

Modeling and Control of  
**Micro Air Vehicle**

# 微型飞行器

## 建模与控制

段洪君 史小平 著



科学出版社

# 微型飞行器建模与控制

段洪君 史小平 著

东北大学秦皇岛分校教材(专著)建设基金资助

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

微型飞行器(MAV)是当今航空、航天领域的一个崭新的尖端子领域,涵盖了空气动力学、微机械、微电力、微计算机及自动控制等多个学科。本书以作者多年的相关研究工作为基础,主要针对MAV飞行动力学建模及其姿态控制问题,将部分理论研究成果进行总结、提炼而成。本书主要内容有绪论、昆虫的振翅飞行机理、MAV飞行的动力学模型、MAV飞行姿态的积分反馈补偿控制、MAV飞行姿态的模型分解控制、MAV飞行姿态的滑模自适应控制、MAV飞行姿态的模糊神经网络控制、总结与展望等。

本书可作为高等院校导航、制导与控制专业及相关专业的研究生与高年级本科生的教材或课外读物,也可作为高等院校相关专业教师和从事微型飞行器研究及其应用的工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

微型飞行器建模与控制/段洪君,史小平著. —北京:科学出版社,2012  
ISBN 978-7-03-034917-0

I. ①微… II. ①段… ②史… III. ①飞行器-飞行控制系统 IV. ①V249.122

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第130721号

---

责任编辑:王 钰 李 军 / 责任校对:柏连海  
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年7月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年7月第一次印刷 印张:12

字数:226 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BZ08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

微型飞行器 (micro air vehicle, MAV) 的概念最早源于 20 世纪 90 年代。根据美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 提出的要求, 微型飞行器的基本技术指标是: 飞行器各个方向的最大尺寸不超过 15cm, 续航时间 20~60min, 航程达到 10km 以上, 飞行速度 22~45km/h, 可以携带有效载荷, 完成一定的任务。在军事方面, MAV 可以装备到排一级的士兵, 进行低空军事侦察、监视、战场损伤评估等; 作为反辐射和微型攻击武器, 摧毁敌方雷达等电子设施; 用于目标搜索和通信中继; 进行生化探测, 并标定危险区域等。在民用方面, MAV 可以用于交通监控、边境巡逻、森林及野生动植物勘测、航空摄影、输电线路检查、环境监测、气象监测、森林防火监测等。正是微型飞行器在军事和民用方面极其广阔的应用前景, 使其得到世界许多国家的极大关注, 很快成为国际上的研究热点。

国内外各大科研机构广泛开展了对微型飞行器本体及其子系统的研究和开发, 并研制了一系列的原理性样机。按照飞行机理的不同, 微型飞行器一般可分为微型固定翼飞行器、微型旋翼飞行器、微型扑翼飞行器三种类型。目前, 国内外关于微型飞行器的研究概括起来包括三大方面, 即微型机电系统的研究、相关空气动力效应的研究、姿态控制方法的研究。微型飞行器由于其尺寸小, 结构复杂, 而气动力效应又不可忽略, 相对于常规尺寸的飞行器而言, 其姿态控制器的设计十分复杂, 姿态控制系统的稳定性分析问题也具有很强的挑战性。

本书的作者从昆虫的振翅飞行机理、微型飞行器动力学建模、微型飞行器姿态控制系统设计等三大方面对扑翼式微型飞行器进行了详细的研究。其中姿态控制部分结合多年来的科研工作经验, 提出以下四种方法, 即 MAV 飞行姿态的积分反馈补偿控制、MAV 飞行姿态的模型分解控制、MAV 飞行姿态的滑模自适应控制、MAV 飞行姿态的模糊神经网络控制。这些姿态控制方法分别针对不同的姿态控制系

统，作者对每一种控制方法都进行了计算机仿真研究，并均给出详细的仿真结果。对于微型飞行器的姿态控制系统而言，它们都具有良好的控制效果。

作为东北大学秦皇岛分校教材（专著）建设基金资助项目，我们希望本书的出版能够对微型飞行器导航与控制领域研究工作的进展献出一份绵薄之力。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，希望从事该领域研究的科研工作者和高等院校相关专业的师生在品读的同时多提宝贵的意见和有益的建议，以便我们进一步修订、完善。让我们携起手来，共同为我国的航天事业贡献自己的力量！

作 者

2011年11月20日

## 主要符号表

$c_x, c_y, c_z$  —— 机身的阻力系数、升力系数及侧向力系数

$c, \bar{c}$  —— 机翼弦长及其平均弦长

$f$  —— 机翼的扑翼频率

$g$  —— 重力加速度

$h$  —— 机翼气动中心在机体坐标系的坐标点

$m_l, m_y, m_z$  —— 机身的滚转力矩系数、偏航力矩系数及俯仰力矩系数

$m$  —— 飞行器的质量

$o_l x_l y_l z_l$  —— 飞行器左翼坐标系

$o_r x_r y_r z_r$  —— 飞行器右翼坐标系

$o x_h y_h z_h$  —— 航迹坐标系

$o x_v y_v z_v$  —— 速度坐标系

$o x y z$  —— 机体坐标系

$p, q, r$  —— 机身的滚转角速度、偏航角速度及俯仰角速度

$v_b$  —— 在机体坐标系上的机身速度矢量

$v_l, v_r$  —— 左、右机翼的气动中心在机体坐标系中的速度矢量

$\nu$  —— 机翼平移速度矢量的标量值

$C_L, C_D$  —— 机翼面的瞬时升力系数与阻力系数

$C_{rot}$  —— 机翼的扭转循环力系数

$F_a$  —— 来流附加质量产生的惯性力矢量

$F, F_{hx}, F_{hy}, F_{hz}$  —— 机身质心所受外力矢量及其沿航迹坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$F_{inst}$  —— 机翼面的瞬时空气动力矢量

$F_L, F_D$  —— 机翼瞬时平移力矢量的升力矢量与阻力矢量

$F_l, F_r$  —— 左、右机翼的空气动力矢量

$F_{rot}$  —— 机翼平移和扭转运动的相互作用而产生的扭转循环力矢量

$F_{trans}$  —— 机翼延后失速产生的瞬时平移力矢量

$F_{wc}$  —— 机翼运动方式的改变而产生的尾流捕获力矢量

$G, G_x, G_y, G_z$  —— 机体重力矢量及其沿地面坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$G_{hx}, G_{hy}, G_{hz}$  —— 机体重力矢量沿航迹坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$H, H_x, H_y, H_z$  —— 机身质心的总动量矩矢量及其在机体坐标系纵轴、竖轴

与横轴的分量

$\mathbf{J}, J_x, J_y, J_z$  —— 飞行器对机体坐标系的惯性张量及其绕机体坐标系纵轴、竖轴与横轴的转动惯量

$J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}, J_{yx}, J_{zx}, J_{zy}$  —— 飞行器对机体坐标系各轴的惯量积

$\mathbf{M}_b, M_{bx}, M_{by}, M_{bz}$  —— 作用于机体质心的空气动力矩矢量及其滚转力矩、偏航力矩与俯仰力矩分量

$M_{bvx}, M_{bvy}, M_{bvz}$  —— 作用于机体质心的空气动力矩矢量沿速度坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$\mathbf{M}_d, M_{dx}, M_{dy}, M_{dz}$  —— 干扰力矩矢量及其沿机体坐标系纵轴、竖轴与横轴的分量

$\mathbf{M}, M_x, M_y, M_z$  —— 作用于机体质心的总动力矩矢量及其滚转力矩、偏航力矩与俯仰力矩分量

$\mathbf{M}_{ub}, M_{ubr}, M_{uby}, M_{ubz}$  —— 机身摄动力矩矢量及其沿机体坐标系纵轴、竖轴与横轴的分量

$\mathbf{M}_u, M_{ux}, M_{uy}, M_{uz}$  —— 机体的总摄动力矩矢量及其沿机体坐标系纵轴、竖轴与横轴的分量

$\mathbf{M}_{uw}, M_{uwx}, M_{uwy}, M_{uwz}$  —— 机翼的摄动力矩矢量及其沿机体坐标系纵轴、竖轴与横轴的分量

$\mathbf{M}_w, M_{wx}, M_{wy}, M_{wz}$  —— 作用于机体质心由机翼产生的气动力矩矢量及其滚转力矩、偏航力矩与俯仰力矩分量

$OXYZ$  —— 地面坐标系

$P_{hr}, P_{hy}, P_{hz}$  —— 机翼驱动力矢量沿航迹坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$\mathbf{P}, P_x, P_y, P_z$  —— 机翼驱动力矢量及其沿机体坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$\mathbf{R}, D, L, S$  —— 机身气动力矢量及其沿速度坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$R$  —— 机翼的翼展长

$S_b$  —— 机身的特征面积

$V_{hr}, V_{hy}, V_{hz}$  —— 飞行速度矢量沿航迹坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$\mathbf{V}, u, v, w$  —— 飞行速度矢量及其沿地面坐标系纵轴、竖轴及横轴的分量

$V$  —— 飞行速度矢量的标量值

$\boldsymbol{\Omega}, \Omega_{hr}, \Omega_{hy}, \Omega_{hz}$  —— 航迹坐标系相对地面坐标系的转动角速度矢量及其在航迹坐标系纵轴、竖轴与横轴的分量

$\phi_l, \phi_l$  —— 飞行器左翼的扭转角与扑动角

$\phi_L, \phi_R, \phi_L, \phi_R$  —— 机翼左、右扭转角和扑动角的最大值

$\Delta\phi_l, \Delta\phi_r$  —— 机翼左、右扑动角的修正值

- $l$  —— 机身特征长度
- $\varphi_r, \phi_r$  —— 飞行器右翼的扭转角与扑动角
- $\theta, \psi_v$  —— 机体的航迹倾角与航迹偏角
- $\gamma_v$  —— 机体的速度倾角
- $\alpha_w$  —— 机翼的瞬时攻角
- $\alpha, \beta$  —— 机体的攻角与侧滑角
- $\vartheta, \psi, \gamma$  —— 机体的姿态角，分别为俯仰角、偏航角及滚转角
- $\boldsymbol{\omega}, \omega$  —— 机体坐标系相对于地面坐标系的转动角速度矢量及其标量值
- $\nu$  —— 机翼扭转角速度矢量的标量值
- $\lambda$  —— 机翼扭转角与扑动角的相位差
- $\zeta$  —— 机翼气动中心沿机翼坐标系横轴方向的坐标值
- $\xi$  —— 机翼气动中心沿机翼坐标系纵轴方向的坐标值
- $\eta$  —— 机翼坐标原点到机体坐标原点的距离
- $\rho$  —— 空气密度



# 目 录

## 前言

## 主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 MAV 的研究背景及现状	1
1.1.1 国外 MAV 的研究现状	2
1.1.2 国内 MAV 的研究现状	6
1.2 MAV 扑翼飞行的仿生学探索	8
1.3 MAV 研究的关键技术	10
1.3.1 扑翼飞行的非定常空气动力学机理	10
1.3.2 MAV 柔性翼结构设计	11
1.3.3 MAV 控制策略及导航系统	11
1.3.4 MAV 数据通信系统	12
1.3.5 MAV 机体结构及机载设备微型化	12
1.3.6 MAV 风洞试验方法	13
1.4 MAV 飞行运动控制	13
1.4.1 MAV 位置导航控制	14
1.4.2 MAV 飞行姿态控制	14
1.5 本书主要研究内容	20
1.6 小结	22
参考文献	22
第 2 章 昆虫的振翅飞行机理	31
2.1 昆虫的翅膀结构及升力产生机制	32
2.1.1 昆虫的翅膀结构	32
2.1.2 昆虫的升力产生机制	34
2.2 昆虫飞行的运动学	36
2.3 昆虫飞行的空气动力学	38
2.3.1 Weis-Fogh 机制	39
2.3.2 延迟脱落机制	40
2.3.3 翻转效应机制	40
2.3.4 尾迹捕获机制	44

2.4	振翅飞行气动特性的研究方法	45
2.4.1	面元法	45
2.4.2	涡格法	45
2.4.3	数值模拟法	45
2.5	昆虫振翅飞行的数理分析	46
2.5.1	昆虫翅膀运动的数学描述	46
2.5.2	昆虫振翅飞行时的周围流场	47
2.5.3	昆虫前向飞行的功耗问题	48
2.6	小结	49
	参考文献	49
<b>第3章</b>	<b>MAV飞行的动力学模型</b>	<b>53</b>
3.1	MAV动力学建模概述	53
3.2	坐标系的描述	55
3.2.1	坐标系的定义	55
3.2.2	坐标系之间的转换关系	57
3.3	MAV机体动力学	62
3.3.1	机身动力	62
3.3.2	机翼气动力	64
3.3.3	机身动力矩	66
3.3.4	机翼气动力矩	66
3.4	MAV动力学方程	68
3.4.1	机体质心运动的动力学方程	68
3.4.2	机体质心运动的运动学方程	69
3.4.3	机体绕质心转动的动力学方程	70
3.4.4	机体绕质心转动的运动学方程	71
3.4.5	机翼运动方程	72
3.4.6	整机动力学模型	72
3.4.7	性能指标与设计参数	74
3.5	MAV姿态控制系统的数学描述	75
3.6	MAV飞行运动控制仿真	79
3.6.1	MAV纵向飞行控制仿真	79
3.6.2	MAV姿态控制仿真	80
3.7	小结	82
	参考文献	82

<b>第 4 章 MAV 飞行姿态的积分反馈补偿控制</b> .....	85
4.1 非线性系统积分反馈补偿控制 .....	86
4.1.1 问题的描述 .....	86
4.1.2 控制器设计及稳定性分析 .....	87
4.2 MIMO 非线性系统积分反馈补偿控制 .....	90
4.2.1 问题的描述 .....	90
4.2.2 控制器设计及稳定性分析 .....	91
4.2.3 仿真实例 .....	94
4.3 MAV 姿态控制 .....	95
4.3.1 控制器设计 .....	95
4.3.2 控制仿真 .....	96
4.3.3 仿真结果分析 .....	99
4.4 小结 .....	99
参考文献 .....	100
<b>第 5 章 MAV 飞行姿态的模型分解控制</b> .....	102
5.1 非线性系统模型分解控制 .....	103
5.1.1 问题的描述 .....	103
5.1.2 控制器设计及稳定性分析 .....	104
5.2 MIMO 非线性系统模型分解控制 .....	108
5.2.1 问题的描述 .....	108
5.2.2 模型分解控制器设计 .....	109
5.2.3 递归 CMAC 观测器设计 .....	110
5.2.4 控制算法及稳定性分析 .....	112
5.2.5 仿真实例 .....	115
5.3 MAV 姿态控制 .....	116
5.3.1 控制器设计 .....	116
5.3.2 控制仿真 .....	118
5.3.3 仿真结果分析 .....	124
5.4 小结 .....	125
参考文献 .....	125
<b>第 6 章 MAV 飞行姿态的滑模自适应控制</b> .....	128
6.1 非线性系统滑模自适应控制 .....	128
6.1.1 问题的描述 .....	128
6.1.2 控制器设计及稳定性分析 .....	129
6.2 MIMO 非线性系统滑模自适应控制 .....	131

6.2.1	问题的描述	131
6.2.2	滑模自适应控制器设计	132
6.2.3	递归 CMAC 观测器设计	134
6.2.4	控制算法及稳定性分析	135
6.2.5	仿真实例	138
6.3	MAV 姿态控制	139
6.3.1	控制器设计	139
6.3.2	控制仿真	141
6.3.3	仿真结果分析	147
6.4	小结	148
	参考文献	148
<b>第 7 章</b>	<b>MAV 飞行姿态的模糊神经网络控制</b>	<b>151</b>
7.1	非线性系统模糊自适应控制	152
7.1.1	问题的描述	152
7.1.2	模糊逻辑系统的设计	153
7.1.3	控制器设计及稳定性分析	154
7.2	MIMO 非线性系统模糊神经网络控制	156
7.2.1	问题的描述	156
7.2.2	模糊自适应控制器设计	158
7.2.3	递归 CMAC 观测器设计	159
7.2.4	控制算法及稳定性分析	161
7.2.5	仿真实例	163
7.3	MAV 姿态控制	164
7.3.1	控制器设计	164
7.3.2	控制仿真	167
7.3.3	仿真结果分析	172
7.4	小结	173
	参考文献	173
<b>第 8 章</b>	<b>总结与展望</b>	<b>176</b>
8.1	总结	176
8.2	展望	177
	参考文献	179

# 第 1 章 绪 论

微型飞行器，即 MAV (micro air/aerial vehicle)，一般是指各向尺寸均小于 15cm 的飞行器。它的设计目标为：质量 50~100g，能以可接受的成本执行某一有价值的飞行任务，飞行范围为 10km，巡航速度为 30~60km/h，连续航行时间为 20~60min。MAV 应能自主飞行，可实时传输图像，发射方式可采用人工发射、弹药发射或平台发射。MAV 最先是在军事领域被提出来的，它可用于军事侦察、目标跟踪、武器投放、电子干扰、对地攻击、部署传感器和中继通信等。具有协调能力的 MAV 群则可完成更多的任务。MAV 在民用领域的应用前景也十分广阔：交通方面，它可昼夜巡视于某一区域，及时发现各种交通隐患或交通事故；监测方面，它可进行环境监测、气象监测、海洋监测、森林防火监测、洪涝灾情监测、农作物病虫害监测；人员营救方面，它可用于搜寻在倒塌房屋中的伤员，在山林地带搜寻迷失的登山者。此外，MAV 还具有价格便宜、质量轻、噪声小和隐蔽性好等优势。美国、俄罗斯、澳大利亚、以色列、德国、日本等国家已拨出专项研究经费，加紧研制和开发各种性能独特的 MAV。对我国而言，能否在这一高技术领域占有一席之地，是决定未来局部战争主动权的关键问题，既是机遇也是挑战。我们必须利用 MAV 在国际上仍处于初步研制阶段的有利时机，加大投入，在某些关键技术方面取得突破，进行必要的技术储备。

就目前情况看，研究的重点是集中力量发展决定 MAV 成败的两大关键技术，即 MAV 在低雷诺数下动力学建模和控制系统的稳定性技术以及 MAV 的机载设备和动力系统的 MEMS (微机电系统) 技术。只有在这两大关键技术上获得突破性进展，才能实现“跟踪前沿，跨越发展”的目标。本书旨在研究 MAV 动力学建模及控制系统的稳定性问题，重点研究它的控制器设计问题。因为在低雷诺数条件下 MAV 的空气动力学特性和一般飞行器有很大的差别，控制系统的非线性和干扰都比一般飞行器要强得多。在这种情况下，必然对控制系统的设计提出的挑战，因为控制系统的鲁棒性设计更加困难也更加迫切。因此，从这个意义上讲，所进行的研究是一项决定 MAV 研制成败的关键性课题，是一项极具创新特色的基础研究，它的成功将为我国 MAV 事业的发展提供有力的技术支持。

## 1.1 MAV 的研究背景及现状

1992 年美国兰德公司提交美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Re-

search Projects Agency, DARPA) 的一份关于未来军事技术的研究报告首次提出 MAV 的概念。该报告中指出携有微小传感器、尺寸极小的侦察飞行器的设想是可以实现的, 发展尺度位于昆虫量级的微型飞行系统对美国在未来保持军事领先具有重要意义, MAV 将会改变未来的战争模式。此后, 麻省理工学院的林肯实验室和美国海军研究实验室对 MAV 技术上的可行性进行了更为深入的评估, 得出与兰德公司一致的结论。同时, 林肯实验室的工程师们提出了他们的一种 MAV 的概念设计。

1995 年, DARPA 首次组织了关于 MAV 可行性的专题研讨会, 并由此制定了一项旨在发展 MAV 的计划。

1996 年, DARPA 向美国工业界作了简要介绍。同年 10 月举办了用户和研究单位之间有关这一问题的讨论会, 会后 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。

1997 年, DARPA 开始加大对 MAV 技术的研究力度, 并开始实施一项耗资 3500 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、业界的公司等。同年, 美国佛罗里达大学发起组织了每年一度的以美国高校为主的 MAV 比赛, 目前参赛队伍已经扩展到全世界。

2003 年仅在美国就有 150 余家公司、科研机构 and 高校在从事 MAV 及其相关技术研究。MAV 的研究发展逐渐演变为世界范围的飞行器和机器人领域的研究热点。

2004 年, 在美国召开的美国电子电气工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 机器人与自动化国际会议专门安排了“微型飞行器: 下一个十年”专题研讨会, 标志着新一轮国际性高技术竞争的开始。

归纳起来, MAV 应具有如下特点:

(1) 应是适合军用的系统。

(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) 质量轻、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, 不应暴露使用人员的位置。

### 1.1.1 国外 MAV 的研究现状

在 DARPA 的研制项目中, 按飞行特点将 MAV 分为三类: 固定翼式 (fixed-wing)、旋翼式 (rotating-wing) 和扑翼式 (flapping-wing)。

## 1. 固定翼式 MAV

### 1) MLB公司的“Trochoid”

该机大小为 8in<sup>①</sup>，内燃机驱动，在风速 10~15mile/h<sup>②</sup> 的天气可飞行 18.5min，飞行速度 10~60mile/h，有效控制范围 30ft<sup>③</sup>。机上有电子载荷 71g，包括无线电控制系统和电压陀螺仪稳定系统，可携带彩色摄像机和视频发射器，续航时间 6min。“Trochoid”如图 1.1 所示。

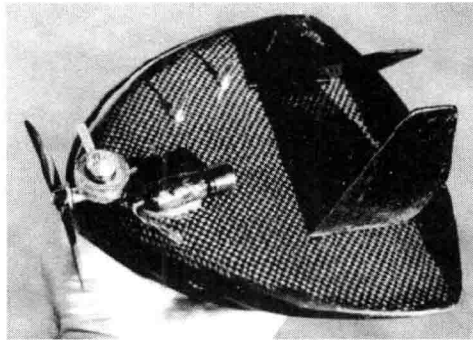


图 1.1 Trochoid

### 2) AeroVironment 公司的“Black Widow”

AeroVironment 公司与洛杉矶加利福尼亚大学和加州理工大学联合研制了“Black Widow”（黑寡妇）MAV，并于 1999 年试飞成功。该机为 6in 的圆盘状，壳体用泡沫聚乙烯制造，翼展 15cm，起飞重量 60g，使用锂电池，巡航速度 12m/s，俯冲速度 20m/s，航程 16km，室外续航时间 22min。机上装有 5g 重的 GPS 导航装置，携带摄像机，数据传输范围约 15km。它具有很强的隐蔽性，在距离 50m 处听不见它的任何声音。整套系统包括固定翼式 MAV、操纵装置、便携式电脑、天线和气压发射器等。“Black Widow”如图 1.2 所示。

### 3) Sanders 公司的“Micro Star”

Sanders 公司与洛克希德公司（Lockheed Martin）以及通用电器公司合作获得了 DARPA 的资金支持，支持金额为 1000 万美元，为期 42 个月。他们提出了“Micro Star”（微星）MAV 技术方案，该机翼展 15cm，总重量 100g，最大负载 15g，总耗电量 15W。它使用 44.5g 重的长寿命锂电池供电，续航时间 20~60min，飞行速度 48km/h，飞行高度为 15~91m，航程 5km。机上装有 5g 重

① 1in=2.54cm。

② 1mile=1.609 34km。

③ 1ft=0.3048m。

的差分 GPS 和惯性导航装置及彩色或黑白微型摄像机。“Micro Star”如图 1.3 所示。

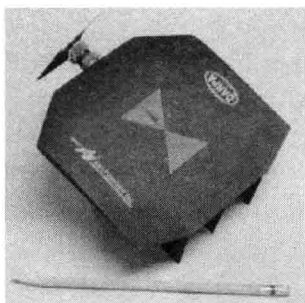


图 1.2 Black Widow



图 1.3 Micro Star

## 2. 旋翼式 MAV

### 1) “Kolibri” (克里卜里) 旋翼式 MAV

Lutronix 公司与 Auburn 大学合作开发了“Kolibri” (克里卜里) 旋翼式 MAV。该机为直升机布局设计, 外型结构为圆柱形, 上部装旋翼, 下部带照相设备, 分单旋翼和共轴双旋翼两种型号, 旋翼直径 10.16cm, 起飞重量 316g, 有效载荷 100g, 具有三轴向稳定性, 2h 续航能力, 动力装置为 D-Star 公司提供的 37g 重的微型柴油发动机。该 MAV 利用叶片在下洗流中的运动进行俯仰、横滚和偏航等姿态的控制, 叶片通过具有 50Hz 频率的压电传感器带动, 机上装有 Draper 研制的 GPS/加速度/陀螺仪导航系统。该 MAV 可装载红外线成像装置或高灵敏窃听器等设备, 能轻松地完成空中悬停等高难动作。“Kolibri”如图 1.4 所示。

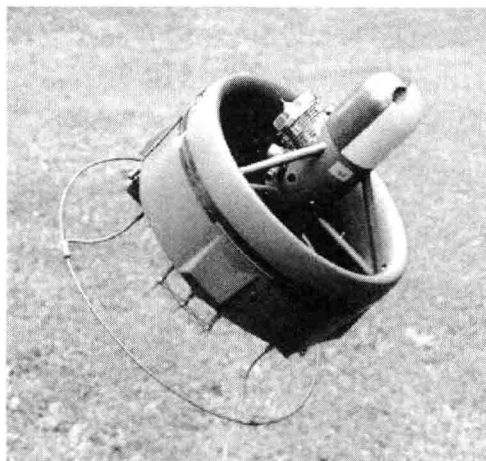


图 1.4 Kolibri



## 2) 爱普生公司的微型无人直升机

2003年11月,日本的爱普生公司发布了一种微小型无人驾驶直升机的原型机,如图1.5所示。旋翼直径为13cm,高为7cm,总重量为8.9g。以一种小巧、轻便、高功率的超声波马达为驱动,采用质心位移控制技术控制直升机稳定飞行,具有超微小精密电路和低功耗无线模块。

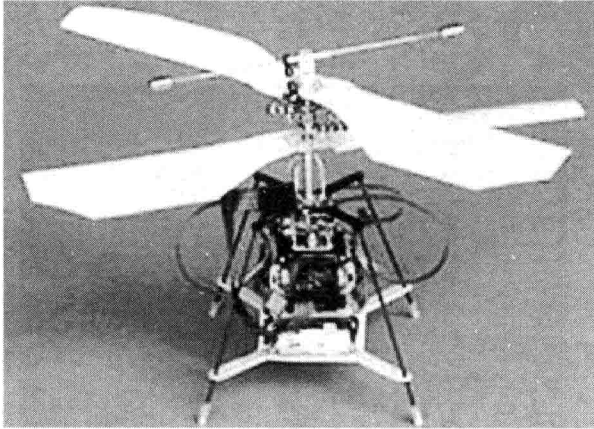


图 1.5 微型无人直升机

## 3. 扑翼式 MAV

### 1) Caltech 的“Micro Bat”

加州技术学院(Caltech)和 AeroVironment 及加州大学联合研制了“Micro Bat”(微型蝙蝠)扑翼 MAV。该项目研究经费为180万美元。该 MAV 采用扑翼布局设计,翼展15.24cm,重量10g,自由飞行时间18s,飞行距离46m,机翼能以20Hz的频率挥舞。它的动力装置为微型电机和新型高能电池,机体骨架及机翼都是采用新型超强复合材料制成。“Micro Bat”如图1.6所示。

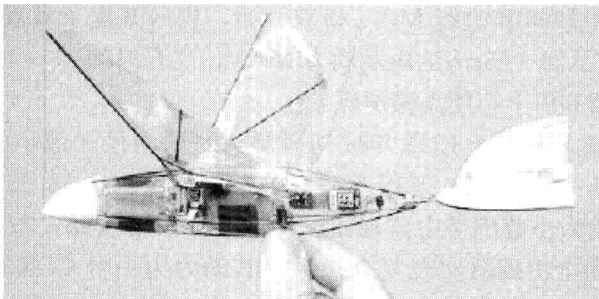


图 1.6 Micro Bat