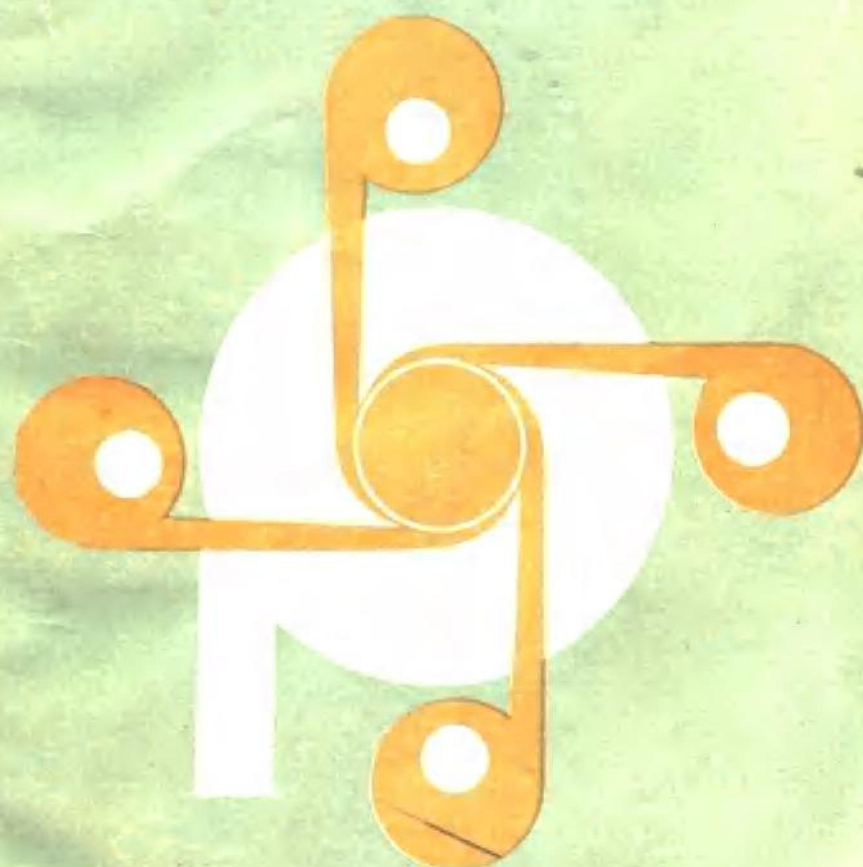


旋转流分选的理论及应用

煤炭工业出版社



内 容 提 要

本书主要阐述旋转流分选、除尘的流固两相流基础理论及其应用；系统介绍水力旋流器、重介质水力旋流器、旋风除尘器（旋风分离器）的工作原理、结构、性能、工作系统、设计计算及运转。本书供煤炭、冶金、矿山、化工、电力、铸造、食品、建材等工业部门从事分选、环境及劳动保护工作的技术人员学习、使用，也可供高等学校有关专业的教师及高年级学生阅读参考。

责任编辑：施 文 华

旋转流分选的理论及应用

柳吉祥 编

*

煤炭工业出版社 出版

（北京安定门外和平北路16号）

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $15^{1/2}$ 插页 2

字数 412 千字 印数 1—3,200

1985年2月第1版 1985年2月第1次印刷

书号 15035·2654 定价 3.10 元

目 录

第一篇 流固两相流运动规律

第一章 单相管流运动规律	1
第一节 流体的物理性质	2
第二节 作用在流体上的力	7
第三节 流体静力学基本方程	9
第四节 单相管流的基本方程	15
第五节 管流阻力及压力损失	30
第二章 重力场中固体物料的沉降	49
第一节 固体物料的性质	49
第二节 运动物体阻力与沉降速度	53
第三节 固体物料在介质流中的沉降	62
第三章 液固两相流管道输送	72
第一节 矿浆的主要物理性质	72
第二节 液固两相流能量方程式	74
第三节 液固两相流的紊流特性和阻力特性	76
第四节 圆管两相流的水力计算	79
第四章 气固两相流管道输送	88
第一节 混合比及固体颗粒群在管道中的运动状态	88
第二节 气固输送管道阻力的基本方程	93
第三节 气固输送管道中最佳空气速度的确定	97
第四节 粉粒体输送直管的阻力计算	100
第五节 管件局部阻力的计算	102
第五章 旋涡运动	107
第一节 旋涡运动基本方程式	108
第二节 自由涡与强制涡运动	109
第六章 旋流分离设备中流体的运动规律	118
第一节 固体颗粒在离心场中的运动规律	119

第二节	液体与气体旋流分离器中的速度分布	121
第三节	旋流分离器的压力分布	124
第四节	旋流分离器的能量损失及矿浆量的计算	129
第五节	旋流分离器临界粒度的计算	133
第六节	重介质水力旋流器按比重分层规律	139

第二篇 旋流分离系统的设计计算

第七章	水力旋流器工作系统的设计计算	145
第一节	水力旋流器的选择计算	145
第二节	重介质水力旋流器的选择计算	169
第三节	矿浆输送系统的设计计算	188
第八章	旋风除尘器工作系统的设计计算	227
第一节	旋风除尘器的类型	230
第二节	旋风除尘器的选择计算	260
第三节	除尘系统的设计计算	275

第三篇 旋流分离系统的运转

第九章	旋流分离设备的工作	307
第一节	水力旋流器的工作	307
第二节	重介质水力旋流器的工作	324
第三节	旋风除尘器的工作	335
第十章	旋流分离系统的磨损	350
第一节	旋流分离系统运转时的磨损	351
第二节	减少磨损的措施	357
第十一章	测试技术	368
第一节	风路系统气流速度及压力的测定	368
第二节	除尘设备的测定	384
第三节	通风机性能的测定与计算	391
第四节	管道中粉尘浓度的测定	396
第五节	粉尘分散度的测定	408
附录一	局部阻力系数 ξ 值汇编	418
附录二	除尘管道计算表	431

附录三	标准三通管尺寸表.....	447
附录四	水力旋流器生产实例参考表.....	464
附录五	大连辉绿岩铸石厂产品规格.....	466
附录六	单位及其换算关系.....	489

第一篇 流固两相流运动规律

各种不同物态的物质（或同一液态的不同物质）混合时，如果它们之间存在着界面，则称为混合介质的相，由两相或两相以上物质所组成的流动系统，通称为多相流动系统。最常见的多相流动系统是两相流动，在两相流动中又以流、固（液-固、气-固）与流、流（液-气、液-液）流动为最普遍和最重要。

研究多相流体的宏观运动规律以及流体与其中固体相互作用的科学，称为多相流体力学，它是流体力学的一门分支。多相流动现象，特别是两相流动现象，自然界和工程上大量存在。掌握多相流的运动规律，在工程上就能对技术设备进行最佳设计，使其高效安全运转，以达到人们预想的目的。

第一章 单相管流运动规律

两相流理论是在单相流（均匀流动）理论的基础上发展起来的。因此，单相流规律对研究两相流动特别重要，只有掌握了单相流的运动规律，才能更好的研究两相流动。单相流的重点是动力学，即研究流体宏观运动规律及其在实际工程上的应用。流体运动和平衡等水力现象又与流体性质密切相关，所以应先从流体的性质谈起。

第一节 流体的物理性质

一、流体的概念、连续性

世界是物质的，物质和运动是不可分的，没有运动就没有物质，更没有世界。物质存在的状态有固态、液态和气态之分。与固体相比，液体和气体的共同特点是内聚力甚小，不能抵抗拉力和切力，因而能无限形变。液体和气体的这种性质称为流动性，故而液体和气体统称为流体。

组成流体的大量分子，以很大的速度作相对运动，混乱而无规则。分子之间存有间隙，因而流体内部是不连续体。但是，从工程角度出发，只有流体的宏观运动规律才有实际意义。于是，在研究方法上进行了“模化”，抛开了分子的相互作用和分子的热运动，把流体看成是由许多分子集团——被称为流体“质点”的物质——所组成，并连续而无间隙地充满其占有的空间。流体在相对静止和机械运动时，宏观上表现为连续体。这种“模化”抓住了客观事物的本质，它可以摆脱繁杂的分子运动，而便于研究流体只有在外力作用下的相对平衡和机械运动。这样，在连续介质的概念下，表示流体所处状态的各个物理量，如速度、压力、密度等都可以看作在流体占有的空间里是连续分布的。这些物理量可在数学上写成空间坐标和时间的连续函数，利用高等数学研究流体的平衡和运动。这种“模化”之所以被允许，是因为它反映了客观的真实情况，即流体分子不规则的热运动的结果，会被它所携带的动量和能量彼此交换，从而使那些宏观的特征量获得连续变化的性质。

液体和气体离心旋流分离设备所用的介质是水和空气。它们的共同特点都具有流动性，不同点是水装入容器能形成自由表面，在很大压力下体积变化极小，可认为是不可压缩体；空气则不然，它在容器中不能形成自由表面，且具有压缩性。因而空气或其他气体，在工程上称为可压缩体。表示气体状态的方程式

如下:

$$pv = RT \quad (1-1)$$

$$\frac{p}{\gamma} = RT \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的绝对压力 (牛顿/米²);
 v ——气体的比容 (米³/公斤);
 R ——气体常数 (牛顿·米/公斤·升), 对于空气 $R_a = 287$ 牛顿·米/公斤·升;
 T ——气体的绝对温度 (开);
 γ ——气体的重度 (牛顿/米³).

二、流体的密度与重度

1. 流体的密度

质量是物质最根本属性之一, 它制约着物质的几何属性和物理属性。流体具有质量的性质用密度来表示。流体的密度以流体的质量与体积之比来度量, 即:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-3)$$

流体密度的倒数, 即单位质量的流体所占有的体积, 称为流体的比容, 以 v 表示, 即

$$v = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho} \quad (1-4)$$

式中 M ——流体的质量 (公斤);
 V ——流体的体积 (米³);
 ρ ——流体的密度 (公斤/米³);
 v ——流体的比容 (米³/公斤)。

2. 流体的重度

地球对一切物体都具有吸引力, 这个引力就是物体所受的重

力。重力就是物体的重量。流体重量的大小，用重度（重率或容重）来描述。流体的重度以流体的重量与体积之比来表示，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-5)$$

式中 G ——流体的重量（牛顿）；

V ——流体的体积（米³）；

γ ——流体的重度。

3. 重度与密度的关系

依牛顿第二定律，在重力场中物体的重量等于物体的质量和重力加速度的乘积，即

$$G = Mg \quad (1-6)$$

式中 g ——重力加速度，一般 $g = 9.81$ 米/秒²。

将式（1-6）代入式（1-5），利用式（1-3）的定义得出重度与密度的换算关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-7)$$

目前推行国际单位制，但工程单位制、物理单位制也在使用，为便于换算将其关系列入下表。

重度和密度各种单位关系换算表

表 1-1

单 位 制	γ	ρ
国际单位制	牛顿/米 ³	公斤/米 ³
工程单位制	公斤/米 ³	公斤·秒 ² /米 ⁴
物理单位制	达因/厘米 ³	克/厘米 ³
换算关系	1公斤/米 ³ = 9.81牛顿/米 ³ 1公斤/米 ³ = 0.98达因/厘米 ³	1公斤·秒 ² /米 ⁴ = 9.81公斤/米 ³ 1公斤·秒 ² /米 ⁴ = 9.81 × 10 ⁻³ 克/厘米 ³

三、流体的粘滞性

流体在流动时，由于分子运动的影响，流体与流体及流体与固体间呈现阻抗的性质，称这种力学特性为粘滞性，所产生的阻

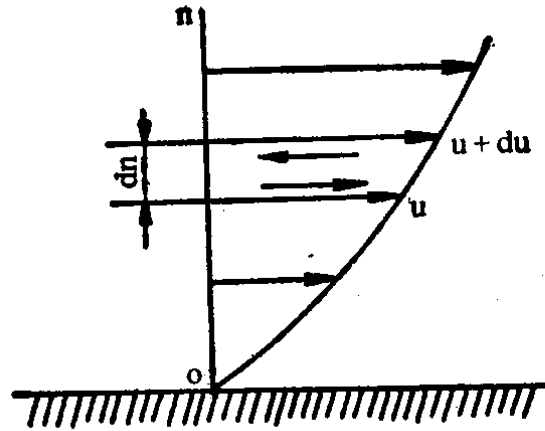


图 1-1 牛顿内摩擦示意图

力称为粘滞力（内摩擦力），所以粘性是表征流体内摩擦力的一个参数。对于层流运动，实践证实内摩擦力与下列因素有关：

- （1）与液体薄层间的接触面的大小成正比；
- （2）与速度梯度（ du/dn ）成正比；
- （3）随流体种类而异；
- （4）与压力大小无关。

牛顿内摩擦定律如图1-1所示，数学表示式如下：

$$T = -\mu S \frac{du}{dn} \quad (1-8)$$

式中 T ——流体薄层的内摩擦力（牛顿）；

S ——相邻两薄层的接触面积（米²）；

$\frac{du}{dn}$ ——速度梯度（流体速度沿截面的变化率）；

μ ——流体的粘性系数，不同流体具有不同数值。

两薄层间单位面积的内摩擦力为：

$$\tau = -\mu \frac{du}{dn} \quad (1-9)$$

式中 τ ——单位面积的内摩擦力（牛顿/米²）。

式中负号在内摩擦力方向与流动方向相反时用之。由式1-9看出：静止流体 $du/dn = 0$ 不显现阻力，所以只有当流体作相对运动时才会出现内摩擦力。

流体的内摩擦力用粘性系数 μ 来表示，它决定于流体的性质。

不同流体的 μ 值不同。

μ 的国际单位:

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{\left[\frac{du}{dn}\right]} = \frac{\frac{\text{牛顿}}{\text{米}^2}}{\frac{\text{米/秒}}{\text{米}}} = \text{牛顿} \cdot \text{秒} / \text{米}^2$$

μ 的物理单位为〔达因·秒/厘米²〕或〔泊(P)〕, 1 泊 = 10⁻¹ 牛 顿·秒/米²。1厘泊 = 1/100 泊 = 1/1000 牛 顿·秒/米²。 μ 的工程单位是公斤·秒/米²。 μ 的单位中包括力, 类似于应力的单位, 所以又把 μ 称为流体的动力粘性系数。 μ 值是反映流体粘度大小的物理量, 不同流体的 μ 值不同, 粘性越强, 流动时产生的阻力也就 越大。同一种流体, 温度不同, μ 值也随之发生变化。

在工程计算中, μ 同 ρ 常以 μ/ρ 的形式相伴出现, 即 $\nu = \mu/\rho$ 。 ν 的单位为米²/秒, 常用的单位为厘米²/秒, 称为斯托 克斯, 简称 为斯 (St)。斯的百分之一为厘斯 (cSt), 即

$$1 \text{ 厘斯} = 10^{-2} \text{ 斯} = 10^{-6} \text{ 米}^2 / \text{秒}$$

ν 的单位类似于速度单位, 所以把 ν 称之为流体的运动粘性系数。

流体的粘性系数与温度有关, 在标准状态下, 可以通过经验

在标准压力下空气的物理性质 表 1-2

温 度 ℃	密 度 ρ 公斤/米 ³	重 度 γ 牛顿/米 ³	粘度 $\mu \times 10^5$ 牛顿秒/米 ²	运 动 粘 度 $\nu \times 10^5$ 米 ² /秒
- 40	1.515	14.86	1.49	0.98
- 20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.205	11.82	1.81	1.50
30	1.165	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.060	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.81	2.09	2.09
100	0.946	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	3.45

公式计算。

对于水：

$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.00337t + 0.000221t^2} \text{ (斯)} \tag{1-10}$$

对于空气：

$$\nu = 0.132(1 + 0.00329t + 0.0000017t^2) \text{ (斯)} \tag{1-11}$$

式中 t —— 温度 (度)。

空气和水的重度、密度和粘度随温度的变化参看表 1-2 和表 1-3。

水的物理性质 表 1-3

温 度 ℃	密 度 ρ 公斤/米³	重 度 γ 千牛顿/米³	粘 度 μ × 10³ 牛 顿 · 秒 / 米²	运动粘度 ν × 10⁴ 米²/秒	弹性系数 Eb × 10⁻⁸ 千 牛 顿 / 米²
0	999.8	9.805	1.781	1.785	2.02
5	1000.0	9.807	1.518	1.519	2.06
10	999.7	9.804	1.307	1.306	2.10
15	999.1	9.798	1.139	1.139	2.15
20	998.2	9.789	1.002	1.003	2.18
25	997.0	9.777	0.890	0.893	2.22
30	995.7	9.764	0.798	0.800	2.25
40	992.2	9.730	0.653	0.658	2.28
50	988.0	9.689	0.547	0.553	2.29
60	983.2	9.642	0.466	0.474	2.28
70	977.8	9.589	0.404	0.413	2.25
80	971.8	9.530	0.354	0.364	2.20
90	965.3	9.466	0.315	0.326	2.14
100	958.4	9.399	0.282	0.294	2.07

从表1-2和1-3看出：水的ν值随温度升高而降低；空气的ν值则随温度的升高而增大。这是由于分子运动的不同特点造成的。

第二节 作用在流体上的力

流体的机械运动是在外力作用下发生的。因此，在着手建立控制流体运动的方程以前，必须了解作用于流体上有哪些力，它

们是怎样作用在流体上的。

作用在所研究流体上的力大致分为三类：

一、内力

内力是流体质点间的相互作用力，在流体内部是相互平衡的（即其合力等于零）。凝聚力、表面张力、内摩擦力都属于此类；

二、体积力

体积力也称质量力，是作用于流体内部每个质点上的力，其大小与流体质量成正比。质量力共分两种：

（1）重力：地球对流体各个质点吸引的结果。

（2）惯性力（达兰贝尔力和离心力）：流体作直线和曲线加速运动时，作用于流体每个质点上的力。

流体在离心力场中运动时，其质量力为离心力。离心力的大小用下式表示：

$$C = m \cdot \omega^2 r \quad (1-12)$$

式中 m ——流体质量（公斤）；

ω ——流体的旋转角速度（弧度/秒）；

r ——流体的旋转半径（米）；

$\omega^2 r$ ——单位质量力，也就是离心加速度。

三、表面力

同所研究的流体相接触的流体或刚体，作用在所研究的流体表面上的力称为表面力。此力又可分为两种：一种是和流体表面垂直的法向应力，一种是和流体表面相切的切向应力。切向应力仅在流体运动状态下才能产生，在静止状态和在理想流体运动中为零。某一点的法向应力（也称压力）为：

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (\text{牛顿/米}^2)$$

同一点的切向应力（简称切应力）：

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta S} \quad (\text{牛顿/米}^2)$$

式中 ΔS ——流体质点的表面积；

ΔP ——法线方向的表面力；

ΔT ——切线方向的表面力。

对流体的主要力学性质和作用于流体上的力进行分析，就为研究流体的平衡和机械运动，找出各种运动状态下运动规律打下了基础。

第三节 流体静力学基本方程

流体静力学是研究流体在外力作用下的平衡规律，以及这些规律在工程上的应用。下面着重论述在重力场和离心力场中外力与流体统一的静力表现形式——流体静力方程式、静压力及其表示方法。

一、流体的静力方程式

液体和未压缩气体的平衡规律是相同的。为了方便，我们用液体来研究流体的平衡问题，结论同样适用于未压缩气体。

容器内装有液体时，容器底部就受到液体的压力。压力的方向永远沿着作用面的内法线方向。在平衡液体中，液体与气体的分界面叫做液体的自由表面。气体作用在自由表面上单位面积的总压力，叫作外压强，以符号 P_0 表示。液体与固体周界的相互作用力，称为静水压力。研究相对静止液体内部某点的静水压力大小及其分布规律，并以数学形式表示，就是水静力学基本方程式。

确定在液体内部任意深度点处的静水压力的方法如下：

如图(1-2)所示，在盛液体的容器中，有一正六面体，上下两面的面积都是 ds ，高为 h ，且上面在自由液面的平面中。作用在六面体上的力有：

(1) 作用在底面沿垂直方向自下而上的总压力 P , $P = p \cdot ds$, 这个力为未知数；

(2) 作用在顶面的外压强 P_0 , $P_0 = p_0 \cdot ds$ ；

(3) 作用在六面体各个侧面上水平方向的压力，分别为 P_x 、 $-P_x$ 、 P_y 、 $-P_y$ ；

(4) 正六面体沿垂直方向自上而下的重力 dG , $dG = \gamma ds \cdot h$ 。

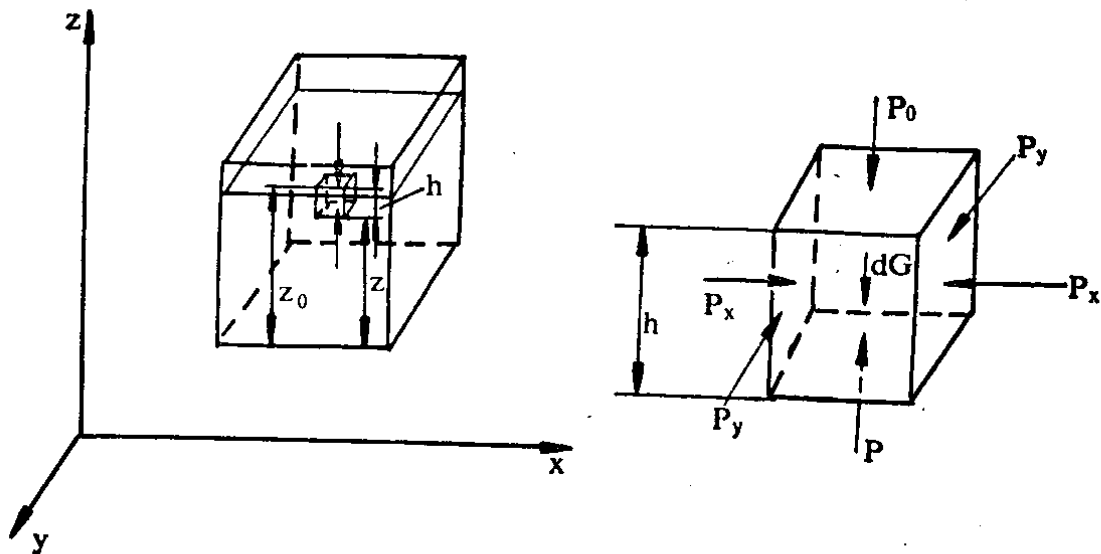


图 1-2 静水压力示意图

六面体处于平衡状态，根据力学的平衡条件， P_x 和 $-P_x$ 、 P_y 和 $-P_y$ 相互抵消，沿垂直方向的合力应等于零，即

$$P - P_0 - dG = 0$$

或
$$Pds - P_0ds - \gamma ds \cdot h = 0$$

上式中消去 ds 后，变成：

$$P = P_0 + \gamma h \quad (1-13)$$

式中 P ——深度 h 处的静水压强（牛顿/米²）；

h ——所研究点与自由液面之间的距离（深度）（米）；

γ ——液体的重度（牛顿/米³）；

P_0 ——作用于自由液面上的压强（牛顿/米²）。

式（1-13）是水静力学基本方程式。它表明，作用在液体内部任意点的静水压力等于作用于液体上的压力与液体自重所形成的压力（ γh ）之和。这个方程同样适用于未压缩气体。

如果 P_0 为定值，则液体内部某一点的静水压强与其所在的深度成正比。同时由式（1-13）还可以知道，同一容器，同一液体和同一液面深度下的静水压强，不管来自何方都相等。由压力相等的各点所形成的液面叫等压面，液体与气体的接触面就是等压面，当质量力仅为重力时，液体中的任一水平面都为等压面。

二、旋转容器中流体的静力方程

只有重力作用绝对静止时,质量力的重力计算公式为 $G = mg$;如果在重力作用的同时还有因旋转而引起的离心力作用,问题就复杂了一些,但这都是旋流分离设备工作的基础,从静力的角度先来讨论这个问题。

取一绕竖轴(OZ轴)旋转的圆柱形容器(图1-3)。当容器静止时,其中液面是水平面且位于MN;容器以等角速度 ω 旋转,液体便随容器逐渐旋转起来,一定时间后,液体与容器之间、液体质点与质点之间,便不再有相对运动,就和容器一起以等角速度 ω 而旋转,这时便达到了旋转容器内液体对容器的相对平衡(静止)。达到相对平衡后,液面不再是水平面,而变成了 $M'b'N'$ 曲面形状。在曲面(液面)上任取一质量为 m 的流体质点A,此质点A既受重力作用又受离心力作用。流体在运动中若同时受几种质量力作用,则总的质量力应为几个质量力的向量和。假如这两种质量力的合力以 F 表示,根据质量力与等压面相互垂直的道理,此合力 F 必垂直于A点的液面。假如A点与旋转轴的距离

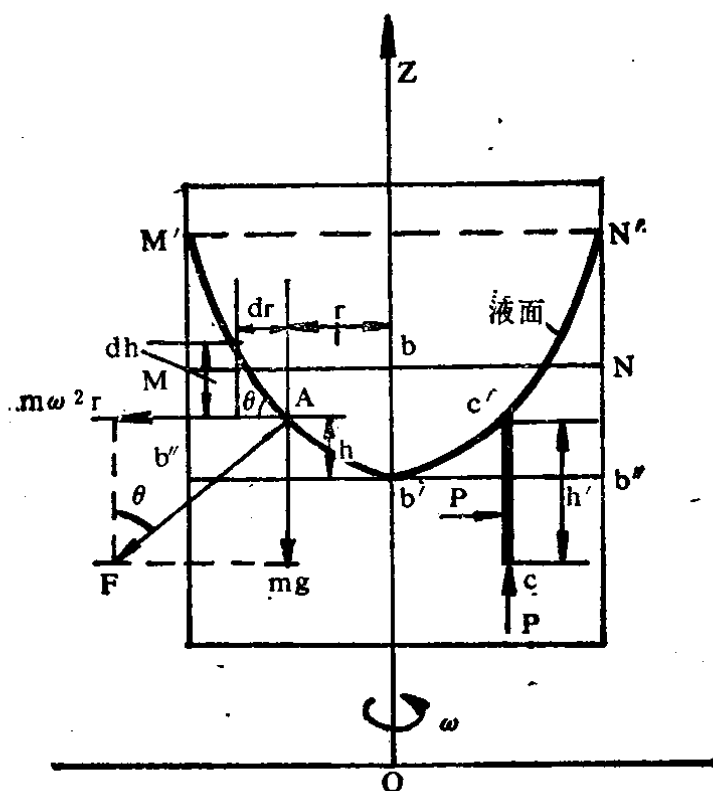


图 1-3 旋转容器中的液体

为 r ，距水平面 $b''-b''$ 的垂直高度为 h ，而 A 点液面与水平面的夹角为 θ ，即

$$\tan\theta = \frac{dh}{dr} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r}{mg} = \frac{\omega^2 r}{g}$$

或

$$dh = \frac{\omega^2}{g} r dr$$

将上式积分

$$h = \int \frac{\omega^2}{g} r dr = \frac{\omega^2 r^2}{2g} + C$$

当 $r = 0$ 时， $h = 0$ ，定积分常数 $C = 0$ ，所以

$$h = \frac{\omega^2 r^2}{2g} \quad (1-14)$$

公式 (1-14) 称为离心水头公式。液面的升高值 h 是由于离心力造成的。式中的 h 和 r 均为变量，所以离心水头公式是一抛物线方程，而液面（包括等压面）形状则为一绕竖轴旋转的抛物面。

相对静止液体内任一点压力大小的求法与绝对静止时的求法一样，均可以用公式 1-13 表示，即：

$$P = P_0 + \gamma h'$$

二、静压力的表示方法

垂直作用于流体单位面积上的力，称为静压力，以符号 P 表示。

静压力有三种度量单位：

第一种是从静压力的定义出发，用单位面积上所受的力表示，即力/面积。国际单位为牛顿/米² (N/m²)，以帕 (Pa) 表示 $10^5 \text{Pa} = 1 \text{巴 (bar)}$ 。工程单位为公斤力/米² 或 公斤力/厘米²。

第二种是以大气压的倍数来表示。国际上规定标准大气压（温度为 0℃ 时海平面上的压力，即 760 毫米汞柱）为 101.325 帕，即 1 标准大气压 = 101.325 帕。工程单位中规定 1 个工程大气压（相当于海拔 200 米处的正常气压）为 1 公斤力/厘米²，即 1 工