

# 仿生蝴蝶飞行器的设计

母俊杰 何园莉 罗 鹰\* 张宇杰 徐世荣 周余骏 戴晨龙

南通理工学院, 江苏 南通 226002

**摘要:**为解决传统微型扑翼飞行器仿生性不足、轻量化与高机动性难以兼顾、控制精度有限等问题,本文采用模块化设计方法,设计了一款基于蝴蝶仿生原理的微型扑翼飞行器。该飞行器以自研飞控芯片为核心控制单元,由翅膀系统、驱动系统、控制系统、电源系统及机身结构五大模块组成,采用四翅独立结构与舵机-橡皮筋联动传动机制,通过编程控制各模块协同工作,实现稳定飞行与精准操控。通过多维度性能测试验证:该飞行器总重仅19.2g,翼展38.7cm,飞行速度1.2m/s,满电连续飞行时间达3min,舵机控制精度误差 $\leq \pm 3^\circ$ ,在5-7Hz扑动频率下升力系数达0.8-1.2,可稳定实现遥控飞行、自主转向及悬停功能。该飞行器具有结构简单、仿生性强、轻量化突出、控制可靠等优点,可应用于环境监测、教育展示及科学研究等场景,对于微型仿生扑翼飞行器的开发具有一定的参考价值与技术支撑。

**关键词:** 仿生蝴蝶; 扑翼飞行器; 四翅独立结构; 舵机-橡皮筋传动; 飞控系统

## 0 引言

随着微机电系统、材料科学与仿生学的深度融合,微型扑翼飞行器因其独特的低雷诺数飞行特性、高机动性和隐蔽性,在环境监测、侦察探测、科学研究等领域展现出广阔应用前景。蝴蝶作为自然界中具有优异飞行性能的昆虫,其翅膀结构轻盈坚固、扑动模式高效灵活,为微型飞行器的设计提供了理想的仿生原型。传统微型扑翼飞行器多采用两翅结构设计,存在仿生性不足、升力效率低、转向控制精度差等问题;同时,现有产品普遍面临轻量化与结构稳定性难以兼顾的技术瓶颈,限制了其实际应用范围。

针对上述问题,国内外学者展开了大量研究。德国 Festo 公司<sup>[1]</sup>的 eMotionButterflies 翼展 50cm,重量 32g,实现了基础扑翼飞行,但结构复杂且成本较高;美国哈佛大学 RoboBee 项目<sup>[2]</sup>虽实现了微型化,翼展 3cm,重量 80mg,但依赖外部电源供电,飞行能力有限。国内方面,冷焯等人<sup>[3]</sup>研发的仿蝴蝶扑翼飞行器翼展 49.8cm,总质量 32.2g,却存在升力不足的缺陷;西北工业大学“云鸮<sup>[4]</sup>”仿生扑翼飞行器虽续航性能优异,但体积较大,仿生性有待提升。现有研究为仿生扑翼飞行器发展奠定了基础,但在轻量化、高仿生性与高控制精度的协同优化方面仍存在不足。

本文采用模块化设计思路,设计一款轻量化仿生蝴蝶飞行器,通过优化结构选型、传动机制与控制策略,解决传统产品的技术瓶颈,为微型仿生扑翼飞行器的研发提供可行的技术方案与实验依据。

## 1 仿生蝴蝶飞行器的硬件结构设计

本设计采用模块化的设计方法,将仿生蝴蝶飞行器划分为翅膀系统、驱动系统、控制系统、

电源系统及机身结构五大核心模块,各模块相互独立又协同配合,共同实现飞行器的稳定飞行与精准控制。

### 1.1 翅膀系统设计

结合自然界蝴蝶的翅膀形态与扑动特性,为实现高仿生性与飞行稳定性的协同,本设计采用四翅独立结构,实现前翅与后翅的分工协作、同步扑动,还原蝴蝶自然飞行姿态。

翅膀骨架选用碳纤维杆,密度约  $1.75\text{g}/\text{cm}^3$ ,仅为钢的  $1/4$ 、铝合金的  $2/3$ ,可在保证相同强度的前提下大幅降低结构重量,同时具备良好的刚性与韧性,满足扑动过程中的受力需求。翼膜选用 P31N 风筝布,单层厚度约  $0.05\text{mm}$ ,面密度约  $0.1\text{g}/\text{cm}^2$ ,远低于传统 PET 膜与聚酰亚胺薄膜,且柔性与形态适应性更优,兼顾轻量化与使用性能,可有效减少扑动过程中的空气阻力。

前翅采用主动扑动设计,与驱动系统直接连接,实现扑动幅度、频率的精准调控;后翅采用被动扑动设计,通过橡皮筋与前翅联动,在前翅带动下完成同步扑动,整体结构简洁,无需额外动力源,进一步降低了系统重量与复杂度。

### 1.2 驱动系统设计

驱动系统是仿生蝴蝶飞行器的动力核心,主要功能是将电能转化为机械动能,为翅膀扑动提供动力,其性能直接影响飞行器的控制精度、飞行稳定性及动力输出效率。为平衡动力输出与轻量化设计要求,规避传统机械传动结构复杂、重量较大的弊端,本设计采用舵机-橡皮筋联动传动机制,优化动力传递效率,具体结构如图 1 所示。



图1舵机-橡皮筋联动传动结构

选用 GDW1906B 型舵机作为主动动力源，该舵机体积小、重量轻，适配飞行器轻量化设计需求，其通过舵机臂与前翅主杆刚性连接，将舵机的旋转运动转化为前翅的往复扑动运动，为飞行器提供核心主动动力。后翅主杆通过两根对称布置的高强度橡皮筋与前翅主杆连接，在前翅完成一次扑动周期的过程中，橡皮筋交替完成拉伸与回缩，利用橡皮筋的弹性势能带动后翅实现被动扑动，形成前翅主动、后翅被动的协同扑动模式。

后翅扑动幅度与频率可通过调整橡皮筋的松紧程度及长度进行精准调控，通过多次调试确定最优参数，使后翅扑动与前翅扑动形成最佳协同效果，提升整体气动效率。与传统机械联动结构相比，该橡皮筋传动方案无需设置复杂的齿轮、连杆等传动部件，有效降低了结构重量与整体体积，同时减少了传动过程中的机械磨损与能量损耗，提升了传动系统的可靠性。

### 1.3 控制系统设计

仿生蝴蝶飞行器的飞控系统是实现稳定飞行与精准控制的关键核心。本设计的控制系统以自研飞控芯片为核心，基于 ARM Cortex-M4 内核进行开发设计，集成姿态感知、舵机控制、电池管理等多功能模块，可实现飞行姿态实时解算、舵机精准控制及飞行参数动态调节。

飞控系统采用 SBUS 通讯协议，工作频率范围为 2.408~2.475GHz，接收灵敏度可达 -92dBm，有效通讯距离超过 400m，可满足中远距离飞行控制需求。传感器系统搭载 MPU6050 陀螺仪与加速度计，该模块是集成六轴传感器的运动处理芯片，可实时采集飞行器的角速度、加速度等姿态参数，为姿态解算与飞行控制提供精准数据支撑，其姿态数据采集与处理流程遵循图 2，飞控芯片通过 I2C 通信方式获取传感器的原始数据，再经过解算与处理后输出控制指令。

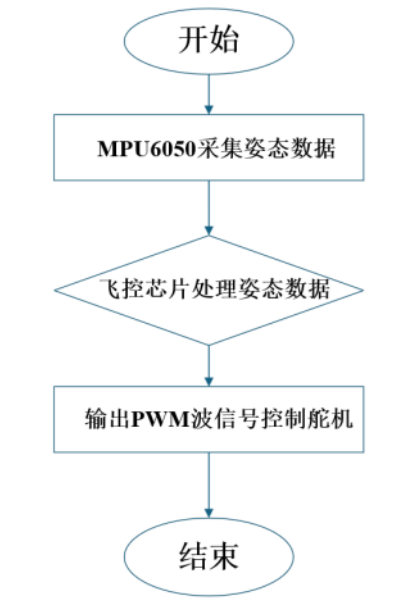


图2数据采集与处理流程

控制算法层面，集成 PID 控制算法、姿态解算算法及转向控制算法，其中 PID 控制算法用于抑制飞行过程中的姿态扰动，保证飞行器飞行稳定性；姿态解算算法用于对传感器采集的原始数据进行解算，实时输出飞行器姿态信息；转向控制算法根据姿态反馈与控制指令，调节左右前翅扑动角度差，实现精准转向，三者协同作用，确保飞行器在不同工况下均能实现稳定飞行与精准操控。飞控系统的核心控制逻辑遵循图 3 飞行姿态调整流程，根据飞行指令与姿态反馈，完成对飞行模式的精准调控。

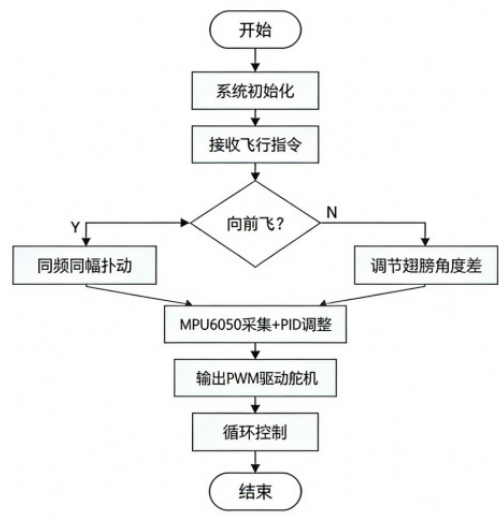


图3飞行姿态调整流程

### 1.4 电源系统设计

电源系统是飞行器的能量供给模块，负责为整个系统提供稳定、持续的供电，其性能直接影响飞行器的续航时间与工作可靠性，同时需兼顾轻量化设计需求。

本设计采用自制轻量化锂聚合物电池，规格为 7.4V 稳定电压、20C 放电能力，相较于商用同规格锂聚合物电池，质量降低约 20%~30%，在保证供电性能的同时，最大限度

降低了电源模块的重量。电池配备微型保护电路，可有效防止过充、过放、短路等问题，提升电源系统的安全性与可靠性。同时，设计标准化电源接口，便于电池的更换与充电，适配不同飞行任务的续航需求。

### 1.5 机身结构设计

机身结构作为仿生蝴蝶飞行器的支撑载体，主要用于固定各核心模块，保障系统整体的支撑强度与结构稳定性，同时需兼顾轻量化与气动性能，减少飞行过程中的空气阻力，确保飞行器飞行姿态稳定，为各模块协同工作提供可靠保障。

机身采用模块化设计，选用碳纤维材料制作，密度约 1.75g/cm<sup>3</sup>，整体结构简洁紧凑，重量轻、强度高，可有效支撑各核心模块的安装与固定。舵机、自研飞控芯片、锂电池等关键部件均安装于机身重心位置，有效避免飞行过程中因重心偏移导致的姿态失稳。机身表面做流线型处理，减少飞行过程中的空气阻力，提升气动效率；各模块通过标准化接口连接，拆卸便捷，便于后期维护与升级。经检测得知该飞行器总重 19.2g，翼展 38.7cm，样机实物如图 4 所示，样机核心部件质量分布如表 1 所示。

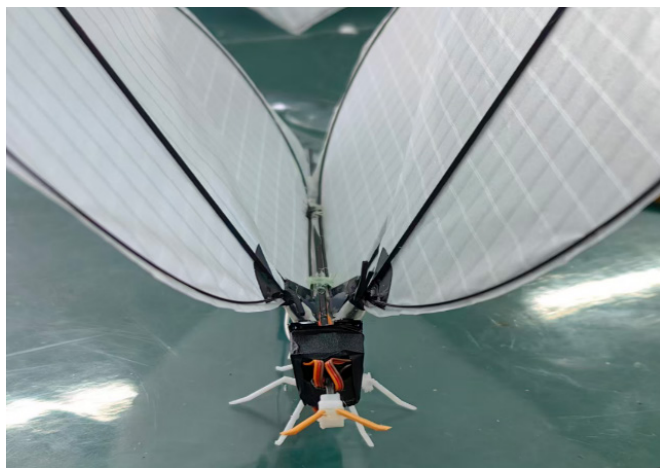


图4仿生蝴蝶飞行器样机

表1: 样机核心部件质量分布

核心部件	质量 /g	系统响应占总质量比例
机身(含 GDW1906B 舵机)	10.2	53.1%
双翼翅膀(碳纤维+P31N 风筝布)	5.7	29.7%
双翼翅膀(碳纤维+P31N 风筝布)	3.3	17.2%
合计(整机)	19.2	100%

## 2 仿生蝴蝶飞行器的软件设计

软件设计是控制仿生蝴蝶飞行器正常工作的核心，通过编写相应程序，使飞控芯片按照

预设逻辑接收指令、处理数据、输出控制信号，协调各硬件模块协同工作，实现飞行姿态控制、扑动频率调节、转向控制等功能。

本设计的软件部分以飞控芯片为核心，采用模块化编程思路，将程序划分为初始化模块、数据采集模块、姿态解算模块、舵机控制模块、通讯模块及电池管理模块，各模块相互独立，可根据需求单独调试与优化，降低了程序开发与调试的难度。飞控系统的核心控制逻辑遵循图 5 控制系统主程序流程，根据飞行指令与姿态反馈，完成对飞行模式的精准调控。

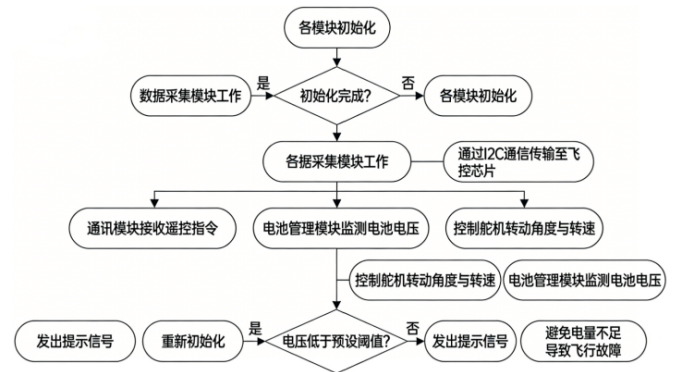


图5控制系统主程序流程

系统启动后，首先完成各模块初始化，包括飞控芯片初始化、传感器初始化、舵机初始化、通讯模块初始化等，确保各模块处于正常工作状态。初始化完成后，数据采集模块实时采集 MPU6050 传感器的姿态数据、电池电压数据等，通过 I2C 通信方式传输至飞控芯片；姿态解算模块对采集到的原始数据进行解算，结合 PID 控制算法，实时输出飞行器的姿态信息与控制指令；舵机控制模块接收控制指令，输出 PWM 波信号，精准控制舵机的转动角度与转速，进而调控翅膀的扑动频率、幅度及转向动作；通讯模块负责接收遥控指令，并将飞行器的飞行状态数据反馈给遥控器，实现人机交互；电池管理模块实时监测电池电压，当电压低于预设阈值时，发出提示信号，避免因电量不足导致飞行故障。

## 3 性能测试

为验证仿生蝴蝶飞行器的结构设计、部件选型与控制策略的合理性和可行性，参照标准化测试方法，开展静态性能测试与动态性能测试，通过多次重复测试，确保测试数据的准确性与可靠性。

### 3.1 静态性能测试

静态性能测试在实验室无风、无干扰环境下开展，重点验证样机各系统独立工作的可靠性、控制精度及部件协同性，测试项目涵盖结构稳定性、舵机控制精度、姿态传感器精度、电源稳定性及传动机构可靠性五大维度，具体测试方法为标准化定量测试，各项目具体操作

步骤如下：

(一) 结构稳定性测试：手动检查翅膀与机身连接处、舵机与传动部件连接处的牢固性，手动转动舵机与翅膀，观察转动灵活性，重复测试10次，记录是否出现松脱、卡顿等故障；

(二) 舵机控制精度测试：通过飞控系统输出不同脉宽的PWM信号，控制舵机转动至预设角度(0°、30°、60°、90°)，使用角度测量仪测量实际转角，计算转角偏差，每个角度重复测试5次，取平均值作为最终误差；

(三) 姿态传感器精度测试：将飞行器固定于水平测试台，通过传感器采集俯仰角、横

滚角、偏航角的静态数据，与标准角度仪测量值对比，计算采集误差，持续采集100组数据，统计误差范围；

(四) 电源稳定性测试：分别在空载、满载状态下，使用万用表测量电池输出电压，记录电压波动值，持续测试5min，验证电路是否存在短路、接触不良等问题；

(五) 传动机构可靠性测试：控制舵机带动前翅完成1000次连续扑动，观察橡皮筋拉伸回缩状态、翅膀扑动协调性，记录是否出现橡皮筋断裂、翅膀松动、翅膜撕裂等故障。

具体测试结果如表2所示。

表2：静态性能测试结果

测试项目	实测结果	设计要求	达标情况
结构稳定性	无松脱、转动顺畅	结构牢固、传动无故障	达标
舵机控制精度	误差 ≤ ±3°	误差 ≤ ±5°	达标
MPU6050 传感器精度	均 ≤ 1°	误差 ≤ ±2°	达标
电源稳定性	电压误差 ≤ ±2%，无短路	电压误差 ≤ ±2%，连接可靠	达标
传动机构可靠性	无断裂松动，翅膜无撕裂	连续扑动无故障	达标

3.2 动态性能测试

动态性能测试在标准化室内环境与模拟户外微风环境下分别开展，采用高速摄像机记录飞行轨迹，数据采集系统同步采集飞行参数，重点验证飞行器飞行性能、转向控制、稳定性三类指标，具体操作步骤如下：

(一) 飞行性能测试：控制飞行器完成自主起飞，通过高速摄像机追踪飞行轨迹，计算起飞距离与起飞高度；控制飞行器直线飞行5m，记录飞行时间，计算飞行速度；满电状态下持续飞行，记录连续飞行时间；调节扑动频率至5Hz、6Hz、7Hz，通过数据采集系统采集升力数据，计算升力系数，每个频率重复测试3次；

(二) 转向控制测试：控制飞行器直线飞行，发出转向指令，调节左右前翅扑动角度差至5°、10°，通过高速摄像机记录转向轨迹，测量转向半径；记录转向响应延迟时间与实际转向角度，与预设角度对比计算误差；在不同扑动频率下重复转向测试，验证转向稳定性；

(三) 稳定性测试：分别在全风、微风环境下，控制飞行器持续飞行1min，记录姿态波动数据；人为施加轻微扰动，记录姿态恢复时间；满电状态下持续飞行3min，记录扑动频率、飞行速度等参数的变化情况，验证长时间飞行可靠性。

测试结果如表3所示。

表3：动态性能测试结果

测试类别	测试项目	实测结果
飞行性能测试	起降能力	起飞 ≤ 0.5m / ≥ 1m，平稳降落
	速度与续航	1.2m/s, 3min
	升重平衡	升力系数 0.8~1.2，平衡良好
转向控制测试	角度差影响	5° 时 1.2m, 10° 时 ≤ 0.8m
	精度与灵敏度	延迟 ≤ 0.3s, 误差 ≤ ±2°
	不同扑频性能	6Hz 最优，各频率均可靠
稳定性测试	不同风速适应性	波动 ≤ ±3°，无失稳
	紧急自适应能力	0.3s 内恢复稳定
	长时间飞行性能	扑频 / 速度无明显衰减

3.3 测试结果分析

静态与动态性能测试结果表明，该仿生蝴蝶飞行器的结构设计、部件选型与控制策略均具备合理性与可行性。静态阶段各系统基础性能扎实，为动态飞行提供了可靠支撑；动态阶段能够稳定实现自主起飞、直线飞行、精准转向等核心功能，在飞行性能、控制精度与环境适应性上均达到设计目标，充分验证了四翅独

立结构、舵机-橡皮筋联动传动机制及自研飞控系统的实用性,为后续工程化应用与优化奠定了坚实基础。

#### 4 结论

本文设计的仿生蝴蝶飞行器在结构上采用高强度、质量轻的碳纤维材料制成翅膀骨架及机身,在保证飞行器所需力学性能的同时,极大地减轻了整机的质量。并且摒弃了传统

扑翼飞行器复杂的机械传动机构,采用舵机-橡皮筋联动传动方式,更加灵活地控制翅膀扑动,同时也能够在PID控制算法的基础上,飞行姿态的控制效果在响应速度上明显优于普通控制方式,在调节精度和系统稳定性上对飞行姿态的控制响应和收敛性都比较好,提升了仿生蝴蝶飞行器的飞行控制效果,对实际微型扑翼飞行器研发有很好的参考价值。

#### 参考文献:

- [1]Anonymous .Vision system helps bionic butterflies coordinate flying[J].Vision Systems Design,2016,21(10):5-5.
- [2]Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences; The RoboBee flies solo[J].NewsRx Health & Science,2019,
- [3]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. DOI:10.13952/j.cnki.jofmndr.2019.0226.
- [4]西工大仿鸟飞行器单次飞行达123min[J].机器人技术与应用,2022,(06):5.

**作者简介:**母俊杰(2005—),男,汉族,江苏宿迁,本科生,研究方向:交通运输。

**通讯作者:**罗鹰(1972—),男,汉族,江苏南通人,副教授,研究方向:汽车节能技术。

**项目信息:**2025年江苏省大学生创新训练计划项目“仿生蝴蝶的湿地监测应用”(项目编号:S202512056013)。

南通市新能源汽车数字化开发与检测技术重点实验室项目(项目编号:CP12017003)。