

中等专业学校交流讲义

泵、压气机与通风机

沈阳建筑工业专科学校编



中国工业出版社

目 录

緒 論

第一篇 水力学基础

第一章 液体及其基本性质	3
§ 1—1 理想液体的概念	3
§ 1—2 液体的主要物理性質	3
§ 1—3 作用在液体上的外力	5
第二章 液体的运动	7
§ 2—1 稳定流动和非稳定流动	7
§ 2—2 跡綫和流綫	7
§ 2—3 过水断面和流量	9
§ 2—4 平均流速和連續性方程式	10
§ 2—5 理想液体流速的伯諾里方程式	11
§ 2—6 实际液体总流的伯諾里方程式	14
第三章 液体流动的阻力和損失	20
§ 3—1 液体流动的相似准数——雷諾准数	20
§ 3—2 液体流动的两种阻力損失	22
§ 3—3 液体流动的两类型	23
§ 3—4 液体的層流运动	25
§ 3—5 液体的紊流运动	28
§ 3—6 局部阻力	31
第四章 管路的水力計算	34
§ 4—1 管路水力計算的基础	34
§ 4—2 简单管路的水力計算	37
§ 4—3 复杂管路的水力計算	38

第二篇 水 泵

第五章 泵的主要参数、吸入过程	42
§ 5—1 泵的主要参数	42
§ 5—2 泵的吸入过程和排出过程	44
第六章 往复泵	48
§ 6—1 往复泵的作用原理及分类	48
§ 6—2 往复泵的流量	51
§ 6—3 曲柄传动泵的活塞运动規律	51
§ 6—4 往复泵的流量曲綫圖	53
§ 6—5 动力泵的吸入过程和排出过程	56
§ 6—6 空气室的作用原理	61

§ 6—7 往复泵的構造和主要另件	65
§ 6—8 往复泵的操作	71
第七章 离心泵	73
§ 7—1 离心泵的作用原理及分类	73
§ 7—2 离心泵的理论	74
§ 7—3 离心泵的流量、效率与功率	78
§ 7—4 汽蝕	79
§ 7—5 轴向压力	80
§ 7—6 比轉数	81
§ 7—7 离心泵的特性曲綫	83
§ 7—8 离心泵在管道中的工作	88
§ 7—9 离心泵的选择	91
§ 7—10 离心泵的構造和主要另件	92
§ 7—11 离心泵的操作	98

第三篇 工程热力学基础

第八章 气体及其基本定律	101
§ 8—1 工質的概念及其状态参数	101
§ 8—2 理想气体和实际气体	103
§ 8—3 理想气体的基本定律	103
§ 8—4 气体的比热	106
第九章 热力学第一定律	112
§ 9—1 热力学第一定律	112
§ 9—2 气体的内能	113
§ 9—3 膨胀功和压缩功	113
§ 9—4 热力学第一定律方程式的一般形式	115
第十章 气体的热力过程	116
§ 10—1 定容过程	116
§ 10—2 定压过程	117
§ 10—3 等温过程	119
§ 10—4 絕热过程	121
§ 10—5 多变过程	124

第四篇 压气机、鼓风机和通风机

第十一章 往复式压气机	129
§ 11—1 往复式压气机的作用原理和分类	129
§ 11—2 往复式压气机的工作过程	131
§ 11—3 往复式压气机的排量及其調节方法	135
§ 11—4 多級压缩	138
§ 11—5 往复式压气机的功率和效率	142
§ 11—6 往复式压气机的構造和主要零件	145

§ 11—7	往复式压气机的操作	161
第十二章	离心式鼓风机和离心式压气机	164
§ 12—1	离心式鼓风机和压气机的作用原理	164
§ 12—2	离心式鼓风机和压气机的压缩过程	165
§ 12—3	离心式鼓风机和压气机的特性及风量调节	166
§ 12—4	离心式鼓风机和压气机的构造及主要零件	168
第十三章	离心式通风机	172
§ 13—1	离心式通风机的作用原理及分类	172
§ 13—2	离心式通风机的风压、风量和功率	172
§ 13—3	离心式通风机的特性	175
§ 13—4	离心式通风机在管路上工作	181
§ 13—5	离心式通风机的调节	183
§ 13—6	通风机的选择原则	184
§ 13—7	离心式通风机的结构及主要零件	185

緒 論

泵、压气机与通風机的应用范围很广，几乎在国民經济的各个部門里都采用它。

这类机械除了在工业生产中用以輸送液体或气体完成工艺过程外，还广泛地应用于劳动保护和建筑物的衛生工程方面。例如，向高温車間中噴撒冷水，以冷却和湿潤空气；在灰尘多的車間內排除灰尘和送入新鮮空气，以改善工作場所的衛生条件等，都需要用这些机械設備来构成液体或气体的輸送系統。这类系統对保护工人身体健康，提高劳动生产率和促进生产發展，有着極為重大的意义，它充分地体现社会主义企业对工人健康的关怀。

在硅酸盐工厂中，一般都設有水泵站，集中供应全厂的生产和生活用水。此外，在各生产車間中为了满足工艺过程的要求还配置了大量的水泵和泥浆泵，如湿法水泥厂、陶瓷厂和石棉水泥制品厂的料浆調剂与輸送，鍋爐用水的供应和污水排出等。

通風收尘是硅酸盐工厂的重要工艺过程之一，在窑爐、球磨机、干燥机和各种运输机械中都装置通風收尘設備，以回收产品或半成品和改善工厂的环境衛生。同时，加强通風还能提高这些生产机械的产量和产品的质量。

压气机与鼓風机在硅酸盐工厂中多用来作为动力設備，如矿山采掘作业中用压缩空气带动凿岩机；窑爐鼓風机煤粉煤气的吹入，均由鼓風机来完成。近代采用压缩空气輸送粉状固体物料，不但可簡化机械設備、降低成本，而且也大大改善了操作条件。

由此可見，在硅酸盐工业中配置和运用良好的泵、压气机和通風机是具有重要意义的。为此，就需要熟悉这类机械的工作原理和結構，掌握这些机械的性能和特点，以便合理地选择、使用和修理这些机械。

为了便于学习这些机械，本書講述了必要的水力学与工程热力学基本知識。全書分水力学基础、水泵、工程热力学基础、压气机、鼓風机与通風机等四篇。

下面簡略地介紹一下泵、压气机和通風机的發展情况。

古代，人类为了謀取生存条件，在劳动中創造出簡單的提水和鼓風工具，例如，戽斗、吊桶和風箱等。随着农业生产的發展，需要用水来灌溉田地以及舂米、磨面等，便出現了結構簡單的提水和送風机械，如水車、風車等。而在动力方面人們逐漸地知道利用兽力、風力和水力作为带动这类机械的动力。

根据历史記載，在公元以前我国就有了这类机械。但是由于历来封建帝王的統治使生产力的發展受到阻碍，甚至于許多創造和發明久而失傳。

原始的泵是用木材制成，以后虽然也發現了多种型式的泵，但因为当时技术水平較低，在制造上存在着困难而受到限制。直到十九世紀，由于鋼鐵工业發达和蒸汽机等动力机械的出現，才为泵、压气机和通風机的發展提供了条件。第一台离心泵是在1889年制成，但是直到二十世紀出現了高轉数的原动机后，离心泵才得到了广泛地应用。

在压气机和通風机方面首先出現的是熔鉄爐用的風箱，随后出現了風車。但在十九世紀中广泛采用的还是往复式压气机。只有在解决热力学、空气动力学、材料力学和机

器制造方面一系列問題以后，才制造出結構上比較合理的透平式压气机。

解放前，由于帝国主义的侵略和国内封建主义、官僚資本主义的殘酷剝削，我国的工业带着浓厚的半殖民地色彩，泵、压气机和通風机等大都依靠外国进口，国内机械制造工业發展的非常緩慢，几乎没有专门制造这类机械的工厂。

解放后，在党的正确领导下和苏联及其他社会主义国家的无私援助下，我国先后建立了許多专门制造泵、压气机和通風机的工厂，产品的数量和質量都在不断地提高。

1958年，党提出了建設社会主义的总路綫和一整套兩条腿走路的方針，我国的社会主义建設事业得到了飞速發展。为了满足工农业生产大跃进的需要，各地出现了許多中小型的制造泵、压气机和通風机的工厂，生产了大批設備，产品数量不断增长。三年来仅农业排灌設備就增长了八倍左右，其他如压气机、鼓風机和通風机等都有很大的增长，有力地支援了工农业生产；有些产品已暢銷国外。

在我国，泵、压气机和通風机制造业的高速發展，是与社会主义制度的优越性分不开的，随着社会主义建設事业的飞跃發展，泵、压气机和通風机的应用范围将会愈来愈广，其制造工业也必然会不断地向前發展。

第一篇 水力学基础

研究液体的机械运动（包括机械运动的特殊状态——“静止”在内）的规律的科学，称为水力学。它以液体作为研究对象，其中水是主要的对象。

水力学是力学的一个组成部分，它广泛采用了理论力学的一切基本法则来确定作用力、运动速度和压力之间的关系，成为很多工程技术的理论基础，例如农田水利、水能利用、水工结构、水利施工和水力机械等等，都需要丰富的水力学的知识作为基础。

第一章 液体及其基本性质

§ 1—1 理想液体的概念

液体与固体的区别就在于液体具有很大的流动性，这是由于液体分子间的内聚力是极微小的缘故，因此，液体实际上对拉力及剪力都不能抵抗，而仅只能抵抗对它的压力。例如，只要有流动的可能，液体在其本身重量的作用下即可发生流动。但是，在实际液体流动时，液体的粘度对其流动情况有着重大的影响，这样也就使我们所研究的问题复杂起来。然而，在一般情况下，也可认为粘度所影响的只是某一流动区域，在此区域以外则影响极小，可以忽略不计。因此在水力学中，引用了理想液体这一概念。所谓理想液体就是认为液体没有粘度。所以，在理想液体的运动中没有内摩擦力，这就使研究的问题大为简化。

由于液体静止时，粘度不呈现其作用，此时，研究理想液体与实际液体所得的结果完全一样。

在研究水力学的一般问题时，系将液体看成是一种“连续介质”，即在研究中，不考虑液体分子的运动和液体的分子力，而认为液体是充满了所研究的整个空间，其中没有任何空隙。这样就可将液体平衡和运动的各个物理量，如压力、密度和速度等，看成是点的坐标和时间的连续函数。因此，就便于应用连续函数的概念，用数学分析的方法，来处理有关液体平衡和运动的问题。

§ 1—2 液体的主要物理性质

表明液体的主要物理性质有：密度、重度和粘度。

1. 密度和重度

液体单位体积所具有的质量称为液体的密度，即：

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

式中： M ——液体的质量（ $\frac{\text{公斤秒}^2}{\text{米}}$ ）

V —— 液体的体积 (米³) ;

ρ —— 液体的密度 (公斤秒²/米⁴) 。

液体单位体积所具有的重量称为液体的重度, 即:

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

式中: γ —— 液体的重度 (公斤/米³) ;

G —— 液体的重量 (公斤) ;

V —— 液体的体积 (米³) 。

2. 粘 度

实际液体运动时, 其中出现对运动产生阻力的内摩擦力。液体这种在运动时产生阻力的性质称为粘度。

液体运动时可看作是極多極薄的液体層彼此沿着滑动, 在兩相鄰移动的液体層接觸面上, 即發生了一种类似摩擦的作用, 因此, 在接觸面上产生了阻止运动的阻力。由于所有的阻力都要消耗一部分有用的能量, 显然, 决定液体运动时由粘度所引起的阻力, 就成为工程上的一个重要問題。

远在1686年, 牛頓就已提出了兩相鄰液体層間作相对移动时的内摩擦力的假說, 即: 内摩擦力与相对移动的速度及接触面积成正比, 与兩相鄰層間的距离成反比; 内摩擦力依液体种类而不同, 与压力无关。在这一假說中, 我們取相距 dr 的兩相鄰層(圖1-1), 下面一層的速度为 u , 上面一層的速度則为 $u+du$, 如其接触面积为 F , 則可写出牛頓液体内摩擦力的数学表达式如下:

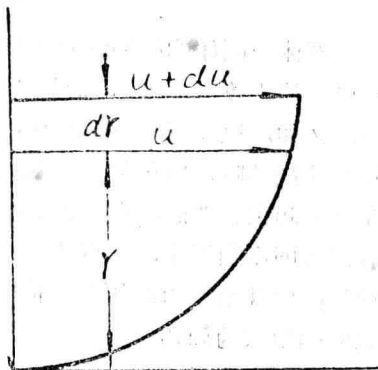


圖 1-1

$$T = \mu F \frac{du}{dr} \quad (1-3)$$

式中: T —— 内摩擦力;

μ —— 依液体的物理性質而定的系数, 称为动力粘性系数, 或简称粘度。

以面积 F 除之, 即可得到作用在 F 面积上的内摩擦应力的公式:

$$\tau = \frac{T}{F} = \mu \frac{du}{dr} \quad (1-4)$$

式中: τ —— 内摩擦应力。

由公式(1-4)可知:

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

μ 即为当 $\frac{du}{dr} = 1$ 时, 液体运动所产生的内摩擦应力。

在CGS制中, μ 的单位为达因秒/厘米², 称为“泊”; 而在工程单位制中 μ 的单位则为公斤秒/米²。在不同的单位制中 μ 的数值是不同的, 例如:

$$1 \text{ 泊} = 1 \frac{\text{达因秒}}{\text{厘米}^2} = \frac{1}{98} \text{ 公斤秒/米}^2。$$

液体的粘度随液体的温度升高而降低, 表1—1为水和机油的动力粘性系数 μ 随温度变化的情况。

水和机油的动力粘性系数 (泊)

表 1—1

温度(°C)	0	15	20	30	40	60
水	0.0179	—	0.0101	0.0080	0.00661	0.0048
机油	6.40	—	1.72	—	0.54	0.22

在液体运动的公式中, 更常用到的是液体的动力粘性系数 μ 与密度 ρ 的比值, 这一比值我们称为液体的运动粘性系数, 以 ν 来表示, 即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

在工程单位制中, ν 的单位为米²/秒; 在CGS制单位中, ν 的单位为厘米²/秒, 称为“斯”。

在工程实际中, 任何一种液体的粘度的大小都可以用粘度计来测量。粘度计有很多种类型, 它们均有其特定的单位来表示液体粘度的数值。因此, 不同粘度计所表示的液体的粘度数值是不同的。目前在苏联和我国应用最广的粘度计是恩格列尔粘度计, 所测得的粘性系数以恩格列尔度 ($^{\circ}E$) 来表示。根据下面的公式即可将恩格列尔度换算为运动粘性系数。

$$\nu = (0.0731^{\circ}E - \frac{0.0631}{^{\circ}E}) \text{ 厘米}^2/\text{秒} \quad (1-6)$$

表1—2为水在各种温度下的运动粘性系数。

水的运动粘性系数

表 1—2

温度 (°C)	ν (厘米 ² /秒)	温度 (°C)	ν (厘米 ² /秒)	温度 (°C)	ν (厘米 ² /秒)
0	0.0178	12	0.0124	30	0.0081
5	0.0152	15	0.0114	40	0.0066
10	0.0131	20	0.0101	50	0.0055

§ 1—3 作用在液体上的外力

作用在液体上的外力可分为两大类, 即表面力和质量力。

1. 表面力

作用在液体体积表面上的力称为表面力, 作用于单位面积上的表面力称为应力。作用在表面上的应力有垂直于作用面的液体静压力与液体动压力和相切于作用面的液体内摩擦力。

液体的内摩擦力在第1—1节中已讨论过, 这里不再重叙。现在, 我们就来叙述关于液

体靜压力的基本概念。

我們观察如圖1—2所示的一塊处于平衡状态的液体。把所研究的这块液体用 BC 平面分作 1、2 兩部分，这两部分液体在接触面 BC 上有一种相互的作用。今假想把 1 部分取去，則为了要保持 2 部分的平衡，就必须要在 BC 上加一相当于 1 部分对 2 部分作用的力，这个力也就是以某一形式分布在 BC 面上的力的和。

今在 BC 面上取任一点 A ，并围绕其取一面积 F ，在此面积上必作用有一力 P 。力 P 称为 F 上的总液体靜压力。将总液体靜压力 P 除以面积 F ，就可以得到作用在 F 上的平均液体靜压力 p 平均，即：

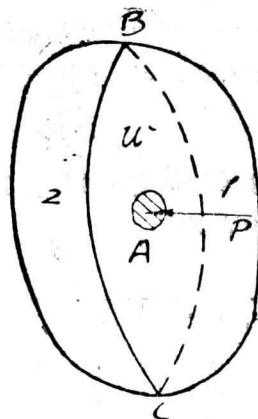


圖 1—2

$$p_{\text{平均}} = \frac{P}{F} \quad (1-7)$$

当把面积 F 无限縮小到 A 点 (圖1—2) 时，則 $\frac{P}{F}$ 即将趋近于一極限值 p ， p 称为 A 点的液体靜压力，即：

$$p = \lim_{F \rightarrow 0} \left(\frac{P}{F} \right) \quad (1-8)$$

液体靜压力的单位一般以公斤/米²表示。

液体靜压力具有两个特性：第一个特性是液体靜压力永远垂直于所作用的液面，并指向液体内部；第二个特性是作用在液体內某一点处的液体靜压力在一切方向上都相等。由此可知，液体靜压力仅是空間座标的一个連續函数。在运动着的液体中，单位面积上所产生的压力称为液体动压力。液体动压力亦具有液体靜压力的特性。但在某种情况下，液体动压力不仅是空間座标的一个連續函数，而且也是時間的一个連續函数。

2. 质 量 力

質量力是作用在所研究液体体积的每一个質点上的力，它与液体質点的質量成正比，因此也与体积成正比，所以也称为体积力。属于質量力一类的有重力和慣性力。

如有一質量力 G ，使質量为 M 的液体产生一加速度 a ，則单位質量的質量力为：

$$\frac{P}{M} = \frac{Ma}{M} = a$$

由上式可知，单位質量的質量力就等于該質量液体的加速度，因此，可把单位質量的質量力称为加速力。

习 題

1. 何謂理想液体，它与实际液体有何不同？
2. 何謂液体的密度，它与液体的重度有何关系？

3. 何謂粘度，為何它能表征液體的一種物理性質？
4. 作用在液體上有哪幾種外力？
5. 何謂液體靜壓力，它有什麼特性？
6. 質量力與表面力有何不同？
7. 當溫度為 0°C 和壓力為760毫米水銀柱時，煙氣的重度為 1.30公斤/米^3 ；煙氣離開水泥迴轉窑時的溫度為 800°C ，求此時煙氣的重度與密度。
8. 以恩格列爾粘度計測得某液體的粘度為 8.5°E ，如某液體的重度為 850公斤/米^3 ，求以工程單位所表示的動力粘性系數和運動粘性系數。

第二章 液體的運動

§ 2—1 穩定流動和非穩定流動

在第1—1節中已討論過液體流動時的各物理量可認為是空間座標和時間的連續函數。如果在充滿着流動液體的空間內，各個點的壓力和速度在全部時間過程中保持不變，而僅只隨空間點位置的改變而變化，則這種流動稱為穩定流動。穩定流動的壓力 P 和速度 u 可用下式表示：

$$P = p(x, y, z) \quad (2-1)$$

$$U = u(x, y, z) \quad (2-2)$$

例如：水從水位不改變的容器（圖2—1）的孔口出流的情況，就是穩定流動。反之，若每一空間點上的壓力和速度隨着時間而變化的流動，則稱為非穩定流動，此時的條件為：

$$P = p(x, y, z, t) \quad (2-3)$$

$$U = u(x, y, z, t) \quad (2-4)$$

例如：在通過容器上的孔口將水放盡的時候，隨着水的出流，容器中的水位不斷下降，液體出流的速度也不斷減小，水柱的形狀也隨之發生改變（圖2—2），這就是一種非穩定流動。

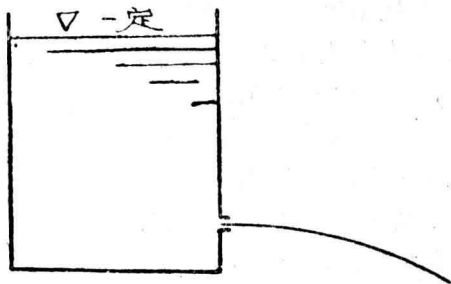


圖 2—1

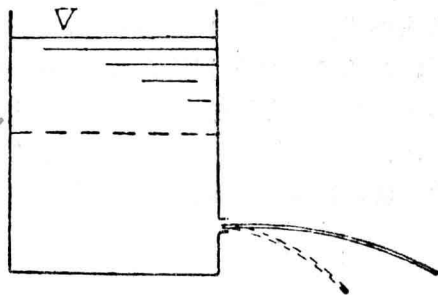


圖 2—2

§ 2—2 迹綫和流綫

在研究液體運動時，為了描繪流動的情況和形狀，作出流動的圖形，我們廣泛運用了跡綫特別是流綫的概念。

跡綫是在所研究的一段時間內，某一液體質點在空間中運動所經過的途程（軌跡）。例如，某一液體質點在 t_1 時間所佔據的空間位置為 A_1 ，而在 t_2 時間所佔的位置為 A_2 ， t_3 時為 A_3 等等，則連接 A_1 、 A_2 、 A_3 ……等等各點構成的綫就稱為跡綫（圖 2—3）。跡綫上

各点的切线则代表着某一固定质点在不同位置上的流动方向。

在流动的液体所占空间中（图2-4），在 t 时间，任意一点 A ，列出其速度矢量 u ，从 A 点沿 u 方向相距 ΔS 处取 A_1 点划出其速度矢量 u_1 ，表示在同一 t 时间位于 A_1 点液体质点的速度，又在 u_1 上可取 A_2 点并划出其速度矢量 u_2 ，依此类推，连接 $A, A_1, A_2, A_3, \dots$ 等等，得出一条折线，而当两点的距离 ΔS 趋于零时，折线则将变成一条曲线，这条曲线称为流线。流线上各点的切线即为在该时间的各点速度方向。

为了进一步理解迹线与流线的概念，我们来看上述稳定流动的例子。设水箱下面的孔做得极小，则流出的

水柱可认为是一条非常细的线，由于箱中水面不随时间变更，细线的形状亦为一定（图2-5），则液体质点必沿着该线流出，故可知这条细线即为迹线，而在该线上每点的切线又是该点的速度方向，故该线又为流线。由此可知，在稳定流动时迹线与流线相重合。现在我们再看非稳定流动的情况（图2-6），由于出流时液面不断下降，流线的形状亦随时间改变。如水箱水面在1-1位置时流线为1，在2-2面时，流线为2。假

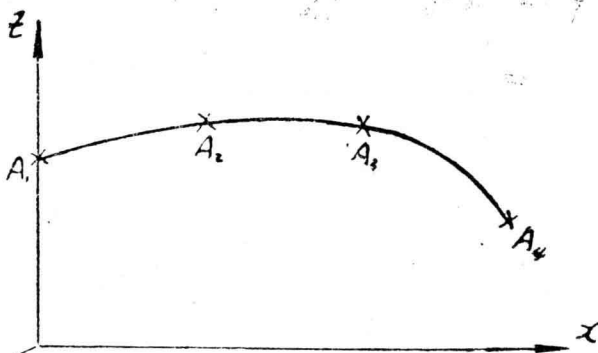


图 2-3

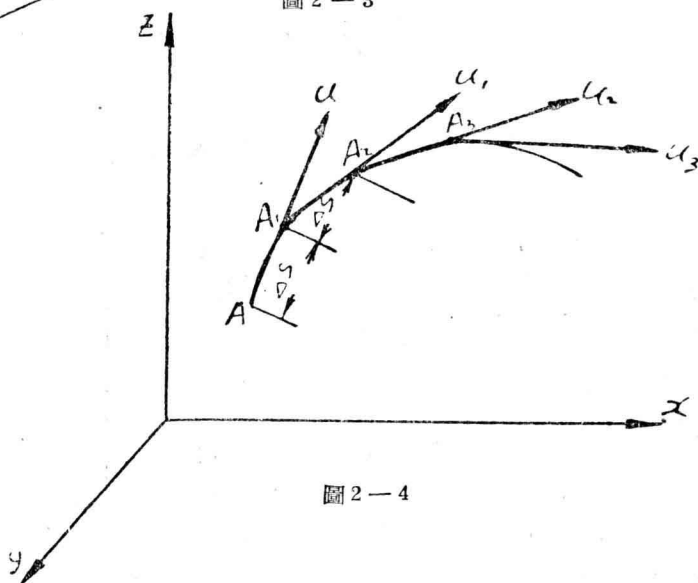


图 2-4

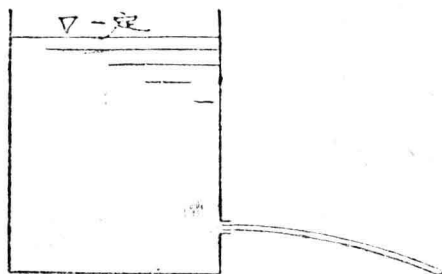


图 2-5

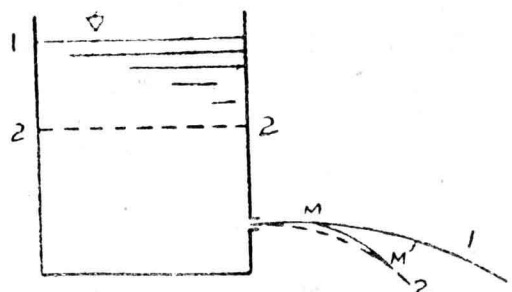


图 2-6

設在水箱中1—1水面时将位于 M 点的液体質点作一标记，則在水箱中2—2水面时将位于 M' 点，其迹綫为 MM' 。由此可知，非稳定流动时流綫随時間而变化，并且迹綫与流綫不相重合。

§ 2—3 过水断面和流量

如果在流动的两个横断面上，分别取出两个微小的断面 dF_1 与 dF_2 （圖2—7），并經過这两个断面的周綫上所有各点作出流綫，則这些流綫所围成的一个管称为流綫管。通过流綫管内部的液体称为流束。

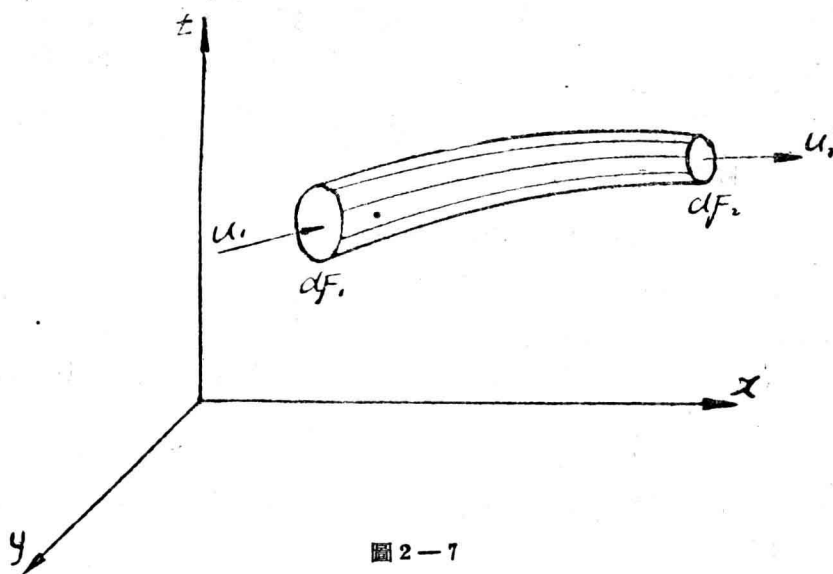


圖 2—7

由于流綫上所有各点的流速都是和流綫相切的，因此就不可能有穿过流綫管壁的流动，也就是液体只可能在流綫管内流动。由于所取的断面 dF 非常小，因此可以把这个微小断面上所有各点的流速都看作是一样的。而在 dF 无限微小时，則流束实际上也就是一条流綫。

流束上与流綫相垂直的断面，称为流束的过水断面。单位時間內流經流束过水断面的液体体积叫做流量（米³/秒），单位時間內流經流束过水断面的液体重量叫重量流量（公斤/秒）。流量以 dq 表示：如以 u 表示垂直于过水断面的速度， dF 表示流束的过水断面面积，則：

$$dq = u dF \quad \text{米}^3/\text{秒} \quad (2-5)$$

一系列流束的总合便形成了液体的总流。与总流的所有流束相垂直的断面称为总流的过水断面。因此，总流的过水断面面积 F 也就是各个流束的过水断面面积的总和，即：

$$F = \int_F dF \quad (2-6)$$

过水断面可能完全或局部地为固体器壁所包围（圖2—8），其接触綫长度称为湿周。过水断面面积 F 与湿周 X 之比，称为流动的水力半徑 R ：

$$R = \frac{F}{X} \quad (2-7)$$

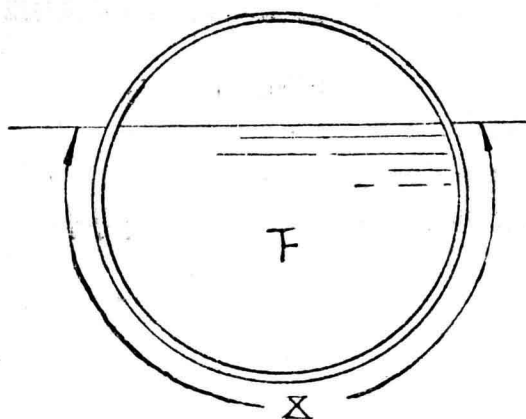


圖 2-8

例如，在充滿直徑為 d 的圓管中，液體流動的水力半徑為：

$$R = \frac{F}{X} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d} = \frac{d}{4} \quad (2-8)$$

即此時水力半徑為流動過水斷面直徑的四分之一。

單位時間流經總流過水斷面的液體量稱為總流的流量。總流的流量 Q 顯然是各個流束的基本流量的總和，即：

$$Q = \int dQ = \int_F v dF \text{ 米}^3/\text{秒} \quad (2-9)$$

§ 2-4 平均流速和連續性方程式

在利用公式 (2-9) 來計算流量時，必須知道過水斷面上各點流速分布的規律，由於總流過水斷面上各點的流速是不一樣的，因此，就使得這個問題複雜起來。

但在水力學上一般是沒有必要去決定每一點流速分布的規律，而只要研究平均流速。

平均流速是一種假想的流速，在這種流動里，過水斷面上所有各點的流速都相同，按照這樣一個流速計算出來的流量，與實際流束經過這個過水斷面的實際流量相等。今若以 v 來表示平均流速，則可知：

$$Q = \int_F v dF = v \int_F dF = v F \quad (2-10)$$

因此
$$v = \frac{Q}{F} \quad (2-11)$$

在實際工作中， Q 可以用不同方法來量得，因此，在知道了總流的過水斷面後，即可根據公式 (2-11) 來計算過水斷面上的平均流速。

有了平均流速 v 的概念後，即不難求出實用上意義甚大的總流的連續性方程式。

液體穩定流動時，在流動的各個過水斷面上的流量是相等的。

即 $Q = \text{常數}$

今取總流的任意兩過水斷面積 F_1 及 F_2 ，其平均流速分別為 v_1 及 v_2 ，則可得：

$$Q = v_1 F_1 = v_2 F_2 \quad (2-12)$$

或
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{F_2}{F_1}$$

公式 (2-12) 即為總流的連續性方程式，由此公式可以得出結論：在穩定流動的情況下，平均流速與過水斷面積成反比。

例 2-1：在一直徑不等的管路中，充滿流動着的水（例 2-1 附圖）。已知管中第一斷面的直徑

$d_1=200$ 毫米，第二断面的直径 $d_2=100$ 毫米；今测得第二断面中的平均流速 $v_2=1$ 米/秒。求第一断面中的平均流速 v_1 。

解：此两断面的面积为：

$$F_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$$

$$F_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$$

将上式代入公式(2-12)中得：

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

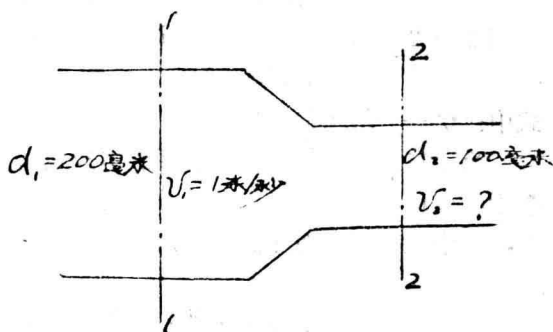
即在圆管充满液体的情况下，平均流速与管内直径的平方成反比。

在第一断面上的平均流速为：

$$v_1 = v_2 \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

将已知 $v_2=1$ 米/秒， $d_2=100$ 毫米 $=0.1$ 米和 $d_1=200$ 毫米 $=0.2$ 米代入上式，即得：

$$v_1 = 1 \times \frac{0.1^2}{0.2^2} = 0.25 \text{ 米/秒}$$



例 2-1 附圖

§ 2-5 理想液体流束的伯諾里方程式

对于仅处在重力作用下的理想液体稳定流，可根据动能定律得出伯諾里方程式。

我們用两个断面 1—1 及 2—2 割截某一液体流束 AB (圖 2-9)。設对于任意的基准水平面 0—0 來說，在某一時間，此流束段的兩过水断面面积 ΔF_1 及 ΔF_2 的重心位置为坐标 Z_1 及 Z_2 。过水断面面积 ΔF_1 及 ΔF_2 上的压力为 p_1 及 p_2 ，而流束的流速相应地为 u_1 及 u_2 。过了无限小的時間間隔 dt 后，在断面 1—1 中的質点移动到距原处为 $u_1 dt$ 远的位置 1'—1'，而断面 2—2 中的質点則移动到距 $u_2 dt$ 远的位置 2'—2'。

作用于流束段上的各力，将同时作出某些功。依动能定律，这些功应该等于流束段的动能的增加。

我們把問題的研究局限于下列情形：在流束边界面上的表面力只有压力，而流束段的質量力仅有重力。因为周围的压力是垂直于流束各边界表面的，所以作用于流束边界面上的压力，在移动时不作任何功。因此其所作的功即为作用于流束兩端过水断面上压力所作的功，其值为：

$$p_1 \Delta F_1 u_1 dt - p_2 \Delta F_2 u_2 dt = \Delta Q dt (P_1 - P_2)$$

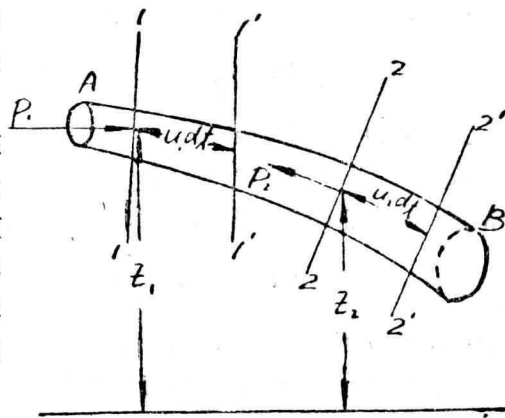


圖 2-9

式中: $\Delta Q = u_1 \Delta F_1 = u_2 \Delta F_2$ 为流束的流量。

其次, 我们来计算重力所作的功。由于流束组成部分 1'—2 段是流束移动前和移动后所共有的, 因而当计算重力做功时, 就可认为这部分液体没有改变原来的位置。即将流束的全部移动看成为流束段 1—1' 到 2—2' 的移动, 而 $Z_1 - Z_2$ 则是流束段 1—1' 移动到 2—2' 位置的下降距离。这样, 我们就可以写出重力所作的功为:

$$\gamma \Delta Q (Z_1 - Z_2) dt$$

式中: γ ——液体的重度。

为了写出能量平衡方程式我们还须求出在时间 dt 内流束段动能的增量。这部分增量等于流束移动后与移动前的动能差。因为是稳定流动, 因而流束段 1'—2 的前后动能在运算中便互相抵消了。这样, 动能的全部增量为:

$$\frac{\gamma \Delta Q}{g} \left(\frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \right) dt$$

结果我们可以写出:

$$\frac{\gamma \Delta Q}{g} \left(\frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \right) dt = \Delta Q (p_1 - p_2) dt + \gamma \Delta Q (Z_1 - Z_2) dt$$

将其简化后得

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (2-13)$$

由于断面 1—1 及 2—2 是我们任意割取的, 因此上式对整个流束都可适用, 对于流束上任何一断面可用下式表示:

$$Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = \text{常数} \quad (2-14)$$

上式即称为理想液体流束的伯诺里方程式, 是由俄罗斯科学研究院院士丹尼尔·伯诺里 (1700~1788) 所导出的。

如液体在静止情况时, 即 $u=0$, 则公式 (2-14) 将成为:

$$Z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数} \quad (2-15)$$

上式称为液体静力方程式。

公式 (2-14) 中的左方各项, 对同一流束上的不同质点是不同的, 但其总和则等于常数, 这个常数称为总水头或总比能, 即:

$$Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = H_{\text{总}} \quad (2-16)$$

式中: $H_{\text{总}}$ ——总水头 (总比能)。

现在分别讨论一下公式中每一项的几何意义及能量意义。

Z 为质点在基准面上的几何高度, 因此称为几何水头; 就能量意义而言, Z 是单位

重量液体对于基准面所具有的位能，即比位能。

$\frac{p}{\gamma}$ 从几何意义来看为一液柱高度，称为压力水头。如图 2—10 所示，一断面为 F 的直角弯管，设水平管部分中有一活塞 A ，在其上加压力 P ，如管中盛以液体，则在 p 的作用下，活塞向前移动，液体沿垂直管部分上升，当上升某一高度 h 时则与压力 p 相平衡，此时：

$$pF = hF\gamma$$

$$\text{则} \quad h = \frac{p}{\gamma}$$

由此可知， $\frac{p}{\gamma}$ 亦为一液柱高度。

从能量意义上看它是单位重量液体所具有的
压力能，称为比压能。

设在管中液体自由表面上（图 2—10），取一公斤液体，加压力 p ，则应下落高度为 $h =$

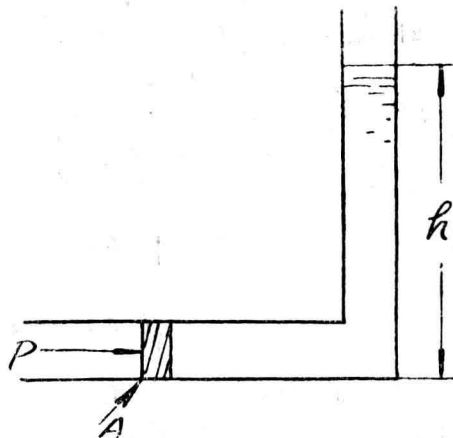


图 2—10

$\frac{p}{\gamma}$ ，所作的功即为 $\frac{p}{\gamma}$ ，因此，此液体必具有 $\frac{p}{\gamma}$ 之能。

$\frac{u^2}{2g}$ 是液体质点以铅直的流速 u 在真空中运动时上升所能达到的高度，称为速度水头。就能量意义来说，则为以速度 u 运动的单位重量液体质点所具有的动能，称为比动能。

设质点质量为 M 的液体，以速度 u 运动，具有动能为：

$$\text{动能} = \frac{1}{2}Mu^2 = \frac{1}{2}\frac{G}{g}u^2$$

式中： G ——液体重量；

g ——重力加速度。

如令 $G = 1$ ，即得单位重量液体质点的动能 $\frac{u^2}{2g}$ 。

所以总水头系等于几何水头、压力水头和速度水头三者的和，而液体质点此时所具有的总比能，则等于比位能、比压能与比动能三者的和，且总水头系等于总比能。

由公式（2—14）可知，位于同一流束上的各液体质点其总比能相等。对理想液体的总比能，在其运动的全部路程上都是不改变的，换句话说，伯诺里方程式是能量守恒定律的一个特例，亦即理想液体质点所具有的各种比能，在运动途中可以发生形式上的转换（例如当比动能增加时，则比位能或比压能必然减少），但各种比能的总和，则保持不变。

例2—2：今取二根管子，一根为两端开口的直管，另一根其一端弯成直角并在弯头处逐渐收缩。将二管插入管道中，且使下弯头的管口与轴线相重合，管中液体（重度为 γ ）上升高度各为 h_1 、 h_2