

中等专业学校教材

火电厂动力设备

重庆电力学校 杨敏媛 主编



中等专业学校教材



火电厂动力设备

重庆电力学校 杨敏媛 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书是中等专业学校热动力类专业统编教材,主要介绍火电厂生产过程基本知识。全书分五部分——流体力学基础,热工学理论基础,锅炉设备,汽轮机设备,电厂热力系统及辅助设备。本书可供火电厂热力过程自动化、电厂化学等专业作为专业基础课教材,亦可供有关专业工程技术人员和电厂工作人员自学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂动力设备/杨敏媛主编. —北京:中国水利水电出版社, 1995
中等专业学校教材
ISBN 7-80124-049-9

I. 火… II. 杨… III. 火电厂-动力-设备-专业学校-教材 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 12864 号

书 名	中等专业学校教材 火电厂动力设备
作 者	重庆电力学校 杨敏媛 主编
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京市京建照排厂
印 刷	北京市京东印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 21 印张 472 千字 3 插页
版 次	1996 年 5 月第一版 1996 年 5 月北京第一次印刷
印 数	0001—4480 册
定 价	16.20 元

前 言

本教材是按中电联教培部“1989~1993年电力中专学校教材建设规划”编写的第三轮教材,是根据1988年水利电力部教育司颁发的教学大纲,并参照本课程教学研究会1990年10月通过的教材编写细纲编写的,供电厂热力过程自动化及电厂化学等专业使用。

教材编写的基本思想是紧扣专业要求,根据职业教育特点,以技术应用能力为主线,必需够用为度,注重针对性和实用性,贯彻启发性原则,启迪学生思维。由于火电厂热力过程自动化水平发展迅速,本教材内容以反映大型火电厂为主。对第一、二轮教材在长期教学实践中得到肯定的部分给予继承。

本书第一、四、五篇由杨敏媛编写;第二篇由张红岩编写;第三篇由陈曲进编写。杨敏媛担任主编;沈阳电力高等专科学校王大振担任主审。

限于编者水平,不当之处,恳请读者批评指正。

作 者

1994年12月

目 录

前 言

第一篇 流体力学基础

第一章 流体力学基本概念	1
第一节 流体的概念	1
第二节 流体的基本性质	1
第二章 液体静力学基础	8
第一节 液体静压力及其特性	8
第二节 液体静压力的基本方程式	9
第三章 液体动力学基础	21
第一节 液体动力学几个基本概念	21
第二节 连续性方程式	24
第三节 能量方程式	25
第四节 伯努利方程式的应用	28
第四章 流动阻力及能量损失	35
第一节 液体的两种流动状态	35
第二节 阻力损失计算	37

第二篇 热工学理论基础

第五章 状态参数及理想气体状态方程式	42
第一节 工质及其状态参数	42
第二节 理想气体状态方程式	45
第三节 混合气体的基本概念	46
复习思考题	48
习题	48
第六章 热力过程及热力学第一定律	50
第一节 热力过程	50
第二节 热力学第一定律	54
第三节 基本热力过程	56
复习思考题	60
习题	60
第七章 热力循环和热力学第二定律	61
第一节 热力循环	61
第二节 卡诺循环	61
第三节 热力学第二定律	62
复习思考题	62
习题	63
第八章 水蒸汽及蒸汽动力循环	64

第一节 水蒸汽的产生	64
第二节 水蒸汽性质图表	66
第三节 水蒸汽的流动	68
第四节 蒸汽动力循环及提高循环热效率的途径	74
复习思考题	82
习题	82
第九章 传热学基础	84
第一节 热交换的基本方式	84
第二节 热传导	84
第三节 对流换热	87
第四节 热辐射	89
第五节 传热过程	91
第六节 热交换器	93
复习思考题	94
习题	95

第三篇 锅 炉 设 备

第十章 概述	96
第一节 锅炉设备的组成及工作过程	96
第二节 锅炉的参数、经济性指标、类型和型号	98
第十一章 燃料及有关计算	102
第一节 燃料	102
第二节 燃烧计算	107
第三节 锅炉热平衡计算	111
第十二章 锅炉制粉和燃烧设备	118
第一节 燃烧的有关概念	118
第二节 制粉设备和系统	120
第三节 燃烧设备	129
第十三章 锅炉蒸发设备和蒸汽净化设备	135
第一节 锅炉蒸发设备	135
第二节 自然循环的基本原理	139
第三节 蒸汽净化设备	142
第四节 强制流动锅炉简介	145
第十四章 锅炉蒸汽加热设备和尾部受热面	151
第一节 蒸汽加热设备	151
第二节 尾部受热面	160
第三节 锅炉风烟系统简介	167
第四节 锅炉整体布置举例	170
第十五章 锅炉运行	173
第一节 锅炉的启动与停炉	173
第二节 锅炉的参数调节	186
第三节 锅炉的燃烧调节	189
第四节 锅炉的静态特性	192

第五节	锅炉的动态特性	194
第六节	直流锅炉的参数调节特点	195
第七节	制粉系统的运行	197

第四篇 汽轮机设备及运行

第十六章	汽轮机的工作原理及构造	202
第一节	汽轮机的基本概念	202
第二节	多级汽轮机	217
第三节	汽轮机的变工况	236
第十七章	汽轮机的调节	246
第一节	汽轮机调节任务及调节系统	246
第二节	调节系统的静态特性及同步器	253
第三节	中间再热式机组的调节特点	258
第四节	汽轮机的保护装置	260
第五节	汽轮机的供油系统	264
第十八章	汽轮机的运行	267
第一节	汽轮机的启动和停机	267
第二节	汽轮机的正常运行及维护	280

第五篇 发电厂热力系统及辅助设备

第十九章	发电厂热力系统	283
第一节	发电厂原则性热力系统	283
第二节	发电厂全面性热力系统	291
第二十章	火电厂辅助设备	301
第一节	电厂常用水泵、风机	301
第二节	汽轮机的凝汽设备	306
附录		318

第一篇 流体力学基础

第一章 流体力学基本概念

第一节 流体的概念

自然界常见的物体有三种形态——固体、液体、气体，只有固体保持一定的形状，而液体和气体由于其分子间引力较小，故具有很大的流动性。我们把液体和气体统称为流体。

流体不能保持一定的形状，它只能抵抗压力而不能抵抗拉力和切力。在受到切力时就发生不断的变形即流动，正由于流体有流动性，才能实现在外力作用下通过管道连续地被输送到指定的地方，例如发电厂使用的油、汽、水的流动，都是流体在管内以一定压力输送来实现的。

液体和气体不同之处是液体的形状改变后，可以继续保持原来的体积，并有自由表面；而气体在容器形状改变后仍将充满该容器，没有自由表面。当液体被加压时，其分子距很难缩小，不易被压缩，通常称为不可压缩流体；气体则是可压缩的，通常称为可压缩流体。

在工程实践中流体占有的空间与流体的分子尺寸比起来大得无法比拟。从物理学中知道，液体和气体的分子都只有很小的体积，一立方厘米的液体有 3×10^{24} 个分子，一立方厘米的气体中有 2.7×10^{19} 个分子，分子之间的间隙是微不足道的。为了研究方便，通常把流体的流动看成是由无数流体质点组成的连续介质的流动，认为流体充满所占空间，没有间隙，而那些与工程流体力学有关的各特征量，例如流体密度、流速、压力和切应力等的空间分布也都是连续的。有了连续性的假定，就可以摆脱研究分子运动的复杂性，只考虑外力作用下的宏观机械运动。

但应指出，连续介质的假定也有一定的应用范围，例如当研究区域很小，与分子的大小处于同一数量级时，或者在很稀薄的空气中或高真空技术中就必须考虑不连续介质。此外，当流体有局部突变时，连续介质的假定也不再合适，例如液体中局部地区压力很低，发生汽化现象形成气穴时，就会破坏液体的连续性。

第二节 流体的基本性质

本节主要讨论工程流体力学中有关流体的几个基本物理性质——惯性、膨胀性和压缩性、粘滞性。

一、密度、重度和单位换算

(一) 密度与比重

任何物体都有质量，因此对于任何改变它的运动状态的作用都显示出惯性，惯性的度量就是质量，质量越大则惯性越大。

1. 密度

对于均质流体来说, 单位体积内所具有的质量称为密度, 即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

式中 m ——流体的质量 (kg);

V ——流体的体积 (m^3);

ρ ——流体的密度 (kg/m^3)。

2. 比容

对于均质流体, 单位质量流体所具有的体积称为比容, 即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-2)$$

比容和密度互为倒数, 其单位是 m^3/kg 。

(二) 重度

地球上的任何物体都在地心引力作用之下, 具有质量的流体也都具有重量, 重量的度量可以用单位体积流体所具有的重量即重度来表示, 对于均质流体, 重度等于流体重量与体积的比值, 即

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

式中 G ——流体的重量 (N);

V ——流体的体积 (m^3);

γ ——流体的重度 (N/m^3)。

(三) 密度、重度和比容之间的关系

根据牛顿第二定律可知: 重量等于质量与重力加速度之乘积, 即 $G=mg$, 此式的两边除以体积 V , 则

$$\frac{G}{V} = \frac{mg}{V}$$

或

$$\gamma = \rho g = \frac{g}{v} \quad (1-4)$$

式中 g ——重力加速度, 其值为 9.81m/s^2 。

在工程流体力学计算中, 水的密度通常以 4°C 蒸馏水的密度来代替, 即

$$\rho = 1000\text{kg/m}^3$$

$$\gamma = \rho g = 9810\text{N/m}^3$$

对于温度为 20°C , 压力为 0.098MPa 状态下的空气, 密度、比容、重度为

$$\rho = 1.2\text{kg/m}^3$$

$$v = \frac{1}{1.2} = 0.834 \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$\gamma = 1.2 \times 9.81 = 11.75 \quad (\text{N/m}^3)$$

表 1-1 中列举了工程中几种常见流体的密度。

表 1-1

几种常见流体的密度 (0.098MPa 下)

液 体	ρ (kg/m ³)	t (°C)	气 体	ρ (kg/m ³)	t (°C)
水	1000	4	空气	1.293	0
铜合金	8200	1000	氧	1.429	0
水银	13600	0	氢	0.0899	0
钢	7200	1550	一氧化碳	1.250	0
酒精	789	20	二氧化碳	1.976	0
熔化生铁	6800~7000	1200~1280	氯	3.217	0
润滑油 (矿)	900~930	15	氨	0.179	0
重油	890~940	15	氮	2.927	0
铝合金	2600	720~810	二氧化硫	1.251	0

流体的密度和重度不仅随流体种类而异,而且随流体的温度和压力而变,因为流体压力和温度变化的同时,流体的体积也要随之而变。对液体来说重度和密度受温度变化的影响不大,因此可以近似地认为液体的重度和密度是常数。但对气体来讲,压力和温度对重度和密度的影响就较大。

(四) 单位制换算

虽然目前已广泛采用国际单位制,但在不少厂家使用的有关技术数据和许多物理参数、图表中仍旧采用了绝对单位制或工程单位制。下面将上述三种单位制中的一些物理量单位及其相互换算关系列在表 1-2 中,以便对照使用。

表 1-2

不同单位制的单位及相互换算关系

物理量	国 际 单 位 制			绝对单位制	工程单位制	三种单位制换算关系 1(国际单位)= x (绝对单位)= y (工程单位)
	中文代号	国际代号	用基本单位表示			
长度 L	米	m	m	厘米	米	1 米=100 厘米=1 米
质量 m	千克	kg	kg	克	公斤力·秒 ² /米	1 千克=10 ³ 克 = $\frac{1}{9.81}$ 公斤力·秒 ² /米
时间 t	秒	s	s	秒	秒	1 秒=1 秒=1 秒
力 F	牛	N	m·kg·s ⁻²	达因	公斤力	1 牛=10 ⁵ 达因= $\frac{1}{9.81}$ 公斤力
密度 ρ	千克/米 ³	kg/m ³	m ⁻³ ·kg	克/厘米 ³	公斤力·秒 ² /米 ⁴	1 $\frac{\text{千克}}{\text{米}^3}$ =10 ⁻³ $\frac{\text{克}}{\text{厘米}^3}$ = $\frac{1}{9.81}$ $\frac{\text{公斤力} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$
比容 v	米 ³ /千克	m ³ /kg	m ³ ·kg ⁻¹	厘米 ³ /克	米 ³ /公斤力	1 $\frac{\text{米}^3}{\text{千克}}$ =10 ³ $\frac{\text{厘米}^3}{\text{克}}$ = $9.81 \frac{\text{米}^3}{\text{公斤力}}$
重度 γ	牛/米 ³	N/m ³	m ⁻² ·kg·s ⁻²	达因/厘米 ³	公斤力/米 ³	1 $\frac{\text{牛}}{\text{米}^3}$ =10 ⁻¹ $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^3}$ = $\frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力}}{\text{米}^3}$
压力 p	帕= $\frac{\text{牛}}{\text{米}^2}$	Pa=N/m ²	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²	达因/厘米 ²	公斤力/米 ²	1 帕=10 ⁻¹ $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2}$ = $\frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力}}{\text{米}^2}$

续表 1-2

物理量	国际单位制			绝对单位制	工程单位制	三种单位制换算关系 1(国际单位)=x(绝对单位)=y(工程单位)
	中文代号	国际代号	用基本单位表示			
动力粘性系数 μ	帕·秒= $\frac{\text{牛}}{\text{米}^2} \cdot \text{秒}$	Pa·s $= \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	泊= $\frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2} \cdot \text{秒}$	$\frac{\text{公斤力}}{\text{米}^2} \cdot \text{秒}$	1 帕·秒=10 泊 $= \frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力}}{\text{米}^2} \cdot \text{秒}$
运动粘性系数 ν	米 ² /秒	m ² /s	m ² ·s ⁻¹	斯=厘米 ² /秒	米 ² /秒	1 米 ² /秒=10 ⁴ 斯=1 米 ² /秒
功 W	焦=牛·米	J=N·m	m ² ·kg·s ⁻²	尔格= 达因·厘米	公斤力·米	1 焦=1 牛·米=10 ⁷ 达因·厘米 $= \frac{1}{9.81} \text{公斤力} \cdot \text{米}$
功率 P	瓦=焦/秒	W=J/s	m ² ·kg·s ⁻³	尔格= 达因·厘米 秒	公斤力·米/秒	1 瓦=1 $\frac{\text{焦}}{\text{秒}} = 10^7 \frac{\text{达因} \cdot \text{厘米}}{\text{秒}}$ $= \frac{1}{9.81} \frac{\text{公斤力} \cdot \text{米}}{\text{秒}}$

二、压缩性与膨胀性

当温度维持不变, 流体承受的压力增大时, 流体的体积会缩小的性质称为流体的压缩性。压力维持不变, 温度升高, 流体的体积会增大的性质称为流体的膨胀性。在这两种性质上, 液体和气体的差别很大。

(一) 液体的压缩性与膨胀性

1. 液体的压缩性

液体的压缩性通常用体积压缩系数 β_p 来表示, 压缩系数是表示当温度不变时, 增加一个单位压力时所发生的体积相对变化量, 即

$$\beta_p = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} \quad (1-5)$$

式中 V ——原有体积 (m³);

ΔV ——体积改变量 (m³);

Δp ——压力增加量 (MPa);

β_p ——体积压缩系数 [(MPa)⁻¹].

因 Δp 与 ΔV 的变化相反, 即压力增加时体积减小, 故上式加一负号, 使 β_p 永为正值。以水在℃时的情况为例, 压力为 0.49MPa 时, 其体积压缩系数 $\beta_p = 0.529 \times 10^{-4} = \frac{0.529}{10000}$ [(MPa)⁻¹], 这表明压力每增高 0.1MPa, 水的体积只改变约万分之零点五。其它液体的压缩性也很小, 因此在工程上可认为液体是不可压缩的, 即认为液体的密度为常数, 从而可以简化对液体运动的研究。

但在研究管道水锤和水下爆炸现象时, 由于瞬间压力升高得很多, 可引起液体体积明显变化, 此时必须考虑液体的压缩性。

2. 液体的膨胀性

液体的膨胀性可用温度膨胀系数 β_t 来表示, 膨胀系数是指当压力保持不变温度升高 1K 时单位体积流体的体积增加量, 即

$$\beta_t = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} \quad (1-6)$$

式中 β_t ——体积膨胀系数 (K^{-1});

ΔT ——流体温度增加值 (K)。

液体的膨胀性是很小的,例如在 0.098MPa 和温度较低的情况下 ($10 \sim 20^\circ C$), $\beta_t = 150 \times 10^{-6} (^\circ C^{-1})$, 即温度每升高 $1^\circ C$, 水的体积只改变万分之一点五左右, 因此在工程上除了部分供热系统外, 膨胀性也是可以不加考虑的, 对于其它液体也如此。

(二) 气体的压缩性和膨胀性

温度与压力的改变, 对气体体积变化影响很大。从物理学中理想气体的状态方程 $PV = RT$ 中看出, 当温度 T 不变时, 气体比容 v 与压力 p 成反比; 当压力不变时, 温度与比容成正比。

气体虽然可以压缩和膨胀, 但有时气体在压力和温度不变或变化很小的情况下, 密度、重度仍可看作常数。

所以说在一般情况下, 流体的压缩系数和膨胀系数都很小, 对于能够忽略其压缩性的流体, 称之为不可压缩流体, 其密度及重度都看成常数。反之流体的压缩系数及膨胀系数比较大的流体, 其密度和重度不能看成常数, 这种流体称为可压缩流体。

通常当气体的流速不高 (小于 50m/s) 或运动过程压力温度变化不大 (相对压力小于 10kPa) 时, 可以将这种气体当作不可压缩气体对待。

【例 1-1】 压力表校正器如图 1-1 所示, 校正器内充满油液, 其体积压缩系数为 $\beta_p = 48.47 \times 10^{-6} (MPa)^{-1}$, 由密封良好的活塞旋进压缩油液, 造成鉴定压力表所需的压力。活塞直径 $D = 1cm$, 螺距 $t = 2mm$, 在 0.098MPa 下, 器内充油体积 $V = 200cm^3$, 当校正器须造成 19.8MPa 的压力时, 求手轮须旋进多少转?

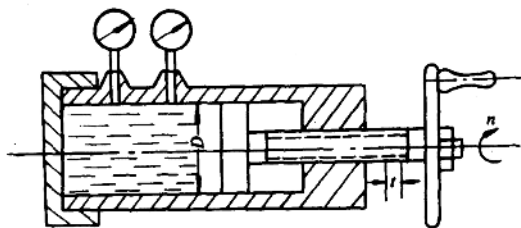


图 1-1 压力表校正器

解: 先求出油液需要减少的体积, 即

$$\Delta V = -\beta_p V \Delta p$$

手轮旋进 n 转时, 使油液减少的体积为

$$\Delta V' = V_1 - V_2 = -\frac{\pi}{4} D^2 t n$$

$\Delta V = \Delta V'$ 时即能形成 Δp 压力, 故得

$$\frac{\pi}{4} D^2 t n = \beta_p V \Delta p$$

则所需旋进转数为

$$n = \frac{4\beta_p V \Delta p}{\pi D^2 t} = \frac{4 \times 48.47 \times 10^{-6} \times (19.8 - 0.098)}{3.14 \times 1^2 \times 0.2} = 12.1 \text{ (转)}$$

三、粘滞性

流体流动时, 在流体层间产生内摩擦力的特性, 称为流体粘滞性。

(一) 牛顿内摩擦定律

先观察如图 1-2 所示的实验。

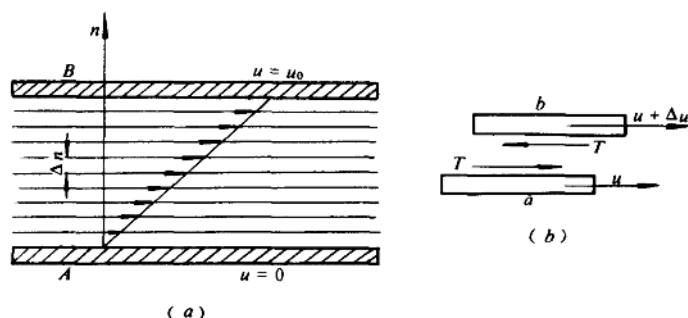


图 1-2 流体粘滞性实验

在两平行平板 (长度与宽度足够大) A 和 B 之间充满流体, 拉动 B 板并以速度 u_0 向右移动时, B 板上流体附着层的速度 $u = u_0$, 因 A 板不动, 所以附着在 A 板上的流体附着层速度 $u = 0$, AB 板之间流体沿 n 方向的速度变化规律是线性的 [见图 1-2 (a)]。

设整个流体由无数个独立流体微层组成, 在其中取 a 、 b 两层 [见图 1-2 (b)], 假定其流速分别为 $u + \Delta u$ 及 u , b 层在 a 层之上以 Δu 的速度滑动, 这样必产生一对力, 即 b 层对 a 层的拖力和 a 层对 b 层的反作用力。后者对于速度较快的 b 层是一个阻力, 拖力和阻力大小相等方向相反, 分别作用在两个微层的表面上。通常把这一对力称为内摩擦力 (或粘滞力)。

若以 F 表示流体的总内摩擦力, 大量实验证明, 这个力与平板 B 的速度成正比, 与两平板间的距离成反比, 即

$$F = \mu \frac{u}{n} A \quad (1-7)$$

式中 F ——内摩擦力 (N);

u ——平板移动速度 (m/s);

n ——运动平板与静止平板间的垂直距离 (m);

A ——流体平板的接触面积 (m^2);

μ ——动力粘滞系数 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。

两平板间的任意两流体层之间的内摩擦力为

$$F = \mu \frac{\Delta u}{\Delta n} A \quad (1-8)$$

式中 Δu ——两层流体之间的速度差 (m/s);

Δn ——两层流体之间的距离 (m)。

如果流体层的速度变化是非线性的, 则式 (1-8) 可写成

$$F = \mu \frac{du}{dn} A \quad (1-9)$$

单位面积上的内摩擦力应为

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} \quad (1-10)$$

$\frac{du}{dn}$ 称为速度梯度，即在流动的法线方向单位距离的速度变化，式(1-9)、(1-10)即为牛顿内摩擦定律，它的物理意义是流体内部摩擦力的与流体的性质有关，与流体的速度梯度和接触面成正比。

(二) 粘滞系数 μ

1. 动力粘滞系数

式(1-10)又可写成

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

μ 的物理意义是：当速度梯度为1单位时，流体单位接触面积上的内摩擦力的大小。可见 μ 是与流体性质有关的比例系数，称为动力粘滞系数，其单位为“泊”，即

$$1 \text{ 泊 (P)} = 10^{-1} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

2. 运动粘滞系数

由于影响流体运动的因素除了内摩擦大小外，还与流体密度有关，故工程上把动力粘滞系数与密度的比值称为运动粘滞系数，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

ν 的单位为斯托克斯简称斯，即

$$1 \text{ 斯 (St)} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

温度对流体粘滞系数影响很大，温度升高粘滞系数降低，流动性增加。这对发电厂中锅炉用重油的输送和雾化起有利作用。但对汽轮机和其它转动机械的轴承润滑油，当油温太高时，由于润滑油的粘滞性降低会妨碍轴承油膜的形成。

气体则相反，温度升高时它的粘滞系数增大。

实验证明，压力对动力粘度的影响很小，而运动粘度由于与密度有关。对可压缩流体，它与压力密切相关；对于不可压缩的流体，视流体密度为常数，故压力对粘滞系数的影响可以忽略。

(三) 理想流体和实际流体

在自然界里，所有实际存在的流体都具有粘滞性，称之为实际流体。假定有完全没有粘滞性的流体，则称之为理想流体，这是一种假想的流体。理想流体运动时，不产生内摩擦力。引入理想流体的概念是为了简化对流体运动规律的研究，因为流体粘滞性问题十分复杂，影响因素很多，故可先研究理想流体运动规律，得出主要结论以后，再对结论进行实验修正，从而得到实际流体运动规律。实践证明这是一种行之有效的研究方法。

此外在许多研究中，粘滞性影响并不大，因此实际流体在一定条件下可当作理想流体处理。

第二章 液体静力学基础

液体静力学研究液体在外力作用下静止平衡规律,以及这些规律在工程实践中的应用。

由于液体处于平衡状态时没有内摩擦力,粘滞性将不起作用。因此,本章所讨论的结论,对理想液体和实际液体都同样适用。

液体静力学基本方程式研究了液体的压力、密度、深度之间的关系,应用这一静力学的重要关系,解决了连通器的平衡问题。液体静压力测量原理,为热工测量提供了重要的理论依据。

第一节 液体静压力及其特性

一、作用在液体上的力

液体的平衡状态,不单指所谓静止状态,凡是液体层与层之间以及液体与固体接触面之间没有相对运动就称为平衡状态,要研究液体的平衡状态,就必须分析作用在液体上的力。

作用在液体上的力可分为两类:表面力和质量力(体积力)。

(一) 表面力

表面力是指作用在液体体积表面上的力。表面力可以是作用在液体外表面上的外力,如活塞对水的压力或大气对水面的压力;也可以是作用在液体内部任一表面的内力。内力是由于液体质点之间相互作用而产生的,一种是与液体表面相垂直的法向力,另一种是与液体表面相切的切向力,液体粘滞性所引起的内摩擦力就是切向力。对于静止的理想液体,不存在粘滞性,无切向力。

(二) 质量力

质量力是指作用在液体内部每一个质点上的力。它的大小与液体的质量成正比。质量力有两种,即重力及惯性力。重力是地球对液体的引力,惯性力是由液体作直线加速运动和作曲线运动所引起的。

在流体力学的研究中常采用“微元分析法”来分析受力情况,即从流体中取出一个微小的流体体积来分析这个微元体受力平衡和运动,得出基本规律后,再应用到整个流体中去。

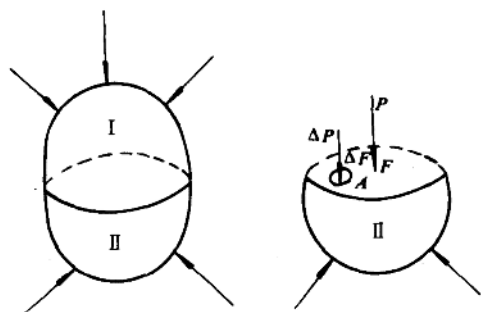


图 2-1 静止流体中的分离体

二、液体静压力及其特性

为说明液体静压力,可观察在若干外力作用下,处于平衡状态下的一个任意形状的流体分离体,如图 2-1 中所示,将分离体分成 I 和 II 两部分。取下分离体 I 来分析分离体 II 的受力情况,显然欲使 II 部分继续保持平衡,则必须在 F 平面上加一个力 P,来代替 I 部分对 II 部分的作用。P 即称为作用在任意面积 F 上的液

体总静压力。单位面积上所受的液体压力 P/F ，称为液体平均静压力。

若要求出 F 面上 A 点的静压力，则应在 A 点附近取一个微小面积 ΔF ，则 $\Delta P/\Delta F$ 称为面积 ΔA 上的液体平均静压力，当面积 ΔF 趋于零时，就接近于 A 点的真实压力，也就是说 $\Delta P/\Delta F$ 的极限就称为 A 点的流体静压力，即

$$p = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (2-1)$$

因此可以定义液体单位面积上所受到垂直于该表面上的力为液体的静压力。它的单位为牛顿/米²，称为帕斯卡，简称“帕”，代号为“Pa”，则

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$$

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

液体静压力具有如下两个特性：

(1) 第一特性。液体静压力的方向和作用面垂直，并指向作用面，即沿着作用面的内法线方向。

这一特性可用反证法来证明，如图 2-2 所示。在静止液体中，假定某微小面积 ΔF 上的作用力 p ，不与该作用面垂直，则可将 p 分解为两个力，一个是与作用面垂直的力 p_1 ，一个是和作用面相切的力 p_2 。若 p_2 存在，则势必引起流体的流动，这与流体处于静止状态的假设不符，因此 p_2 只可能等于零，静压力方向必定是垂直于作用面的。根据液体不能承受拉力的重要特性可以得出 p 的方向只能是沿作用表面的内法线方向。

(2) 第二特性。液体内任意一点的各个方向的液体静压力均相等。

如果作用于某点上的液体静压力在各个方向不相等，则势必会使液体质点发生流动，而不可能处于静止状态，所以对于静止液体中任意一点，在各个方向的静压力均相等。

根据这一特性，当需要测量流体中某一点的静压力时，可以不必选择方向，只须在该点确定的位置上进行测量便可。

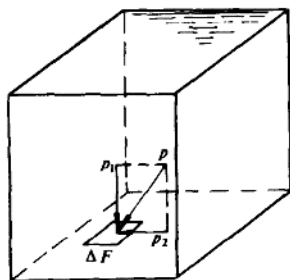


图 2-2 液体静压力的作用方向

第二节 液体静压力的基本方程式

一、静压力基本方程式

这里研究静止液体中压力分布及任意一点静压力的计算方法。

图 2-3 为静止液体中的一个直立棱柱体，其底为液面下的一极小水平面 ΔF ，所研究的任意点 A 位于其上，棱柱高度为 h ，液面上的压力为 p_0 。由于液体为静止状态，根据平衡条件有：

(1) 在水平方向上，液柱左右两侧面上的压力互相平衡，前后两个侧面上的压力互相平衡，否则液柱会移动。

(2) 在垂直方向上的力有：作用在底面积上，

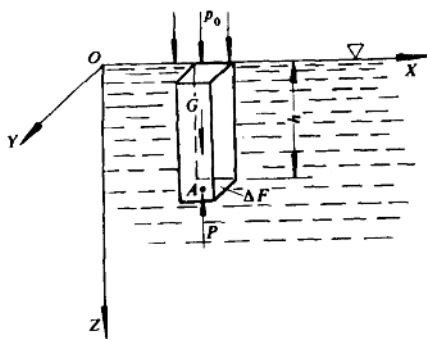


图 2-3 静止液体的直立棱柱体

自下而上的总压力 P ；作用在顶面积上自上而下的压力 $p_0\Delta F$ ；棱柱体的重力 $G=\gamma h\Delta F$ 。在重力作用下，静止棱柱体所有的垂直分力的合力应为零，即

$$p_0\Delta F + \rho gh\Delta F - P = 0$$

或

$$P = p_0\Delta F + \rho gh\Delta F$$

$$\frac{P}{\Delta F} = p_0 + \rho gh$$

取极限求出静止液体任意点 A 的压力

$$\lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta F} = p_0 + \rho gh$$

因为

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

故

$$P = p_0 + \rho gh \quad (2-2)$$

上式即称为液体静力学基本方程式。由该式可以看出：

(1) 在重力作用下的液体内部的压力 P 随深度 h 按直线关系变化，作用点的位置 h 越深，则静压力 P 就越大。

(2) 在重力作用下液体中深度 h 相同的各点静压力相同，即是说等压面是一个水平面。

(3) 液体中任意一点的压力由 p_0 和 ρgh 两部分组成， p_0 称自由表面的液体静压力， ρgh 称为剩余压力， P 即为液体绝对静压力。当液体的密度 ρ 值一定时， h 便成为测量相对压力（或压差）的一种尺度，工程中常用液柱高度作为测量压力的单位，用上述原理来制造测压器。

二、液体内压力的表示方法

式 (2-2) 中若液体自由表面的压力为大气压力 $p_0 = p_a$ ，则可改写为

$$P = p_a + \rho gh$$

$$P - p_a = \rho gh = p_{\text{表}} \quad (\text{Pa}) \quad (2-3)$$

式中 P ——液体的绝对压力 (Pa)；

p_a ——当地大气压力 (Pa)；

$p_{\text{表}}$ ——液体的相对压力，又称表压力 (Pa)。

为此，从不同的基准，就产生了绝对压力、相对压力、真空度的概念。

(一) 绝对压力

液体压力以绝对真空为零点起算，这个压力值称为绝对压力

$$\begin{aligned} p_{\text{绝}} &= p_a + \rho gh \\ &= p_a + p_{\text{表}} \end{aligned} \quad (2-4)$$

(二) 相对压力

以大气压力为零点起算的压力值称为相对压力。

$$p_{\text{表}} = p_{\text{绝}} - p_a = \rho gh \quad (2-5)$$