

高等学校教材

流体力学

(航海类专业用)

© 俞嘉虎 主编

人民交通出版社

高等学校教材

LiuTi LiXue

流体力学

(航海类专业用)

俞嘉虎 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本教材内容所研究的对象主要是液流,并且偏重于其在工程实际中的各方面应用,故也称为工程流体力学。

本书是为高等学校(包括职业技术学院)航海类各专业,如航海技术(内河)、轮机工程、港航监督、船舶设计与制造、船舶机械及动力装置以及船舶检验等专业(主要指高职高专或应用型本科)而编写的少学时教材。

全书分为两篇共九章,内容包括第一篇流体力学基础理论:绪论、流体静力学、一元流动的基本方程与相似理论、流动型态与水头损失;第二篇专题部分:孔口、管嘴和管路的水力计算、液体的节流与缝隙流动、机翼理论基础知识、明渠水流、波浪理论简介等。

选用本书时,各专业可根据教学大纲要求,对所要讲授的章节进行适当的取舍。

本书也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 / 俞嘉虎编. —北京: 人民交通出版社,
2002. 8
ISBN 7-114-04417-8

I.流... II.俞... III.流体力学 IV.035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 059479 号

高等学校教材

流 体 力 学

(航海类专业用)

俞嘉虎 主编

正文设计: 王静红 责任校对: 刘高彤 责任印制: 张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京明十三陵印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12 字数: 289 千

2002 年 11 月 第 1 版

2002 年 11 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—4000 册 定价: 24.00 元

ISBN 7-114-04417-8

U · 03257

前 言

大力发展各种学历层次的高等教育,以满足经济发展和社会进步对各类人才的需要,是新世纪我国教育战线的重要任务。

目前,教学改革不断深入,存在将专才培养变为通才(大类)培养的趋势,这就要求教材基础性强,专业面宽,理论与实践结合较好。本书力求突出大类中各专业的应用特点,并把握好“必需”和“够用”的原则,紧扣大纲,深广度适中,在讲清概念的前提下尽量通俗,并便于自学,同时重视学生能力和实际技能的培养。

本书的第一篇内容是航海类各专业学生的必学部分,而第二篇的专题部分则根据各专业需要而选择。为了巩固理论、联系实际和培养分析能力,各章选编了例题和一定数量的思考题、习题,以便选用。

本书由俞嘉虎主编,由重庆交通学院沈希杰副教授主审,并提出了宝贵的意见和建议。编写过程中曾得到各级主管领导和同行们的热情支持,谨在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,加之时间仓促,书中缺点和错误在所难免,恳切读者批评指正。

编 者

2001年11月

目 录

第一篇 基础理论部分

第一章 绪论	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 流体的基本特性和主要物理性质	1
§ 1-3 连续介质和理想流体的概念	10
§ 1-4 作用于流体上的力	10
思考题	11
习题	11
第二章 流体静力学	12
§ 2-1 流体静压强及其特性	12
§ 2-2 静止流体的平衡微分方程式	15
§ 2-3 流体静压强的基本方程	16
§ 2-4 流体静压强的表示方法	17
§ 2-5 连通器内液体的平衡、等压面	20
§ 2-6 水头与比势能	21
§ 2-7 流体静压强的量测	23
§ 2-8 流体静压强分布图	27
§ 2-9 作用在平面壁上的流体总静压力	28
§ 2-10 作用于曲面壁上的流体总静压力	33
§ 2-11 作用于物体上的流体总静压力,潜体、浮体的平衡及其稳定性	38
§ 2-12 重力和惯性力同时作用下的液体相对平衡	43
思考题	45
习题	46
第三章 一元流动的基本方程式与相似理论	50
§ 3-1 流体动力学的基本概念	50
§ 3-2 恒定流的连续方程式	56
§ 3-3 恒定流微小流束的能量方程式	58
§ 3-4 渐变流、急变流及其特性	61
§ 3-5 恒定总流的能量方程式	63
§ 3-6 能量方程式的工程应用举例	68
§ 3-7 恒定流的动量方程式	73
§ 3-8 恒定流动量方程式的工程应用举例	77

§ 3-9	流体相对运动的能量方程式	82
§ 3-10	液体的曲线运动	83
§ 3-11	量纲分析和相似理论	86
* § 3-12	理想流体空间流动及平面流动的一般概念	93
	思考题	94
	习题	95
第四章	流动型态和水头损失	98
§ 4-1	流动阻力与水头损失的分类	98
§ 4-2	流体流动的两种型态	100
§ 4-3	均匀流沿程水头损失与切应力的关系	103
§ 4-4	圆管层流的沿程水头损失计算	106
§ 4-5	紊流结构及其特征	107
§ 4-6	紊流时沿程阻力系数的变化规律	109
§ 4-7	局部水头损失的计算	116
§ 4-8	边界层理论简介	120
	思考题	124
	习题	124

第二篇 专题部分

第五章	孔口、管嘴和管路的水力计算	126
§ 5-1	孔口、管嘴计算概述	126
§ 5-2	薄壁孔口的恒定自由出流	126
§ 5-3	圆柱形外伸管嘴的恒定自由出流	127
§ 5-4	薄壁孔口的非恒定自由出流	128
§ 5-5	管路计算概述	130
§ 5-6	长管的水力计算	130
§ 5-7	短管的水力计算	132
§ 5-8	水泵装置的水力计算	133
§ 5-9	压力管路中的水击现象	134
	思考题	139
	习题	139
第六章	液体的节流与缝隙流动	139
§ 6-1	油液流经小孔的流量计算	140
§ 6-2	油液流经缝隙的流量计算	142
	思考题	145
	习题	145
第七章	机翼理论基础知识	145
§ 7-1	机翼及其几何要素	145
§ 7-2	二元机翼的升力理论	146

§ 7-3 机翼的动力特性	150
§ 7-4 有限翼展机翼简介	151
思考题	152
第八章 明渠水流	153
§ 8-1 明渠的类型及其对水流运动的影响	153
§ 8-2 明渠水流的三种流态	155
§ 8-3 泥沙运动概述	158
§ 8-4 河流中的副流	161
§ 8-5 弯道水流	165
§ 8-6 科里奥里斯惯性力对河道演变的影响	169
思考题	171
习题	172
第九章 波浪理论简介	172
§ 9-1 波的形成	173
§ 9-2 波浪的几何要素	174
§ 9-3 船行波与兴波阻力	176
思考题	179
主要参考文献	181

第一篇 基础理论部分

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学。它可分为理论流体力学和工程流体力学,我们学习的是工程流体力学。这门课研究的对象就是流体,流体包括液体和气体,所以水、汽油、滑油、空气、蒸汽等等都是流体力学的研究对象。

我们学习这门课的任务是应用流体力学的基本理论,加上实验数据以及经验公式来解决工程中的实际问题。

流体力学的内容包括两个基本部分:流体静力学和流体动力学。前者研究流体在静止(或相对平衡)状态下的力学规律;后者研究流体流动时的运动规律。

流体力学在水利、机械、冶金、化工、石油、城建等部门中,有广泛的应用。航运部门也不例外,如舰船与水相互作用所体现出的浮性、稳性、抗沉性、速航性、摇摆性和操纵性,舰船驾驶员对航道及水性的理性认识,这些都离不开流体力学的知识,轮机中用各种泵来输送、排放各种液体(如水、滑油、液压油等),用风机来输送、排放气体(如空气、废气等),其工作原理和工作情况无不与流体的平衡规律、运动规律有关。可见,流体力学是交通系统航海类专业一门重要的基础课。

§ 1-2 流体的基本特性和主要物理性质

流体力学所研究的流体是处于静止状态还是处于运动状态,都是由于受到不同的外力作用,以及流体本身的内在性质所决定的,所以我们必须对流体的基本特性和物理性质有所了解。

一、流体的基本特性

我们知道,自然界中物质存在于三种状态:固体、液体和气体。我们把液体和气体统称为流体。流体与固体的基本区别在于:固体有一定的形状,而流体没有一定的形状,很容易流动,其形状随容器而变。流体易于流动的原因是:其分子间距离较大,内聚力很小,分子间相互移动和形状改变非常容易,只要有极小的外力作用包括自身重力的作用,就可能发生变形(或流动),几乎没有抵抗变形的能力,所以表现为极易流动。换句话讲,固体有抗拉、抗压、抗切的能力,而流体则不同,要把流体拉开,几乎不用费力。流体抗切的能力也很小,静止流体不能承受

切力,只有流体运动时才有微小的抗切能力来抵抗剪切变形(这就是我们后面要讲到的粘滞性)。至于抗压,流体是能够承受压力的,液体的这种抗压能力很大;而气体则小得多,但还是能承受一定压力的,这种抗压能力的不同也是液体和气体的区别之一。区别之二是液体有一定的体积,在容器内有自由表面,而气体则没有自由表面,它力求占据尽可能大的容器空间,弥漫在其中。

二、流体的主要物理性质

1. 流体的密度与容重

任何物质都具有惯性,惯性就是物体保持原有运动状态的特性,或物体企图保持速度不变的顽强性。

由物理学可知,物体的惯性大小可由质量来度量,质量愈大,惯性就愈大,就愈难改变其平衡和运动状态。

对于均质流体,单位体积的质量称为流体的密度,用字母 ρ 表示。

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

式中: ρ ——流体的密度;

V ——流体的体积;

M ——流体的质量。

流体与固体一样,受地球引力作用,具有重量。对于均质流体,单位体积的重量称为流体的容重,也称重度,用字母 γ 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中: γ ——流体的容重;

V ——流体的体积;

G ——流体的重量。

由物理学可知

$$G = Mg$$

上式两边同除以体积 V ,

$$\frac{G}{V} = \frac{M}{V}g$$

即:

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中: g ——重力加速度,取 $g = 9.8$ 米/秒²(m/s^2)。

公式(1-3)表明,流体的容重等于流体的密度与重力加速度的乘积。如已知容重,也可据式(1-3)求得密度。

密度和容重都是有单位的物理量。在国际单位制中, γ 通常也可以 ρg 表示。

不同的流体,其密度和容重是不同的。当温度和压力不同时,流体的体积要发生变化,所以同种流体的密度和容重随温度和压力而变化。但对于工程中常涉及的流体来说,这种变化很小,一般可看作常数。一个标准大气压下,水在不同温度时的密度和容重,见表 1-1。

在工程上一般认为水的密度 ρ 和容重 γ 变化不大,常取 4℃ 蒸馏水的 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $\gamma = 9800\text{N}/\text{m}^3$ 作为其日常计算值。

标准大气压下不同温度时水的密度和容重

表 1-1

$t(^{\circ}\text{C})$	0	4	10	20	40	60	80	100
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.87	1000.00	999.75	998.26	992.35	983.38	971.94	958.65
$\gamma(\text{N}/\text{m}^3)$	9798.73	9800.00	9797.54	9782.95	9725.03	9637.12	9525.01	9394.77

在一个标准大气压下测定的几种常见的流体密度列于表 1-2。

几种常见流体的密度

表 1-2

流体的种类	温度 $t(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	流体的种类	温度 $t(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$
海水	15	1020 ~ 1030	重油	20	980
润滑油	15	890 ~ 920	水银	0	13600
液压油	15	860 ~ 900	酒精	15	790 ~ 800
柴油	20	840 ~ 900	空气	0	1.293
汽油	15	700 ~ 750	二氧化碳	0	1.977

例题 1-1: 试求在标准状态下, 2L(升)空气的重量为多少?

解: 根据式(1-2), $\gamma = \frac{G}{V}$

则: $G = \gamma V$

又据式(1-3), $\gamma = \rho g$

则: $G = \rho g V$

查表 1-2: 空气 $\rho = 1.293$

所以: $G = \rho g V = 1.293 \times 9.8 \times 0.002 = 0.0253\text{N}$

例题 1-2: 按表 1-2, 已知水银的密度, 试求其容重。

解: 据式(1-3), $\gamma = \rho g$

查表: 水银的 $\rho = 13600\text{kg}/\text{m}^3$

所以: 水银的容重 $\gamma = \rho g = 13600 \times 9.8 = 133280\text{N}/\text{m}^3$

例题 1-3: 体积为 60L 的油箱装满了油, 油的重量为 500.43N。求油的容重 γ 和密度 ρ 。

解: 根据式(1-2), $\gamma = \frac{G}{V} = \frac{500.43}{0.06} = 8345\text{N}/\text{m}^3$

根据式(1-3), $\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{8345}{9.8} = 852\text{kg}/\text{m}^3$

2. 流体的粘滞性

凡流体都具有流动性, 而流动就是发生了切向变形。但各种流体的流动性可以有很大的差别。例如日常生活中, 从瓶里倒水或油, 可以看到水和油的流动速度不同。用通俗的话讲, 水比油稀些, 而油则比水稠些。不管是水或是油, 其流动过程均是克服其内部和与瓶壁间的阻滞作用的过程。

流体在运动状态下具有抵抗剪切变形的物理性质, 叫流体的粘滞性。流体在静止时不能承受切力抵抗剪切变形(一旦发生剪切变形, 静止状态即遭破坏), 但在运动状态下, 具有抵抗剪切变形的能力。有了粘滞性的概念, 我们就可以讲水与油相比, 水容易发生切向变形, 它的粘滞性就小, 而油的粘滞性就大。流体的粘滞性主要由流体的内聚力引起。所有流体都有不

同程度的粘滞性,它是流体流动时产生阻力的内因。这种阻力是一种切向力,当流体内部发生相对变形即剪切变形时,这种内部出现的切向力(又称内摩擦力),将抵抗流体内部的相对运动,从而影响流体的运动状态。可见,粘滞性是影响流体运动的一个重要因素。

假定两块平行板,其间充满液体,下板 A 静止不动,上板 B 则以匀速度 u_0 向右移动,如图 1-1a) 所示。由于粘滞作用,与上下两板相邻的极薄水层将粘附在板上,与板保持同样的运动状态,即最上层水以 u_0 速度向右移动;最下层水则静止不动。而这两层水也在运动中影响相邻水层。也就是说第一层水将通过粘滞(摩擦)作用影响第二层水的流速,第二层水又通过粘滞作用而影响第三层水,如此逐渐影响下去,所以中间的水层分别以不同的速度分层运动。可见平板通过液体的粘滞性而对液体运动起阻滞作用。如果某层水以 u 速度流动,相邻 dn 处的上层水则以 $u + du$ 的速度流动,既然速度不同,就产生了相对运动,相邻接触面上有内摩擦力出现,相互阻滞,相互制约,流得快的水层对流得慢的水层起拖动作用,而快层作用于慢层的摩擦力与流向一致,反之慢层对快层起阻滞作用,则慢层作用于快层的摩擦力与流向相反,见图 1-1b)。这种内摩擦力就是粘滞力。单位面积上的粘滞力我们叫粘滞切应力,用 τ 表示。可见

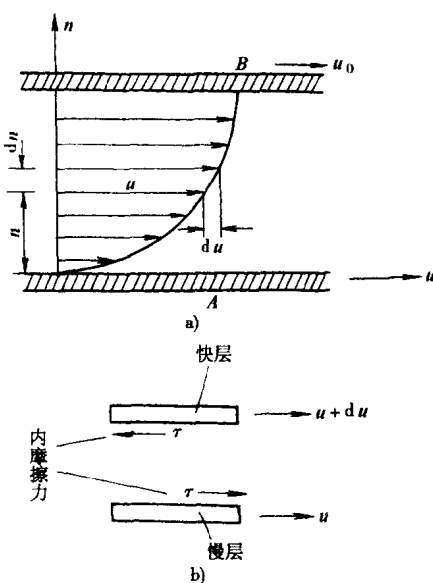


图 1-1

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1-4)$$

式中: F ——流体的粘滞力,或流体层接触面上的内摩擦力(N);

A ——流层间的接触面积。

根据牛顿内摩擦定律:作层流运动的流体,相邻流层间单位面积所作用的内摩擦力与流速梯度成正比,同时与流体的性质有关。

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} \quad (1-5)$$

式中: $\frac{du}{dn}$ ——流速梯度,是沿垂直流动方向上各流层流速的相对改变率,显然流速梯度较大的地方,切应力 τ 也较大;

μ ——比例系数,称为流体的动力粘滞系数,它与流体的性质有关,流体不同则 μ 值不同。

切应力 τ 与动力粘滞系数 μ 永远是正值,而 $\frac{du}{dn}$ 可能是正值也可能是负值。当 $\frac{du}{dn}$ 为负值时,在式(1-5)中右边应加“-”号。

关于牛顿内摩擦定律要说明一点,对于某些特殊液体(如泥浆、胶状液体、接近凝固的石油等)是不适用牛顿内摩擦定律的。为了区别,把符合牛顿内摩擦定律的液体叫“牛顿液体”,反之称为“非牛顿液体”,而即便对于牛顿液体,也仅仅是对液体作层流运动时才满足牛顿内摩擦定律。

关于式(1-5)中各项的单位,流速梯度 $\frac{du}{dn}$ 为 $[1/s]$,切应力 τ 为 $[N/m^2]$ 或 $[Pa]$ 。所以

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{\left[\frac{du}{dn}\right]} = \frac{N/m^2}{1/s} = N/m^2 \cdot s = Pa \cdot s$$

在流体力学中,粘滞性除以动力粘滞系数 μ 表示外,还常以运动粘滞系数 ν 来表示。它是动力粘滞系数 μ 与流体密度 ρ 的比值。即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$

$$[\nu] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{kg/m \cdot s}{kg/m^3} = m^2/s$$

从单位来看 ν ,不包含力的单位,是一个运动学的要素,所以叫运动粘滞系数。

温度对流体的粘滞性影响很大,温度升高,液体的粘滞性减弱,粘滞性系数降低,流动速度加快。从瓶中往外倒食油,夏天比冬天要快些,这就说明了温度对液体粘滞性的影响。但对气体则相反,即温度升高,其粘滞性增强。为什么温度变化对液体和气体的影响不同呢?从分子运动来解释,液体和气体均由大量分子组成,分子间存在着内聚力。液体和气体比较,液体分子之间间距较小,对液体的内摩擦力起决定性作用的是分子间的内聚力。当温度升高时,分子之间的距离变大,内聚力相应变小,因而粘滞性下降。对气体来讲,对气体的内摩擦力起决定作用的不是内聚力,而是相邻流层间分子动量的交换,温度升高,则气体分子的运动速度加快,动量的交换增多,各流层之间的制动作用加大,因而粘滞性增大。

液体粘滞性随温度升高而降低的特性,对船舶主辅机燃油输送和提高它的雾化质量,起到了积极作用。但这个特性对主辅机、水泵、风机等转动机械轴承的润滑,在温度超过 $60^\circ C$ 时,将起消极的作用。因为润滑油温度超过 $60^\circ C$ 时,由于粘滞性的降低,妨碍润滑油膜的形成,造成轴承温度升高,甚至会发生轴瓦烧毁的事故。因此,轴承温度一般都保持在 $60^\circ C$ 以下。

在正常压强下,不同温度的水的运动粘滞系数可按下式求得:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad cm^2/s \quad (1-7)$$

在标准大气压下,不同温度的空气的运动粘滞系数可按下式求得:

$$\nu = 0.132(1 + 0.00329t + 0.0000017t^2) \quad cm^2/s \quad (1-8)$$

以上两式中: t ——温度($^\circ C$)。

为了便于实际应用,不同温度时水和空气的运动粘滞系数 ν 值可查阅表 1-3 和表 1-4。

水在正常压强下,不同温度时的 ν 值

表 1-3

温度 ($^\circ C$)	运动粘滞系数 (cm^2/s)	温度 ($^\circ C$)	运动粘滞系数 (cm^2/s)	温度 ($^\circ C$)	运动粘滞系数 (cm^2/s)	温度 ($^\circ C$)	运动粘滞系数 (cm^2/s)
0	0.0179	7	0.0143	14	0.0118	40	0.0066
1	0.0173	8	0.0139	15	0.0115	50	0.0055
2	0.0167	9	0.0135	16	0.0112	60	0.0048
3	0.0162	10	0.0131	17	0.0109	70	0.0042
4	0.0157	11	0.0127	18	0.0106	80	0.0037
5	0.0152	12	0.0124	20	0.0101	90	0.0033
6	0.0147	13	0.0121	30	0.0081	100	0.0030

空气在标准大气压下,不同温度时的 ν 值

表 1-4

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	运动粘滞系数 (cm^2/s)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	运动粘滞系数 (cm^2/s)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	运动粘滞系数 (cm^2/s)
0	0.1370	40	0.1760	80	0.2170
10	0.1470	50	0.1860	90	0.2290
20	0.1570	60	0.1960	100	0.2378
30	0.1660	70	0.2045	120	0.2620

通常,液体的动力粘滞系数 μ 和运动粘滞系数 ν ,采用间接测定的方法,结合系数间的换算关系而得出。如液压油用粘度计测得的数值叫相对粘度。各国采用的相对粘度单位有所不同,美国用赛氏粘度 Say. s,英国用雷氏粘度 Rs,我国和德国、俄罗斯用恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$ 。

恩氏粘度的测定是利用恩氏粘度计。图 1-2 所示的恩氏粘度计,是由两个同心安置的黄铜容器 1 和 2 组成。容器 1 的球形底部中心有一个小管嘴 3。管嘴的孔口用具有锥形顶部的针杆 4 塞住。在容器 1 和 2 之间的空间内充以水。通常用加热器加热,并用恒温设备保持被测液体所需的温度。先测出在一定温度下(利用温度计 5 测得),从恩氏粘度计管嘴 3 的孔口流出 200cm^3 的液体所需的时间 t ,然后再测定 20°C 同体积水的流出时间 t_0 。 t 与 t_0 的比值称为恩氏粘度,并以 $^{\circ}\text{E}$ 表示。即:

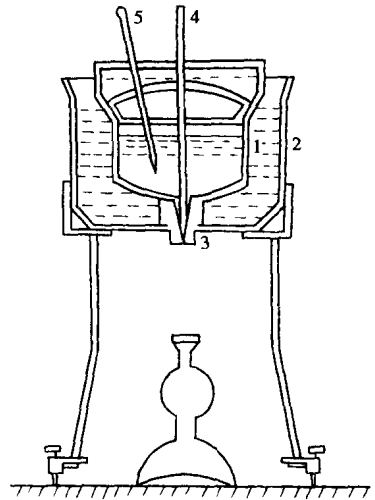


图 1-2

$$^{\circ}\text{E} = \frac{t}{t_0} \quad (1-9)$$

恩氏粘度 $^{\circ}\text{E}$ 与运动粘滞系数 ν 、动力粘滞系数 μ 之间的换算关系如下:

$$\nu = 0.0731^{\circ}\text{E} - \frac{0.0631}{^{\circ}\text{E}} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (1-10)$$

$$\mu = 0.0067^{\circ}\text{E} - \frac{0.0058}{^{\circ}\text{E}} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (1-11)$$

例题 1-4:某输油管直径 $d = 5\text{cm}$,管中流速分布的方程式为 $u = 0.5 - 800n^2(\text{m/s})$,已知靠近管壁单位面积上的粘滞力 $\tau = 43.512\text{N/m}^2$,试求该液体的动力粘滞系数 μ (n 为管子轴心至管壁距离,以 m 计)。

解:以管子中心轴为横坐标表示流速 u ,垂直中心轴沿管径方向的轴为纵坐标表示长度 n ,绘制流速分布图 $u = 0.5 - 800n^2$,得曲线 $u - n$,如图 1-3 所示。

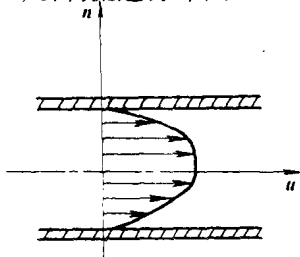


图 1-3

求流速梯度时,对曲线方程 $u = 0.5 - 800n^2$ 进行求导。即:

$$\frac{du}{dn} = -1600n$$

靠近管壁处, $n = \pm 2.5\text{cm} = \pm 0.025\text{m}$ 代入上式得:

$$\frac{du}{dn} = \mp 1600 \times 0.025 = \mp 40 \text{ 1/s}$$

不论 $\frac{du}{dn}$ 正负如何, τ 和 μ 只能为正数。

按题意管壁处 $\tau = 43.512\text{N/m}^2$

所以油的动力粘滞系数

$$\mu = \tau \frac{1}{\frac{du}{dn}} = 43.512 \times \frac{1}{40} = 1.0878\text{Pa} \cdot \text{s}$$

例题 1-5: 图 1-4 所示为一轴和滑动轴承, 间隙 $\delta = 0.1\text{cm}$, 轴的转速 $n = 180\text{r/min}$, 轴直径 $D = 15\text{cm}$, 轴承宽度 $b = 25\text{cm}$, 求所消耗的功率? 润滑油的 $\mu = 0.245\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

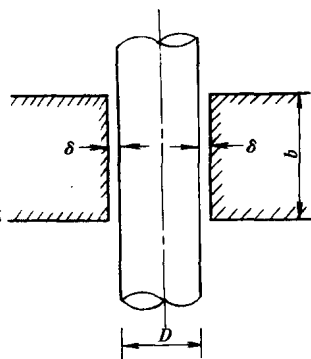


图 1-4

解: 轴表面的圆周速度

$$u = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3.14 \times 0.15 \times 180}{60} = 1.415\text{m/s}, \text{因油层很薄, 故可取}$$

$$\frac{du}{dn} = \frac{u}{\delta} = \frac{1.415}{0.001} = 1415\text{l/s}$$

则内摩擦力为:

$$T = \mu A \frac{u}{\delta} = 0.245 \times 3.14 \times 0.15 \times 0.25 \times 1415 = 40.82\text{N}$$

滑动轴承所消耗的功率为:

$$\begin{aligned} N = M\omega &= T \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{2\pi n}{60} = 40.82 \times \frac{0.15}{2} \times \frac{2 \times 3.14 \times 180}{60} \\ &= 57.82\text{W} \end{aligned}$$

例题 1-6: 试按经验公式求水在 20°C 时的运动粘滞系数。

解: 根据式(1-7), 水在 20°C 时的运动粘滞系数。

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{0.01775}{1 + 0.0337 \times 20 + 0.000221 \times 20^2} \\ &= 0.0101\text{cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

3. 流体的压缩性与膨胀性

当温度保持不变, 流体所受压强增大时, 体积会缩小的性质称为流体的压缩性。

当压强保持不变, 流体的温度升高时, 体积会增大的性质称为流体的膨胀性。

下面分别对液体和气体加以说明。

(1) 液体的压缩性

液体压缩性的大小, 用体积压缩系数 β 表示。体积压缩系数是液体体积的相对缩小值与压强的增值之比。若某一液体在承受压强为 p 的情况下, 其体积为 V , 当压强增加 dp 后, 体积缩小 dV , 其体积压缩系数为:

$$\beta = - \frac{dV}{V dp} \quad (1-12)$$

式中负号是考虑到压强增大, 体积缩小, 所以 dV 与 dp 始终是反号的(dp 为正则 dV 为负, dp 为负则 dV 为正), 为保持 β 为正数, 加一个负号。 β 值愈大, 则液体压缩性亦愈大。其常用单位是 m^2/N 。

体积压缩系数的倒数称为弹性系数, 以符号 E_0 表示, 单位为 N/m^2 。

$$E_0 = \frac{1}{\beta} \quad (1-13)$$

根据实测,在常温下水的体积压缩系数随压强的变化很小,一般 $\beta = 4.93 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$, 即 $E_0 = 2.03 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。

例题 1-7: 试求在常温下,水的压强从 $9.8\text{N}/\text{cm}^2$ 增加到 $980\text{N}/\text{cm}^2$ 时,水的体积缩小多少?

解: 从题意知 dp 为正, dV 则为负。

根据式(1-9)水的体积缩小百分比

$$\frac{-dV}{V} = -\beta dp$$

所以
$$\frac{dV}{V} = \beta dp = 4.93 \times 10^{-6}(980 - 9.8) = 0.48\%$$

通过计算,说明液体的压缩性很小,压强从 $9.8\text{N}/\text{cm}^2$ 增加到 $980\text{N}/\text{cm}^2$ (即 100 倍),水的体积减小不到 0.5%。所以在实际工程中,往往不考虑液体的压缩性,而把它看作不可压缩的流体,但对个别特殊情况(如水击现象),就必须考虑压缩性。

(2) 液体的膨胀性

液体的膨胀性很小。例如水在温度增加 1°C 的情况下,体积只增加万分之五,所以在一般的温度变动下,液体的密度和容重改变很小,可以看为常数,而不考虑膨胀性,这样既简化了问题,也具有足够的精确性。

(3) 气体的压缩性和膨胀性

对于气体来说,随着压强与温度的改变,气体的体积有较大变化,因而容重或密度也有较大变化。当温度一定时,气体的体积与压强成反比,压强增加一倍,气体的体积减小为原来的一半;当压强一定时,温度每升高 1°C ,体积就比 0°C 时的体积增大 $1/273$ 。

气体是可以压缩或膨胀的,但有时气体在压强和温度不变或变化很小的情况下,容重或密度仍然可以看作常数,这种气体称为未压缩气体,如大气层的中空气。而将气体受到压缩或膨胀后,容重已经不能看作常数的气体称为压缩气体。

我们主要考虑未压缩气体。特别是当气体流速远比音速为小时,在运动过程中其密度变化很小(例如在标准状态下,在地球表面附近的气流速度为 $50\text{m}/\text{s}$ 时,密度仅增加 1%),气体也可视为不可压缩。这样,从宏观看,液体和气体就没有什么大的区别了,液体的各项基本规律都可以应用到气体流动中去,如船舶通风等问题,可以把气体当作不可压缩流体处理。

4. 液体的表面张力特性

在液体的自由表面上,由于自由表面两侧分子引力不平衡,使自由表面上液体分子受有极其微小的拉力,这种表面上所受的拉力称为表面张力。表面张力仅在自由表面存在,液体内部并不存在,所以它是一种局部受力现象。一般说来这种微弱的拉力对液体的宏观运动不起作用,可以不予考虑。但对实际装置中的测压管来说,由于表面张力的影响使测压管中的液面和与之相连通的容器中的液面不在同一水平面上,这就是物理学中所指出的毛细管现象,如图 1-5 所示。

图中的液面差 h 可以如下两式计算。

对于 20°C 的水,玻璃管中水面高出容器中水面的高度 h 约为:

$$h = \frac{29.8}{d} \text{ mm} \quad (1-14)$$

对于水银,玻璃管中水银面低于容器中水银面的高度 h 约为:

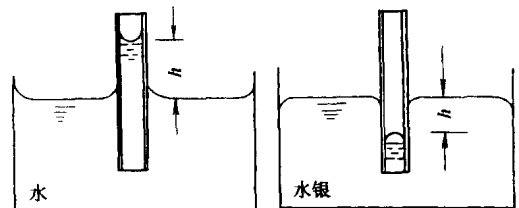


图 1-5

$$h = \frac{10.15}{d} \text{ mm} \quad (1-15)$$

上两式中 d 为玻璃管的内径,以 mm 计。

测压管中的毛细管现象,将造成读数误差,通常使管径 d 不小于 10mm,以减小误差。

在日常生活中,表面张力的现象也是见得到的,水滴悬在水龙头口上,水面稍高出碗口而不外溢,铁针能浮在液面上而不下沉等等。

5. 液体的汽化压力特性

液体分子有足够的动能可以在它的自由表面不断地发射出来而成为蒸气或汽,这种汽化时液体所具有的向外扩张的压力就是汽化压力,也叫饱和蒸气压。当液体所受外界压力和汽化压力相等或稍低时,液体就沸腾起来。汽化压力随温度的升高而增大。一些液体在 20℃ 时的汽化压力,见表 1-5。

常见液体在 20℃ 时的汽化压力

表 1-5

液体名称	水	水银	四氯化碳	煤油	汽油
汽化压力(N/m ²)	2340	0.17	12100	3200	55000

水的汽化压力也叫水汽张力。当水流所受的压力降低到汽化压力时,水汽就要游离出来,影响水流,造成不良后果,如工程中的空泡和气蚀问题。不同水温的汽化压力,见表 1-6。

不同水温的汽化压力

表 1-6

水温(℃)	0	5	10	20	30	40
汽化压力(N/m ²)	610	870	1230	2340	4240	7380
水温(℃)	50	60	70	80	90	100
汽化压力(N/m ²)	12330	19920	31160	47340	70100	101330

6. 大气压

地球外表包围着大气圈,99.9%的大气在离地表 50km 高度的范围内,这样高的一个空气柱因重量产生的压应力就是大气压。大气压随海拔高度和温度不同而有变化。现将不同海拔高度的大气压列于表 1-7 中。

不同海拔高度的大气压

表 1-7

海拔(m)	0	100	200	300	400	500	600	700
大气压(N/m ²)	101330	100062	99081	98100	96138	95157	94176	93195
海拔(m)	800	900	1000	1500	2000	3000	4000	5000
大气压(N/m ²)	92214	91233	90252	84360	82404	71613	61803	53955

大气压是随海拔高的增大而变小。

液体的这种汽化压力特性只在特殊场合下才加以考虑,如螺旋桨的空泡现象,辅机中的气穴、气蚀现象等。通常情况下液体的汽化压力可以忽略。

以上介绍的几个物理性质,都不同程度地决定和影响着流体的运动。但每一种性质的影响又各不相同,就一般流体的宏观运动来看,重力、粘滞力起主要作用,而且粘滞力的存在使流体的运动规律变化更加复杂。

§ 1-3 连续介质和理想流体的概念

一、连续介质的概念

从微观来看,流体由分子所组成,分子间有间隙,可以说是不连续的。而工程流体力学所涉及的流体是具有一定规模尺寸的宏观整体,是不考虑为数众多、难以捉摸的单个分子运动状态的。也就是说工程流体力学所研究的流体运动是宏观的机械运动,而不是分子的微观运动。为此 1753 年欧拉(Euler)建议采用连续介质的概念来解决其真实的不连续状况。把流体看成连续一片,没有空隙也没有分子运动的介质。对于这种假定,实践证明是行得通的。总之,流体力学中所讨论的流体的最小对象不是流体分子,而是以无数个流体分子所构成的集合体,即叫流体质点,流体质点与它所在的流体相比,其尺寸仍然很微小,可忽略不计。

由于我们把流体视为连续介质,则流体运动时的一切物理量(如速度、压强、密度等),都可视为空间坐标和时间的连续函数,便于在研究中利用分析数学这个工具。

对于这个假定,我们也并不陌生,材料力学中认为材料是均匀而无空隙的,这实际上也是一种连续的假定。

二、理想流体的概念

为反映对流体运动起主要作用的物理性质,我们对流体进行适当的简化,引入“理想流体”的概念。所谓理想流体就是把流体看成为绝对不可压缩、不能膨胀、没有粘滞性、没有表面张力和汽化压力(后两者对液体而言)的连续介质。

由前面讨论已知,实际流体所具有的压缩性、膨胀性、表面张力和汽化压力特性比起粘滞性来说都小得多,所以有没有粘滞性就成了理想流体与实际流体之间最重要的差别。因此按理想流体所得的流体运动的一切结论在应用到实际流体时,必须对没有考虑粘滞性而引起的偏差进行修正。

§ 1-4 作用于流体上的力

流体力学是研究流体平衡和运动的各种力学规律的科学,一个重要的问题就是要搞清流体受哪些力的作用。

流体总是在一定的固体边界内运动的,流体与固体边界之间的相互作用,就是力的体现。我们要研究这些力,首先以流体为讨论对象,研究流体所受的力,其中包括边界对流体的作用力,然后再以边界为讨论对象,通过作用与反作用原理,得出流体对边界的作用力,所以讨论作用在流体上的力是至关重要的。

从前面讨论的流体物理性质来看,作用于流体上的力有重力、惯性力、弹性力、摩擦力、表面张力等等,如果按其作用的特点,可分为表面力和质量力两大类。

一、表面力

作用于被研究流体的表面,其大小和被作用面的面积大小有关的力叫表面力。如固体边界对流体的摩擦力,边界对流体的反作用力,相邻两部分流体在接触面上所产生的压力等等。