普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI PEITAO JIAOICAI

十一五

GONGCHENG LIUTI LIXUE XUEXI ZHIDAO

工程流体力学学习指导

杜广生 主编

中国电力出版社
http://jc.cepp.com.cn

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI PEITAO JIAOICAI

GONGCHENG LIUTI LIXUE XUEXI ZHIDAO

工程流体力学学习指导

主编　杜广生
编写　刘丽萍　雷　丽　王军旗
主审　张志宏

中国电力出版社
http://jc.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为杜广生主编的《普通高等教育“十一五”国家级规划教材　工程流体力学》的配套教学用书。全书共九章，每章设有教学基本要求、主要知识点、重点难点分析、典型例题、思考题和习题。

主要内容包括：流体静力学，流体动力学基础，相似原理和量纲分析，黏性流体的一维流动，气体的一维定常流动，理想不可压缩流体的有旋和无旋流动，黏性流体绕物体的流动，膨胀波和激波。

本书可作为普通高等教育能源动力类本科热能与动力工程、核工程与核技术专业，机械类机械设计制造及其自动化专业，土建类建筑环境与设备工程专业，环境与安全类环境工程等专业的教学用书，也可作为其他流体力学教材的辅助教学用书。

图书在版编目（CIP）数据

工程流体力学学习指导/杜广生主编. —北京：中国电力出版社，2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教材

ISBN 978-7-5083-8829-8

Ⅰ. 工… Ⅱ. 杜… Ⅲ. 工程力学：流体力学—高等学校—教学参考资料 Ⅳ. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 072317 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号　100044　http://jc.cepp.com.cn）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 6 月第一版　2009 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米　16 开本　11 印张　263 千字

定价 **18.00** 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有　翻 印 必 究

前　言

本书为杜广生主编的《普通高等教育“十一五”国家级规划教材　工程流体力学》和国家级精品课程山东大学“工程流体力学”的配套教学用书。全书共九章，每章设有教学基本要求、主要知识点、重点难点分析、典型例题、思考题和习题。《普通高等教育“十一五”国家级规划教材　工程流体力学》书中的少量习题作为本书的例题，并力求每个知识点对应一个例题。本书作为《普通高等教育“十一五”国家级规划教材　工程流体力学》辅助教学用书，主要以能源动力类的热能与动力工程、核工程与核技术、机械类的机械设计制造及其自动化 、土建类的建筑环境与设备工程、环境与安全类的环境工程等专业的需要为主，兼顾了其他相近专业的需要，也可作为其他流体力学教材的辅助教学用书。

本书在编写过程中，参考了教育部力学教学指导委员会基础力学课程教学指导分委员会制定的能源动力类流体力学课程教学基本要求以及由该分委员会流体力学、水力学课程指导组制定的流体力学课程教学主要知识点，同时参考了国家级精品课程山东大学“工程流体力学”教学网站的内容，例题和习题主要考虑上述三个方面的因素选取。本书编写的宗旨是为工科学生学习流体力学课程提供指导，力求帮助学生提高分析问题、解决问题的能力，全面、准确地掌握流体力学的基本理论、基本概念和基本计算技巧。

本书作者均为多年从事流体力学课程教学和参与国家级精品课程建设的教师，在本书的编写过程中注意融汇平时的教学经验和体会，对问题的叙述力求做到深入浅出，便于读者自学。

本书习题均在题后给出答案，由于查曲线和图表、系数的选取以及计算过程中小数的取舍因人而异，所以只供参考。

本书由山东大学杜广生主编，刘丽萍、雷丽、王军旗参加编写。第一～三章由杜广生编写，第四章由王军旗编写，第五、六章由雷丽编写，第七～九章由刘丽萍编写。海军工程大学张志宏教授主审，并对本书提出了许多宝贵的意见和建议，对提高书稿的质量大有裨益，在此谨表示衷心的感谢。

由于编者经验和水平所限，疏漏之处在所难免，恳请读者指正。

编者

2009 年 2 月于山东大学

目　录

前言
第一章　概述 …… 1
一、教学基本要求 …… 1
二、主要知识点 …… 1
三、重点、难点分析 …… 3
四、本章小结 …… 4
五、典型例题 …… 4
六、思考题 …… 8
七、习题 …… 9
第二章　流体静力学 …… 13
一、教学基本要求 …… 13
二、主要知识点 …… 13
三、重点、难点分析 …… 20
四、本章小结 …… 22
五、典型例题 …… 22
六、思考题 …… 27
七、习题 …… 28
第三章　流体动力学基础 …… 36
一、教学基本要求 …… 36
二、主要知识点 …… 36
三、重点、难点分析 …… 41
四、本章小结 …… 43
五、典型例题 …… 43
六、思考题 …… 51
七、习题 …… 51
第四章　相似原理和量纲分析 …… 62
一、教学基本要求 …… 62
二、主要知识点 …… 62
三、重点、难点分析 …… 64
四、本章小结 …… 65
五、典型例题 …… 65
六、思考题 …… 70
七、习题 …… 70

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第五章　黏性流体的一维流动 …… 73
一、教学基本要求 …… 73
二、主要知识点 …… 73
三、重点、难点分析 …… 81
四、本章小结 …… 82
五、典型例题 …… 82
六、思考题 …… 94
七、习题 …… 94
第六章　气体的一维定常流动 …… 100
一、教学基本要求 …… 100
二、主要知识点 …… 100
三、重点、难点分析 …… 106
四、本章小结 …… 107
五、典型例题 …… 108
六、思考题 …… 115
七、习题 …… 115
第七章　理想不可压缩流体的有旋流动和无旋流动 …… 118
一、教学基本要求 …… 118
二、主要知识点 …… 118
三、重点、难点分析 …… 127
四、本章小结 …… 128
五、典型例题 …… 129
六、思考题 …… 133
七、习题 …… 134
第八章　黏性流体绕物体的流动 …… 138
一、教学基本要求 …… 138
二、主要知识点 …… 138
三、重点、难点分析 …… 147
四、本章小结 …… 148
五、典型例题 …… 148
六、思考题 …… 152
七、习题 …… 152
第九章　膨胀波和激波 …… 156
一、教学基本要求 …… 156
二、主要知识点 …… 156
三、重点、难点分析 …… 160
四、本章小结 …… 161
五、典型例题 …… 161
六、思考题 …… 165
七、习题 …… 165
参考文献 …… 168

第一章 概 述

一、教学基本要求

理解连续介质模型、流体的压缩性、流体黏性的概念；了解理想流体、实际流体的概念以及液体的表面性质；掌握牛顿内摩擦定律、作用在流体上的力及流体力学中的量纲和单位。

二、主要知识点

1. 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法包括理论分析、数值模拟和实验研究。理论分析的方法是以实际问题为对象建立模型，进行严密数学推导求解。通过对流体物理性质和流动特性的科学抽象，确立合理的理论模型。数值计算方法一般按照理论分析方法确定数学模型，在此基础上合理选用计算方法，通过编制计算程序或者用商业计算软件上机计算，得到近似解，分析答案，以确定是否符合精度要求。该方法的优点是，过去许多用数学解析方法不能求解的流体力学问题，用电子计算机通过数值计算便可得到解决。实验研究方法一般要对实际流体力学问题的影响因素分清主次，抓住主要因素，根据相似原理建立实验模型，选择流动介质，将实验数据整理成相似准则数，并通过对实验数据的拟合找出准则方程式，此方程便可推广应用于相似的流动。

2. 流体力学的主要研究对象

流体力学的主要研究对象为气体和液体。它们具有各自的特性，在某些方面又具有共性。气体没有一定的体积、不存在自由液面、易于压缩；液体具有一定的体积、有自由液面、不易压缩。

3. 流体的连续介质模型

在流体力学的研究中将流体作为由无穷多稠密、没有间隙的流体质点构成的连续介质，这就是1755年欧拉提出的“连续介质模型”。

4. 流体的压缩性和膨胀性

在一定的温度下，单位压强增量引起的体积变化率定义为流体的压缩率，用以衡量流体压缩性的大小，其表达式为

$$\kappa = -\frac{\frac{\mathrm{d}V}{V}}{\mathrm{d}p} = -\frac{\mathrm{d}V}{V\mathrm{d}p} \quad \mathrm{m^2/N} \tag{1-1}$$

式中 $\mathrm{d}p$——压强增量，Pa；

$\mathrm{d}V/V$——$\mathrm{d}p$ 引起的体积变化率。

工程中往往还涉及流体的体积模量或称为体积弹性系数，用 K 来表示，定义为压缩率的倒数，其表达式为

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{V\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V} \tag{1-2}$$

式（1-2）表明，K 值大的流体压缩性小，K 值小的流体压缩性大。K 的单位和压强的单位相同。

当压强一定时，流体温度变化体积改变的性质称为流体的膨胀性，膨胀性的大小用体膨胀系数来表示，其表达式为

$$\alpha_V = \frac{\frac{\mathrm{d}V}{V}}{\mathrm{d}T} = \frac{\mathrm{d}V}{V\mathrm{d}T} \quad 1/℃ \text{ 或 } 1/\mathrm{K} \tag{1-3}$$

式中 $\mathrm{d}T$——温度增量；

$\frac{\mathrm{d}V}{V}$——相应的体积变化率。

一般情况下，由于温度升高体积膨胀，故二者同号。

5. 流体的黏性

流体流动时产生内摩擦力的性质称为流体的黏性，黏性是流体的固有物理属性，但黏性只有在运动状态下才能显示出来。

6. 牛顿内摩擦定律

$$\tau = \mu \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}y} \quad \mathrm{N/m^2} \tag{1-4}$$

式（1-4）仅适用于层流流动的情况。该式表明，黏性剪切力和速度梯度成正比，其物理意义为：在层流流动中相邻两层之间的剪切应力与流体微团的角变形速度成正比。比例系数 μ 为流体的动力黏度，亦称为动力黏性系数，单位为 Pa·s。流体动力黏度的大小表征了流体黏度的实际大小。黏度有时还用运动黏度来表示，其定义式为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \mathrm{m^2/s} \tag{1-5}$$

式中 ν——流体的运动黏度，亦称为运动黏性系数；

ρ——密度，$\mathrm{kg/m^2}$。

7. 作用在流体上的力

作用在流体上的力分为两种类型，一类是分离体以外的其他物体作用在分离体上的力，称为表面力，另一类是某种力场作用在流体上的力，此类力称为质量力。

8. 流体的密度

单位体积流体所具有的质量定义为流体的密度，用符号 ρ 表示，单位为 $\mathrm{kg/m^3}$，混合气体的密度按组分气体在混合气体中所占体积百分比计算，即

$$\rho = \rho_1\alpha_1 + \rho_2\alpha_2 + \cdots + \rho_n\alpha_n = \sum_{i=1}^{n}\rho_i\alpha_i \tag{1-6}$$

式中 ρ_i——混合气体中各组分气体的密度；

α_i——混合气体中各组分气体所占体积的百分比。

密度的倒数定义为比体积，比体积表征了单位质量流体所具有的体积，定义式为

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \mathrm{m^3/kg} \tag{1-7}$$

流体的相对密度定义为某流体的密度与 4℃时水的密度的比值，用 d 表示，定义式为

$$d = \frac{\rho_f}{\rho_w} \tag{1-8}$$

9. 理想流体和实际流体

自然界中的实际流体都是具有黏性的，所以实际流体又称黏性流体。为了便于处理工程实际问题，可以建立一个没有黏性的理想流体模型，即把假想没有黏性的流体作为理想流体，它是一种假想的流体模型，在实际中并不存在。

10. 表面张力和毛细现象

表面张力是液体分子间的力引起的，其作用结果使得液面好像一张紧的弹性膜。表面张力的大小和液体的种类有关，不同的液体表面张力的大小不同。温度变化时，表面张力的大小也要发生变化，温度升高表面张力减小。毛细现象可以用内聚力和附着力之间的关系解释。附着力大于内聚力时，表面力使管内的液面呈向上凹的曲面，管内液面上升；附着力小于内聚力时，在表面力作用下液面呈现上凸的形状，管内液面下降。

11. 流体力学中的单位制

流体力学中各物理量的单位一般采用国际单位制表示，国际单位制的代号为 SI。有七个有定义的单位，与流体力学有关的有四个，分别是：长度单位米（m）、质量单位千克（kg）、时间单位秒（s）、热力学温度开尔文（K），其他物理量的单位都是由它们导出的。如速度的单位是由长度单位和时间单位相除得到的，为 m/s。力的单位是由牛顿第二定律得到的，为质量和加速度的乘积，单位是 $kg \cdot m/s^2$，其名称为牛顿，简称牛，用 N 表示。

三、重点、难点分析

1. 流体的黏性

形成流体黏性的原因有两个方面，一是流体分子间的引力，当流体微团发生相对运动时，必须克服相邻分子间的引力，这种作用类似物体之间的相互摩擦，从而表现出摩擦力；另一个原因是流体分子的热运动，当流体层之间作相对运动时，由于分子的热运动，流体层之间产生质量交换，由于流层之间的速度差别，必然产生动量交换，从而产生力的作用，使相邻的流体层之间产生摩擦力。对于液体来说，分子距小，分子的引力大，而分子的热运动微弱，因此液体黏性的主要因素是分子间的引力。对于气体，分子距大，分子间的引力小，而分子的热运动强烈，所以认为构成气体黏性的主要因素是分子的热运动。

压强的改变对气体和液体黏性的影响有所不同。由于压强变化对分子的动量交换影响非常微弱，所以气体黏性随压强的变化很小。压强增大时对分子的间距影响明显，故液体的黏性受压强变化的影响较气体大。但在通常的变化范围内（低于 100atm）变化时，液体压强的变化对黏性的影响很小，通常可以忽略不计。压强较高时，必须考虑压强变化对液体黏性的影响。

温度对液体和气体黏性的影响截然相反，温度升高时气体分子的热运动加剧，气体的黏性增大，分子距增大对气体黏性的影响可以忽略不计。对于液体，由于温度升高体积膨胀，分子距增大，分子间的引力减小，故液体的黏性随温度的升高而减小。而液体温度升高引起的液体分子热运动量的变化对黏性的影响可以忽略不计。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿内摩擦定律的表达式为式（1-4），表征了黏性流体作层流流动时流体层与层之间的摩擦应力和速度梯度之间的关系，其物理意义为：在黏性流体的层流流动中，层与层之间的摩擦应力与流体微团的角变形速度成正比。证明如下：

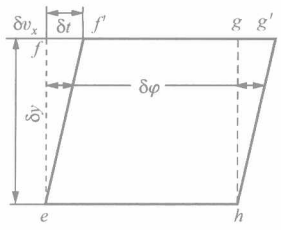

图 1-1　流体微团变形示意

如图 1-1 所示，在运动的流体中取一正方形的流体微团，在 t 时刻其形状为 $efgh$，经过一无限小的时间间隔 δt 后，由于上下层流速的差别，其形状变为 $efg'h'$，产生角变形 $\delta\varphi$，角变形速度可由几何关系推出：

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}=\lim_{\delta t\to 0}\frac{\delta\varphi}{\delta t}=\lim_{\delta t\to 0}\frac{\delta v_x\delta t/\delta y}{\delta t}=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}y}$$

即在流动过程中流体微团的角变形速度等于速度梯度，因此牛顿内摩擦定律的物理意义可以表述为：在层流流动时流层之间的剪切应力和流体微团的角变形速度成正比，其比例系数为流体的动力黏度。

四、本章小结

本章主要介绍了流体力学的三种研究方法，即理论分析、实验研究和数值模拟方法；介绍了流体力学的研究对象及流体的重要物理属性；分析了流体黏性的形成原因及影响因素；介绍了实际流体和理想流体的概念；通过典型例题示范了有关问题的计算技巧，为后续章节的学习奠定了基础。

五、典型例题

【例 1-1】 如图 1-2 所示，一鉴定压强表的校正器内充满油液，油的压缩率 $\kappa=4.75\times10^{-10}\mathrm{m^2/N}$，用手轮旋进密封良好的活塞，已知活塞直径 $D=10\mathrm{mm}$，旋进螺距 $t=2\mathrm{mm}$，在 1atm 时的充油体积为 $V_0=200\mathrm{cm^3}$，问手轮应旋进多少圈，才能造成 200atm 的油压。

解： 将式（1-1）写成差分形式，则有

$$\kappa=-\frac{1}{V}\frac{\delta V}{\delta p}$$

设手轮旋进的转数为 n，则旋进的体积应为

$$\delta V=nt\frac{\pi D^2}{4}=\kappa V\delta p$$

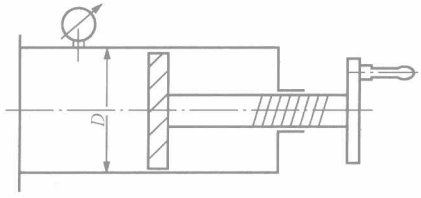

图 1-2　压强表校正器

则

$$n=\frac{4\kappa V\delta p}{\pi D^2 t}$$

所以

$$n=\frac{4\times4.75\times10^{-10}\times200\times10^{-6}\times(200-1)\times10^5}{\pi\times0.01^2\times0.002}$$

$$=12.0(\text{转})$$

【例 1-2】 把绝对压强 $p_1=1\mathrm{atm}$，温度 $T_1=20℃$的水密封在体积 $V=2\mathrm{m^3}$ 的高压容器中进行水压试验。欲使容器中水的绝对压强为 $p_2=50\mathrm{atm}$，试问需用高压泵向容器中注入多少体积的水？（假设高压容器是刚体不变形，水受压后温度不变。计算时取 $K=2.17\times10^9\mathrm{N/m^2}$。）

解： 注入的水体积等于水被压缩后减少的体积。把体积弹性系数表达式右边的微分用差分代替，则

$$K=-\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}}=-\frac{p_2-p_1}{\frac{\Delta V}{V}}$$

得减少的体积

$$\Delta V = -\frac{(p_2 - p_1)V}{K} = \frac{-(50-1)\times 101\ 325\times 2}{2.17\times 10^9} = -4575.96(\text{mL})$$

式中负号是表示水体积的减少，这减少的体积恰是水压试验时，泵向高压容器所注入的体积。

【例 1-3】 若某活塞可自由、无摩擦地在气缸内移动，气缸内气体可视为完全气体，温度为 20℃。若缸内气体压强不变，气体温度升高到 80℃，气体容积相对变化了多少？

解： 根据题意可知，气缸内气体质量不变，容积相对变化率等于比体积相对变化率，即

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{v_2 - v_1}{v_1} = \frac{v_2}{v_1} - 1 = \frac{RT_2}{p_2}\frac{p_1}{RT_1} - 1$$

由于压强不变

$$\frac{v_2 - v_1}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} - 1 = \frac{273+80}{273+20} - 1 = 0.205$$

即气缸容积相对增加了 0.205 倍。

【例 1-4】 容积为 10m^3 的容器装满某种液体。当压强增加 6atm 时体积减小 0.1m^3，求该液体的体积压缩率。

解： 将式（1-1）写成差分形式，即

$$\kappa = -\frac{1}{V}\frac{\delta V}{\delta p}$$

则

$$\kappa = \frac{0.1}{10\times 6\times 1.013\ 25\times 10^5} = 1.64\times 10^{-8}(\text{m}^2/\text{N})$$

即该液体的体积压缩率为 $1.64\times 10^{-8}\text{m}^2/\text{N}$。

【例 1-5】 一平板距另一固定平板 $\delta=1\text{mm}$，二板水平放置，其间充满流体，上板在单位面积上为 $\tau=2\text{N/m}^2$ 的力作用下，以 $v_x=0.4\text{m/s}$ 的速度移动，求该流体的动力黏度。

解： 由牛顿内摩擦定律（1-4）

$$\tau = \mu\frac{\text{d}v_x}{\text{d}y}$$

由于两平板间隙很小，速度可以认为是线性分布，可用增量来表示微分。

$$\mu = \tau\frac{\text{d}v_x}{\text{d}y} = \tau\frac{v_x - 0}{\delta} = 2\times\frac{1\times 10^{-3}}{0.4} = 0.005(\text{Pa}\cdot\text{s})$$

【例 1-6】 如图 1-3 所示，一圆锥体绕竖直中心轴等速旋转，锥体与固定的外锥体之间的缝隙 $\delta=2\text{mm}$，其中充满 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油。已知锥体顶面半径 $R=0.4\text{m}$，锥体高度 $H=0.5\text{m}$，当旋转角速度 $\omega=20\text{s}^{-1}$ 时，求所需的旋转力矩。

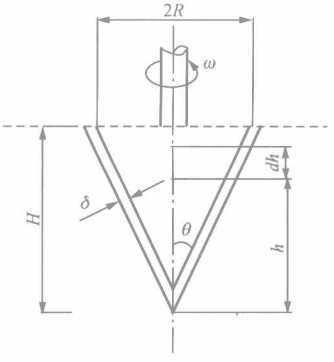

图 1-3 旋转的锥体

解： 设圆锥的半锥角为 θ

$$\tan\theta = \frac{R}{H} = 0.8,\quad \cos\theta = 0.7809$$

高度 h 处的圆锥半径 $r=h\tan\theta$

在微元高度 $\text{d}h$ 范围内的圆锥表面积

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

$$dA = 2\pi r \frac{dh}{\cos\theta} = \frac{2\pi\tan\theta}{\cos\theta} h\,dh$$

设间隙内的流速为直线变化，即

$$\frac{dv}{dy} = \frac{v}{\delta} = \frac{\omega r}{\delta}$$

则在微元高度范围内的力矩为

$$dM = r\tau dA = r\mu \frac{\omega r}{\delta} 2\pi \frac{\tan\theta}{\cos\theta} h\,dh = 2\pi\mu \frac{\omega}{\delta} \frac{\tan^3\theta}{\cos\theta} h^3\,dh$$

圆锥旋转所需的总力矩为

$$M = \int dM = 2\pi\mu \frac{\omega}{\delta} \frac{\tan^3\theta}{\cos\theta} \int_0^H h^3\,dh$$

$$= 2\pi\mu \frac{\omega}{\delta} \frac{\tan^3\theta}{\cos\theta} \frac{H^4}{4}$$

$$= 2\pi \times 0.1 \times \frac{20 \times 0.8^3}{0.002 \times 0.7809} \times \frac{0.5^4}{4} = 64.37(\text{N} \cdot \text{m})$$

【例 1-7】 如图 1-4 所示，液体充满两个同心圆筒之间的环形空间，液体的深度 $h=200\text{mm}$。内筒外半径 $r_1=100\text{mm}$，外筒内半径 $r_2=105\text{mm}$。外筒固定不动，内筒旋转。如果内筒的转速 $n=50\text{r/min}$，需要的转矩 $M=0.15\text{N}\cdot\text{m}$。试求该液体的动力黏性系数 μ 的值（筒底部的切应力不计）。

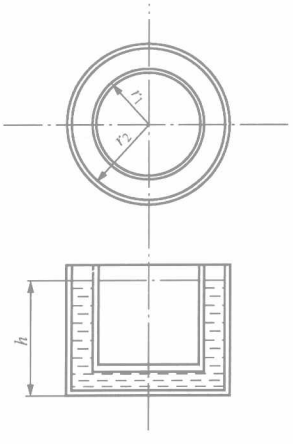

图 1-4 同心圆筒

解： 使内筒旋转所需要的转矩是由于环形空间液体的黏性阻力引起的。设环形空间任一半径 r 处的黏性阻力为 F，转矩为 dM，则

$$dM = Fr = -\mu \frac{dv}{dr} 2\pi r h r$$

总转矩

$$M = \int dM = -2\pi\mu h \int \frac{dv}{dr} r^2$$

$$M\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = -\mu 2\pi h \int_v^0 dv$$

$$M\left(-\frac{1}{r}\right)\Big|_{r_1}^{r_2} = -\mu 2\pi h(0 - v)$$

$$M\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \mu 2\pi h r_1 \omega = \mu 2\pi h r_1 \frac{2\pi n}{60}$$

$$\mu = \frac{15M\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{\pi^2 h r_1 n}$$

将给定数值代入上式得

$$\mu = \frac{15 \times 0.15 \times \left(\frac{1}{0.1} - \frac{1}{0.105}\right)}{\pi^2 \times 0.2 \times 0.1 \times 50} = 0.1086(\text{Pa} \cdot \text{s})$$

此题列出转矩表达式时，应注意到环形空间液体被内筒带动的速度 v，随着 r 的增加而减小，因此在式中要加负号。

【例 1-8】 转轴直径 $d=0.36\text{m}$，轴承长度 $L=1\text{m}$，轴与轴承的缝隙宽 $\delta=0.2\text{mm}$，其中充满动力黏性系数 $\mu=0.72\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的油，若轴的转速 $n=200\text{r/min}$，如图 1-5 所示，求克

服油的黏性阻力所需的功率。

解：油层与轴承接触处的速度为0，与轴接触处的速度等于轴的旋转周速，即

$$v=\frac{\pi nd}{60}$$

$$=\frac{\pi\times 200\times 0.36}{60}$$

$$=3.77(\mathrm{m/s})$$

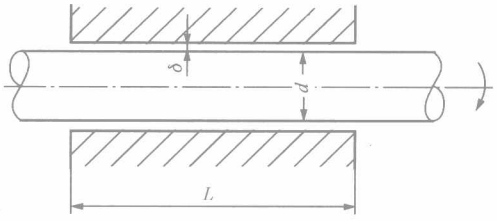

图 1-5 滑动轴承

设油层在缝隙中沿径向的速度为直线分布，即

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}=\frac{v}{\delta}$$

则轴与轴承间的总切力为

$$T=\tau A=\mu\frac{v}{\delta}\pi dl$$

$$=\frac{0.72\times 3.77\times\pi\times 0.36\times 1}{2\times 10^{-4}}$$

$$=1.535\times 10^{4}(\mathrm{N})$$

克服轴承摩擦所消耗的功率为

$$N=M\omega=Tv$$

$$=1.535\times 10^{4}\times 3.77$$

$$=5.79\times 10^{4}(\mathrm{N\cdot m/s})$$

$$=57.9(\mathrm{kW})$$

【例 1-9】 在锅炉尾部烟道中，测得烟气各组分气体的体积百分数，分别为 $\alpha_{N_2}=76\%$，$\alpha_{O_2}=5\%$，$\alpha_{CO_2}=14\%$，$\alpha_{SO_2}=0.5\%$。这些气体在标准状态下的动力黏度和分子量分别为 $\mu_{N_2}=16.60\times 10^{-8}\,\mathrm{Pa\cdot s}$，$M_{N_2}=28.02$；$\mu_{O_2}=19.20\times 10^{-6}\,\mathrm{Pa\cdot s}$，$M_{O_2}=32.00$；$\mu_{H_2O}=8.93\times 10^{-6}\,\mathrm{Pa\cdot s}$，$M_{H_2O}=18.01$；$\mu_{CO_2}=13.80\times 10^{-6}\,\mathrm{Pa\cdot s}$，$M_{CO_2}=44.01$；$\mu_{SO_2}=11.60\times 10^{-6}\,\mathrm{Pa\cdot s}$，$M_{SO_2}=64.06$。在标准状态下各组分的密度分别为 $\rho_{N_2}=1.25\mathrm{kg/m^3}$，$\rho_{H_2O}=0.804\mathrm{kg/m^3}$，$\rho_{O_2}=1.43\mathrm{kg/m^3}$，$\rho_{CO_2}=1.98\mathrm{kg/m^3}$，$\rho_{SO_2}=2.87\mathrm{kg/m^3}$。试求标准状态下烟气的动力黏度 μ 和运动黏度 ν。

解：烟气是混合气体，标准状态下的密度

$$\rho=\rho_1\alpha_1+\rho_2\alpha_2+\cdots+\rho_n\alpha_n$$

$$=1.25\times 0.76+1.43\times 0.05+0.804\times 0.045$$

$$+1.98\times 0.14+2.87\times 0.005$$

$$=1.3493(\mathrm{kg/m^3})$$

标准状态下的动力黏度

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}\mu_i}{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i M_i^{\frac{1}{2}}}=15.954\times 10^{-6}(\mathrm{Pa\cdot s})$$

标准状态下的运动黏度

$$\nu=\frac{\mu}{\rho}=\frac{15\,954\times 10^{-6}}{1.3493}=11.824\times 10^{-6}(\mathrm{m^2/s})$$

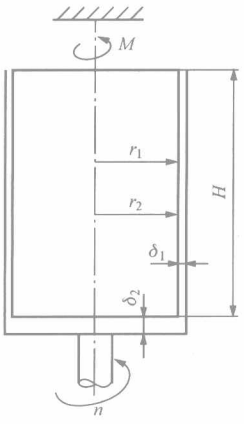

图 1-6 黏度测定仪

【例 1-10】 黏度测定仪有内外两同心圆筒组成，如图 1-6 所示，外筒以转速 n（r/min）旋转，通过内外筒之间的油液，将力矩传递至内筒，内筒固定悬挂于一金属丝下，金属丝所受扭矩 M 可以通过旋转的角度测定。若内外筒之间的间隙 $\delta_1=r_2-r_1$，底面间隙 δ_2，筒高 H，求油液动力黏性系数的计算式。

解：（1）圆筒侧壁上所受的摩擦切应力为

$$\tau_1=\mu\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}r}=\mu\frac{2\pi nr_2}{60\delta_1}$$

相应产生的摩擦力矩为

$$M_1=(2\pi r_1H)\tau\cdot r_1=\frac{\pi^2r_1^2r_2Hn}{15\delta_1}\mu$$

（2）圆筒底面上所受的摩擦切应力为

$$\tau_2=\mu\frac{2\pi n}{60\delta_2}r$$

相互产生的摩擦力矩为

$$M_2=\int_0^{r_1}\tau_2(2\pi r\mathrm{d}r)r=\mu\frac{\pi^2n}{15\delta_2}\int_0^{r_1}r^3\mathrm{d}r=\frac{\pi^2nr_1^4}{60\delta_2}\mu$$

（3）总力矩

$$M=M_1+M_2=\mu\left(\frac{\pi^2r_1^2r_2Hn}{15\delta_1}+\frac{\pi^2nr_1^4}{60\delta_2}\right)$$

所以

$$\mu=\frac{\dfrac{15M}{\pi^2r_1^2n}}{\dfrac{r_1^2}{4\delta_2}+\dfrac{r_2H}{\delta_1}}$$

【例 1-11】 试计算 20℃的水在竖直放置的、直径为 1mm 的玻璃管内因毛细作用所能上升的最大值。

解： 查得 20℃水的密度 $\rho=998\mathrm{kg/m^3}$，表面张力 $\sigma=0.0728\mathrm{N/m}$，则由式 $h=\dfrac{4\sigma\cos\theta}{\rho gd}$ 可得，h 最大时，$\theta=90°$，则

$$h=\frac{4\times0.0728\times1}{998\times9.8\times0.001}=29.8(\mathrm{mm})$$

六、思考题

1-1 牛顿内摩擦定律为 $\tau=\mu\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$。流体质点之间的切应力 τ 为何与流速分布的情况 $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$ 直接相关呢？

1-2 牛顿内摩擦定律中的剪切应力，顾名思义是指流体内部相邻质点之间的摩擦力。但在流体与固体壁面相接触的地方也存在切应力，流体与固体壁面之间的摩擦力是内摩擦力还是外摩擦力？

1-3 为什么液体的动力黏度 μ 随温度的增加而减小，而气体的动力黏度 μ 却随温度的增加而增大？

1-4 在温度为20℃时，$\nu_{air}=15.7\times10^{-6}m^2/s$，$\nu_{H_2O}=1.01\times10^{-6}m^2/s$，空气的运动黏性系数比水的运动黏性系数大十几倍，是否意味着空气的黏性比水还大？

1-5 表面张力是分子作用力的表现，为什么流体内部不存在这种张力，而只在液面上才存在？是否在弯曲的液面上才存在表面张力？

1-6 牛顿内摩擦定律的表达式如何？说明各项的物理意义。

1-7 为什么玻璃上一滴油总是近似呈球形？

1-8 为什么要提出理想流体这个假设？它与热力学中的理想气体有什么区别？

1-9 表面张力是如何产生的？其大小的影响因素有哪些？

1-10 流体黏性与哪些因素有关？它们随温度是如何变化的？

1-11 作用在流体上的力包括哪些？在什么情况下有惯性力？在什么情况下有摩擦力？

1-12 什么是流体的压缩性？什么是流体的膨胀性？流体的压缩性与膨胀性的大小如何反映？

七、习题

1-1 已知某种物质的密度为$\rho=890kg/m^3$，试求其相对密度d。 [0.89]

1-2 某种液体的相对密度$d=1.8$，试求比体积为多少。 [$5.56\times10^{-4}m^3/kg$]

1-3 某工程流体力学实验室，用大气压力计测得当地大气压强$p=774mmHg$，室内气温$t=-4℃$。试求实验室内空气的密度ρ值。 [$1.337kg/m^3$]

1-4 某流体的相对密度为0.006，求该流体的密度。 [$6kg/m^3$]

1-5 某液体在温度不变的条件下，压强增加2×10^5Pa，体积减小0.01%，求其体积弹性模量。 [2GPa]

1-6 某封闭容器内装满液体，液体的质量$m=1.5kg$，容器的容积$V=2L$，求该液体的相对密度。 [0.75]

1-7 海水的平均深度h为3800m，平均膨胀系数为1.6×10^{-4}（1/℃），计算海水温度升高1℃时海平面上升的高度。 [0.608m]

1-8 证明完全气体在定温条件下，压缩系数的大小等于其压强的倒数。

1-9 水在常温下，由5atm增加到20atm，其密度将改变多少？ [0.0786%]

1-10 绝对压强为4atm的空气的等温体积模量和等熵体积模量各等于多少？ [39.244kPa；549.17kPa]

1-11 空气的初始状态为$t_0=15℃$，$p_0=101.3kPa$，在汽缸内绝热压缩后体积变为原来的$\frac{1}{2}$，求终态温度和压强值。 [107℃；267.3kPa]

1-12 敞口水箱水温10℃，水深3m，如水加热到20℃，水箱水位上升多少？ [4.5mm]

1-13 求绝对压强为140kPa、温度为50℃时的空气密度。 [$1.51kg/m^3$]

1-14 水银的密度为13 600kg/m^3，求它对4℃水的相对密度d。 [13.6]

1-15 水的体积弹性模量$K=2.0\times10^9N/m^2$，求密度$\rho=1000kg/m^3$时水中的声速c。 [$c=1.414\times10^3m/s$]

1-16 在温度为0℃、压强为760mmHg的标准状态下，烟气的密度为$1.34kg/m^3$，当

压强不变、温度为400℃时，求烟气的密度。 [0.5436kg/m³]

1-17 某活塞可自由、无摩擦地在气缸内移动，气缸内气体可视为完全气体，温度为20℃。若缸内气体压强不变，气体温度升高到60℃，气缸容积相对变化了多少？

[增加了0.14倍]

1-18 用压缩机压缩空气，绝对压强从1atm升高为6atm，温度由20℃升高为78℃，问空气的体积将减少多少？ [约减少80%]

1-19 体积为5m³的水，在温度不变的条件下，压强从1atm增加到5atm，体积减小了0.001m³，求水的压缩率和弹性系数值。 [0.51×10^{-9}m²/N；1.96×10^{9}N/m²]

1-20 体积为3m³的液体，在温度不变的条件下，压强从1×10^{5}Pa升高到3×10^{5}Pa，体积减小了0.001m³，求其压缩率。 [1.67×10^{-9}m²/N]

1-21 敞口水箱水温10℃，水深2m，如水加热到20℃，水箱水位上升多少？

[0.003m]

1-22 体积为5m³的液体，在温度不变的条件下，压强从1×10^{5}Pa升高到4×10^{5}Pa，体积减小了0.002m³，求其压缩率。 [1.33×10^{-9}m²/N]

1-23 将初压$p_1=1.0\times10^{5}$N/m²的水装入体积为$V=1000$cm³的高压缸内，然后加压到$p_2=2.1\times10^{6}$N/m²，结果体积减小了1.0cm³。如果高压缸是刚体不变形，求水的体积弹性模量K。 [$K=2.0\times10^{9}$N/m²]

1-24 空气在30℃时的动力黏性系数为1.87×10^{-5}Pa·s，求其运动黏性系数。

[1.61×10^{-5}m²/s]

1-25 空气在0℃时的运动黏性系数为13.2×10^{-6}m²/s，密度为1.29kg/m³，求在150℃时的动力黏性系数值。 [23.6×10^{-6}Pa·s]

1-26 水在40℃时的运动黏性系数为0.661×10^{-6}m²/s，求其动力黏性系数。

[0.656×10^{-3}Pa·s]

1-27 飞轮重500N，回转半径300mm，转轴和轴套间的距离0.05mm，轴的直径20mm，轴套长50mm，已知飞轮以600r/min的转速旋转时，动力中断后的减速度为0.02rad/s²，求轴与轴套之间的流体动力黏性系数值。 [0.232Pa·s]

1-28 一平板距另一固定平板$\delta=0.5$mm，两板水平放置，其间充满液体，上板在单位面积上$\tau=2$N/m²的力作用下，以$v=0.25$m/s的速度移动，求该流体的动力黏性系数。

[0.004Pa·s]

1-29 滑动轴承轴径的转速$n=3000$r/min，轴径$d=40$mm，长度$l=80$mm，径向间隙$\delta=0.4$mm。已知润滑油在轴承转动情况时的动力黏度$\mu=0.054$Pa·s。求由于油黏性所消耗的功率。 [53.5W]

1-30 15℃的空气在直径200mm的圆管中流动，假定距管壁1mm处的速度为0.3m/s，试求每米管长上的摩擦阻力。 [3.41×10^{-3}N]

1-31 已知圆管中的流速分布公式为

$$v=C\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right)$$

求管中切应力τ的分布公式。 $\left[\tau=\frac{2C\mu}{R}r\right]$

1-32 某流体的动力黏度 $\mu=5\times10^{-2}$Pa·s，流体在管内的流动速度分布如图 1-7 所示。速度的表达式为 $v=100-c(5-y)^2$。试问切向应力 τ 为多少？最大切向应力 τ_{max} 为多少？发生在何处？ [最大切向应力发生在管壁上，$\tau_{max}=2$Pa]

1-33 一平板在一薄层水面上带动水体做水平运动。已知平板运动速度 $v=1$m/s，板下水体厚度 $\delta=5$mm，流速线性分布，其动力黏度 $\mu=1.0\times10^{-3}$Pa·s，求作用在单位面积上的黏性阻力。 [$\tau=0.2$Pa]

1-34 直径为 0.5m 的水平圆盘，在较大的平板上绕其中心以 100r/min 的转速旋转。已知两壁面间的间隙为 0.3mm，间隙内油的动力黏度为 0.35Pa·s，如果忽略油的离心惯性力影响和圆盘上面的空气阻力，试求转动圆盘所需的力矩。 [74.97N·m]

1-35 有一流场流体黏度 $\mu=0.3$Pa·s，流体作层流流动，速度分布 $v=1+0.25y^{0.5}$，求 $y=0.08$m 处的内摩擦切应力。 [0.133Pa]

1-36 如图 1-8 所示，有一底为 45cm×60cm 的矩形木版，质量为 5kg，以 1m/s 的速度沿着与水平面成 30°夹角的斜面匀速下滑，木板与斜面之间的油层厚度为 2mm，求油的动力黏滞系数。 [0.185Pa·s]

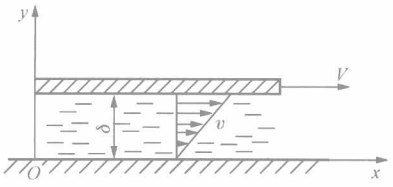

图 1-7 1-32 题用图

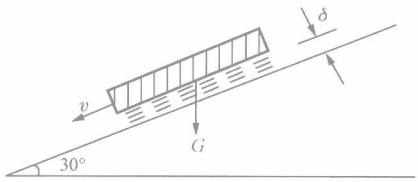

图 1-8 1-36 题用图

1-37 两平行平板之间的间隙为 1.5mm，间隙内充满密度为 885kg/m³、运动黏度为 0.001 59m²/s 的油，试求当两板相对速度为 5m/s 时作用在平板上的摩擦应力。 [4700Pa]

1-38 长度 $l=1$m，直径 $d=200$mm 水平放置的圆柱体，置于内径 D=206mm 的圆管中以 $v=1$m/s 的速度移动，已知间隙中油液的相对密度为 $d=0.92$，运动黏度 $\nu=5.6\times10^{-4}$m²/s，求所需拉力 F 为多少？ [107.8N]

1-39 往复式压缩机的气缸与活塞间用润滑油润滑。已知润滑油在压缩机运行情况下的动力黏度 $\mu=1.44$Pa·s，气缸内径 D=240mm，二道活塞环与气缸壁的间隙都为 $\delta=0.2$mm，每活塞环的宽度都为 $b=20$mm，活塞运动速度 $v=2$m/s，试求活塞运动时应克服的黏滞力。 [434.07N]

1-40 图 1-9 中，上下两平行圆盘，直径均为 d，间隙厚度为 δ，间隙中液体的动力黏度为 μ，若下圆盘固定不动，上圆盘以角速度 ω 旋转，求所需力矩 T 的表达式。 $\left[\frac{\pi\mu\omega d^4}{32\delta}\right]$

1-41 图 1-10 中，一木块的底面积为 40cm×45cm，厚度为 1cm，质量为 5kg，沿着涂有润滑油的斜面以速度 $v=1$m/s 等速下滑，油层厚度 $\delta=1$mm，求润滑油的动力黏度。 [0.105Pa·s]

1-42 试分析图 1-11 中三种情况下流体微团 A 受到哪些表面力和质量力的作用。

1-43 已测的锅炉烟气各组分气体的体积百分比分别为 $\alpha_{CO_2}=13.5\%$，$\alpha_{SO_2}=0.3\%$，$\alpha_{O_2}=5.2\%$，$\alpha_{N_2}=76\%$，$\alpha_{H_2O}=5\%$，求烟气的密度。 [1.341kg/m³]

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com