

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.06.003

扑翼/扑旋翼微型飞行器系统建模与控制方法研究进展

贺媛媛, 霍津锋, 李傲, 杨巧娅, 刘海旭

(北京理工大学空天科学与技术学院, 北京 100081)

摘要: 扑翼飞行器通过模仿昆虫及鸟类的扑翼运动, 在低雷诺数环境下具有优异的气动效率和机动性。而扑旋翼飞行器在扑翼运动的基础上实现了机翼的被动旋转运动, 具备更好的悬停及垂直起降能力, 是近些年新兴的研究热点。本文系统综述了扑翼微型飞行器(Flapping-wing micro air vehicles, FWMAVs)及扑旋翼微型飞行器(Flapping-wing rotor micro air vehicles, FWRMAVs)在系统建模与控制方法方面近几年的研究进展, 分析了仿昆虫扑翼飞行机理中的非定常空气动力学理论, 并探讨了已有的基于仿昆虫的 FWMAVs 及 FWRMAVs 系统建模及控制方法。最后, 提出了目前 FWMAVs 在飞行动力学和控制方法上面临的柔性翼气动建模和非定常扰动抑制等问题, 分析了 FWRMAVs 缺乏对其飞行动力学特性和主动姿态控制等方面研究的问题, 同时本文对该领域未来进一步的研究做出了展望。

关键词: 扑翼; 扑旋翼; 系统建模; 控制方法; 微型飞行器

中图分类号: V211.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)06-1046-15

Research Progress on Modeling and Control Methods of Flapping-Wing Flapping-Wing Rotor Micro Air Vehicle Systems

HE Yuanyuan, HUO Jinfeng, LI Ao, YANG Qiaoya, LIU Haixu

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Flapping-wing vehicles, inspired by the wing kinematics of insects and birds, exhibit remarkable aerodynamic efficiency and maneuverability under low-Reynolds-number regimes. In contrast, flapping-wing rotor vehicles, an emerging research frontier in recent years, integrate passive rotational motion with flapping actuation, enabling enhanced hovering and vertical take-off/landing capabilities. It presents a systematic review of recent advancements in system modeling and control methodologies for flapping-wing micro air vehicles (FWMAVs) and flapping-wing rotor micro air vehicles (FWRMAVs). It delves into the unsteady aerodynamic theories underlying the insect-inspired flapping-wing flight mechanism, and further explores the existing system modeling and control approaches tailored to insect-inspired FWMAVs and FWRMAVs. Finally, this review addresses current challenges in FWMAVs dynamics and control methodologies, including aerodynamic modeling of flexible wings and suppression of unsteady disturbances. It further highlights the insufficient research on flight dynamic characteristics and active attitude control of FWRMAVs, thereby outlining prospects for future investigations.

Key words: flapping wing; flapping-wing rotor; system modeling; control methods; micro air vehicle

基金项目: 国家自然科学基金(52572395)。

收稿日期: 2025-03-25; **修订日期:** 2025-11-30

作者简介: 贺媛媛, 女, 博士, 教授, 主要从事飞行器总体设计和新概念仿生扑旋翼飞行器研究, 主持国家自然科学基金项目 3 项、科技部重点研发子课题 1 项以及多项纵向课题。

通信作者: 贺媛媛, E-mail: appleyuanyuan@bit.edu.cn。

引用格式: 贺媛媛, 霍津锋, 李傲, 等. 扑翼/扑旋翼微型飞行器系统建模与控制方法研究进展[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(6): 1046-1060. HE Yuanyuan, HUO Jinfeng, LI Ao, et al. Research progress on modeling and control methods of flapping-wing/flapping-wing rotor micro air vehicle systems[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(6): 1046-1060.

自然界是人类创新和科学的研究重要的灵感来源。自然界中有近100万种飞行昆虫、9000余种鸟类以及1000余种蝙蝠采用扑翼飞行^[1],而扑翼飞行器就是模仿自然界中鸟类或昆虫的飞行机理,通过驱动机翼以特定的拍动模式运动产生升力进行飞行。

得益于多种非定常高升力机制,扑翼在气动性能和机动性上相对固定翼和传统旋翼飞行器优势明显,可以在这种低雷诺数环境下具有较高的气动效率,并且做到像旋翼飞行器那样悬停飞行和小半径低速盘旋^[2]。在具备上述优势的同时,扑翼飞行器的气动特性也更为复杂,因此它也受到国内外学者的广泛研究。

从20世纪末开始,相关研究呈现出明显的上升趋势。图1展示了在Web of Science数据库中检索与“flapping wing”有关的“title”,结果显示相关文章的数量从1994年之前的每年不足50篇上升至近年来每年超过400篇。

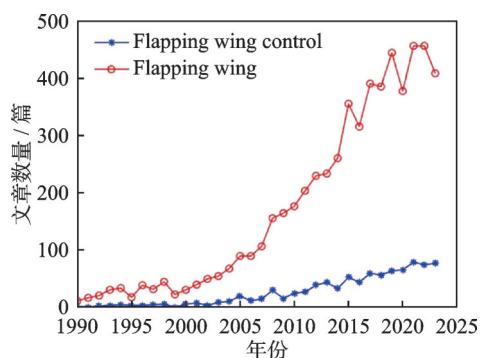


图1 1990—2023年关于扑翼及扑翼控制的文章数量
Fig.1 The number of articles on flapping wings and flapping wing control from 1990 to 2023

微型飞行器^[3](Micro air vehicles, MAVs)的概念首先由美国国防高级研究设计局于20世纪90年代提出,扑翼微型飞行器(Flapping-wing micro air vehicles, FWMAVs)随着近些年集成电路等技术的发展,已经成为微型飞行器重要的研究方向。这类FWMAVs主要模仿昆虫和蜂鸟的飞行方式,而一些大型扑翼飞行器更多参照鸟类的飞行方式。这些FWMAVs一部分模仿昆虫仅依赖扑翼的运动来控制自身飞行,一部分则是参照蜂鸟,引入尾翼来控制自身飞行。因此,FWMAVs也可以进一步划分为无尾翼式和有尾翼式。

在过去的几年里,开发垂直起降和悬停的扑翼微小飞行器受到了科学基础、商业和军事应用的推动^[4]。而扑旋翼恰好符合这一需求,它将原有的扑翼与旋翼结合,使机翼在扑动的同时进行旋转,使飞行器具备更好的悬停和垂直起降的能力。尽管扑旋翼研究起步较晚,但在相关研究中已经占据了

很重要的位置。Pan等^[4]指出,在过去的十年中,一部分研究人员致力于研究扑旋翼技术,其相关内容已经占据微型飞行器领域核心期刊上约6%的出版物。图2^[4]中的数据来源于Scopus数据库,图中关键词FW为搜索与“flapping-wing AND robot OR vehicle OR MAV”有关的“title”的结果;FWR为搜索与“flapping-wing rotor/flapping-rotary wing/flapping perturbed revolving wing”有关的“title”的结果。Fixed-wing MAVs为搜索与“fixed-wing MAV”有关的“title”的结果;RW为搜索与“rotary-wing OR rotorcraft AND MAV”有关的“title”的结果。

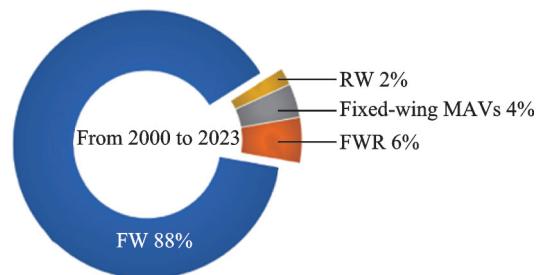


图2 2000—2023年关于微型飞行器的出版物分布^[4]
Fig.2 Distribution of publications on MAVs during the period from 2000 to 2023^[4]

在此前的研究中,飞行机理和升力机制是主要的研究方向。而随着相关研究的发展,这一方面的研究已经日渐成熟,目前已经开发出一系列具有不同布局、驱动装置和飞行机理的仿昆虫FWMAVs与扑旋翼微型飞行器(Flapping-wing rotor micro air vehicles, FWRMAVs)。这些飞行器基于上述区别,所采用的系统建模方法和控制方法也各不相同,这也逐渐成为了新的研究热点。图1还展示了在Web of Science数据库中检索与“flapping wing control”有关的“title”的结果,相关文章数量在2000年后呈现出显著的上升趋势。基于此背景,本文对近些年有关FWMAVs及FWRMAVs系统建模方法和控制方法的研究展开综述,对目前最新的研究成果进行梳理,并为未来可能的一些发展方向进行展望,以求为扑翼/扑旋翼飞行器的相关研究提供一定参考。

本文首先简要介绍昆虫扑翼飞行时的空气动力学机理,随后重点讨论了FWMAVs及FWRMAVs系统建模方法,并且对无尾翼式FWMAVs、有尾翼式FWMAVs及FWRMAVs的控制方法的研究进展与挑战进行了讨论梳理。最后,本文对FWMAVs及FWRMAVs的飞行动力学特性和控制系统设计研究进行了简单总结,指出了其未来研究所面临的挑战与潜在的方向。

1 扑翼/扑旋翼飞行的空气动力学原理

1.1 昆虫扑翼飞行的空气动力学原理

在自然界中,尽管鸟类和昆虫都采用扑翼飞行,但二者的飞行机理并不相同,这其中的核心在于是否可以实现翅膀的主动变形。

鸟类通常会通过翅膀的主动变形在扑翼运动中获得更高的升力和推力。诸如尖翅鸟类会通过在上拍时扭转翼尖来使空气更好地通过羽毛减少阻力^[5],然后在下拍过程获得更多的空气动力,展示了更好的升阻比^[5-6]。此外,还有部分鸟类采用改变翼展的方式。在下扑时伸展翅膀提高下扑升力,上扑过程中收缩翅膀降低上扬阻力,完整周期内产生正向升力和推力^[1]。

尽管翅膀主动变形的方式使鸟类获得了更好的飞行能力,但鸟类通常不具备悬停能力。值得注意的是,蜂鸟虽然属于鸟类,但它的飞行机理更接近于昆虫^[7]。它们都可以实现悬停,主要依靠改变扑翼运动方式来控制自身飞行,并不具备翅膀的主动变形能力。

对于昆虫扑翼飞行机理的理论研究最早可追溯到 20 世纪 20 年代 Birnbaum 的工作^[8],其分析了二维翼型在小振幅的正弦振荡下产生的流场与气动力变化,发现在扑翼振动中存在动态失速现象,这一现象在之后对于昆虫扑翼运动的研究中扮演了重要角色。

近年来,计算机和电子技术的发展使得微型无人机研究进展迅速,微型扑翼飞行器重新受到研究者的广泛关注,而明确昆虫飞行机理就成为了首要目标。通过对生物、机翼模型的飞行实验、流场的理论分析和仿真计算,研究者对昆虫扑翼升力的产生机制展开了大量研究。

20 世纪 70 年代初,Weis-Fogh^[9]发现中国台湾小黄蜂的飞行过程中翅膀采取快速合拢-打开的运动方式,认为这一运动方式产生的非定常流是产生高升力的主要机制,称为“Weis-Fogh 机制”。后来该机制被 Lighthill^[10]和 Maxworthy^[11]所证实。

20 世纪 90 年代,扑翼非定常流动过程及升力机理开始受到广泛关注。在针对昆虫飞行过程的研究中发现,昆虫翅膀产生的升力是定常空气动力学理论所能解释的 2~3 倍^[12]。人们认为,昆虫可能是利用动态失速机制来产生并保持瞬时的高升力,使得昆虫能持续飞行,而后续的一系列研究证实了这一猜想。1996 年,Ellington 等^[13]利用鹰蛾翅膀拍动模型进行实验,观察到由于翅膀上展向流动的存在,失速涡在整个下拍的平动过程中都保持附着在翼面上,使得整个下拍过程中都能保持高升力,如图 3^[13]所示。这一发现被称为“动态失速机



图 3 鹰蛾翅膀拍动模型上的失速涡^[13]

Fig.3 Stall vortex on a hawkmoth flapping wing model^[13]

制”或“延迟失速机制”。这一机制后续被实验^[14]和数值计算^[15-17]进一步确认。

Dickinson 等^[14]利用果蝇翅膀模型,测量了翅膀拍动过程中的气动力变化。实验结果表明,除动态失速之外,翅膀拍动过程中可通过翅膀周期性的前旋和后旋运动,在上拍和下拍起始阶段捕获前一次拍动的尾流产生的“附加风速”,在终止阶段产生附加环量,从而在上拍和下拍过程中各产生两次升力峰。这两种机制被称为“尾流捕获”机制和“旋转环流”机制。

Sun 等^[16-17]和孙茂等^[18]对这一过程的流场运动机理进行了进一步研究,发现只有在失速涡脱落产生 Karman 涡街的情况下才会产生附加风速,而在动态失速机制中,失速涡始终保持在翅膀面上,此时不会产生附加风速^[19]。通过对计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真结果的分析,Sun 等^[18]指出,果蝇翅膀拍动过程中,产生高升力的机制有如下 3 种:上下拍动过程开始时的快速加速运动、等速平动过程中的动态失速机制和拍动终止阶段翅膀的快速上仰(后旋)运动。这 3 种机制构成了大部分昆虫的主要高升力机制。在以上这些机制的共同作用下,扑翼空气动力学呈现出了典型的时变特性。

Van Truong 等^[20]在研究中得到了甲虫翅膀模型在一个完整扑动周期中垂向升力随时间变化的仿真和实验结果,结果就完整展示了扑动周期 T_f 内的时变力学特性,如图 4^[20]所示。图 4 中 F_v 表

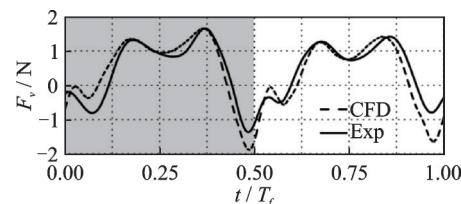


图 4 甲虫翅膀模型在一个完整扑动周期中 F_v 随时间变化的结果对比^[20]

Fig.4 Results comparison of the time-dependent F_v variation during a complete flapping cycle in the beetle wing model^[20]

示垂向升力,Exp表示实验结果,CFD表示仿真结果。在 $0.125T_f \sim 0.375T_f$ 和 $0.625T_f \sim 0.875T_f$ 区间内翅膀处于平动过程,此时延迟失速机制提供了可观的高升力,而在 $0.375T_f \sim 0.625T_f$ 这个区间内翅膀做旋转运动,此时尾迹捕获机制发挥主要作用,并且上下拍动的快速加速运动也带来了一定的增升效果。

实际上昆虫的飞行是动不稳定的,除了通过控制扑翼运动本身,还可以调整自身各部分姿态来控制飞行,而飞行机理相似的蜂鸟则可以用尾翼来控制自身飞行。它们在悬停时通过在机翼诱导流中展开尾部(图5)来产生尾部控制力矩以保持姿态,这种控制机制引入了独特的机翼-尾翼相互作用^[21]。



图5 蜂鸟尾翼展开图

Fig.5 Expanded view of hummingbird tail feathers

Teoh等^[22]在研究中通过引入一个尾巴作为气动阻尼器,实现了已知的最早的类昆虫扑翼飞行器的稳定悬停演示。此后,Altartouri等^[23]在对带尾翼的扑翼飞行器进行研究时发现,垂尾会受到扑翼诱导气流的影响,这可以提高飞行器在悬停时的稳定性。Zhang等^[24]参照蜂鸟在取食时翼展和尾巴的比例关系确定尾巴的大小,并通过实验研究了仿生尾翼上扑翼诱导流动力矩与扑翼面积、翼尾间距和尾翼摆角之间的关系。

综上,目前对于昆虫扑翼飞行机理的研究已经较为完备,主要围绕产生高升力的动态失速机制、尾流捕获机制和旋转环流机制等方面以及扑动周期内呈现出的时变动力学特性方面;但是主流的准定常气动力方法通常针对二维机翼进行计算,对于有限展长机翼的三维流动特征的研究相对较少。另一方面,虽然昆虫的翅膀不可以主动变形,但其扑翼运动过程中也存在柔性变形,这也涉及到复杂的流固耦合过程,而目前仍然缺少处理柔性翼上气动力的有效模型。除此之外,有尾翼飞行器中机翼尾流与尾翼的相互作用以及扑翼间相互作用也对飞行器的动力学特性有着重要影响,但这一方面的研究也仍较为有限。

1.2 扑旋翼飞行空气动力学原理

相比FWMAVs来说,FWRMAVs诞生时间较晚,Guo等^[25]在2009年提出了一种扑旋翼的概念。如图6(a)所示,扑翼飞行器通过机翼的扑动产生沿竖直方向的升力和推动其前进的推力;而扑旋翼飞行器将一侧扑翼旋转,使一对扑翼的布置方式由面对称变为中心对称,如图6(b)所示。两侧机翼产生的推力此时方向相反,转化为绕身体纵轴的力矩,使机翼在扑动的同时做旋转运动。

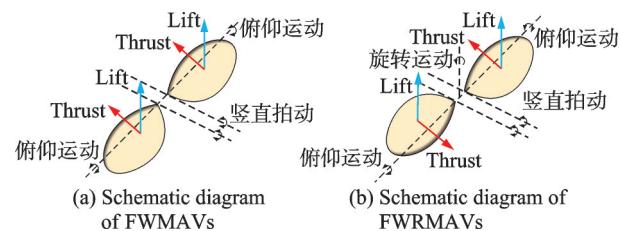


图6 FWMAVs及FWRMAVs原理示意图

Fig.6 Schematic diagrams of FWMAVs and FWRMAVs

如果只看单片翼的扑动,那么扑旋翼运动和扑翼运动的气动机理是一致的;但对于双翼或者多翼而言,由于旋转运动所带来的影响,使扑旋翼的气动机理显得更为复杂。目前对于扑旋翼飞行机理方面的研究主要围绕如何提升气动效率、改善气动特性等方面,集中在扑旋翼运动学参数和机翼结构特性方面。

在扑旋翼运动学参数的研究中,Guo等^[26]做了大量的工作。不仅基于三维非定常势流理论建立了一种非定常涡环法^[27],还通过实验先后证明了:在相同的输入电机功率或等效的振动频率下,一个飞行周期内采用不同飞行频率的平均升力大于恒定采样频率时的平均升力^[28];输入频率相同时,采用被动变桨距可以提高平均升力^[29];选择 $10^\circ \sim 70^\circ$ 的扭转角和采用弹簧都可以提高FWRMAVs的升力效率^[30]。除此之外,Li等^[31]综合准定常气动力模型与CFD计算,对扑旋翼的最优运动参数进行了分析。

对于机翼结构特性的研究,研究者们考虑到机翼的柔性变形,开展了许多有关机翼刚度对于扑旋翼气动特性影响的研究。Chen等^[32]为研究FWRMAVs机翼弹性扭转对气动性能的影响,采用准定常假设建立扑旋翼飞行器的流固耦合模型,发现刚性机翼相比翼根刚度小于 $3 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 的柔性机翼具有更好的气动性能,与翼根刚度更高的柔性机翼相比差距不大。同时,随着扑旋翼的拍动频率增加,尽管柔性机翼的升力能够提高,但气动效率显著降低。Pan等^[33]则在研究中通过设计后掠翼尖与优化机翼刚度,证实柔性机翼能通过涡延迟机制和弯曲变形显著提升扑翼旋翼的升力效率。

(最高提升 50%~68%)。

目前对于扑旋翼气动特性的研究已经有了一定的成果,证明可以通过优化扑旋翼运动参数和采用柔性翼等方式提升气动效率;但是现有研究主要还是围绕通过实验和CFD仿真来研究如何提高升力效率和气动特性,对于气动机理相关理论方面的研究还有待进一步完善成熟。

2 FWMAVs/FWRMAVs 系统建模方法

2.1 FWMAVs 系统建模方法

在昆虫的扑翼飞行过程中,往往扑翼的拍动频率要远高于机身的固有频率。表 1^[34-35]给出了部分昆虫的拍动频率、机身短周期运动模态的固有频率及其比值。可以看出,昆虫扑翼的拍动频率一般比机身固有频率高出 1~2 个数量级。

表 1 飞行生物扑翼拍动频率、机身固有频率及比值^[34-35]
Table 1 Wing flapping frequency, body natural frequency of natural fliers and their ratio^[34-35]

生物种类	拍动频率/Hz	机身固有频率/Hz	比值
鹰蛾	26.3	0.914	28.78
大蚊	45.5	0.899	50.62
大黄蜂	155	1.073	144.46
蜂蝇	157	1.079	145.50
食蚜蝇	160	1.404	113.98

这种动力学特性使研究者可以采取时标分离假设进行分析,即假设扑翼的拍动运动与机身运动解耦。机翼周期性的拍动运动可以在扑动的时间周期内对飞行器的空气动力进行平均化,忽略了上文中提到的扑动周期内的时变动力学特性,这使 FWMAVs 的空气动力学模型的系统参数不随时间而变化,而变为了与固定翼飞行器类似的定常模型。在这一基础上,可以建立低阶非线性定常(Nonlinear time-invariant, NLTI)模型和线性定常(Linear time-invariant, LTI)模型。二者的主要区别在于线性特性,如果所建立的定常系统模型同时满足叠加定理和齐次定理时,该模型就是一个线性定常模型^[36],即 LTI 模型;反之,不满足二者任意一条定理时,都是非线性的,也就是 NLTI 模型。

FWMAVs 或 FWRMAVs 最简单的建模方式是建立 LTI 模型^[37-40]。通常情况下,动力学模型可以表示为常微分方程的形式

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1)$$

这种建模方式就是类似于传统的固定翼飞行器建模方式,它从刚体动力学方程出发,在飞行的配平状态下进行线性化,从而得到线性的机体动力

学方程^[41],也就是使式(1)中的函数变为线性函数,即可以表示为

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u \quad (2)$$

同时,又由于该模型是定常模型,与时间无关,可进一步表示为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

然后,在配平状态下,将飞行器的气动力和气动力矩表示为飞行状态(如姿态、角速度、速度等)和控制量(如舵面偏转)增量的线性函数,此时该模型成为了一个具备线性特性的定常系统,也就是得到了飞行器的 LTI 模型。

LTI 模型形式较为简单,参数较少,易于通过系统辨识获得模型参数。此外,针对 LTI 系统的控制方法比较成熟,如比例积分微分(Proportional integral differential, PID)、回路整形^[42]、线性二次调节^[43](Linear quadratic regulator, LQR) 和鲁棒控制^[44]等,因此 LTI 模型在 FWMAVs 的控制系统设计中比较常用。

在 LTI 模型的基础上,对空气动力学特性增加低阶非线性分量,便得到了 NLTI 模型。由于新分量的引入,模型不再具备线性特性,原本的动力学模型不可以转化为式(2)的形式,但其定常特性不会改变,此时可表示为

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (4)$$

在 NLTI 模型中,低阶非线性分量的引入改善了模型对空气动力学特性的拟合精度。Nijboer 等^[39]采用不同的 NLTI 模型对 Delfly Nimble 的竖直方向气动力开展系统辨识。通过对比不同的模型预测结果,发现高阶 NLTI 模型虽然在拟合精度上效果较好,但模型的部分高阶项物理意义不明确,且高阶模型可能存在过拟合的现象。

LTI 模型只能表示一个配平点附近的飞行动力学特性。为了使模型适应更广的飞行状态空间,Armanini 等^[45]根据不同飞行状态下的 46 组实验数据,设计参数调度律,从而建立扑翼飞行器纵向运动的线性变参数(Linear parameter varying, LPV)模型,在俯仰角 50°~90°,飞行速度 0~1 m/s 的飞行包线内均具有较高的精度。

基于平均化方法建立的 LTI、NLTI 和 LPV 模型完全忽略了扑翼在扑动时间周期内的动力学特性,使得模型的精度不会太高^[46]。同时,基于平均化假设建立控制系统时,由于无法处理扑动周期内的时变动力学特性,扑翼的时变动力学将变为系统的输出扰动,对控制系统的鲁棒性产生一定要求,这在 FWMAVs 遭遇阵风扰动时是不利的。再加上昆虫飞行时本身就具有动不稳定特性,这种特性意味着受到扰动后很快会大幅偏离预定状态^[7]。

因此,扑翼的时变动力学特性的分析与建模对于提升扑翼飞行的稳定性显得尤为重要。

扑翼时变动力学特性研究通常基于扑翼运动的周期性展开。Armanini等^[47]将扑翼飞行器的气动力分为定常和周期扰动分量,其中周期扰动分量由3阶的傅里叶级数表示为

$$F_{\text{TV}}(t) = \sum_{n=1}^h [a_n \sin(2\pi nft) + b_n \cos(2\pi nft)] \quad (5)$$

式中: F_{TV} 表示气动力的时变分量, n 为傅里叶级数的阶数, f 为拍动频率, t 为时间, a_n 和 b_n 为第 n 阶的傅里叶级数。

基于Delfly II的飞行数据,研究者们分别对气动力的定常和周期扰动分量开展参数辨识,建立了其线性时变动力学模型。Saetti等^[48]将扑翼飞行器的纵向动力学分解为谐波模型,用直流和諧波分量的幅值作为状态变量建立了等效LTI模型。Orłowski等^[46]对扑翼拍动中每1/4个周期的气动力变化进行平均,建立气动力的一阶小扰动模型,对扑翼飞行器的纵向飞行稳定性进行了分析。He等^[49]使用神经网络估计一个周期内的非定常气动力扰动,用于姿态控制系统的输出补偿。

在机翼的扑动运动中,由于机翼本身质量较大,此时机翼自身的惯性对整个飞行器的运动具有可观的影响,特别是翼展较大的仿昆虫飞行器,扑翼拍动频率相比机体短周期运动固有频率仅有最多1个数量级的差距,时标分离假设的条件不一定能得到保证^[47,50]。对于这类飞行器,基于多体动力学的方法可描述机翼惯性的影响,从而分析飞行器的飞行稳定性和动态性能。

多体动力学方法将扑翼和机体的各个主要部件看作相互连接的刚体进行动力学分析,常用于扑翼飞行器的多体动力学方法有牛顿-欧拉法^[51]、拉格朗日法^[52-53]和Kane方法^[54]等,它们的差别主要在于动力学方程形式不同。Sun等^[34,55]建立了不同翅翼拍动频率昆虫的多刚体模型,对扑翼运动进行周期平均得到昆虫飞行的动力学模型,并分析了其稳定性和可控性。之后,进一步求得了扑翼运动的周期解,在此基础上得到了线性时变的动力学模型,得到线性时变的动力学模型,利用Floquet原理分析系统运动周期解附近在小扰动作用下的稳定性^[56]。

Cheng等^[57]考虑了机体运动与翅翼运动学的相互影响,利用准定常气动力模型进一步建立了扑翼飞行器的6自由度刚体动力学模型,基于此模型分析了4种昆虫飞行的静稳定性。Taha等^[35]通过一系列三角函数模拟扑翼运动的运动学特征,利用高阶平均化理论分析扑翼拍动过程中的稳定性。

Hassan等^[58]通过微分方程几何理论分析考虑翅翼影响的昆虫纵向运动,发现其纵向动力学特性类似卡皮察摆,为昆虫纵向运动提供纵向稳定性。

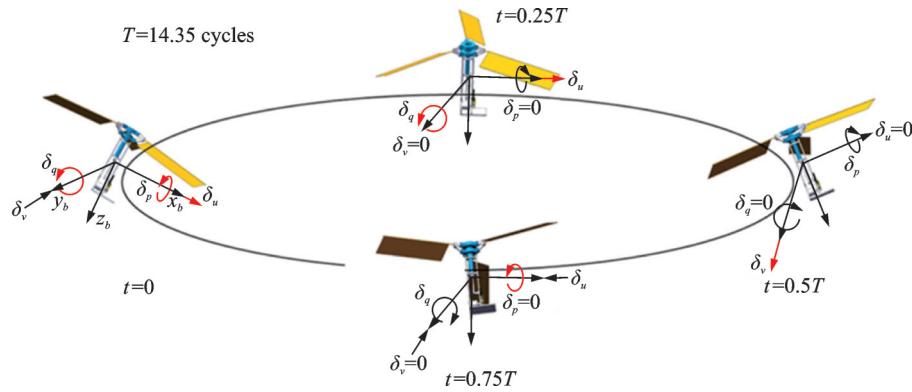
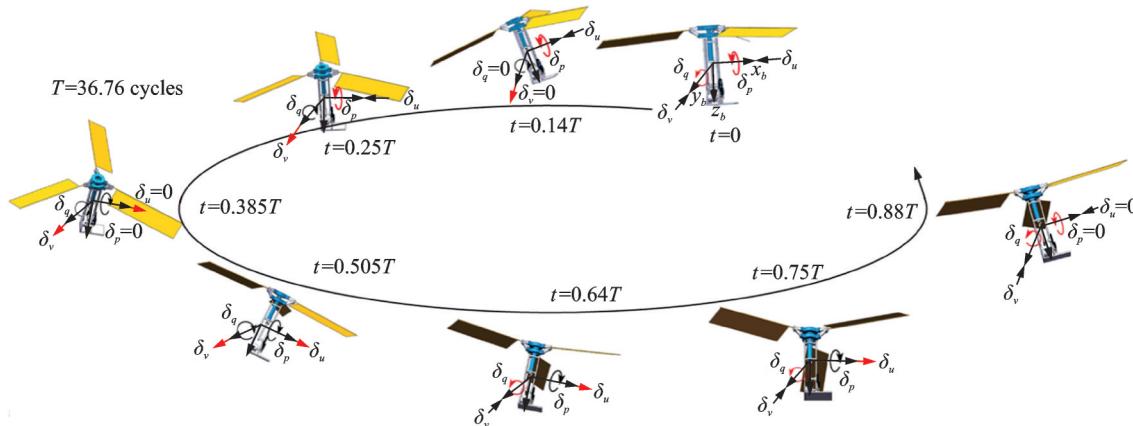
相较于只依赖扑翼控制的无尾翼式FWMAVs,有尾翼式的FWMAVs可以参照蜂鸟通过机翼-尾翼相互作用^[21]来提升飞行稳定性,因而在对这类飞行器进行系统建模时也需考虑这一影响。Qian等^[59-60]在研究中通过尾翼的偏转来产生俯仰和滚转控制力矩,考虑扑翼本身在拍动过程中的动力学,基于拉格朗日方法建立扑翼飞行的多刚体模型,又提出了一种利用奇异摄动理论来分析扑翼飞行周期稳定性的方法。Zhang等^[61]建立了阻尼器面积、质量和转动惯量之间的拟合关系,提出了阻尼器布置为顶部和底部布置的被动稳定条件。但遗憾的是,受限于对扑翼与尾翼相互作用的气动特性的研究,这一方面的研究也无法更进一步。

目前对仿昆虫FWMAVs的系统建模的研究已经将扑翼运动的时变动力学特性考虑其中,建立了较为准确的系统模型。但是如何在系统模型中处理扑翼飞行的非定常特性给飞行器带来的大幅扰动,仍是现在需要解决的重要问题。另一方面,目前的研究更多考虑的是无尾翼式FWMAVs,未来如何在此基础上完善对有尾翼式微型扑翼飞行器系统建模的研究也是未来的潜在方向。

2.2 FWRMAVs系统建模方法

相较于FWMAVs,对于FWRMAVs气动特性的研究并不完全成熟,有关FWRMAVs的系统建模方法的研究也较为有限。目前主要集中于对机翼非定常空气动力学以及扑旋翼运动时的运动学和动力学建模,研究FWRMAVs升力产生的机理和机翼设计参数的优化设计。

Chen等^[62]建立了考虑扑旋翼的前缘吸引效应的线性化空气动力学模型。Wen等^[63]基于达朗贝尔原理建立FWRMAVs的多体动力学模型,研究了低雷诺数下(雷诺数数量级约为 10^3)翼面动力学特性及其对FWRMAVs气动性能的影响。Wu等^[64]基于小扰动假设和时间周期方法,建立了扑旋翼飞行器悬停状态下的开环动力学线性模型,线性模型的特征值表明FWRMAVs的纵向-横侧向运动具有两种主要运动模态,即如图7^[64]所示的稳定振荡模态(此时振荡周期 T 等于14.35个机翼旋转周期cycles)和如图8^[64]所示的不稳定振荡模态(此时振荡周期 T 等于36.76个机翼旋转周期cycles)。其中,稳定振荡模态表现为飞行器质心的循环运动和俯仰、滚转角的周期振荡。FWRMAVs的竖直方向运动具有慢速发散模态,表现为机翼旋转运动速度增加(或减小),同时机身向上(或向下)

图 7 FWRMAVs 的稳定振荡模态^[64]Fig.7 Stable oscillatory mode of FWRMAVs^[64]图 8 FWRMAVs 的不稳定振荡模态^[64]Fig.8 Unstable oscillatory mode of FWRMAVs^[64]

运动速度增加。纵向-横侧向运动耦合和机翼旋转-机身竖直运动耦合使得扑旋翼飞行器具有不同于扑翼、旋翼或直升机的特殊动力学特性。

目前对于 FWRMAVs 系统建模方法已经有了一定的研究成果,但是这类飞行器气动特性更为复杂,对飞行动力学方面的研究提出了更高的要求。受限于此,目前对于这类飞行器系统建模方面的研究仍有待进一步的丰富和成熟。

3 FWMAVs/FWRMAVs 控制方法

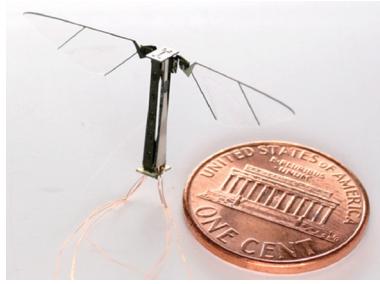
FWMAVs 具有多种布局,可分为有尾翼式 FWMAVs 以及无尾翼式 FWMAVs。无尾翼式扑翼飞行器中包括单自由度控制和多自由度控制的扑翼飞行器,它们都是模仿昆虫或蜂鸟的飞行控制方式,通过改变扑翼的运动模式产生不对称的气动力作为控制力。其中,单自由度控制只通过控制拍动幅度或周期内部的拍动角变化产生控制力,多自由度控制则增加了对扑翼扭转和运动的控制。它们的控制系统设计通常会包含很多非线性项,往往较为复杂。而有尾翼式扑翼飞行器通过加装尾翼可以引入方向舵和升降舵产生控制力矩。因此,有尾翼式的扑翼飞行器一定程度可以仿照固定翼飞行器的控制系统设计方式,实用化程度较高。

3.1 无尾翼式扑翼飞行器控制方法

昆虫的飞行控制是通过控制翅膀的拍动规律来产生不同方向的控制力矩^[7],那么无尾翼式的 FWMAVs 也可以仅通过改变扑翼运动来控制自身飞行。较为典型的无尾翼式 FWMAVs 就是图 9^[65-66]所示的美国哈佛大学团队研发的“Robobee”,该飞行器的早期样机仅为一枚硬币大小,质量 86 mg,却可以 110 Hz 的频率实现大于 50° 的扑动。

现有的研究表明,可以通过改变扑翼运动时拍动角度^[67]、拍动频率^[68]、拍动平面角度^[69]和扑翼俯仰角^[70]等参数产生控制力矩。目前对于无尾翼式扑翼飞行器的控制方法或者说只考虑扑翼运动的控制方法都是基于此展开的,尤其是多自由度扑翼飞行器。例如,Wang 等^[71]将其研究的 2 自由度扑翼飞行器的扑动轨迹特性用于指导该飞行器的姿态控制,建立了一套俯仰、滚转和偏航解耦的控制方法。目前,包括迭代学习控制^[72]、线性二次调节控制^[73]、命令滤波积分反推控制^[74]、积分滑模控制^[75]、饱和反馈控制^[76]和比例积分解耦反馈控制^[77]在内的各种方法都逐渐出现在了相关研究中。

应用在扑翼飞行器控制的经典传统控制方法包括比例微分(Proportion differentiation, PD)控

图9 美国哈佛大学“Robobee”^[65-66]Fig.9 “Robobee” at Harvard University, USA^[65-66]

制^[78]和比例积分(Proportional integral, PI)控制^[79]等,以PID控制为主。Chen等^[80]基于双翼类昆虫扑翼飞行器采用的并联控制机构的动力学解设计了带解耦器的PID控制器,使样机具有不错的飞行稳定性。Sato等^[81]在具有变幅连杆机构的3自由度扑翼飞行器的控制器中,设置了位置、速度和力的3个PID控制回路。一些学者提出的基于场定向控制^[82-83](Field-oriented control, FOC)的瞬时闭环机翼轨迹跟踪控制系统也采用了PID控制。

由于扑翼飞行器工作环境复杂,系统输入输出量较多,且这些参数关系复杂,传统的PID控制已经不完全适用,因此在近些年出现了许多改进策略。例如,Zheng等^[84]提出的多级优化模型预测控制(Multi-level optimization model predictive control, MOMPC)就表现出比PID控制更好的精度。这些改进策略中,自适应控制方法是目前许多研究的方向,它可以调整控制器的相关参数使其达到特定情况下的最佳性能。Khosravi等^[85]通过一种基于无模型自适应变结构控制(Model-free adaptive variable structure control, MFAVSC)的多体控制方法实现对FWMAVs期望姿态和位置的精确跟踪,Fei等^[86]设计的参数自适应的FWMAVs非线性控制器比传统PD控制展现出了稳态跟踪误差和瞬态性能的优势。Mou等^[87]设计的多轴自适应姿态高度控制器在超调量、解耦和精度方面表现出更好的性能。

昆虫可以通过调整自身各部位姿态来帮助应对动不稳定飞行带来的易受扰动的问题,蜂鸟也可以使用尾翼稳定自身飞行。而对于无尾翼式扑翼飞行器而言,既没有尾翼,暂时又无法实现对自身部位姿态的快速调整。因此,如何只依赖扑翼控制来提高扑翼飞行器的抗干扰能力及鲁棒性也是这个改进策略重要的研究方向。

Li等^[88]提出的线性自抗扰结合模型预测控制的方法在面对正弦干扰下可以准确跟踪参考踪迹。Guo等^[89]基于FWMAVs的LPV模型针对参数不确定问题设计了一种鲁棒控制器。Yang等^[44]在可测和不可测风扰动的FWMAVs纵向飞行控制

中引入了鲁棒无模型自适应控制器。Hu等^[90]通过深度强化学习增强了一种无尾扑翼飞行器悬停控制策略的鲁棒性。Wang等^[91]所设计的模糊滑模变结构控制器的闭环控制框架和鲁棒LQ(Linear quadratic)控制器使姿态内闭环系统稳定时间显著降低。此外,也有一些研究聚焦于机翼损伤所带来的干扰。Long等^[92]结合自适应方案、固定时间控制技术和模糊逻辑近似技术建立了一种基于固定时间自适应模糊饱和故障容错控制(Fault-tolerant control, FTC)方案来研究扑翼飞行器在机翼损伤、模型不确定性、外部干扰和输入饱和等情况下的控制问题。

许多昆虫在控制飞行中主要依靠翅膀扑动频率和幅度的调制,因此独立的频率或者幅度调制也是这一领域研究的热点,尤其是针对扑翼飞行器的调频控制。He等^[49]提出了一种基于扑动频率的扑翼飞行器的力和扭矩模型。在最新的研究中,Mcgill等^[93]将主动频率控制应用在类昆虫扑翼飞行器的悬停控制中。Mcivor等^[94]利用对扑动频率和幅度的独立控制提高了扑翼系统的控制精度。Hill等^[95]基于以扑动频率为输入的离散时间控制器,提出了一种基于离散滑模控制方法的鲁棒趋近律,可以在阵风为0.7 m/s的情况下控制模拟FWMAVs稳定位置。

神经网络作为人工智能领域的研究热点,也逐渐被引入了扑翼飞行器控制方法当中。Huang等^[96]设计了一种Actor-Critic神经网络优化算法用于仿蜂鸟的扑翼无人机的控制。

总的来说,近些年对于无尾式FWMAVs控制系统的研究已经较为充分,在传统控制方法的基础上,针对FWMAVs多输入多输出、时变动力学特性及动不稳定等优点采取了更具针对性的控制策略,并且呈现出智能化的趋势。值得注意的是,如何处理抑制非定常扰动带来的误差仍是未来FWMAVs进一步研究中需要解决的重要问题。

3.2 有尾翼式扑翼飞行器控制方法

对于有尾翼式扑翼飞行器,由于参照蜂鸟引入了尾翼,在飞行时的稳定性具有一定的优势,也为飞行控制提供了更多可能。目前,在对有尾翼式扑翼飞行器控制方法的许多研究中,研究者们已经将尾翼与扑翼的相互作用考虑到了控制系统的设计中。

Zhang等^[24]先通过实验研究了仿生尾翼上扑翼诱导流动力矩与扑翼面积、翼尾间距和尾翼摆角之间的关系,而后基于所建立的基于准稳态理论的双翼扑翼升力模型设计了串联PID控制器,验证了基于姿态控制器的尾翼倾角调整对提高微型扑翼

飞行器姿态的被动稳定性是有益的。Li 等^[97]在考虑到机翼柔性变形和机翼尾翼气动干扰的情况下,采用 CFD 方法计算了如图 10 所示的倒 T 形尾翼和倒 V 形尾翼的扑翼飞行器的气动特性。结果表明,虽然扑翼的尾流会降低垂尾的前飞性能,但倒 T 形尾翼在低速时具有较好的操纵特性,而倒 V 形尾翼在快速前飞时具有较好的性能。

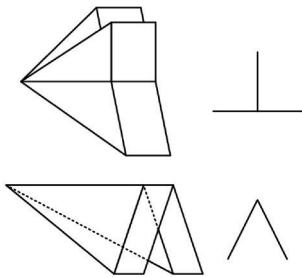


图10 两种尾翼示意图

Fig.10 Schematic diagrams of two types of tails

DelFly 系列^[98-103]中的 DelFly I 、DelFly II 和 DelFly Micro 都是较为典型的采用了倒 T 形尾翼的扑翼飞行器。它们通过垂直尾翼控制飞行器的偏航运动, 水平尾翼控制飞行器的俯仰运动。DelFly 设计的一个关键特征是如图 11^[102]所示的双翼配置, 即两对机翼相互重叠。与单对机翼相比, 机翼以反相方式运动, 这提供了稳定性优势。

在对 DelFly 避障系统的研究^[102]中,建立了一套地空协同的计算架构:将需要快速响应的高度控制(基于气压计的 PI 控制器)和偏航阻尼(内环 P 控制器)部署在机载微控制器上,确保飞行器的基本稳定性;而计算量更大的横向轨迹控制(级联 PID 控制器)和视觉避障决策则交由地面基站完成。



图 11 Delfly II^[102]

Fig.11 Delfly II [102]

如果说 DelFly II 由于其 X 型的扑翼设计并不能在外形方面定义为严格意义上的仿蜂鸟飞行器,那么 Wang 等^[104-107]研究的扑翼飞行器 Beibee 在外形上就与蜂鸟十分相似了。如图 12(b)所示,它只配备了一对扑翼,和图 12(a)展示的 DelFly II 的示意图有明显不同。

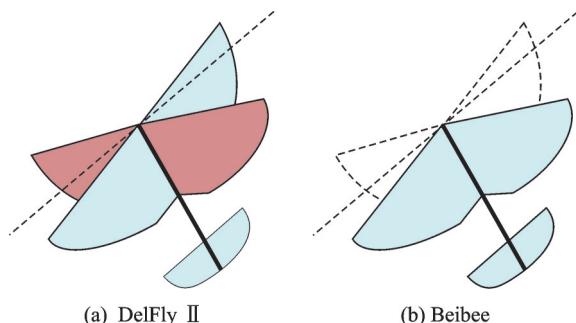


图 12 Delfly II 和 Beibee 外形示意图

Fig.12 Schematic diagrams of the appearance of DelFly II and Beibee

通过实验证明,当尾翼安装在距前缘1.5倍弦长,频率在10 Hz以上时,所提出的基于动量理论的机翼-尾翼相互作用解析模型可以准确得出尾翼产生的操纵力矩^[104]。在此基础上,设计了频率依赖的尾翼控制器,该控制器能根据实时扑动频率自适应调整增益,补偿诱导流强度的变化,从而在全频率工作范围内保持良好的俯仰控制效果^[105],此外,还提出基于平均化线性模型和根轨迹法来设计PI控制器,并指出“寻找可行的周期轨道并设计使闭环系统保持在有界邻域内的控制器”是应对扑翼系统周期性、非线性动态的有效方法^[107]。

从上述研究来看,相较于无尾翼式FWMAVs,传统的PD/PID控制在有尾翼式FWMAVs上确实展现了更好的控制效果。然而,其有效性在很大程度上依赖于精确的模型(如翼-尾相互作用模型)和参数设定。Dang等^[108]就分别采用PD控制器、PID控制器和带扰动观测器的三环反馈控制器来研究20 Hz时不同机翼缺陷下仿蜂鸟扑翼飞行器的姿态控制,结果显示三环反馈控制器凭借其对扰动的估计和补偿能力,在响应速度和精度上均显著优于传统的PD/PID控制器。

基于神经网络的方法同样被大量应用于有尾翼式扑翼飞行器的研究中。Wang等^[106]针对Beibee提出了一种考虑气动阻尼的神经网络位置控制器,其外部位置控制器和内部姿态控制器的设计包括已建模的线性阻尼项、未建模的非线性小阻尼项和通过径向基函数神经网络得出的其他非线性项,同时提升了位置控制精度和姿态控制精度。除此之外,Mousavi等^[109]针对扑翼飞行中的震荡问题设计的自适应动态逆控制器将神经网络用于处理控制器中模型的不确定性,提高系统的鲁棒性。将自适应陷波器加入控制回路,不仅从干扰、延迟和饱和等多个维度提高了控制器性能,还降低了其工作量。Qian等^[110-111]在针对欠驱动扑翼飞行器提出的三维位置稳定策略中,通过径向基函数神经网络增强了闭环系统的自适应性。除此之外,还针对欠驱动

动扑翼飞行器提出了轨迹生成和跟踪控制策略,结合鲁棒控制和切换控制技术,设计了具有渐进稳定性的轨迹跟踪控制器。

总的来说,对于有尾翼式扑翼飞行器,借助于尾翼-机翼的相互作用,传统的PD/PID控制展现了突出的实际效果。但如何在更加复杂和动态的环境中(如应对风扰、机构损伤)实现稳定的受控飞行,就需要引入更加先进的智能化控制方法,这也是未来研究面临的问题与方向。

3.3 扑旋翼飞行器控制方法

与扑翼飞行器相比,扑旋翼飞行器出现时间较晚,可以实现垂直起降和悬停^[4],所以已有的研究更多地围绕在其升力机制及气动机理方面。

如果要想建立FWRMAVs的控制系统,一方面需要设计合理的姿态控制机构,另一方面需要完善对其飞行力学的研究。Wu等^[64]针对悬停扑旋翼飞行器动态飞行稳定性展开了系统的分析,该研究基于与扑翼类似的周期平均力和小扰动假设,这也为后续FWRMAVs飞行力学及稳定性研究提供了思路。将扑翼研究中的方法理论应用到扑旋翼飞行器中,同时结合扑旋翼运动的特殊性,是未来这一方面重要的研究思路。

目前国内对于FWRMAVs的研究中,贺媛媛等^[112-114]针对FWRMAVs结构特性等多方面做出了很多研究,但遗憾的是它们还未能实现FWRMAVs的自主受控飞行。除此之外,其他研究者也在FWRMAVs方面做了大量的研究^[115-120],并且实现了FWRMAVs的自主受控飞行^[115]。文献[115]设计了一种如图13所示的三翼扑旋翼飞行器,通过机翼下方起到尾翼作用的稳定器和方向舵实现姿态控制,并且设计了具有鲁棒姿态估计和控制算法的控制器,实现了稳定的悬停和前飞。

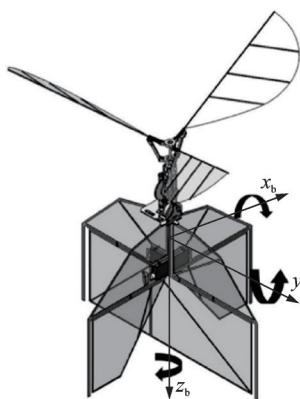


图13 三翼扑旋翼飞行器^[115]

Fig.13 Three-wing flapping-wing rotor vehicle^[115]

除此之外,在设计的双翼扑旋翼无人机上,通过改变输入电压让两片机翼产生运动学差异,产生控制力矩^[116]。考虑到扑旋翼运动复杂的气动特性

和动力学特性,如何构建成熟的系统模型并实现有效的姿态控制,是未来扑旋翼飞行器走向工程实际应用需要解决的重要课题。

4 结 论

目前FWMAVs/FWRMAVs的飞行动力学特性和控制系统设计方面的研究仍有许多具有挑战性的问题需要进一步的探索,这既包括空气动力学方面的问题,也涉及飞行力学和控制原理方面的问题。

首先,在扑翼运动的空气动力学研究上主要面临3方面问题:(1)目前主流的准定常气动力方法通常针对二维机翼进行计算,难以表达有限展长机翼的三维流动特征;(2)扑翼间的相互作用以及有尾翼飞行器中机翼尾流与尾翼的相互作用对飞行器的动力学特性影响仍有待进一步研究;(3)柔性翼的空气动力学涉及复杂的流固耦合过程,目前仍然缺少处理柔性翼上气动力的有效模型。

由于上述问题的局限性,对于FWMAVs非定常特性的研究仍需进一步完善。这种非定常特性使飞行器的速度在机翼的扑动周期之内存在较大幅度的扰动,这一扰动将会产生飞行器的轨迹跟踪和编队控制的跟踪误差,再加上仿昆虫扑翼飞行本身就具有动不稳定性。因此,控制系统设计中的非定常扰动抑制也是未来扑翼飞行器进一步研究中需要解决的重要问题。

对于FWRMAVs,其飞行时的气动机理目前也仍缺乏成熟的理论阐释,这也就限制了针对扑旋翼飞行器飞行动力学特性和控制系统的进一步研究。因此,如何进一步完善气动机理的阐释,构建更加成熟的系统模型,从而实现扑旋翼飞行器准确的主动姿态控制是未来扑旋翼飞行器重要的研究方向。

总而言之,FWMAVs/FWRMAVs的非定常空气动力学特性给飞行器带来了纷繁复杂的飞行动力学特性和非定常扰动。要使人造的FWMAVs/FWRMAVs能像自然界中的昆虫一样自如地飞行,还需要对它们的飞行动力学特性和控制系统设计进行更加充分的研究。

参考文献:

- [1] 向锦武,孙毅,申童,等.扑翼空气动力学研究进展与应用[J].工程力学,2019,36(4):8-23.
XIANG Jinwu, SUN Yi, SHEN Tong, et al. Research progress and application of flapping wing aerodynamics[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(4): 8-23.

- [2] 杨文青, 郭越洋, 董渊博, 等. 仿生柔性扑翼无人机流固耦合研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(17): 530069.
YANG Wenqing, GUO Yueyang, DONG Yuanbo, et al. Research progress on fluid structure interaction of bionic flexible flapping wing UAV[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(17): 530069.
- [3] MCMICHAEL J M, FRANCIS M S. Micro air vehicles—toward a new dimension in flight[J]. *Unmanned Systems*, 1997, 15(3): 10-17.
- [4] PAN Y J, GUO S J, HUANG X. Research progress on bio-inspired flapping-wing rotor micro aerial vehicle development[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2024, 21(4): 1621-1643.
- [5] CRANDELL K E, TOBALSKE B W. Aerodynamics of tip-reversal upstroke in a revolving pigeon wing [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2011, 214(11): 1867-1873.
- [6] ROS I G, BASSMAN L C, BADGER M A, et al. Pigeons steer like helicopters and generate down and upstroke lift during low speed turns[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): 19990-19995.
- [7] 吴江浩. 仿生扑翼微型飞行器概论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2024.
WU Jianghao. *Introduction to bionic flapping-wing micro air vehicle*[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2024.
- [8] BIRNBAUM W. Das ebene problem des schlagenden Flügels[J]. *Zeitschrift Für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1924, 4(4): 277-292.
- [9] WEIS-FOGH T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1973, 59(1): 169-230.
- [10] LIGHTHILL M J. On the Weis-Fogh mechanism of lift generation[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, 60: 1-17.
- [11] MAXWORTHY T. Experiments on the Weis-Fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight: Part 1: Dynamics of the “fling”[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1979, 93(1): 47-63.
- [12] ELLINGTON C P. The novel aerodynamics of insect flight: Applications to micro-air vehicles[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1999, 202(23): 3439-3448.
- [13] ELLINGTON C P, VAN DEN BERG C, WILL-MOTT A P, et al. Leading-edge vortices in insect flight[J]. *Nature*, 1996, 384: 626-630.
- [14] DICKINSON M H, LEHMANN F O, SANE S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight [J]. *Science*, 1999, 284(5422): 1954-1960.
- [15] LIU H, ELLINGTON C, KAWACHI K, et al. A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1998, 201(4): 461-477.
- [16] LAN S L, SUN M. Aerodynamic properties of a wing performing unsteady rotational motions at low Reynolds number[J]. *Acta Mechanica*, 2001, 149(1): 135-147.
- [17] SUN M, TANG J. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(1): 55-70.
- [18] 孙茂, 吴江浩. 昆虫飞行的高升力机理和能耗[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(11): 970-977.
SUN Mao, WU Jianghao. Unsteady lift mechanisms and energetic in flying insects[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(11): 970-977.
- [19] MAO S, HAMDANI H. A study on the mechanism of high-lift generation by an airfoil in unsteady motion at low Reynolds number[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 17(2): 97-114.
- [20] VAN TRUONG T, LE T Q, PARK H C, et al. Experimental and numerical studies of beetle-inspired flapping wing in hovering flight[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(3): 036012.
- [21] THOMAS A L R. On the aerodynamics of birds' tails [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1993, 340(1294): 361-380.
- [22] TEOH Z E, FULLER S B, CHIRARATTANANON P, et al. A hovering flapping-wing microrobot with altitude control and passive upright stability[C]// *Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, 2012: 3209-3216.
- [23] ALTARTOURI H, ROSHANBIN A, ANDREOLI G, et al. Passive stability enhancement with sails of a hovering flapping twin-wing robot[J]. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2019, 11: 1756829319841817.
- [24] ZHANG Y C, XIAO Y M, GUO Q C, et al. Stability and controller research of double-wing FMAV system based on controllable tail[J]. *Biomimetics*, 2024, 9(8): 449.
- [25] GUO S J, YANG D Q, KUMMARI K L, et al. Smart material flapping wing micro rotorcraft[C]// *Proceedings of the 17th International Conferences on Composite Materials*. Edinburgh, UK: [s.n.], 2009.
- [26] GUO S J, LI D C, WU J H. Theoretical and experimental study of a piezoelectric flapping wing rotor for micro aerial vehicle[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 23(1): 429-438.

- [27] CHEN S, GUO S J, XU H C, et al. The effect of variable rotary motion of a flapping wing rotor on its aerodynamic performance based on an improved unsteady vortex ring method[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 145: 108706.
- [28] CHEN S, WANG L, GUO S J, et al. A bio-inspired flapping wing rotor of variant frequency driven by ultra-sonic motor[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 412.
- [29] CHEN S, WANG L, HE Y Y, et al. Aerodynamic performance of a flyable flapping wing rotor with passive pitching angle variation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9176-9184.
- [30] CHEN S, DENG Z Q, XIANG J W, et al. Aerodynamic efficiency enhancement effect of the energy capture technique on a flyable flapping wing rotor system [J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(12): 3843-3854.
- [31] LI H, GUO S, ZHANG Y L, et al. Unsteady aerodynamic and optimal kinematic analysis of a micro flapping wing rotor[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 63: 167-178.
- [32] CHEN L, WANG L Y, WANG Y Q. Efficient fluid-structure interaction model for twistable flapping rotary wings[J]. AIAA Journal, 2022, 60(12): 6665-6679.
- [33] PAN Y, GUO S, WHIDBORNE J, et al. Aerodynamic performance of a flyable flapping wing rotor with dragonfly-like flexible wings[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 148: 109090.
- [34] SUN M, WANG J K, XIONG Y. Dynamic flight stability of hovering insects[J]. Acta Mechanica Sinica, 2007, 23(3): 231-246.
- [35] TAH A H E, TAHMASIAN S, WOOLSEY C A, et al. The need for higher-order averaging in the stability analysis of hovering, flapping-wing flight[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(1): 016002.
- [36] 陈晓平, 和卫星, 傅海军. 线性系统理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- CHEN Xiaoping, HE Weixing, FU Haijun. Linear system theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [37] CAETANO J V, DE VISSER C C, DE CROON G C H E, et al. Linear aerodynamic model identification of a flapping wing MAV based on flight test data[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2013, 5(4): 273-286.
- [38] KAJAK K M, KARÁSEK M, CHU Q P, et al. A minimal longitudinal dynamic model of a tailless flapping wing robot for control design[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2019, 14(4): 046008.
- [39] NIJBOER J, ARMANINI S F, KARASEK M, et al. Longitudinal grey-box model identification of a tailless flapping-wing MAV based on free-flight data [C]//Proceedings of AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, USA: AIAA, 2020.
- [40] AURECIANUS S, HA G H, PARK H C, et al. Longitudinal mode system identification of an insect-like tailless flapping-wing micro air vehicle using on-board sensors[J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2486.
- [41] ETKIN B, REID L D. Dynamics of flight: Stability and control[M]. New York, USA: Wiley, 1995.
- [42] SANTOSO F, LIU M, EGAN G K. Robust μ -synthesis loop shaping for altitude flight dynamics of a flying-wing airframe[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 79(2): 259-273.
- [43] ABBASI S H, WAQAR K, MAHMOOD A, et al. Flight control design of a flapping wing UAV flying in gusts inspired from covert feathers of birds[J]. Journal of Micro and Bio Robotics, 2023, 19(1): 47-57.
- [44] YANG Z Y, HOU Z S, JIN S T. Robust model-free adaptive longitudinal flight control for a flapping wing micro air vehicle with wind disturbances[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2023, 33(17): 10425-10450.
- [45] ARMANINI S F, KARÁSEK M, DE VISSER C C. Global linear parameter-varying modeling of flapping-wing dynamics using flight data[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2018, 41(11): 2338-2360.
- [46] ORLOWSKI C T, GIRARD A R. Longitudinal flight dynamics of flapping-wing micro air vehicles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(4): 1115-1131.
- [47] ARMANINI S F, DE VISSER C C, DE CROON G C H E, et al. Time-varying model identification of flapping-wing vehicle dynamics using flight data[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, 39(3): 526-541.
- [48] SAETTI U, ROGERS J. Harmonic decomposition models of flapping-wing flight for stability analysis and control design[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2022, 45(8): 1371-1384.
- [49] HE W, MU X X, ZHANG L, et al. Modeling and trajectory tracking control for flapping-wing micro aerial vehicles[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(1): 148-156.
- [50] XU W F, PAN E Z, LIU J T, et al. 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.
- [51] SHEN Y L, GE W J, MIAO P. Multibody-dynamic modeling and stability analysis for a bird-scale flapping-wing aerial vehicle[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 103(1): 9.
- [52] RAMEZANI A, SHI X C, CHUNG S J, et al. La-

- grangian modeling and flight control of articulated-winged bat robot[C]//Proceedings of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany: IEEE, 2015: 2867-2874.
- [53] RAMEZANI A, SHI X C, CHUNG S J, et al. Non-linear flight controller synthesis of a bat-inspired micro aerial vehicle[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. San Diego, USA: AIAA, 2016: 1376.
- [54] LASHGARI M, NAGHASH A. Hardware in the loop simulation and implementation of a dragonfly-like MAV using clap and fling mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2023, 237(15): 3363-3377.
- [55] SUN M. Insect flight dynamics: Stability and control [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 86(2): 615-646.
- [56] WU J H, SUN M. Floquet stability analysis of the longitudinal dynamics of two hovering model insects[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2012, 9(74): 2033-2046.
- [57] CHENG B, DENG X Y. Translational and rotational damping of flapping flight and its dynamics and stability at hovering[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(5): 849-864.
- [58] HASSAN A M, TAH A H E. Differential-geometric-control formulation of flapping flight multi-body dynamics[J]. *Journal of Nonlinear Science*, 2019, 29(4): 1379-1417.
- [59] QIAN C, FANG Y C, LI Y P. Quaternion-based hybrid attitude control for an under-actuated flapping wing aerial vehicle[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(5): 2341-2352.
- [60] 钱辰, 方勇纯, 李友朋. 面向扑翼飞行控制的建模与奇异摄动分析[J]. *自动化学报*, 2022, 48(2): 434-443. QIAN Chen, FANG Yongchun, LI Youpeng. Control oriented modeling and singular perturbation analysis in flapping-wing flight[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(2): 434-443.
- [61] ZHANG Y C, GUO Q C, LIU W, et al. Research on optimization of stable damper for passive stabilized double-wing flapping micro air vehicle[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2024, 21(5): 2167-2183.
- [62] CHEN L, ZHOU C. Linearized aerodynamic modeling of flapping rotary wings by rotating the leading-edge suction[J]. *AIAA Journal*, 2021, 59(5): 1884-1890.
- [63] WEN Q Q, GUO S J, LI H, et al. Nonlinear dynamics of a flapping rotary wing: Modeling and optimal wing kinematic analysis[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(5): 1041-1052.
- [64] WU J H, WU X Y, TANG P, et al. Dynamic flight stability of a hovering flapping-rotary-wing vehicle[J]. *AIAA Journal*, 2023, 61(12): 5584-5597.
- [65] WOOD R J. Design, fabrication, and analysis of a 3 DOF, 3 cm flapping-wing MAV[C]//Proceedings of 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA: IEEE, 2007: 1576-1581.
- [66] MA K Y, FELTON S M, WOOD R J. Design, fabrication, and modeling of the split actuator microrobotic bee[C]//Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, 2012: 1133-1140.
- [67] DUDLEY R. The biomechanics of insect flight: Form, function, evolution[J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2000, 93(5): 1195-1196.
- [68] LEHMANN F O, DICKISON M H. The control of wing kinematics and flight forces in fruit flies (*Drosophila* spp.)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1998, 201(3): 385-401.
- [69] JEAN B. Aerodynamic capabilities of flies, as revealed by a new technique[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1981, 92(1): 155-163.
- [70] DONG Y B, SONG B F, YANG W Q, et al. A numerical study on the aerodynamic effects of dynamic twisting on forward flight flapping wings[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2024, 19(2): ad253b.
- [71] WANG L, SONG B F, SUN Z C, et al. Flapping trajectory characteristics and attitude control approach of a flapping-wing robot with 2-DOF parallel mechanism [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 147: 109020.
- [72] HE W, MENG T T, HE X Y, et al. Iterative learning control for a flapping wing micro aerial vehicle under distributed disturbances[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(4): 1524-1535.
- [73] DENG X Y, SCHENATO L, SASTRY S S. Flapping flight for biomimetic robotic insects: Part II — Flight control design[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(4): 789-803.
- [74] KALLINY A N, EL-BADAWY A A, ELKHAMI-SY S M. Command-filtered integral backstepping control of longitudinal flapping-wing flight[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(7): 1556-1568.
- [75] WISSA B E, ELSHAFEI K O, EL-BADAWY A A. Lyapunov-based control and trajectory tracking of a 6-DOF flapping wing micro aerial vehicle[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 99(4): 2919-2938.
- [76] HE G P, SU T T, JIA T M, et al. Dynamics analysis and control of a bird scale underactuated flapping-

- wing vehicle[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(4): 1233-1242.
- [77] DOMAN D B, OPPENHEIMER M W, SIGTHORSSON D O. Wingbeat shape modulation for flapping-wing micro-air-vehicle control during hover[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(3): 724-739.
- [78] MA H, GONG P Y, TIAN Y Q, et al. HiFly-dragon: A dragonfly inspired flapping flying robot with modified, resonant, direct-driven flapping mechanisms [J]. *Drones*, 2024, 8(4): 126.
- [79] BHATTI M Y, LEE S G, HAN J H. Dynamic stability and flight control of biomimetic flapping-wing micro air vehicle[J]. *Aerospace*, 2021, 8(12): 362.
- [80] CHEN Z H, ZHANG W P, MOU J W, et al. Development of an insect-like flapping-wing micro air vehicle with parallel control mechanism[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(7): 3509.
- [81] SATO T, FUJIMURA A, TAKESUE N. Three-DOF flapping-wing robot with variable-amplitude link mechanism[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2019, 31(6): 894-904.
- [82] GUO Q C, WU C F, ZHANG Y C, et al. Development of a bio-inspired tailless FWMAV with high-frequency flapping wings trajectory tracking control[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2024, 21(5): 2145-2166.
- [83] CHEERANGAL M J, JAIN A K, DAS A. Multiple fault tolerant control strategy for rotor field oriented induction motor drive fed from CHB converter with redundant cells[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(1): 852-861.
- [84] ZHENG H Y, CHEN W G, XIE F F. Control simulation of flapping-wing micro aerial vehicle based on multi-level optimization model predictive control[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 40700-40709.
- [85] KHOSRAVI M, NOVINZADEH A B. A multi-body control approach for flapping wing micro aerial vehicles [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 112: 106525.
- [86] FEI F, TU Z, DENG X Y. An at-scale tailless flapping wing hummingbird robot: II. Flight control in hovering and trajectory tracking[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2023, 18(2): acaa7b.
- [87] MOU J W, ZHANG W P, WU C F, et al. Adaptive control of flapping-wing micro aerial vehicle with coupled dynamics and unknown model parameters[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 9104.
- [88] LI H, GAO H, GENG Z Y, et al. Predictive control of trajectory tracking for flapping-wing aircraft based on linear active disturbance rejection[J]. *Electronics*, 2024, 13(14): 2735.
- [89] GUO Q C, DENG Z C, WU C F, et al. LPV modeling and robust sampled-data H_{∞} control of a tailless flapping wing microaerial vehicle with parameter uncertainties[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2025, 30(2): 1333-1344.
- [90] HU H T, ZHANG Z Y, WANG Z G, et al. Hovering of bi-directional motor driven flapping wing micro aerial vehicle based on deep reinforcement learning[J]. *Drones*, 2024, 8(9): 508.
- [91] WANG S Q, SONG B F, CHEN A, et al. Modeling and flapping vibration suppression of a novel tailless flapping wing micro air vehicle[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(3): 309-328.
- [92] LONG H H, ZHANG P Y, GUO T L, et al. Fixed-time adaptive fuzzy fault-tolerant control of flapping wing MAVs with wing damage[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(5): 6594-6607.
- [93] MCGILL R, HYUN N P, WOOD R J. Frequency-modulated control for insect-scale flapping-wing vehicles[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 12515-12522.
- [94] MCIVOR B, MCGUIRE J, CHAHL J. Feedback and control of linear electromagnetic actuators for flapping wing MAVs[J]. *Aerospace*, 2023, 10(3): 259.
- [95] HILL J, FAHIMI F. Variable sampling time discrete sliding mode control for a flapping wing micro air vehicle using flapping frequency as the control input[J]. *Nonlinear Engineering*, 2024, 13: 20240017.
- [96] HUANG H F, WU X Y, WANG T T, et al. Reinforcement learning control for a flapping-wing micro aerial vehicle with output constraint[J]. *Assembly Automation*, 2022, 42(6): 730-741.
- [97] LI H D, LI D C, SHEN T, et al. Numerical analysis on the aerodynamic characteristics of an X-wing flapping vehicle with various tails[J]. *Aerospace*, 2022, 9(8): 440.
- [98] JORIS J L. Delft university to expand delfly MAV capability for security work[J]. *Jane's International Defense Review*, 2006, 39 (11): 34.
- [99] DE CLERCQ K M E, KAT R, REMES B, et al. Flow visualization and force measurements on a hovering flapping-wing MAV 'DelFly II' [C]//Proceedings of the 39th AIAA Fluid Dynamics Conference. Texas, USA: AIAA, 2009: 1-6.
- [100] DE CROON G C H E, DE CLERCQ K M E, RUIJSINK R, et al. Design, aerodynamics, and vision-based control of the DelFly[J]. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2009, 1(2): 71-97.
- [101] DE CLERCQ K M E, DE KAT R, REMES B, et al. Aerodynamic experiments on DelFly II : Unsteady

- lift enhancement[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2009, 1(4): 255-262.
- [102] DE CROON G E, GROEN M A, DE WAGTER C, et al. Design, aerodynamics and autonomy of the DelFly[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(2): 025003.
- [103] PERCIN M, VAN OUDHEUSDEN B W, DE CROON G E, et al. Force generation and wing deformation characteristics of a flapping-wing micro air vehicle 'DelFly II' in hovering flight[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2016, 11(3): 036014.
- [104] WANG L, JIANG W Y, WU Z Y, et al. Modeling the bio-inspired wing-tail interaction mechanism and applying it in flapping wing aircraft pitch control[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(5): 2914-2921.
- [105] WANG L, JIANG W Y, ZHAO L F, et al. Modeling and hover flight control of a micromechanical flapping-wing aircraft inspired by wing-tail interaction[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(6): 3132-3142.
- [106] WANG L, JIANG W Y, ZHAO L F, et al. Neural network based position control of an underactuated flapping wing aircraft considering the aerodynamic damping[J]. Nonlinear Dynamics, 2024, 112(15): 13249-13267.
- [107] WANG L, JIANG W Y, ZHAO L F, et al. Stabilization controller design of flapping wing aircraft considering the unique periodic characteristics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025, 30(1): 38-48.
- [108] DANG J Q, YOU H, TANAKA H. An experimental study on attitude control of a tailless hummingbird-mimetic flapping-wing robot with defective wings[J]. Advanced Robotics, 2024, 38(16): 1108-1123.
- [109] MOUSAVI S M S, POURTAKDOUST S H. Improved neural adaptive control for nonlinear oscillatory dynamic of flapping wings[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2023, 46(1): 97-113.
- [110] QIAN C, FANG Y C, LI Y P. Neural network-based hybrid three-dimensional position control for a flapping wing aerial vehicle[J]. IEEE Transactions on Cybernetics 2023, 53(10): 6095-6108.
- [111] QIAN C, CHEN R, SHEN P Y, et al. Trajectory generation and tracking control for flapping wing robot three-dimensional flight[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025, 30(2): 1248-1260.
- [112] 贺媛媛, 王琦琛, 张航, 等. 扑旋翼飞行器机构动力学建模与功率优化[J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 33-43.
- HE Yuanyuan, WANG Qichen, ZHANG Hang, et al. Mechanism dynamic model and power optimization of flapping wing rotor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(17): 33-43.
- [113] 贺媛媛, 韩慧, 王琦琛, 等. 微小型仿生扑翼飞行器研究进展及关键技术概述[J]. 战术导弹技术, 2023(1): 39-50.
- HE Yuanyuan, HAN Hui, WANG Qichen, et al. Overview of development and key technologies of bionic flapping wing micro aerial vehicles[J]. Tactical Missile Technology, 2023(1): 39-50.
- [114] 谢浩然, 贺媛媛, 陶志坚. 扑旋翼飞行器气动特性分析及机翼拓扑优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(2): 280-287.
- XIE Haoran, HE Yuanyuan, TAO Zhijian. Aerodynamic characteristics analysis and topology optimization design of wing of flapping rotorcraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 280-287.
- [115] DONG X, LI D C, XIANG J W, et al. Design and experimental study of a new flapping wing rotor micro aerial vehicle[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(12): 3092-3099.
- [116] LIU F, LI S, DONG X, et al. Design, modelling, and experimental validation of a self-rotating flapping wing rotorcraft with motor-spring resonance actuation system[J]. Bioinspiration & biomimetics, 2023, 18(4): 04601.
- [117] WANG Z Y, KAN Z, LI H D, et al. Parametric study on aerodynamic performance of a flapping wing rotor MAV capable of sustained flight[J]. Aerospace, 2022, 9(10): 551.
- [118] WANG Z Y, KAN Z, LI H D, et al. Experimental and numerical study of different wing number and flapping-rotation decomposition of a flapping wing rotor unmanned aerial vehicle[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(2): 027138.
- [119] DONG X, WANG Z Y, LIU F Y, et al. Visual-inertial cross fusion: A fast and accurate state estimation framework for micro flapping wing rotors[J]. Drones, 2022, 6(4): 90.
- [120] WANG Z Y, DONG X, XIANG J W, et al. Experimental validation of an effective control mechanism to enable flapping wing rotor stable flight[J]. Guidance, Navigation and Control, 2022, 2(3): 2250014.