

普通高等教育智能建筑规划教材

建筑设备概论

白 莉 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育智能建筑规划教材

建 筑 设 备 概 论

主编 白 莉

参编 谭羽非 全贞花 张喜明 冯 炼

主审 廉乐明 刘 晔



机 械 工 业 出 版 社

本书根据建筑设备产业发展的需要,概述了建筑给水排水及消防,通风空调及制冷,供热及热水供应等建筑设备的基本知识和实用技术。为了便于读者掌握建筑设备的基本知识和实用技术,本书对其所涉及的基本原理、基本理论以及相关的工程技术知识也进行了介绍。

本书的编写力求深入浅出、图文并茂、内容丰富,既注重基本原理和必要的理论分析,又尽量收入一些该领域最新的技术成果,同时更突出工程上的实用性。

本书主要是为普通高等院校电气工程与自动化、信息工程专业,智能建筑、建筑电气等专业方向编写的教科书,也可供从事建筑、计算机、通信和自动控制等领域的技术人员参考,并可作为与建筑设备工程相关的技术人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

建筑设备概论/白莉主编. —北京:机械工业出版社, 2003.7

普通高等教育智能建筑规划教材

ISBN 7-111-12592-4

I. 建... II. 白... III. 建筑设备—高等学校—教材 IV. TU2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 056286 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:周娟 贡克勤 王保家 版式设计:张世琴

封面设计:张静 责任印制:路琳 责任校对:李秋荣

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·12 印张·1 插页·295 千字

定价:17.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

智能建筑规划教材编委会

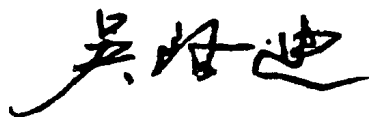
主 任	吴启迪		
副主任	徐德淦	温伯银	陈瑞藻
委 员	程大章	张公忠	王元凯
	龙惟定	王 忱	张振昭

序

20 世纪,电子技术、计算机网络技术、自动控制技术和系统工程技术获得了空前的高速发展,并渗透到各个领域,深刻地影响着人类的生产方式和生活方式,给人类带来了前所未有的方便和利益。建筑领域也未能例外,智能化建筑便是在这一背景下走进人们的生活。智能化建筑充分应用各种电子技术、计算机网络技术、自动控制技术、系统工程技术,并加以研发和整合成智能装备,为人们提供安全、便捷、舒适的工作条件和生活环境,并日益成为主导现代建筑的主流。近年来,人们不难发现,凡是按现代化、信息化运作的机构与行业,如政府、金融、商业、医疗、文教、体育、交通枢纽、法院、工厂等,他们所建造的新建筑物,都已具有不同程度的智能化。

智能化建筑市场的拓展为建筑电气工程的发展提供了宽广的天地。特别是建筑电气工程中的弱电系统,更是借助电子技术、计算机网络技术、自动控制技术和系统工程技术在智能建筑中的综合利用,使其获得了日新月异的发展。智能化建筑也为其设备制造、工程设计、工程施工、物业管理等行业创造了巨大的市场,促进了社会对智能建筑技术专业人才需求的急速增加。令人高兴的是众多院校顺应时代发展的要求,调整教学计划,更新课程内容,致力于培养建筑电气与智能建筑应用方向的人才,以适应国民经济高速发展需要。这正是这套建筑电气与智能建筑规划教材的出版背景。

我欣喜地发现,参加这套建筑电气与智能建筑规划教材编撰工作的有近 20 个姐妹学校,不论是主编者或是主审者,均是这个领域有突出成就的专家。因此,我深信这套系列教材将会反映各姐妹学校在为国民经济服务方面的最新研究成果。这套教材的出版还说明一个问题,时代需要协作精神,时代需要集体智慧。我借此机会感谢所有作者,是你们的辛劳为读者提供了一套好的教材。



写于同济园

2002 年 9 月 28 日

前 言

本书主要介绍了建筑给水排水及消防, 通风空调及制冷, 供热及热水供应等工程设备的基本知识和实用技术。

近年来随着科学技术的发展和人民生活水平的提高, 人们对建筑设备工程标准、质量及功能的要求也日益提高。建筑设备自动化、智能化的发展趋势, 使我国的建筑设备产业蓬勃兴起, 这就要求从事土木建筑、智能建筑、建筑电气、自动化及信息工程等专业的技术人员, 掌握一定的建筑设备的基本知识和实用技术。为了适应经济建设的发展需求, 便于建筑设备工程领域的技术人员掌握该领域的知识和技能, 本书梗概介绍了建筑设备的基础理论, 重点介绍了建筑给水排水及消防, 通风空调及制冷, 供热及热水供应等工程的基本知识和实用技术, 同时对建筑设备的自动控制技术也进行了介绍。

本书的内容涉及多种工程技术学科, 其工程设施共置于建筑物内部或小区, 为各类建筑创造舒适、有效、防灾、安全的生活和生产环境, 因此建筑设备之间及与建筑物之间, 均存在互相协调的关系。本书的建筑设备部分着重介绍了各种设备工程的综合设计要求, 及其自动控制的设计要求、控制方法等内容, 其目的是便于技术人员理解和掌握。

近几年来, 随着建筑设备领域的不断拓宽及建筑工程技术的飞速发展, 出现了许多新产品、新技术, 对此本书也作了相应的介绍。

本教材推荐学时为 30 学时, 各章自成体系, 任课教师可根据本校的学时计划、讲授对象及专业特点自行取舍。

本书的第一、三章由全贞花、谭羽非编写, 第二、四章由白莉、张喜明编写, 有关自动控制方面的内容由冯炼编写, 本书由白莉担任主编。全书承廉乐明、刘晔教授审阅。

本书的编写大纲承蒙程大章、龙惟定教授审定, 在此谨表感谢。在本书编写过程中还曾得到谢洪、韩相奎教授等许多同行专家的指导和帮助, 在此一并致以诚挚的谢意。限于编者水平, 本书难免存在纰漏之处, 尚望同行和读者指正。

编者

目 录

序

前言

第一章 基础知识	1	附录 B 给排水工程常用数据	177
第一节 流体力学基础知识	1	附录 B-1 钢管公称压力与试验压力的 关系	177
第二节 传热学基础知识	20	附录 B-2 钢管工作压力与公称压力的 关系	177
第三节 湿空气的热工基础知识	26	附录 B-3 住宅生活用水定额及小时变 化系数	177
第二章 建筑给排水工程及消防设备	36	附录 B-4 集体宿舍、旅馆和公共建筑 生活用水定额及小时变化系 数	177
第一节 常用管道、附件和卫生器具	36	附录 B-5 工业企业建筑淋浴用水量定 额	179
第二节 建筑给水工程	47	附录 B-6 设置各类自动喷水灭火系统 的原则	179
第三节 建筑排水工程	63	附录 C 供热工程常用数据	179
第四节 建筑消防系统	72	附录 C-1 每个人的散热量 q (W) 和 散湿量 w (g/h)	179
第三章 通风、空调工程及制冷设备	85	附录 C-2 室外气象参数	180
第一节 通风工程	85	附录 C-3 电气照明散热量	181
第二节 空调工程	99	附录 C-4 车间空气中有害物质的最高 容许含量	181
第三节 空调用制冷设备	125	附录 C-5 居住及公共建筑的换气次 数	181
第四章 供热工程及热水供应设备	135	附录 C-6 进、排气窗的局部阻力系 数 ζ	182
第一节 供暖热负荷	135	参考文献	183
第二节 供暖系统的分类及系统形式	140		
第三节 常用供暖设备	143		
第四节 供暖系统及设备的调节与控制	154		
第五节 热力入口与锅炉房	156		
第六节 热水供应系统与设备	167		
附录	175		
附录 A 湿空气物性参数	175		
附录 A-1 湿空气的密度、水蒸气压 力、含湿量和焓	175		
附录 A-2 湿空气焓湿图 (见书后插 页)	176		

第一章 基础知识

第一节 流体力学基础知识

物质是指通常所见到的固体、液体和气体。而流体是液体和气体的统称。流体力学就是研究流体平衡和运动的力学规律及其应用的科学。

一、流体的主要物理性质

日常生活中遇到许多流体的运动，如水在江河中流动、煤气在管道中输送、空气从喷口中喷出等，都表现出流体具有易流动性。流体不能承受拉力，静止流体不能抵抗切力。但是流体能承受较大的压力。

下面介绍流体的主要物理性质。

(一) 密度

流体和固体一样，也具有质量。对于均质流体，单位体积的质量，称为流体的密度，用 ρ 表示，即

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

式中， ρ 是流体的密度 (kg/m^3)； m 是流体的质量 (kg)； V 是流体的体积 (m^3)。

流体的密度随外界压力和温度的变化而变化，例如水在标准大气压 ($1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$ ，后同) 和 4°C 时其 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。水银在标准大气压和 0°C 时，密度是水的 13.6 倍。干空气在标准大气压和 20°C 时的密度为 $\rho_a = 1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(二) 流体的粘滞性

流体的粘滞性可以由下列实验和分析了解到。用流速仪测出管道中某一断面的流速分布，如图 1-1 所示。流体沿管道直径方向分成很多流层，各层的流速不同，并按某种曲线规律连续变化，管轴心的流速最大，向着管道壁的方向递减，直至管壁处的流速为零。

如图 1-1 所示，取流速方向的坐标为 u ，垂流速方向的坐标为 n ，若令水流中某一流层的速度为 u ，则与其相邻流层的速度为 $u + du$ ， du 为相邻两流层的速度增值。令流层厚度为 dn ，沿垂流速方向单位长度的流速增值 $\frac{du}{dn}$ ，叫做流速梯度。由于流体各流层的流速不同，相邻流层间有相对运动，便在接触面上产生一种相互作用的剪切力，这个力叫做流体的内摩擦力，

或称粘滞力。流体在粘滞力的作用下，具有抵抗流体的相对运动（或变形）的能力，称为流体的粘滞性。对于静止流体，由于各流层间没有相对运动，不显示粘滞性。

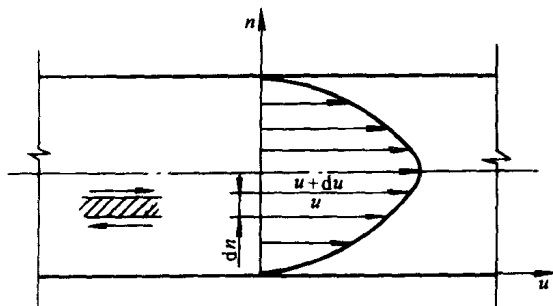


图 1-1 管道中断面流速分布

牛顿在总结实验的基础上,首先提出了流体内摩擦力的假说——牛顿内摩擦定律。如用切应力表示,可写为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dn} \quad (1-2)$$

式中, τ 是流层单位面积上的内摩擦力, 又称切应力 (N/m^2 , Pa); F 是内摩擦力 (N); A 是摩擦流层的接触面面积 (m^2); μ 是动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$), 与流体种类有关; $\frac{du}{dn}$ 是流速梯度, 表示速度沿垂直于速度方向的变化率 ($1/\text{s}$)。

流体粘滞性的大小, 可用粘度表示。除动力粘度 μ 外, 常用运动粘度 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, 单位为 m^2/s 。 μ 受温度影响大, 受压力影响小。水及空气的 μ 值及 ν 值如表 1-1 及表 1-2 所示。

表 1-1 水的粘度

t / $^{\circ}\text{C}$	μ / $(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	ν / $(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	t / $^{\circ}\text{C}$	μ / $(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	ν / $(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	50	0.549	0.556
10	1.308	1.308	60	0.469	0.477
15	1.140	1.140	70	0.406	0.415
20	1.005	1.007	80	0.357	0.367
25	0.894	0.897	90	0.317	0.328
30	0.801	0.804	100	0.284	0.296

表 1-2 一个大气压下空气的粘度

t / $^{\circ}\text{C}$	μ / $(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	ν / $(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	t / $^{\circ}\text{C}$	μ / $(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	ν / $(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
-20	0.0166	11.9	70	0.0204	20.5
0	0.0172	13.7	80	0.0210	21.7
10	0.0178	14.7	90	0.0216	22.9
20	0.0183	15.7	100	0.0218	23.6
30	0.0187	16.6	150	0.0239	29.6
40	0.0192	17.6	200	0.0259	25.8
50	0.0196	18.6	250	0.0280	42.8
60	0.0201	19.6	300	0.0298	49.9

流体的粘滞性对流体运动有很大的影响, 因为内摩擦阻力做负功, 不断损耗运动流体的能量, 从而成为实际工程水力计算中必须考虑的一个重要问题。对此, 将在后面有关部分讨论。

(三) 流体的压缩性和热胀性

流体压强增大体积缩小的性质，称为流体的压缩性。流体温度升高体积膨胀的性质，称为流体的热胀性。

液体的压缩性和热胀性都很小。例如，水从 1atm 增加到 100atm 时，每增加 1atm，水的密度增加 1/20000。水在温度较低（10~20℃）时，温度每增加 1℃，水的密度减小 1.5/10000，当温度较高（90~100℃）时，温度每增加 1℃，水的密度减小也仅为 7/10000。因此，在很多工程上可以忽略液体的压缩性和热胀性，因它带来的误差很小。例如，在建筑设备管道液体输送过程中，除水击和热水情况外，一般在计算中均不考虑液体的压缩性和热胀性。

与液体不同，气体具有显著的压缩性和热胀性。在温度不太低，压强不太高时，密度、压强和温度三者之间的关系服从理想气体状态方程

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-3)$$

式中， p 是气体的绝对压强（N/m²）； ρ 是气体的密度（kg/m³）； T 是气体的热力学温度（K）； R 是气体常数（J/（kg·K））。

对于空气， $R = 287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；对于其他气体， $R = \frac{8314}{M}\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， M 为该气体的相对分子质量。

对于速度较低（远小于音速）的气体，在流动过程中其压强和温度变化较小，密度可视为常数，这种气体称为不可压缩气体。反之，速度较高（接近或超过音速）的气体，在流动过程中其密度变化较大，密度不能视为常数，这种气体称为可压缩气体。

在建筑设备工程中所接触到的水、气流体，其流速在大多数情况下均较低，因而密度在流动过程中变化较小，可视为常数，一般将这种水、气流体视为易于流动的、具有粘滞性的和不可压缩的流体。

在研究流体运动规律中，还需了解“连续介质”的概念。把流体当作是由密集质点构成的、内部无任何空隙的连续体，这就是连续介质。所谓质点，是指含有大量分子的、与一切流动空间相比体积可忽略不计的，又具有一定质量的流体微团。建立连续介质，既可避开分子运动的复杂性，对流体物质结构进行简化，又可将流体运动中的物理量视为空间坐标和时间变量的连续函数。这样，就可用分析方法来研究流体在外力作用下的机械运动。

二、流体静压强及其分布规律

流体静力学研究流体在静止（平衡）或相对静止（相对平衡）状态下的力学规律及其应用。根据流体的流动性可知，在静止（平衡）或相对静止（相对平衡）状态下，流体只存在压应力——压强。因此，流体静力学的核心问题是研究流体静压强及其分布规律。

（一）流体静压强及其特征

设想在一容器的静止水中，隔离出部分水体 I 来研究，如图 1-2 所示，这种情况必须把周围水体 II 对部分水体 I 的作用力加上，以保持其静止状态不变。设作用于隔离体表面某一微小面积 $\Delta\omega$ 上的总压力是 Δp ，则 $\Delta\omega$ 面上的平均压强为

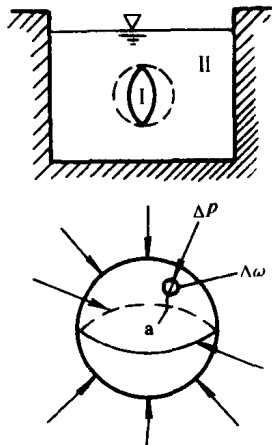


图 1-2 流体的静压强

$$\bar{p} = \frac{\Delta p}{\Delta \omega} \quad (1-4)$$

当所取的面积无限缩小为一点 a ，即 $\Delta \omega \rightarrow 0$ ，则平均压强的极限值为

$$p = \lim_{\Delta \omega \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta \omega} \quad (1-5)$$

这个极限值 p 称为 a 点的静压强 (Pa 或 N/m^2)。

流体静压强有两个特征：

1) 流体静压强的方向必定沿着作用面的内法线方向，即垂直于作用面并指向作用面。因为对静止流体来说，不存在拉应力和切应力，所以，只能存在垂直于表面内法线方向的压应力——压强。

2) 任意一点各方向的流体静压强大小相同，与作用面的方位无关。

(二) 流体静压强的分布规律

在静止液体中任取一点 A ，已知 A 点在液面下的深度为 h ，液面压强为 p_0 ，如图 1-3 所示。设 A 点的静压强为 p ，通过 A 点取底面积为 $\Delta \omega$ 、高为 h ，上表面与液面相重合的铅直小圆柱体，研究其轴向力的平衡。此时作用于轴向的外力有：上表面压力 $P_0 = p_0 \Delta \omega$ ，方向垂直向下；下底面的静压力 $P = p \Delta \omega$ ，方向垂直向上；柱体重力 $G = \rho g h \Delta \omega$ ，方向垂直向下（图中未绘出）；柱体侧面积的静压力，方向与轴向垂直（图中未绘出），在轴向投影为零。此铅直小圆柱体处于静止状态，故其轴向力平衡为

$$p \Delta \omega - \rho g h \Delta \omega - p_0 \Delta \omega = 0$$

化简后得

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1-6)$$

式中， p 是静止液体中任意点的压强 (kN/m^2 或 kPa)； p_0 是表面压强 (kN/m^2 或 kPa)； h 是所研究点在液面下的深度 (m)。

式 (1-6) 是液体静压强基本方程式，又称为流体静力学基本方程式。式中 ρ 和 p_0 都是常数。方程表明静止液体中压强随深度呈直线分布，作用于自由液面上的压强 p_0 等值地传递到静止液体中每一点上。方程也可用于静止气体的压强计算，由于气体密度 ρ 很小，因此，在高差 h 值不大的情况下，可忽略 $\rho g h$ 项，则 $p = p_0$ 。例如研究气体作用在锅炉壁上的静压强时，可认为气体在空间各点的静压强相等。

应用静压强基本方程式分析问题时，要掌握等压面的概念。流体中压强相等的各点所组成的面称为等压面。如液体与气体的交界面（自由表面）；处于平衡状态下的两种不同液体的分界面；静止、同种类、连续液体的水平面等都是等压面。

工程计算中，压强有不同的量度基准：

(1) 绝对压强 是以完全真空为零点计算的压强，用 p' 表示。

(2) 相对压强 是以大气压强 p_a 为零点计算的压强，用 p 表示。

由上可知，相对压强与绝对压强的关系为

$$p = p' - p_a \quad (1-7)$$

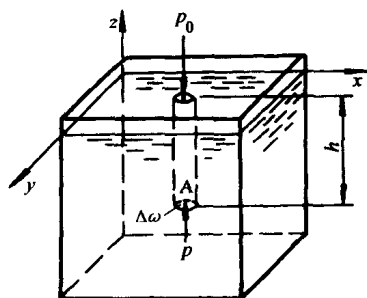


图 1-3 静止液体中压强分布

某一点的绝对压强与大气压强比较，可以大于大气压强，也可以小于大气压强，因此相对压强可以是正值也可以是负值。相对压强的正值称为正压（即压力表读数）；负值称为负压，这时流体处于真空状态，通常用真空度（或真空压强）来度量流体的真空程度。所谓真空度，是指某点的绝对压强不足于一个大气压强的部分，用 p_k 表示，即

$$p_k = p_a - p' = -p \quad (1-8)$$

某点的真空度愈大，说明它的绝对压强愈小。真空度的最大值为 98kN/m^2 ，即绝对压强为零，处于完全真空状态；真空度的最小值为零，即处于一个大气压强下。真空度 p_k 在 $0 \sim 98\text{kN/m}^2$ 的范围内变动。

真空度实际上等于负的相对压强的绝对值。例如某点的绝对压强是 40kN/m^2 ，如用相对压强表示， $p = 40\text{kN/m}^2 - 98\text{kN/m}^2 = -58\text{kN/m}^2$ ，采用真空度表示，则 $p_k = 98\text{kN/m}^2 - 40\text{kN/m}^2 = 58\text{kN/m}^2$ 。从式（1-7）、式（1-8）亦可以看出，真空度有时叫做“负压”，就是这个缘故。

在建筑设备的水、气输送工程中，如水泵吸水管、虹吸管和风机吸风口等，经常遇到真空度的计算和量测。

在工程计算中，通常采用相对压强，如图 1-4 所示，水池任一受压壁面 AB，内外都有大气压作用而相互抵消。实际作用于 AB 壁面上的静压强分布，如 ABC 所示，其图形称为相对压强分布图。

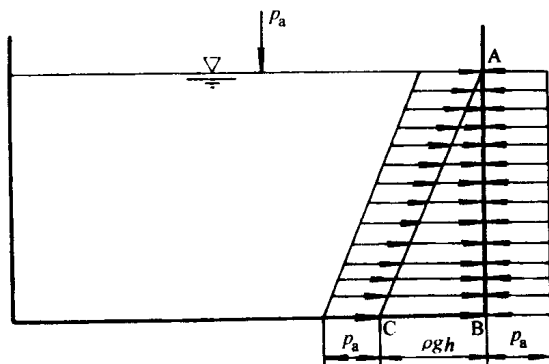


图 1-4 水池壁相对压强分布图

压强单位如前所述，除用单位面积上的压力和工程大气压表示外，还可用液柱高度表示，如米水柱、毫米水柱、毫米汞柱。如

$$h = \frac{p_a}{\rho g} = \frac{98\text{kN/m}^2}{9.8\text{kN/m}^3} = 10\text{mH}_2\text{O} = 10000\text{mmH}_2\text{O}$$

$$h_{\text{Hg}} = \frac{p_a}{\rho_{\text{Hg}} g} = \frac{98\text{kN/m}^2}{133.38\text{kN/m}^3} = 73.56\text{cmHg} = 735.6\text{mmHg}$$

上述三种压强单位的关系是

$$1 \text{ 个工程大气压} = 10\text{mH}_2\text{O} = 735.6\text{mmHg} = 98\text{kN/m}^2 = 98000\text{Pa}.$$

除了流体静压强的计算外，工程上常遇到流体静压强的量测问题，如锅炉、制冷压缩机、水泵和风机等设备中均需测定压强。常用测压仪器有液柱测压计、金属压力表和真空表等，现简单介绍如下：

(1) 液柱测压计 测压管是一种最简单的液柱测压计，如图 1-5 所示。A 的静压强 p 用

水柱高度 h 表示。如果被测点的压强值较大, 则水柱将会很高, 观测不便。可以在测压管中充以密度大的液体, 例如水银测压计, 如图 1-6 所示。

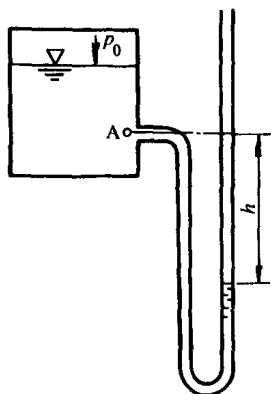


图 1-5 测压管

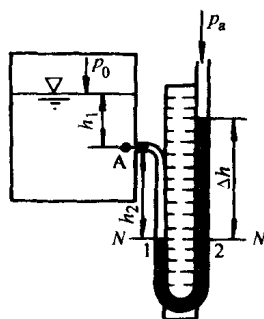


图 1-6 水银测压计

在测量微小的压强时, 为了提高测量精度, 常采用倾斜微压计。

当测量两种容器的压强差时, 可采用比压计。

图 1-7 是一种常用的测量流体流量的仪器, 叫文丘里流量计, 它装置在管路中, 是一段管径先收缩后扩大的短管, 将流量计收缩前的 A 点和收缩喉部的 B 点分别与水银比压计的两端连通。当管中水从 A 向 B 通过时, 因 A、B 两点的压强不等, 在水银比压计上将出现某一水银柱高差 Δh 。以 N-N 为等压面, 则

$$p_A + \rho g h_1 = p_B + \rho g h_2 + \rho_{\text{Hg}} g \Delta h$$

$$\text{故} \quad \frac{p_A - p_B}{\rho g} = \left(\frac{\rho_{\text{Hg}} g}{\rho g} - 1 \right) \Delta h = 12.6 \Delta h \quad (1-9)$$

流量的进一步计算, 将在后面介绍。

(2) 金属压力表、真空表 液柱测压计常在实验室使用, 它的优点是准确度高, 缺点是量测值小, 体积大。压力表与此相反, 压力表的种类很多, 常用的为弹簧压力表, 构造如图 1-8 所示。表内有一根下端开口上端封闭的镰刀形青铜管, 开口端与测点相接, 封闭端外有细链条与齿轮连接。测压时, 青铜管在流体压力作用下发生伸张, 从而牵动齿轮旋转, 齿轮上的指针便把压强的大小在表盘上指示出来。

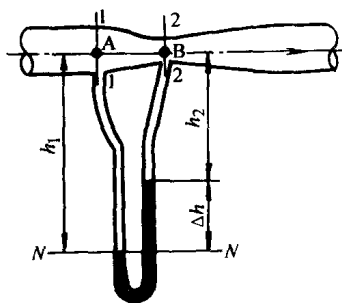


图 1-7 文丘里流量计

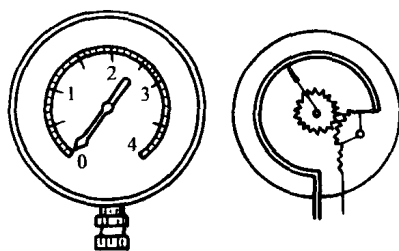


图 1-8 弹簧压力表

真空表是用来测量真空度的仪表, 亦可分为液体的和金属的两种, 其构造、作用原理与上述各测压计基本相同。

真空表常装在离心泵吸水管上，表盘读数常用 $0 \sim 760\text{mmHg}$ 表示。

三、恒定流的连续性方程

(一) 流体运动的基本概念

1. 压力流与无压流

(1) 压力流 流体在压差作用下流动时，流体整个周界都和固体壁相接触，没有自由表面，如供热工程中输送的汽、水带热体的管流，风道中的气流，给水工程中输送的水流等都是压力流。

(2) 无压流 液体在重力作用下流动时，液体的部分周界与固体壁相接触，部分周界与气体相接触，形成自由表面，如天然河流、明渠流等一般都是无压流动。

2. 恒定流与非恒定流

(1) 恒定流 流场中各空间点的运动要素（速度、压强、密度等）皆不随时间变化的流动称为恒定流动，如图 1-9a 所示。

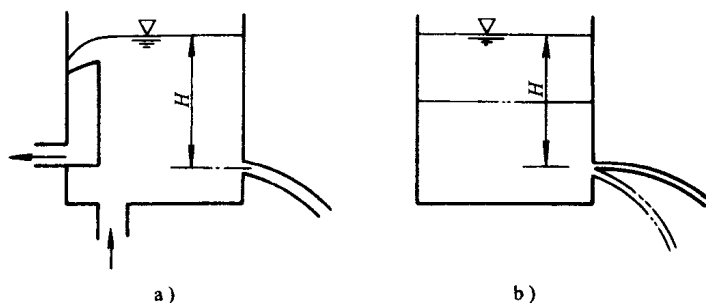


图 1-9 恒定流与非恒定流

(2) 非恒定流 流场中各空间点的运动要素（速度、压强、密度等）皆随时间变化而变动的流动称为非恒定流。水箱出流时如果水箱内水位 H 发生变化，就是非恒定流，如图 1-9b 所示。

实际工程中，多数系统正常运行时是恒定流，或虽为非恒定流，但运动参数随时间的变化缓慢，仍可近似按恒定流处理。

3. 流线与迹线

(1) 流线 流体运动时，在流速场中画出某时刻的这样的一条空间曲线，它上面所有流体质点在该时刻的流速矢量都与这条曲线相切，这条曲线就称为该时刻的一条流线，如图 1-10 所示。

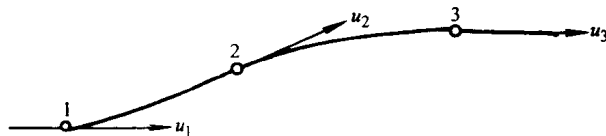


图 1-10 流线

(2) 迹线 流体质点在某一时段的运动轨迹称为迹线。流线与迹线是两个完全不同的概念。非恒定流时流线与迹线不相重合；在恒定流中，流线不随时间变化，流线上的质点继续沿流线运动，此时流线和迹线在几何上是一致的，两者重合。

4. 均匀流与非均匀流

(1) 均匀流 流线是平行直线的流动称为均匀流。如等截面长直管中的流动。

(2) 非均匀流 流线不是平行直线的流动称为非均匀流。如流体在收缩管、扩大管或弯管内的流动等。它又可分为：

1) 渐变流。流线接近平行线的流动称为渐变流，如图 1-11 中 A 区。

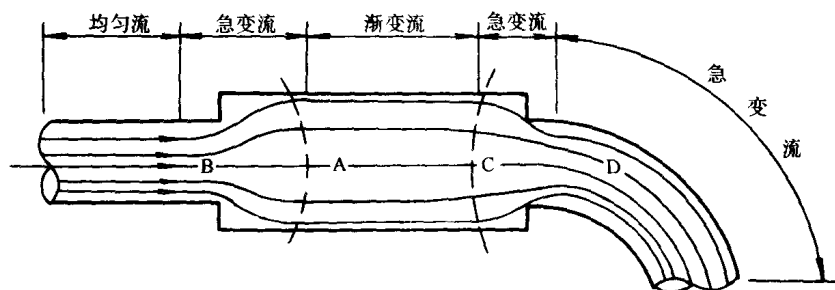


图 1-11 均匀流与非均匀流

2) 急变流。流线不能视为平行直线的流动称为急变流，如图 1-11 中 B、C、D 区。

5. 元流、总流、过流断面、流量与断面平均流速

(1) 元流 流体运动时，在流体中取一微小面积 $d\omega$ ，并在 $d\omega$ 面积上各点引出流线并形成了一股流束，称为元流，如图 1-12 所示。在元流内的流体不会流到元流外面；在元流外面的流体亦不会流进元流中去。由于 $d\omega$ 很小，可以认为 $d\omega$ 上各点的运动要素（压强与流速）相等。

(2) 总流 流体运动时，无数元流的总和称为总流，如图 1-12 所示。

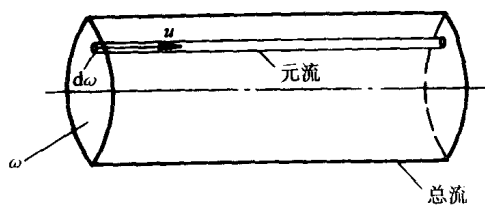


图 1-12 元流与总流

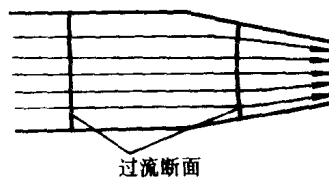


图 1-13 流线与过流断面

(3) 过流断面 流体运动时，与元流或总流全部流线正交的横断面称为过流断面。用 $d\omega$ 或 ω 表示，单位为 m^2 或 cm^2 。均匀流的过流断面为平面，渐变流的过流断面可视为平面；非均匀流的过流断面为曲面。如图 1-13 所示。

(4) 流量 流体运动时，单位时间内通过过流断面的流体体积称为体积流量。用符号 Q 表示，单位是 m^3/s 或 L/s 。一般流量指的是体积流量，但有时亦引用质量流量，质量流量表示单位时间内通过过流断面的流体质量，单位是 kg/s 。

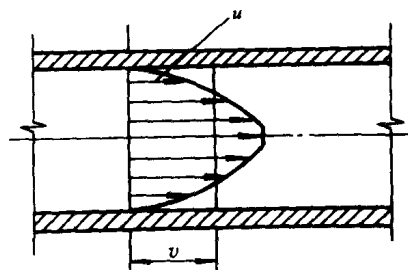


图 1-14 断面流速

(5) 断面平均流速 流体流动时，断面各点流速一般不易确定，当工程中无必要确定时，可采用断面平均流速 v 简化流动。如图 1-14 所示，断面平均流速为断面上各点流速的平均值。因此，过流断面面积乘断面平均流速 v 所得到流量，等于实际流速通过该断面的流量。即

$$Q = v\omega = \int_{\omega} u d\omega$$

显然，断面平均流速计算式为

$$v = \frac{\int_{\omega} u d\omega}{\omega} = \frac{Q}{\omega} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 表达了流量、过流断面和平均流速三者之间的关系。

(二) 恒定流的连续性方程

恒定流的连续性方程是流体运动的基本方程之一，它的形式虽然简单，但是应用极为广泛。

在恒定总流中任取一元流，如图 1-15 所示，元流在 1—1 过流断面上的面积为 $d\omega_1$ ，流速为 u_1 ；在 2—2 过流断面上的面积为 $d\omega_2$ ，流速为 u_2 。并考虑到：

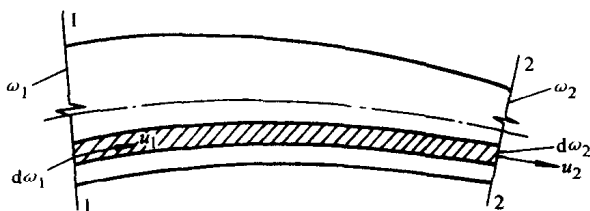


图 1-15 恒定总流段

- 1) 由于流动是恒定流，元流形状及空间各点的流速不随时间变化。
- 2) 流体是连续介质。
- 3) 流体不能从元流的侧壁流入或流出。

因此，应用质量守恒定律，流进 $d\omega_1$ 断面的质量必然等于流出 $d\omega_2$ 断面的质量。令流进的流体密度为 ρ_1 ，流出的流体密度为 ρ_2 ，则在 dt 时间内流进与流出的质量相等。

$$\rho_1 u_1 d\omega_1 dt = \rho_2 u_2 d\omega_2 dt$$

或

$$\rho_1 u_1 d\omega_1 = \rho_2 u_2 d\omega_2$$

推广到总流，得

$$\int_{\omega_1} \rho_1 u_1 d\omega_1 = \int_{\omega_2} \rho_2 u_2 d\omega_2$$

如果过流断面上密度为常数，以 $\int_{\omega} u d\omega = Q$ 代入上式，得

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (1-11)$$

或

$$\rho_1 \omega_1 v_1 = \rho_2 \omega_2 v_2 \quad (1-12)$$

式中， ρ 是密度 (kg/m^3)； ω 是总流的过流断面面积 (m^2)； v 是总流的断面平均流速 (m/s)； Q 是总流的体积流量 (m^3/s)。

式 (1-11) 与式 (1-12) 为总流连续性方程式的普遍形式——质量流量的连续性方程式。

当流体不可压缩时，流体的密度不变，由式 (1-11) 和式 (1-12) 得

$$Q_1 = Q_2 \quad (1-13)$$

或

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 \quad (1-14)$$

式 (1-13) 与式 (1-14) 是不可压缩流体的总流连续性方程——体积流量的连续性方程式。方程表示流速与断面积成反比的关系, 该式在实际工程中应用广泛。

若在工程上遇到可压缩流体, 可用总流质量流量的连续性方程式, 即式 (1-11) 和式 (1-12)。

四、恒定总流能量方程式

能量守恒及其转化规律是物质运动的一个普遍规律。应用此规律来分析流体运动, 可以揭示流体在运动中压强、流速等运动要素随空间位置的变化关系——能量方程式, 从而为解决许多工程技术问题奠定基础。

(一) 恒定总流实际液体的能量方程式

1738 年荷兰科学家达·伯努里 (Daniel Bernoulli) 根据功能原理建立了不考虑粘性作用的理想液体的能量方程式, 然后, 考虑液体的粘性影响, 推演出如图 1-16 中 1—1 和 2—2 断面间流段实际液体恒定总流的能量方程, 亦即伯努里方程式

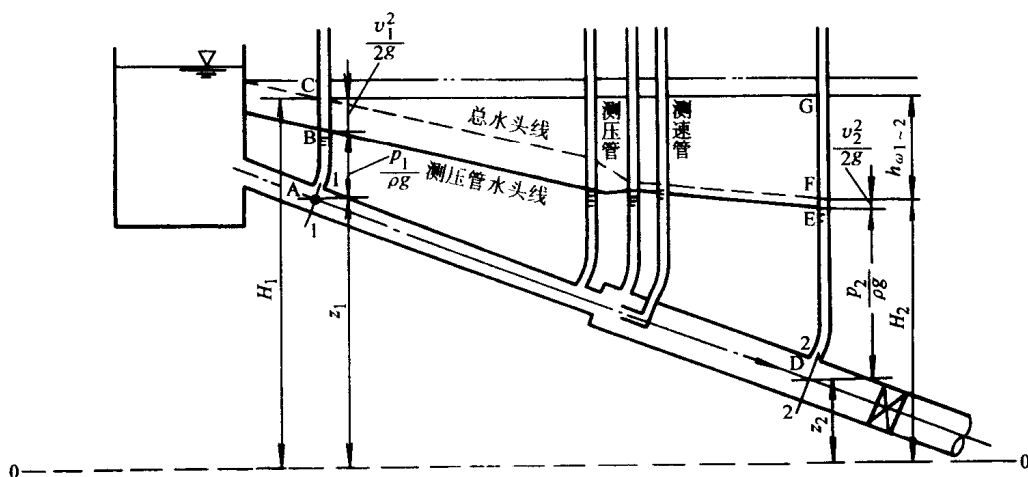


图 1-16 圆管中有压流动的总水头线与测压管水头线

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (1-15)$$

式中, z_1 、 z_2 是过流断面 1—1、2—2 上单位重量液体的位能, 也称位置水头; $\frac{p_1}{\rho g}$ 、 $\frac{p_2}{\rho g}$ 是过流断面 1—1、2—2 上单位重量液体的压能, 也称压强水头; $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ 、 $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$ 是过流断面 1—1、2—2 上单位重量液体的动能, 也称流速水头; h_{w1-2} 是单位重量液体通过流段 1—2 的平均能量损失, 也称水头损失; α 是动能修正系数, 为用断面平均流速 v 代替质点流速 u 计算动能所造成误差的修正, 一般 $\alpha = 1.05 \sim 1.1$, 为计算方便, 常取 $\alpha = 1.0$ 。

能量方程式中每一项的单位都是长度单位, 都可以在断面上用铅垂线段在图中表示出来。这样就可以更形象地描述方程式各项在流动过程中的变化关系 (压强和流速可用测压管和测速管量测出来), 如图 1-16 所示。

如果把各断面上的总水头 $H = \left(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \right)$ 顶点连成一条线, 则此线称为总水头线,