穷小; 就是说, 流体质点对于宏观流体而言, 其尺寸非常小而可忽略不计; 但同时, 它对于分子和分子间距而言, 又足够大, 包含足够多的分子。由于分子线性尺度甚小, 如体积为  $10^{-9} \text{m}^3$  的空间中, 标准状态  $[0^\circ \text{C}, 101325 \text{Pa} (1 \text{标准大气压})]$  下所包含的气体分子多达  $2.688 \times 10^{16}$  个, 而同体积内  $4^\circ \text{C}$  的水分子多达  $3.346 \times 10^{19}$  个。因而这种不考虑分子间隙把流体视为连续介质的假定是合理的。

流体既被视为连续介质, 则表征流体属性的密度、压力、温度等物理量, 一般地在空间也是连续分布的, 除个别情况外, 这些物理量都是时间和空间坐标的连续可微函数, 因而可用微分方程等数学工具去研究流体的平衡和运动规律。

流体作为连续介质的假定也是相对的。这就是说, 在某些特殊问题中, 如超音速气流的冲击波、稀薄气体的流动, 就不能视为连续介质, 而必须代以分子动力论的微观方法。

流体运动的全部范围称“流场”。为了分析流体的运动, 常常取流场中的任意流体微团来分析流体。流体微团和流体质点是两个不同概念。流体质点是可以忽略线性尺度效应的最小单元, 该单元中流体的运动参量可以看成是相同的; 微团是由大量质点组成的具有线性尺度效应的微小流体团。微团中质点流动参量的差别趋于微量。各微团的流动参量各不相同, 因而在流体的整体运动中, 流场各点的运动参量是不同的。

## 第二节 流体的主要力学性质

### 一、密度

流体力学所研究的流体有时是无限大空间的液体或气体, 在这里总重量或者总的质量意义不大, 需要改用密度和重度来表征流体的这一重要属性。

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度, 用  $\rho$  表示。

若某流体中任意点的密度均相同, 则称该流体为均匀流体。显然均匀流体的密度为:

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

式中:  $\rho$ ——流体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\Delta M$ ——体积为  $\Delta V$  的流体部分之质量 ( $\text{kg}$ );

$\Delta V$ ——质量  $\Delta M$  的流体部分之体积 ( $\text{m}^3$ )。

对于非均匀流体, 因为各点的密度不同, 所以按式 (1-1) 计算的只是平均密度。某一点的密度是当包含该点的  $\Delta V \rightarrow 0$  时平均密度的极限, 即:

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

式中:  $dM$ ——所取微元体积的质量 ( $\text{kg}$ );

$dV$ ——质量为  $dM$  的微元体积 ( $\text{m}^3$ )。

必须指出，这里 $\Delta V \rightarrow 0$ ，在物理上应理解成研究对象趋于流体质点，该点的体积同被考察的流体体积相比是完全可以忽略不计的，但它又必须包含足够多的分子，而不失去把流体当作连续介质处理的基础。后面碰到的类似情况均应这样理解。

密度的倒数为比体积（或称比容），以 $v$ 表示。比体积（比容）指单位质量的流体所占有的体积，即：

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

$v$ 的单位为 $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

## 二、重度

如将式（1-1）及式（1-2）中的质量换成重量，则得到重度的定义。重度指单位体积流体具有的重量，以 $\gamma$ 表示，即：

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

式中： $G$ ——流体重量。

对于均质与非均质流体均有如下关系：

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

$\rho$ 为平均密度时， $\gamma$ 为平均重度； $\rho$ 为点密度时， $\gamma$ 为非均质流体的点重度。 $g$ 为当地重力加速度，通常取 $g = 9.806 \text{ m/s}^2$ 。

一些常用流体的密度和重度（标准大气压下）如表1-1所示。

表1-1 常用流体的密度

流体名称	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
纯水	4	1 000
海水	15	1 020~1 30
酒精	15	790~800
水银	20	13 550
空气	0	1.293
空气	20	1.2
水蒸气	0	0.804
二氧化碳	0	1.976

混合气体的密度按各组分气体所占体积百分比计算如下：

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \dots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-6)$$

式中： $\rho_i$ ——混合气体中各组分气体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；

$\alpha_i$ ——对应 $\rho_i$ 气体所占的体积百分比。

## 三、压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压力增加时，流体所占有的体积将减少，这种特性称为流体的压缩性，通常用体积压缩系数 $\beta_v$ 表示。当温度升高时，体积膨胀，称为流体的膨胀性，以温度影

胀系数 $\beta_t$ 表示。

温度不变时 $\beta_v$ 由下式确定：

$$\beta_v = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp} \quad (1-7)$$

式中： $\beta_v$ ——体积压缩系数 ( $m^2/N$ )；

$dp$ ——压力增量 ( $N/m^2$ )；

$dV/V$ ——流体体积变化率，无量纲。

由式 (1-7) 可知， $\beta_v$  为单位压力引起的流体体积变化率。由于压力增加体积减小，故  $dV$  与  $dp$  异号。

体积压缩系数的倒数为体积弹性系数，以  $E_v$  表示，即：

$$E_v = \frac{1}{\beta_v} = -\frac{dp}{dV/V} = -\frac{dp}{dv/v} = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (1-8)$$

工程上有时以  $E_v$  衡量流体压缩性的大小。 $E_v$  大 ( $\beta_v$  小)，即对同样的压力增量，体积变化率小，不易压缩。

0℃时水的压缩系数见表1-2。

表1-2

压 力 Pa (工程大气压)	$4.9 \times 10^5$ (5)	$9.8 \times 10^5$ (10)	$1.96 \times 10^6$ (20)	$3.92 \times 10^6$ (40)
$\beta_v \times 10^9$ ( $m^2/N$ )	-0.538	-0.536	-0.531	-0.523

压力不变时，温度膨胀系数 $\beta_t$ 由下式确定

$$\beta_t = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-9)$$

即 $\beta_t$ 为单位温升所引起的体积变化率。由于温度升高，体积膨胀，故 $dV$ 与 $dT$ 同号。 $\beta_t$ 的单位“1/K”或“1/℃”。

在一定压力作用下水的温度膨胀系数与温度的关系见表1-3。

由表1-2和表1-3可见，水的热胀性和压缩性是很小的，在一般情况下均可忽略不计。可忽略压缩性的流体称不可压缩流体，其密度 $\rho$ 为常数。

表1-3 水的温度膨胀系数 $\beta_t \times 10^6$  (1/℃)

压 力 $1 \times 10^4$ Pa (工程大气压)	温 度 (℃)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
9.8 (1)	14	150	422	556	719
980 (100)	43	165	422	548	704
1960 (200)	72	183	426	539	—

气体不同于液体，压力和温度的改变对气体密度的影响较大。在温度不过低、压力不太高时，气体的密度、压力和温度三者之间服从完全气体状态方程，即：

$$pv = RT \quad (1-10)$$

或

$$p/\rho = RT \quad (1-10a)$$

式中： $p$ ——气体的绝对压力 (Pa)；

$v$ ——比体积 (比容) ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$T$ ——热力学温度 (K)；

$R$ ——气体常数 ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )。

对于空气  $R = 287$ ，在标准状态下其它气体的气体常数为  $R = 8314/n$ ， $n$  为气体的分子量。

当气体温度不变即等温过程时：

$$pv = \text{常数} \quad \text{或} \quad p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (1-11)$$

当气体压力不变即等压过程时：

$$v/T = \text{常数} \quad \text{或} \quad v_1/T_1 = v_2/T_2 \quad (1-12)$$

若气体的变化过程是既不向外散热，又没有热量输入的绝热过程，由热力学可得下式：

$$pv^k = \text{常数} \quad (1-13)$$

式中  $k$ ——绝热指数， $k = C_p/C_v$ 。对于空气和多原子气体，在通常温度下，可取  $k = 1.4$ 。

需要指出，一般情况下液体视为不可压缩流体，气体视为可压缩流体。但是“可压”、“不可压”的划分不是绝对的。当整个流动过程中气体的压力和温度变化很小（如纺织厂空调、除尘系统）时，它的密度变化也很小，可以近似看作常数，这种气体即为不可压缩气体。不可压缩气体的运动规律与液体相似。而对于高速流动，在流动过程中温度和压力变化很大，密度不能看作常数，这种状态的气体称为可压缩气体。

纺织工程中遇到的多数气流，例如前纺工程中的气流、新型纺纱器中的气流以及空调、除尘系统中的气流，其速度一般小于  $20\text{m/s}$ ，压力和温度变化不大，密度变化也小于  $1\%$ ，这些气流均可视为不可压缩流体。但是随着纺织工业的现代化，高速气流（可压缩流体）在纺织工业中会得到日益广泛的应用。国外近年来使用的喷气织机，其喷口速度高达  $200\text{m/s}$  以上；对长丝进行空气变形处理时，喷嘴处速度也高达  $300\sim 400\text{m/s}$ 。这些流动就必须考虑压缩性的影响。通常，当气流速度大于  $68\text{m/s}$  时，流动就须作为可压缩流体处理。

#### 四、粘性

##### (一) 粘性的概念

流体都是有粘性的。把一瓶蜂蜜倒进杯中去要比把水倒进杯子缓慢，这是由于两者粘性不同。这一过程与蜂蜜的温度也有关，温度较高的蜂蜜容易流动。可见“粘性”是与流体本身以及外在条件有关的性质。前面提到在切应力作用下流体必然作变形运动。流体的粘性是指当流体微团间发生相对滑移时，抵抗这种滑移（或变形）产生切向阻力的性质。一般情况下，一定大小的平衡切应力对一定的流体只能使之作一定快慢的变形运动。就不同的流体对

相同的切应力而论，变形愈慢，我们就说这一流体越粘滞。流体在平衡切应力作用下变形放慢这一性质，称为粘性（粘滞性）。

## （二）牛顿内摩擦定律、粘度

流体运动的粘滞力与哪些因素有关？应该怎样确定？牛顿经过大量的实验研究于1686年指出了确定流体内摩擦力的所谓“牛顿内摩擦定律”。

如图1-1所示，有足够大的两块平行平板，其间充满流体。上板A以等速度 $u_0$ 运动，下板B静止不动。二板距离为 $b$ 。板间流体由于粘着能力，具有不同速度。B板上流体附着层的速度 $u_B = 0$ ，A板上流体附着层的速度 $u_A = u_0$ 。

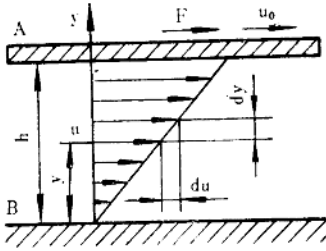


图1-1 牛顿内摩擦实验

当速度 $u_0$ 不很大时，AB板间流体沿y方向的速度变化规律将是线性的。要保持上板以等速 $u_0$ 运动，须加一力F于其上，该力的大小恰等于克服流体粘性而产生的摩擦力T，方向与T相反。大量实验证明，这个力与流体的接触面积（流体、平板之间）成正比，与垂直于板

的速度梯度 $du/dy$ 成正比，写成等式则有如下关系：

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

式中：T——内摩擦力（N）；

$\frac{du}{dy}$ ——y方向速度梯度（1/s）；

A——接触面积（ $m^2$ ）；

$\mu$ ——与流体性质及其压力和温度有关的比例系数，称作流体的动力粘度，或简称粘度。在一定温度和压力下，它是个常数。它的单位为 $Pa \cdot s$ 或 $N \cdot s/m^2$ 。

式（1-14）和（1-15）即为牛顿内摩擦定律。单位面积上的摩擦力 $\tau$ 为：

$$\tau = \pm \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$

$\tau$ 称为切应力。

式（1-14）及式（1-15）中的正、负号，是为使T、 $\tau$ 的值恒为正值而设的。对于 $du/dy$ 大于零，取正号；对 $du/dy$ 小于零，取负号。

当两层流体相对静止， $du/dy = 0$ 时 $\tau = 0$ 。可见相对静止的流体不存在内摩擦力。由式（1-15）还可看出，同样的流体，速度梯度大时，切应力大，能量损失也大；速度梯度小时，切应力小，能量损失也小。

还应指出，切应力总是成对出现的，其方向规定如下：当所研究的面是被快层带动时， $\tau$ 与运动方向一致；如果被慢层阻止时， $\tau$ 与运动方向相反。

在流体力学与工程实际的计算中，常常采用流体的动力粘度与其密度的比值，称为运动粘度或运动粘性系数，并以 $\nu$ 表示，即：

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-16)$$

$v$ 的单位是 $m^2/s$ 。

利用牛顿内摩擦定律可以近似计算纺织机械中广泛应用的滑动轴承的润滑油损耗功率。

〔例1-1〕 如图1-2 (a) 所示, 滑动轴承的轴与轴承之间充满动力粘度为 $\mu$ 的流体。

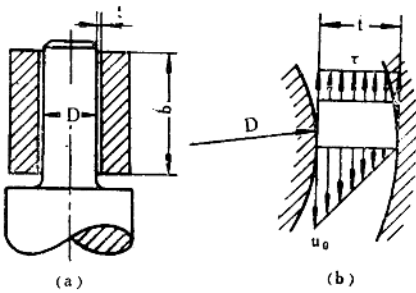


图1-2 滑动轴承油耗功率计算

轴承长为 $b$ , 轴径为 $D$ , 间隙为 $t$ ,  $t/D \ll 1$ 。轴的转速为 $n$  ( $\omega = n\pi/30$ )。计算润滑油损耗功率。

解 由于 $t/D \ll 1$ , 不计曲率, 可近似认为润滑油速度分布如图1-2(b)所示。则轴表面润滑油的线速度为:

$$u_0 = \omega \frac{D}{2} = \frac{n\pi D}{60}$$

摩擦力:

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = \mu \cdot \pi D b \frac{u_0}{t}$$

润滑油耗损功率近似于:

$$N = T \cdot \frac{D}{2} \cdot \omega = \frac{\mu b n^2 \pi^3 D^3}{3 \cdot 600 t} \quad (1-17)$$

式中 $\mu$ 的单位为 $Pa \cdot s$ ;  $b$ 、 $D$ 、 $t$ 的单位为 $m$ ;  $n$ 的单位为 $1/min$ ; 功率 $N$ 的单位为 $J/s$ 。

式(1-17)的使用是有条件的。这类问题更精确的计算将在第六章给出。

满足牛顿内摩擦定律式(1-14)或式(1-15)的流体称为牛顿流体。但是实际上并非所有流体都满足关系式(1-15)。例如纱线上浆过程中用的淀粉、PVA、丙烯酸系三大类浆料都是粘滞流体, 且大多不满足上述关系。不满足式(1-15)的流体, 统称非牛顿流体。一般流体的 $\tau$ 与 $du/dy$ 之间的关系可用图1-3表示。

线1、2、3的方程可用指数规律表示为:

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^\alpha \quad (1-18)$$

式中:  $K$ ——常数;

$\alpha$ ——指数。

式(1-18)也称奥斯特华氏方程。

曲线1:  $\alpha = 1$ , 牛顿流体。

曲线2:  $\alpha < 1$ , 粘度随速度梯度 $du/dy$ 增大而减小, 称此为假塑性流体。CMC、PVA、马铃薯淀粉、聚丙烯酸盐等常用浆料都属于 $\alpha < 1$ 的非牛顿流体。对于它们的 $\tau$ 与 $du/dy$ 关系以及测定方法在《浆料化学》中有

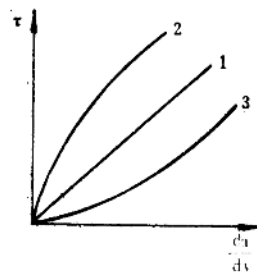


图1-3 各种流体摩擦关系

详细的论述。

曲线3： $\alpha > 1$ ，称胀塑性流体。

我们再回到牛顿内摩擦定律式(1-15)。显然，流体内摩擦定律与两固体之间的摩擦定律不同。前者摩擦力与速度梯度成正比，而在一定范围内与压力关系甚小。后者在一定范围内与速度关系不大，但与两固体间正压力成正比。此外，流体不存在静摩擦力，固体间存在静摩擦力。

速度梯度的大小表示流速在其法线方向上的变化情况，也表示流体微团角变形速度的大小。如图1-4所示，设流体作直线运动。在t时刻从流体中取一矩形流体微元平面〔图1-4(a)〕。由于上层、下流速不等（设上快下慢），经过dt时间后，该微元矩形变形成一

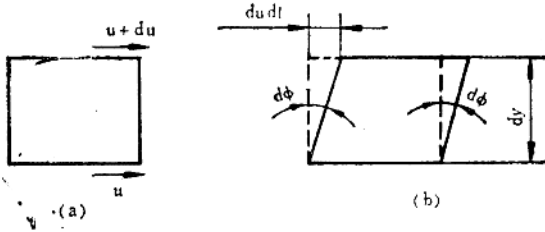


图1-4 角变形速度与速度梯度关系

平行四边形。其角度有一微小变化 $d\phi$ ，角变形速度 $d\phi/dt$ 为：

$$\frac{d\phi}{dt} \approx \frac{\text{tg}(d\phi)}{dt} = \frac{du/dy \cdot dt}{dt} = \frac{du}{dy}$$

即角变形速度等于速度梯度。

### (三) 粘度与温度的关系

流体的粘度与温度和压力有关。但如上面指出的，通常只要压力不是特别高，压力对动力粘度的影响很小。例如液体每增加一个大气压，其粘度平均只增加1/300~1/500。所以在多数情况下，因压力变化而产生的粘度变化可以略去不计。对于气体，在小于几个工程大气压（1工程大气压=9.8×10<sup>4</sup>Pa）的压力作用下，可以认为其动力粘度与压力无关。但因为运动粘度和密度有关，所以气体的运动粘度与压力密切相关。

温度对流体粘性的影响很大。液体的粘度随温度上升而减小，而气体的粘度却随温度的上升而增大。这就是说，温度对这两类流体粘度的变化趋向的影响正好相反，其原因是构成它们的粘性的主要因素不同。液体的分子间距小，引力大，分子间引力是构成粘性的主要因素。当温度增加，分子间距增大，吸引力减小，粘度降低。相反，气体分子间的吸引力微不足道，构成其粘性的主要因素是分子杂乱运动时进行的动量交换。温度升高，气体分子杂乱运动剧烈，动量交换频繁，气体粘度也越大。

水的动力粘度与温度的关系，可以近似地用下述经验公式计算，



$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337t - 0.000221t^2} \quad (1-19)$$

式中： $\mu_0$ ——水在0℃时的动力粘度 (Pa·s)；

$t$ ——水温 (℃)。

气体的动力粘度可近似用下述经验公式计算：

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{273 + C}{T + C} \right) \left( \frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-20)$$

式中： $\mu_0$ ——气体在0℃时的动力粘度 (Pa·s)；

$T$ ——气体的绝对温度 (K)， $T = 273 + t$ ℃；

$C$ ——依气体而定的常数，如空气 $C = 111$ ，水蒸气 $C = 961$ 。

式 (1-20) 适用于压力不太高 [ $P \leq 9.8 \times 10^5 \text{ Pa}$  (10工程大气压)] 的场合，此时可认为气体的粘度与压力无关。

水和空气在压力为 $101.325 \times 10^3 \text{ Pa}$  (1标准大气压) 时的粘度见表1-4和表1-5。表1-6为几种常见液体在压力为 $101.325 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时的粘度值。

表1-4 水的 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $\nu$ 值

温 度 $t$ (°C)	密 度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	动力粘度 $\mu \times 10^5$ (Pa·s)	运动粘度 $\nu \times 10^5$ (m <sup>2</sup> /s)
0	999.8	1.792	1.792
5	1000.0	1.519	1.519
10	999.7	1.308	1.308
15	999.1	1.140	1.141
20	998.2	1.005	1.007
25	997.0	0.894	0.897
30	995.7	0.801	0.804
40	992.2	0.656	0.661
50	988.0	0.549	0.556
60	983.2	0.469	0.477
70	977.8	0.406	0.415
80	971.8	0.357	0.367
90	965.3	0.317	0.328
100	958.4	0.284	0.296

表1-5 空气的 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $\nu$ 的值

温 度 $t$ (°C)	密 度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	动力粘度 $\mu \times 10^5$ (Pa·s)	运动粘度 $\nu \times 10^5$ (m <sup>2</sup> /s)
0	1.293	1.725	1.334
5	1.270	1.747	1.376
10	1.247	1.770	1.419
15	1.226	1.795	1.461