



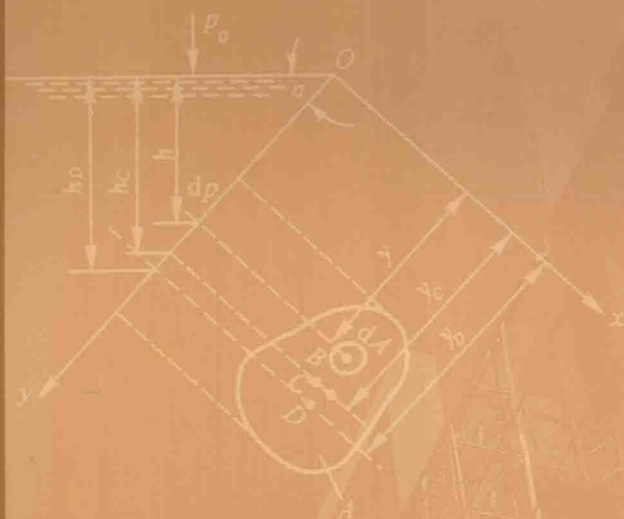
“十三五”普通高等教育规划教材

工程流体力学

GONGCHENG LIUTI LIXUE

(修订版)

庞艳荣 主编
方立德



 中国质检出版社
中国标准出版社



“十三五”普通高等教育规划教材

GONGCHENG LIUTI LIXUE

工程流体力学

(修订版)

庞艳荣 方立德 主编

中国质检出版社
中国标准出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/庞艳荣, 方立德主编. —北京: 中国质检出版社, 2015. 9
ISBN 978 - 7 - 5026 - 4214 - 3

I. ①工… II. ①庞… ②方… III. ①工程力学—流体力学 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 202171 号

内 容 提 要

本书共分 5 章, 第一章主要简述流体的物理性质和概念; 第二、三章阐述流体平衡与运动的基本规律; 第四章讲述流动阻力及管路水头计算; 第五章论述可压缩流体一元运动基本知识。在内容选取和安排上, 既体现了本学科的系统性及全面性, 又侧重于基本概念的理解和基本原理的应用, 以培养学生运用基本理论分析和解决实际问题的能力。

本书可作为高等院校相关专业的教材用书, 也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010) 68533533 发行中心: (010) 51780238

读者服务部: (010) 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 10.25 字数 252 千字

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月第一次印刷

*

定价: 28.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

前言

• FOREWORD •

工程流体力学是高等院校热能动力类和流体动力工程类、仪器仪表类、航空航天类、建筑工程类、机械类、材料类专业的一门重要的专业基础课。本教材是以朱爱民主编的《流体力学基础》为依据修订编写的，书中除着重讲述流体的性质、平衡规律的基础外，对工程上常见的管内液流及气流问题作了较为详细的叙述。在内容的安排上，既体现了本学科的系统性及全面性，又侧重于基本概念的理解和基本原理的应用，以培养学生运用基本理论分析和解决实际问题的能力。

本书共分5章，第一章主要简述流体的物理性质和概念；第二、三章阐述流体平衡与运动的基本规律；第四章讲述流动阻力及管路水头计算；第五章论述可压缩流体一元运动基本知识。其中第二、三、五章是本课程的中心内容，第二、三章是本课程的重点。

本书体现了高等学校工程流体力学学科体系的理论水平，加深并强化了如流体平衡与运动多元分析法和气体的全能方程等内容。

注重加强流体力学理论与计量技术的结合，即应用流体力学的基本概念和原理，解释和解决计量技术中的实际问题。例如，对静力学基本方程与压力测量仪器、动力学方程与流量测量仪表、高压气体经喷管的流动与临界流流量计等作了分析介绍。

强化理论，注意应用。本书附有必要的图表数据，各章附有习题，借助例题启发和习题求解引导学生学以致用，促进理论深化，从而培养学生分析和解决问题的能力。

本教材由河北大学庞艳荣、方立德、刚芹果、王芳，河北省计量科学研究院卜占成、屈宏强编写。其中第一、二章由方立德、刚芹果、王芳编写，第三、四章由卜占成、屈宏强编写，第五章由庞艳荣编写。全书由庞艳荣统稿。

本教材在编写过程中得到了中国计量科学研究院王自和、翟秀贞的指导和帮助，也得到了编者所在单位以及朱爱民、梁树英老师的大力支持，谨在此表示衷心的感谢。

本书编者均长期工作在计量科学研究单位和高等学校，希望本教材对从事相关专业的工程技术人员有所帮助。由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015年6月

目 录

• CONTENTS •

绪 论	1
第一章 流体的主要物理性质	3
第一节 流体的特性	3
第二节 流体的密度和重度	4
第三节 流体的压缩性和膨胀性	8
第四节 流体的黏性及内摩擦定律	11
第五节 表面张力和毛细现象	20
第六节 作用在流体上的力	31
习题	32
第二章 流体静力学	34
第一节 流体静压力及其特性	34
第二节 流体平衡微分方程及等压面	36
第三节 流体静压力基本方程	39
第四节 流体静压力的测量——液体式压力计	43
第五节 平面上的液体总压力	48
第六节 曲线上的液体总压力	52
第七节 浮力原理、潜体和浮体的平衡	54
习题	59
第三章 流体动力学基础	67
第一节 流体力学有关基本概念	67
第二节 连续性方程	73
第三节 能量方程（不可压缩流体）	76

第四节	能量方程的应用	82
第五节	动量方程的应用	87
第六节	平面流、绕流、两相流	90
第七节	相似理论	95
习题		99
第四章	流动阻力与能量损失	101
第一节	流动阻力与能量损失的两种形式	101
第二节	流体流动的两种形态及雷诺实验	102
第三节	管中层流运动规律——达西公式	106
第四节	管中紊流概述	109
第五节	紊流沿程损失的计算公式	113
第六节	尼古拉茨实验及系数 λ 公式	114
第七节	局部能量损失	117
第八节	管路计算	121
习题		129
第五章	压缩性流体一元运动基本理论	131
第一节	绝热气流的基本方程及应用	131
第二节	音速、气流按不可压缩处理的限度	135
第三节	速度与断面关系、临界参数	140
第四节	高压气体经喷嘴与拉伐尔喷管的流动	142
第五节	气体管流的基本理论	150
习题		155
主要参考文献		157

绪 论

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学，可分为理论流体力学和工程流体力学，本教材阐述的是工程流体力学。

工程流体力学是以理论分析和实验研究相结合的方法来研究流体处于平衡运动和流体与固体相互作用的力学规律，以及这些规律在实际工程中的应用，因此流体力学又是力学的一个分科。

工程流体力学研究对象是流体，而流体主要是液体和气体的总称，因而流体力学就是指液体力学和气体力学。液体力学通常以水为液体的代表，故又称为水力学。水力学在研究液体运动过程中，认为流体不可压缩（或其压缩性可忽略），而流场中各点的密度为恒值，这种等密度流动就是水力学的特点，因此水力学是在等密度流动的前提下来研究其运动规律。气体力学在研究气体运动过程中，由于流体可被压缩，而密度在流场上各点为变数，且气体在改变密度的同时还伴随有扰动波的形成，这两个特性就是气体力学的特点，因此气体力学是在上述前提下来研究运动规律以及确定表征运动状态的参数值。

气体力学与水力学是有原则性区别的，其实质就在于气体的可压缩与液体的不可压缩。

古典流体力学在研究流体平衡及运动规律时，是从严密的数学推理出发，追求问题的严密性和精确性。而水力学则是从简化的工程角度出发，在理论分析的基础上，广泛采用实验数据和经验公式来解决实际问题。

现代工程流体力学的内容和研究方法，是古典流体力学与水力学两者的结合，也就是以理论分析与实验研究相结合的方法来研究流体的力学规律。

工程流体力学在工程技术中占有重要地位，计量技术与流体力学的关系同样十分密切。例如，液体式压力计的测压原理，皮托管测量流速的原理，差压式流量计、速度式流量计、临界流流量计等测量流量的原理以及流量标准装置的设计计算等都分别涉及流体静力学、流体动力学等基本理论，特别是经常用到的伯努利方程、连续方程和动量方程这三个流体力学的基本方程。可见流体力学在计量技术中具有重要作用，因此流体力学是计量测试技术，特别是热工计量技术专业的一门重要的基础课，只有掌握流体平衡和运动的主要理论规律，才能为后继的计量技术专业课奠定基础。

流体的物理性质是决定流体平衡和运动规律的内部原因，因此在讨论流体的力学规律之前，应先了解流体的概念和流体的主要物理性质。

第一章 流体的主要物理性质

第一节 流体的特性

一、流体的概念

液体和气体统称为流体。流体由大量流体分子组成。液体和气体与固体相比较，分子间引力较小，分子运动较剧烈，分子排列松散，不能像固体一样抵抗拉力和切力，只能抵抗对它的压缩力作用。只要有运动及变形的可能，流体就会发生变形或流动。自然界中的流体都具有一定的黏性，因而其流动性也要受到自身的黏性约束，不会无限制地流动。

液体和气体所具有的共同特性是流动性（这种流动性不是无限制的）。但它们也还有一些不同的特性，对气体来说，它很容易被压缩或使其膨胀，而且它没有自由表面，不能保持一定的形状。由于分子间的斥力很弱，因而容易被压缩，气体分子的自由运动使它能够充满所占容器的空间。另一特点是气体的黏性小，而随温度的升高，其黏性加大。

对液体而言，它有自由表面，有固定的体积，在一般的情况下液体被看成是不可压缩的流体。因为液体分子比固体分子间距离大，所以引力减弱，不能保持一定的形状，但两者都比气体分子间的距离小，分子间的引力尚能使液体保持一定的体积。在受到压缩时，由于分子的斥力较大，阻抗压缩，因而具有不可压缩性，这一点在实用上是很有意义的。液体黏性较大，并且随温度的升高而降低。

二、流体作为连续介质的概念

流体由大量的流体分子所组成，而分子是存在间隙的，由于分子力的作用，这些分子一直在做不规则的运动。从微观上来看，这些分子之间是不连续（有间隙）的，如果从研究分子运动出发，从而掌握整个流体与运动规律是很困难的，即便在一个很小的体积内所包含的分子数目也特别多（在标准状况下， $1\mu\text{m}^3$ 液体中有 3.35×10^{10} 个液体分子， $1\mu\text{m}^3$ 气体中有 2.7×10^7 个气体分子），而每个分子的运动又很复杂，所以要列出这些单个分子的运动方程式几乎是不可能的。因此，在研究流体时，可将流体加以理想化。这就是把真正的流体看成是一种有无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质，而这种假想的连续介质仍然具有流体的一切基本力学性质。

将流体视为一种连续介质也是可能的，因为流体力学研究的不是个别分子的微观运动，而是由大量分子组成的宏观流体的机械运动。

把流体看作连续介质，我们就可以抛开流体内部复杂的分子运动，而仅研究流体的宏观机械运动。这样，反映流体宏观运动的物理量，如压强、温度、速度等均可看作是在空间坐标上连续分布的，可用数学上的连续函数来描述。数学上一系列的连续函数的研究成果均可



用于解决流体力学中的各类问题。

以上便是把流体看作连续介质的假说，它是 1753 年由欧拉提出的观点。之后人们一直沿用把流体看作连续介质的观点，并将这种连续介质本身看作有无数多个连续分布的微小、流体团组成，这种微小流体团称之为流体质点，又称流体微团。

特别指出，连续介质的假定有一定的适用范围。当研究的区域很小，与分子的自由程处于同一数量级时，例如在很稀薄的空气中或高真空技术中，连续介质的假定就不再适用，而必须考虑不连续介质。另外，当流体性质局部突变时，连续介质的假定也不适用。例如液体中局部地区压强很低，发生汽化现象形成气穴时，就会破坏液体的连续流动。

第二节 流体的密度和重度

一、流体的密度

流体和自然界里其他物体一样，具有质量。单位体积内流体所具有的质量称为密度。对于均质流体，其密度等于流体质量与它所占体积的比值，即

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

式中： ρ ——均质流体的密度， kg/m^3 ；

m ——均质流体的质量， kg ；

V ——均质流体的体积， m^3 。

对于非均质流体，按式 (1-1) 计算的结果只能表示流体的平均密度，而流体内某一点处的密度 ρ 表示为

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

式中： ρ ——流体内部某一点 a 处的密度， kg/m^3 ；

Δm ——包含该点的微元流体体积所具有的质量， kg ；

ΔV ——包含该点的微元流体体积， m^3 。

流体的密度随压强和温度而变化。

二、密度与温度的关系

假设物体在温度 t_1 和 t_2 时的密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 ，物体的质量为 m ，则有

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1}$$

$$\rho_2 = \frac{m}{V_2}$$

于是有

$$\begin{aligned} \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{V_1 [1 + \beta(t_2 - t_1)]} = \frac{1}{1 + \beta(t_2 - t_1)} \\ \rho_2 &= \rho_1 [1 - \beta(t_2 - t_1) + \beta^2(t_2 - t_1)^2 - \dots] \end{aligned} \quad (1-3)$$

根据密度变化的性质、温度间隔值和准确度的要求，式 (1-3) 可取到一次项、二次项

或三次项。对于温度变化范围不大的间隔，在一般准确度要求下，可将式中的二次项小量忽略掉，即将密度随温度的变化视为线性，此时有

$$\rho_2 = \rho_1 [1 - \beta (t_2 - t_1)] \quad (1-4)$$

式中： ρ_1 ——温度为 t_1 时流体的密度， kg/m^3 ；

ρ_2 ——温度为 t_2 时流体的密度， kg/m^3 ；

β ——温度在 $t_2 \sim t_1$ 范围内流体的体胀系数。

体胀系数等于物质温度每变化 1°C 时它的密度相对变化量的大小，即

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

式中： p ——压强，Pa。

在实际工作中，若已知 t_1 ， t_2 ， ρ_1 和 β 值，则可根据式 (1-3) 求得流体温度为 t_2 时的密度。许多液体的密度随温度的变化可视为线性关系，即 $(\rho_1 - \rho_2) / (t_2 - t_1)$ 是一常量，我们用 α 表示它，并称为密度温度修正系数。

三、密度与压强的关系

由于液体分子间距很小，所以液体内部（分子）的压强很大。故在外部压强变化时，液体密度变化很小，尤其压强变化不大时，密度变化更微小。通常在一个大气压下的液体密度测定，压强的波动对密度的影响可以忽略不计。但在高压下的测定或在极精密的测定中，为得到准确的结果，压强变化的影响还须考虑。

若以 ρ_1 和 ρ_2 分别表示压强为 p_1 与 p_2 时的液体密度，在恒定温度下，则有

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \beta_p (p_2 - p_1)] \quad (1-5)$$

式中： β_p ——在压强为 $p_1 \sim p_2$ 范围内的平均等温压缩系数，它等于压强变化一个单位压强时相应的密度变化量。

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

气体就不同了，它的分子间距比液体大得多，当压强变化时，分子间距就随之有明显的变化。当温度不变时，压强的变化对密度的影响可用式 (1-6) 表示：

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

可见，压强的变化对气体密度的影响是很大的。对于气体，如果不计气体分子之间的相互作用力和分子本身的尺寸，把气体作为完全气体（即理想气体），则它的密度、热力学温度及绝对压强间的关系，可用理想气体状态方程表示：

$$p\nu = RT$$

$$p = \rho RT$$

式中： p ——气体的压强，Pa；

R ——气体常数， $\text{N} \cdot \text{m} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 或 $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ；

T ——热力学温度，K；

ν ——气体的比容（比容为密度的倒数，即 $\nu = \frac{1}{\rho}$ ）， $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

对于空气、氦气、氩气、氧气、氮气、二氧化碳气等，除了高压和低温状态外（如，压



强不超过 $2 \times 10^7 \text{ Pa}$ ，热力学温度不低于 253 K ），基本上都能遵循上述方程的规律，这样气体的密度就为

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

式 (1-7) 中，对于同一种气体，不论在什么状态下， R 的数值恒为常数，但 R 值随气体的种类而异，如氧气、空气的 R 值分别为 $0.2598 \times 10^3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 和 $0.287 \times 10^3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。气体常数与气体的摩尔质量 M 的乘积为一恒定值，称为摩尔气体常数，用 R_M 表示。 $R_M = 8.314510 \pm 0.000070 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。若气体的质量为任意千克时，则气体的密度为

$$\rho = \frac{pM}{R_M T} \quad (1-8)$$

在工程计算中常用式 (1-7)。

由式 (1-7) 可知，气体的密度并不完全取决于压强，这给气体力学分析带来了不便，但是气体的状态变化又遵循 $\frac{p}{\rho^n} = C$ (C 为常数) 的规律，而且很多工程问题可以归属于下列两种情况：

(1) 等温变化过程， $n = 1$ 即 $\frac{p}{\rho} = C$ ；

(2) 等熵变化过程， $n = \kappa$ 即 $\frac{p}{\rho^\kappa} = C$ 。

式中： n ——多变指数，取决于状态变化过程中气体吸热或放热的程度；

κ ——等熵指数（又叫绝热指数）。

在量值上

$$\kappa = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}}$$

式中： $C_{p,m}$ ——摩尔定压热容 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；

$C_{v,m}$ ——摩尔定容热容 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

各种气体的 κ 值见表 1-1。

表 1-1 常用气体的物理性质
(在标准大气压下，温度为 20°C)

气体名称	分子式	摩尔质量 $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	摩尔定压热容 $C_{p,m}/[\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}]$	绝热指数 κ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	重度 $\gamma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$
空气	—	29.98×10^{-3}	29.10	1.40	1.205	11.82
氦气	He	4.033×10^{-3}	20.94	1.66	0.166	1.628
氩气	Ar	39.95×10^{-3}	20.89	1.67	1.662	16.29
氢气	H ₂	2.016×10^{-3}	28.71	1.41	0.0839	0.823
氧气	O ₂	32.00×10^{-3}	29.25	1.40	1.331	13.04
氮气	N ₂	28.01×10^{-3}	29.13	1.40	1.160	11.38

续表

气体 名称	分子式	摩尔质量 $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	摩尔定压热容 $C_{p,m}/[\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}]$	绝热指数 κ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	重度 $\gamma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$
一氧化碳	CO	28.01×10^{-3}	29.16	1.40	1.160	11.38
二氧化碳	CO ₂	44.00×10^{-3}	30.04	1.301	1.84	18.04

四、流体的重度

依据万有引力定律，任何物体都要受到地球的吸引作用，流体也是如此。在忽略地球自转的影响下，可近似地认为物体所具有的重力（重量）就等于引力。对于均质流体，重度就等于流体的重量与其体积的比值。流体的重度表示了流体的重量在空间分布的密集程度。重度用符号 γ 表示

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-9)$$

式中： γ ——流体的重度， $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ；

G ——流体的重量， N ；

V ——流体的体积， m^3 。

五、密度与重度的关系

依据流体密度定义式（1-1）和流体重度的定义式（1-9），则

$$\gamma = \rho g \quad (1-10)$$

式中： g ——重力加速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

流体的重度在量值上等于流体的密度与当地（或位置）重力加速度的乘积。依牛顿第二定律可知，重力加速度是由重力所产生。由于地球自转的影响，同一质量的物体其重力的大小随地球纬度和海拔高度而变，故流体也是如此。由于流体的质量与其位置无关，所以流体的重力加速度也就随地球的纬度和海拔高度而变化。重力加速度在地球的两极时最大，在赤道时最小，如同一物体在赤道海平面上测量为 $g = 9.780 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，在与北京同纬度的海平面上测量为 $g = 9.801 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，而在北极的海平面上测量为 $g = 9.832 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。故流体的重度也随地理的位置而变化，在工程技术上常取 $g = 9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

标准大气压下常用液体的物理性质见表 1-2。

表 1-2 在标准大气压下常用液体的物理性质

流体的名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	重度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$
纯水	20	998	9.79×10^3
海水	20	1026	10.06×10^3
浓度 20% 的盐水	20	1149	11.27×10^3
乙醇	20	789	7.74×10^3
氟里昂-12	20	1335	13.10×10^3
汽油	20	678	6.65×10^3



续表

流体的名称	温度/℃	密度/(kg·m ⁻³)	重度/(N·m ⁻³)
煤油	20	808	7.93×10 ³
原油	20	850~928	8.34~9.11×10 ³
水银	20	13555	132.96×10 ³

例 1-1 试计算在温度为 40℃，绝对压强为 8.3×10^5 Pa 时甲烷的密度、比容和重度。
[已知甲烷的气体常数 $R = 518.5 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]

解：密度 $\rho = \frac{p}{RT} = \frac{8.3 \times 10^5}{51850 \times (273 + 40)} = 5.1 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$

比容 $\nu = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{5.1} = 0.196 \text{ (m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$

重度 $\gamma = \rho g = 5.1 \times 9.80 = 49.98 \text{ (N} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$

例 1-2 在 32℃ 和 2×10^5 Pa 的绝对压强下，某一气体的比容 $\nu = 0.74 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，试求出气体常数 R 和密度 ρ 。

解：由于 $\rho = \frac{p}{RT}$, $R = \frac{p}{\rho T}$, $\nu = \frac{1}{\rho}$

所以 $R = \frac{p\nu}{T} = \frac{2 \times 10^5 \times 0.74}{273 + 32} = 485.2 [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$

$\rho = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0.74} = 1.35 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$

第三节 流体的压缩性和膨胀性

一、流体的压缩性

在一定的温度下，流体的体积随外界压强升高而体积缩小的性质称为流体的压缩性。压缩性的度量方法如下：

1. 压缩率

单位压强引起的体积相对收缩量称作流体的压缩率，用 β_v 表示

$$\beta_v = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} = -\frac{1}{\nu} \frac{\partial \nu}{\partial p} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (1-11)$$

式中： β_v ——流体压缩率， Pa^{-1} 。

V ——流体体积， m^3 ；

ν ——流体比容， $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ；

ρ ——流体密度， $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ；

p ——流体压强，Pa。

压缩系数越大的流体越容易压缩。

2. 体积弹性模量

压缩系数的倒数称为体积的弹性模量。用符号 E_V 表示

$$E_V = \frac{1}{\beta_V} = \rho \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad (1-12)$$

式中: E_V ——体积弹性模数, Pa。

体积弹性模数越大的流体越难压缩。

水是典型的流体, 在常温下水的弹性模数为 $E_V = 2.05 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。若利用式 (1-12)

则有 $\frac{\Delta p}{\Delta \rho} = \frac{E_V}{\rho}$ 。若水的压强增加 $\Delta p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, 则引起水的密度的相对增量为 $\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta p}{E_V} = \frac{1.013 \times 10^5}{2.05 \times 10^9} = 0.5 \times 10^{-4}$ 。由此可知, 水的密度的相对增量极小。

气体的可压缩性与液体大不一样, 其压缩性与压缩过程有关。现以完全气体为例, 气体的状态方程为 $\frac{p}{\rho} = RT$, 若过程为等温 ($T = \text{恒量}$), 即在压缩过程中气体的温度保持为常数,

则由状态方程可知 $\frac{p}{\rho} = \text{恒量}$, 由此可得

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{p}{\rho} \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-12) 中可得

$$E_V = \rho \frac{dp}{d\rho} = p$$

若过程为等熵 (熵 $S = \text{恒量}$) 即 $\frac{p}{\rho^\kappa} = c$ (恒量), 由此可得

$$dp = c\kappa\rho^{\kappa-1}d\rho = \frac{p}{\rho^\kappa}\kappa\rho^{\kappa-1}d\rho = \kappa p \frac{d\rho}{\rho}$$

或写成:

$$\frac{dp}{d\rho} = \kappa \frac{p}{\rho} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 代入式 (1-12) 中, 可得 $E_V = \rho \frac{dp}{d\rho} = \kappa p$ 。由此可见, 气体的弹性模量与 p 成正比, 压强越大, 可压缩性越小。

以空气为例, 其绝热指数为 $\kappa = 1.4$, 对于 $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 条件下的空气

$$(E_V)_{\text{等温压缩}} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$(E_V)_{\text{等熵压缩}} = 1.4 \times 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

可见, 水的弹性模量是空气的 $10^3 \sim 10^4$ 倍, 水比空气难压缩。

例 1-3 有空气 1m^3 , 原处于 $t_1 = 40^\circ\text{C}$, $p_1 = 0.105 \times 10^6 \text{ Pa}$, $R = 287 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$, $\kappa = 1.4$ 。(1) 若等熵地压缩为 0.5m^3 , 求终态温度和压强; (2) 若等温地压缩为 0.5m^3 , 求终态温度和压强。

解: 由状态方程可知

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{0.105 \times 10^6}{287 \times (40 + 273)} = 1.17 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$



由于 $V_2 = 0.5V_1$, 故 $\rho_2 = 2\rho_1 = 2 \times 1.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

(1) 等熵过程: $\frac{p_2}{\rho_2^\kappa} = \frac{p_1}{\rho_1^\kappa}$, 由此可得

$$p_2 = \rho_2^\kappa \frac{p_1}{\rho_1^\kappa} = (2.34)^{1.4} \times \frac{0.105 \times 10^6}{(1.17)^{1.4}} = 0.27 \times 10^6 \text{ (Pa)}$$

(2) 等温过程: $T_2 = T_1 = 313\text{K}$

$$p_2 = R\rho_2 T_2 = 287 \times 2.34 \times 313 = 0.212 \times 10^6 \text{ (Pa)}$$

例 1-4 图 1-1 所示为一鉴定压强表的校正器, 器内充满油液, 其体积压缩系数 $\beta_V = 47.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, 由密封良好的活塞旋进压缩油液, 造成检定压力表所需的压强。活塞直径 $D = 1\text{cm}$, 螺距 $t = 2\text{mm}$, 在一个大气压下器内充油体积 $V = 200\text{cm}^3$ 。当校正器造压至 200 个大气压时, 求手轮需旋进多少转?

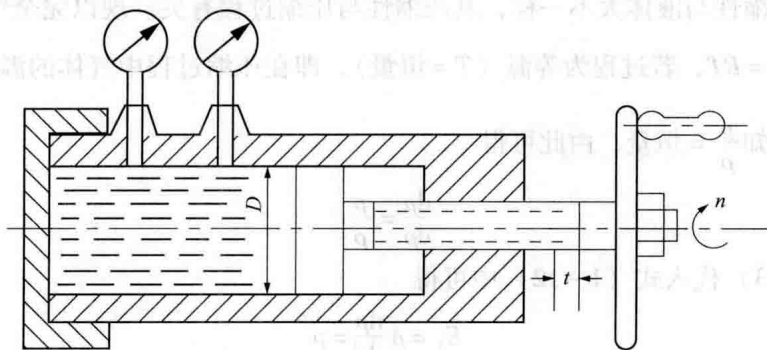


图 1-1 压力表校正器

解: 根据式 (1-11) 可求出油液需减少的体积为

$$dV = -\beta_V V dp$$

手轮旋进 n 转时, 使油液减少的体积为 $dV_1 = V_1 - V = -\frac{\pi D^2 t n}{4}$

当 $dV_1 = dV$ 时, 即造成 dp 压强, 故有

$$\frac{\pi}{4} D^2 t n = \beta_V V dp$$

于是

$$n = \frac{4\beta_V V dp}{\pi D^2 t} = \frac{4 \times 47.5 \times 10^{-6} \times 200 \times 200}{3.14 \times 1^2 \times 0.2} = 12.1 \text{ (r)}$$

二、流体的膨胀性

流体的体积随温度升高而增大的性质称为热膨胀性。流体热膨胀性的大小用膨胀系数 α_V 表示, 它是指流体在恒定的压强条件下, 温度改变所引起的相对体积的变化率。

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial T} \quad (1-15)$$

式中: α_V ——流体的体积膨胀系数, K^{-1} 。

实验指出, 液体的体积膨胀系数很小, 如在 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 压强下, 温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围