第 22 卷第 4 期
2024 年 4 月

动 力 学 与 控 制 学 报
JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL

Vol. 22 No. 4
Apr. 2024

文章编号:1672-6553-2024-22(4)-001-015

DOI:10.6052/1672-6553-2023-073

仿鸟类扑翼飞行器研究进展*

赵晓伟[1] 曾东鸿[1] 占英[2†] 宝音贺西[1]

(1.清华大学 航天航空学院,北京 100084)

(2.内蒙古大学 电子信息工程学院,呼和浩特 010021)

摘要 仿生扑翼飞行器有着优异的气动性能和灵活的飞行能力,在军民领域均有广泛的应用前景,学者们在原理样机研制、扑翼气动机理、驱动机构、飞行控制等多领域取得了一系列重要进展.本文从总体设计方法、驱动机构设计与优化、气动机理等方面综述了仿鸟类扑翼飞行器技术的发展历程与研究进展.首先,从扑翼总体设计方法入手,总结了仿鸟类扑翼飞行器仿生构型,归纳了总体设计参数估算方法;其次,综述了多种构型曲柄连杆机构在扑翼驱动中的应用与优缺点;接着总结了扑翼气动机理研究的实验方法与数值计算方法,分析了不同扑翼气动算法针对不同应用场景在计算成本和准确度方面的优劣情况;最后,对仿鸟类扑翼飞行器系统设计研究现状进行总结,针对原理样机研制过程提出展望.

关键词 扑翼飞行器, 仿生构型, 总体设计, 驱动机构, 气动机理

中图分类号:V276 **文献标志码**:A

Advances on System Design of Bio-Inspired Flapping Wing MAV*

Zhao Xiaowei[1] Zeng Donghong[1] Zhan Ying[2†] Baoyin Hexi[1]

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. School of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract Bio-inspired flapping wing micro air vehicles have excellent aerodynamic performance and flexible flight ability. They have been widely used in both military and civilian markets. Research teams at home and abroad have made significant progress in developing principle prototypes, flapping wing aerodynamics, driving mechanisms, flight control, and other fields. This paper reviews the development and research progress of the bird-like flapping wing MAVs from the conceptual design methods, driving mechanism design and optimization, and aerodynamics. Firstly, starting from the conceptual design method of the flapping wing, the bionic configuration of bird-like flapping wing aircraft has been summarized, and the overall design parameter estimation method has been outlined. Secondly, the application, advantages, and disadvantages of various configuration crank-link mechanisms in flapping wing drives have been reviewed. Then, the flapping wing aerodynamic experimental methods and numerical calculation methods are summarized, and the advantages and disadvantages of different flapping wing aerodynamic algorithms in terms of calculation cost and accuracy for different application scenarios have been analyzed. Finally, the design and research status of the bird-like ornithopter system is summarized, and the prospect of the prototype development process has been put forward.

Key words flapping wing aircraft, bionic configuration, conceptual design, driving mechanism, aerodynamic

2023-06-12 收到第 1 稿,2023-06-28 收到修改稿.

* 国防科学技术预先研究基金项目资助(301021505), Defense Science and Technology Pre-research Fund (301021505).

† 通信作者 E-mail:zhanying@imu.edu.cn

引言

自古以来，人类对飞行的向往从未止步，像鸟一样飞行是人类的共同梦想. 随着科学技术的发展，人造仿鸟类扑翼飞行器经历了从外形尺寸的模仿到内在结构的模仿，再到研究气动原理进行再创造的过程. 公元前5世纪，墨子制作木质飞鸟，“墨子为木鸢，三年而成，蜚一日而败”；进入文艺复兴时代，达·芬奇在观察鸟类内部构造的基础上，设计了人力扑翼机的手稿；进入工业革命时代，人类开始利用机械装置制作人力扑翼飞行器实现载人飞行. 德国航空工程师、空气动力学先驱 Lippisch[1]首次实现了载人人力扑翼飞行，由于人力功率和肌肉疲劳的限制，扑翼难以实现长时间飞行；进入21世纪初，随着发动机等动力源逐渐成熟，加拿大多伦多大学航空航天研究所的 DeLaurier 等[2-4]成功实现了发动机驱动、有人驾驶扑翼机的离地飞行.

20世纪90年代，现代战争对于微型侦察飞行器的需求日益增长. 美国国防高级研究计划局[5](DARPA)提出了微型飞行器[6](Micro Air Vehicle, MAV)的概念，旨在利用微型飞行器体积小便于单兵携带、空中机动性强、成本低等优势，帮助小型作战部队开展针对丛林、山地、建筑等环境的侦察、定位、监视任务. 微型飞行器按照飞行原理的不同可分为固定翼、旋翼和扑翼三种，仿生扑翼微型飞行器因为其优异的低雷诺数气动性能和灵活机动的飞行能力受到研究人员青睐. 1998年，DARPA正式启动了3500万美元的预研任务研制微型扑翼飞行器，全球掀起了一股扑翼微型飞行器的研究热潮.

加州理工学院的 Pornsin-Sirirak 等[7,8]研制成功第一款手掌大小的仿生扑翼飞行器 Microbat；美国 AeroVironment 公司的 Keennon 等[9]研制成功具备彩色视频实时传输能力的仿蜂鸟扑翼飞行器 Nano Hummingbird；荷兰代尔夫特理工大学的 De Croon 等[10-14]研制成功的交叉X翼四翼面扑翼飞行器 DelFly 系列；加州大学伯克利分校 Baek[15]等研制了一款基于谐振驱动器的5.8 g重量的扑翼飞行器；麻省理工学院的 Tedrake 等[16]研制了一款近2 m翼展的扑翼飞行器 Phoenix，可搭载运行 Linux 系统的小型处理器实现自动飞行；荷兰 Clear Flight Solutions 公司的 Folkertsma 等[17,18]模仿游隼利用3D打印技术研制了一款单段翼高速构型扑翼飞行器 Robird，应用于机场驱鸟；德国 Festo 公司模仿海鸥首次研制成功两段折叠翼扑翼飞行器 SmartBird[19,20]和模仿雨燕研制成功类羽毛片状叠加机翼的扑翼飞行器 BionicSwift[21]. 加州大学伯克利分校的 Rose 等[22]研究六足爬行机器人和微小型扑翼飞行器二者的配合使用，实现扑翼飞行器的自主起飞. 哈佛大学的 Chen 等[23,24]采用介电弹性体构造人工肌肉驱动微小型扑翼飞行器实现可控飞行.

国内高校在仿鸟类扑翼飞行器方面开展了大量研究并研制成功一系列原理样机，包括西北工业大学的“信鸽”[25]、南京航空航天大学的金鹰[26]、哈尔滨工业大学的“凤凰”[27]、北京航空航天大学的四翼面构型扑翼飞行器[28-31]和双关节大鸟型扑翼飞行器[32]、上海交通大学的基于电磁驱动和微机电系统的微小型扑翼飞行器[33,34]，同时也在扑翼气动、驱动机构、飞行控制等多领域取得了一系列重大进展.

扑翼飞行器广泛的军事和民用前景使其成为无人飞行器研究的热点之一，本文从总体设计方法、驱动机构设计、气动机理研究三个方面进行综述，最后对仿鸟类扑翼飞行器的研究现状和研究难点进行总结.

表1 典型仿生扑翼飞行器

Table 1 Typical bionic flapping wing micro air vehicles

翼型	名称	研究机构	m/g	b/cm	f/Hz	v/(m/s)
Nano-wing	Nano Hummingbird[9]	AVINC	19	16.5	30	6.7
X-wing	DelFly[11]	TU Delft	20	28	14	7
	X-wing[35]	NUS	26	28	15	6
Single-wing	Microbat[7]	Caltech	12.5	—	30	—
	BionicSwift[21]	Festo	42	68	—	—
	Phoenix[16]	MIT	—	200	2.4	5
	Robird[17]	CFS	730	112	6	18
	Dove[25]	NPU	220	50	4～12	8～12
	HIT-Phoenix[27]	HIT	675	230	2～5	2～8
	Rosaker600	THU	650	140	7～10	10～15
Folding-wing	SmartBird[20]	Festo	450	107	2	5

1 扑翼总体设计方法研究现状

航空器高速发展的百余年以来，固定翼、旋翼

飞行器的设计已经逐渐成熟,建立了完备的标准设计流程,总结了大量可靠的经验公式可供参考,开发了相关参数快速估算的方法,形成了成熟的设计手册.在微型飞行器的研制过程中,以固定翼、旋翼为基本飞行原理的微型飞行器可看作全尺寸飞行器的缩放版本,其设计原则可参考遵循飞机设计手册相关标准,而扑翼微型飞行器由于研制时间较短,尚未形成成熟完善的总体设计方法,在总体设计阶段,往往按照"确定仿生构型、估算整机重量、拟定总体参数"的流程开展,并根据不同样机特性总结关键系统特征参数的一般规律.

1.1　仿生气动构型

自然界中具备飞行能力的鸟类大概有 9000 多种,具备飞行能力的昆虫有近百万种,Shyy 等[36]从扑翼飞行的鸟类和昆虫的总体指标参数出发,建立了雷诺数和扑翼频率之间的负相关关系,分析了雷诺数、缩减频率、斯特劳哈尔数无量纲参数对气动性能的影响.韩国 Park 等[37]从总体指标方面总结归纳了自然界的飞行生物(包括种子、昆虫、鸟类)和人造航空器(包括固定翼和直升机)的重量和翼展的数据,揭示了重量和翼展之间的正相关关系.众多统计规律都表示扑翼飞行器的重量、尺寸、扑翼频率存在密切的关系,因此可根据仿生类型和总体参数对现有研制成功的仿鸟类扑翼飞行器进行分类,方便后续根据需求进行仿生气动构型选择和设计.

目前国内外仿鸟类扑翼飞行器从仿生气动构型方面主要分为四种情况,如图 1 所示.

仿蜂鸟气动构型,如 Nano Hummingbird[9],模仿蜂鸟的气动构型和运动规律,多为单段翼多自由度扑翼气动构型,尺寸多为 20cm 以下,翼面无翼型,可实现扑动和俯仰耦合的扑翼运动,具备悬停和前飞能力,机动性好,但是由于体积和重量较小,携带有效载荷能力不足,续航时间有限.

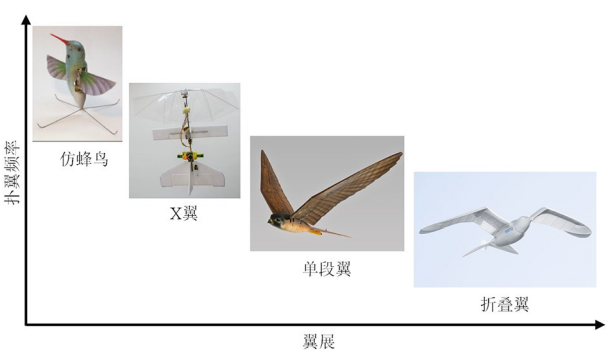

图 1　仿生气动构型

Fig. 1　Biomimetic aerodynamic configuration

X 翼气动构型,如 DelFly[11]系列,此类扑翼飞行器未仿制大自然中任一鸟类,在仿蜂鸟的基础上,为提高升力和推力,将单段翼双翼面布局升级为四翼面布局,构成 X 型交叉翼面构型,通常情况下位于对角线上的翼面同步运动,翼展尺寸多为 10～30cm,气动机理更接近昆虫拍合机制,无翼型,依靠翼面在气动力作用下被动扭转产生推力.该类扑翼飞行器一般具有较高的沿机身向前的推力,因此可悬停飞行(推力向上)或以较大仰角低速前飞,但是该类扑翼飞行器携带有效载荷能力不足,续航时间和可控飞行距离有限.

单段翼气动构型,如 Robird[17]、Dove[25]等,模仿大自然中小型鸟类如信鸽、喜鹊、麻雀等,翼展多为 50cm～200cm 左右,采用单段翼飞行,扑翼运动可实现上下扑动运动和翼剖面的被动扭转运动,有效提升了推力.由于单段翼升力气动效率不如双段翼,需要较高的前飞速度保障升力,同时阻力增大,因此需要较高的推力平衡阻力.此类扑翼飞行器一般具有 10m/s 以上的飞行速度,可携带图传、避障等机载设备,续航时间可达 20min 以上.

折叠翼气动构型,如 SmartBird[20],模仿大自然中大型鸟类,如海鸥、猎隼等,多为两段翼气动构型,尺寸多为 200cm 以上,采用双段折叠翼结构,可实现上下扑动运动、内外翼折叠运动和外翼主动扭转运动,内翼仅有扑动运动,主要提供升力,外翼扑动和扭转耦合,主要提供推力.两段翼具有比单段翼高的气动效率,由于折叠产生了扑动不对称,升力效率较高,因此仅需要较低的飞行速度.此类扑翼飞行器气动效率较高,巡航速度一般在 10m/s 以下,最高可实现续航时间 90min 以上.

1.2　起飞重量估算方法

扑翼飞行器的设计过程中,起飞重量对气动性能和飞行性能都有重要的影响,载荷重量和结构部件的重量估算是至关重要的一步,为了便于后续计算总体参数的准确,需要对扑翼飞行器的重量进行合理精确估算.Tsai 等[38]从翼面尺寸出发,先确定了翼面尺寸,再根据气动数值计算得到了最大起飞重量极限,最后给定了样机各部件的总重量的上限,但只有在子系统设计与集成时总重低于这一重

量上限,该样机才可以飞行,该方法由于对载荷和结构部件重量的估计不足,很容易在后续详细设计阶段各子系统总重超过气动数值计算的上限,从而陷入反复迭代过程,影响设计效率.因此,根据任务需求确定载荷和结构部件重量,再估算总体重量,设计所需翼面尺寸大小和扑翼运动参数,可以更高效地推进总体设计.Hassanalian[39]从任务需求出发,将总重量分为电子元器件和结构部件两部分,采用工程设计方法对电子元器件重量进行估算,基于已经研制成功的扑翼飞行器统计数据采用比例法和翼载荷法估算结构部件重量,并通过原理样机制作验证了该重量估算方法的有效性.

1.3 总体参数估算方法

总体参数的拟定对扑翼飞行器的初步设计具有重要的指导作用,根据任务需求和载荷需求确定整机重量之后,如何根据整机重量初步确定扑翼飞行器的其他总体参数对于扑翼飞行器的总体设计至关重要.

自然界众多的飞行生物经过成千上万年的迭代逐渐进化出最优的参数,可根据对自然界飞行生物的参数统计规律寻找不同物理量之间的联系.Tennekes等[40]从昆虫尺度到鸟类尺度再到大型喷气式飞机,总结了翼载荷、重量、巡航速度之间的关系.Greenewalt等[41]和Rayner等[42]总结了翼展、重量和飞行特性参数的关系.Liu[43]对比分析了扑翼飞行器在翼展、速度和功率方面的尺度规律,并探讨了尺度对升阻比、扑翼效率、诱导阻力、寄生阻力和推进效率的影响.Kirkpatrick[44]研究了鸟类骨骼和肌肉可承受的最大应力极限,骨骼和肌肉决定了扑翼输出的最大功率,且与重量密切相关,Pennycuick[45-48]以此为基础,建立了重量和最大扑翼频率之间的关系,并且观察统计鸟类的巡航扑翼频率,通过拟合得到了扑翼频率与重量、翼展、机翼面积的经验公式.Shyy等[49]在前人的基础上,以几何相似为假设前提,采用量纲分析建立重量与飞行性能参数之间的关系,给出了尺度律公式,该公式以重量为基础,可以快速计算得到翼展、翼面积、展弦比、翼载荷、最小功率速度、扑翼频率等总体参数,给扑翼飞行器的设计提供了较为可靠的初始参数拟定方法.Hassanalian等[50]为了设计高效扑翼微型飞行器,提出了一种基于理论分析和统计分析的综合尺寸参数确定的方法,并进行了实验验证.Whitney等[51]提出了一种扑翼总体设计方法,建立了一个单自由度扑翼动力学模型,以能量为基础,综合考虑气动力和推进效率,得到了续航时间和航程的解析表达式,可以快速估算机翼尺寸和整机重量,通过原理样机研制验证了该方法有效性.

基于仿生尺度律的总体参数确定方法广泛地应用在扑翼飞行器的总体设计阶段,但是由于尺度律公式来源于鸟类的统计数据,扑翼飞行器难以达到鸟类的高气动效率和低功率传递损耗,因此该公式难以准确估算扑翼飞行器的总体设计参数,需要提出适合扑翼飞行器设计的总体参数估算方法.王利光[52]借鉴固定翼与旋翼飞行器的总体参数体系,结合扑翼飞行器的特点,提出了一系列扑翼飞行器总体参数,如:考虑扑翼频率和扑翼幅度的影响提出有效翼面积,综合考虑扑翼升力和推力的双重特征提出当量翼载荷,考虑到升力、阻力、推力的耦合特性提出单位功率载荷,基于斯特劳哈尔数和缩减频率提出推进效率因子,并在一系列实验中验证了总体参数的合理性.苏进展等[53]提出了适合工程实际的微扑翼飞行器的设计方法,利用几何相似原理,拟合了以翼展为基本参数的仿生公式,并确定了飞行参数、结构参数和动力参数;根据初步的仿生设计结果,进行传动结构、翅翼尾翼等总体结构设计,并按照运动学分析、气动力分析、动力学分析相结合的动态分析方法研究了扑翼样机理论上产生的升力;与风洞实验结果相比,平均升力误差为0.61g,基本满足设计要求,为微扑翼飞行器的研制提供了理论和实验依据.

扑翼总体设计理论尚处于初级阶段,设计流程方面采用飞机总体设计的设计框架,气动布局方面主要根据仿生对象的特征采用不同的气动构型,总体参数方面主要借助鸟类的尺度律公式进行估算,需要通过大量的实物研制工程经验对仿鸟类扑翼飞行器进行迭代设计,将降低研制效率、提高物力人力成本;另一方面扑翼总体设计往往以单个原理样机为主要研究目标,相关研究结果难以应用到其余原理样机中,尚未形成某类扑翼构型的普适性总体设计理论.

2 扑翼驱动机构研究现状

机械式扑翼驱动系统主要由动力、减速器、驱

动机构构成,其中在仿鸟类扑翼飞行器中动力主要指无刷电机,提供高转速、低扭矩的动力源,再由减速器转化为适当转速、高扭矩的回转运动,最后通过驱动机构将主轴的回转运动转化为扑翼翼面的往复扑动运动,实现扑翼飞行.动力源和减速器的方案选择主要根据样机驱动机构和翼面载荷进行选择和匹配,基本大同小异,但驱动机构却各有千秋,本文主要针对驱动机构的不同类型进行综述.

目前扑翼飞行器中广泛采用的驱动机构以不同类型的连杆机构为基础进行改进设计,模仿鸟类翅膀的往复扑动、弦向俯仰和前后挥摆运动,从而获得升力和推力驱动扑翼飞行器实现飞行.常用的连杆驱动机构主要包括曲柄摇杆机构、曲柄滑块机构和凸轮弹簧机构.其中曲柄滑块机构摩擦大、效率不高;凸轮弹簧机构制造困难,同样存在摩擦、磨损的问题.曲柄摇杆机构简单可靠、磨损小、效率高,成为驱动机构的主流选择,同时以此为基础改进设计衍生出一系列的扑翼驱动机构,包括:空间四连杆机构和平面四连杆机构,其中平面四连杆机构可根据曲柄、连杆数量进行如下分类:单曲柄单连杆机构、单曲柄双连杆机构、双曲柄双连杆机构.

2.1　单曲柄双连杆机构的应用及优化

单曲柄双连杆机构是最早应用于扑翼飞行器的机构之一,如图 2 所示,由一个曲柄同时驱动两个连杆,带动两个摇杆产生单自由度的扑翼运动,各杆件运动位于一个平面内. Pornsin-Sirirak 等[7,8]首先针对单曲柄双连杆机构进行研究,基于该机构设计了四种不同分型的驱动机构,根据重量、对称性等原则最终确定了单曲柄双连杆机构的基本构型,并制作成功 Microbat[7]样机. Madangopal 等[54,55]在单曲柄双连杆机构的基础上引入弹性元件,实现在上下扑动过程中的储能—释放过程,

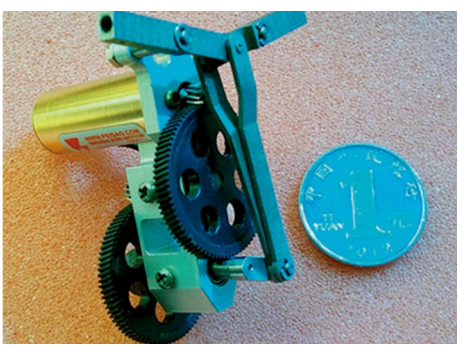

图 2　"信鸽"的单曲柄双连杆驱动机构

Fig. 2　Dove's single-crank and double-linkage driving mechanism

降低了扑翼驱动机构的峰值扭矩. Tsai 等[38]基于该机构制作了一款重量 8g、扑翼频率 25Hz、扑翼幅度 73°的原理样机.李峙岳[56]基于单曲柄双连杆机构,运用再生运动链原理设计扑翼驱动机构,并进行动力学分析和优化.通过大量高校、研究机构在仿鸟类扑翼飞行器原理样机上的研究和应用,证明了单曲柄双连杆机构的优势,但由于机构本质特性,连接机翼的左右摇杆运动存在相位差.

单曲柄双连杆机构的左右摇杆相位差是固然存在的,只能通过优化杆件尺寸参数减小相位差,不能彻底消除.为了减小相位差带来的影响,研究人员以左右摇杆运动学相位差作为目标函数进行优化,改进该机构在扑翼飞行器原理样机中的应用.杨文青、张亚锋等[25,57]采用遗传算法进行优化,使得左右摇杆的相位差降低为优化前数值的 17%,并且通过试飞实验中验证了优化效果,飞行的振荡减弱,提高了飞行的稳定性.周凯等[58]建立了驱动机构运动学的数学模型,引入机械学、仿生学等约束条件,采用模式搜索法对相位差进行优化计算,改善了该机构的运动对称性.董二宝等[59]结合解析法和仿真实验方法,建立机构优化设计数学模型,求得理论最优解,给出了机构的工程设计公式,制作的原理样机验证了摇杆良好的同步性.

2.2　运动对称的驱动机构类型

单曲柄双连杆机构固有的相位差导致了在仿鸟类扑翼飞行器设计中应用的局限性,仅靠优化设计只能改善但是不能彻底消除相位差,因此多家高校和研究机构以左右摇杆扑翼同步对称为目标,对驱动机构进行了升级和创新,研制了一系列左右摇杆运动对称的扑翼机构,包括:空间四连杆机构、双曲柄双连杆机构、单曲柄单连杆机构.

第一种消除相位差的机构是空间四连杆机构,如图 3 所示,在单曲柄双连杆的基础上,改变曲柄旋转方向与摇杆运动平面的位置关系,使得曲柄旋转轴垂直于机身纵向平面,构成空间四连杆机构. De Croon 等[10,11]和 Bruggeman[13]以此为驱动机构研制成功 DelFly Ⅱ和 DelFly Micro 两款原理样机,并且通过实验得到了相关结论:机构越靠近机身纵向平面,扑翼角度范围越大,翼面提供的推力越大. Pan 等[27,60]基于空间四连杆机构,设计制作 HIT-Hawk 和 HIT-Phoenix 两款原理样机(内部

构造相同,外形涂装不同),实现扑翼频率 3Hz～7Hz 和扑翼角度－11°～45°. Zhang 等[61]采用空间四连杆机构制作了一款重量 14.88g 的微小型扑翼飞行器,实现扑翼频率 17Hz 和扑翼角度－30°～40°.

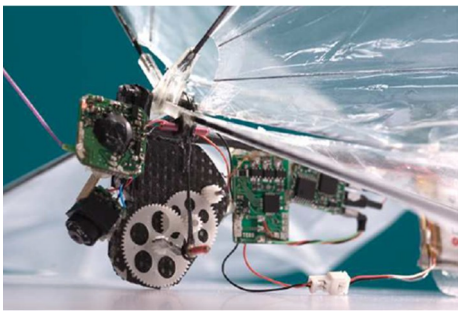

图 3 DelFly Ⅱ的空间四连杆驱动机构
Fig. 3 DelFly Ⅱ's spatial four-bar links driving mechanism

第二种消除相位差的机构是双曲柄双连杆机构,如图 4 所示,在单曲柄双连杆的基础上增加一个曲柄部件构成双曲柄双连杆机构,为了减少机构部件、减轻重量,利用二级减速从动齿轮构造曲柄,双曲柄双连杆机构相当于左右对称分布两套曲柄摇杆机构,二者依靠中间的二级减速从动齿轮啮合保持同步运动,因此在机械原理上保证了摇杆运动的对称性. De Croon、Bruggeman 和 Groen 等[11,13,14]以双曲柄双连杆机构作为驱动机构升级改进制作了原理样机 New DelFly Ⅱ. Hsu 等[62]以双曲柄双连杆机构为基础,增大了扑翼角度范围,与同为四翼面扑翼的 New DelFly Ⅱ相比,在一个完整扑翼周期内,翼面重合情况由原来的左右两侧拍打重合变为了左右上三处拍打重合,提高了前向推力效果. Festo 的 Send 等[19]研制了一款 Smartbird,在双曲柄双连杆机构的基础上,通过在连杆和摇杆之间补充附加杆,实现单自由度的内外翼折叠往复运动,通常应用于大型翼展的两段翼折叠扑翼构型,该机构优势在于运动对称且能产生折叠扑翼运动.

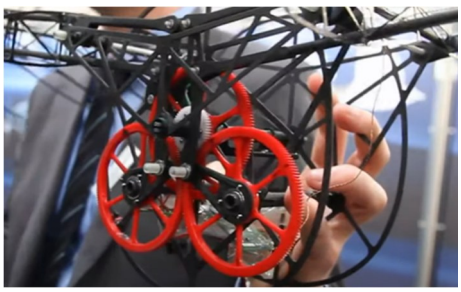

图 4 Festo 的双曲柄双连杆驱动机构
Fig. 4 Festo's double-crank and double-linkage driving mechanism

第三种消除相位差的机构是单曲柄单连杆机构,如图 5 所示,在摇杆和连杆之间进行改进设计,或增加滑块、或增加杆件、或增加半齿传动结构,保证左右两侧摇杆运动的同步性. 加州大学伯克利分校的 Baek 等[15]采用曲柄滑块机构制作了一款 5.8g 的微小型扑翼飞行器. Peng 等[63]采用压电元件和永磁体设计了一种新型直线驱动器,并通过曲柄滑块机构将往复直线运动直接转化为扑动运动. Analooee 等[64]在曲柄滑块机构的基础上,将滑块机构替换为同样实现直线上下运动的空间连杆机构,消除了滑块的磨损带来的机构影响. Zhang 等[65]基于曲柄滑块机构设计了一款可调扑翼幅度的扑翼飞行器,可以控制左右摇杆运动的相位差实现更高效的转弯. 王鹏程等[66]利用 Watt 连杆的直线运动原理,设计了一款扑翼驱动机构,保证了左右两侧运动的对称性,提高了扑翼驱动机构的紧凑性和稳定性. 付鹏[67]使用半齿保证摇杆运动的同步性,单曲柄单连杆驱动单侧摇杆产生往复扑翼运动,具备良好对称性的同时减少了杆件数量,对减重和减少磨损具有重要意义. 本课题组利用单曲柄单连杆半齿机构,建立了含扭簧驱动机构的动力学模型,考虑了周期气动力对驱动力矩的影响,优化了扑翼驱动力矩,实现了扑翼气动力矩降低 36% 的效果.

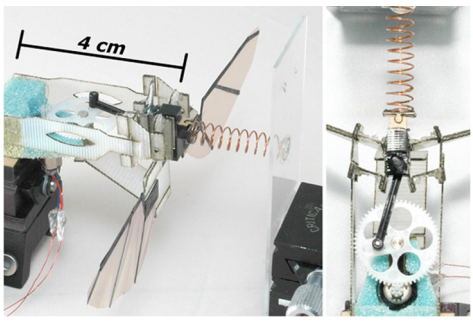

图 5 Caltech 的单曲柄单连杆驱动机构
Fig. 5 Caltech's single-crank and single-linkage driving mechanism

仿鸟类扑翼飞行器驱动机构以单曲柄双连杆机构为源头,开始了原理样机的制作和实验,并发现了该机构固有的相位差对扑翼飞行的不良影响,因此开展了对该机构的优化设计和改进升级,前者主要以相位差为目标函数采用多种优化方法降低相位差,后者主要从机构原理角度改进机构部件,衍生出多种机构类型消除相位差;在改进优化相位差的同时也有学者合理利用相位差,实现了相位差

的可控,可提高转弯效率.

3　扑翼气动机理研究现状

微型扑翼飞行器是仿生学的一个典范,翼面设计和气动机理分析是仿鸟类扑翼飞行器研制的核心环节,想要设计一款飞行性能优越的原理样机,就必须理解扑翼飞行产生升力的机理,深入研究扑翼飞行器的气动特性.

3.1　扑翼气动机理观测与实验

最早对扑翼气动的研究是基于对流场的可视化观测和实验. Ellington[68-74]观察记录扑翼飞行生物的形态学和运动学数据,首次提出并证明了准定常气动模型不能完全刻画扑翼飞行机理,扑翼过程中存在非定常高升力机制,并探讨了非定常气动机理在扑翼飞行器上的应用. Willmott 等[75]利用烟雾可视化技术和高频摄影技术对飞蛾扑动的气动流场进行观测,揭示了前缘涡的存在、将扑翼三维流动模式可视化. Van Den Berg 等[76,77]进一步制作放大版仿飞蛾样机模型,揭示了前缘涡的形成和发展是扑翼升力增强的主要机制. Dickinson 等[78-80]研究了翅膀运动带来的气动性能增强是延迟失速、旋转循环和尾流捕获三种机制互相作用下的结果. Birch 等[81]利用数字粒子图像测速技术(DPIV)研究了扑翼的展向流动和前缘涡再附着是扑翼高升力机理的重要原因. De Clercq 等[82]利用 DPIV 研究了 DelFly Ⅱ的流场特性,揭示了柔性机翼是前缘涡产生的重要因素,验证了翅膀拍合—分离机制对前缘涡的贡献.

3.2　扑翼准定常气动模型

随着研制扑翼飞行器的需求增大,建立合适的模型对仿生飞行器的气动力进行计算对扑翼飞行器的设计和应用具有重要意义. 早期扑翼气动计算方法主要以准定常模型为主,主要方法是叶素法(BEM),该方法基于稳态的固定翼理论,将机翼沿展向分为二维翼型单元,计算各单元当地气动力最后积分得到整个机翼的气动力,该方法广泛应用于直升机和船舶的螺旋桨翼面的气动计算.

Berman 等[83]将叶素法推广到扑翼气动的计算中,并结合遗传算法优化扑翼运动. Truong 等[84]改进叶素法,增加附加质量力和旋转力,可更准确地估算扑翼气动力. 以叶素法为基础的条带法也成为估算仿鸟类扑翼气动力的有效手段,Delaurier 等[3,4]针对人力扑翼飞行器提出条带法 (Strip Theory)气动计算模型. Malik 等[85]利用基于叶素法的改进版条带法建立了半椭圆扑翼的气动计算模型,分析了不同参数对气动力的影响. Kim 等[86]在改进版条带法的基础上,考虑俯仰动态失速效应,提出了一种有效的气动数值模型.

因此,该方法的气动力主要由平移力、旋转力、附加质量力组成. 其中,平移力包含升力及阻力,升力和阻力系数是与瞬时攻角有关的函数[78]:

$$C_L = 0.225 + 1.58\sin(2.13\alpha - 7.20^\circ)$$
$$C_D = 1.92 - 1.55\cos(2.04\alpha - 9.82^\circ) \tag{1}$$

旋转力垂直于机翼表面,其计算公式[87]为:

$$F_{\mathrm{tot}} = \rho C_{\mathrm{rot}} u \omega c^2 R \int_0^1 \zeta c^2(\zeta)\,\mathrm{d}\zeta \tag{2}$$

而附加质量力指的是机翼在流体中加速运动时附加的反作用力.

叶素法考虑了扑翼过程的周期特性,通过模型的简化可以在计算出瞬时攻角后快速估算气动力数值,给扑翼飞行器初步设计提供了快速高效的方法,因此也可用于扑翼飞行器的动力学与控制仿真. 例如 Banazadeh 等[88]基于准定常气动模型研究了存在不确定性的刚体类昆虫扑翼模型的姿态和位置自适应滑模控制技术. Liang 等[89]采用准定常气动模型,提出了一种基于自抗扰控制方法的控制结构用于仿鸟类扑翼飞行器的降落过程控制. 由于机翼质量相对于机身较小,附加质量力在动力学与控制的研究中有时也会被忽略不计[89,90].

3.3　扑翼非定常气动模型

准定常模型忽略了扑翼流场的非定常特性,计算得到的数据和结果不准确,仅能借助其对扑翼气动特性进行初步的估算,无法准确描述气动机理,因此需要更加准确的模型来描述扑翼的气动特性. 近年来,随着计算流体动力学技术 (CFD)的发展,可实现非定常扑翼流场的数值模拟需要,有关扑翼飞行器的相关气动特性研究取得了突破性的发展,提出了多种研究方法,其中最具代表性的方法有:非定常面元法、非定常涡格法和数值求解 Navier-Stokes 方程法.

非定常面元法和非定常涡格法 (UVLM)均为基于势流理论的三维非定常计算方法,折衷兼顾计

算成本和准确度,计算成本和准确度介于叶素法和求解 N-S 方程法二者之间,可以处理三维非定常流场,但没有考虑气流粘性. 非定常面元法是将机翼表面或机翼中弧面离散为多个面元,在面元上布置涡和偶极子求解气动问题,非定常涡格法是在机翼表面的离散网格上布置涡线形成涡格求解气动问题,如图 6 所示. 前者布置在实际的机翼表面,后者布置在中性面上. 为了捕获尾涡的影响,同样将尾涡离散为涡格,涡格从后缘尖端脱出,其环量可由 Kelven 定律得出.

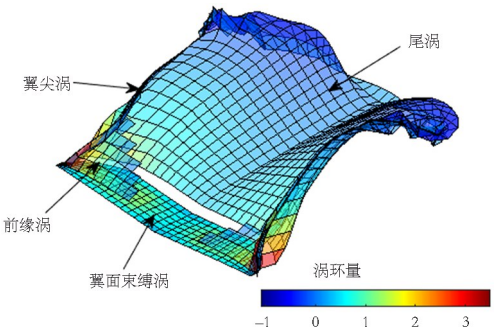

图 6 扑翼的非定常涡格法仿真

Fig. 6 UVLM simulation of a flapping wing

UVLM 基于 Biot-Savart 定律来计算每个涡段对于空间中任意一点的诱导速度,继而在控制点上利用物面不可穿透的边界条件来求解每个涡格上涡的环量.

$$\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\Gamma_j + (v_\infty + v_{\text{motion}} + v_{\text{wake}} + v_{\text{lev}} + v_{\text{tip}}) \cdot n = 0 \tag{3}$$

其中,a_{ij} 为单位环量的第 i 个涡格在第 j 个涡格的控制点引起的诱导速度,垂直于面板的分量. v_{wake}、v_{lev}、v_{tip} 则为尾涡、前缘涡、翼尖涡在该控制点引起的诱导速度. 利用式求解出环量后,即可根据非定常 Bernoulli 方程,计算气动分布.

Smith 等[91]基于非定常面元法模拟刚性扑翼流场中的尾涡结构,Vest 等[92]利用非定常面元法研究鸟类气动特性,与实验结果进行对比,准确度相比准定常模型有较大提高. Katz 等[93]详细介绍了非定常涡格法,Fritz 等[94]采用非定常涡格法对有限展弦比机翼的俯冲、俯仰、扭转和扑动进行了数值模拟,验证了该方法能够准确模拟复杂扑翼飞行的许多特征. Smith[95]采用非定常涡格法和有限元模型结合计算柔性机翼的气动特性,揭示了柔性机翼的尾涡对于非定常气动力的重要性. Zhu[96]将非定常涡格法和二维非线性薄板模型结合分析柔性机翼弦向和展向柔性对机翼推进效率的影响. Stanford 等[97]分析了非定常涡格法中各参数的灵敏度,并提出了基于梯度的优化方法提高扑翼推进效率. Roccia[98,99]对非定常涡格法进行了前缘涡分离的改进,与 Dickinson 等[79]的实验数据进行对比,验证了模型的有效性. Verstraete 等[100]将非定常涡格法应用到仿海鸥折叠机翼的气动力计算中.

数值求解 Navier-Stokes 方程法考虑粘性,能更好地刻画扑翼非定常流场特性,计算结果具有高准确度,但求解难度和计算成本也相应提高. Liu 等[101,102]采用求解三维不可压非定常 Navier-Stokes 方程,数值模拟扑翼的非定常流场结构,验证了前缘涡对提高升力的作用. Sun 等[103-109]和 Wu 等[110]采用全层流假设求解 Navier-Stokes 方程,研究昆虫的非定常飞行机理.

在数值计算方法中,扑翼气动特性描述的准确性和扑翼设计优化迭代的快速性二者不可兼得,搜索优化过程通常需要多次计算迭代才能收敛到相关最优值,低准确度更利于减少计算成本. 低准确度基于叶素法的准静态模型计算成本较低,但无法捕捉到真实流场的流动特性,仅适合总体设计阶段的扑翼气动力初步估算;准确度和计算成本折衷的非定常面元法和非常涡格法可以处理三维非定常流动,计算成本相对可以接受,适合在优化设计和流固耦合相关程序中应用,但未考虑粘性. 高准确度的数值求解 Navier-Stokes 方程法考虑流体的粘性,可以准确描述扑翼流场中的气动特性,对研究扑翼飞行生物的气动飞行机理具有重要作用.

3.4 扑翼气动机理的应用与柔性机翼研制

在建立模型计算扑翼气动力的基础上,设计和制作柔性机翼是验证气动理论的重要途径,同时柔性翼面也是制作原理样机的关键子系统之一. 在翼面构造设计中, De Croon[12]研究表面 X 翼构型相较单段翼提供更高的稳定性. Tsai 等[38]通过试飞发现尾翼的刚度对尾翼的控制效果至关重要,需要加强尾翼的刚度以保障在高频扑动情况下提供有效的舵面转角以实现整机控制. Malolan 等[111]搭建测力平台研究了扑翼翼面平面形状和翼梁分布对气动力的影响. Beasley[112]通过实验台和模型样机实验,测量了不同扑翼平面形状所产生的升力和推力.

3.5　扑翼气动机理研究现状总结

扑翼气动机理的研究主要分为实验与数值计算两个方向,其中实验方向主要以扑翼流场可视化观测、气动力测量、柔性翼面研制为主,揭示了前缘涡对扑翼高升力机理的贡献,可以实验获取扑翼气动力周期性规律,对扑翼飞行器柔性机翼的制作具有指导作用;数值计算主要包括准定常模型和非定常模型,计算效率和计算准确度因方法而已,可根据实际情况选取适当的数值计算方法辅助扑翼飞行器的设计与优化.

4　结论

本文针对仿鸟类扑翼飞行器的总体设计方法、驱动机构设计、气动机理三个方面进行综述:

(1)总体设计方面,仿生构型根据翼面尺寸和仿生对象可大致分为仿蜂鸟、X 翼、单段翼和折叠翼四种,扑翼飞行器的起飞重量主要依据统计数据按照子系统占比进行估算,总体参数主要借助鸟类的尺度律公式进行估算.

(2)驱动机构方面,主要以曲柄连杆机构为基础构型进行拓展设计,单曲柄双连杆机构结构简单、传动高效,但存在运动不对称问题,后续研究人员一方面采用多种优化方法降低运动不对称情况,一方面改进机构构型衍生出空间四连杆机构、双曲柄双连杆机构、单曲柄单连杆机构消除运动不对称.

(3)气动机理方面,从实验角度解释了扑翼高升力的气动机理,从数值仿真方法角度分析了准定常模型、非定常模型的计算效率和计算准确度,给出了各个方法的适用情况.可根据实际情况选取适当的数值计算方法辅助扑翼飞行器的设计与优化.

为提高仿鸟类扑翼飞行器的设计效率和飞行性能,进一步扩展该类飞行器的应用场景,有以下问题尚待解决:

(1)仿鸟类扑翼飞行器的总体设计方法尚待完善,目前常规的总体参数不能体现扑翼飞行器翼面运动的特点,需结合扑翼运动特征提出适用于扑翼飞行器总体设计的总体参数体系;总体参数的估算方法主要以鸟类统计规律得出的尺度律公式为主,与实际工程研制的扑翼飞行器差距较大,需结合扑翼飞行器原理样机研制数据总结归纳仿生飞行器尺度律公式.

(2)扑翼驱动机构的主要优化方向侧重于运动学,主要求解机构的扑翼角度范围,以左右扑翼角度相位差为目标函数进行优化,对驱动机构峰值力矩的计算和优化较少;在工程研制过程中,由于机构设计不合理,经常出现驱动机构在特定角度的卡顿现象,影响扑翼飞行性能实现;需建立扑翼驱动机构的动力学模型,以驱动力矩为优化目标进行优化设计.

(3)扑翼气动机理的研究主要侧重于实验现象观察、数值算法研究、翼面构造设计等方面,通常在仿真和计算过程中假设左右机翼完全对称来降低计算量,针对工程研制中出现的左右机翼气动力/力矩不对称问题,需建立实验方法测定不对称情况并研究改善不对称的方案.

综上所述,仿鸟类扑翼飞行器拥有广泛的应用前景,需要进一步在扑翼总体设计方法、驱动机构力矩优化、机翼对称性测试等方面开展研究,提升扑翼飞行器的工程研制效率,为仿生飞行器研制提供参考.

参考文献

[1]　SAI K P P M, BHARADWAJ K, TEJA K R, et al. Design, fabrication and testing of flapping wing micro air vehicle [J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2016, 6: 133－150.

[2]　DELAURIER J D. Development and testing of a full-scale piloted ornithopter [J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1999, 45(2): 72－82.

[3]　DELAURIER J D. An aerodynamic model for flapping-wing flight [J]. The Aeronautical Journal, 1993, 97(964): 125－130.

[4]　DELAURIER J D, HARRIS J M. A study of mechanical flapping-wing flight [J]. The Aeronautical Journal, 1993, 97(968): 277－286.

[5]　ASHLEY S. Palm-size spy planes [J]. Mechanical Engineering, 1998, 120(2): 74－78.

[6]　HUNDLEY R O, GRITTON E C. Future technology-driven revolutions in military operations. results of a workshop [R]. Santa Monica, California. RAND Corporation, 1994.

[7]　PORNSIN-SIRIRAK T, TAI Y, HO C M, et al.

Microbat: a palm-sized electrically powered ornithopter [C]//Proceedings of the NASA/JPL Workshop on Biomorphic Robotics. Pasadena, US: NASA, 2001.

[8] PORNSIN-SIRIRAK T N, TAI Y C, NASSEF H, et al. Titanium-alloy MEMS wing technology for a micro aerial vehicle application [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 89(1/2): 95－103.

[9] KEENNON M, KLINGEBIEL K, WON H. Development of the nano hummingbird: a tailless flapping wing micro air vehicle [C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, Virginia: AIAA, 2012: 588.

[10] 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.

[11] DE CROON G C H E, PERÇIN M, REMES B D W, et al. The delfly: design, aerodynamics, and artificial intelligence of a flapping wing robot [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer. 2016: 178－194.

[12] DE CROON G C H E, GROEN M A, DE WAGTER C, et al. Design, aerodynamics and autonomy of the DelFly[[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(2): 025003.

[13] BRUGGEMAN B. Improving flight performance of DelFly II in hover by improving wing design and driving mechanism [D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2010.

[14] GROEN M, BRUGGEMAN B, REMES B, et al. Improving flight performance of the flapping wing MAV DelFlyII [C]//International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition. Braunschweig, Germany: [s. n.], 2010.

[15] BAEK S S, MA K Y, FEARING R S. Efficient resonant drive of flapping-wing robots [C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York, USA. IEEE, 2009: 2854－2860.

[16] TEDRAKE R, JACKOWSKI Z, CORY R, et al. Learning to fly like a bird [C]//14th International Symposium on Robotics Research. New York: ACM, 2009.

[17] FOLKERTSMA G A, STRAATMAN W, NIJENHUIS N, et al. Robird: a robotic bird of prey [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2017, 24(3): 22－29.

[18] VASEUR C. Robird wind tunnel test setup design [D]. Enschede, Netherlands: University of Twente, 2014.

[19] SEND W, FISCHER M, JEBENS K, et al. Artificial hinged-wing bird with active torsion and partially linear kinematics [C]//Proceeding of 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. [S. l.]: ICAS, 2012.

[20] FESTO. SmartBird: aerodynamic lightweight design with active torsion [EB/OL]. (2011-3-11) [2023-2-1]. https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/46270/Brosch_SmartBird_en_8s_RZ_110311_lo.pdf.

[21] FESTO. BionicSwift: safe aerial acrobatics as a swarm [EB/OL]. (2021-2-1)[2023-2-1]. https://www.festo.com/net/es_group/SupportPortal/Files/701389/fesd-047_Brosch_BionicSwift_en_210201_lo.pdf.

[22] ROSE C J, MAHMOUDIEH P, FEARING R S. Coordinated launching of an ornithopter with a hexapedal robot [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2015: 4029－4035.

[23] CHEN Y F, ZHAO H C, MAO J, et al. Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles [J]. Nature, 2019, 575: 324－329.

[24] CHEN Y F, WANG H Q, HELBLING E F, et al. A biologically inspired, flapping-wing, hybrid aerial-aquatic microrobot [J]. Science Robotics, 2017, 2(11): eaao5619.

[25] YANG W Q, WANG L G, SONG B F. Dove: a biomimetic flapping-wing micro air vehicle [J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2018, 10(1): 70－84.

[26] 昂海松. 仿生扑翼推进飞行器的发展和前景[C]//中国力学大会－2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会. 北京:中国力学学会, 2017: 880－889.
ANG H S. Development and prospect of bionic flapping wing propulsion vehicle [C]//The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics (CCTAM 2017) China. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. (in Chinese)

[27] PAN E Z, XU H, YUAN H, et al. HIT-Hawk and HIT-Phoenix: two kinds of flapping-wing flying ro-

botic birds with wingspans beyond 2 meters [J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2021, 1: 100002.

[28] JIAO Z X, WANG L, ZHAO L F, et al. Hover flight control of X-shaped flapping wing aircraft considering wing-tail interactions [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 116: 106870.

[29] ZHAO L, WANG W, CHEN Y, et al. Analytical modeling of a hoverable X-shape flapping wing aircraft considering wing-tail interaction [C]//32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. [S. l.]: ICAS, 2021.

[30] WANG L, JIANG W Y, JIAO Z X, et al. Limit cycle oscillation suppression controller design and stability analysis of the periodically time-varying flapping flight dynamics in hover [J]. Nonlinear Dynamics, 2022, 107(4): 3385－3405.

[31] WANG L, ZHAO L, JIANG W, et al. Modeling and control of a hoverable flapping wing aircraft considering induced flow [C]//32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. [S. l.]: ICAS, 2021.

[32] XIAO K, CHEN Y X, JIANG W Y, et al. Modeling, simulation and implementation of a bird-inspired morphing wing aircraf [C]//2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). New York: IEEE, 2019: 238－243.

[33] KE X J, ZHANG W P, CAI X F, et al. Wing geometry and kinematic parameters optimization of flapping wing hovering flight for minimum energy [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 64: 192－203.

[34] MENG K, ZHANG W P, CHEN W Y, et al. The design and micromachining of an electromagnetic MEMS flapping-wing micro air vehicle [J]. Microsystem Technologies, 2012, 18(1): 127－136.

[35] CHIN Y W, KOK J M, ZHU Y Q, et al. Efficient flapping wing drone arrests high-speed flight using post-stall soaring [J]. Science Robotics, 2020, 5 (44): eaba2386.

[36] SHYY W, KANG C K, CHIRARATTANANON P, et al. Aerodynamics, sensing and control of insect-scale flapping-wing flight [J]. Proceedings Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2016, 472(2186): 20150712.

[37] PARK J H, YOON K J, PARK H C. Development of bio-mimetic composite wing structures and experimental study on flapping characteristics [C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). New York: IEEE, 2007: 25－30.

[38] TSAI B J, FU Y C. Design and aerodynamic analysis of a flapping-wing micro aerial vehicle [J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(7): 383－392.

[39] HASSANALIAN M, ABDELKEFI A. Methodologies for weight estimation of fixed and flapping wing micro air vehicles [J]. Meccanica, 2017, 52(9): 2047－2068.

[40] TENNEKES H. The simple science of flight, revised and expanded edition: from insects to jumbo jets [M]. London: MIT Press, 2009.

[41] GREENEWALT C H. The flight of birds: the significant dimensions, their departure from the requirements for dimensional similarity, and the effect on flight aerodynamics of that departure[J]. Transactions of the American Philosophical Society, 1975, 65(4): 1－67.

[42] RAYNER J M V. Form and function in avian flight [M]//JOHNSTON RF. Current Ornithology. Boston, USA: Springer, 1988: 1－66.

[43] LIU T S. Comparative scaling of flapping- and fixed-wing flyers [J]. AIAA Journal, 2006, 44(1): 24－33.

[44] KIRKPATRICK S J. Scale effects on the stresses and safety factors in the wing bones of birds and bats [J]. Journal of Experimental Biology, 1994, 190 (1): 195－215.

[45] PENNYCUICK C. Wingbeat frequency of birds in steady cruising flight: new data and improved predictions [J]. Journal of Experimental Biology, 1996, 199(7): 1613－1618.

[46] PENNYCUICK C J. Predicting wingbeat frequency and wavelength of birds [J]. Journal of Experimental Biology, 1990, 150(1): 171－185.

[47] PENNYCUICK C J. Speeds and wingbeat frequencies of migrating birds compared with calculated benchmarks [J]. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(19): 3283－3294.

[48] PENNYCUICK C J. Bird flight performance: a practical calculation manual [M]. Oxford: Oxford University Press, 1989.

[49] SHYY W, AONO H, KANG C K, et al. An intro-

duction to flapping wing aerodynamics [M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 17－24.

[50] HASSANALIAN M, ABDELKEFI A, WEI M J, et al. A novel methodology for wing sizing of bio-inspired flapping wing micro air vehicles: theory and prototype [J]. Acta Mechanica, 2017, 228(3): 1097－1113.

[51] WHITNEY J P, WOOD R J. Conceptual design of flapping-wing micro air vehicles [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(3): 036001.

[52] 王利光. 微型扑翼飞行器系统设计与原理样机研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.

[53] 苏进展, 方宗德, 刘岚. 微扑翼飞行器总体设计及实验[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(4): 656－661.
SU J Z, FANG Z D, LIU L. Integrated design and experimental study of FMAV [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 656－661. (in Chinese)

[54] MADANGOPAL R, KHAN Z A, AGRAWAL S K. Biologically inspired design of small flapping wing air vehicles using four-bar mechanisms and quasi-steady aerodynamics [J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(4): 809－816.

[55] MADANGOPAL R, KHAN Z A, AGRAWAL S K. Energetics-based design of small flapping-wing micro air vehicles [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(4): 433－438.

[56] 李峙岳. 微型扑翼飞行器传动机构设计与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Li Z Y. Design of flapping-wing micro-air vehicle driving mechanism [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[57] 张亚锋, 宋笔锋, 马红萍, 等. 仿生扑翼机构的优化设计[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(4): 23－25.
ZHANG Y F, SONG B F, MA H P, et al. Optimization design of flapping-wing mechanism based on genetic algorithm [J]. Machine Design & Research, 2008, 24(4): 23－25. (in Chinese)

[58] 周凯, 方宗德, 曹雪梅, 等. 单曲柄双摇杆扑翼驱动机构的优化设计[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 184－188.
ZHOU K, FANG Z D, CAO X M, et al. Optimization design for single-crank and double-rocker kind of driving mechanism of FMAV [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 184－188. (in Chinese)

[59] 董二宝, 许旻, 李永新, 等. 单曲柄双摇杆机构同步性能优化[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 22－26.
DONG E B, XU M, LI Y X, et al. Synchronization optimum design of single-crank and double-rockers mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 22－26. (in Chinese)

[60] PAN E Z, CHEN L R, ZHANG B, et al. A kind of large-sized flapping wing robotic bird: design and experiments [C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Cham, Switzerland: Springer, 2017: 538－550.

[61] ZHANG T, ZHOU C Y, ZHANG X W, et al. Design, analysis, optimization and fabrication of a flapping wing MAV [C]//2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC). New York: IEEE, 2011: 2241－2244.

[62] HSU C K, EVANS J, VYTLA S, et al. Development of flapping wing micro air vehicles-design, CFD, experiment and actual flight [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, Virginia: AIAA, 2010: 1018.

[63] PENG Y X, CAO J, LIU L, et al. A piezo-driven flapping wing mechanism for micro air vehicles [J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(4): 967－973.

[64] ANALOOEE A, GHAYOUR M. Flowchart-aided design of a novel spatial flapping wing mechanism [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(22): 4462－4477.

[65] ZHANG R, ZHANG H Y, XU L C, et al. Mechanism and kinematics for flapping wing micro air vehicles maneuvering based on bilateral wings [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2022, 2022: 5759343.

[66] 王鹏程, 王浩, 顾光健. 单曲柄双摇杆无相差扑翼驱动机构的设计与仿真[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(1): 94－96＋126.
WANG P C, WANG H, GU G J. Structure design and simulation of single-crank and double-rocker mechanism with phase-free flapping wing drive [J]. Machine Building & Automation, 2020, 49(1): 94－96＋126. (in Chinese)

[67] 付鹏. 微型扑翼飞行器风洞实验方法与应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2017.
FU P. Research on wind tunnel experimental method and application of flapping-wing micro air vehicle [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)

[68] ELLINGTONC P. The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1984, 305(1122): 41－78.

[69] ELLINGTON C P. The aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 1984, 305 (1122): 1－15.

[70] ELLINGTON C P. The aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological parameters [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1984, 305(1122): 17－40.

[71] ELLINGTON C P. The aerodynamics of hovering insect flight. VI. Lift and power requirements [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1984, 305(1122): 145－181.

[72] ELLINGTON C P. The aerodynamics of hovering insect flight. IV. Aerodynamic mechanisms [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1984, 305(1122): 79－113.

[73] ELLINGTON C P. The aerodynamics of hovering insect flight. V. A vortex theory [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1984, 305(1122): 115－144.

[74] ELLINGTON C P. The novel aerodynamics of insect flight: applications to micro-air vehicles [J]. Journal of Experimental Biology, 1999, 202(23): 3439－3448.

[75] WILLMOTT A P, ELLINGTON C P, THOMAS A L R. Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, manduca sexta [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1997, 352 (1351): 303－316.

[76] VAN DEN BERG C, ELLINGTON C P. The vortex wake of a 'hovering' model hawkmoth [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1997, 352 (1351): 317－328.

[77] VAN DEN BERG C, ELLINGTON C P. The three-dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1997, 352(1351): 329－340.

[78] 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.

[79] DICKINSON M H, GÖTZ K G. Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers [J]. Journal of Experimental Biology, 1993, 174(1): 45－64.

[80] DICKINSON M. The effects of wing rotation on unsteady aerodynamic performance at low Reynolds numbers [J]. Journal of Experimental Biology, 1994, 192(1): 179－206.

[81] BIRCH J M, DICKINSON M H. Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings [J]. Nature, 2001, 412: 729－733.

[82] 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.

[83] BERMAN G J, WANG Z J. Energy-minimizing kinematics in hovering insect flight [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 582: 153.

[84] TRUONG Q T, NGUYEN Q V, TRUONG V T, et al. A modified blade element theory for estimation of forces generated by a beetle-mimicking flapping wing system [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2011, 6(3): 036008.

[85] MALIK M A, AHMAD F. Effect of different design parameters on lift, thrust and drag of an ornithopter [C]//Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol Ⅱ. Hong Kong: International Association of Engineers, 2010: 1460－1465.

[86] KIM D K, LEE J S, LEE J Y, et al. An aeroelastic analysis of a flexible flapping wing using modified strip theory [C]//Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008. Bellingham, USA: SPIE, 2008: 477－484.

[87] SANE S P, DICKINSON M H. The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight [J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(8): 1087－1096.

[88] BANAZADEH A, TAYMOURTASH N. Adaptive attitude and position control of an insect-like flapping wing air vehicle [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 85(1): 47－66.

[89] LIANG S R, SONG B F, XUAN J L. Active disturbance rejection attitude control for a bird-like flapping wing micro air vehicle during automatic landing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 171359－171372.

[90] HE W, YAN Z C, SUN C Y, et al. Adaptive neural network control of a flapping wing micro aerial vehicle with disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(10): 3452－3465.

[91] SMITH M J C, WILKIN P J, WILLIAMS M H. The advantages of an unsteady panel method in modelling the aerodynamic forces on rigid flapping wings [J]. Journal of Experimental Biology, 1996, 199(5): 1073－1083.

[92] VEST M S, KATZ J. Unsteady aerodynamic model of flapping wings [J]. AIAA Journal, 1996, 34(7): 1435－1440.

[93] KATZ J, PLOTKIN A. Low-speed aerodynamics [M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

[94] LONG L N, FRITZ T E. Object-oriented unsteady vortex lattice method for flapping flight [J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(6): 1275－1290.

[95] SMITH M J C. Simulating moth wing aerodynamics-Towards the development of flapping-wing technology [J]. AIAA Journal, 1996, 34(7): 1348－1355.

[96] ZHU Q. Numerical simulation of a flapping foil with chordwise or spanwise flexibility [J]. AIAA Journal, 2007, 45(10): 2448－2457.

[97] STANFORD B, BERAN P. Analytical sensitivity analysis of an unsteady vortex lattice method for flapping wing optimization [C]//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2009: 2614.

[98] ROCCIA B A, PREIDIKMAN S, MASSA J C, et al. Modified unsteady vortex-lattice method to study flapping wings in hover flight [J]. AIAA Journal, 2013, 51(11): 2628－2642.

[99] ROCCIA B A, PREIDIKMAN S, BALACHANDRAN B. Computational dynamics of flapping wings in hover flight: a co-simulation strategy [J]. AIAA Journal, 2017, 55(6): 1806－1822.

[100] VERSTRAETE M L, PREIDIKMAN S, ROCCIA B A, et al. A numerical model to study the nonlinear and unsteady aerodynamics of bioinspired morphing-wing concepts [J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2015, 7(3): 327－345.

[101] 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.

[102] LIU H, KAWACHI K. A numerical study of insect flight [J]. Journal of Computational Physics, 1998, 146(1): 124－156.

[103] SUN M, DU G. Lift and power requirements of hovering insect flight [J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 19(5): 458－469.

[104] SUN M, TANG J. Lift and power requirements of hovering flight in Drosophila virilis [J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(16): 2413－2427.

[105] 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.

[106] SUN M, WU J H. Aerodynamic force generation and power requirements in forward flight in a fruit fly with modeled wing motion [J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(17): 3065－3083.

[107] 孙茂. 昆虫飞行的高升力机理[J]. 力学进展, 2002, 32(3): 425－434.
SUN M. Unsteady lift mechanisms in insect flight [J]. Advances In Mechanics, 2002, 32(3): 425－434. (in Chinese)

[108] 孙茂, 吴江浩. 微型飞行器的仿生流体力学: 昆虫前飞时的气动力和能耗[J]. 航空学报, 2002, 23(5): 385－393.
SUN M, WU J H. Biomimetic aerodynamics of micro-air vehicles: aerodynamic force and power requirements in forward flight of insect [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(5): 385－393. (in Chinese)

[109] 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 M, WU J H. Unsteady lift mechanisms and energetic in flying insects [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(11): 970－977. (in Chinese)

[110] WU J H, SUN M. Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing [J]. Journal of Experimental Biology, 2004, 207(7): 1137－1150.

[111] MALOLAN V, DINESHKUMAR M, BASKAR V. Design and development of flapping wing micro air vehicle [C]//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2004: 40.

[112] BEASLEY B. A study of planar and nonplanar membrane wing planforms for the design of a flapping-wing micro air vehicle [D]. College Park, USA: University of Maryland, College Park, 2006.