



高中物理教学参考读物

流体力学

中国物理学会上海分会
中学物理教学研究委员会编

上海教育出版社

前 言

为了适应当前中学物理教学的需要，帮助教师更好地掌握教材，本会决定按照“中学物理教学大纲”（修订草案）和高中物理新教材编写一套“高中物理教学参考读物”，共计十四册。本书是其中的第六册，分“流体静力学”和“流体动力学”两章。全书的内容相当于高二教材的第三章。

在“流体静力学”里，着重地阐明了流体静压强产生的原因和传递的特征，并就压强差说明浮力的存在。在“流体动力学”里，为了便于读者更好地理解现象的本质，介绍了伯努利定律。在课堂教学中，教师仍应根据课本进行教学，本书内容只供参考，决不能用来代替课本上的教材。

为了减少教师们在提问和考查命题方面可能感到的困难和麻烦，我们拟了一些参考题。

本书根据编委会拟就的提纲，由俞大年、杨逢挺、束世杰三位同志负责编写，限于编者的教学经验和业务水平，难免有很多不恰当的地方，请读者随时指正，以便在再版时修正和改进。

中国物理学会上海分会
中学物理教学研究委员会

1957年5月

目 录

引言	1
第一章 流体静力学	3
(一) 流体的压强	3
1. 液体内部压强的产生	4
2. 液体内部压强的计算	7
3. 液体内部压强的传递	12
4. 液体的表面	14
5. 大气压强的存在	19
6. 托里拆利实验	20
7. 封闭气体的压强	23
8. 压强计	25
9. 抽机和虹吸管	28
(二) 流体的浮力	34
1. 浸在液体里的物体所受的浮力	34
2. 阿基米德定律	35
3. 物体的浮沉	40
4. 应用阿基米德定律求物体的比重	44
5. 气体的阿基米德定律	47
第二章 流体动力学	51
(一) 流体的流动	51
1. 液体的稳流和流綫	52
2. 理想液体的連續原理	55
3. 流动流体压强的量度	56

4. 流动流体的压强和速度的关系——柏努利定律	57
5. 柏努利定律的应用	61
(二) 物体在流体中的运动	67
1. 物体在理想流体中的运动	68
2. 物体在实际流体中运动的阻力	68
3. 手球是怎样走曲线的	70
4. 飞机的举力	71
5. 物体在流体中的下落	72
(三) 流体能量的利用——水力发动机	73
1. 冲击式水轮机	74
2. 反击式水轮机	75
附录一 复习提问参考题	77
附录二 计算题和论证推导题	80

引 言

在前面的物理学习中，我們已經研究了物体运动的情况、力和运动的关系以及功和能的关系，我們也簡單地提到过物体在受力以后会产生形状和体积的变化。但以往所談的大多是属于固体的范围。現在我們要研究流体力学，有必要先对流体的性質加以說明。

流体包括液体和气体。它們和固体一样，都具有重量，但又都具有一种固体所沒有的性質，叫做**流动性**。如果我們把很小的力作用在液体表面上，只要这个力沿着液面的分力不等于零，液体表面上受力的部分立即开始滑动。例如：在水盆中的水面上吹气，水面就会发生皺紋；在不平的桌面上倒很少的水，水在重力沿着桌面的微小分力的作用下，就向低处流动；烟囱或是火爐里出来的烟，受着微风就能飄蕩。这些都是流动性的表現，流体也正是因此而得名的。流体和固体的主要不同之处，就在于对外形的改变沒有抵抗，也就是說沒有一定的形状。把它們裝在什么形状的容器里，它們就呈現什么形状。由于流动性的关系，**静止流体和容器壁之間的作用力总和接触面垂直**，因为只有当器壁对液体的作用力沿接触面方向的分力等于零时，液体才会平衡，依作用力和反作用力的大小相等、方向相反的关系，可知液体对器壁的作用力也必須垂直于液和壁的接触面。

从液体和气体之間来看，它們在可压缩性方面，存在着很大的差别。气体是很容易压缩的，當我們对气体稍加一点压力时，它的体积就有很显著的縮小；压力愈大縮小愈厉害。倘使减小气

体的压力，它的体积就要脹大；压力愈小体积愈大。液体就不同了，它的体积虽然也随着外加压力的变化而有伸縮，但是它的伸縮实在是太小了，小到我們不容易觉察的程度。在3000大气压范围内，每增加1大气压，一般液体，只能縮小原有体积的十万分之三。这样小的变化，在实际应用中可以忽略不計，所以課本里面提出了“液体差不多不能压缩”。这样的說法基本上是正确的。气体的体积要看所受压力的大小来决定，液体的体积差不多不受压力大小的影响，所以我們認為液体具有一定的体积，气体没有一个固定不变的体积。在容器里可以只盛半容器的水，就不能只放半容器的气体。气体要充滿整个容器的，如果没有容器壁的限制，或者說没有外力加在一定質量的气体上，它的膨脹将会没有止境。因此我們就可以說明为什么液体有自由表面，而气体没有自由表面。

弄清楚流体的共同特性和液体与气体之間的不同性質，对流体力学中各种現象的进一步分析和研究是很有帮助的。所以在进行流体力学的教学时，也应当以此为起点。

在今后的許多討論里，由于液体和气体的共同性，許多現象的发生，都依着相同的規律，我們常以液体为代表来进行探討，免得重复。至于另外一些依着不同規律发生的現象，分別在以后各本小册子里再来討論。

第一章 流体静力学

(一) 流体的压强

在以前的力学学习中，曾經討論到物体受到外力后要产生加速度。在闡明力和加速度之間的关系时，我們只要求知道物体所受外力的大小和方向，并認為力的作用都集中在一点上，而不考虑到受力面积的大小如何。这是因为物体受力面积的大小，对它的运动变化沒有关系。流体既具有流动性，就和压缩它的容器壁形成密切接触，因此流体和器壁之間的相互作用，也必須是分布在整個接触面上，而不是集中在某些点。当我们研究流体受力而产生的一切力学的现象，尤其是关于流体的傳力作用时，我們必須弄清力在作用面上的分布情况，也就是要弄清压强这一概念。

压强是說明作用在流体表面單位面积上沿垂直方向的力的大小的物理量。它是由一个面上所受的垂直总力和受力面积的比值来决定的。如果用 F 来表示面上的总压力， S 代表受力的面积， p 代表压强的大小，那末

$$p = \frac{F}{S} \text{ 达因/厘米}^2 \text{ (巴), 或克重/厘米}^2 \text{。}$$

如果液体表面上所受的力是均匀分布的，那末每个單位面积所受的力就相等，用上面公式所求得的压强可以代表面上任何部分的压强。如果力的分布并不均匀，那末面上各部分的压强就不相等，上式求得的结果只是这个面上各部分压强的平均值。

它可能与面上某几部分的压强值恰好相等，但它并不代表面上每一部分的压强。这一概念在后面的压强计算中是很重要的，应该把它弄清楚。

在实际问题的讨论中，我们还可能提到“某一点的压强是多少”这样一句话。如果单从字面上来理解，就会联想到点是只有位置而没有面积的，既没有面积就无法计算压强的大小。我们应该利用理解即时速度的方法来理解它，即某一点的压强就是以这点为中心，在它周围一块极小面积上的平均压强值。

1. 液体内部压强的产生 液体和与它接触着的容器壁之间，有着压强存在，是很容易理解的，在日常生活中有着很多的体验。用手指按着已打开了的自来水龙头，手指上会感到压力；在玻璃筒下面口上扎一块橡皮膜做底，向筒里灌水，橡皮膜被压就向下凸出。这都说明了液体对和它接触着的物体表面有压强存在。

在液体的内部是不是也有压强存在呢？我们通过了用膜片压强计的实验（课本第 37 图），能够看到液体内部确实也有压强存在。不但如此，从同一个实验还可以证明：液体内部的压强，在上下左右前后各个方向都有；在同一深度下，沿各个方向的压强大小相等；在不同的深度，压强的大小也不同；在液面下愈深，压强也愈大。这几点都是液体内部压强的特性，也可以算是规律。只要膜片压强计足够精确并且相当的大，虽在课堂里的远处看，也能从直观中接受这一事实。

不过要说明液体内部的压强是怎样产生的和在同一深度的压强为什么相等，上面的实验并不解决问题，这是需要进一步分析和推论的。我们每一个人都知道液体本身有重量，也能够意识到从重量会产生压强，但究竟怎样从重量产生压强呢？用课本里图 38 进行分析时，最好和固体受力的情况对比说明。把一个正

方柱形的物体放在水平桌面上,(图 1 左图)这个物体受到两个外力,一个是重力 mg 坚直向下,另一个是桌面向上的托力 P 。因为物体处在平衡状态,所以柱底所受的托力 P 和柱的重量 mg 相等相反。根据牛顿第三定律,我们知道柱底对桌面也应该有压力,大小等于 P ,方向坚直向下。这个压力是由于柱体受到重力要向下运动,挤压桌面而产生的。在液体里我们也可以用相同的方法来研究。假定在静止的水里,从水面起划出一个正方直柱体,高度为 h 厘米,上下底的面积为 S 厘米²。把它当作固体来研究它受力的情况(这种方法叫做刚化法,是 300 年前丹麦物理学家司忒藩提出的),我们可以得出相同的结论,就是柱底对下面的水的压力等于水柱的重量 mg ,并且也是因为重力而产生的。根据压强公式可以求得柱底对下面水的压强为 mg/S ,下面水对柱底的压强也等于 mg/S 。

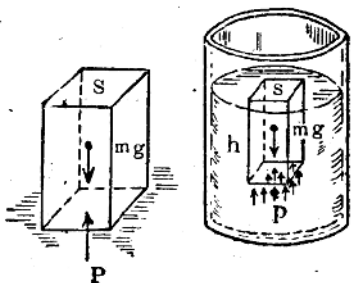


图 1

这就说明了液面下深度为 h 处的上下压强都是由重力而产生的。

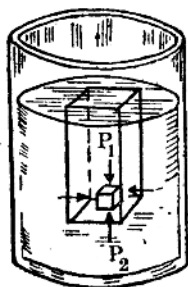


图 2

现在要问侧压强是怎样产生的? 在同一深度时为什么它和上下压强相等? 我们可以在上面所取的水柱底部划出很小的一块立方体来研究(图 2)。现在这块水既然很小,为了简化问题,我们可以不考虑它本身的重量,那末它顶面上所受的下压力 P_1 和底面上所受的上压力 P_2 就可以看作相

等。液体是具有流动性的，受到很小的作用力就要改变形状。它上下两面既受到一对相等压力的挤压，整体上虽不产生运动，但在水平方向就有了向外扩张的趋势。实际上这一块水的形状并未改变，因此它的侧面一定是受到外圍水的向内压力，阻止它扩张。同时它对外圍的水也有向外的压力。所以说因为有了上下压强才会产生侧面压强，当然侧面压强也和上下压强一样，是由液体的重量产生的。

在同一深度的侧压强和上下压强相等的原因，要根据液体产生压强的根本原因来说明，对中学生来谈不一定容易理解。但是在初中物理学中，液体力学的第一节就谈到了压强传递问题：加在密闭的液体或气体上的压强，能够照它原来的大小由液体和气体向各个方向传递。在图 2 里所划出的这一小块水，是被周围的水所密闭着的，加在它上面的上压强和下压强是有一定的大小的，那末这一块水向侧面各个方向所传出的压强当然也和它们的大小一样了。

从上面所谈的我们已理解了液体内部压强产生的原因和侧压强与上下压强的关系，但是为了更好地掌握压强的理论，我们还是从压强的本质来说明。

如果我们要想使一根弹簧缩短，我们就要对弹簧加上一个压力。只有加上了外力才能使弹簧缩短。不过外力并不能使弹簧无限制的缩短下去，因为弹簧在缩短的过程中，它的内部产生了阻碍缩短的弹性力。这个弹力随着弹簧的缩短程度而变化，当弹簧受到外力的时候，一面逐渐缩短，同时阻碍缩短的力也逐渐加大。等到弹簧缩到某一个长度，弹力和外力平衡，弹簧即不再缩短（请参看本会编的“功和能”第三章第五节）。流体受压时也和上面的情况相似，当我们对一块被包围着的流体，从各方面增加压强时，它的体积就要缩小（液体的缩小很少，但并不是没有缩

小),外加的压强愈大,体积的缩小愈大。因为流体的体积在缩小,内部就向外产生一个弹性压强和外加压强对抗,阻止压缩,当弹性压强和外加压强平衡时,才不继续缩小。因此,外力所产生的压强使流体压缩,流体因压缩而产生内部压强;愈被压缩,产生的压强就愈大。在液体表面下某一深度处的一块液体,因受到上面液体重量压力而缩小,因为被压缩,就对它四周的液体发出压强,又因为所产生的压强只和压缩的程度有关,所以各个方向的压强都相等。在水下愈深,所产生的压强也愈大。

2. 液体内部压强的计算 在液面下某一深度的压强怎样计算呢?我们可用前面的图1来研究。当液体的自由表面不和任何物体接触时,也就是液面上不受到外加的压力时,液柱底部对下面液体的总压力 P 和液柱的重量相等。如果液柱的高度为 h 厘米,底面积为 S 厘米²,它的体积是 Sh 厘米³。若液体的比重等于 d 克重/厘米³,它的重量有二种表示方法,一种是 dSh 克重,另一种是 $dShg$ 达因。因此压强

$$p = \frac{P}{S} = \frac{dSh}{S} \text{ 或 } \frac{dShg}{S};$$

消去 S ,得到

$$p = dh \text{ 克重/厘米}^2 \text{ 或 } p = dhg \text{ 达因/厘米}^2。$$

在公式的推导过程里,我们是根据了压强的基本公式来进行的,我们也假定了液面上并没有受到其他物体的作用力。所以这一个公式,我们不应该看成是求压强的一个普适公式,或者看成是压强的另一个定义式。它只是在一定的条件下,液体内部某一深度的压强公式,因此在课本第44页上特别强调提出“液体重量所引起的压强”。当我们在提出:在液体里某一深度处,液体重量所引起的压强等于液体的比重和深度的乘积时,不但要附带说明用绝对单位时是比重、深度和重力加速度的乘积,还应

該說明它在液面上不受任何外力作用的特殊情況下才成立。

上面的压强公式，是从液面下的水平面上所受的总压力来推导的，水平面上各点离开液面的深度 h 都相等，因此面上各部分的压强也相等，所以公式 $p = dh$ 或 dhg 在求水平面上任意一部分的压强时都适用。

如果这个面并不在水平方向而是和水平方向成一个任意角度，面上各点距离液面的深度就不相等，因而各部分的压强大小也不相同。在这种情况下，我們常要求出它的平均压强。平均压强怎样求呢？原则上还是用总压力和受力面积来求比值，不过在

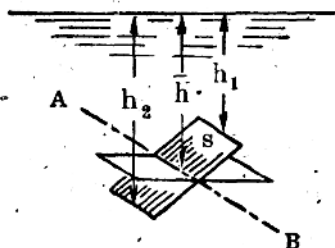


图 3

这样的一个傾斜面上，要想在求得平均压强以前，先知道总压力的大小，是不切合实际的。現在我們就来研究这个问题。

假定在液面下有一个任意方向的平面，它正好是矩形，上边和下边都和液面平行，如图 3 中的 S 。这时面上

从上边到下边各部分的压强大小是逐渐加大的，从上边到下边的寬窄又完全相同，所以整个面上的压强平均值就是上边和下边压强值的平均数。設上边距液面 h_1 厘米，下边距液面 h_2 厘米。沿上边各部分的压强， $p_1 = dh_1$ ，沿下边各部分的压强， $p_2 = dh_2$ 。

那末这个面上的平均压强

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{dh_1 + dh_2}{2} = d \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right).$$

因为 $(h_1 + h_2)/2$ 是这个面的平均深度，也就是等于这个面的中心点(重心)在液面下的深度，我們用 $\bar{h}$ 来代表它，上式可以

写成

$$\bar{p} = d\bar{h}, \text{ 或 } \bar{p} = d\bar{h}g.$$

这个公式不但适用于有规则几何图形的平面，从理论和实验都可证明它也适用于任意形状的平面，所以它是一个求液面下任意平面上平均压强的普适公式。由此可见，在液面下任意平面所受到的因液重所引起的压强平均值，等于液体比重和面的中心(重心)深度的乘积。

只要面的中心深度固定不变，平均压强的大小和面的形状无关，也和面的大小无关。当我们把这个面让它沿着穿过中心的水平轴线 AB 转动到水平方向的时候，面上各点的深度既相同，各部分的压强大小就完全相等。和前面所讲的 $p = dh$ 完全一致，决不因为面的大小而有改变。

在已经求得了某个面上的平均压强以后，我们就可以应用下面的公式来计算面上所受的总压力：

$$F = \bar{p} \cdot S.$$

现在让我们来看一下图 4 所说明的求器壁所受压强大小的

方法。从压强基本公式 $p = \frac{F}{S}$ ，知道当

S 为一个单位面积时，压强 p 就等于面上所受的总力 F 。课本里常常提到一个单位面积所受到的总力就是指这个面上所受的压强。图 4 A 处有一个单位面积，它所受的总力应该等于这

块面的中心深度乘液体的比重， $d\bar{h}$ 。在 B 处有一个单位面积放在水平方向，深度和 A 面的中心深度相同，也是 $\bar{h}$ ，这个面上所受的总力也等于 $d\bar{h}$ 。

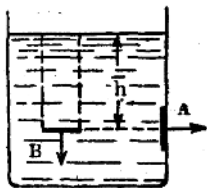


图 4

例 1. 在一个正方形的容器里，装满液体。求底面上压强

和側面上平均壓強的比，底面總壓力和側面總壓力的比。

解：設容器每邊長為 l ，則底面中心深度等於 l ，側面中心深度等於 $\frac{l}{2}$ ；

根據公式

$$\bar{p} = d\bar{h},$$

得

$$\frac{\text{底面壓強}}{\text{側面壓強}} = \frac{dl}{dl/2} = 2。$$

底面積等於 l^2 ，側面積等於 $4l^2$ ，

$$\frac{\text{底面總壓力}}{\text{側面總壓力}} = \frac{l^2 \cdot dl}{4l^2 \cdot dl/2} = \frac{1}{2}。$$

例2. 如图5所示，三个不同形狀的容器 A、B 和 C，底面積都等於 S ，各裝液體到相同的高度 h 。試比較它們底部所受

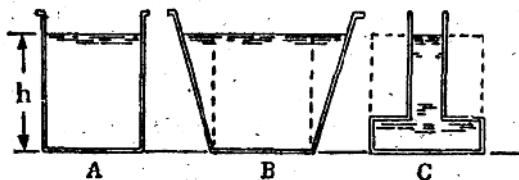


图5

的壓強、總壓力和所裝液體的重量。

解：因為容器 A、B 和 C 內的液體深度都等於 h ，三個容器底部的壓強都等於 dh ，所以 $p_A = p_B = p_C = dh$ ；三個容器底部的面積又都等於 S ，所以 $F_A = F_B = F_C = dhS$ 。

也就是說，三個容器底面受到的總壓力相等。

從外形上看 B 的容積大於 A，C 的容積小於 A，當液體的高度相同的時候，B 里面液體最重，C 里面液體最輕，即

$$P_B > P_A > P_C。$$

從這一個例題里，我們看到：不管容器的形狀怎樣，只要所

装的是同一种液体,深度相等,容器里的液体重量尽管不同,底面所受的压强总相等;只要底的面积也相等,那末液体对容器底面的总压力也必定相等。

这是一个千真万确的事实,但一般初学的人总觉得有些难以相信。为什么呢?主要是由于把总压力和重量这两个概念混为一谈了。重量 P 是器内液体所受的重力,它的大小等于 mg ,总压力是液体作用在器底上的力,它的大小等于 $p \cdot S$,它们本来是两个不同的概念。但因为 A 形的容器是常见的,它所盛的液体的重量又正好等于作用在底面上的总压力,又因为在证明液体内压强和研究压强产生原因时,都曾引用了液柱的重量,因此就把重量引起压强和总压力这一概念误认为液体重量等于总压力了。其次是对液体的流动性认识不足,把液体看成固体,忘记了液体对所有接触到的器壁都有力的相互作用,而误以为整个重量只有在底面上受到平衡。要说明这种想法的不正确,通过上面例题的分析还是不够。如有仪器设备,最好用实验先认清事实,然后再作进一步的解释。

我们可以在 B 容器的图上作两根竖直的虚线,把液体划分成底面上的直柱体和斜壁上的直角环。液体柱的重量所产生的压力加在底面上,与 A 容器完全相似。直角环状液体的重量所产生的压力与侧壁成垂直方向加在侧壁上,同时液柱和直角环的接触面上也有相互作用的压力。现在把它们分别用刚化法来研究。液柱部分(图 6 左图),重量 mg 与底的托力 F 平衡,因此作用在底面上的总压力也和液柱重

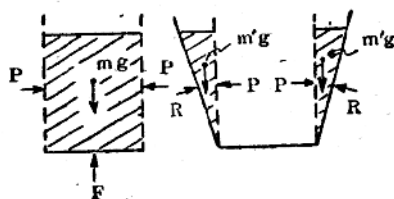


图 6

量相等,它小于容器里的液体重量。液环部分(图 6 右图),重量 $m'g$ 被斜壁的作用力 R 的豎直分力所平衡。或簡單一点說,直角环部分液体的重量作用在斜壁上,与底面无关。

在 C 容器的图上沿器壁和液面作三根虛綫(图 7)。假設从

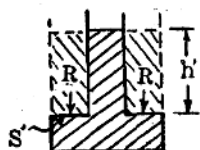


图 7

液面到肩部盒盖的高是 h' , 那末液体对盒盖的上压强等于 dh' 。如果盒盖周围的面积是 S' , 盒盖所受的向上的总压力等于 $dh'S'$, 盒盖对液体肩部的作用力(向下的) R 也等于 $dh'S'$, 正好等于肩部上方所缺少的一圈液体的重量。因此整个

底部所受的总压力等于以容器底为底的液柱的重量, 大于容器里液体重量。

3. 液体内部压强的传递 为了使我们对流体静力学的研究比較完整起見, 我们对流体传递压强, 也簡略的說明一下。

当我们把一个四角台形的鉄块放在桌上, 无论把大底放在下面, 或者把小底放在下面(图 8), 桌面上所受到的总压力都是



图 8

相等的, 都等于鉄块的重量。但由于接触面的大小不同, 它们所产生的压强就有显著的大小。所以我们說, 用固体传递压力, 力的大小和方向都不变, 但压强可以改变。

在一个截面等于 S 的圆柱体容器里, 装水到 h 厘米高, 再

在水面上加一个活塞(为了简化,当它没有重量)如图9。在活塞上作用一个力等于 F 克重,这时器底所受的压强

$$p = \frac{F + dhS}{S} = \frac{F}{S} + dh。$$

这里 F/S 等于外力 F 对液体所加的压强,用 p_0 来代表。因此

$$p = p_0 + dh。$$

用这一个方程式与由液体重量所引起的压强来比较,多出一个 p_0 部分,这正好等于外力对液体所加的压强。用同样道理可以证明,在液体内部任何地方及液体与器壁接触的任何地方,除受到因液体重量所引起的压强之外,都还多出一个 p_0 。这一个现象,由帕斯卡总结出一个定律:加在密闭的液体或气体上的压强,能够按照它原来的大小由液体或气体向各个方向传递。这里我们必须把外加压强 p_0 与由液体本身重量所引起的压强 dh 严格区分开,否则在应用中就要犯错误。

我们再来研究这样一个实验,把两个粗细不同的容器在下面用管子连起来,然后装上液体和无摩擦的活塞(图10)。在小活塞上加一个力 F ,大活塞就要上升,为了阻止大活塞上升,在它

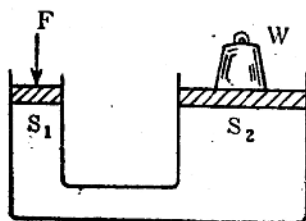


图 10

上面放上法码 W 。设小活塞的面积是 S_1 ,大活塞的面积是 S_2 ,那末在小活塞处的外加压强 $p_0 = \frac{F}{S_1}$,传到大活塞处应该毫不减小,所以 $\frac{W}{S_2}$ 也等于 p_0 ,因此

$$\frac{F}{S_1} = \frac{W}{S_2}, \quad \frac{W}{F} = \frac{S_2}{S_1}。$$