

运动物体受到的阻力

作者：

莫罗·雷内（MOREAU René），格勒诺布尔国立理工学院（Grenoble-INP）材料科学与工程实验室（Laboratoire SIMaP）名誉教授，科学院（Académie des Sciences）和技术科学院（Académie des Technical）成员

索莫利亚·乔尔（SOMMERIA Joël），法国国家科学研究中心（CNRS）、格勒诺布尔-阿尔卑斯大学（UGA）地球物理与工业流动实验室（LEGI）主任级研究员。



为什么人在水中移动如此困难？为什么大型船只需要消耗那么多的能量来克服水的阻力？而在如此轻盈的空气中，鸟类、骑自行车的人、汽车和飞机又是如何克服这份阻力而前进的呢？也正是因为这种空气的粘性所产生的阻力（粘性阻力），阻止了雾滴和其他微小颗粒的下落。对于车辆或其他大型物体来说，它们的阻力还来源于湍流（紊乱的流动），这种流动造成了很大的能量损失。而对于水面上的船只，还存在另一种能量损失的机制，它与重力有关，船体与水的相互作用使得船的周围产生波浪，与此对应的是兴波阻力。

1. 粘性阻力：以雾和雨为例

1.1. 粘性摩擦

想象一下，一个薄如剃刀片的平板在蜂蜜或油这样粘稠的液体（图 1）中运

动。即使在低速时，平板也必须克服**流体摩擦产生的阻力**才能向前运动。从局部上看，该板的每个表面单元都受到与运动方向相反的**切向力**。该切向力与流体的粘度（见文章 "[流体和固体](#)"）以及壁面上速度的法向梯度成正比。

从整体上看，这些由局部力所构成的阻力产生的结果就是**粘性摩擦效应**。掉进蜂蜜里的勺子下落或者流线型的锥形船体缓慢运动，都属于这种情况。物体周围的流动被称为**层流**，这意味着每个流体颗粒的运动都比较规则，相邻的**流线**也比较顺滑。这种行为与下面讨论的**湍流**状态不同。

其中，最著名的实验之一就是流体围绕球体的缓慢运动（图 2），因为球体的几何形状简单，而且它可以作为小水滴或气泡（受表面张力作用）的近似。根据通常的做法，我们在与球体固结的参考系进行流动观察，而不是在静止的流体中观察物体的运动。



图 1. 蜂蜜比水粘稠得多。它以层流的形式缓慢流动，即不会发生湍流脉动。

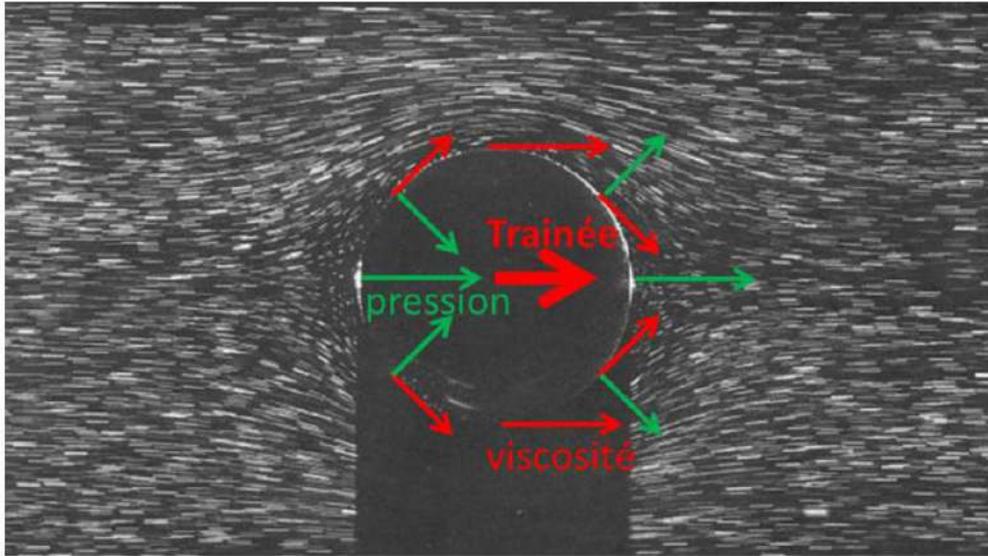


图 2. 围绕小球的层流图像（从左到右）。照片中，光从顶部往底部横向照射，流场中微小粒子的轨迹使得流动可视化，球体下方的黑暗部分是其阴影。作用在球体上的切向粘性力和法向动压力分别用红色和绿色箭头表示，它们的合力是粘性阻力。
（图中 Trainée 轨迹方向，pression 压力，viscosité 粘性阻力）[图片来源：流体运动相册 (Album of Fluid Motion)]

小球的粘性阻力由**斯托克斯公式**[1]给出，根据该公式，阻力 F 与球体的直径 d 及其相对于周围流体的速度 U 成正比， $F=3\pi\mu dU$ 。该定律在考虑动态粘度 μ 的情况下可适用于蜂蜜、水、空气或任何其他普通流体（统称为**牛顿流体**）。相同类型的公式实际上适用于慢速运动的任何小物体， 3π 特指球形物体阻力公式的系数。就如摩擦力一样，阻力总是一个与速度方向相反且与速度大小成正比的量。

1.2. 小物体自由落体的速度限制

在真空中，在重力的作用下，任何物体，无论是铅块还是羽毛，都会以同样的匀加速运动落下（见“**动力学规律**”）。在水或空气等流体中，物体也要受到**阿基米德浮力**，这无非是**静水压力**的结果（见“**阿基米德浮力与升力**”）。这种力与被物体排挤出的流体重力大小相等、方向相反，因此，物体将以较小的加速度下降，或上升，这取决于它比周围流体密度差异。

但物体不会被无限加速，因为阻力随着速度的增加而增长，直到它**完全补偿**了它的重力和阿基米德的浮力所产生的**驱动力**。这时，这个物体所受的合力为零，根据动力学规律，它的加速度就为零。速度所达到的恒定值被称为下降**速度极限**。

对于我们这里考虑的轻小物体来说，很快就能达到这个速度极限。请注意，对于比环境流体轻的物体，如水中的一个气泡或一滴油，它会向上运动。

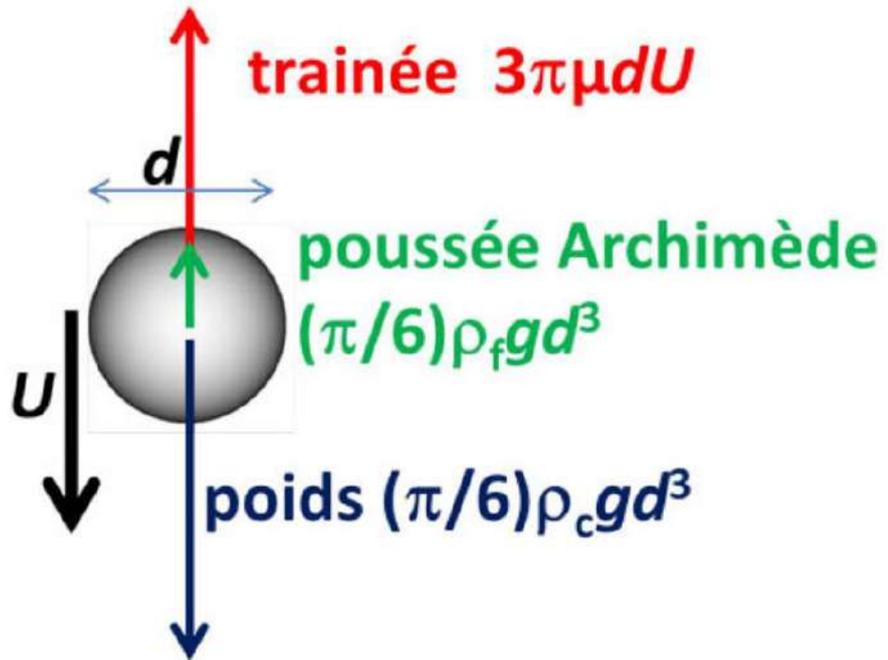


图 3. 直径为 d 的小球达到下降速度极限 U 时的力平衡
(图中 *trainée* 轨迹方向, *poussée Archimède* 阿基米德浮力, *poids* 重力)

利用上面给出的斯托克斯公式，可以很容易计算出来最大下降速度。重力是重力加速度 $g \approx 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 乘以球体的体积 $(1/6)\pi d^3$ ，再乘以球体的密度 ρ_c 。阿基米德的浮力由同样的公式给出，用流体的密度 ρ_f 代替物体。通过三个力的平衡(见图 3)，我们可以推导出最大下落速度等于 $(1/18)g(\rho_c - \rho_f)d^2/\mu$ 。不仅随着粘度 μ 增大而降低，而且随着直径 d 的平方增大而增大，这就是为什么小物体能长时间保持悬浮状态的原因（见焦点 小物体悬浮的世界）。

1.3. 雾随风动

例如，假设一个直径约为 20 微米（0.02 毫米）的雾滴。考虑到水的密度 ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 和空气的粘度 ($\mu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)，该液滴的最大下降速度约为 $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。然而，周围空气的轻微运动都比这个速度大得多。在这种条件下，液滴保持悬浮状态，随风而动。这同样适用于花粉粒和所有小于 20 微米的颗粒。这也就解释了为什么在美丽的高空中，平静的大气里污染峰值持续时间很长。

因此，当雾产生时，导致雾消失的机理并不是雾落到地面上，而是雾在阳光照射后的蒸发，或者是伴随着寒冷地面上以露水或霜的形式的凝结。

1.4. 从雾到雨

在充满水的云中，水滴的凝聚会产生越来越大的水滴。当它们的直径变成大约一毫米时，它们就会像雨一样落下来。如果气流仍然是层流，因为直径 $d=2$ 毫米的水滴，比细小的雾滴大 100 倍，其下降速度将是 10,000 倍，可以达到 100m/s (360km/h)。实际上，正如我们后面将要讲到的那样，空气阻力来源于湍流，摩擦力增加，自由落体速度降低了。

此外，在毫米尺度上，表面张力已经不足以维持液滴的球形。如图 4 所示，液滴在流动引起的压力作用下发生变形。如果这个液滴的尺寸超过 5mm(图 4 中的右栏)，就会变得不稳定，从而发生液滴的破碎，重新形成 2mm 左右的液滴，因此液滴下落的整个过程就是 B、C、D、E 的不断循环的过程。

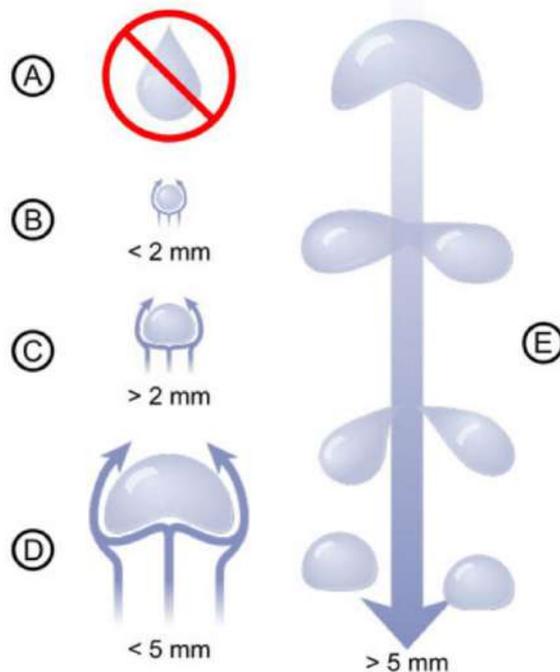


图 4. 自由下落的雨滴的形状是什么？A：水滴从支撑物上脱离时呈梨形，在表面张力的作用下迅速向球形演变。B：直径小于 2mm 的液滴为球形。C 和 D：直径超过 2 毫米时，液滴与球体的差异越来越大，但液滴不会破裂。E：当直径大于 5mm 时，液滴的变形巨大而发生破碎，从而形成 2 至 3mm 大小的液滴。

[图片来源: Pbroks 13(个人作品) 维基百科共享(<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>)]

2. 湍流阻力

2.1. 雷诺数

当一个足够大的物体在像空气或水这样低粘度的流体中运动时，流动就会变得**不稳定**。这种不稳定是落叶不稳定运动的根源。在较高的速度下，物体的下游会形成一个无序涡流尾迹，就像在船的后面可以看到的那样：**湍流尾迹**（见焦点湍流尾迹）。

爱尔兰物理学家和工程师奥斯本·雷诺(Osborne Reynolds)首次对湍流概念进行了科学定性[2]。为了纪念他，流体力学中最重要无量纲量用他的名字命名，称为**雷诺数**。这个数，记为 Re ，等于流动的粘性扩散时间尺度(可估计为 d^2/ν ，其中 ν 为运动粘度[3])与流体绕过障碍物的时间尺度(约为 d/U)之比。所以，雷诺数的表达式为 $Re=Ud/\nu$ 。当这个雷诺数超过一个临界值时，就会发生湍流，这个临界值总是比 1 高得多，取决于所考虑的具体流动。

尽管湍流是一种非常复杂的现象，而且其建模仍然是个问题，但雷诺数体现了流体（甚至不同粘度的流体）围绕几何形状相同但大小不同的物体流动的相似性规则。例如，我们可以预测，在相同的流体中，如果一个物体尺度扩大了 10 倍，那么它的速度需要减小到原来的 1/10 才能形成相似的湍流流动。在实践中，如气球、汽车或船等这些相当大的物体的尾部总是湍流。

2.2. 阻力系数

通过这种雷诺相似性可以得到湍流阻力的表达式为 $F=(1/2)C_x S \rho_f U^2$ ，其中 C_x 称为**阻力系数**。这个力与物体的最大迎风面积 S 成正比，也称为**主迎风面积** [4]，同时也与前面提到的流体密度 ρ_f 和相对运动速度的平方 U^2 成正比，阻力系数 C_x 取决于**物体的形状**，也取决于雷诺数。

对于一个处于层流中的球体，通过上面提出的斯托克斯公式可以得到 $C_x=24/Re$ 。另一方面，当雷诺数足够大时， C_x 则会趋于定值，而这个定值只取决于物体的形状，所以使得 C_x 这个量具有很大的意义。图 5 显示了圆盘和球体的 C_x 与 Re 之间函数关系。 Re 在 100 到 1000 之间为层流和湍流的过渡，当 Re 变得非常大时即湍流时， C_x 趋向于一个常数，但圆盘和球体的 C_x 常数不同。由于球体的外形优于圆盘，所以其 C_x 值较低。

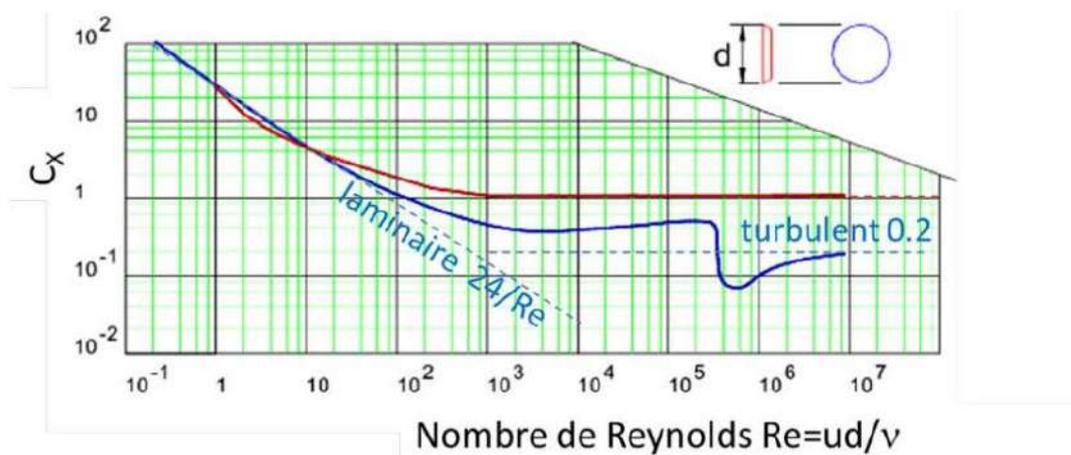


图 5. 圆盘（红色曲线）和光滑球体（蓝色曲线）的阻力系数 C_x 随雷诺数 Re 的变化。层流的临界情况以及完全湍流的渐近情况用虚线表示。

(图中 laminaire 层流,turbulent 湍流)[图片来源: www.roymech.co.uk]

这种阻力行为可以通过估算物体在运动过程中排开流体所消耗的能量来理解[5]。像圆盘这样整个截面的横扫运动对应的阻力系数 $C_x \approx 1$ ，而流线型的物体推开流体的力度就小得多，它减少了湍流尾迹的横截面大小。最高效的量产汽车阻力系数可以达到 $C_x \approx 0.25$ 。事实上，控制阻力的是 $C_x S$ 乘子，可以看作是有效面积，用它和流体密度、速度的平方的乘积就很容易地计算出阻力了。

2.3. 消耗功率与速度的立方成正比

阻力的存在造成了能量损失，即阻力做了**负功**。相应的功率，或单位时间内的能量损失，是通过将阻力乘以运动速度得到的。由于力与 U^2 成正比，消耗的功率就与 U^3 成正比。因此，**消耗功率随速度增加而增长很快**。

这种消耗的能量会转化为流体的动能(包含所有湍流脉动的动能)，并在流体粘性的作用下最终耗散为热量。由于热量被稀释在大量的流体中，因此产生的温升一般难以察觉。但是，对于以极高速度进入大气层的陨石或航天器来说，空气加热会使它们表面的温度上升到数千度并导致其毁灭。

2.4. 动压的作用：阻力和升力

慢速物体的阻力是由粘度控制的，而快速物体的阻力主要是由流动引起的压力，称为**动压**。正如我们所看到的，这种压力使周围的流体侧向绕开物体而从上

游向下游流动，以至于运动的物体可以替换原来流体所在的位置。这种压力差会对运动物体产生整体阻力，从而阻碍物体运动。

在高速时，粘性效应变得可被忽略，利用伯努利关系[6]可以估算出流体的动压 $\rho_f U^2/2$ 。将这个动压乘以横截面积 S ，就可以得到上面所说的湍流阻力。实际上，控制阻力的是湍流尾迹的横截面积，数量级为 $C_x S$ ，而不是物体本身的面积 S 。

对于不对称的物体，如飞机的机翼或风帆，表面压力积分还会呈现出与速度垂直的力，称为升力（见“阿基米德浮力和升力”）。它和阻力都是力的分解，而阻力的方向与速度方向平行且相反。这两个力与流体的密度和速度的平方成正比，因此它们的比值是不变的。后面我们会知道，这个比值可用来表征飞机滑行能力，叫做升阻比。

2.5. 一些关于自由落体速度极值的例子

在雾和雨的情况下，只要知道空气的运动粘度 $\nu=1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ，就很容易估算出雷诺数。对于雾滴， $d = 20 \times 10^{-6} \text{ m}$ (或 0.02 mm)， $U = 10^{-2} \text{ m/s}$ ，雷诺数 $Re \approx 10^{-2}$ ，流动处于层流区。另一方面，对于直径 $d=2 \text{ mm}$ ，以速度为 $U=100 \text{ m/s}$ 下降的物体，雷诺数为 $Re=13\,000$ ，处于湍流区。但是，由于没有考虑到湍流摩擦阻力，下落速度被过估了。若液滴的重量为 $(1/6)\pi g \rho_f d^3 = 4 \times 10^{-5} \text{ N}$ ，用基于 $C_x=0.5$ 的湍流阻力进行平衡，下落速度达到 6 m/s ，对应的雷诺数 $Re=800$ ，刚达到湍流区的边缘。

假如一个人从高处自由下落，质量 $M=80 \text{ kg}$ ，即重量为 800 N ，阻力可以用截面 $C_x S=1 \text{ m}^2$ 来估计，得出下落速度为 50 m/s ，即 180 km/h 。达到这个速度极值大约需要 5 s ，意味着下落了 $(1/2)gt^2 \approx 125 \text{ m}$ 。对于跳伞者而言，他们在空中下落时，不再感觉到任何加速度。一旦降落伞展开，其巨大的横截面积 $C_x S$ 增加了 100 倍，意味着阻力增大 100 倍，速度极值就会大大降低。因此，要获得同样大小的阻力，速度就要下降到 $1/10$ （因为与 U^2 成正比），即 5 m/s 。

2.6. 流体密度的重要性

前文所述，湍流阻力与流体的密度成正比。在 $34,000$ 米的高度，空气的密度比地面附件低 100 倍，需要 10 倍的速度才能产生相同的阻力。因此，阻力与重

力平衡时的下降速度极值就要增大 10 倍，即 500 m/s。2012 年，跳伞运动员费利克斯-鲍姆加特纳(Felix Baumgartner)从 39000 米高空自由下跳，45 秒后，在约 30 000 米的高度，下落速度达到了 372m/s(1340km/h)，接近这个预估的速度[7]。

另一方面，在水里的阻力要大得多，水的密度是低空时空气密度的 800 倍，这也解释了为什么固体物体在水中下落的速度要比在空气中慢得多(阿基米德的浮力也会减慢下落的速度，对于漂浮的物体来说，甚至可以抵消重力，但对于石头等密度大的物体来说，它的作用要比阻力小很多)。

这种密度效应也解释了为什么一个骑自行车的人可以达到 40km/h 的速度，而优秀的游泳运动员很少超过 4km/h。速度增长 10 倍，则消耗功率增长 1000 倍(前文所述，消耗功率随着 U^3 成正比)。但由于密度的不同，骑自行车的人和游泳运动员所消耗的功率大致相同。

3. 水面上的重力阻力（兴波阻力）

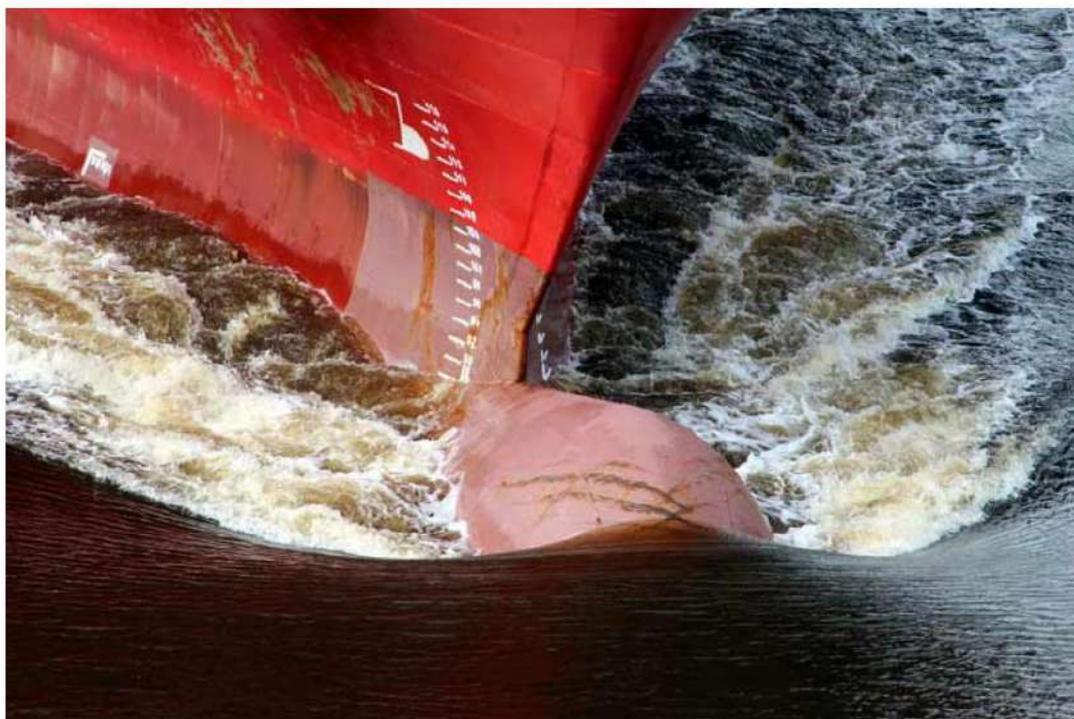


图 6. 船舶产生的波浪，其轮廓旨在最大程度减少重力阻力和波浪能。

另一个减缓船舶行进的力是兴波阻力 (wave drag)，或叫重力阻力 (gravity drag)。船舶的压力具有双重作用。正如我们所看到的，行进中的船艏把上游的水

推向两侧，从而占据原来水的位置，同时**提升**了大部分水的高度，这些水随后向船的两侧回落。上升过程中水获得的势能（图 6）在其下降过程中转化为动能，且继续下降到水平面以下。然后，像钟摆一样，水体上下振荡，形成远离船体的波动，这就产生了在船舷上看到的波浪。天鹅在平静的湖面上缓慢移动也会产生类似的波浪（图 7）。这种**重力阻力**将船舶消耗的部分能量转移到波浪上，它是受重力影响的。



图 7. 绕过天鹅颈部的湖水上升又下降形成向两侧传播的波，从上往下看，水面的振荡在半顶角为 α 的角度范围内， $\alpha = c / U$ ，其中 c 指波浪的速度， U 指天鹅的速度。

我们已经知道，粘性和湍流轨迹取决于雷诺数（图 5）。重力阻力由另一个参数控制，称为**弗劳德数(Froude number)**[8]，它表示为 $Fr = U / (gl)^{1/2}$ ，其中 l 是运动物体的长度。经验表明，当弗劳德数接近 1 时，这种阻力会大大增加。那么，所产生的波的波长(两个连续的波峰之间的距离)就接近于船的长度[9]。船体将消耗相当大的能量来驾驭自己产生的波浪，而不是简单地使得附近水面提升。

图 8 显示出与图 7 明显不同的情况。对于经典设计的船来说，超过 $Fr=1$ 这个极限几乎是不可能。只有更长的船才能更快。只有通过产生额外的升力，比如使用合适的船体（如帆板）或侧翼（水翼），船只才能超过这个极限（见“阿基米德浮力和升力”）。



图 8.接近弗劳德数极限的航迹，其波的波长可与船的长度相当。

[图片来源: Edmont (个人作品)<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0> 或者维基百科共享协议 <http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>

4. 如何对抗阻力

尽管阻力很小，但仍会使运动速度减慢。因此，只有在有驱动力补偿它的情况下才能维持运动状态不变。如果驱动力和阻力之间存在差异，物体就会加速或减速，这取决于差异是正还是负。因此，在上面讨论的自由落体的情况下，重力使身体加速，直到阻力准确地补偿了重量。

在没有动力的情况下，任何水平运动都会因阻力而减慢。因此，球和气球的水平速度沿其轨迹下降。它们的最大值是由最初的冲击力造成的（网球或足球约为 260km/h），而轨迹的长度则取决于阻力。例如，对于高尔夫球，世界冠军 Jason Zuback 创造的速度记录是 320km/h，轨迹的总长度是 400m。在没有阻力的情况下，对于竖直上抛运动，物体达到的高度是受阻力情况的两倍。

4.1. 速度的能源成本

骑车人即使在水平道路上，没有逆风的情况下，也必须踩踏板来克服前进的阻力。其尾迹的横截面积 $C_x S$ 在 $0.2 \sim 0.4 \text{ m}^2$ 之间，取决于其在自行车上的姿势，比如直立部分的多少[10]。因此，对于 15 m/s (54 km/h) 的骑行速度，阻力将在 27 到 54N 之间，骑车人为克服阻力而输出的功率（通过将该力乘以速度获得）大约是 400 到 800W，此外，还必须增加用于抵抗机械摩擦的功率，而机械摩擦几乎与速度无关。只有杰出的冠军才能将 400 W 的功率[11]维持到几分钟以后

（相比之下，一匹马所提供的平均功率约为 735 W，即常说的马力）。这就解释了为什么自行车选手一小时的骑行纪录恰好是 54km（2015 年的布拉德利-维金斯）。如果将速度限制在 12m/s(43km/h)则只需要输出一半的功率，这会更容易实现。

对于一款外形优化的量产汽车来说，产品的 C_xS 约为 0.6m^2 。在速度为 28 m/s (100 km/h)的情况下，这会产生 280 N 的阻力，或者说为了克服空气动力阻力需要输出 8 kW 功率。这对于一辆额定功率为 50kW 的普通汽车来说，仍然是适度的。当速度达到 200 km/h 时，所产生的阻力也会增加到原来的 4 倍。因此，给定路程所要消耗的能量（等于力和位移的乘积）增大到原来的 4 倍。由于此时速度是原来的 2 倍，因此所需的功率（即单位时间内所消耗的能量）是原来的 8 倍，即需要 64 千瓦而不是 8 千瓦才能补偿空气动力阻力。这只有大马力汽车才能做得到。

4.2. 不同的推进模式

封面图中的划船者用桨向后划水时，在水面上可见一个个清晰的旋涡。在这里，作用在桨上的是一种阻力，它推动着船前进。这同样适用于脚踏船和老式轮船。

就飞机而言，提供**推进力**的是螺旋桨或发动机。每个螺旋桨叶片的外形像飞机机翼，因此受到垂直于其转动平面的“升力”。在设计中需要输入扭矩，才能有效地产生向前的推力。在发动机的整流罩中，安装有大量的被优化了的桨片。

鸟类扑翼飞行时，肌肉做功带动翅膀的扇动，产生了升力和推力，这归功于每次扇动都会释放出有利的旋涡（见“[阿基米德浮力和升力](#)”）。游泳者的拍打，不管有没有鳍，也会在其尾迹中释放涡流；正是这种机制解释了它们的推进力。这也是一种垂直于鳍或翼挥拍运动的升力型推进模式。

4.3. 滑翔飞行



图 9. 鱼鹰在肯尼亚巴林戈湖上空滑翔。[图片来源: © Jacques Joyard]

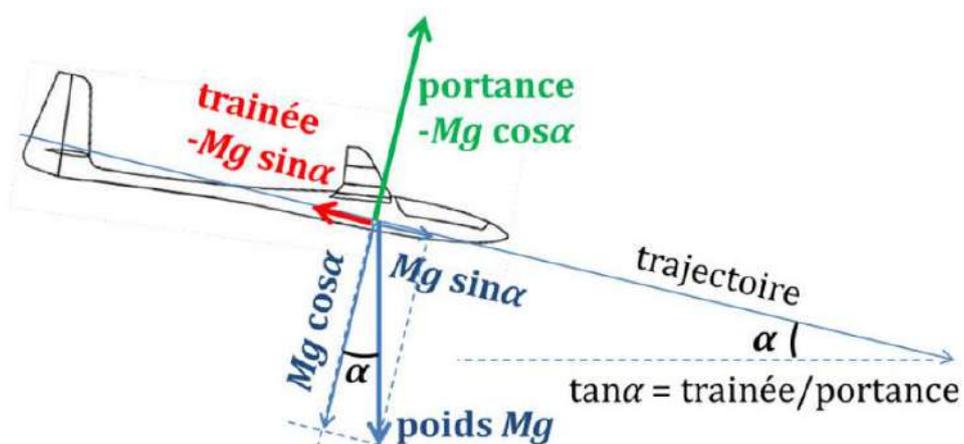


图 10. 在静止空气中飞机滑行时的力分解。重力 Mg 投影在垂直于轨迹的分量为 $Mg \cos \alpha$ ，通过升力进行平衡，而驱动分量沿着轨迹 $Mg \sin \alpha$ ，通过阻力平衡。因此，下降斜率 $\tan \alpha$ 是阻力与升力之比，与升阻比相反。(图中 portance 垂直方向, trainee 轨迹方向, trajectoire 轨迹, poids 重力)

滑翔机的例子更加经典，经验丰富的飞行员会寻找上升气流，如热风，从而引导飞机在空中上升。在这种情况下，风的阻力可以有一个向上的分量，增加了抬升作用，从而参与了滑翔机的上升。滑翔的鸟类，如海鸟和猛禽(图 9)，广泛使用这些方法，以减少它们的飞行能耗。

我们已经知道，升力和阻力与速度的平方成正比，它们的比值称为升阻比，它与滑翔机在静止空气中下降斜率互为倒数，如图 10 所示。那么，滑翔机在倾斜的平面上下降时，推动滑翔机的是重力 Mg 沿轨迹投影的分量，而其横向分量则由升力来平衡。效率最高的滑翔鸟--信天翁的滑翔比（升阻比）为 20，与空客

A320 等客机相当, 后者的滑翔比为 17。现代滑翔机做得更好, 其升阻比约为 50。在静止空气中, 这样的滑翔机仅需要下降 2000 米, 就可以滑行 100 公里的水平距离。

因此, 飞行物体的速度受到如下限制的约束: 升力必须平衡重力, 但是可能的调整范围取决于相对于轨迹的倾斜角。一架轻而大的滑翔机可以缓慢飞行, 并利用上升的气流而上升。另一方面, 为了飞得更快, 飞机必须设计一个更小的翼展, 但代价是更高的能量消耗。另一种策略是飞得更高: 在 1 万米的高空, 空气的密度比地面上低 3 倍, 由于阻力和升力与速度的平方成正比, 为了获得同样大小的力, 速度需要增大到原来的 $\sqrt{3}=1.73$ 倍。

5. 提高效率

5.1. 灵感来自于动物

通过对动物世界的观察我们发现了很多飞行和游泳的例子来减少运动的阻力。一些海豚能够在水中保持 30km/h 的游速, 因此我们一直在寻找这种保持高速的神秘机制, 比如通过它们皮肤的弹性来抑制湍流等。但最近的研究表明, 本质上是它们身体外形的优化, 以及它们特殊的肌肉力量[12]赋予了它们这些令人印象深刻的运动能力。

至于鸟类, 它们知道如何通过将腿缩进羽毛中, 并尽可能顺着自己的轨迹方向贴合来减少阻力。鱼鹰雄伟的滑翔飞行(图 9)很好地诠释了这些鸟类是如何进化身体结构和提高飞行技能以减少它们的飞行能耗。

5.2. 控制湍流

在从自然界的模仿中获得灵感的同时, 科学和技术的进步使我们能够做得更好。汽车和飞机制造商使用了大量研究手段来最大限度地减少阻力, 从而减少燃料消耗, 包括高性能数值模拟和风洞实验。这些都可以优化车辆的空气动力学外形, 并测试每个细节的影响, 使用的烟雾等显示流动(如图 11)。



图 11. 在风洞中，使用烟雾来可视化绕汽车的气流流动，并测试降低型面阻力的可能性。
[图片来源:美国福特汽车公司(<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>)或者维基百科共享(<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>)]

由于**湍流**是控制阻力的一个重要因素，目前正在进行深入的研究以减少其影响。可以通过使用粗糙度或划痕等被动方法或主动方法来防止湍流扰动的增长，从而来实现减阻的目的。然而，这些方法存在着实际和经济上的限制。以飞机为例，已知的限制阻力的解决方案是通过机翼后半段的众多小孔吸收气流，从而使绕机翼的气流贴体，然而，由于存在小孔堵塞等问题，这并没有实施下去。在液体中，通过添加聚合物，即使是微量浓度的聚合物，也可以显著降低湍流阻力。但这当然只限于封闭环境下的工业应用，例如管道。

在赛艇中，人们使用翼型产生升力的方式来减小重力阻力（兴波阻力），取得了惊人的进步。但要应用于运输船则会有许多问题。对速度的追求总是意味着巨大的能源消耗，这很难被效率的提高所抵消。

参考资料及说明：

封面图片：独木舟的阻力必须由桨手做功来克服，力的平衡决定了独木舟的速度。

[1]. 斯托克斯 (George Gabriel Stokes, 1819-1903), 爱尔兰物理学家, 在流动粘性效应的数学表达上做出了卓越贡献。

[2]. 雷诺 (Osborne Reynolds, 1842-1912), 爱尔兰工程师、物理学家, 在流体力学中贡献卓越, 特别是关于流动稳定性的开创性实验 (1883) 至今仍被引述。

[3]. 流体的动力粘度, 通常用 μ 表示, 与流动的粘性摩擦力大小有关。单位是 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 有时叫做泊肃叶 (poiseuille), 以纪念 19 世纪法国物理学家泊肃叶 (Jean-Louis Marie Poiseuille)。在研究中, 流动的粘性也可用运动学粘度来表示, $\nu = \mu/\rho_f$, 即动力粘度除以流体的密度, 单位是 m^2/s 。

[4]. 严格地说, 迎风面一词应指船体的竖直截面, 主迎风面是最大的截面。因此这个海洋专业词汇被我们用来表示物体或航行器在流体中运动的等价面积。

[5]. 在一个时间步长 dt 内, 截面积为 S 的物体扫过的长度为 Udt , 则对应的流体质量为 $\rho_f SUdt$ 。估算的动能为 $\frac{1}{2}\rho_f SU^3dt$, 与阻力做功大小 $FUdt$ 相当, 这就得到阻力系数 $C_x=1$ 。

[6]. 伯努利 (Daniel Bernoulli, 1700-1782), 瑞士医生、物理学家、数学家、哲学家, 巴塞尔大学的教授, 他的主要兴趣是对流动的研究。伯努利定理, 发表于 1738 年出版的水动力学著作, 是流体力学的基础理论之一。它表述为沿着流线 $p + \rho_f U^2/2 = p_0$, 其中 p 是当地压强, p_0 是来流制止的压强。

[7]. 超过声速时存在额外的阻力: 下落的能量不仅用于推开周围的空气, 还使得空气**压缩**, 形成**激波**, 一种声波, 产生声障。船舶的**兴波阻力**不同于此, 它是与重力有关的。

[8]. 这个无量纲数称为弗劳德数, 弗劳德 (William Froude, 1810-1879), 英国工程师、海军建筑师, 他是第一位研究重力阻力 (兴波阻力) 的科学家。

[9]. 弗劳德数表达了船体速度与重力波传播速度之比, 与波长 l 有关。尾迹波传播速度与船体的速度相当。速度关系即 $c=U$ 可用来估算尾迹波长, 当 $Fr=1$ 时, 它与船体长度相当。

[10]. 参考 http://sportech.online.fr/sptc_idx.php?pge=spfr_xfd.html

[11]. 相对于总能耗, 机械能的消耗大约为 1.9kW, 效率约 21%, 参考 <http://www.agoravox.fr/culture-loisirs/sports/article/puissance-et-performance-en-159520>, 这部分能耗与呼吸的氧吸收有关。

[12]. F.E. Fisch and G.V. Lauder, 2006, Ann. Rev. Fluid Mech.

<https://www.yumpu.com/en/document/view/46389631/passive-and-active-flow-control-by-swimming-fishes-and-mammals>.

译者：邹思楠

审校：余永亮教授

责任编辑：杨茹月