

基于扑翼式飞行机理研究构建的仿生蝴蝶飞行器

周衡 王燕萍 钱春霞 马硕旋

南京市东南大学成贤学院

DOI:10.32629/acair.v3i4.17907

[摘要] 本文从仿生学出发,以蝴蝶的飞行特性开始研究,经过查阅得知蝴蝶的飞行方式为扑翼式飞行,于是确立了基于扑翼式飞行机理所开展的研究如何构建仿生蝴蝶飞行器。构建仿生蝴蝶飞行器所需要的主要组成部位为舵机、机身、舵机座、支架、机翼、电源及电路板。飞行器主要的动力来源于舵机与机翼的扑翼式传动连接运动所产生的升力,再加上电路板主控芯片的输入,控制舵机的驱动从而完成一些简单的飞行运动。基于扑翼式飞行的仿生蝴蝶飞行器整体重量约为50g,尺寸为50x70cm,具有蝴蝶的轻便、小巧等特性,其基于蝴蝶的仿生性较强。为了使该仿生飞行器具有更强的飞行能力,后续将通过更换机翼材料、舵机型号、容量更大的电池等途径实行整体飞行器的优化。经过严谨的飞行测试等方法,验证了自主设计的仿生蝴蝶飞行器可以具有蝴蝶的仿生性能及正常的飞行器飞行能力。将来欲实现仿生蝴蝶飞行器在军事、科研、生活等场景的广泛使用。

[关键词] 仿生蝴蝶; 扑翼式飞行器; 结构优化; 舵机驱动

中图分类号: TN967.6 **文献标识码:** A

Bionic Butterfly Aircraft Constructed Based on Flapping-Wing Flight Mechanism Research

Heng Zhou Yanping Wang Chunxia Qian Shuoxuan Ma

Chengxian College, Southeast University, Nanjing

[Abstract] Starting from bionics, this article studies the flight characteristics of butterflies. After consulting, it is found that the flight mode of butterflies is flapping wing flight. Therefore, it is established how to construct a bionic butterfly aircraft based on the flapping wing flight mechanism. The main components required for building a biomimetic butterfly aircraft are the servo, fuselage, servo seat, bracket, wings, power supply, and circuit board. The main power source of the aircraft comes from the lift generated by the flapping transmission connection between the servo and the wings, coupled with the input of the main control chip of the circuit board, which controls the driving of the servo to achieve some simple flight movements. The bionic butterfly aircraft based on flapping wing flight has an overall weight of about 50g and dimensions of 50x70cm. It has the characteristics of lightness and compactness of butterflies, and has strong biomimicry based on butterflies. In order to enhance the flight capability of the bionic aircraft, the overall optimization of the aircraft will be carried out through the replacement of wing materials, servo models, and larger capacity batteries. Through rigorous flight testing and other methods, it has been verified that the self-designed biomimetic butterfly aircraft can possess the biomimetic performance of butterflies and normal flight capabilities of the aircraft. In the future, we aim to achieve widespread use of biomimetic butterfly aircraft in military, scientific research, and daily life scenarios.

[Key words] biomimetic butterfly; Flapping wing aircraft; Structural optimization; Servo drive

引言

近年来,随着国家对于科技创新及科研行业的关注,以及机械及自动化领域的逐渐兴起,越来越多的机器人与飞行器的研究设计开始被人们所关注。仿生蝴蝶飞行器因具备灵活性与环境适应性,成为了生态监测、生物机理分析等领域的研究热点。

并且仿生类的飞行器在军事、科研、生活等方面具有较大的前景,故设计一种仿生型飞行器,旨在为该领域的研究提供充实的理论基础与实践经验。

1 背景研究

1.1 国内外研究现状

在国内,仿生蝴蝶飞行器作为一种利用仿生学原理设计制作的机械蝴蝶,常见于一些科技展览和公共艺术装置中。目前国内仿生蝴蝶飞行器的应用范围较为有限,大多集中在科研实验室和科技馆等公共场所。同时,一些科技企业也开始尝试将仿生蝴蝶技术应用于创意设计和产品开发中。一些城市的公共艺术装置中出现了仿生蝴蝶的身影,这些仿生蝴蝶作品多为静态装置,用来增添城市的美感和文化氛围。总的来说,国内仿生蝴蝶的应用还处于起步阶段。

在国外,仿生蝴蝶技术已经被广泛应用于各个领域。其中,最为突出的是应用在无人机技术中。许多无人机制造商利用仿生蝴蝶的飞行原理设计了无人机的飞行控制系统,使得无人机能够更加灵活和高效地飞行,例如德国fasto公司制作的仿生蝴蝶eMotionButterflies。此外,仿生蝴蝶也被应用于机器人技术中。可以预见,仿生蝴蝶技术在国外的应用领域将会不断扩大,为各个领域带来更多创新和突破。

1.2 生物蝴蝶飞行机理现阶段研究不够

如今仿生蝴蝶飞行器的研究已然有了一些起色,但其中对于蝴蝶的飞行机理,这一最基础的飞行原理尚未完全研究透彻,存在诸多方面的不足,以至于仿生蝴蝶难以做到如生物蝴蝶般具有飞行的灵活性和动力持久性等特性。首先从生物构造来看,蝴蝶的翅膀中有多层薄膜,上面布满了“翅脉”(主要成分为几丁质,具有“低密度、高比强度”的特点),形成了牢固的骨架,同时覆盖了很多细小的鳞片,这种结构既保证了翅膀的强度和刚度,又减轻了蝴蝶整体的重量,使其能够轻便的飞行。然而,目前则采用高强度轻质碳纤维棒来替代蝴蝶的翅脉,虽然其弹性模量接近生物蝴蝶翅脉的几丁质,能在扑翼式飞行时产生适度的弹性形变,模拟生物蝴蝶翅脉对于气流的调节,但其与生物蝴蝶仍有较大的结构性能差异。

从空气动力学角度来看,现有研究对蝴蝶扑翼过程中气流场的精细变化分析不够深入。蝴蝶主要依靠微小尺寸的空气漩涡或小尺度的不稳定气流飞行。蝴蝶翅膀在扑动时,会形成复杂的涡流结构,下拍时,翅膀产生强涡环,形成阻力,提供升力;上拍时,翅膀产生的阻力较小,但仍能提供动力。这些升力和推力的产生对蝴蝶的飞行起到关键作用。然而,目前的研究多集中在宏观气流现象的观察,对于不同扑动频率、幅度下涡流的生成、发展、消散过程及其与翅膀运动的动态耦合关系尚未完全明晰,无法精准量化涡流对飞行力的贡献。

在能量利用效率方面,生物蝴蝶飞行时的能量消耗机制研究存在欠缺。蝴蝶能够长时间飞行且消耗能量较低,其翅膀的运动模式、肌肉收缩方式与能量利用效率之间存在紧密联系。但现有研究未能准确揭示蝴蝶在不同飞行状态(如巡航、转弯、悬停)下的能量转换效率,也未明确翅膀结构(如翅脉分布、翼膜弹性)对能量消耗的影响规律,这使得仿生蝴蝶飞行器在能量优化设计上缺乏足够的生物原型参考。

此外,蝴蝶飞行的姿态控制机理研究也有待完善。蝴蝶在飞行过程中能够灵活调整身体姿态以应对复杂环境,如躲避障碍

物、适应气流变化等,这与其翅膀的不对称扑动、身体的微调动作密切相关。但目前对于蝴蝶如何通过感知外部环境信息(如视觉、气流感知)并转化为翅膀和身体的控制信号,以及不同控制信号对飞行姿态调整的具体作用机制尚未研究透彻,导致仿生蝴蝶飞行器在姿态控制的灵活性和稳定性上与生物蝴蝶存在较大差距。

2 扑翼式仿生蝴蝶飞行器设计

2.1 设计思路

扑翼式仿生蝴蝶飞行器的设计遵循“需求分析-结构设计-样机制作-功能验证”的核心逻辑,以生物蝴蝶飞行特性为原型,结合实际制作。首先明确飞行器对于飞行功能实现的需求,要求整体机型小且轻便,机翼和机架拥有足够的强度。其次结构设计则从局部考虑,机架以“轻量化+高稳定性”为原则,采用尼龙3D打印;机翼复刻蝴蝶翅脉-翼膜结构,由碳纤维棒+PET薄膜制成。设计完整机械结构部分,则开始实现样机的制作,通过机架部分与舵机的装配,再让舵机与机翼直接连接,以达到舵机对于整机的直接驱动。随后接入该样机的操作系统,以主控芯片为核心设计控制系统,连接舵机与电源,与实物集成形成完整样机。最后对集成后的样机进行控制功能测试,判断控制系统是否能精准驱动实物动作。

2.2 整体模型

扑翼式仿生蝴蝶飞行器的整体模型由6个核心部件组成,各部件功能明确、协同工作,共同实现扑翼飞行与姿态控制,其具体组成为:舵机、机身、舵机座、支架、机翼、电源及电路板。

2.3 扑翼式动力传动连接

该仿生蝴蝶飞行器采用舵机直驱替代传统电机机翼传动机构,既大幅减轻自身质量,又凭借舵机的高灵活性与可操作性,满足扑翼飞行的反复拍打需求,还能宽范围调节拍打幅度和频率以控制飞行器姿态与轨迹;其核心优势在于枢转装置支持可逆旋转,无需通过固定方向的曲柄和连杆传递运动,这对扑翼飞行器设计至关重要。^[1]

然而目前常见的飞行传动机构却是单曲柄摇杆机构、双曲柄摇杆机构、曲柄滑块机构等,本文则采用的是舵机直驱的方法,可用在对蝴蝶飞行机理分析的扑翼式仿生蝴蝶飞行器基于舵机驱动实现了仿蝴蝶扑翼飞行机器人的无尾航向控制。^[2]

2.4 材料与结构设计

仿生蝴蝶飞行器产生动力的机翼是以高强度轻质碳纤维棒作为主体连接翼膜上使用PET薄膜为材料制作;其驱动机翼的舵机采用型号为GDWDS1906AB舵机,其重量8-9g,扭矩3.2kg·cm,角度180°,且高速响应,这种高扭矩微型数字舵机,适合机翼稍大或需更大扑打力度的机型;用于搭载主要工件的舵机座、机身、支架则采用尼龙材料3D打印制作,这样既保证了整体飞行器的轻便性,又使本研究的操作变的更加方便。最终制作出该仿生蝴蝶飞行器总重约50g,尺寸为50x70cm,使该飞行器具备了高仿生性、轻便性及灵活性等特征。

3 仿生蝴蝶飞行器的优化与应用展望

3.1 飞行器的优化

首先从仿生蝴蝶飞行器的机翼结构上出发,由于生物蝴蝶翅翼中的“脉管”为中空结构,可在减重的同时提升抗弯刚度。据此,将仿生翅脉从“实心碳纤维棒”优化为“中空碳纤维管”,以达到功能增强的作用;再通过集成柔性传感器,在仿生翅脉中集成微型柔性传感器,实现翅脉形变的实时监测与飞行姿态的精准控制;还可以在中空翅脉内嵌入形状记忆合金丝,通过电流加热控制翅脉形变,实现升力的主动调节(如遇强风时增大主脉刚度,提升抗风能力)。其次为了具有更高精度的仿生,我们可基于显微CT扫描数据,将生物蝴蝶的翅翼生物成分提取出,用于仿生物器上,再复刻生物翅脉的分支节点处,对翅脉分支处的几丁质加厚,进一步提升连接强度。最后为了实现仿生蝴蝶飞行器高续航、高效率的能力,则需要对于蝴蝶飞行器的电池及舵机两环节做出调换,利用新型的能源材料电池以及更高性能的舵机实现上述目标。

3.2 应用展望

在未来,仿生蝴蝶飞行器将为生物机理研究、生态环境监测、气象观测等学科提供全新的研究工具与技术手段。基于仿生蝴蝶飞行器的技术成果,拓展其在多个领域的应用前景,如在军事侦察领域,可实现对特定区域的隐蔽式侦察与情报收集;在环境监测方面,能够对大气污染、森林火灾、生态变化等进行实时监测与数据采集;在农业领域,可用于农作物病虫害监测、授粉作业等;在影视拍摄与娱乐表演领域,为观众带来新颖独特的视觉体验。预计在项目成果推广应用后的几年内,实现一定的经济效益与社会效益,带动相关产业的发展与升级。

3.3 实验测试

为全面验证仿生蝴蝶飞行器的性能,需从基础功能、飞行性能、环境适应性及耐久性四个维度设计测试方案,确保测试结果的科学性与实用性。测试前需搭建标准化测试环境,包括室内无风测试场、室外半开放测试区,选择无遮挡、风速可控的空旷场地进行测试。

通过高速摄像机记录,GDWS1906AB舵机完成 180° 转动的平均时间为 0.08s ,最快响应时间 0.07s ,最慢 0.09s ,满足“响应时间 $\leq 0.1\text{s}$ ”的标准,且连续100次测试无卡顿现象,说明舵机驱动的稳定性和良好。在该测试环境中,所设计的仿生蝴蝶能够保持稳定的前向飞行姿态,飞行速度约 0.5m/s ,可以实现左转、右转、上升和下降动作飞行性能测试验证了仿生蝴蝶飞控系统的设计

满足预期的性能指标,并为后续的优化提供了数据支持。

综合测试结果,仿生蝴蝶飞行器在基础功能、飞行性能及耐久性上均达到设计目标,但在环境适应性(尤其是低温与高风速场景)存在短板,具体改进方向如下:

(1) 高风速姿态控制: 升级控制系统算法,增加风速传感器模块,实时采集风速数据并自动调整舵机扑动幅度与频率,提升抗风补偿能力。

(2) 精度提升: 针对机翼扑动频率在高负载下的误差(如搭载传感器后误差增加),优化舵机驱动电路,增强扭矩输出稳定性。

4 总结

综上所述,本文从生物蝴蝶飞行机理出发,基于扑翼式飞行器原理研究仿生蝴蝶飞行器,通过梳理国内外仿生蝴蝶技术研究现状,明确了当前生物飞行机理研究在结构复刻、空气动力学分析、能量利用及姿态控制等方面的短板,从多方面探讨分析,不断优化创新,最终实现对于仿生蝴蝶飞行器模型的制作。后续通过优化翅脉结构、集成柔性传感器、嵌入形状记忆合金丝,以及升级电池与舵机等路径,进一步提升了飞行器的结构性能、控制精度与能量效率。尽管现阶段已经在扑翼结构设计上取得了一定的研究成果,但相较于自然界飞行生物高超的飞行技能,仿生扑翼飞行机器人的性能表现远远不足,距离实用化仍有很长的路要走。为使仿生扑翼飞行机器人具有与飞行生物相似的运动特点,之后会通过进一步深入研究飞行生物的物理结构和飞行机理,剖析生物飞行运动中的共有特征,设计高仿生高效率高可靠扑翼机构,进一步提高仿生扑翼飞行机器人系统的仿生性、机动性、高效性与稳定性。^[3]

[参考文献]

[1]冷焯,张卫平,周岁,等.仿生蝴蝶飞行器设计分析[J].机械设计与研究,2019,35(04):32-35+42.

[2]陈明生.基于异步驱动的仿生微型扑翼式飞行器关键技术研究[D].东南大学,2023.

[3]黄海丰.舵机驱动仿生扑翼飞行机器人控制系统设计与研究[D].北京科技大学,2023.

作者简介:

周衡(2003—),男,汉族,安徽省芜湖市人,本科在读,研究方向:机械系统创新设计、仿生机械,东南大学成贤学院,机械与电气工程学院。