

网站地图 (<http://www.imech.cas.cn/serv/wzdt/>) |

联系我们 (http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205_3698646.html) |

所 (<http://oa.imech.ac.cn>) | English (<http://english.imech.cas.cn/>) |



中国科学院力学研究所
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

(<http://www.imech.cas.cn/>)

Search



当前位置：首页 (../..../..../) > > 科学传播 (../..../..../) > > 力学园地 (../..../..../) > > 科普花园 (../..../..../)

【科普花园】从“打水漂”游戏谈起——关于入水的一个力学问题

作者：王一伟 王宇飞 2020-09-01 08:20

【放大 缩小】

英国诗人威廉·布雷克在诗歌《天真的预言》中，写到：“从一粒细沙中窥探世界，在一朵野花里寻觅天堂”。的确，真正的发现来源于生活和自然，身边的事物往往蕴藏着无穷的奥妙。

每个孩子都玩过打水漂的游戏。他们在小池塘边拾起一块扁平的石头或瓦片，侧着身，挥动手臂用力将石头甩到水面上。那石子就在水面上不断俯冲和跃起弹向池子的尽头，在平静水面上掀起一朵朵白色的浪花（如图1）。有时石头能弹起三四次甚至十几次，但若是将一块沉重的石头扔在水里，出现的只有沉闷的“扑通”声和四溅的水花，一次也弹不起来。



图 1 打水漂照片（来自网络）

“打水漂”过程中的流动特征与物体形状、姿态、入水角度、初速度乃至旋转、表面特性等多种因素相关。Christophe Clanet教授给出了碟形石块（其平面的法线方向为 \mathbf{n} ）以速度 \mathbf{v} 打水漂时的梦幻攻角^[1, 2]。如图2所示，平板以 20° 弹道角的姿态撞击水面，碰撞时间最小，因而能量损失最小，能够得到最佳的弹跳效果。但是，如果弹道角大于 45° 以后，物体就不会再产生弹跳（No skipping）而开始进入水面了。

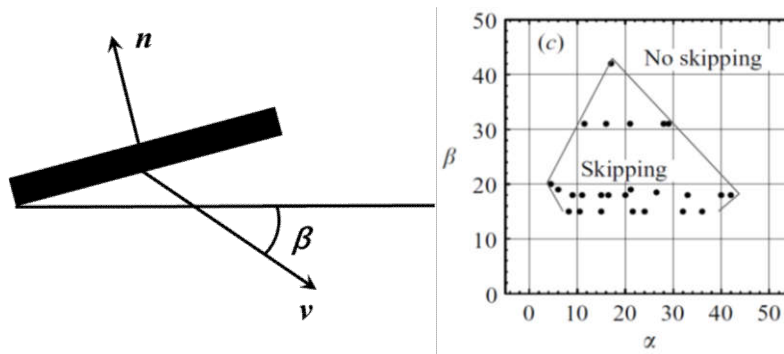


图 2 碟形鹅卵石打水漂的力学模型及分析^[1]

（左图：力学模型。其中弹道角 β 为石块入水速度方向与水平面的夹角；右图：分析结果）

“打水漂”可不仅仅是孩子们玩的游戏，它也曾多次得到重要的实际应用。在第二次世界大战时期，盟军希望攻击德国鲁尔工业区内的水坝，但是在严密防守下通常的高空投弹和水中鱼雷攻击都一筹莫展。英国发明家威利斯依据打水漂现象，发明了一种弹跳弹，飞机投下的炸弹在水面上跳过防御工事后在大坝上爆炸，最终盟军采用这种方法成功摧毁了德国境内的三座大坝（如图3）。

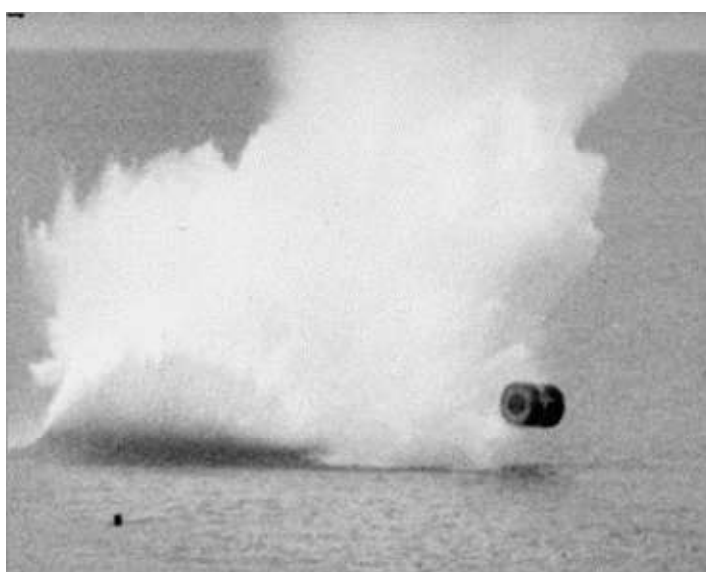
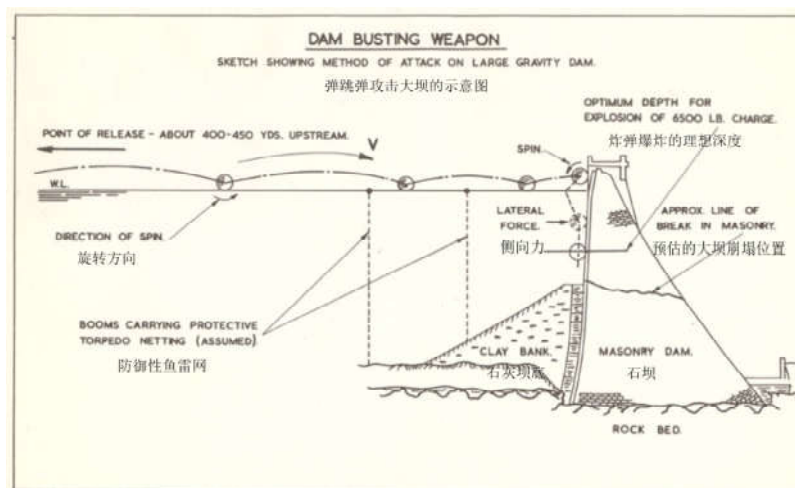


图 3 威利斯的弹跳弹设计原始草图（上）及使用效果照片（下）

如前所述，当入水弹道角大于 45° ，Clanet教授发现，石块会直接进入水转入水下运动阶段。从力学的角度来看，物体以一定速度穿越水面后的入水过程，主要包括三个阶段^[3]：接触瞬时的冲击、自由面大变形的开式空泡、开式空泡闭合后的水中运动。前者主要是冲击动力学问题，而后两方面则表现为水动力与刚体运动甚至结构变形的耦合。如图3所示，一个小球冲击水面时会导致径向射流（radial jet）的产生；下落过程中会导致水体的自由表面变形，并形成一个大开式空泡（即所谓的“开式空泡”），而被挤出的水还形成一个飞溅的皇冠（splash

crown)；随着小球继续下落，上端溅出物闭合成圆拱形 (splash dome)；开式空泡闭合后，空泡在水体深处发生闭合 (deep seal) 并分别向上、下各产生一股垂向射流 (vertical jets)；最终，在自由表面附近发生表面闭合 (surface seal)，闭合处亦有一股垂直向下的射流形成。

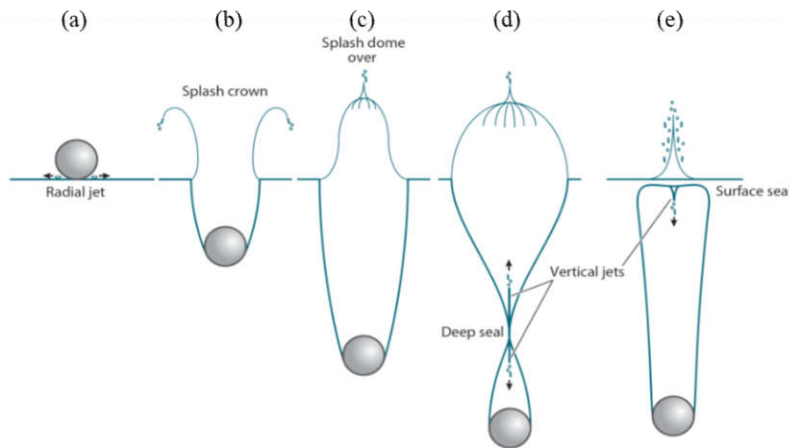


图4 小球入水的典型过程^[3]

(a) 入水冲击和射流生成；(b) (c) 形成与空气联通的开式空泡和皇冠形飞溅；(d) 空泡发生深闭合并形成垂向射流；(e) 空泡发生表面闭合

由于开式空泡条件下，物体与水通常只有头部小面积接触，流动约束反力非常小，因而姿态通常不稳定，并可导致物体在水中的弹道剧烈偏转，使得子弹的入水深度非常小。这个现象有不少实际工程的应用，例如水下弹头的弹道稳定问题。美国麻省理工学院 (MIT) 的Tadd Truscott教授通过优化弹头的形状，使子弹始终贴在空泡表面的一侧从而获得稳定弹道^[3]。如图5所示，常规的标准子弹 (Standard bullet) 进入水中，往往会发生旋转，并使得弹道失稳。如果对其形状进行一定的修改，譬如加装一个逐渐变细的尖头 (tapered tip) 使其形状优化，这样入水后就不会发生失稳现象了。实验和理论研究都证实了这点。类似的工程问题还包括水上飞机的着陆，航天器水上降落和回收等等。

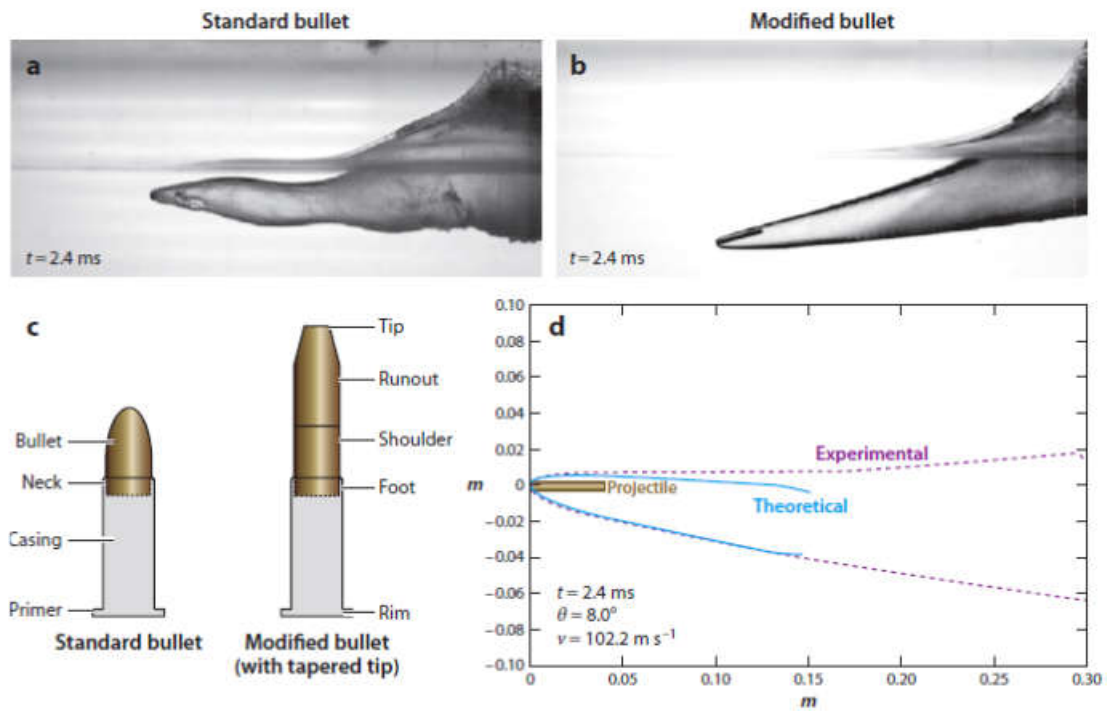


图 5 针对入水弹道稳定性的子弹形状优化

(a) 常规子弹入水弹道失稳旋转；(b) 优化后子弹弹道保持稳定；(c) 子弹形状对比；(d) 优化子弹入水空泡的理论与实验分析

其实，自然界和生物界也有形形色色的入水问题。翠鸟、鸕鸟等平时在空中飞行，发现猎物后会以近乎垂直的角度突然俯冲下来进入水中，靠惯性入水抓捕鱼类。为了尽可能在入水后保持更快的速度、潜入更深的水中以提高捕食到鱼类的机会，这种以鱼为食鸟类通常具有尖锐的喙和细长的脖子，而且入水前翅膀会夹紧使身体像箭一般刺入水中。这就是最大限度的优化自身入水的水动力学特性。入水之后通过调整翅膀的伸展来控制姿态，迅速捕食猎物。翠鸟入水通常只会激起非常小的水花（如图6），据观察，塘鹅入水最高速度甚至可达到36m/s。然而，为了生存，这些鸟类不得不挑战自身的极限，巨大的冲击和水动力带来的结构响应和流固耦合就成为了威胁自身安全的重要问题。科学家非常关心这些水鸟如何在高速入水的过程中不受到伤害。一项发表在《美国科学院院报》的研究^[4]通过对一种北方塘鹅（northern gannet）的标本进行入水实验，发现海鸟在入水之前会努力收缩肌肉，通过肌腱保持骨头的稳定性使脖子伸直，以降低入水产生的巨大冲击载荷导致的受伤风险。



图 6 翠鸟入水过程照片

(左图：入水前空中姿态拼叠；右图：入水后姿态控制及空泡形态)

科学家们还建立了海鸟入水的安全速度理论预测模型并能够为人的活动提供参考。不过，长期训练的运动员也已经能够通过合理的入水姿态使得激起的水花最小，看起来与翠鸟的照片也有几分相似。如图7所示的跳水比赛运动员入水照片，他们在入水前都会控制手部姿态，以降低初始皇冠型飞溅；而在入水后都要控制身体姿态，以降低气泡闭合射流形成的水花。这样，才能取得理想的成绩。

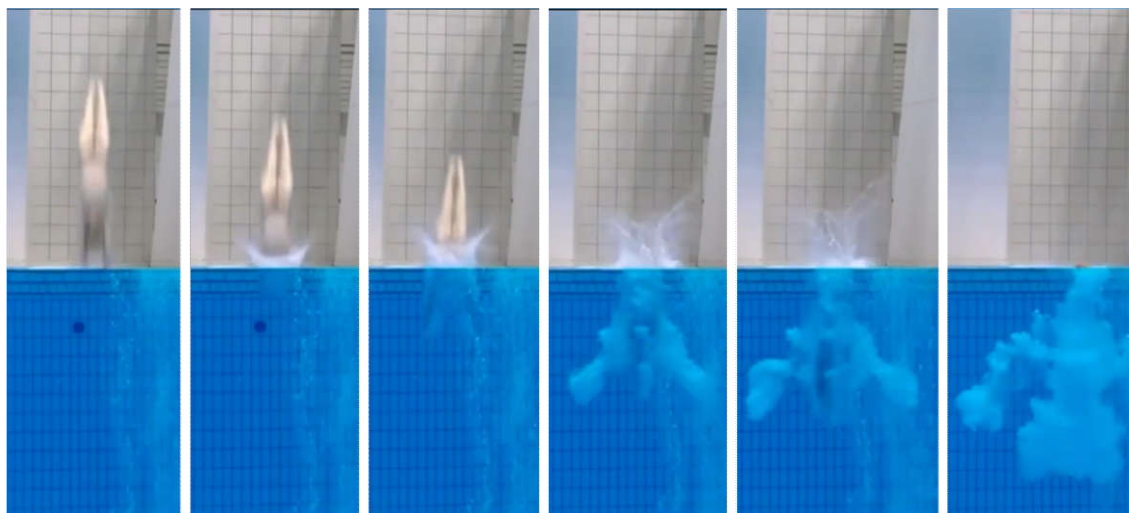


图 7 跳水比赛运动员入水照片

入水问题有广阔的研究范围和应用前景，其研究热度持续近一个世纪而依然不减。爱尔兰皇家科学院院士Frederic Dias等指出，由于液体运动在静止的结构物上产生抨击，比如海浪对堤坝或海上平台的拍打和撞击，本质上和入水也是同一类问题^[5]。著名的多相流体力学专家Andrea Prosperetti等提出不同大小的雨滴入水会产生相似主频的声音，而开式空泡断裂形成的小气泡溃灭则是最主要的原因^[6]。关于液滴入水的各方面研究还有很多，目前关于入水的基础研究和工程应用中，人们都还有许多工作需要完成。例如高速入水条件下低压区的水会发生空化相变，与侵入气体的复杂流场结构之间的相互作用机制仍不清楚；工程上仍需要改进结构设计，以降低入水的巨大冲击载荷并实现航行姿态的稳定控制。人们一直梦想的可以自由穿梭于空气和水中跨介质飞行器，目前仍然只有少量的概念样机，例如英国帝国理工学院研制的“塘鹅”入水飞行器，这是一种仿生结构（参见图8）。

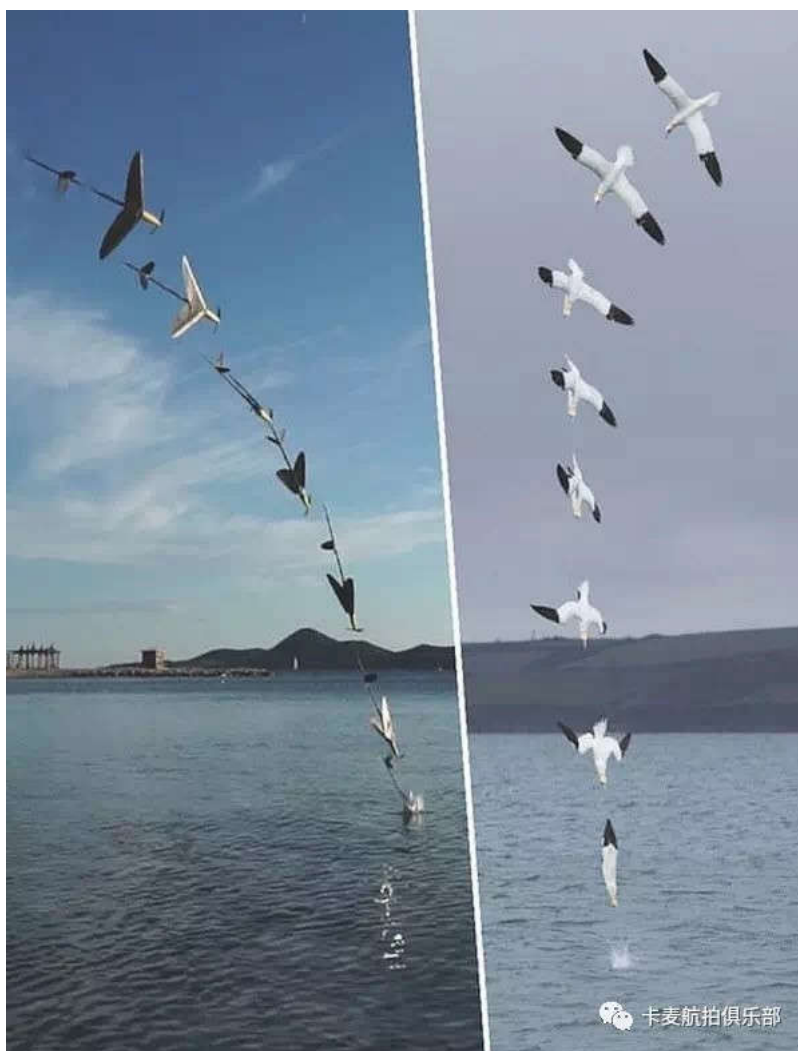


图 8 英国帝国理工学院研制的AquaMav（塘鹅）跨介质飞行器样机

（左图：样机入水照片；右图：真实塘鹅入水照片）

老子的《道德经》中讲道，故恒无欲也，以观其眇妙；恒有欲也，以观其所噉。意思是说，平常要处于一种“无欲”的状态，去观察大自然和生活中有趣的问题；然后再进入“有欲”的阶段，通过人本能的求知欲来寻找现象背后的奥秘。所以，如果我们能够善于在日常观察中寻找科学发现契机，采用严谨认真的分析归纳出一般规律，就能够更好的运用这些规律解决实际问题。

参考文献

[1] Clanet C, Ersen, Couet . Secrets of success in stone-skipping . *Nature* 2004 421 :6969 :29-29.

[2] Rosellini, Ersen, Clanet C et al. Skipping stones. *Journal of Fluid Mechanics* 2005 543:133 -146.

[3] Truscott T, Topp, Elden . Water entry of projectiles. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2014 46:355-388.

[4] Chan, Croson M, Straker et al. How seabirds plunge-dive without injuries. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2016. 113: 12006-12011.

[5] Dias, Hida, Lia M. Slammin : recent progress in the evaluation of impact pressures. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2018 50: 243-273.

[6] Prosperetti, Uzi . The Impact of Drops on Liquid Surfaces and the Underwater Noise of Rain. *Annual Review of Fluid Mechanics* 1993 25:533 -602.



中国科学院 (http://www.cas.cn)
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

中国科学院力学研究所 版权所有 京ICP备05002803号 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮编：100190

(http://bszs.conac.cn/sitename?

method=show&id=081D2D6355AD574EE053022819ACCBA7)

