

# 仿生学在航空发动机领域的应用

## Application of Bionics in Aero Engines

■ 孙培培 李雯 胡文颖 / 中国航发研究院

虽然仿生学在航空发动机领域的应用尚处在起步阶段，但在航空发动机减阻降噪和减摩抗磨方面已经展现出较为广阔的应用前景。

**仿** 生物学是研究、模仿生物系统，或具有生物系统特征方式，亦或类似于生物系统工作方式的系统科学。通过模仿动植物的形态、结构、功能和行为，从中得到启发，并在此过程中不断创新，最终得到接近或超越生物原型的功能，从而解决人类面临的技术问题，这就是仿生学的思想。这一思想在生物学和技术之间架起了一座桥梁，通过再现生命现象的原理，找到解决工程问题的途径和方案。仿生学的发展与人类认识自然的水平和层次直接相关。人类对生物功能的模仿已经从最初的宏观尺度深入到微观结构和化学结构。随着人类对生物认识的不断深入，以及新材料、新工艺、新测试方法的不断发展，仿生学也进入到一个全新的发展阶段。目前，科研人员正在不断探索，试图运用仿生学原理来解决人类在日常生产生活中遇到的实际工程问题，并在仿生流体减阻降噪、材料表面自清洁、自修复、抗磨蚀、抗疲劳，以及增效等方面初步实现了工程化应用。

航空发动机是尖端科技的综合体现，是使用要求与条件最为严苛的动力装置。随着高推重比、低油耗、高可靠性、长寿命的现代先进航空发动机的发展，其零部件的工作条

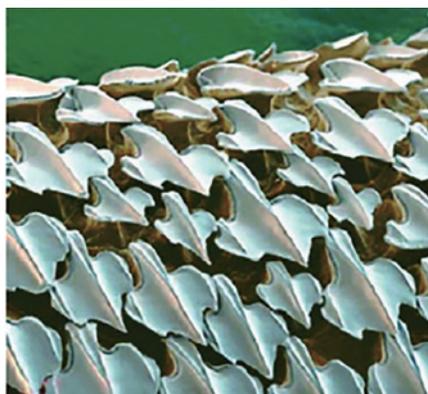


图1 鲨鱼皮体表沟槽形态和具有仿生表面贴膜的飞机

件变得越来越苛刻。将仿生学的先进思想应用到航空发动机的关键零部件中，可能会是一种有效的解决问题的途径。

### 仿生学的典型工程化应用

瑞弗 (W.E. Reif) 等人观察到鲨鱼体表存在许多规则分布的盾鳞，鳞片上存在着沿顺流方向排列的V形沟槽，这种结构有助于鲨鱼在水中快速游动。根据这一发现，美国国家航空航天局 (NASA) 兰利中心在1978年率先开展了鲨鱼皮的仿生研究，将大量 $2.54\text{mm} \times 10.2\text{mm}$ 的凸状物粘贴在机身表面，使机身表面阻力减少了 $6\% \sim 8\%$ 。此外，空客公司在试验中将A320试验机约70%的表面贴上具有沟槽结构的薄膜，达到了节油

$1\% \sim 2\%$ 的效果，如图1所示。

西日本铁路公司在制造新一代新干线列车时，列车的运行速度超过 $320\text{km/h}$ ，但当列车高速通过狭窄的车道时会产生声爆效应，所产生的噪声超过了环境保护标准。设计人员从翠鸟的流线型鸟嘴得到启发，对子弹车头进行重新改造，使其直径逐渐增加，以便让气流顺畅向后流动。实践证明这种列车的车速比起原有设计提升了10%，电力消耗降低了15%，而噪声水平也有了显著下降，如图2所示。

吉林大学根据穿山甲鳞片的磨粒磨损具有明显方向性的特征，研制了仿生耐磨轧辊，如图3所示，根据蚯蚓生物体表微观耐磨通孔结构，研制了仿生耐磨活塞缸套，如图4所示。



图2 翠鸟嘴和500系列子弹列车



图3 穿山甲背板形态及仿生耐磨轧辊



图4 蚯蚓体表形态及仿生耐磨活塞缸套

## 仿生学在航空发动机领域的应用

### 沙丘驻涡火焰稳定器

仿生学在航空发动机上最典型的应用就是沙丘驻涡火焰稳定器，如图5所示。1981年，北京航空学院（现北京航空航天大学）的高歌教授提出了新的燃烧室火焰稳定性准则，并成功研制了沙丘驻涡火焰稳定器，提高了燃烧效率与火焰稳定性，降低了流体阻力和振荡损失，大幅度提高了航空发动机的合格率。而设计这种稳定器的灵感正是来源于沙

漠中新月形沙丘——无论风力大小，这种沙丘依然保持其原有的月牙形状。这种沙丘驻涡火焰稳定器既适



图5 新月形沙丘形态及沙丘驻涡火焰稳定器

用于航空发动机，又适用于工业锅炉和船舶等。

### 仿生减阻降噪

减小阻力和降低气动噪声技术是流体机械设计的关键技术，可以为机翼、叶轮机、螺旋桨等的翼型设计开发提供理论和实践依据。

美国宾夕法尼亚州西彻斯特大学的菲施（F. E. Fish）教授通过考察飞鱼的鳍和身体尺寸，研究了形态参数的变化与空气动力学性能的关系。基于仿生学原理，菲施提出一种具有高升力、低阻力特性的仿生翼型设计。此外，菲施模仿座头鲸胸鳍的前缘锯齿状凸起，设计出前缘具有凹凸变化的叶片，可以提高叶片的升力，这种特殊结构也被用于风力发电机叶片和飞机机翼的设计，如图6所示。

吉林大学孙少明博士以生物耦合特征研究为基础，应用逆向工程研究方法，量化了长耳鸮的鸟翼形态与构形耦合消声降噪特征，重构了长耳鸮鸟翼三维实体模型，建立了长耳鸮鸟翼耦合降噪特征的主耦元及次主元仿生模型。并基于计算流体力学及声学理论，进行了仿生模型气动声场有限元模拟分析，探讨了长耳鸮鸟翼表面耦合消声系统的降噪机理。研究结果发现：耦合仿生非光滑形态及特殊翼



图6 座头鲸胸鳍及具有凹凸变化的涡轮叶片

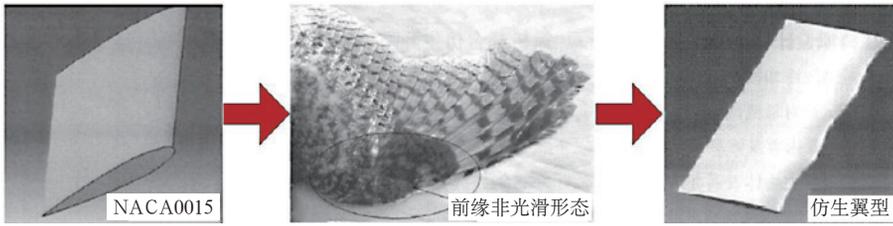


图7 基准翼型与仿生翼型设计

型构型能够有效延缓翼型绕流场边界层分离，并减弱翼型表面流体压力脉动，进而减少声能产生。根据生物耦合降噪特征，孙少明博士以标准翼型NACA0015为基准，进行前缘非光滑改型设计，建立了耦合降噪仿生前缘非光滑形态翼型模型，如图7所示。

西安交通大学的刘小民等人也开展了流体仿生减阻降噪方面的研究。他们利用逆向工程方法提取苍鹰尾缘非光滑形态的降噪特征元素，建立了仿生叶片结构模型，如图8所示。采用基于马格林斯基(Smagorinsky)亚格子应力模型的大涡模拟，结合基于Lighthill II理论FW-H方程，分别对仿生尾缘锯齿叶片和标准叶片的流道模型进行了三维流场及声场的数值计算。结果表明：仿生尾缘锯齿结构叶片的总A计权声压级比标准叶片降低了9.8dB；叶片尾缘锯齿结构可以改变流场噪声峰值的分布规律，从而降低了噪声峰值，且大部分频率范围内的气动噪声均有所降低；仿生尾

缘锯齿结构可以改变各截面尾迹涡的脱落位置，从而增大了涡心之间的距离，抑制了脱落涡对尾迹流动



图8 苍鹰翼形态与仿生叶片锯齿形结构

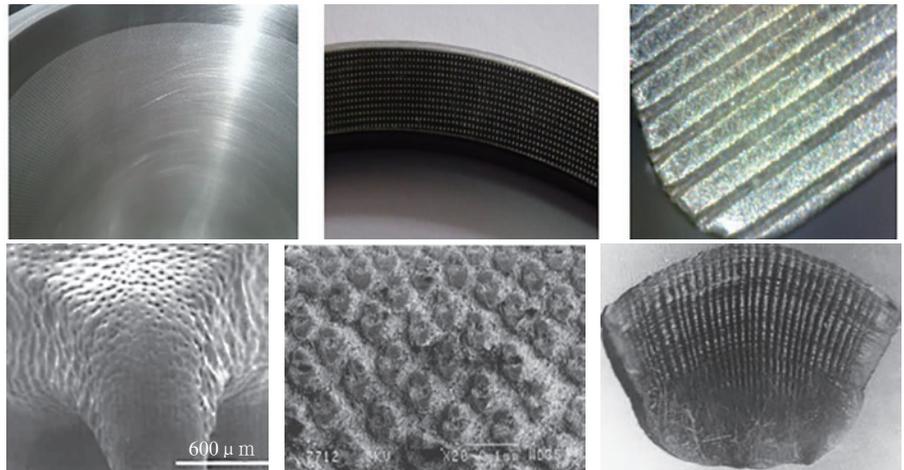


图9 仿生表面织构技术应用

的扰动，进而减小了叶片表面的非定常压力脉动和尾迹涡引起的气动噪声。

### 仿生抗磨减摩

通过减小摩擦实现节能正成为摩擦学界面临的越来越紧迫的任务，同时实现摩擦的主动控制也是摩擦学研究的终极目标。为此，研究人员在发展减摩技术方面做出了巨大的努力且有所突破，并在基础研究中努力研究摩擦产生的机理，力图为减少和控制摩擦提供理论基础。近年来，利用仿生摩擦学提出的表面织构技术已成为摩擦学领域的一个研究热点，并在活塞缸套、滑动轴承、密封圈、汽缸、导轨等机械零部件上得到了大量的应用（如图9所示），起到改善表面润滑状态和提高抗磨减摩能力的作用。

早在20世纪60年代, 汉密尔顿(Hamilton)等研究发现不规则微凸体能够起到提高摩擦副表面润滑膜承载能力的作用。各国学者已经证实, 摩擦副表面并非越光滑越好, 具有一定粗糙度能够存储润滑剂, 使摩擦副表面更容易形成持续的润滑膜, 从而减少摩擦副表面间的固相接触, 达到减小摩擦磨损的目的。通过仿生织构技术来优化摩擦副表面的微观几何形貌, 可改善零件的摩擦特性、降低摩擦因数、提高承载能力。这些织构化的表面具有多重作用: 表面微小织构可以作为蓄油池, 保证在挤压的情况下, 输运或释放蓄含的润滑液, 使之仍然弥散在接触区形成混合膜润滑; 表面微小织构可以吸附磨损下来的微粒, 从而抑制磨损和犁沟摩擦; 当微小织构设计合理、密度足够时, 还可以提高表面对润滑液的润湿性, 有利于润滑液膜的形成; 在较高的摩擦速度、充足的润滑液条件下, 表面织构可以作为流体动力高压囊, 产生流体动力压差, 从而减小摩擦阻力。

例如, 生活在新疆塔克拉玛干沙漠的巴基斯坦沙漠蝎子能够在流沙里自由穿梭, 而体表不受到任何

损伤。沙漠蝎子背板由几丁质材料构成, 且随机分布着一些凸包颗粒, 背板之间由节间膜连接, 这些特征均能有效降低其体表的冲蚀磨损。研究人员根据沙漠蝎子特征, 制备环状、沟槽状、微米团簇仿生微织构表面, 如图10所示, 嵌填在微形貌中的固体润滑剂, 在摩擦过程中不断释放, 形成均匀弥散、连续致密的自润滑膜, 实现表面承载、润滑强化的有机统一, 可有效改善抗高温微动磨损性能。

目前, 应用在摩擦磨损领域的仿生微织构表面大致可分为三种形式: 一是单纯微织构表面抗磨损, 研究人员在摩擦副表面制备不同形状的仿生非光滑表面形态, 探讨最优的微织构分布方式、织构加工距离和微织构深度, 使得摩擦副润滑性能最强; 二是将固体润滑与微织构表面相结合的织构表面自润技术, 将固体润滑剂通过涂或镀等方法在织构化表面制备固体润滑膜, 该技术不仅发挥了固体润滑剂的良好润滑性能, 而且发挥了表面微凹坑的储存润滑剂和捕获磨粒的功能, 可以显著改善摩擦副摩擦磨损性能; 三是采用多种润滑方式的微织构复合润滑技术, 在摩擦副表面采用固

体润滑和液体润滑复合的新型润滑技术, 即双重润滑系统, 对于某些要求日益增长的领域极具应用潜力。研究表明: 相比单一的润滑剂, 将固体润滑剂和液体润滑剂相结合的抗摩擦性能得到显著提高。

## 结束语

流体中的仿生表面减阻研究, 主要以鲨鱼等水生动物为主要仿生对象, 以飞行动物为仿生对象的研究开展得很少。仿生降噪研究, 主要展开的是以猫头鹰等飞行动物为仿生对象的非光滑边缘形态降噪和耦合仿生边缘降噪, 同时也进行了棱纹等仿生非光滑表面形态降噪。但在航空发动机领域, 仿生表面减阻离实际的工程应用还有一段距离, 还需要大量的基础与应用研究。

仿生学减摩抗磨技术依然处在基础研究阶段, 在航空发动机领域尚无应用。但根据前期的基础研究成果可以看出, 无论是采用单纯微织构表面抗磨损技术, 还是将固体润滑与微织构表面相结合的织构表面自润技术, 抑或是采用多种润滑方式的微织构复合润滑技术, 均可起到减摩抗磨的作用, 若能应用在航空发动机发生高温微动磨损的部位, 如榫头—榫槽、花键、轴承衬套等, 必将起到重要的作用。

综上, 仿生学在航空发动机领域的应用尚处在起步阶段, 沙丘驻涡火焰稳定器是其最典型的应用之一, 减阻降噪及减摩抗磨是具有广阔应用前景的两个方向, 在工程应用方面有望取得突破。

**航空动力**

(孙培培, 中国航发研究院, 高级工程师, 从事机械系统专业摩擦学方面研究)

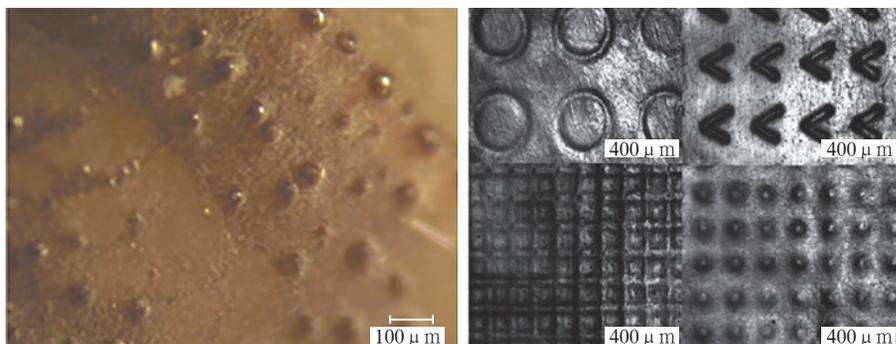


图10 沙漠蝎子背板及仿生微织构表面