

文章编号: 1674-8190(2024)06-027-12

仿生技术在航空工程中的应用进展

高怡宁, 冯军, 艾俊强

(航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 仿生学是一门通过模仿自然或具有表征自然系统特性的系统科学。将仿生技术应用于航空飞行器的设计, 对于大幅提升现有航空器的气动性能、减轻结构重量等问题, 提供了一种新的原理和技术支撑, 具有广阔的应用前景。本文首先基于飞行器性能提升需求, 对仿生技术在航空工程中的应用方向进行分类, 梳理并总结了仿生学在飞行器气动形态、气动减阻降噪、仿生结构布局及仿生轻质结构等方面的仿生物原型、典型特征及仿生功能; 然后综述了飞行器气动仿生、飞行器结构仿生等方面的应用进展; 最后展望了仿生技术在飞行器上的潜在应用方向, 包括仿生增升减阻综合设计、跨尺度多层次仿生轻量化综合设计、仿生结构功能一体化集成设计等, 为仿生技术的航空应用提供参考。

关键词: 仿生学; 生物原型; 仿生形态; 减阻; 降噪; 轻质结构; 航空工程

中图分类号: V219

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.03

Application progress of bionic technology in aeronautical engineering

GAO Yining, FENG Jun, AI Junqiang

(AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Bionics is a systematic science that imitates or characterizes natural systems. The application of bionic technology in aircraft design can provide a new principle and technical support for the improvement of aerodynamic performance, reduction of structural weight, which has a broad application prospect. In this paper, firstly, based on the demand for improving aircraft performance, the application of bionic technology in aviation engineering is classified, and the bionic biological prototypes, typical features, and bionic functions of bionic technology in aerodynamic morphology, aerodynamic drag reduction and noise reduction, bionic structural layout, and bionic lightweight structures of aircraft are summarized. Then application of aero-bionics and structure bionics of aircraft is overviewed. Finally, the potential application direction of bionic technology in aircraft is prospected, including comprehensive design of bionic lift and drag reduction, multi-scale and multi-level bionic lightweight design, integrated design of bionic structure and function, etc., which provides reference for the application of bionic technology in aeronautical engineering.

Key words: bionics; bionic prototype; bionic morphology; drag reduction; noise reduction; lightweight structure; aeronautical engineering

收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-10-08

基金项目: 国防科技战略先导计划(19-ZLXD-04-12-05-200-01)

通信作者: 高怡宁(1989-), 女, 硕士, 高级工程师。E-mail: gaoyin@avic.com

引用格式: 高怡宁, 冯军, 艾俊强. 仿生技术在航空工程中的应用进展[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 27-38.

GAO Yining, FENG Jun, AI Junqiang. Application progress of bionic technology in aeronautical engineering[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 27-38. (in Chinese)

0 引言

随着航空装备的不断升级换代,增加飞行升力,减小阻力,减轻飞行器结构质量,提高舒适性与安全性,降低能耗、噪声及环境污染,是航空技术发展的主要趋势,也是飞机设计师追求的目标。虽然人类模仿鸟类设计的飞机无论在速度、高度和飞行距离上都远超过了鸟类,但现代飞机还远没有鸟类那样轻巧、灵活、高效、低能耗。传统构型航空飞行器包括固定翼和旋翼类,飞行器主要是对飞行生物宏观气动或形态的模仿和提升,采用刚性结构来实现承载。这种依据整体宏观空气动力学视角的传统飞行器设计理论,使得飞行器增升、减阻、降噪、减重等性能提升已经逐渐接近极限,导致基于当前相对成熟的气动/结构设计方法对航空飞行器整体性能的突破性提升遇到了技术瓶颈。

仿生学是将工程技术与生物科学结合起来的交叉学科。自然界的动物和植物在几百万年的自然进化中,结构特性趋于完美,具有最优化的结构特点、灵活的运动特性、良好的适应性和生存能力,形成了一套自身适应环境的巧妙生物机制^[1]。通过分析生物结构和功能实现机制,从自然界生物中获取设计灵感与参考,并将生物学原理应用于人类所从事的技术领域,所得到的技术方案不仅能解决技术问题,更能适应自然需求。仿生技术在航空工程中的应用,不仅能有效提升飞行器的性能,也为飞行器设计提供了新思路。纵观飞行器的发展历程,人类飞行梦想及其实现灵感来源于鸟类的自由飞行,从古人制作木鸢、风筝,到15世纪达芬奇模仿蝙蝠形态设计出的人力“扑翼机”,模仿生物飞行的初衷促进了航空技术的不断发展与成熟,仿生技术已成为航空器发展及性能提升的常用方法^[2]。例如,仿照鸟类的形态开展仿生气动布局设计,有望进一步提升航空飞行器的气动特性^[3];仿照鸟类在飞行过程中改变飞行姿态、降落时将翅膀折叠的变化开展仿生变构型设计及机翼形态变化,对未来飞机的变体和高效折叠具有重要的指导意义^[4];仿照竹子、骨骼等生物的结构特征,将多孔、多层级微结构引入结构设计中,可满足飞机结构件的高效传载和轻量化设计

要求^[5]。

本文聚焦航空气动性能及结构轻量化特性的提升需求,分析在飞行器气动、结构等方面的性能提升应用方向及其相应的仿生生物原型和典型特征,全面综述仿生技术在飞行器仿生形态、仿生减阻、仿生降噪、仿生结构布局及仿生轻质结构等方面的应用进展,指出仿生技术在飞行器上的潜在应用方向,以为仿生技术的航空应用提供参考。

1 航空仿生应用方向及仿生对象分析

高效飞行和增升减阻一直是飞机设计师追求的核心目标,特别是如何尽可能地减少飞行阻力,以实现飞行器提速、延长飞行器续航时间、减少飞行器燃料损耗等。鸟类具备高效自适应续航能力,其气动减阻、增升、降噪机理对于飞行器气动设计具备借鉴意义。仿照鸟类翅膀的自适应变形机理可以实现自主改变机翼的升阻比,仿照鲨鱼脊状微结构、鸟类羽毛表面微观结构特征可以提升表面减阻特性,仿照鸟类羽翼表面结构可以提升减阻降噪性能。国内外研究者针对鸟类飞行机理、气动特性、运动规律等开展了相关研究,西北工业大学宋笔锋等^[6]将鸟类空气动力学特性总结为静态几何外形、多自由度扑动、动态柔性变形、小尺度流动控制结构四个主要因素。鸟类为满足不同飞行状态下的气动性能需求,具有改变翅膀形状的能力。例如,为提高俯冲飞行性能,鸟类翅膀收拢或后掠,以实现气动阻力快速且大幅度降低。此外,包括鸟类的自然界飞行生物无一例外地采用扑翼飞行方式,昆虫翅膀扑动时通过大角度的扭转运动即可产生足够大的升力,扑翼飞行方式能够有效提高气动性能^[7]。通过模仿生物的气动外形、飞行姿态等,可以获得良好的气动性能和飞行效率。在仿生减阻方面,大多数鸟类翅膀梢部突出的、分开的羽毛翼梢开缝结构起到使翼尖涡破碎化,减小诱导阻力的作用^[6]。基于海豚皮肤形貌提出的自适应表层减阻技术,可以根据流动情况改变表面形貌,达到减阻的目的^[8]。体型庞大却游动快速灵活的鲨鱼皮肤表面整体上看呈较明显的沟槽形状,可以显著降低水流的摩擦阻力,使水流更高效流过。美国航空航天局(NASA)将

仿鲨鱼盾鳞结构防污减阻材料称为未来航空产业的关键技术之一,仿鲨鱼皮的沟槽结构在航空、泳衣、管道输运等方面都获得了广泛的应用^[9]。在仿生气动降噪领域,许多鸮形目鸟类(俗称猫头鹰)都具有静音飞行的能力,如佛罗里达林鸮、灰林鸮、苍鸮、雕鸮、长耳鸮等,其前缘、后缘、末梢、上下表面微观结构为工程降噪技术提供了新的仿生学思路与方法。

如何设计出轻质、高强韧性、多功能的结构形式也是未来飞行器型号研究的重要着眼点,而传统的结构和材料已经很难在满足性能要求下继续大幅减轻质量。仿生学为飞行器结构设计提供了新的思路,生物为适应环境而进化出复杂的微观结构,具备传统材料无与伦比的优异性能,例如轻质高强韧性、环境适应性、损伤自修复能力等。科学家已经在一定程度上利用生物体的结构启示制

造出了多种工程材料和工程结构,例如蜂窝结构复合材料具有质量轻、韧性好、耐碰撞、耐冲击、强度和刚度大、隔热和隔音性能好的特点;鸟类翅膀为有序点阵结构,具有质轻、高刚度、高强度等特点;植物脉络布局、动物骨骼分叉结构布局具有优良的载荷传递和汇集作用。上述生物结构形式为下一代航空结构和材料的发展提供了新的方向,从自然界广泛存在着的大量传力效率异常高效的生物结构形式中得到启发,探明生物结构及承载机理,发展仿生轻质结构及仿生布局优化设计新方法是当前的研究热点。

针对上述航空领域亟需提升的关键性能,本文梳理飞行器性能需求提升的典型仿生对象及其结构特征,如图 1 所示,并归纳总结在飞行器气动、结构性能提升方面具有潜在应用价值的仿生物原型、典型特征及仿生功能,如表 1 所示。



图 1 飞行器性能提升仿生对象及其典型结构特征

Fig. 1 Performance enhancement bionic objects and their typical structural characteristics

表 1 航空仿生对象、典型特征、仿生功能
Table 1 Bionic prototypes, typical features, and bionic functions for aircrafts

生物原型	典型特征	仿生功能
鸟类(鸚鵡 ^[10] 、寒鴉 ^[11] 、雨燕 ^[12] 、家燕 ^[13] 、信天翁、鸕鶿 ^[14] 、鯉鳥 ^[15] 、翠鳥 ^[16])	飞行和俯冲阶段可通过调整翼翅的形状,实现不同的飞行姿态	通过改变机翼外形获取不同飞行姿态下最优的气动特性,可用于仿生变体飞机设计
海鸥 ^[17-18]	翅膀肘关节可变形调节,保持稳定飞行	提高其在复杂流场中的飞行稳定性,降低飞行能耗
鸟类 ^[19] 、昆虫 ^[20]	鸟类扑动气动机理:尾部涡流、前缘引力、惯性影响等 昆虫扑动气动机理:延迟失速、拍合机制、旋转环流、尾迹捕获等	适应复杂低空环境,可用于仿生扑翼飞行器设计
海豚 ^[8]	海豚皮肤由两层构成,表皮层布有许多乳头状的小突起,整个表皮层有弹性。表皮的下面是海绵状结构,里面有很多突起,突起之间充满液体	表面流动保持在层流状态,可显著降低摩擦阻力,可用于水中舰船,也可用于飞机减阻
鲨鱼 ^[21-22]	鲨鱼皮肤表面有鳞片和类似圆谷状的非光滑盾鳞结构,沟槽方向平行于游动方向	可改变周边流场,降低流体阻力,可用于机翼及发动机叶片仿生设计,减小气流阻力
鲸鱼 ^[23]	前缘波状凸起	控制流动分离,也具有一定的减阻降噪作用
大型鸚类(雕鸚、林鸚、长耳鸚等 ^[24])	翼羽轻质、高强,初级飞羽前缘的锯齿形态,羽毛后缘呈穗状结构,翅膀和腿部表面松软的绒毛结构	降低气动噪声,可用于机翼表面、发动机叶片、直升机悬桨仿生设计
鸟喙 ^[25-26]	致密外部表面结合内部中空支撑	质量轻,刚度和强度高
骨骼类(鸟类骨架 ^[27])	中间呈中空包络,骨片轻薄,长骨中空	质量轻,刚度高
鱼骨、树叶叶脉、鸟羽 ^[28]	包含平行的倾斜分支结构	轻质高刚度,降低结构质量,可用于加筋板设计
植物根系 ^[29]	脉络状分支结构	抗倒伏、锚固和支撑能力强,可用于加筋板设计
甲虫鞘翅(东方龙虱 ^[30] 、独角仙 ^[31-32] 、水生甲虫、步甲虫、蜣螂 ^[33])	主要结构形式有腔、梁、微孔洞、蜂窝和叠层结构 ^[48]	强度高,质量轻,高强度和韧性,耐冲击性能好,各向异性,自愈合性
龙虾壳 ^[34]	多尺度分层结构	轻质、坚硬而有弹性
贝壳类(鲍鱼、牡蛎 ^[35] 、花斑钟螺、红鲍螺、企鹅珍珠贝 ^[36] 、文蛤、欧洲扇贝)	从微观到宏观的分层结构:角质层、棱柱层及珍珠层 ^[49]	强度高,韧性好,抗击穿能力好,可用于增强军用装甲抗冲击能力
动物角类(牛角 ^[37] 、羊角 ^[38] 、犀牛角 ^[39-40])	沿着角的长度方向上有中空管状结构,孔的密度从外表面到内表面发生变化	坚硬耐用,可以承受极度的载荷冲击,具有攻击及防御等功能
甲壳类(狢狢壳 ^[41] 、乌龟壳 ^[42])	由致密的外层和多孔的内层组成的夹层结构	轻质,坚硬,抗冲击
植物杆茎(竹子 ^[43] 、木贼 ^[44] 、香蒲 ^[45] 、棕榈树 ^[46])	表层致密,内部为多孔结构 竹子:梯度分布的多胞结构,含竹节 木贼、香蒲:多胞元薄壁结构 棕榈树:四边形或五边形多胞元结构,含节点	轻质高效,吸能效果好,可增强结构抗破坏性和能量吸收率
玻璃海绵 ^[47]	呈圆筒状,由纵横交错的硅质骨针构成网状主骨架并形成许多壁孔,体外有锯齿状隆起的壁脊	高韧性,高强度和高稳定性,可用于蜂窝轻质管、薄壁结构

2 飞行器气动仿生应用研究进展

2.1 仿生形态

2.1.1 仿生变体飞行器

近年来,随着鸟类飞行机理研究的逐渐揭示

以及先进材料、智能技术等快速发展,仿鸟变体飞机在飞行器上的应用研究持续深入,陈树生等^[50]详述了变体飞机的发展阶段以及不同机翼变形方式的研究进展。按照变形方式,变体飞机可以分为机翼折叠变体飞机、滑动蒙皮变体飞机、伸缩机

翼变体飞机、其他形式的变体飞机^[51],各变体形式典型代表如图 2 所示。

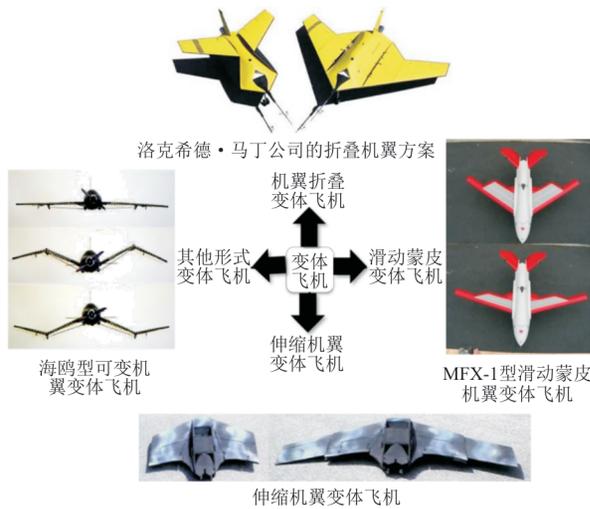


图 2 不同变形方式变体飞机^[51]

Fig. 2 Morphing aircrafts with different deformation modes^[51]

洛克希德·马丁公司在美国国防部高级研究计划局(DARPA)“变体飞行器结构”项目支持下研制了一种折叠机翼的小型无人机,飞机机翼在起飞时完全展开以获得更大的升阻比,而在飞行过程中,机翼可以根据飞行速度部分或完全折叠,从而减小浸湿面积并降低飞行阻力^[52]。同样在 DARPA 的资助下,新一代航空技术公司设计了滑动蒙皮可缩放的可变机翼方案并应用于无人机的技术验证,无人机机翼可以根据外界环境和自身飞行状态的变化自动伸展或收缩,并能实现大尺度变化:展长 40%,展弦比 177%,机翼面积 73%,后掠角变化范围 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ^[53]。佛罗里达大学的仿海鸥飞行器,通过内外侧机翼绕纵向关节垂直旋转,可实现机翼从完全展开到正鸥翼或负鸥翼的姿态变化,以改善俯冲机动性能和稳定性^[17-18]。

此外,近年来鸟类仿生在水空两栖跨介质飞行器的研究中也多次提出,鸬鹚、鲑鸟等水鸟对跨介质飞行器入水前的气动外形与飞行控制策略具有借鉴意义,例如,北京航空航天大学研制的鲑鸟飞行器借鉴了鲑鸟捕鱼过程中独特的空海转换机制,实现了从空中直接扎入水中以及从水中垂直起飞至空中的功能^[54]。国内外研究者参考自然界中具有水空两栖生存特性的生物在跨介质飞行器的气动布局形式、变体结构和跨介质转换机理等方面开展了探索研究,研制了如“鸬鹚”“弹簧刀”、Sea-Robin XFC 潜射无人机等^[16]潜射飞行器;

通过模仿自然界中具有空—水穿越能力水鸟的入水方式和入水机理^[55],研制了仿鲑鸟潜航飞行器^[56]、“鸬鹚”仿生无人机^[57]、仿飞鱼小型无人机^[58]以及仿鲑鸟微型飞行器^[59]等潜航飞行器。上述跨介质飞行器均采用变体结构设计,实现了飞行器在不同环境中的高效运行。

综上所述,变体飞行器通过模仿鸟类大幅改变机翼构型,显著提高了飞行器的性能^[60]。针对未来面对不同飞行环境、执行不同飞行任务以及跨介质的不同航行模式,适时改变外形达到更优性能的飞行器需求,通过变体实现“一器多能”,降低能耗、提高作战效能、改善气动性能、增强操纵控制能力等^[61],可以有效提高飞行器的通用性和任务适应性。

2.1.2 仿生扑翼飞行器

仿生扑翼飞行器是一种模仿鸟类^[2]和昆虫^[62-63]飞行,基于仿生学原理设计制造的飞行器。近年来随着对鸟类及昆虫飞行特性及机理研究的逐渐深入,国内外仿生扑翼飞行器层出不穷,其中有代表性的是德国 Festo 公司开发的一系列仿生扑翼产品,如图 3 所示。2011 年, Festo 公司模仿海鸥研制的 SmartBird 仿鸟扑翼飞行器,无需外力驱动即可进行自主启动、飞行和降落;2013 年打造的仿蜻蜓扑翼飞行器 BionicOpter 能够实现前飞、悬停、后飞及侧飞等多种飞行姿态;2015 年 Festo 推出的 eMotionButterflies 配备高度集成的机载电子设备,在轻质结构和微型化方面更迈进了一步;2017 年 Festo 推出的 BionicFlyingFox 加入智能算法,通过机器学习对比真实蝙蝠并不断优化仿生蝙蝠的飞行轨迹。国内西北工业大学、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、吉林大学等院校也开展了扑翼飞行器的研制^[64-66],西北工业大学研制的“云鸮”“信鸽”分别于 2022 年和 2023 年打破了仿生飞行器单次充电飞行时间的世界记录^[67]，“信鸽”突破 3 h 的续航记录。

仿生扑翼飞行器虽然外形与生物相近,但目前研制的样机大多功能简单,存在飞行灵活性有限、续航时间短、控制鲁棒性不足、扑动动作逼真性粗糙等问题^[68],大多处于实验室阶段,离实际应用还有较大距离。因此,需要对生物飞行机理开展进一步研究,突破在精准动力学建模、扑动翼结构变形主动控制、扑动翼多自由度驱动、仿生智能飞行策略等方面^[69]的关键技术,形成飞行能力可媲美

自然界鸟类的仿生与高度智能化无人机系统。

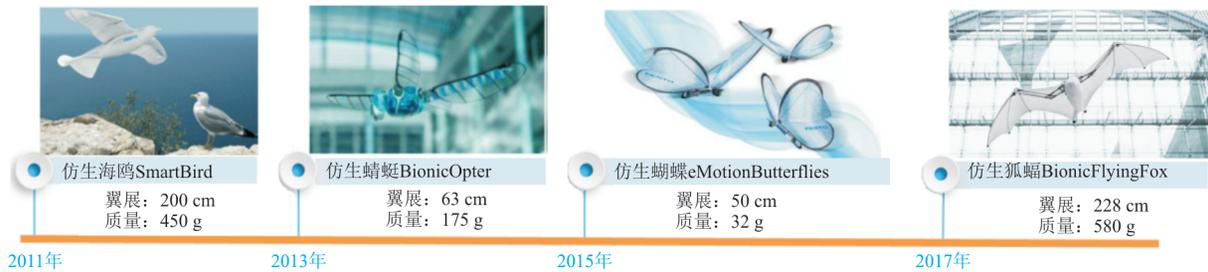


图3 Festo 仿生扑翼飞行器^[70]
Fig. 3 Festo bionic flapping-wing aircrafts^[70]

2.2 仿生减阻

仿鲨鱼皮等仿生减阻蒙皮可以显著降低飞行阻力,减少燃油消耗,提高飞行器的效能。为了获得最优的减阻效果,国内外研究者将研究重点集中在对沟槽形貌的优化设计上,并开展了沟槽表面在多款飞机上的应用研究^[71-74];NASA 针对 LEARJET 型飞机表面开展沟槽表面设计,经飞行试验测试减阻量约为 6%^[74];空客公司在 A320 飞机上铺设过面积达到全机 70% 的沟槽膜,使油耗降低了 1%~2%;国内西北工业大学的李育斌等^[75]在 1:12 的运七模型上粘贴了沟槽薄膜并进行了风洞试验,运用类似的“粗糙”肌理,全机零升阻力降低 5%~8%。以上研究证实了仿生表面微结构良好的减阻性能,但是针对飞行器复杂应用场景、长使用寿命等特点,在微结构优化设计、大批量制备、环境适用性等方面还需要开展更深入的研究^[76]。

2.3 仿生降噪

对于猫头鹰翅膀的锯齿尾缘、座头鲸鳍肢前缘凸起结构的波浪状前缘结构,研究者已开展了大量理论研究、数值计算和实验研究,乔渭阳等^[77]综述了仿生气动降噪的研究进展。仿生气动降噪在航空上的潜在应用点集中在飞机的主要噪声源,包括机翼、风扇/涡轮叶片、旋翼等前缘及尾缘^[78-83],如图 4 所示。Juknevicus 等^[81]开展了仿猫头鹰前缘梳状结构对 NACA0008 叶片前缘干涉噪声影响的试验研究,如图 4(d)所示,该前缘锯齿结构可以有效降低前缘干涉噪声 8 dB,且锯齿振幅越大、波长越小,降噪效果越好。众多的研究成果已证实了锯齿形前/尾缘构型降低机翼/叶片噪声

的有效性,但目前对仿生降噪机理研究还不够深入,仿生降噪技术在飞机上的应用还处于理论探索阶段,与实际工程应用还存在差距。



图4 仿生降噪在飞行器上的潜在应用
Fig. 4 Potential application of bionic noise reduction in aircraft

3 飞行器结构仿生应用研究进展

3.1 仿生结构布局

减轻飞机结构重量对于提高飞机性能有重要意义,也是飞行器结构设计追求的永恒主题。仿生结构布局通过提取生物体结构有益的构型特征

用于飞行器结构设计,达到提高结构效能、实现轻量化设计的目的。在仿生结构布局设计上的代表性研究有丹麦科技大学 Aage 等^[84]对一架波音 777 飞机 27 m 长机翼开展拓扑优化分析与建模,机翼拓扑优化形状与鸟类骨骼分叉极为相似,机翼前缘的复杂支撑结构与鸟喙的内部结构相似。该设计在保持刚度不变的情况下,比传统机翼结构减重约 2%~5%。此外,国内外研究者针对机身、机翼、舵面等飞行器部件以及加强筋、接头等结构件开展了仿生结构布局设计研究,如图 5 所示。空客公司将叶片上的类似蜂窝不规则结构应用在飞机部件上,不仅能够显著提高结构的承载能力,同时减少结构质量,并据此设计并制造了仿王莲结构的飞机舵面结构;北京航空航天大学刘良宝等^[85]基于对王莲叶脉结构与构型规律的研究分析,开

展了飞机盖板内的加强筋仿生设计参数优化,不仅降低了结构的整体质量还提高了结构的比刚度;马建峰等^[86]依据蜻蜓膜翅优良力学性能的结构特征对机身加强框进行设计,仿主翅脉结构特征沿主应力和主要承载方向布置主加强筋,仿主翅脉和支翅脉拓扑网络结构在主加强筋区域之间布置多孔结构的次加强筋,仿生结构的比刚度比原型结构提高了 2%~6%,比强度提高了 1%~8%;岑海堂等^[87]在分析小型翼结构设计特点的基础上,借鉴叶脉结构特征设计 3D 打印仿生型机翼结构,静力弯曲试验结果表明与原型机翼相比结果显示仿生型机翼质量、变形、应力都相应减少。上述研究基于生物结构布局特点,探索了将生物骨架特征引入飞机结构布局设计中的可行性,证实了仿生结构布局的性能提升潜力。

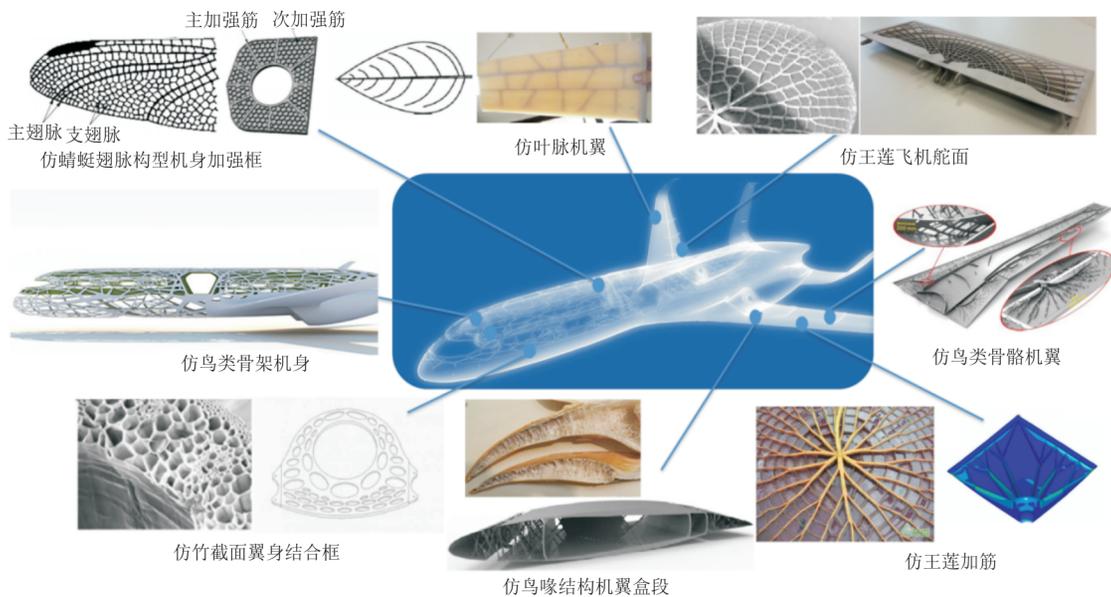


图 5 仿生结构布局在飞行器设计上的应用^[84-89]

Fig. 5 Application of bionic structure layout in aircraft design^[84-89]

3.2 仿生轻量化结构

仿生微结构的主要特点有孔隙率高、表面积大、质量轻等^[90],基于仿生微结构的功能性仿生零件设计制造,特别是轻质高强/高刚仿生零件设计制造在航空航天、武器装备领域也备受关注^[91-92]。在仿生微结构建模与优化、力学性能与传力机理、宏微结构材料仿生制造技术^[90-93]等方面已开展了大量研究,设计和探索不同仿生微结构的力学性能,这些研究为后续航空航天装备应用提供了借鉴。但是目前的研究多集中于仿生微结构测试试

验样件的设计与实验,基于仿生微结构的飞机零部件研究与应用较少。随着仿生多孔材料、材料制备和成型加工技术的发展而出现了一类新颖的多功能材料,例如轻质多孔仿生材料、多层级仿生结构材料,金属 3D 打印技术的快速发展为该复合结构制造提供了可能。但是,由于生物纤维与设计飞行器材料所用到的工业级纤维在尺度上存在明显的差异,对生物结构进行合理的仿生设计而非简单的复制,在设计和制备上仍存在诸多挑战^[93]。对于下一代面向功能结构一体化的仿生零

件的设计理论、建模方法及机械性能调控技术的研究明显不足,需开展新型功能性仿生结构相关机理、建模仿真、性能分析、制备方法的研究。

4 结束语

自然界中的生物为了适应环境和生存需要,经过千百万年的进化,形成了一套自身适应环境的巧妙生物机理。这些生物机理为提升航空飞行器气动、结构等关键性能提供了不竭的灵感与参考,为飞行器设计提供了新原理、新构型、新方法,在航空飞行器设计上具有广阔的应用前景。从可持续发展的角度看,航空仿生不仅可以解决飞行器本身的性能等实际问题,还可以减少环境的负担。通过“师法自然”,深入研究、分析、总结、利用生物的优异特性,可以更好地服务于飞行器设计以及性能提升。

针对现有航空器的气动性能、结构减重及运动性能的大幅增强问题,有必要基于仿生技术对航空器设计中的应用发展方向开展深入研究,为仿生技术在未来航空领域的工程应用奠定基础。航空仿生技术研究与应用的具体方向展望如下:

1) 从形态布局到表面微结构的仿生增升减阻综合设计

目前,对仿生沟槽、翼梢开缝、小翼羽等流动控制与增升减阻机理还需要进一步研究和明确。未来的航空器气动设计方面应从多角度融入仿生元素,以生物形态和表面结构为模板,研究仿生沟槽结构、翼梢开缝、小翼羽、离散粗糙元等生物形貌流动控制及增升减阻机理,开展从形态布局到表面微结构的综合仿生增升减阻设计,为实现航空飞行器增升减阻特性的大幅提升探索新的解决途径。

2) 从宏观布局到微观结构的跨尺度多层级仿生轻量化综合设计

现有优化设计方法往往从传统结构形式出发,未能从宏/微观材料结构传力匹配的角度深入探索结构构型的设计,因而所开展的优化设计仅能获得少量的减重效果。基于仿生学的思路,在宏观布局方面,综合考虑动物骨骼、植物脉络结构以及拓扑优化技术,获得飞机最优的载荷传递路径,同时在最优传力路径上,仿照自然界中丰富的

生物轻质结构形式堆积材料,开展从宏观布局到微观结构的多层级、多尺度仿生轻量化综合设计,形成兼顾仿生传力布局及仿生微结构的多层级、多尺度轻量化结构方案。

3) 仿生结构功能一体化集成设计

自然界的生物除了在飞行器气动仿生、结构仿生方面提供诸多设计灵感之外,在飞行器仿生疏水防除冰、仿生可控黏附、低雷达散射及红外发射表面等方向同样提供了很多有价值的生物参考原型,为飞行器的防除冰功能、黏附对接功能、电磁功能提供了新的设计途径。另外,智能材料、精密加工、先进驱动等技术的成熟与发展,促进了未来航空仿生由单一外形、材料、结构功能仿生设计向结构材料功能一体化仿生设计的转变。通过全面、系统、集成化仿生设计,进一步合理利用飞行器内部及表面有限的空间,实现更紧凑、更轻量化的设计,获得低能耗、高效率、强环境适应性的性能特点。

参考文献

- [1] 沈海军,余翼. 形态仿生飞行器研制进展及关键技术[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 9-19.
SHEN Haijun, YU Yi. Development and key technologies of morphological bionic aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 9-19. (in Chinese)
- [2] 赵晓伟,曾东鸿,占英,等. 仿鸟类扑翼飞行器研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(4): 1-15.
ZHAO Xiaowei, ZENG Donghong, ZHAN Ying, et al. Advances on system design of bio-inspired flapping wing MAV[J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(4): 1-15. (in Chinese)
- [3] 薛栋,朱紫文,宋笔锋. 仿鸟扑翼飞行器关键技术综述[J]. 航空学报, 2024, 45(17): 63-98.
XUE Dong, ZHU Ziwen, SONG Bifeng. Key technologies of bird inspired flapping-wing micro aerial vehicles: review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(17): 63-98. (in Chinese)
- [4] 柯智骞,骆俊衡,马锐,等. 宽域自适应变体飞行器技术研究进展[J]. 战术导弹技术, 2024(4): 16-29.
KE Zhiqian, LUO Junheng, MA Rui, et al. Research progress of wide-range adaptive morphing aircraft technology[J]. Tactical Missile Technology, 2024(4): 16-29. (in Chinese)
- [5] 李家雨,付宇彤,李元庆,等. 增材制造仿生结构的力学性能优化及其功能设计研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4435-4456.
LI Jiayu, FU Yutong, LI Yuanqing, et al. Research prog-

- ress on mechanical performance optimization and functional design of additive manufactured biomimetic structures [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41 (9) : 4435-4456. (in Chinese)
- [6] 宋笔锋, 粮鑫雨, 薛栋, 等. 鸟翼空气动力学机理的研究现状和进展综述[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(6): 893-910.
SONG Bifeng, LANG Xinyu, XUE Dong, et al. A review of the research status and progress on the aerodynamic mechanism of bird wings[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(6): 893-910. (in Chinese)
- [7] 张红梅, 杨文青. 微型扑翼仿生“0”字和“8”字形扑动方式气动特性研究[J]. *航空工程进展*, 2016, 7(1): 44-50.
ZHANG Hongmei, YANG Wenqing. Investigation of "0"-figure and "8"-figures wingtip path effect on aerodynamic performance of micro flapping-wing[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2016, 7(1): 44-50. (in Chinese)
- [8] CARPENTER P W, DAVIES C, LUCEY A D. Hydrodynamics and compliant walls: does the dolphin have a secret? [J]. *Current Science*, 2000, 79(6): 758-765.
- [9] 刘宝胜, 吴为, 曾元松. 鲨鱼皮仿生结构应用及制造技术综述[J]. *塑性工程学报*, 2014, 21(4): 56-62.
LIU Baosheng, WU Wei, ZENG Yuansong. Review on application and fabrication of shark skin bionic structure [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2014, 21(4): 56-62. (in Chinese)
- [10] TOBALSKE B W, DIAL K P. Neuromuscular control and kinematics of intermittent flight in budgerigars (*Melopsittacus undulatus*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1994, 187(1): 1-18.
- [11] ROSÉN M, HEDENSTRÖM A. Gliding flight in a jackdaw: a wind tunnel study [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(6): 1153-1166.
- [12] LENTINK D, MÜLLER U K, STAMHUIS E J, et al. How swifts control their glide performance with morphing wings [J]. *Nature*, 2007, 446: 1082-1085.
- [13] 刘玉荣. 家燕羽毛表面结构与翅翼翼型气动特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
LIU Yurong. Study on feather surface structure and aerodynamic characteristics of wing airfoil of domestic swallow [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [14] LIANG J H, YAO G C, WANG T M, et al. Wing load investigation of the plunge-diving locomotion of a gannet *Morus* inspired submersible aircraft [J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(2): 390-402.
- [15] ROPERT-COUDERT Y, GRÉMILLET D, RYAN P, et al. Between air and water: the plunge dive of the Cape Gannet *Morus capensis* [J]. *International Journal of Avian Science*, 2004, 146(2): 281-290.
- [16] 张秀梅. 翠鸟入水俯冲气动特性及变体飞行策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
ZHANG Xiumei. Study on aerodynamic characteristics and variant flight strategy of kingfisher diving into the water [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [17] ABDULRAHIM M, LIND R. Flight testing and response characteristics of a variable gull-wing morphing aircraft [C] // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Reston, Virginia: AIAA, 2004: 5113.
- [18] ABDULRAHIM M. Flight performance characteristics of a biologically-inspired morphing aircraft [C] // *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 345.
- [19] 周林, 张忠海, 王建辉, 等. 扑翼飞行器的研究现状与发展 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(8): 44-54.
ZHOU Lin, ZHANG Zhonghai, WANG Jianhui, et al. Research status and development of flapping wing aircraft [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(8): 44-54. (in Chinese)
- [20] SHYY W. *Aerodynamics of low Reynolds number flyers* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [21] REIF W E. Morphogenesis and function of the squamation in sharks [J]. *Neues Jahrbuch Für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 1982, 164(1/2): 172-183.
- [22] DINKELACKER A, NITSCHKE-KOWSKY P, REIF W E. On the possibility of drag reduction with the help of longitudinal ridges in the walls [M] // LIEPMANN H W, NARASIMHA R. *Turbulence management and relaminarisation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988: 109-120.
- [23] FISH F E, WEBER P W, MURRAY M M, et al. Marine applications of the biomimetic humpback whale flipper [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2011, 45(4): 198-207.
- [24] 陈坤. 三种鸮形态学、飞行运动学特征规律及其仿生研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
CHEN Kun. Morphological and flight kinematics characteristics of three owls and their bionics research [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [25] SEKI Y, SCHNEIDER M S, MEYERS M A. Structure and mechanical behavior of a toucan beak [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(20): 5281-5296.
- [26] MCKITTRICK J, CHEN P Y, BODDE S G, et al. The structure, functions, and mechanical properties of keratin [J]. *JOM*, 2012, 64(4): 449-468.
- [27] CHEN P Y, MCKITTRICK J, MEYERS M A. Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs [J]. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(8): 1492-1704.
- [28] 邓扬晨, 陈华. 基于仿生的大展弦比直机翼结构布局形式研究 [J]. *航空计算技术*, 2007, 37(2): 14-19.
DENG Yangchen, CHEN Hua. Research of high aspect ratio straight wing structural layout based on bionics [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2007, 37(2): 14-19. (in Chinese)
- [29] 丁晓红, 林建中, 王峰, 等. 基于应力场的植物根系模拟及工程应用 [J]. *上海理工大学学报*, 2008, 30(2): 152-156.
DING Xiaohong, LIN Jianzhong, WANG Feng, et al. Si-

- mulation of botanic root system according to stress field and its applications in engineering[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2008, 30(2): 152-156. (in Chinese)
- [30] 杨志贤, 王卫英, 虞庆庆, 等. 四种甲虫鞘翅的力学参数测定及微结构观测[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 92-98. YANG Zhixian, WANG Weiyang, YU Qingqing, et al. Measurements on mechanical parameters and studies on microstructure of elytra in beetles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 92-98. (in Chinese)
- [31] 陈锦祥, 倪庆清. 甲虫前翅中的三维复合材料结构[J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 61-66. CHEN Jinxiang, NI Qingqing. Three dimensional composite structures in the fore-wing of beetles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(6): 61-66. (in Chinese)
- [32] HAN S, LE V T, GOO N S. Investigation of punch resistance of the *Allomyrina dichotoma* beetle forewing[J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(1): 57-68.
- [33] 王国林, 任露泉, 陈秉聪. 螭螂体表几何非光滑结构单元分布的分形特性[J]. 农业机械学报, 1997, 28(4): 5-9. WANG Guolin, REN Luquan, CHEN Bingcong. The fractal character about the distribution of geometric unsmoothed structural units on dung beetle's cuticle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(4): 5-9. (in Chinese)
- [34] NIKOLOV S, PETROV M, LYMPERAKIS L, et al. Revealing the design principles of high-performance biological composites using *ab initio* and multiscale simulations: the example of lobster cuticle[J]. Advanced Materials, 2010, 22(4): 519-526.
- [35] CHATEIGNER D, HEDEGAARD C, WENK H R. Mollusc shell microstructures and crystallographic textures[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22(11/12): 1723-1735.
- [36] FLEISCHLI F D, DIETIKER M, BORGIA C, et al. The influence of internal length scales on mechanical properties in natural nanocomposites: a comparative study on inner layers of seashells[J]. Acta Biomaterialia, 2008, 4(6): 1694-1706.
- [37] LI B W, ZHAO H P, FENG X Q, et al. Experimental study on the mechanical properties of the horn sheaths from cattle[J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(3): 479-486.
- [38] TOMBOLATO L, NOVITSKAYA E E, CHEN P Y, et al. Microstructure, elastic properties and deformation mechanisms of horn keratin[J]. Acta Biomaterialia, 2010, 6(2): 319-330.
- [39] RYDER M L. Structure of rhinoceros horn[J]. Nature, 1962, 193: 1199-1201.
- [40] HIERONYMUS T L, WITMER L M, RIDGELY R C. Structure of white rhinoceros (*ceratotherium simum*) horn investigated by X-ray computed tomography and histology with implications for growth and external form[J]. Journal of Morphology, 2006, 267(10): 1172-1176.
- [41] RHEE H, HORSTEMEYER M F, RAMSAY A. A study on the structure and mechanical behavior of the *Dasyypus novemcinctus* shell[J]. Materials Science and Engineering: C, 2011, 31(2): 363-369.
- [42] KRAUSS S, MONSONEGO-ORNAN E, ZELZER E, et al. Biological materials: mechanical function of a complex three-dimensional suture joining the bony elements in the shell of the red-eared slider turtle[J]. Advanced Materials, 2009, 21(4): 1-8.
- [43] TAN T, RAHBAR N, ALLAMEH S M, et al. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures[J]. Acta Biomaterialia, 2011, 7(10): 3796-3803.
- [44] XIAO Y Y, YIN H F, FANG H B, et al. Crashworthiness design of horsetail-bionic thin-walled structures under axial dynamic loading[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2016, 12(4): 563-576.
- [45] ZHAO Z L, HUANG W X, LI B W, et al. Synergistic effects of chiral morphology and reconfiguration in cattail leaves[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(4): 634-642.
- [46] WEGST U G K. Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and wood-based composites[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2011, 4(5): 744-755.
- [47] AIZENBERG J, WEAVER J C, THANAWALA M S, et al. Skeleton of *Euplectaspis*: structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale[J]. Science, 2005, 309: 275-278.
- [48] CHEN H, CHEN M S, SUN J R. Histological structures of the dung beetle, *Copris ochus* Motschulsky integument[J]. Acta Entomologica Sinica, 2003, 46(4): 429-435.
- [49] KALPANA S, DINESH R, MOHANTY B. Biomimetic lessons learnt from Nacre[M]// Biomimetics learning from nature. Anon: InTech, 2010: 9-35.
- [50] 陈树生, 贾苜梁, 刘衍旭, 等. 变体飞行器变形方式及气动布局设计关键技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(6): 7-53,2. CHEN Shusheng, JIA Muliang, LIU Yanxu, et al. Deformation modes and key technologies of aerodynamic layout design for morphing aircraft: review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(6): 7-53,2. (in Chinese)
- [51] 艾俊强, 李士途. 变体飞机典型形式的历史发展及其应用机型浅析[J]. 航空工程进展, 2010, 1(3): 205-209. AI Junqiang, LI Shitu. Brief history and prospect of typical morphing aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(3): 205-209. (in Chinese)
- [52] NEAL D A. Design, development, and analysis of a morphing aircraft model for wind tunnel experimentation[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- [53] FLANAGAN J, STRUTZENBERG R, MYERS R, et al. Development and flight testing of a morphing aircraft, the

- NextGen MFX-1[C]// 48th AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. US: IEEE, 2007: 73-75.
- [54] YAO G C, LIANG J H, WANG T M, et al. Submersible unmanned flying boat: design and experiment [C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Bali, Indonesia: IEEE, 2014: 1308-1313.
- [55] 吴正阳. 基于翠鸟入水策略的跨介质飞行器构型仿生设计及入水性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- WU Zhengyang. Bionic design of transmedia aircraft configuration based on kingfisher's entry strategy and research on entry performance[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [56] FABIANA A, FENG Y F, SWARTZ E, et al. Hybrid aerial underwater vehicle (MIT Lincoln Lab) [J]. Scope Projects, 2012(1): 8-15.
- [57] WEISSHAAR T A. Morphing aircraft systems: historical perspectives and future challenges [J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(2): 337-353.
- [58] CHERNEY R. Robotic flying fish: ENGR 2330[R]. Needham: College of Engineering, Intro to Mechanical Prototyping, 2010.
- [59] SIDDALL R, ORTEGA ANCEL A, KOVAČ M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle[J]. Interface Focus, 2017, 7(1): 20160085.
- [60] 张家应, 黄可, 武冠振, 等. 变体飞行器结构关键技术及研究进展[J]. 电光与控制, 2024, 31(1): 1-13.
- ZHANG Jiaying, HUANG Ke, WU Guanzhen, et al. Key technologies and research progress of morphing aircraft structure [J]. Electronics Optics and Control, 2024, 31(1): 1-13. (in Chinese)
- [61] 甄宇洋, 刘攀, 陆宇平. 变体飞行器智能变形与飞行控制技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 995-1006.
- ZHEN Ziyang, LIU Pan, LU Yuping. Research progress on intelligent deformation and flight control technology of morphing aircraft [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 54(6): 995-1006. (in Chinese)
- [62] PLATZER M F. Review of aerodynamics of low Reynolds number flyers [J]. AIAA Journal, 2009, 47(1): 287-296.
- [63] 张益鑫, 李少石, 王兴坚, 等. 蝴蝶飞行机理及仿蝴蝶扑翼飞行器研究进展综述[J]. 工程科学学报, 2024, 46(9): 1582-1593.
- ZHANG Yixin, LI Shaoshi, WANG Xingjian, et al. Research progress on the flight mechanism of butterfly and butterfly-inspired flapping wing air vehicles [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(9): 1582-1593. (in Chinese)
- [64] 徐艺星. 仿蝙蝠微型扑翼飞行器气动理论研究及结构优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- XU Yixing. Aerodynamic theory research and structural optimization design of bat-like flapping-wing micro air vehicle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [65] 顾光健. 仿生扑翼飞行器的设计制作与力学测试[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- GU Guangjian. Design, manufacture and mechanical test of bionic flapping-wing aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [66] 陈默. 仿生扑翼飞行器系统设计及运动学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- CHEN Mo. System design and kinematics research of bionic flapping-wing aircraft [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [67] XUAN Jianlin, SONG Bifeng, SONG Wenping, et al. Progress of Chinese "Dove" and future studies on flight mechanism of birds and application system [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(10): 663-675.
- [68] 肖扬宏, 崔峰, 张逸晨, 等. 仿蝴蝶扑翼飞行器: 研究进展、挑战与未来发展[J]. 无人系统技术, 2023, 6(3): 45-58.
- XIAO Yanghong, CUI Feng, ZHANG Yichen, et al. Butterfly inspired flapping wing air vehicles: research progress, challenges and future developments [J]. Unmanned Systems Technology, 2023, 6(3): 45-58. (in Chinese)
- [69] 曹嘉睿. 仿生扑翼飞行器发展现状与关键技术分析[J]. 科技传播, 2020, 12(4): 141-142.
- CAO Jiarui. Research status and key technology analysis of bionic flapping wing air vehicle [J]. Public Communication of Science and Technology, 2020, 12(4): 141-142. (in Chinese)
- [70] Festo. Taking a close look at wings in nature [EB/OL]. [2024-07-24]. https://www.festo.com.cn/hk/zh/e/journal/bionics/taking-a-close-look-at-wings-in-nature-id_44627/.
- [71] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338: 59-87.
- [72] DEBISSCHOP J R, NIEUWSTADT F T M. Turbulent boundary layer in an adverse pressure gradient: effectiveness of riblets [J]. AIAA Journal, 1996, 34(5): 932-937.
- [73] 谢华. 仿生壁面减阻机理及表面微结构设计方法研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2017.
- XIE Hua. Study on drag reduction mechanism of bionic wall and design method of surface microstructure [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2017. (in Chinese)
- [74] 王晋军. 沟槽面湍流减阻研究进展[C]// 2001 中国科学技术协会青年科学家论坛. 北京: 中国科学技术协会, 2001: 40-49.
- WANG Jinjun. Research progress of turbulent drag reduction on grooved surfaces [C]// 2001 Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology. Beijing: China Association for Science and Technology, 2001: 40-

49. (in Chinese)
- [75] 李育斌, 乔志德, 王志歧. 运七飞机外表面沟纹膜减阻的实验研究[J]. 气动实验与测量控制, 1995, 9(3): 21-26.
LI Yubin, QIAO Zhide, WANG Zhiqi. An experimental research of drag reduction using riblets for the Y-7 airplane [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 1995, 9(3): 21-26. (in Chinese)
- [76] 王春举, 程利冬, 薛韶曦, 等. 仿生减阻微结构制造技术综述[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 88-98.
WANG Chunju, CHENG Lidong, XUE Shaoxi, et al. Manufacturing technologies of bionic micro-structures for drag reduction: a review [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 88-98. (in Chinese)
- [77] 乔渭阳, 全帆, 陈伟杰, 等. 仿生学气动噪声控制研究的历史、现状和进展[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(1): 98-121.
QIAO Weiyang, TONG Fan, CHEN Weijie, et al. Review on aerodynamic noise reduction with bionic [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(1): 98-121. (in Chinese)
- [78] 卫凯, 曹琦, 燕群, 等. 仿生学锯齿桨叶降噪效果试验研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(5): 125-130.
WEI Kai, CAO Qi, YAN Qun, et al. Experimental study on the noise reduction effect of bionic sawtooth blades [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(5): 125-130. (in Chinese)
- [79] FISH F E, WEBER P W, MURRAY M M, et al. The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology [J]. Integrative and Comparative Biology, 2011, 51(1): 203-213.
- [80] GRUBER M. Airfoil noise reduction by edge treatments [D]. Southampton: University of Southampton, 2012.
- [81] JUKNEVICIUS A, CHONG T P. On the leading edge noise and aerodynamics of thin aerofoil subjected to the straight and curved serrations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 425: 324-343.
- [82] NING Z, WLEZIEN R W, HU H. An experimental study on small UAV propellers with serrated trailing edges [C]// 47th AIAA Fluid Dynamics Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2017: -3813.
- [83] HUFF D. Noise reduction technologies for turbofan engines [C]// 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. US: AIAA, 2007: 1-9.
- [84] AAGE N, ANDREASSEN E, LAZAROV B S, et al. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design [J]. Nature, 2017, 550: 84-86.
- [85] 刘良宝, 陈五一. 基于叶脉分枝结构的飞机盖板结构仿生设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12): 1596-1600.
LIU Liangbao, CHEN Wuyi. Structural bionic design for aircraft cover plate based on leaf vein branched structure [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1596-1600. (in Chinese)
- [86] 马建峰, 陈五一, 赵岭, 等. 基于蜻蜓膜翅结构的飞机加强框的仿生设计[J]. 航空学报, 2009, 30(3): 562-569.
MA Jianfeng, CHEN Wuyi, ZHAO Ling, et al. Bionic design of aircraft reinforced frame based on structure of dragonfly wing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 562-569. (in Chinese)
- [87] 岑海堂, 陈五一. 小型翼结构仿生设计与试验分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 286-290.
CEN Haitang, CHEN Wuyi. Structural bionics design and experimental analysis for small wing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 286-290. (in Chinese)
- [88] 岑海堂, 陈五一, 喻懋林, 等. 翼身结合框结构仿生设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(1): 13-16.
CEN Haitang, CHEN Wuyi, YU Maolin, et al. Structural bionics for reinforcing frame of fuselage and wing joint [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(1): 13-16. (in Chinese)
- [89] 白鹏, 陈钱, 徐国武, 等. 智能可变形飞行器关键技术发展现状及展望[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(3): 426-443.
BAI Peng, CHEN Qian, XU Guowu, et al. Development status of key technologies and expectation about smart morphing aircraft [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(3): 426-443. (in Chinese)
- [90] 廖文和, 戴宁. 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 347-360.
LIAO Wenhe, DAI Ning. Development and challenge of lightweight design and manufacturing technology for aerospace structures [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 55(3): 347-360. (in Chinese)
- [91] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-135.
LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129-135. (in Chinese)
- [92] 喻长江, 戴宁, 李大伟, 等. 多级仿生建模及优化技术[J]. 中国机械工程, 2019, 30(9): 1111-1118.
YU Changjiang, DAI Ning, LI Dawei, et al. Multilevel bionic modelling and optimization techniques [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(9): 1111-1118. (in Chinese)
- [93] 曹忠亮, 杨思鑫, 朱昊, 等. 轻质复合材料仿生夹芯结构研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(14): 24-37.
CAO Zhongliang, YANG Sixin, ZHU Hao, et al. Research progress on biomimetic sandwich structures of lightweight composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(14): 24-37. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)