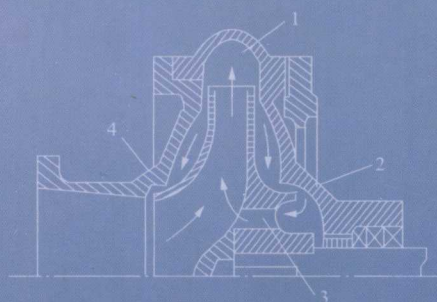
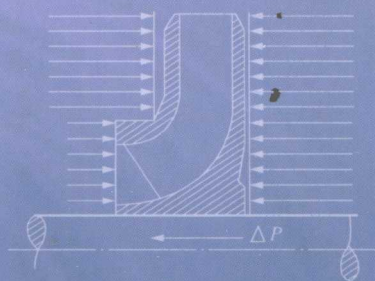
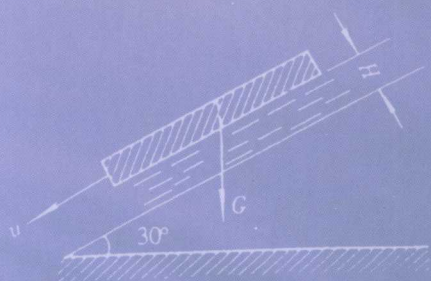


柯 葵 朱立明 编著

流体力学与流体机械

LIUTILIXUE YU LIUTIJIXIE



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

流体力学与流体机械

柯 葵 朱立明 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是根据高等学校工科基础课流体力学教学大纲编写的。全书共分 13 章,内容包括:绪论、流体静力学、流体动力学基础、流动阻力和水头损失、孔口、管嘴出流和有压管路、绕流运动、明渠流动、堰流、因次分析和模型试验、渗流及流体机械等。各章附有内容提要、学习指导、复习思考题、选择题和习题。

本书主要适合于土建类给排水、环境科学、道路桥梁、土建结构等专业的流体力学(水力学)的教学用书或参考书,也可作为有关工程技术人员、全国注册工程师流体力学考试的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学与流体机械/柯葵,朱立明编著. —上海:同济大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-5608-4000-0

I. 流… II. ①柯…②朱… III. ①流体力学—教材
②流体机械—教材 IV. O35 TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 108017 号

流体力学与流体机械

柯 葵 朱立明 编著

责任编辑 林武军 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 20.75

印 数 1—4100

字 数 517000

版 次 2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4000-0

定 价 36.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

本书是在 2000 年同济大学出版社出版的《水力学》教材基础上,根据现行的教学大纲以及当前学生的学习特点改编而成的。主要适用于土建类环境工程、给排水工程及道路桥梁工程等专业。本书也可用作上述专业及相关专业学生的自学用书。

本书系统地阐述了流体力学与流体机械的基本概念和基本理论以及在工程中的应用。在基本理论的论述上,主要采用了一元流动的分析方法。

本书继承了原《水力学》教材的编写特点,深入浅出,内容深度、广度适宜。书中有大量的与教学内容相匹配的例题。除了依然在每章后都附有学习指导、复习思考题和计算习题外,还在每章前增加了内容提要,在每章后增加了选择题,以方便学生理解内容和自我测试。

本书相比较前《水力学》教材,增补了适用于上述专业的绕流运动及风机方面的内容。

参加本书编写工作的有朱立明(第一、二、三、四、六章)、柯葵(第五、七、八、九、十、十一、十二、十三章),全书由柯葵统稿,由同济大学陈硕主审。本书的编写出版得到了有关兄弟院校教师、同济大学出版社的帮助和支持,还得到了同济大学网络学院的关心和资助,编者表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 2 月于同济大学

目 录

前言

1 绪 论	(1)
1.1 流体力学的任务和发展简史	(1)
1.2 连续介质假设和流体力学的研究方法	(2)
1.3 流体的主要物理性质	(3)
1.4 作用在液体上的力	(8)
1.5 流体力学中的力学模型	(9)
1.6 牛顿流体和非牛顿流体	(10)
2 流体静力学	(14)
2.1 静止流体中压强的特性	(14)
2.2 流体静力学基本微分方程	(15)
2.3 重力作用下静止流体中的压强分布规律	(16)
2.4 静止流体压强的表示方法	(18)
2.5 静水压强的量测方法	(19)
2.6 作用在平面上的静水总压力	(21)
2.7 作用在曲面上的静水总压力	(24)
2.8 流体的相对平衡	(28)
3 流体动力学基础	(42)
3.1 描述流体运动的两种方法	(42)
3.2 流体运动的基本概念	(44)
3.3 恒定总流的连续性方程	(47)
3.4 恒定元流的能量方程	(48)
3.5 渐变流过流断面的压强分布规律	(50)
3.6 恒定总流的能量方程	(51)
3.7 恒定总流能量方程应用	(53)
3.8 总水头线和测压管水头线	(55)
3.9 恒定总流的动量方程	(56)
4 流动阻力和水头损失本	(66)
4.1 流动阻力和水头损失的分类及计算	(66)
4.2 雷诺试验——层流与紊流	(67)
4.3 均匀流基本方程	(69)
4.4 圆管中的层流运动	(70)

4.5	紊流运动	(72)
4.6	沿程阻力系数的变化规律	(76)
4.7	边界层及其分离	(83)
4.8	局部水头损失	(85)
5	孔口、管嘴出流和有压管路	(94)
5.1	孔口出流	(94)
5.2	管嘴出流	(99)
5.3	短管出流	(102)
5.4	长管的水力计算	(107)
5.5	给水管网水力计算基础	(115)
5.6	有压管路中的水击	(118)
6	绕流运动	(132)
6.1	流体微团运动的分析	(132)
6.2	不可压缩流体连续性微分方程	(135)
6.3	流体运动微分方程(纳维-斯托克斯方程)	(135)
6.4	无旋流动	(136)
6.5	平面无旋流动	(138)
6.6	几种简单的平面无旋流动	(138)
6.7	势流叠加	(141)
6.8	绕流阻力和升力	(145)
7	明渠均匀流	(151)
7.1	明渠均匀流的形成条件和水力特征	(152)
7.2	明渠均匀流的计算公式	(153)
7.3	明渠水力最优断面和允许流速	(154)
7.4	明渠均匀流的水力计算	(157)
7.5	无压圆管均匀流的水力计算	(160)
7.6	复式断面渠道的水力计算	(163)
8	明渠非均匀流	(167)
8.1	断面比能和临界状态	(167)
8.2	明渠流的流动型态及其判别准则	(171)
8.3	明渠非均匀急变流	(173)
8.4	棱柱体平坡渠道上的完整水跃	(175)
8.5	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	(178)
8.6	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的分析	(179)
8.7	渠道底坡变化时水面曲线的连接	(186)
8.8	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	(188)

9 堰 流	(199)
9.1 堰流及其特征	(199)
9.2 堰流的基本方程	(200)
9.3 薄壁堰	(201)
9.4 实用堰	(205)
9.5 宽顶堰	(206)
9.6 小桥孔径的水力计算	(209)
10 因次分析和模型试验	(216)
10.1 因次分析——白金汉 π 理论	(216)
10.2 相似的基本概念	(222)
10.3 相似准则	(224)
10.4 重力和粘性力同时作用下的相似	(229)
11 渗 流	(235)
11.1 概 述	(235)
11.2 渗流的基本定律——达西定律	(236)
11.3 单 井	(241)
11.4 井 群	(245)
11.5 流 网	(248)
12 离心式水泵和风机	(255)
12.1 流体机械概述	(255)
12.2 离心式水泵和风机的的工作原理和基本构造	(258)
12.3 离心式水泵和风机的基本性能参数	(261)
12.4 离心式泵和风机的基本方程式	(265)
12.5 离心式泵和风机的性能曲线	(269)
12.6 离心式水泵和风机装置的工况	(273)
12.7 相似定律和相似准数	(276)
12.8 相似定律的应用	(280)
12.9 泵和风机的联合工作	(284)
12.10 离心泵吸水条件和汽蚀	(286)
12.11 泵和风机的选择	(289)
13 其他常用水泵及风机	(297)
13.1 轴流式泵和风机	(297)
13.2 往复式泵和压缩机	(300)
13.3 螺旋泵	(303)
13.4 贯流式风机	(305)

13.5 齿轮泵.....	(306)
13.6 射流泵.....	(308)
附录 A BA,BL 型离心泵及 SG 型管道泵性能	(312)
附录 B BL 型水泵性能表及水泵型号举例	(314)
附录 C IS 型单级离心泵	(315)
附录 D T4-72 型离心通风机	(316)
参考文献.....	(322)

1 绪 论

[内容提要] 本章是流体力学的开篇,概述有关流体力学的任务、发展简史、研究方法和流体的主要物理性质,重点阐述了流体固有的力学性质——粘性,这些基本知识是学习流体力学理论的基础。

1.1 流体力学的任务和发展简史

流体力学是力学的一个分支,主要研究流体的各种运动特性、在各种力的作用下流体的运动规律,以及流体与其他界面(固体壁面、不同密度的流体等)由于存在相对运动时的相互作用。

流体力学研究最多的流体是水和空气。它的主要基础是牛顿运动定律、质量守恒定律和能量守恒定律。从现代的认识角度看,流体力学是一门理论与实践相结合的经验性学科,它广泛应用于环境工程、市政建设、土木工程、交通运输、航空、水利等工程中。先修学科为高等数学、物理、理论力学和材料力学等。

一、流体力学的任务

流体力学的基本任务分以下三个层次:

1. 研究流体宏观机械运动的基本规律(包括静止状态);
2. 研究产生上述宏观机械运动的原因;
3. 研究流体与固体间、流体与流体间的相互作用。

二、流体力学发展简史

流体力学是在人类与自然界相处和生产实践中逐步发展起来的。对流体力学学科的形成做出卓越贡献的是古希腊哲学家阿基米德(《论浮体》,公元前 250 年),他建立了包括浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的基础。

17 世纪,经典力学奠基人牛顿(1686 年)研究了在流体中运动的物体所受到的阻力,得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系。他针对粘性流体运动时的内摩擦力提出了著名的牛顿粘性定律(牛顿内摩擦定律)。17 世纪初,帕斯卡(1601 年)阐明了静止流体中压强的概念。但流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学,却是随着经典力学建立了速度、加速度、力和流场等概念,以及质量、动量、能量三个守恒定律的奠定之后才逐步形成的。

18 世纪,瑞士的欧拉(1775 年)采用了连续介质的概念,把静力学中压强的概念推广到运动流体中,建立了以牛顿第二定律为基础的流体运动方程——欧拉方程,欧拉方程是用微分方法描述了理想流体(无粘流体)的运动与作用力之间的相互关系;伯努利(1738 年)从经典力学的能量守恒出发,研究供水管道中水的流动,精心地安排了实验并加以分析,得到了流体定常运动下的流速、压强、管道高程之间的关系——伯努利方程。伯努利方程是欧拉方程的积分形式。

欧拉方程和伯努利方程的建立,是流体力学作为一门独立学科的标志,从此开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。从 18 世纪起,法国拉格朗日对于无旋运动,德国赫尔姆霍兹对于涡旋运动作了不少研究。在上述的研究中,流体的粘性并不起重要作用,

即所考虑的均是理想流体。这种理论当然阐明不了流体运动中粘性的效应和现象。

19 世纪,工程师们为了解决许多工程问题,尤其是要解决带有流体粘性影响的问题。1822 年,纳维建立了粘性流体的基本运动方程;1845 年,斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程,并将其所涉及的宏观力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程(简称 N-S 方程),它是流体动力学的理论基础。上面说到的欧拉方程正是 N-S 方程在理想流体时的特例。N-S 方程是以牛顿第二定律和牛顿内摩擦定律为基础推导的,该方程只适合于层流运动的。

粘性流体的基本运动微分方程是非线性偏微分方程,其求解的困难性,加上雷诺(1883 年,雷诺实验)提出了紊流运动的概念,使流体运动规律的求解难以想象。

20 世纪,普朗特学派从 1904 年到 1921 年逐步将 N-S 方程作了简化,从推理、数学论证和实验测量等各个角度,建立了普朗特边界层理论,能实际计算简单情形下,边界层内流动状态和流体同固体间的粘性力。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算简单物体运动时遇到的摩擦阻力,使理想流体和粘性流体以普朗特边界层理论为纽带得到了统一。

到了 21 世纪,流体力学的发展至今还停留在原来的基础上,但是随着相关科学的发展,只要人类对科学的孜孜不倦的追求,沿着从理论到实践再理论再实践的科学研究路线,克服流体力学的难题将在 21 世纪得以完成。

1.2 连续介质假设和流体力学的研究方法

一、连续介质基本假设

流体力学研究对象是流体,从微观角度分析,流体是由大量的分子构成的,分子与分子间不是致密的,并存在空隙,用数学观点分析流体的物理量在空间上的分布是不连续的,加上分子的随机的热运动,也导致物理量在时间的坐标轴也是不连续的,这样无法用数学方法进行分析研究。然而,流体力学主要是研究流体的宏观运动规律,以宏观角度去分析,几乎观察不到分子间的空隙。比如,对于比水疏松得多的空气为例,在标准状态下,1mm³所含气体分子就有 10¹⁹ 个,分子间的间距从宏观角度来讲已是忽略不计了。因此,对于流体的宏观运动来说,我们可以把流体视为由无数质点组成的致密的连续体,并认为流体的各物理量的变化随时间和空间也是连续的。这种假设的连续体称为连续介质。

把流体视为连续介质,可应用高等数学中的连续函数来表达流体中各种物理量随空间、时间的变化关系。

二、流体力学的研究方法

在研究和解决流体力学问题时,通常选用理论分析、数值计算和实验分析三种方法。

1. 理论分析方法

理论分析方法是建立在一般的力学原理上,在连续介质的基本假设前提下,用数学分析方法将流体运动过程中的各种物理量先建立基本关系式(基本方程组),然后根据具体问题进行求解,并对其解进行分析。

由于流体的基本方程组(N-S 方程)是二阶非线性偏微分方程,对于一般问题是难以求解的,只有很少的流体力学问题才能求得完整的理论解。再加上实际流体运动中紊流运动存在,使方程组的封闭性、附加方程的复杂性,等等,更使方程组的理论解面临挑战。

2. 数值计算方法

随着计算机技术和数值计算方法的发展,产生了广泛应用于实际工程中的研究方法——数值计算方法。该方法就是通过数学近似解的方法,使理论解无法求得的问题能用近似的计算方法进行表达,使流体力学基本理论在实际工程中得到应用。数值计算方法一般包括有限基本解法、有限元法、有限差分法等。

3. 实验分析方法

流体力学问题如从基本运动方程的属性来分析,属于强非线性偏微分方程,加上紊流的存在,一般实际问题用理论方法是无法求得的,有时用数值计算方法也甚为困难,要解决问题的唯一方法就是实验方法。实验方法在流体力学中的重要性是不言而喻的,流体力学是一门经验性的学科,通过实验,即模型实验,来解决工程实际问题,同时,通过实验能充分了解流体运动的规律,使基本方程得以简化,如普朗特的边界层理论。

现代流体力学,在解决实际工程问题过程中,经常将上述三种方法同时应用,使工程实际问题得以较为完整的解决。

1.3 流体的主要物理性质

工程实际中的流体运动形式是多样化的,但无论流体运动状态如何变化,其影响的因素不外乎流体本身的物理性质和外界的作用力,流体的主要物理性质有惯性、粘性、压缩性、表面张力、汽化等。

一、惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质,质量是用来度量物体惯性大小的物理量,单位体积的质量称为密度,以符号 ρ 表示,在连续介质假设的前提下,对于均质流体其密度的定义为

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

式中, V 为体积, m 为质量,密度的单位是 kg/m^3 。

流体力学中常用到与密度相关的一个组合物理量即重度,其定义是单位体积的重量,以符号 γ 表示,如流体处在地球引力场中,重度与密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-2)$$

式中, g 为地球引力场的加速度。

液体的密度随温度和压强的变化很小,在一般的工程问题中可以忽略。而气体就不然。

二、粘性

1. 粘性的特征

图 1-1 所示两块平行平板,其间充满了静止流体,两板的间距 h ,以 y 方向为平板的法线方向。下平板保持静止,上平板沿所在平面以速度 U 匀速运动。于是“粘附”在上平板表面的一层流体,将随上平板一起运动,并一层一层地向下传递,传递过程中速度逐渐变小,直至下平板的流体层与下平板的速度保持一致即静止。

上平板运动带动粘附在板上的流体运动,而且能影响到内部各流层运动,这一性质表明各流体层之间存在着剪切力,这就是流体粘性的现象。

2. 牛顿内摩擦定律

粘性是流体运动固有的,是有别于固体的主要物理性质,固体在受到外力的作用下,通过

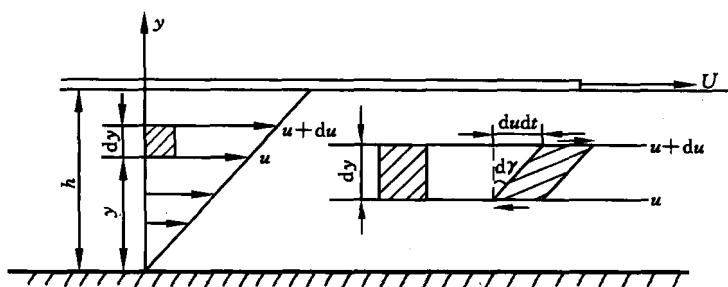


图 1-1 粘性现象

变形抵抗外力,由变形的形式分为正应变和切应变,对应的力为正应力和切应力或切向应力。而一般流体是无法通过变形来抵抗切向应力的,无论作用力多么微小,流体(牛顿流体)就不断地变形,但变形的快慢(变形率)与外界的作用力和流体的性质有关,这一流体的性质称为粘性,因此,流体是通过不断地变形(变形率)来抵抗外界的切向作用力的。

关于粘性牛顿有个著名的牛顿内摩擦定律,见图 1-1,拉动上平板保持匀速运动的切向力 T (流体的内摩擦力)与流体的接触面面积 A 和流层的速度梯度 $\left(\frac{du}{dy}\right)$ 成正比,这一比例常数反映流体克服外界切向力的物理属性称为粘性,式(1-3)所示。这一结论是牛顿 1686 年提出的,故称为牛顿内摩擦定律。

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-3(a))$$

有时也常用单位面积的切向力即切应力 τ 表示上述方程:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3(b))$$

牛顿内摩擦定律有别于固体的摩擦定律,固体摩擦力与接触面的压力有关,而流体的内摩擦力与压力无直接关系。流体的内摩擦力是存在于流体流层之间的作用力,所以,常称为内摩擦定律。当切向力一定时,粘性越大,变形速度越小,因此粘性也是反应流体流动性的一个因素。

式中 μ 称为流体动力粘性系数,单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,在分析粘性流体运动规律中,常用运动粘性系数 ν 表示,单位 m^2/s ,运动粘性系数 ν 为动力粘性系数 μ 与密度 ρ 的比。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

流体的粘性系数随压强变化的影响很小,随温度的变化如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1

水的粘性系数

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	μ $\times 10^{-3} \text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$	ν $\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	μ $\times 10^{-3} \text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$	ν $\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表 1-2

一个大气压下空气的粘性系数

温度 (°C)	μ $\times 10^{-3} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s})$	ν $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	温度 (°C)	μ $\times 10^{-3} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s})$	ν $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.028	42.8
80	0.021	21.7	300	0.0298	49.9

从表 1-1 中可看出,液体(水)的动力粘性系数随温度升高而减小,而气体则相反(表 1-2)。要从产生流体粘性的因素出发分析其原因,流体粘性既取决于分子间的引力,又取决于分子间的动量交换。因此,随着温度升高,分子间的引力减小,而分子间的动量交换加剧。而液体水分子间的距离很小,其粘性力主要取决于分子间的引力,空气分子间的距离远大于液体,分子的热运动即分子间的动量交换是形成粘性的主要因素。所以,液体与气体产生粘性力的主要原因不同,造成表中随温度变化其粘性截然相反的变化规律。

【例 1-1】 一底面积为 $45\text{cm} \times 40\text{cm}$, 高为 1cm 的木块, 质量为 5kg , 沿涂有润滑油的斜面向下作等速运动, 木块运动速度 $u=1\text{m/s}$, 油层厚度 1mm , 斜坡角 22.62° (图 1-2 示), 求油的粘度。

【解】 木块重量沿斜坡分力 F 与切力 T 平衡时, 等速下滑

$$mgsin\theta = T = \mu A \frac{du}{dy}$$

$$\mu = \frac{mgsin\theta}{A \frac{u}{\delta}} = \frac{5 \times 9.8 \times \sin 22.62^\circ}{0.4 \times 0.45 \times \frac{1}{0.001}}$$

$$\mu = 0.1047 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

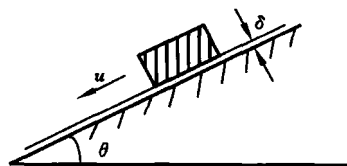


图 1-2 例题 1-1 图

【例 1-2】 在图中, 汽缸内壁的直径 $D=12\text{cm}$ 、活塞的直径 $d=11.96\text{cm}$, 活塞的长度 $l=14\text{cm}$, 活塞往复运动的速度为 $v=1\text{m/s}$, 润滑油的 $\mu=0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$, 试问作用在活塞上的粘性力为多少?

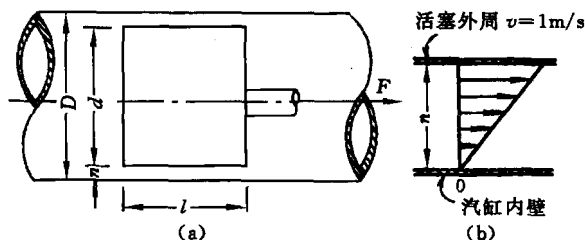


图 1-3 例题 1-2 图

【解】 因粘性的作用, 粘附在汽缸内壁的润滑油速度为零, 粘附在活塞外沿的润滑油与活塞的速度相同, 由于活塞与汽缸的间距很小, 润滑油的速度可近似认为是从零线性变化到 1m/s 。

由牛顿内摩擦定律(式 1-3)

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = \mu \pi dl \frac{v}{\frac{(D-d)}{2}}$$

$$T = 26.5 \text{ N}$$

三、压缩性与膨胀性

压缩性是指流体在压力的作用下,改变自身体积的特性。膨胀性是指由于温度的变化,流体改变自身体积的特性。

1. 压缩性

液体的压缩性用压缩系数表示,在一定温度下,液体原有的体积 V ,在压强增量 dp 作用下,体积改变了 dv

$$\text{则压缩系数} \quad \beta = -\frac{\frac{dv}{V}}{dp} \quad (1-5)$$

式中的负号是由于 $dp > 0, dv < 0$,为使压缩系数为正值而加负号的。

β 的单位是压强的倒数。

表 1-3 为水在 20°C ,不同工程大气压(at)下的压缩系数。

表 1-3 水的压缩系数

压强(at)	5	10	20	40	80
压缩系数 $\beta \times 10^{-9} (\text{Pa})$	0.515	0.505	0.495	0.480	0.460

表中可以看出,水的压缩系数是很小的(即很难被压缩),如压强增加约为 100 大气压,相对体积只有大约 0.5%的变化,所以,工程上一般可将液体视为不可压的。

2. 膨胀性

膨胀性又称热胀性,液体的膨胀性可用体积膨胀系数 α 来表示,在一定的压强下,液体原有的体积为 V ,当温度升高 dT 时,体积的变化量为 dv 则

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dv}{dT} \quad (1-6)$$

α 的单位是温度的倒数, $1/^\circ\text{C}$ 或 $1/^\circ\text{K}$ 。

水的体积膨胀系数 α 在常压下随温度的变化见表 1-4。

表 1-4 水的体积膨胀系数

温度($^\circ\text{C}$)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
膨胀系数 $\alpha \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	0.14	1.50	4.22	5.56	7.19

表 1-5 是水在标准大气压下,不同温度下的容重及密度变化。

表 1-5

水的容重及密度

温度 (°C)	容重 (kN/m ³)	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)	容重 (kN/m ³)	密度 (kg/m ³)
0	9.806	999.9	50	9.690	988.1
5	9.807	1000.0	60	9.645	983.2
10	9.805	999.7	70	9.590	977.8
20	9.790	998.2	80	9.529	971.8
30	9.755	995.7	90	9.467	965.3
40	9.731	992.2	100	9.399	958.4

3. 气体的压缩性和膨胀性

气体与液体不同,具有显著的压缩性和膨胀性。温度与压强的变化对气体的容重的影响很大。在一般情况下,气体密度、压强和温度三者之间的关系,服从完全气体状态方程式。即

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

式中 T ——气体的热力学温度(K)。

R ——气体常数。对于空气, $R=287$ 。

四、表面张力

由于分子间的吸引力,在液体的自由表面上能够承受极其微小的张力,这种张力称表面张力。表面张力不仅在液体与气体接触的周界面上发生,而且还会在液体与固体(水和玻璃,汞和玻璃等),或一种液体与一种液体(汞和水等)相接触的周界面上发生。

对于液体,表面张力在平面上并不产生附加压力,它只有在曲面上才产生附加压力,以维持平衡。

因此,在工程问题中,液体只要有曲面的存在就会有表面张力的附加压力作用。例如,液体中的气泡,气体中的液滴,液体的自由射流,液体表面和固体壁面相接触等。所有这些情况,都会出现曲面,也就会引起表面张力,从而产生附加压力。不过在一般情况下,这种影响是比较微弱的。

由于表面张力的作用,如果把两端开口的玻璃细管竖立在液体中,液体就会在细管中上升或下降 h 高度,如图 1-4 及图 1-5 所示。这种现象称为毛细管现象。上升或下降取决于液体和固体的性质。

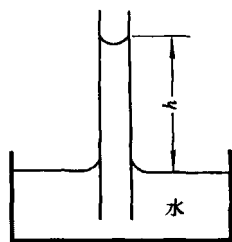


图 1-4 水在玻璃管表面张力

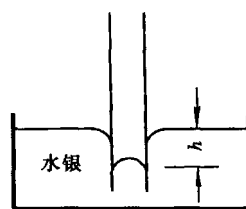


图 1-5 水银在玻璃管表面张力

如果把玻璃细管竖立在水中,如图 1-4。当水温为 20°C 时,则水在管中的上升高度为

$$h = \frac{15}{r} \quad (1-8)$$

如果把玻璃细管竖立在水银中,如图 1-5。当水银温度为 20℃时,则水银在管中的下降高度为

$$h = \frac{5.07}{r} \quad (1-9)$$

在式(1-8)及式(1-9)中, h 及 r 均以 mm 计。可见,当管径很小时, h 就可以很大。所以,用来测定压强的玻璃细管直径不能太小,否则,会产生很大的误差。

表面张力的影响在一般工程实际中是被忽略的。但在水滴和气泡的形成、液体的雾化、汽液两相流的传热与传质的研究中,将是重要的不可忽略的因素。

五、气蚀

物质有固态、液态和气态之分,在一定的外部条件下,这三种状态是可以相互转换的。如水加热产生蒸汽;气体降温、加压也可以液化。

决定物质状态的因素是分子的热运动和分子的内聚力,以及外界因素。一般而言,加热、减压会使分子热运动加剧,同时减小分子内聚力;而降温、加压的作用则相反。因此,温度和压强是促使物态变化的两个主要的外部因素。比如,水在一个大气压的作用下,其沸点为 100℃;在高原地区,水的沸点小于 100℃。当液体沸腾或汽化时的压强称为汽化压强 P_v 。显然,液体的汽化压强与温度有关。表 1-6 给出水在不同温度下的汽化压强。

表 1-6 水在不同温度下的汽化压强

温度 $T(^{\circ}\text{C})$	汽化压强 $P_v(\text{kN/m}^2)$	温度 $T(^{\circ}\text{C})$	汽化压强 $P_v(\text{kN/m}^2)$
0	0.61	50	12.33
5	0.87	60	19.92
10	1.23	70	31.16
20	2.34	80	47.34
30	4.24	90	70.10
40	7.38	100	101.33

液体在流动过程中,当液体与固体的接触面处于低压区,并低于汽化压强时,液体产生汽化,在固体的表面产生很多气泡,若气泡随液体的流动进入高压区,气泡中的气体便液化,这时,液化过程中的液体将冲击固体表面。如这种运动是周期的,将对固体表面产生疲劳并导致剥落,这种现象称为气蚀。在工程应用必须避免气蚀。

1.4 作用在液体上的力

一、表面力

表面力是通过直接接触,施加在接触面上的力,它正比于接触面面积,通常用单位面积上所受的力表示应力。表面力可分解成与表面垂直的法向分量和平行于表面的切向分量。

设 M 为隔离体表面上的一点,见图 1-6 包含 M 点取微元面积 ΔA ,若作用在微元上的力为 ΔF ,将其分解为法向分力 ΔP 和切向分力 ΔT ,则 $\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 为 ΔA 上的平均正应力,由于液体只能受压力而不能承受拉力,因此,法向应力为压应力。

取极限 $p_M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 为 M 点的压应力即压强。

同理 $\tau_M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A}$ 为 M 点的切向应力。

应力的单位是 N/m^2 , 简称帕斯卡或帕, 以符号 Pa 表示。

二、质量力

作用在隔离体内每个流体质点上的力称为质量力。质量力正比于隔离体的质量, 通常用单位质量的质量力来表示。重力和惯性力是最常见质量力。

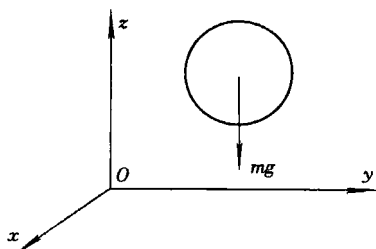


图 1-7 质量力

设均质液体中隔离体 V 的质量为 Δm , 所受的质量力为 ΔF , 则单位质量的质量力为 F , 简称质量力, 则

$$F = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta m}$$

质量力在直角坐标系中各坐标轴上的分量分别为 X , Y 和 Z 。若作用在液体上的质量力只有重力, 如图 1-7 所示, 则

$$X=0, Y=0, Z=-g$$

质量力的单位为 m/s^2 , 与加速度单位相同。

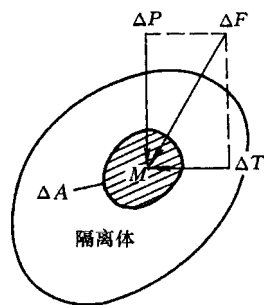


图 1-6 表面力

1.5 流体力学中的力学模型

客观上存在的实际流动、物质结构和物理性质是非常复杂的。如果考虑所有因素, 将很难导出它的力学关系式。为此, 我们在分析考虑流体力学问题中, 根据抓主要矛盾的观点, 建立各种力学模型, 对流体加以科学的抽象, 以便于列出流体运动规律的数学方程式。这种研究问题的方法, 在固体力学中也常采用。例如, 刚体、弹性体, 等等。所以, 力学模型的概念具有普遍意义。下面介绍几个主要的流体力学模型:

(1) 无粘性流体(理想流体)。一切流体都具有粘性, 提出理想流体是对液体物理性质的简化。因为在某些问题中, 粘性不起作用或主要作用。这种不考虑粘性作用的流体称为理想流体。

(2) 不可压缩液体。这是不计压缩性和膨胀性对流体物理性质的简化。液体的压缩性和膨胀性均很小, 密度可视为常数, 通常用不可压缩模型。气体在大多数情况下, 也可采用不可压缩模型。只有在某些情况下, 比如, 气流速度很大, 接近或超过音速, 或者在流动过程中其密度变化很大, 这时, 必须用可压缩模型来处理。本课程主要讨论的是不可压缩流体。

(3) 牛顿流体和非牛顿流体。牛顿的内摩擦定律只适用于一般流体, 它对某些特殊流体是不适用的。为此, 将满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。如水和空气等称为牛顿流体。而将不满足牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。如水泥、高分子溶液等。本书仅限于研究牛顿流体。

上述是流体力学中的主要力学模型, 以后在具体问题的分析中, 还会提出一些力学或运动模型。