



宋笔锋 SONG Bifeng

长江学者特聘教授

Chang Jiang Scholar

西北工业大学教授

Professor of Northwestern Polytechnical University


西北工业大学教授,博士生导师。教育部“长江学者”特聘教授,973项目首席科学家,全国百篇优秀博士论文获得者,歼20飞机某分系统副总设计师,“百千万人才”工程国家级人选,享受国务院政府特殊津贴,教育部高等学校航空航天类课程指导委员会副主任委员,全国高等学校优秀青年骨干教师,担任科技部等3个部委的专家组成员。主要从事仿生飞行器等新概念飞行器创新设计、飞机多学科设计优化与顶层决策技术、装备高生存力技术、系统/结构/机构可靠性与维修性、临近空间飞行器等研究。获陕西省科学技术一等奖1项、军队科技进步一等奖1项、国防技术发明二等奖1项,授权发明专利47项,出版专著(译著)6部,发表SCI/EI论文120余篇。

仿生扑翼飞行器：空气动力、扑动与智能控制的完美结合

——访长江学者特聘教授、飞行器设计专家宋笔锋

Flapping Flight Vehicle: Ideal Combination of Aerodynamic, Flapping and Intelligent Control

本刊记者 李丹

：您从2001年就带领团队开展仿生扑翼飞行器研究,请谈谈仿生扑翼飞行器研究的难点是什么?

宋笔锋：仿生扑翼飞行器可像自然界中的鸟一样飞行,飞行效率高,其悬停盘旋能力、抗风能力、机动

性与被察觉性也均优于多旋翼和常规固定翼,是目前飞行器发展的一种颠覆性技术和热点方向,具有广泛的应用前景。仿生扑翼飞行器主要面临高效飞行、高抗风、高智能化控制3大核心难题,具体体现在:

(1) 缺乏完善的仿生飞行数值仿真设计分析和试验手段,尚无法全面准确揭示仿生扑翼飞行机理及其与结构参数的关系。仿生飞行器的雷诺数低,存在层流和湍流共存的复杂流动现象,飞行器的升阻特性变化


剧烈,常规的计算方法误差很大;仿生翼在飞行过程中相对大变形和气动相互影响,这种气动/结构的强耦合给数值仿真计算带来很大难度;由于低雷诺数效应,仿生微型飞行器的风洞试验对流场品质要求极高,只有低速、超低湍流度风洞才能保证试验精度;仿生飞行器飞行时有固有的俯仰、沉浮等组合运动形式,传统的固定式支架系统难以模拟这种实际飞行状况;仿生柔性翼的气动特性和柔性变形息息相关,需要在风洞试验中同时测量气动力和对应的柔性变形才能分析出仿生机理,国际上的此类研究较少。因此亟须建立一套完善的数值仿真与试验研究系统,来研究鸟类是如何产生和利用非定常流和旋涡来获得高升力和大推力,并建立仿鸟扑翼飞行器低雷诺数非定常气动数值模拟与试验研究方法,为仿生扑翼飞行器的设计提供支撑。

(2) 高效飞行机理及高效仿生扑翼与扑翼驱动方式的实现问题。鸟类经过亿万年的自然进化,形成了适于高效飞行的翅膀形状与骨架结构,飞行效率惊人;另外,鸟类在飞行过程中翅膀并不是单纯的上下拍动,而是具有扑动、扫掠、扭转、折叠、变幅等复杂的运动规律。这就需要揭示鸟类高效飞行机理的基础上,进行仿生扑翼运动学与动力学研究,设计并实现高效可靠的仿生扑翼和扑翼驱动机构,在运动规律上要满足扑翼飞行的需要,做到形神兼备。

(3) 仿生飞行器的高抗风问题。国际上把至少抗4级风作为飞行器实用化的标志性要求之一。我们知道,鸟类可以在大风大浪中自由翱翔,尤其是像信天翁一类的海鸟,甚至可以感知风场,调整飞行姿态,借风使力,不仅可以解决抗风问题,还能节约能耗。因此如何解决仿生扑翼飞行器的高抗风问题,是摆在研究者面前极为重要的课题之一。

(4) 仿生扑翼飞行器的控制策

略与飞控导航系统的实现问题。扑翼飞行器飞控导航系统研制面临的难点主要是:扑翼飞行器一般以8~13Hz的频率进行周期性俯仰和沉浮运动,姿态角波动幅度达 20° ,加速度波动幅度达2g,空速波动幅度达2m/s,传统算法无法解决这样的高频大幅度波动状态下的姿态解算;扑翼飞行器重量轻、转动惯量小、自身的稳定飞行能力较弱,对飞控系统应对快速变化飞行情况的自适应调节能力提出了新的挑战;微型仿生飞行器内部空间小,载荷有限,飞控导航系统硬件的尺寸、重量、电磁兼容性与系统性能之间存在突出矛盾。

: 您的团队在仿生飞行领域开展了哪些研究?取得了哪些进展?

宋笔锋:从2001年开始,我们团队深入研究了鸟类飞行机理,聚焦3大核心难题,建立了较为完整的微小型飞行器仿生共性技术体系。主要做了以下5个方面的工作:

(1) 完善了气动/运动/结构强耦合的数值仿真与特种风洞试验系统:具备同时模拟鸟类5种基本扑动方式、机体俯仰/沉浮运动及结构相对大变形的数值仿真能力和试验测试能力,突破了该领域的国际难题,从力学机理上保证了仿生技术研究从“形似”到“形神兼备”。

数值仿真系统基于所发明的将精确实测的微型结构模态振型、飞行动力学方程和包含3种湍流模型的NS方程/高效距离减缩法相耦合的求解方法,突破了微小型仿生飞行器特有的层流湍流共存、大幅度变构型、结构相对大变形、机体沉浮俯仰运动等强耦合的气动特性高精度真实模拟这一公认的国际难题。数值仿真系统相对误差小于10%,能力和精度达到国际先进水平。

风洞试验系统基于所发明的动态支架和测控系统等而创建。动态支架能同时模拟扑动翼上下扑动/

前后扫掠/弦向扭转/变幅/展向折叠5种基本扑动方式,还能模拟鸟类机体沉浮与俯仰2种运动方式;测控系统能实现扑动翼柔性大变形和气动实时同步测量。主要性能指标覆盖了翼展1m量级鸟类的运动与扑动范围,湍流度可控制在0.02%以内,最低稳定风速3m/s,为深刻研究仿生飞行机理和验证前述数值仿真系统提供了试验手段和试验数据。特种风洞试验系统是国内唯一能实现气动力、运动参数和柔性变形全部耦合变量实时同步精确测量的超低湍流度、低稳定风速的系统,技术指标达国际前列。

(2) 提出了高升力大推力仿生翼系列设计技术。获得了翼型的厚度、弯度和最大弯度位置对扑动翼的前缘吸力与翼尖涡的作用规律,提出了高升力大推力翼型设计方法;获得了前缘涡和反卡门涡街强度的主要影响因素,揭示了鸟类翅膀内段主要产生升力和外段主要产生推力的机制,获得了内外段折叠位置与前后掠角度对扑动翼升力和推力的影响规律,提出了仿生翼高升力和大推力面积分布和骨架刚度设计准则;发明了通过不对称截面仿生翼骨架实现上下扑动不对称变形及仿生开缝翼产生附加升力的方法。基于以上方法设计出气动特性优越的仿生扑动翼,在单位输入能量下升力提高了100%,推力提高了40%。

(3) 发明了仿生高效驱动装置系列设计技术。揭示了鸟类扑动方式高升力大推力运动机制,发明了上下扑动/前后扫掠/扭转/变幅扑动/折叠及运动自由度相位差可控的3大系列11种高效仿生驱动装置;气动特性不变时,扑动装置单位输入能量的有效输出功率提高至3.5倍。

基于运动相似原理、仿生尺度律计算方法和鸟类飞行统计数据,得到了最佳仿生运动形式与规律,发明了含高效二维运动驱动装置、可变参数

驱动装置和复杂运动规律驱动装置在内的3类8种基础运动机构;在此基础上,创新性地运用含曲柄连杆、多连杆和齿轮传动等多种机构组合的运动数学模型及其变体的组合,发明了能实现扑动、扫掠、扭转三维任意组合复合扑动,变幅扑动和折叠的仿生驱动装置。以上几项研究成果使所研制的信鸽系统(手抛/自主起降仿生扑翼巡检系统)续航时间由5min提高到30min。

(4)发明了仿生高抗风布局设计技术。基于鸟翼刚度分布、外形布局、鸟类低阻力(力矩)变构型尾翼以及鸟翼矢量推力对抗风能力的影响规律,发明了柔性扑翼布局、柔性固定翼布局、变构型尾翼及推力矢量微偏转等高抗风技术,显著提高了抗风能力,降低了起降偏航力矩,所研制的信鸽系统和信天翁系统(自动起降仿生柔性固定翼巡检系统)实现了4~6级抗风稳定飞行。


鸽子和海鸥等在大风中可以自如飞行的原因之一是“翅膀的柔性”具备自适应抗风能力。研究了仿鸟柔性翼(含扑翼和柔性固定翼)不同刚度分布和外形布局等对抗风能力的影响规律、鸟类低阻力(力矩)变构型对抗风能力的影响规律以及鸟翼差动扑动所致矢量推力对抗风能力的影响规律。在此基础上,发明了阵风响应量最小/推力最大的柔性扑翼抗风布局技术、阵风响应量最小/升力最大的柔性固定翼抗风布局技术、降低起降偏航力矩的仿生变构型尾翼抗风技术及提高抵抗偏航力矩的推力矢量微偏转抗风技术。柔性翼(扑翼、固定翼)布局抗风能力达到4级(5.5~7.9m/s),仿生变构型尾翼可降低偏航力矩82%,推力矢量微偏转技术可在升力不降低情况下提高1个风力级别的抗风能力。

(5)发明了国际上唯一能适应仿生飞行器加速度、速度及姿态剧烈变化特点的MEMS飞控导航技术与

系统,并拓展实现了定点悬停与自主垂直起降控制功能。

与其自身的尺度相比,微小型仿生飞行器飞行时状态变化非常剧烈,现有小型无人机姿态算法和控制规律已不适用。同时,需解决自主垂直起降及全飞行过程中的一键操控问题,以提高安全性和使用性。

基于28阶全状态完全非线性卡尔曼滤波算法,实现了多传感器数据融合和姿态解算;基于总能量解耦的纵向自适应控制算法,实现了动力与操纵强耦合特点的高度与速度自适应协调控制;将高精度差分导航算法与多旋翼的直接力控制技术相结合,实现了定点悬停与自主垂直起降及一键操控功能。实现了仿生微小型飞行器在4级风下的稳定飞行,可覆盖500Hz、3g加速度、 $\pm 20\text{mm}$ 以下的振动环境,系统重量轻(重35g,含图传、数传和天线等)、功耗小(2.4W),姿态角误差小于 0.5° ,航迹控制精度小于5m。

: 仿生飞行技术主要可以应用在哪些领域?


宋笔锋:目前,我们已将仿生共性技术体系应用于3个方面:

(1)开发了手抛/自主起降仿生扑翼巡检系统、自主起降仿生柔性固定翼巡检系统和CW-10大鹏自主起降固定翼无人机系统等包含5种不同尺度飞行器的3类应用系统,航时0.5~6h,航程9~150km,可抗4~6级风。研制的系统产品已在陕西、浙江、新疆等地的30多家单位推广应用,主要用于环境监测、管线巡检、物资输送、国土测绘、应急救援等,一定程度上促进了环境资源保护、国土规划、快递运输、边防巡逻等行业国民经济领域生产方式的变革和发展。研制的信鸽系统是国际上唯一能全自主长航时飞行的实用化仿生飞行器系统,受到多方关注。

(2)仿生飞行器数值仿真系统与特种风洞试验系统支持了哈工大

深圳研究院、复旦等多家单位的各类中小型无人飞行器研究。

(3)全部或部分技术可推广应用用于蜜蜂到老鹰等尺度的系列仿生飞行器,并应用于未来大型飞机。这方面正在积极与航空工业第一飞机设计研究院、中国商飞北京民用飞机技术研究中心等单位开展相关合作。

: 仿鸟扑翼飞行器未来关注的重点发展方向是什么?

宋笔锋:未来随着柔性材料、压电材料、仿生材料的原理与制备方法突破并逐步工程化,锂电池技术突破以及新能源电池的研发,集微传感器、微执行器、微机械结构、信号处理与控制电路、高性能电子集成器件、接口、通信等于一体的微机电系统技术的逐步发展成熟,仿生飞行技术可以进一步扩展到老鹰及更大尺度的仿鸟飞行器以及蜜蜂、蝴蝶和蜻蜓等微小尺度的仿生飞行器研究,发展不同尺度更加高效可靠的仿生飞行器,推动仿生技术在各领域的广泛应用。

当前,仿生飞行器已具备一定的感知能力,能够自主起降和按航线自主飞行,但在智能识别、自动避障、智能航线规划以及多机协同方面还需进一步深化研究,将微小型仿生飞行器与视觉导航、智能识别、智能搜索、智能协同控制和图像理解等人工智能技术相结合,突破智能仿生飞行原理和技术,研制具备认知导航与自主避障能力、可实现智能化集群飞行与信息传输、更接近甚至超过自然飞行生物智能的无人飞行器。

目前仿生飞行器可在4~6级风、小雨雪等环境下使用,已在众多领域推广应用。但市场还需求能在全天候、环境更复杂条件下自如飞行的微小型仿生飞行器,今后需要更加深入研究鸟类高效飞行机理,提高飞行器飞行效率和能力,发展仿生抗风技术和抗电磁干扰技术,研制出适用范围更广的仿生飞行器。

(责编 逸飞)