



附：水力学自学考试大纲

水力学

组编/全国高等教育自学考试指导委员会
主编/刘鹤年

全国高等教育自学考试指定教材

建筑工程专业 (独立本科段)

武汉大学山

全国高等教育自学考试指定教材
建筑工程专业(独立本科段)

水 力 学

(附:水力学自学考试大纲)

全国高等教育自学考试指导委员会 组编
主编 刘鹤年

武汉大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学/全国高等教育自学考试指导委员会组编;刘鹤年主编. - 武汉:武汉大学出版社,2001.2

全国高等教育自学考试指定教材,建筑工程专业(独立本科段). 附:水力学自学考试大纲

ISBN 7-307-03080-2

I. 水… II. ①全… ②刘… III. 水力学-高等教育-自学考试-教材
IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000)第 55956 号

责任编辑:史新奎 责任校对:刘凤霞 版式设计:支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:epd@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:北京友谊印刷有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:17.50 插页:1

版次:2001年2月第1版 2004年2月第3次印刷

字数:428千字 印数:10001-11000

ISBN 7-307-03080-2/TV·3 定价:23.00元

版权所有,不得翻印;所购教材,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地教材供应部门联系调换。

组 编 前 言

当您开始阅读本书时,人类已经迈入了 21 世纪。

这是一个变幻难测的世纪,这是一个催人奋进的时代,科学技术飞速发展,知识更替日新月异。希望、困惑、机遇、挑战,随时随地都有可能出现在每一个社会成员的生活之中。抓住机遇,寻求发展,迎接挑战,适应变化的制胜法宝就是学习——依靠自己学习,终生学习。

作为我国高等教育组成部分的自学考试,其职责就是在高等教育这个水平上倡导自学、鼓励自学、帮助自学、推动自学,为每一个自学者铺就成才之路。组织编写供读者学习的教材就是履行这个职责的重要环节。毫无疑问,这种教材应当适合自学,应当有利于学习者掌握、了解新知识、新信息,有利于学习者增强创新意识,培养实践能力,形成自学能力,也有利于学习者学以致用,解决实际工作中所遇到的问题。具有如此特点的书,我们虽然沿用了“教材”这个概念,但它与那种仅供教师讲、学生听,教师不讲、学生不懂,以“教”为中心的教科书相比,已经在内容安排、编写体例、行文风格等方面都大不相同了。希望读者对此有所了解,以便从一开始就树立起依靠自己学习的坚定信念,不断探索适合自己的学习方法,充分利用已有的知识基础和实际工作经验,最大限度地发挥自己的潜能,以达到学习的目标。

欢迎读者提出意见和建议。

全国高等教育自学考试指导委员会

2000 年 10 月

编 者 的 话

本书是根据全国高等教育自学考试指导委员会土建类专业委员会审订的高等教育自学考试建筑工程专业《水力学自学考试大纲》编写的自学考试教材,也可作为全国注册结构工程师基础考试流体力学备考用书,本科土木工程专业流体力学教学参考书。

为便于自学,本书各章均有要点提示和本章小结。全书文字叙述力求简明扼要,注意化解自学中的难点问题,减小坡度,循序渐进,同时增加了例题和习题的类型。

本书由清华大学李玉柱教授主审,大连理工大学崔莉教授、张廷芳教授参审,他们提出了许多宝贵的修改意见。在本书的编写过程中,得到全国高等教育自学考试指导委员会土建类专业委员会和哈尔滨建筑大学建筑工程学院的指导和帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

由于个人水平所限,工作不够周详,难免有疏漏不妥之处,恳请自考生和广大读者批评指正。

编 者

2000.4. 于哈建大

目 录

第一章 绪论	1
第一节 水力学及其任务	1
第二节 作用在流体上的力	3
第三节 流体的主要物理性质	4
第四节 牛顿流体和非牛顿流体	10
本章小结	12
复习思考题	12
习题	12
第二章 流体静力学	16
第一节 静止流体中应力的特性	16
第二节 流体平衡微分方程	17
第三节 重力作用下液体静压强的分布	19
第四节 测量压强的仪器	24
第五节 作用在平面上的静水总压力	28
第六节 作用在曲面上的静水总压力	32
本章小结	36
复习思考题	36
习题	37
第三章 流体动力学基础	44
第一节 流体运动的描述	44
第二节 欧拉法的基本概念	47
第三节 连续性方程	54
第四节 流体的运动微分方程	57
第五节 元流的伯努利方程	60
第六节 总流的伯努利方程	63
第七节 总流的动量方程	73
本章小结	77
复习思考题	77
习题	78

第四章 流动阻力和水头损失 83

第一节 流动阻力和水头损失的分类 83

第二节 粘性流体的两种流态 84

第三节 沿程水头损失与切应力的关系 87

第四节 圆管中的层流 89

第五节 紊流运动 91

第六节 紊流的沿程水头损失 96

第七节 局部水头损失 106

第八节 边界层概念与绕流阻力 112

本章小结 119

复习思考题 119

习题 120

第五章 孔口、管嘴出流和有压管流 125

第一节 孔口出流 125

第二节 管嘴出流 128

第三节 有压管流 130

第四节 有压管道中的水击 138

第五节 离心泵的原理和选用 143

本章小结 147

复习思考题 147

习题 148

第六章 明渠流动 153

第一节 概述 153

第二节 明渠均匀流 155

第三节 无压圆管均匀流 161

第四节 明渠流动状态 165

第五节 水跃和水跌 171

第六节 棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析 176

第七节 明渠非均匀渐变流水面曲线的计算 183

本章小结 185

复习思考题 187

习题 187

第七章 堰流 190

第一节 堰流及其特征 190

第二节 宽顶堰溢流 192

第三节 薄壁堰和实用堰溢流	195
本章小结	198
复习思考题	198
习题	199
第八章 渗流	200
第一节 概述	200
第二节 渗流的阻力定律	201
第三节 井和井群	204
本章小结	208
复习思考题	208
习题	208
第九章 量纲分析和相似原理	210
第一节 量纲和谐原理	210
第二节 量纲分析法	212
第三节 相似理论基础	217
第四节 模型实验	220
本章小结	223
复习思考题	224
习题	224
习题答案	228
主要参考文献	232
附录 水力学自学考试大纲	233

第一章 绪 论

【要点提示】 本章是水力学的开篇，概述有关水力学研究对象和研究方法的一些基本概念，主要是流体的流动性，连续介质模型，作用在流体上的力，以及流体的主要物理性质。这些基本概念是建立水力学理论的基础。

第一节 水力学及其任务

开卷研读，初学者首先会想到水力学是怎样一门课程，从事建筑工程的科技工作者为什么要学习水力学？这正是本节要说明的问题。

一、水力学的研究对象

水力学是研究液体机械运动规律及其应用的科学。这个简单的定义，概括了三个涵义。

第一，水力学的研究对象是液体。自然界的物质有固体、液体和气体，液体和气体合称流体。流体的基本特征是具有流动性。我们所观察到的流动现象，诸如微风吹过平静的池水，水面因受气流的摩擦力（沿水面作用的切力）而流动；斜坡上的水因受重力沿坡面方向的切向分力而往下流淌等等，都表明，流体在静止时不能承受切力，或者说，任何微小的切力作用，都使流体运动，只要切力存在，运动就持续进行，这就是流动性的力学解释。此外，流体无论静止或运动都几乎不能承受拉力。

固体能承受一定大小的拉力、压力和切力。当外力作用在固体上时，固体将产生一定程度的相应变形。外力保持不变，变形就不会变化。

水力学的研究对象是以水为代表的液体，但基本原理也适用于可以忽略压缩性影响的气体。

第二，水力学研究的内容是流体做机械运动的规律。流体的机械运动遵循物质机械运动的普遍规律，包括牛顿运动定律、能量转换和守恒定律、动量原理等，并以这些普遍规律作为建立水力学理论的理论基础。

第三，水力学研究的目的在于应用。水力学作为力学的一个分支，是基础科学，同时也是与工农业生产密切相关的应用科学。现代水力学广泛应用于土建、水利、环境、机械、采矿、冶金、化学、石油等各工程领域，为工程设计和运行控制提供科学依据。

二、连续介质模型

水力学研究的对象是液体，从微观角度来看，液体是由大量的分子构成的，这些分子都在做无规则的热运动。由于分子之间存在空隙，描述液体的物理量（如各点的密度、压强和

速度等)在空间的分布是不连续的。同时,由于分子的随机运动,导致空间任一点上液体物理量在时间上的变化也是不连续的。可以想见,以分子为对象来研究液体的运动,是极为困难的。

现代物理学的研究得出,在常温下 1cm^3 的水中约有 3.3×10^{22} 个水分子,分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$,可见分子间距离之微小。即使在很小的体积中,也含有大量的分子,足以得到与分子数目无关的各项统计平均特性。

水力学研究液体宏观机械运动的规律,也就是大量分子统计平均的规律性。1755 年瑞士数学家和力学家欧拉(Euler, L 1707—1783)首先提出把流体当作是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体来研究,这就是连续介质模型。这里所说的质点,是指大小同一切流动空间相比微不足道,又含有大量分子,具有一定质量的流体微元。建立连续介质模型,是为摆脱分子运动的复杂性,对流体物质结构的简化。按连续介质模型,流体运动中的物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数。这样就能用数学分析方法来研究流体运动。

连续介质模型对于学过固体力学的读者并不陌生,在材料力学和弹塑性力学中,都是把受力构件当作连续介质来研究应力和变形的规律,可以说连续介质模型是固体和流体力学许多分支学科共同的理论基础。

三、水力学研究方法

水力学研究方法大体上有理论、数值和实验三种。

理论方法是通过对液体物理性质和流动特性的科学抽象(近似),提出合理的理论模型。对这样的理论模型,根据机械运动的普遍规律,建立控制液体运动的闭合方程组,将原来的具体流动问题转化为数学问题,在相应的边界条件和初始条件下求解。理论研究方法的关键在于提出理论模型,并能运用数学方法求出理论结果,达到揭示液体运动规律的目的。但由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。

数值方法是在计算机应用的基础上,采用各种离散化方法(有限差分法、有限元法等),建立各种数值模型,通过计算机进行数值计算和数值实验,得到在时间和空间上许多数字组成的集合体,最终获得定量描述流场的数值解。近二三十年来,这一方法得到很大发展,已形成专门学科——计算流体力学。

实验方法是通过对具体流动的观察与测量来认识流动的规律。理论上的分析结果需要经过实验验证,实验又须用理论来指导。水力学的实验研究包括原型观测和模型实验,而以模型实验为主。

上述三种方法互相结合,为发展水力学理论,解决复杂的工程技术问题奠定了基础。

四、水力学与土木工程

人类为生存和繁衍,自古有防洪患、开河渠的悠久历史。在中国古代的典籍中,就有相传上古时期大禹治水,“疏壅导滞”,使滔滔洪水各归于河的记载。在以后的年代,如先秦时期(公元前 256~公元前 251 年)在四川岷江中游建都江堰,自此川西“水旱从人,时无饥馑,永无凶年”。隋自文帝始历二世(公元 587~610 年)完成南北大运河,“自是天下利于转输”,“运漕商旅,往来不绝”。又如现存于世的古桥,皆因“顺应水性”,跨江河逾千年而不毁,其中隋朝工匠李春在冀中洺河上建造(公元 605~617 年)的赵州石拱桥,它的跨径达 37.4m,

拱背上还有 4 个小拱，既减轻了主拱的负载，又可渲泄洪水，迄今 1380 余年依然完好。这些名垂千古的伟大工程，是人类文明史上的光辉实绩。

水力学成为一门独立的科学是在 17 世纪末至 18 世纪中叶。这个时代，作为近代自然科学基础的经典力学已相当成熟，为水力学的建立奠定了理论基础。资本主义工商业的崛起，航海、造船、水利以及城市建设等新兴产业的需要，是水力学建立和发展的推动力。

水力学广泛用于土木工程各个领域，例如在建筑工程和交通土建工程中，基坑排水、地基抗渗稳定处理、围堰修建、桥渡设计等等都有赖于水力计算方能确定；在给水处理工程中，无论取水、水处理、输配水都是在水流动过程中实现的，水力学理论是给水处理系统设计和运行控制的理论基础；在建筑环境与设备工程中，供热、通风与空调设计，以及设备的选用，都离不开水力学（流体力学）。

水力学不仅用于解决某项土木工程中的水和气的问题，更能帮助工程技术人员进一步认识土木工程与大气和水环境的关系。大气和水环境对建筑物和构筑物的作用是长期的，多方面的，其中台风、洪水通过直接摧毁房屋、桥梁、堤坝造成巨大的自然灾害。另一方面，兴建大型厂矿、公路和铁路、桥梁和隧道、江海堤防、水坝等也会对大气和水环境造成不利影响，导致生态环境恶化，甚至加重灾害。只有处理好土木工程与大气和水环境的关系，做到减轻灾害，保护环境，才能实现国民经济的可持续发展。

第二节 作用在流体上的力

力是物体机械运动状态发生变化的原因。因此，研究流体机械运动的规律，就要从分析作用在流体上的力入手。作用在流体上的力，按作用方式的不同，分为两类。

一、表面力

表面力是通过直接接触，施加在接触表面上的力。

在运动的流体内取隔离体为研究对象（图 1-1），周围流体对隔离体的作用，以分布的表面力代替。表面力在隔离体表面某一点的集中程度（集度）用应力来表示。

设 A 为隔离体表面上的一点，包含 A 点取微小面积 ΔA ，若作用在 ΔA 上的总表面力为 ΔF_s ，将其分解为法向分力（压力） ΔP 和切向分力 ΔT ，则

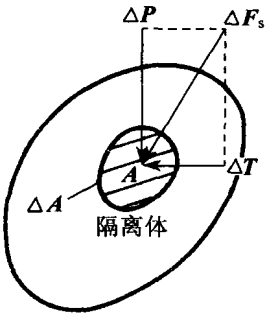


图 1-1 表面力

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

为 ΔA 上的平均压应力；

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A}$$

为 ΔA 上的平均切应力。

使微小面积 ΔA 无限缩小至 A 点，即

$$p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

为 A 点的压应力，习惯上称为 A 点的压强；

$$\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A}$$

为 A 点的切应力。

应力的单位是帕斯卡 (Pascal, 法国科学家 1623~1662), 简称帕, 以符号 Pa 表示, $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。

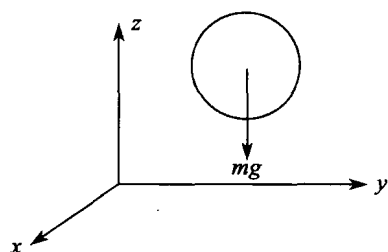
二、质量力

质量力是以隔距离作用, 施加在每个质点上的力。重力是最常见的质量力。除此之外, 在运用达朗伯原理 (动静法) 求解动力学问题中, 假想加在质点上的惯性力也归为质量力。

质量力的大小用单位质量力表示。设均质流体的质量为 m , 所受质量力为 $\mathbf{F}_B$, 则单位质量力为

$$\mathbf{f}_B = \frac{\mathbf{F}_B}{m} \quad (1-1)$$

若 $\mathbf{F}_B$ 在每个坐标轴上的分力为 F_{Bx} 、 F_{By} 、 F_{Bz} , 则单位质量力 $\mathbf{f}_B$ 在 3 个坐标轴上的分量为



$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{F_{Bx}}{m} \\ Y &= \frac{F_{By}}{m} \\ Z &= \frac{F_{Bz}}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

用矢量表示

$$\mathbf{f}_B = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k}$$

图 1-2 重力

式中: $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别为 x 、 y 、 z 轴方向的单位矢量。

如作用在流体上的质量力只有重力 (图 1-2), 则单位质量力的 3 个分量为 $X=0$, $Y=0$, $Z = \frac{-mg}{m} = -g$, 负号表示重力方向与 z 轴的方向相反。

单位质量力的单位为 m/s^2 , 与加速度的单位相同。

第三节 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素。同流体运动有关的主要物理性质是惯性、粘性和压缩性。

一、惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质, 改变物体的运动状态, 都必须克服惯性的作用。表示惯性大小的物理量是质量, 质量愈大, 惯性愈大, 运动状态愈难于改变。

单位体积的质量称为密度, 以符号 ρ 表示。对于均质流体, 如体积为 V , 质量为 m , 则

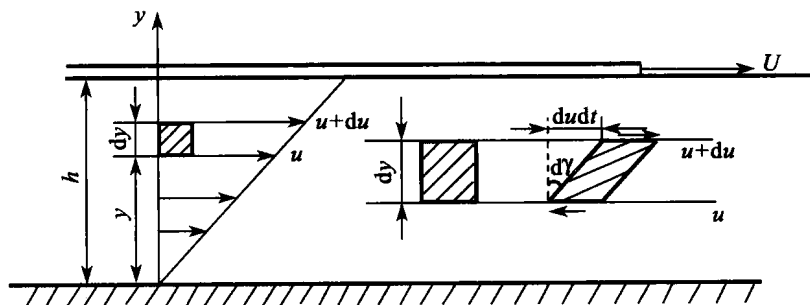
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

密度的单位是 kg/m^3 。

气体的密度随压强和温度变化，一个标准大气压条件下，0℃空气的密度为1.29kg/m³。在一个标准大气压条件下，水的密度见表1-1，几种常见流体的密度见表1-2。

温度 C	0	4	10	20	30
密度 (kg/m³)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
温度 (C)	40	50	60	80	100
密度 (kg/m³)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

流体名称	空 气	酒 精	四氯化碳	水 银	汽 油	海 水
温度 (℃)	20	20	20	20	15	15
密度 (kg/m ³)	1.20	799	1590	13550	700~750	1020~1030



在相对运动的流层间，内摩擦力总是成对出现的。速度较快的流层带动较慢的流层，施加在较慢流层上的切力与流速方向一致。速度较慢的流层阻滞较快的流层，施加较快流层上的切力与流速方向相反。

粘性是流体在运动过程中出现阻力，产生机械能损失的根源。粘性的存在也给流体运动规律的分析带来很多困难，它是对流体运动有重要影响的固有属性。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿 (Newton, I) 1687 年在所著《自然哲学的数学原理》中提出，并经后人验证，流体的内摩擦力（切力） T 与流速梯度 $\frac{U}{h} = \frac{du}{dy}$ 成比例，与流层的接触面积 A 成比例，与流体的性质有关，与接触面上的压力无关。即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

以应力表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

式 (1-4) 或式 (1-5) 称为牛顿内摩擦定律。

式中： $\frac{du}{dy}$ 为流速在流层法线方向的变化率，称为速度梯度。

为进一步说明该项的物理意义，在厚度为 dy 的上、下两流层间取矩形流体微团，这里微团就是质点，只是在考虑尺度效应（旋转、变形）时，习惯上称为微团（图 1-3）。因上、下流层的流速相差 du ，经 dt 时间，微团除位移外，还有剪切变形 $d\gamma$ ：

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{du dt}{dy}$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt}$$

可知速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 实为流体微团的剪切变形速度。牛顿内摩擦定律也可表示为

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-6)$$

即流体因粘性产生的内摩擦力与微团的剪切变形速度（剪切变形速率）成正比。当切应力一定时，粘性越大，剪切变形速度越小，所以粘性又可定义是流体抵抗剪切变形速度的特性。

μ 是比例系数，称为〔动力〕粘度，简称粘度，单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。〔动力〕粘度是流体粘性大小的度量， μ 值越大，流体越粘，流动性越差。气体的粘度不受压强影响，液体的粘度受压强影响很小。粘度随温度而变化，不同温度的水和空气的粘度见表 1-3、表 1-4。

在分析粘性流体运动规律时，粘度 μ 和密度 ρ 经常以比的形式出现，将其定义为流体的运动粘度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

运动粘度的单位为 m^2/s 。

由表 1-3 及表 1-4 可见，液体的粘度随温度升高而减小，气体的粘度却随温度升高而增大。其原因是液体分子间的距离很小，分子间的引力即内聚力是形成粘性的主要因素，温度升高，分子间距离增大，内聚力减小，粘度随之减小；气体分子间距离远大于液体，分子热运动引起的动量交换是形成粘性的主要因素，温度升高，分子热运动加剧，动量交换加大，粘

度随之增大。

表 1-3 不同温度下水的粘度

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

表 1-4 不同温度下空气的粘度

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9

3. 理想流体

实际的流体，无论是液体还是气体，都是有粘性的。粘性的存在，往往给流体运动规律的研究带来极大困难。为了简化理论分析，特引入理想流体的概念。所谓理想流体，是指无粘性，即 $\mu=0$ 的流体。理想流体实际上是不存在的，它只是一种对物理性质进行简化的力学模型。

由于理想流体不考虑粘性，使得对流动的分析大为简化，易于得出理论分析的结果。这样得到的结果，对某些粘性影响很小的流动，能够较好地符合实际；对粘性影响不能忽略的流动，则可通过实验加以修正，从而能够比较容易地解决许多实际流动问题，这是处理粘性流体运动问题的一种有效的方法。

【例 1-1】 一平板在油面上做水平运动（图 1-4），已知平板的运动速度为 40cm/s，油层厚度为 5mm，油的〔动力〕粘度 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。求作用在平板单位面积上的粘性阻力。

【解】 直接与平板接触的油层粘附在平板上，随平板一起运动。下面与之相邻的油层作用在该层上的切应力（方向与平板运动方向相反），等于作用在平板单位面积上的粘性阻力。

由牛顿内摩擦定律, 有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

因为油层内流速按直线分布 $\frac{du}{dy} = \frac{U}{\delta}$, 故

$$\tau = \mu \frac{U}{\delta} = 0.1 \times \frac{40}{0.5} = 8 \text{ N/m}^2$$

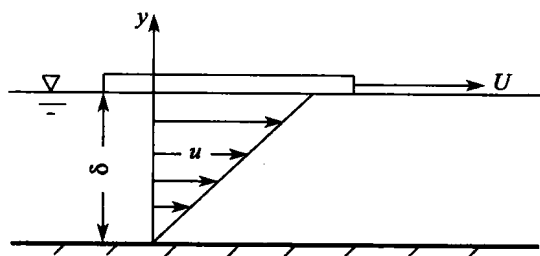


图 1-4 油面平板运动

【例 1-2】 旋转圆筒粘度计, 外筒固定, 内筒由同步电机带动旋转。内外筒间充入实验液体 (图 1-5)。已知内筒半径 $r_1 = 1.93\text{cm}$, 外筒半径 $r_2 = 2\text{cm}$, 内筒高 $h = 7\text{cm}$, 实验测得内筒转速 $n = 10\text{r/min}$, 转轴上扭矩 $M = 0.0045\text{N} \cdot \text{m}$ 。试求该实验液体的粘度。

【解】 充入内外筒间隙的实验液体, 在内筒带动下作圆周运动。因间隙很小, 速度近似直线分布。不计内筒端面的影响, 内筒壁的切应力

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1}{\delta}$$

式中: 内筒的旋转角速度 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$

$$\text{扭矩} \quad M = \tau \cdot 2\pi r_1 \cdot h \cdot r_1 = \frac{\mu \omega 2\pi r_1^3 h}{\delta}$$

$$\text{粘度} \quad \mu = \frac{M\delta}{2\pi \omega r_1^3 h} = 0.952 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

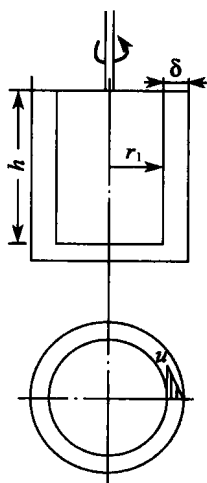


图 1-5 旋转圆筒粘度计

三、压缩性和膨胀性

压缩性是流体受压, 分子间距离减小, 体积缩小的性质。膨胀性是流体受热, 分子间距离增大, 体积膨胀的性质。

液体和气体虽然都是流体, 但它们的压缩性和膨胀性大不一样, 下面分别说明。

1. 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性通常用压缩系数表示。压缩系数的定义是: 增加单位压强, 液体体积的相对减小值。设液体的体积为 V , 压强增加 $d\rho$ 后, 体积减小 dV , 压缩系数为

$$\kappa = - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\rho} \quad (1-8)$$

由于液体受压体积减小, $d\rho$ 和 dV 异号, 式中右侧加负号, 以使 κ 为正值, 其值愈大, 液体愈易压缩。 κ 的单位是 m^2/N 。

因为液体压缩前后质量保持一定, 只有密度发生变化。所以

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

得到

$$- \frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

压缩系数也可写为

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\rho} \quad (1-9)$$

压缩系数的倒数是体积模量，即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-10)$$

K 的单位是 N/m^2 。

液体的压缩系数随温度和压强而变化。水在 0°C ，不同压强下的压缩系数见表 1-5。表中符号 at 表示工程大气压， $1\text{at} = 98000\text{N/m}^2$ 。

表 1-5 水的压缩系数

压强 (at)	5	10	20	40	80
$k \times 10^9 \text{ (m}^2/\text{N)}$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

液体的膨胀性用体膨胀系数表示。体膨胀系数的定义是：在一定压强下，单位温升，液体体积的相对增加值。设液体体积为 V ，温度升高 dT 后，体积增加 dV ，体膨胀系数为

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-11)$$

α_v 值愈大，液体愈易热胀。 α_v 的单位是温度的倒数 $1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$ 。

液体的膨胀系数随压强和温度而变化。水在 1 标准大气压下，不同温度时的膨胀系数见表 1-6。

表 1-6 水的膨胀系数

温度 ($^\circ\text{C}$)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
$\alpha_v \times 10^4 \text{ (1/}^\circ\text{C)}$	0.14	0.15	0.42	0.55	0.72

从表 1-5 和表 1-6 可以看出，水的压缩性和膨胀性都很小。压强增加 1 个大气压，体积压缩率约为 $1/20000$ 。在常温 ($10 \sim 20^\circ\text{C}$) 下，温度升高 1°C ，体积膨胀率约为 $1.5/100000$ 。所以一般情况下，水的压缩性和膨胀性均可忽略不计。对于某些特殊的流动现象，如有压管流的水击、水中爆炸波的传播等，压缩性起着关键作用，必须考虑水的压缩性；在液压封闭系统或热水采暖系统中，当工作温度变化较大时，则须考虑水体积膨胀对系统造成的影响。

2. 气体的压缩性和膨胀性

气体和液体不同，具有显著的压缩性和膨胀性。也就是说，气体的密度随压强和温度发生较为显著的变化。在一般常温常压下，常用气体（如空气、氮、氧、二氧化碳等）的密度、压强和温度三者之间的关系，相当符合理想气体状态方程，即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-12)$$

式中： p 为气体的绝对压强 (N/m^2)； ρ 为气体的密度 (kg/m^3)； T 为气体的热力学温度 (K)； R 为气体常数， $R = \frac{8314}{M} \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$ ， M 为气体的分子量。空气的气体常数为 $287\text{J/kg} \cdot \text{K}$ 。

当气体处于很高的压强、很低的温度，或接近于液态时，就不能当作理想气体，(1-12)式