



大众流体动力学

[苏] 密尔库洛夫 著

科学普及出版社

内 容 提 要

本书以通俗的形式介绍了流体动力学的基本概念和重要定律、它的研究对象和所面临的任务，并选取许多生动的例子来加以说明，此外还谈到了它在日常生活中一些有趣的应用。

本书附有大量生动的插图。这些插图不仅形象地说明了书中所涉及的各种自然现象和流体动力学的基本原理，而且能帮助读者加深对它们的理解。

В.И.Меркулов
ПОПУЛЯРНАЯ ГИДРОДИНАМИКА
Издат «Техніка» Киев 1976

* * *

大 众 流 体 动 力 学

〔苏〕В.И.密尔库洛夫 著

袁 幼 卿 译

赵 震 炎 校

封面设计 洪涛

*

科学普及出版社出版（北京白石桥紫竹院公园内）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
安徽新华印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：5 字数：112千字

1981年1月第1版 1981年1月第1次印刷

印数：1—11,000册 定价：0.44元

统一书号：13051·1088 本社书号：0095

前 言

科学门类繁多，引人入胜。每一门科学都在为人类的进步事业做出自己的贡献。没有哪一门科学是人们可以离得了的。就这一点来说，各门科学都是同等重要的。

各种不同专业的科学家，都在专心致志地从事各自的工作。成年累月的顽强劳动换来了重大的发现；不畏失败终于取得了成功。看来，每个人都认为自己所从事的那门科学和所研究的课题是最有趣的，是最重要的。没有这样的信念，他们未必能找到力量去克服在探索大自然奥秘的道路上所遇到的重重困难。

可是，那些刚准备踏进科学之门的人，他们对各门科学抱的是什么态度呢？他们的态度，一部分取决于在学校中所获得的知识，一部分则取决于所阅读的科学普及书籍、报纸和杂志上的文章或所观看的电影。

这样，对各门科学就会有不同的看法。一些科学，因为有书刊和电影专门加以介绍，就带上了绚丽多彩的光环，而另外一些科学则显得黯然失色。流体动力学这一门关于液体和气体运动的科学则属于后者。这种情况是很奇怪的。因为这门科学所研究的对象是我们日常生活中到处都能遇到的。就连我们自己，我们周围的一切，无一不是在空气中运动（如鸟、汽车、飞机），或是在水中运动（如鱼、海豚、潜水的和水面上的船艇）。人们需要研究气流和洋流，潮汐和风浪，石油和天然气在数千公里长的管道内的流动，以及血液在微血管内的流动，等等。

如果说，大家都知道飞机和水翼船的性能取决于流体动

力学的成就，那么关于宇宙飞行器重返地球大气层或进入其它星球的大气层，也要依靠流体动力学来解决这一点，知道的人就不多。制造出能使人挣脱地球那强有力的怀抱的、功率为一千五百万千瓦的火箭发动机，这不仅是设计师、冶金工程师和化学工程师的成就，也是空气动力学工程师的成就。如果将来人们实现了可控的热核反应，那么在这方面将不仅有物理学家的，而且也有流体力学家的功绩。

流体力学和任何一门科学一样，是随着实践的需要而产生和发展的。为了满足古代造船业的需要，阿基米德（公元前287—212年）建立了漂浮物体的浮动和稳定性定律。修建水道、水坝、水闸和喷水池，以及十七世纪到十八世纪造船业和航海业的进一步发展，都大大促进了流体力学的发展。就在这个时候，彼得堡科学院院士伯努利（1700—1782年）和欧勒（1707—1783年）发表了伟大的著作。伯努利提出了“流体动力学”这个术语，他的书是在1738年出版的，书名就叫《流体动力学》。欧勒推导出了非粘性液体运动的一般方程式。这些方程式，直到现在我们还在引用。

十九世纪末和二十世纪初，航空事业的产生和发展，使飞行器空气动力学的研究工作也开展起来了。在这里，首先要提到的是被列宁称为“俄罗斯航空之父”的茹阔夫斯基教授（1847—1921年）。茹阔夫斯基的公式和翼型直到现在在空气动力学中仍起着重大的作用。

求知的渴望，是人类的天性，它经常激励人们往往超越技术条件的许可和社会的实际需要去追根求源，探索现象的本质。在艺术家、诗人和作家的眼里，世界是多么美好和引人入胜啊！如果你用科学家的眼光来观察世界，那么，你看到的世界将更加美好和令人神往。比如说，在天空中翱翔的

鸟儿，会向你述说空气动力学的定律；拍打岸边的波浪，会形象地给你解释波动理论。通过事物表面的现象看到其内在的本质该是多么有趣啊！

本书不打算对流体动力学这门科学作系统的阐述，而只是用一幅幅的图画来讲述流体动力学的内容，其目的仅仅是使读者了解其中某些问题。

我们从最简单的已经解决的问题讲起，但是，即便这些问题也内含着令人感兴趣的和可以利用的东西。关于这些方面，我们努力做到不仅讲述发生了什么事，而且还要告诉大家事情是怎样发生的。读者如有兴趣的话，可以根据所列的公式，自己检验所给出的结果或进行计算。在最后几章中，我们只限于讲述流体动力学面临的任务。

正如不用音符不能写出交响乐曲一样，不用数学公式就不能讲述流体动力学。但是，我们只用了最简单的公式，对于这些公式只要具备在中学里所学到的代数和三角知识就能理解。

再解释一下流体动力学这个术语。力学是研究物体在各种力作用下移动和平衡的科学。我们把表示水的词“流体”加在力学之前，就是把力学中研究液体运动的部分划分出来。由于历史上形成的原因，在流体力学范围内不仅研究液体的运动，而且还研究气体的运动。这是因为当运动速度低于音速（对于空气来说，音速等于340米/秒）时，液体和气体的运动规律是接近的。随着航空速度的增加，从流体力学中又分出空气力学和气动力学，来考虑气体的可压缩性。在不讨论平衡问题（静力学），而只研究在某些力作用下的运动（动力学）时，就用流体动力学，空气动力学这样的名词，或者用它们的组合名词。

目 录

前言

流体静力学.....(1)

流体静力学的基本方程(1) 巴斯噶定律(4) 表面张力(6)

失重中的流体静力学(7) 船舶的平衡(9) 空气静力学(11)

沙漠之舟(15) 用气球输送气体(16)

空气润滑和射流自动学.....(18)

不润滑,就动弹不了(18) 空气轴承(19) 怎样挪动冰箱(19)

踩着滑雪板在空气上滑行(20) 空气层上的车厢(23) 气垫

船(23) 经济气垫船(27) 射流学(29) 射流自动学元件(31)

射流学的功用(35) 贴面低飞的飞行器(38)

人在水面上行走.....(40)

在水中轻轻拍手(40) 附加质量(41) 可以在水面上奔跑(43)

在薄冰上奔跑(44) 无桥渡河(46) 乌贼游泳的“诀窍”(47)

液体和气体中的动力学效应.....(49)

能量守恒定律(49) 水从容器中流出(50) 冷水沸腾(51) 测

量流速(52) 两船相撞(53) 小球悬在空中(55) 马格奴斯效

应(56) 弗立特涅尔帆(58) 飞行汽车(59) 陨石在空气中燃

烧(60)

粘性液体.....(63)

粘性(63) 轴承(64) 泰勒流(65) 流体动力的阻力(66) 怎

样制止奥斯坦琴塔的摆动(67) 达拉姆贝尔-斯托克斯疑题(69)

非牛顿液体(71)

流体动力机械.....(74)

空气螺旋桨(74) 船用螺旋桨(76) 水轮机(78) 液压变速器(82) 液压冲击(84)

波浪冲刷城市.....(89)

波浪的产生(89) 波浪在奔跑,水却停留在原地(91) 波的合成(92) 波浪对海底有感觉(93) 海啸(94) 火箭燃料箱中的波浪(96) 水翼船(96) 怎样利用波浪(98) 在浴盆里和海洋中的龙卷风(101)

动物的流体动力学.....(106)

潜泳冠军(106) 自然推进器(107) 扑翼(108) 反转子式推进器(111) 快速的奥秘(112)

动物界中的飞行.....(117)

滑翔飞行(117) 翱翔飞行(119) 扑翼飞行(120)

磁流体动力学.....(128)

磁流体动力泵(128) 磁流体动力推进器(131) 无坩埚冶炼(133) 无坩埚区域熔炼(135) 磁流体发电机(136) 原子能磁流体发电机(138) 磁瓶中的妖魔(140) 热核反应(140) 引缩效应(141) 等离子束的稳定性(143)

流体动力学的理论和实验.....(146)

实验方法(146) 用方程代替模型(150)

流 体 静 力 学

流体静力学的基本方程

很自然,你要了解流体力学,就得从其较简单的部分——流体静力学开始。虽然液体和气体的平衡问题实际上要比运动问题简单,可是这方面的问题还是十分广泛而有趣的。

如果想知道,在我们面前的玻璃杯中的水受哪些力的作用,这就对我们提出了一个最简单的流体静力学问题(图 1)。

让我们取横截面为 S 的垂直水柱来看。这根水柱承受的大气压强,我们用 p_0 表示。大气压强在面积 S 上产生的力为 $p_0 S$ 。在同一方向上还作用着水柱的重力。

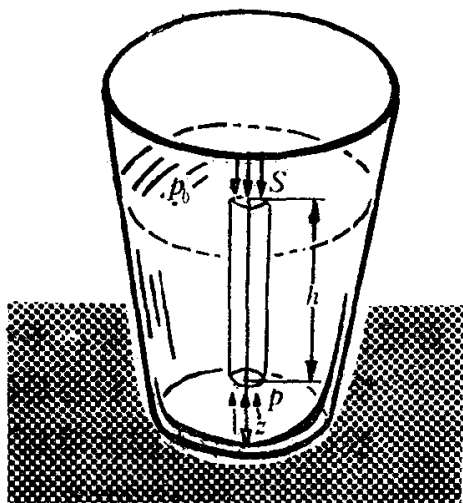


图 1

如果用 ρ 表示液体的密度,用 g 表示重力加速度,用 h 表示水柱的高度,那么水柱的重量就可以用乘积 ρghS 来确定。

水柱不往下沉这一事实,说明作用在水柱底上的、方向向上的力正好与作用在水柱上面的、方向向下的力互相平衡。单位面积上所受的这个压力,叫做流体静压强,用 p 表示,水柱的平衡条件写成:

$$p_0 S + \rho g h S = p S. \quad (1)$$

在这个方程中，面积 S 是公因数，因此可以消去。通常不写水柱的高度 h ，而是想要测定哪一点上的压强 p ，就写出哪一点的坐标。我们从液体的自由表面起算坐标，得到某一负值，用 $z = -h$ 表示。把这个符号代入方程(1)中，并消去等式两边的 S ，就得出流体静力学的基本方程：

$$p + \rho g z = p_0. \quad (2)$$

如果坐标为 z 的点位于杯子的底部，那末 p 就是作用在其底面上的压强。在一般情况下， p 是作用在 z 水平上的液体的压强。

液体性质的特点是，液体中的压力与所讨论的这一压力的作用面的方向无关。每一水柱承受同样大小的侧压力，这个力为邻近的水柱压力或杯壁上的压力所平衡。

为了更好地了解流体静力学定律，可以做一个实验。把玻璃杯灌满水，再拿一张纸贴在杯口上，随即用手掌捂住纸，把杯子倒过来，杯底朝上，然后把手放开，这时，杯中的水好象被杯底吸住了一样，不会外溢。

利用方程(2)，很容易解释这个实验。

我们把这个方程改写如下：

$$p_0 - \rho g z = p.$$

只要指出，在倒置的杯子中，坐标 z 是从自由表面向上计算起的，因此总是正值。

分析这一方程，就可以得出结论：水中的压强将随着 z 的增大而减小。但是，如果水柱的重力 $\rho g z$ 小于大气压强 p_0 ，压强 p 即使小于大气压强，也仍保持正值。在液体中内压力为正值，就表示有压缩液体的力存在。这些力就会使水保留在倒置的杯子中。

从方程(2)还可以确定大气压强所能托住的水柱的高度。

显然, 当

$$p = p_0 - \rho g z = 0$$

时, 水就溢出。由此

$$z = \frac{p_0}{\rho g} \quad (3)$$

把数值 $p_0 = g \times 10332$ 牛顿/米², $\rho = 1000$ 公斤/米³ 代入此式, 便得

$$z = \frac{10332}{1000} = 10.3 \text{ 米}。$$

由此可以推断出, 从深度超过10米的井中抽水是抽不上来的(图2)。

我们再来看看公式(3)。如果我们把它用于密度较大的液体, z 值就将变小。例如, 对汞来说, $\rho = 13600$ 公斤/米³, 则 $z = 0.76$ 米。

由于汞柱上升的高度小, 所以用它来作大气压强的试验相当方便。其作法如下: 取一支长度大于760毫米、一端封死的玻璃管, 灌满汞, 用手指堵住管口, 并把这一端放入盛汞的容器内。此时玻璃管内的汞柱高

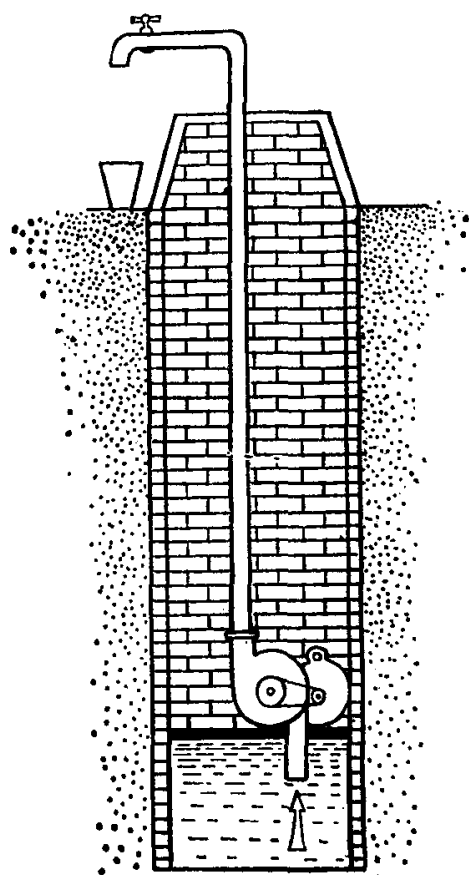


图 2

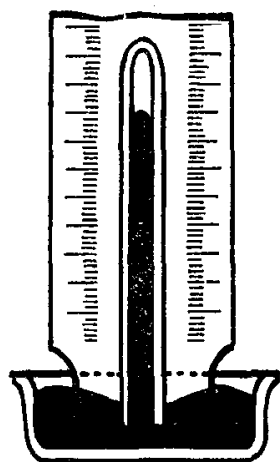


图 3

度只取决于大气压强。这样,图3所示的仪表就成了气压表,用通用的单位——毫米汞柱来表示大气压强。

从方程(3)中还可以得出阿基米德定律和巴斯噶定律。但由于读者在中学物理课程中已熟悉这两个定律,我们就不再重复了,这里只介绍一下它们可能应用的范围。

巴斯噶定律

现在提出一个问题,为什么在液压机械中通常用的是油,而不是水?从经济观点来考虑,似乎应当用水,况且这也更符合机械的名称*。正如你所猜测的那样,用油不用水,这一方面是因为油具有液体的性质,能把压力传到四面八方,而另一方面,油又具有腻子的性质,能堵塞机构活动部分与固定部分接合处的缝隙。但只有在缝隙很小的情况下,油才能起到堵塞的作用。因此,液压机接合部分的加工要非常精确,表面光洁度要求也很高。

也许,读者在城市的街道上看到过装有套管式升降机的汽车,人站在围有栏杆的工作台上由升降机升高。汽车停下来,互相套装的钢管竖立起来,然后用泵把油注入钢管的下部,钢管就一根接一根地往上升。站人的有围栏的工作台就

* 因为有时液压机称为水压机。——译校者注

固定在最上面(最细的)那一根钢管上。

同样的道理，可以取几根钢筋混凝土管子，一根一根地套装起来，竖直放着，然后把液体注入管子内部，直至管子上升到前所未有的高度。不过，这一设想无法实现，因为钢筋混凝土管子或焊接的钢管制造精度都很低。这些管子互相套装在一起，形成的间隙很大，油全会从这些缝隙中漏走。说实在的，我们为什么必须用油呢？难道不能采用一种在管间缝隙中渗漏得很慢的液体，以便及时用泵把它注入管内吗？很清楚，这种液体必须具有很大的粘性，例如象树脂一样的粘性。在这种情况下，我们又会碰到另一个困难。用什么泵来压注树脂呢？

这样，需要有一种液体，当它通过泵时粘性变小，而在管间缝隙中时粘性变大。在这里，使人想起有一些具有这种触变性的泥浆。这些泥浆在流动时粘性很小，而在静止状态时就会变成固体。目前在钻井时就采用这

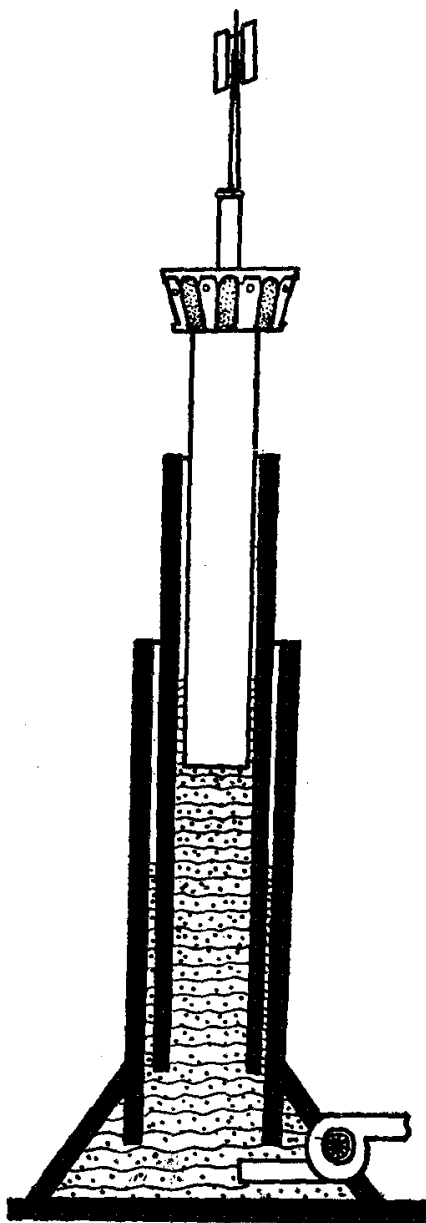


图 4

种泥浆。

利用具有触变性的泥浆，就能解决垂直安装钢筋混凝土管子的问题(图4)。假定有10根钢筋混凝土管子，直径一根比一根小，每根长30米。把这些管子一根根套在一起。用普通的建筑安装机械把这些管子竖立在打好的地基上，把最外面一根管子用水泥浆浇注固定牢。然后在最里面一根管子的上部，根据不同的用途安装上广播电台或电视台的发射天线，或者建起餐厅。所有的安装工作在30米左右高度进行，因此不需要特殊的起重装置。设备安装完毕后，开始把泥浆注入地基与管间的缝隙。泥浆在泵和管道中迅速流动，好象粘性小的液体一样。然而，在相互位移得很慢的管子的缝隙之中，泥浆几乎变成了固体，内压力已不可能使它从缝隙中渗漏出去。此时，内压力能够超过管子的重量，于是管子就开始一根接一根地向上升起。

即使钢筋混凝土管子的相对移动每秒钟只有1毫米(在这样的滑动速度下，泥浆不会从缝隙中逸出)，用不了100个小时，建筑物就会升到大约300米的高度。达到这个高度时，把管子里埋置的钢筋焊接起来，就可以使管子固定牢实。把泥浆放出后，用水泥浇注管缝，300米高的高层建筑就此完工。这样，利用普通的、连农村建筑单位也能掌握的技术，便可以又快又省地建成一座高入云霄的建筑物。

表 面 张 力

除了重力外，在某些场合下，还须考虑表面张力。每一个液体分子四面八方都受到相邻分子的吸引。液体表面的分子，其所处的条件与液体内部的分子不同；同空气接触的这

一面没有吸引力，而为表面张力所补偿。我们可以通过下面的实验形象地说明表面张力的存在(图5)。

取一枚细小的缝衣针，用手指擦干净。把一张吸墨纸放在水上，把针放在吸墨纸上。一会儿，纸吸足了水就沉下去了，而针仍留在水面上。此时，我们会很清楚地看到针有一定的吃水深度。



图 5

水虫——水黾能在池塘水面上奔跑正是利用这一现象。

因为表面张力的强弱与弯月形液面的曲率大小成正比，所以在毛细管中，即在很细的管子中，表面张力表现得最为明显。并且要看液体对毛细管的材料是否有浸润作用，以此决定液体是沿着毛细管上升，还是下降。水能沿着树干中纤细的毛细管上升数十米，滋润最顶端的树叶。

如果你有细网眼的茶滤，那你就可以做另一个实验。用葵瓜子油涂抹茶滤，然后将油抖掉，以免糊住网眼。现在往茶滤内倒些水，而水却留在茶滤上不往下渗漏。网滤不透水的性质，应用在给汽车油箱加油上。汽油充分浸润铜网滤后，就能畅通无阻地流过。水与汽油有相斥性，水由于表面张力的作用而滞留在网眼中。

失重中的流体静力学

在重力很大的条件下，表面张力表现得较小。在失重条

件下，例如在人造地球卫星内产生失重的条件下，表面张力成了主要的力，它决定液体的动态。

如果在失重情况下，打开装着水的瓶子，那会发生什么情况呢？由于水能浸润干净的玻璃，所以水就从瓶子内壁漫流出来，弄得瓶子外壁上尽是水(图6)。过了不大一会儿，瓶子中的水全都附着在瓶子外面，而瓶子里面就变得空空如也了。



图 6

为了弄明白这一现象，我们来讨论一下液体在瓶中和在瓶外这两种情况下表面张力和内压力的平衡问题。液体在瓶中时，弯月形液面是凹下去的，表面张力的方向是从液体向外，尽力把液面往外拉平，以扩大其体积。因为液面是不可能被拉平的，所以表面张力必将使液体内的压力降低。这种液体状态是不稳定的，稍有些扰动，弯月形液面不对称，就会使液体朝着压力小的方向流动。我们可以看到，这一现象与通常在地面条件下倒置盛满水的杯子时液体的表现有某些相似之处。

而如果液体在瓶子外表面上时，自由表面的曲率就趋向于使每一点上的表面张力方向都指向液体内部。此时，液体内部产生的压力，比周围大气的压力要高。这样的平衡是稳定的。在扰动消除后，液体就将回到原先的位置。

因为液体总是力图处于稳定平衡的位置，所以它也就留在瓶子外面了。要想把水盛在启盖的容器内也行，不过得用不受浸润的材料，比如用聚乙烯来做容器。

如果我们想在火上做饭，那么液体的表现又如何呢？当

然，读者知道，在失重的条件下暴露着的火苗会很快熄灭。这是由于没有重力，在火苗周围就不产生对流，火焰也就失去了氧气供应。因为缺氧，燃烧便进行不下去。但是可以用电炉来烧开水，电炉是不需要氧气的。很容易明白，水蒸气会把全部的水通过容器的排气孔驱赶出去。由此可见，在失重条件下做饭是相当复杂的问题。宇航员暂时只得服用软管装的膏状食物。

当然，谁也没有打算在宇宙飞船中烧开水。但是在一个美国的空间站中发生过类似的情形。那里面有一只杜瓦瓶，瓶内盛着用来冷却超导电磁铁的液氮。在有地心引力的条件下，杜瓦瓶内的氮蒸气从液氮表面升起，通过小孔放出（如果把孔堵住，气态氮的压力就会使容器爆炸）。在液氮全部蒸发完毕之前，杜瓦瓶内的温度不会高于绝对温度4度。杜瓦瓶提供的良好的隔热条件，能使液氮贮存得相当长久。在失重条件下，液氮蒸发的过程就不一样了。在空间站中，氮蒸气使液氮从排气孔喷出，杜瓦瓶很快就变空了。

从这些平衡稳定条件中可以推导出，在失重条件下，自由空间里的液体是球状的。将来人们会利用这个现象，在地球的外层空间进行轴承用钢珠的生产。

船 舶 的 平 衡

从阿基米德那个时候起，大家就知道，如果物体排开的液体重量等于物体本身的重量，物体便会浮着。

圆木头漂浮在水面上，完全符合阿基米德定律。即使你骑在这根木头上，也不违反阿基米德定律。如果阿基米德力*

* 阿基米德力就是我们通常在物理学中所称的浮力。——译校者注

等于木头的重量和你体重的和，你便可以一直漂浮着。但是，只要有些扰动，木头就带着你一起翻滚，把你翻到水下去。这时，阿基米德定律仍然有效，这一点也将使你略为放心。

通过这个例子可以看到，为了漂浮，除了阿基米德发现的条件外，还需服从重力与阿基米德力平衡的稳定条件。

只要观察一下木把铁锨怎样在水中漂浮(图7)，上述稳定条件就变得十分容易理解了。铁锨在往下沉，直到它排开的水的重量与它本身的重量相等时，下沉才停止。这时，阿基米德力作用在木把上，而重力的合力作用在铁锨上。这样的情况就决定铁锨在水中取竖直状态。如果波浪使铁锨偏离竖直位置，那就产生使铁锨回复到原位的力矩。

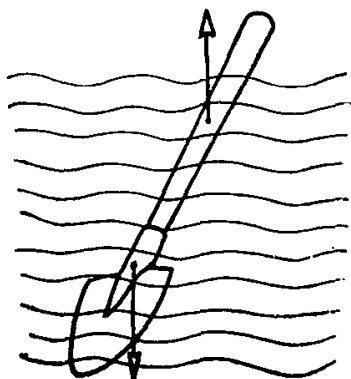


图 7

由此可见，只要物体的重心低于被排开的液体体积的重心，那么物体就处于稳定平衡状态。在船舶上，把发动机和货物放在底舱以满足稳定条件。在帆船上，除此以外，还要平衡作用在帆上的力矩，因此要制造很重的设在船底的龙骨。在没有重型发动机的帆船上，常用水泥浇注底部。潜水艇内的重量配置，也要考虑满足稳定条件。

对于在水面上航行的船只来说，还有一种保证航行稳定的方法。这种方法自古以来就

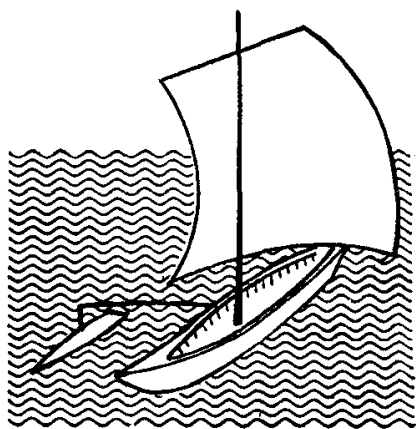


图 8