



世纪高等教育土建类规划教材



建筑设备

第2版

◎主编 傅海军

Education



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪  2011 教育部规划教材

建 筑 设 备

第 2 版

主 编 傅海军

副主编 张格红 王珍娟

参 编 王惠敏 韩喜莲 张新桥 胡志轶

机 械 工 业 出 版 社

本书是高等工科院校土木工程、工程管理、工程造价、建筑学、城乡规划等土建类专业的教材。全书共 15 章, 简单介绍了流体力学、热工学基本知识, 重点介绍了建筑给水排水、热水、消防、供暖、燃气、通风、空气调节、建筑供配电系统、建筑照明、建筑防雷及接地系统、建筑设备自动化等方面的基本知识。

本书以教学大纲为主要依据, 注意与实践知识的衔接, 突出以实用性内容为主, 以学术性内容为辅的特点, 理论知识根据“必需、够用”的原则编写, 充分体现实用性、针对性、简约性、及时性和直观性的特点; 注重与工程实践相结合, 体现了为培养高技能人才服务的特色, 突出了土木建筑行业的特点。本书注重理论与工程应用的有机结合, 并加入了大量形象化的图例, 便于读者理解和掌握有关的学习内容。书中各章都附有思考题, 可供读者复习巩固所学知识。

本书配有电子课件, 免费提供给选用本书的授课教师。需要者请登录机械工业出版社教育服务网 (www.cmpedu.com) 注册免费下载, 或根据书末的“信息反馈表”索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑设备/傅海军主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 3

21 世纪高等教育土建类规划教材

ISBN 978-7-111-56110-1

I. ①建… II. ①傅… III. ①房屋建筑设备-高等学校-教材 IV. ①TU8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 031657 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘 涛 责任编辑: 刘 涛 臧程程 林 辉

责任校对: 刘雅娜 封面设计: 张 静

责任印制: 李 飞

北京振兴源印务有限公司印刷

2017 年 4 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·26.5 印张·652 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-56110-1

定价: 49.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机 工 官 网: www.cmpbook.com

机 工 官 博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金 书 网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

建筑设备充分发挥了建筑物的使用功能,为人们提供了卫生、舒适的生活与工作环境,为提高工作效率与产品质量提供必要的环境保障,其中的建筑消防在保护人民生命财产、经济建设安全等方面起着重要作用。建筑设备是现代化建筑的重要组成部分,其设置的完善程度和技术水平,已成为社会生产、房屋建筑和物质生活水平的重要标志,是一门内容广泛、综合性的学科。

随着现代建筑,特别是高层建筑的迅猛发展,人民物质生活水平的提高,对建筑的使用功能和质量提出了越来越高的要求,以致建筑设备投资在建筑总投资中的比重日益增大,建筑设备在建筑工程中的地位也日显重要。近年来,节约不可再生资源,发展和利用可再生资源的呼声日益高涨,所以从事建筑类各专业的工程技术人员,只有对现代建筑物中的给水排水、供暖、通风、空调、燃气供应、消防、供配电、智能建筑等系统和设备的工作原理、功能以及在建筑中的设置应用情况有所了解,才能在建筑和结构设计、建筑施工、室内装饰、建筑管理等工作中合理地配置及使用能源和资源,真正做到既能完美体现建筑的设计和使用功能,又能尽量减少能量的损耗和资源的浪费。

本书是为高等工科院校土木工程、建筑学、工程管理、工程造价、城乡规划等土建类专业编写的教材,简单介绍了流体力学、热工基本知识,重点介绍了建筑给水排水、热水、消防、供暖、燃气、通风、空气调节、建筑供配电系统、建筑照明、建筑防雷及接地系统、建筑设备自动化等方面的基本知识,并介绍了建筑设备的基本理论、规划设计原则、简要计算方法、应用材料设备。同时对近年来专业发展的新技术、新材料和新设备也做了阐述,反映了本学科现代化的科学技术水平。

为适应目前应用型本科教学的需要,根据 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》、GB 50974—2014《消防给水及消火栓系统技术规范》、GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》、GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》等国家规范,我们修订了本书。主要修订内容如下:

- 1) 补充了居住区给水排水设计内容。
- 2) 调整和补充了住宅、公共建筑用水定额。
- 3) 补充了管道连接防污染措施。
- 4) 补充了新型管材应用技术。
- 5) 对住宅给水秒流量计算公式进行了调整。
- 6) 调整了水箱制作材料的相关内容。
- 7) 补充了消防水源。
- 8) 将住宅建筑的规范统一按建筑高度进行了分类。
- 9) 提高了高层住宅建筑和建筑高度大于 100m 的高层民用建筑的防火要求。
- 10) 充实了设计场所火灾危险等级、系统与组件选型。
- 11) 介绍了一项自动喷水灭火系统新技术——重复启闭预作用系统。



12) 补充了建筑防排烟系统相关内容。

13) 重新编写了第14章。

本书在编写体系上注重基础理论与工程应用的有机结合,并加入了大量的图例,便于读者理解和掌握有关的学习内容。在编排上,章节安排明晰清楚,内容全面。书中各章都附有思考题,可供读者复习巩固所学的主要内容。

本书由江苏大学傅海军,兰州理工大学王珍娟、王惠敏、韩喜莲,西安工业大学张格红,湖南城市学院张新桥,中国民航机场建设集团公司胡志轶共同编写,由傅海军任主编,张格红、王珍娟任副主编,负责全书的统稿和审定。

本书在编写过程中参考了有关专家、学者的著作,并且应用了最新的规范和标准,在此对各参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于本书侧重于土建类专业,加之篇幅所限,故对各类建筑设备系统的设计计算基本略去。这样编排的目的是使土建类专业的师生以及设计者、施工者能够充分了解建筑设备的系统布置、系统要求,并能很好地把握建筑设备和建筑设计、结构之间的关系,形成一个有机、和谐的整体。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正,以便再版时修订完善。来信请发送至 hjfu21@126.com。

目 录

前言

第 1 篇 建筑设备基础知识

第 1 章 流体力学基本知识	2	第 2 章 热工学基础	30
1.1 流体的主要物理性质	2	2.1 工质的热力学状态	30
1.2 流体静压强及其分布规律	7	2.2 水蒸气和湿空气	31
1.3 流体运动基本知识	14	2.3 传热的基本方式	34
1.4 流动阻力和水头损失	21	2.4 传热过程与传热系数	36
1.5 孔口、管嘴出流	26	思考题	37
思考题	29		

第 2 篇 给水排水工程

第 3 章 室外给水排水工程	39	6.2 建筑排水系统的组成	99
3.1 室外给水工程	39	6.3 建筑排水管道的布置与敷设	101
3.2 室外排水系统	45	6.4 建筑排水系统计算	105
3.3 室外给水排水工程规划概要	50	6.5 排水管材、附件及卫生器具	110
思考题	52	6.6 屋面雨水排放	120
第 4 章 建筑给水	53	6.7 建筑中水工程	125
4.1 建筑给水系统及给水方式	53	6.8 污水局部处理构筑物	129
4.2 给水管材、附件及水表	58	思考题	133
4.3 室内给水管道的布置与敷设	62	第 7 章 热水及燃气供应	134
4.4 建筑给水系统计算	65	7.1 热水供应系统	134
4.5 给水增压与调节设备	72	7.2 热水管道管材及布置与敷设	144
思考题	78	7.3 耗热量、热水量和热媒耗量的 计算及加热设备	146
第 5 章 建筑消防	79	7.4 饮水供应系统	149
5.1 城市消防给水系统	79	7.5 燃气供应系统	152
5.2 消火栓消防给水系统	83	思考题	157
5.3 自动喷水灭火系统	90	第 8 章 高层建筑给水排水概述	158
5.4 其他灭火系统	95	8.1 高层建筑给水	159
思考题	97	8.2 高层建筑排水	162
第 6 章 建筑排水工程	98	8.3 高层建筑热水	165
6.1 建筑排水系统的分类和污水 排放条件	98	思考题	167



第3篇 暖通空调工程

第9章 建筑供暖	169	10.4 通风系统的主要设备和构件 ...	218
9.1 供暖方式、热媒及系统分类	169	10.5 建筑防排烟系统	223
9.2 供暖热负荷	171	思考题	228
9.3 对流供暖系统	174	第11章 空气调节	229
9.4 辐射供暖系统	188	11.1 概述	229
9.5 供暖系统的末端设备	191	11.2 空调系统的组成与分类	230
9.6 供暖系统的管路布置与主要设备 ...	194	11.3 空调负荷与送风量	233
9.7 热源	198	11.4 空调房间的气流组织	236
思考题	204	11.5 空气处理设备	239
第10章 通风及防排烟	205	11.6 空调水系统	244
10.1 建筑通风概述	205	11.7 空调冷源	247
10.2 自然通风	208	11.8 空调系统的消声减振	253
10.3 机械通风	214	思考题	256

第4篇 建筑电气及建筑设备自动化

第12章 建筑供配电系统	258	14.4 防雷装置	323
12.1 建筑电气的含义及分类	258	14.5 建筑物防雷计算	329
12.2 建筑电气系统的分类	259	14.6 接地系统概述	331
12.3 建筑对供电的要求	260	14.7 低压系统的接地型式	333
12.4 电力线路常用的几种供电方式 ...	261	14.8 电气装置保护接地的范围	336
12.5 变配电所的组成	263	14.9 接地电阻	337
12.6 高压配电系统	268	14.10 等电位联结	343
12.7 低压配电系统	272	思考题	345
12.8 线路的敷设、导线截面选择及 线路的保护	280	第15章 建筑设备自动化基础	346
思考题	290	15.1 概述	346
第13章 建筑照明系统	291	15.2 建筑设备自控网络	349
13.1 照明要点	291	15.3 空调通风监控系统	365
13.2 照明种类	294	15.4 给排水监控系统	370
13.3 照明电光源	295	15.5 供配电监控系统	373
13.4 灯具的种类与选择	297	15.6 照明监控系统	375
13.5 灯具的布置与照度计算	302	15.7 电梯监控系统	376
13.6 照明线路的控制	308	15.8 安全防范系统	378
思考题	309	15.9 火灾自动报警与消防联动 控制系统	384
第14章 建筑物防雷及接地系统	310	15.10 综合布线系统	395
14.1 雷电的危害	310	15.11 智能建筑的系统集成	411
14.2 建筑物的防雷分类	310	思考题	416
14.3 建筑物的防雷措施	311	参考文献	417

第1篇

建筑设备基础知识

第1章 流体力学基本知识

第2章 热工学基础

第1章

流体力学基本知识



自然界中的物体一般有三种存在状态：固体（固相）、液体（液相）和气体（气相）。液体和气体因具有较大的流动性而被统称为流体，它们具有与固体完全不同的力学性质。研究流体平衡状态与运动状态的力学规律及其实际应用的科学称为流体力学。

流体力学按介质可分为两类：液体力学和气体力学。液体力学的主要研究对象是液体，但当气体的流速和压力不大、密度变化也不大、压缩性的影响可以忽略不计时，液体的各种规律对于气体也是适用的。

流体力学在建筑工程中有广泛的应用。给水、排水、供热、供燃气、通风和空气调节等工程设计、计算和分析都是以流体力学作为理论基础的，因此，必须了解和掌握流体力学的基本知识。

1.1 流体的主要物理性质

为了研究流体的力学规律，首先应掌握流体的主要物理性质。流体中由于各质点间的黏聚力极小，不能承受拉力，也不能承受剪力。任何微小的剪力都能使静止流体发生很大的变形，因此流体具有很大的流动性，不能形成固定的形状，而只能随时被限定为其所在容器的形状，但流体在密闭状态下却能承受较大的压力。

充分认识流体的基本特征，深入研究流体处于静止或运动状态的力学规律，才能很好地输送和利用水、空气或其他流体，以服务于人们的生活和生产。

1.1.1 流体的密度和重度

流体和固体一样具有质量。均质流体单位体积所具有的质量称为密度，用 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。

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

式中 m ——流体的质量，单位为 kg ；

V ——流体的体积，单位为 m^3 。

同理，单位体积流体所受的重力称为重度，用 γ 表示，单位为 N/m^3 。

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

式中 G ——流体的重力，单位为 N 。

根据牛顿第二定律 $G=mg$ ，则流体的重度和密度有如下的关系



$$\gamma = \rho g \tag{1-3}$$

式中 g ——重力加速度，通常取 $g=9.80\text{m/s}^2$ 。

流体的密度和重度随外界压力和温度而变化，即同一流体的密度和重度不是一个固定值。但在实际工程中，液体的密度和重度随温度和压力的变化而变化，但数值变化不大，可视为固定值；而气体的密度和重度随温度和压力的变化较大，不能视为固定值，其变化规律可按气体状态方程来计算。

在建筑设备中，涉及的流体主要有水、水银（汞）、干空气等，其密度和重度见表 1-1。

表 1-1 几种常见物质的密度和重度

物 质	密度/(kg/m³)	重度/(N/m³)	备 注
水	1000	9800	4℃ 及 1 个标准大气压
水银（汞）	13600	133280	0℃ 及 1 个标准大气压
干空气	1.2	11.80	20℃ 及 1 个标准大气压

注：1 个标准大气压 = $1.013\times10^5\text{Pa}$ 。

水和干空气在一个标准大气压下的密度和重度，分别见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 一个标准大气压下水的密度和重度

温度 /℃	密度/(kg/m³)	重度/(N/m³)	温度 /℃	密度/(kg/m³)	重度/(N/m³)	温度 /℃	密度/(kg/m³)	重度/(N/m³)
0	999.87	9805	10	999.73	9804	60	983.24	9642
2	999.97	9806	20	998.23	9789	70	977.81	9589
4	1000.00	9807	30	995.67	9764	80	971.83	9530
6	999.97	9806	40	992.24	9731	90	965.34	9467
8	999.88	9805	50	988.07	9690	100	958.38	9399

表 1-3 一个标准大气压下干空气的密度和重度

温度 /℃	密度/(kg/m³)	重度/(N/m³)	温度 /℃	密度/(kg/m³)	重度/(N/m³)	温度 /℃	密度/(kg/m³)	重度/(N/m³)
0	1.293	12.70	25	1.185	11.62	60	1.060	10.40
5	1.270	12.47	30	1.165	11.43	70	1.029	10.10
10	1.248	12.24	35	1.146	11.23	80	1.000	9.81
15	1.226	12.02	40	1.128	11.07	90	0.973	9.55
20	1.205	11.80	50	1.093	10.72	100	0.947	9.30

1.1.2 流体的黏性

一切实际流体都是有黏性的，这也是流体的典型特征。流体的黏性是在流动中呈现出来的，不同流体的流动性能不同，这主要是因为流体内部质点间相对运动时存在不同的内摩擦力，阻碍流体质点间的相对运动。流体由静止到开始流动，是一个流体内部产生剪力，形成剪切变形，以使静止状态受到破坏的过程。这种表明流体流动时产生内摩擦力阻碍流体质点或流层间相对运动的特性称为黏性，内摩擦力也称为黏滞力。



黏性是流体阻止其发生剪切变形的一种特性,流体的黏性越大,其流动性越小。

当相邻的流体层有相对移动时,各层之间因具有黏性而产生摩擦力。摩擦力使流体摩擦而生热,流体的机械能部分地转化为热能而损失掉。所以,运动流体的机械能总是沿程减少的。

为了说明流体的黏性,先观察流体的流动。平板间液体速度变化如图 1-1 所示,设有上、下两块面积很大且相距很近的平行平板,板间充满某种静止液体。将下板固定,对上板施加一个恒定的外力,上板以恒速 u 沿水平方向运动。若 u 较小,则两板间的液体就会分成无数平行的薄层而运动。上板底面下的一薄层流体以速度 u 随上板运动,各层液体的速度依次降低,紧贴在下板表面的一层液体速度为零,流速的分布呈直线形。将它们的流速矢量顶点连接起来,即成为流速分布曲线。

平行平板间的流体,流速分布呈直线,而流体在圆管内流动时,速度分布呈抛物线形,如图 1-2 所示。当流体在圆管中缓慢流动时,紧贴管壁的流体质点粘附在管壁上,流速为零,而位于管轴心线上的流体质点流速最大。在介乎管壁与管轴之间的流体质点具有不同的流速,将它们的流速矢量顶点连接起来,即成为流速分布曲线,呈抛物线形。

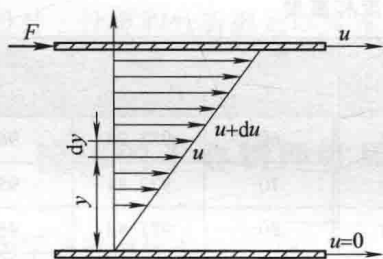


图 1-1 平板间液体速度变化

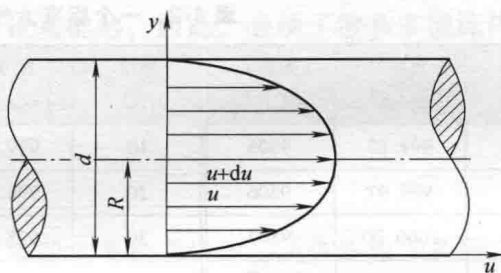


图 1-2 液体在圆管内的速度变化

牛顿在总结实验分析的基础上,提出了流体内摩擦力假说——牛顿内摩擦定律,其数学表达式可写为

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

单位面积上的内摩擦力称为切应力,以 τ 表示,单位为 Pa 。

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

上两式中 $F_{\text{内}}$ ——内摩擦力,单位为 N ;

τ ——切应力,或称单位面积的内摩擦力,单位为 N/m^2 或 Pa ;

μ ——流体动力黏度,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$;

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度,速度沿垂直于流速方向的变化率,单位为 s^{-1} 。

式 (1-4) 中的流体动力黏度 μ 表示流体黏性的大小,它取决于流体的种类和温度,通常也称为黏度或动力黏度。流体黏性除用动力黏度 μ 表示外,还常用运动黏度 ν 表示,单位为 m^2/s 。常见液体的运动黏度列于表 1-4。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$



表 1-4 常见液体的运动黏度

液体名称	温度/℃	$\nu / (\text{cm}^2/\text{s})$	液体名称	温度/℃	$\nu / (\text{cm}^2/\text{s})$
汽油	18	0.0065	石油	18	0.2500
酒精	18	0.0133	重油	18	1.4000
煤油	18	0.0250	甘油	20	8.7000

运动黏度更能说明流体流动的难易程度。运动黏度越大，反映流体质点相互牵制的作用越明显，流动性能越差。压强对流体黏度基本无影响，仅在高压系统中才稍有增加，因此流体的黏性与压强的大小几乎无关。但温度对流体黏性的影响较大，且温度对气体和液体的黏性影响情况不相同。气体分子黏聚力较小，分子运动较剧烈，黏性主要取决于流层间分子的动量交换，所以，当温度升高时，气体分子运动加剧，其黏度增大。液体的情况则与此相反，当温度升高时，液体分子的黏聚力减小，所以其黏度降低。

值得注意的是：牛顿内摩擦定律只适用于部分流体，对于某些特殊流体是不适用的。把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，不符合的称为非牛顿流体，如泥浆、血浆、油漆和颜料等。本书研究的对象主要是牛顿流体。

1.1.3 流体的压缩性和热膨胀性

流体受压，体积缩小、密度增大的性质称为流体的压缩性。流体受热，体积膨胀、密度减小的性质称为流体的膨胀性（也称热胀性）。液体和气体的压缩性和膨胀性是有所区别的。

液体的压缩性和膨胀性都很小。在实际工程中可认为液体是不可压缩流体。而液体随着温度的升高体积膨胀的现象较为明显，所以认为液体具有膨胀性。但是水的膨胀性比较特殊，当水温在 $0 \sim 4^\circ\text{C}$ 时，水的体积随温度的降低而增大，密度和重度相应减小。气体和液体不同，具有显著的压缩性和膨胀性，即气体的体积随压强和温度的变化而变化的数值较大，因而其密度和重度也有较大的变化，气体是很容易被压缩或膨胀的。其中有少数气体的压强和温度不变或变化很小时，气体的密度和重度可以视为常数，此种气体称为不可压缩气体。

流体的膨胀性的大小用热膨胀系数 α ($1/\text{K}$ 或 $1/^\circ\text{C}$) 来表示，热膨胀系数表示单位温度所引起的体积相对变化量，即

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} \quad (1-7)$$

式中 V_0 ——初温度 T_0 (K) 时的流体体积，单位为 m^3 ；

T ——温度，单位为 K 或 $^\circ\text{C}$ 。

流体压缩性的大小一般用压缩系数 β (单位为 Pa^{-1}) 来表示。压缩系数是指单位压强所引起的体积相对变化量。

$$\beta = -\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dp} \quad (1-8)$$

式中 V_0 ——受压缩前流体体积，单位为 m^3 ；

V ——流体的体积，单位为 m^3 ；

p ——流体的压强，单位为 Pa。



式 (1-8) 中等号右边的负号, 表示 dV 与 dp 的变化相反。

液体分子的间隙小, 在很大的外力作用下, 其体积只有极微小的变化。水从一个大气压增加到一百个大气压时, 每增加一个大气压, 水的密度只增加两千万分之一; 水的温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 时, 温度每增加 1°C , 水的密度减小还不到万分之二; 当水的温度在 $90 \sim 100^\circ\text{C}$ 时, 温度每增加 1°C , 水的密度减小也只有万分之七。因此, 水的压缩性和热膨胀性是很小的, 一般可看成是不可压缩流体。在建筑设备工程中, 一般均不考虑液体的压缩性和热膨胀性, 即我们研究的主要对象是不可压缩流体。

从流体的分子结构来看, 气体分子的间隙大, 分子之间的引力很小, 气体的体积随压强和温度的变化而发生的变化是非常明显的, 故称为可压缩流体, 若在一定容器内气体的质量不变, 则两个稳定状态之间的参数关系可由理想气体状态方程确定

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1-9)$$

式中 p_1 、 V_1 和 T_1 ——气体状态变化前的压强、体积和热力学温度;

p_2 、 V_2 和 T_2 ——气体状态变化后的压强、体积和热力学温度。

1.1.4 流体的惯性

流体和其他物体一样, 具有惯性。流体具有的抵抗改变其原有运动状态的物理特性称为惯性。惯性是物体保持原有运动状态的性质。运动状态的任何改变, 都必须克服惯性的作用。质量是衡量惯性的唯一尺度。质量越大, 惯性越大, 运动状态越难改变。

1.1.5 表面张力

液体表面, 包括液体与其他液体或固体的接触表面, 存在着一种力使液体表面积收缩为最小的力, 称为表面张力。表面张力是由液体分子的黏聚力引起的, 发生在曲面上, 液体表面的曲率越大, 表面张力就越大。气体分子具有扩散作用, 故气体不存在表面张力。

将细玻璃管竖立在液体中, 由于表面张力的作用, 液体就会在细管中上升或下降, 称此为毛细管现象。在工程实际中, 有时需要消除测量仪器中因毛细管现象所造成的误差。

在水流实验中, 经常用盛有水或水银的细玻璃管作测压管, 就要消除毛细管现象。故测量压强的玻璃管内径不宜太小, 否则会造成很大的误差。

水的毛细升高, 所造成的误差是正值; 水银的毛细降低, 所造成的误差是负值, 如图 1-3 所示。

$$\text{水的毛细升高} \quad h = \frac{30}{d} \quad (1-10)$$

$$\text{水银的毛细降低} \quad h = \frac{10.15}{d} \quad (1-11)$$

式中 h ——毛细升高, 单位为 mm ;

d ——玻璃管内径, 单位为 mm 。

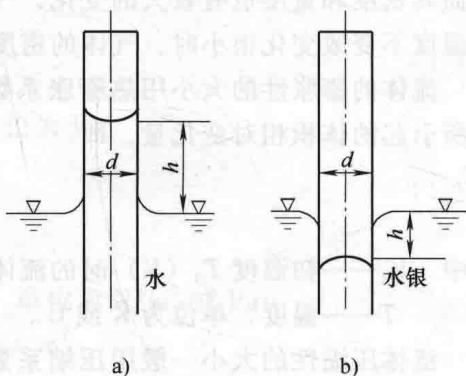


图 1-3 毛细管现象



管的内径越小,毛细管升高或下降值越大。

1.1.6 作用于流体上的力

作用于流体上的力包括质量力和表面力两大类。

1. 质量力

质量力是指通过所研究流体的每一部分质量而作用于流体的力,其大小与流体的质量成正比。常见的质量力有重力和各种惯性力(如直线加速运动时的直线惯性力和圆周运动时的离心力等)。质量力的单位为牛顿(N)。

质量力除用总质量力度量外,也常用单位质量力来表示。作用在单位质量流体上的质量力称单位质量力。

若质量为 m 的均质流体,总质量力为 F ,则单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-12)$$

设总质量力 F 在空间坐标上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力 f 在相应坐标轴上的投影为 f_x 、 f_y 、 f_z ,即

$$f_x = \frac{F_x}{m}, \quad f_y = \frac{F_y}{m}, \quad f_z = \frac{F_z}{m} \quad (1-13)$$

当液体所受的质量力只有重力时,重力 $G = mg$ 在直角坐标系的三个轴向分量分别为 $G_x = 0$ 、 $G_y = 0$ 、 $G_z = -mg$,则单位质量重力的轴向分力大小为

$$f_x = 0, \quad f_y = 0, \quad f_z = -g \quad (1-14)$$

2. 表面力

表面力是指作用在流体表面上的力,其大小与受力表面的面积成正比。例如,固体边界对流体的摩擦力、边界对流体的反作用力、一部分流体对相邻流体产生的压力等。表面力可分解为垂直于作用面的压力和沿作用面方向的剪力。表面力的单位为牛顿。与作用面垂直的称为压应力或压强;与作用面平行的称为切应力。

流体处于静止状态时,不存在黏性力引起的内摩擦力(切向力为零),表面力只有法向压力。对于理想流体,无论是静止或处于运动状态,都不存在内摩擦力,表面力只有法向压力。

1.2 流体静压强及其分布规律

流体质点间没有相对运动,流体的黏滞性表现不出来,认为流体处于静止状态或相对静止状态(统称为平衡状态)。当流体处于平衡状态时,流体各质点之间均不产生相对运动。因而平衡状态时流体的黏滞性不起作用,流体只受重力和法向压力。

1.2.1 流体静压强

液体和固体一样,由于自重而产生压力。但液体和固体不同,因为流体具有流动性,流体对任何方向的接触面都显示压力。流体对容器壁面、液体内部之间都存在压力。

在静止或相对静止的流体中,单位面积上的内法向表面力称为静压强。在静水中取一表



面积为 A 的水体, 如图 1-4 所示。设周围水体对 A 表面上某一微小面积 ΔS 产生的作用力为 ΔP , 则该微小面积上的平均压强为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1-15)$$

当 ΔS 无限缩小到 a 点时, 比值趋于某一极限值, 该极限值为 a 点的静压强, 以 p 表示

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow a} \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1-16)$$

1.2.2 流体静压强的特性

流体静压强有两个重要特性:

特性一: 流体静压强永远垂直于作用面, 并指向该作用面的内法线方向即垂直性。

特性一表明静压强的方向总是和受压面垂直, 并且只能是压力, 不能是拉力。这一特性可用反证法证明。在平衡状态液体中, 取出某一体积的液体, 现假设作用在这一部分液体表面上的流体静压强的方向不是垂直于该作用面的。此时将该压强分解为垂直于作用面和平行于作用面的两个力。后者即为剪切摩擦力, 这表明流体存在相对运动, 与静止或平衡的约束条件相矛盾。故流体的静压强只能是垂直并指向受压面。

特性二: 静止流体中任一点的静压强只有一个值, 与作用面的方向无关, 即任意点处各方向的静压强均相等, 即各向等值性。

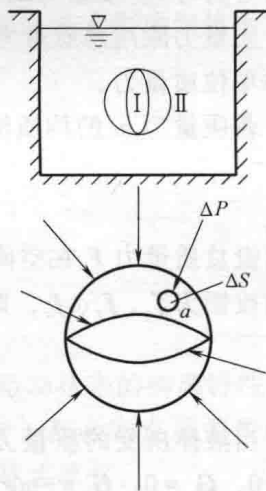


图 1-4 流体的静压强

1.2.3 流体静压强的分布

1. 分界面、自由表面和等压面

两种密度不同且互不混合液体之间的接触面为分界面; 液面和气体的交界面称为自由表面。流体中压强相等的各点组成的面叫作等压面。静止流体在重力作用下, 分界面和自由表面既是等压面, 又是水平面, 这一规律只适于满足同种、静止和连续三个条件的流体。

等压面具有两个重要性质: 一是在平衡液体中等压面即等势面; 二是等压面与质量力正交。只有重力作用下的静止液体, 其等压面必然是水平面。

敞口容器内静止液体中任一水平面均为等压面, 液体的自由表面上所受的压强相同, 为大气压强。若在连通器内, 相连通的同一种液体在同高度上的压强相等。相连通的液体可以是在此水平面之下或之上。如图 1-5 中 1—1 面、4—4 面不是等压面。

2. 静压强的分布规律

在静止的流体内部中任取一圆柱体作为隔离体, 研究其底面的静压强, 如图 1-6 所示。已知圆柱体的高度为 h , 断面面积为 ΔA , 其上表面与自由表面重合, 所受压强为 p_0 。在圆柱体侧面上的静水压力方向与轴向垂直, 而且对称, 故相互平衡, 则圆柱体轴向的作用力有三个: 上表面压力 $P_0 = p_0 \Delta A$, 方向垂直向下; 下表面压力 $P = p \Delta A$, 方向垂直向上; 圆柱体的重力 $G = \rho g h \Delta A$, 方向垂直向下。

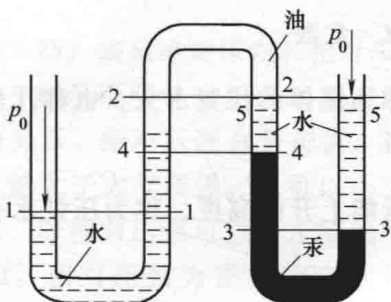


图 1-5 等压面与水平面

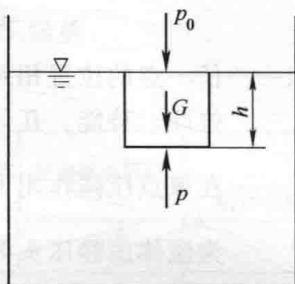


图 1-6 静止液体中的小圆柱体

根据圆柱体静止状态的平衡条件，假设方向向上为正，向下为负，则可得圆柱体轴向的力平衡方程，即

$$p\Delta A - \rho gh\Delta A - p_0\Delta A = 0 \quad (1-17)$$

即

$$p = p_0 + \rho gh = p_0 + \gamma h \quad (1-18)$$

式中 p ——静止流体中任一点的压强，单位为 N/m^2 ；

p_0 ——液体表面压强，单位为 N/m^2 ；

γ ——液体的重度，单位为 N/m^3 ；

h ——所研究的点在液面下的深度，单位为 m 。

式 (1-18) 是静水压强基本方程式。式中 γ 和 p_0 都是常数。该方程表达了只有重力作用时流体静压强的分布规律。由式 (1-18) 说明流体的静压强与深度成直线分布规律，且流体中某点静压由两部分组成，即液面上的压强 p_0 和由单位断面液柱自重引起的压强 γh 。式 (1-18) 还说明流体内任一点的静压强都包含液面上的压强 p_0 ，因此，液面压强若有任何增量，都会使其内部各处的压强有同样的增量，即 $(p_B + \Delta p) = (p_0 + \Delta p) + \gamma h$ ，这称为液面压强等值地在液体内部传递的原理，即帕斯卡定律。

该方程也适用于静止气体，只是气体的重度很小，在高差不大的情况下可忽略 γh 项。

只有重力作用时静止液体静压强的分布规律如下：

- 1) 静止液体内部任意一点的压强等于液面压强加上液体重度与深度乘积之和。
- 2) 静止液体内部压强随深度按直线规律变化。
- 3) 同一深度的点压强相等，即等压面为水平面。
- 4) 液面压强可等值在液体内部传递。

3. 流体静力学方程式的其他形式

设水箱水面的压强为 p_0 ，在箱内的液体中任取两点 A 和 B ，在箱底以下任取一基准面 $0-0$ 。箱内液面到基准面的高度为 z_0 ， A 点和 B 点到基准面的高度分别为 z_1 和 z_2 ，如图 1-7 所示。

由式 (1-18)，列出 A 点、 B 点的压强表达式

$$A \text{ 点的压强为} \quad p_1 = p_0 + \gamma (z_0 - z_1) \quad (1-19)$$

$$B \text{ 点的压强为} \quad p_2 = p_0 + \gamma (z_0 - z_2) \quad (1-20)$$

将式 (1-19) 和式 (1-20) 两边同除以液体的重度并整理

可得

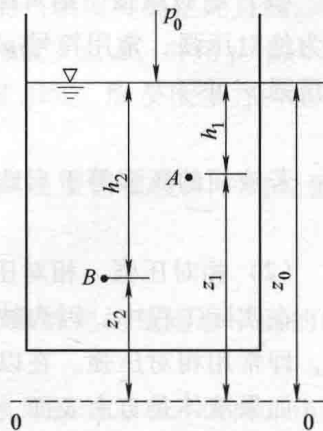


图 1-7 静水压强基本方程的其他形式



$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma} = C = \text{常数} \quad (1-21)$$

式中 z ——任一点的位置相对于基准面的高度,称为流体的位置水头,也称几何意义的位能、势能,几何压头等;

$\frac{p}{\gamma}$ ——在该点压强作用下,液体在测压管中所能上升的高度,称为压强水头,也称为流体的静压头等;

$z + \frac{p}{\gamma}$ ——测压管水头,图 1-8 表示流体测压管水头。

$z + \frac{p}{\gamma} = C$ 表示同一容器内的静止液体中,所有各点的测压管水头均相等。

4. 流体压强的表示方法

压强的表示方法一般有三种:

1) 用应力单位表示。从压强定义出发,用单位面积上的力表示,单位为 N/m^2 ,国际单位制为 Pa 。1Pa 表示每平方米面积上承受 1N 的压力。常用的还有 kN/m^2 、 N/cm^2 等。

2) 用液柱高度表示。常用水柱高度和汞柱高度表示。其单位为 mH_2O 、 mmH_2O 或 mmHg 。

3) 用大气压的倍数表示。国际上规定一个标准大气压为 101.325kPa ,其单位为 atm 。

工程上经常使用的单位有毫米汞柱 (mmHg)、毫米水柱 (mmH_2O)、大气压 (atm)。它们之间的换算关系如下:

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 101325\text{Pa} = 101.325\text{kPa} = 101.325\text{kN}/\text{m}^2$$

5. 流体压强的度量

流体的压强按照基准点的不同,可分为绝对压强和相对压强。

(1) 绝对压强 绝对压强是以设想没有大气存在的绝对真空状态作为零点计算的压强,称为绝对压强,常用符号 p' 表示。若液面的绝对压强为 p'_0 ,由式 (1-18),则液体内部某点绝对压强 p' 可写为

$$p' = p'_0 + \rho gh \quad (1-22)$$

若液面的压强等于当地大气压强 p_a ,则

$$p' = p_a + \rho gh \quad (1-23)$$

(2) 相对压强 相对压强是以大气压强 (p_0) 为零点计算的压强。用符号 p 表示。

在实际工程中,因为被研究对象的表面均受大气压强作用,因此不需考虑大气压强的作用,即常用相对压强。在以后的讨论中,一般都指相对压强,若指绝对压强将会注明。

如果液体是自由表面,则自由表面压强有 $p_0 = p_a$,则式 (1-18) 简化为

$$p = \rho gh \quad (1-24)$$

(3) 绝对压强和相对压强的关系 绝对压强和相对压强的关系为

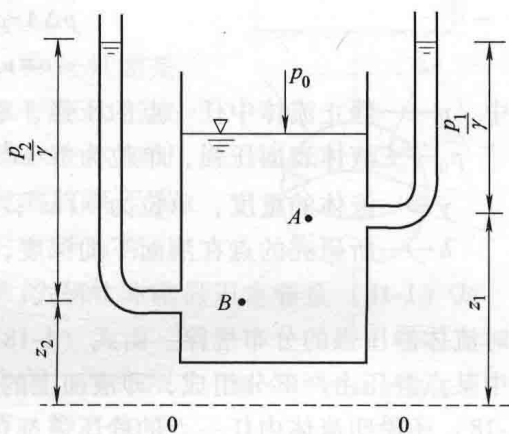


图 1-8 测压管水头