



国家科学技术学术著作出版基金资助

上海交通大学学术出版基金资助

微型扑翼式仿生飞行器

陈文元 张卫平 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

上海交通大学学术出版资金资助

微型扑翼式仿生飞行器

陈文元 张卫平 著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

微型飞行器(Micro Aerial Vehicle, MAV)具有携带方便、操作简单、制造成本低、隐蔽性好、机动灵活等特点,因此无论在军事领域还是在民用领域,都有十分诱人的应用前景。本书从仿生的角度来研究 MAV 的飞行机理与样机制作;通过文献中对自然界中昆虫翅膀运动的观察与测量,获取了昆虫翅膀的运动方程;采用 UG 建模技术,建立昆虫的几何模型;采用网格划分方法,获取昆虫在流场运动时的三维网格;运用 CFD(计算流体力学)方法模拟翅膀运动时周围的流场,获取昆虫运动时的升阻力特性,进而来研究昆虫的飞行机理;在此基础上,通过现有可用的材料加工制作仿生 MAV。

本书可作为从事 MAV 研究及其应用的科技人员和高等学校有关专业教师的参考书,也可作为相关专业研究生、本科高年级学生和工程技术人员的科研参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

微型扑翼式仿生飞行器/ 陈文元,张卫平著. —上海:上海交通大学出版社,2010

ISBN 978-7-313-06319-9

I. 微... II. ①陈... ②张... III. 微型—扑翼机 IV. V276

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 039824 号

微型扑翼式仿生飞行器

陈文元 张卫平 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

昆山市亭林印刷有限责任公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:14 字数:258 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-06319-9/V 定价:98.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

微型飞行器(Micro Aerial Vehicle, MAV)具有携带方便、操作简单、制造成本低、隐蔽性好、机动灵活等特点,因此无论在军事领域还是在民用领域,都有十分诱人的应用前景。

由于微型化的飞行器在众多领域中具有不可估量的应用潜力,因此世界许多发达国家已经开始将微型飞行器技术列为研究的重点。对于微型化的飞行器,由于其特征尺度远小于传统的飞行器,因此许多传统的飞行器设计理论和方法将不再适用,飞行器的微型化将面临诸多的来自空气动力学方面和制造技术方面的挑战。

在这一背景下,本书从仿生的角度来研究 MAV 的飞行机理与样机制作;通过文献记载的自然界中昆虫翅膀运动的观察与测量,获取昆虫翅膀的运动方程;采用 UG 建模技术,建立昆虫的几何模型;采用网格划分方法,获取昆虫在流场运动时的三维网格;运用 CFD 方法模拟翅膀运动时周围的流场,获取昆虫运动时的升阻力特性,进而来研究昆虫的飞行机理。书中的大部分内容是作者及其团队科研成果的总结,在学术上具有前瞻性。对于推动 MAV 研究具有一定的意义。

先后参加本书相关内容研究和写作的有陈文元教授、张卫平教授、左德参博士、彭松林博士、曹雯硕士等。值此本书问世之际,谨向参与和支持本书研究的所有工作人员及各级领导表示衷心的感谢。

扑翼微飞行器的研究仍处于发展阶段,书中的一些研究成果和结论还在发展之中,书中有不完善和错误之处敬请各位专家和读者予以批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 微飞行器研究启动计划	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 微飞行器的飞行方式	8
1.3.1 固定翼飞行方式	8
1.3.2 旋翼飞行方式	10
1.3.3 扑翼飞行方式	11
1.3.4 三种飞行方式的特点	14
1.3.5 微飞行器飞行方式的选择	15
1.4 MAV 研究的关键问题	17
1.4.1 微飞行器在低雷诺数下的空气动力学问题	17
1.4.2 微型动力装置技术	18
1.4.3 机载元器件的 MEMS 化技术	18
1.4.4 光电传感技术	19
1.4.5 微飞行器的飞行控制和数据传输	19
1.4.6 MDO 方法的进一步研究	20
1.5 微飞行器应用前景	20
1.6 微飞行器的现实意义	21
1.7 本章小结	21
第 2 章 低雷诺数下昆虫的飞行机理	23
2.1 昆虫飞行机理研究	23
2.2 坐标系定义及翅膀的运动方程	29
2.2.1 惯性坐标系 $Ox_gy_gz_g$	29
2.2.2 昆虫体坐标系 $Oxyz$	30

2 微型扑翼式仿生飞行器

2.2.3 翅膀平面坐标系 $Ox'y'z'$	30
2.3 昆虫悬飞时的边界条件	33
2.4 计算网格的生成	34
2.5 求解方法	36
2.6 计算结果的分析与讨论	37
2.6.1 昆虫悬飞时周围的流场	37
2.6.2 昆虫悬飞时的非稳态涡和轴向流	41
2.6.3 昆虫悬飞时产生的升阻力	44
本章小结	45

第3章 仿生飞行的数学建模与仿真

47

3.1 MAV 的建模方法	47
3.1.1 物理结构建模法	47
3.1.2 神经网络建模法	49
3.1.3 系统辨识建模法	50
3.2 昆虫飞行的运动学建模	51
3.2.1 昆虫飞行时的坐标系表示	52
3.2.2 翅膀相对于昆虫体的运动方程	53
3.2.3 扑翼昆虫的姿态运动方程	54
3.3 昆虫的空气动力学模型	54
3.3.1 昆虫翅膀的空气动力及力矩	55
3.3.2 昆虫体的空气动力及力矩	57
3.3.3 昆虫飞行时质心的动力学方程	58
3.3.4 昆虫运动姿态动力学方程	59
3.4 仿生飞行的模型仿真	59
3.4.1 仿真模型的结构设计	60
3.4.2 仿真模型的控制设计	61
3.4.3 仿真结果分析	69
3.5 本章小结	69

第 4 章 仿生微飞行器的设计	71
4.1 仿生微飞行器的驱动形式	71
4.1.1 压电驱动的扑动机构	71
4.1.2 电磁驱动的扑动机构	72
4.1.3 形状记忆合金(SMA)驱动的扑动机构	73
4.1.4 人造肌肉驱动的扑动机构	73
4.1.5 微马达驱动的扑动机构	73
4.2 扑翼微飞行器扑翼机构原理及设计	74
4.2.1 现有扑翼微飞行器中的扑翼机构	74
4.2.2 曲柄摇杆机构原理	77
4.2.3 平面四杆机构的位置分析	79
4.2.4 扑翼机构原理	80
4.2.5 减速齿轮设计	81
4.2.6 扑翼机构的三维建模	82
4.3 扑翼机构的仿真与优化	83
4.3.1 扑翼机构的 UG 建模	84
4.3.2 仿真模型的建立	84
4.3.3 仿真结果及分析	89
4.4 本章小结	113
第 5 章 扑翼微飞行器的翅膀研究	115
5.1 研究思路及方法	115
5.2 平面刚性翅脉的仿真研究	116
5.2.1 翅脉形貌变化对扑翼机构性能的影响	118
5.2.2 翅脉材料属性变化对扑翼机构性能的影响	129
5.2.3 翅脉初始安装角变化对扑翼机构性能的影响	130
5.2.4 仿真结果的分析和讨论	132
5.3 平面翅脉的实验验证	139
5.4 本章小结	144

第 6 章 仿生微飞行器的航迹规划	145
6.1 仿生 MAV 的分层控制机理	145
6.2 仿生 MAV 任务规划与控制	147
6.3 路径规划常用算法	149
6.3.1 全局路径规划	149
6.3.2 局部路径规划	152
6.4 未知环境中 MAV 的航迹规划	154
6.4.1 航迹规划问题描述	155
6.4.2 静态未知环境中的航迹规划及仿真	155
6.4.3 动态未知环境中的航迹规划及仿真	158
6.5 本章小结	162
第 7 章 扑翼 MAV 的风洞实验	163
7.1 原理样机	163
7.2 风洞实验	166
7.2.1 现有典型风洞测试方法	166
7.2.2 风洞实验 PIV 系统	167
7.2.3 风洞实验设备及装置	170
7.3 风洞扑动频率测试实验结果与分析	173
7.4 PIV 风洞实验结果与分析	174
7.4.1 延迟拍摄方式	175
7.4.2 外部触发拍摄方式	182
7.5 不同特征参数对升阻力的影响	193
7.5.1 扑翼攻角对升阻力系数的影响	193
7.5.2 扑翼的振幅对升阻力系数的影响	194
7.5.3 频率对升阻力系数的影响	195
7.5.4 飞行速度对升阻力系数的影响	195
7.5.5 扑翼不同起始位置对升阻力系数的影响	196
7.6 本章小结	197

第 8 章 总结与展望	198
8.1 研究内容	198
8.1.1 理论建模	198
8.1.2 物理模型	199
8.1.3 仿生 MAV 试验	199
8.2 创新点	200
8.3 建议与展望	201
参考文献	202

第1章 绪 论

现在和未来的飞行机器人设计方向是期望机器人是小巧的、手提的、可随身携带的,像昆虫一样超低空飞行,能灵活地完成侦察和搜索任务。多年来以军事用途为背景的无人飞机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)研究一直十分活跃,这些无人飞机通过地面基站遥控导航,或者通过自身的智能控制算法,实现其自身的任务规划与航迹生成,完成预定的飞行任务。随着空气动力学和 MEMS(Micro Electro Mechanical systems)制造等技术的飞速发展,飞行器的设计又开始出现一种向小型化、微型化发展的新趋势,微型飞行器(Micro Aerial Vehicle, MAV)的出现正是这种趋势发展的产物。MAV 一般是指翼展长度在 15cm 左右(约 6in),重量在几十克至上百克,有效载荷 20g,航速 64~80km/h,留空时间 20~60min,航程数 10km;它应有实时成像、导航及通信能力,可用手、弹药或飞机部署。由于微型化的飞行器在众多领域中具有不可估量的应用潜力,因此世界许多发达国家已经开始将 MAV 技术列为研究的重点。对于微型化的飞行器,由于其特征尺度远小于传统的飞行器,因此许多传统的飞行器设计理论和方法将不再适用,飞行器的微型化将面临诸多的来自空气动力学方面和制造技术方面的挑战。MAV 一次性使用的价格应不超过 1000 美元。

1.1 微飞行器研究启动计划

1992 年,在美国兰德公司,由国防先进研究计划署(Defense Advanced Research Program Agency, DARPA)举办了一个关于未来军事技术的研讨会,高级科学家奥根斯坦主持了有关 MAV 的讨论。兰德公司最早提出了研制 MAV 的主张。1995 年 11 月, DARPA 主持了关于 MAV 可行性的研讨会,代表们得出的结论是肯定的。1996 年正式成立了用户与研制人员组成的联合小组。美国国防科学委员会在 1996 年“21 世纪作战技术和战术”的研究报告中强调,“为了对付现代战役战斗,特别是在地区突发事件中,加强一级地面作战小分队对周围作战环境的感知力,显得尤为重要”。

经过这一系列研讨会,专家们认为 MAV 系统应具有以下特点:

- (1) 应是适合于军事用途的飞行系统。
- (2) 能携带全天候的近距离成像系统,分辨率应足以使操作人员分辨出发送

区内的重要细节。

- (3) 应具有准确确定地理位置的能力。
- (4) 重量轻、坚固耐用,以便能够放在士兵的背包里携带。
- (5) 价格低廉,甚至可一次性使用。
- (6) 隐蔽性好,不易被敌人发现,不暴露使用人员的位置。

在前期阶段进行的几轮富有成效的研讨会使 DARPA 意识到开展 MAV 技术研究的重要性以及研制生产 MAV 的现实可行性。紧接着,DARPA 于 1997 年制定了一项为期 4 年、投入 3 500 万美元的 MAV 研制计划,该计划主要是对 MAV 及其子系统的研究和开发,包括推进系统、飞行控制和导航系统、遥感系统及传感器等。同时,DARPA 还开展与 MAV 相关技术的研究,如高性能数字计算机系统、微机电系统(MEMS)、高级航空电子系统等。

为此,DARPA 战术技术办公室与一些单位和企业签订了 9 项第一阶段的“小企业创新研究”(SBIR)合同,加大对 MAV 技术的研究力度。1997 财政年度,DARPA 向工业界和学术界进行项目招标,开始实施一项耗资 3 500 万美元、为期 4 年的 MAV 研究计划。参与竞标单位包括美国国内众多大学的研究实验室,航空航天业界的公司以及其他一些小型企业。1998 财政年度,其中的 4 个项目进入了第二阶段,它们是:

- (1) Aero Vironment 公司的合同,继续研制电动的固定翼侦察 MAV。
- (2) Aerodyne 公司的合同,继续研制一种名为 Hiperav 的悬停式飞行圆盘。
- (3) M-Dot 公司的合同,继续研制 1.4Ib($1\text{Ib}=0.454\text{kg}$)推力的燃气轮机。
- (4) IGR 企业公司的合同,将研制 MAV 用的固体氧化物燃料电池。

除第二阶段的“小企业创新研究”合同外,1998 财政年度,DARPA 还选择了另外几家合同单位进行 MAV 技术的研究。这些项目有:

(1) 桑德斯公司、洛克希德·马丁公司及通用电气公司将研制名叫“微星”(MicroSTAR)的固定翼 MAV。

(2) Lutronix 公司研制城市侦察用的 10cm 大的旋翼式 MAV。

(3) SRI 国际公司与多伦多大学共同研制一种约 15cm 的扑翼式 MAV,它由电致伸缩的聚合物人造肌肉驱动。

(4) 范德比尔特大学研制仿昆虫的 MAV,多个压电驱动器使很细的金属结构振动,驱动机翼。

(5) 加利福尼亚技术研究所等几家共同研制一种 10g 重的扑翼式的“微型蝙蝠”。

(6) 麻省理工学院将研制纽扣大小的涡轮喷气式发动机/发电机组。

(7) D-STAR 工程公司将制造一台煤油内燃发动机,也可能是一台陶瓷柴油

发动机。

(8) 布赖克斯堡技术公司将研制利用小型发动机没有充分燃烧所产生的废热的温差电池。

此外,DARPA 还有一项微型自适应流量控制(MAFC)计划,目的是研制新的小型发动机系统。除 DARPA 外,美国海军也有自己的 MAV 研究计划。

1.2 国内外研究现状

MAV 概念一经美国提出,便立即引起世界上许多国家的广泛关注,开始 MAV 及其相关技术的研究。目前开展 MAV 研制的国家主要是美国,此外还有德国、英国、日本、中国等。

桑德斯(Sanders)公司研制的名为“Micro Star”的固定翼 MAV,其基本结构为:微电子设备放在机翼内,结构在中间的电动马达驱动螺旋桨。桑德斯公司采用的策略是在可能的情况下尽量选用商业化的设备,而把注意力集中在集成上,如数字数据链来源于无线局域网,图像传感器是建立在数字相机的基础上,陀螺来自汽车工业。该 MAV 机翼展为 15cm,总重 100g,最大负载 15g,总耗电量 15W。机身重 7g,处理/存储系统重 6g,摄像系统重 4g,电机和螺旋桨共重 20g,其最大的部件是锂电池,重达 44.5g。它可在空中飞行 20~60min,飞行速度为 48km/h,飞行高度 15~91m,航程 5km。9in(1in=2.54cm)的“Micro Star”于 2000 年 9 月 18 日在 Quantico 演示飞行,它由掌上起飞,飞行高度为 100ft(1ft=0.3048m),飞行距离为 1mi(1mi=1.609km),按设定的轨迹在空中盘旋。该 MAV 具有基于 GPS 的自主导航和控制能力,机上装有彩色或黑白微型摄像机,它能传输实时图像到地面控制站。固定翼 MAV 的特点是飞行速度快,负载能力大,设计结构相对简单。由于有最小速度限制,因而机动灵活性差,起飞和降落比较困难。

Aero Vironment 公司研制的名为“Black Widow”的固定翼 MAV,6in 的圆盘状,航程 16km,巡航速度 12m/s,俯冲速度 20m/s,依靠专门发射设备起飞,这样可大大节省 MAV 起飞所消耗的能量。它由锂电池驱动电机带动前端的螺旋桨工作,推进系统重 110mg,效率为 82%。该 MAV 的飞控系统包括计算机、无线电接收器和 3 个基于微马达的执行机构共重 2g。具有横滚、俯仰稳定性,空速、高度和航向保持能力,机上装有一台照相机和一个 5g 重的 GPS 装置。

“Black Widow”的固定翼 MAV 的发展经历了以下阶段:1996 年春“Black Widow”完成了原型样机的制作,翼展 15cm,飞行了 9 秒钟;在 1997 年 11 月的试飞过程中,未携带有效载荷、采用锂电池供电的“Black Widow”飞行时间达到 16min;为了进一步提高原型机的性能,Aero Vironment 采用综合设计优化方法

(MDO)对原型机进行设计改进,在1999年3月携带黑白摄像机的“Black Widow”成功地飞行了22min,飞行重量为56g,巡航速度为约40.2km/h;1999年夏季,Aero Vironment完成了“Black Widow”的最终设计;2000年8月“Black Widow”试飞的留空时间可以达到30min,最大活动半径1.8km,最大飞行高度约234m(769ft),飞行重量为80g,达到了比较理想的性能指标。“Black Widow”的机载接收机重量为2g,它的方向舵和升降舵均由0.5g重的驱动器控制,摄像采用CMOS彩色摄像头(重量1.7g、分辨率 512×488 、功率150mW),图像传送装置重1.4g。整机重量中,推进系统占62%,结构占17%,控制系统占9%,有效载荷占12%。由于“Black Widow”采用电机驱动方式,加上尺寸小,距离50m以外便听不到它发出的声音,因此它具有极好的隐蔽性。整套系统可以放置在一个公文包大小的手提箱内,其中包括MAV、拆卸式发射架、地面控制与监视用液晶显示器,总重约7kg。

林肯实验室开发的固定翼MAV,采用鸭式布局,分为昼间侦察和昼夜侦察两种型号。续航时间均为1h,飞行高度为100m,侦察范围为1000m。昼间型的最大特点是尺寸和重量都非常小,其翼展只有7.4cm,起飞重量仅10.5g。其中摄像机和所用电池重1.4g,通信系统重0.11g,动力电机和电池重7g,飞机自身的结构仅重2g。其摄像机可从100m外分辨出7cm大小的物体,每2秒钟拍摄一张相片。而昼夜侦察型,其翼展20.5cm,起飞重量91.5g。其中红外相机和所用电池重17.9g,通信系统0.1g,动力系统61g,飞行结构重12.5g。其摄像机可从100m外分辨出13cm大小的物体,每秒钟拍摄相片2张。

美国海军研究实验室开发的名为“MITE”的固定翼MAV,其翼展为15cm,长15cm,重65g。机翼内装有锂电池或燃料电池,动力装置为无刷直流电动机,通过减速器,驱动一对反向旋转的螺旋桨,桨叶直径为12cm。飞行速度每秒10m。组合式的垂直、水平稳定器携带由微型伺服驱动器驱动的升降舵辅助翼。

美国MLB公司研制的名为“Trochoid”的固定翼MAV,其大小为8in,由内燃机驱动,在有风(10~15mi/h)天气可飞行18.5min,飞行速度10~60mi/h,有效控制范围30ft。机上有电子载荷71g,包括无线电控制系统和压电陀螺仪稳定系统。另有携带彩色摄像机和视频发射器的“Trochoid”可飞行6min。此外,MLB公司还研制了两种6in的MAV,一种称为“Heli Rocket”,它可水平和盘旋自由飞行,第二代的“Heli Rocket”的飞行能力和稳定性都有了提高,飞行高度可达2000ft。另一种6in的MAV称为“FlySwatter”,它由气体驱动,用无线电信号控制飞行。

Lutronix与Auburn大学合作研制的名为“Kolibri”的旋翼MAV,它是在一个垂直圆柱顶端装上旋翼、摄像机装在底部。它可垂直起降和悬停,留空时间至少30min。设计方设计了共轴双旋翼和单旋翼两种直升机型的MAV,均没有尾桨,

利用叶片进行俯仰、横滚和偏航控制,叶片通过具有 50Hz 的压电传感器带动。动力装置是一台电动机或 D-STAR 研制的 0.1 马力的微型柴油发动机。该 MAV 的直径为 10cm,总重 316g,微型柴油发动机重 37g,燃料重 132g,发动机与燃料的重量占了总重的一半以上,可携带约 100g 重的有效载荷。“Kolibri”带有一个由 Draper Labs 研制的综合有 GPS/加速度传感器/陀螺的设备包。旋翼 MAV 与固定翼 MAV 相比的最大优点是能够垂直起降和悬停,因而比较适合于在室内等狭小空间飞行,还可在较复杂的地形上飞行,但飞行速度相对较慢。

加州理工学院和 Aero Vironment 公司及加州洛杉矶大学共同研制的名为“MicroBat”的扑翼 MAV,机翼结构形状是通过模仿蝙蝠或昆虫的翅膀,并利用 MEMS 技术加工制作而成。其翼展为 15.24cm、重 10g,扑翼频率为 20Hz。该机可携带一台微型摄像机、上下行链路或音响传感器。在试飞中,无控制地飞行了 18min,46m 远,后因镍镉电池用完而坠地。为了获得高功率,它采用镍镉电池而不是锂电池。扑翼飞行方式的独特优点是利用尾迹气流获取部分升力,因而大大节省了能量,提高了升力获取的效率。它在微小尺寸下能产生远大于固定翼和旋翼飞行方式所能产生的升力,但扑翼飞行机理和具体实现都较困难。

Mentor 是 SRI 国际公司和多伦多大学合作研究的扑翼 MAV。扑翼采用一种电致伸缩的聚合物——人工肌肉(EPAM)驱动,最大翼展在 15cm 左右,翼展为 30cm。试验模型已于 2000 年制造完成。尺寸更小的试验模型以及更完善的飞行控制系统也正在研发中。当模型扑翼飞行器的前期设计、试飞达到要求后,将采用 SRI 国际公司研发的 EPAM 驱动装置进行试飞。由于扑翼飞行模式的飞行机理目前尚未搞清楚,加之该扑翼机构的控制复杂,目前的研究尚处于初级研究阶段。

美国佐治亚技术研究所(GTRI)和英国剑桥大学及 ETS 实验室共同研制的名为“Entomopter”的扑翼 MAV,其翼展为 10in,由往复式化学肌肉(RCM)驱动,燃料注入后,产生化学反应将化学能转化为动能,使翅膀以 10Hz 的频率上下拍动。这种方法的主要优点是结构紧凑,却能产生高的能量释放。

加利福尼亚大学伯克利分校于 1998 年开始研制了一种名为“机器苍蝇”的扑翼 MAV,重约 43mg,直径 5~10mm,具有 4 只翅膀和一个玻璃眼睛。它的身体用像纸一样薄的不锈钢制成,翅膀用聚酯树脂制成。它由太阳能电池驱动,一个微型压电石英驱动器以每秒 180 次的频率扑动它的 4 只小翅膀。

美国佛罗里达大学的一个研究小组于 1999 年 10 月,试制出一种鸟一样大小,成本低廉、能大规模生产的 MAV。翼展 15cm 左右,使用乳胶和碳纤维制成柔软的机翼,依靠风力或其他力量起飞,若携带一个摄像机及其他仪器,能在空中滞留 20min 以上。每架飞行器造价为 300 美元。

美国斯坦福大学教授 Ilan Kroo 和 Fritz Prinz 教授的研究小组在 NASA 的支

持下研制了外形似正方形邮票的直升机,每个角分别装有一个微型马达,并配有直径 3mm、高 5mm 的螺旋桨。马达与螺旋桨各重 0.3g,并能以 5 万 r/min 的速度运转。此外,它还装有锂电池作供电之用。

美国康奈尔大学科学家研制的“直升机”由 3 个部分构成,包括一个镍金属管,里面装一些生物分子,顶部则有一个形似直升机螺旋桨的推进器。金属管内的生物分子相当于直升机的引擎部分,能够将人体内的 ATP 化学物质转化为能源,以推动螺旋桨,这 3 个部分能够在人体内自动结合为一部“直升机”。直升机利用身体的自然能源,可以在人的细胞内“飞翔”和着陆。在实验中发现,该螺旋桨每秒钟可以转 8 周,可以进行两个半小时的活动。

此外,Vanderbilt 大学的 CIM 正在发展一种利用压电原理驱动机翼的微型扑翼机器昆虫。这种人工昆虫目前的翼展为 15cm,重量为 5g,机翼驱动系统由陶瓷压电材料制成并由重量约为 15g 的锂电池供电。

目前,瓦伊伦门特航空公司在 MAV 研制工作中也取得了实质性进展,现在已经制造一种 15cm 直径的圆盘飞行器,可以飞行 16min。公司研究人员认为圆盘是最佳的布局,机翼面积最大,升阻比相对较高,采用的是 2 个高能量的锂电池。公司还用镍镉电池作电源飞行器飞行了 2.5min。飞行器的巡航速度约 70km/h,升阻比 3~4,升力系数约 0.16,机翼面积 0.018m²,不包括摄像机等设备的飞行器重量为 42g。飞行器的主要结构是泡沫聚苯乙烯,局部用轻木料加强。飞行器采用了通道飞行操纵系统,用来操纵油门、升降副翼或方向舵及升降舵,并装有滚转陀螺增加滚转稳定性。飞行器隐身性很好,空中飞行时几乎看不到也听不见,电机的噪声比一只鸟还低。

瓦伊伦门特航空公司的下一步研究计划希望借助于空速和磁罗盘的领航方式可以自动飞行到中途航站,届时要求机载设备,如磁罗盘、空速指示器和稳定陀螺等的尺寸和重量将进一步减少,例如磁罗盘重量约 2g,微型风速计的重量 0.5g,2 个陀螺仅重 1.8g,所有的导航组件重量将不到 4.5g,而且电耗极小。同时,公司将用计算流体力学、风洞试验和滑翔试验深入开展在低雷诺数空气动力学机理的研究,以便于找到更有效的气动外形。

随着 MAV 研究的不断升温,除了上述主要由 DARPA、NASA 以及军方等资助进行 MAV 技术研究的这些公司及科研院校外,美国的其他一些大学和研究机构也在积极开展各种各样微型飞行系统的技术研究。为了促进 MAV 研究的进展和相互交流,1997 年在美国佛罗里达大学(University of Florida)和亚利桑那州立大学(Arizona State University)联合主办了第一届 MAV 大赛。此项赛事已经连续举办了若干届,吸引了美国国内外的许多大学以及美国的一些公司参加,促进了 MAV 技术的研究。

美国在 MAV 的研制上投入大量的人力和财力,并且也取得了相当大的进展。世界上除美国外,其他的国家对 MAV 的研究也表现出浓厚的兴趣,并且取得了一定的进展。

早在美国提出 MAV 的概念之前,英国剑桥大学(Cambridge University)的 Charles P. Ellington 研究小组已经对昆虫飞行的空气动力学及昆虫的飞行机理进行了多年的研究,并且取得了若干研究成果。1997 年 Ellington 曾建议并寻求英国 DERA 资助,但未获得成功。与此相反,美国 DARPA 却对 Ellington 的研究表现出了兴趣,他们邀请剑桥大学动物学系的 Ellington 等 9 人研究小组加盟到以 Robert Michelson 任首席研究工程师的 GTRI 研究组中,并给予 Ellington 100 多万英镑的资助。

德国 IMM 公司的微型直升机是在 1997 年研制出来,曾经是世界上最小的能飞行的直升机,其总长为 24mm,高 8mm,重 0.4g;机身为铝制材料,旋翼由图漆纸制成,直径为 13mm,由直径 2mm,长 5mm 的微电机驱动,电机起飞转速为 40 000r/min,最高能达到 100 000r/min,在有限制的情况下,该直升机的离地飞行高度为 134.6mm。

日本东京大学利用 MEMS 技术研制的一种飞行装置,其翼展为 4mm,重 1.6mg。该装置的机翼、圆盘及玻璃棒作为一整体在交变磁场中靠磁力矩驱动而旋转,当旋转的频率增大到 438Hz 时,整个装置便飞起来。

上海交通大学微纳米科学技术研究院的微型直升机研究项目是在总装备部的建议和支持下完成的。该微型直升机的旋翼直径为 14mm,旋翼和机身均由陶瓷材料制成,驱动装置为上海交通大学研制和改进的 2mm 电磁微电机,直升机总长 18.8mm,宽 2.5mm,高 4.6mm,重 106.7mg,其体积和重量均小于德国 IMM 公司的微型直升机,飞行时间为 10s 左右,高度为 50mm。

中国摩擦学国家重点实验室研制的微小型固定翼飞机,飞机翼展为 250mm,长 250mm,空机重量 150g,留空时间约为 3min,采用 0.8cc 两冲程活塞发动机。这是目前国内率先研制成功的几何尺寸最小、采用内燃机作为动力、可操纵的微型圆盘形飞机。

此外国内其他大学也在进行 MAV 的相关研究,如西北工业大学正在研制的扑翼 MAV,采用聚合物锂电池做电源,微型电动机做驱动源,碳纤维做骨架,采用柔性机翼,样机重约 15g,制作的扑翼 MAV 可以在 15~20Hz 左右的频率下拍动;南京航空航天大学对固定扑翼 MAV 进行了研究,设计制作了不同款式的几种 MAV,飞行时间可达 5min;清华大学的固定翼飞行器分别为 38cm 和 36cm,飞行时间可达 20min;东南大学也对扑翼 MAV 进行了相关研究。

1.3 微飞行器的飞行方式

MAV 通过机翼与周围空气的相互作用产生克服其自身重量的升力,从而实现空中飞行之目的。目前 MAV 根据其翼型运动方式的不同可以分为 3 类,分别为固定翼、旋翼和扑翼。其中固定翼和旋翼是两种常规飞行普遍采用的方式,两者都是通过机翼产生升力;扑翼 MAV 并不常见,但自然界中的鸟类和昆虫广泛采用这种飞行方式,被认为是生物进化的最优飞行方式,它的升力产生机理与固定翼和旋翼有很大的不同。

1.3.1 固定翼飞行方式

固定翼的飞行方式是最早采用机械装置实现人工飞行的方式之一,也是目前应用最广、最为成熟的一种飞行方式,大到各种军用飞机、民用运输机以及一些有翼导弹等;小到 UAV、MAV。作用在固定翼 MAV 上的外力是由推力、升力、阻力和地心引力的合成。另外,作用于俯仰轴、滚转轴和偏航轴的角力矩会引起飞行器绕这些轴旋转。升力、阻力和旋转力矩可以根据动压、机翼面积和尺度减小系数计算出来。固定翼的飞行力学在一般的文献中均有详细的介绍,在这里只简述之。

由流体力学的伯努利方程可以推导出固定翼 MAV 的升力公式:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 S \quad (1-1)$$

式中, L 为固定翼产生的升力, C_L 为固定翼的升力系数,其值与飞行速度、固定截面以及机翼攻角、飞行雷诺数等有关,其大小一般通过风洞实验测得, ρ 为固定翼所在大气的空气密度, V 为固定翼与大气的相对速度, S 为固定翼的有效面积。

其阻力可表示为:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S \quad (1-2)$$

式中, D 为固定翼产生的阻力, C_D 为固定翼的阻力系数,其值与飞行速度、固定翼面积以及机翼攻角等有关,其大小一般通过风洞实验测得, ρ , V , S 的定义与升力中定义相同。

力矩是 MAV 在飞行过程中调整其运动姿态的重要因素, MAV 的力矩可表示为:

$$M = \frac{1}{2} C \rho V^2 S c \quad (1-3)$$

式中, C 为力矩系数,在三维空间可分为 C_l , C_d , C_n , 分别是升力、阻力和翼剖面的力