

仿生扑翼自稳控制模型设计与仿真

胡馨竿 王俊杰 *

沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159

摘要: 本文针对扑翼飞行器控制系统, 设计了自稳定高飞行控制模型, 重点分析了仿生扑翼飞行器的动力学特性及其定高自稳控制策略。首先, 采用微元法研究了扑翼飞行器在飞行过程中的受力分布与运动特性, 研究了翅膀拍动周期内升力与推力的生成机制。其次, 针对尾翼姿态角, 系统探讨了尾翼升力、机体总受力、阻力与高度控制之间的相互关系。最终, 结合转动惯量和力矩的计算, 建立了飞行器的受力模型, 提出了高度与姿态的控制方法, 并设计了基于传统 PID 控制的高度与姿态自稳控制模型, 实现高度与姿态的精确调节。仿真实验结果与外场实飞数据表明, 该飞行器能够快速收敛至期望高度, 并在小范围内保持高度波动, 验证了其在俯仰、滚转与偏航方向上的稳定性, 充分体现了控制模型的自稳特性。

关键词: 仿生扑翼飞行器; 空气动力学; 动力学建模; 姿态控制; 自稳定高

Design and Simulation of Bionic Flapping Wing Self-stabilizing Control Model

Hu, Qingyu Wang, Junjie*

School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning, 110159, China

Abstract: In this paper, a self-stabilizing high-altitude flight control model is designed for the flapping-wing aircraft control system, focusing on the analysis of the dynamic characteristics of the bionic flapping-wing aircraft and its fixed-altitude self-stabilizing control strategy. First, the force distribution and motion characteristics of the flapping-wing aircraft during flight are studied by the microelement method, and the generation mechanism of lift and thrust during the wing flapping cycle is studied. Secondly, for the tail attitude angle, the relationship between the tail lift, the total force of the body, the drag and the altitude control is systematically discussed. Finally, combined with the calculation of the moment of inertia and torque, the force model of the aircraft is established, the control method of the altitude and attitude is proposed, and the altitude and attitude self-stabilizing control model based on the traditional PID control is designed to achieve precise adjustment of the altitude and attitude. The simulation experimental results and the field actual flight data show that the aircraft can quickly converge to the desired altitude and maintain altitude fluctuations within a small range, verifying its stability in the pitch, roll and yaw directions, which fully reflects the self-stabilizing characteristics of the control model.

Keywords: Bionic flapping wing aircraft; Aerodynamics; Dynamic modeling; Attitude control; Self-stabilizing high; Control system

DOI: 10.62639/sspis38.20250203

引言

随着无人机技术的快速发展, 扑翼机低雷诺数与仿生伪装性, 因此在诸多领域具有广泛的应用前景。作为一种新型飞行平台, 逐渐成为研究的热点。

北京交通大学结合空气动力学, 采用模糊自适应 PID 控制器, 实现了飞行器的多种飞行模式^[1]。北京科技大学的 *USTBird* 无需尾翼控制, 采用 PD 控制实现室外自主巡航飞行^[2-3]。哈尔滨工业大学根据运动学模型及相对运动学模型, 开发了嵌入式高集成的飞行控制系统^[4-5]。西工大扑翼机 *RoboFalcon* 能够模仿鸟类和蝙蝠的飞行特性, 实现翼展变化与挥动周期同步的新型驱动机制^[6]。大型扑翼飞行机器人 *HIT-Phoenix* 采用 FreeRTOS 实时操作系统设计了高度集成的控制器, 满足了对体积、重量和功率的严格限制, 实现了自动、半自动和手动三种飞行模式^[7]。吉林

大学利用复数矢量法对扑动机构的运动学方程进行了详细分析和计算, 确保了扑翼机在不同飞行阶段能够实现理想的翅膀运动^[8]。吉林大学针对扑翼飞行器的定高飞行控制问题, 通过运动学仿真与计算流体力学仿真建立相应的飞行器运动学模型^[9]。

由于扑翼飞行器的气动特性复杂, 而扑翼机的自稳定高控制直接关系到飞行的可靠性。因此, 设计一种能够实现高度自稳的控制模型, 成为扑翼飞行器研究的重要内容。

一、自稳定高模型及控制算法

本文所研究的扑翼机采用了一个电机和一个舵机进行控制。扑翼机实物如图 1 所示。

(稿件编号: IS-25-3-M001)

作者简介: 胡馨竿 (2002-), 男, 汉族, 籍贯: 沈阳, 学生, 本科学历, 研究方向: 无人机控制系统优化。

通讯作者: 王俊杰 (1980-), 男, 蒙古族, 籍贯: 沈阳, 职称: 副教授, 硕士学历, 研究方向: 无人机协同控制。

基金项目: 辽宁省大学生创新创业计划项目: “仿生飞行器的自稳飞控模型与任务决策算法的设计及仿真” (编号: 202310144026)。



图 1 扑翼机样机

（一）气动动力学建模

本文通过气动力学计算模块、动力学运动模块和 PID 飞行控制模块三个核心部分，进行自稳飞行设计。采用微元法来研究扑翼飞行器升力的生成机制。我们将本体视为一个圆柱体，单侧的机翼视为 1/4 椭圆。可以类比如图 2 所示。

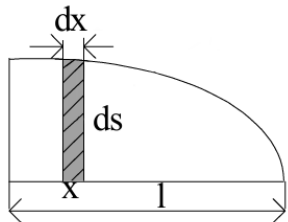


图 2 机翼微元法示意图

我们可以通过微元法求得图 2 中的阴影部分速度 $v(t)$ ，即

	$v(t)=m(t)*x$	(1)
--	---------------	-----

$m(t)$ 为 t 时刻机翼与水平来流的夹角方位角。基于上述分析，通过微元法可以计算在一个周期内，翅膀的平均升力。通过微元法，将机翼和尾翼的受力分解为微小部分的瞬时力计算，通过积分得到整体受力。

基于气动力学提供的受力模型，我们可以推导出飞行器的加速度、高度位置以及姿态角的变化规律，精确描述飞行器的高度变化和姿态变化。尾翼升力 F_m 在机体坐标系中的分力为：

	$F_m^x=F_m\cos\phi\cos\theta$	(2)
	$F_m^y=F_m\sin\phi\cos\theta$	(3)
	$F_m^z=F_m\cos\phi\sin\theta$	(4)

其中， θ 为俯仰角为， ϕ 为尾翼滚转角。对于机体整体的动力学，机体在 x 、 y 、 z 三个方向的总受力分别为：

	$F^x=F_t+F_d+F_m^x$	(5)
	$F^y=F_m^y$	(6)
	$F^z=F_G+F_L+F_v^z$	(7)

在扑翼飞行器的飞行过程中，高度方向的主要受力包括翅膀产生的升力 F_L 、飞行器自身的重力 G ，以及尾翼向上的分力。通过加速度 a ，可以进一步计算飞行器的高度变化，假设初始高度

为 H_0 ，则飞行器在时间 t 后的高度 H 为：

	$H=H_0+\int\int a dt$	(8)
--	-----------------------	-----

基于上述气动力学和运动学模型，推导了扑翼机在飞行过程中受力情况和运动高度、姿态变化的数学模型，利用 Simulink 搭建相应的仿真模型验证模型的正确性。如图 3 所示。

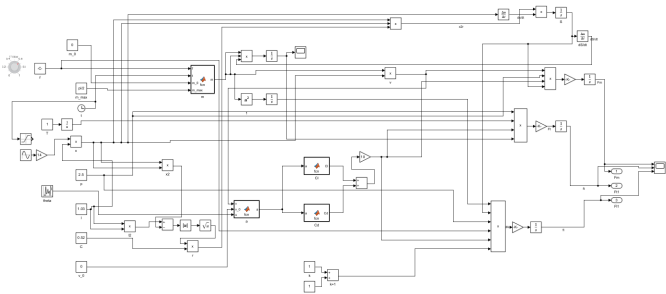


图 3 气动力学计算模型模块

通过微元法分析，可以清晰地观察到在半个周期（即单次上拍或下拍）内，产生的力会发生变化，呈现出一定的规律性。

（二）PID 自稳定高控制算法

基于气动力学和运动学模型受力分析及参数结果，PID 控制器使飞行器能够快速收敛到期望高度，通过实时调整尾翼的角度，确保飞行器的姿态稳定在期望值。

根据图 4 所示，在传统 PID 控制下，扑翼飞行器的俯仰角数值逐渐接近设定的期望值 25° ，并最终趋于平稳。尽管在 24° 至 26° 之间存在小范围的波动，但这种误差在可接受范围内，可以认为俯仰角已稳定在期望值 25° 附近，实现了角度的自稳控制。PID 控制器通过比例环节快速响应俯仰角的偏差，使飞行器迅速向期望角度调整；积分环节则有效消除了稳态误差，确保俯仰角最终稳定在 25° ；而微分环节在本例中未启用，因为系统对俯仰角的调节无需额外的阻尼来抑制振荡。

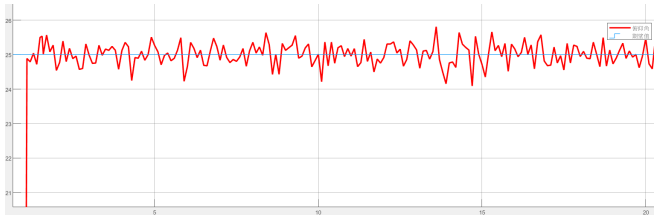


图 4 仿真俯仰角测试图

如图 5 所示，在 PID 控制下，扑翼飞行器的高度数值逐渐接近设定的期望值 35 米，并最终趋于平稳。尽管在 34 米至 36 米之间存在微小误差，但这种波动在可接受范围内，表明飞行器已成功稳定在期望高度附近，实现了高度的自稳控制。

PID 控制器通过比例环节快速响应高度误差，使飞行器迅速向目标高度调整；积分环节有效消除了稳态误差，确保高度最终稳定在 35 米。

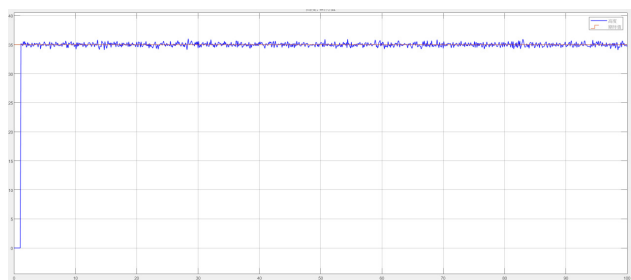


图 5 100s 内仿真高度测试

二、外场飞行实验数据

为验证姿态控制实际效果，我们进行了外场飞行实验。通过外场实验。实验结果显示，扑翼飞行器在飞行过程中能够实现良好的姿态稳定性。具体表现为俯仰角稳定在 1°，而滚转角与偏航角则在 0° 附近呈现小幅度波动，如图 6 所示。这一结果表明，扑翼飞行器能够自主保持姿态稳定，成功达到了预期控制效果。

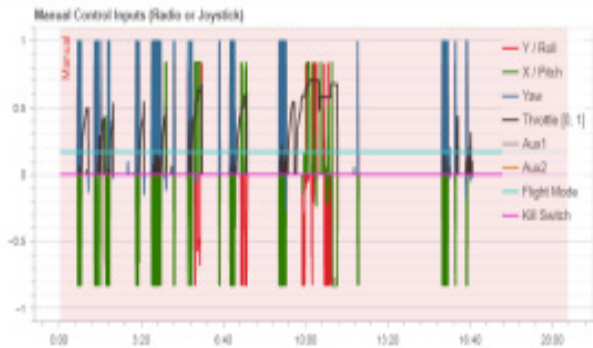


图 6 飞行姿态角变化情况



图 7 卫星地图飞行轨迹

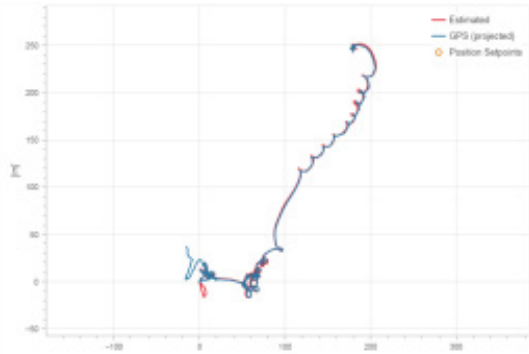


图 8 平面内飞行轨迹

航向保持模式下的飞行轨迹如图 7、图 8 所示。其中图 7 展示了经纬度轨迹投影在卫星地图上的效果，而图 8 则将经纬度信息转换为平面内的米制单位，与实际实验场地的尺寸相符。从图中可以看出，样机能够稳定地按照既定航向前进，表明航向控制策略的有效性。实测航向与期望航向的对比进一步验证了系统的精度稳定控制能力。整体实验结果表明，扑翼飞行器在航向保持模式下能够实现稳定、精确的飞行，达到了预期设计目标。

三、结束语

本文研究了仿生扑翼飞行器的气动力学特性、动力学行为及其高度和姿态自稳控制策略，分析了翅膀拍动过程中升力和推力的生成机制，揭示了翅膀折叠与展开对气动性能的优化作用，基于尾翼姿态角建立了飞行器的受力模型，探讨了高度和姿态的控制方法，设计了基于传统 PID 控制的自稳控制模型，通过调节电机扑动频率实现高度和姿态的精确调节，并通过仿真和实飞实验表明飞行器能够快速收敛到期望高度，并在小范围内波动，体现了系统的自稳特性。未来的研究可以进一步结合模糊控制、神经网络控制等智能控制算法，以提高系统的适应性和抗干扰能力。

参考文献：

[1] 据鸿德. 基于 PX4 的扑翼飞行器位置与姿态控制方法研究与仿真 [D]. 北京交通大学, 2023. DOI:10. 26944/d. cnki. gbfju. 2023. 003171.

[2] 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. DOI:10. 26945/d. cnki. gbju. 2023. 000126.

[3] 穆新星. 仿生扑翼飞行机器人自主飞行控制系统设计 [D]. 北京科技大学, 2022. DOI:10. 26945/d. cnki. gbju. 2022. 000090.

[4] 王元鹏. 大型仿生扑翼飞行机器人自主编队飞行队形设计及实现 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021. DOI:10. 27061/d. cnki. ghgdu. 2021. 000878.

[5] 刘军涛. 一种带翼型扑翼飞行机器人设计及飞行控制研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018.

[6] A. Chen, B. Song, Z. Wang, D. Xue and K. Liu, "A Novel Actuation Strategy for an Agile Bioinspired FWAV Performing a Morphing-Coupled Wingbeat Pattern," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 39, no. 1, pp. 452-469, Feb. 2023, doi: 10.1109/TR0. 2022. 3189812.

[7] Wenfu XU, Erzhen PAN, Juntao LIU, Yihong LI, Han YUAN. Flight control of a large-scale flapping-wing flying robotic bird: System development and flight experiment[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35 (2): 235-249.

[8] 张天和. 基于双层曲柄结构的扑翼机飞行控制器的研究 [D]. 吉林大学, 2023. DOI:10. 27162/d. cnki. gjlin. 2023. 003786.

[9] 杜巧玲, 张天和, 郑伟. 扑翼飞行器定高飞行控制器的模型构建与仿真 [J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46 (06): 827-831.