

目 录

第一章 流体的基本概念	(1)
§ 1-1 工程流体力学研究的对象和任务	(1)
§ 1-2 流体的主要物理性质	(2)
习题	(10)
第二章 流体静力学	(11)
§ 2-1 流体静压强及其特性	(11)
§ 2-2 流体静压强的分布规律	(15)
习题	(33)
第三章 流体动力学基础	(35)
§ 3-1 流体运动的几个基本概念	(35)
§ 3-2 恒定流连续性方程	(41)
§ 3-3 恒定流能量方程	(44)
§ 3-4 恒定流的气流能量方程	(56)
§ 3-5 恒定流的动量方程	(59)
习题	(64)
第四章 流动阻力和能量损失	(69)
§ 4-1 流动阻力和水头损失的两种形式	(69)
§ 4-2 流动的两种型态——层流和紊流	(71)
§ 4-3 沿程水头损失	(76)
§ 4-4 局部水头损失	(86)
习题	(94)
第五章 孔口、管嘴出流及气体射流简介	(95)
§ 5-1 孔口出流	(95)
§ 5-2 管嘴出流	(98)
§ 5-3 气体射流简介	(100)

习题	(109)
第六章 有压管流和无压管流	(111)
§ 6-1 简单管道	(111)
§ 6-2 串联管道	(121)
§ 6-3 并联管道	(122)
§ 6-4 管网水力计算	(123)
§ 6-5 水击的基本概念	(128)
§ 6-6 无压圆管的水力计算	(132)
习题	(146)
第七章 理论流体力学基础	(149)
§ 7-1 环量和旋度, 通量和散度	(149)
§ 7-2 流体微团运动的分解, 有旋和无旋运动	(155)
§ 7-3 连续性微分方程	(166)
§ 7-4 流体运动微分方程	(169)
§ 7-5 平面运动, 流函数及其性质	(175)
§ 7-6 平面无旋运动, 势函数及其性质	(180)
§ 7-7 几种简单的平面势流	(183)
习题	(198)
第八章 流体与固体颗粒间的相对运动	(200)
§ 8-1 概述	(200)
§ 8-2 悬浮物的重力沉降分离	(204)
§ 8-3 悬浮物的离心力分离	(218)
§ 8-4 渗流	(235)
习题	(260)
附录 部分习题答案	(261)

第一章 流体的基本概念

§ 1-1 工程流体力学研究的对象和任务

流体力学是一门研究流体平衡和运动的力学规律及其应用的学科，即研究各运动要素（如速度、压力、惯性力、密度……）与时间、空间（即位置）的相互关系，以及这些规律在工程实际中的应用。本书则着重于工程应用。

流体是液体和气体的总称，其基本特征为易流动性，即流体质点间的凝聚力极小，以致对张力、形状的缓慢改变都几乎不显示出阻力，各部分之间很容易作相对运动，这是区别流体和固体的主要特征。至于液体和气体的主要差别则在于液体具有一定的体积，在容器中能够形成一定的自由表面，很不容易被压缩，而气体则没有一定的体积，即总是充满容纳它的整个容器，很容易被压缩。

流体运动规律的研究常引入流体是“连续性介质”的假设，即认为流体质点间没有空隙存在，这样可不考虑复杂的分子运动，且能利用连续函数这一数学工具来研究流体力学。采用连续介质的模型是合理的，因为在实际工程中，需要流体力学解决的问题，如管流，一般都具有较大的尺寸，其最小的尺寸亦远大于流体分子的平均自由行程，即使在流体中取一质点，微团也包含庞大数量的分子。只有在遇到水、气两相流、高速水流掺气、高空稀薄气体这一类问题时，这一假设才失去其实际意义。

流体力学是建筑物主体和设备以及环境保护工程中有关水、气方面的理论分析和计算的基础。建筑、环境保护以及

市政工程方面的科技工作者，很有必要掌握工程流体力学的基本知识。

§ 1-2 流体的主要物理性质

一、流体具有质量

由物理学知道，表示惯性（物体维持原有运动状态的性质）的物理量是质量（用 M 表示）。质量愈大，惯性愈大，运动状态愈难改变。而质量常以密度来表征。对于均质流体，单位体积的质量称为密度，以 ρ 表示，即

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

密度 ρ 的国际单位（SI 制）为千克/米³ 或公斤/米³。

二、流体具有重量

流体的重量（用 G 表示）即地球对流体的引力（重力），常以重度（或称重率、容重） γ 来表征，对于均质流体，单位体积的重量称为重度。

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

重度的国际单位为牛/米³。

因为重量 $G = \text{质量 } M \times \text{重力加速度 } g$ ，即

$$\frac{G}{V} = \frac{Mg}{V}$$

$$\text{所以} \quad \gamma = \rho g \quad (1-3)$$

这就是重度和密度的关系。对不可压缩的流体，认为 ρ 或 γ 不随压力变化，但可随温度而变化，如 90℃ 和 4℃ 的水，其

ρ , γ 不同, 但差别很小, 而气体的密度或重度随温度变化则非常明显。

重度和比重具有不同的含义。重度是物体单位体积的重量, 而比重是指物体某一体积的重量与同体积水的重量之比 (在 4°C 时), 前者是有量纲的, 后者只是一个比值, 是无量纲数。

常温时, 几种常见流体的重度如下:

$$\gamma_{\text{水}} = 9.807 \text{ 千牛/米}^3$$

(工程单位为 1000 公斤力/米³)

$$\gamma_{\text{汞}} = 133.38 \text{ 千牛/米}^3$$

(工程单位为 13600 公斤力/米³)

温度为 293 开尔文 (简称为开, 以 K 表示)、压强为 101.325 千牛/米² (即标准大气压) 时,

$$\gamma_{\text{干空气}} = 11.77 \text{ 牛/米}^3$$

(工程单位为 1.2 公斤力/米³)

可见水的重度约为干空气重度的 833.3 倍。

经测定可知, 一升湿空气比一升干空气轻。这是因为湿空气为干空气和水蒸汽的混合物, 而水蒸汽比干空气轻。

三、流体具有粘滞性

流体的粘滞性可由下述实验来说明: 有 A, B 两块平板 (图 1-1), 其间充满流体, 当拉动板 B 时, 会发生如下现象: 紧贴在板 A 上的流体质点, 粘附在静的板 A 上, 而紧贴在板 B 上的流体质点的速度最大 (为 u_R), 板间速度的大小 u 则随着垂直于方向 u 的 n 的变化而变化, 即 u 为 n 的函数 $u = f(n)$, 此称为速度分布。

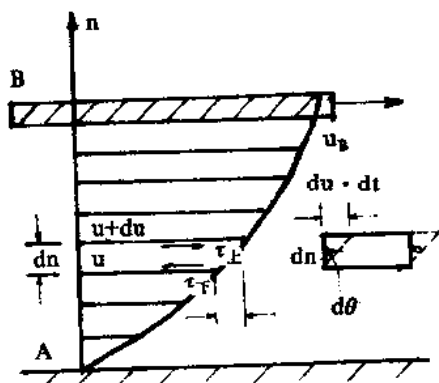


图 1-1

实验证明有如下关系:

(1) 流体层与层之间产生的内摩擦力的大小 F (即粘滞力或剪切力) 不一样, 表现在各层间速度的大小也不一样, 近 A 处为 $u_A \approx 0$, 近 B 处为 $u_B = u_{max}$. 粘滞力与 $\frac{du}{dn}$ 成正比,

$\frac{du}{dn}$ 称为速度梯度, 表示速度 u 的大小沿 n 方向的变化率, 单位为 $1/\text{秒}$, 亦称流体剪切变形角速度或角变形率 ($\frac{du}{dn} = \frac{d\theta}{dt}$), 如图 1-1 所示.

(2) 粘滞力与层间接触面的大小成正比.

(3) 粘滞力与流体的性质有关 (因水、油、空气等而异).

(4) 粘滞力与板 B 上所受的垂直压力 (内法向压力) 的大小无关.

粘滯力的表达式为

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

式中, F 为层间接触面的总粘滯力, 单位为牛顿; A 为层间接触面的面积, 单位为米²; $\frac{du}{dn}$ 为层间速度梯度, 单位为 1/秒; μ 为比例系数, 称为动力粘滯系数, 单位为 $\frac{\text{牛}}{\text{米}^2 \cdot \text{秒}}$, 即帕·秒 (帕为帕斯卡的简称)。可见 μ 包含力的量纲, μ 与流体的性质有关。

(1-4) 式称为牛顿内摩擦定律。若以 τ 表示单位面积上的内摩擦力, 则称为粘滯应力或切应力:

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

这就是常用的粘滯应力计算公式, τ 的单位为牛/米²。

流体的粘滯性是指流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦应力 (切应力) 以反抗相对运动的性质; 或者说是流体抵抗形变能力的性质。粘滯力是流体运动能量损失的重要根源, 以后要讲述的流体阻力和能量损失都要用到这一重要概念。

现在来分析切应力 τ 的方向。由图 1-1 取出的流层 dn 可知, 其上表面被速度较快的流层“拉着向前”, 故 $\tau_{\text{上}}$ 与运动方向一致; 下表面被速度较慢的流层“拉着向后”, 故 $\tau_{\text{下}}$ 与运动方向相反。而作用在同一分界面的不同流层上的切应力必然是大小相等方向相反的。

流体力学中经常采用运动粘滯系数 ν 来表示流体的粘性:

$$\nu = \frac{\text{动力粘滞系数 } \mu}{\text{流体密度 } \rho} \quad (\nu \text{ 的单位为米}^2/\text{秒}) \quad (1-6)$$

式中 ν 只有运动学量纲，而无力的量纲，故称为运动粘滞系数。

关于 μ , ν 和温度的关系，可由表 1-1、表 1-2 看出：液体（如水）的粘滞性随温度的升高而减小，气体（如空气）则相反。这是因为粘滞性取决于两个方面：即分子间的吸引力和由于分子不规则热运动所产生的动量交换。对于液体，因分子的间距比气体的要小得多，其粘滞性主要由分子吸引力所引起，当温度升高时，液体分子间距增大，分子吸引力减小，故粘滞性相应减小；对于气体，由于分子间吸引力很小，其粘滞性主要由分子动量的交换所引起，当温度升高时，气体分子热运动速度增大，动量交换加剧，故粘滞性相应增大。

还应指出，凡符合牛顿内摩擦定律规律的流体，称为牛顿流体。不符合此规律的某些特殊流体（如泥浆、纸浆水、遇热熔化的沥青等），称为非牛顿流体，实际应用时应加以区别。

四、流体的压缩性和热胀性

在一定温度下，流体受压，体积缩小，密度增大的性质，称为流体的压缩性；在一定压力下，流体受热，体积膨胀，密度减小的性质，称为流体的热胀性。

液体的压缩性和热胀性都很小，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，水的密度约增加二万分之一。在温度较高时（90~100℃），水的密度也只减少万

表 1-1 水的粘滞系数

t ($^{\circ}\text{C}$)	$\mu \times 10^{-3}$ (帕·秒)	$\nu \times 10^{-6}$ (米 ² /秒)	t ($^{\circ}\text{C}$)	$\mu \times 10^{-3}$ (帕·秒)	$\nu \times 10^{-6}$ (米 ² /秒)
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 1-2 一个大气压下空气的粘滞系数

t ($^{\circ}\text{C}$)	$\mu \times 10^{-3}$ (帕·秒)	$\nu \times 10^{-4}$ (米 ² /秒)	t ($^{\circ}\text{C}$)	$\mu \times 10^{-3}$ (帕·秒)	$\nu \times 10^{-4}$ (米 ² /秒)
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

分之七 (见表 1-3)。因此, 在很多工程技术中可以把液体的压缩性和热胀性忽略不计, 即认为液体是不可压缩的流

体。在建筑设备工程设计中，只有在计算当水泵开、停时所产生的水击压强以及热水循环系统等的计算中才考虑液体的压缩性和热胀性。

表 1-3 一个大气压下水的重度和密度

温度 (℃)	重度 (千牛/米 ³)	密度 (千克/米 ³)	温度 (℃)	重度 (千牛/米 ³)	密度 (千克/米 ³)	温度 (℃)	重度 (千牛/米 ³)	密度 (千克/米 ³)
0	9.806	999.9	15	9.799	999.1	60	9.645	983.2
1	9.806	999.9	20	9.790	998.2	65	9.617	980.6
2	9.807	1000.0	25	9.778	997.1	70	9.590	977.8
3	9.807	1000.0	30	9.755	995.7	75	9.561	974.9
4	9.807	1000.0	35	9.749	994.1	80	9.529	971.8
5	9.807	1000.0	40	9.731	992.2	85	9.500	968.7
6	9.807	1000.0	45	9.710	990.2	90	9.467	965.3
8	9.806	999.9	50	9.690	988.1	95	9.433	961.9
10	9.805	999.7	55	9.657	985.7	100	9.399	958.4

表 1-4 在标准大气压时的空气重度 and 密度

温度 (℃)	重度 (牛/米 ³)	密度 (千克/米 ³)	温度 (℃)	重度 (牛/米 ³)	密度 (千克/米 ³)	温度 (℃)	重度 (牛/米 ³)	密度 (千克/米 ³)
0	12.70	1.293	25	11.62	1.185	60	10.40	1.060
5	12.47	1.270	30	11.43	1.165	70	10.10	1.029
10	12.24	1.248	35	11.23	1.146	80	9.81	1.000
15	12.02	1.226	40	11.05	1.128	90	9.55	0.973
20	11.80	1.205	50	10.72	1.093	100	9.30	0.947

气体则具有明显的压缩性和热胀性（见表 1-4）。当压

强不过高、温度不过低时，气体的压强、温度和密度三者之间的关系服从理想气体状态方程（即克拉珀龙方程）：

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-7)$$

式中， p 为气体的绝对压强，单位为牛/米²； T 为气体的热力学温度，单位用开表示； ρ 为气体的密度，单位为千克/米³； R 为气体常数，单位为焦耳/千克·开，对空气 $R=287$ ；对其它气体，在标准状态下， $R=8314/n$ ，式中 n 为气体的分子量。

表 1-3 列举了水在一个标准大气压下，不同温度（℃）时的重度及密度。

在表 1-4 中，列举了在标准大气压下，不同温度时的空气重度及密度。

对速度较低（远小于音速，当大气温度 15℃ 时，音速为 341 米/秒）的气体，当流动过程中压强和温度变化较小时，重度仍可认为是常数，这种气体称为不可压缩气体。反之，对速度较高（接近或超过音速）的气体，当在流动过程中其压强和温度变化很大，重度已经不能视为常数时，称为可压缩性气体。

建筑设备工程中所遇到的大多数气体流动，其速度远小于音速，其压强和温度变化不大（当速度等于 50 米/秒时，密度变化 1%；当速度等于 150 米/秒时，密度的变化也只有 10%），例如通风机吸、送风系统，皆认为是不可压缩气流。即使对供热系统为蒸汽输送，从整个系统来看，重度变化很大，但对系统内各管段而言，重度变化并不显著。因此，对每一管段仍可按不可压缩气体对待。只不过这时不同管段按不同的重度进行分析计算。对于燃气的远距离输送

等实际工程，则应考虑气体的压缩性。

综合上述流体的各项物理性质，从建筑设备的水、气工程中所接触到的流体，因其流速大多数较低，一般可以认为是一种易于流动的、具有粘滞性的和不可压缩的连续性介质。

习 题

1-1 已知水的密度为 $\rho = 1000$ 千克/米³，用 SI 制表示其重度。若有这样的水一升，用 SI 制表示其质量和重量，并用工程单位制表示其重度、密度以及 1 升水的质量和重量。

1-2 温度为 20℃ 的空气，在直径为 2.54 厘米的管中流动，距管壁 2 毫米处的空气速度为 6 厘米/秒，求作用于单位长度管壁上的粘滞切力的大小以及粘滞切应力的大小。

第二章 流体静力学

流体静止是流体运动中的特殊状态。流体静力学是研究流体处于静止（即平衡）或相对静止状态下的力学规律及其在工程技术中的应用。

由于静止流体各质点间的相对速度为零，流体粘滞性不起作用，因而不存在切向应力，同时我们认为流体也不能承受拉力。因此，流体静力学的基本问题是研究流体静压强及其分布规律。

§ 2-1 流体静压强及其特性

一 流体静压强的定义

从静止均质流体中取一分离体 V 。要使分离体仍处于静止（平衡）状态，就必须在它的表面加上某些等效力来代替原来四周流体对它的作用。由于流体是连续介质，因此这些等效力（外力）是连续地作用在分离体表面的每一点上，如图 2-1 所示。

在表面上设有一面积 ΔA ，令其所受到的总作用力的大小为 ΔP （ ΔP 称为在作用面 ΔA 上

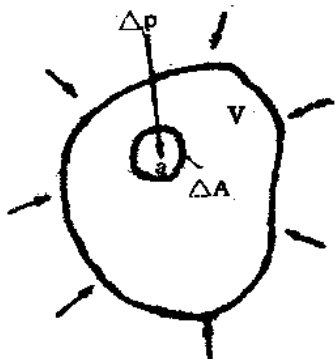


图 2-1 流体的静压强

的流体静压力)，则作用在面积 ΔA 上的平均静压强 p 为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-1)$$

当 ΔA 无限缩小至点 a 时, 则作用在点 a 的静压强为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \text{或} \quad \frac{dp}{dA} \quad (2-2)$$

可以看出, 流体静压力和流体静压强都是压力的一种量度。前者是作用在某一面积上的总压力; 而后者是作用在某一面积上的平均压强或某一点的压强。

设质量的量纲为 $[M]$, 长度的量纲为 $[L]$, 时间的量纲为 $[T]$, 则流体总压力的量纲为 $\left[\frac{ML}{T^2}\right]$, 国际单位为牛, 以 N 表示; 工程单位为公斤力即千克力 (kgf), 吨力。1 公斤力 = 9.8 牛。流体静压强的量纲为 $\left[\frac{M}{T^2L}\right]$, 国际单位为帕, 以 p_a 表示, 1 帕 = 1 牛/米²。更大的单位为巴, 以 bar 表示, 1 巴 = 1000 毫巴 = 10^5 帕, 而 1 毫巴 = 1000 达因/厘米²。在工程单位制中常用单位为千克力/米², 吨力/米², 千克力/厘米²。

二 流体静压强的特性

流体静压强有两个重要特性: 第一, 流体静压强的方向沿作用面的内法线方向; 第二, 流体中某一点静压强的大小与其作用面的方位无关, 即同一点各方向的静压强相等。

1. 现在来证明流体静压强的第一个特性。这里采用反证法。设在某静止流体 a 中 (图 2-2), 在点 a 有一任意方向的作用力 p_a , 则 p_a 可分解为法向应力 p_n , 切向应力 p_r 。我们知道流体具有流动性, 当有切应力 p_r 作用时, 则流体

必产生流动。由于流体是静止的，故 $p_r = 0$ ，也就是说，点 a 所受到力为 p_a 所指的方向是不可能的。

再看点 b。 p_b 虽然垂直于流体表面，但却沿外法线方向，而流体是不能抵抗拉力（张力）的，否则流体会分离，故静止流体也不可能有 p_b 所示方向的力。

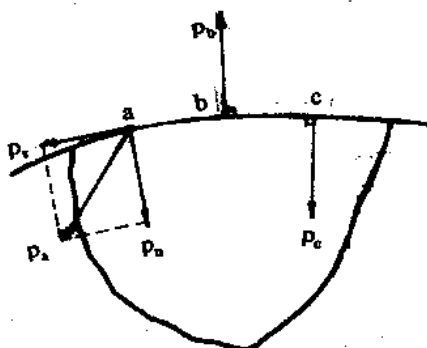


图 2-2 流体静压强的方向

据此，只有在作用面内法线方向的力（法向压应力）才是唯一的，即如图中 p_c 所示。

2. 证明流体静压强的第二个特性。在静止流体中任取一点 O，以其为原点设直角坐标 $Oxyz$ （图 2-3）。在坐标系中取包括原点 O 在内的任意无限小四面体 ABCO

（其任意性是指面积 ABC 的方位可任意变化）。设想将四面体以外的流体除去，为了保持流体静止平衡，必须在四面体的各个面上，加上与原来流体作用等值的静压力 P_x ，

P_y ， P_z 和 P_n ，对应地，用 p_x ， p_y ， p_z 和 p_n 分别表示作用于

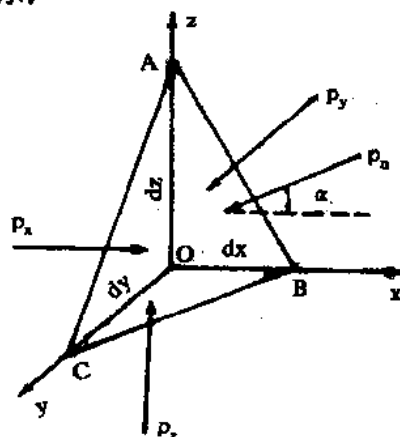


图 2-3 微小四面体的平衡

两轴组成的平面（即垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的平面）和四面体倾斜面上流体静压强的大小。它们的方向应沿作用面的内法线方向。如果我们能证明当四面体 $ABCO$ 无限地缩小到点 O 时，作用于点 O 的压强的大小为 $p_x = p_y = p_z = p_a$ ，则就证明了流体静压强的第二个特性。现分别分析四面体上所受到的外力。外力包括表面力和质量力。表面力作用在流体表面上，其大小与作用面积的大小成正比，如压力、粘滞阻力；质量力作用在流体的每一个质点上，其大小与流体的质量成正比，如重力、惯性力等。质量力又称超距力，对均质流体亦可称为体积力。

无限小四面体各面上的表面力只有压力，各面上流体的总压力为：对平面 AOC 为 $p_x \cdot \frac{1}{2} dydz$ ；对平面 BOC ，为 $p_y \cdot \frac{1}{2} dx dy$ ；对平面 AOB ，为 $p_z \cdot \frac{1}{2} dx dz$ ；对倾斜面 ABC ，为 $p_a \cdot dF$ （ dF 为倾斜面 ABC 的面积）。这里可以认为同一作用面上各点的压强相等，即压强在同一平面上为等值分布。因为虽然静压强是坐标位置的连续函数，同一平面上各点的静压强不同，但现在研究的是无限小平面，各点的静压差也是无限小，故可认为同一无限小平面上压强是等值分布的。

作用在无限小四面体上的外力还有质量力。设单位质量力在 x 、 y 、 z 方向上的分量的大小分别为 X 、 Y 、 Z ；流体容重为 ρ ；四面体的体积为 $\frac{1}{6} dx dy dz$ 。

我们先写出质量力在 x 轴上的分量，其大小为 $X \cdot \rho \cdot \frac{1}{6} dx dy dz$ 。因为流体静止，所有外力在 x 轴上投影的总和应

等于 0 (即外力平衡), 则有方程:

$$p_x \cdot \frac{1}{2} dydz - p_a dF \cos \alpha + X \cdot \rho \cdot \frac{1}{6} dx dy dz = 0$$

式中 α 为 p_a 和 x 轴的夹角, 由几何关系可知 $dF \cos \alpha = \frac{1}{2} dydz$ (即平面 ABC 与平面 AOC 的夹角也是 α)。

上面方程中的第三项是三阶无穷小, 与前两项二阶无穷小比较可略去, 则得

$$p_x \cdot \frac{1}{2} dydz - p_a \cdot \frac{1}{2} dydz = 0$$

即

$$p_x = p_a$$

同理可证 $p_y = p_a, p_z = p_a$

也就是

$$p_x = p_y = p_z = p_a$$

因四面体是任意取的, 即可作无数不同方位的 dF (微小面积 ABC)。这就说明了在静止流体中的同一点上静压强的大小与作用方向无关, 即同一点各方向的静压强是一个标量, 这和固体是不相同的。因此, 流体静压强只是空间位置的函数 $p = f(x, y, z)$ 。研究流体静压强的分布规律即研究这一连续函数。

§ 2-2 流体静压强的分布规律

一、自由表面和表面压强

自由表面是液体与气体的交界面。在质量力仅有重力作用下的静止流体的自由表面是水平面, 如蓄水池水面、潮面等。

自由表面上的气体压强称为表面压强, 一般以 p_0 表