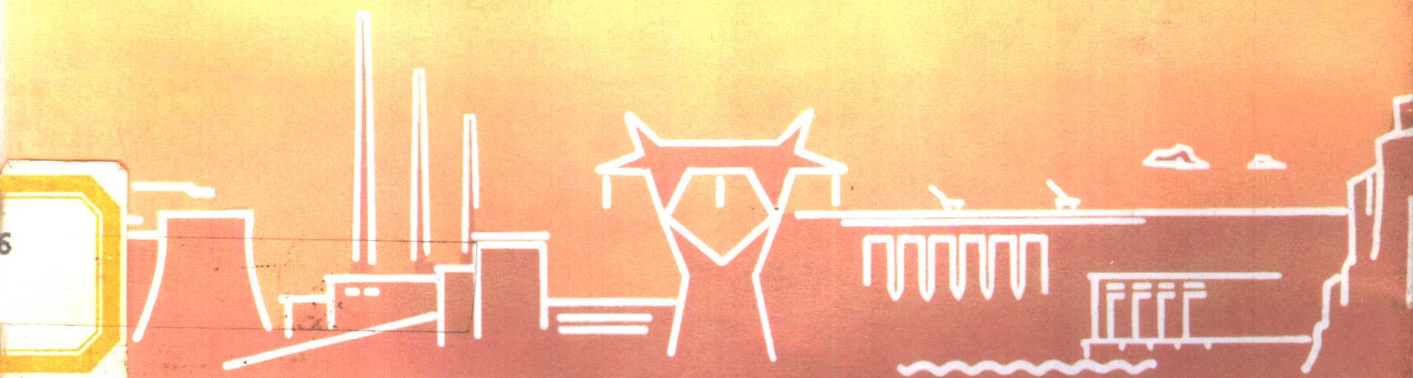




普通高等学校热能动力类专业教学指导委员会推荐使用教材

工程流体力学

东北电力学院 薛祖绳 周云龙 合编



中国电力出版社

991122

普通高等学校热能动力类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

工程流体力学

东北电力学院 薛祖绳 周云龙 合编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书共六章,内容包括流体及其物理性质、流体静力学、流体流动基本概念和方程、黏性流体的一维流动、流体的二维流动和气体流动基础。各章还介绍了有关热工测量仪表的工作原理。各章均附有一定数量的例题、复习思考题和习题。

本书为高等学校工业自动化专业以及其它少学时相近专业的工程流体力学课程的教材,也可作为工厂和设计部门中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/薛祖绳,周云龙编. -北京:中国电力出版社, 1997

高等学校教材

ISBN 7-80125-322-1

Ⅰ. 工... ① 薛... ② 周... Ⅱ. 工程力学:流
体力学 Ⅲ. 高等学校教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04579 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市梨园彩印厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1997 年 11 月第一版 1997 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 259 千字

印数 0001—4070 册 定价 11.60 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本教材是根据 1995 年 5 月在湖北宜昌召开的电力部高等学校热能动力专业教学指导委员会流体力学及泵与风机教学组会议审定的工业自动化专业《工程流体力学》课程修定教学大纲,在原薛祖绳主编的《工程流体力学》教材的基础上修定而成的。

工程流体力学是工业自动化专业的一门重要的专业基础课,该课程的目的是为学习热力设备和热工参数测量及仪表等专业课,以及从事本专业工程技术工作提供必要的理论基础。

薛祖绳主编的原教材《工程流体力学》,作为工业自动化专业一门重要专业基础课的教材,已在东北电力学院和其他兄弟院校使用十多年。在此期间,使用过该教材的兄弟院校的同行们曾以各种方式提出了许多宝贵的意见。这次是在总结教学实践经验的基础上对该教材进行修订。修订后的教材保留了原教材的基本内容,并根据专业需要,对教材的内容和体系进行了一些必要的调整。删去了旋转容器中液体的相对平衡、连通器、节流式流量计、动量矩方程、用皮托-静压管测量流量、五孔球形测压管、用皮托-静压管测量气流中的压力和速度等内容。在各章中均增添了一些新内容,例如流体的分类、流动分类、拉格朗日法等,并且在各章中均增加了应用举例的内容,同时增加了例题和习题。对教材章节作了某些调整,如将边界层的概念、绕物体的阻力移到流体的二维流动中等。为了使读者掌握流体力学(fluid mechanics)的英文专业词汇,在第一次出现专业词汇的同时给出了它的英文名称。调整后的教材内容和体系更加符合专业教学需要。此外,对于教材中各物理量的名称、单位和符号均按《中华人民共和国国家标准 量和单位》和流体力学及泵与风机教学组会议上统一的意见进行了修定。

本教材除适用于工业自动化专业外,也可作为化工、石油、冶金以及其它少学时相近专业工程流体力学的教材。

本教材由东北电力学院薛祖绳教授和周云龙教授合编,从第一章到第六章全部由周云龙编写,薛祖绳作为学术指导。山东工业大学孔珑教授任主审,本教材的主审对书稿修订作了大量细致的工作,提出了许多宝贵意见和建议,才使本教材的质量得以提高,在此表示感谢!

由于编者水平有限,本教材中还难免存在有缺点和错误,恳请读者批评指正。

薛祖绳 教授

周云龙 教授

1997 年 6 月

CA-10802

目 录

前 言

第一章 流体及其物理性质	1
第一节 流体的定义、特征和连续介质假设	1
第二节 流体的密度	2
第三节 流体的压缩性和膨胀性	3
第四节 流体的黏性	5
第五节 流体的分类	9
第六节 液体的表面性质	10
第七节 作用在流体上的力	14
复习思考题	15
习题	16
第二章 流体静力学	19
第一节 流体静压强及其特性	19
第二节 流体平衡微分方程式 等压面	21
第三节 在重力作用下的流体静力学基本方程式	24
第四节 绝对压强、计示压强和真空度	26
第五节 流体静力学基本方程的应用	27
第六节 水位计的基本原理	34
第七节 静止液体作用在平面上的总压力	35
第八节 静止液体作用在曲线上的总压力	40
复习思考题	44
习题	44
第三章 流体流动的基本概念和方程	52
第一节 研究流体运动的两种方法	52
第二节 流动的分类	56
第三节 流体动力学的几个基本概念	58
第四节 流体流动的连续性方程	61
第五节 理想流体的运动微分方程	65
第六节 理想流体微元流束的伯努里方程	67
第七节 伯努里方程的应用	69
第八节 定常流动的动量方程	73
复习思考题	76
习题	76
第四章 黏性流体的一维流动	81

第一节 黏性流体总流的伯努里方程	81
第二节 流体流动的状态	85
第三节 流体流动的能量损失与流动阻力	89
第四节 圆管中流体的层流流动	90
第五节 圆管中流体的紊流流动	94
第六节 沿程阻力系数的实验研究	103
第七节 非圆形管道沿程损失的计算	108
第八节 局部损失计算	109
第九节 管道水力计算	115
复习思考题	119
习题	119
第五章 不可压缩流体的二维流动	125
第一节 有旋流动和无旋流动	125
第二节 速度环量和旋涡强度	127
第三节 速度势和流函数	130
第四节 基本的平面有势流动	135
第五节 有势流动的叠加	140
第六节 应用举例	147
第七节 边界层的概念	149
第八节 绕流物体的阻力	152
复习思考题	154
习题	154
第六章 气体流动基础	156
第一节 声速及马赫数	156
第二节 气体一维定常等熵流动基本方程	158
第三节 气流参数与通道截面的关系	161
第四节 气体经渐缩喷管和缩放喷管的流动	164
第五节 正激波	167
第六节 微弱扰动波在空间的传播	171
第七节 应用举例	172
复习思考题	176
习题	177
参考文献	178

第一章 流体及其物理性质

第一节 流体的定义、特征和连续介质假设

一、流体的定义和特征

物质常见的存在状态是固态、液态和气态，处在这三种状态下的物质分别称为固体 (solid)、液体 (liquid) 和气体 (gas)。通常说能流动的物质为流体，液体和气体易流动，我们把液体和气体称之为流体。但这样说是不严格的，严格地说应该用力学的语言来叙述：在任何微小剪切力的持续作用下能够连续不断变形的物质，称为流体。根据上述定义，流体显然不能保持一定的形状，即具有流动性。但流体在静止时不能承受切向力，这显然与固体不同。固体在静止时也能承受切向力，发生微小变形以抗拒外力，一直达到平衡为止。只要作用力保持不变，固体的变形就不再变化。

流体和固体具有上述不同性质是由于分子间的作用力不同造成的。在相同体积的固体和流体中，流体所含的分子数目比固体少得多，分子间的空隙就大得多，因此流体分子间的作用力小，分子运动强烈，从而决定了流体具有流动性和不能保持一定形状的特性。

流体中所包括的液体和气体除具有上述共同特性外，还具有如下的不同特性：

液体的分子距和分子的有效直径差不多是相等的，当对液体加压时，只要分子距稍有缩小，分子间的斥力就会增大以抵抗外压力。所以，液体的分子距很难缩小，即液体很不易被压缩，以致一定重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，液体有力求自身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 (free surface) (或称自由液面)，通常称为水平面 (horizontal surface)。

气体的分子距比液体的大，在 0°C 、1 个标准大气压力 (101325Pa) 下，气体的平均分子距约为 $3.3 \times 10^{-7}\text{cm}$ ，其分子平均直径约为 $2.5 \times 10^{-8}\text{cm}$ ，分子距比分子平均直径约大十倍。因此，只有当分子距缩小很多时，分子间才会出现斥力。可见，气体具有很大的压缩性。此外，因其分子距与分子平均直径相比很大，以致分子间的吸引力微小，分子热运动起决定性作用，所以气体没有一定形状，也没有一定的体积，它总是能均匀充满容纳它的容器而不能形成自由表面。

二、流体连续介质假设 (fluid continuum hypothesis)

从微观角度看，流体和其它物体一样，都是由大量不连续分布的分子组成，分子间有间隙。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宏观运动。因此，在流体力学中，取流体微团来作为研究流体的基元。所谓流体微团是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，故可作为流体质点看待。这样，流体可看成是由无限多连续分布的流体微团组成的连续介质。

这种对流体的连续性假设是合理的，因为在流体介质内含有为数众多的分子。例如，在标准状态下， 1mm^3 气体中有 2.7×10^{16} 个分子； 1mm^3 的液体中有 3×10^{19} 个分子。可见分子间的间隙是极其微小的。因此在研究流体宏观运动时，可以忽略分子间的间隙，而认为流体是连续介质。

当把流体看作是连续介质后，表征流体性质的密度 (density)、速度 (velocity)、压强 (pressure) 和温度 (temperature) 等物理量在流体中也应该是连续分布的。这样，可将流体的各物理量看作是空间坐标和时间的连续函数，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。

流体作为连续介质的假设对大部分工程技术问题都是适用的，但对某些特殊问题则不适用。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，其分子距与设备尺寸可以比拟，不再是忽略不计了。这时不能再把流体看成是连续介质来研究，需要用分子动力论的微观方法来研究。本书只研究连续介质的力学规律。

第二节 流体的密度

一、流体的密度 (fluid density)

单位体积流体所具有的质量称为流体密度，用符号 ρ 来表示，它的物理意义表示流体在空间分布的密集程度。

对于流体中各点密度相同的均质流体 (homogeneous fluid)，其密度

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

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

m ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

对于各点密度不同的非均质流体 (non-homogeneous fluid)，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

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

二、流体的相对密度

流体的相对密度是指某种流体的密度与 4°C 时水的密度的比值，用符号 d 来表示。

$$d = \rho_t / \rho_w \quad (1-3)$$

式中 ρ_t ——流体的密度， kg/m^3 ；

ρ_w —— 4°C 时水的密度， kg/m^3 。

表 1-1 列出了一些常用液体在标准大气压强下的物理性质。表 1-2 列出了一些常用气体在标准大气压力和 20°C 下的物理性质。

表 1-1

在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)	相对密度 d	动力黏度 $\mu \times 10^4$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
纯水	20	998	1.00	10.1
海水	20	1026	1.03	10.6
20%盐水	20	1149	1.15	—
乙醇(酒精)	20	789	0.79	11.6
苯	20	895	0.90	6.5
四氯化碳	20	1588	1.59	9.7
氟利昂-12	20	1335	1.34	—
甘油	20	1258	1.26	14900
汽油	20	678	0.68	2.9
煤油	20	808	0.81	19.2
原油	20	850—928	0.85—0.93	72
润滑油	20	918	0.92	—
氢	-257	72	0.072	0.21
氧	-195	1206	1.21	2.8
水银	20	13555	13.58	15.6

表 1-2

在标准大气压和 20 $^{\circ}\text{C}$ 常用气体性质

气 体	密 度 ρ (kg/m^3)	动力黏度 $\mu \times 10^5$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	气体常数 R [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	气 体	密 度 ρ (kg/m^3)	动力黏度 $\mu \times 10^5$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	气体常数 R [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
空 气	1.205	1.80	287	氮	1.16	1.76	297
二氧化碳	1.84	1.48	188	氧	1.33	2.00	260
一氧化碳	1.16	1.82	297	甲 烷	0.668	1.34	520
氢	0.166	1.97	2077	饱和水蒸气	0.747	1.01	462
氦	0.0839	0.90	4120				

第三节 流体的压缩性和膨胀性

随着压强的增加, 流体体积缩小; 随着温度的增高, 流体体积膨胀, 这是所有流体的共同属性, 即流体的压缩性和膨胀性。

一、流体的膨胀性(fluid expansibility)

在一定的压强下, 流体的体积随温度的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胀系数 α_v 来表示, 它表示当压强不变时, 升高一个单位温度所引起流体体积的相对增加量, 即

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-4)$$

式(4) α_v ——流体的体胀系数, $1/^\circ\text{C}$, $1/\text{K}$;

dt ——流体温度的增加量, $^\circ\text{C}$, K ;

V ——原有流体的体积, m^3 ;

dV ——流体体积的增加量, m^3 。

实验指出, 液体的体胀系数很小, 例如在 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 下, 温度在 $1 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内, 水的体胀系数 $\alpha_v = 14 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内, 水的体胀系数 $\alpha_v = 150 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。在常温下, 温度每升高 1°C , 水的体积相对增量仅为万分之一点五; 温度较高时, 如 $90 \sim 100^\circ\text{C}$, 也只增加万分之七。其它液体的体胀系数也是很小的。

流体的体胀系数 α_v 还决定于压强。对于大多数液体, α_v 随压强的增加稍为减小。水的 α_v 在高于 50°C 时也随压强的增加而减小, 只有在低于 50°C 时随压强的增加而增大。

在一定压强作用下, 水的体胀系数与温度的关系如表 1-3 所示。

表 1-3 水的体胀系数 α_v ($1/^\circ\text{C}$)

压 强 (10^5Pa)	温 度 ($^\circ\text{C}$)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.98	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
98	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
196	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
490	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
882	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

二、流体的压缩性(fluid compressibility)

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。流体压缩性的大小用压缩率 κ 来表示。它表示当温度保持不变时, 单位压强增量引起流体体积的相对缩小量, 即

$$\kappa = - \frac{1}{d\rho} \frac{dV}{V} \quad (1-5)$$

式中 κ ——流体的压缩率, m^2/N ;

$d\rho$ ——流体压强的增加量, Pa ;

V ——流体的原有体积, m^3 ;

dV ——流体体积的缩小量, m^3 。

由于压强增加时, 流体的体积减小, 即 $d\rho$ 与 dV 的变化方向相反, 故在上式中加个负号, 以使压缩率 κ 永为正值。

实验指出, 液体的压缩率很小, 例如水, 当压强在 $(1 \sim 490) \times 10^7 \text{Pa}$ 、温度在 $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 的范围内时, 水的压缩率仅约为二万分之一, 即每增加 10^5Pa , 水的体积相对缩小约为二万分之一。表 1-4 列出了 0°C 水在不同压强下的 κ 值。

气体的压缩性要比液体的压缩性大得多, 这是由于气体的密度随着温度和压强的改变

从而产生切向作用力，称其为内摩擦力。作用在两个流体层接触面上的内摩擦力总是成对出现的，即大小相等而方向相反，分别作用在相对运动的流层上。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 F ，其方向与流体流动方向相同，带动下层流体向前运动，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 F' ，其方向与流体流动方向相反，阻碍上层流体运动。通常情况下，流体流动的速度并不按直线变化，而是按曲线变化，如图 1-1 虚线所示。

二、牛顿内摩擦定律

根据牛顿 (Newton) 实验研究的结果得知，运动的流体所产生的内摩擦力 (切向力) F 的大小与垂直于流动方向的速度梯度 (velocity gradient) du/dy 成正比，与接触面的面积 A 成反比，并与流体的种类有关，而与接触面上压强 P 无关。内摩擦力的数学表达式可写为

$$F \propto A \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

写成等式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 F ——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 ；

du/dy ——垂直于流动方向上的速度梯度， $1/s$ ；

μ ——动力黏度 (dynamic viscosity)， $Pa \cdot s$ 。

流层间单位面积上的内摩擦力称为切向应力 (shear stress)，则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中 τ ——切向应力， Pa 。

从式 (1-9) 可知，当速度梯度等于零时，内摩擦力也等于零。所以，当流体处于静止状态或以相同速度运动 (流层间没有相对运动) 时，内摩擦力等于零，此时流体有黏性，流体的黏性作用也表现不出来。当流体没有黏性 ($\mu=0$) 时，内摩擦力等于零。

在流体力学中还常引用动力黏度与密度的比值，称为运动黏度 (kinematic viscosity) 用符号 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

式中 ν ——表示运动黏度， m^2/s 。

常用液体和气体的动力黏度见表 1-1 和表 1-2。表 1-5 和表 1-6 分别给出了水和空气不同温度时的黏度。一些常用气体和液体的动力黏度和运动黏度随温度的变化见图 1-2 和图 1-3。

表 1-5

水的黏度与温度的关系

温 度 (℃)	$\mu \times 10$ (Pa · s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	温 度 (℃)	$\mu \times 10^{-6}$ (Pa · s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /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	1.141	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

表 1-6

空气的黏度与温度的关系

温 度 (℃)	$\mu \times 10^{-6}$ (Pa · s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	温 度 (℃)	$\mu \times 10^{-6}$ (Pa · s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)
0	17.09	13.00	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.80	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50
120	22.60	25.20	380	32.10	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

三、影响黏性的因素

流体黏性随压强和温度的变化而变化。在通常的压强下，压强对流体的黏性影响很小，可忽略不计。在高压下，流体（包括气体和液体）的黏性随压强升高而增大。流体的黏性受温度的影响很大，而且液体和气体的黏性随温度的变化是不同的。液体的黏性随温度升高而减小，气体的黏性随温度升高而增大。造成液体和气体的黏性随温度不同变化的原因是由于构成它们黏性的主要因素不同。分子间的吸引力是构成液体黏性的主要因素，温度升高，分子间的吸引力减小，液体的黏性降低；构成气体黏性的主要因素是气体分子作不规则热运动时，在不同速度分子层间所进行的动量交换。温度越高，气体分子热运动越强烈，动量交换就越频繁，气体的黏性也就越大。

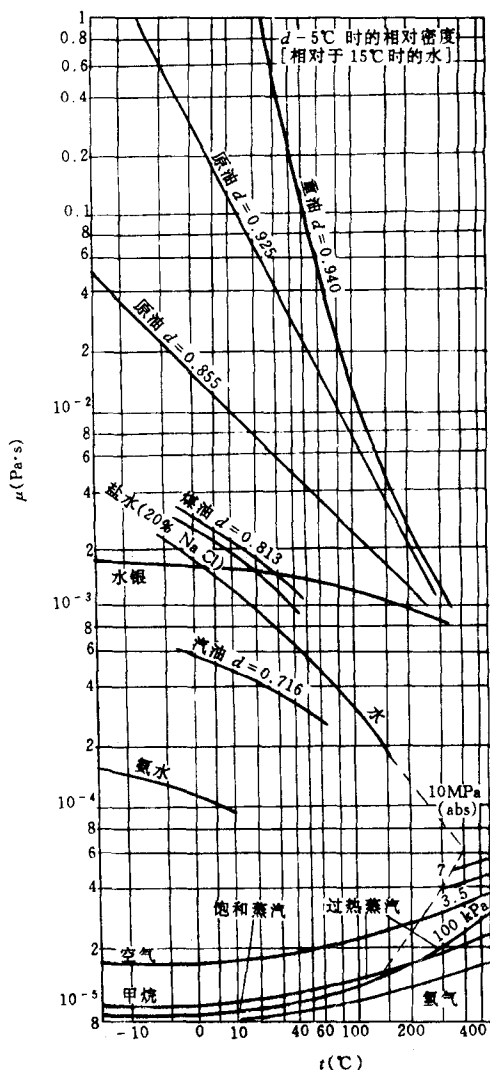


图 1-2 流体的动力黏度

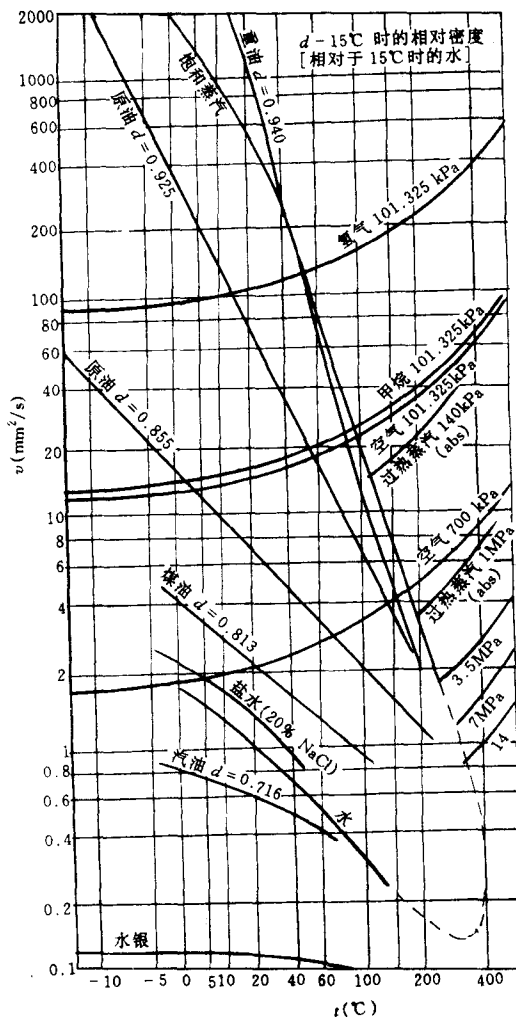


图 1-3 流体的运动黏度

【例 1-1】 一平板距另一固定平板 $\delta=0.5\text{mm}$ ，二板水平放置，其间充满流体，上板在单位面积上为 $\tau=2\text{N/m}^2$ 的力作用下，以 $u=0.25\text{m/s}$ 的速度移动，求该流体的动力黏度。

【解】 由牛顿内摩擦定律式 (1-10)

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

由于两平板间隙很小，速度分布可认为是线性分布，用增量来表示微分

$$\mu = \tau \frac{du}{dy} = \tau \frac{\delta}{u - 0} = 2 \times \frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.25} = 0.004 (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

【例 1-2】 长度 $L=1\text{m}$ ，直径 $d=200\text{mm}$ 水平放置的圆柱体，置于内径 $D=206\text{mm}$ 的圆管中以 $u=1\text{m/s}$ 的速度移动，已知间隙中油液的相对密度为 0.92，运动黏度为 $5.6 \times$

$10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$,求所需拉力 F 为多少?

【解】 已知间隙中油液的相对密度 $d=0.92$, 而 $d=\rho/\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 则油的密度为

$$\rho = \rho_{\text{H}_2\text{O}}d = 1000 \times 0.92 = 920(\text{kg}/\text{m}^3)$$

动力黏度为

$$\mu = \rho\nu = 920 \times 5.6 \times 10^{-4} = 0.5151(\text{Pa} \cdot \text{s})$$

由牛顿内摩擦定律式 (1-9)

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

间隙很小, 速度可以认为是线性分布

$$F = \mu A \frac{u - 0}{D - d} = 0.515 \times 3.14 \times 0.2 \times 1 \times \frac{1}{\frac{206 - 200}{2}} \times 10^3 = 107.8(\text{N})$$

第五节 流体的分类

按照流体性质可以把流体分为可压缩流体和不可压缩流体, 牛顿流体和非牛顿流体, 理想流体和黏性流体。

一、可压缩流体和不可压缩流体(compressible fluid and incompressible fluid)

压缩性是流体的基本属性。任何流体都是可以压缩的, 只不过可压缩的程度不同而已。液体的压缩性都很小, 随着压强和温度的变化, 液体的密度仅有微小的变化, 在大多数情况下, 可以忽略压缩性的影响, 认为液体的密度是一个常数。 $dp/dt=0$ 的流体称为不可压缩流体, 而密度为常数的流体称为不可压均质流体。

气体的压缩性都很大。从热力学中可知, 当温度不变时, 完全气体的体积与压强成反比, 压强增加一倍, 体积减小为原来的一半; 当压强不变时, 温度升高 1°C 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, 而是随压强和温度的变化而变化的。我们把密度随温度和压强变化的流体称为可压缩流体。

把液体看作是不可压缩流体, 气体看作是可压缩流体, 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, 研究管道中水击和水下爆炸时, 水的压强变化较大, 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, 在锅炉尾部烟道和通风管道中, 气体在整个流动过程中, 压强和温度的变化都很小, 其密度变化很小, 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声速要小得多时, 气体的密度变化也很小, 可以近似地看成是常数, 也可当作不可压缩流体处理。

二、牛顿流体和非牛顿流体(Newton fluid and non-Newton fluid)

凡作用在流体上的切向应力与速度梯度之间的关系满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛

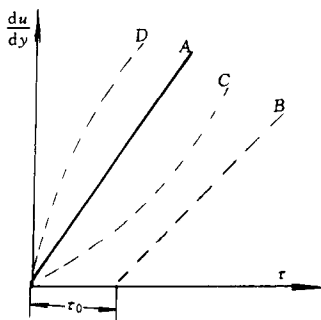


图 1-4 流动曲线

顿流体，如图 1-4 中的曲线 A 所示。凡作用在流体上的切向应力与速度梯度之间的关系不满足牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体，如图 1-4 中的曲线 B、C、D。图中曲线 B 表示理想塑性体，如牙膏便有这种性质；曲线 C 表示拟塑性体，如黏土浆和纸浆；曲线 D 表示胀流型流体，如沙与水的混合物；纵坐标轴表示理想流体；横坐标轴表示弹性固体。

本书只讨论牛顿流体，牛顿内摩擦定律只适用于牛顿流体，而不适用于非牛顿流体。非牛顿流体是流变学的研究对象，它的研究对化工、食品等工业部门是相当重要的。

的。

三、黏性流体和理想流体(viscous fluid and ideal fluid)

自然界中所存在的各种流体，包括各种气体和液体，都有黏性。我们把有黏性的流体($\mu \neq 0$)称为黏性流体或实际流体(real fluid)。由于黏性的存在，实际流体的运动一般都很复杂，给研究流体的运动规律带来很多困难。为了使问题简化，便于进行分析，在流体力学中引入理想流体的假设，没有黏性的流体($\mu = 0$)称为理想流体。显然理想流体运动时，不论流层间有无相对运动，其内部都不会产生内摩擦力，即无切向应力。在研究理想流体流动的基本规律后，再对黏性的影响进行试验观测和分析，以对理想流体所得结果加以补充和修正，得到实际流体流动的规律。

第六节 液体的表面性质

一、表面张力(surface tension)

当液体与其它流体或固体接触时，在分界面上都产生表面张力，出现一些特殊现象，例如空气中的雨滴呈球状，液体的自由表面好像一个被拉紧了的弹性薄膜等。

表面张力的形成主要取决于分界面液体分子间的吸引力，也称为内聚力(cohesion)。在液体中，一个分子只有距离它约 10^{-7}cm 的半径范围内才能受到周围分子吸引力的作用。在这个范围内的液体分子对该分子的吸引力各方向相等，处于平衡状态。但在靠近静止液体的自由表面、深度小于约 10^{-7}cm 薄的表面层内，每个液体分子与周围分子之间的吸引力不能达到平衡，而合成一个垂直于自由表面的合力。这个合力从自由表面向下作用在该分子上，当分子处于自由表面上时，向下的合力达到最大值。表面层内的所有液体分子均受有向下的吸引力，从而把表面层紧紧拉向液体内部。由于表面层中的液体分子都有指向液体内部的拉力作用，所以任何液体分子在进入表面层时都必须反抗这种力的作用，也就是必须给这些分子以机械功。当自由表面收缩时，在收缩的方向上必定有与收缩方向相反的作用力，这种力称为表面张力。在不相混合的液体间以及液体和固体间的分界面附近的分子都将受到两种介质吸引力的作用，沿着分界面产生表面张力，通常称为交界面张力。表面张力 σ 的大小以作用在单位长度上的力表示，单位为 N/m 。

表 1-7 常用液体在 20℃ 时与空气接触的表面张力

液 体	表面张力 σ (N/m)	液 体	表面张力 σ (N/m)	液 体	表面张力 σ (N/m)
纯 水	0.0728	四氧化碳	0.0266	润滑油	0.0350~0.0379
乙醇 (酒精)	0.0223	煤 油	0.0234~0.0321	水 银	0.513*~0.485**
苯	0.0289	原 油	0.0234~0.0379		

* 和空气接触

** 和水银本身蒸汽接触

表 1-8 水与空气接触的表面张力

温 度 (℃)	表面张力 σ (N/m)	温 度 (℃)	表面张力 σ (N/m)	温 度 (℃)	表面张力 σ (N/m)
0	0.0756	25	0.0720	60	0.0662
5	0.0749	30	0.0712	70	0.0644
10	0.0742	35	0.0704	80	0.0626
15	0.0735	40	0.0696	90	0.0608
20	0.0728	50	0.0679	100	0.0589

表 1-9 20℃ 时两种介质分界面上的表面张力

场 合	温度 (℃)	表面张力 σ (N/m)	场 合	温度 (℃)	表面张力 σ (N/m)
苯-水银	20	0.375	水-四氯化碳	20	0.045
水-苯	20	0.035	水-水银	20	0.0375

不同的液体在不同的温度下具有不同的表面张力值。所以液体的表面张力都随着温度的上升而下降。几种常用液体在 20℃ 时与空气接触的表面张力列于表 1-7, 在 0~100℃ 内水与空气接触时的表面张力列于表 1-8; 在 20℃ 时两种介质分界面上的表面张力列于表 1-9。

现在进一步分析表面张力对液体自由表面两侧压强的影响。若自由表面是一个平面, 则沿着平面的表面张力处于平衡状态, 平面表面两侧的压强相等; 若自由表面是曲面, 则表面张力将使曲面两侧产生压强差 $p_1 - p_2$, 以维持平衡。

设在曲表面上取一个边长为 ds_1 和 ds_2 的微元矩形双曲面, 双曲面曲率半径各为 R_1 和 R_2 , 夹角为 $d\alpha_1$ 和 $d\alpha_2$, 作用在曲面凹面和凸面的压强分别为 p_1 和 p_2 , 如图 1-5 所示。在微元矩形双曲面两对边 ds_1 和 ds_2 上, 表面张力产生一对与边界线正交的向外力 σds_1 和 σds_2 , 则垂直于曲面的合力沿曲面法线方向的力平衡方程为

$$\begin{aligned}
 (p_1 - p_2)ds_1ds_2 &= 2\sigma ds_1 \sin \frac{d\alpha_2}{2} + 2\sigma ds_2 \sin \frac{d\alpha_1}{2} \\
 &= 2\sigma ds_1 \frac{ds_2}{R_2} + 2\sigma ds_2 \frac{ds_1}{R_1}
 \end{aligned}$$