

DA XUESHENG Z

工程流 解

江苏科学技术出版社

工程流体力学解题分析

于 荣 宪

江苏科学技术出版社

工程流体力学解题分析

于荣宪

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：淮海印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 26.125 插页 2 字数 579,000

1985 年 11 月第 1 版 1985 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—6,900 册

书号：13196·206 定价：4.42 元

责任编辑 孙广能

前 言

本书是为工科大学生学习工程流体力学而编写的。内容与各类工程流体力学教材密切配合。

工程流体力学是一门应用面很广的技术基础课。它的特点是数学分量重,抽象概念多,理论性较强。学习这门课,要弄清概念,掌握理论,学会运用基本理论分析、解决实际问题。为此,书中除了巩固基本理论的题目外,特别加强了流体静压作用力、动量和动量矩定理的应用、管路计算、层流运动、相似原理和量纲分析的应用以及液体出流等结合工程实际的题目。并附有较详细的图、表,可供工程计算使用。

本书也可供有关教师和工程师参考。

参加审阅的同志有华东水利学院王惠民(第一、二、三章)、南京工学院蔡崧(第四章)、重庆大学周义光(第五、六章)、北京工业大学李元和(第七、八、九章)、哈尔滨工业大学李有义(第十、十一章)、南京航空学院张荣学(第十二章)。书中插图均为王志爱同志绘制。对以上各位同志的帮助谨致衷心感谢。

编者水平有限,错误与不足之处,诚恳欢迎批评指正。

于 荣 宪

1984年1月于南京工学院

目 录

第一章 流体及其物理性质	1
第一节 流体的密度、重度、压缩性和膨胀性	1
第二节 流体的粘性 液体的表面张力	10
第一章 练习题答案	27
第二章 流体静力学	29
第一节 流体静力学基本方程液柱式测压计	29
第二节 静止液体作用在平面及曲面上的总压力	50
第三节 液体的相对平衡	91
第二章 练习题答案	113
第三章 流体动力学基础	117
第三章 练习题答案	156
第四章 动量定理和动量矩定理	158
第一节 动量方程及其应用	160
第二节 动量矩方程及其应用	201
第四章 练习题答案	211
第五章 管流阻力和能量损失	214
第五章 练习题答案	269
第六章 管路计算	271
第六章 练习题答案	354
第七章 理想流体的有旋流动和无旋流动	356
第七章 练习题答案	430
第八章 流体层流运动	433

第八章 练习题答案	478
第九章 附面层与流体绕物体流动	479
第一节 附面层	479
第二节 绕流阻力	513
第九章 练习题答案	528
第十章 相似原理与量纲分析	530
第一节 相似原理	530
第二节 量纲分析法	557
第十章 练习题答案	585
第十一章 液体的出流和非定常流动	587
第一节 液体经孔口和管嘴的出流	587
第二节 液体的一元非定常流动	624
第十一章 练习题答案	646
第十二章 可压缩流体的流动	648
第一节 完全气体的一元定常等熵流动	648
第二节 气体流动速度与通道截面的关系	672
第三节 气体管流	699
第四节 膨胀波和激波	712
附 录	755
表 1 常用物理量单位及其换算	755
表 2 一个大气压下水的重度和密度	762
表 3 标准大气压下空气的重度和密度	762
表 4 常用流体的重度和密度	763
表 5 水的体积弹性系数 K_p	763
表 6 常用气体的气体常数、比热和绝热指数	764
表 7 常用气体的粘性系数、分子量和常数 C	764
表 8 水的粘性系数与温度的关系	765

表 9	空气的粘性系数与温度的关系	765
表 10	常用液体的表面张力系数	766
表 11	压强单位及其换算	766
表 12	平面形心、压力中心、面积和惯性矩	767
表 13	工业管道管壁粗糙度 K	769
表 14	管道局部阻力系数	770
表 15	通风管道的汇流三通阻力系数	787
表 16	通风管道的分流三通阻力系数	789
表 17	《全国通用通风管道计算表》圆形风管单位 管长压强损失表	790
表 18	气体动力学函数表	816
表 19	超音速气流等熵变化数值表	820
表 20	正激波参数表	823
附图 1	二元对称绕流体阻力系数	
附图 2	三元轴对称绕流体阻力系数	
附图 3	沿程阻力系数莫迪图	

第一章 流体及其物理性质

实际流体是一种受任何微小剪力都能连续变形的物质。从集态上可分为液体和气体；从压缩性上可分成可压缩流体和不可压缩流体；从粘性上又可分为实际流体和理想流体。

流体力学并不研究微观的分子运动，而只研究流体的宏观机械运动。在研究流体的宏观运动中，取流体微元体积作为无穷小的流体微团或称质点，作为最小单元。微团内包含有足够多的分子，从而使各物理量的统计平均值有意义。这样，就不考虑分子间存在的间隙，而把流体看成是由无数连续分布的流体微团所组成的连续介质。

第一节 流体的密度、重度、 压缩性和膨胀性

一、内 容 提 要

1. 流体的密度

流体的密度表征流体在空间某点质量的密集程度。流体中围绕某点的体积 δV ，其中流体的质量是 δm ，用符号 ρ 表示单位体积内所具有的质量，则

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1-1)$$

对均匀流体

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

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 。

混合气体的密度按各组份气体所占体积百分数计算如下:

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

式中 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——混合气体中各组份气体的密度;

$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$ ——混合气体中各组份气体所占体积百分数。

2. 流体的重度(容重)

在重力场中单位体积流体所具有的重量称为重度(容重)。流体的重度用下式计算:

对于非均匀流体

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

对于均匀流体

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-5)$$

式中 γ ——流体的重度(容重) N/m^3 ;

W ——流体的重量 N ;

V ——流体的体积 m^3 。

流体的重度(容重)与密度之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-6)$$

式中 g ——重力加速度,通常 $g = 9.806 \approx 9.81 \text{m}/\text{s}^2$ 。

一个大气压下不同温度的水和空气的重度与密度值列于附录表 2 和表 3。常用流体在标准大气压下的重度与密度数

值列于附录表 1。

比重是指某流体的重量与 4℃ 时同体积水的重量的比值。也等于流体的密度或重度与 4℃ 时水的密度或重度的比值。用 s 表示

$$s = \rho / \rho_w = \gamma / \gamma_w \quad (1-7)$$

式中 ρ_w ——4℃ 时水的密度 kg/m^3 ;

γ_w ——4℃ 时水的重度 N/m^3 。

3. 流体的压缩性

流体的压缩性是温度不变时，单位压强增量所引起的体积变化率。用体积压缩系数 k 来表示

$$k = - \frac{\delta V / V}{\delta p} \quad (1-8)$$

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数，用 K_p 表示

$$K_p = \frac{1}{k} = - \frac{\delta p}{\delta V / V} \quad (1-9)$$

式中 K_p ——流体的体积弹性系数 N/m^2 ;

δp ——压强增量 N/m^2 ;

$\delta V / V$ ——流体的体积变化率。

工程上常用体积弹性系数去衡量流体压缩性的大小。 K_p 值愈大的流体压缩性愈小。水的体积弹性系数值列于附录表 5。

4. 流体的膨胀性

流体的膨胀性是压强不变时，单位温度增量所引起的体积变化率。用温度膨胀系数 β 来表示

$$\beta = \frac{\delta V / V}{\delta T} \quad (1-10)$$

式中 β ——温度膨胀系数 $1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$;

δT ——温度增量。

对于气体需要同时考虑压强和温度对气体体积和密度变化的影响。完全气体可用状态方程表示它们之间的关系：

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

式中 p ——气体的绝对压强 Pa 或 N/m^2 ;

ρ ——气体的密度 kg/m^3 ;

R ——气体常数 $\text{N}\cdot\text{m/kg}\cdot\text{K}$;

T ——热力学温度 K。

流体都是可压缩的，只是可压缩的程度不同而已。在工程实际问题中，要不要考虑流体的压缩性，则要看具体情况。凡是可忽略压缩性影响的流体，都视为不可压缩流体。例如，一般工程中，液体和低速流动的气体，都可当成不可压缩流体。

二、例题分析

例 1 在压强 $p = 1\text{atm}$ ，温度 $t = 0^\circ\text{C}$ 时，水银的比重 $s = 13.6$ 。当 $p = 1\text{atm}$ ， $t = 4^\circ\text{C}$ 时，水的密度 $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$ 。试用国际单位制和工程单位制分别计算水的重度 γ_w 和水银的重度 γ 及密度 ρ 。

解 水在 4°C 的重度可用下式计算

$$\begin{aligned} \gamma_w &= \rho_w g \\ &= 1000 \times 9.81 = 9.81 \times 10^3 \text{N/m}^3 (\text{国际单位}) \\ &= 9.81 \times 10^3 (\text{N/kgf}) \text{kgf/m}^3 \\ &= 9.81 \times 10^3 (1/9.81) \text{kgf/m}^3 \\ &= 1000 \text{kgf/m}^3 (\text{工程单位}) \end{aligned}$$

$\therefore 1\text{kgf} = 9.81\text{N}$ ，在上面括号中进行了单位换算。从计算我们发现，国际单位制中密度与工程单位制中的重度数值上是相等的。

水银的重度和密度可根据比重计算式(1-7), 则得重度

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \gamma_{Hg} \\
 &= 13.6 \times 9.81 \times 10^3 = 133.416 \times 10^3 \text{ N/m}^3 \text{ (国际单位)} \\
 &= 133.416 \times 10^3 (\text{N/kgf}) \text{ kgf/m}^3 \\
 &= 133.416 \times 10^3 (1/9.81) \text{ kgf/m}^3 \\
 &= 13600 \text{ kgf/m}^3 \text{ (工程单位)}
 \end{aligned}$$

同样可算得水银的密度

$$\begin{aligned}
 \rho &= \gamma / g \\
 &= 13.6 \times 1000 = 13600 \text{ kg/m}^3 \text{ (国际单位)} \\
 &= 13600 (1 \text{ kgf}/9.81 \text{ m/s}^2) / \text{m}^3 \\
 &= 1386.34 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4 \text{ (工程单位)}
 \end{aligned}$$

从上面看到, 工程单位制中的密度单位与国际单位有很大差别。这是由于工程单位制中把长度 $[L]$ 、力 $[F]$ 和时间 $[T]$ 作为基本量, 而国际单位制是把长度 $[L]$ 、质量 $[M]$ 和时间 $[T]$ 作为基本量的缘故。

例 2 试导出在大气压附近常温状态下, 空气密度随压强和温度变化的计算式。

解 一个大气压常温下空气的气体常数为

$$R = 287 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

空气在标准状态下的压强和温度值分别为

$$p_s = 101325 \text{ Pa (或 N/m}^2) = 760 \text{ mmHg}$$

$$T_s = 273 + 0 = 273 \text{ K}$$

因此空气在标准状态下的密度

$$\rho_s = \frac{p_s}{RT_s} = \frac{101325}{287 \times 273} = 1.293 \text{ kg/m}^3$$

状态方程可写成

$$\frac{p_0}{\rho T} = \frac{p_s}{\rho_s T_s}$$

将以上各值代入即得空气密度的计算式

$$\rho = \rho_0 \frac{p_0}{p_s} \frac{T_s}{T} = 1.293 \times \frac{p_0}{760} \times \frac{273}{T} = 0.4645 \frac{p_0}{T} \text{ kg/m}^3$$

上面计算式在实际中使用时 p_0 要用大气压力计的读数 mmHg, T 要用空气的绝对温度 K 代入。

例 3 流体中音速的表达式为 $a = \sqrt{dp/d\rho}$, 试证明也可写成 $a = \sqrt{K_\rho/\rho}$ 。

解 由题中给出的两个音速表达式可知, 只要能证明 $dp/d\rho = K_\rho/\rho$ 问题即解决了。因为在要证明的表达式中含有流体的体积弹性系数 K_ρ , 所以很自然地就联想到 K_ρ 的表达式(1-9):

$$K_\rho = - \frac{\delta p}{\delta V/V}$$

流体密度的倒数称为比体积, 是单位质量的流体所占有的体积, 用 v 表示

$$v = \frac{1}{\rho} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

等式两边微分, 则有

$$dv = -\frac{d\rho}{\rho^2} \quad \text{或} \quad \frac{dv}{v} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

$$\text{又} \because \quad dv/v = dV/V \quad \therefore \quad dV/V = -d\rho/\rho$$

代入式(1-9)可得

$$K_\rho = \frac{\delta p}{d\rho/\rho} \quad \text{或} \quad dp/d\rho = K_\rho/\rho$$

由此证明了音速表达式的两种写法

$$a = \sqrt{dp/d\rho} = \sqrt{K_\rho/\rho}$$

解此题的关键是引进了比体积的表达式，对其微分找到了体积的变化率 $\delta V/V$ 等于密度变化率的负值 $-d\rho/\rho$ 。

例4 把绝对压强 $p_1 = 1 \text{ atm}$ ，温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 的水密封在体积 $V = 1 \text{ m}^3$ 的高压容器中进行水压试验。欲使容器中水的绝对压力 $p_2 = 80 \text{ atm}$ ，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。已知 80 atm 、 20°C 的水 $K_p = 2.17 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。

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(1-9)右边的微分用差分代替，则

$$K_p = - \frac{\Delta p}{\Delta V/V} = - \frac{(p_2 - p_1)}{\Delta V/V}$$

得减少的体积

$$\begin{aligned} \Delta V &= - \frac{(p_2 - p_1)V}{K_p} = - \frac{(80 - 1) \times 9.81 \times 10^4 \times 1}{2.17 \times 10^9} \\ &= - 357.138 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = - 3571.38 \text{ mL} \end{aligned}$$

式中负号是表示水体积的减少值，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。

三、习题选解

1. 化学分析用酒精，在标准大气压 15°C 时的密度 $\rho = 790 \text{ kg/m}^3$ 。试求此状态下酒精的比重 s 和重度 γ ，用国际单位和工程单位两种单位表示。

解 酒精的比重

$$s = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{790}{1000} = 0.79$$

酒精的重度

$$\begin{aligned}\gamma &= \rho g = 790 \times 9.81 = 7749.9 \text{ N/m}^3 \text{ (国际单位)} \\ &= 7749.9 (\text{N/kgf}) \text{ kgf/m}^3 \\ &= 7749.9 (1/9.81) \text{ kgf/m}^3 \\ &= 790 \text{ kgf/m}^3 \text{ (工程单位)}\end{aligned}$$

2. 试计算空气在 $p = 1.05 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $t = 68^\circ\text{C}$ 时的密度 ρ 和重度 γ 。如果以绝热和等温两种过程压缩到原体积的 50%，则压强和温度各为多少？已知空气的气体常数 $R = 287 \text{ N}\cdot\text{m/kg}\cdot\text{K}$ ，绝热指数 $k = 1.4$ 。

解 空气的密度用状态方程可得

$$\begin{aligned}\rho &= p/RT = 1.05 \times 10^5 / 287 \times (273 + 68) \\ &= 1.073 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

重度 $\gamma = \rho g = 1.073 \times 9.81 = 10.526 \text{ N/m}^3$

对绝热过程根据绝热方程

$$p/\rho^k = \text{const} \quad \text{可得压强}$$

$$\begin{aligned}p_2 &= p \left(\frac{\rho_2}{\rho} \right)^k = p \left(\frac{V}{V_2} \right)^k \\ &= 1.05 \times 10^5 \times (2)^{1.4} = 2.77 \times 10^5 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

温度由状态方程得

$$\begin{aligned}T_2 &= p_2/\rho_2 R \\ &= 2.77 \times 10^5 / 2 \times 1.073 \times 287 \\ &= 449.75 \text{ K}\end{aligned}$$

对等温过程由等温过程方程

$$p/\rho = \text{const} \quad \text{可得压强}$$

$$\begin{aligned}p_2 &= p \left(\frac{\rho_2}{\rho} \right) = p \left(\frac{V}{V_2} \right) \\ &= 1.05 \times 10^5 \times 2 = 2.1 \times 10^5 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

$$T_2 = T = 273 + 68 = 341\text{K}$$

3. 测得钴炉尾部烟道中烟气各组份气体所占体积百分数分别为: $\alpha_{\text{N}_2} = 76\%$, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 4.5\%$, $\alpha_{\text{O}_2} = 5\%$, $\alpha_{\text{CO}_2} = 14\%$, $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.5\%$ 。在标准状态下各组份气体的密度分别为: $\rho_{\text{N}_2} = 1.25\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{O}_2} = 1.43\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{CO}_2} = 1.98\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{SO}_2} = 2.87\text{kg/m}^3$ 。试求标准状态下烟气的密度 ρ 。

解 混合气体的烟气其密度按照各组份所占体积百分数计算如下:

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_1\alpha_1 + \rho_2\alpha_2 + \cdots + \rho_n\alpha_n \\ &= \rho_{\text{N}_2}\alpha_{\text{N}_2} + \rho_{\text{H}_2\text{O}}\alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \rho_{\text{O}_2}\alpha_{\text{O}_2} + \rho_{\text{CO}_2}\alpha_{\text{CO}_2} + \rho_{\text{SO}_2}\alpha_{\text{SO}_2} \\ &= (1.25 \times 0.76) + (0.804 \times 0.045) + (1.43 \times 0.05) \\ &\quad + (1.98 \times 0.14) + (2.87 \times 0.005) \\ \rho &= 1.35\text{kg/m}^3\end{aligned}$$

4. 某工程流体力学实验室,用大气压力计测得当地大气压强 $p = 774\text{mmHg}$,室内气温 $t = -4^\circ\text{C}$ 。试求实验室内空气的密度 ρ 值。

解 方法一 利用例 2 导出的计算式

$$\rho = 0.4645 \frac{p}{T} = 0.4645 \times \frac{774}{273 + (-4)} = 1.337 \text{ kg/m}^3$$

方法二 直接用状态方程

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{774 \times (101325/760)}{287 \times (273 - 4)} = 1.337 \text{ kg/m}^3$$

方法一使用方便,但应记住 p 的单位应为 mmHg 。方法二要进行单位换算,将 mmHg 换成 N/m^2 , 应记住 $1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 101325\text{N/m}^2$ 。

四、练 习 题

1. 氯气的气体常数 $R = 117 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}$, 试求在绝对压强 $p = 10 \times 10^5 \text{ N} / \text{m}^2$, 温度 $t = 30^\circ \text{C}$ 时的密度 ρ 和重度 γ 。

2. 氧气的气体常数 $R = 259.75 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}$, 试问(1)绝对压强 $p = 9.81 \times 10^4 \text{ N} / \text{m}^2$, 温度 $t = 20^\circ \text{C}$ 时的密度 ρ 和重度 γ 各为多少? (2)如把它绝热压缩到原体积的 20% 时的压强 p_2 和温度 t_2 各为多少? (3)把绝热压缩改为等温压缩时 p_2 和 t_2 为多少?

3. 将初压 $p_1 = 1.0 \times 10^5 \text{ N} / \text{m}^2$ 的水装入体积为 $V = 1000 \text{ cm}^3$ 的高压缸内, 然后加压到 $p_2 = 2.1 \times 10^6 \text{ N} / \text{m}^2$, 结果体积减少了 1.0 cm^3 。如果高压缸是刚体不变形, 求水的体积弹性系数 $K_p = ?$

4. 水的体积弹性系数 $K_p = 2.0 \times 10^9 \text{ N} / \text{m}^2$, 求密度 $\rho = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ 时水中的音速 $a = ?$

第二节 流体的粘性 液体的表面张力

一、内 容 提 要

1. 流体的粘性

流体的粘性是指当流体微团间发生相对滑动时, 产生切向阻力的性质。流体内单位面积上的切向阻力称为切向应力, 用 τ 表示。实践证明, 作用在流体层上的切向应力与速度梯度 du/dy 成正比