

流体力学和水力学理论及习题

R. V. 贾尔斯 原著

D. J. 波拉德 改编

E. H. 威尔逊

科学出版社

流体力学和水力学理论及习题

R. V. 贾尔斯 原著

D. J. 波拉德

E. H. 威尔逊 改编

周显初 译

戴世强 校

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是一本阐述流体力学和水力学基本理论及其应用的书,书中给出了大量的习题。内容包括:流体的性质、流体静力学、流体动力学基本原理、管流、明渠流动、流动的测量、运动流体产生的力、流体机械、量纲和相似理论等。

本书强调物理直观和工程应用,内容浅显易懂。书中用国际单位制。本书可供理工院校有关专业师生及有关工程技术人员阅读。

R. V. Giles, D. J. Pollard, E. H. Wilson
THEORY AND PROBLEMS OF FLUID MECHANICS AND HYDRAULICS
SI (METRIC) EDITION, 1976
McGraw-Hill Book Company

流体力学和水力学理论及习题

R. V. 贾尔斯 原著

D. J. 波拉德 改编

E. H. 威尔逊

周显初 译

戴世强 校

责任编辑 陈大宁

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1986 年 3 月第一次印刷 印张: 19

印数: 0001—6,500 字数: 433,000

统一书号: 13031·3114

本社书号: 4515·13—2

定 价: 4.45 元

译 者 的 话

本书是一本阐述流体力学和水力学基本原理及其应用的书，并有大量习题。每一章都有内容提要、例题、补充习题。本书涉及的范围很广，几乎包括了工程技术中所有有关流体力学方面的基础知识。

本书有两个特点：1) 强调物理直观和工程应用，尽可能用较简单的数学工具来解决有实际意义的问题。叙述条理清楚、浅显易懂，理工科大学一年级的学生就能阅读此书。2) 本书采用国际单位制。国际单位制是1960年第十一届国际计量大会通过的全世界统一的单位制，近年来已被广泛采用。目前，用这种单位制编写的教学参考书还不多。在力学中，尤其需要这样的教学参考书。

译者——校核了原书题解中所有的计算结果，对误差太大的答案作了修正，对原书中明显的错误作了改正。原书基本原理的叙述中不够严谨的地方，译者也尽可能加了注释。翻译时还参考了原书英制单位第一、二版。

由于译者水平所限，故译稿中难免有错误或不当之处，请读者批评指正。

译 者

国际单位制版前言

由于在教学和工业实践中，国际单位制的使用日益频繁，促使我们决定出版《流体力学和水力学理论及习题》第二版的国际单位制版本。我们已经有了用国际单位制写成的教科书，但仍需要出版一本采用国际单位制的习题集。

国际单位制仍处在过渡阶段，习惯势力仍然限制着这种单位制的普及。随手可得的大量数据用的都是英制单位，而且这种状况还要持续一段时间。因此，我们给出了一些换算系数，特别是关于准无量纲数(例如比速)的换算系数。

这个版本实质上是本书第二版的修订本，保留了所有例题，凡需作单位换算之处都作了换算。在某些场合，为了运算方便，我们对换算作了舍入，但在许多情况下，由于精度或者习惯的关系我们没有这样做。我们相信这种做法有颇大的优点，因为在从事实践工作的工程师所处理的具体问题中出现的数据，很少刚好是整数。尽管我们换算的精度很高，但问题的答案却只达到计算尺的精度。一个工程师对他的工作需要达到的精度和实际达到的精度应该有所判断，且不应误信计算器所得结果的表面的精度，因为这一点很重要，所以我们采用了这种处理方法。为与正文一致，已经把数值表作了换算，但是，还不得不另外保留一些有用的英制单位的数据。

D. J. 波拉德

E. H. 威尔逊

1976年8月于格尔福德

符 号 表

下表列出了本书所用的字母符号。因为字母有限，所以不可避免地要用同一字母代表一个以上的概念。由于这种符号在初次使用时都加以定义，故不会产生混淆。

a	加速度(米 ² /秒)	h	水头(米)
	面积(米 ²)		高度或深度(米)
A	面积(米 ²)		压头(米)
b	堰长(米)	H	总压头(总能量)(米或焦耳/牛顿)
	水面宽度(米)	H_L, h_L	压头损失(米)
	明渠底宽(米)		(有时用 LH)
c	出流系数	hp	马力 = 0.746 千瓦
	压力波波速(声速)(米/秒)	I	惯性矩(米 ⁴)
c_c	收缩系数	I_{xy}	惯性积(米 ⁴)
c_v	速度系数	k	比热比
C	(谢才)系数		等熵(绝热)指数
	积分常数		冯·卡门常数
C_G	重心	K	梯形渠道的流量因子
C_p	压力中心		放大时的压头损失系数
	螺旋桨功率系数		任何常数
C_D	阻力系数	K_c	收缩时的压头损失系数
C_F	螺旋桨推力系数	l	混合长度(米)
C_L	升力系数	L	长度(米)
C_T	螺旋桨扭矩系数	L_E	等效长度(米)
C_1	黑兹恩-威廉斯系数	m	巴赞公式中的粗糙系数
cf _s	英尺 ³ /秒		坝的堰流系数
d, D	直径(米)	$\dot{m}$	质量流量
D_1	单位直径(米)	M	质量(千克)
e	效率		分子量
E	体积弹性模量(帕斯卡或牛顿/米 ²)	n	粗糙系数
	比能(牛顿·米/牛顿或焦耳/牛顿)		指数
f	管道流动的(达西)		库特和曼宁公式中的粗糙系数
	摩擦系数	N	转速(转/分)
F	力(牛顿)	N_s	比速
	推力(牛顿)	N_u	单位速度
g	重力加速度 = 9.81 米/秒 ²	N_F	弗罗特数
gpm	加仑/分	N_M	马赫数

N_w	韦伯数	T	温度
p	压力		扭矩(牛顿·米)
	湿周(米)		时间(秒)
p'	压力	u	旋转部件的圆周速度(米/秒)
P	力(牛顿)	u, v, w	X, Y, Z 方向的速度分量
	功率(千瓦)	v	体积(米 ³)
P_u	单位功率		局部速度(米/秒)
psf	磅/英尺 ²		水力机械中的相对速度(米/秒)
psia	绝对压力(磅/英寸 ²)	v_r	比容 $= \frac{1}{\rho} = \text{米}^3/\text{千克}$
psig	表压(磅/英寸 ²)	v_*	剪切速度 $= \sqrt{\tau/\rho}$ (米/秒)
q	单宽流量(米 ³ /秒/单位宽度)	V	平均速度(米/秒)
Q	体积流量(米 ³ /秒)		(或按照定义)
Q_u	单位流量	V_c	临界速度(米/秒)
r	任何半径(米)	w	单位体积流体的重量(牛顿/米 ³)
r_0	管道半径(米)	W	重量(牛顿)
R	气体常数		重量流量 $= \rho g Q$ (牛顿/秒)
R	水力半径(米)	x	距离(米)
R_e	雷诺数	y	深度(米)
rl dn	相对密度		距离(米)
S	水力坡度线斜率	y_c	临界深度(米)
	能量线斜率	y_N	正常深度(米)
S_0	渠道底部斜率	Y	可压缩流动的膨胀系数
sp gr	比重	z	高度(高程水头)(米)
t	时间(秒)	Z	从渠底算起的堰顶高度(米)
	厚度		
	赛波特秒粘性系数		
α	角度, 动能修正系数	π	无量纲参数
β	角度, 动量修正系数	ρ	密度(千克/米 ³)
δ	边界层厚度(米)	σ	表面张力(牛顿/米), 张力强度(牛 顿/米 ² 即帕斯卡)
Δ	流量修正项	τ	剪切应力(牛顿/米 ² 即帕斯卡)
ε	表面粗糙度(米)	φ	速度系数, 速度势, 比值
η	涡流粘性系数	ϕ	流函数
θ	任何角度	ω	角速度(弧度/秒)
μ	绝对粘性系数(帕斯卡·秒或泊)		
ν	运动粘性系数 $= \mu/\rho$ (米 ² /秒)		

有用的换算因子

$$1 \text{ 英尺}^3 = 7.48 \text{ 美国加仑} = 28.32 \text{ 升} = 0.02832 \text{ 米}^3$$

$$1 \text{ 美国加仑} = 8.338 \text{ 磅 } 60^\circ\text{F 的水(的体积)} = 3.785 \times 10^{-3} \text{ 米}^3$$

$$1 \text{ 英尺}^3/\text{秒} = 0.646 \text{ 百万加仑/天} = 448.8 \text{ 加仑/分} = 0.02832 \text{ 米}^3/\text{秒}$$

$$1 \text{ 磅秒/英尺}^2 (\mu) = 478.7 \text{ 泊} = 47.87 \text{ 帕斯卡} \cdot \text{秒(或千克/米} \cdot \text{秒)}$$

$$1 \text{ 英尺}^2/\text{秒} (\nu) = 929 \text{ 厘米}^2/\text{秒} = 0.0929 \text{ 米}^2/\text{秒}$$

$$1 \text{ 马力} = 550 \text{ 英尺磅/秒} = 0.746 \text{ 千瓦}$$

$$30 \text{ 英寸水银柱} = 10.3 \text{ 米水柱} = 14.7 \text{ 磅/英寸}^2 = 101353 \text{ 帕斯卡}$$

$$1 \text{ 巴} = 10^5 \text{ 帕斯卡}$$

$$1 \text{ 泊} = 10^{-1} \text{ 帕斯卡} \cdot \text{秒}$$

$$1 \text{ 沱} = 10^{-4} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

目 录

译者的话

国际单位制版前言

符号表

第一章 流体的性质..... 1

流体力学和水力学 流体的定义 国际单位制 质量密度 相对密度 粘性 蒸气压力 表面张力 毛细现象 流体压力 单位压力 压差 可压缩流体中的压力改变 压头 h 体积弹性模量 气体的压缩 等温状态 绝热或等熵状态 压力扰动

第二章 作用在表面上的流体静力..... 23

作用在平面面积上的力 力的作用线 水平分力和铅直分力 环向应力 纵向应力

第三章 浮力和漂浮..... 39

阿基米德原理 潜体和浮体的稳定性

第四章 液团的平移和转动..... 47

水平运动 铅直运动 开口容器中流团的旋转 密闭容器中流团的旋转

第五章 量纲分析和水力学相似..... 56

量纲分析 白金汉 π 定理 水力学模型 几何相似 运动学相似 动力学相似 惯性力之比 惯性力-压力之比 惯性力-粘性力之比 惯性力-重力之比 惯性力-弹性力之比 惯性力-表面张力之比 各种时间的比值

第六章 流体流动的基本原理..... 76

流体流动的三个重要概念 流体的流动 定常流动 均匀流动 流线 流管 连续性方程 流网 能量方程 速度头和动能修正系数 伯努利定理的应用 能量线 水力坡度线 功率

第七章 流体在管道中的流动..... 105

能量原理 层流 临界速度 雷诺数 湍流 管壁剪切应力 速度分布 层流的压头损失 达西-韦斯巴赫公式 摩擦系数 f 其它的压头损失

第八章 等效管道, 复合管道, 环路管道和分支管道..... 127

管道系统和哈迪·克罗斯方法 等效管道、复合管道、环路管道和分支管道 求解方法 黑兹恩-威廉斯公式

第九章 流体流动的测量..... 148

速度测量和流量测量引论 皮托管 出流系数 速度系数 收缩系数 压头损失 堰 堰流公式 当作堰用的坝 水箱放空时间 建立流动时间

第十章 明渠流动..... 179

明渠 定常均匀流动 非均匀流动或可变流动 层流 谢才公式 系数 C 的公式 曼宁公式 确定的流量 Q 压头损失 垂直方向的速度分布 比能 临界深度 最大单宽流量 非矩形渠道中的临界流动 非均匀流动和壅水曲线 宽顶堰 水跃

第十一章 运动流体产生的力..... 214

冲量-动量原理 动量修正系数 阻力 升力 总阻力 阻力系数 升力系数 马赫数 边界层理论 平板的公式 水击 超声速

第十二章 流体机械	246
流体机械 旋转渠槽 速度系数 速度、流量和功率关系 单位速度 单位流量 单位功率 比速 效率 气蚀 螺旋桨推进及其系数	
附录	267
数值表 1. 空气、水和一些气体的性质	267
2. 一些液体的相对密度和运动粘性系数	268
3. 水的摩擦系数 f	269
4. 典型的压头损失项目	270
5. 关于收缩和放大的 K 值	270
6. 黑兹恩-威廉斯系数 C_1 的一些值	271
7. 圆孔口的出流系数	271
8. 可压缩流动的膨胀系数 Y	271
9. 曼宁公式中的 n 和巴赞公式中的 m 的平均值	272
10. 由库特公式算得的 C 值	272
11. 梯形渠道流量因子 K 的值	273
12. 梯形渠道流量因子 K' 的值	274
13. 圆的面积	276
14. 铸铁管的尺寸和重量	276
曲线图 A-1. 摩擦系数 f 的穆迪图	277
A-2. 摩擦系数 f 的改进的穆迪图 (直接解出流量 Q)	278
B. 黑兹恩-威廉斯公式 ($C_1 = 100$) 的流量计算图	279
C. 管道孔口系数	280
D. 测流嘴系数	281
E. 文杜里流量计系数	282
F. 阻力系数	283
G. 光滑平板的阻力系数	284
H. 超声速时的阻力系数	285
索引	286

第一章 流体的性质

流体力学和水力学

流体力学和水力学是应用力学的一个分支,专门论述静止流体和运动流体的性状。在阐明流体力学原理时,流体的某些性质起主要作用,其它性质只起次要作用或者完全不起作用。在流体静力学中,重量是重要的性质,而在流体动力学中,密度和粘性是主要的性质;在出现明显的可压缩性的场合,必须考虑热力学原理;在出现负压(表压)时,蒸气压力变成了重要因素,而表面张力则影响小通道中流体的静止状态和流动状态。

流体的定义

流体是一种可以流动的、与容器形状保持一致的物质。流体在平衡时不能承受切向力或剪切力。所有流体都有某种程度的可压缩性,并且几乎没有抵抗变形的能力。

流体可以分为液体和气体。液体和气体的主要差别是:(a)液体实际上是不可压缩的,而气体是可压缩的,并且往往必须这样处理。(b)液体占有确定的体积,有自由表面,而给定的一团气体则会膨胀,直到它充满任何盛它的容器的所有空间为止。

国际单位制

选定的三个参考量纲(基本量纲)是质量、长度和时间。本书所用的相应的基本单位是:质量为千克(kg),长度为米(m),时间为秒(s)。所有其它单位可以从这些单位导出。从这些单位导出的力的单位是牛顿(N)。因此,体积的单位为米³(m³);加速度的单位是米/秒²(m/s²);功的单位是牛顿·米(Nm),叫作焦耳(J);压力的单位是牛顿/米²(N/m²),叫作帕斯卡(Pa)。若数据是用其它单位给出的,那么在用它们解问题之前,必须换算成国际单位制。

在国际单位制中,力的单位牛顿是从质量单位和加速度单位导出的。从牛顿第二定律得出

$$\text{力(牛顿)} = \text{质量(千克)} \times \text{加速度(米/秒}^2\text{)} \quad (1)$$

或者 1 牛顿的力使 1 千克的质量产生 1 米/秒² 的加速度。

物质的质量密度(ρ)

物质的密度是单位体积物质的质量。对于液体来说,在实际的压力变化范围内,密度可以取作常数。在 4℃ 时,水的密度是 1000 千克/米³。其它的值请看附录表 1c 及表 2。

气体的密度可以用气体的状态方程来计算。

$$\frac{p v_i}{T} = R \quad (\text{波义耳定律和查尔斯定律}) \quad (2)$$

其中 p 是以帕斯卡为单位的绝对压力, v_i 是单位质量的比容,单位为米³/千克, 温度 T 是绝对温度(等于 273+摄氏温度), R 是气体常数,单位为焦耳/千克·°K。因为 $\rho = 1/v_i$,

上面的方程可以写为

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3)$$

有时,特别是在处理液体时,要用到乘积 ρg , 其中 g 是重力加速度,其标称值是 9.81 米/秒²。以前,这个乘积称为比重。用符号 w 表示。在国际单位制里,字头“比”专门用来描述单位质量的性质,不再使用比重这个名词。

物体的相对密度[以前称作比重]

一个物体的相对密度是一个无量纲数,该无量纲数等于一个物体的质量与另一个等体积的当作标准的物质的质量之比。固体和液体以水(4℃)作为标准,而气体常取清除了 CO₂ 的空气或氢气(在温度为 0℃、压力为 1 个大气压 = 1.013×10^5 帕斯卡时)作为标准。例如:

$$\text{物质的相对密度} = \frac{\text{物质的质量}}{\text{等体积的水的质量}} = \frac{\text{物质的密度}}{\text{水的密度}} \quad (4)$$

因此,如果某种油的相对密度是 0.750,那么它的密度是 0.750×1000 千克/米³ = 750 千克/米³。

水的相对密度是 1.00,水银的相对密度是 13.57。一种物质的相对密度在任何度量单位制下都是相同的。其值请看附录表 2。

流体的粘性

流体的粘性是决定流体反抗剪切力的程度的一种性质,粘性主要由流体分子之间的相互作用而产生

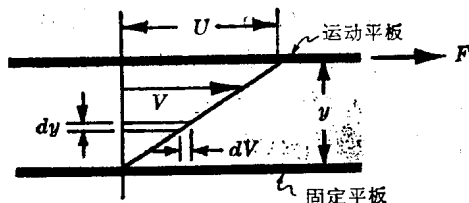


图 1-1

参照图 1-1,考虑两块大的平行平板,其间距 y 很小,间隙为流体所充满。假定上面那块平板受一个常力 F 的作用,而以常速度 U 运动。与上面一块平板相接触的流体粘附在平板上,也以速度 U 运动。与固定平板接触的流体速度为零。如果距离 y 和速度 U 不太大,那么速度按线性变化。实验表明,力 F 与平板的面积 A 、速度 U 成正比,与距离 y 成反比。因为根据相似三角形关系得出 $U/y = dV/dy$, 有

$$F \propto \frac{AU}{y} = A \frac{dV}{dy} \quad \text{或} \quad \frac{F}{A} = \tau \propto \frac{dV}{dy}$$

其中 $\tau = F/A =$ 剪切应力。如果引入比例常数 μ , 叫作绝对粘性系数(动力粘性系数), 那么

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad \text{或} \quad \mu = \frac{\tau}{dV/dy} \quad (5)$$

μ 的单位是帕斯卡·秒, 因为 $\frac{\text{帕斯卡}}{(\text{米/秒})/\text{米}} = \text{帕斯卡} \cdot \text{秒}$ 。遵循方程(5)的流体称为牛顿流体(请看问题 9)。

另一个粘性系数, 运动粘性系数, 定义为

$$\text{运动粘性系数 } \nu = \frac{\text{绝对粘性系数 } \mu}{\text{质量密度 } \rho}$$

或者

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

因为 $\frac{\text{帕斯卡} \cdot \text{秒}}{\text{千克/米}^3} = \frac{\text{千克/米} \cdot \text{秒}}{\text{千克/米}^3} = \text{米}^2/\text{秒}$ 。所以 ν 的单位是米²/秒。

由粘度计测得的、记载在手册中的粘性系数以泊和沱为单位(厘米、克、秒单位制), 有时还以赛波特秒为单位。这些单位与国际单位制的换算在问题 6—8 中予以说明。一些粘性系数的值列在附录的表 1 和表 2 中。

液体的粘性系数随着温度的增加而减小, 而改变压力对它没有明显影响; 气体的绝对粘性系数随着温度的增加而增加, 但是不随压力的改变而明显改变。由于(温度不变时)气体的密度随压力而变化, 所以运动粘性系数的变化与压力成反比。不管怎样, 从上面的方程知道, $\mu = \rho\nu$ 。

蒸气压力

在一个密闭的容器内发生蒸发时, 蒸气分子产生的那个分压力叫作蒸气压力。蒸气压力依赖于温度, 并随温度增加而增加。水的蒸气压力值见表 1c。

表面张力

液体内部的分子处于各个方向吸引力的作用之下, 这些力的向量和为零。但是液体表面的分子受到一个垂直于该表面的向内的净内聚力的作用。因此, 要把一个分子移到表面上去, 需要反抗这个力作功, 所以表面上的分子比内部分子有更多的能量。

液体的表面张力就是把足够的分子从液体内部带到表面上形成该表面一个新的单位面积必须作的功(牛顿·米/米²)。这个功在数值上等于作用在液体表面单位长度假想的线上的切向收缩力(牛顿/米)。

在初等流体力学的大部分问题中, 表面张力不是特别重要的。表 1c 给出了与空气接界的水的表面张力 σ 的值。

毛细现象

在毛细管中(或在某种等效情形, 例如多孔介质中)液体的上升或下降由表面张力引起, 并且依赖于液体的内聚力和液体对容器壁的粘附力的相对数值。液体在它浸润的管中上升(粘附力 > 内聚力), 在它不能浸润的管中下降(内聚力 > 粘附力)。当所用的管

子的直径小于 10 毫米时,毛细现象是重要的。

流体的压力

流体的压力是向各个方向等强度传递的,且作用在任一平面的法线方向。在同一水平面上,液体中的压强相等¹⁾。单位压力的测量用各种形式的压力计来完成。除非另作说明,本书将始终采用表压即相对压力。表压表示超过大气压或低于大气压的数值。

单位压力或压强

单位压力或压强用力除以面积来表示,一般来说

$$p(\text{牛顿/米}^2\text{或帕斯卡}) = \frac{dP(\text{牛顿})}{dA(\text{米}^2)}$$

对于力 P 均匀分布在整個面积的这种情况

$$p(\text{帕斯卡}) = \frac{P(\text{牛顿})}{A(\text{米}^2)} \text{ 或 } p'(\text{巴}) = \frac{P(\text{牛顿})}{A(\text{米}^2)} \times 10^{-5}$$

压差

液体中不同水平面上任何两点间的压差由下式给出

$$p_2 - p_1 = \rho g(h_2 - h_1) \quad (\text{帕斯卡}) \quad (7)$$

其中 ρg = 单位体积液体的重量(牛顿/米³), $h_2 - h_1$ = 高度差(米)。

如果点 1 在液体的自由表面上, h 向下为正,那么上面的方程变为

$$p = \rho g h \quad (\text{帕斯卡, 表压}) \quad (8)$$

为了得到以巴为单位的压力,我们利用

$$\text{表压 } p' = p/10^5 = \rho g h/10^5(\text{巴}) \quad (9)$$

只要 ρ 是常数(或 ρ 随 h 变化极微,使所得结果不产生明显的误差)就可以应用这些方程。

可压缩流体中的压力改变

因为在水力学的计算中所考虑的可压缩流体的单位体积的重量和高度差很小,所以在可压缩流体中的压力改变一般很小。在必须确定与小的高度改变 dh 对应的这种压差时,压力变化规律可以写为

$$dp = -\rho g dh \quad (10)$$

负号表示高度增加时压力减小, h 向上为正。这个规律的应用请看问题 29—31。

压头 h

压头 h 表示产生一给定压强的均质流体柱的高度

$$h(\text{米流体柱}) = \frac{p(\text{帕斯卡})}{\rho g(\text{牛顿/米}^3)} \quad (11)$$

1) 本书和一般的流体力学教科书一样,“压力”都是指单位面积上所受的力,与“压强”、“单位压力”的概念相同。——译者

体积弹性模量 (E)

体积弹性模量 (E) 表示流体的压缩性, 它是单位压力改变与对应的每单位体积的体积改变之比

$$E = \frac{dp'}{-dv/v} \left(\frac{\text{帕斯卡}}{\text{米}^3/\text{米}^3} = \text{帕斯卡或牛顿/米}^2 \right) \quad (12)$$

气体的压缩

气体的压缩可能遵循各种不同的热力学定律。对于处于两个不同状态下的同一团气体来说,

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = MR \text{ 或 } \frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} = R \quad (13)$$

其中, p = 绝对压力(帕斯卡), v = 体积(米³), M = 质量(千克), ρ = 密度(千克/米³), R = 气体常数(焦耳/千克·°K), T = 绝对温度(°K = 273 + °C)。

等温状态

对于等温状态(常温)来说, 上面的表达式(13)变为

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \text{ 或 } \frac{p_1}{\rho_2} = \frac{p_2}{\rho_1} = \text{常数} \quad (14)$$

又

$$\text{体积弹性模量} \quad E = p \text{ (帕斯卡)} \quad (15)$$

可逆的绝热或等熵状态

对于可逆的绝热或等熵状态(没有热交换的状态)而言, 上面的表达式变为

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \text{ 或 } \left(\frac{p_1}{\rho_2} \right)^k = \frac{p_1}{\rho_2} = \text{常数} \quad (16)$$

且

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \quad (17)$$

$$\text{体积弹性模量} \quad E = kp \text{ (帕斯卡)} \quad (18)$$

其中 k 是定压比热和定容比热之比, 叫作等熵指数。

附录中表 1 A 列出了一些典型的 R 和 k 值, 对于许多气体来说, R 与分子量的乘积大约为 8314。

压力扰动

加在流体上的压力扰动以波的形式传播。这些压力波传播的速度等于流体中的声速。这个速度(单位为米/秒)可表示成

$$C = \sqrt{E/\rho} \quad (19)$$

其中 E 必须以帕斯卡为单位。对于气体而言, 声速为

$$C = \sqrt{kp/\rho} = \sqrt{kRT} \quad (20)$$

题 解

1. 试计算在温度为 40℃、绝对压力为 8.3 巴时, 甲烷的密度 ρ 和比容 v_s 。

解: 由附录表 1 A 查出

$$R = 96.3 \times 5.38 = 518 \text{ 焦耳/千克} \cdot ^\circ\text{K}^1$$

因此

$$\text{密度 } \rho = \frac{p}{RT} = \frac{8.3 \times 10^5}{518 \times (273 + 40)} = 5.1 \text{ 千克/米}^3$$

$$\text{比容 } v_s = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{5.1} = 0.196 \text{ 米}^3/\text{千克}$$

2. 设 5.6 米³的油重 46800 牛顿, 试计算这种油的密度 ρ 和相对密度。

解: 单位体积的重量 = $\rho g = \frac{46800}{5.6} = 8360 \text{ 牛顿/米}^3$

$$\text{密度 } \rho = \frac{\rho g}{g} = \frac{8360}{9.81} = 852 \text{ 千克/米}^3$$

$$\text{相对密度} = \frac{\rho_{\text{油}}}{\rho_{\text{水}}} = \frac{852}{1000} = 0.852$$

3. 在 32℃ 的温度和 2 巴的绝对压力下, 某一气体的比容 $v_s = 0.74 \text{ 米}^3/\text{千克}$, 试求出气体常数 R 和密度 ρ 。

解: 由于 $\rho = \frac{p}{RT}$, 于是 $R = \frac{p}{\rho T} = \frac{pv_s}{T} = \frac{2 \times 10^5 \times 0.74}{273 + 32} = 485.2 \text{ 焦耳/千克} \cdot ^\circ\text{K}$

$$\text{密度 } \rho = 1/v_s = 1/0.74 = 1.35 \text{ 千克/米}^3$$

4. (a) 试求出 1.00 米³的水在 26.7℃ 下所受的压力增加 20 巴时, 它的体积的改变量。

(b) 根据下列试验数据确定水的体积弹性模量: 压力为 35 巴时, 体积为 1.000 米³; 压力为 240 巴时体积为 0.990 米³。

解: (a) 由附录表 1 C 查出, 在 26.7℃ 时, E 为 2.24×10^9 帕斯卡。利用公式(12)求得

$$dv = -\frac{v dp'}{E} = -\frac{1.00 \times 20 \times 10^5}{2.24 \times 10^9} = -0.00089 \text{ 米}^3$$

(b) 公式(12)的定义表明: 必须考虑压力和体积的相应的改变。这里压力增加对应于体积减小。

$$E = -\frac{dp'}{dv/v} = -\frac{(240 - 35) \times 10^5}{(0.990 - 1.000)/1.000} = 2.05 \times 10^9 \text{ 帕斯卡}$$

$$= 2.05 \text{ 千兆帕斯卡}$$

5. 在 50℃ 的温度和 2.76 巴的绝对压力下, 汽缸内有 0.35 米³ 的空气。把这些空气压缩到 0.071 米³。(a) 假定压缩时处于等温状态, 新体积下的空气压力是多少? 体积弹性模量是多少? (b) 假定压缩时处于等熵状态, 最终压力和最终温度是多少? 体积弹性模量

1) 96.3 是英制单位中甲烷的气体常数, 5.38 是换算系数。——译者

是多少?

解: (a) 对于等温状态而言 $p_1 v_1 = p_2 v_2$

$$\text{于是 } 2.76 \times 10^5 \times 0.35 = p'_2 \times 10^5 \times 0.071$$

$$p'_2 = 13.6 \text{ 巴}$$

$$\text{体积弹性模量 } E = p' = 13.6 \text{ 巴}$$

(b) 对于等熵状态而言, $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$, 附录的表 1 A 给出 $k = 1.40$. 于是

$$2.76 \times 10^5 \times (0.35)^{1.40} = p'_2 \times 10^5 \times (0.071)^{1.40}$$

$$p'_2 = 25.8 \text{ 巴}$$

利用方程(17), 得出最终温度

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}, \quad \frac{T_2}{(273 + 50)} = \left(\frac{25.8}{2.76}\right)^{0.40/1.40}$$

$$T_2 = 612^\circ\text{K} = 339^\circ\text{C}$$

$$\text{体积弹性模量 } E = k p' = 1.40 \times 25.8 \times 10^5 = 3.61 \text{ 兆帕斯卡}$$

6. 从《国际科技常数手册》查得, 水在 20°C 时的(绝对)粘性系数是 0.01008 泊. (a) 试计算以帕斯卡·秒为单位的绝对粘性系数. (b) 如果在 20°C 时水的相对密度是 0.998, 试计算以米²/秒为单位的运动粘性系数.

解: 泊是以达因·秒/厘米²来量度的. 由于 1 达因 = 1 克·厘米/秒² = 10^{-5} 牛顿, 于是可得

$$1 \text{ 泊} = \frac{10^{-5} \text{ 牛顿} \cdot \text{秒}}{(10^{-2})^2 \text{ 米}^2} = 10^{-1} \text{ 帕斯卡} \cdot \text{秒}$$

(a) 以帕斯卡·秒为单位的 $\mu = 0.01008/10 = 1.008 \times 10^{-3}$ 帕斯卡·秒

(b) 以米²/秒为单位的 $\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.008 \times 10^{-3}}{0.998 \times 1000} = 1.01 \times 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}$

7. 设液体的相对密度为 0.964, 请把 15.14 泊换算为以米²/秒为单位的运动粘性系数.

解: 可以采用问题 6 中说明的步骤, 或者对于水来说, 可以规定一个附加因子

$$\frac{1}{10} \times \frac{1}{1000} = 10^{-4}. \text{ 因此以米}^2/\text{秒为单位的 } \nu = \frac{15.14 \times 10^{-4}}{\text{相对密度}} = \frac{15.14 \times 10^{-4}}{0.964} \\ = 1.57 \times 10^{-3}$$

8. 把温度为 60°F 时的 510 赛波特秒粘性系数换算成以米²/秒为单位的运动粘性系数 ν .

解: 用赛波特通用粘度计时, 有两组换算公式

(a) 对于 $t \leq 100$, $\mu(\text{泊}) = (0.00226t - 1.95/t) \times \text{相对密度}$

对于 $t > 100$, $\mu(\text{泊}) = (0.00220t - 1.35/t) \times \text{相对密度}$

(b) 对于 $t \leq 100$, $\nu(\text{沱}) = (0.00226t - 1.95/t)$

对于 $t > 100$, $\nu(\text{沱}) = (0.00220t - 1.35/t)$

其中 t = 以赛波特秒为单位的数值. 想把沱(厘米²/秒)换算为以米²/秒为单位, 要除以 $(100)^2$ 即 10^4 .

利用(b)组公式, 由于 $t > 100$, 所以

$$\nu = \left(0.00220 \times 510 - \frac{1.35}{510}\right) \times 10^{-4} = 11.19 \times 10^{-5} \text{ 米}^2/\text{秒}$$