

仿生扑翼无人机仿真模型的优化研究

阳铭, 项阳, 沈琴, 屈宁华, 谢雨荷, 高翔, 李晨好

上海工程技术大学, 上海

发布日期: 2025年11月06日

摘要

随着技术的快速发展,我国对无人机的技术需求日渐提高。扑翼无人机,又称仿生飞行器,是新颖的无人机类型。其灵感源于自然界鸟类和昆虫的飞行方式,通过机翼的高频扑动来产生升力和推力,从而实现飞行。针对传统扑翼无人机,本文通过观察与模仿蝙蝠的形态结构,基于一种单一原动件的扑翼无人机的空间结构进行进一步的结构优化与设计的蝙蝠无人机。本研究为扑翼无人机的空间结构提供了另一种不一样的可能,具有进一步的研究价值。

关键词

仿生飞行器; 扑翼无人机

Research on Optimization of Bionic Flapping-wing Drone Simulation Model

Ming Yang, Yang Xiang, Qing Shen, Ninghua Qu, Yuhe Xie, Xiang Gao and Chenhao Li

Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai, China

Abstract

With the rapid development of technology, the demand for drone technology in China has been increasingly growing. The flapping-wing drone, also known as a bionic aircraft, is a novel type of unmanned aerial vehicle. Inspired by the flight modes of birds and insects in nature, it generates lift and thrust through high-frequency flapping of wings to achieve flight. In response to the limitations of traditional flapping-wing drones, this paper proposes a structurally optimized bat-inspired drone based on the spatial mechanism of a single-actuator flapping-wing UAV, through observation and imitation of bat morphology and structure. This study offers an alternative possibility for the spatial structure design of flapping-wing drones, demonstrating significant potential for further research.

Keywords

Bionic Aircraft; The Flapping-wing Drone

文章引用: 阳铭, 项阳, 沈琴, 屈宁华, 谢雨荷, 高翔, 李晨好. (2025). 仿生扑翼无人机仿真模型的优化研究.

工程學輯要, 1(1), 19-26. ISSN Print: 3079-5648; ISSN Online: 3079-5656.

DOI: 10.63313/Engineering.4001

Copyright © 2025 by author(s) and Erytis Publishing Limited.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 绪论

1.1. 研究背景及意义

1.1.1. 低空经济与新质生产力发展对仿生无人机的需求

低空经济作为新兴经济形态,在环境监测、物资配送、应急救援等领域需求激增。传统固定翼与旋翼无人机在复杂地形(如城市楼宇间隙、森林树冠层)和低速飞行场景中,存在机动性不足、能耗较高等问题。仿生扑翼无人机模仿鸟类、昆虫等生物的飞行方式,兼具悬停、低速巡航、快速转向能力,能更好适配低空复杂任务场景,成为低空经济发展的关键装备[1]。

1.1.2. 传统固定翼/旋翼无人机局限性与扑翼无人机优势对比

传统固定翼无人机依赖高速前飞产生升力,无法悬停且起降要求高;旋翼无人机虽可悬停,但存在噪音大、续航短、抗风能力弱等缺陷。扑翼无人机通过翅膀周期性扑动产生升力与推力,具有以下核心优势:

- 低雷诺数[2]适应性强,在 10^3 - 10^5 雷诺数范围内气动效率显著高于传统机型;
- 能耗低,同等重量下续航时间比旋翼无人机提升 30%-50%;
- 隐蔽性好,扑翼运动噪音远低于旋翼,适合侦察、隐蔽监测等任务。

1.1.3. 仿真模型优化对仿生扑翼无人机研发效率的提升价值

仿生扑翼无人机飞行机理复杂,涉及非定常气动、机构耦合、柔性翼变形等多物理场问题,实物样机研发成本高、周期长。通过仿真模型优化,可在设计阶段验证机构运动合理性、气动性能与控制策略,减少实物迭代次数。例如,基于仿真的扑翼机构参数优化可将研发周期缩短 40%,同时降低 30% 以上的试验成本[3]。

1.2. 国内外研究现状

1.2.1. 国外研究进展

国外在仿生扑翼无人机仿真与实物研发领域起步早,技术较为成熟,代表性成果如下:

加州理工学院与 Aero Vironment 公司:联合研发的“MicroBat”扑翼无人机,翼展 15.24cm、重量 10g,采用 MEMS 工艺制作翼面,通过 FLUENT 进行非定常流场仿真,验证了前缘涡(LEV)对高升力的贡献,其仿真模型首次量化了扑翼频率(20Hz)与升力系数的关联关系[4];德国 Festo 公司:“Bionic Flying Fox”仿蝙蝠扑翼无人机,翼展 2.2m,通过 ADAMS 建立多体动力学模型,优化翼膜与骨骼的耦合运动,仿真分析了翼膜弹性变形对气动效率的提升作用,实测续航达 9 分钟[5];

1.2.2. 国内研究进展

国内研究聚焦于扑翼机构轻量化与仿真精度提升,代表性成果包括:

上海交通大学陈文元团队：在《微型扑翼式仿生飞行器》中，基于 UG 建模与 FLUENT 流场分析，建立了昆虫翅膀的三维网格模型，通过求解 N-S 方程，获取了悬飞状态下的非稳态涡场与升阻力特性，其提出的“翼脉 - 翼膜耦合仿真方法”被广泛用于微型扑翼仿真[6]；西北工业大学：研发的“云鹞”扑翼无人机，采用高升力大推力柔性扑动翼设计，高效仿生驱动系统设计和微型飞控导航一体化集成等关键技术，创造了单次充电飞行 154 分钟的吉尼斯世界纪录[7]；哈尔滨工业大学：针对仿蝙蝠扑翼无人机，建立了柔性翼膜的有限元仿真模型，分析了翼膜弹性模量（4-7GPa）对扑动效率的影响，为翼面材料选型提供了仿真依据[8]。

2. 仿生扑翼无人机的生物机理与仿真基础

2.1. 蝙蝠飞行生物机理

2.1.1. 蝙蝠翅膀结构特性与运动耦合关系

如图 2.1 所示，蝙蝠翅膀作为典型的“刚性骨骼 - 柔性翼膜”复合结构，其形态与运动特性是仿生设计的核心依据。从解剖结构来看，蝙蝠翅膀由肱骨、桡骨、尺骨及多节指骨构成支撑骨架，其中指骨延伸形成翼展方向的主要受力结构，而尺骨与桡骨则通过关节联动实现翅膀的拍打与扭转；翼膜覆盖于骨骼表面，以弹性纤维与胶原纤维为主要成分，具备“拉伸 - 回弹”的非线性力学特性，其厚度沿翼展方向从根部（0.1-0.3mm）向翼尖（0.05-0.1mm）逐渐减薄，这种梯度分布可减少翼尖惯性力，同时保证根部结构强度[9-10]。

从运动耦合关系来看，蝙蝠飞行时翅膀的运动并非单一拍打，而是“拍打 - 扭转 - 伸缩”的协同动作：拍打运动围绕肱骨与身体的铰接点展开，角度范围通常为 30° - 60° ，主要产生升力；扭转运动通过指骨关节的微小转动实现，翅膀攻角在扑动周期内可动态调整 5° - 15° ，以适配不同飞行姿态下的气动需求；伸缩运动则依赖翼膜的弹性变形，翼展在扑动过程中存在 5%-10% 的长度变化，可减少上扑时的空气阻力。这种多运动耦合特性，使蝙蝠能在低雷诺数环境下（ $Re=10^3$ - 10^5 ）高效利用非定常气动效应，其升阻比相较于传统固定翼无人机提升 20%-30%[8]。

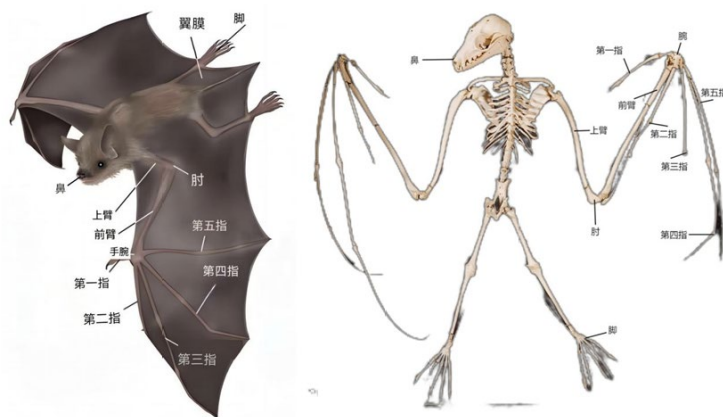


图 2.1. 蝙蝠的身体结构与骨骼

2.1.2. 蝙蝠飞行运动学分析

基于高速摄像（帧率 1000-2000fps）对灰头狐蝠、埃及果蝠等典型物种的飞行观测，蝙蝠翅膀运动

可分解为三个关键动作参数, 且各参数随飞行模态(悬停、前飞、转向)动态调整:

扑翼角度: 翅膀拍打角度(即翅膀平面与水平面的夹角)呈正弦规律变化, 峰值角度集中在 30° - 60° , 且下扑阶段角度变化速率高于上扑阶段, 以产生更大升力; 前飞状态下, 拍打角度峰值随飞行速度提升而减小, 当速度达到 5m/s 时, 峰值角度可降至 15° - 25° , 同时拍打平面向前进方向倾斜 10° - 15° , 以平衡升力与推力。

翼展收放: 翼展在扑动周期内呈现“下扑伸展 - 上扑收缩”的规律, 悬停时翼展变化幅度最大, 可达翼展总长的 8%-12%; 前飞时变化幅度随速度增加而减小, 主要通过翼尖部分的收放调整气动载荷分布, 避免翼尖涡过度发展导致的阻力增加。

被动扭转: 翅膀扭转主要发生在翼面中外部(距翼根 $2/3$ 翼展处), 悬停时扭转角峰值为 8° - 12° , 且扭转动作与拍打动作存在相位差(约 $1/4$ 周期), 可延迟翼面气流分离; 转向时, 左右翅膀扭转角产生 5° - 10° 的差值, 通过不对称气动载荷实现姿态调整, 这种被动扭转特性无需额外驱动机构, 为仿生扑翼的轻量化设计提供了参考[8]。

3. 仿生扑翼机构仿真模型的优化设计

本设计的仿生扑翼机构的仿真模型的优化设计包含空间结构中拍打机构的优化、机翼伸缩机构的优化。本模型因为是仿真蝙蝠的简化模型, 由“拍打 - 扭转 - 伸缩”三种的协同动作简化为“拍打 - 伸缩”两种协同动作, 以下是模型优化的原理。

3.1. 拍打机构的优化

一种仿蝙蝠型扑翼无人机的扑动空间结构的优化系统, 主要由一组三级啮合齿轮组带动曲柄摇杆机构所组成的复合空间结构实现。如图 3.1, 由机体作为该机构的主体, 将下外齿轮, 下右外齿轮, 右外齿轮, 左外齿轮, 左内齿轮和中心内齿轮连接在一起。其中下外齿轮连接电动机, 为整个机构提供动力, 并与右下外齿轮啮合, 将运动传递出去。右下外齿轮与右外齿轮啮合, 右外齿轮又与左外齿轮啮合, 四枚齿轮形成三级啮合齿轮传动。

在右外齿轮 4 与左外齿轮 5 运动时, 在二者上分别连接着外主动杆, 外主动杆的上平面与第二从动杆连接, 下平面与第一从动杆连接, 第二从动杆与运动观测杆连接, 第一从动杆与平衡杆连接, 平衡杆与运动观测杆连接, 组成一个曲柄摇杆机构。运动观测杆可以直观的看到该曲柄的运动周期与轨迹, 平衡杆的运动角度与机翼的运动角度相同, 不仅可以保持机构平行, 也可以观测机翼的扑动角度。平衡杆与运动观测杆连接处与主杆同轴, 当该曲柄摇杆机构开始运动时, 将会带动着主杆一起运动, 使机翼完成上下扑动的运动。

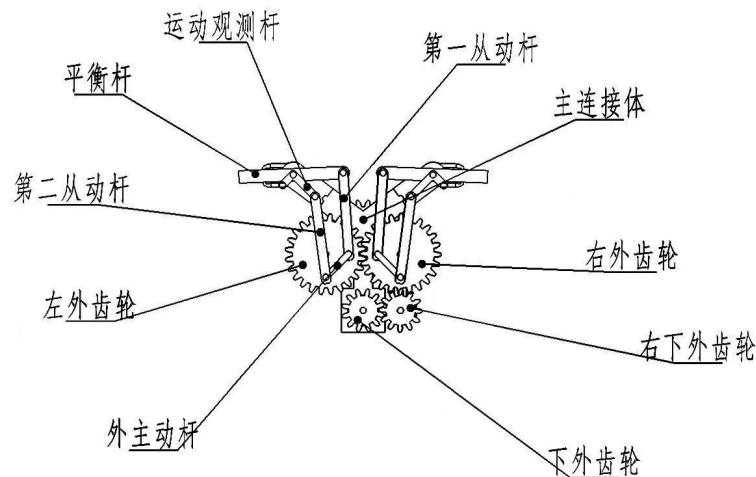


图 3.1. 拍打机构正视图

3.2. 机翼伸缩机构的优化

伸缩机构采用气缸组件以及机翼折叠设计相结合实现。如图 3.2，左外齿轮与左内齿轮通过键连接，同轴且同周期，左外齿轮收到的运动将会传递至左内齿轮，左内齿轮与中心内齿轮啮合，中心内齿轮连接着凸轮，凸轮与滚轮活塞杆和气缸组成一道气缸组件，中心内齿轮收到运动会带动凸轮运动，凸轮也会将运动传递给滚轮活塞杆所在的气缸组件。

如图 3.3 所示，在机体 1 上方两侧连接着对称的主杆，大从动杆 1 与大从动杆 3 分别连接在主杆上，大从动杆 1 与大从动杆 3 连接大从动杆 2，大从动杆 3 又与大从动杆 4 连接，大从动杆 2 与大从动杆 4 连接尾翼，形成一个可屈伸可折叠的复合机构——机翼。在大从动杆 2 与大从动杆 3 的连接处连接钢丝，将绳索穿过气缸组件中的气缸设计的圆环孔，与滚轮活塞杆设计的连接圆环处也连接钢丝，当凸轮运动时，气缸组件会拉着钢丝将复合机构进行收缩运动。在大从动杆 1 与大从动杆 2 之间、大从动杆 3 与主杆之间连接一个弹簧，该弹簧的作用不仅可以在该复合机构完成收缩运动之后进行伸展的回弹，而且还可以在气缸组件完成凸轮下压的力之后还会收到弹簧的拉力进行回弹，进行往复的有规律的运动，从而完成复合机构的屈伸运动。

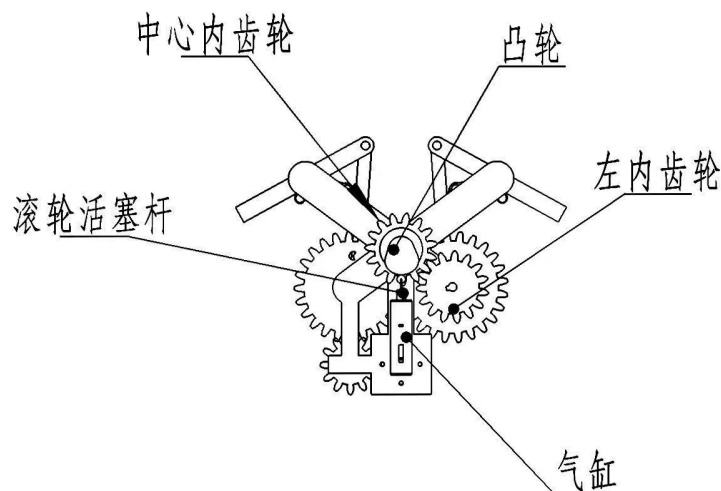


图 3.2. 气缸组件视图

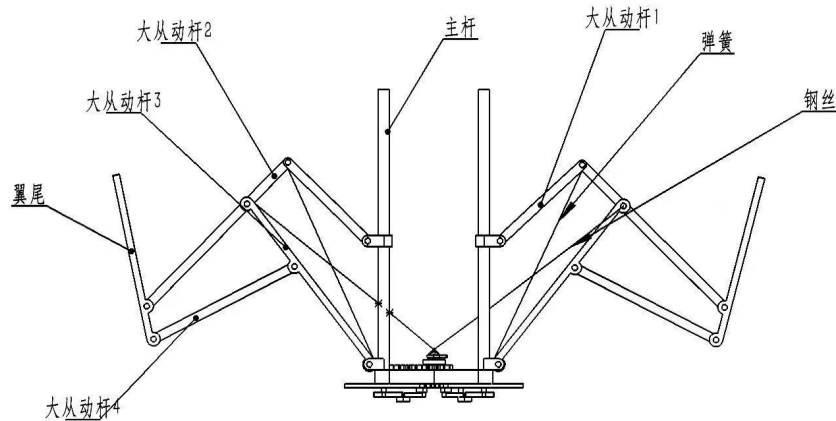


图 3.3. 优化模型俯视图

3.3. 扑动模型的运动分析

运用SWLIDWORKS MOTION 三维运动分析插件, 给该模型前端插入了一个速度为100RPM的马达, 对运动观测杆进行运动分析:

角加速度(α)的数值范围为-562 到 1214 (deg/sec^2), 周期性变化, 峰值和谷值尖锐, 变化剧烈; 角速度(ω)的数值范围为-138 到 165 (deg/sec), 平滑的周期性波动, 类似正弦或余弦曲线; 角位移(θ)的数值范围为-27 到 29 (deg), 平滑的周期性波动, 也类似正弦或余弦曲线。

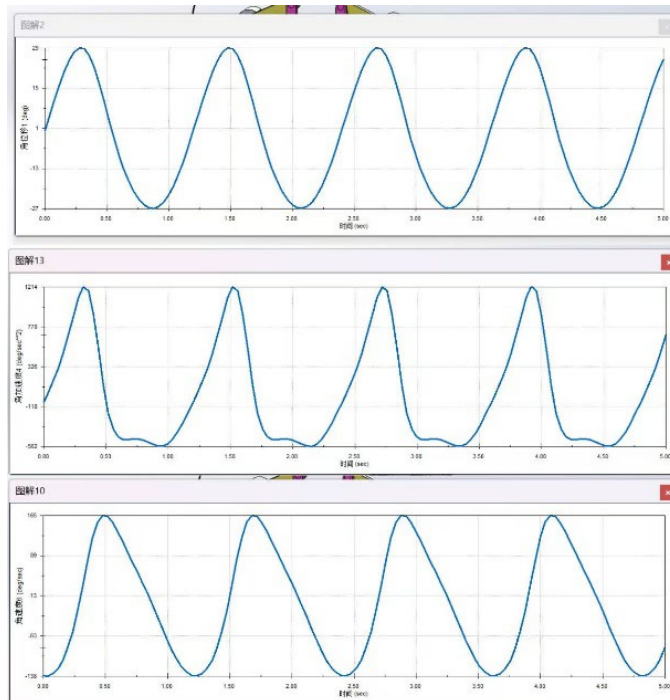


图 3.4. 扑动模型运动分析图例

如图例所示, 本机构扑动角度大约为 56° , 而蝙蝠常态下的挥拍角为 30° - 60° , 扑动角度满足仿

生蝙蝠的常态数据；且角加速度峰值正向 $\approx 1200^\circ/\text{s}^2$ ，负向 $\approx -560^\circ/\text{s}^2$ ，向上回正的速度大于向下扑动的速度，蝙蝠常态下的运动机理与之相同；扑动频率可以调节马达挡位从而模拟蝙蝠常态下的扑动频率。该机构属于低频、大振幅的运动模式，这种模式与蝙蝠的悬停和低速飞行行为高度相关。

4. 总结与展望

4.1. 研究成果总结

随着低空经济与新质生产力的快速发展，仿生扑翼无人机因其卓越的复杂环境适应能力（如城市楼宇间隙、森林树冠层）成为关键技术方向。与传统固定翼/旋翼无人机相比，扑翼无人机具备低能耗（续航提升 30%-50%）、高隐蔽性（噪音低）及强机动性（悬停、低速巡航）三大核心优势。本研究通过仿真模型优化，显著降低了实物研发成本与周期，为扑翼无人机设计提供了新思路。

优化的核心结果分为拍打机构的优化以及伸缩机构的优化。通过三级啮合齿轮组+曲柄摇杆复合空间结构实现高效动力传递。其中，齿轮组驱动外主动杆，带动平衡杆与运动观测杆联动，最终控制主杆完成机翼上下扑动。该设计通过运动观测杆直观反馈运动轨迹，确保机构平行性与运动精度。采用凸轮-气缸组件与折叠机构协同设计，通过钢丝牵引实现翼展动态收放。弹簧回弹机制与气缸组件配合，保障了机翼“收缩-伸展”的周期性运动，有效降低了上扑阶段的空气阻力。优化后的扑翼模型通过空间机构耦合，实现了蝙蝠飞行中多自由度运动的仿生模拟，为扑翼无人机轻量化与气动效率提升提供了新方案。

4.2. 未来展望

未来仿生扑翼无人机将深度融合人工智能与生物机理模拟，实现飞行姿态的自主优化。基于蝙蝠多模态飞行数据（悬停、前飞、转向）的机器学习模型，可动态调整扑翼频率、扑动角度及翼展伸缩幅度，使无人机具备环境自适应能力。例如，在复杂城市气流环境中，通过实时感知风速、障碍物分布，自动切换仿生飞行模式，提升抗干扰性能。

当前研究的齿轮-曲柄摇杆机构可进一步微型化，结合 MEMS 工艺与 3D 打印技术，实现毫米级驱动结构的集成制造。例如，将气缸组件与凸轮机构整合为单片式压电驱动器，减少机械传动损耗，使整机重量降至 10g 以下，续航时间突破 30 分钟[11]。

未来扑翼无人机将突破单机局限，发展仿生集群算法。通过模拟鸟群、蝙蝠群的协同飞行规则，实现大规模机群的自主编队、任务分配与抗碰撞协调。在应急救援场景中，集群可构建动态通信网络，通过扑翼运动传递信息，替代传统射频模块，增强隐蔽性[12]。

总之，虽然扑翼无人机的技术尚未成熟，但在未来扑翼无人机的发展会与时代的发展交融，乘上时代发展的浪潮，在众多产品当中脱颖而出，成为社会新助力。

参考文献

- [1] 肖志伯,刘一泽.我国低空经济发展的政策协同与制度构建路径研究[J].中国经贸期刊. F562.2025.09.15
- [2] 吴江浩,周超.仿生微型飞行器悬停飞行的空气动力学研究[J].2018.36(01)
- [3] 薛栋,宋笔锋等.仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行动力学耦合研究进展[J]. 2018.36(01)
- [4] 于海山,王子琦.微型飞行器的研究进展和关键技术[J].DOI:10.19981/j.cn23-1581/g3.2018.15.064.2018
- [5] 仿生蝙蝠 | 费斯托网站[EB].
- [6] 柴双双,张卫平等.仿昆虫扑翼微型飞行器中压电驱动器的性能参数分析[N].1006-2647(2015)05-0663-06.DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2015.05.15
- [7] 吉尼斯世界纪录.扑翼式无人机单次充电飞行时间.2022

- [8] 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].哈尔滨工业大学,2021.
- [9] 吴跃峰,武明录等.河北动物志两栖,爬行,哺乳动物类[M].河北科技出版社,2009.
- [10] 大卫·麦克唐纳.世界动物大百科全书——下[M]. 程高龄等,译.哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社,2009:886.
- [11] 谷雨.MEMS 技术现状与发展前景[J].1004-4507(2013)08-0001-09.2013.8.20
- [12] 冯一飞.基于行为法的分布式无人机集群控制方法与仿真研究[D].吉林大学.2023.