

# 昆虫飞行——非常规空气动力学

R Ennos

英国 York 大学生物系

许多证据表明,昆虫飞行的机理与飞机及直升机的机理大不相同。Zanker & Gotz<sup>[1-3]</sup> 测出了被系住的果蝇所产生的瞬时力,并发现这些力不能用常规空气动力学理论来解释。这些力也是这些果蝇使用不一般的方法来产生升力的证据。

在飞机稳态飞行时,空气在机翼上方流动比下方快。这时绕机翼周围有一纯环流。正是具有附体环流的机翼在空气中的运动产生了升力。可是,如果机翼从静止开始加速,那么它必须移动比它本身宽度长几倍的距离,才会有环流绕流机翼而产生足够的升力以使飞机达到稳态飞行。这一现象叫做 Wagner 效应。

对动物的飞行进行常规分析,通常将其翅膀当作固定的机翼处理。这些分析假设,每一时刻,具有相同姿态的每一翼截面都以相同的定常速度运动而产生相同的升力。于是总升力就以上述这些力对时间和空间积分而算出。对于滑翔来说,这样作的确是正确的。但是对于扑翼飞行 (flapping flight) 来说,翅膀的速度和姿态都在不断变化。在悬停飞行 (hovering flight) 的极端情形中 (图 1),翅膀在

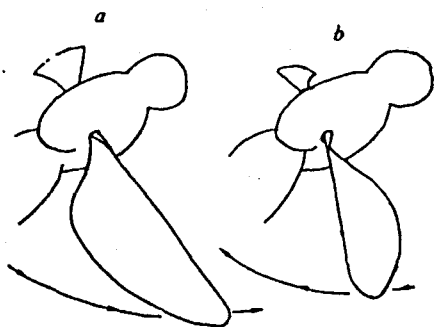


图 1 悬停昆虫的翅膀拍动,翅膀前后运动,在向下拍结束 (a) 和向上拍结束 (b) 之间翅膀的旋转大于 $90^\circ$

在一次拍动中仅走过几倍于翅膀宽度的距离,然后便作大于 $90^\circ$ 的旋转而朝相反方向运动了。在考虑 Wagner 效应问题时,这种“准定常”的假设对悬停的昆虫来说不大可能成立。近 20 年来,对昆虫自由飞行空气动力学的研究<sup>[4-7]</sup> 通常认为,由常规升力机理产生的力不足以支持和推动昆虫飞行。这一认识已被 Zanker & Gotz 的结果证实了。

此外, Zanker<sup>[3]</sup> 还研究了被系住的果蝇对视觉刺激 (这些视觉刺激的效果使果蝇

相信它们在作偏航 (yawing)、俯仰 (pitching) 或侧滚 (rolling) 运动) 的变化以及对吹过它们的气流速度的变化的补偿反应。果蝇翅膀拍击运动的反应在其自由飞行中会使果蝇自身稳定。而用常规动力学分析,果蝇翅膀拍击的变化所引起的反应却是在某些情况下使飞行更不稳定。所以这些昆虫一定使用了不同的机理来产生升力和进行机动飞行。

第一个非常规升力机理“拍击-挥摆 (clap-and-fling)”是 Torquell Weis-Fogh<sup>[4]</sup> 发现的。他注意到在小黄蜂的飞行中,



图 2 在“拍击-挥摆”过程中,翅膀的运动产生非定常力。各翅拍在一起 (a), 然后前缘先旋转 (b), 空气冲进空隙 (虚线箭头), 并且绕翅形成环流以开始下次拍击 (c)

各个翅膀总是在其向上拍动的顶点处拍到一起，然后开始旋转并以旋转后的形状在前缘处先分开（图2）。他提出在空气冲进翅膀分开时造成的部分真空中而形成附体环流，结果造成下次翅膀拍击时的巨大升力。这一效应已被实验证实，而且事实上是许多飞行动物在应用着的。例如，鸽子喧闹地起飞时所需的大升力便是由其翅膀背部拍击而产生的。

动物在开始拍动翅膀时是先旋转它们，看来这也会产生巨大的升力，甚至在翅膀分得很开的情况下也是如此。特别在翅膀旋转得很快并且一直延迟到翅膀改变其运动方向以前也会产生巨大升力。例如悬停的果蝇，其翅膀的旋转一直延迟到开始向下拍动之前，看来也能使它们产生巨大的升力，并且使它们拍动翅膀仅仅约 $50^\circ$ 便能悬停，对比起来其他大多数昆虫都需拍动 $120^\circ$ <sup>[5]</sup>。另一方面，飞行较高的果蝇，其翅膀前缘先向后轻拍，而在翅膀向下拍动结束时，在较弱的翅线处往往向下弯曲<sup>[1-3,6,8,9]</sup>。这将造成迅速的迟滞的旋转，从而使翅膀在向上拍击时产生巨大升力。

这种翅膀单独旋转可以造成环流及升力的机理还未完全得到了解，直到不久前这种现象尚未在实验上予以证实。Zanker & Gotz 用一个可连续纪录翅膀拍击时产生铅直方向力的传感器，将果蝇翅膀系在该力传感器上，从实验上证实了这种现象。他们终于显示出，果蝇产生的升力峰值不但在拍击-挥摆后在向上拍动到顶点处产生，而且还在翅膀单独旋转后在向下拍动到底点处也产生。

他们的这些结果有两个重要意义。第一，很显然，解决昆虫如何控制其飞行的问题将是极其困难的，即使我们发现了很大数目的肌肉怎样直接控制翅膀运动的细节，在我们对非定常空气动力学有了更好的了解之前，问题还是不能解决。第二，迫切需要研究非定常运动机翼的空气动力学。这样的研究不但可能澄清动物如何飞行的机理，而且还会帮助我们改进飞机的空气动力学设计；在机动飞行方面，昆虫及鸟类终归还是远比直升机或飞机更有能耐的。

#### 参考文献（9篇，略）

修建华译自：*Nature*, 344 (5 April 1990) : 491. (董务民校)

---

#### （上接第 285 页）

然而，对于不规则网格来说，我们得到的位移或在真实柱面之上，或在真实柱面之下，其实际形状由零膜应变来决定。因为弯曲表面必须与这种形状相协调，因而出现了附加局部弯曲，这就产生了闭锁。

为要改善这种情况，可以通过更高阶膜应变来更精确地描写非线性膜应变。其结果为，当 $P = 400\text{N}$ 时，误差仅为0.5%，而 $P = 1400\text{N}$ 时，误差仅为1.5%。

读者可以用这个准则试验自己体系中的单元，结果可以在 *BENCHmark* 上发表，以便对这个有趣特性的结果进行讨论。

胡雨村译自：*BENCHmark* (June 1991) : 28—29. (王克仁校)