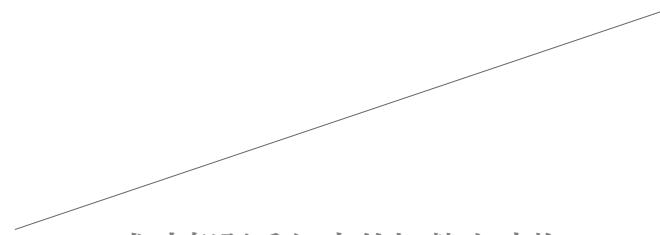


## 第 3 章



成功驾驭毛细力的智慧小动物



### 3.1 池塘里的溜冰者——水黾

在自然界中,我们经常发现很多小动物能够在水面上自如地运动,而人类如果不借助于工具就不可能站在水面上。如图 3-1 所示的水黾就是这样的一种动物,它是一种水生的半翅目类昆虫,体长一般在 10mm 左右;体重很轻,大约为十几毫克;身体上有三对腿,其中前腿很短,中腿和后腿特别细长。每条腿由三段组成,各段之间由关节相连。水黾不但能够静止地站立在水面上,还能够像溜冰运动员一样在水面上优雅地跳跃和玩耍,因此常被称作“池塘中的溜冰者”。它的高明之处是,不管如何跑跳,既不会划破水面,也不会浸湿自己的腿。水黾在水面上每秒钟可滑行的距离相当于它身体长度 100 倍,这相当于一位身高 1.8m 的人以每小时 400 mile<sup>①</sup> 的速度

---

① 1 mile = 1.6093 km

游泳，是非常惊人的。正如英国作家贝洛克(Hilaire Belloc, 1870—1953)在诗中对水黾的赞美：“它在水面漫步，显得那么轻盈、敏捷、悠闲、逍遥，它使人们的奔跑为之逊色；又令你不由得目瞪口呆……”。



图 3-1 水黾在水面行走

正因为水黾拥有“轻盈、敏捷、悠闲、逍遥”的非凡水上奔走特技，从而引起了科学家和工程师们的极大兴趣，想尽力弄明白其内在的物理机制。研究水黾的这种水上漂的本领，本身就是一个系统工程，需要考虑很多复杂的影响因素。水黾能够在水上奔跑的主要原因就是它的腿能够产生很大的浮力。通过实验测量，人们发现水黾的一条腿就能够产生其体重 15 倍的支持力，是其腿能够排开液体体积的 300 倍！为何水黾的一条很细的腿能够产生这么大的力呢？下面我们分别从几个比较重要的方面来加以分析。

首先，由于水黾腿很细，远远小于毛细长度  $\kappa^{-1}$  的范围，因此液体的表面张力会起到主导作用。如图 3-2 所示，我们可以把水黾腿想

象成一根细长的棒，尽管它的密度大于水的密度，但由于比较细，所以仍然可以浮在水面上。

很显然，由于表面张力的存在，长棒周围产生了一个弯液面，这个弯液面的形状由拉普拉斯方程决定。根据经典的阿基米德定律，我们知道长棒所受的浮力与排开液体的体积成正比。如果不考虑图中弯液面的影响，长棒排开的水体积较小，它受到的浮力就小于其重力，所以就会下沉。所以对于很粗的密度大于水的棒，由于表面张力不起主要作用，是不可能浮在水面上的。但是如果考虑了弯液面的影响，那么阿基米德定律就可以写成

$$F = F_1(\gamma) + F_2(V) \quad (3-1)$$

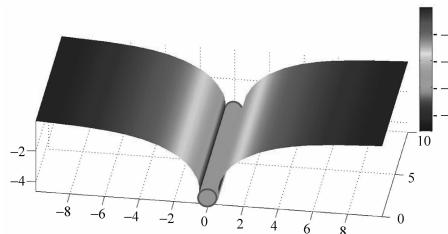


图 3-2 密度大于水的细长棒浮在水面上(彩图附后)

这说明，式(3-1)中的浮力分为两部分，第一部分是由表面张力贡献的分量；第二部分跟没有考虑弯液面影响时长棒排开的液体体积有关，也就是我们中学时学到的阿基米德定律计算出来的浮力。对于很细的长棒，上式中右端的第一项要大于第二项的数值。所以综合而言，这两部分浮力之和就要比没有考虑表面张力的影响时的数值大得多。因此，尽管棒的密度一般大于水，但是当棒非常细，小于毛细长度时，水提供的总浮力就会大于长棒的重力，长棒就会很自

然地浮在水面上了。

第二个原因就是，水黾的腿具有超疏水性质，这一点也非常重要。如果它的腿是亲水的，那么毫无疑问，它会立即沉入到水中。它的腿具备超疏水性质的原因在于两个方面：首先，水黾腿部的构成材料接近于蜡质，本身就具备疏水性，但还达不到超疏水的效果；所以超疏水的原因肯定跟腿表面的微结构有关。如图 3-3 所示，我们把水黾腿放在扫描电镜下观察，可以看到在其腿表面上覆盖着上万根细长的角质刚毛，这些刚毛大约与腿的轴线方向成  $20^\circ$  的倾角。大多数刚毛长约  $50\mu\text{m}$ ，直径大约为  $0.4\mu\text{m}$ ，由尖端到根部呈锥形，两根刚毛之间的距离约为  $10\mu\text{m}$ 。进一步增大电镜的放大倍数进行更为细致的观察，可以发现这些刚毛上面还非常有规律地分布着宽度和深度都是纳米量级的凹槽。类似于荷叶的表面，正是由于这种宏观、微观和纳观的多层次结构的存在，才使水黾的腿表面呈现出很强的超疏水性能，从而能够产生很大的浮力，所以我们就观察到它能够轻松自如地在水面上运动。

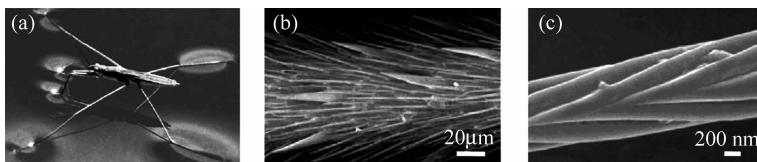


图 3-3 水黾腿的微纳米结构<sup>[14]</sup>（彩图附后）

第三个原因，我们运用上述的阿基米德定律，可以进一步计算具有不同截面形状的棒能够提供的浮力大小。经过分析发现，当棒的质量一定时，椭圆形或者其他不规则形状截面的棒会产生比圆形截面棒更大的浮力；同时，环形截面的棒也能够提供比实心的圆形截面

棒更大的浮力(图 3-4)。而水黾就像早就已经洞察了这一秘密一样，竟然神鬼莫测、恰到好处地利用了这两个人性。

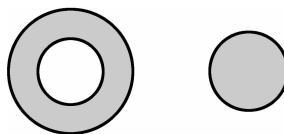


图 3-4 水黾腿横断面的形状

通过电镜观察可以发现,水黾腿的横截面果然不是实心的圆形,而是空心的环状结构,环形的外径大约为内径的 1.5 倍。根据刚才分析得到的结论,可以知道水黾腿长成这种结构也有利于提供相对较大的浮力。假设水黾腿提供生长的能量是一定的,当它长成环形时,环形的外半径会大于它长成实心圆形时对应的半径,所以排开的水的体积就大,产生的浮力也大。另外,从材料力学的角度来看,对于一定质量的材料,环状截面的腿比完全实心截面形状的腿具有更强的抵抗弯曲的能力,用力学的术语来说,就是“弯曲刚度”较大。当然,从另外的角度来看,把腿看做力学上的薄壳结构时,它的壁厚也不能过于小。如果壳壁太薄,就容易在自身重力作用下发生轴向的屈曲现象。这一问题也正是著名的力学家、火箭研究的先驱钱学森先生在 20 世纪 40 年代所研究的火箭筒体产生轴向屈曲的现象。因此,从低质量密度、高弯曲刚度以及能够提供较大浮力的角度来看,水黾腿部环形截面的形状是经过优化的;也就是说,它是故意长成这种结构的。

另外一个需要说明的问题如图 3-5 所示,就是水黾腿表面的刚毛压入水面过程的示意图。这些腿部的刚毛比较细长,因而具有一定的弹性行为。当腿未接触水面时,可以设想腿表面上的刚毛分布

具有轴对称的构型(图 3-5)；当整个腿压入水面时，刚毛会发生弹性变形而团簇在一起，从而形成图中所显示的不规则形状。这样，根据我们刚刚提到的两个发现之一，就可以知道这种不规则形状截面的腿以及刚毛，能够产生比规则的轴对称形状更大的浮力。

第四个原因，水黾的整条腿都具有弹性，能够在接触水面的时候发生弹性变形。如图 3-6 所示，一根细长的具有弹性的纤维压在水面上时，经过计算分析可知，它比起一根刚性的棒能够产生更大的浮力。所以水黾的腿往往不是刚度非常大，而是具备一定的弹性。

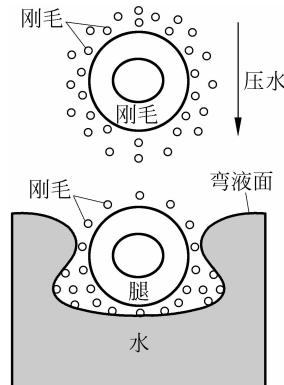


图 3-5 水黾腿的压水过程，其弹性变形增大了浮力

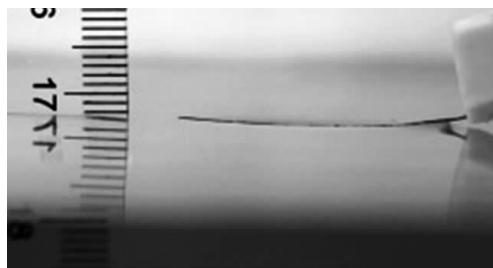


图 3-6 把一条弹性纤维压入水面示意图<sup>[15]</sup>

再仔细观察水黾的一根腿，发现它一般可以分为三节，通过两个可以转动的关节连接起来。如图 3-7 所示，当水黾的腿压入水面时，其腿部的关节能够调节整条腿的变形，使得腿的变形跟水面的形貌相一致，从而可以排开更多体积的水。由此可见，这种关节的转动以

及整个腿的弹性变形性质有助于水黾提高水面的承载能力。

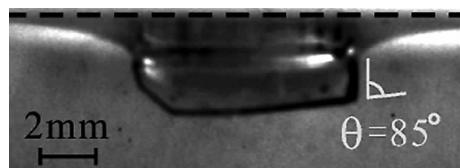


图 3-7 水黾腿压入水面时的关节变形<sup>[16]</sup>

综上来看,水黾这种生物,它的腿的结构性质已经经过了大量的优化。首先它的腿半径比较小,因此表面张力引起的毛细效应显著增强了腿的浮力。其次,腿的材料是疏水的,表面又长了很多刚毛,更进一步增强了其超疏水性。再次,腿的表面刚毛能够变形而适应水面的形状,同时腿的横截面形状为环形,这就增强了它的浮力大小和抗弯刚度。最后,腿部的弹性变形和关节的转动能够促使腿产生更强的浮力。正是由于这多种因素的协同作用,使水黾具备了产生超强浮力的能力,因而能够在水面闲庭信步。

当深刻理解水黾腿产生浮力的原因之后,就可以通过仿生学的办法制备水生机器水黾。如图 3-8 所示,为一个人工制造的机器水黾,可以在水面上实现自如的运动。随着这方面研究的深入,在不远的将来,这种机器水黾可有望应用于军事、探测、信息等领域。

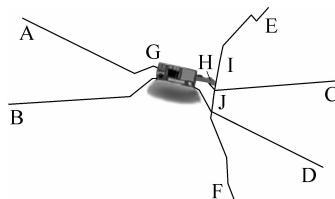


图 3-8 仿生机器水黾

### 3.2 水面承载能力最强的昆虫——蚊子

除了水黾之外，蚊子也是一种离不开水的两栖小型昆虫，它能够在水面上自由行走、起落、产卵和捕食，并且还能在空中实现高水平的飞行。蚊子的臭名昭著在于它那讨厌的吸血行为，能够给人类带来很多痛苦，同时也能传播疾病。

我们平常所见的蚊子，平均体重为 $0.002\sim0.003g$ ，身长为 $5\sim6mm$ ，有6条细长的腿，其中一对前腿长度为 $6\sim8mm$ ，一对中腿长度为 $8\sim10mm$ ，一对后腿最长，长度为 $10\sim12mm$ 。如图3-9所示，蚊子的每条腿一般都分为三部分，即跗节、胫节和腿节。

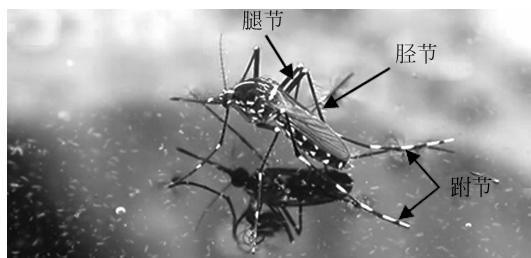


图3-9 蚊子的腿的三段结构(彩图附后)

蚊子具备非凡的在水面生存的能力，主要是因为它的腿能够产生很大的浮力，因此能够实现产卵以及水面起降等活动。鉴于此，我们定量测出了一条蚊子腿在水面上到底能够承受多大的浮力。实验原理如图3-10所示。

具体来说，就是将单根蚊子腿胶结到细钢针上，再一起固定到与