

高等学校教材
工程流体力学

高等学校教材

工程流体力学

东北电力学院 薛祖绳 主编

水利电力出版社

高等学校教材

工 程 流 体 力 学

东北电力学院 薛祖绳 主编

水利电力出版社

高等学校教材
工程流体力学
东北电力学院 薛祖绳 主编

*

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12.5印张 279千字
1985年8月第一版 1985年8月北京第一次印刷
印数00001—9610册 定价2.60元
书号 15143·5865

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、流体动力学基础、粘性流体的流动、理想流体的流动以及气体流动的基础。此外，书中各章还讲述了有关热工测量仪表的工作原理。

本书为高等学校电厂热工测量及自动化专业以及其他相近专业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的参考书。

前 言

本教材是根据1983年1月在青岛召开的高等学校热能动力类流体力学教材编审组扩大会议上所制定的电厂热工测量及自动化专业《工程流体力学》教学大纲编写的。

工程流体力学是电厂热工测量及自动化专业的一门重要的专业基础课,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。

本教材按流体力学学科的系统性着重阐述流体的主要物理性质、流体在平衡和运动时的基本概念和基本理论。此外,根据本专业的需要,应用各章的有关理论和公式,阐明热工测量仪表的工作原理,并推导出相应的计算公式。例如:在第二章流体静力学中,阐述以重力作用下的液体平衡方程为基础的液柱式压力计;在第四章粘性流体的流动中,阐述以伯努里方程为基础的各种流量计;在第五章理想流体的流动中,根据理想流体绕圆柱体和球体无环量流动的理论,阐述三孔圆柱形和五孔球形测压管的工作原理;在第六章气体流动的基础中,应用一元定常等熵流动的基本方程和正冲波公式推导出用皮托-测压管测量超音速气流中的压力和速度公式等。

为了加深学生对基本内容的理解,培养学生分析问题和解决问题的能力,各章除编入一定数量的例题外,还在每章末编有复习思考题和习题,并附有答案。

本教材除适用于电厂热工测量及自动化专业外,也可作为化工、石油、冶金等相近专业的工程流体力学课程的教材,学时数为50。

本教材由东北电力学院薛祖绳主编、马传魁和郭春光参加编写。其中第一章和第二章由郭春光编写,第三章和第四章由马传魁编写,第五章和第六章由薛祖绳编写。山东工业大学孔珑任主审。

由于编者水平有限,本教材中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1984年10月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§ 1-1 工程流体力学在电厂热工测量及自动化专业中的应用	1
§ 1-2 流体的定义和特征 连续性假设	3
§ 1-3 流体的密度和重度	4
§ 1-4 流体的膨胀性和压缩性	6
§ 1-5 流体的粘性 牛顿内摩擦定律	9
§ 1-6 表面张力和毛细现象	14
§ 1-7 作用在流体上的力	18
复习思考题	19
习题	19
第二章 流体静力学	23
§ 2-1 流体静压力及其特性	23
§ 2-2 流体平衡微分方程 等压面	25
§ 2-3 重力作用下的液体平衡方程	27
§ 2-4 绝对压力、表压力和真空度	29
§ 2-5 液柱式测压计	30
§ 2-6 连通器	37
§ 2-7 水位计	38
§ 2-8 旋转容器中液体的相对平衡	40
§ 2-9 静止液体作用在平面上的总压力	41
§ 2-10 静止液体作用在曲面上的总压力	46
复习思考题	48
习题	49
第三章 流体动力学基础	58
§ 3-1 研究流体运动的方法	58
§ 3-2 定常流动和非定常流动	60
§ 3-3 流体动力学的几个基本概念	61
§ 3-4 流体流动的连续性方程	64
§ 3-5 理想流体的运动微分方程 皮托-静压管	67
§ 3-6 理想流体微元流束的伯努里方程	69
§ 3-7 动量方程和动量矩方程	73
复习思考题	78
习题	78
第四章 粘性流体的流动	84

§ 4-1 粘性流体总流的伯努里方程	84
§ 4-2 流体流动的两类型	88
§ 4-3 流动阻力和能量损失的两类型	92
§ 4-4 圆管中流体的层流流动	93
§ 4-5 紊流运动	97
§ 4-6 沿程阻力系数的实验研究	103
§ 4-7 非圆形管道沿程阻力的计算	109
§ 4-8 局部损失	110
§ 4-9 管道的水力计算	115
§ 4-10 节流式流量计	118
§ 4-11 用皮托-静压管测量流量	122
§ 4-12 附面层概述	126
§ 4-13 绕流物体的阻力	130
复习思考题	131
习题	132
第五章 理想流体的流动	138
§ 5-1 有旋流动和无旋流动	138
§ 5-2 速度环量和旋涡强度	140
§ 5-3 速度势和流函数	143
§ 5-4 基本的平面有势流动	146
§ 5-5 有势流动的迭加	151
§ 5-6 三孔圆柱形测压管	158
§ 5-7 五孔球形测压管	161
复习思考题	167
习题	167
第六章 气体流动的基础	170
§ 6-1 音速	170
§ 6-2 微弱扰动波在气体中的传播	172
§ 6-3 气体一元定常等熵流动的基本方程	173
§ 6-4 气体速度与通道截面的关系	176
§ 6-5 气体经渐缩喷管和缩放喷管的流动	178
§ 6-6 正冲波	183
§ 6-7 用皮托-静压管测量气流中的压力和速度	186
复习思考题	189
习题	189
参考书	192

第一章 绪 论

§ 1-1 工程流体力学在电厂热工测量及 自动化专业中的应用

现代许多工业部门都涉及到流体的问题。水泵、风机、压缩机、汽轮机、水轮机、喷气发动机等都是流体机械。火力发电厂中，在锅炉、各种热交换器及其连接的管道中，工作介质都是流体。各种机器的润滑和冷却亦多数依靠流体。图 1-1 为凝汽式燃煤电厂的生产过程示意图，煤粉和热空气自锅炉喷燃器喷入炉膛内燃烧，将水冷壁管中的水加热，使水汽化。水冷壁管中的汽水混合物上升进入汽包，在其中分离成蒸汽和水。蒸汽进入过热器，进一步被加热成高温高压的过热蒸汽，完成了煤燃烧所发生的化学能转变成蒸汽热能的过程。

过热蒸汽经主蒸汽管道送到汽轮机，在汽轮机中不断膨胀做功，流速增加，高速蒸汽冲动装在汽轮机转子上的叶片，使转子旋转，带动发电机旋转，发出交流电，完成了蒸汽的热能转变为动能、动能又转变为汽轮机旋转的机械能，机械能最后转变成电能的过程。汽轮机中排出的乏汽进入凝汽器，被冷却水冷却，凝结成凝结水。凝结水由凝结水泵升压后，通过给水管流道流经低压加热器、除氧器，再由给水泵进一步升压，经高压加热器送回锅炉中继续使用。所以，在火力发电厂中，主要的工作介质是水和蒸汽。它们在汽轮机或水泵中进行能量转换，在凝汽器、加热器和除氧器中进行热交换。

此外，用送风机经风道送空气到锅炉尾部的空气预热器中，用引风机从锅炉尾部中抽出烟气，该烟气经烟道从烟囱排入大气；锅炉的炉渣和除尘器下部的细灰用水由灰渣泵排到灰场；汽轮机、发电机各轴承的润滑用油以及汽轮机调速系统的用油来自油系统。

由此可见，在火力发电厂中庞大复杂的热力设备和管道系统内，是水、油、蒸汽、空气和烟气等流体在不断流动着。

流体力学是以水、油等液体和蒸汽、空气、烟气等气体（统称为流体）作为研究的对象。工程流体力学是研究流体的平衡和运动规律，并应用这些规律去解决实际工程问题的一门科学。工程流体力学所研究的问题与电厂的生产实际有着十分密切的关系。

因此，为保证火力发电厂的安全经济运行，就必须熟悉、掌握流体的特性和流体在各种热力设备中的平衡及运动规律；必须对各种热力设备和管道系统中流动的工作介质的温度、压力、流速和流量等参数进行严密地监测（称为热工测量），并对这些参数及时准确地进行自动控制和调节。随着电力工业生产水平的不断提高，高参数、高效率、大容量、高度自动化的汽轮发电机组和火力发电厂日益增多，对热工测量和自动化技术以及其理论基础的要求愈来愈高。

工程流体力学是电厂热工测量及自动化专业的一门重要的专业基础课。通过本课程的学习，要着重掌握流体的重要特性、流体的平衡及其运动的基本规律，掌握压力、流速和

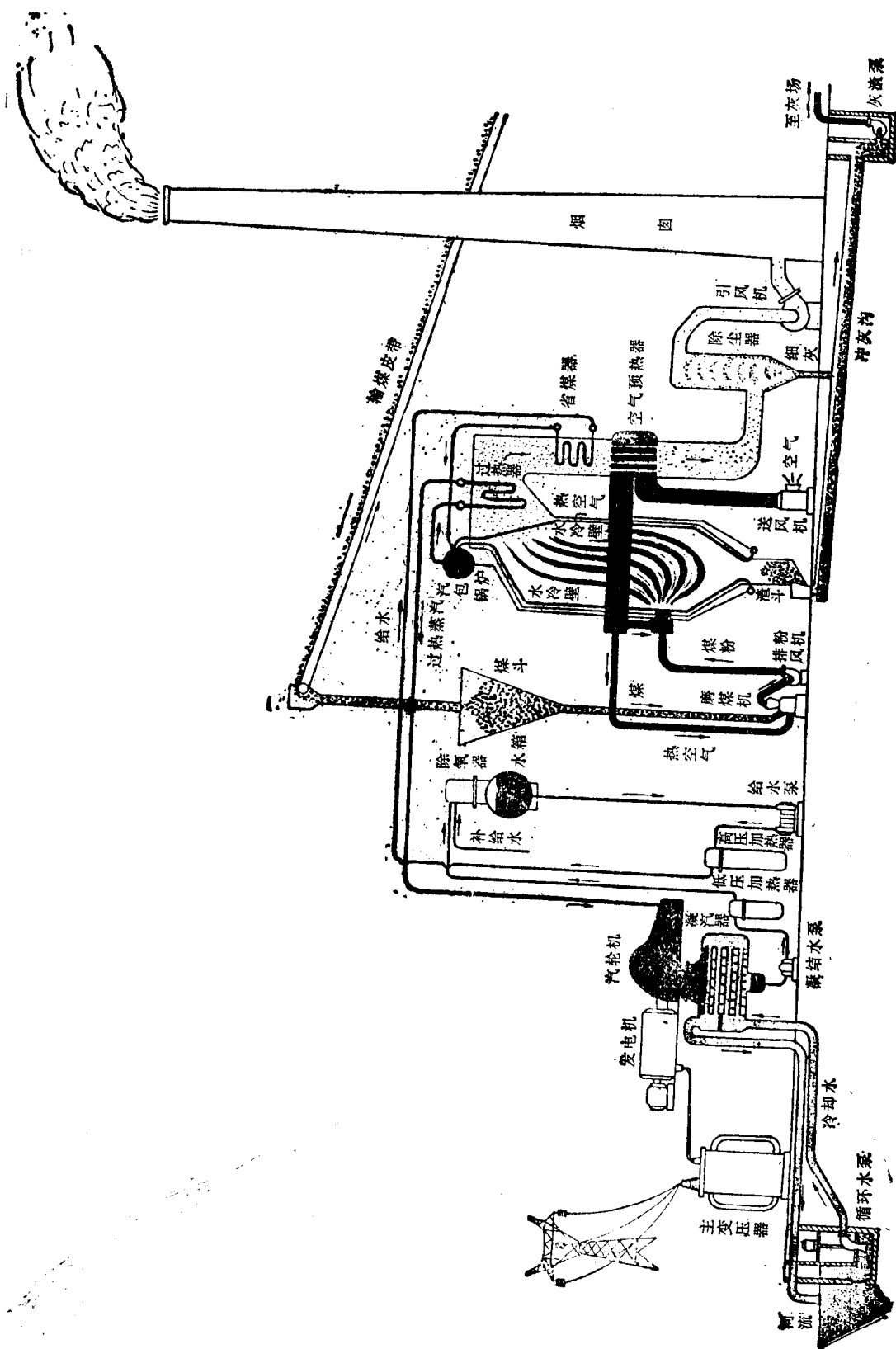


图 1-1 凝汽式燃煤电厂生产过程示意图

流量等测量仪表的结构原理并具有一定的实验和计算技能，为专业课打下理论基础。

本教材采用我国法定计量单位，它是以国际制单位（SI单位）为基础的。为了便于同以往采用的工程制单位衔接，本书仍保留了以液柱高度表示的压力单位，如 mH_2O 、 mmHg 等。表1-1为我国法定计量单位与工程制单位的对照和换算关系表。

表 1-1 中华人民共和国法定计量单位与工程制单位对照换算表

物 理 量	法 定 计 量 单 位				工 程 制 单 位		1 工程单位换成法定单位应乘的系数
	名 称	中文代号	国际代号	用基本单位表示	名 称	用基本单位表示	
长 度 L	米	米	m	m	米	m	
质 量 M	千克(公斤)	千克(公斤)	kg	kg	公斤力秒方 每米	$\text{kgf}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$	
时 间 T	秒	秒	s	s	秒	s	
温 度 K, t	开 尔 文	开	K	K	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	$1\text{K} = 273.15 + t^{\circ}\text{C}$
力 F	牛 顿	牛	N	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	公斤力	kgf	9.806
力 矩	牛 顿 米	牛·米	$\text{N}\cdot\text{m}$	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	公斤力米	$\text{kgf}\cdot\text{m}$	9.806
压力、应力	帕 斯 卡	帕	Pa	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	公斤力每 平方米	$\text{kgf}\cdot\text{m}^{-2}$	9.806
表面张力 σ	牛 顿 每 米	牛/米	N/m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	公斤力每米	$\text{kgf}\cdot\text{m}^{-1}$	9.806
密 度 ρ	千克每立方米	千克/米 ³	kg/m^3	$\text{m}^{-3}\cdot\text{kg}$	质量每立方米	$\text{kgf}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-4}$	9.806
重 度 γ	牛 顿 每 立 方 米	牛/米 ³	N/m^3	$\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	公斤力每 立方米	$\text{kgf}\cdot\text{m}^{-3}$	9.806
动力粘性 系 数 μ	帕 斯 卡 秒	帕·秒	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	公斤力秒 每平方米	$\text{kgf}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$	9.806
运动粘性 系 数 ν	平方米每秒	米 ² /秒	m^2/s	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	平方米每秒	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	
功	焦 耳	焦	J	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	公斤力米	$\text{kgf}\cdot\text{m}$	9.806
功 率 W	瓦 特	瓦	W	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$	公斤力米每秒	$\text{kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	9.806

§ 1-2 流体的定义和特征 连续性假设

物质存在的形态有三种：固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。流体受很小的剪切力作用时，将连续不断地发生变形，承受切应力，直到剪切力的作用消失为止。所以，流体不能保持一定的形状，即具有流动性。但流体在静止时，不能承受切应力。这显然与固体不同。固体在静止时也能承受切应力，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结构和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，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的共同特性外，还有如下的不同特性：

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（或称自由液面），通常称为水平面。

气体的分子距比液体的大，在 0°C ，1 个标准大气压下，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。

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，取流体微团来代替流体的分子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，因为在流体介质内含有为数众多的分子。例如，在标准状态下， 1mm^3 的气体中有 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，表征流体力学性质的密度、速度、压力和温度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。

§ 1-3 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/m^3)；

m ——流体的质量 (kg)；

$\mathcal{V}$ ——流体的体积 (m^3)。

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 $\Delta\mathcal{V}$, 该体积内流体的质量为 Δm , 则该点的密度为

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

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

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

式中 γ ——流体的重度 (N/m^3);

G ——流体的重量 (N);

$\mathcal{V}$ ——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

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

式中 $\Delta\mathcal{V}$ ——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, 流体的密度和重度之间的关系为

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

流体的密度 ρ 与地理位置无关。但由于重力加速度随地球的纬度和海拔高度而变化 (如在北纬 45° 海平面上, 重力加速度 $g = 9.80665 \text{m/s}^2$, 在中纬度附近约等于 9.81m/s^2), 故流体的重度也随地理位置的变化而变化。

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 20°C 纯水的密度或重度之比, 即

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

式中 s 为液体的比重, 是个无因次量; ρ 和 γ 分别为液体的密度和重度; $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为标准大气压下 20°C 时纯水的密度和重度。由于在标准大气压、 4°C 时, 纯水的密度等于 $1 \text{g}/\text{cm}^3$ 或 $1000 \text{kg}/\text{m}^3 = 1 \text{Mg}/\text{m}^3$, 所以物理学把液体比重定义为: 液体的密度与标准大气压下 4°C 纯水的密度之比, 而密度的单位又采用 g/cm^3 或 Mg/m^3 , 故液体的比重和密度在数值上是相同的。

气体的比重是指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。由于对压力和温度没有统一的规定, 所以在表示气体的比重时必须注明给定的压力和温度。表1-2列出了一些常用液体在标准大气压下的物理性质。表1-3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 1-2

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)	重度 γ (kN/m^3)	比重 S	动力粘度 $\mu \times 10^4$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
纯水	20	998	9.79	1.00	10.1
海水	20	1026	10.06	1.03	10.6
20% 盐水	20	1149	11.27	1.15	—
乙醇(酒精)	20	789	7.74	0.79	11.6
苯	20	895	8.78	0.90	6.5
四氯化碳	20	1588	15.58	1.59	9.7
氟利昂-12	20	1335	13.10	1.34	—
甘油	20	1258	12.34	1.26	14900
汽油	20	678	6.65	0.68	2.9
煤油	20	808	7.93	0.81	19.2
原油	20	850~928	8.34~9.11	0.85~0.93	72
润滑油	20	918	9.00	0.92	—
氢气	-257	72	—	0.072	0.21
氧气	-195	1206	—	1.21	2.8
水银	20	13555	132.96	13.58	15.6

表 1-3

在标准大气压和20 $^{\circ}\text{C}$ 常用气体物理性质

气 体	密度 ρ (kg/m^3)	重度 γ (N/m^3)	动力粘度 $\mu \times 10^5$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	气体常数 R ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	气 体	密度 ρ (kg/m^3)	重度 γ (N/m^3)	动力粘度 $\mu \times 10^5$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	气体常数 R ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
空气	1.205	11.82	1.80	287	氮	1.16	11.38	1.76	297
二氧化碳	1.84	18.04	1.48	188	氧	1.33	13.04	2.00	260
一氧化碳	1.16	11.38	1.82	297	甲烷	0.668	6.552	1.34	520
氨	0.166	1.628	1.97	2077	饱和水蒸汽	0.747	7.327	1.01	462
氢	0.0839	0.823	0.90	4120					

§ 1-4 流体的膨胀性和压缩性

一、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

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \tag{1-7}$$

式中 β_t ——流体的体积膨胀系数 ($1/^{\circ}\text{C}$)；

dt ——流体温度的增加量 ($^{\circ}\text{C}$)；

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,液体的体积膨胀系数很小,例如在 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 下,温度在 $1 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内,水的体积膨胀系数 $\beta_t = 14 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内,水的体积膨胀系数 $\beta_t = 150 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。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。其它液体的体积膨胀系数也是很小的。

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 随压力的增加稍为减小。水的 β_t 在高于 50°C 时也随压力的增加而减小,只有在低于 50°C 时 β_t 随压力的增加而增大。

在一定压力作用下,水的体积膨胀系数与温度的关系如表1-4所示。

表 1-4 水的体积膨胀系数 β_t ($1/^\circ\text{C}$)

压 力 (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

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 来表示。它表示当温度保持不变时,单位压力增量所引起流体体积的相对缩小量,即

$$\beta_p = -\frac{1}{dp} \frac{dV}{V} \quad (1-8)$$

式中 β_p ——流体的体积压缩系数 (m^2/N);

dp ——流体压力的增加量 (Pa);

V ——流体的原有体积 (m^3);

dV ——流体体积的缩小量 (m^3)。

由于压力增加时,流体的体积减小,即 dp 与 dV 的变化方向相反,故在上式中加个负号,以使体积压缩系数 β_p 永为正值。

实验指出,液体的体积压缩系数很小,例如水,当压力在 $(1 \sim 490) \times 10^7 \text{Pa}$ 、温度在 $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 的范围内时,水的体积压缩系数仅约为二万分之一,即每增加一个大气压力,水的体积相对缩小约为二万分之一。表1-5列出了 0°C 水在不同压力下的 β_p 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力的改变将发生显著的变化。对于完全气体^①,其密度与温度和压力之间的关系可用热力学中的状态方程式表示,即

① 为了与流体力学中无粘性的理想流体相区别,本书将热力学的理想气体称为完全气体。

表 1-5

0°C水在不同压力下的 β_p 值

压力 10^5Pa	4.9	9.8	19.6	39.2	78.4
$\beta_p \times 10^3 \text{N/m}^2$	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-9)$$

式中 p —— 气体的绝对压力 (Pa) ;
 ρ —— 气体的密度 (kg/m^3) ;
 T —— 热力学温度 (K) ;
 R —— 气体常数 ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$) 。

常用气体的气体常数见表1-3。

在工程上, 不同压力和温度下气体的密度和重度可按下式计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273+t} \frac{p}{760} \quad (1-10)$$

$$\gamma = \gamma_0 \frac{273}{273+t} \frac{p}{760} \quad (1-11)$$

式中 ρ_0 和 γ_0 分别为标准状态 (0 °C, 760mmHg) 下某种气体的密度和重度。如空气的 $\rho_0 = 1.293\text{kg/m}^3$, $\gamma_0 = 12.68\text{N/m}^3$; 烟气的 $\rho_0 = 1.34\text{kg/m}^3$, $\gamma_0 = 13.14\text{N/m}^3$ 。 ρ 和 γ 为在温度 t °C、压力 p mmHg下, 某种气体的密度和重度。

三、不可压缩流体的假设

由上述可知, 压力和温度的变化都会引起流体密度的变化。任何流体, 不论是气体还是液体, 都是可以压缩的。

液体的压缩性都很小, 随着压力和温度的变化, 液体的密度和重度仅有微小的变化, 在大多数情况下, 可以忽略压缩性的影响, 认为液体的密度和重度是一个常数, 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 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ 和相应的重度 $\gamma = 9806\text{N/m}^3$ 作为计算值, 这并不影响工程上精确度的要求。

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力成反比, 压力增加一倍, 体积减小为原来的一半; 当压力不变时, 温度升高 1 °C, 体积就比 0 °C 时的体积膨胀 $\frac{1}{273}$ 。所以, 通常把气体看成是可压缩流体, 即它的密度和重度不能作为常数, 而是随压力和温度的变化而变化的。

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, 在锅炉尾部烟道和通风管道中, 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。

【例 1-1】 如图1-2所示，在采暖系统顶部设置一个膨胀水箱，系统内的水在温度升高时可以自由膨胀，进入水箱。若系统内水的总体积为 8 m^3 ，温度最大升高为 50°C ，水的体积膨胀系数 $\beta_t = 0.0051/^\circ\text{C}$ ，问膨胀水箱最小应有多大的容积？

【解】 由式 (1-7) $\beta_t = \frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dt}$

则

$$d\gamma = \beta_t \gamma dt = 0.005 \times 8 \times 50 = 2 \text{ m}^3$$

【例 1-2】 体积为 5 m^3 的水，在温度不变的条件下，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 1 l ，求水的体积压缩系数值。

【解】 由式 (1-8)

$$\beta_p = -\frac{1}{\gamma} \frac{d\gamma}{dp} = -\frac{1}{(4.9 - 0.98) \times 10^5} \times \frac{-1 \times 10^{-3}}{5} = 0.509 \times 10^{-9} (\text{N/m}^2)$$

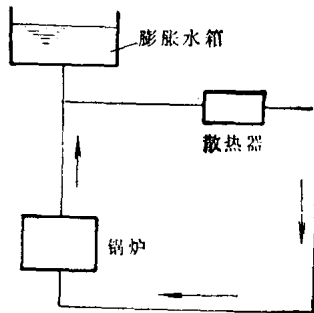


图 1-2

§ 1-5 流体的粘性 牛顿内摩擦定律

一、流体的粘性

所谓流体的粘性是指在流体内部有抗拒变形、阻碍流体流动的特性。自然界中所存在的各种流体(液体、气体)内部都有阻碍流体流动的作用，即都具有粘性。但是，不同流体的粘性是不相同的，例如，在一块平放的玻璃板上滴些水，会看到水很快地向四周流开。如果滴些油(如机油)，则油缓慢地散开。这表明了油的内部阻碍流体流动的作用比水大，即其粘性大。

现通过一个实验来进一步说明流体的粘性。将两块平板相隔一定距离水平放置，其间充满某种液体，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1-3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 跟随上板一起向右运动，

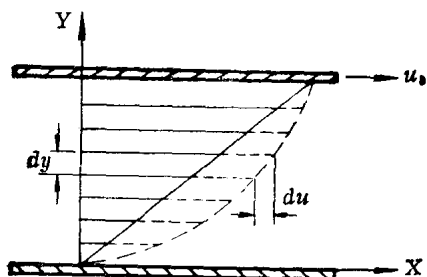


图 1-3 流体粘性实验示意

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，都作平行于平板的运动，其运动速度由上向下逐层递减，由上板的 u_0 减小到下板的零。在这种情况下，板间流体流动的速度是按直线变化的。显然，由于各流体的速度不同，流层间就有相对运动，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' ，其方向与流体流动方向相反，阻碍流

体运动，使速度较大的流体层减速。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1-3中虚线所示。

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，其数学表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

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 ($1/\text{s}$)；

μ —— 与流体的物理性质有关的比例系数，称为动力粘性系数或动力粘度，简称为粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

流体的动力粘性系数 μ 是衡量流体粘性大小的物理量。从式(1-12)可知，当 $\frac{du}{dy} = 0$ 时，内摩擦力等于零。所以，当流体处于静止状态或以相同速度运动（流层间没有相对运动）时，流体的粘性就表现不出来。

流层间单位面积上的内摩擦力称为切应力。其表达式为

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

流体粘性随压力和温度的变化而变化。在通常的压力下，压力对 流体的粘性影响很小，可忽略不计。在高压下，流体（包括气体和液体）的粘性随压力升高而增大。流体的粘性受温度的影响很大，而且液体和气体的粘性随温度的变化是不同的。液体的粘性随温度升高而减小，气体的粘性随温度升高而增大。造成液体和气体的粘性随温度不同变化的原因是由于构成它们粘性的主要因素不同。分子间的吸引力是构成液体粘性的主要因素，温度升高，分子间的吸引力减小，液体的粘性降低；构成气体粘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，气体的粘性也就越大。

在研究流体流动问题和推导流体运动规律公式时，常常同时存在粘性力和惯性力，粘性力与动力粘度 μ 成正比，而惯性力与密度 ρ 成正比。因此比值 $\frac{\mu}{\rho}$ 经常出现在公式中。为了方便起见，以 ν 来表示其比值，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-14)$$

式中 ν —— 运动粘性系数或运动粘度 (m^2/s)。

常用液体和气体的动力粘度见表1-2和表1-3。表1-6和表1-7分别给出了水和空气不同