

E

船舶辅机(二)

液压甲板机械

5

上海海运学院

目 录

第一章 流体力学基础	(1)
§ 1—1 流体的物理性质	(2)
一、质量、重量和两种度量单位制	(2)
二、密度、重度和比重	(2)
三、压缩性和膨胀性	(3)
四、热容量、比热、导热系数	(4)
五、液体的粘度	(5)
§ 1—2 静止液体的特性	(6)
一、两个基本特性	(6)
二、压强的测量	(8)
三、巴斯格定律及其应用	(10)
§ 1—3 流动液体的基本特性	(12)
一、伯努利方程式及其应用	(13)
二、层流、紊流与雷诺数	(17)
§ 1—4 液体在管道中流动时的阻力损失	(19)
一、沿程阻力损失	(19)
二、局部阻力损失	(20)
§ 1—5 液体流经小孔与缝隙	(23)
一、薄壁小孔和细长小孔	(24)
二、平面缝隙与环状缝隙	(28)
§ 1—6 液压冲击和气穴现象	(31)
第二章 油泵和油马达	(33)
§ 2—1 齿轮泵	(33)
一、齿轮泵的基本工作原理	(33)
二、齿轮泵的典型结构	(34)
三、齿轮泵的其他结构型式	(38)
§ 2—2 螺杆泵	(41)
一、螺杆泵的基本工作原理	(41)
二、螺杆泵的典型结构	(42)
§ 2—3 叶片泵	(46)
一、叶片泵的基本工作原理	(46)

二、叶片泵的典型结构	(47)
· § 2—4 径向柱塞泵	(49)
一、径向柱塞泵的基本工作原理	(49)
二、径向柱塞泵的典型结构	(50)
§ 2—5 轴向柱塞泵	(56)
一、轴向柱塞泵的基本工作原理	(56)
二、轴向柱塞泵的典型结构	(57)
§ 2—6 油泵的使用、管理和维修保养	(62)
一、一般通则	(62)
二、各种类型油泵的常见故障	(63)
三、油泵流量、扭矩和功率的估算	(64)
§ 2—7 低速大扭矩油马达	(66)
一、活塞连杆式油马达	(67)
二、静力平衡式油马达	(67)
三、内曲线多作用式油马达	(72)
第三章 控制阀	(75)
§ 3—1 压力控制阀	(75)
一、溢流阀	(75)
二、减压阀	(76)
三、顺序阀	(77)
四、压力继电器	(79)
§ 3—2 流量控制阀	(80)
一、节流阀	(80)
二、单向节流阀	(81)
三、调速阀	(81)
四、溢流节流阀	(82)
五、行程节流阀	(83)
§ 3—3 方向控制阀	(84)
一、单向阀	(84)
二、换向阀	(85)
第四章 液压装置的使用和管理	(91)
§ 4—1 液压油的选用	(91)
§ 4—2 维护液压装置的清洁	(95)
§ 4—3 安装、维修和保养	(95)
第五章 电动液压舵机	(97)
§ 5—1 概述	(97)

§ 5—2 船舶对舵机的要求·····	(99)
§ 5—3 电动液压舵机的组成和工作原理·····	(100)
一、推舵机构·····	(100)
二、舵机液压系统·····	(113)
三、操舵控制系统·····	(117)
§ 5—4 电动液压舵机整机分析·····	(131)
一、“风”字号船舶电动液压舵机·····	(131)
二、“门”字号远洋轮电动液压舵机·····	(136)
三、“丰”字号远洋轮电动液压舵机·····	(138)
四、“亭”字号远洋轮电动液压舵机·····	(141)
五、“天津”轮转叶式电动液压舵机·····	(143)
六、GZ65 型转叶舵机·····	(144)
七、“长乐”轮转叶式电动液压舵机·····	(145)
八、AEG 型转叶式电动液压舵机·····	(146)
§ 5—5 电液舵机的管理·····	(147)
一、舵机液压系统管理的一般原则·····	(147)
二、使用前的准备·····	(148)
三、运行中的管理·····	(149)
四、停泊时的管理·····	(149)
五、故障及其排除·····	(149)
第六章 液压起货机和舱口盖 ⁶² ·····	(151)
§ 6—1 液压起货机·····	(152)
一、基本工作原理和特点·····	(152)
二、双吊杆式液压起货机·····	(152)
三、单吊杆式液压起货机·····	(158)
四、回转式液压起货机——液压克令吊·····	(159)
§ 6—2 液压舱口盖·····	(166)
一、甲板置油缸式液压舱口盖·····	(166)
二、舱盖板置油缸式液压舱口盖·····	(169)
三、油马达式液压舱口盖·····	(173)
四、螺旋油缸式液压舱口盖·····	(176)
§ 6—3 使用实例·····	(177)
一、“长风”轮液压起货机和舱口盖·····	(177)
二、“安源”轮液压起货机和舱口盖·····	(180)
第七章 液压起锚机和绞缆机 ⁶³ ·····	(183)

第一章 流体力学基础

毛主席说：对于某一现象的领域所特有的某一种矛盾的研究，就构成某一门科学的对象。

流体力学就是专门研究流体所特有的平衡和运动规律，以及它的矛盾特殊性和对立统一的一门基础科学。

什么是流体？它具有什么特性？这是首先需要弄清楚的。

简单地说，流体就是容易流动的物体，如水、油、空气等。

“易流动性”是它的主要特性之一。所谓“易流动性”，这是流体不同于固体的地方。固体能保持一定的形状，要想改变它，必须施加一定的外力，有时可能相当大；而流体若无容器的限制，根本不能维持固定的形状，如水将在自身重力作用下向低处流动。若将水放在杯子里，则它能保持一个固定的体积和一个自由液面。这是因为液体分子与分子之间的内聚力大大地小于固体分子间的内聚力，完全不能抵抗切向力或拉力的缘故。至于气体，分子与分子之间的距离更大些，因而内聚力更弱，分子运动活泼，故在容器里连自由表面也不能形成，而总是充满整个容器。

流体的另一个重要特性是“粘滞性”。流体在运动状态下，由于内部出现成对的切力（或摩擦力），抵抗流体内部分子层的相对运动，就形成了它的“粘滞性”。这种流体的粘滞性是流体流动过程中产生各种阻力和能量损失的根源。但事物总是一分为二的，在水力系统中用于调节压力和流速，起减振作用等也是利用这一粘滞特性。但当流动一停止，这种粘滞性立刻消失，因此在静止的或平衡的液体中，液体的粘滞性是不表现出来的。

流体运动变化的情况是一个非常复杂的问题，影响因素相当多。

毛主席指出：在复杂的事物的发展过程中，有许多的矛盾存在，其中必有一种是主要的矛盾，由于它的存在和发展，规定或影响着其他矛盾的存在和发展。

因此，在研究流体力学时，要抓住主要矛盾，忽略次要因素，才能看清现象的本质，找到解决矛盾的办法。

这里所要研究的流体主要是水和液压油。在一般性的问题的探讨中，常将它假设为不可压缩的、均匀的、连续性的。实际上，宇宙间没有绝对不可压缩的物体。不过，在通常压强作用下，液体的可压缩性很小，可以忽略。所谓均匀的、连续性的，这是指在整个液体中，各微小分子质点一个紧挨一个，中间没有任何空隙，并且由于分子间频繁而无规则的运动，互相撞击和渗透，各分子间的质量、能量和动量彼此交换而达到基本均衡。从而可以认为整个液流是均匀的、连续性的、在各个方向上特性相同的。事实证明，根据上述假设条件建立起来的流体力学理论，对于解决实际工程问题，已经完全满足需要。但是在涉及到水锤或液冲击现象时，液体的弹性变形和非连续性已上升为主要矛盾，不能不加以考虑。

在特殊的条件下，气体也可以当作不可压缩的、均匀的、连续的流体看待。例如，船舶上采用的风机，一般风速不大，风压不超过 400m.m. 水柱。工作过程中，空气密度变化甚小，可以忽略。

流体力学是学习船舶液压甲板机械不可缺少的基础理论知识,掌握它对于深入理解液压甲板机械的工作原理、结构、特性是有利的,可以提高运行管理工作中分析问题和解决问题的能力。根据本专业的特点,尽量避免纯理论性的探讨,主要采用联系实际,深入浅出,重在应用的方法进行讲述。

§ 1—1 流体的物理性质

在流体力学中经常遇到若干物理性质的概念和度量单位的问题,往往容易混淆,有必要先讲一下。

一、质量、重量和两种度量单位制

质量是物体中所含有的物质数量。不论放于何处,质量大小不变。重量是地球对物体的吸引力,随着物体所处的纬度和海平面高度不同而不同。

质量与重量的度量,国际上有统一的标准。单位质量是由一个铱合金立方体做成,它保存在法国巴黎国际权度局。这个单位质量叫1千克或一公斤。相当于在4℃时1000立方厘米的纯水的质量。

将一千克的单位质量,放在纬度45°的海平面上,地球对它产生的吸引力,称为单位重量,叫1千克重或1公斤重。这时的重力加速度等于9.806米/秒²。

重量和重力在物理意义上是相同的。

在力学度量单位中,包含有三个基本单位。质量或重量、长度、时间。采取质量、长度、时间三个基本单位的称为质量单位制,又称绝对制;采取重量、长度、时间三个基本单位制的称为重力单位制,又称工程制。

绝对制中,长度以厘米(cm)、质量以克(g)、时间以秒(sec)为单位的,称为CGS制。在CGS制中,力的单位称为达因,它相当于1克质量产生1厘米/秒²的加速度所需要的力。10⁵达因称为1牛顿。在物理学中常采用绝对制。

工程制中,长度以米(m)、重力以公斤(kg)、时间以秒(sec)为单位。这是一般工程中常用的度量单位制。值得注意的是在工程制中遇到质量因子m时,根据牛顿第二定律 $m = G/g$,G为重量(公斤),g是重力加速度(米/秒²),所以质量的单位应当是公斤·秒²/米。

在工程制中,近来常有用“公斤力”或“kgf”表示重量单位,与CGS制中的质量“公斤”、“克”相区别。

二、密度、重度和比重

单位容积中所含流体的质量称为密度,用 ρ 表示:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{克/厘米}^3) \quad (1-1)$$

式中 m ——流体的质量,克;

V ——流体的容积,厘米³。

若换用工程制表示,密度 ρ 的单位为克力·秒²/厘米⁴。

单位容积中所含流体的重量称为重度,用 γ 表示:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{公斤力/厘米}^3) \quad (1-2)$$

式中 G ——流体的重量, 公斤力;

V ——流体的容积, 厘米³。

由于 $G = mg$, 所以流体的重度和密度的关系为:

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

流体的比重是流体在某一温度下的重度和 4℃ 时纯水的重度之比。比重是没有单位的。

下面用表的形式列出几种常用流体的密度, 重度和比重的数值, 单位用工程制表示, 见表 1-1。

表 1-1

流 体 名 称	物 理 性 能	密 度 ρ 克力·秒 ² /厘米 ⁴	重 度 γ 公斤力/米 ³	比 重
纯 水 (4℃)		0.00102	1000	1
海 水 (15℃)		0.00104~0.00105	1020~1030	1.02~1.03
矿 物 油 (20℃)		0.00092	900	0.9
水 银 (0℃)		0.0139	13600	13.6
空 气 (20℃)		0.0000012	1.2	0.0012

三、压缩性与膨胀性

流体具有一般物体所共有的物理特性。在压力与温度的影响下, 它的重度和密度要产生相应的变化。

液体在压力作用下, 容积缩小, 密度和重度增大。当压力变化范围不是特别大时, 液体的压缩可以认为是大致具有线性关系的弹性压缩。受压缩液体的容积变化关系可用下式表示:

$$V = V_0 - \Delta V = V_0 (1 - \beta \Delta p) \quad (1-4)$$

式中 V ——受压缩后液体的容积, 厘米³;

V_0 ——受压缩前液体的容积, 厘米³;

ΔV ——液体被压缩后容积的变化值, 厘米³;

β ——压缩系数, 相当于单位压力变化时液体容积的相对变化值, 厘米²/公斤力;

Δp ——压力的变化值, 公斤力/厘米²。

一般液体的可压缩性很小, β 值约为 6×10^{-5} 厘米²/公斤力, 可以忽略。但是在研究液

压冲击, 振动, 动态特性, 以及远距离液压操纵机构时必需考虑液体的可压缩性。

β 值的倒数, 称为弹性模数, 以 E 表示。

$$E = \frac{1}{\beta}$$

对于水 $E = 21000$ 公斤力/厘米²

矿物油 $E = 16000$ 公斤力/厘米²

液体受温度变化的影响, 一般温度增加, 体积增大, 从而密度和重度减少。这就是液体

的膨胀性。它可用公式表示如下：

$$V_t = V_0(1 + \beta_t \Delta t) \quad (1-5)$$

式中 V_t ——温升后液体的容积，厘米³；

V_0 ——温升前液体的容积，厘米³；

β_t ——膨胀系数，相当于增加一单位温度时，液体容积的相对变化量，1/°C；

Δt ——温度变化值，°C。

对于矿物油，一般可取 $\beta_t = 8 \sim 9 \times 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ；

对于水 $\beta_t = 7 \times 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ 。

在较大的油液容器或油缸中，液体的膨胀性在温度变化范围较大的情况下可能产生严重的影响，甚至引起缸裂。应当注意并采取必要的措施。

空气是可压缩性和膨胀性较大的流体。它的密度和重度随压力和温度变化的关系，可用下式表示：

$$\rho = 0.125 \frac{p}{760} \frac{273 + 15}{273 + t} \frac{\text{公斤力} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4} \quad (1-6)$$

式中 p ——空气压力，毫米水银柱；

t ——空气的温度，°C。

当温度为 0°C，压力为 760 毫米水银柱时，空气的密度 $\rho = 0.132$ 公斤力·秒²/米⁴；这时，空气的重度 $\gamma = \rho g = 1.29$ 公斤力/米³。

四、热容量、比热、导热系数

在液压传动中不正常的温度升高往往是机器故障出现的象征。温升是与物体所含热量的多少，质量大小，以及物体本身的物理性质，如热容量、比热、导热系数等有关。流体受外界温度的影响，或者自己在运动工作过程中，由于分子间的摩擦，能量的变换，使流体产生热量与温度的变化。另一方面，又受流体的循环、散热条件、油箱容积等影响。

1 克质量的水从 14.5°C 加热到 15.5°C 所需的热量称为卡。1 公斤质量的水从 14.5°C 加热到 15.5°C 所需的热量称为千卡。卡与千卡是工程上常用的热量单位。

热量是能量的一种表现形式，它可以转化为功。根据实验，热功当量有如下关系式：

$$1 \text{ 卡} = 4.187 \text{ 焦耳}$$

$$1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 牛顿} \times 1 \text{ 米} = 1 \text{ 公斤米}^2/\text{秒}^2 = 10^7 \text{ 尔格}$$

$$1 \text{ 焦耳} = 0.239 \text{ 卡}$$

热容量是物体温度升高或减低 1°C 时所吸收或放出的热量。热容量经常用符号 q 表示。

热量用 H 表示，它与热容量 q 、温度 Δt 的关系，可用下式表示：

$$H = q \Delta t \quad (1-7)$$

物体的热容量是与质量成正比的，即

$$q = cm \quad (1-8)$$

式中 c ——比热容量，简称比热。物理意义是一单位质量物体温度升高或降低 1°C 时所吸收或放出的热量；

m——流体的质量。

水的比热 $c = 1 \text{卡/克} \cdot ^\circ\text{C} = 1 \text{千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C}$

矿物油的比热 $c = 0.4 \sim 0.5 \text{卡/克} \cdot ^\circ\text{C} = 0.4 \sim 0.5 \text{千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

将上两式合并，可写成：

$$H = cm\Delta t \quad (1-9)$$

导热系数是表示流体传导热量能力的大小，用符号 λ 表示。

水的导热系数 $\lambda = 0.47 \sim 0.5 \text{千卡/米} \cdot \text{小时} \cdot ^\circ\text{C}$

油的导热系数 $\lambda = 0.1 \sim 0.16 \text{千卡/米} \cdot \text{小时} \cdot ^\circ\text{C}$

空气的导热系数 $\lambda = 0.021 \sim 0.074 \text{千卡/米} \cdot \text{小时} \cdot ^\circ\text{C}$

五、液体的粘度

流体运动时具有粘滞性是流体重要特性，它是由于流体流动时各层分子间产生的内摩擦力或切应力所引起的。液体粘滞性的大小常用粘度来表示。

粘度有下列几种：

1. 动力粘度

根据牛顿对液体内摩擦研究所得到的结论，液体运动时单位面积上的内摩擦力 τ ，与液体相对滑动的速度梯度 dv/dy 成正比，用公式表示：

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-10)$$

式中 μ ——动力粘度系数；

dy ——相邻油膜层的距离；

dv ——相邻油膜层的相对滑动速度、

$\frac{dv}{dy}$ 称为速度梯度。当速度梯度等于 1 时，单位面积上的内摩擦力 $\tau = \mu$ 。 μ 就称为动力

粘度。在 CGS 制中，动力粘度的单位是达因·秒/厘米²，称为泊 (poise)。泊的百分之一，称为厘泊。在工程制中，动力粘度的单位为：公斤力·秒/米²。

1 公斤力·秒/米² $\approx 10^4$ 厘泊

2. 运动粘度

液体的动力粘度与它的密度之比值称为运动粘度，用 ν 表示：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{厘米}^2/\text{秒}) \quad (1-11)$$

在 CGS 制中，运动粘度的单位为厘米²/秒，称为沱，沱的百分之一称为厘沱。

动力粘度和运动粘度都是较难直接测量的，一般在理论计算时用到。

3. 相对粘度

在一般实用工业范围，通常用相对粘度来表示粘度的大小。最常用的是恩氏粘度。它是利用恩氏粘度计来测定的。某一种液体在某一定温度下，从 $\phi 2.8$ 毫米短管流出 200 毫升所需要的时间 t_1 ，与蒸馏水在 20 $^\circ\text{C}$ 流出相同体积所需要的时间 t_2 的比值，称为恩氏粘度，用符号 $^\circ\text{E}$ 表示。

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

温度 t 时的恩氏粘度, 用 $^{\circ}E_t$ 表示, 例如常用的 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 、 $^{\circ}E_{100}$ 等。

国际上经常使用的相对粘度, 还有美国的国际赛氏秒用 "S 或 SSU 表示, 商用雷氏秒, 用 "R 或 Re.1# 表示。它们都是运用恩氏粘度相同的方法测量出来的, 只是仪器的形状不同而已。

我国主要采用运动粘度, 它与其他粘度单位的换算关系如下:

$$v(\text{厘沲}) = 7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E} \quad (1-12)$$

$$v(\text{厘沲}) = 0.22''S - \frac{180}{''S} \quad (1-13)$$

$$v(\text{厘沲}) = 0.26''R - \frac{172}{''R} \quad (1-14)$$

油液的粘度随着温度和压力的变化而变化。一般温度升高, 油液粘度就降低; 反之, 温度降低, 粘度就升高。在压力的影响下, 粘度也有变化, 但如压力不太高时, 一般可以忽略不计。在 $0 \sim 500$ 公斤力/厘米² 变化时, 矿物油受压力影响而粘度变化的关系可以当作线性关系计算, 计算公式如下:

$$v_p = v_0(1 + 0.003p) \quad (1-15)$$

式中 v_p 、 v_0 分别表示在压力为 p 和零时的运动粘度; p 表示油液所受到的压力。

当压力更高时, 油液粘度和压力的关系将是非线性增加, 当 $p = 1500$ 公斤力/厘米² 时, 矿物油的粘度增加将近 17 倍。

§ 1—2 静止液体的特性

一、两个基本特性

假设在一个盛水容器的不同高度处, 各开一个小孔, 就可以看到这样的现象: 水从小孔中射出, 在靠近器壁处, 水流方向与器壁垂直, 后因受重力作用影响, 成抛物线下降。同时可以看到, 下面小孔射出水的射程比上面小孔水的射程要远。如图 1—1 所示。

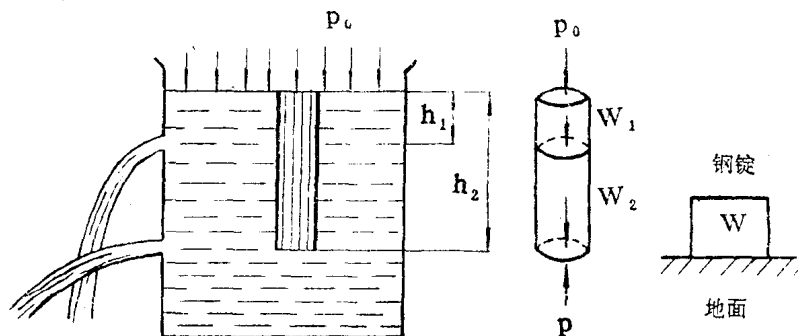


图 1—1 静止液体的压力

水从小孔射出,说明它内部有压力作用,由于取消了器壁的阻挡就向外流出来。静止液体压力的形成与一块重 W 的钢锭或其他重物放在地面上对地面产生压力的道理一样。在液体的自由表面上作用着大气压力 p_0 ,在水深 h_1 处,除了 p_0 外,还有单位面积 ΔF 上水柱高度为 h_1 的水的重量 w_1 也作用在上面;在水深 h_2 处,则还要加上水柱重量 w_2 。因此静止水中的压力强度随水的深度成线性规律增加。用公式表示,在液面下深度为 h 处的压强为 p 。

$$p = p_0 + \frac{\Delta W}{\Delta F} = p_0 + \gamma h \quad \text{公斤力/厘米}^2 \quad (1-16)$$

$$\Delta W = \Delta F \cdot h \cdot \gamma \quad \text{公斤力} \quad (1-17)$$

式中的 ΔW 表示水深 h 处,单位面积 ΔF 上作用的水柱的重量, γ 为液体的重度公斤力/厘米³。

下面小孔的水流比上面小孔水流射程远的原因,就在于它的压力强度比上面小孔处水的压力强度大。公式(1-16)是水静力学中一个重要的方程式。

静止液体有两个基本特性:

1. 静止液体压力的方向总是与被作用面相垂直。
2. 在静止液体中,任意点上各方向的压力强度均相等。

第一个基本特性,从图1-1所见到的现象,水流在器壁处总是与它相垂直的可以证明。无论容器的形状如何都是如此。在液体内部液体压力也总是垂直于被作用面的。它可以这样来解释,若不垂直于被作用面,则势必产生一个切向分力,而液体是不能承受切向力的,因此就要引起平衡的破坏,液体就要流动,就不能保持为静止液体了。

这个特性具有很大的实用意义,例如在计算船舶压载水舱所需要的钢板厚度时,就要分析承载力的大小和方向。如图1-2a)所示。由公式(1-16)可知,压力 p 的大小是随着深度 h 而成线性增加,底面上压力最大。压力的作用方向是垂直于壁面的,因此侧斜板上的受压情况应如图所示。又如在圆筒形容器中充满有压流体时,它的作用力的方向,如图1-2b)所示,垂直于筒壁。

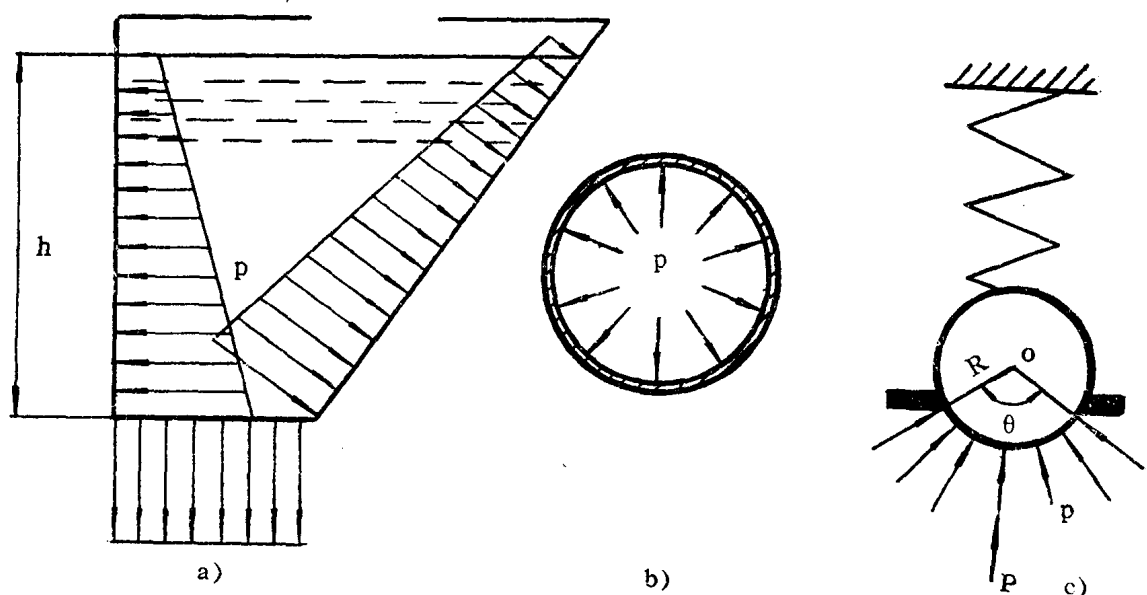


图1-2 静止液体压力对器壁的作用

图 1-2c) 表示一个简单的钢球阀门。上面靠弹簧作用力压紧, 下面液体的压力为 p , 对钢球的作用力方向垂直于球表面, 并通过钢球中心。当计算向上推开钢球的总力时应该考虑到方向, 总力 P 等于液压 p 与钢球上承压面积在水平面上投影的面积之乘积。承压面积在水平面上投影面积为一个圆面积, 等于 $\pi R^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}$, 所以总力 P 为:

$$P = p \pi R^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1-18)$$

第二个基本特性可用直观现象来说明一下。若在盛水容器的同一深度处, 容器四周任意方向上开若干个小孔, 每个小孔射出的水流射程是完全相同的, 这说明在任意方向上它的压力强度相等。假使在静止液体中, 取任意小的一块液体, 它的左右上下的压强必须相等, 才能维持平衡, 否则就会破坏静止状态而产生流动。

二、压强的测量

1. 绝对压力和计示压力(或表压力)

若在一容器中盛有液体, 液面上压力为大气压力 p_0 , 液面下深度 h 处的压力为 p , $p = p_0 + \gamma h$, 此 p 值称为液体的绝对压力。绝对压力是以绝对真空为基准算起的压力值, 绝对真空时压力等于零。

若如图 1-3 所示, 在一密闭容器中, 液面上压力为 p , 在液面下 a 点处的绝对压力为 p_a , 外面接一玻璃管来测量点 a 处的压力, 得到液柱高度为 h 。则 a 点处的压力可以用液柱高度 h 来表示, 也可以用 $p_{\text{示}} = \gamma h$ 表示, $p_{\text{示}}$ 称为计示压力。

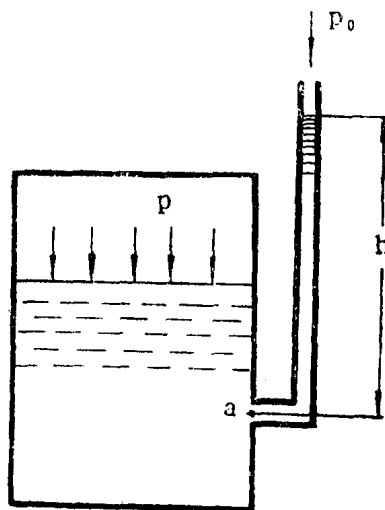


图 1-3 计示压力

计示压力和绝对压力的差别在于计示压力是以一个大气压力为基准算起的压力值, 一个大气压力时, 计示压力为零。两者的关系为:

$$p_{\text{示}} = p_{\text{绝}} - p_0 \quad (1-19)$$

式中 p_0 相当于一个大气压力。

用液柱高度表示计示压力时, 与采用的液体重度 γ 有关。如果液体为水, 它的重度 $\gamma = 10^{-3}$ 公斤力/厘米³, 所以 1 公斤/厘米² 的压力(一个工程大气压力)相当于 10 米水柱高度; 如果液体为水银, 它的重度 $\gamma = 1.36 \times 10^{-2}$ 公斤力/厘米³, 则 1 公斤力/厘米² 相当于 736 毫米水银柱的高度。这玻璃细管称为测压管。采用计示压力较为方便, 因为测量一般均在一个大气压的外界条件下测量, 只需要从测压管直接读数就可以了。

一个物理大气压为 1.0333 公斤力/厘米²。相当于 760 毫米水银柱高度。

当容器中压力 p 小于大气压力时, 绝对压力减去大气压力后为负值。此时, 真空计示压力也可以用测量管测量, 用液柱高度表示。它的方法如图 1-4 所示。绝对压力 p 加上 $h_{\text{真空}} \gamma$ 才等于大气压 p_0 。

$$h_{\text{真空}} = \frac{p_0 - p}{\gamma} \quad (1-20)$$

$h_{\text{真空}}$ 称为真空度, 以毫米水柱或毫米水银柱表示。真空度越高, 则绝对压力值越低。

2. 压力的测量

一般常用的测压计有两种: 液体压力计和金属压力计。

液体压力计 最常见的U型管测压计就是一种液体式测量压力的工具。在U型管内盛着重度较大的液体, 例如水银。U型管一般是利用玻璃弯制而成的, 一端开口与大气相通, 另一端与测压点相连接。若在U型管中出现图 1-5a) 所示的情况, 则与测压点连接的被测容器内的计示压力 p_a 为:

$$p_a = h_2 \gamma_2 - h_1 \gamma_1 \quad (1-21)$$

式中 h_2 ——U型管中两端水银柱液面的高度差;

h_1 ——由测压点到一端水银柱液面的被测流体的高度;

γ_2 ——水银的重度;

γ_1 ——被测流体的重度。

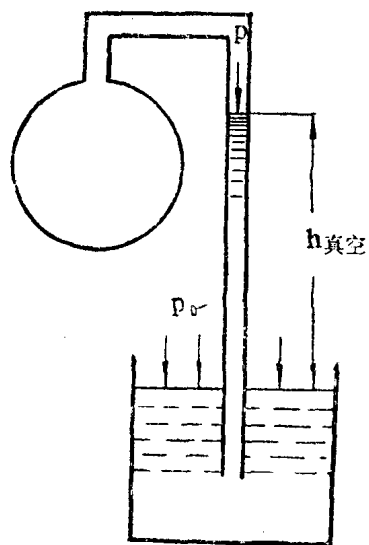


图 1-4 真空计示压力

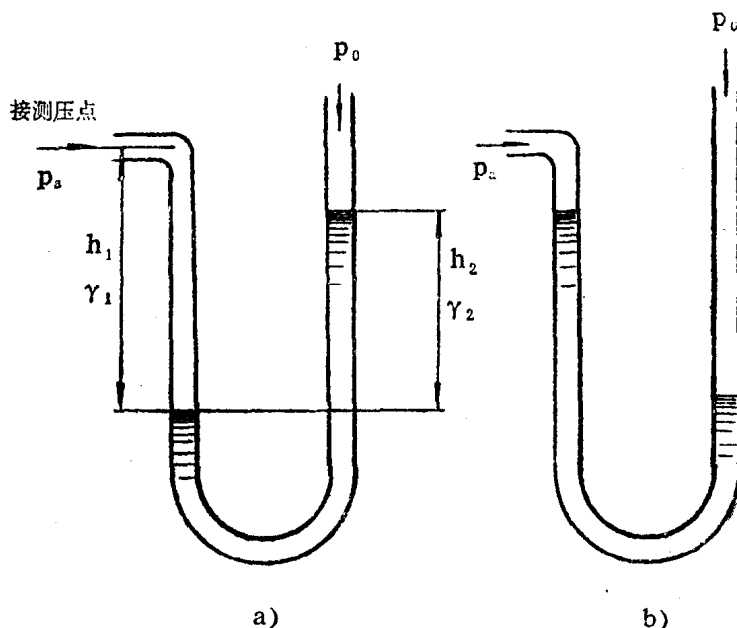


图 1-5 U型管压力计

有时 $\gamma_1 \ll \gamma_2$, 例如空气的重度为水银重度的 $\frac{1}{10,000}$, 可以忽略不计, 则上式 (1-21)

可改写为:

$$p_a = h_2 \gamma_2 \quad (1-22)$$

用U型管也可以测量真空度, 方法与上面讲过的一样, 但是它出现如图 1-5b) 所示的情况。接测压点一端的水银柱高于另一端。因此, 两端的平衡关系式为:

$$p_a + h_2 \gamma_2 = p_0 \quad (1-23)$$

$$p_a = p_0 - h_2 \gamma_2 \quad (1-24)$$

h_2 越大, 真空度越大, 真空压力越小。

液体压力计广泛地应用于压强较小的情况。

金属压力计 最常见的为一般压力表, 它的工作原理如图 1—6 所示。利用弹性环形金属管作为测压元件。随着管内压强大小的变化, 弹性管作相应的伸缩变形。带动联动杆去转动齿弧, 从而使指针转动。指针在刻度盘上指示出压力数值。这种压力表可以测量较大的压强。一般压力表接头与大气相通时, 指针指零值。因此压力表指针所指示的压力为计示压力, 或称表压力。用于测量低于大气压的压力表, 称为真空表。有时压力表可兼测真空度, 在刻度盘上正压强都采用公斤力/厘米²表示; 真空度用毫米水银柱表示。

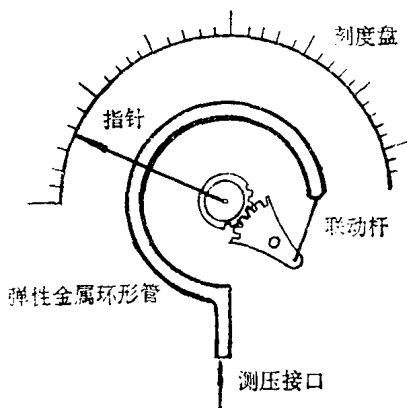


图 1—6 压力表原理

压力的单位, 我国采用“公斤力/厘米²”或 Kgf/cm² 表示。

国际上常见有用“磅/吋²”或“psi”表示。它们的换算关系为:

$$1000 \text{ 磅/吋}^2 = 70 \text{ 公斤力/厘米}^2$$

$$1 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 14.3 \text{ 磅/吋}^2$$

还有用“巴”或“bar”表示

$$1 \text{ 巴} = 1.02 \text{ 公斤力/厘米}^2$$

三、巴斯格定律及其应用

在密闭容器内的静止平衡液体, 其液面或任意一点的压力和压力变化, 可以不变地传给液体中的所有各点, 不论其密闭容器的形状如何。习惯上称上述流体静压力的传递规律为巴斯格定律。例如,

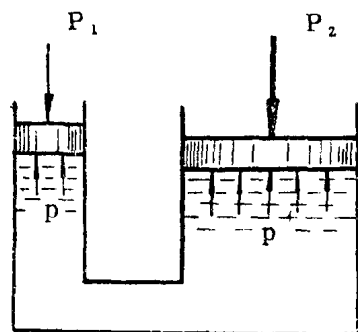


图 1—7 静压力的传递规律

如图 1—7 所示, 在两个互相连通的充满油液的密封油缸中, 上部装有大小两个活塞, 小活塞面积为 f_1 , 大活塞面积为 f_2 。假使在小活塞上作用一个力 P_1 , 它就使活塞下油液产生一个反作用压力 p 来使之平衡, 因此油压 p 应该等于 P_1/f_1 。根据巴斯格定律, 这个油压力 p 可以不变地传给液体中的所有各点, 也就是说, 在大活塞的下面也作用着相同的油压 p 。由于大活塞的面积 f_2 较大, 因此在大活塞上面的平衡力 $P_2 = pf_2$ 也较大。 P_1 和

P_2 的关系可以根据压力 p 相等的条件求出来, 即:

$$\frac{P_1}{f_1} = \frac{P_2}{f_2}; \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad (1-25)$$

或

$$P_2 = P_1 \frac{f_2}{f_1} \quad (1-26)$$

由公式可知， P_1 和 P_2 之比，即为其活塞面积之比。这个原理广泛地利用于机械工程，用以产生巨大的拉力或推力。如千斤顶，水压机等。在小活塞处施加较小的力，就可以在大活塞处抬起较重的物体。

在轮机拆装检修时，经常遇到需要很大的拉力或推力来进行工作的情况。例如主机贯穿螺栓是将气缸体、机架和机座紧固在一起的重要零件。为了防止气缸工作时，强大的爆发压力将气缸体、机架、机座分离，保证机器工作时各连接部件的紧密性，贯穿螺栓必需要有很大的预紧力。采用专用的液压拆装工具可以较为方便和准确地达到这个要求。图 1—8 为液压拆装工具的工作原理图。液压拆装工具的活塞具有内螺纹，首先将它拧到贯穿螺栓上，使缸套的下端面顶住在垫块上，此时贯穿螺栓没有预紧力。将截止阀关闭，上下摇动手柄使油液通过钢球阀 1 吸入到直径为 d 的小柱塞腔内，然后通过钢球阀 2 将油液压入到活塞与缸套构

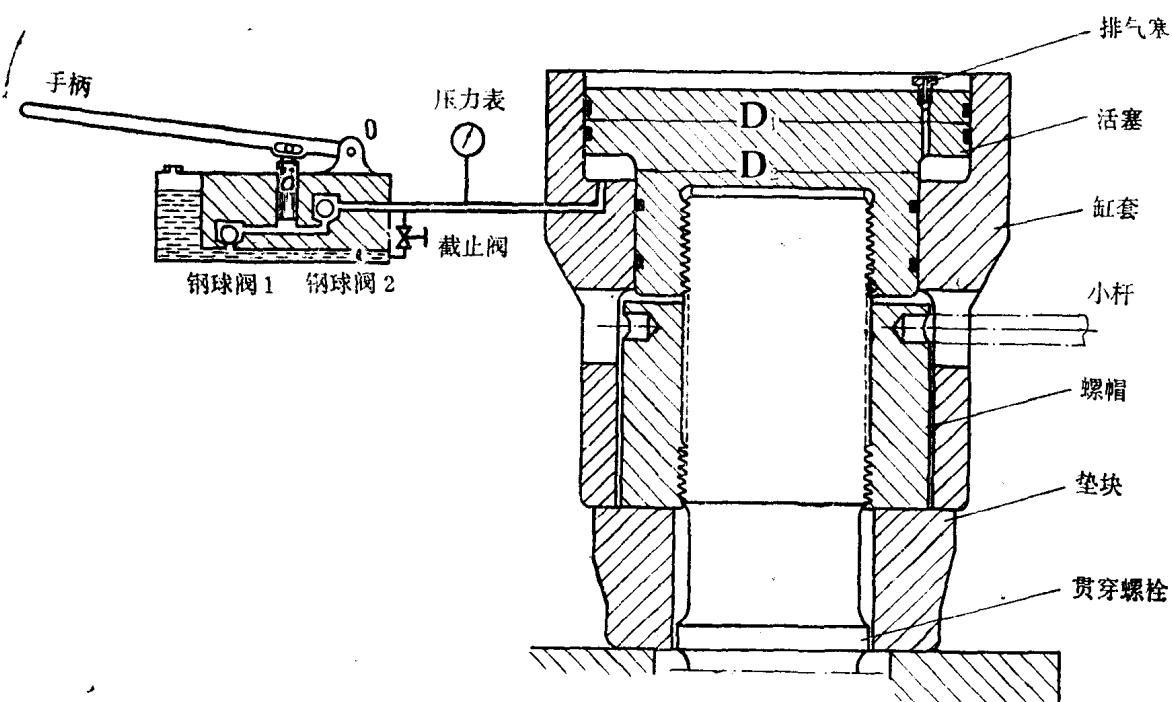


图 1—8 液 压 拆 装 工 具

成的空腔中去。假使中间有空气，拧开排气塞将空气放出，空气放完后将排气塞拧紧。这样在小柱塞与活塞之间形成了一个密闭的空间。根据巴斯格定律，小柱塞 d 下面所形成的油压 p ，将不变地传递到大活塞下面，由于大活塞下的面积为 $\pi(D_1^2 - D_2^2)/4$ ，它大大地超过柱塞下的面积 $\pi d^2/4$ 。因此当手柄上用不大的力摇动时，在大活塞上就能产生巨大的作用力，由于缸套下端顶住在垫块上，大活塞上的作用力就通过螺纹使贯穿螺栓拉长。然后用小杆插入螺帽的小孔，将螺帽旋紧碰到垫块为止，这样就使贯穿螺钉产生预紧力。预紧力的大小可以通过油压表上的压力反映出来，达到要求的预紧力后，就可以打开截止阀，卸除油压，将工具从贯穿螺栓上拧下。

流体静压传递规律实用的另一个典型例子是压力表校验器。它的工作原理示于图 1—9。在平台上装有一个加压油缸，它是利用手柄转动丝杠，推动活塞向前进行加压作用的。加压油缸出油管路分别通向储油杯，标准压力表，受检压力表，砝码盘四个地方。每个地方都有

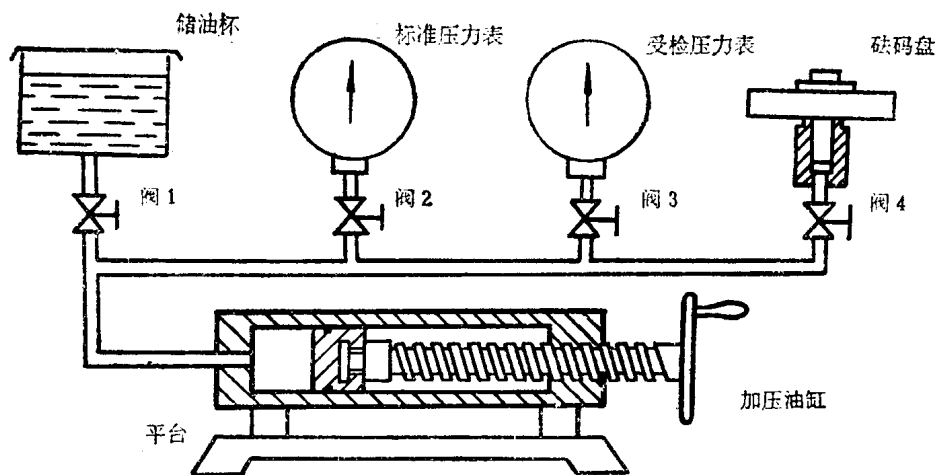


图 1—9 压力表校验器工作原理

一个截止阀控制油路的连通或截断。一般有三种使用工况：

1. 阀 1 打开，阀 2、阀 3、阀 4 截断。转动丝杠，活塞左右移动。这是检验压力表前的准备工作。油缸由储油杯中吸入油液，将油缸、管道中的空气排出，使之充满油液。

2. 阀 1、阀 4 截断，阀 2、阀 3 打开。转动加压油缸丝杠，使活塞向左移动。在标准压力表、受检压力表，加压油缸构成的密封容积中，任意一点的压力和压力变化是相同的。因此受检压力表的精确程度，通过与标准压力表的对比就能看出来了。

3. 阀 1、阀 2 截断，阀 3、阀 4 打开。转动丝杠使密封容积加压，用砝码盘上的砝码重量来校验受检压力表的精确度。或者阀 1、阀 3 截断，阀 2、阀 4 打开，利用砝码盘来校验标准压力表的精确度。

压力表是常用的测示仪表，经常容易发生故障或损坏。使用不正确压力表常会引起对机器工作的错误判断而造成不必要的损失，因此应该经常加以检验。压力表校验器是常用的工具，从基础理论上来了解，易于掌握和灵活运用。

§ 1—3 流动液体的基本特性

本节研究流体在流动状态时的规律。由于实际流动液体运动变化的情况比较复杂，分析研究时要作若干假定使问题简化。这里先假定：一、流体是理想流体，没有粘性，不可压缩的；二、流动是稳定流动，就是说流体在流动过程中任意一点的压力、速度和密度都不随时间而变化。反之，若其中任何一个参数随时间而变化就称为非稳定流动。

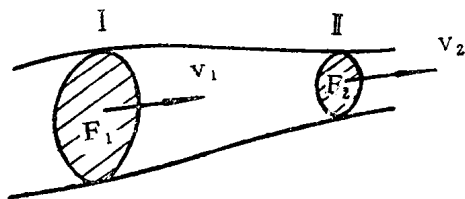


图 1—10 液流连续性

当理想流体沿任意形状的管道作稳定流动时，它流过不同截面的流体质量是相等的。在整个液流中不存在任何空隙，称为液流的连续性。例如图 1—10 所示。在任意形状管道中任意取两截面 I 和 II，它们的截面积分别为 F_1 和 F_2 ，通过该截面积的平均流速为 v_1 和 v_2 。由于理想流体是不可压缩的，两个截面处的液体密度 ρ 相同。

流过两截面处的液体流量相等。即：

$$\rho v_1 F_1 = \rho v_2 F_2 = \text{常数} \quad (1-27)$$

这就是液流的连续性方程式。

消去 ρ ，换算后，可得：

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{F_2}{F_1} \quad (1-28)$$

公式(1-28)表明，液体速度与其截面积的大小成反比。管子细处，流速大；管子粗处，流速小。

一、伯努利方程式及其应用

伯努利方程式是流体力学中极为重要的一个基本公式。在分析液流现象和解决工程实际问题时，得到广泛的应用。

假定理想流体在任意几何形状的管道中，作稳定连续流动。如图 1—11 所示，在任意截面上取一个极小的容积 ΔV ，包含质量为 m 的流体。它在流动过程中存在着三种能量形式。对照图 1—10 当容积 ΔV 液体处在截面 I 处，容积 ΔV 的液体中心位置处于高度 h_1 ，流过截面 I 处的平均流速为 v_1 ，压力为 p_1 的状态；当此容积 ΔV 液体流动到截面 II 处时，它的中心位置高度变为 h_2 ，流过截面 II 的平均流速变为 v_2 ，压力为 p_2 状态。

一个质量为 m 的物体，处在某个位置高度 h ，它就具有位置势能为 mgh ，简称位能。 g 为重力加速度。因此容积 ΔV 液流从截面 I 处流到截面 II 处，它的位能发生了变化，由 mgh_1 增加到 mgh_2 。

一个运动物体，质量为 m 。若它的运动速度为 v ，它就具有运动势能为 $\frac{1}{2}mv^2$ ，简称动能。质量 m 的液流从截面 I 处，流动到截面 II 处时，由于截面积的缩小，为了保持液流的连续， v_2 相应增大。因此动能由 $\frac{1}{2}mv_1^2$ 增加到 $\frac{1}{2}mv_2^2$ 。

容积 ΔV 的液体，处于压力 p 的作用下，它具有的压能为 $p\Delta V$ 。液流从截面 I 处流动到截面 II 处，压能的变化由 $p_1\Delta V$ 变为 $p_2\Delta V$ 。

由于假设条件为理想流体，稳定连续流动，没有粘滞摩擦阻力及其他外力作用，也没有任何能量的输入和输出。根据能量不灭原则，容积为 ΔV ，质量为 m 的液体在流动过程中，总的能量的变化应该是零。即：

$$(mgh_1 - mgh_2) + \left(\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 \right) + (p_1\Delta V - p_2\Delta V) = 0 \quad (1-29)$$

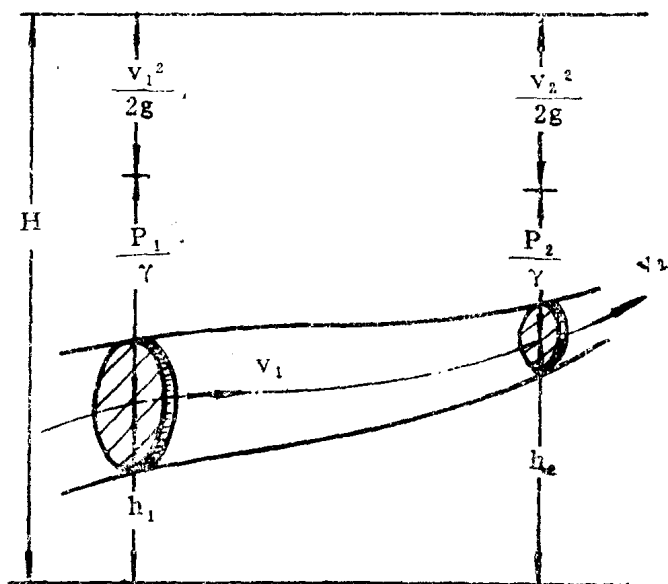


图 1—11 理想流体的能量形成