



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目

中国制造  
2025



# 扑翼飞行机器人 系统设计

贺威 孙长银 著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目



# 扑翼飞行机器人 系统设计

贺威 孙长银 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书第1章介绍了仿生扑翼飞行机器人的研究现状与应用情况；第2章集中介绍了在进行仿生扑翼飞行机器人系统建模和稳定性分析时所用到的基础理论；第3章至第5章分别针对单柔性翼系统、双柔性翼系统和刚柔混合扑翼系统进行建模分析，并对不同结构的仿生扑翼飞行机器人柔性翼进行动力学分析、边界控制器设计以及系统稳定性证明；第6章针对仿生扑翼飞行机器人系统中存在的输出约束问题进行研究，设计能够解决输出约束限制的主动边界控制器；第7章通过ADAMS设计和搭建3D半实物仿真平台，并联合SIMULINK对边界扰动情况下柔性梁PD控制和边界控制进行仿真模拟验证；第8章设计神经网络控制算法来对仿生扑翼飞行机器人的位姿进行自主控制分析；第9章详细介绍一款舵机驱动仿生扑翼飞行机器人的机械结构设计以及硬件系统搭建；第10章设计了仿生扑翼飞行机器人的飞行实验。

本书适合机器人设计相关专业的人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

扑翼飞行机器人系统设计/贺威,孙长银著. —北京:  
化学工业出版社, 2018. 11  
“中国制造2025”出版工程  
ISBN 978-7-122-33072-7

I. ①扑… II. ①贺…②孙… III. ①扑翼机-无人驾  
驶飞机-系统设计 IV. ①V276

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第217509号

责任编辑: 宋辉  
责任校对: 秦姣

文字编辑: 陈喆  
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印装: 三河市延风印装有限公司  
710mm×1000mm 1/16 印张14 字数260千字 2019年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

—— 爱因斯坦



“中国制造2025”  
出版工程

# 《“中国制造 2025” 出版工程》

## 编 委 会

### 主 任

孙优贤 (院士)

### 副主任 (按姓氏笔画排序)

王天然(院士) 杨华勇(院士) 吴 澄(院士)

陈 纯(院士) 陈 杰(院士) 郑南宁(院士)

桂卫华(院士) 钱 锋(院士) 管晓宏(院士)

### 委 员 (按姓氏笔画排序)

马正先 王大轶 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔 非 任春年 伊廷锋 刘 敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李 莉 李 慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴 飞 吴 澄 吴伟国 宋 浩 张 平

张 晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈 为

陈 刚 陈 纯 陈 杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗 映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺 威 桂卫华 柴 毅 钱 锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康 锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢 颖 谢胜利 蔡 登 管晓宏 魏青松

# 序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

## 目录

# 1 第1章 绪论

- 1.1 引言 / 2
- 1.2 扑翼飞行机器人的发展历史 / 3
  - 1.2.1 国外研究现状 / 3
  - 1.2.2 国内研究现状 / 10
- 1.3 应用前景 / 13

# 14 第2章 基础理论

- 2.1 引理 / 15
- 2.2 Hamilton 原理 / 15
- 2.3 柔性梁振动控制理论 / 16
- 2.4 自适应神经网络控制 / 17
- 2.5 稳定性分析方法 / 21

# 24 第3章 仿生扑翼飞行机器人单柔性翼控制系统设计

- 3.1 单柔性翼建模与动力学分析 / 25
- 3.2 单柔性翼边界控制器设计及稳定性分析 / 29
- 3.3 MATLAB 数值仿真 / 37
- 3.4 本章小结 / 41

# 42 第4章 仿生扑翼飞行机器人双柔性翼控制系统设计

- 4.1 双柔性翼建模与动力学分析 / 43
- 4.2 双柔性翼边界控制器设计及稳定性分析 / 46



4.3 MATLAB 数值仿真 / 54

4.4 本章小结 / 57

59

## 第 5 章 仿生扑翼飞行机器人刚柔混合扑翼控制系统设计

5.1 刚柔混合扑翼建模与动力学分析 / 60

5.2 刚柔混合扑翼边界控制器设计及稳定性分析 / 65

5.3 MATLAB 数值仿真 / 73

5.4 本章小结 / 78

79

## 第 6 章 带有输出约束的柔性翼的控制系统设计

6.1 带有输出约束的柔性翼控制模型 / 80

6.2 稳定性分析 / 81

6.3 MATLAB 数值仿真 / 88

6.4 本章小结 / 92

93

## 第 7 章 扑翼飞行机器人仿真平台

7.1 ADAMS 与 SIMULINK 的联合仿真 / 94

7.1.1 仿真平台功能介绍 / 94

7.1.2 动力学仿真实例 / 98

7.1.3 结果分析 / 105

7.2 基于 XFlow 的空气动力学仿真 / 105

7.2.1 XFlow 仿真软件介绍 / 105

7.2.2 扑翼拍动速度对升力影响的仿真分析 / 106

7.2.3 结果分析 / 109

7.3 本章小结 / 109

110

## 第 8 章 仿生扑翼飞行机器人的位姿自主控制

8.1 建模方法及动力学分析 / 111

- 8.2 控制器设计 / 113
  - 8.2.1 姿态控制 / 113
  - 8.2.2 位置控制 / 120
- 8.3 MATLAB 数值仿真 / 121
- 8.4 本章小结 / 129

## 130 第9章 仿生扑翼飞行机器人软硬件设计及架构

- 9.1 硬件系统设计与构建 / 131
  - 9.1.1 机械结构及外观设计 / 132
  - 9.1.2 舵机控制系统 / 140
  - 9.1.3 飞控电路板 / 145
- 9.2 软件系统设计与集成 / 151
  - 9.2.1 无线链路和通信控制 / 153
  - 9.2.2 地面站工作界面 / 156
- 9.3 本章小结 / 160

## 161 第10章 飞行实验

- 10.1 定高飞行 / 162
  - 10.1.1 硬件系统设计 / 163
  - 10.1.2 扑翼飞行机器人位置捕获 / 167
  - 10.1.3 系统上位机设计 / 177
  - 10.1.4 视觉反馈飞行控制实验 / 184
- 10.2 自主起飞 / 189
  - 10.2.1 运载车结构设计 / 189
  - 10.2.2 软硬件系统设计 / 190
  - 10.2.3 自主起飞实验过程 / 194
  - 10.2.4 数据分析 / 197
- 10.3 本章小结 / 200

## 201 参考文献

## 211 索引



# 第1章

## 绪论

## 1.1 引言

扑翼飞行机器人具有体积小、质量轻、成本低、能耗低、噪声小等特点,在国防军事和民用领域应用广泛,它能完成其他种类的无人机无法完成的任务<sup>[1,2]</sup>,比如在国防领域中有低空侦察、城市作战、电子干扰、通信中继、核/生化探测、精确投放等任务,民用领域有自然灾害的监视与支援、环境和污染监测等任务。与固定翼和旋翼飞行器相比,它具有独特的优点:能原地或小场地起飞,极好的飞行机动能力和空中悬停能力以及低廉的飞行费用等。扑翼飞行机器人的主要特点是将升降、悬停和推进功能集于一身,依靠扑翼的运动方式,快速有效地改变扑翼飞行机器人的姿态,具有较强的机动性与灵活性。扑翼飞行机器人的扑动可以使机身在水平位置锁定,并且扑翼所产生的升力效率高,能够利用较少的能量实现长距离飞行,此外,还可以利用势能在高空进行翱翔。这些特点将使得扑翼飞行机器人更易于完成长时间、远距离、无能源补充条件下的飞行任务<sup>[3~5]</sup>。

自然界的飞行生物无一例外地采用扑翼飞行方式。同时,根据仿生学和空气动力学的研究结果可以推测,在翼展小于15cm时,扑翼飞行比固定翼和旋翼飞行更具优势,微型仿生扑翼飞行机器人(FMAV)也必将在该研究领域占据主导地位<sup>[6]</sup>。然而,与固定翼和旋翼飞行器的飞行机理相比,仿生扑翼飞行机器人的飞行机理也更为复杂,目前,人们对这一领域的研究还不完整,其理论建模及分析还具有相当程度的困难性。

对于扑翼飞行的研究最初是从鸟类和昆虫飞行的测试与试验开始的,使用人工制作的机械翅膀来模拟鸟类和昆虫的扇翅运动,通过从实验中发现的现象、检测到的数据和得到的结论,建立相应的理论模型,并基于该模型完成进一步分析和控制研究。目前,此类结合实验测试与空气动力学理论分析的方法在扑翼飞行的机理研究中取得了一些突破。然而,扑翼飞行机器人的设计灵感来源于对鸟类和昆虫的仿生学研究,同时需要借鉴固定翼飞行器的一些结构设计,如何完美融合两者还有待研究。此外,扑翼飞行机器人的控制理论与传感技术的研究目前也尚处在初期阶段,人们距离完全了解扑翼飞行的机制还有很长的路要走<sup>[7,8]</sup>。

随着国民经济和社会的发展,为了加快复杂机械系统运行速度和降低结构重量,质量轻、能耗低、灵活度高、韧性好的柔性材料被大量用

于机器人系统。一方面,柔性结构增加了设计和制造上的灵活性,提高了仿生扑翼飞行机器人系统性能;另一方面,柔性结构在运动和使用过程中产生的振动问题又会影响控制效果<sup>[9~11]</sup>,甚至会加速机械结构的疲劳损坏,缩短使用寿命。因此,如何抑制柔性翼的振动是研究扑翼飞行中迫切需要解决的一个问题。

## 1.2 扑翼飞行机器人的发展历史

昆虫和鸟类<sup>[12,13]</sup>具有高超的飞行技巧。通过对动物身体构造、运动机理和行为方式的观察和研究,研究人员把工程系统的研究设计与仿生学<sup>[14~16]</sup>相结合,进行仿生机器人的开发与研究。仿生扑翼飞行机器人就是其中一个重要的分支。

### 1.2.1 国外研究现状

仿生扑翼飞行机器人最早可以追溯到15世纪初,发明家达·芬奇设计了扑翼机图纸,但扑翼飞行系统由于其复杂性,在20世纪70年代之后才有很好的发展。其发展从前期的低频扇动大型载人仿生扑翼机,到中频扇动的仿鸟扑翼机,一直到现在比较流行的高频扇动的昆虫扑翼机(低雷诺数条件),其理论建模也经历了由开始的固定翼做正弦运动向后来复合翼做复杂运动的逐步发展。其中较前沿的研究成果主要来自美国、德国、英国、荷兰等。

如图1-1所示的是加州理工大学研究团队和伊利诺伊大学香槟分校(UIUC)联合研制的一款仿生蝙蝠扑翼机器人BatBot(B2)<sup>[17]</sup>。研究表明,蝙蝠的翅膀具有40个自由度,十分复杂。研究人员将自由度削减至5个,分别设置在肩部、肘部、腕部、腿部和尾部。BatBot的翼膜采用了硅基碳纤维加强膜,厚度只有 $56\mu\text{m}$ 。通过机械耦合结构,一个直流无刷电动机驱动左右翼同时进行扑翼飞行。而其他自由度的调整则通过空心杯电动机来执行。在控制设计方面,蝙蝠机器人采用边界控制的方法使柔性扑翼按照期望的轨迹来扇动,从而实现飞行<sup>[18]</sup>。现在这只蝙蝠机器人已经可以完成翻转和俯仰飞行。此项目的研究成果收录于2017年第2期《Science Robotics》,并被作为封面论文。Bat-Bot的研究人员表示,未来会将蝙蝠的回声定位和倒挂栖息引入到蝙蝠机器人飞行中。

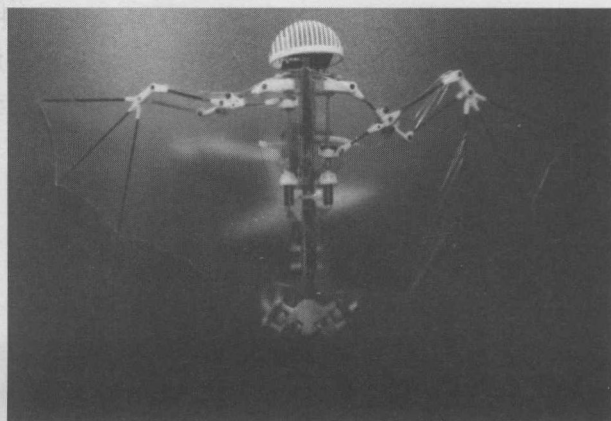


图 1-1 加州理工大学和伊利诺伊大学香槟分校联合研制的 BatBot (B2)

美国 Aero Vironment 公司的蜂鸟机器人 Nano hummingbird<sup>[19]</sup> 如图 1-2 所示。它是在 DARPA 资助下的 NAV 项目成果。该项目从 2005 年启动，致力于制造一个不大于 7.5cm、负载 2g、自重不超过 10g、能飞行 1000m、盘旋 60s 且速度不低于 5m/s 的无人飞行器。从 2006 年的仅实现了系统稳定但不能实现飞行的第一代产品 FP1 到 2011 年带有摄像系统，能仰俯、翻转、偏航多维控制，实现 360° 翻转、持续飞行 11min 的蜂鸟机器人，多代不断完善，使得其在飞行控制、续航能力、结构设计等多方面都处于世界领先水平。翅膀采用柔性膜，结合计算、实验、仿真等方法设计选型；采用四连杆和基于弦结构进行拍动结构设计；控制设计方面包括无尾翼控制方法，结合翅膀转动和扭动调整方法实现仰俯、翻转、偏航的控制。与实际的蜂鸟相比，该系统推进效率较低，输出推力较小，导致续航能力较差，翅膀几何结构设计难以适应复杂环境要求。

麻省理工学院 (MIT) 的 Phoenix<sup>[20]</sup> 仿生扑翼飞行机器人如图 1-3 所示。Phoenix 采用碳纤维框架，柔性结构翅膀翼展 2m，能够在飞行时提供大约 300W 的巨大升力，足够的负载能力使得其能糅合多个功能模块，包括无刷电动机、钛焊四连杆传动装置、固态惯性测量模块，能手动调节控制器实现速度大约 4m/s 的简单水平稳定飞行。由于控制系统不完善，稳定性差，导致飞行时间短，无法完成复杂动作且加速慢，只能通过手持起飞。

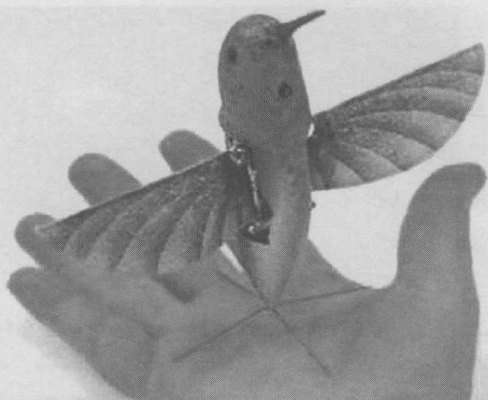


图 1-2 美国 Aero Vironment 公司的 Nano hummingbird



图 1-3 麻省理工学院的 Phoenix

哈佛大学 Wood 教授团队研发了一款飞行昆虫机器人 RoboBee<sup>[21]</sup>，如图 1-4 所示。结构方面：包括电子元件在内的所有元件均采用微加工的 SCM 技术，仅重 80mg，尺寸仅 5 $\mu$ m。为克服尺寸小导致的负载能力较弱的问题，翅膀采用了被动旋转翼铰链，使得其负载能力从 30~40mg 提升至 170mg，增加了 3 倍多，而能量损耗只增加了 55%。控制方面：受昆虫单眼启发，利用光传感器模拟昆虫的单眼视野和光感，进行环境反馈。这个微型扑翼飞行器的缺陷是负载能力不足，难以支撑能源模块，只能采用绳动控制，传感器的使用也很有限，功能拓展受到很大的限制。控制效果欠佳，只能持续飞行 20s 左右，难以保持长时间的稳定。再者，飞行实验很难模拟诸如非线性、多自由度交叉耦合的动态流体力学模型，使得系统难以面对现实中的复杂环境。

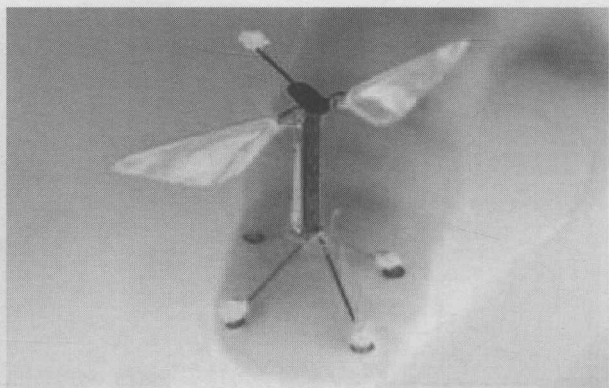


图 1-4 哈佛大学的 RoboBee

德国 Festo 公司的 SmartBird<sup>[22]</sup> 如图 1-5 所示。其翼展 2m，在结构和飞行姿态等方面对银鸥有很高的还原度。翅膀采用主动铰接扭转驱动，为系统提供上升和推动力；尾巴提供紧急上升以及 pitch 和 yaw 方向的控制作用。其系统机电效率可达 45%，在绕圆飞行中表现尤为出色，气流优化设计能使气动效率高达 80%；但其飞行模型中不包含扭转部件，虽然能使其避免受损，但这使控制效果受到限制，不能完成精细复杂的运动，难以在复杂的任务中完成要求。

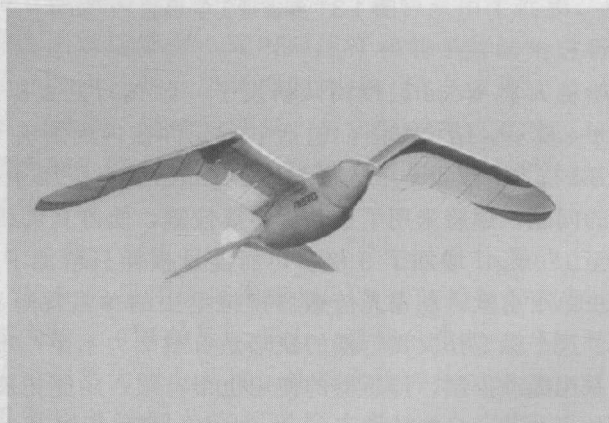


图 1-5 德国 Festo 公司的 SmartBird

加州理工大学 YC Tai 教授团队开发了一款手掌大小的机器蝙蝠 Microbat<sup>[23]</sup>，如图 1-6 所示。为了减轻质量和提高升力，该团队对翅膀

做了大量研究。通过风洞实验，把钛合金蝙蝠翅膀和蝉翅膀进行对比，发现生物模拟的翅膀性能远不如生物翅膀，所以他们放弃了复杂的生物模拟翅膀，转向研发能够提供足够升力和推力的简单结构翅膀。为了解决电池质量大、功率低的难题，利用轻便的转换器和镍铬细胞供电系统代替传统的镍铬 N-50 电池，既减轻了质量，又增加了供能性能。在自主飞行测试中，初次样机只能飞行 9s，后来改用镍铬电池驱动后，能飞行 22s，不断改良后，现在最佳飞行时间 42s。如何应对现实中风速和风向的变化，优化尾巴的设计以提升稳定性，更大的翅膀、更强的动力系统以及更完善的 MEMS 系统是他们未来努力的方向。

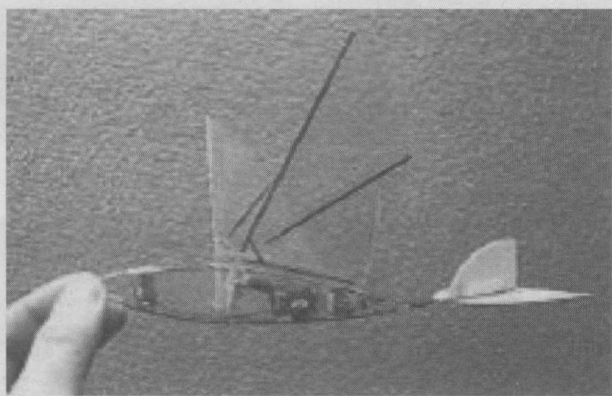


图 1-6 加州理工大学的 Microbat

美国亚利桑那大学的研究团队开发了一系列尺寸不同的仿生扑翼飞行机器人<sup>[24]</sup>，包括 15cm、25cm 以及 74cm。其中，74cm 的最新款仿生扑翼飞行机器人 Ornithopter 每个翅膀包括三个轴，且翅型改为 V 型，如图 1-7 所示。在前期节流控制的基础上，该仿生扑翼飞行机器人采用节点追踪技术来计算翅膀的拍动频率，并采用频闪测速仪来调节两者间的关系。同时，为了调节在不同实验中的机体动力学分析，研究人员采用 ViconNexus 节点追踪软件来获取实验数据。在飞行实验中，由于仿生扑翼飞行机器人机体和翅膀的空气动力学参数具有较大的波动，对仿生扑翼飞行机器人系统的稳定性具有很大的影响，在之后的研究中需要进一步完善。

美国马里兰大学的 Harmon 教授带领的团队研发了一款机身为蓝色的仿生扑翼飞行机器人 Robo Raven<sup>[25]</sup>，如图 1-8 所示。为了对该仿生扑翼飞行机器人进行进一步优化，研究人员在实验中应用动作解析装置将其与另一款外形和构造相似的仿生扑翼飞行机器人进行对比，以便得到

不同系统参数对仿生扑翼飞行机器人的系统性能的影响,包括空气动力学模型、速度、攻角等。在研究中,实验与数据分析的结果还没有实现有效的结合,有待进一步开展研究。

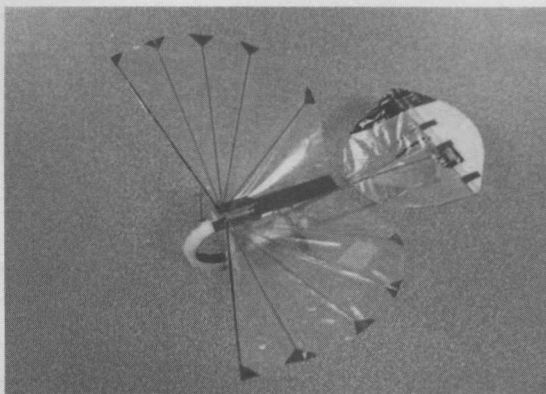


图 1-7 亚利桑那大学的 Ornithopter



图 1-8 马里兰大学的 Robo Raven

荷兰代尔夫特理工大学从 2005 年便开始进行仿生扑翼飞行机器人的研究,并将其研制的扑翼飞行机器人命名为 DelFly<sup>[26]</sup>。第一代仿生扑翼飞行机器人 DelFly I 的结构是模仿蜻蜓搭建的。第二代仿生扑翼飞行机器人 DelFly II 如图 1-9 所示,不仅换上了更轻巧的电子元器件,还采用碳素材料搭建骨架,对翅膀进行改进,并用无刷电动机取代有刷电动机。该仿生扑翼飞行机器人系统稳定性良好,能够搭载摄像头实现自主飞行。最新款的仿生扑翼飞行机器人 DelFly Micro 除了能够搭载摄像头进行自主飞行外,并且能够传送照片返回地面站,但还未实现盘旋飞行,稳定性也不如 DelFly II。