

蝴蝶仿生飞行器的飞行稳定性与控制策略研究

郭泽萱¹ 吴影² 巩权威³ 杨清月¹ 关舒豪⁴

1 沈阳航空航天大学国际工程师学院 2 沈阳航空航天大学应用技术学院

3 沈阳航空航天大学民用航空学院 4 沈阳航空航天大学经济与管理学院

DOI:10.12238/pe.v2i6.10428

[摘要] 研究聚焦于仿蝴蝶飞行器的飞行稳定性与控制仿真。利用XFLOW软件,在低雷诺数非定常流场条件下,对仿蝴蝶飞行器进行三维数值仿真,分析翅膀扑动对气流的影响及飞行参数对性能的作用。同时,运用片条理论计算气动力,构建动力学模型,并通过PID控制方法,使用MATLAB/Simulink进行仿真验证,确保飞行控制的精确性与有效性。

[关键词] 仿蝴蝶飞行器; 气动分析; 控制仿真

中图分类号: TN967.6 文献标识码: A

Research on Flight Stability and Control Strategy of Butterfly Biomimetic Aircraft

Zexuan Guo¹ Ying Wu² Quanwei Gong³ Qingyue Yang¹ Shuhao Guan⁴

1 School of International Engineering, Shenyang Aerospace University

2 School of Applied Technology, Shenyang Aerospace University

3 School of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University

4 School of International Engineering, Shenyang Aerospace University

[Abstract] The research focuses on the flight stability and control simulation of the butterfly aircraft. By using XFLOW software, three-dimensional numerical simulation of butterfly aircraft was carried out under the condition of unsteady flow field at low Reynolds number, and the effect of wing flutter on airflow and flight parameters on performance were analyzed. At the same time, the aerodynamic force is calculated using the strip theory, the dynamic model is built, and the PID control method is verified by MATLAB/Simulink simulation to ensure the accuracy and effectiveness of the flight control.

[Key words] butterfly aircraft; aerodynamic analysis; control simulation

仿蝴蝶飞行器的研究领域,目前尚处于探索阶段,相较于传统固定翼和旋翼飞行器,相关研究较为有限^[1]。仿蝴蝶飞行器的飞行原理与常规扑翼飞行器存在显著差异,飞行姿态也大不相同,导致现有的固定翼和旋翼飞行器理论难以直接应用。因此,仿蝴蝶飞行器研究面临众多挑战,需要突破关键技术瓶颈^[2]。研究者们通过观察蝴蝶的飞行行为,利用高速摄像技术等先进观测手段,对蝴蝶的飞行运动学进行分析,构建了蝴蝶飞行的动力学模型,并在此基础上开发了仿蝴蝶扑翼飞行器的原型机。

1 总体设计

飞行器在飞行过程中需要保持稳定,平飞时提供的升力要与重力相当^[3]。而在进行滚转、偏航等机动动作时,需要提供更多的升力。通过详细分析和计算,确定了尺寸参数如下表。

仿生扑翼飞行器的翅膀设计中,柔性翼能够产生相对较大的气动力及抗干扰能力而更受青睐。本作品模拟蝴蝶翅脉

和翅膜,采用碳纤维增强复合材料作为翅脉结构材料,利用其高强度、耐磨损等特性,以及PET薄膜材料作为翅膜,因其良好的透明度、光学性能和电绝缘性能。为增强结构强度、减少气动损失,作品采用纵脉沿翅膀展向伸展的结构布局。通过MATLAB/Simulink进行仿真验证,确保设计的精确性和有效性。

表1 最终几何参数

参数名	符号	数值	单位
翼面面积	S	0.084	m ²
展长	L	0.493	m
跟弦长	C ₁	0.213	m
最大弦向长度	C ₂	0.261	m

根据上述的外观尺寸,绘制该图,其包含结构模型以及舵机和电池等零部件的大概安装位置,如图1。

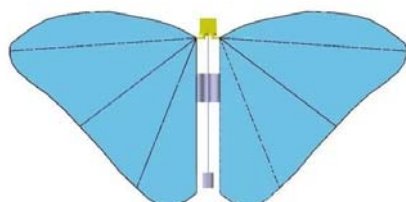


图1 仿蝴蝶飞行器三维几何图

2 仿蝴蝶飞行器飞行稳定性分析

2.1 仿蝴蝶飞行器气动计算模型。与鸟类飞行相比, 蝴蝶的翅膀扑动包含明显的大角度翻转。将蝴蝶飞行分为四阶段: 下扑、下翻、上扑、上翻(见图2-3)。翅膀阻力提供升力和推力。蝴蝶下扑翻转时, 阻力向上生成主要升力, 上扑翻转时阻力向前生成主要推力。飞行中可忽略机身在调节平衡时对气动力的影响。



图2 翅膀下扑及下翻图(其一) 图3 翅膀上扑及上翻图(其一)

在飞行器的设计中, 气动特性的分析对制造、试飞及控制样机都起到至关重要的作用。本文基于蝴蝶在振翅时的飞行特性, 构建了以多自由度为前提的“振翅-翻转”运动模型。为获取飞行器的相关气动特性, 采用XFlow软件, 对飞行器进行数值仿真, 模拟在振翅时引起的空气流场。

2.2 气动计算方案。本文旨在探究仿蝴蝶飞行器的飞行动力学, 分析飞行时速度、翅膀扑动时的频率、扑动时的角度、在翻转时的角度及扑动角度分配比例对气动力的影响。研究设置相关5个关键变量: 飞行速度、扑动频率、扑动角度、翻转角度和扑动角度分配比例, 每变量设5组参数(见表2)。为确保其研究合理性, 选取其他变量时, 根据正常飞行时的参数进行选择。

表二

参数	数据				
飞行速度(m/s)	0	0.5	1	1.5	2
扑动频率(Hz)	2	4	6	8	10
扑动角度(°)	90	105	120	135	150
翻转角度(°)	30	45	60	75	90
扑动角分配比例	1:02	2:03	1:01	3:02	2:01

2.3 扑翼扑动过程的压力变化分析。通过图4和5, 仿生蝴蝶飞行器下扑与翻转时, 前缘和翼梢产生涡流, 导致上表面前端和翼梢处形成低压区, 下表面高压。背面中心低压区在下扑与翻转阶段贡献升力。机身水平, 升力向上, 阻力导致推力为负。分析气动载荷变化曲线和受力情况。上扑与翻转阶段, 下表面低压, 上表面高压, 翼尖负压, 翼梢背侧和尾部高压区, 由涡流和向下移动产生。抬头姿态下, 扑动产生前下部力, 提供推力, 负升力。爬升中, 机翼弯曲增升。翅膀上下扑击翻转间, 仿蝴蝶飞行器通过升力维持飞行, 前进推力维持速度, 旋转实现力矩平衡。扑击

阶段, 飞行器能量来自内载能源系统。

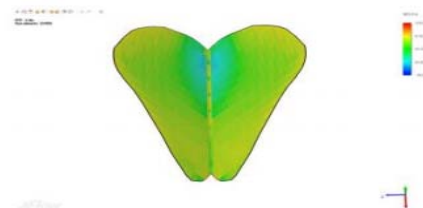


图4 翅膀上表面压力云图(其一)

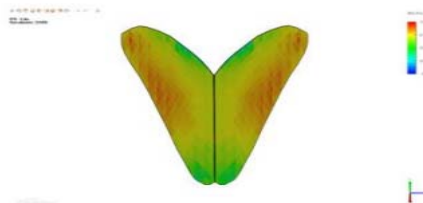


图5 翅膀下表面压力云图(其一)

2.4 扑动周期的涡量分析。图6为翅膀扑动和翻转时的涡量分布。翅膀下扑并翻转时, 翼梢上表面产生涡流, 随着翅膀持续下扑, 涡流向后移动。翅膀上扑并翻转时, 下表面产生涡流, 这些涡流逐渐远离飞行器并向外扩散。

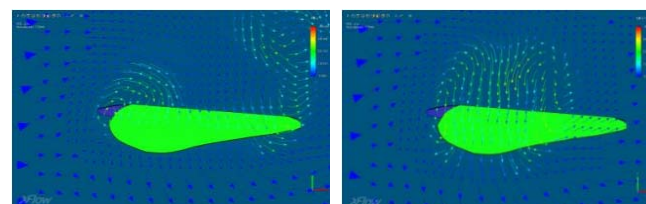


图6 翼前缘涡量图

2.5 翼前缘涡量变化分析。观察图6, 可见翅膀扇动时翼梢及前沿均形成涡流。随翼展增加, 前沿涡流增强, 因线速度高。外缘处前沿及后侧涡流明显, 推论外侧升力较大。

2.6 扑动角度对升力和推力的影响。观察显示, 在鸟类从静止到起飞过程中, 翅膀扑动角近180°。大角度的扑动会帮助其保持静止, 翅膀不会再产生升力, 当在一开始的飞行速度为零时。在特定的情况下, 此扑动会产生较大升力。为探究飞行时其对升力和推力的影响, 其他飞行的参数固定: 飞行速度1m/s, 扑动频率6Hz, 翻转角60°, 扑动角2:1, 不同扑动角(75°、90°、105°、120°、135°)下, 分析升力, 记录推力数据。

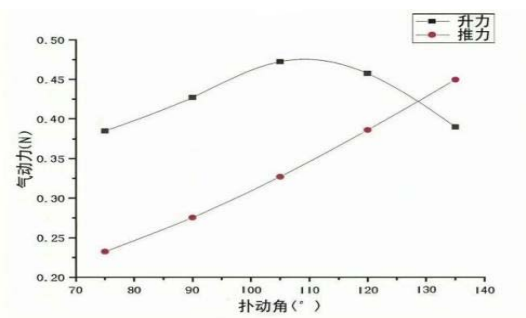


图7 不同扑动角度的气动力变化趋势图

如图七, 在扑动周期内产生的平均升力为先上升后下降的

趋势。在75°至105°之间时,升力会逐渐增加;在105°之后时,升力逐渐减小。

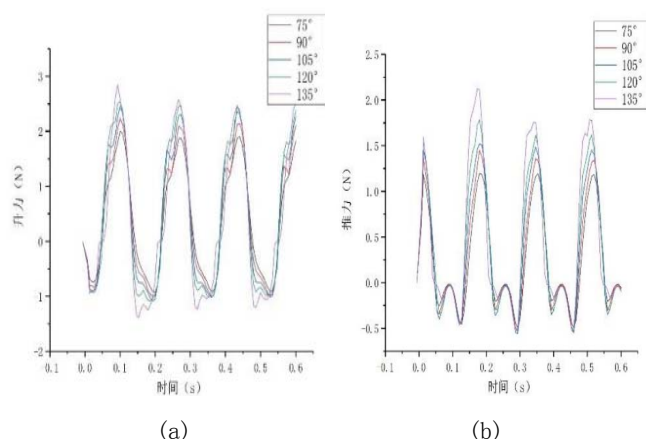


图8 (a)不同扑动角度下实时升力图 (b)不同扑动频率下实时推力图

根据图8(a)的数据显示,翅膀下的正向升力与扇动角呈正相关,而翅膀上的负向升力也是如此。当扇动角小于105°时,正向升力的增幅超过负向升力,从而导致总体升力增加;但当扇动角超过105°时,情况则发生逆转,总体升力反而下降。在推力方面,频率的变化对翅膀下的负向推力影响较小,但对上扬时的正向推力影响显著。而根据图8(b)的显示,随着频率的增大,推力的峰值也随之增大,周期平均推力也会上升。在固定的姿态下,仅仅增加扇动角并不能持续增加升力。

3 仿蝴蝶飞行器飞行控制与仿真

3.1仿蝴蝶飞行器气动力模型。通过建立基于相关稳态方程的模型,并对所述参数进行合适的调整,就能够准确推测出扑翼运动产生的气动力及气动力矩。通过片条理论,及微分思想得出上述力矩。

首先简化仿生蝴蝶飞行器模型:其模型为刚体模型,质量分布均匀,同时忽略影响翅膀柔性形变的因素以及忽略其升力和阻力。

假设仿生翅膀的运动模型如下:

$$\gamma_r(t) = \gamma_{r0} \sin(2\pi Ft) + A_r \gamma_{r0}$$

$$\gamma_l(t) = \gamma_{l0} \sin(2\pi ft) + A_l \gamma_{l0}$$

$$\varphi_r(t) = \varphi_{r0} \cos(2\pi ft + \delta) + B_r \varphi_{r0}$$

$$\varphi_l(t) = \varphi_{l0} \cos(2\pi ft + \delta) + B_l \varphi_{l0}$$

当仿蝴蝶飞行器的翅膀运动对称时,左右两翅产生的气动力相等,由于对称性,不产生力矩。然而,一旦翅膀的扑动角、扑动角范围、翻转角或翻转角相位出现不对称,两翼产生的气动力差异导致产生俯仰、滚转和偏航力矩。力矩可由气动力与该力作用点至质心的垂直距离的乘积确定。

方程定义了其俯仰、滚转及偏航力矩。得出的瞬时力矩同时除以周期,得到其平均力矩。验证气动力数学模型,比较其在相同运动参数下与XFLOW软件的计算结果。得出其与XFLOW的结

果相近,证实了模型的可靠性。

3.2仿生蝴蝶飞行器姿态控制仿真及分析。相关姿态的控制包括俯仰角、滚转角和偏航角。仿真框架由期望姿态角输入值、PID控制器和气动及动力学模型所构成。

3.3俯仰角的控制仿真。通过Simulink软件,分析已经建立的仿真模型,调整PID控制器参数改善系统的响应。当输入俯仰角期望值为10度,一开始大约会有3度的超调,但在俯仰角稳定下来后,可以看到合适的响应速度,同时以极快的速度接近期望俯仰角度。

3.4对滚转角的控制及仿真。通过调节对PID参数,滚转角的响应良好。设定滚转角的期望值为8度,但实际滚转角通过短暂调整后以极快的速度接近期望值,没有发生高频振荡和偏离等情况,成功达到了预期要求。

3.5偏航角控制及仿真。调整PID参数,在10度的期望角时对应的偏航角响应曲线。可以使跟踪曲线更为出色。会在短期内稳定在期望数值附近,发散的问题少见,符合要求。

4 结论

(1)本研究基于蝴蝶飞行动作建立仿蝴蝶飞行器运动模型,运用XFLOW软件模拟分析相关飞行速度、翅膀扑动频率、扑动角度、运动翻转角度、及分析升阻特性在飞行时上下分配比例的影响。结果表明,提升飞行速度与俯仰角可增进升力,而扑动频率、角度及分配比例的过度增加不益于升力。扑动频率和角度的增加有助于推力提升,飞行速度和分配比例的增加则相反,翻转角度对推力影响有限。该研究为仿蝴蝶飞行器设计和控制提供指导。

(2)确立基础坐标系及飞行器特有翅膀坐标系,构建翅膀运动模型以关联两坐标系。应用片条理论核算翅膀运动产生的气动力和力矩,研究运动参数对这些力及力矩的影响。建立动力学模型,并通过PID控制器仿真验证飞行器姿态控制。

辽宁省大学生创新创业训练计划支持项目X202410143102资助。

【参考文献】

[1]Avallone F, Van der Velden WCP, Ragni D. Benefits of curved serrations on broadband trailing-edge noise reduction. J Sound Vib 2017;400:167-77.

[2]Vasista S, De Gaspari A, Ricci S, et al. Compliant structures based wing and wingtip morphing devices. Aircraft Eng Aerospace Technol 2016;88(2):311-30.

[3].Scheper KYW, Tijmons S, de Visser CC, et al. Behavior trees forevolutionary robotics. Artif Life 2016;22(1):23-48.

作者简介:

郭泽莹(2004--),女,黑龙江省绥化市人,本科在读,研究方向:飞行器飞行稳定性。