

煤炭职业教育课程改革规划教材

MEITAN ZHIYE JIAOYU KECHENG GAIGE GUIHUA JIAOCAI

矿山流体机械

KUANGSHAN LIUTI JIXIE

● 主 编 张书征

煤炭工业出版社

煤炭职业教育课程改革规划教材

矿山流体机械

主编 张书征

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山流体机械/张书征主编. --北京: 煤炭工业出版社, 2010

煤炭职业教育课程改革规划教材

ISBN 978-7-5020-3707-9

I. ①矿… II. ①张… III. ①矿山-流体力学-职业教育-教材 IV. ①TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 139162 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 12³/₄

字数 298 千字 印数 1—3 000

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

社内编号 6517 定价 26.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

全书共八章。前五章为流体力学基础部分，主要介绍了流体的基本知识、流体静力学、流体动力学、流动阻力与能量损失及管路水力计算等内容；后三章为矿山流体机械部分，主要介绍了矿山排水设备、矿井通风设备、矿山压缩空气设备的工作原理、结构、性能、工况调节、使用维护、设备检测及选型计算方法等内容。

本书可作为煤炭职业院校矿山机械专业、矿山机电专业的教学用书，也可作为现场技术人员的参考用书。

前 言

为满足煤炭工业新形势对煤炭职业教育发展的需要，加快煤炭职业教育教材建设步伐，依据培养技术应用型专门人才的要求和煤炭行业的自身特点，我们组织有关教师编写了本教材。本教材在编写过程中注重职业教育的特点，简化了理论体系，以实用、必需、够用为原则，力求使所讲内容尽可能与现场实践相结合。

本书由云南能源职业技术学院张书征编写。在编写过程中，得到了其他兄弟院校、科研院所、设备生产厂家、煤矿企业等单位的大力支持与帮助，谨在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中可能存在错误和不妥之处，恳请有关专家和广大读者提出宝贵意见，以便再版时修改。

编 者

2010年9月

目 次

第一章 流体的基本知识.....	1
第一节 流体的主要物理性质.....	1
第二节 作用在流体上的力.....	6
第三节 流体的力学模型.....	7
第二章 流体静力学.....	9
第一节 流体静压力及其特性.....	9
第二节 流体静压力的计算基准和度量单位	10
第三节 静力学基本方程	11
第四节 流体静压力的测量	14
第三章 流体动力学	20
第一节 流体运动的基本概念	20
第二节 流体运动的连续性方程	24
第三节 流体运动的伯诺里方程	25
第四节 伯诺里方程的应用	29
第四章 流动阻力与能量损失	37
第一节 流动阻力与能量损失的形式	37
第二节 流体的两种流动状态	38
第三节 均匀流	40
第四节 圆管层流与紊流	42
第五节 沿程阻力系数	45
第六节 局部阻力系数	51
第五章 管路水力计算	55
第一节 管路的分类	55
第二节 简单管路的水力计算	56
第三节 串联管路的水力计算	58
第四节 并联管路水力计算	60
第五节 分支管路的水力计算	61

第六章 矿山排水设备	66
第一节 概述	66
第二节 离心式水泵的结构	68
第三节 离心式水泵的性能参数与性能曲线	74
第四节 离心式水泵在管路中的工作	80
第五节 离心式水泵的联合工作	86
第六节 排水设备的经济运行	87
第七节 矿井排水设备的操作运行与维护	90
第八节 水泵、管路在泵房内的布置	94
第九节 离心泵的性能测定	96
第十节 排水设备的选型设计	99
第七章 矿井通风设备	108
第一节 概述	108
第二节 矿用通风设备与反风设施	111
第三节 通风机的性能曲线	119
第四节 通风机在网络中的工作分析	129
第五节 通风机的经济运行与工况调节	132
第六节 通风设备的操作运行、维护、故障处理及完好标准	135
第七节 通风机的性能测定	139
第八节 矿井通风设备的选型设计	144
第八章 矿山压缩空气设备	154
第一节 概述	154
第二节 活塞式空压机的理论工作循环与实际工作循环	156
第三节 活塞式空压机的两级压缩	160
第四节 L型活塞式空压机的结构	162
第五节 活塞式空压机排气量调节	173
第六节 空压机的操作运行与维护	175
第七节 螺杆式空气压缩机	180
第八节 空压机的性能测定	186
第九节 压缩空气设备选型设计	189
参考文献	196

第一章 流体的基本知识

在任何微小剪切力的持续作用下能够连续变形的物质统称为流体。液体和气体是我们常见的流体。

流体力学是研究流体平衡与运动基本规律及在实际工程中应用的科学，是力学的一个重要分支。流体力学分为流体静力学和流体动力学。流体静力学主要研究流体的平衡条件、压力分布规律及对固体壁面的作用力；流体动力学主要研究流体运动要素（压力、速度、密度、温度等）随时间变化的规律、能量损失及作用力与运动的关系。

第一节 流体的主要物理性质

一、流体的流动性

物质由分子和原子组成，在不同条件下，分子和原子之间的距离及相互作用力不同，其存在的状态也不同。物质的存在状态有固态、液态和气态。固体有一定的形状，而流体的形状则取决于盛装流体的容器。

由于流体分子之间的距离比固体分子之间的距离大，流体分子之间的相互作用力较弱，任何微小的剪切力都会使流体产生连续的剪切变形，即流动，流体的这种性质称为流体的流动性。

气体和液体分子的距离及作用力不同，它们的流动性也不同。在常温常压下，气体分子之间的平均距离大于分子直径的十倍，分子之间的作用力极其微弱，气体分子可以自由运动，能够自由膨胀，所以，气体不能保持一定的体积和形状，极易变形，能够充满它能达到的空间。液体分子之间的平均距离约为分子直径的一倍，分子之间的作用力较强，液体分子可以在其他分子之间移动，但不能像气体分子一样自由运动，通常可以保持一定的体积，但不能保持固定的形状，只能随容器形状的变化而变化。

二、流体的密度与重度

流体的密度是指单位体积流体的质量，即

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

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

M ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

流体的重度是指单位体积流体的重力，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——流体的重度, N/m^3 ;

G ——流体的重力, N 。

因 $G = Mg$, 由式 (1-1) 和式 (1-2) 可得流体的重度与密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——当地的重力加速度, 一般取 $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

流体的密度与它在地球上的位置无关, 而流体的重度与它所处的位置有关, 因为地球上不同地点的重力加速度不同, 所以重度也就不一样。另外, 流体的密度和重度受外界压力和温度的影响, 因此, 当指出某种流体的密度或重度时, 应指明所处的外界压力和温度条件。表 1-1 给出了几种常见流体在标准大气压和不同温度下的密度和重度。

表 1-1 几种常见流体在标准大气压 (101325 Pa) 和不同温度下的密度和重度

流体名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	重度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	测量温度/ $^{\circ}\text{C}$	流体名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	重度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	测量温度/ $^{\circ}\text{C}$
空气	1.293	12.68	0	水	999.87	9809	0
空气	1.247	12.23	10	水	1000	9810	4
空气	1.205	11.82	20	水	999.72	9807	10
空气	1.165	11.43	30	水	998.2	9792	20
空气	1.128	11.07	40	水	995.7	9768	30
氧气	1.429	14.02	0	水	992.2	9733	40
氧气	1.123	11.07	20	水银	13600	133416	0
一氧化碳	1.160	11.38	20	水银	13550	132926	10
二氧化碳	1.840	18.05	20	水银	13550	132923	20
瓦斯	0.7168	7.03	0	酒精	790	7742	20

三、流体的压缩性和膨胀性

1. 流体的压缩性

流体的压缩性是指流体的体积随压力增加而缩小的性质。压缩性的大小用压缩系数表示。流体的压缩系数是指温度不变时, 单位压力变化所引起流体体积的相对变化量, 即

$$\beta_p = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-4)$$

式中 β_p ——流体的压缩系数, Pa^{-1} ;

dp ——压力变化量, Pa ;

dV ——压力变化引起的体积变化量, m^3 ;

V ——原来的体积, m^3 。

式 (1-4) 中的负号表示体积与压力的变化相反。

压缩系数大, 表示流体体积随压力增加容易缩小, 即容易压缩; 压缩系数小, 表示流体体积随压力增加不易缩小, 即不易压缩。例如, 气体容易压缩, 液体不易压缩。

2. 流体的膨胀性

流体的膨胀性是指流体的体积随温度升高而增大的性质。膨胀性的大小用膨胀系数表

示。流体的膨胀系数是指压力不变时，单位温度变化所引起流体体积的相对变化量，即

$$\beta_T = \frac{dV/V}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-5)$$

式中 β_T ——流体的膨胀系数， K^{-1} ；

dT ——温度变化量， K ；

dV ——温度变化引起的体积变化量， m^3 ；

V ——原来的体积， m^3 。

3. 液体与气体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性和膨胀性都很小，受压或受热时，体积和密度变化很小。例如，水的压缩性很小，通常每增加 0.1 MPa 的压力，其体积的变化率不到 $1/10000$ ；水的膨胀性也很小，在 $10 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，温度每增加 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，水的体积变化率约为 $1.5/10000$ 。其他液体的压缩性和膨胀性也很小。因此，常把液体作为不可压缩流体。

气体的压缩性和膨胀性都很大，受压或受热时，体积和密度变化都较大。例如，理想气体等温压缩时，压强增大一倍，体积缩小 $1/2$ ；理想气体等压膨胀时，温度升高一倍，体积增大一倍。因此，常把气体作为可压缩流体。

在工程实际中，是否考虑流体的压缩性与膨胀性，要根据具体情况而定。在一般的工程计算中，通常把液体视为不可压缩流体，即忽略液体的压缩性和膨胀性，把液体的密度视为常量。这种考虑可使工程计算大为简化，并能满足一般工程计算精度要求。如矿井排水、城市供水等一般给水、排水工程中，忽略其压缩性与膨胀性，把水作为不可压缩流体处理。但在一些特殊情况下，如研究水击现象、水暖系统等问题时，则需要考虑其压缩性和膨胀性。通常把气体作为可压缩流体，特别是在流速较高、压力与温度变化较大时，其压缩性与膨胀性不能忽略。例如，空气压缩机的压缩，在计算时就不能忽略空气的压缩性和膨胀性。但在流速不高、压力与温度变化不大时，便可忽略其压缩性与膨胀性，把气体视为不可压缩流体。因此，对于矿井通风等一般的通风系统，就可以把空气视为不可压缩流体，这样，不可压缩流体得出的运动规律便可直接应用到这类气体的工程计算中。

四、黏性

1. 黏性的定义

流体内部质点或流层间因相对运动产生内摩擦力而阻碍相对运动的性质，称为流体的黏性。下面以水在圆管内的流动为例，说明流体的黏性。

如图 1-1 所示，当水在圆管中缓慢流动时，流动状态为层流，流速在同一过流断面上按抛物线规律分布。紧贴管壁的流层或质点流速为零，处于管轴上的流体质点流速最大。这是因为，紧贴管壁的流体质点受管壁的影响最大，黏附在管壁上，流速为零；管轴上的流体质点距离管壁最远，受管壁的影响最小，流速最大。处于管壁与管轴之间的流体质点以不同的流速流动，越接近管轴的流体质点，流速越

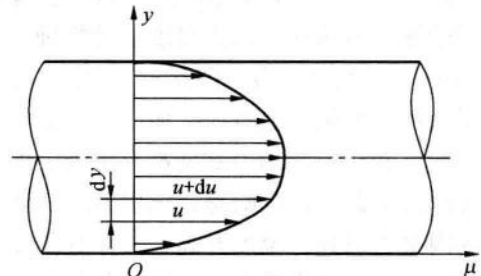


图 1-1 水在圆管中的流速分布

大。由于各流层的速度不同，相邻流层之间必然产生摩擦阻力，摩擦阻力的存在，也必然阻碍其相对运动。由于这种阻力产生在流体内部，所以称为内摩擦力。

流体在流动时，要克服内摩擦力，必定要消耗一定的能量，这就是流体在运动过程中产生能量损失的重要原因之一。黏性是流体本身的物理性质，但静止流体不显示黏性，只有流体运动时，黏性才能显现出来。

2. 牛顿内摩擦力定律

牛顿通过大量的试验发现了流体内摩擦力的影响因素，并于1686年提出了流体内摩擦力数学表达式，即牛顿内摩擦力定律。

流体内摩擦力大小与下列因素有关：

- (1) 与两流层之间的速度差 du 成正比，与两流层之间的距离 dy 成反比。
- (2) 与两流层之间的接触面积 A 成正比。
- (3) 与流体的种类和温度有关。
- (4) 与流体所受的压力无关。

牛顿内摩擦力定律数学表达式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中 F ——流层间的内摩擦力，N；

μ ——表征流体黏性大小的比例因数，称为动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

A ——流层间的接触面积， m^2 ；

du/dy ——速度沿垂直于流动方向 y 的变化率，即速度梯度， $1/\text{s}$ 。

单位面积上的内摩擦力（切应力）为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 τ ——单位面积上的内摩擦力（切应力）， N/m^2 。

3. 黏性的度量方法

不同的流体，其黏性不同。黏性的大小用黏度表示，黏度通常有动力黏度、运动黏度和相对黏度这3种度量方法。

1) 动力黏度

动力黏度是表示流体动力特性的黏度，用 μ 表示。由式 (1-7) 可得

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-8)$$

μ 是表征流体本身黏性大小的一个因数，流体的动力黏度 μ 越大，其黏性越大，抵抗变形的能力就越强。动力黏度 μ 的物理意义可以理解为，在数值上，其大小等于速度梯度 $du/dy = 1$ 时的切应力，即 $\mu = \tau$ 。因为， μ 的单位含有力的因次，是一个动力学要素，反映了流体黏性的动力特征，所以，称 μ 为动力黏度，也叫动力黏滞因数或绝对黏度。

温度和压力对动力黏度都有影响，但压力的影响很小，通常只考虑温度的影响。温度对液体动力黏度的影响是，温度升高，液体的黏性降低。液体的黏性主要是由液体分子之间的内聚力引起，温度升高，液体分子之间的内聚力减弱，黏性降低。温度对气体动力黏度的影响是，温度升高，气体的黏性增加。气体分子之间的距离较大，其黏性主要是由气体分子的热运动引起的，温度升高，气体分子的热运动加剧，分子之间的碰撞加剧，黏性

增大。

2) 运动黏度

运动黏度是指在一个标准大气压和同一温度下，流体的动力黏度与密度的比值，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

式中 ν ——运动黏度， m^2/s 。

运动黏度 ν 没有特殊的物理意义，因在计算和分析流体运动问题时，经常要考虑 μ 和 ρ 及比值，所以才引用运动黏度这个物理量。但从运动黏度的单位中可以看出，它的单位只含有长度和时间这两个运动要素，能够反映流体的运动特性，即运动黏度越小，流体的流动性越好。

温度和压力对运动黏度也有影响，压力的影响很小，通常也只考虑温度的影响。温度升高，液体的运动黏度减小，气体的运动黏度增大。

运动黏度 ν 的单位除 m^2/s 外，还有斯托克斯 St (cm^2/s) 和厘斯 cSt (mm^2/s)。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} = 10^6 \text{ cSt}$$

润滑油的牌号就是用运动黏度 (mm^2/s) 的大小来表示的。我国用 40 °C 时的运动黏度值来表示润滑油的牌号。

表 1-2 和表 1-3 分别为水和空气在标准大气压和不同温度下的动力黏度和运动黏度。

表 1-2 标准大气压和不同温度下水的动力黏度和运动黏度

温度/°C	$\mu/10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$\nu/(10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	温度/°C	$\mu/10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$\nu/(10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
0	1.781	1.785	40	0.653	0.658
5	1.518	1.519	50	0.547	0.553
10	1.307	1.306	60	0.466	0.474
15	1.139	1.139	70	0.404	0.413
20	1.002	1.003	80	0.354	0.364
25	0.890	0.893	90	0.315	0.326
30	0.798	0.800	100	0.282	0.294

表 1-3 标准大气压和不同温度下空气的动力黏度和运动黏度

温度/°C	$\mu/10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$\nu/(10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	温度/°C	$\mu/10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$\nu/(10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
0	17.16	13.27	40	19.42	17.16
5	17.46	13.75	60	20.10	18.96
10	17.75	14.23	80	20.99	20.99
15	18.00	14.69	100	21.77	23.01
20	18.24	15.13	120	22.60	25.20
25	18.49	15.61	140	23.44	27.40
30	18.73	16.08	200	25.82	34.60

3) 相对黏度

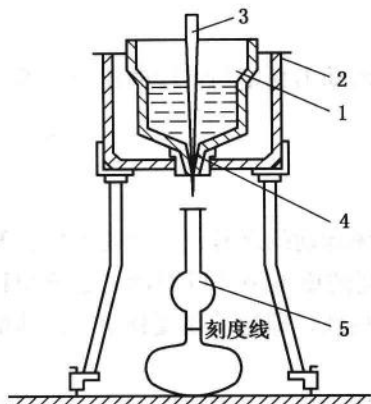
相对黏度又称条件黏度，是在规定条件下用特定黏度计直接测定的黏度。根据测定条件不同，有恩氏黏度、赛氏黏度和雷氏黏度。各国采用的相对黏度也不尽相同，我国采用恩氏黏度。恩氏黏度计如图 1-2 所示。

恩氏黏度是指把加热并保持恒定温度（一般为 50℃）的 200 cm³ 被测液体，靠自重从恩氏黏度计中流出需要的时间 t 与同体积 20℃ 蒸馏水从恩氏黏度计中流出的时间 t_0 （约为 51 s）的比值，用 $^{\circ}E_t$ 表示，即

$$^{\circ}E_t = \frac{t}{t_0} \quad (1-10)$$

恩氏黏度与运动黏度的换算关系为

$$\nu_t = 7.31 ^{\circ}E_t - \frac{6.31}{^{\circ}E_t} \quad (1-11)$$



1—黄铜储液器；2—水槽；3—木塞；
4—锥管；5—量杯

图 1-2 恩氏黏度计

式中 ν_t ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的运动黏度， mm^2/s 。

恩氏黏度的测量方法是：先用木塞将锥管关闭，把 220 cm³ 的蒸馏水注入黄铜储液器中，开启水槽中的电加热器进行加热，目的是把黄铜储液器中的蒸馏水加热至 20℃，并保持温度不变，然后迅速拔起木塞，测定蒸馏水经锥形孔流入量杯 200 cm³ 刻度线所需的时间 t_0 ；然后，用同样的方法测定待测液体流出 200 cm³ 所需的时间 t ，但要给出待测液体的温度，并保持测定时温度不变。根据测定的时间，按式 (1-10) 计算恩氏黏度。

第二节 作用在流体上的力

无论流体处于静止或运动状态，都要受到力的作用。作用在流体上的力按其性质分为质量力和表面力两类。

一、质量力

质量力是作用在流体某体积内所有质点上，并与流体质量成正比的力。在均质流体中，质量力与流体的体积成正比，故质量力又被称为体积力。

重力是由地球引力所产生的，与流体的质量成正比，其大小为 $G = mg$ 。惯性力是由流体加速运动而产生的，如作直线加速运动的惯性力和做圆周运动的离心力等。

二、表面力

表面力是指作用在流体中所取某部分流体体积表面上的力。如图 1-3 所示，从静止流体中任取一体积为 V 、表面积为 A 的分离体为研究对象，则与分离

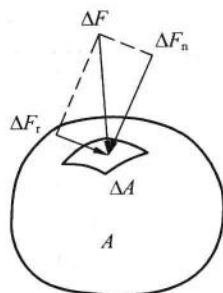


图 1-3 作用在分离体上的力

体相邻的流体必定通过接触面对分离体产生作用力。在分离体表面取一微小面积 ΔA ，作用在它上面的表面力为 ΔF ，把 ΔF 分解为切向力 ΔF_t 和法向力 ΔF_n ，则当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时，作用在该点的切向应力 τ 和法向应力 σ 分别为

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A} \quad (1-12)$$

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad (1-13)$$

习惯上，把流体的法向应力 σ 称为流体的压强，而在液压传动中，习惯称为流体的压力，用 p 表示，本书中通称为流体的压力，简称压力。

静止流体主要承受法向应力，即静压力 p 。因为流体分子间的作用力极其微弱，所以静止流体不能承受切向力和拉力。

第三节 流体的力学模型

一、连续介质

物质是由分子和原子组成的。同样，流体是由大量的分子组成的，分子在不停地运动，分子之间有间隙。从微观上看，流体的结构在时间和空间上是不连续的，而且，每个流体分子的运动是不规则的、随机的，这必然给研究带来极大困难。但从宏观上看，流体又是连续的、均匀的，这是由于大量分子运动的宏观表现，即流体的宏观机械运动。流体力学研究流体的宏观机械运动，即流体的宏观运动规律，而流体分子之间的间隙很小，如水分子的平均间隙仅为 5×10^{-10} m，因此，流体分子之间的间隙相对于宏观流动的空间是完全可以忽略的。

研究流体的运动规律时，从宏观上把流体看成由无限多质点组成的连续介质，质点之间没有间隙，这就是连续介质假说。

将微观不连续的流体当做宏观的连续介质处理后，其宏观物理量（如速度、压力、温度、密度等）在流动空间中就是连续分布的，可以对它们进行宏观观测，其宏观物理量一般为时间和空间的连续函数，因此可以用数学方法来分析和解决流体问题。实验表明，连续介质假说解决一般的工程问题是正确的。但在一些特殊场合，如研究 120 km 高空稀薄空气中飞行的物体时，就不能用这一假说。

二、理想流体

由于实际流体存在黏性、压缩性、膨胀性及表面张力，特别是黏性的存在，使对流体运动的分析变得非常困难。为使对流体的分析简单化，我们引入了理想流体的概念。所谓理想流体，是指绝对无压缩与膨胀、无黏性、无表面张力的连续流体。

显然，理想流体并不是实际流体，它是为了分析研究方便而引入的一种理想模型。由于实际流体，特别是液体，其压缩性、膨胀性及表面张力都很小，与理想流体差别不大，气体在压缩性与膨胀性不大时与理想流体差别也不大，所以，一般可不考虑实际流体压缩性、膨胀性及表面张力的影响。但是，黏性的影响较大，黏性是实际流体与理想流体最主

要的差别，所以，按理想流体得出的规律，在应用到实际的黏性流体时，一般要考虑黏性的影响，应对这些规律与黏性流体的偏差进行修正，以用于解决实际流体问题。

三、不可压缩流体

不考虑压缩性和膨胀性的流体称为不可压缩流体。压缩性和膨胀性是流体的基本属性，任何实际流体都具有压缩性和膨胀性。液体的压缩性和膨胀性都很小，在压力和温度变化不大时，可以忽略压缩性和膨胀性的影响，认为液体的密度是一个常数。气体的压缩性和膨胀性都很大，但当气体流速变化不大时，气体的密度变化很小，如当气体流速为 68 m/s 时，密度变化仅为 1% ，可以认为是不可压缩流体。密度为常数的流体，称为不可压缩均质流体。

复习思考题

1. 什么是流体？流体的重度和密度有什么关系？
2. 什么是流体的压缩性和膨胀性？液体和气体的压缩性和膨胀性有何不同？
3. 什么是流体的黏性？压力、温度对液体的黏性和气体的黏性有什么影响？
4. 黏性的度量方法有哪些？几种黏度之间有什么关系？
5. 什么是连续介质、理想流体和不可压缩流体？
6. 已知体积为 1.2 m^3 的某润滑油质量为 1032 kg ，求该润滑油的密度和重度。
7. 用恩氏黏度计测得 200 cm^3 润滑油流出的时间为 229.5 s ，同体积蒸馏水从恩氏黏度计流出的时间为 51 s ，求该润滑油的恩氏黏度和运动黏度。
8. 水的重度 $\gamma = 9.792 \text{ kN/m}^3$ ，动力黏度 $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，求水的运动黏度。
9. 空气的重度 $\gamma = 11.77 \text{ N/m}^3$ ，运动黏度 $\nu = 0.1513 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，求空气的动力黏度。
10. 如图 1-4 所示，油缸内径 $D = 0.12 \text{ m}$ ，活塞直径 $d = 0.1196 \text{ m}$ ，活塞长度 $L = 0.14 \text{ m}$ ，活塞与油缸间隙内为 $\mu = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的油液，活塞以 $v = 1 \text{ m/s}$ 的速度运动，求作用于活塞上的黏滞力 F 。

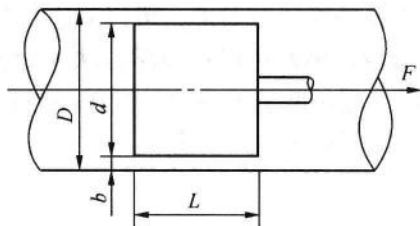


图 1-4 习题 10 图

第二章 流体静力学

流体静力学是研究流体平衡（静止和相对静止）状态下的力学规律，以及这些规律在实际工程中的应用。

在静力学研究中，由于流体是静止的，质点间无相对运动，流体不显示黏性，因此，流体静力学的规律与流体的黏性无关。流体静力学的规律不仅适用于理想流体，而且适用于黏性流体。

第一节 流体静压力及其特性

一、流体静压力

静止流体不能承受切向应力和拉应力，只能承受法向应力，所以，流体静压力是指静止流体单位面积上所受的力，单位为 Pa。

如图 2-1 所示，从静止或相对静止的均质流体中任取一微小分离体，用一水平面把该微小分离体分为 B、C 两部分。假定将 C 移去，C 对 B 的作用力为 ΔF ，那么，作用在平面 ΔA 上的平均压力 \bar{p} 为

$$\bar{p} = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2-1)$$

当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时， ΔA 缩小为一点，对式 (2-1) 取极限，可得该点的压力 p ，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (2-2)$$

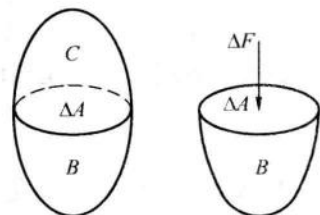


图 2-1 静止流体中的分离体

二、流体静压力的两个特性

特性一 流体静压力的作用方向总是沿作用面的内法线方向。

也就是说，流体静压力的方向总是由外指向作用面，并与作用面垂直。假如流体静压力不与作用面垂直，那么，沿作用面必定有切向应力，流体将产生流动，流体的静止将遭到破坏，这与流体处于平衡状态相违背，显然是不可能的。另外，由于流体分子之间的作用力很小，也不能承受拉应力，所以，流体静压力的作用方向只能沿作用面的内法线方向。

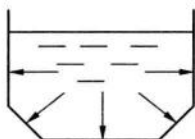


图 2-2 静压力的方向

根据流体静压力的特性一可知，静止流体对与其接触的壁面作用力的方向必垂直于该作用面，如图 2-2 所示。

特性二 静止流体中任意一点的压力与作用方位无关，其值

均相等。

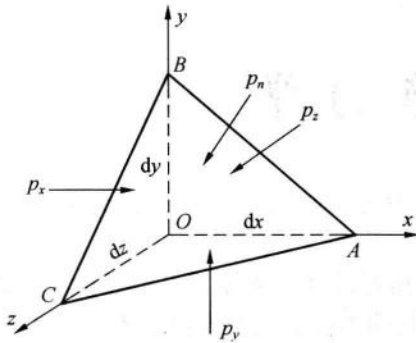


图 2-3 平衡流体中微小四面体

证明：如图 2-3 所示，在静止流体中取一微小四面体 $OABC$ ，该四面体与坐标轴的关系如该图所示，边长分别为 dx 、 dy 、 dz 。由于所取四面体为微小四面体，可以认为各微小表面上的压力相等，记为 p_x 、 p_y 、 p_z 、 p_n 。所以，面 OBC 、 OAC 、 OAB 、 ABC 上的作用力分别为 $p_x \frac{1}{2} dydz$ 、 $p_y \frac{1}{2} dx dz$ 、 $p_z \frac{1}{2} dx dy$ 、 $p_n A_n$ (A_n 为斜面 ABC 的面积)。

除了这些力之外，还有质量力。把质量力在 x 、 y 、 z 轴上的投影用 X 、 Y 、 Z 表示，并用 ρ 表示其密度，微小四面体 $OABC$ 的体积为 $dV = \frac{1}{6} dx dy dz$ ，那

么，质量力在 x 、 y 、 z 方向上的分力分别为 $X\rho \frac{1}{6} dx dy dz$ 、 $Y\rho \frac{1}{6} dx dy dz$ 、 $Z\rho \frac{1}{6} dx dy dz$ 。

因为流体是静止的，微小四面体处于平衡状态，所以，作用在微小四面体上的各力在各坐标轴上的投影总和为零。

在 x 轴上， $\Sigma F_x = 0$ ，则

$$p_x \frac{1}{2} dydz - p_n A_n \cos(n, x) + X\rho \frac{1}{6} dx dy dz = 0 \quad (2-3)$$

式中， $\cos(n, x)$ 是斜面 ABC 内法线与 x 轴夹角的余弦，由几何关系得

$$A_n \cos(n, x) = \frac{1}{2} dydz$$

代入式 (2-3) 并简化得

$$p_x - p_n + X\rho \frac{1}{3} dx = 0 \quad (2-4)$$

当 $dx \rightarrow 0$ 时

$$p_x = p_n$$

同理

$$p_y = p_n, \quad p_z = p_n$$

所以

$$p_x = p_y = p_z = p_n$$

由于微小四面体是任意选定的，当微小四面体的边长趋于零时，微小四面体变成一个点。所以，这就证明了作用在静止流体上某点的静压力与作用方位无关，其值均相等。应该注意的是，不同点的静压力一般不同，这取决于空间点的位置。

第二节 流体静压力的计算基准和度量单位

一、静压力的计算基准

静压力的计算基准有两种：绝对压力和大气压力。

1. 绝对压力

以绝对真空为基准算起的压力，称为绝对压力，用 p 表示。

绝对压力没有负值，最小绝对压力为零。