

微型仿生扑翼飞行器研究综述

徐韦佳¹, 姚奎¹, 宋阿羚¹, 施雯², 侯煜¹

(1. 中国人民解放军陆军工程大学 基础部, 江苏 南京 211101;

2. 中国人民解放军陆军工程大学 教研保障中心, 江苏 南京 210001)

摘要: 基于仿生学原理的扑翼飞行器因质量轻、体积小、灵活性好、隐蔽性高等优点在军事和民用领域应用广泛, 实现扑翼飞行器的微型化是未来发展方向。首先介绍了微型仿生扑翼飞行器的概念和特点, 分析了研究背景和国内外研究现状及成果, 在此基础上, 就实现微型仿生扑翼飞行器需要解决的关键技术和难题进行了讨论, 最后对我国微型仿生扑翼飞行器的应用前景作出展望。

关键词: 仿生; 扑翼; 飞行器

中图分类号: V279

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.10.002

引用格式: 徐韦佳, 姚奎, 宋阿羚, 等. 微型仿生扑翼飞行器研究综述 [J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(10): 7-10, 17.

Survey of research on small and micro bionic flapping wing aircraft

Xu Weijia¹, Yao Kui¹, Song Aling¹, Shi Wen², Hou Yu¹

(1. Basic College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 211101, China;

2. Teaching and Research Support Center, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210001, China)

Abstract: The flapping wing aircraft based on the bionics principle is widely used in military and civilian fields due to its advantages such as light weight, small size, good flexibility, and high concealment. The miniaturization of the flapping wing aircraft is the future development direction. This article firstly introduces the concept and characteristics of the micro-bionic flapping wing aircraft, analyzes the research background and the current status and results of research at home and abroad. Based on this, the key technologies and problems that need to be solved to implement the micro-bionic flapping wing aircraft are discussed. Finally, The application prospects of China's miniature bionic flapping wing aircraft are prospected.

Key words: bionic; flapping wing; aircraft

0 引言

近年来,随着计算机技术、通信技术、微机电技术、人工智能等学科的发展,体积小、载重轻、速度慢的微型飞行器逐渐得到世界各国的青睐^[1]。1992年,美国兰德公司研究机构首次提出“微型飞行器”(Micro Aerial Vehicle, MAV)的概念,该微型飞行器区别于传统飞行器,外形小巧(翼展不超过150 mm、重量为10~100 g),在续航时间(20~60 min)内能以巡航速度(30~60 km/h)实现足够长的巡航距离(1~10 km),有效载荷为1~18 g,具备便于携带、操作简单、机动灵活、安全性好的优点,适用于军事场合^[2],已成为世界各国重点研究的热门领域。

1 微型仿生扑翼飞行器的特点

微型仿生扑翼飞行器是一种基于仿生学原理、通过模仿鸟类和昆虫飞行而设计制造的新型微型飞行器,具有尺寸小巧、质量轻、成本低廉、操作灵活等优点。空气动力学和仿生学的研究表明,对于尺寸与鸟类或者昆虫相近的微型飞行器,扑翼式飞行比旋翼和固定翼飞行更具优势^[1]。

当前,微型仿生扑翼飞行器的设计方向不断趋向于小巧、手提、随身携带、超低空飞行,灵活完成侦察和搜索任务。微型扑翼飞行器要在各领域中大展身手,还需具备完善的飞行控制系统、导航能力、能随外界环境变化而自行改变飞行高度和调整飞

行姿态、自动躲避障碍物、稳定性优良、信号采集和图像识别能力,这也是其未来发展方向。

2 研究背景

微型飞行器按其产生升力的原理主要分为三种类型:微型固定翼飞行器、微型旋翼飞行器和微型扑翼飞行器。当前,微型固定翼飞行器应用最广,其翼保持固定,类似常规飞机,研制难度较小。旋翼微型飞行器不同于固定翼,其翼可以旋转,特点是可以悬停,且起飞要求低。随着微型固定翼飞行器和微型旋翼飞行器的技术越来越成熟,其自身难以克服的缺点也逐渐暴露出来。固定翼飞行器的尺寸较大、机动性差,对于起飞和降落要求较高,且不能实现悬停飞行。旋翼飞行器虽然能够实现悬停飞行,但是仍然存在尺寸较大、机动性能较差、飞行效率低、耗能高等诸多缺陷^[3]。

研究表明,微型扑翼飞行器作为一种仿生微型飞行器,具有较高的升力系数和灵活的机动性^[2],而且,由于微型扑翼飞行器不使用高速转动螺旋桨,不会产生噪声,因此隐蔽性更强,可以执行军事等特殊任务^[4]。当代机械结构学、材料科学、通信技术、微机电系统、集成电路设计与制造、3D 打印技术等学科和技术的发展交融,为扑翼微型飞行器设计与制造提供了基础。

3 国内外研究现状及成果

3.1 理论研究现状

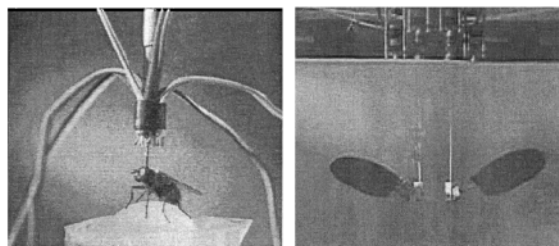
传统空气动力学主要分析定常空气中飞行器升力的产生,并不能解释生物通过扑翼运动产生升力并悬浮在空中的机理,因此,传统的空气动力学并不适用于扑翼飞行器。1973 年,Weis-Fogh 基于昆虫仿生学的相关理论,提出了定常气流中产生高升力的 Clap and Fling 机制(也称作 Weis-Fogh 机制),为后期仿生飞行的理论研究提供了指导作用^[5]。1993 年,Delaurier 对运动的翼建立空气动力学模型并进行演算^[6]。1995 年,Vest 等人研究了鸽子扑翼运动时的非定常空气动力学理论且进行了风洞试验^[7]。1999 年,Weir Shyy 等人研究了低雷诺数下的微型扑翼飞行器设计中的关键问题^[1]。同年,Giesing 对 Smith 定常机翼流动法进行推广^[8]。北京航空航天大学的孙茂用 N-S 方程解释了昆虫高升力产生机理。南京航空航天大学的昂海松用非定常涡格法研究了扑翼气动特性。赵亚博研究了扑翼运动力学和智能材料^[9]。

当前,国内外理论重点研究多是关于扑翼飞行流场分析方法的研究,逐步揭开扑翼飞行的运动机理,但是距离形成完整的非定常空气动力学理论尚有一定距离。

3.2 试验研究现状

关于扑翼飞行的试验研究,早期主要基于仿生学原理,对生物飞行过程进行测量与试验。美国加州大学伯克利分校进行了苍蝇吊飞试验,如图 1(a)所示。研究人员将苍蝇固定在探针上,通过配置光源诱导苍蝇正常扑翼飞行,采用精密光学仪器测量、力学传感器测量、高速摄像等方式,对苍蝇扑翼运动过程进行测量,研究扑翼飞行的性能参数。我国水稻研究所对 50 多种昆虫进行吊飞试验,测量昆虫翅膀、重量、结构等参数,证明昆虫翅膀的大小、厚度、扑翼方式等飞行参数必须符合一定的运动学原理,才能实现有效飞行^[10]。

当前,扑翼飞行试验的研究主要包括流场显示和气动力测量。由于昆虫和鸟类的体积小,扑翼产生的流场尺度小、变化快、不易测量,因此多采用放大的扑翼模型来研究。1996 年,英国剑桥大学的 Ellington 等人研制了一种雷诺数与鹰蛾相同的扇形模型——扇板,用以研究扑翼飞行时翅膀周围产生的漩涡,证明前缘涡不脱落是昆虫扑翼产生高升力的原因之一^[11]。1999 年,美国加州大学的 Dickinson 等人使用油罐中的机械翅进行试验,如图 1(b)所示,证明了昆虫扑翼产生高升力的机制^[1,8]。我国西北工业大学的白存儒等人进行了风洞试验^[1]。



(a) 苍蝇吊飞试验

(b) 油罐机械翅试验

图 1 扑翼飞行器的早期试验研究

扑翼飞行器的试验研究,从仿生学角度进一步分析了昆虫扑翼产生高升力的原理,为后期样机研制起到指导作用。

3.3 样机研究现状

1998 年起,美国加利福尼亚理工学院着手研制一种微蝙蝠飞行器 Microbat,其翼展 15~20 cm,扑翼

频率 20~30 Hz, 重量 12.5 g, 是世界上第一架可以持续飞行的微型扑翼飞行器^[11], 如图 2(a) 所示。1998 年, 英国剑桥大学与美国乔治亚理工学院合作研发了一种计划用于火星探测的微型扑翼飞行器 Entomopter, 采用复式化学肌肉制成, 可产生高频扑翼运动^[1], 如图 2(b) 所示。荷兰代尔夫特大学研制的 Delfly 微型扑翼飞行器, 具有 X 翼结构和 V 型尾翼, 翼展 35 cm, 质量 37 g, 采用 3.17 V 锂电池做动力, 能以 11.8 m/s 的速度飞行 20 min^[12], 如图 3(c) 所示。2011 年, 美国 Aero Vironment 公司耗资 400 多万美元, 研发成功“纳米蜂鸟”, 如图 2(d) 所示, 其翼展 16 cm, 质量 19 g, 能连续飞行 10~20 min, 完成悬停、翻转等动作, 被《时代》杂志评为 50 大创新发明之一^[1]。“纳米蜂鸟”在相当一段时间内, 代表扑翼飞行器样机研制的领先水平。

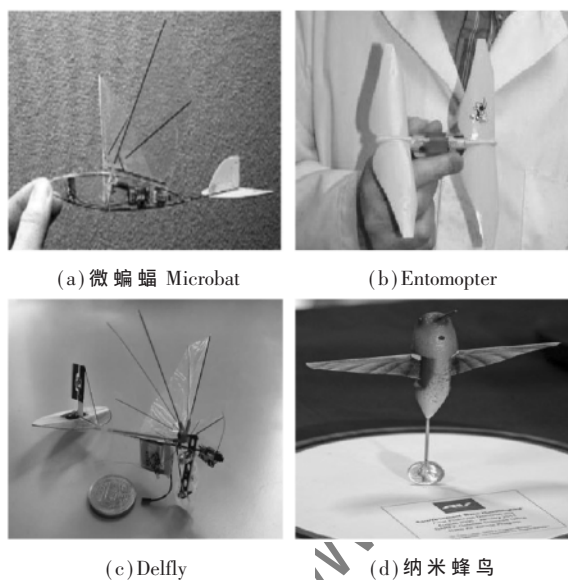


图 2 国际经典微型扑翼飞行器样机成品

2002 年起, 南京航空航天大学的昂海松等人设计了多款仿生机械鸟, 如图 3(a) 所示, 其最新型号性能已达到美国 Microbat 同等水平^[13]。西北工业大学的方宗德等人设计了一款具有自主巡航能力扑翼飞行器 ASN-211, 如图 3(b) 所示, 其翼展 600 mm, 质量约 220 g, 速度 6~10 m/s, 高度 20~200 m, 具备一定的抗风能力, 内部搭载导航系统, 携带微型摄像机, 可用于侦察^[13]。此外, 哈尔滨工业大学、上海交通大学、北京大学、厦门大学等国内高校也都纷纷开展对扑翼飞行器的研究。

综上所述, 我国虽然在扑翼飞行器的研究上取

得了巨大进展, 但是和发达国家相比, 仍有较大差距。此外, 由于扑翼运动并非简单重复的机械挥动, 扑翼动作所产生的气流变化使得翼上每一处的受力情况都截然不同。因此, 扑翼过程是一个极为复杂的运动过程, 要实现仿生飞行器的扑翼运动需要解决诸多关键技术问题。



(a) 仿生机械鸟

(b) ASN-211

图 3 我国自主研发的微型扑翼飞行器样机成品

4 微型仿生扑翼式飞行器的关键技术问题

4.1 飞行机理

自然界的鸟类和昆虫尺寸小巧、翅膀扑动频率快, 可以完成除起飞和落地基本动作以外的悬停、转弯、俯冲、滑翔、躲闪等多种复杂动作。如何提高扑翼飞行器的灵活性、稳定性、高效性和可操作性, 仍是当前国内外研究的重难点^[14]。因此, 开展对鸟类和昆虫的翅膀尺寸、扑动规律、翅膀扭转、飞行姿态等飞行机理的研究, 对优化微型扑翼飞行器的设计具有重要意义。

4.2 低雷诺数下的空气动力学问题

常规飞行器的飞行雷诺数约为 1×10^7 , 而扑翼飞行器的飞行时速一般只有每小时几十千米, 其飞行雷诺数只有 2×10^5 左右。当飞行器在低雷诺数环境中飞行时, 其空气动力学特征会出现变化, 例如气动粘性力和阻力突出、机身附面层趋于层流特征、飞行姿态难以控制等, 这些变化会严重影响扑翼飞行器的正常飞行^[11]。当前, 低雷诺数飞行环境下的空气动力学理论仍处在探索阶段, 尚未形成完整的空气动力学理论。

4.3 超轻型机体和部件微型化

要实现微型飞行器机身的超轻量化, 需要在实现预期功能的基础上, 寻找性能优良的新型超轻材料。其次就是内部零部件的微型化问题。微型扑翼飞行器的内部零部件组成复杂, 包括电机、制动器、稳定陀螺仪、通信设备、导航模块等, 零部件微型化直接对微机电、集成电路设计、微电子制造工艺等行业

技术提出更高的要求^[15]。显然,当前的制造工艺尚未完全达到人们期望的水平,因此,加强对相关科学和技术的研究,是当务之急。

4.4 飞行动力和高效能源问题

微型扑翼飞行器由于体积小、载重量轻,能够携带的能源少,其动力装置需要在满足体积小、质量轻的前提下,还需要给飞行器提供足够的飞行动力,并且维持机载设备工作所需的电能。当前研究较多的微动力装置主要有微型马达、微型内燃发动机、交变磁场驱动器、人造肌肉等,然而考虑到驱动效率,当前绝大多数扑翼飞行器都是微马达驱动的,即电磁电机驱动。微型马达的尺寸也越来越小,例如上海交通大学直径仅为 1 mm 的电磁微马达、德国 IMM 公司直径 2 mm 的电微马达、美国加州大学直径 120 μm 的静电超微马达。鉴于未来扑翼式飞行器的研制目标是实现自主飞行,因此无线式微能源供给将是今后的发展重点。另外,人造肌肉由于具有稳定性好、结构紧凑、动力好等优点,国内外已经开展着手相关研究。

4.5 通信和导航

飞行器在飞行过程中主要采用无线微波通信的方式与地面进行数据交换,但是微波通信由于穿透力不强,因此通信距离受限。当前,研制适合的 GPS 接收机和地面匹配系统是当前主要的研究方向。当飞行器超出无线通信的范围时,就要依靠自主导航来控制飞行路径,主要依靠全球定位系统(GPS)、惯性导航系统(INS)、地理信息系统(GIS)来实现,因此,导航的稳定性、可靠性以及定位精度等需要提高^[15]。

5 应用前景

5.1 军用方面

在复杂战场环境中,微型扑翼飞行器由于体积小、隐蔽性强,在某特定场合,例如超低空雷达盲区内,可以用来进行侦察和监视,提高作战效率;还可以作为微型和侦察机的辅助手段,发现丛林、灌木中的隐蔽目标^[16];充当通信媒介,为作战小分队提供通信支持;携带多种传感器,对战场周边环境、生态及污染等因素进行取样和考察;利用自身体积小、灵活性强的特点,可往返穿梭于微型狭窄地形,进行救援或者在室内对恐怖分子进行攻击等。

5.2 民用方面

通过模仿鹰隼盘旋飞行路线,模仿其叫声可用

于机场周围的驱鸟工作;充当电子警察的作用,对交通实施监控;在边境防线上进行巡逻;在森林保护区对野生动植物进行勘测等。此外还可以用于缉毒巡查、突发事件现场监测、航空摄影、输电线路检查、环境监测、气象监测、森林防火监测、家居服务、表演展览等。

6 结论

扑翼飞行作为人类最熟悉、也最复杂的一种飞行方式,具备质量轻、体积小、机动灵活、隐蔽性强等特点,必定会在未来信息化战场上大展身手。当前,以美国为首的发达国家,正在紧锣密鼓地研制新一代高性能微型扑翼飞行器,并且已经正式投放军用。因此,随着我国军队信息化建设已经进入新阶段,以微型扑翼飞行器为代表的相关技术研究必定会在未来得到长足发展。

参考文献

- [1] 刘岚.微型扑翼飞行器的仿生翼设计技术研究[D].西安:西北工业大学,2007.
- [2] 周骥平,武立新,朱兴龙.仿生扑翼飞行器的研究现状及关键技术[J].机器人技术及应用,2004,6(3):12-17.
- [3] 王磊.仿生扑翼飞行器的设计及气动力分析[D].北京:北京交通大学,2018.
- [4] 孙泽红.扑翼结构的仿生飞行器研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2017.
- [5] 左得参.仿生微型飞行器若干关键问题的研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [6] 修星辰.仿生扑翼飞行器机构设计与仿真[D].绵阳:西南科技大学,2017.
- [7] 宋海龙.微型扑翼飞行器传动系统设计及新型扑翼形式概念研究[D].西安:西北工业大学,2005.
- [8] 武立新.仿生扑翼飞行机器人的机理分析及其实验研究[D].扬州:扬州大学,2005.
- [9] 郝银凤.基于仿生学的变体机翼探索研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [10] 王朋远.微型扑翼飞行器扑翼运动规律与控制技术研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [11] PORNSIN-SIRIRAK T N, TAI Y C, HO C M, et al. Microbat: a palm-sized electrically powered ornithopter[C].2001 NASA/JPL Workshop on Biomimetic Robotics, 2001.
- [12] DE CROON G, DE CLERCQ K M E, RUIJSINK R,

(下转第 17 页)

- [10] LECUN Y, KAVUKCUOGLU K, CLEMENT F. Convolutional networks and applications in vision[C]. International Symposium on Circuits & Systems. IEEE, 2010.
- [11] CIRESAN D, MEIER U, MASCI J, et al. A committee of neural networks for traffic sign classification[C]. International Joint Conference on Neural Networks. IEEE, 2011.
- [12] KE Y, HAGIWARA M. Alleviating overfitting for polysemous words for word representation estimation using lexicons[C]. International Joint Conference on Neural Networks. IEEE, 2017.
- [13] GRAVES A, MOHAMED A R, HINTON G. Speech recognition with deep recurrent neural networks[C]. IEEE International Conference on Acoustics. IEEE, 2013.
- [14] BRUNA J, ZAREMBA W, SZLAM A, et al. Spectral networks and deep locally connected networks on graphs[J]. Computer ENCE, 2013.
- [15] BOSCAINI D, MASCI J, EMANUELE R, et al. Learning shape correspondence with anisotropic convolutional neural networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2016: 3189–3197.
- [16] DEFFERRARD M, BRESSION X, VANDERGHEYNST P. Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2016: 3844–3852.
- [17] KIPFT N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[C]. International Conference on Learning Representations, 2017.
- [18] ANURAG R, TIMO B, Michael J B. Convolutional mesh autoencoders for 3d face representation[C]. ECCV, 2018.
- [19] CHUNG F R K. Spectral graph theory[J]. American Mathematical Society, 1997.
- [20] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface simplification using quadric error metrics[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1997: 209–216.
- [21] RABINOVICH M, PORANNE R, PANOZZO D, et al. Scalable locally injective mappings[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(2): 1–16.
- [22] LIGANG L, CHUNYANG Y, RUIQI N, et al. Progressive parameterizations[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): 1–12.

(收稿日期: 2020-07-24)

作者简介:

高晨(1996-), 通信作者, 女, 硕士, 主要研究方向: 计算机图形学、深度学习。E-mail: gaochen@mail.ustc.edu.cn。

(上接第 10 页)

- et al. Design, aerodynamics, and vision-based control of the delfly[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2009, 1(2): 71–97.
- [13] 曾锐, 昂海松. 仿鸟复合振动的扑翼气动分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(1): 6–12.
- [14] 蔡常睿. 基于信鸽翅膀的仿生机翼气动性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [15] 郑焕魁. 微型飞行器新式局部翼面运动翼型气动特性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.

- [16] 吴海宇. 仿生微型飞行器的设计与测试实验的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.

(收稿日期: 2020-03-30)

作者简介:

徐韦佳(1989-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 电子与通信工程。

姚奎(1972-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向: 数学教育与管理。

宋阿羚(1979-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 通信工程。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所