

工程流体力学

学习指导及习题解答

陈洁 袁铁江 编著



清华大学出版社

工程流体力学

学习指导及习题解答

陈洁 袁铁江 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是配合《工程流体力学》(孔珑主编第4版)而编写的参考书。内容包括《工程流体力学》的主要内容概括和每一章的难点;《工程流体力学》习题的参考解答,包括《工程流体力学》(孔珑主编第4版)一书中各章习题,约210题。

本书可作为高等院校工程流体力学课程的教学辅导书和流体力学、水力学、空气动力学等相关课程的教学参考书,便于本科学生自主学习和研究生入学、注册设备工程师考试参考,也适用于相关工程技术人员及教师参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学学习指导及习题解答/陈洁,袁铁江编著.--北京:清华大学出版社,2015
ISBN 978-7-302-37859-4

I. ①工… II. ①陈… ②袁… III. ①工程力学—流体力学—高等学校—教学参考资料
IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第202652号

责任编辑:王剑乔
封面设计:傅瑞学
责任校对:袁芳
责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京季蜂印刷有限公司

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:10.25

字 数:233千字

版 次:2015年5月第1版

印 次:2015年5月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:25.00元

产品编号:057343-01

前 言

工程流体力学是研究流体(液体和气体)的力学运动规律及其应用的学科,主要研究在各种力的作用下,流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体壁面、流体和流体间、流体与其他运动形态之间的相互作用和流动规律。流体力学是力学的一个重要分支,而工程流体力学(应用流体力学)侧重在生产、生活中的实际应用,它不追求数学上的严密性,而是趋向于解决工程中出现的实际问题,是高等院校机械类、材料类、仪器仪表类、航空航天类、建筑工程类、热能动力类和流体动力工程专业学生必修的技术基础课程。

为加强教辅材料的建设,便于读者能更好地完成工程流体力学这门课程的学习,特编写了这本工程流体力学学习指导及习题解答。

《工程流体力学》(孔珑主编第4版)是工程流体力学课程的经典教学用书。其课后习题很好地配合了教学要求,与教材的理论内容密切联系,给读者提供了完整的工程流体力学解题训练,加强了学生对内容的理解和掌握,起到了很好的示范和引导作用。本书是与该教材配套的参考书。本书的体例与教材相同,共分十章,分别为绪论、流体及其物理性质、流体静力学、流体运动学和流体动力学基础、相似原理和量纲分析、管内流动和水力计算、液体出流、气体的一维流动、理想流体的有旋流动和无旋流动、黏性流体绕过物体的流动、气体的二维流动。除第1章外其余每章由主要内容、本章难点、课后习题解答三部分组成。其中,主要内容部分对教材中的内容进行了高度的概括总结,系统简捷地串讲了该章的重要概念、重要理论、重要方程,为读者快捷地抓住学习重点提供帮助;本章难点对读者学习过程中经常出现,但又无力自我解决的一些疑难问题做了总结;课后习题解答部分给出了教材中每章末习题的详细解答,对读者的学习具有很强的指导作用,提高了学习效率。

本书可作为高等院校工程流体力学课程的教学辅导书和流体力学、水力学、空气动力学等相关课程的教学参考书,便于本科学生自主学习和研究生入学、注册设备工程师考试参考,也适用于相关工程技术人员及教师参考。

本书由陈洁编写第1章及第4~10章,袁铁江编写第2~3章。在编写过程中,得到了王春耀教授的指点与帮助。另外,本书的编写与出版,得到了清华大学出版社的大力支持,并且借鉴了许多相关的教材和标准规范,同时也引用了互联网上的资料,在此对有关作者一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,恳请读者批评、指正。

编 者

2015年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 流体及其物理性质	3
2.1 主要内容	3
2.2 本章难点	6
2.3 课后习题解答	7
第 3 章 流体静力学	12
3.1 主要内容	12
3.2 本章难点	15
3.3 课后习题解答	16
第 4 章 流体运动学和流体动力学基础	38
4.1 主要内容	38
4.2 本章难点	41
4.3 课后习题解答	42
第 5 章 相似原理和量纲分析	59
5.1 主要内容	59
5.2 本章难点	62
5.3 课后习题解答	62
第 6 章 管内流动和水力计算 液体出流	72
6.1 主要内容	72
6.2 本章难点	78
6.3 课后习题解答	78
第 7 章 气体的一维流动	104
7.1 主要内容	104
7.2 本章难点	109

IV 工程流体力学学习指导及习题解答

7.3 课后习题解答	110
第8章 理想流体的有旋流动和无旋流动	122
8.1 主要内容	122
8.2 本章难点	126
8.3 课后习题解答	126
第9章 黏性流体绕过物体的流动	135
9.1 主要内容	135
9.2 本章难点	138
9.3 课后习题解答	139
第10章 气体的二维流动	149
10.1 主要内容	149
10.2 本章难点	151
10.3 课后习题解答	151
参考文献	157

第 1 章

绪 论

1. 流体力学的研究内容和研究方法

流体力学是力学的一个重要分支。以流体为研究对象,是研究流体平衡和运动规律的科学。流体力学包括流体静力学、流体运动学、流体动力学。

流体力学研究方法有理论分析方法、实验研究方法和数值计算方法。

理论分析方法是根据提出问题的主要因素提出适当的假定,建立一定的数学模型,根据物理基本定律,列出基本方程,运用数学工具寻求流体运动的普遍解。

实验研究方法是将实际流动问题概括为相似的实验模型,在实验中观察现象、测定数据并对数据进行处理、分析,得出实际模型的流动状况。

数值计算方法是根据理论分析与实验观测拟定计算方案,通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统进行分析。它的基本思想是把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替,通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程以获得场变量的近似值。

2. 流体力学在工程技术中的地位

流体力学在许多工业技术中有着广泛的应用,是许多工业技术部门必须应用和研究的一门重要学科。

3. 流体力学在教学计划中的地位

流体力学为许多后续课程打下了基础,如发动机原理、叶片机原理、燃气轮机原理与构造、传热学、燃烧学、黏性流体力学、计算流体力学、计算传热学。

4. 工程流体力学内容简介

系统地阐述了流体力学的任务和发展史、流体的性质及力学模型,在此基础上详细介绍

绍了流体静力学、流体运动学、流体动力学、流动阻力和能量损失,孔口、管嘴出流和有压管流,量纲分析和相似原理。

主要重点内容:欧拉静平衡方程、流体对固壁的作用力;流体运动的描述、雷诺输运定理、积分形式的动量(矩)方程、伯努利方程、附面层的概念及流动分离、气体动力学的参考状态(滞止状态、极限状态和临界状态)、激波和膨胀波的概念与计算方法、变截面管流中的气流参数变化规律;收敛喷管和拉瓦尔喷管的分析等。

主要难点:流体对固壁的作用力、流体运动的描述、雷诺输运定理、积分形式的动量方程、激波和膨胀波的概念与计算方法、拉瓦尔喷管的分析。

第 2 章

流体及其物理性质

2.1 主要内容

1. 流体的定义和特征

流体的定义：流体是一种受任何微小的剪切力作用都能连续变形的物质，包括气体和液体。

气体分子距大，分子间的吸引力小，可以充满所能达到的全部空间；液体分子距小，分子间的吸引力大，流动性不如气体。

当液体和气体接触时便会出现液体和气体间的交界面，称为液体的自由表面。

2. 流体作为连续介质的假设

当从宏观角度研究流体的机械运动，而不涉及微观的物质结构时，就可以认为流体是由无数连续分布的流体微团组成的连续介质。这种流体微团虽小，但却包含为数甚多的分子，并具有一定的体积和质量，一般将这种微团称为质点。

连续介质中，质点间没有空隙，质点本身的几何尺寸，相对于流体空间或流体中的固体而言，可忽略不计，并设质点均质地分布在连续介质之中。

流体的这种“连续介质模型”的建立，是对流体物质结构的简化，为研究流体力学提供了很大的方便。

根据流体的连续介质模型，表征流体属性的各种物理量是时间和空间的单值连续可微函数。

3. 作用在流体上的力 表面力 质量力

作用于流体上的力按其性质分为表面力和质量力两类。

(1) 表面力是指作用在所研究的流体表面上的力，其大小与受力表面的面积成正比。表面力可分成两类：一种是沿表面内法向的压强；另一种是沿表面切线方向的摩擦力，

即黏性力。

$$\vec{p}_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}}{\delta A}$$

(2) 质量力是指某种力场作用在流体的全部质点上的力,它的大小与流体的质量成正比。如重力、磁力、电动力。

$$\vec{f} = f_x \vec{i} + f_y \vec{j} + f_z \vec{k}$$

4. 流体的密度

流体的密度指单位体积的流体的质量。

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

流体的相对密度指流体的密度与 4℃ 时水的密度的比值。

$$d = \frac{\rho_l}{\rho_w}$$

流体的比体积指单位质量流体所占有的体积。

$$v = \frac{1}{\rho}$$

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算。

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

5. 流体的压缩性和膨胀性

(1) 流体的压缩性和膨胀性

流体的压缩性用单位压强所引起的体积变化率表示,称为压缩系数。

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

式中: κ 值大的流体,较易压缩; κ 值小的流体,较难压缩。

压缩系数的倒数为体积模量。

$$K = \frac{1}{\kappa}$$

显然, K 值大的流体压缩性小; K 值小的流体压缩性大。

流体的膨胀性用单位温升所引起的体积变化率表示,称为体膨胀系数。

$$\alpha_v = \frac{\delta V/V}{\delta T}$$

完全气体的状态方程:

$$p = \rho RT$$

(2) 可压缩性流体和不可压缩流体

通常把液体视为不可压缩流体,即忽略在一般工程中没有多大影响的微小的体积变

化,而把液体的密度视为常量。

通常把气体作为可压缩流体处理,特别是在流速较高、压强变化较大的场合,它们体积的变化是不容忽视的,必须把它们的密度视为变量。

6. 流体的黏性

(1) 流体的黏性 牛顿内摩擦定律

流体的黏性指流体微团间发生相对滑移时产生切向阻力的性质。

$$F = \mu \frac{Av}{h}$$

式中: μ 称作流体的动力黏度。它是与流体的种类、温度和压强有关的比例系数,在一定温度和压强下,它是个常数。

单位面积上的切向阻力称为切向应力。

$$\tau = \mu \frac{v}{h} = \mu \frac{dv_x}{dy}$$

运动黏度: $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 。

温度对液体和气体黏性的影响截然不同。温度升高时,液体的黏性降低;温度升高时,气体的黏性增加。

(2) 流体黏度的测量

恩格勒黏度计: 在规定条件下,一定体积的试样从恩格勒黏度计的小孔流出 200mL,所需的时间(s)与该黏度计测定水的值之比,以 $^{\circ}\text{E}$ 表示。

$$^{\circ}\text{E} = t'/t$$

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

(3) 牛顿流体和非牛顿流体

作用在流体上的切向应力与它所引起的角变形速度(速度梯度)之间的关系符合牛顿内摩擦定律的流体。

(4) 黏性流体和理想流体

不具有黏性的流体称为理想流体。实际流体都是具有黏性,都是黏性流体。

当分析比较复杂的流动时,若考虑黏性,必将给分析研究带来很大的困难,有时甚至无法进行。为此,引入一个理想流体模型,将复杂的流动问题简化。

7. 液体的表面性质

(1) 表面张力

单位长度上的这种与收缩方向相反的拉力定义为表面张力,用 σ 表示。

(2) 毛细现象

液体分子间的吸引力较大,在分子吸引力的作用下,液体分子相互制约,形成一体,不能轻易跑掉,这种吸引力称为内聚力。

当液体同固体壁面接触时,液体分子和固体分子之间也有吸引力,这种吸引力称为附着力。

当液体与固体壁面接触时,若液体的内聚力小于它同固体间的附着力,液体将附着、湿润该固体壁面,并沿固体壁面向外伸展。若液体的内聚力大于它同固体间的附着力,液体自身将抱成一团,并不湿润该固体壁面。

毛细管中液柱的上升或下降的高度为

$$h = \frac{4\sigma\cos\theta}{\rho g d}$$

2.2 本章难点

1. 流体的基本特征

(1) 易流性

流动性是流体的主要特征。组成流体的各个微团之间的内聚力很小,任何微小的剪切力都会使它产生变形(发生连续的剪切变形)——流动。

(2) 形状不定性

流体有没有固定的形状,取决于盛装它的容器的形状,只能被限定为其所在容器的形状。

(3) 连续性

流体能承受压力,但不能承受拉力,对切应力的抵抗较弱,只有在流体微团发生相对运动时,才显示其剪切力。因此,流体没有静摩擦力。

注意液体与气体的区别。液体具有一定的体积,有一自由表面;而气体没有固定体积,没有自由表面,易于压缩。

2. 连续介质模型的主要内容

连续介质模型的主要内容是由大量的分子组成的流体,分子与分子间是有间隙的;而由大量的流体微团(包含有许多流体分子)组成的流体,微团与微团间是没有间隙的。

有了连续介质假设,就可以把一个本来是大量的离散分子或原子的运动问题近似为连续充满整个空间的流体质点的运动问题,而且每个空间点和每个时刻都有确定的物理量,它们都是空间坐标和时间的连续函数,从而可以利用数学分析中连续函数的理论分析流体的流动。

3. 流体力学中表面力的表示形式

流体力学中表面力 p_n 分解为法向应力 p_{nn} 和切向应力 p_{nt} ,法向分量就是物理学中的压强,流体力学中称为压力。

4. 气体特殊情况时视为不可压缩体

在压力不是很高,速度不是很快的情况下,气体也可看成是不可压缩流体。

5. 牛顿内摩擦定律的应用

(1) 符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体, 否则称为非牛顿流体。常见的牛顿流体包括空气、水、酒精等; 非牛顿流体有聚合物溶液、原油、泥浆、血液等。

(2) 静止流体中, 由于流体质点间不存在相对运动, 速度梯度为 0, 因而不存在黏性切应力。黏性应力为 0 表现在以下几种情况: 绝对静止、相对静止和理想流体。

(3) 流体的黏性切应力与压力的关系不大, 主要取决于速度梯度的大小。

(4) 牛顿内摩擦定律只适用于层流流动, 不适用于紊流流动, 紊流流动中除了黏性切应力之外还存在更为复杂的紊流附加应力。

2.3 课后习题解答

2-1 已知某种物质的密度 $\rho = 2.94 \text{ g/cm}^3$, 试求它的相对密度 d 。

$$\text{解: } d = \frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{2.94 \text{ g/cm}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = \frac{2.94 \times 10^{-3} \text{ kg/10}^{-6} \text{ m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 2.94$$

2-2 已知某厂 1 号炉水平烟道中烟气组分的百分数为 $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.5\%$, $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.3\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 5.2\%$, $\alpha_{\text{N}_2} = 76\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 5\%$, 试求烟气的密度。

$$\begin{aligned} \text{解: } \rho_{\text{烟气}} &= \rho_{\text{CO}_2} \alpha_{\text{CO}_2} + \rho_{\text{SO}_2} \alpha_{\text{SO}_2} + \rho_{\text{O}_2} \alpha_{\text{O}_2} + \rho_{\text{N}_2} \alpha_{\text{N}_2} + \rho_{\text{H}_2\text{O}} \alpha_{\text{H}_2\text{O}} \\ &= 1.967 \times 0.135 + 2.927 \times 0.003 + 1.429 \times 0.052 + 1.251 \\ &\quad \times 0.76 + 0.804 \times 0.05 \\ &= 0.265545 + 0.006891 + 0.074308 + 0.95076 + 0.0402 \\ &= 1.341 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

2-3 习题 2-2 中烟气的实测温度 $t = 170^\circ\text{C}$, 实测静计示压强 $p_e = 1432 \text{ Pa}$, 当地大气压强 $p_a = 100858 \text{ Pa}$ 。试求工作状态下烟气的密度和运动黏度。

解: 利用 $p = \rho RT$ 可得

$$\begin{aligned} \frac{p_1}{\rho_1 T_1} &= \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \\ \Rightarrow \rho_2 &= \frac{p_2 \rho_1 T_1}{p_1 T_2} = \frac{(1432 + 100858) \times 1.341 \times 273}{100858 \times (273 + 170)} = 0.8381 (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

烟气中各成分在温度为 170°C 时的动力黏度:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{CO}_2} &= \mu_{0\text{CO}_2} \frac{273 + S}{T + S} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \\ &= 16.8 \times 10^{-6} \times \frac{273 + 254}{(273 + 170) + 254} \times \left(\frac{273 + 170}{273} \right)^{3/2} \\ &= 16.8 \times 10^{-6} \times 0.7561 \times 2.0671 \\ &= 26.2573 \times 10^{-6} (\text{Pa} \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{SO}_2} &= \mu_{0\text{SO}_2} \frac{273+S}{T+S} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} = 11.6 \times 10^{-6} \times \frac{273+306}{(273+170)+306} \times \left(\frac{273+170}{273}\right)^{3/2} \\ &= 11.6 \times 10^{-6} \times 0.773 \times 2.0671 \\ &= 18.5353 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{O}_2} &= \mu_{0\text{O}_2} \frac{273+S}{T+S} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} = 19.2 \times 10^{-6} \times \frac{273+125}{(273+170)+125} \times \left(\frac{273+170}{273}\right)^{3/2} \\ &= 19.2 \times 10^{-6} \times 0.7007 \times 2.0671 \\ &= 27.8096 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{N}_2} &= \mu_{0\text{N}_2} \frac{273+S}{T+S} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} = 16.6 \times 10^{-6} \times \frac{273+104}{(273+170)+104} \times \left(\frac{273+170}{273}\right)^{3/2} \\ &= 16.6 \times 10^{-6} \times 0.6892 \times 2.0671 \\ &= 23.6491 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{H}_2\text{O}} &= \mu_{0\text{H}_2\text{O}} \frac{273+S}{T+S} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} = 8.93 \times 10^{-6} \times \frac{273+961}{(273+170)+961} \times \left(\frac{273+170}{273}\right)^{3/2} \\ &= 8.93 \times 10^{-6} \times 0.8789 \times 2.0671 \\ &= 16.2238 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}\end{aligned}$$

混合气体在温度为 170℃ 时的动力黏度:

$$\begin{aligned}\mu &= \left(\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i M_i^{1/2} \mu_i \right) \div \left(\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i M_i^{1/2} \right) \\ &= \frac{0.135 \times 44^{1/2} \times 26.2573 \times 10^{-6} + 0.003 \times 64^{1/2} \times 18.5353 \times 10^{-6} + 0.052 \times 32^{1/2} \times 27.8096 \times 10^{-6}}{0.135 \times 44^{1/2} + 0.003 \times 64^{1/2} + 0.052 \times 32^{1/2} + 0.76 \times 28^{1/2} + 0.05 \times 18^{1/2}} \\ &\quad + \frac{0.76 \times 28^{1/2} \times 23.6491 \times 10^{-6} + 0.05 \times 18^{1/2} \times 16.2238 \times 10^{-6}}{0.135 \times 44^{1/2} + 0.003 \times 64^{1/2} + 0.052 \times 32^{1/2} + 0.76 \times 28^{1/2} + 0.05 \times 18^{1/2}} \\ &= \frac{23.5131 + 0.4448 + 8.1804 + 95.1058 + 3.4416}{0.8955 + 0.024 + 0.2942 + 4.0215 + 0.2121} \times 10^{-6} \\ &= \frac{130.6857}{5.4473} \times 10^{-6} \\ &= 23.9909 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}\end{aligned}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{23.9909 \times 10^{-6}}{0.8381} = 28.6253 \times 10^{-6} = 2.8625 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

2-4 当压强增量为 50000Pa 时,某种液体的密度增长 0.02%,试求该液体的体积模量。

$$\text{解: } \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} = \frac{\frac{m_2}{V_2} - \frac{m_1}{V_1}}{\frac{m_1}{V_1}} = \frac{\frac{V_1 - V_2}{V_1 V_2}}{\frac{1}{V_1}} = \frac{V_1 - V_2}{V_2} = \frac{V_1}{V_2} - 1 = 0.02\%$$

$$\frac{V_1}{V_2} = 1 + 0.02\% = \frac{100.02}{100}$$

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{V_2}{V_1} - 1 = \frac{100}{100.02} - 1 = \frac{100 - 100.02}{100} = -\frac{0.02}{100} = -0.02\%$$

$$K = -\frac{\delta P}{\delta V/V} = -\frac{50000}{-0.02\%} = 2.5 \times 10^8 \text{ (Pa)}$$

2-5 绝对压强为 $3.923 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的空氣的等温体积模量和等熵体积模量各等于多少?

$$\begin{aligned} \text{解: 等温: } \frac{p_1}{p_2} &= \frac{\rho_1 RT}{\rho_2 RT} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{m/V_1}{m/V_2} = \frac{V_2}{V_1} \\ K &= -\frac{\delta p}{\delta V/V} = -\frac{3.923 \times 10^5 - 1.01325 \times 10^5}{\frac{V_2 - V_1}{V_1}} \\ &= -\frac{2.90975 \times 10^5}{\frac{V_2}{V_1} - 1} = -\frac{2.90975 \times 10^5}{\frac{1.01325}{3.923} - 1} \\ &= 3.923 \times 10^5 \text{ (Pa)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{等熵: } K &= -\frac{\delta p}{\delta V/V} = -\frac{3.923 \times 10^5 - 1.01325 \times 10^5}{\frac{V_2 - V_1}{V_1}} \\ &= -\frac{2.90975 \times 10^5}{\frac{V_2}{V_1} - 1} = -1.4 \times \frac{2.90975 \times 10^5}{\frac{1.01325}{3.923} - 1} \\ &= 5.492 \times 10^5 \text{ (Pa)} \end{aligned}$$

2-6 充满石油的油槽内的压强为 $4.9033 \times 10^5 \text{ Pa}$, 今由槽中排出石油 40kg, 使槽内压强降到 $9.8067 \times 10^4 \text{ Pa}$, 设石油的体积模量 $K = 1.32 \times 10^9 \text{ Pa}$. 试求油槽的体积。

$$\text{解: } \rho = 880 \text{ kg/m}^3$$

由于 $K = -\frac{\delta p}{\delta V/V}$, 得

$$\frac{\delta V}{V} = -\frac{\delta p}{K} \Rightarrow \frac{\delta m/\rho}{m/\rho} = -\frac{\delta p}{K} \Rightarrow m = -\frac{K \delta m}{\delta p}$$

$$\text{所以 } V = \frac{m}{\rho} = -\frac{K \delta m}{\rho \delta p} = -\frac{1.32 \times 10^9 \times 40}{880 \times (9.8067 \times 10^4 - 4.9033 \times 10^5)} = 153 \text{ (m}^3\text{)}$$

2-7 流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、温度为 70°C 的水流入热水锅炉, 经加热后水温升到 90°C , 而水的体胀系数 $\alpha_v = 0.000641/^\circ\text{C}$, 问从锅炉中每小时流出多少立方米的水?

$$\text{解: } \alpha_v = \frac{\delta V/V}{\delta T} \Rightarrow \frac{\delta V}{V} = \alpha_v \delta T$$

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{V - 50}{50} = \frac{V}{50} - 1 = \alpha_v \delta T = 0.00064 \times (90 - 70)$$

$$\text{得 } V = 50.64 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

2-8 压缩机压缩空气, 绝对压强从 $9.8067 \times 10^4 \text{ Pa}$ 升高到 $5.884 \times 10^5 \text{ Pa}$, 温度从 20°C 升高到 78°C , 问空气体积减小了多少?

解: 因为 $p = \rho RT$, $\rho = \frac{m}{V}$, 所以有

$$R = \frac{p}{\rho T} = \frac{pV}{mT}$$

$$\text{所以有 } \frac{p_1 V_1}{m T_1} = \frac{p_2 V_2}{m T_2} \Rightarrow \frac{9.8067 \times 10^4 V_1}{293} = \frac{5.884 \times 10^5 V_2}{351}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{5} = 20\%$$

$$\frac{\delta V}{V_1} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1} = 0.8$$

空气气体减少 80%。

2-9 动力黏度为 $2.9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、密度为 678 kg/m^3 的油,其运动黏度等于多少?

$$\text{解: } \nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{2.9 \times 10^{-4}}{678} = 4.277 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

2-10 设空气在 0°C 时的运动黏度 $\nu_0 = 13.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、密度 $\rho_0 = 2.94 \text{ g/cm}^3$ 。试求在 150°C 时空气的动力黏度。

$$\text{解: } \mu_0 = \nu_0 \rho_0 = 13.2 \times 10^{-6} \times 1.29 = 17.028 \times 10^{-6} (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

$\mu = \mu_0 \frac{273+S}{T+S} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}$ 查《工程流体力学》(孔珑主编第四版)(以下简称教材)表 2-6 常用气体的黏度分子量 M 和苏士兰常数 S (在标准状态下),可知 $S=111\text{K}$ 。

$$\begin{aligned} \mu_{150} &= \mu_0 \frac{273+S}{T+S} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} = 17.028 \times 10^{-6} \times \frac{273+111}{273+150+111} \times \left(\frac{273+150}{273} \right)^{3/2} \\ &= 23.608 \times 10^{-6} (\text{Pa} \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

2-11 借恩氏黏度计测得石油的黏度为 8.5°E ,如石油的密度为 $\rho=850 \text{ kg/m}^3$,求石油的动力黏度。

$$\text{解: } \nu = 0.0731^\circ\text{E} - 0.0631/^\circ\text{E} = 0.0731 \times 8.5 - \frac{0.0631}{8.5} = 0.6139 (\text{cm}^2/\text{s})$$

$$\mu = \nu \rho = 0.6139 \times 10^{-4} \times 850 = 0.05218 (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

2-12 一平板距离另一固定平板 0.5 mm ,两板间充满液体,上板在每平方米有 2 N 的力作用下以 0.25 m/s 的速度移动,求该液体的黏度。

$$\text{解: 因为 } F = \mu A v / h$$

$$\text{所以有 } \mu = \frac{F}{A} \cdot \frac{h}{v} = 2 \times \frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.25} = 4 \times 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

2-13 已知动力滑动轴承的轴直径 $d=0.2 \text{ m}$,转速 $n=2830 \text{ r/min}$,轴承内径 $D=0.2016 \text{ m}$,宽度 $l=0.3 \text{ m}$,润滑油的动力黏度 $\mu=0.245 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,试求克服摩擦阻力所消耗的功率。

$$\text{解: } h = \frac{D-d}{2} = \frac{0.2016-0.2}{2} = 0.0008 (\text{m})$$

$$\text{轴承旋转线速度 } v = \frac{\pi d n}{60} = \frac{3.1416 \times 0.2 \times 2830}{60} = 29.64 (\text{m/s})$$

$$A = \pi d l = 3.14 \times 0.2 \times 0.3 = 0.1884 (\text{m}^2)$$

$$F = \frac{\mu A v}{h} = \frac{0.245 \times 0.1884 \times 29.64}{0.0008} = 1710.15 (\text{N})$$

$$P = F v = 1710.15 \times 29.64 = 50.7 \times 10^4 (\text{W})$$

2-14 一重 500 N 的飞轮的回转半径为 30 cm ,由于轴套间流体黏性的影响,当飞轮以 600 r/min 旋转时,它的角减速度为 0.02 rad/s^2 。已知轴套的长度为 5 cm ,轴的直径为 2 cm

以及它们之间的间隙为 0.05mm。试求流体的黏度。

$$\text{解: } v = \frac{\pi d n}{60} = \frac{\pi \times 0.02 \times 600}{60} = 0.628 (\text{m/s})$$

$$F = \frac{M}{d/2} = \frac{m \times 0.3^2 \times 0.02}{0.01} = \frac{50 \times 0.3^2 \times 0.02}{0.01} = 9 (\text{N})$$

$$\mu = \frac{Fh}{Av} = \frac{9 \times 0.05 \times 10^{-3}}{\pi \times 0.02 \times 0.05 \times 0.628} = 0.228 (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

2-15 直径为 5.00cm 的活塞在直径为 5.01cm 的缸体内运动。当润滑油的温度由 0°C 升高到 120°C 时,求推动活塞所需的力减少的百分数。用图 2-5 中相对密度 $d=0.855$ 的原油的黏度进行计算。

解: 由教材图 2-5 流体的动力黏度曲线图可知,当 0°C 时, $\mu_1 = 1.6 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}$

当 120°C 时, $\mu_2 = 2.2 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$

$$F = \frac{\mu Av}{h} \Rightarrow \frac{F_1 - F_2}{F_1} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1} \times 100\% = 86.25\%$$

2-16 内径为 10mm 的开口玻璃管插入温度为 20°C 的水中,已知水与玻璃的接触角 $\theta=10^\circ$ 。试求水在管中上升的高度。

$$\text{解: } h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g d} = \frac{4 \times 0.0731 \times \cos 10^\circ}{998.23 \times 9.8 \times 10 \times 10^{-3}} = 0.0029435 (\text{m})$$

2-17 内径 8mm 的开口玻璃管插入 20°C 的水银中。已知水银与玻璃管的接触角约为 140°,试求水银在管中下降的高度。

解: 查教材中表 2-9 普通液体的表张力(20°C,与空气接触)得, $\delta=0.5137$, 20°C 时水银的密度 $\rho=13550 \text{kg/m}^3$ 。

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g d} = \frac{4 \times 0.5137 \times \cos 140^\circ}{13550 \times 9.8 \times 8 \times 10^{-3}} = -0.00148 (\text{m})$$