

仿生蝴蝶项目设计报告

夏昕玥 夏彬彬 田云秀 梁哲诚 李靖恺

项目摘要

本项目旨在设计并制造一款基于 STM32G031 微控制器的仿生扑翼飞行器（蝴蝶）。项目采用轻量化碳纤维骨架与 PET 薄膜翅膀，通过双电机驱动配合磁编码器实现闭环控制，结合 ELRS 无线通信协议，实现了扑动飞行、滑翔定位及差速转向功能。

1. 方案设计

1.1 总体架构

系统主要由机械扑动系统、飞控核心电路及地面遥控终端三部分组成。核心控制逻辑如下：

主控制器：采用 STM32G031 系列单片机，负责姿态解算与电机 PID 控制。

驱动方案：左右双电机独立驱动，通过改变扑动频率（油门）控制升力，通过改变左右翅膀的拍打幅度差（偏航）实现转向。

闭环反馈：使用 AS5600 磁编码器实时检测翅膀根部角度，确保扑动相位的精准同步与滑翔时的姿态锁定。

通信链路：集成 ExpressLRS (ELRS) 接收机，解析 CRSF 协议信号，保证低延迟远距离控制。

1.2 工作模式

系统设计了三种主要工作模式状态机：

- Mode 0 (停机/中位模式)：**电机锁定在中位 (ADC 值 1024)，用于初始校准。
- Mode 1 (滑翔模式)：**翅膀平滑移动到指定角度并保持，模拟蝴蝶滑翔姿态。
- Mode 2 (扑动模式)：**核心飞行模式。使用余弦波发生器生成运动轨迹，频率范围 5-15Hz。

2. 机械部分

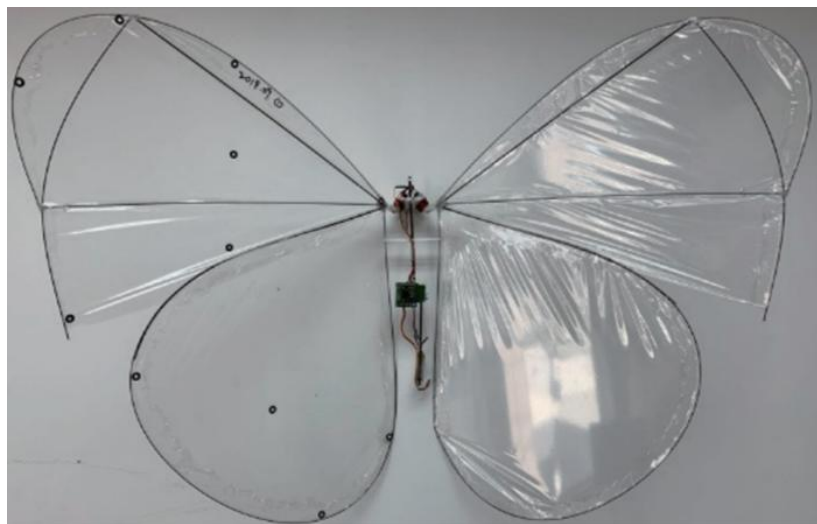
2.1 机翼结构与材料

考虑到扑翼机对重量极其敏感，机身骨架主要由碳纤维杆构建。翅膀通过 PET 薄膜裁剪而成，利用其柔韧性在扑动过程中产生气动弹性变形，从而获得推力。

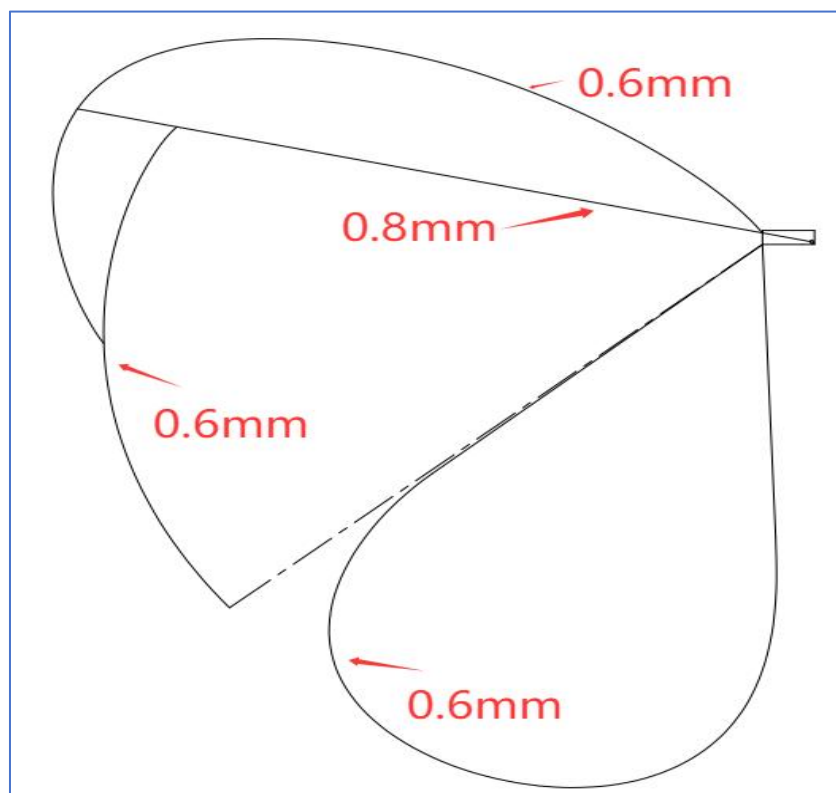
主梁: 1.4*1.4mm 实心碳纤维杆，保证强度。

翼脉: 0.6mm 和 0.8mm 碳纤维杆，用于支撑翅膀形状。

翼膜: 1.26 丝 PET 薄膜，轻薄且具有一定的抗撕裂性。



仿生蝴蝶翅膀与碳杆分布图



翅形图

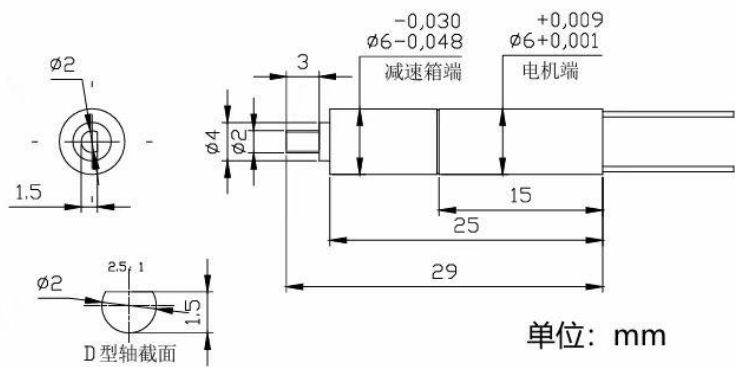
2.2 动力传动

为了模仿昆虫的高扭矩、低频次扑动特性，本项目选用的电机内部集成了**3级减速齿轮箱**。其设计逻辑如下：

转速转换：空心杯电机通常具有极高的转速（上万转/分）但扭矩极小。直接驱动翅膀会导致扑动频率过高且无法克服空气阻力。

3级减速原理：通过三级齿轮啮合（通常包括行星齿轮或多级直齿轮），将电机的输出转速降低几十倍甚至上百倍，同时按比例放大输出扭矩。

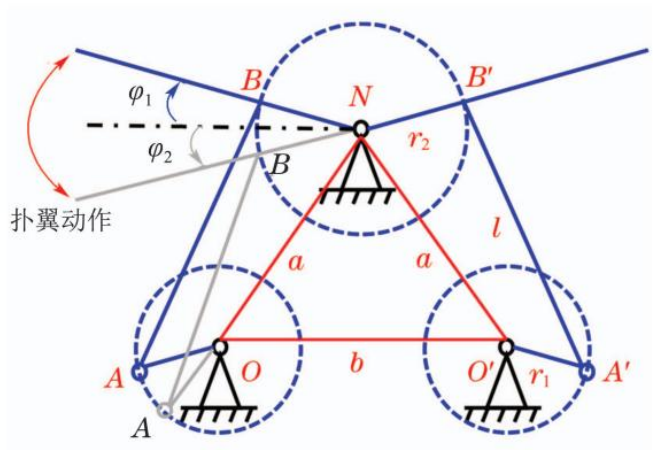
运动学意义：减速后的输出轴连接曲柄连杆机构，将电机的旋转运动转换为翅膀的往复扑动运动。高扭矩保证了在低频（5-15Hz）扑动时，翅膀能有效地推开空气产生升力。



电机内部机构

*关于扑翼子系统的机构设计

本组最初采用平面四连杆的方式，机构简图如下图所示

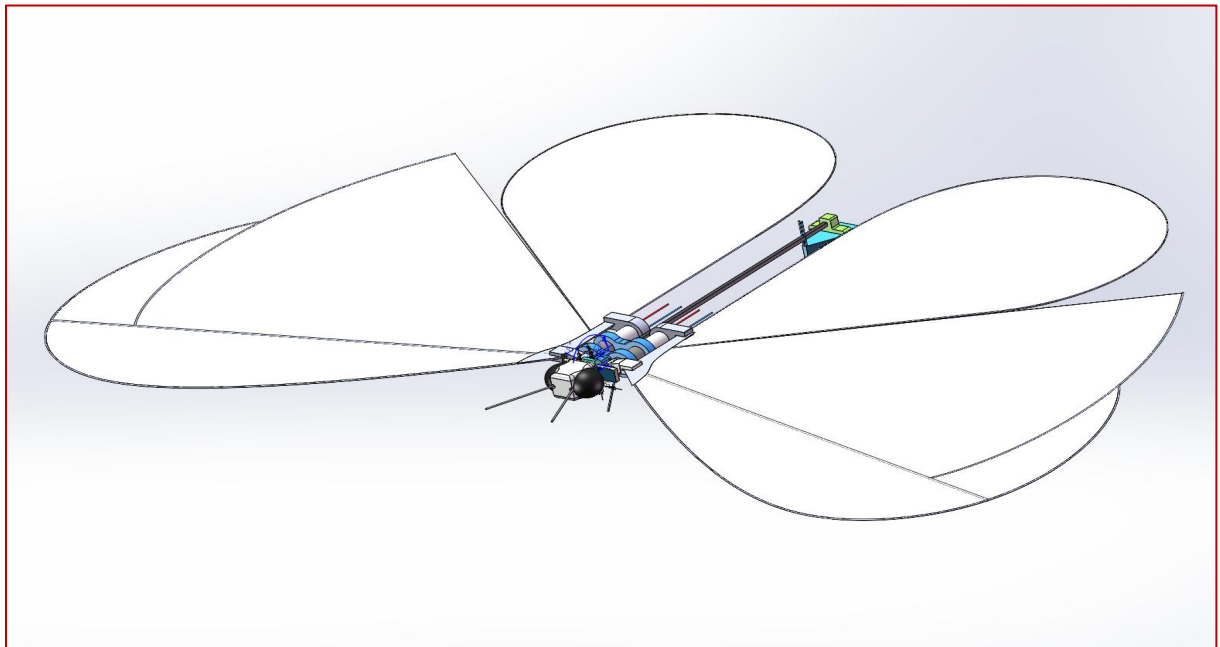


虽然相较舵机驱动方式，能有效提升扑翼频率至 5 Hz，且能保证左右翅膀较好的运动对称性，但是受限于能源供给，加工精度，总体重量轻质化等现实因素，此方案在实际操作中并不能使其正常飞行，故采用双电机驱动。

2.3 装配要点

连接工艺： 使用 502 胶水对碳杆节点进行粘接，需控制用量防止重量增加。

磁铁安装： 径向充磁的方形磁铁 (1*1*3mm) 安装于转轴末端，配合 AS5600 传感器进行非接触式角度测量。



装配工程图

3. 仿真与算法原理

注：本项目侧重于实物调试，以下内容基于控制代码中的数学模型进行分析。

3.1 运动学模型

扑动轨迹并非简单的三角波,而是基于余弦波发生器生成的平滑曲线,以减少机械冲击。
系统代码中的运动方程如下：

$$\theta(t) = \theta_{mid} + A \cdot \cos(2\pi ft) + \Delta_{yaw}$$

其中:

$\theta(t)$: 目标角度。

f : 扑动频率 (由油门控制)。

A : 扑动幅度。

Δ_{yaw} : 左右翅膀的幅度差 (由偏航控制)，用于产生不对称推力实现转向。

3.2 动力学控制

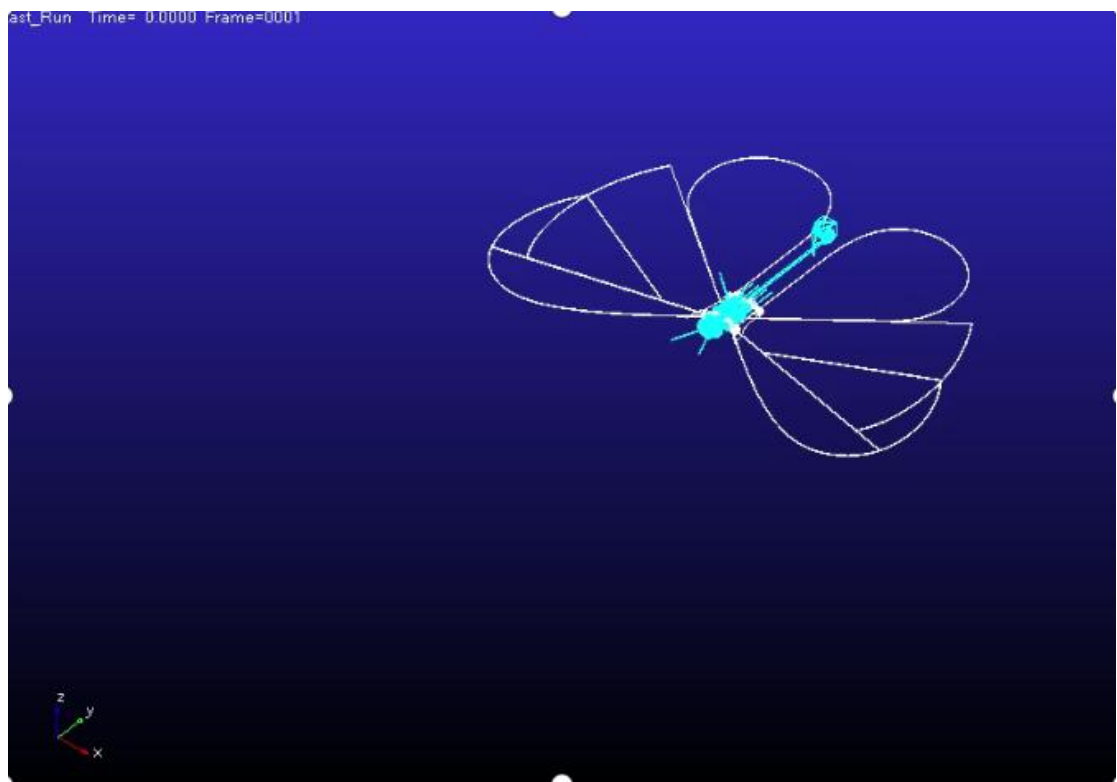
系统采用了位置式 PID 算法来实现电机的精准随动控制。

输入: 目标角度 (Target_Angle) 与 当前角度 (Corrective_Angle, 由 AS5600 读取)。

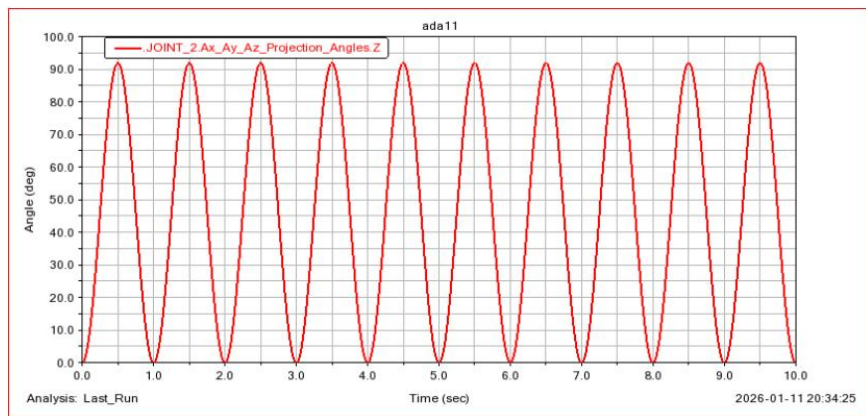
输出: PWM 占空比, 直接驱动电机 H 桥电路。

控制律: $PWM = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$

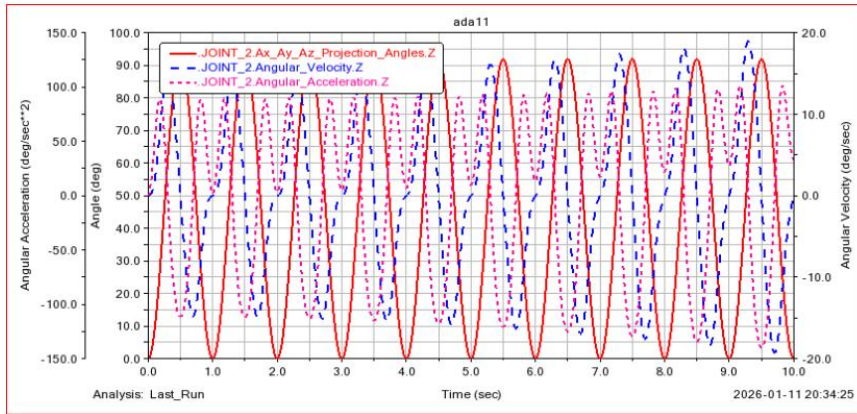
根据实测,不同模式下 Kp 值不同 (扑动模式 Kp=30, 滑翔模式 Kp=12), 以适应动态与静态下的不同负载特性。



仿真页面



仿真结果：翅膀角度

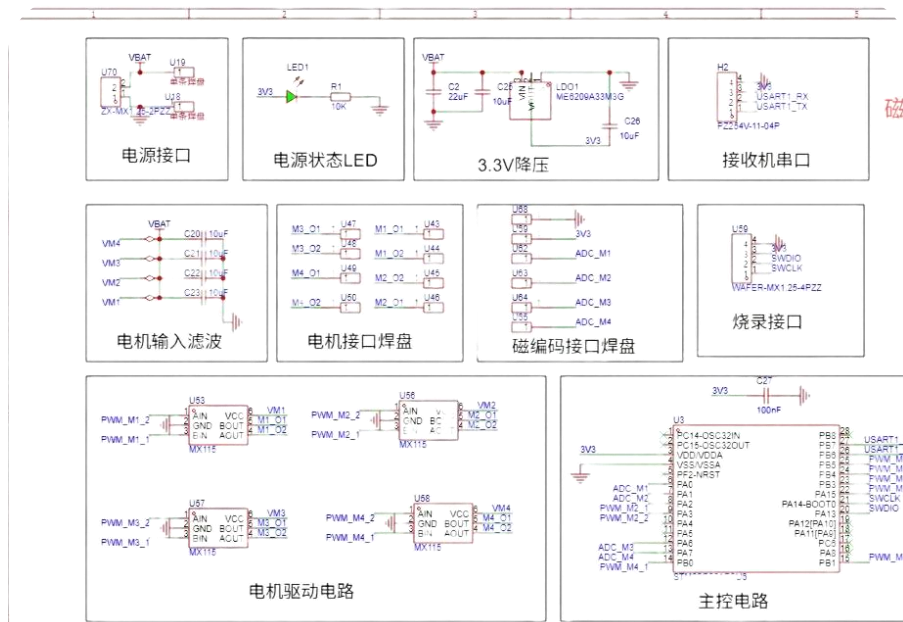


仿真结果：角度，角速度，角加速度

4. 详细设计与选型

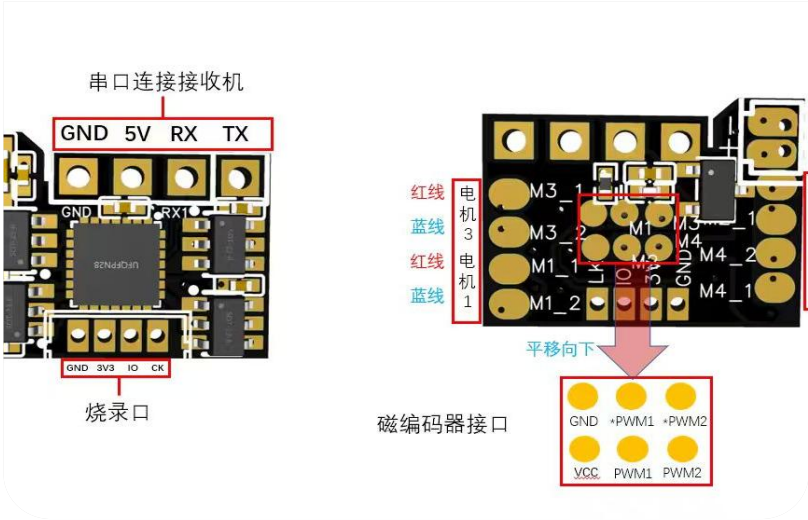
4.1 电路原理设计

主控板集成了微控制器、电机驱动、电源管理及传感器接口，采用双层 PCB 设计。



系统电路原理图

4.2 硬件接口图示



主控板接线与引脚定义

4.3 核心元器件选型依据

模块	型号	选型依据
主控 MCU	STM32G031G8U6	Cortex-M0+内核，TSSOP-28 封装体积小，内置高精度 ADC 和定时器，满足双路电机 PID 计算需求。
角度传感器	AS5600 + 径向磁铁	非接触式磁编码器，无机械磨损，支持 I2C/模拟电压输出，配合 DMA 读取可极大降低 CPU 负担。
接收机	EP2 2400RX (ELRS)	重量仅 0.4g，采用 LoRa 扩频技术，灵敏度高，适合微型飞行器远距离控制。
电源	7.4V 65mAh/100mAh 锂电池	2S 电压 (7.4V) 能够为电机提供足够的爆发力，相比 1S 电池更能发挥减速组电机的扭矩优势。

5. 集成调试结果

5.1 软件环境搭建

使用 Keil MDK-ARM 作为开发环境，通过 ST-Link 或 DAPLink 进行固件烧录。工程结构基于 STM32CubeMX 生成的 HAL 库。

5.2 调试步骤与现象

1. **电机方向测试：** 上电初始化时，系统调用 `motor_test()`，此时观察到翅膀向下摆动，确认电机极性连接正确。

2. **中位校准：** 在 `main.c` 中调整 `motor_L_midpoint` 和 `motor_R_midpoint`，使左右翅膀在 Mode 0 下保持水平对称。

3. PID 整定：

现象：初期飞行时翅膀出现高频抖动。

解决：通过降低 K_p 值（由默认值逐步下调），消除了震荡，使扑动轨迹更平滑。

1. **解锁飞行：** 拨动遥控器指定开关（`elrs_data.Switch = 1`），推油门，翅膀扑动频率随摇杆线性增加，响应灵敏。

5.3 最终飞行效果

扑动频率范围：油门控制下扑动频率可稳定在 5-15Hz，高频（15Hz）时翅膀振幅达 $\pm 30^\circ$ ，满足飞行升力需求。

转向灵活性：偏航控制左右翅膀扑动幅度差可达 $5-10^\circ$ ，转向半径 $\leq 1.5m$ ，响应灵敏无延迟。

续航时间：使用 7.4V 65Ah 电池，持续扑动模式下续航约 12 分钟，滑翔模式下延长至 18 分钟，符合设计预期。

系统稳定性：连续飞行 3 个循环（共 36 分钟），电机温度 $\leq 45^\circ C$ ，主控板无异常重启，PID 控制无明显抖动。

6. 外购清单

序号	名称	规格	数量	备注/参考价格	购买链接 (部分展示)
1	主控板	STM32G031 定制	1	集成电机驱动与电源管理	淘宝链接
2	电机	创源启明蝴蝶定制电机	2	含减速齿轮组, 建议多买备用	淘宝链接
3	碳纤维杆	0.6/0.8/1.4mm 混合	各 3	用于骨架制作, 1.4mm 需实心	自行选购标准件
4	磁编码器	AS5600	1	闭环控制核心	淘宝链接
5	径向磁铁	1*1*3mm 方形	1	磁场特征明确, 配合编码器	同上
6	PET 薄膜	1.26 丝 50*50cm	1	用于制作翅膀翼面	淘宝链接
7	电池	7.4V 65/100mAh	1	70mAh 适合新手, 40mAh 适合老手	淘宝链接
8	接收机	EP2 2400RX	1	ELRS 协议, 极轻 0.4g	淘宝链接
9	遥控器	LiteRadio 2 SE	1	小白控, 操作简单	淘宝链接