



职工中等专业学校教材

工程流体力学 泵与风机

常石明 李大志 编

北京科学技术出版社

内 容 提 要

本书是根据职工中等专业学校1984年西安协作会议制定的教学大纲编写的，为热能动力装置专业的教材之一。

全书共十章，主要内容有：流体的物理性质、液体静力学，液体动力学，流动阻力及管道水力计算，气体动力学基础，离心泵与风机的工作原理、分类、构造及性能，轴流泵与风机等。

全书叙述通俗简捷，为便于自学，每章后均留有思考题及习题。本书还适合具有初中文化程度 青年工人阅读参考。

职工中等专业学校教材

工程流体力学泵与风机

常石明 李大志 编

北京科学技术出版社出版

(北京市西直门外南路19号)

北京科学技术出版社发行

北京市房山区十渡印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 15印张 362千字

1989年6月第一版 1989年6月北京第一次印刷

印数0001—5300册

ISBN 7-5304-0331-6/T·65

定价：4.00 元

前 言

为了提高水利电力系统职工的技术水平,使水利电力职工中等专业学校的教学工作走向正规化、系统化,我司统一组织编写了这套水利电力职工中专教材。这套教材是根据我司1985年制定的《水利电力系统成人中专教学计划及教学大纲》,由水利电力系统内各职工中等专业和普通中专学校中有经验的教师分工编写的。在编写过程中,力求在保证理论的系统性、完整性的同时,密切联系生产实际、深入浅出,突出职工教育的特点。

水利电力职工中专教材分基础课及专业课两大部分,包括发电厂及电力系统、输配电工程、用电管理、电厂热能动力装置、电厂热工测量及自动化、水工建筑、水电工程施工、水电厂动力设备、陆地水文、工业与民用建筑及经济管理等11个专业,共约120种教材。

《工程流体力学 泵与风机》系热动专业的教材之一,全书共十章,由西安电力学校常石明、李大志编写,全书由东北电管局职工大学于新蓉审稿。

在编写本书过程中曾得到重庆电力学校侯文纲等同志的支持和帮助,并参考了《工程流体力学泵与风机》(中等专业学校教材、侯文纲主编)、《工程流体力学》(山东工学院、东北电力学院合编)、《流体力学 泵与风机》(周浚仁主编)、《流体力学风机及泵》(华南工学院、上海化工学院编)、《泵与风机》(重庆大学编)、《通风机》(李庆宜主编)等书的部分内容,在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促,教材中错误难免,恳请读者批评指出。

水利电力部教育司

一九八八年四月一日

目 录

前 言	1
绪 论	1
第一节 学习本课程的目的和任务	1
第二节 流体力学、泵与风机的发展概况	1
第一篇 工程流体力学	
第一章 流体的基本物理性质	3
第一节 流体的概念	3
第二节 惯性和万有引力特性	4
第三节 压缩性和膨胀性	5
第四节 流体的粘滞性	7
思考题	13
习题	13
第二章 液体静力学	14
第一节 作用在液体上的力	14
第二节 液体静压力及其特性	15
第三节 液体静力学基本方程式	17
第四节 绝对压力、相对压力及真空	20
第五节 液体静力学基本方程式的应用	21
第六节 液体的相对平衡	27
第七节 作用在壁面上的液体总压力	29
思考题	33
习题	34
第三章 液体动力学	38
第一节 概述	38
第二节 连续方程式	43
第三节 能量方程式	44
第四节 能量方程式的意义和应用举例	48
第五节 动量方程式及动量矩方程式	58
思考题	63
习题	63
第四章 流动阻力及管道水力计算	66
第一节 流体运动的两种状态	66
第二节 均匀流基本方程式	70
第三节 圆管中的层流运动	72
第四节 圆管中的紊流运动	75
第五节 局部损失计算	81
第六节 总能量损失的计算	86
第七节 管道水力计算	89

第八节 管道特性曲线	96
第九节 水击	99
思考题	102
习题	103
第五章 气体动力学基础	105
第一节 音速及马赫数	105
第二节 气体流动的基本方程式	108
第三节 涡线、涡束及涡强	110
第四节 速度环量及环流	111
第五节 汤姆逊旋涡定理	114
第六节 流体通过叶栅的流动	114
第七节 附面层	120
第八节 弱扰动在气流中的传播	122
第九节 超音速气流绕过外凸、内凹壁面的流动	124
第十节 激波绝热过程及波阻的概念	126
思考题	128
习题	128

第二篇 泵 与 风 机

第六章 离心式泵与风机的分类及构造	131
第一节 离心式泵与风机的分类	131
第二节 离心泵的构造	135
第三节 离心风机的构造	141
第四节 离心泵的轴向推力及其平衡装置	143
思考题	145
第七章 离心式泵与风机的原理	146
第一节 离心式泵与风机的工作过程	146
第二节 速度三角形	146
第三节 泵与风机的基本方程式	148
第四节 叶片型式	152
第五节 扬程与风压的确定	155
第六节 离心式泵与风机的损失、效率和功率	161
第七节 泵内的汽蚀	163
思考题	167
习题	168
第八章 离心式泵与风机的性能	170
第一节 离心泵的性能曲线	170
第二节 离心风机的性能曲线	175
第三节 相似定律	177
第四节 比转数	179
第五节 比例定律及性能曲线的换算	184
第六节 车削定律	188

第七节 无因次性能曲线	192
第八节 离心式泵与风机工作的稳定性	195
第九节 泵与风机的调节	198
第十节 泵或风机的联合运行	202
思考题	207
习题	207
第九章 轴流式及其他型式的泵与风机	210
第一节 轴流式泵与风机的工作原理	210
第二节 轴流式泵与风机的基本型式及构造	212
第三节 轴流式泵与风机的性能	216
第四节 其他型式泵	217
第五节 其他型式风机	220
思考题	222
第十章 发电厂常用泵与风机	223
第一节 发电厂常用泵	223
第二节 发电厂常用风机	226
第三节 泵与风机的发展趋势	227
思考题	228
答案	229

绪 论

第一节 学习本课程的目的和任务

本课程的内容分为两大部分。第一部分是工程流体力学，第二部分是泵与风机。

工程流体力学是研究流体平衡和运动的规律，以及流体与固体之间相互作用的一门科学。提高液体机械能的设备称为泵；提高气体机械能的设备称为风机。泵与风机部分是研究泵、风机设备的构造、工作原理、性能及运行等有关知识。

职工中等专业学校的电厂热能动力设备专业是为电力工业培养具有本专业基础知识的中等工程技术人才。电厂各种热力设备中的工作介质都是流体，如水、空气、烟气、蒸汽等。只有深入地了解 and 掌握了流体力学的基本知识，才能熟悉和掌握各热力设备的性能和运行规律，也才能在电力生产中充分发挥这些设备的效益，使其更好地为我国经济建设服务。因此，流体力学是电厂热能动力设备专业的基础课，是掌握本专业有关专业知识的基础。

泵与风机是电厂的重要辅助设备，电厂生产过程中给水、循环水、凝结水、疏水、油、空气、烟气等各种流体的循环流动，都是靠泵或风机来维持的。泵、风机的工作状况直接影响生产的安全性与经济性。泵与风机课程是电厂热能动力设备专业的专业课。只有掌握了泵、风机的有关知识，才能使泵与风机在电厂的安全、经济运行中起积极、保证作用。

第二节 流体力学、泵与风机的发展概况

工程流体力学、泵与风机和其他科学一样，也是在人类社会生产实践中产生和发展起来的。

远古时代，人类就开始了向洪水与干旱作斗争。如我国在公元前2286~2278年就有著名的大禹治水的传说，到春秋战国和秦朝时修建了都江堰工程以及郑国渠和灵渠三大著名水利工程。隋朝时开凿了闻名中外的大运河，对沟通南北交通、促进经济、文化的发展发挥了很大作用。通过实践，积累了不少关于流体方面的知识。不过这些知识还只是停留在经验积累的阶段，没有能进行系统的总结与提高。

15~18世纪，由于欧洲资本主义的兴起和发展，生产力得到了进一步解放，特别是欧洲的产业革命更加促进了自然科学的发展。这期间伯努利应用动能定理得出了表述流体运动速度、压力及外力间微分关系的运动微分方程式。他第一次应用数学分析的方法来研究流体的运动，并且奠定了古典流体力学基础。在古典流体力学的研究中，通常采用的方法是，将实际现象简化和提出一系列假设，最后利用数学分析方法得出最终结果。但是这种简化往往不能完全符合实际情况，因而所得结果与实际就有一定的出入，不能完全满足生产发展的需要。因此人们不得不另找办法，即利用实验的方法得出一些经验数据与公式，来修正理论分析的误差，使问题得到较圆满的解决。直到19世纪后期，特别是本世纪以来，随着宇宙航行

和原子能工业的发展，稀薄气体动力学及电磁流体力学的理论已逐渐形成。为了适应近年来工业和生物环境卫生发展的需要，非牛顿流体力学、多相流体力学、生物流体力学、气体噪声流体力学等都在发展形成中。

在古代，为了生活和生产的需要，人们挖井取水，创造了戽斗、吊杆、辘轳等提水工具。随着农业的发展，又创造了水车、木制往复水泵等提水工具。由于冶金工业的出现，人们创造了风箱、风车等设备。到18世纪末至19世纪中叶，由于蒸汽机的发明和采矿、钢铁工业的发展，出现了比较完善的以蒸汽机为原动机的往复泵和风机。到19世纪末，出现了高速原动机，流体力学、材料力学、机械制造工艺等方面也得到了迅速发展，为离心式泵与风机的应用提供了良好的条件。因此，到20世纪初离心式泵与风机取得了有效的发展，并广泛地应用到国民经济的各个部门。

随着电力事业的发展，火力发电厂中广泛地采用了大容量、高参数的锅炉和汽轮机设备。这就促进了泵与风机向大流量、高扬程、高效率、高转数及自动化等方向发展。但目前在理论上、材料及制造工艺上都还存在许多问题未得到完全解决。这些都有待今后进一步的研究解决。

第一篇 工程流体力学

第一章 流体的基本物理性质

流体的平衡、运动与外界对它的作用情况有关,但更重要的是决定于流体本身所具有的内在性质。所以在讨论流体的平衡和运动规律之前,要首先了解流体的概念和流体的基本物理性质。

第一节 流体的概念

一、流体

通常我们将易流动的气体、液体统称为流体。

从力学的性质看,固体具有抵抗压力、拉力和切向力的能力。当固体受到外力作用时,仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形就不再变化。流体仅能抵抗压力而不能抵抗拉力和切向力。流体受到任何微小的切向力,都要产生连续变形(这一变形就是流动)。只要切向力存在,流体就将继续变形,只有当外力停止作用,变形才会停止。

固体与流体相比较,其分子间的距离要小得多,分子间的引力也就大得多。因而固体能够抵抗一定的外力,保持本身的形状。流体由于分子之间距离较大,吸引力小,仅能抵抗一定的压力,不能保持自身的形状。气体与液体相比较,其分子间的间距更大,分子间的吸引力更小,因而气体比液体更易流动,且能充满所在容器的空间。不仅不能保持本身的形状,也不能保持本身的体积。

正是由于流体的易流动性,才能在外力作用下,通过一定的通道将流体输送到指定的地点,以满足人们生产或生活的需要。

二、连续介质的概念

流体和一切物体一样,都是由分子组成的。分子之间具有一定的空隙,又都不停地作不规则的分子运动。所以从微观角度看,流体的内部结构是不连续的。但是工程流体力学所研究的并不是流体的微观运动,而是研究由大量分子组成的宏观流体在外力(如重力、压力差等)作用下的平衡和运动规律。在工程实际中,流体所占有的空间与分子的尺寸相比大得无法比拟。例如在1个标准大气压下,温度为 0°C 时,每 1cm^3 的液体约有 3×10^{24} 个分子,每 1cm^3 的气体约有 2.7×10^{19} 个分子。由此可见,流体分子的间隙微不足道。为了简化问题和能应用连续函数这一数学工具,而引入流体具有连续性的假设。这一假设将流体看作由无穷多个连续分布的流体微团组成的连续介质。流体微团又称为质点,是组成流体的基本单元。

将流体看作连续介质,就可以使流体力学摆脱研究分子运动的复杂性,同时反映流体情况的各物理量(如速度、压力等)就都可以看作是空间位置坐标和时间的连续函数。因此在以后的讨论中,都可以用连续函数的解析方法,来研究流体处于平衡和运动状态下各物理量间的数量关系。

把流体看作连续介质来研究，对于大部分工程技术问题都是可行的，但对于某些特殊问题则是不适合的。例如在高真空环境中，气体就不能再看作连续介质了。本书只研究可以看作连续介质的流体的力学规律。

第二节 惯性和万有引力特性

一、惯性

惯性是流体所具有的保持原有运动状态的物理性质。流体的质量愈大，其惯性也愈大。流体的质量是指流体所含物质的多少，用符号 M 表示。流体具有质量的情况，常用单位体积的流体所具有的质量——密度来表示。对于均质流体，密度等于流体的质量与其体积的比值，即

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{1-1}$$

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 。

不同种类流体的密度数值不同，同一种流体的密度数值又随其温度和压力的变化而变化。表1-1给出几种常见流体的密度。表1-2给出不同温度下的水和空气的密度。

表 1-1 常见流体的密度(压力为1个标准大气压①)

流 体 名 称	温 度 (℃)	密 度(kg/m³)
纯水	4	1000
水银	15	13600
酒精	15	790~800
润滑油	15	890~920
柴油	20	840~900
空气	0	1.293
烟气	0	1.30~1.34
水蒸汽②	0	0.804

① 1标准大气压(atm)=101354N/m²
 ② 为便于计算而推算到0°C。

表 1-2 水和空气的密度随温度的变化(压力为1个标准大气压)

温度(℃)	-20	-10	0	4	10	20	60	80	100
密度(kg/m³)									
水			999.89	1000	998.97	998.73	983.24	971.83	958.38
空气	1.39	1.34	1.293	1.25	1.24	1.20	1.06	0.99	0.94

从表1-1可以看出,液体的密度都远远大于气体的密度。从表1-2可以看出,当温度变化时,水的密度变化不大,而空气的密度变化却很大。另外,压力的变化对气体的密度影响也很大。气体的密度随压力、温度的变化关系,可用完全气体^①的状态方程式来表示,即

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (1-2)$$

式中 ρ_1 、 p_1 、 T_1 ——气体状态变化前的密度、压力及热力学温度;

ρ_2 、 p_2 、 T_2 ——气体状态变化后的密度、压力及热力学温度。

例1-1 确定炉膛压力为98070N/m²,温度达800℃时,烟气的密度。

解:由公式(1-2)知 $\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}$

从表1-1中查得:在压力 $p_1 = 101354\text{N/m}^2$ 时,温度 $T_1 = 273\text{K}$ 时的密度 $\rho_1 = 1.32\text{kg/m}^3$
故炉膛中烟气的密度:

$$\rho_2 = 1.32 \times \frac{98070}{101354} \cdot \frac{273}{273 + 800} = 0.33(\text{kg/m}^3)$$

当气体由几种彼此不起化学作用,而且能够均匀混合的气体组成时,此混合气体的密度可按各组分气体的密度及其所占体积百分数计算:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \dots + \alpha_n \rho_n \quad (1-3)$$

式中 ρ_1 、 $\rho_2 \dots \rho_n$ ——混合气体中各组分气体的密度,kg/m³;

α_1 、 $\alpha_2 \dots \alpha_n$ ——混合气体中各组分气体所占体积的百分数。

二、万有引力特性

流体和自然界中任何物体一样具有万有引力特性。万有引力特性是物体之间相互具有吸引力的物理性质。流体受到地球的吸引力称为重力,用符号 G 表示。重力的数值取决于流体的质量和重力加速度,即

$$G = Mg \quad (1-4)$$

式中 G ——流体的重力,N;

M ——流体的质量,kg;

g ——重力加速度,m/s²,一般计算中常取 $g=9.81$ 。

第三节 压缩性和膨胀性

流体的体积随所承受的压力和温度的不同而改变。流体的体积随压力增加而缩小的性质称为流体的压缩性。流体的体积随温度增加而增大的性质称为流体的膨胀性。

流体的压缩性一般用体积压缩系数表示,即流体所受的压力每增加1N/m²,流体体积的相对变化量。它的数学表达式为:

^① 工程热力学中的理想气体在这里称为完全气体,以便与无粘滞性的理想气体区别。

$$\beta_v = - \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-5)$$

式中 β_v ——体积压缩系数, m^2/N 或 $1/\text{Pa}$;
 Δp ——作用于流体上的压力增量, N/m^2 ;
 V ——流体原有体积, m^3 ;
 ΔV ——流体体积的变化量, m^3 。

因 Δp 与 ΔV 异号, 为了保持 β_v 为正值, 在等号的右侧加一负号。

式(1-5)表明, β_v 大的流体, 较易压缩。反之, β_v 小的流体, 较难压缩。
 体积压缩系数的倒数, 称为体积弹性系数, 以 E 表示, 即

$$E = \frac{1}{\beta_v} \quad (1-6)$$

E 的单位是 N/m^2 。工程上也常用弹性系数衡量流体的压缩性。

流体的膨胀性一般用体积膨胀系数表示, 即流体温度每升高 1K 时, 流体体积的相对变化量。它的数学表达式为:

$$\beta_r = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta T} \quad (1-7)$$

式中 β_r ——体积膨胀系数, $1/\text{K}$;
 ΔT ——流体温度的增加量, K ;

$\frac{\Delta V}{V}$ ——流体体积的相对变化量。

水的体积压缩系数与压力的关系列于表1-3中。

表 1-3 水的体积压缩系数 $\beta_v (\times 10^5 \text{m}^2/\text{N})$

温 度	体 积 压 缩 系 数 压 力	4.905×10^5 (N/m^2)	9.81×10^5 (N/m^2)	19.612×10^5 (N/m^2)	39.24×10^5 (N/m^2)	78.448×10^5 (N/m^2)
		5(at) ^①	10(at)	20(at)	40(at)	80(at)
273(K)	0(℃)	0.5399	0.5371	0.5315	0.5233	0.5154
283(K)	10(℃)	0.5233	0.5179	0.5077	0.4978	0.4813
293(K)	20(℃)	0.5154	0.5052	0.4953	0.4813	0.4603

① 以前工程上常用at(工程大气压)作为计量压力的单位, $1\text{at} \approx 98100 \text{N}/\text{m}^2$ 。

从表1-3可以看出 $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 的水, 在压力为 $4.905 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2$ 时, 压力每增加 $0.981 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2$ (即 1at), 其体积的相对减小量约为万分之0.5。随着压力值的提高, β_v 还在减小。可见水的压缩性是很小的。由有关资料中看出, 其他液体的压缩性也是很小的。

水的体积膨胀系数与温度的关系列于表1-4中。

表 1-4

水的体积膨胀系数 $\beta_T (\times 10^3 1/K)$

压 力	体 积 膨 胀 系 数 温 度	0~10(°C)	10~20(°C)	40~50(°C)	60~70(°C)	90~100(°C)
$9.81 \times 10^4 (N/m^2)$	1(at)	14	150	422	556	719
$9.81 \times 10^6 (N/m^2)$	100(at)	43	165	422	548	704

从表1-4可以看出, 水的膨胀性也很小。如压力1at、温度40~50℃的水, 温度每升高1℃, 其体积的相对增加量为万分之4.22。由有关资料中看出, 其他液体的膨胀性也很小。

温度及压力的改变, 对气体的体积影响很大。对于完全气体, 可用状态方程式表示它们之间的关系, 即

$$p_v = RT \quad (1-8)$$

式中 p ——气体的绝对压力, N/m^2 ;

v ——气体的比容, m^3/kg ;

R ——气体常数, $N \cdot m/kg \cdot K$;

T ——气体的热力学温度, K 。

状态方程式说明: 气体的体积与绝对压力成反比, 与热力学温度成正比。

任何流体都具有压缩性。但各流体的可压缩程度不同。液体的压缩性较小, 而气体的压缩性比较大。例如, 在等温过程中, 完全气体当压力增大一倍时, 其体积就要缩小一倍。可见气体压缩性之大。气体在其他过程的压缩性也是比较大的。

在工程实际中, 是否需要考虑流体的压缩性, 视具体情况而定。通常把液体看作不可压缩流体, 即忽略对于工程实际没有多大影响的微小体积变化。由于忽略了体积的变化, 其密度就可以看作常数, 从而使工程计算大大简化。但在研究管道中的水击、水下爆破等问题时, 又必须考虑水的压缩性。否则, 所得结果与实际不符。通常不能把气体看作不可压缩流体, 特别是在流速较高、压力变化较大的场合, 气体体积的变化是不能忽略的。必须把气体的密度看作变数。但在流速不高(约小于100m/s)、压力变化不大的场合, 可忽略压缩性的影响, 而把气体看作不可压缩流体。例如当空气流速为68m/s时, 不考虑压缩性所引起的相对误差约为1%。

第四节 流体的粘滞性

一、粘滞性的概念

我们先来观察一种现象: 设有两块足够大的平行平板 M 和 N , 其间充满液体, 如图1-1(a)所示。当 N 板静止不动, M 板以匀速 u_0 沿 x 轴方向运动时, 直接粘附在板上的流体必然同板的运动速度一样。因而粘附在 M 板上的一层流体以匀速 u_0 随同 M 板运动; 粘附在板 N 上的一层流体静止不动。介于两板之间的流体将以自上而下递减的速度向右运动。整个流动可以看作是由许多流速不同的运动流层所组成。

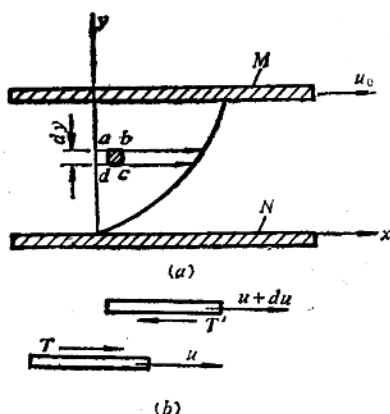


图 1-1 流体的内摩擦

流体内部产生摩擦力或粘性阻力的特性称为流体的粘滞性。

二、粘性阻力产生的原因

由于流体分子间的吸引作用及分子不规则运动的动量交换形成了粘性阻力。

1. 分子间的吸引力形成的粘性阻力

当流体层之间没有相对运动时，相邻层中的流体分子均处于平衡位置，各方向的吸引力相平衡。当相邻层间有相对运动时，两层间分子的吸引力就显示出来，形成阻力。

2. 分子不规则运动的动量交换形成的阻力

在运动流体中，由于分子作不规则运动，各流体层之间互有微观的分子迁移、掺混。当快层的分子迁移到慢层时，传递给慢层分子一定的动量，使慢层分子加速。当慢层分子迁移到快层时，得到一定的快层动量，而使快层分子减速。这种动量交换，使分子间互相碰撞，形成阻力。

三、牛顿内摩擦定律

由牛顿提出并经多次实验证明：相邻两流体层间内摩擦力 T 的大小与两层间的速度差 du 成正比、与流体层间距离 dy 成反比、与两流体层间的接触面积 A 成正比。内摩擦力的数学表达式为：

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

式中 T —— 内摩擦力，N

A —— 层间的接触面积， m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ —— 流体的速度梯度， $1/s$ ，表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率；

μ —— 比例系数， $Pa \cdot s$ 。常称为动力粘滞系数，其值与流体种类、温度有关，由实验方法测定。

式(1-9)称为牛顿内摩擦定律。

单位面积上的内摩擦力可表达为：

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

式中 τ ——内摩擦切应力, N/m^2 。

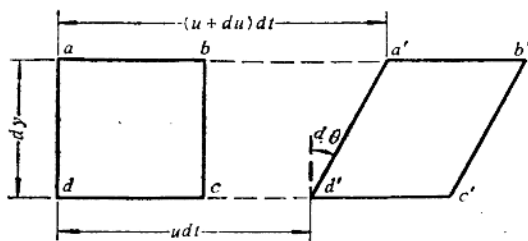


图 1-2 流体微团的变形

为了理解速度梯度的意义, 在图1-1的运动流体中取出一小块正方形的流体微团 $abcd$, 如图1-2所示。由于各流层的运动速度不同, 经过无限小的时段 dt 之后, 原先的正方体流体微团 $abcd$ 变成棱柱体 $a'b'c'd'$ 。直角 $\angle adc$ 变成锐角 $\angle a'd'c'$, 角度减

小了 $d\theta$ 。则角变形为: $d\theta = \tan d\theta = \frac{du}{dy} dt$

角变形的速度为: $\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$

上式表明了速度梯度的物理意义就是流体在流动过程中的角变形速度。实际上也反映了速度变化的程度。它的数值可由速度分布函数在该点的一阶导数求得。对于平衡流体, 由于流体质点间没有相对运动, 即 $\frac{du}{dy} = 0$, 故 $T = \tau = 0$ 。所以在讨论平衡流体的问题时, 不必考虑流体的粘滞性。

四、流体的动力粘滞系数及运动粘滞系数

由牛顿内摩擦定律可知, 流体的动力粘滞系数 $\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}}$ 当 $\frac{du}{dy} = 1$ 时, $\mu = \tau$ 。即当流体

的速度梯度等于1的时候, 在数值上 μ 就等于流层接触面上的内摩擦切应力。所以 μ 值的大小反映了流体内摩擦力作用的强弱, 即反映了流体的粘滞性。

在流体力学中, 通常用运动粘滞系数来反映流体的粘滞性。动力粘滞系数 μ 与密度 ρ 的比值, 称为运动粘滞系数, 即

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

式中 ν —— 运动粘滞系数, m^2/s 。

例1-2 有一滑动轴承(如图1-3所示)。轴的直径 $D = 15\text{cm}$, 轴承宽度 $b = 25\text{cm}$, 轴与轴承的间隙 $\delta = 0.1\text{cm}$ 。轴承中充满 $\mu = 0.054\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的润滑油。轴的转数 $n = 2980\text{r}/\text{min}$ 。

求轴承所消耗的轴功率。

解: 轴表面的线速度:

$$u = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3.14 \times 0.15 \times 2980}{60} = 23.39 \text{ (m/s)}$$

因间隙很小, 即轴与轴承间的油层厚度很薄, 故可将润滑油的速度分布按直线规律处理, 则速度梯度:

$$\frac{du}{dy} \doteq \frac{u}{\delta} = \frac{23.39}{0.1 \times 10^{-2}} = 2339 \text{ (1/s)}$$

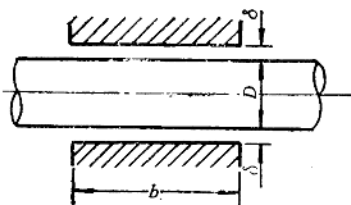


图 1-3 例题1-3附图

由于轴的旋转使润滑油中产生的摩擦力:

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = \mu \pi D b \frac{du}{dy}$$

$$= 0.054 \times 3.14 \times 0.15 \times 0.25 \times 23393 = 148.74(\text{N})$$

故滑动轴承所消耗的功率:

$$N = M \cdot \omega = T \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{2\pi n}{60} = 148.74 \times 23.39 = 3479.02(\text{N} \cdot \text{m/s})$$

或 $N = 3.479(\text{kW})$ 。

五、温度、压力对流体粘滞性的影响

流体的粘滞性各不相同,而且与流体的温度和压力有关。

温度对粘滞性的影响很大。液体的粘滞性随温度的上升而减小,气体的粘滞性随温度的上升而增大。表1-5、1-6中列出了水和空气在一个标准大气压下不同温度的粘滞系数。

表 1-5 水的粘滞系数与温度的关系

温度(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
粘滞系数											
$\mu(\times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s})$	1.792	1.308	1.005	0.801	0.656	0.549	0.469	0.406	0.357	0.317	0.284
$\nu(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	1.792	1.308	1.007	0.804	0.661	0.556	0.477	0.415	0.367	0.328	0.296

表 1-6 空气的粘滞系数与温度的关系

温度(°C)	-50	-20	0	20	40	60	80	100	200	300
粘滞系数										
$\mu(\times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s})$	14.61	16.28	17.09	18.08	19.04	19.97	20.88	21.75	25.82	29.46
$\nu(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	9.54	11.93	13.20	15.00	16.90	18.80	20.90	23.00	34.60	48.10

温度对液体和气体粘滞性影响的不同,是由于液体分子的间隙是气体的近千分之一。因而液体分子间的吸引力比气体的要大的多。分子间的吸引力是形成液体内摩擦力的主要因素。当温度上升时,分子间隙加大,吸引力减小,所以液体的粘滞性减小。但气体分子间的吸引力却微不足道,气体分子不规则运动的动量交换才是形成气体内摩擦力的主要因素。故当温度上升时,气体分子运动加剧,动量交换频繁,气体的粘滞性增大。

测得在压力小于1MPa时,当压力变化时,气体的粘滞系数几乎不变,多数液体也是如此。因此一般认为在普通的压力下,流体的粘滞性不随压力变化,而只随温度变化。但是在高压作用下,气体和液体的粘滞性均随压力的升高而增大。如汞在10⁴MPa时的粘滞性比在0.1MPa时的粘滞性大了一倍。

水的动力粘滞系数与温度的关系,可近似的用下述经验公式计算:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-12)$$

式中 μ_0 ——水在0℃时的动力粘滞系数, Pa·s;

t ——水温的摄氏度数, ℃。

气体的动力粘滞系数与温度的关系可近似用下述经验公式计算:

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (1-13)$$

式中 μ_0 ——气体在0℃时的动力粘滞系数, Pa·s;

T ——气体的绝对温度, K;

C ——视气体而定的常数。

常见气体在标准状态下的粘滞系数、常数 c 和分子量 M 列入表1-7中, 以备查用。

表 1-7 常见气体的粘滞系数、常数 C 和分子量

流 体 名 称	空气	氧	氮	氢	一氧化碳	二氧化碳	二氧化硫	水蒸汽
$\mu_0 (\times 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s})$	17.09	19.20	16.60	8.40	16.80	13.80	11.60	8.93
$\gamma (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s})$	13.20	13.40	13.30	93.50	13.50	6.93	3.97	11.12
C	111	125	104	71	100	254	306	961
M	28.96	32.00	28.02	2.016	28.01	44.01	64.06	18.01

混合气体的动力粘滞系数可用下列近似公式计算:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}} \mu_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-14)$$

式中 α_i ——混合气体中 i 组分气体所占的体积百分数;

M_i ——混合气体中 i 组分气体的分子量;

μ_i ——混合气体中 i 组分气体的动力粘滞系数Pa·s。

六、粘滞系数的测定

流体的粘滞系数不能直接测量, 往往通过测量与粘滞性有关的其他物理量, 经有关公式计算得到。例如在两个直径不同的同心圆筒的环形间隙中充以待测流体, 其中一圆筒固定, 另一圆筒以已知角速度旋转。此时测定所需的转动动力矩, 进而计算出该流体的粘滞系数。工业上测定各种液体粘滞系数, 最常用的是恩格勒粘度计。它的结构见图 1-4 所示。将贮液罐1与水箱2同心安装在支架5上。测定时先用木制针阀4将贮液罐底部的锥形通道3堵塞。将 220cm^3 的蒸馏水注入罐1。接通水箱2中的电加热器, 加热水箱中的水, 以便加热罐1中的蒸馏水, 使其温度达到 20°C , 并保持不变。迅速提起针阀4, 使蒸馏水经锥形通道3泄入长颈瓶6中。并测定 200cm^3 泄出所需的时间 t_0 (s)。然后用同样的方法测定待测液体被加热至某一指定温度后 200cm^3 泄出所需的时间 t (s)。待测液体在指定温度下的运动粘滞系数可由下