

# 流体力学与热工基础

---

主 编 李国斌 崔 红

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 流体力学与热工基础

主 编 李国斌 崔 红

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 提 要

本书根据高等院校课程改革与人才培养目标的要求,并结合多年教学的经验编写而成。全书共分为三篇:第一篇流体力学,包括流体的基本知识、流体静力学、流体动力学、阻力损失与管路计算;第二篇工程热力学,包括工质及理想气体、热力学第一定律、气体的热力过程、热力学第二定律、水蒸气、湿空气;第三篇传热学,包括传热学概述、稳态导热、对流换热、辐射换热、传热及传热的增强和削弱。

本书可作为高等院校热工控制及自动化、电厂化学、热工测量仪表、建筑环境与设备工程、环境工程等专业教材,也可作为能源动力类短训班、培训班教材和工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学与热工基础/李国斌,崔红主编.—北京:北京理工大学出版社,2016.9

ISBN 978-7-5682-3060-5

I.①流… II.①李… ②崔… III.①流体力学—高等学校—教材 ②热工学—高等学校—教材 IV.①O35 ②TK122

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第209791号

---

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

(010) 82562903(教材售后服务热线)

(010) 68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京紫瑞利印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/13.5

字 数/294千字

版 次/2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷

定 价/44.00元

责任编辑/钟 博

文案编辑/钟 博

责任校对/周瑞红

责任印制/边心超

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 前 言

“流体力学与热工基础”是供热通风与空气调节工程、建筑水电设备及燃气工程等专业的的主要理论基础课，是从事建筑设备类专业的技术人员必须掌握的基础理论知识。本教材在编写前广泛听取了教学第一线的有关教师和学生的意见，以高等院校课程改革的实践为基础，在内容安排上既考虑相对的独立性，又考虑知识的先后照应关系；在内容论述上，以“适度、够用”为原则，充分考虑适当的深度，做到层次分明、重点突出，使知识易于学习掌握，力求培养学生良好的理论基础。本教材内容精练，条理清楚，在内容的表述中注意文字简练易懂、技术语言规范。每章配有学习目标、本章小结、思考与练习，能够帮助学生突出学习重点，加深内容理解，培养分析问题和解决问题的能力。

本教材包括流体力学、工程热力学和传热学三部分内容。其中，流体力学部分40学时，工程热力学部分66学时，传热学部分42学时，能够满足热工控制及自动化、电厂化学、热工测量仪表、建筑环境与设备工程、环境工程等专业人才培养的需要。

本教材由李国斌、崔红共同编写。具体编写分工为：第一篇流体力学由崔红编写，第二篇工程热力学由李国斌编写，第三篇传热学的第十一、十二、十三章由李国斌编写，第十四、十五章由崔红编写，全书由李国斌进行统稿。

由于编写水平所限，加之时间仓促，书中难免有疏漏或不足之处，敬请广大读者指正。

编 者

# 目 录

<b>第一篇 流体力学</b>	
<b>第一章 流体的基本知识</b> ..... 1	<b>第三章 流体动力学</b> ..... 15
<b>第一节 流体的主要力学性质</b> ..... 1	<b>第一节 描述流体运动的基本概念</b> ..... 15
一、密度和容重..... 2	一、压力流与无压流..... 15
二、压缩性和热胀性..... 2	二、恒定流与非恒定流..... 15
三、黏滞性..... 3	三、流线和迹线..... 16
<b>第二节 作用在流体上的力</b> ..... 5	四、元流和总流..... 16
一、质量力..... 5	五、过流断面、流量和断面平均 流速..... 16
二、表面力..... 5	六、均匀流与非均匀流..... 17
<b>第二章 流体静力学</b> ..... 7	<b>第二节 恒定流连续性方程</b> ..... 17
<b>第一节 流体静压强及其特性</b> ..... 7	<b>第三节 恒定流能量方程</b> ..... 19
一、流体静压强的定义和单位..... 7	<b>第四节 能量方程的应用</b> ..... 20
二、压强的两种计算基准..... 7	一、应用条件..... 20
三、流体静压强的特性..... 8	二、应用能量方程的注意事项..... 21
<b>第二节 流体静压强的分布规律</b> ..... 8	三、能量方程在流速和流量测量中 的应用..... 22
一、液体静压强的基本方程..... 8	<b>第五节 恒定气流能量方程</b> ..... 24
二、等压面..... 10	<b>第四章 阻力损失与管路计算</b> ..... 27
<b>第三节 液柱式测压计</b> ..... 11	<b>第一节 流动阻力与能量损失</b> ..... 27
一、测压管..... 11	<b>第二节 流体流动的两种流态</b> ..... 28
二、压差计..... 11	一、雷诺试验..... 28
三、微压计..... 12	二、流态的判别..... 29

第三节 沿程损失的计算	30	第六章 热力学第一定律	58
一、圆管流的沿程损失	30	第一节 热力过程	58
二、非圆管流的沿程损失	31	一、准静态过程	58
第四节 局部损失的计算	33	二、可逆过程	59
第五节 简单管路的计算	36	第二节 系统储存能	60
一、短管的计算	36	一、内能	60
二、长管的计算	38	二、外部储存能	60
第六节 串联与并联管路的计算	38	三、系统储存能	61
一、串联管路	38	第三节 系统与外界传递的能量	61
二、并联管路	39	一、功量	61
		二、热量	63
		第四节 第一定律闭口系统能量方程	63
		第五节 第一定律开口系统能量方程	66
		一、通过开口系统边界的能量传递	66
		二、开口系统能量方程	67
		三、焓的物理意义及计算	69
		第六节 开口系统稳定流动能量方程	
		及应用	70
		一、稳定流动能量方程	70
		二、技术功	71
		三、稳定流动能量方程的应用	72
		第七章 气体的热力过程	77
		第一节 气体的基本热力过程	77
		一、定容过程	77
		二、定压过程	79
		三、定温过程	80
		四、绝热过程	81
		第二节 气体的多变热力过程	85
		一、多变热力过程方程	85
		二、多变热力过程分析	86
<b>第二篇 工程热力学</b>			
第五章 工质及理想气体	43		
第一节 工质及其基本状态参数	43		
一、工质的热力状态	43		
二、基本状态参数	44		
第二节 平衡状态及状态方程	46		
一、热力系统	46		
二、平衡状态	47		
三、状态方程	47		
第三节 理想气体状态方程	48		
一、理想气体与实际气体	48		
二、理想气体状态方程	49		
第四节 理想气体的比热容	51		
一、比热容的定义	51		
二、比定容热容与比定压热容	52		
三、真实比热容与平均比热容	53		
四、定值比热容	54		

第八章 热力学第二定律·····	90	第三节 湿空气的基本热力过程·····	116
第一节 热力循环·····	90	一、加热过程·····	116
一、动力循环·····	90	二、冷却过程·····	116
二、逆循环·····	91	三、加湿过程·····	117
第二节 热力学第二定律的实质及		四、绝热混合过程·····	119
表述·····	92		
一、热过程的方向性与不可逆性·····	92		
二、热力学第二定律的两种表述·····	93		
第三节 卡诺循环与卡诺定理·····	93		
一、卡诺循环·····	94		
二、逆卡诺循环·····	94		
三、卡诺定理·····	95		
第九章 水蒸气·····	99		
第一节 水蒸气的产生·····	99		
一、液体的汽化·····	99		
二、水蒸气的定压发生过程·····	100		
第二节 水蒸气表及焓熵图·····	102		
一、水和水蒸气表·····	103		
二、水蒸气的焓熵图( $h-s$ )·····	103		
第十章 湿空气·····	106		
第一节 湿空气的状态参数·····	106		
一、温度和压力·····	106		
二、绝对湿度、相对湿度、含湿量·····	107		
三、焓·····	109		
四、密度·····	109		
五、露点温度和湿球温度·····	110		
第二节 湿空气的焓湿图·····	112		
一、 $h-d$ 图的构成及绘制原理·····	112		
二、 $h-d$ 图的应用·····	114		
		第三篇 传热学	
		第十一章 传热学概述·····	122
		一、传热学的研究对象与研究方法·····	122
		二、热量传递的基本方式·····	122
		第十二章 稳态导热·····	124
		第一节 导热的基本概念·····	124
		一、温度场·····	124
		二、等温面与等温线·····	125
		三、温度梯度·····	125
		第二节 导热的基本定律·····	126
		第三节 导热系数·····	126
		一、导热系数的定义·····	126
		二、导热系数的影响因素·····	127
		第四节 通过平壁的导热·····	129
		一、通过单层平壁导热·····	129
		二、通过多层平壁导热·····	130
		第五节 通过圆筒壁的导热·····	132
		一、通过单层圆筒壁导热·····	132
		二、通过多层圆筒壁导热·····	133
		第十三章 对流换热·····	137
		第一节 对流换热概述·····	137
		一、对流换热过程的特点·····	137

二、影响对流换热的因素·····	137	九、定向辐射力·····	159
三、表面传热系数·····	139	十、吸收、反射和透射·····	159
第二节 相似理论及其在对流换热中 的应用·····	139	十一、黑体、白体和透明体·····	160
一、相似概念·····	140	第二节 辐射的基本定律·····	161
二、相似准则·····	140	一、普朗克定律·····	161
三、相似定理·····	142	二、维恩(位移)定律·····	161
四、相似理论在对流换热中的应用·····	142	三、斯蒂芬-玻尔兹曼定律·····	162
第三节 自然对流换热·····	143	四、兰贝特余弦定律·····	164
一、无限空间中的自然对流换热·····	143	五、基尔霍夫定律·····	166
二、有限空间中的自然对流换热·····	144	第三节 物体表面之间的辐射换热·····	166
第四节 管内受迫流动换热·····	146	一、有效辐射·····	167
一、流体在管内流动的特征·····	146	二、两平行平壁之间的辐射换热·····	167
二、流体在层流时的换热·····	148	三、密闭空间内的物体与周围壁面 之间的辐射换热·····	168
三、流体在过渡状态时的换热·····	148	四、任意位置两物体之间的辐射换热·····	170
四、流体在紊流时的换热·····	149	五、辐射隔热·····	172
第五节 流体在圆管外横向流过时的 换热·····	150	第十五章 传热及传热的增强和削弱·····	175
一、外掠单管·····	150	第一节 通过平壁及圆筒壁的传热·····	175
二、外掠光滑管束·····	151	一、通过平壁的传热·····	175
第十四章 辐射换热·····	156	二、通过圆筒壁的传热·····	177
第一节 基本概念·····	156	第二节 通过肋壁的传热·····	179
一、辐射·····	156	第三节 传热的增强和削弱·····	181
二、热射线·····	156	一、增强传热的基本途径·····	181
三、热辐射·····	157	二、增强传热的方法·····	182
四、辐射换热·····	157	三、削弱传热的方法·····	182
五、辐射强度·····	158	附录·····	185
六、单色辐射强度·····	158	参考文献·····	208
七、辐射力·····	158		
八、单色辐射力·····	158		



# 第一篇 流体力学

## 第一章 流体的基本知识

### 学习目标

了解流体力学的研究对象、内容及应用；掌握流体的主要力学性质和作用在流体上的力。

流体力学是力学的一个分支，其任务是研究流体静止和运动时的宏观力学规律，并运用这些规律解决工程技术中的问题。

流体力学的研究对象是流体。流体包括液体和气体。流体力学由两个基本部分组成：一是研究流体静止规律的流体静力学；二是研究流体运动规律的流体动力学。

流体力学是建筑设备工程技术、供热通风与空调和燃气工程等专业的一门重要的专业基础课程。水的输送、热的供应、空气的调节、燃气的输配等，都是以流体作为工作介质，通过流体的各种物理作用，对流体的流动有效地加以组织来实现的。因此，只有学好流体力学，才能对专业中的流体力学现象作出科学的定性分析及精确的定量计算，才能正确地解决工程中所遇到的流体力学方面的测试、运行、管理和设计计算等问题。

### 第一节 流体的主要力学性质

为了研究流体的静止和运动规律，首先必须了解流体本身所固有的特征和主要的力学性质。

在生产和生活中，我们看到很多流体流动的现象，例如，水在江河中流动、自来水从水龙头流出、燃气从喷口喷出等。这些现象表明了流体不同于固体的最基本的特性，就是它的流动性。

固体具有抗拉、抗压、抗切的能力。要将某一固体拉裂、压碎或切断，必须施加足够的外力，否则是拉不裂、压不碎、切不断的。但是流体则大不相同，要分裂或切断水体，几乎不用费什么力气，这说明流体抗拉能力极弱，抗切能力也很微小。静止的流体只要受到微小的切力作用就会发生不断的变形，各质点之间发生不断的相对运动。流体的这一特性就被称为流动性。这也是流体便于用管道、渠道进行输送，适宜作为工作介质的主要原因。

下面介绍与流体运动有关的几个物理性质。

## 一、密度和容重

### 1. 密度

流体的惯性可用密度来表征。对于均质流体，单位体积的质量称为密度，用  $\rho$  表示。

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

式中  $\rho$ ——流体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$M$ ——流体的质量( $\text{kg}$ )；

$V$ ——质量为  $M$  的流体的体积( $\text{m}^3$ )。

### 2. 容重

流体的重力特性常用容重来表征。对于均质流体，作用于单位体积流体的重力称为容重，用  $\gamma$  表示。

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

式中  $\gamma$ ——流体的容重( $\text{N}/\text{m}^3$ )；

$G$ ——流体所受的重力( $\text{N}$ )；

$V$ ——重力为  $G$  的流体的体积( $\text{m}^3$ )。

由于重力是质量和重力加速度  $g$  的乘积，即  $G=Mg$ ，所以，密度和容重的关系为

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

常见流体的密度及容重见表 1-1。

表 1-1 常见流体的密度及容重

流体名称		密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	容重 $/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	测定条件	
				温度/ $^{\circ}\text{C}$	气压/ $\text{mmHg}$
液体	煤油	800~850	7 848~8 338	15	760
	纯乙醇	790	7 745	15	
	水	1 000	9 807	4	
	水银	13 590	133 318	0	
气体	氮	1.250 5	12.267 4	0	760
	氧	1.429 0	14.018 5		
	空气	1.292 0	12.682 4		
	一氧化碳	1.976 8	19.392 4		

## 二、压缩性和热胀性

流体在压力的作用下，改变自身体积的特性称为压缩性。流体在温度的作用下，改变自身体积的特性称为热胀性。

### 1. 液体的压缩性和热胀性

液体的压缩性一般用压缩系数  $\beta$  来表示。压缩系数是指压强变化 1 Pa 时，液体体积或密度的相对变化率。

$$\beta = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} = -\frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta p} \quad (1-4)$$

式中  $\beta$ ——流体的压缩系数( $\text{m}^2/\text{N}$ )；

$\Delta p$ ——压强的变化量(Pa)；

$V$ ——流体的原有体积( $\text{m}^3$ )；

$\Delta V$ ——流体体积的变化量( $\text{m}^3$ )；

$\rho$ ——流体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$\Delta \rho$ ——流体密度的变化量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

液体的热胀性一般用热胀系数  $\alpha$  来表示。热胀系数是指温度变化 1 K( $^{\circ}\text{C}$ ) 时，液体体积或密度的相对变化率。

$$\alpha = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = -\frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta T} \quad (1-5)$$

式中  $\alpha$ ——流体的热胀系数[1/K( $1/^{\circ}\text{C}$ )]；

$\Delta T$ ——温度的变化量[K( $^{\circ}\text{C}$ )]。

液体的压缩性和热胀性都很小，一般情况下可忽略不计。只有在某些特殊情况下，例如水击、热水采暖等问题，才需要考虑水的压缩性和热胀性。

### 2. 气体的压缩性和热胀性

气体与液体不同，其具有显著的压缩性和热胀性。压强和温度的变化对气体的密度或容重影响很大。在压强不是很高、温度不是很低的条件下，气体的压缩性和热胀性可以用理想气体状态方程来描述。

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-6)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压强(Pa)；

$T$ ——气体的热力学温度(K)；

$\rho$ ——气体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$R$ ——气体常数[J/(kg·K)]。其数值与气体的种类有关，与气体的状态无关。

上式表明，在定温条件下，气体的密度与压强成正比；在定压条件下，气体的密度与温度成反比。

气体虽然是可以压缩和热胀的，但如果气体在流动过程中压强和温度的变化较小，其密度仍然可以视为常数，这种气体称为不可压缩气体。在供热通风工程中，所遇到的大多数气体可以当作不可压缩气体来看待。

## 三、黏滞性

流体内部质点或流层间因相对运动而产生内摩擦力以抵抗相对运动的性质称为黏滞性。

图 1-1 所示为流体在圆管中流动时的流速分布图。

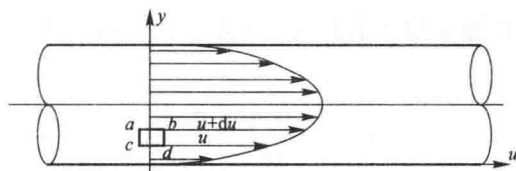


图 1-1 流体在圆管中流动时的流速分布图

当流体在管道内流动时，紧贴管壁的流体质点附着在管壁上，其流速为零。管轴心处的流体质点受管壁的影响最小，速度最大。从管壁到轴心，流体速度逐渐增加，形成了抛物线形的速度分布。

牛顿通过大量的试验研究，提出了牛顿内摩擦定律。

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

式中  $T$ ——内摩擦力(N)；

$A$ ——流层的接触面积( $m^2$ )；

$\frac{du}{dy}$ ——垂直于速度方向的速度梯度( $1/s$ )；

$\mu$ ——动力黏滞系数(动力黏度)( $Pa \cdot s$ )。

流体力学中还常用动力黏度与密度的比值来表示流体的黏滞性，称为运动黏滞系数(运动黏度)，用符号  $\nu$  表示，单位为  $m^2/s$ 。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

不同的流体有不同的黏度。同一种流体的黏度也会随温度而改变，但液体和气体的黏度随温度变化的规律是不同的。液体的黏度随温度的升高而减小，而气体的黏度随温度的升高而增大。水和空气在一个大气压下的黏度分别见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 一个大气压下水的黏度

$t/^\circ C$	$\eta/(\times 10^{-3} Pa \cdot s)$	$\nu/(\times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1})$	$t/^\circ C$	$\eta/(\times 10^{-3} Pa \cdot s)$	$\nu/(\times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1})$
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 1-3 一个大气压下空气的黏度

$t/^{\circ}\text{C}$	$\eta/(\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$t/^{\circ}\text{C}$	$\eta/(\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
0	0.017 2	13.7	90	0.021 6	22.9
10	0.017 8	14.7	100	0.021 8	23.6
20	0.018 3	15.7	120	0.022 8	26.2
30	0.018 7	16.6	140	0.023 6	28.5
40	0.019 2	17.6	160	0.024 2	30.6
50	0.019 6	18.6	180	0.025 1	33.2
60	0.020 1	19.6	200	0.025 9	35.8
70	0.020 4	20.5	250	0.028 0	42.8
80	0.021 0	21.7	300	0.029 8	49.9

## 第二节 作用在流体上的力

要研究流体静止和运动的规律，除了了解流体的力学性质外，还必须对作用在流体上的外力加以分析。前者是改变流体运动状态的内因，后者是改变流体运动状态的外因。

作用在流体上的力可以分为质量力和表面力。

### 一、质量力

质量力是作用在流体的每个质点上，与流体的质量成正比的力，如重力、惯性力。

质量力常用单位质量力来表示。单位质量力的单位为  $\text{m}/\text{s}^2$ ，与加速度的单位相同，说明质量力总是与加速度相联系。

### 二、表面力

表面力是作用在被研究流体表面上，与作用表面的面积成正比的力。它可以是作用在流体边界上的外力，如大气对液体的压力、活塞作用在流体上的压力、容器壁面的反作用力等；也可以是流体内部一部分流体作用于另一部分流体接触面上的内力。我们在分析问题，常常从流体内部取出一个分离体研究其受力状态，使流体的内力变成作用在分离体表面上的外力。

因为流体几乎不能承受拉力，所以，作用于流体上的表面力只可分解为垂直于表面的法向力和平行于表面的切向力。法向力即压力，切向力即内摩擦力。

表面力用单位面积上的表面力来表示。单位面积上的压力称为压应力(压强)，单位面积上的切向力称为切应力。压应力和切应力的单位均为 Pa。



## ➤ 本章小结

本章主要讲述了流体力学的任务和地位、流体的主要力学性质、作用在流体上的力。重点内容如下：

- (1) 流体力学的研究对象是流体，流体包括液体和气体。
- (2) 流体的力学性质有密度和容重、热胀性和压缩性、黏滞性。
- (3) 作用在流体上的力有质量力和表面力。



## ➤ 思考与练习

- 1-1 流体的密度和容重有什么区别和联系？
- 1-2 流体的压缩性和热胀性用什么来表示？
- 1-3 什么是流体的黏滞性？它对流体的运动有何影响？
- 1-4 已知某种液体的密度为  $815.5 \text{ kg/m}^3$ ，求其容重。
- 1-5 已知油的体积为  $0.4 \text{ m}^3$ ，重量为  $350 \text{ kN}$ ，求其密度。
- 1-6 已知空气容重为  $11.5 \text{ N/m}^3$ ，运动黏度为  $0.157 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，求其动力黏度。
- 1-7 已知  $1 \text{ m}^3$  的液体重量为  $9.71 \text{ kN}$ ，动力黏度为  $0.6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，求其运动黏度。
- 1-8 某气体由于温度升高， $\nu$  值增加了  $15\%$ ，同时， $\gamma$  值减小了  $10\%$ ，问  $\mu$  值变化了多少？

## 第二章 流体静力学

### 学习目标

熟悉流体静压强的基本特性；了解压强的计算基准和常用的计量单位；掌握流体静压强的分布规律；了解液柱式测压计的原理；熟练掌握静压强的计算。

### 第一节 流体静压强及其特性

#### 一、流体静压强的定义和单位

处于静止状态下的流体，不仅对与其相接触的固体边壁有压力，而且在流体内部，相邻的流体之间也有压力作用，这种压力称为流体静压力，用符号  $P$  表示，单位是牛顿(N)。作用在单位面积上的流体静压力称为流体静压强，用符号  $p$  表示。

压强的计量单位有三种，即

(1)用单位面积上的压力来表示。在国际单位制中用  $\text{N}/\text{m}^2$  (Pa)，也可用 kPa 或 MPa。在工程单位制中用  $\text{kgf}/\text{m}^2$  或  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。

(2)用液柱高度表示。常用  $\text{mH}_2\text{O}$ 、 $\text{mmH}_2\text{O}$ 、 $\text{mmHg}$ 。

(3)用大气压强表示。国际上常用标准大气压(atm)，工程上一般用工程大气压(at)。

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 98\,070 \text{ Pa} = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 736 \text{ mmHg}$$

#### 二、压强的两种计算基准

压强有两种计算基准，即绝对压强和相对压强。

以没有气体分子存在的绝对真空为零点起算的压强称为绝对压强，用符号  $p'$  表示。

以当地同高程的大气压强  $p_a$  为零点起算的压强称为相对压强，用符号  $p$  表示。

$$p = p' - p_a \quad (2-1)$$

绝对压强只能是正值，而相对压强可正可负。当相对压强为正值时，称其为表压力；当相对压强为负值时，其绝对值称为真空度，用符号  $p_v$  表示。

$$p_v = p_a - p' \quad (2-2)$$

为了区别以上几种压强，现将它们的关系表示在图 2-1 中。

### 三、流体静压强的特性

(1) 流体静压强的方向与作用面垂直，并指向作用面。

(2) 作用于流体中任一点静压强的大小在各个方向上均相等，与作用面的方位无关。

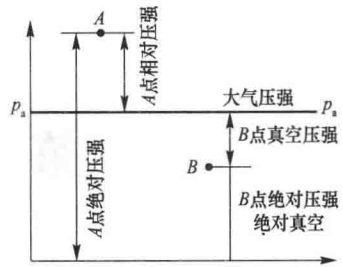


图 2-1 压强的图示

## 第二节 流体静压强的分布规律

### 一、液体静压强的基本方程

图 2-2 所示为重力作用下的静止均质液体。在液面下深度为  $h$  处任选一点  $A$ ，围绕  $A$  点取一水平微小面积  $dA$ ，再以  $dA$  为底，取一垂直的棱柱体作为隔离体，柱体顶面与自由液面重合。下面分析作用在液柱上的力。

(1) 表面力。作用在液柱顶面上的压力为  $p_0 dA$ ，方向垂直向下， $p_0$  为液柱表面压强；作用在液柱底面上的压力为  $p dA$ ，方向垂直向上， $p$  为作用在底面的压强；作用在液柱侧面上的压力，它们都是水平方向，且成对互相平衡。

(2) 质量力。作用在液柱上的质量力只有重力，其值为  $\gamma h dA$ ，方向垂直向下。

由于液体处于静止状态，根据力的平衡原理，其沿垂直方向，所以外力的合力等于零。

$$p dA - p_0 dA - \gamma h dA = 0$$

整理得

$$p = p_0 + \gamma h \quad (2-3)$$

式中  $p$ ——静止液体中某点的压强(Pa)；

$p_0$ ——液面压强(Pa)；

$\gamma$ ——液体的容重(N/m<sup>3</sup>)；

$h$ ——某点在液面下的深度(m)。

根据液体静压强的基本方程式(2-3)，可以得出以下结论：

1) 静止液体中任一点的压强是由液面压强  $p_0$  和该点在液面下的深度与容重的乘积  $\gamma h$  两部分组成。压强的大小与容器的形状无关。只要知道液面压强  $p_0$  和某点在液面下的深度  $h$ ，就可求出某点的压强。



2) 当液面压强  $p_0$  增大或减小时, 液体内各点的静压强也相应地增大或减小, 即液面压强的任何变化将等值地传递到液体内部各点。

3) 液体静压强随液体深度逐渐增大。当容重一定时, 静压强随深度呈线性规律变化。

液体静压强基本方程对于不可压缩气体仍然适用。由于气体的容重很小, 在高差不大的情况下, 气柱产生的压强值很小, 所以, 可以忽略  $\gamma h$  的影响, 则式(2-3)可简化为

$$p = p_0 \quad (2-4)$$

即认为气体空间各点的压强相等。

**【例 2-1】** 某水池中盛水如图 2-3 所示。已知液面压强  $p_0 = 98.07 \text{ kPa}$ ,  $h_1 = h_2 = h_3 = 2 \text{ m}$ , 求作用在池中 A、B、C、D、E、F、G 各点的静压强的大小及方向。

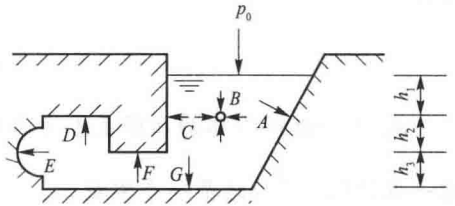


图 2-3 池壁和水体的点压强

**【解】** 因为 A、B、C、D 四点位于同一水深  $h_1$  处, 所以

$$p_A = p_B = p_C = p_D = p_0 + \gamma h_1 = 98.07 + 9.807 \times 2 = 117.684 \text{ (kPa)}$$

因为 E、F 两点位于同一水深  $h_1 + h_2$  处, 所以

$$p_E = p_F = p_0 + \gamma(h_1 + h_2) = 98.07 + 9.807 \times (2 + 2) = 137.298 \text{ (kPa)}$$

G 点的静压强为

$$p_G = p_0 + \gamma(h_1 + h_2 + h_3) = 98.07 + 9.807 \times (2 + 2 + 2) = 156.912 \text{ (kPa)}$$

静压强的方向根据静压强的特性确定, 如图 2-3 中各点箭头所示的方向。

液体静压强基本方程还有另一种表达形式。如图 2-4 所示, 设容器内液体的表面压强为  $p_0$ , 液体内 A、B 两点距液面的深度为  $h_A$  和  $h_B$ , 距任意基准面 0-0 的高度为  $z_A$  和  $z_B$ 。自由液面上任意一点距基准面 0-0 的高度为  $z_0$ 。

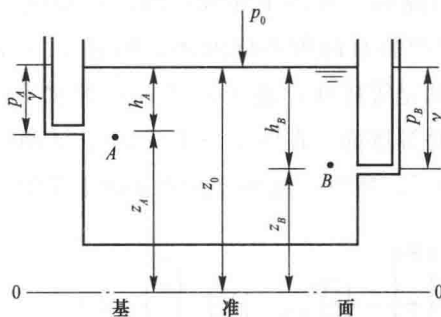


图 2-4 静压强基本方程的另一种形式

根据式(2-3), 可得

$$p_A = p_0 + \gamma h_A = p_0 + \gamma(z_0 - z_A)$$

$$p_B = p_0 + \gamma h_B = p_0 + \gamma(z_0 - z_B)$$

以上两式分别除以容重  $\gamma$ , 并整理, 得

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma}$$