

## “游泳”于沙漠中

(中国科学院物理研究所 厚美瑛 编译自 Yang Ding, Chen Li, Daniel I. Goldman. *Physics Today*, 2013, (11): 68, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

“日本叉牙鱼”(sandfish)又叫鳐鱼,是一种产于北太平洋的毛齿鱼科的无鳞鱼,多穴居于沙质或多泥的洋底。2013年11月份的 *Physics Today* 杂志上刊登了 *Swimming in the desert* 一文,文中从流体力学出发,以穴居于沙质中的鳐鱼为例,研究生物体在非固非液介质中的有效前进方式。这些研究将有助于在沙地上或星球表面上类似外星漫游者号或灾害现场的机器人的设计与操作。文章摘译如下:

生物通过自身变形和与环境相互作用来移动身体,是人们习以为常的一种现象。这样的运动挑战科学家对生物和物理系统动力学的理解。科学家目前取得的进展主要是在坚硬表面或流体(如空气和水)中的运动。但是,许多陆地的动物是在既不是理想固体也不是理想流体的表面上移动的,例如沙子。动物在像沙子或泥这样会变形的基底上

运动的流变学就更富挑战性了。沙子像其他颗粒物质一样,是由相互作用会产生能量耗散和排斥接触力的固体颗粒组成的集体。颗粒物质能像流体一样流动,也可以像固体一样保持形状。沙还是许多蛛形纲动物、爬行动物和哺乳动物的居所,它们在其表面迅速奔跑、追捕猎物。如图1所示,鳐鱼蜥蜴为躲避高温和其他食肉动物,甚至可以潜入沙内移动。

颗粒物质对于生物运动的响应,由于颗粒物质能通过形成复杂的力链网络支撑负载,是一种能表现出具有异质性密度和压力的可压缩流体,它对局部作用力的响应极其复杂,我们对之知道的尚不完全。

2009年, R. Maladen 等第一次用高速X射线成像技术记录10 cm长的鳐鱼 *Scincus*, 在沙中的运动情况,如图2(a)所示。我们发现,当它在沙表面以下时,鳐鱼在

沙中侧蹬它的双腿,像比它小的1 mm长的线虫 *C. elegans* 在粘性流体中游泳一样,通过身体从头部到尾部的正弦波动起伏向前游动。以体长/秒为计算单位,鳐鱼的前进速度大于线虫。鳐鱼每一波动的前进速度接近0.4体长/秒,是线虫速度的两倍。

在试图解释我



图1 鳐鱼

们的观测时所面临的问题是,没有办法计算鳐鱼与颗粒介质的相互作用。此外,我们也不清楚鳐鱼是在一种固体、液体、还是一种两者的复杂组合的介质中游泳。既然鳐鱼的运动看着这么像线虫,我们尝试将鳐鱼周边的颗粒介质考虑为一种流体,并将问题诉诸于流体力学。

描述流体运动的 Navier—Stokes 偏微分方程是一组复杂的非线性方程。六十多年以来,研究人员使用了简化的阻力理论模型(RFT)来模拟在低雷诺数( $Re$ )流体中波状和鞭毛推进运动,也就是说,在惯性力小于粘性力的流体中用了简化的RFT模型来描述其运动。这理论是基于假设作用于身体任一无穷小体积元的垂直与平行力  $F_{\perp}$  和  $F_{\parallel}$  与身体其他单元的位置和运动无关。需要注意的是,物体要能向前进,  $F_{\perp}$  与  $F_{\parallel}$  的比值必须大于1。在低雷诺数时, Navier—Stokes 方程的惯性项可以忽略不计,因此,在游泳速度恒定时,所有作用于运动物体的外力总和可视为零。在此简化条件下,生物体的游泳速度可以用生物体的波动速度来计算。

如图2(b)中圆柱体所示,我们引入了一个圆柱体代表鳐鱼身体的一小段,从而来实验确定相对于前进方向取向的垂直与平行力  $F_{\perp}$  和  $F_{\parallel}$ 。对于低雷诺数流体,力可以从理论上计算得到。结果显示出一些有趣的不同于流体中低雷诺数运动结论,例如,在

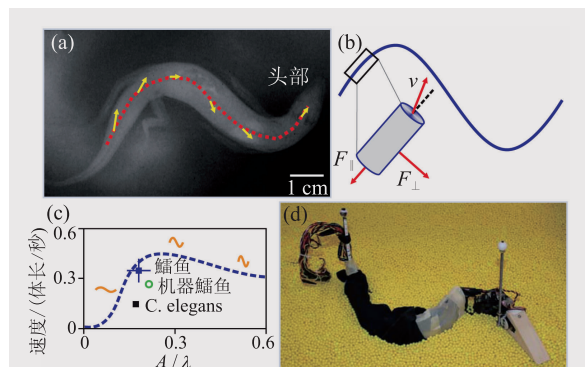


图2 (a)鳐鱼在玻璃颗粒中游泳的X射线俯视图。鳐鱼头部在照片的右侧,黄色箭头为身体元的估计速度;(b)RFT模型的体元力  $F_{\perp}$  和  $F_{\parallel}$  与速度  $v$  的关系;(c) RFT模型预测的泳速与  $A/\lambda$  的关系(其中  $A$  为振幅,  $\lambda$  为波长);(d)实验用的机器鳐鱼

流体中低雷诺数运动时力与速度成正比，但在颗粒介质中，在鳐鱼的运动速度小于或等于5 cm/s时，力对速度不敏感。力与速度无关的原因是，在鳐鱼的运动速度惯性力可以忽略不计时，作用在它们身上的力主要来源于它们身体各部位与沙颗粒、以及沙颗粒之间的摩擦。另一个有趣的差异是，在流体中，作用于小生物体的横向拖动力不依赖于其在表面下的深度，但在颗粒介质中，这种力类似于静水压力，是正比于深度的。

我们发现， $F_{\perp}$ 在低雷诺数流体中运动与在颗粒介质中运动有相似的行为； $F_{\perp}$ 为身体柱状单元在颗粒介质中相对于运动速度的柱体轴线

取向函数。但 $F_{\perp}$ 的行为则不同，攻角(柱体轴线和速度的夹角)小时，力 $F_{\perp}$ 在颗粒介质中比在流体中上升得快。导致这种不同行为的机制尚不清楚，但我们推测，它与表面附近颗粒堆积近似固体有关。

当我们将所有作用于鳐鱼上的力加起来，将合力设为零时，就会惊讶地发现，RFT模型对鳐鱼速度的预测准确在20%以内，这样的准确度表明，我们对鳐鱼在颗粒流体中游泳的认识是正确的。颗粒介质的 $F_{\perp}/F_{\parallel}$ 比值较大则解释了鳐鱼每一波动的身体前进长度相较于线虫更大的事实。

该理论还预测了由身体波动幅

度增加而加大的推力与随之而来速度减小之间存在一种制衡。这种折衷最终给出以每单位距离最小能耗达到最高泳速的最佳身体波动。如图2(c)所示，鳐鱼已接近RFT预测的最佳泳速。我们还用机器鳐鱼(见图2(d))测试了在颗粒介质中的RFT模型。由于机器的不连贯结构，它没有鳐鱼的游泳效率。但是，一旦将该结构考虑进去，RFT模型就能很好地预测机器人的最佳运动状态。

将来结合计算机模拟的颗粒介质实验研究可能可以进一步揭示为什么RFT行之有效，它又在什么情况下失效。这样的研究也可能提供普适性的力关联及其机理。