

职业技术院校教学用书

矿 山 机 械

马新民 主编

中国矿业大学出版社

前 言

本书是在“八·五”规划教材《煤矿机械》(马新民、钟光耀主编,中国矿业大学出版社,1994年)的基础上,经过较大幅度地修改或重新编写而成。供高等职业技术学院或中等专业学校采矿专业以及矿山机械制造、机电技术应用、企业电气化等需开设矿山机械课的专业使用。

全书内容共分三篇:第一篇液压传动技术基础,第二篇采掘工作面机械,第三篇轨道运输与矿山固定机械。较全面地介绍了液压传动、采煤机械、液压支护设备、掘进装载机械、运输机械以及提升、排水、通风、压气设备的结构原理、工作性能、选型方法、配套原则和使用维护知识。

在编写中,力求使教材内容适应矿山生产的现状和发展的需要,力争使教材具有鲜明的思想性、先进性、启发性、适用性和科学性,突出职业技术教育的特色,以适应培养应用型人才的需要。

参加本书编写的有:马新民(第二、三、四、五、六、七章)、钟光耀(第十七章)、梁兴义(第八、十一章)、黄留安(第九章)、丁原廉(第十、十二章)、冯海明(第十三、十四章)、马立克(第一、十五、十六章)。全书由马新民统稿并担任主编。

编写过程中,利用和参考了许多文献资料,我们谨向这些文献资料的编著者和支持编写工作的单位表示衷心的感谢。由于我们水平有限,书中不妥之处在所难免,切望读者批评指正。

编 者

1999年2月

目 录

第一篇 液压传动技术基础

第一章 流体力学基础	(1)
第一节 流体的主要物理性质	(1)
第二节 流体静力学	(4)
第三节 流体动力学基础	(8)
第四节 流动阻力与能量损失	(13)
第五节 流体在小孔及缝隙中流动	(17)
第六节 水击与气蚀现象	(20)
第二章 液压传动基本概念与工作液体	(23)
第一节 液压传动基本概念	(23)
第二节 工作液体	(25)
第三章 液压泵	(32)
第一节 概述	(32)
第二节 齿轮泵	(35)
第三节 叶片泵	(41)
第四节 柱塞泵	(45)
第四章 液压马达与液压缸	(56)
第一节 液压马达	(56)
第二节 液压缸	(67)
第五章 液压控制阀	(73)
第一节 方向控制阀	(73)
第二节 压力控制阀	(81)
第三节 流量控制阀	(90)
第四节 其他液压控制阀	(96)
第六章 液压辅助元件	(100)
第一节 油管 and 管接头	(100)
第二节 油箱和热交换器	(103)
第三节 滤油器	(105)
第四节 蓄能器	(108)
第五节 密封装置	(110)
第七章 液压传动系统	(114)

第一节 液压回路和系统的形式	(114)
第二节 液压系统的调速	(115)
第三节 液压系统实例分析	(119)

第二篇 采掘工作面机械

第八章 采煤机械	(125)
第一节 概述	(125)
第二节 单滚筒采煤机	(137)
第三节 MLS_3-170 型双滚筒采煤机	(158)
第四节 其他形式采煤机	(173)
第五节 工作面喷雾除尘供水系统	(190)
第九章 液压支护设备	(195)
第一节 概述	(195)
第二节 液压支架的主要部件及结构	(201)
第三节 液压支架的典型结构	(217)
第四节 液压支架的控制	(224)
第五节 单体液压支柱与滑移顶梁支架	(226)
第六节 乳化液泵站	(232)
第十章 采区运输机械	(240)
第一节 刮板输送机	(240)
第二节 桥式转载机	(263)
第三节 胶带输送机	(265)
第十一章 采煤工作面机械配套性能	(289)
第一节 滚筒采煤机的选型	(289)
第二节 支护设备的选型	(292)
第三节 输送设备的配套性能	(295)
第四节 采煤设备的配套性能	(296)
第十二章 掘进装载机械	(303)
第一节 概述	(303)
第二节 煤巷掘进机	(304)
第三节 装载机械	(317)

第三篇 轨道运输与矿山固定机械

第十三章 轨道运输	(329)
第一节 矿用电机车运输	(329)
第二节 单轨吊运输	(344)
第三节 钢丝绳运输	(346)

第十四章 矿井提升设备	(350)
第一节 概述.....	(350)
第二节 提升容器.....	(351)
第三节 提升钢丝绳.....	(356)
第四节 矿井提升机.....	(361)
第五节 提升设备的运行理论.....	(370)
第六节 电动机容量验算及提升电耗计算.....	(378)
第七节 斜井串车提升系统.....	(380)
第十五章 矿井排水设备	(391)
第一节 概述.....	(391)
第二节 离心式水泵的工作理论.....	(392)
第三节 离心式水泵的结构.....	(398)
第四节 离心式水泵的运行.....	(403)
第十六章 矿井通风设备	(408)
第一节 概述.....	(408)
第二节 通风机的特性曲线.....	(409)
第三节 通风机的构造及反风装置.....	(412)
第四节 通风机在网路中的工作.....	(422)
第五节 矿井通风设备选型设计.....	(427)
第十七章 矿山空气压缩设备	(434)
第一节 概述.....	(434)
第二节 活塞式空压机的工作循环.....	(436)
第三节 活塞式空压机的结构.....	(440)
第四节 活塞式空压机的附属设备.....	(447)
第五节 其他类型的空压机.....	(448)
附录 常用液压传动图形符号.....	(450)
主要参考文献.....	(459)

第一篇 液压传动技术基础

第一章 流体力学基础

液体和气体,统称为流体。

流体力学是力学的一个分支,是研究流体静止和运动的力学规律,以及流体和固体之间相互作用的一门应用科学。

流体在矿山生产中应用得非常广泛。矿井通风、排水、液压传动与气动等,都是以流体作为工作介质,通过流体的各种物理作用以及对流体的流动有效地加以组织来实现的。

第一节 流体的主要物理性质

流体是一种可以流动的、与容器形状保持一致的物质。它几乎不能抗拉,抗剪的能力也很小,但是能够承受较大的压力。

一、密度与重度

(一) 密度

密度是表示流体具有惯性的物理量。对于均质流体,单位体积的流体所具有的质量称为密度,用 ρ 来表示,法定单位是 kg/m^3 。

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

式中 m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

(二) 重度

重度是表示流体具有重力特性的物理量。对于均质流体,作用于单位体积流体的重力称为重度,用 γ 来表示,单位是 N/m^3 。

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

式中 G ——流体的重力, N ;

V ——流体的体积, m^3 。

依据 $G = mg$ 的关系式,两端同除以体积 V ,则得重度与密度的重要关系

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

式中 g ——当地的重力加速度, m/s^2 。

需要说明的是: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,当指出某种流体的密度或重度值时,必须指明所处的外界压力和温度条件。

常见的几种流体的密度和重度见表 1-1。

表 1-1 常见流体在标准大气压下的密度和重度

名 称	密 度 /kg·m ⁻³	重 度 /N·m ⁻³	测定条件	名 称	密 度 /kg·m ⁻³	重 度 /kN·m ⁻³	测定条件
空 气	1.205	11.80	20 ℃	水	999.9	9.809	0 ℃
氮 气	1.160	11.37	20 ℃	水	1 000.0	9.810	5 ℃
氧 气	1.123	11.01	20 ℃	水	999.7	9.807	10 ℃
水 蒸 气	1.205	11.82	20 ℃	水	998.2	9.792	20 ℃
一氧化碳	1.160	11.37	20 ℃	水 银	13 550.0	132.926	20 ℃
二氧化碳	1.840	18.03	20 ℃	酒 精	790	7.742	20 ℃
乙 炔	1.091	10.70	20 ℃	液压矿油	845~900		20 ℃

二、压缩性和膨胀性

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,体积增大,密度减小的性质,称为流体的膨胀性。

(一) 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性和膨胀性很小,当压力和温度变化不大时,可以认为液体的体积不发生变化,既不可压缩又不膨胀。但是在一些特殊情况(如水击现象)下,就必须考虑其影响,否则液体的压缩性和膨胀性引起的影响,将会造成很大的误差。

(二) 气体的压缩性和膨胀性

气体与液体不同,温度和压力的变化都将引起气体体积的很大变化。但是具体问题也要具体分析,气体在流动过程中压力和温度的变化较小(如矿井通风系统)时,可以忽略气体的压缩性和膨胀性。若压力或温度变化较大(如空气压缩机)时,气体的压缩性和膨胀性不能忽略。

三、粘性

流体流动时内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力的性质,称为粘性。它对流体的运动起着拖阻作用。现以流体在管中流动为例,来观察其运动情况,如图 1-1 所示。当流体在管中缓慢流动时,由于流体壁面间的附着力,分子运动以及分子间的内聚力的存在,使流动受到阻滞,在流动截面上各点的速度不同。紧贴管壁的流体质点,粘附在管壁上

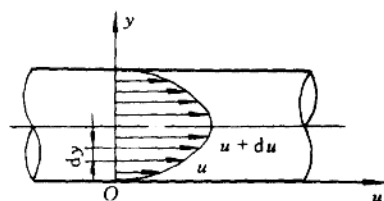


图 1-1 流体在圆管中的流速分布

流速为零。位于管中心轴线上的流体质点,受管壁的影响最小,因而流速最大。介于管壁和管轴之间的流体质点,将以不同的速度向右运动,其速度将从管壁至管轴线,由零增加到最大。此变化规律可用速度分布图来表示。由于流体各薄层的流速不同,因而各薄层质点间产生相对运动,从而产生内摩擦力阻碍相对运动,为了维持流体的运动状态,必须消耗一定的能量来克服内摩擦力,这就是流体运动时产生能量损失

的原因之一。

流体静止时,不显示粘性。

(一) 牛顿内摩擦定律

流体运动时产生的内摩擦力究竟与哪些因素有关?应该如何确定?牛顿通过大量的实验研究,于1686年提出了流体运动的内摩擦定律。

大量实验证明,流层间内摩擦力的大小与以下因素有关:

- (1) 与两流层间的速度差 du 成正比,与流层间距离 dy 成反比;
- (2) 与两流层间的接触面积 A 成正比;
- (3) 与流体的种类有关;
- (4) 与流体的压力无关。

内摩擦定律的数学表达式可写为

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

式中 F ——流层间内摩擦力, N;

μ ——与流体性质有关的比例因数,称为动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

A ——流层的接触面积, m^2 ;

du/dy ——速度梯度,表示流速沿垂直于流速方向 y 的变化率, $1/\text{s}$ 。

(二) 流体粘度的表示方法

粘度是表示粘性大小的物理量。通常有三种表示方法。

1. 动力粘度

动力粘度又称动力粘滞因数或绝对粘度,其数学表达式可由公式(1-4)导出

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

式中 τ ——单位面积上的内摩擦力,又称切应力, N/m^2 。

μ 的法定单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。不同流体有不同的 μ 值,同一流体的 μ 值越大,其粘性越强。 μ 的物理意义是两层流体间的速度梯度 $du/dy=1$ 时所产生的切应力,即 $\mu = \tau$ 。因为 μ 的单位含有力的因次,是一个动力学的要素,反映了粘性的动力特征,因此称 μ 为动力粘度。

2. 运动粘度

运动粘度也称运动粘滞因数,它是流体动力粘度与其密度在一个标准大气压下温度相同时的比值,用 ν 来表示

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

ν 的法定单位是 m^2/s 、 mm^2/s 。我国润滑油的牌号是以 40°C 时的运动粘度(mm^2/s)来表示的。例如,32号 L-HH 液压油,就是指这种油在 40°C 时的运动粘度为 $32 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

运动粘度无特殊的物理意义,只因在计算和分析流体运动问题时,经常遇到需要考虑密度和动力粘度的情况,所以才引出运动粘度这个物理量。由于 ν 的单位中含有运动学的要素,所以称为运动粘度。

表1-2列举了几种流体的动力粘度和运动粘度。

表 1-2 几种流体在标准大气压下的粘度

气体名称	$\mu/10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$t/^\circ\text{C}$	液体名称	$\mu/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$t/^\circ\text{C}$
空 气	17.25	13.7	0	水	1.308	1.308	10
空 气	17.70	14.7	10	水	1.005	1.007	20
空 气	18.20	15.7	20	水 银	1.560	0.115	20
氮 气	17.60	15.0	20	原 油	7.200	8.411	20
一氧化碳	18.20	16.0	20	汽 油	0.290	0.428	20
二氧化碳	14.80	8.00	20	煤 油	1.920	2.376	20
水 蒸 气	10.10	13.50	20	酒 精	1.190	1.510	20

3. 相对粘度

相对粘度又称为条件粘度。它是用特定的粘度计在规定的条件下直接测出的粘度。根据测量条件的不同,各国采用相对粘度的单位也不一样。我国采用恩氏粘度计测定粘度,其值称为恩氏粘度。用 $^\circ\text{E}$ 表示。

恩氏粘度是指 200 cm^3 的被测液体从恩氏粘度计中流出所需的时间 t_1 与同体积 20°C 的蒸馏水从该恩氏粘度计中流出的时间 t_2 (约 51 s) 之比,即

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2}$$

恩氏粘度与运动粘度的换算关系如下:

$$\nu_t = 7.31^\circ\text{E}_t - \frac{6.31}{^\circ\text{E}_t} \quad (1-7)$$

上式中的 ν_t 和 $^\circ\text{E}_t$ 分别为试验温度为 t 时的运动粘度和恩氏粘度。 ν_t 的单位 mm^2/s 。

压力和温度对液体的粘性都有影响,液体的粘性随压力的升高而增大,但在压力不很高时,其粘性变化很小,可以忽略。温度的变化对液体的粘性影响较大,液体的粘性随温度的升高而降低,流动性增强。气体则相反,温度升高时,气体分子运动加强,动量增大,因此气体的粘性随温度升高而增大。

第二节 流体静力学

流体静力学是研究流体在静止状态下的力学规律以及这些规律在工程上的应用。当流体处于静止状态时,各质点间不产生相对运动,因而流体的粘性不起作用。

一、流体静压力及其特征

作用于流体上的力有表面力和质量力两种。表面力是作用于流体表面上,并与作用的表面积成正比的力,它是由与流体相接触的其他物体(流体或固体)的作用而产生的;质量力是作用于流体每一质点上,并与流体质量成正比的力,如重力、惯性力等。

(一) 流体静压力

流体静压力是指流体处于静止状态时,单位面积上所受的力。静压力在物理学中称为压强,在液压传动中简称为压力。

若法向作用力 F 均匀地作用在面积 A 上, 则静压力 p 为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-8)$$

若在静止流体中围绕某点取一面积 ΔA , 设作用在这小块面积 ΔA 上的法向力为 ΔF 。当面积 ΔA 无限缩小到一点时, 这个比值的极限称为该点的静压力, 即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1-9)$$

(二) 流体静压力的特性

流体静压力有两个重要特性。

(1) 流体静压力的方向必然沿着作用面的内法线方向, 即垂直指向作用面。

(2) 静止流体中任一点各方向的静压力均相等。说明在静止流体中, 任一点的流体静压力的大小与作用方向无关, 只与该点的位置有关。

二、流体静压力的分布规律

如图 1-2 所示, 液体在重力作用下处于静止状态。在静止液体中取一点 m , m 点在液面下的深度为 h , 液面上的压力为 p_0 。为了研究 m 点的静压力, 从静止液体中取一微小圆柱体, 使圆柱体的底面包含 m 点, 顶面与液面重合。设微小圆柱体的横截面积为 ΔA , 高为 h , 取微小圆柱体为隔离体, 根据力学平衡条件, 作用在微小圆柱体上的所有外力在三个坐标轴上投影的代数和应等于零。

作用在微小圆柱体上的外力有:

(1) 顶面上的力: $F_0 = p_0 \Delta A$, 方向垂直向下;

(2) 底面上的力: $F = p \Delta A$, 方向垂直向上;

(3) 重力: $G = \gamma h \Delta A$, 方向垂直向下;

(4) 侧面上的力: F_x, F_y , 方向都是水平对称的, 它们之间成对地互相平衡。

依据力学平衡条件, 可写出 z 轴方向力的平衡方程式为

$$F - F_0 - G = 0$$

$$p \Delta A - p_0 \Delta A - \gamma h \Delta A = 0$$

化简、移项得

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-10)$$

式中 p ——流体中某点的静压力, Pa;

p_0 ——液面压力, Pa;

γ ——液体重度, N/m^3 ;

h ——某点在液面下的深度, m。

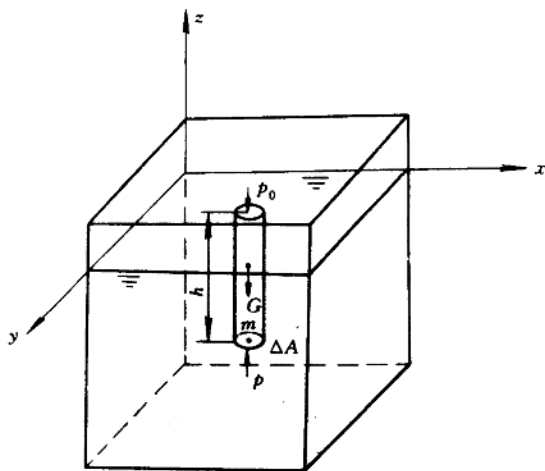


图 1-2 流体静力学基本方程式推证

式(1-10)是在重力作用下,静止液体内压力分布规律的数学表达式。称为流体静力学基本方程式。方程式表明:

- (1) 在重力作用下,液体内的静压力随着深度 h 的增加而增大;
- (2) 静压力由两部分组成,即液面压力 p_0 和单位面积上的重力 γh ;
- (3) $h = \text{常数}$ 时, $p = \text{常数}$ 。即同一容器内深度相同的各点静压力也相等。

在静止液体中,由压力相等各点组成的面称为等压面。在静止、同种、连续的流体中,水平面就是等压面,如果不能同时满足这三个条件,水平面就不是等压面。

三、流体静压力的度量

(一) 计算基准

压力有两种计算基准:绝对压力和相对压力。

以完全没有气体存在的绝对真空为零点起算的压力称为绝对压力,用符号 p_i 表示;以大气压力 p_a 为零点起算的压力称为相对压力,用符号 p 表示。

相对压力、绝对压力和大气压力的相互关系是

$$p = p_i - p_a \quad (1-11)$$

某点的绝对压力只能是正值。但是,某点的相对压力可正可负。当相对压力为正值时,称为正压(即压力表读数);为负值时,称为负压。负压的绝对值称为真空度(即真空表读数),用 p_z 表示。

$$p_z = -p = p_a - p_i \quad (1-12)$$

为了区别以上几种压力,将它们的关系表示在图 1-3 上。

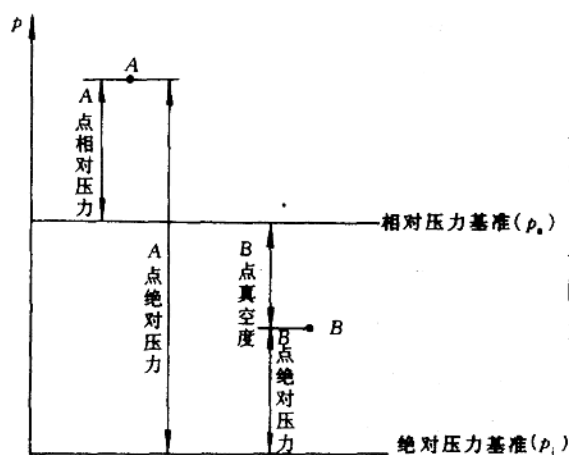


图 1-3 压力关系图示

(二) 度量单位

我国法定的压力单位为帕(Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。因为 Pa 的单位太小,故常用单位为千帕(kPa)和兆帕(MPa), $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$, $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

也有用大气压和液柱高度作为压力单位的。应当明确,这两种单位已属废除单位,在度量或计算出结果后应换算为法定单位,换算关系如下:

$$1 \text{ atm (标准大气压)} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ at (工程大气压)} = 98.1 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ mmHg (毫米汞柱)} = 133.3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mH}_2\text{O (米水柱)} = 9.81 \text{ kPa}$$

(三) 液柱测压计

常用的测压计有弹簧金属式、电测式和液柱式三种。由于液柱式测压计具有直观、可靠、经济、方便诸多优点,因而在工程上得到广泛的应用。

1. U 形管测压计

U 形管测压计的应用范围较广,既可以测量液体或气体内部较大的压力,也可用于测量真空度。

如图 1-4 所示,U 形管内装有重度为 γ_s 的液体(通常为水银)。测量时 U 形管的一端

连接被测容器 A, 另一端开口与大气相通。根据 U 形管中液面的位置变化测得 A 点压力。

根据流体静力学基本方程式

$$p_{1j} = p_A + \gamma h_1$$

$$p_{2j} = p_a + \gamma_g h_2$$

因为 1 和 2 是等压面, 于是得到

$$p_A + \gamma h_1 = p_a + \gamma_g h_2$$

A 点的相对压力

$$p_A = p_{Aj} - p_a = \gamma_g h_2 - \gamma h_1 \quad (1-13)$$

当被测容器内为气体时, 因气体的重度很小, 因此 γh_1 可忽略不计, 于是得到

$$p_A = \gamma_g h_2 \quad (1-14)$$

如图 1-5 所示, 应用 U 形管测压计测定 B 点真空度。当左边管中水银柱上升某一高度值 h_2 时, B 点的真空度为

$$p_{Bz} = \gamma h_1 + \gamma_g h_2 \quad (1-15)$$

如果被测流体是气体, 则 B 点的真空度为

$$p_{Bz} = \gamma_g h_2 \quad (1-16)$$

2. 压差计

将 U 形管的两端分别与被测的两容器相连, 即可测量两容器的压力差。如图 1-6 所示。

根据流体静力学基本方程式,

可得

$$p_1 = p_A + \gamma_A h_1$$

$$p_2 = p_B + \gamma_B h_2 + \gamma_g h$$

因为

$$p_1 = p_2$$

所以

$$p_A - p_B = \gamma_g h + \gamma_B h_2 - \gamma_A h_1 \quad (1-17)$$

若 $\gamma_A = \gamma_B = \gamma$, 则

$$p_A - p_B = \gamma_g h + \gamma(h_2 - h_1) \quad (1-18)$$

若 A、B 两容器内均为气体, 则

$$p_A - p_B = \gamma_g h \quad (1-19)$$

3. 微压计

当被测压力很低时, 为了放大读数, 提高测量精度, 采用斜管式微压计, 如图 1-7 所示。测量前, 容器内的液面与斜管内的液面齐平。测量时, 将容器与被测压力 p_x 接通, 容器内液面下降 h_1 , 斜管内液面上升 h_2 , 倾斜长度为 L , 于是得到

$$p_x = \gamma h = \gamma(h_1 + h_2)$$

设容器断面积为 A , 玻璃管断面积为 a , 倾斜角为 θ , 则

$$A h_1 = a L$$

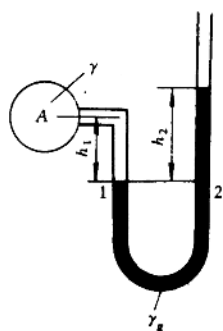


图 1-4 水银测压计

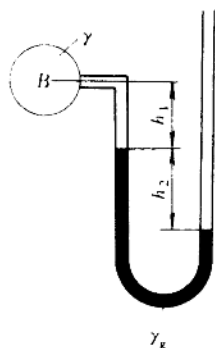


图 1-5 真空计

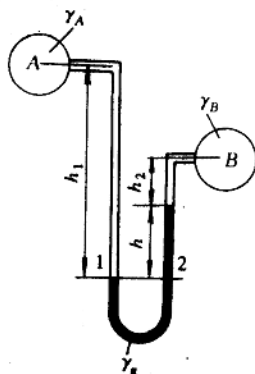


图 1-6 压差计

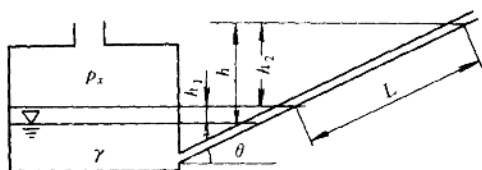


图 1-7 微压计

$$h_1 = \frac{a}{A} L$$

$$h_2 = L \sin \theta$$

$$p_x = \gamma \left(\frac{a}{A} L + L \sin \theta \right) \quad (1-20)$$

当 $A \gg a$ 时

$$p_x = \gamma L \sin \theta \quad (1-21)$$

θ 角越小, 测量液体的重度越小, 放大

倍数越大, 测量精度越高。

四、流体静压力的传递

由流体静力学基本方程式 $p = p_0 + \gamma h$ 可知, p_0 与 γh 无关, 属于表面力。 p_0 将传递到液体内的各点上, 使任意一点的压力 p 发生相应的改变。由此可知, 静止液体表面上的压力变化将等值地传递到液体中的任意点。这就是静压力的等值传递规律, 也称帕斯卡定律。

静压力等值传递规律在工程上应用广泛, 如水压机、油压千斤顶等。图 1-8 为水压机工作原理图。

在相连通的两个容器内的液体表面上各置一个活塞, 面积分别为 A_1 和 A_2 , 在小活塞上施加力 F_1 , 于是小活塞下液体的压力应为

$$p = \frac{F_1}{A_1}$$

根据帕斯卡定律, p 将等值地传递到大活塞下的液体中, 使大活塞产生的作用力为

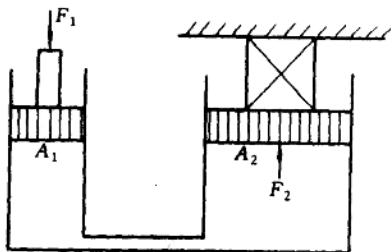


图 1-8 水压机工作原理图

$$F_2 = p A_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (1-22)$$

由于 $A_2 > A_1$, 所以作用在大活塞上的力 F_2 要比小活塞上的力 F_1 大很多。

第三节 流体动力学基础

无论在自然界或工程实际中, 流体静止总是相对的, 运动才是绝对的。流体最基本的特征就是它的流动性。因此, 研究流体运动规律具有重要意义。

流体动力学研究流体的运动规律及其在工程上的实际应用。

流体运动时, 由于流体本身具有粘性, 会使内部产生摩擦力, 阻滞流体运动, 并给流体运动的研究带来困难。为此, 引入理想流体概念。所谓理想流体, 是指不存在粘性和压缩性的流体。而客观存在的流体称为实际流体。

一、基本概念

(一) 稳定流动与非稳定流动

按流体的运动要素是否随时间变化, 可以分为稳定流动与非稳定流动。

当流体运动时, 流体任意一点的流速、压力等运动要素不随时间而发生变化的流动, 称为稳定流动; 否则称为非稳定流动。

(二) 过流断面

过流断面是指与流体运动方向相垂直的横断面,用符号 A 表示,单位为 m^2 。

(三) 流量

流量是指单位时间通过过流断面的流体体积,用符号 Q 表示,单位为 m^3/s 、 L/min 。

(四) 断面平均流速

过流断面的流量除以面积所得的商称为断面平均流速,以 v 表示,单位 m/s 。即

$$v = \frac{Q}{A}$$

平均流速 v 不是过流断面上各质点的实际流速,它是在保持实际流量的条件下所取的平均值,是一个假想的流速,按此流速计算的流量,恰好等于过流断面上以实际流速所通过的流量。如图 1-9 所示。

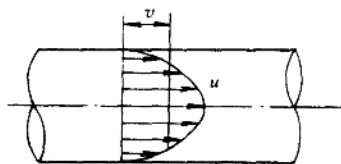


图 1-9 断面平均流速

二、流体的连续性方程式

质量守恒是自然界的普遍规律,流体力学也必然遵守这个规律。在流体力学中,连续性方程就是根据这个规律推导出来的。如图 1-10 所示。

单位时间内流入断面 1-1 的流体质量应等于流出断面 2-2 的流体质量。即

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \text{常数}$$

两边同除 ρ 得

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = Q = \text{常数} \quad (1-23)$$

或

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

图 1-10 连续性方程的推证

式(1-23)称为连续性方程式。

例 1-1 如图 1-11 所示,有一变径水管,已知管径 $d_1 = 200 \text{ mm}$, $d_2 = 100 \text{ mm}$,若 d_1 处的断面平均流速 $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$,试求 d_2 处的断面平均流速 v_2 。

解: 由于圆管的面积为

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

所以

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

把 $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$, $d_1 = 200 \text{ mm}$, $d_2 = 100 \text{ mm}$ 代入上式,可得

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 0.25 \times \left(\frac{0.2}{0.1}\right)^2 = 1 \text{ m/s}$$

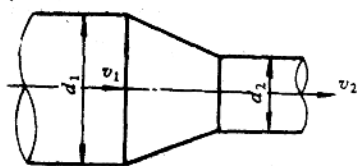


图 1-11 变径水管

三、流体的能量方程式

运动流体各质点沿流程的位置、压力和速度之间存在着相依变化的关系。这说明流体内部各种能量是可以相互转换的。流体内部的能量转换规律称为能量方程式,又称为伯努利方程式。它是能量转换与守恒定律在流体力学中的具体应用,是流体力学中重要的基本方程式。

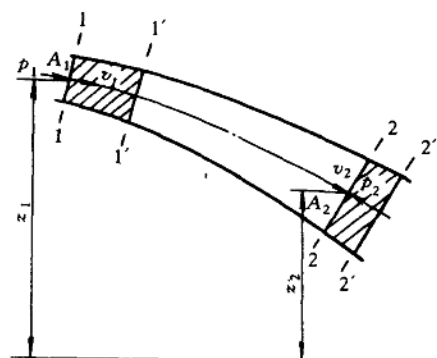


图 1-12 能量方程的推证

(一) 能量方程式的推导

如图 1-12 所示,重力作用下的流体做稳定流动,在其中任意截取两个断面 1-1 和 2-2。

设两个断面的面积分别为 A_1 、 A_2 , 平均流速分别为 v_1 、 v_2 , 压力分别为 p_1 、 p_2 , 几何高度分别为 z_1 、 z_2 。经过 dt 时间, 流段由 1-2 位置分别移动到 1'-2' 位置。根据动能定理, 外力在 dt 时间内做功之和等于此段时间动能增量。

$$\text{压力做功: } p_1 A_1 v_1 dt - p_2 A_2 v_2 dt = Q(p_1 - p_2)dt$$

$$\text{重力做功: } \gamma A_1 v_1 z_1 dt - \gamma A_2 v_2 z_2 dt = \gamma Q(z_1 - z_2)dt$$

$$\text{动能增量: } \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \rho Q \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) dt$$

于是可得

$$\gamma Q(z_1 - z_2)dt + Q(p_1 - p_2)dt = \rho Q \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) dt$$

全式除以 γ 并移项得

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1-24)$$

上式即为理想流体的能量方程式, 也称理想流体的伯努利方程式。对于实际流体, 由于粘性的存在, 流动中必然要产生摩擦阻力, 消耗一部分能量。另外以断面平均流速代替实际流速计算动能时, 需乘以修正因数 α , 如果用 h_w 表示能量损失, α_1 、 α_2 表示动能修正因数, 则实际流体的能量方程式为

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w \quad (1-25)$$

式中, 动能修正因数近似等于 1。

(二) 能量方程式的意义

从物理学的观点来看, 能量方程式中的各项, 表示流体的某种能量, 其单位为焦耳/牛顿 (J/N), 或米 (m)。

z 是指单位重力流体所具有的位置势能, 简称单位位能。

p/γ 是指单位重力流体所具有的压力势能, 简称单位压能, 压能的大小可以用测压管内液面高度来表示。

$z + p/\gamma$ 是指单位重力流体的位置势能与压力势能之和, 简称单位势能。

$\alpha v^2/2g$ 是指单位重力流体所具有的动能, 简称单位动能。

h_w 是指单位重力流体从一断面流至另一断面, 因克服各种阻力所引起的能量损失, 简称单位能量损失。

$z + p/\gamma + \alpha v^2/2g$ 是指单位重力流体所具有的总能量。

如果用 E_1 和 E_2 分别表示两个断面的总能量, 则公式(1-25)可写成

$$E_1 = E_2 + h_w$$

可见, $E_1 > E_2$ 。这说明流体总是从能量较大的断面流向能量较小的断面。

(三) 能量方程式的应用条件及注意事项

1. 应用条件

- (1) 流体必须是做稳定流动;
- (2) 流体不可压缩, 即 $\gamma = \text{常数}$;
- (3) 符合连续性方程, 即 $Q = \text{常数}$;
- (4) 两断面间没有能量的输入和输出;
- (5) 两断面必须为缓变流。

所谓缓变流, 如图 1-13 所示, 是指沿流程各断面的形状、大小和流动方向没有突变的流动; 反之称为急变流。

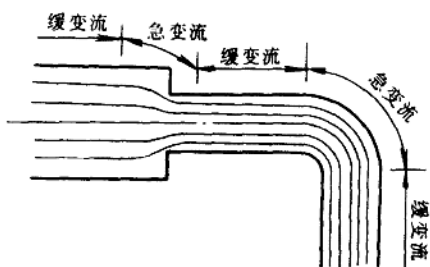


图 1-13 缓变流与急变流

2. 注意事项

(1) 基准面一般应选在下游断面中心, 这样可使 z 不出现负值。但是对不同的计算断面必须选取同一基准面。

(2) 压力基准的选择, 可以选相对压力, 也可以选绝对压力, 但方程式两边必须选取同一基准。

(3) 如果两断面间有能量输入或输出时, 能量方程式应改写为

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \pm H = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w$$

式中 $+H$ ——单位重力流体获得的能量;

$-H$ ——单位重力流体失去的能量。

(4) 方程式中的能量损失 h_w 一项, 应加在流动的末端断面上。

(四) 能量方程式的应用举例

例 1-2 如图 1-14 所示, 已知文德里流量计管径 $d_1 = 100 \text{ mm}$, $d_2 = 50 \text{ mm}$, 试求当水银压差计的读数 $\Delta h = 0.5 \text{ m}$ 时, 管内液体的流量。

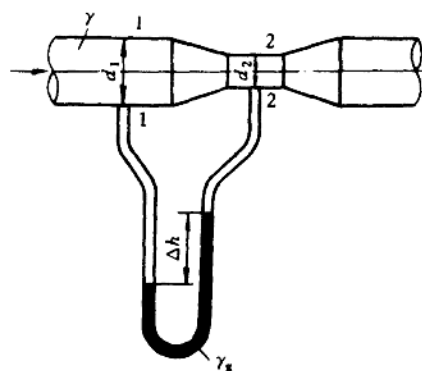


图 1-14 文德里流量计

解: 选 1-1 和 2-2 两断面, 以管轴线为基准, 列出能量方程式。

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w$$

由于 $z_1 = z_2$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, 令 $h_w = 0$, 得

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

根据连续性方程可知

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

根据静力学基本方程可知

$$p_1 - p_2 = \Delta h (\gamma_g - \gamma)$$

于是可得

$$\frac{\gamma_g - \gamma}{\gamma} \Delta h = \frac{v_1^2 [(d_1/d_2)^4 - 1]}{2g}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{(d_1/d_2)^4 - 1} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma} - 1 \right)}$$

所以流量

$$Q = \frac{1}{4} \pi d_1^2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{(d_1/d_2)^4 - 1} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma} - 1 \right)}$$

若考虑两断面间的能量损失, 用一个小于 1 的因数进行修正, 于是, 实际流量

$$Q = \mu \frac{\pi}{4} d_1^2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{(d_1/d_2)^4 - 1} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma} - 1 \right)} \quad (1-26)$$

式中 μ ——流量因数, 一般为 0.95~0.98。

本例中 $\mu = 0.98$, 则

$$Q = 0.98 \times \frac{\pi \times 0.1^2}{4} \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 0.5}{(0.1/0.05)^4 - 1} \times \left(\frac{132926}{9810} - 1 \right)} = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$$

例 1-3 如图 1-15 所示, 已知皮托管测速装置中的测压管水头为 h_1 , 测速管水头为 h_2 , 求管内液体流速。

解: 弯管管口 A 点正对来流方向, 管内液体呈静止状态。这说明 A 点的动能全部转化为压力能。因此, A 点的总水头 h_2 等于该点的压力水头 h_1 和速度水头 $v^2/2g$ 之和。即

$$h_1 + \frac{v^2}{2g} = h_2$$

$$v = \sqrt{2g(h_2 - h_1)} = \sqrt{2g\Delta h} \quad (1-27)$$

本例中 $h_1 = 0.2 \text{ m}$, $h_2 = 0.7 \text{ m}$, 则

$$v = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.5} = 3.132 \text{ m/s}$$

例 1-4 如图 1-16 所示, 已知水泵流量 $Q = 20 \text{ L/s}$, 吸水管直径 $d_2 = 100 \text{ mm}$, 吸水管能量损失 $h_w = 3 \text{ mH}_2\text{O}$, 若水泵最大允许吸上真空高度 $H_s = 7 \text{ m}$, 试求水泵的安装高度 H_g 。

解: 以水井水面为基准, 选取 1—1, 2—2 两断面, 列两断面能量方程为

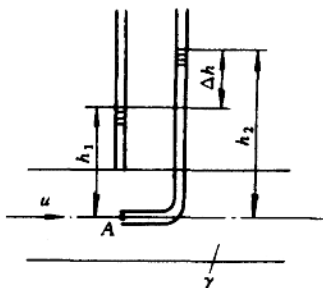


图 1-15 皮托管原理

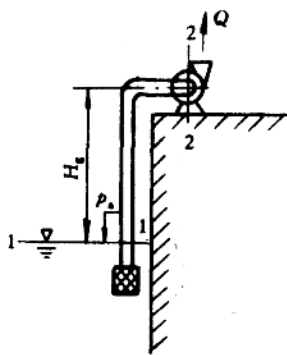


图 1-16 水泵安装高度