

目 录

前言

第一章 绪论

§ 1.1 工程流体力学研究对象及其在电厂热动专业上的应用	(1)
§ 1.2 流体作为连续介质的假设	(3)
§ 1.3 流体的主要物理性质	(4)
§ 1.4 作用在流体上的力	(14)
§ 1.5 单位与量纲	(15)
思考题	(17)
习题	(17)

第二章 流体静力学

§ 2.1 流体静压力及其特性	(19)
§ 2.2 流体的平衡微分方程式及等压面	(20)
§ 2.3 重力作用下流体静力学基本方程式	(23)
§ 2.4 绝对压力、表压力及真空	(25)
§ 2.5 静力学基本方程式的应用	(26)
§ 2.6 液体的相对平衡	(33)
§ 2.7 静止液体作用在平面及曲面上的总压力	(37)
思考题	(45)
习题	(46)

第三章 流体动力学基础

§ 3.1 研究流体运动的两种方法	(52)
§ 3.2 流体运动的基本概念	(54)
§ 3.3 流体运动的连续性方程	(58)
§ 3.4 理想流体的运动微分方程	(61)
§ 3.5 理想流体的伯努里方程	(63)
§ 3.6 伯努里方程的应用	(66)
§ 3.7 相对运动的伯努里方程	(69)
§ 3.8 粘性流体的伯努里方程	(70)
§ 3.9 动量方程和动量矩方程及其应用举例	(77)
思考题	(82)
习题	(83)

第四章 管道流动与管道阻力计算

§ 4.1 流体运动的两种状态——层流及紊流	(90)
------------------------------	------

§ 4.2	圆管中的层流流动	(93)
§ 4.3	圆管中的紊流流动	(96)
§ 4.4	沿程损失与沿程阻力系数	(102)
§ 4.5	局部损失	(108)
§ 4.6	管道计算	(116)
§ 4.7	水击简介	(119)
§ 4.8	相似理论简介	(122)
§ 4.9	汽蚀简介	(125)
§ 4.10	两相流简介	(125)
思考题		(127)
习题		(128)
第五章 理想流体的旋涡运动及平面势流		
§ 5.1	流体微团(质点)的变形和旋转	(133)
§ 5.2	旋涡运动的基本概念	(139)
§ 5.3	旋涡运动的基本性质	(144)
§ 5.4	速度势函数及其特性	(150)
§ 5.5	流函数及其特性	(153)
§ 5.6	平面势流的几种基本解	(156)
§ 5.7	平行流绕圆柱体流动	(161)
§ 5.8	绕叶型、叶栅的流动——儒可夫斯基公式	(168)
思考题		(172)
习题		(173)
第六章 粘性流体的绕物体流动		
§ 6.1	粘性流体的运动微分方程(纳维尔——斯托克斯方程)	(177)
§ 6.2	边界层的基本概念	(181)
§ 6.3	边界层基本微分方程	(183)
§ 6.4	边界层动量积分关系式	(185)
§ 6.5	平板边界层的近似计算	(187)
§ 6.6	边界层的分离和物体阻力	(193)
§ 6.7	绕圆柱体流动卡门涡街	(196)
§ 6.8	绕小圆球流动的阻力	(198)
§ 6.9	自由淹没射流	(201)
思考题		(210)
习题		(211)
第七章 气体动力学基础		
§ 7.1	气体动力学基本方程	(213)
§ 7.2	音速与马赫数	(214)
§ 7.3	一元定常等熵流动的能量方程	(216)

§ 7.4	气流速度与通道形状的关系	(220)
§ 7.5	渐缩喷管与拉伐尔喷管	(221)
§ 7.6	微弱扰动波的传播	(224)
§ 7.7	膨胀波与压缩波	(226)
§ 7.8	冲波的基本概念	(228)
§ 7.9	喷管在不同背压下的工作状况	(233)
§ 7.10	压缩性对伯努里方程应用的影响	(234)
思考题		(235)
习题		(236)

第一章 绪论

本章将阐述的内容是学习流体力学这门课程所必须了解和掌握的基本概念。它阐明了工程流体力学的研究对象及在电厂热能动力专业中的应用,阐述了流体的定义、特性及流体作为连续介质的假设,流体的主要物理性质等内容;分析了作用在流体上的力。对流体力学中所采用的单位制也作了介绍。其中流体的连续介质假设和流体的粘性等概念是本章讨论的主要内容。

§ 1.1 工程流体力学研究对象及其在电厂热动专业上的应用

一般而言,自然界中的物质可以按其存在的物理形式分为固体、液体和气体。我们知道,液体或气体与固体之间有着较大的差别。无论是液体还是气体,当受到剪切应力的作用时,它们都有一种明显的反应形式——流动,因此液体和气体又被统称为流体。工程流体力学就是以流体为研究对象,主要研究流体处于平衡和运动、流体与固体之间相互作用的力学规律以及如何在工程实际中应用这些规律的一门学科。

流体力学所研究的问题,广泛涉及到许多工程技术领域。在城市给水、排水和采暖通风等建筑行业,在液压传动和液体输送等机械行业,在飞机和飞行器的设计制造等航空航天业,在船舶运输、石油开采、冶金化工、生物海洋乃至现代医学等各行各业都有大量的流体力学问题存在。同样地,流体力学与火力发电厂的生产实际也有着直接而紧密的联系。

在火力发电厂中,热能动力装置的主要工作介质是水、水蒸汽、空气、烟气和油等流体。图1-1是火力发电厂生产流程简图。燃料即煤粉与风机送来的热空气经锅炉喷燃器喷入炉膛内进行燃烧,燃料的化学能转变为热能而形成高温烟气。锅炉水冷壁管中的水吸收炉膛热量而不断被汽化,生成的水蒸汽被送进过热器继续吸热变为高温高压的过热蒸汽,过热蒸汽经过主蒸汽管道送入汽轮机中膨胀做功,使蒸汽的热能转变为使汽轮机轴旋转的机械能,并带动发电机的转子转动而产生了电能。与此同时,在汽轮机中做功后的乏汽排入凝汽器,被冷却为凝结水。凝结水经水泵升压后送入各级加热器进一步升温升压,然后送进锅炉再次使用,这就完成了能量转换的整个循环。可见,在发电厂的主要热力设备及复杂的管路系统中都有水、水蒸汽、烟气、空气等流体在不断地流动和工作着,而研究这些流体的流动规律正是流体力学所涉及的内容。

流体力学对流体流动又分为管流、射流、绕流等三种不同形式的流动进行研究。例如,电厂中水蒸汽等流体在传输管道中的流动及烟气、空气在烟、风道中的流动是管流问题;燃料和热空气的混合物经锅炉喷燃器喷射到炉膛中燃烧是射流问题;蒸汽在汽轮机中绕叶栅流动及水泵、风机中的流体绕过叶型流动等则是绕流问题。因此说,流体力学问题普遍存在于电厂的生产实际之中,这就使工程流体力学这门课程成为电厂热能动力专业的主要基础课之一,所以学好工程流体力学是非常重要的。

学习工程流体力学应着重掌握基本概念和基本原理,掌握流体平衡和运动的基本规律,

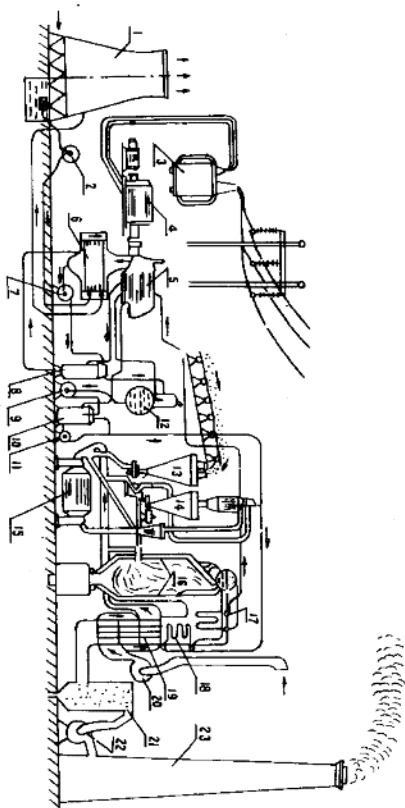


图 1-1 凝汽式火力发电厂生产流程简图

- 图1-1 冷水塔 2. 循环水泵 3. 变压器 4. 发电机 5. 汽轮机 6. 凝汽器
7. 凝结水泵 8. 低压加热器 9. 给水泵 10. 高压加热器 11. 疏水泵 12. 除氧器 13. 厚煤仓
14. 煤粉仓 15. 球磨机 16. 水冷壁 17. 过热器 18. 省煤器 19. 空气预热器 20. 送风机
21. 除尘器 22. 引风机 23. 烟囱

要弄清推导各主要计算公式的前提条件、适用范围和各种系数的确定方法,继而较熟练地进行基本运算。要能够结合电厂的生产实际进行学习。总之,学好工程流体力学不仅可以为学习专业课奠定基础,同时也为今后从事生产实践与科研工作做好必要的准备。

本教材共有七章内容,各章分别讲述了流体及其物理性质,流体静力学,流体动力学基础,粘性流体的管道流动及其阻力计算,旋涡运动和平面势流,粘性流体的绕流及气体动力学基础等内容。

§ 1.2 流体作为连续介质的假设

§ 1.2.1 流体的定义与特性

流体具有这样的特性,即使受到非常微小的剪切力的作用,也会发生连续不断的变形,承受着切应力,且这种变形不能停止。可见流体不能抵抗哪怕是很微小的剪切力的作用,这就使得流体本身不能保持一定的形状,流体的这个特性被称为流动性。由于气体和液体都具备这种特性,故气体和液体均被称为流体。固体的情形就不同了,固体在受到一定的外力作用时,仅发生一定量的变形,且只要作用力保持不变,变形量的大小就不再改变。因此固体没有易流动的特性。

从力学观点看,固体能够抵抗压力、拉力和剪切力,而流体只能抵抗压力,不能抵抗拉力和剪切力。由于流体有了上述易流动抗压力的特性,使得它能便于用管道或槽道进行输送,并可承受高压而进入热力设备(如汽轮机)中做功。

流体与固体的特性有所不同之主要原因在于流体与固体的分子结构和分子间的作用力存在不同之处。流体与固体相比其分子间的距离较大,分子间的吸引力较小,且分子运动剧烈使其易于产生流动。不论是气体还是液体都具有这个共同的特性。但气体与液体还具有如下不同之特性。

液体和气体分子的有效直径大小没有显著差异,但在相同质量时气体所占的体积大约为液体所占体积的 1000 倍,可见气体分子间的距离很大,而液体的分子间距离相对要小得多。

在常温常压下,气体的分子距大约是分子直径的 10 倍左右,分子间的吸引力可认为是微不足道的。当气体分子间距缩小很多时分子之间才产生相互排斥力,这就使得气体的收缩性比较大,通常称气体为可压缩的流体。另一方面,气体分子除与容器壁面及自身发生相互碰撞外,还可以自由运动。故无论盛装气体的容器体积有多大,气体总能充满它所能到达的容器中的全部空间,且没有自由分界面,其形状取决于容器的形状。

液体则不然。当对液体施加压力时,由于液体分子距很小,只要液体分子距稍有减小,分子间排斥力就会随之增大以抵抗外界压力的作用,这说明液体的分子间距离很难缩小,这就使液体不易被压缩,故通常又称液体为不可压缩流体。另一方面,由于分子间的相互作用,液体总是力求自身表面积收缩到最小的程度。所以,一定质量的液体在容器中只能占据一定的空间,不一定会充满容器,未充满容器时可在液体上部保持一个自由分界面。这样,液体的形状也取决于盛装它的容器的形状。

§ 1.2.2 流体作为连续介质的假设

从微观角度来看,任何流体都是由大量的分子所组成的,在分子与分子之间有空隙存在,因此流体并不是质量连续分布的物质。但是流体力学所要研究的是无数个分子所组成的宏观流体在受外力作用下进行宏观机械运动的问题,而不是研究个别分子的微观运动问题。即:我们采用大量分子的行为和作用的统计平均值来作为宏观流体的物理量。而宏观流体模

型的建立就是基于流体的连续性概念。

在流体力学中,取包含着许多分子而体积无穷小的流体微团去代替流体分子作为研究流体的基本微元。在工程上1立方毫米的体积被认为是宏观上很小的体积,可在标准状态(0°C,1个标准大气压)下,1立方毫米的体积中约包含 2.7×10^{18} 个气体的分子,约包含 3×10^{17} 个液体的分子。由此可见,如果选取的流体微团的宏观尺寸极其微小,其中包含着大量的分子数目的话,就可以不去考虑分子间存在的空隙,而将整个流体视为由无限多连续分布的流体微团所组成的连续介质了。这就是流体的连续介质的假设学说。一般而论,我们所面对的问题的特性尺寸远远大于流体的分子平均自由程,这就使我们有理由将流体作为宏观的连续介质,而不必再去研究流体的微观分子运动了。

把流体作为连续介质处理后,表征流体物理属性的各物理量(如密度、速度、温度、压力等)在流体中也应该是连续分布的,使各物理量成为空间坐标和时间的单值连续可微函数,进而可以采用微积分等数学手段对流体静止及运动规律进行研究。

这里应该说明,流体的连续介质假设只是相对的。它对于绝大部分的工程技术问题是正确的,但对某些问题却不适用。例如:在空气非常稀薄的场合,气体分子间的距离与所涉及的设备的特性尺寸可以相比拟时就不能把流体视为连续介质了。这种情况需用稀薄分子动力学或分子动力学等微观方法进行研究。又比如象航天器在地球外层空间飞行及高真空技术等问题也均属此例。

流体的连续性概念使我们对实际问题的分析研究得到了简化。本教材只讨论连续介质的力学规律。

§ 1.3 流体的主要物理性质

研究流体力学的问题时,必然会涉及到流体的许多基本属性及表征这些基本属性的物理量,诸如质量、重量、压力、密度、重度、压缩性、膨胀性、粘性、粘度以及牛顿内摩擦定律等等,对流体的这些主要物理性质作一正确的了解和掌握,是学习流体力学这门课程的重要基础。

§ 1.3.1 流体的密度和重度

流体是一种物质,它具有一定的质量和重量,流体力学中以流体的密度和重度来分别表征流体的质量和重量。

流体力学中把单位体积的流体所具有的质量定义为流体的密度,用符号 ρ 来表示。如果流体中各点的密度均匀相等则称之为均质流体。而流体中各点密度不相等时称之为非均质流体。对于均质流体及非均质流体其密度的表达式有以下两种形式。

均质流体的密度等于流体的质量与体积的比值,即:

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

上式中 ρ ——流体的密度, (kg/m³);

m ——流体的质量, (kg);

V ——流体的体积, (m³)。

非均质流体的密度 ρ 用下式表示:

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

上式中 dm —流体中任意一点处微元流体的质量；

$d\gamma$ —质量为 dm 的微元流体所占体积。

流体力学中把单位体积内流体所具有的重量定义为流体的重度，用符号 γ 来表示。

均质流体的重度 γ 可用下式计算

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

上式中 γ —流体的重量，(N/m³)

G —流体的重量，(N)

γ —流体的体积，(m³)

非均质流体的重度 γ 用下式表示

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

上式中 dG —流体中任意一点处微元流体的重量；

$d\gamma$ —重量为 dG 的微元流体所占体积。

由于地球引力的作用，质量为 m 的均质流体所产生的重量 G 可用下式计算： $G=mg$ ，取 $g=9.806\text{m/s}^2$ 。

上式两端均用体积 γ 相除则可得到密度 ρ 与重度 γ 之间的关系式

$$\gamma = \frac{G}{\gamma} = \frac{m}{\gamma} g = \rho g \quad (1-5)$$

由式(1-5)可见，流体的重度是其密度的 g 倍， g 为重力加速度。密度是只随流体的种类、温度及压力变化而变化的物理量，而重度则不同，它不仅随流体的种类、温度及压力的不同而发生变化，而且还随着流体所处的地理位置的不同而发生变化。这主要是重力加速度 g 与地球的纬度和海拔高度有关。通常，在地理位置相差不大时，流体重度因重力加速度的变化而产生的较小变化可以忽略不计。

比重是指某种液体的密度(或重度)与标准大气压下 4℃ 纯水的密度(或重度)之比，若用 S_d 表示比重则有以下式

$$S_d = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} = \frac{\gamma}{\gamma_{H_2O}} \quad (1-6)$$

上式中 S_d —液体的比重，无量纲；

ρ_{H_2O} 、 γ_{H_2O} —标准大气压下 4℃ 纯水的密度、重度。标准大气压值为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 或 760mmHg 。 $\rho_{H_2O}=1000 \text{kg/m}^3$ ， $\gamma_{H_2O}=9806 \text{N/m}^3$ 。

比重是无量纲量，学习时应注意比重与密度或重度在概念上的区别。

表 1-1 中所列数据是工程上一些常见气体在标准大气压下的物理性质。

表 1-2 中所列数据是工程上常见液体在标准大气压下的物理性质。

表 1-1 标准大气压下常见气体的物理性质

气体名称	温度 C	密度 kg/m ³	重度 N/m ³	分子量	气体常数 R kJ/kgK
空气	0	1.293	12.68	28.97	0.287
	20	1.205	11.82		
氧	0	1.429	14.02	32.00	0.260
	20	1.331	13.05		
氮	0	0.0899	0.881	28.016	0.124
	20	0.084	0.824		
氩	0	1.251	12.28	39.94	0.207
	20	1.165	11.42		
甲烷	0	0.70167	7.028	16.043	0.520
	20	0.668	6.35		
一氧化碳	0	1.2504	12.26	28.01	0.297
	20	1.165	11.42		
二氧化碳	0	1.977	19.39	44.00	0.189
	20	1.842	18.06		
饱和水蒸汽	0	0.804	7.88	18.00	0.462
	20	0.747	7.367		

表 1-2 标准大气压下常见液体物理性质

液体名称	温度 C	密度 ρ kg/m ³	重度 γ kN/m ³	比重 S_g
纯水	4	1000	9.806	1
	20	998	9.79	1
海水	20	1025	10.06	1.03
汽油	20	678	6.65	0.68
石油	15	880~890	8.63~8.77	0.88
润滑油	20	915	9.00	0.92
氟里昂-12	20	1335	13.10	1.34
酒精	20	785	7.74	0.79
汞(水银)	0	13540	134	13.6
	20	13550	132.92	13.56

〔例 1—1〕 在标准大气压下即 $p=1.013 \times 10^5 \text{Pa}$, 温度为 20°C 的水银比重是 $S_d=13.56$, 温度为 4°C 纯水的密度是 $\rho_{H_2O}=1000 \text{kg/m}^3$ 。试计算纯水的重度 γ_{H_2O} 及水银的密度 ρ 、重度 γ 。

〔解〕纯水在 4°C 时的重度可用式 (1-5) 计算

$$\gamma_{H_2O} = \rho_{H_2O} g = 1000 \times 9.806 = 9806 \text{N/m}^3$$

水银的密度 ρ 、重度 γ 可用式 (1-6) 计算。

$$\rho = S_d \rho_{H_2O} = 13.56 \times 1000 = 13560 \text{kg/m}^3$$

$$\gamma = \rho g = 13560 \times 9.806 = 132969 \text{N/m}^3$$

§ 1.3.2 流体的压缩性和膨胀性

同一种流体有着这样的物理性质,在不同的压力作用下或者在不同的温度条件下其所占有的体积都会发生变化。在温度不变条件下,如果压力的增加使流体所占有的体积减小,这种性质称为流体的可压缩性;反之,在压力不变的条件下,如果温度的升高使流体所占有的体积增大,这种性质则被称为流体的膨胀性。在压缩性和膨胀性这两种流体性质上,液体和气体有着较大的差异。

流体压缩性的多少,用体积压缩系数 β_v 来表示,它是指在温度不变时压力每升高一个单位(即 1Pa)流体体积的相对缩小量,单位为 m^3/N 或 $1/\text{Pa}$ 。

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

上式中 β_v —体积压缩系数;

dp —压力增加量, $(\text{N/m}^2 \text{ 或 } \text{Pa})$;

dV —流体体积的缩小量, (m^3) ;

V —流体原有的体积, (m^3) 。

由上式可见,当压力变化一个单位时,流体的体积变化率越小,则流体的体积压缩系数 β_v 值越小,这说明该流体不易被压缩。在上式中由于压力变化量 dp 与体积变化量 dV 的变化方向相反,为了使 β_v 取正值在式中加一个负号。

表 1-3 中列出了水在 0°C 和 20°C 时的体积压缩系数 β_v 的数值。

表 1-3 水在 0°C 和 20°C 时体积压缩系数 β_v 的数值 $(\times 10^6, \text{m}^3/\text{N})$

压力 $\times 10^{-4} \text{Pa}$	4.9	9.81	19.61	39.23	78.45
温度 $^\circ\text{C}$					
0	0.593	0.537	0.531	0.523	0.515
20	0.515	0.505	0.495	0.481	0.461

由上表可见,当压力变化范围较大时,水的体积压缩系数 β_v 值仅有很小的变化。

流体膨胀性的多少,用体积膨胀系数 β_t 来表示,它是指在压力不变的条件下,温度每增加一个单位(即 1°C)流体体积的相对增加量,用下式表示

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-8)$$

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

dt —温度增加量, $(^\circ\text{C})$;

dV —流体体积的增加量, (m^3) ;

$\mathcal{V}$ —流体原有体积, (m³)。

表 1-4 中列出了水的体积膨胀系数 β_v 的值。

由表 1-4 可以看出, 水的体积膨胀系数值很小, 即使是在很大的压力下, 温度升高 1℃ 时流体体积变化率只有万分之几。例如在 $882 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的高压下, 温度为 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 的范围内, 水的体积膨胀系数仅为万分之三左右。实际上, 其它的液体也如此, 它们的体积膨胀系数均较小。

表 1-4 水的体积膨胀系数 β_v 值 ($\times 10^{-4}, 1/^\circ\text{C}$)

温度 $^\circ\text{C}$ 压力 $\times 10^5 \text{ Pa}$	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.98	14	150	422	556	719
98	43	165	422	548	704
196	72	183	426	539	—
490	149	236	429	523	661
882	229	289	437	514	621

〔例 1-2〕 在一个长为 0.8m, 直径为 0.4m 的密闭油缸中盛满某种油, 且油缸一端有一可以移动的活塞。缸内油的体积压缩系数为 $0.76 \times 10^{-9} 1/\text{Pa}$, 在温度不变条件下推动活塞, 使油压升高了 $19.8 \times 10^5 \text{ Pa}$, 问油的体积会减少多少 m³?

〔解〕 未加压之前油缸内油的体积为

$$\mathcal{V} = \frac{\pi}{4} d^2 L = \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 \times 0.8 = 0.1 \text{ m}^3$$

由式(1-7)知,

$$\begin{aligned} \beta_v &= -\frac{1}{\mathcal{V}} \frac{d\mathcal{V}}{dp} \\ d\mathcal{V} &= -\beta_v dp = -0.76 \times 10^{-9} \times 0.1 \times 19.8 \times 10^5 \\ &= -1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

负号表明体积是缩小的, 即缸内油体积减小了 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。

〔例 1-3〕 在一个密封的容器中盛有 0.8m³ 的水, 当水温由 15°C 升到 60°C 时水的体积增加了 0.015 m^3 。试求水的体积膨胀系数 β_v 。

〔解〕由式(1-8)得:

$$\begin{aligned} \beta_v &= \frac{1}{\mathcal{V}} \frac{d\mathcal{V}}{dt} = \frac{1}{0.8} \times \frac{0.015}{45} \\ &= 4.17 \times 10^{-4} 1/^\circ\text{C} \end{aligned}$$

§ 1.3.3 可压缩流体与不可压缩流体

由流体的压缩性可知, 任何流体都是可以压缩的, 但各种流体的可压缩程度有着差异。通常说来, 液体的可压缩性比较小, 气体的可压缩性比较大。

实验指出, 当压力增加 $9.8 \times 10^5 \text{ Pa}$ (即一个工程大气压) 时, 水的体积变化率小到只有万分之一。这表明水的可压缩性非常小。在分析和解决工程实际问题时, 常常由于水或其它液体的可压缩性较小而把水或其它液体当作不可压缩流体。这样处理的结果使液体由于体积的微小变化而引起的流体密度的微小变化可以忽略不计, 近似认为液体的密度和重量是

常数。这样可以使工程计算得到大大地简化,而由此造成的误差则完全可以略而不计。

从前面的表 1-1 和表 1-2 中可以看出,气体的密度与液体的密度相比要小得多。以标准大气压下温度为 20℃ 的纯水和空气的密度为例进行比较如下:

流体名称	温度	密度	比容
纯 水	20℃	998kg/m ³	1.002×10 ⁻³ m ³ /kg
空 气	20℃	1.205kg/m ³	829.3×10 ⁻³ m ³ /kg

可见在相同质量的气体与液体相比时气体将占有更大的体积,因此,随着压力和温度的变化气体所占有的体积将发生显著的变化,这个特点说明了气体是具有可压缩性的。工程实际中通常将气体作为可压缩流体来处理,尤其是在流速较高、压力变化较大的场合,气体体积的变化不容忽视,必须把气体的密度作为变数对待而不能作为常数对待。当把某流体作为不可压缩流体时其可压缩性系数 β , 等于零。

但是,在工程实际问题上将流体视为可压缩流体还是不可压缩流体不能一概而论。对某些特定场合下的问题还应该具体分析和对付,有时可以简化处理,有时则不可以。例如,在标准大气压下空气流速达到 68m/s 时,若将空气作为不可压缩流体对待,对计算结果引起的相对误差只有百分之一,这在工程计算上一般是允许的。这时对不可压缩流体得出的各种结论均可应用到这种条件下的空气流动问题中去。在锅炉的通风管道和尾部烟道中,气体在整个流动过程中风速只有 10~20m/s,压力和温度的变化也不大,这时,也可将其作为不可压缩流体来处理,使分析和计算都得到简化。但是,在研究水下爆破和管道中水击现象时,由于水的压力在短时间内急剧变化,而由此带来的水的密度变化则是不容忽略的,这时水不能再当作不可压缩流体来对待了,而必须作为可压缩流体来对待,否则将会得出错误的结论。

总之,一切流体无论是气体还是液体都是可以压缩的,这一点是真实的、绝对的。不可压缩流体只是一种人为的假设,是相对的。由于这样的假设给分析问题带来了很大的方便,所以工程流体力学中常常用类似的方法来对待工程实际问题的简化处理,由此而带来的误差很小,而得出结论的途径却简便得多。

§ 1.3.4 流体的粘性

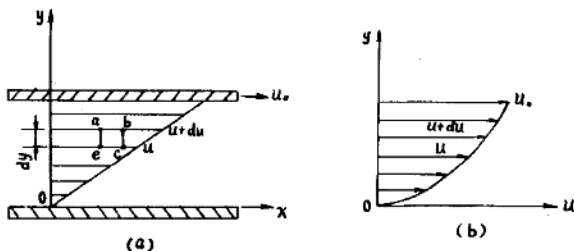


图 1-2 流体粘性示意图



流体在流动时,因流体与固体壁面间有附着力,且流体本身之间有分子运动和分子内聚力等缘故,使得流体在流动时各流层间流动速度产生差异,现将两块相互平行的平板水平放置,如图 1-2(a)所示。在平板间充满某流体,设下面平板固定不动,拉动上面平板以速度 u_0 向右平移。这时贴近两平板表面的流体必附着于平板上,紧贴上板的一薄层流体将以与平板相同的速度 u_0 随平板右移。而紧贴下板的一薄层流体将与下板一样固定不动,流速为零。平板间各层流体的流速将由上向下逐层递减,按照直线规律变化着。可见,运动较快的流体层可以带动运动较慢的流体层,反之运动较慢的流体层又阻滞运动较快的流体层,使不同速度的流体层之间产生一种互相制约的切向作用力。由于这种情形类似于固体摩擦过程产生的摩擦力,因此被称之为流体的内摩擦力(也称为粘滞力)。流体流动时质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力的性质就称为流体的粘性。

虽然流体的粘性是流体内部抗拒相对运动的性质,但它并不能从根本上阻止流动的产生,流体的流动特性也就不因为内摩擦力的存在而消失了。当流体没有质点间相对运动时(如流体静止时),内摩擦力才消失,流体也不表现出粘性。

粘性是流体的一个重要物理性质,不同流体的物性各不相同,粘性也各不相同。

在上述实验中流体流动速度沿 y 方向呈直线规律变化,但在通常情况下并不是这样的。一般而论,流体流动速度不按直线关系变化而按曲线规律变化,如图 1-2(b)所示。

§ 1.3.5 牛顿内摩擦定律

在图 1-2(a)所示的运动流体中取一微元矩形 $abce$ 。若 ce 层流体流速为 u , ab 层流体流速为 $u+du$,则层间流速变化量为 du 。当两流体层之间的垂直距离为 dy 时,称垂直于速度方向的速度变化率 $\frac{du}{dy}$ 为速度梯度。速度梯度的物理意义讨论如下:

将图 1-2(a)中微元矩形 $abce$ 放大示于图 1-3 中。经 dt 时间后, a, b, c, e 各点分别运动到 a', b', c', e' 处。 ab 流层移动距离为 $(u+du)dt$, ce 流层移动距离为 $u dt$ 。矩形 $abce$ 经 dt 时间后的剪切变形角度为 $d\theta$ 。 ab 和 ce 两流层间的相对位移为

$$fa' = (u+du)dt - udt = dudt$$

由三角形 $a'e'f$ 中关系又可知

$$fa' = dy \tan(d\theta)$$

$$\text{因此 } dy \tan(d\theta) = dudt$$

即

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

对微小角变形量可取 $\tan(d\theta) \approx d\theta$

则

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt}$$

上式中 $\frac{d\theta}{dt}$ 是流体发生剪切变形的角速度, $\frac{du}{dy}$ 是速度梯度。由此可得出结论:速度梯度实质上就是粘性流体运动时的剪切变形角速度。



经过实验,牛顿指出当粘性流体发生剪切变形时,其内部产生的阻滞变形的内摩擦力 T 的大小与速度梯度(即剪切变形角速度)成正比,与接触面积成正比,与流体的物理性质有关,这些就是牛顿内摩擦定律的内容。

将牛顿内摩擦定律写成数学表达式为

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

单位面积上的内摩擦力用 τ 表示,称为切应力。即:

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

上两式中各项意义如下

(1) T —内摩擦力, (N)

(2) A —流层间接触面积, (m^2);

(3) $\frac{du}{dy}$ —速度梯度,与剪切变形速度 $\frac{d\theta}{dt}$ 相等, ($1/s$);

(4) τ —切应力, (N/m^2) 切应力不仅有大小也有方向,它与剪切变形的角速度成正比,故 τ 又称为剪切应力。

(5) μ —比例系数称为动力粘度, ($Pa \cdot s$ 或 $N \cdot s/m^2$)

动力粘度 μ 与流体种类及物理性质有关,同一种流体的动力粘度 μ 随温度和压力而变化,不同种流体具有不同的动力粘度值。

在流体力学的运算中还经常出现流体动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值,为了方便运算用 ν 来表示 μ 与 ρ 的比值, ν 定义为流体的运动粘度。

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

工程中常见液体和气体的动力粘度随温度的变化关系分别列于表 1-5 和表 1-6 中。其它常见气体和液体的动力粘度和运动粘度随温度的变化关系可参见图 1-4 和图 1-5 中的曲线。

表 1-5 水的粘度与温度关系表

温度 °C	密度 kg/m ³	动力粘度 $\mu \times 10^3$ N·s/m ²	运动粘度 $\nu \times 10^4$ m ² /s
0	999.8	1.781	1.785
5	1000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.307
15	999.1	1.129	1.140
20	998.2	1.002	1.004
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.798	0.893
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.554

温度 ℃	密度 kg/m ³	动力粘度 $\mu \times 10^3$ N · s/m ²	运动粘度 $\nu \times 10^6$ m ² /s
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

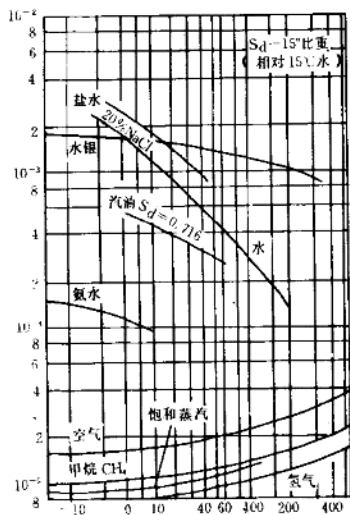


图 1-4 流体的动力粘度

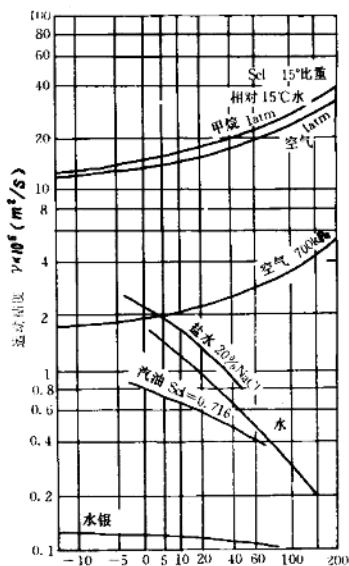


图 1-5 流体的运动粘度

表 1-6 空气在标准大气压下粘度与温度关系表

温度 C	密度 kg/m ³	动力粘度 $\mu \times 10^5$ N · s/m ² 或 Pa · s	运动粘度 $\nu \times 10^5$ m ² /s
40	1.515	1.49	0.98
20	1.395	1.61	1.15
0	1.293	1.73	1.32

温度℃	密度 kg/m ³	动力粘度 $\mu \times 10^3$ N·s/m ² 或 Pa·s	运动粘度 $\nu \times 10^5$ m ² /s
10	1.248	1.76	1.41
20	1.205	1.81	1.50
30	1.165	1.86	1.60
40	1.128	1.90	1.68
50	1.128	1.90	1.68
60	1.060	2.00	1.89
80	1.000	2.09	2.09
100	0.946	2.18	2.30
200	0.747	2.58	3.45

对上述图或表中数据进行观察会发现,在一定压力下液体和气体粘度随温度变化而变化的趋势是不一样的。例如表 1—5 中水的粘度值随着温度的升高呈现递减趋势;而表 1—6 中空气的粘度随着温度的升高呈现递增的趋势,产生这种差异的原因是构成两种流体粘性的微观原因不同。对液体来说,构成粘性的主要原因是分子间距加大时产生的吸引力。当温度升高时,分子间引力减小,液体的粘性便下降,粘度值减小。对于气体来说,构成粘性的主要原因是气体分子的不规则热运动而产生的动量交换。温度升高时气体分子的热运动增强,不同速度分子层之间的动量交换加大,因而气体的粘性也就增大,粘度值增加。另一方面,流体在不同的压力作用下粘性要发生变化。但在常压下,压力对流体动力粘度 μ 值的影响很小,可以忽略不计。在高压下,流体的粘性将随压力的升高而增大。

流体的粘度不能直接测量,工业上常用工业粘度计来间接测量流体的粘度,所用的粘度计种类较多。如我国多采用恩格勒(Engler)粘度计。美国采用 Saybolt 粘度计,英国采用 Redwood 粘度计,苏联和德国也采用恩格勒粘度计。用恩格勒粘度计测出的液体粘度称为恩氏度用符号 E 表示。恩氏度可以用下面的半经验公式换算为运动粘度。

$$\nu = (0.0731E - \frac{0.0631}{E}) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

用恩格勒粘度计测流体粘度的方法可参阅其它有关书籍。

应该指出,应用牛顿内摩擦定律时需要注意两个问题:

1. 只有满足牛顿内摩擦定律的流体才能应用。我们把满足牛顿内摩擦定律的流体即作用在流体上的切应力 τ 与它引起的剪切角速度(速度梯度)之间存在线性关系的流体称为牛顿流体。把不满足牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。自然界中有少数流体属于非牛顿流体,如融化的塑料浆、血浆、沥青等,它们的剪应力 τ 与剪切角速度 $\frac{d\theta}{dt}$ (或速度梯度 $\frac{du}{dy}$) 之间的关系是非线性的函数关系。非牛顿流体是流变学的研究对象,对化工、食品、医疗等部门有重要意义。

2. 只有流体流速较缓慢、流体分层流动时才能应用牛顿内摩擦定律。如流体质点作杂乱无章的紊乱运动则不能应用。

〔例 1—4〕 将两块薄平板平行放置于 20℃ 的水中,两平板相距 0.5mm。在其中一块平板上施加以 1.2N/m^2 的作用力使其移动,而另一块板则不动,试计算上面一块平板的移动速度。

【解】查表 1-5 知 20℃ 水的动力粘度为 $\mu = 1.002 \times 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{s})$

由式 (1-10) 得:

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

$$du = \frac{\tau}{\mu} dy = \frac{1.2 \times 0.5 \times 10^{-3}}{1.002 \times 10^{-3}} = 0.6 \text{ m/s}$$

上面平板以 0.6 m/s 速度移动。

§ 1.3.6 粘性流体与理想流体

从流体的物理性质可以知道,所有流体都具有粘性,都是粘性流体(也称为实际流体),而没有粘性的流体(即所谓理想流体)只是一种假设,在自然界并不存在。引进理想流体的概念主要是对于研究流体运动规律会带来很大方便。因此,通常先来研究理想流体的运动,而不考虑流体的粘性可以很容易地得到一些运动规律,然后再应用于粘性流体的运动,并对由于粘性的影响造成的误差用实验结果进行修正,使之与粘性流体流动的实际情况相符,其实在工程实际问题中,也有许多场合下粘性流体的粘性作用表现不出来或影响较小而可以忽略不计。例如流体相对静止或流体质点匀速直线运动时其粘性就表现不出来,把粘性流体当作理想流体来对待甚至不会引起任何误差。

§ 1.4 作用在流体上的力

作用在流体上的力是引起流体运动状态发生变化的原因,因此要研究流体的相对静止和运动规律,就必须研究流体的受力情况。可将作用在流体上的所有力归纳为表面力和质量力两大类。

§ 1.4.1 表面力

在流体中取出任意一块体积为 V 的流体,这部分流体的表面积用 A 表示,如图 1-6 所示。由流体的连续介质假设可知,表面积为 A 的流体被四周流体所包围,并与周围流体相互接触,周围的流体(或固体)将通过接触表面与所取流体产生相互作用力。例如摩擦力、压力等等。这些力只与接触表面有关,故称这些力为表面力。表面力与流体的质量或体积无关。若在体积为 V 的流体上围绕 a 点取一微元面积 ΔA ,则周围流体作用在其上的表面力即为 ΔF ,按表面力作用在表面上的方向不同,又可将表面力 ΔF 分解为垂直于表面 ΔA 的法向力 ΔF_n 和与表面相切的切向力 ΔF_t 。为了方便在单位面积上流体所受的法向表面力称为压力,用 p 表示;单位面积上的切向表面力称为切向应力用 τ 表示。则流体表面 a 点上的平均压力 p_a 和平均切应力 τ_a 可用下列两个式子表示。

$$p_a = \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad (1-12)$$

$$\tau_a = \frac{\Delta F_t}{\Delta A} \quad (1-13)$$

上式中 p_a —流体表面某点的平均压力, $\text{Pa} (\text{N/m}^2)$ 。

τ_a —平均切应力, (N/m^2)

流体中某定点处的压力和切应力的数学式可表达成: