

8

035
w38

中等职业供热通风与空调专业系列教材

流体力学 泵与风机

王宇清 主编
邢玉林 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 泵与风机/王宇清主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 12

(中等职业供热通风与空调专业系列教材)

ISBN 7-112-04647-5

I. 流… II. 王… III. ①流体力学—专业学校—教材②泵—专业学校—教材③鼓风机—专业学校—教材
IV. ①035②TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 043577 号

本书是中等职业学校供热通风与空调专业和建筑水电设备专业的技术基础课教材, 全书分为两篇。第一篇流体力学, 主要包括: 流体静力学; 流体动力学的连续性方程和能量方程; 流动阻力与能量损失; 管路的计算; 孔口、管嘴出流与气体射流。第二篇泵与风机, 主要包括: 泵与风机的原理、构造和性能参数; 离心式泵与风机的运行分析; 泵与风机的调节及选择。

本书也可供从事通风空调、热能供应及锅炉设备工作的专业技术人员学习参考。

中等职业供热通风与空调专业系列教材

流体力学 泵与风机

王宇清 主编

邢玉林 主审

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{3}{4}$ 字数: 306 千字

2001 年 12 月第一版 2001 年 12 月第一次印刷

印数: 1—3,000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-112-04647-5

G·336(10097)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

本书是建筑类中等职业学校供热通风与空调工程专业和建筑水电设备专业“流体力学泵与风机”课程用教材。主要任务是使学生掌握流体平衡和运动的基本理论及运算方法,了解泵与风机的工作原理和构造;掌握离心式泵与风机运行、调节及选用方法,为学习专业课和今后从事专业工作奠定基础。

本书是根据建设部中等职业学校供热通风与空调专业教学大纲编写的。包括两篇,第一篇流体力学,主要阐述了流体静压强的基本特性和分布状况;流体动力学的连续性方程和能量方程及其应用;管路能量损失的计算;管路的水力计算;孔口、管嘴的出流规律及气体射流。第二篇泵与风机主要阐述了泵与风机的基本原理、构造和性能参数;泵与风机的运行、调节及选择。

本书内容注重以实用为目的,以必需、够用为度,尽量删繁就简。理论联系实际,注意与专业课的衔接,对课程内容进行了大量的调整。

在例题和习题的安排上,具有针对性,由易到难,循序渐进,注重了例题和习题的质量,减少了习题数量,以利于学生复习、巩固所学的理论知识,培养学生运用基本理论解决实际问题的能力。

本书由黑龙江建筑职业技术学院王宇清担任主编,由黑龙江建筑职业技术学院邢玉林主审,参加编写的有:黑龙江建筑职业技术学院王宇清(第五、六、七章);抚顺城市建设学校毕红(第三、四章);山东城市建设学校邢国清(第一、二章);黑龙江建筑职业技术学院李绍君(第八、九章)。

限于编者水平有限,书中如有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

目 录

第一篇 流 体 力 学

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的任务	1
第二节 流体的主要物理性质	2
第三节 作用在流体上的力	10
习题	11
第二章 流体静力学	13
第一节 流体静压强及其特性	13
第二节 流体静压强的分布规律	15
第三节 压强的计量基准和计量单位	19
第四节 连通器及等压面	21
第五节 流体静压强的应用	23
第六节 流体静压强的分布图	26
第七节 作用在平面上的流体总压力	27
习题	33
第三章 流体动力学基础	38
第一节 概述	38
第二节 流体动力学的两种研究方法	38
第三节 流体动力学基本概念	40
第四节 恒定流连续性方程	46
第五节 恒定流能量方程	49
第六节 能量方程式的意义	58
第七节 能量方程式的实际应用	63
习题	65
第四章 流动阻力与能量损失	70
第一节 流动阻力与能量损失的形式	70
第二节 过流断面的水力要素	71
第三节 流体流动的两种流态	74
第四节 管中的层流运动	77
第五节 管中的紊流运动	81

第六节	沿程阻力系数的确定	84
第七节	局部损失的计算	95
第八节	绕流阻力与升力的概念	102
习题	.....	105
第五章	管路计算	108
第一节	简单管路	108
第二节	串联管路的计算	110
第三节	并联管路的计算	112
第四节	压力管路中的水击现象	115
第五节	无压均匀流的水力计算	119
习题	.....	127
第六章	孔口、管嘴出流与气体射流	129
第一节	孔口出流	129
第二节	管嘴出流	135
第三节	气体的淹没射流	139
习题	.....	145

第二篇 泵 与 风 机

第七章	离心式泵与风机的理论基础	147
第一节	离心式泵的工作原理	147
第二节	离心泵的基本构造及分类	148
第三节	离心式风机的分类及基本构造	153
第四节	离心式泵与风机的性能参数	156
第五节	离心式泵与风机的基本方程式	158
第六节	离心式泵与风机的叶型及理论性能曲线	160
第七节	泵与风机的实际性能曲线	162
第八节	相似律与比转数	163
第九节	离心泵的气蚀与安装高度	166
习题	.....	168
第八章	离心式泵与风机的运行与调节	170
第一节	管路性能曲线和工作点	170
第二节	泵及风机的联合运行	171
第三节	泵及风机的工况调节	175
第四节	离心式泵与风机的选择	178
习题	.....	185

第九章 其他常用泵与风机	187
第一节 管道泵	187
第二节 蒸汽活塞泵	188
第三节 真空泵与射流泵	190
第四节 轴流式泵与风机	192

第一篇 流体力学

第一章 绪 论

第一节 流体力学的任务

流体力学的任务是研究流体静止和运动时的力学规律,及其在工程技术中的应用。它是力学学科的一个组成部分。

流体力学的研究对象是流体。流体包括液体和气体。研究流体运动规律的学科可分为两支:以液体为主要研究对象的水力学、流体力学和以气体为主要研究对象的空气动力学、气体动力学。由于液体与气体既有共性,又有各自的特性,所以这几门学科既有一些共同的基本理论,又有各自的专门问题及研究方法。本课程主要讨论工程实际所遇到的不可压缩流体的静止和运动规律,属于工程流体力学的范畴。

流体力学由两个基本部分组成:一是研究流体静止规律的流体静力学;二是研究流体运动规律的流体动力学。

流体与所有物质一样,是由不断运动着的分子组成的。分子之间有空隙,所以从微观角度看,流体并不是一种连续分布的物质。但是,流体力学研究的是流体的宏观机械运动(无数分子总体的力学效果),是以流体质点作为最小研究对象。所谓流体质点,是指由无数的分子组成,具有无限小的体积和质量的几何点。因此,从宏观角度出发,认为流体是被其质点全部充满,无任何空隙存在的连续体。在流体力学中,把流体当作“连续介质”来研究,就可以把连续函数的概念引入到流体力学中来,利用数学分析这一有力的工具来研究流体的运动规律。

流体力学是供热通风和燃气工程专业的一门重要的专业基础课程。供热、制冷、给水排水、空气调节、燃气输配、通风除尘等工程中,都是以流体作为工作介质,应用它们的物理特性、静止和运动规律,将它们有效地组织起来应用于这些技术工程之中。因此,学好流体力学,才能对专业范围内的流体力学现象做出科学的定性分析及精确的定量计算;才能正确地解决工程中所遇到的流体力学方面的测试、运行、管理与设计计算等问题。

学习流体力学,要注重基本原理、基本概念和基本方法的理解和掌握,要理论联系实际,学会用流体力学的理论知识科学地分析和解决实际工程中的问题。

本书主要采用法定单位制,基本单位是:长度用米,代号为 m ;时间用秒,代号为 s ;质量用千克,代号为 kg ;力为导出单位,采用牛顿,代号为 N , $1N = 1kg \cdot m/s^2$ 。

由于我国长期采用工程单位,实际工程遇到的某些量仍用工程单位表示,必须注意两种单位的换算。两种单位换算的关系为:1kgf=9.807N。

常用的法定单位与工程单位的换算关系见表 1-1。

米制单位与法定单位制单位对照表

表 1-1

量的名称	米制单位		法定单位制单位		换算关系
	名称	符号	名称	符号	
长度	米	m	米	m	
时间	秒	s	秒	s	
质量	公斤力二次方秒每米	kgf·s ² /m	公斤	kg	1kgf·s ² /m=9.81kg
力、重量	公斤力	kgf	牛顿	N	1kgf=9.81N
压强	公斤力每平方米	kgf/m ²	帕斯卡	Pa	1kgf/m ² =9.81Pa
	工程大气压	at	帕斯卡	Pa	1at=9.81×10 ⁴ Pa
	巴	bar	帕斯卡	Pa	1bar=10 ⁵ Pa
	毫米水柱	mmH ₂ O	帕斯卡	Pa	1mmH ₂ O=9.81Pa
	毫米汞柱	mmHg	帕斯卡	Pa	1mmHg=133.32Pa
应力、强度	公斤力每平方厘米	kgf/cm ²	帕斯卡	Pa	1kgf/cm ² =9.81×10 ⁴ Pa
能量、功	公斤力·米	kgf·m	焦耳	J	1kgf·m=9.81J
功率	公斤力米每秒	kgf·m/s	瓦特	W	1kgf·m/s=9.81W
	马力		瓦特	W	1马力=735.45W
动力粘度	泊	P	帕斯卡秒	Pa·s	1P=0.1Pa·s
运动粘度		m ² /s	斯托克斯	m ² /s St	1St=10 ⁻⁴ m ² /s

第二节 流体的主要物理性质

流体区别于固体的基本特征是流体具有流动性。流体在静止状态时不能承受剪切力,当有剪切力作用于流体时,流体便产生连续的变形,也就是流体质点之间产生相对运动。流体也不能承受拉力,它只能承受压力。流动性使流体的运动具有下列特点:

第一,流体没有固定形状,它的形状是由约束它的边界形状所决定的。不同的边界必将产生不同的流动。因此,与流体接触的物体的形状和性质(也就是边界条件)对流体的运动有着直接的影响。

第二,流体的运动和流体的变形联系在一起。当流体运动时,其内部各质点之间有着复杂的相对运动。所以流体的运动又是和它的物理性质有密切的关系。物理性质不同的流体,即使其边界条件相同也会产生不同的流动。

因此,流体的流动是由流体本身的物理性质(这是内因)和流动所在的外界条件(这是外因)这两个因素所决定的。流体力学中所要探讨的运动规律,实质上就是要研究流体的物理性质和流动的边界条件对流体运动所产生的作用和影响。

流体的主要物理性质有:密度、容重、压缩性、膨胀性及粘滞性等。

一、密度和容重

流体和其他物体一样,具有质量和重量。质量的存在使流体运动时具有惯性;而重量则使流体有从高处流向低处的趋势。

1. 密度

质量特性常以密度表示。单位体积流体所具有的质量,称为密度,用 ρ 表示。任意点上密度相同的流体,称为均质流体。均质流体密度可表示为:

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

式中 ρ ——流体的密度(kg/m^3);

M ——流体的质量(kg);

V ——质量为 M 的流体所占的体积(m^3)。

各点密度不完全相同的流体,称为非均质流体。非均质流体中任一点处的密度为:

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

式中 ρ ——任一点流体的密度(kg/m^3);

ΔM ——微小体积 ΔV 内的流体质量(kg);

ΔV ——质量 ΔM 的流体所占的体积(m^3)。

2. 容重

流体受地球引力作用的特性,称重力特性。流体的重力特性用容重表示。单位体积流体所具有的重量,称为容重,用 γ 表示。

均质流体的容重为:

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

式中 γ ——流体的容重(N/m^3);

G ——体积为 V 的流体的重量(N);

V ——重量为 G 的流体体积(m^3)。

对于非均质流体,任一点的容重为:

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

式中 γ ——任一点流体的容重(N/m^3);

ΔG ——为微小体积 ΔV 上的流体重量(N);

ΔV ——重量为 ΔG 的流体所占的体积(m^3)。

由于重量等于质量乘以重力加速度,即: $G = mg$ 。所以密度和容重有下列关系:

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

式中 g ——重力加速度,一般采用 $g = 9.81 \text{m}/\text{s}^2$,这个关系对均质和非均质流体都适用。

常见流体的密度和容重值见表 1-2。

【例 1-1】 已知煤油的密度 $\rho = 800 \text{kg}/\text{m}^3$,求其容重。3L 的此种煤油,质量和重量为多少?

【解】 根据式(1-5),煤油容重为:

$$\gamma = \rho g = 800 \times 9.81 = 7848 \text{N}/\text{m}^3$$

由 $M = \rho V$ 和 $G = \gamma V$,得到:

$$\text{煤油质量: } M = 800 \times 0.003 = 2.4 \text{kg}$$

$$\text{煤油重量: } G = 7848 \times 0.003 = 23.54 \text{N}$$

常见流体密度、容重表

表 1-2

流体名称		密度 (kg/m ³)	容 重 (N/m ³)	测 定 条 件	
				温 度 (℃)	气 体
液 体	煤 油	800~850	7848~8338	15	760mmHg
	纯 乙 醇	790	7745	15	
	水	1000	9807	4	
	水 银	13590	133318	0	
气 体	氮	1.2505	12.2674	0	760mmHg
	氧	1.4290	14.0185		
	空 气	1.2920	12.6824		
	一 氧 化 碳	1.9768	19.3924		

二、流体的压缩性和膨胀性

一般说来,流体的密度和容重随温度和压强的改变而变化。这是由于流体内部分子间距离的改变引起的。

在温度不变条件下,流体受压,体积减小,密度增大的性质,称为流体的压缩性。

在压强不变条件下,流体受热,体积增大,密度减小的性质,称为流体的膨胀性。

1. 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性通常以压缩系数 β 表示。它表示压强每增加 1 帕斯卡时,液体体积或密度的相对变化率。

设 V 为液体原有体积,如压强增加 Δp 后,体积减小 ΔV ,则压缩系数为:

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-6)$$

β 的单位是压强单位的倒数,即 m^2/N 。 β 值愈大,流体的压缩性也愈大。由于压强增大时液体体积必然减小,式中 $\Delta V/\Delta p$ 永为负值,故在公式右侧加一负号,以保持 β 为正值。

流体被压缩前后,其质量 ρV 没有改变,即:

$$\Delta M = \Delta(\rho V) = \rho \Delta V + V \Delta \rho = 0$$

所以

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{\Delta V}{V}$$

故压缩系数又可表示为:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta p} \quad (1-7)$$

流体受压后体积缩小,但压强撤除后体积还能恢复到原有状态,故压缩性也可用弹性模量 E 来表示。压缩系数的倒数即为弹性模量:

$$E = \frac{1}{\beta} = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} = \rho \frac{\Delta p}{\Delta \rho} \quad (1-8)$$

式中, E 的单位为 N/m^2 。

表 1-3 列举了水在 0℃ 时不同压强下的压缩系数。表中压强单位为工程大气压(1at = 98070 N/m²)。

液体的膨胀性通常以膨胀系数 α 来表示。它表示在一定压强下温度每增加 1(K) 度时,液体体积或密度的相对变化率。

水的压缩系数

表 1-3

压强(MPa)	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
$\beta(\text{m}^2/\text{N})$	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

设 V 为液体原有体积,如温度增加 ΔT 后,体积增加 ΔV ,则膨胀系数 α 为:

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-9)$$

式中, α 的单位是温度单位的倒数,即 $1/\text{K}$ 。 α 值愈大,液体的膨胀性也愈强。

同理,膨胀系数亦可表示为:

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad (1-10)$$

(1-10)式中负号,表示温度变化量与密度的变化呈反比关系。

表 1-4 给出了一个大气压下不同温度时水的膨胀系数。

水的膨胀系数

表 1-4

温度($^{\circ}\text{C}$)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
$\alpha(1/^{\circ}\text{C})$	0.14×10^{-4}	0.15×10^{-4}	0.42×10^{-4}	0.55×10^{-4}	0.72×10^{-4}

表 1-5 中列举了一个大气压下水在不同温度时的容重和密度。

一个大气压下水的容重及密度

表 1-5

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	容 重 (kN/m^3) ^①	密 度 (kg/m^3)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	容 重 (kN/m^3) ^①	密 度 (kg/m^3)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	容 重 (kN/m^3) ^①	密 度 (kg/m^3)
0	9.806	999.9	15	9.799	999.1	60	9.645	983.2
1	9.806	999.9	20	9.790	998.2	65	9.617	980.6
2	9.807	1000.0	25	9.778	997.1	70	9.590	977.8
3	9.807	1000.0	30	9.755	995.7	75	9.561	974.9
4	9.807	1000.0	35	9.749	994.1	80	9.529	971.8
5	9.807	1000.0	40	9.731	992.2	85	9.500	968.7
6	9.807	1000.0	45	9.710	990.2	90	9.467	965.3
8	9.806	999.9	50	9.690	988.1	95	9.433	961.9
10	9.805	999.7	55	9.657	985.5	100	9.399	958.4

① 在国际单位制中常将因数 10^3 写成千,以符号 k 表示, 10^6 写成兆,以符号 M 表示。

从表 1-3 及表 1-5 看出:压强每升高一个大气压,水的密度约增加二万分之一。在温度较低时($10 \sim 20^{\circ}\text{C}$),温度每增加 1°C ,水的密度减小约为万分之一点五;在温度较高时($90 \sim 100^{\circ}\text{C}$),水的密度减小也只有万分之七。这说明水的膨胀性和压缩性是很小的,一般情况下可忽略不计。只有在某些特殊情况下,例如水击、热水采暖等问题时,才需要考虑水的压缩性及膨胀性。

2. 气体的压缩性及膨胀性

气体与液体不同,具有显著的压缩性和膨胀性。压强和温度的改变对气体密度或容重影响很大。在压强不很高和温度不很低条件下,气体的压缩性和膨胀性可以用理想气体状态方程来描述,即:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-11)$$

式中 p ——气体的绝对压强(Pa);

T ——气体的热力学温度(K);

R ——气体常数, J/kg·K。对于空气, $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; 对于其他气体, 在标准状态下, $R = 8314/n$, 其中 n 为气体的分子量。

ρ ——气体的密度(kg/m^3)。

同一种气体在不同状态下的压强、温度和密度间的关系可表示为:

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-12)$$

式中, 符号下的脚注 1、2 分别表示两种不同状态。

在温度不变的等温情况下, $T_1 = T_2$, 得到密度与压强关系:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1-13)$$

式(1-13)表示在等温情况下压强与密度成正比。即如果一定质量的气体被压缩到密度增大一倍, 则压强也要增加一倍; 相反, 如果密度减小一倍, 则压强也要减小一倍。这里需指出, 气体密度的变化存在一个极限值, 当压强增加使气体密度增大到这个极限值时, 即使再增大压强, 气体密度也不会增加。这时, 式(1-13)不再适用了。对应极限密度下的压强为极限压强。所以, 只有当密度远小于极限密度时, 式(1-13)与实际气体的情况才是一致的。

在压强不变的定压情况下, $p_1 = p_2$, 得到密度和温度的关系:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-14)$$

式(1-14)表示在定压情况下, 气体的密度与温度成反比。即温度增加, 体积增大, 密度减小; 反之, 温度降低, 体积减小, 密度增大。这里也要指出, 当气体温度降低到其液化温度时, 式(1-14)规律不再适用了。

将(1-14)式写成常用形式:

$$\rho_0 T_0 = \rho T = \text{常数} \quad (1-15)$$

式中, ρ_0 为温度 T_0 等于 273.16K(近似为 273K)时的气体密度; ρ 、 T 为任一状态下气体的密度和热力学温度。

表 1-6 列举了在标准大气压下, 不同温度下空气的容重和密度。

标准大气压下空气的容重和密度

表 1-6

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 (kg/m^3)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 (kg/m^3)
0	12.70	1.293	25	11.62	1.185
5	12.47	1.270	30	11.43	1.165
10	12.24	1.248	35	11.23	1.146
15	12.02	1.226	40	11.05	1.128
20	11.80	1.205	50	10.72	1.093

续表

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 (kg/m^3)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	容 重 (N/m^3)	密 度 (kg/m^3)
60	10.40	1.060	90	9.55	0.973
70	10.10	1.029	100	9.30	0.947
80	9.81	1.000			

三、流体的粘滞性

1. 粘滞性的作用

流体在流动时,其内部会出现相对运动,各质点之间会产生切向的内摩擦力以抵抗其相对运动。流体的这种性质称为粘滞性。产生的内摩擦力称为粘滞力。

图 1-1 为流体在圆管中流动时的管内流速分布图。

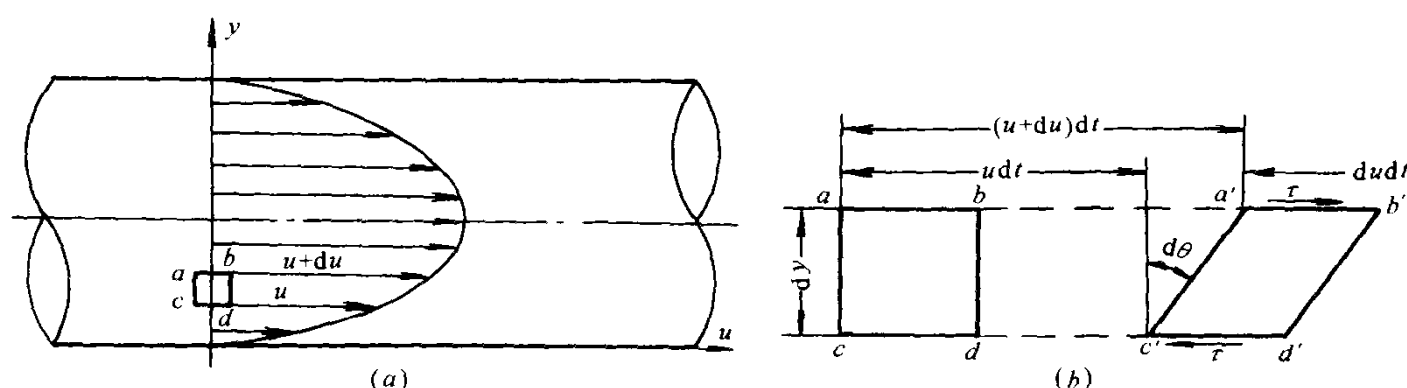


图 1-1 流体质点的直角变形速度

当流体在管中缓慢流动时,紧贴管壁的流体质点,粘附在管壁上,流速为零。而和它相邻的一层流体,在惯性的作用下具有保持其原有运动的趋势(假如流体没有粘滞性,第二层流体将以原有的速度运动)。因为实际流体都有粘滞性,所以当两层流体出现相对运动时,它们之间会产生内摩擦力,阻滞第二层流体的运动,使其速度减慢下来。当第二层流体的速度减小后,它和第三层流体之间又会出现相对运动,因而这两层流体之间也会产生内摩擦力,使第三层流体的速度也减慢下来。如此一层一层地影响下去。位于管轴上的流体质点,离管壁的距离最远,受管壁的影响最小,因而流速最大。图 1-1(a)就是流体在管中缓慢流动时,流速 u 随垂直于流速方向 y 而变化的函数关系图,即 $u = f(y)$ 的函数关系曲线,称为流速分布图。

由此可见,流体沿固体壁面运动时所受到的流动阻力,主要原因不是流体与固体壁面之间的摩擦力,而是流体内部各流层之间产生的摩擦力,故称为内摩擦力。固体壁面的存在只是引起流动阻力的外部条件,流体的粘滞性才是产生流动阻力的内在原因。如果流体没有粘滞性,流动时就不会出现阻力,也就不会产生能量损失。

2. 牛顿内摩擦定律

内摩擦力的大小怎样确定? 牛顿经过大量实验证明,对于大多数流体,内摩擦力 T 的大小:

- (1) 与两流层间的速度差 du 成正比,与两流层间距离 dy 成反比;
- (2) 与流层的接触面积 A 的大小成正比;

- (3) 与流体种类有关;
 - (4) 与流层接触面上的压力无关。
- 内摩擦力的数学表达形式可写作:

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-16)$$

这个关系称为牛顿内摩擦定律。

以 τ 代表单位面积上的内摩擦力,称为切应力。则:

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-17)$$

式中:

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度。表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率,单位为 s^{-1} 。为了理解速度梯度的意义,我们在图 1-1(a)中垂直于速度方向的 y 轴上,任取一边长为 dy 的小正方体 $abcd$ 。为清楚起见,将它放大成图 1-1(b)。由于小方块下表面的速度 u 小于上表面的速度 $(u + du)$,经过 dt 时间后,下表面移动的距离 $u dt$,小于上表面移动的距离 $(u + du) dt$,因而小方块 $abcd$ 变形为 $a'b'c'd'$ 。即, ac 及 bd 在 dt 时间内发生了角变形 $d\theta$ 。由于 dt 很小, $d\theta$ 也很小,则: $d\theta = \text{tg}(d\theta) = \frac{du \cdot dt}{dy}$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-18)$$

可见,速度梯度就是直角变形速度。这个直角变形速度是在切应力的作用下发生的,所以,也称剪切变形速度。

τ ——称切应力。常用的单位为 N/m^2 ,简称 Pa。切应力 τ 不仅有大小,还有方向。 τ 的大小由式(1-17)计算; τ 的方向现以图 1-1(b)来说明:上表面 $a'b'$ 上面的流层运动较快,有带动较慢的 $a'b'$ 流层前进的趋势,故作用于 $a'b'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相同。下表面 $c'd'$ 下面的流层运动较慢,有阻碍较快的 $c'd'$ 流层前进的趋势,故作用于 $c'd'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相反。流体运动时,切应力总是成对出现的,它们大小相等方向相反。流体内产生的切应力,是阻碍流体相对运动的,但它不能从根本上制止流动的发生。因此,流体的流动性,不因有内摩擦力的存在而消失。当流体静止时,则 $\frac{du}{dy} = 0$,也就不产生切应力,但流体仍具有粘滞性。

μ ——称动力粘滞系数,又称动力粘度。是与流体种类有关的比例系数,单位是 $\frac{N}{m^2} \cdot s$,用符号 $Pa \cdot s$ 表示。不同的流体有不同的 μ 值, μ 值越大,表明其粘滞性愈强。由式(1-17)看出,当 $\frac{du}{dy} = 1$ 时, $\tau = \mu$,表示当速度梯度为 1 时的切应力即为流体的动力粘滞系数,所以它反映了流体粘滞性的动力性质。

在分析流体的运动规律时,动力粘度 μ 和密度 ρ 经常同时出现,流体力学中常把它们组成一个量,用 ν 来表示,称为运动粘度。即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-19)$$

式中, ρ 为流体的密度; ν 常用单位为 cm^2/s , 称斯托克斯, 简写 St。

表 1-7 列出了水和空气在一个大气压、不同温度下的粘度。

水和空气(一个大气压下)的粘度

表 1-7

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	水		空气	
	$\mu \times 10^{-3}(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	$\mu \times 10^{-3}(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792	0.0172	13.7
5	1.519	1.519		
10	1.308	1.308	0.0178	14.7
15	1.140	1.140		
20	1.005	1.007	0.0183	15.7
25	0.894	0.897		
30	0.801	0.804	0.0187	16.6
35	0.723	0.727		
40	0.656	0.661	0.0192	17.6
45	0.599	0.605		
50	0.549	0.556	0.0196	18.6
60	0.469	0.477	0.0201	19.6
70	0.406	0.415	0.0204	20.5
80	0.357	0.367	0.0210	21.7
90	0.317	0.328	0.0216	22.9
100	0.284	0.296	0.0218	23.6
120			0.0228	26.2
140			0.0236	28.5
160			0.0242	30.6
180			0.0251	33.2
200			0.0259	35.8
250			0.0280	42.8
300			0.0298	49.9

从表 1-7 可看出:水和空气的粘度随温度变化的规律是不同的,水的粘度随温度升高而减小,空气的粘度随温度升高而增大。这是因为粘滞性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换共同作用的结果。温度升高,分子间吸引力降低,动量增大;温度降低,分子间吸引力增大,动量减小。对于液体,分子间的吸引力是决定性的因素,所以液体的粘度随温度升高而减小;对于气体,分子间的热运动产生动量交换是决定性的因素,所以气体的粘度随温度升高而增大。

最后,还需指出:牛顿内摩擦定律只适用于一般流体,它对某些特殊流体是不适用的。为此,将满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,如水和空气等。而将特殊流体称为非牛顿流体,如血浆、泥浆、油漆等。本课程仅限于研究牛顿流体的力学问题。

【例 1-2】 有一底面为 $60\text{cm} \times 40\text{cm}$ 的木板,质量为 5kg ,沿一与水平面成 20° 角的斜面下滑(图 1-2)。木板与斜面间的油层厚度为 0.6mm 。如以等速度 0.84m/s 下滑时,求油的动力粘度 μ 。

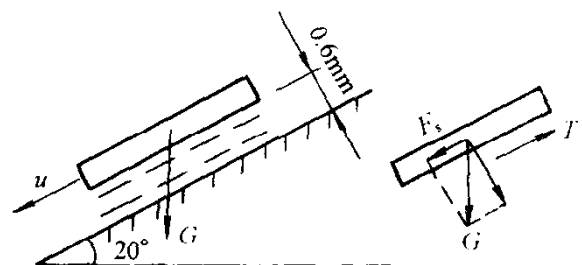


图 1-2

【解】木板沿斜面等速下滑,作用在木板上的重力 G 在平行于斜面方向的分力为 F_s , F_s 应与油层间因相对运动产生的粘滞力 T 平衡:

$$T = F_s = G \sin 20^\circ = 5 \times 9.81 \times 0.342 = 16.78 \text{ N}$$

根据牛顿内摩擦定律粘滞力 $T = \mu A \frac{du}{dy}$ 。油层厚度很薄,可以认为木板与斜面间速度按直线分布:

$$\frac{du}{dy} = \frac{0.84 - 0}{0.0006} = 1400 \quad 1/\text{s}$$

因此

$$\mu = T / \left(A \frac{du}{dy} \right) = \frac{16.78}{0.6 \times 0.4 \times 1400} = 0.05 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

第三节 作用在流体上的力

要研究流体静止和运动的规律,除应了解流体的物理性质外,还必须对作用于流体上的外力加以分析。前者是改变流体运动状态的内因,而后者是改变流体运动状态的外因。

作用在流体上的力,可分为质量力和表面力。

一、质量力

质量力是作用在流体的每一质点上、与流体的质量成正比的力,如重力、离心力及一切由于加速度而产生的惯性力等。质量力的合力作用于流体的质量中心。在均质流体中,质量力与受作用流体的体积成比例,所以又叫体积力。

质量力常用单位质量力来表示。设在流体中取质量为 M 的质点(或微团),作用于该质点的质量力为 F ,则单位质量力为 F/M 。若 F 在直角坐标系 x, y, z 轴方向上的分量分别为 F_x, F_y, F_z ,则在 x, y, z 轴方向上的单位质量力分量 X, Y, Z 为:

$$X = \frac{F_x}{M}, \quad Y = \frac{F_y}{M}, \quad Z = \frac{F_z}{M} \quad (1-20)$$

如果流体质量力只有与 z 轴反向作用的重力时,则质量力为 $F = F_z = -G = -Mg$,单位质量力分量就变成:

$$X = 0, \quad Y = 0, \quad Z = -g \quad (1-21)$$

同样可以分析得到,以等加速度 a 在 x 轴方向作直线匀加速运动的流体,所受质量力的分力为: $F_x = -Ma, F_y = 0$ 和 $F_z = -Mg$,单位质量分力就为:

$$X = -a, \quad Y = 0, \quad Z = -g \quad (1-22)$$

在容器中的流体以匀角速度 ω 绕垂直固定轴旋转,所受质量力可表示为: $F_x = M\omega^2 x, F_y = M\omega^2 y$ 和 $F_z = -Mg$ 。单位质量力分力则为:

$$X = \omega^2 x, \quad Y = \omega^2 y, \quad Z = -g \quad (1-23)$$

单位质量力的单位为 m/s^2 ,它与加速度的单位相同。

二、表面力

表面力是作用在被研究流体表面上,且与作用表面的面积成正比的力。它可以是作用在流体边界面上的外力,如大气对液面的压力、活塞作用在流体上的压力、容器壁面的反作用力等;也可以是流体内部一部分流体作用于另一部分流体接触面上的内力,它们大小相

等、方向相反,是相互抵消的。我们在流体力学里分析问题时,常常从流体内部取出一个分离体来研究其受力状态,使流体的内力变成作用在分离体表面上的外力。

质量力的表达形式是单位质量力的坐标分量。类似地,表面力的表达形式也采用单位表面力的切向分力和法向分力。

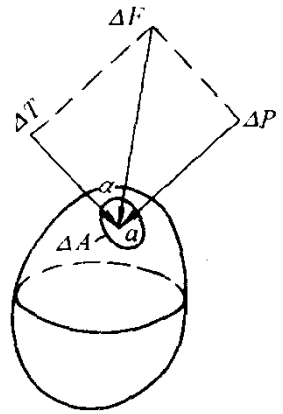


图 1-3 表面力分析

在流体中取出一分离体,在分离体表面上取包含点 a 的微小面积 ΔA ,作用在 ΔA 面上的表面力为 ΔF ,一般情况下 ΔF 与 ΔA 是斜交的,它们之间呈 α 交角,如图 1-3 所示。一般把 ΔF 分解为两个分力:沿 ΔA 法线方向的力 ΔP 和沿切线方向的力 ΔT 。由于流体不能承受拉力, ΔP 一定指向 ΔA 的内法线方向。 ΔP 称 ΔA 面上的总压力, ΔT 为 ΔA 面上的切向力或摩擦力。于是 ΔA 面上的表面力可分解为:

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}, \bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-24)$$

式中, \bar{p} 称为面积 ΔA 上的平均压应力,简称平均压强; $\bar{\tau}$ 称为面积 ΔA 上的平均切应力。

如果面积 ΔA 无限缩小至中心点 a ,则:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}, \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-25)$$

式中, p 称为 a 点的压强; τ 称为 a 点的切应力。在法定单位制中,压强 p 和切应力 τ 的单位为帕斯卡,符号为 Pa。 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。

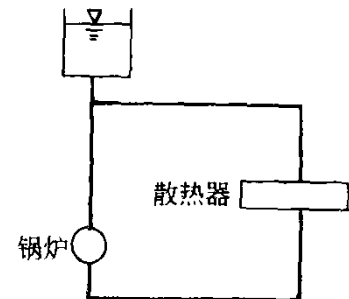
习 题

1-1 流体的容重和密度有何区别及联系?

1-2 已知水的密度 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$,求它的容重。若有这种水 2L,它的质量和重量各为多少?

1-3 何谓流体的压缩性与膨胀性?对流体的容重和密度有何影响?

1-4 如图,供暖系统在顶部设置一个膨胀水箱,系统内的水在温度升高时可自由膨胀进入水箱。若系统内水的总体积为 8m^3 ,温度最大升高为 50°C ,水的热胀系数 $\alpha = 0.0005\text{1}/^\circ\text{C}$,问膨胀水箱至少应有多大容积?



题 1-4 图

1-5 在一个大气压,温度为 0°C 时,烟气密度为 $1\text{kg}/\text{m}^3$,求 800°C 时烟气的容重。

1-6 什么是流体的粘滞性?它对流体流动有何作用?动力粘度与运动粘度有何区别及联系?

1-7 水的容重 $\gamma = 9.71\text{kN}/\text{m}^3$,动力粘度 $\mu = 0.6 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$,求其运动粘度 ν ?

1-8 空气容重 $\gamma = 11.5\text{N}/\text{m}^3$,运动粘度 $\nu = 0.157\text{cm}^2/\text{s}$,求它的动力粘度 μ 。

1-9 当空气温度从 0°C 增加至 20°C 时,运动粘度 ν 值增加 15%,容重 γ 减少 10%,问此时动力粘度 μ 值增加多少?

1-10 图示为一水平方向运动的木板,其速度为 $1\text{m}/\text{s}$ 。平板浮在油面上,油层厚度 $\delta = 10\text{mm}$,油的动力粘度 $\mu = 0.09807\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。求作用于平板单位面积上的阻力。

1-11 温度为 20°C 的空气,在直径为 2.5cm 的管中流动,距管壁上 1mm 处的空气速度为 $3\text{cm}/\text{s}$,求作用于单位长度管壁上的粘滞切应力为多少?

1-12 如图示,一底面积为 $40\text{cm} \times 45\text{cm}$,高为 1cm 的木块,质量为 5kg ,沿着涂有润滑油的斜面等速向