

中等专业学校教学用书

水力学及水力机械

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

水力学及水力机械

长沙冶金工业学校 黄自圃 编

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书
水力学及水力机械
长沙冶金工业学校 黄白雁 编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 11 3/4 字数 274 千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷

印数00,001~3,000册

统一书号: 15062·3978 定价0.97元

前 言

本书系根据一九七八年冶金中等专业学校教材工作会议制订的矿山机械专业教学计划和“水力学及水力机械”教学大纲编写的教学用书。

本书共分三章。第一章是水力学基本原理，包括水静力学，流体运动特性及柏努里方程，粘性流体运动的水力损失，以及圆形有压管路的水力计算。第二章是矿用涡轮机的理论基础，包括涡轮机的主要结构及工作原理，运转理论及其相似原理与应用，其中亦简要地介绍了涡轮机运转稳定性的物理概念。第三章是矿山水泵及通风机，包括离心式水泵设备与通风机设备运转中的主要问题及其选择计算，其中亦介绍了水泵轴向推力的平衡及其气蚀现象的消除方法，排水设备的自动化原则，涡轮机的调整与联合工作，它们常见的故障分析与处理，以及矿山环境保护等方面的必需知识。本书由长沙冶金工业学校黄自圃编写。

本书除可作为中等专业学校矿山机械专业的教学用书外，也可供现场生产技术人员参考。

由于编写时间仓促，加之编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，希望读者批评指正。

编 者

1981年10月

目 录

第一章 水力学基本原理	1
第一节 流体及其作用力的性质	1
一、流体的概念及其理想结构	1
二、流体的主要物理性质	1
三、流体作用力的性质分析	7
第二节 水静压力及其分布规律	8
一、水静压力及其特性	8
二、绝对静止液体的压力分布规律	11
三、相对静止液体的压力分布规律	13
四、压力的表示法及其测量——以绝对静止液体的水静压力分布规律为依据	16
第三节 流体运动及其特性	25
一、流体运动的几个基本概念	25
二、流体运动的连续性方程	27
第四节 柏努里方程	29
一、理想流体微流束绝对运动的柏努里方程	29
二、理想流体微流束相对运动的柏努里方程	31
三、实际流体微流束绝对运动的柏努里方程及其意义	33
四、实际总流绝对运动的柏努里方程	35
五、总流绝对运动柏努里方程的应用与举例	39
第五节 粘性流体运动及其水头损失	46
一、过水断面上影响流动阻力的主要因素——水力半径及其概念	46
二、流体流动阻力与速度的关系	47
三、沿程阻力的理论分析及其水头损失的计算	51
四、粘性流体在圆管中的均匀紊流运动	54
五、粘性流体非均匀流动及局部水力损失的计算	60
六、沿程阻力损失与局部阻力损失的迭加	65
第六节 圆形有压管路的水力计算	66
一、短管的水力计算	66
二、长管水力计算的概念	72
第二章 矿用涡轮机的理论基础	76
第一节 涡轮机的工作原理及其基本工作参数	76
一、涡轮机的工作原理	76
二、表明涡轮机工作状况的基本参数	78
第二节 矿山涡轮机的理论压头或压力及理论流量	79
一、离心式涡轮机的理论压头或压力及其基本方程式	79
二、有限叶片数目对离心式涡轮机基本方程式的修正	82
三、轴流式涡轮机的工作原理及其理论压力方程式	84

四、涡轮机的理论流量	87
第三节 涡轮机的理论压头或压力特性曲线 (转速一定)	88
一、离心式涡轮机的理论压头或压力特性曲线	88
二、轴流式通风机的理论压力特性曲线	90
三、离心式工作轮叶片出口安装角 β_2 对理论压头或压力的影响及其选择	91
第四节 矿山涡轮机实际运转特性曲线 (转速一定)	92
一、实际压头或压力特性曲线——实际压头或压力与实际流量之间的关系	92
二、功率曲线——功率与实际流量之间的关系	93
三、效率曲线——效率与实际流量之间的关系	95
第五节 涡轮机工作时与外部网路的关系	96
一、涡轮机运转时外部网路特性曲线	96
二、涡轮机运转时的工况及工作区	101
第六节 涡轮机的相似理论及其应用	106
一、同类型涡轮机及其在运转中的特性——涡轮机的相似原理	106
二、同类型涡轮机运转时相似工况的变化规律——比例定律与通用曲线	108
三、同类型涡轮机的压头 (或压力)、流量、转速和密度的关系——比转数	112
第三章 矿山水泵及通风机	116
第一节 离心式水泵运转中的主要问题	116
一、离心式水泵的轴向推力及其平衡方法	116
二、气蚀现象及其消除方法	119
三、离心式水泵的调整	125
四、离心式水泵运转中常见的主要故障及其消除方法	128
五、矿山排水设备自动化原则	130
第二节 矿山通风机运转中的主要问题	136
一、矿山通风机的调整	136
二、矿山通风机的联合工作	142
三、矿山环境保护对通风机设备的要求	144
四、通风机运转中常见故障及其消除方法	148
第三节 矿山水泵及通风机设备的选择计算	150
一、矿山离心式水泵设备的选择计算	150
二、矿山通风机设备的选择计算	160
附录	169
参考书目	179

第一章 水力学基本原理

第一节 流体及其作用力的性质

一、流体的概念及其理想结构

凡不像固体那样能保持一定形状的物体均称为流体。

任何微小的外力均能使流体发生很大的变形。流体与固体的区别，主要是它无一定的形状，具有流动性。

流体有两种，一种是气体，另一种是液体。它们的个性与共性为：气体分子排列较松散，分子间的作用力较弱，若对气体加以外力，则其体积极易缩小；反之，将外力除去，则其体积将无限地膨胀。所以通常称之为可压缩的流体。

液体分子排列较紧密，分子间的作用力较强。在极大的外力作用下，其体积只能发生极微小的变化，因而通常称之为不可压缩的流体。它不能因外力除去而膨胀，像气体一样充满容纳它的空间。所以它常与空气相接触，能形成一个自由表面。

由上述可知，液体与气体共同的特性是：它们均无一定的形状，具有流动性。它们相异之处是：液体不可压缩（压缩性非常微小），在容器里形成一定的自由表面；相反，气体可压缩，又因其膨胀后可充满整个容器，故不能形成自由表面。

水力学所研究的对象是液体，但当气体密度改变很小时，则水力学的各种原理与定律对它均可应用。

组成流体的分子永远处于杂乱的热运动之中。为了避免研究分子微观运动的繁难，引入流体具有连续性的假设：即认为流体中没有空隙存在，它是由完全充满所占空间的无数流体质点所组成的连续介质，并忽略分子内部的微观运动。

同时，假定流体是均质的，即在它所占据的空间中，其质量均匀分布。在一定情况下，这个假设与客观事实基本相符。而在某些特定情况下，必须将它们看成非均质的，本书只研究均质流体。

引入均质、连续介质这一概念，使得流体的一切特性如密度、压力及速度等，均可看作是坐标及时间的连续函数，从而可以利用数学工具研究流体平衡与运动的规律，能够简便而有效地解决工程实际问题。

二、流体的主要物理性质

流体状态（运动或静止）的变化与所受外力有关，也与它本身的下列物理性质有关。

1. 密度与质量 单位体积均质流体的质量叫做密度，以 ρ 表之。

$$\rho = \frac{M}{V} \text{公斤/米}^3 \quad (1-1)$$

式中 V ——均质流体的体积，米³；

M ——均质流体的质量，公斤。

流体的质量与它的惯性大小成比例，故常以惯性的大小，表示其质量的多少。这种质量叫做流体的惯性质量。

另一方面，流体的质量是指“包含在流体中物质的量”。处在重力场中的流体均有重量，故常以流体的重量判断其质量多少。这种质量称为重力质量。经验证明，流体的重力质量与惯性质量相同。根据牛顿运动第二定律，流体的重量等于流体的质量与重力加速度的乘积，即：

$$G = Mg \quad (1-2)$$

式中 G ——均质流体的重量，牛顿；

M ——均质流体的质量，公斤；

g ——重力加速度，常取 $g = 9.8 \text{米/秒}^2$ 。

质量相同的流体在不同的地方可能有不同的重量，因此，质量与重量既有区别又有联系，两者的概念不同，量纲不同，单位不同，不可混淆。

2. 重度与比重 单位体积流体的重量叫做流体的重度，以 γ 表之：

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 牛顿/米}^3 \quad (1-3)$$

比重是指流体的重量与同体积 4°C 的蒸馏水的重量相比之值，其概念可视为相对重度。它是无量纲的纯数，通常以 d 表之。比重也可视为流体的密度与 4°C 的蒸馏水的密度相比之值，即相对密度的概念。两者的物理意义不同，但在同一地点，比值相同，均为无量纲的纯数。

由式 (1-1)、(1-2) 与 (1-3) 可得重度与密度的关系：

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

水和空气的重度与密度随温度的变化值列于表1-1中。

水和空气的重度与密度 (在一个大气压力下)

表 1-1

温度 ($^\circ\text{C}$)	重度 γ (牛顿/米 3)		密度 ρ (公斤/米 3)		温度 ($^\circ\text{C}$)	重度 γ (牛顿/米 3)		密度 ρ (公斤/米 3)	
	水	空气	水	空气		水	空气	水	空气
0	9798	12.64	999.9	1.29	25	9779	11.72	997.1	1.19
4	9800	12.49	1000.0	1.27	30	9767	11.45	995.7	1.17
10	9797	12.23	999.7	1.25	35	9752	11.26	995.1	1.15
15	9791	12.03	999.1	1.23	40	9737	11.07	992.2	1.13
20	9789	11.82	998.2	1.21	45	9720	10.88	990.2	1.11

由表1-1可知，当温度不高时，水的重度与密度变化很小，因此，在常温常压下进行水力计算时，可以采用固定不变的值，即采用 $\gamma = 9800 \text{牛顿/米}^3$ ， $\rho = 1000 \text{公斤/米}^3$ 。同样，为了计算方便，常取空气的重度 $\gamma = 11.82 \text{牛顿/米}^3$ ， $\rho \approx 1.2 \text{公斤/米}^3$ 。

一般矿山坑下排出的水，因夹带泥砂，并溶解有某些矿物质，故其重度较大。金属矿山坑下水的重度约为 $9947 \sim 10045 \text{牛顿/米}^3$ (即密度约为 $1015 \sim 1025 \text{公斤/米}^3$)。对于水砂充填的矿水含泥砂更多，重度可能达到 $11270 \sim 11760 \text{牛顿/米}^3$ 。它们的实际数据，因各矿井而异。

在一个大气压力下，其他几种常用流体的重度、密度与比重值列于表1-2中。

例题1-1 容积为 0.5米^3 的容器盛满 35°C 的清水，水的重量 G 为 4876牛顿 。问此水的质量 M 、密度 ρ 、重度 γ 及比重 d 各为若干？

几种常用流体的重度、密度与比重 (在一个大气压力下)

表 1-2

流体名称	温度(°C)	重度(牛顿/米 ³)	密度(公斤/米 ³)	比重
海水	15	9996~10094	1020~1030	1.02~1.03
飞机汽油	15	6370	650	0.65
普通汽油	15	6860~7350	700~750	0.70~0.75
石油	15	8624~8722	880~890	0.88~0.89
润滑油	15	8722~9010	890~920	0.89~0.92
煤油	15	7450	760	0.76
酒精(乙醇)	15	7742~7840	790~800	0.79~0.80
甘油	0	12348	1260	1.26
水银	0	133280	13600	13.6
乙醚	0	7252	740	0.74
甲醇	4	7938	810	0.81
苯	0	8624	880	0.88

解：从上述各式及其物理概念得：

故 质量 $M = \frac{G}{g} = \frac{4876}{9.8} = 497.55$ 公斤

密度 $\rho = \frac{M}{V} = \frac{497.55}{0.5} = 995.1$ 公斤/米³

重度 $\gamma = \rho g = 995.1 \times 9.8 = 9752$ 牛顿/米³

比重 $d = \frac{\gamma}{\gamma_4} = \frac{\rho}{\rho_4} = \frac{995.1}{1000} = 0.9951$

式中 γ_4 及 ρ_4 分别表示温度为4°C时清水的重度及密度； $\gamma_4 = 9800$ 牛顿/米³； $\rho_4 = 1000$ 公斤/米³。

3. 压缩性与膨胀性 压缩性和膨胀性是指流体的体积随压力和温度而变化的特性。

(1) 压缩性 常以体积压缩系数 β 表示流体压缩性的大小，即温度一定时，单位压力所引起的体积相对变化量：

$$\beta = -\frac{dV}{V} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \text{米}^2/\text{牛顿} \quad (1-5)$$

式中 V ——流体原来的体积，米³；

dV ——流体受压后体积减小值，米³；

dp ——压力的变化值，牛顿/米²（简称帕）；

$\frac{dV}{V}$ ——体积的变化率（即相对变化量）。

因为压力增加，体积减小，即 dp 为正时， dV 为负，故在式(1-5)的等号右边冠以负号。

液体的压缩性非常微小，例如水的体积压缩系数 $\beta = 4.859 \times 10^{-10}$ 米²/牛顿，因此在工程上解决实际问题时，可以看成液体是不可压缩的。但一些特殊情况例外，如水锤的计算等，则须考虑液体的压缩性（本书从略）。

(2) 膨胀性 常以体积膨胀系数 α 表示流体膨胀性的大小, 即压力一定时, 温度每升高 1°C 所引起的流体体积相对变化量:

$$\alpha = \frac{\frac{dV}{V}}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \text{ } 1/^{\circ}\text{C} \quad (1-6)$$

式中 dt ——流体的温度变化量, $^{\circ}\text{C}$;

dV ——温度升高 dt 时, 流体体积相应增大值, 米^3 。

因温度升高, 体积随之增大, 故 dt 与 dV 同号。

液体的膨胀性非常微小, 例如水在一个大气压力下, 温度变化在 $0^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 时, $\alpha = 150 \times 10^{-6}$ 。因此在工程上解决实际问题时, 可将液体看成是不膨胀的流体。

气体的压缩性与膨胀性非常显著, 是可压缩的流体。但在低温、低压下, 流动速度较小 (如通风机输送空气的情况) 时, 它的重度与密度变化甚微。因此, 其压缩性与膨胀性均可忽略不计, 把空气看成不可压缩的流体, 在本章中一并讨论。

4. 粘性 (粘滞性) 流体流动时, 由于流体与固体壁间存在附着力, 流体本身各部分之间有内聚力, 遂使流体流动时各处的速度产生差异。以圆管中层流为例, 紧贴管壁的液体由于附着力的作用, 速度为零; 离界壁越远流速越大, 轴心处的流速最大。即通过管道的横截面上各点流体的速度按抛物面规律分布, 如图1-1所示。

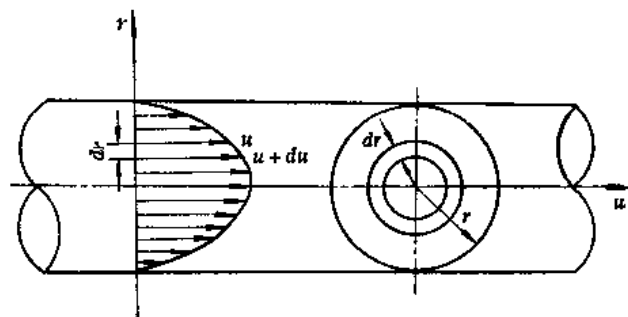


图 1-1 圆管中流速的分布

若将此时的液体看成许多无限薄层, 则显然各薄层的流速彼此不等。流动较快的薄层带动流动较慢的薄层; 反之, 流动较慢的薄层阻滞流动较快的薄层。这样, 在任意快慢两层间相互滑过的接触面上, 将产生一对等值反向的内摩擦力(切向力)。这种因流体流动而产生内摩擦力的性质叫做流体的粘性或粘滞性。

牛顿的研究证明, 流体在流动时所产生的内摩擦力与流体流动时的速度梯度成正比, 与接触面积的大小成正比, 与流体种类及其温度有关, 而与压力无关。此关系称为牛顿内摩擦定律, 其数学式:

$$T = -\mu S \frac{du}{dr} \quad (1-7)$$

或写成切应力形式:

$$\tau = \frac{T}{S} = -\mu \frac{du}{dr} \quad (1-8)$$

式中 T ——内摩擦力，牛顿；

S ——两摩擦层的接触面积，米²；

τ ——相邻两薄层间的摩擦切应力，牛顿/米²；

du ——两薄层间的速度差值，米/秒；

dr ——两薄层间的微小间距，米；

$\frac{du}{dr}$ ——速度梯度，1/秒；为在垂直于流速的半径方向上单位距离内的速度变化率；

μ ——比例常数，其值与流体的种类及其温度有关，称它为动力粘性系数。

式(1-7)及式(1-8)中右侧取负号，表示断面上的内摩擦力 T 或切应力 τ 随半径 r 的增加而增大，而速度 u 随半径 r 的增加而减小。

由上述两式可知，当 $du/dr = 0$ 时， $T = \tau = 0$ 。即流体呈静止状态时，不显示内摩擦力，不呈现粘性。只有在流动状态中，流体才显示内摩擦力，才呈现粘性。

动力粘性系数 μ 的物理意义为：从式(1-8)中去掉负号，即取绝对值，可得：

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dr}} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知，当速度梯度等于1时，动力粘性系数即是接触液层间单位面积上的内摩擦力，此时 $\mu = \tau$ 。由此可知，动力粘性系数 μ 代表液体的一种重要的物理性质。 μ 值大即表示液体流动时，内摩擦切应力大，流动困难；反之，内摩擦力小，流动较易。它直接影响着液体流动的阻力。

动力粘性系数 μ 的单位可从式(1-9)导出。在国际单位制中，切应力 τ 的单位是 $\frac{\text{牛顿}}{\text{米}^2}$ ，

$\frac{du}{dr}$ 的单位是1/秒，故 μ 的单位是 $\frac{\text{牛顿} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$ （帕·秒）。而在物理单位制中， μ 的单位是

$\frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2}$ ，又叫它泊。两者的换算关系是： $1 \frac{\text{牛顿} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} = 10 \text{泊}$ 。目前工程上常采用泊作为 μ

的单位。同时因为单位泊太大，有时应用不便，而取百分之一即厘泊作单位。

无论采用哪种单位制度， μ 的单位中均含有动力学的量纲，因之叫它动力粘性系数。

在水力学或液压系统的计算中，常出现动力粘性系数 μ 与液体密度 ρ 的比值。为了方便，常以 ν 表之，称之为运动粘性系数，即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

在国际单位制中，运动粘性系数 ν 的单位为米²/秒。在物理单位制中， ν 的单位为厘米²/秒，简称沱。它们相互换算关系为： $1 \text{米}^2/\text{秒} = 10000 \text{沱}$ 。工程中常用单位沱，但因为沱太大，有时应用不方便，而取百分之一沱即厘沱做单位。

无论采用哪种单位制， ν 的单位中均含有运动学的量纲，因之叫它运动粘性系数。

不同的流体有不同的 μ 与 ν 值，并且流体的粘性随温度与压力而变化。但压力对它的影响较小，在一般情况下，可忽略不计，仅考虑温度对它的影响。但对某些特殊情况，如

油压系统的压力过高时，则应考虑压力对粘性的影响。

根据实验测出温度 $t = 0 \sim 40^\circ\text{C}$ 时，水与空气的运动粘性系数 ν 值列于表1-3中。

水与空气的运动粘性系数

表 1-3

温度 ($^\circ\text{C}$)	运动粘性系数 ν ($\text{米}^2/\text{秒}$)		温度 ($^\circ\text{C}$)	运动粘性系数 ν ($\text{米}^2/\text{秒}$)	
	水	空气		水	空气
0	1.792×10^{-6}	0.137	20	1.007×10^{-6}	0.157
4	1.56×10^{-6}	0.141	25	0.893×10^{-6}	0.162
10	1.31×10^{-6}	0.147	30	0.804×10^{-6}	0.166
15	1.14×10^{-6}	0.152	40	0.661×10^{-6}	0.176

由表1-3可知：液体的运动粘性系数随温度升高而减小；气体则相反，它随温度增高而增大。这是由于液体与气体具有不同分子结构的缘故。

液体中分子间距较小，分子间相互作用力较强，阻止质点相对滑动的内摩擦力较大，故其粘性较大。当液体温度升高时，分子间距加大，引力减弱，粘性降低。

气体则相反，其分子的间距较大，相互间的引力较弱。分子运动的自由行程大，相邻两层速度快慢不同的分子互相掺混，从而减小了质点的相对滑动。当温度升高时，其内能增加，分子运动加剧，掺混现象增强，阻止流体质点相对滑动的内摩擦力加大，所以气体的粘性随温度增加。

运动粘性系数也叫运动粘度。动力粘性系数又叫动力粘度，因为它直接表示流体粘性的大小，故也叫绝对粘度。因为两者均难以直接测量，所以工程上采用另一种可用仪器直接测出的粘度单位，叫相对粘度或条件粘度。

相对粘度是以流体的粘度与水的粘度的间接比值来表示该流体粘度的大小。国际上采用的相对粘度单位有赛氏、富氏及恩氏粘度。我国目前采用恩氏粘度，以 $^\circ\text{E}$ 表示之。

恩氏粘度用恩氏粘度计测定。恩氏粘度计的结构及其测量方法如图1-2所示。在水槽2中安置有球状底的黄铜圆筒1，在其底部焊接黄铜管3，在黄铜管内安装有白金锥管4。测定流体的粘度时，先将白金锥管堵塞，然后将被测液体注入圆筒内，使液面与标点针5的尖端平齐，此时筒内注入的液体恰好是200厘米³。借水槽内的水温使被测液体始终保持一定的温度，用温度计6与7测定之。然后将锥管开启，观察筒内200厘米³的液体流出直径为2.8毫米的锥管小孔所需时间 t 。再测出温度为20 $^\circ\text{C}$ 时同体积的蒸馏水流出所需时间 t_0 。 t 与 t_0 的比值即是流体的恩氏粘度值，即

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t}{t_0} \quad (1-11)$$

式中 t_0 一般为50~52秒，计算时可取平均值51秒。

工业上常以20 $^\circ\text{C}$ 、50 $^\circ\text{C}$ 及100 $^\circ\text{C}$ 作为测定恩氏粘度的标准温度，并相应以符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 及 $^\circ\text{E}_{100}$ 表示之。

实际流体均呈粘性，流动时均产生内摩擦力，它给流体运动的研究带来了困难。因之，引入一个理想流体的概念。它没有粘性，在运动中不产生内摩擦力，用来简化对流体运动的研究，容易找出它的主要性质。然后考虑实际流体有粘性，对研究结果进行相应的修正，即可得出精确的实际流体运动的基本规律。

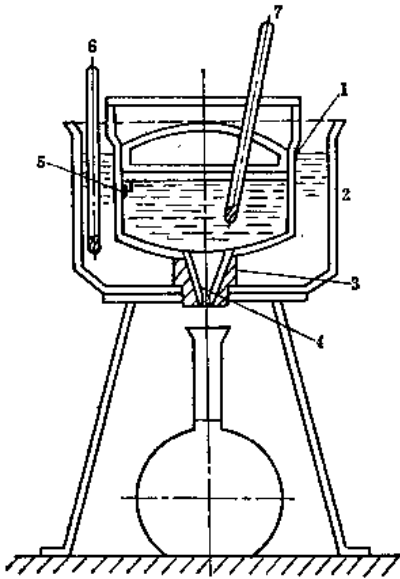


图 1-2 恩氏粘度计

1—黄铜圆筒；2—水槽；3—黄铜管；4—白金锥管；
5—标点针；6—温度计；7—温度计

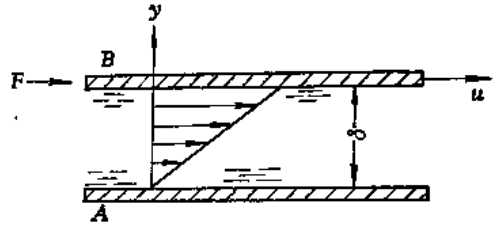


图 1-3 平板间的液体流动

例题1-2 在宽度极大的平板 A 、 B 之间充满水，如图 1-3 所示。板间距离 $\delta = 1$ 毫米。开始时水处于静止状态。在下平板 A 固定不动时，拉动上平板 B 向右作匀速 u 运动，发现两平板间各层的水以不同速度向右运动，其分布规律呈直线。与平板 A 相接触的液层速度为零，越向上速度越大，直到与平板 B 相接触的液层速度与平板 B 运动速度相同，均等于 u 。如 $u = 1$ 米/秒，水的运动粘性系数 $\nu = 0.0156$ 厘米²/秒，试求作用在平板 B 单位面积上的阻力有多大？

解： 由于板间液体运动速度呈直线分布，流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 等于常数，即各液层间的切应力相等。且两平板间距离很小，可认为该切应力即是作用于平板 B 单位面积上的阻力。可用 u/δ 代替速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 。

已知动力粘性系数等于密度与运动粘性系数的乘积，即：

$$\begin{aligned} \mu &= \rho\nu = 1000 \times 1.56 \times 10^{-6} = 1.56 \times 10^{-3} \text{ 牛顿} \cdot \text{秒/米}^2 \text{ (帕} \cdot \text{秒)} \\ &= 1.56 \times 10^{-2} \text{ 达因} \cdot \text{秒/厘米}^2 \text{ (泊)} \end{aligned}$$

将 μ 值代入牛顿内摩擦定律公式得切应力：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{u}{\delta} = 1.56 \times 10^{-3} \times \frac{1}{0.001} = 1.56 \text{ 牛顿/米}^2$$

切应力 τ 的方向与速度 u 的方向相反。

三、流体作用力的性质分析

由于流体受力作用的情况不同，而使之处于静止或运动状态。作用于流体上的力主要有质量力与表面力两种。

1. 质量力 质量力作用于所研究流体的全部质点上，它不随质点所在的有限空间位

置而变化，系由其它物体对该流体的作用而产生，如重力等。另一方面，运动的流体常具有加速度，根据达朗伯原理而虚拟的、加之于流体上的质量力，称之为惯性力。如流体作直线运动的定向等值惯性力（方向与运动相反），作等速旋转运动的离心惯性力等。

质量力与流体的质量成正比，在分析流体受力时，常用单位质量所受的质量力来度量其大小。单位质量所受的质量力叫做单位质量力，用 J 表之。而以 X 、 Y 、 Z 表示它在 x 、 y 、 z 轴上的分量。单位惯性质量力等于所研究流体运动的加速度，而方向相反。若以 F 表示作用于质量为 M 液体上的质量力，以 F_x 、 F_y 、 F_z 分别表示 F 在 x 、 y 、 z 轴上的投影，则单位质量力及其在三轴上的分量分别为：

$$J = \frac{F}{M}, \quad X = \frac{F_x}{M}, \quad Y = \frac{F_y}{M}, \quad Z = \frac{F_z}{M} \quad (1-12)$$

显然，单位质量力的单位与加速度的单位相同，故又称之为加速度质量力。

又由于均质流体的密度为常数，因之其质量力与流体的体积成正比，故又称为体积力。

2. 表面力 表面力的作用不是反映在液体的每个质点上，而是反映在所研究流体的外部表面上或内部截面上。如与液体边界相接触的固体、气体或其他液体的作用力，以及从整个流体内部取出的分离体表面上所承受的其它部分流体的作用力。其大小与作用面积成正比。在分析流体受力时，常用单位面积上所受的表面力来度量其大小。单位面积上的表面力称之为应力。常将它分解为沿作用面法线方向的分量及切线方向的分量。前者称为压应力，简称压力（随后将证明它只能是压力，不可能是拉力）；后者称之为切应力。这里所说切应力即是指流体流运时所引起的单位接触面积上的摩擦力。

关于压应力及切应力与液体状态（运动与静止）的关系，下面各节将陆续说明之。

第二节 水静压力及其分布规律

本节所研究的是液体处于静止状态下的力学规律，以及这些规律的实际应用问题。

液体处于静止状态，包括两种情况：液体整体对地球没有相对运动，叫做绝对静止（平衡）；液体整体对地球有相对运动，但液体各部分彼此之间没有相对运动，叫做相对静止。由于专业的需要，本书主要讨论流体绝对静止的问题。

由于静止的液体不存在内摩擦力，不显示粘性，因而这里所讨论的力学规律，无须考虑理想流体与实际流体的区别。

一、水静压力及其特性

水静压力的特性与固体应力的特性有着本质的区别。对固体来说，每点上的应力可能是拉应力或压应力。但由于液体分子间的凝聚力很小，在外力的作用下，极易产生变形、流动，因之液体每点上的水静压力有它独自的特性。

1. 液体的静压力及其作用方向（液体静压力特性之一） 设在相对或绝对静止的液体中，取出任意形状的分离体进行研究，如图1-4所示。在该分离体内部，通过任意一点 A 用平面 S 将它分割成 I 与 II 两部分，这两部分液体在接触面上是相互作用着的。假定把上面第 II 部分取走，为了使下面第 I 部分的液体保持原来的平衡状态，则必须在割截面上加一个力，或者说沿割截面的每一个微小面积上加一个微小分力，用它或它们来代替原来的第 II 部分液体对第 I 部分液体的作用。

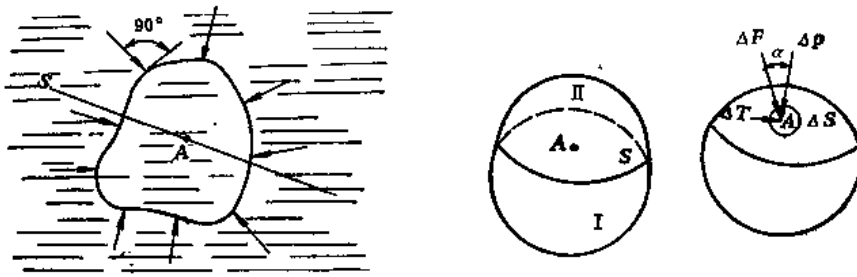


图 1-4 平衡状态下的液体及其内部的作用

现假设在割截面上绕点 A 划出一微小面积 ΔS ，则必须在此面积上加一个相应的作用力 ΔF 以代替其上部被截去的相应液体的作用力（如图所示）。若 ΔF 与 ΔS 面积上的法线成夹角 α ，则可将 ΔF 分解为两个分量，其中一个沿法线方向的分量 $\Delta P = \Delta F \cos \alpha$ ，它与作用面垂直；另一个切向分量 $\Delta T = \Delta F \sin \alpha$ ，它与作用面相切。由于液体静止，不显示内摩擦力，因之 ΔT 必须等于零，否则会发生流动，与静止的前提相矛盾。由此可知，静止液体内部各点的作用力必是一个垂直于作用面的法向力 ΔP 。

又根据液体极易流动的性质， ΔP 如果是一个向外的拉力，亦必然引起液体流动，同样与静止的前提相矛盾。因此作用在 ΔS 面上的力只能是沿法线方向垂直向内的力。

上面所证明的是 ΔS 面积上的总压力 ΔP 只能垂直于它的作用面。如果用 ΔS 去除 ΔP ，则得 ΔS 面积上的平均压力，以 p_m 表之：

$$p_m = \frac{\Delta P}{\Delta S} \text{ 牛顿/米}^2 \text{ (帕)} \quad (1-13)$$

这一平均值可能大于 ΔS 面积上某些点的压力，而小于另一些点的压力，因之它与点 A 的实际压力可能不相同。但 ΔS 面积越小（始终包括点 A 在内），则 p_m 越与点 A 的实际压力近似。当 ΔS 无限减小而趋近于面积上的点 A 时，则 $\Delta P/\Delta S$ 的极限值即是点 A 的实际压力，以 p_A 表之：

$$p_A = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \text{ 牛顿/米}^2 \text{ (帕)} \quad (1-14)$$

上面已经证明 ΔS 面积上的总压力 ΔP 沿法线方向垂直向内，则点 A 的压力也向内垂直于作用面。同样可证明，割截面 S 上任意一点的压力均向内垂直于作用面。

在水静力学中， p_m 叫做 ΔS 面积上的平均水静压力， p_A 叫做点 A 的水静压力，其单位均为牛顿/米²（帕）。 ΔP 叫做 ΔS 面积上的总水静压力，其单位为牛顿。

2. 水静压力特性之二 静止液体内部任意一点的水静压力值与所取的受压面（作用面）的方向无关，即静止液体内部任意一点的水静压力不论来自何方均相等。它的这一重要特性可用流体受力平衡原理证明。

从绝对静止液体中取出一微小五面体 $OABECD$ ，如图 1-5a 所示。五面体各边的长度分别为 dx 、 dy 、 dz 与 dn 。并设作用于面积 $ABCD$ 、 $OECD$ 及 $OABE$ 上的平均水静压力分别为 p_x 、 p_y 及 p_z 。将各面上的总压力平移到 OAD 面所在平面内，同时将微小五面体所受的重力（质量力）亦平移到同一面上，如图 1-5b 所示。由第一水静压力特性已知，作用于五面体各面上的平均水静压力均向内垂直于相应的作用面。因五面体处于静止状态，根据平衡条件，沿 x 轴方向各作用力之和应等于零，即：

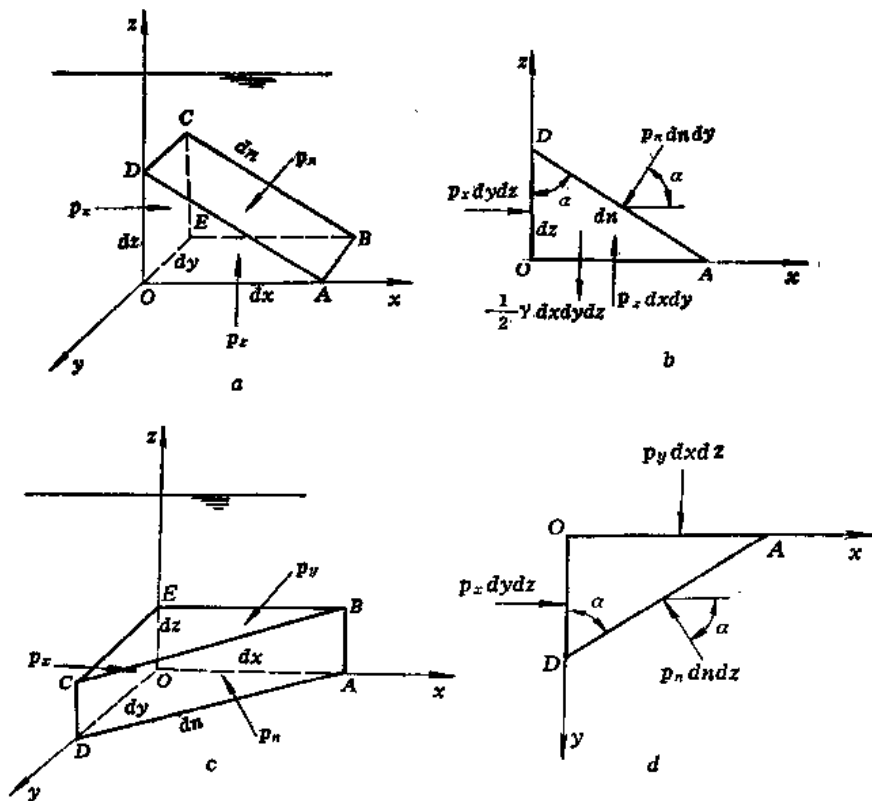


图 1-5 水静压力特性之二分析图

$$p_x dydz - p_n dy dn \cos \alpha = 0$$

其中 $dn \cos \alpha = dz$ ，于是得：

$$p_n = p_x \quad (1-15)$$

沿 z 轴方向的作用力，除表面力外，还有垂直向下的重力（质量力），它是五面体的质量与重力加速度 g 的乘积。同样，根据平衡条件，该方向诸力之和应等于零，即：

$$p_x dx dy - p_n dn dy \sin \alpha - \frac{1}{2} g \rho dx dy dz = 0$$

式中 $dn \sin \alpha = dx$ ；第三项质量力与前两项比较，属于高阶无穷小量，可忽略不计。于是得：

$$p_n = p_x \quad (1-16)$$

由式 (1-15) 与 (1-16) 得：

$$p_x = p_y = p_n \quad (1-17)$$

因为图1-5a中五面体的倾斜面（与坐标轴倾斜）方向是任意取的，若将五面体向前（或向后）旋转 90° ，如图1-5c所示，并将有关各面上的总压力平移到 OAD 面所在的平面内，如图1-5d所示，同样可证明 $p_y = p_x$ 。

上面所指 p_n 、 p_x 、 p_y 及 p_z 是微小五面体各个表面上的平均压力。当 dx 、 dy 及 dz 无限减小，直至以点 O 为极限趋近于零时，则它们变成点 O 上来自 x 、 y 、 z 及 n 四个方向的水静压力。因为坐标轴 x 、 y 、 z 及 n 的方向是任意取的，所以静止液体内任意一点的水静压力，不论来自何方均相等，即：

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (1-18)$$

式 (1-18) 表示静止液体中任意一点的水静压力。但在一般情况下, 不同点的水静压力大小多不相同, 即水静压力是空间坐标的连续函数:

$$p = f(x, y, z) \quad (1-19)$$

以上两个特性构成了水静压力区别于其他压强的特殊本质。

二、绝对静止液体的压力分布规律

这里所指的是液体只受重力作用而处于静止状态。

1. 水静压力基本方程式 揭示绝对静止液体中的压力分布规律, 求出任意一点上的水静压力值, 是水静力学中最基本的问题。

图1-6为一密闭容器, 其中液体处于绝对静止状态。液体的自由表面上作用着压力 p_0 。

为了求得液体中任意一点 A 的水静压力, 假想在液体中分离出一个底面积为 ds , 高度为 h 的正方柱体。该柱体的上端面 ds 与自由液面重合, 其上作用着压力 p_0 ; 下端面 ds 处于液面下 h 深处, 和上端面平行, A 是该端面上的一点, 设它上面的压力为 p 。取柱体的四个侧面和坐标面平行, 每个侧面上分别作用着总压力 P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 , 各个总压力分别等于各个侧面上的平均压力乘各相应的侧面积。柱体的重量为 G 。因为该柱体处于静止液体中, 所以它受力平衡。

根据理论力学原理, 写出沿各坐标轴的受力平衡式:

沿 x 轴方向, 只有侧面上的总压力 P_1 与 P_2 , 它们处于水平方向, 因为平衡, 则有:

$$P_2 - P_1 = 0 \quad \text{或} \quad p_{1m} = p_{2m} \quad (\text{平均压力相等})$$

沿 y 轴方向, 只有侧面上的总压力 P_3 与 P_4 , 同样它们处于水平方向, 根据平衡条件有:

$$P_3 - P_4 = 0 \quad \text{或} \quad p_{3m} = p_{4m} \quad (\text{平均压力相等})$$

上面说明沿 x 与 y 轴方向的作用力相互抵消。

沿 z 轴方向, 有液体的重力(质量力)和上下端面上的压力(表面力)。它们的值分别为: 上端面上的总压力 $P_0 = p_0 ds$, 方向向下; 下端面上的总压力 $P = p ds$, 方向向上; 柱体的重力 $G = \rho gh ds = \gamma h ds$, 方向向下; 它们处于平衡状态, 故有:

$$p ds - p_0 ds - \rho gh ds = 0$$

以 ds 除上式的两侧并移项, 则得在 h 深处微小面积 ds 上的平均压力:

$$p = p_0 + \rho gh = p_0 + \gamma h \quad \text{牛顿/米}^2 \quad (\text{帕}) \quad (1-20)$$

若 ds 面积无限缩小, 直至以点 A 为极限趋近于零, 则式(1-20)代表任意一点 A 的水静压力。

若容器是开口的, 作用于液体自由表面上的压力为当地大气压力 p_{at} , 则式(1-20)可写成:

$$p = p_{at} + \rho gh = p_{at} + \gamma h \quad \text{帕} \quad (1-21)$$

式(1-20)与式(1-21)即为所求的水静力学基本方程式。它们说明, 作用于液体内任意一点的水静压力等于作用于液面上的压力 p_0 或 p_{at} 与液体自重所形成的压力 γh 之和。

将水静压力基本方程式(1-20)及式(1-21)稍加改变即得出另一种表达式。如图1-7所示, 1与2为液体内的任意两点, 它们对某一水平基准面 xoy 的高度为 z_1 与 z_2 , 两者在液面下的深度分别为 h_1 与 h_2 , 其水静压力分别为 p_1 与 p_2 。自由液面上的压力为 p_0 , 它对基准面的高度为 z_0 。列出点1与2的水静力学基本方程式: