

**Introduction to the Design of  
Fixed-Wing Micro Air Vehicles:  
Including Three Case Studies**

# 固定翼微型飞行器设计引论： 含3个研究案例

托马斯·J. 穆勒 (Thomas J. Mueller)

詹姆斯·C. 凯洛格 (James C. Kellogg)

(美)

彼得·G. 伊夫尤 (Peter G. Ifju)

著

谢尔盖·V. 斯卡拉耶夫 (Sergey V. Shkarayev)

宋笔锋 王利光 杨文青 译



航空工业出版社

AIAA EDUCATION SERIES

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

# 固定翼微型飞行器设计 引论：含3个研究案例

托马斯·J. 穆勒 (Thomas J. Mueller)  
(美) 詹姆斯·C. 凯洛格 (James C. Kellogg) 著  
彼得·G. 伊夫尤 (Peter G. Ifju)  
谢尔盖·V. 斯卡拉耶夫 (Sergey V. Shkarayev)  
宋笔锋 王利光 杨文青 译

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书简要介绍了微型无人飞行器的演变历程,并系统地阐述了微型飞行器设计的基本知识和设计理念,包括小展弦比机翼的基本空气动力学、推进系统和自动驾驶仪与微型飞行器的集成方法等。此外,本书以较大篇幅,通过案例分析的形式分别详细介绍了固定翼微型飞行器、柔性翼微型飞行器和可变形机翼微型飞行器三种不同机翼构型微型飞行器的研制过程。本书旨在帮助读者设计、制作并且测试微型飞行器,可供工程院校相关专业高年级本科生和研究生,以及相关专业从业人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

固定翼微型飞行器设计引论:含3个研究案例/  
(美)托马斯·J. 穆勒(Thomas J. Mueller)等著;宋  
笔锋,王利光,杨文青译. --北京:航空工业出版社,  
2016.8

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文:Introduction to the Design of Fixed-  
Wing Micro Air Vehicles: Including Three Case  
Studies

ISBN 978-7-5165-1089-6

I. ①固… II. ①托… ②宋… ③王… ④杨… III.  
①飞行器—研究 IV. ①V47

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第209452号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2012-8733

Translated from the English language edition: *Introduction to the Design of Fixed-Wing Micro Air Vehicles: Including Three Case Studies*, By Thomas J. Mueller, James C. Kellogg, Peter G. Ifju, and Sergey V. Shkarayev. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978-1-56347-849-9. Copyright©2007 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

固定翼微型飞行器设计引论:含3个研究案例  
Gudingyi Weixing Feixingqi Sheji Yinlun: Han 3 ge Yanjiu Anli

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年8月第1版

2016年8月第1次印刷

开本:710×1000

1/16

印张:17.75

字数:357千字

印数:1—2000

定价:90.00元

## 《AIAA 航空航天技术丛书》审委会

顾问：(按姓氏笔画排列)

尹泽勇 石 屏 冯培德 刘大响 关 桥 杨凤田 李 天  
李 明 宋文骢 张彦仲 陈一坚 陈祥宝 赵振业 唐长红  
顾诵芬 曹春晓 颜鸣皋

主任：林左鸣

副主任：谭瑞松 顾惠忠 吴献东 张新国

委员：(按姓氏笔画排列)

王 坚 王之林 王向阳 王英杰 王润孝 卢广山 曲景文  
华 俊 刘选民 刘春晖 杨圣军 李晓红 吴 松 汪亚卫  
陈元先 陈灌军 庞 为 郭恩明 都本正 彭卫东 葛子干  
蔡 毅 魏金钟

## 《AIAA 航空航天技术丛书》编委会

主任：张新国

副主任：王英杰 魏金钟

委员：(按姓氏笔画排列)

丁文强 丁全心 王永庆 王永明 王明皓 王聪梅 车 宏  
牛文生 邓景辉 尹红顺 艾俊强 帅朝林 田 泽 白晓东  
冯子明 巩水利 朱知寿 朱荣刚 刘永泉 江和甫 孙 聪  
杨 伟 杨 旭 杨 超 杨朝旭 苏炳君 李文正 李东杰  
李孝堂 李宏新 李周复 严成忠 吴希明 吴良斌 吴学仁  
何胜强 沈锡钢 宋笔锋 张 弘 张 波 张明习 张继高  
陆志东 陆虎敏 陈聪慧 范彦铭 欧阳绍修 罗安阳 周自全  
赵 霞 侯敏杰 姚 华 袁 立 聂海涛 徐华胜 郭德伦  
益小苏 陶春虎 桑建华 黄 佑 黄传跃 曹奇凯 章怡宁  
梁相文 梁晓庚 董建鸿 强宝平 童明波 曾 军 曾元松  
蒲小勃 褚林塘 臧 军 廖志忠 樊会涛

### 编委会办公室

主任：刘 鑫

副主任：史晋蕾 李苏楠

成员：(按姓氏笔画排列)

安玉彦 李金梅 郭 玮 郭倩旒

## 丛书序（一）

中国航空工业要融入世界航空产业链，进行国际化开拓，参与国际合作和竞争，与世界航空航天企业共谋发展，需要的是强大的技术支撑。构建先进的技术研发平台，加速推进前沿科学技术的研究，加速推进航空发动机技术和航空先进材料技术领域的基础及应用技术研究、新产品研发与技术创新，关键是要有一批具有高水平、高素质的航空航天专业人才。而人才的培养离不开知识的传承，这套《AIAA 航空航天技术丛书》就为我们提供了一个很好的资源。

习人之长，补己之短，正视不足，奋发崛起，社会发展规律普遍如此。从这套书中，我们不仅能读到长久以来人类在探索天空的过程中积跬步而形成的基础的、科学的、先进的专业知识和技术，以及崭新的思维方式和解决问题的技巧及方法，更重要的是能在学习这些成功经验的同时，多注意看看前车之鉴，避开陷阱。在这里我想要与大家共勉的是，即使是在百科全书中也不能找到所有问题的答案，科学发展永无止境，航空航天业的进步带动着社会高精尖技术的发展，其中还有很多领域及问题需要我们去探索 and 解决，因此，我们要抱着虚心的态度去学习，勇于探索的态度去思考，用好这些书，读好这些书。

科技的进步是整个社会的进步。愿我们的科技工作者、科研管理人员和广大的院校师生，既能够从中学习到知识、寻找到答案，更能够汲取精华，并能积极探索，与自身的知识、技术和经验相结合，在中国航空工业整翼飞升之时，迸发出更加绚丽的思想火花。



中国航空工业集团公司董事长

## 丛书序（二）

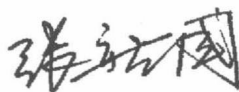
航空航天业是关系国家安全和国民经济命脉的战略性新兴产业，是高投入、高附加值的技术密集型产业。由于其技术含量高、产业链长、带动性强，其发展对我国经济结构调整、实现产业优化升级、提高综合国力具有重要意义。金融危机之后，全球对于实体经济的认识回归到正确的轨道上来，重振制造业已成大家共识。而依靠高新技术和高产品附加值的高端制造业，被认为是推进工业转型升级的突破口。航空航天业作为高端制造业的重中之重，如何发挥其“火车头”作用引领制造业拥有强大竞争优势，成为当务之急。而解决这一问题的关键，就是突破核心技术，加强自主创新。

相比欧美等发达国家，我国并没有系统地经历科学革命和工业革命的洗礼。科学技术和工业基础落后，是导致我们高端制造业发展缓慢的原因之一。科学技术的进步非一朝一夕之力。通常来讲，一个产业发展所依托的先进技术至少需要10~20年的储备周期。以前的飞机材料都是单一金属的，现在随着材料技术、制造技术的进步，发展到铝合金、铝镁合金、钛合金以及碳纤维材料。这种科学技术的进步改进了飞机的性能和功能，包括后期出现的预警机、加油机、空天飞机等，其背后凭借的也是飞机的电子设备、任务系统、功能系统等的不断升级，依靠的是一系列科学技术的积累。

夯实技术基础并谋求创新，除了依靠自身积极探索、不断积累技术成果，还要吸纳国外先进的技术成果和经验，建立开放式的科学技术发展架构。

着眼于此，中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）从美国航空航天学会（AIAA）的专业出版物中选择优秀图书引进翻译出版为中文版，推出了这套《AIAA 航空航天技术丛书》。熟悉AIAA的同行们都知道，AIAA的出版物专注于航空航天领域，包括专业图书、期刊、会议论文和标准等，是为航空航天业提供信息服务的重要组成部分。AIAA的图书工作委员会及其严格的审查制度保证了其图书具有较高的学术水平和技术含量。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》涵盖飞行器的结构技术、材料技术、制造技术、气动技术、推进技术、试验技术、控制技术、航电系统和武器系统等方面，是对国内有关专业领域的有益补充。这次引进翻译出版工作所涉及的专业领域较多，工作繁杂，难度很大，需要协调的事情也很多，衷心希望最终能够达到预期目的，真正为促进国际化的交流与合作、为培养高素质的航空航天专业人才、为前沿科学技术的探索和创新起到应有的作用。



中国航空工业集团公司副总经理

## 给 AIAA 中文版丛书的序言

美国航空航天学会 (AIAA) 由成立于 1930 年的美国火箭协会和成立于 1932 年的美国航空科学学会于 1963 年合并而成。自此, AIAA 就作为最早的平台服务于美国及全球航空航天技术的创新者、卓越者和引领人。广为人们所熟悉的奥维尔·莱特, 尼尔·阿姆斯特朗, 弗兰克·惠特尔, 凯利·约翰逊, 西奥多·冯·卡门和沃纳·冯·布朗都是 AIAA 的会员, 而每 6 名 AIAA 的会员中就有超过 1 名会员来自美国以外的国家或地区。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》是 AIAA 和中航出版传媒有限责任公司 (航空工业出版社) 良好合作的硕果。这种合作关系使得 AIAA 与中国航空学会之间以及 AIAA 与中国宇航学会之间的合作相得益彰。作为世界上最大的服务于航空航天业的技术学会, 由我们来推进 AIAA 图书中文版及双语版的出版和促成我们会员之间的交流是极为恰当之事。

我们的合作最早是由中航出版传媒有限责任公司所提出的, 最初主要关注在对 AIAA 技术图书的翻译上, 采用译注的形式使得英文技术词汇有限的学生能够掌握图书阐述的概念。正如你们所看到的这套丛书, 现在它已不仅限于最初的目的和形式。我们不会忘记我们的宗旨, 而当我们展望未来时, 我们感到非常高兴的是这套 AIAA 中文版图书包含了 AIAA 所出版的所有类别的图书: 教育系列 (大学教材)、航空航天进展系列 (科技) 以及飞行图书馆系列 (大众爱好)。

另外, 最近几年里, AIAA 的所有图书、期刊文章和技术会议论文都已进行电子版存档, 我们也希望我们的国际会员和合作伙伴能够很方便地访问这个强大的航空航天信息图书馆。

由最初在出版上的合作开始, AIAA 已增强了其与中国的合作关系, 包括代表团互访和交流等活动。这些互惠活动使美国和中国的航空航天团体之间的联系纽带更加牢固, 也使双方收获了重要的友谊。各种开拓性的互动将使我们的国家间拥有更好的相互理解与合作关系。AIAA 非常感谢中国航空工业集团公司的张新国副总经理、中航工业经济技术研究院王英杰院长、中航出版传媒有限责任公司的刘鑫总经理和李苏楠主任为此次合作所做出的努力。

AIAA 致力于服务广大会员和航空航天业。如今，AIAA 有许多来自中国的会员，随着更多的学生和专业人士通过这套丛书、AIAA 的其他出版物和直接的交流而对 AIAA 有更多的了解，我们希望来自中国的会员数量将会不断增多。而对于如何改善我们的服务，我们认为最好的想法是来自于我们的读者和会员。欢迎你们提出建议，并且我相信中航出版传媒有限责任公司会将你们提出的建议转达给 AIAA。

我们期待着未来长期且富有成效的合作。



罗伯特·迪克曼  
美国航空航天学会主席

# 原 版 序

我们很高兴将这本由托马斯·J. 穆勒、詹姆斯·C. 凯洛格、彼得·G. 伊夫尤和谢尔盖·V. 斯卡拉耶夫编写的《固定翼微型飞行器设计引论：含3个研究案例》呈现给各位读者。相信这本书将因其对固定翼微型飞行器这一重要且快速发展的领域进行的全面而深入的阐释而将在科技界广为传阅。这本书共分为7章，大约310页（英文原版书）。

几位作者在此领域有着渊博的专业知识，因此非常适合撰写本书。他们收集整理的材料极为出色，并且用清晰明了的方式组织并呈现出来。

AIAA 教育系列丛书旨在覆盖航空航天领域的各个方面，包括基本理论、应用和设计。完整的书目信息表按本书最后一页所列信息查询。出版这一系列丛书的指导思想是推出一套既可用于大学教学，又可用于继续教育或专业课程的指导材料，此外，这套丛书也可作为独立研究的参考资料。欢迎大家提出新的话题或对作者的意见和建议。

约瑟夫·A. 舒茨

AIAA 教育系列丛书主编

## 译者序

20 世纪末,随着微电子和微机电等技术的飞速发展,飞行器的设计开始出现一种向小型化、微型化发展的趋势。微型飞行器的概念一经提出,便引起世界上许多国家的广泛关注,并纷纷投入大量人力、物力成立专门研究机构,开始进行相关的技术研究工作。同时,各种级别的微型飞行器国际竞赛也相继成功举办,参赛国家和参赛的飞行器都逐年增多,技术水平也逐年提高。微型飞行器的研究热潮已经在全世界范围内形成。

本书的作者均是微型飞行器研究方面的专家。托马斯 J. 穆勒是圣母大学的荣誉教授,在伊利诺伊理工学院获得学士学位,在伊利诺伊香槟大学获得硕士和博士学位,是 AIAA、RAeS、ASME 的会员,在微型飞行器的研究方面有很深造诣。

本书简要介绍了无人飞行器的发展历史,分析了小展弦比机翼的空气动力学机理、固定翼微型飞行器动力系统和总体设计的基本方法,并以三种不同构型的固定翼微型飞行器为例详细介绍了微型飞行器的设计方法和步骤。

本书对该领域的专业人士以及学习微型飞行器设计、制作和测试的学生都具有一定的借鉴作用,同时也对研发更小的微型飞行器具有指导意义。

本书由西北工业大学航空学院多年从事相关教学与科研的教师负责翻译。全书由宋笔锋教授担任主译,翻译成员包括:宋笔锋、王利光、杨文青。此外,博士生薛栋、李洋、王进、付鹏和李博扬等参与了部分资料整理与文字编辑等工作,感谢他们对本书翻译工作的帮助与大力支持。

译者

2016 年 7 月于西安

# 原版前言

设计能用于特殊任务和有限续航任务、尽可能小的飞行器的一系列尝试可追溯到 1996 年。这类飞行器可以携带视觉、听觉、化学或生物传感器。这种被称为微型飞行器 (Micro Air Vehicle, MAV) 的飞行器之所以能引起大家的兴趣,是由于现在电子侦测和监测传感器设备可以被小型化,使所有负载的质量减为了 18g 甚至更少。尽管这项计划的远期目标是研制出质量小于 30g、展长约 8cm、可以飞行 20 ~ 30min、速度在 30 ~ 65km/h 的飞行器,但最初的目标是研制出展长小于 15cm、质量不超过 90g 的飞行器。满足最初演示要求的固定翼微型飞行器在两年内就实现了,它们使用了航模的设备。由于这些飞行器尺寸小,而且必须以较低的速度飞行,因此不同布局的气动效率问题备受关注。对于一个尺寸为 15cm 的飞行器,由于弦向相对雷诺数在  $5 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$ ,在微型飞行器引起大家的兴趣之前,几乎没有小展弦比机翼性能方面的资料可供参考。低成本航模设备的出现加速了固定翼微型飞行器在设计方法方面的迅速发展,尤其是大学生们推动了这一历程。这使一年一度的微型飞行器比赛中出现了种类更为繁多的构型设计,通过比赛来检验飞行器的性能也使人们兴趣盎然。

本书简要介绍了使微型飞行器出现的无人飞行器演变历程和始于 1997 年的学生比赛。本书还包括了小展弦比机翼的基本空气动力学、推进系统、固定翼微型飞行器的基本设计理念和自动驾驶仪与微型飞行器的集成方法。案例分析介绍了三种不同机翼构型(刚性机翼、柔性机翼和可变形机翼)。本书旨在帮助读者设计、制作并且测试微型飞行器,并借此推进体积更小的微型飞行器的研制。

尽管微型飞行器可以使用廉价的航模元件制作,但它们不应由缺乏经验的驾驶员在不合适的室外环境中,以及缺少飞行训练和保护措施的情况下飞行。微型飞行器操作难度很大,也很难引起周围人员足够的注意。在美国,印第安纳州曼西市的航模协会可以帮助你找到合适的飞行场地、飞行指导和保障。

托马斯·J. 穆勒, 詹姆斯·C. 凯洛格,  
彼得·G. 伊夫尤, 谢尔盖·V. 斯卡拉耶夫  
2006 年 5 月

# 目 录

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| 第 1 章 微型飞行器发展概述 .....         | ( 1 )   |
| 1.1 引言 .....                  | ( 1 )   |
| 1.2 历史回顾 .....                | ( 4 )   |
| 1.3 小结 .....                  | ( 32 )  |
| 致谢 .....                      | ( 33 )  |
| 参考文献 .....                    | ( 33 )  |
| 第 2 章 空气动力学、推进系统及设计方法基础 ..... | ( 39 )  |
| 术语表 .....                     | ( 39 )  |
| 2.1 引言 .....                  | ( 41 )  |
| 2.2 刚性机翼 .....                | ( 46 )  |
| 2.3 柔性翼与可变翼 .....             | ( 64 )  |
| 2.4 推进系统 .....                | ( 66 )  |
| 2.5 基于试验数据的微型飞行器设计 .....      | ( 92 )  |
| 2.6 数值方法设计微型飞行器 .....         | ( 95 )  |
| 2.7 小结 .....                  | ( 95 )  |
| 致谢 .....                      | ( 96 )  |
| 参考文献 .....                    | ( 96 )  |
| 第 3 章 微型飞行器自动驾驶仪的集成 .....     | ( 104 ) |
| 术语表 .....                     | ( 104 ) |
| 3.1 引言 .....                  | ( 106 ) |
| 3.2 微型飞行器的设计和性能介绍 .....       | ( 110 ) |
| 3.3 飞行控制系统 .....              | ( 114 ) |
| 3.4 微型飞行器的稳定性和控制设计 .....      | ( 117 ) |
| 3.5 飞行测试 .....                | ( 135 ) |
| 3.6 小结 .....                  | ( 139 ) |

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| 附录 传递函数 .....                         | (140)        |
| 致谢 .....                              | (140)        |
| 参考文献 .....                            | (141)        |
| <b>第 4 章 研究案例：MITE 刚性翼微型飞行器 .....</b> | <b>(144)</b> |
| 术语表 .....                             | (144)        |
| 4.1 引言 .....                          | (145)        |
| 4.2 NRL 和 DAPPA 的微型飞行器计划 .....        | (145)        |
| 4.3 MITE 构型的由来 .....                  | (146)        |
| 4.4 MITE 的详细设计 .....                  | (150)        |
| 4.5 飞行试验和设计演变 .....                   | (165)        |
| 4.6 稳定性和飞行控制 .....                    | (169)        |
| 4.7 MITE 的演示验收及向“龙眼”无人机的转变 .....      | (172)        |
| 4.8 小结 .....                          | (174)        |
| 致谢 .....                              | (175)        |
| 参考文献 .....                            | (175)        |
| <b>第 5 章 研究案例：柔性翼微型飞行器 .....</b>      | <b>(177)</b> |
| 术语表 .....                             | (177)        |
| 缩略语 .....                             | (178)        |
| 5.1 引言 .....                          | (178)        |
| 5.2 MAV 基本描述 .....                    | (182)        |
| 5.3 MAV 制造方法 .....                    | (183)        |
| 5.4 柔性翼特性的风洞试验 .....                  | (191)        |
| 5.5 柔性翼的建模 .....                      | (213)        |
| 5.6 飞行试验 .....                        | (221)        |
| 5.7 小结 .....                          | (223)        |
| 致谢 .....                              | (223)        |
| 参考文献 .....                            | (223)        |
| <b>第 6 章 研究案例：可变翼微型飞行器 .....</b>      | <b>(226)</b> |
| 术语表 .....                             | (226)        |
| 6.1 引言 .....                          | (227)        |

|     |             |       |
|-----|-------------|-------|
| 6.2 | 方案设计        | (230) |
| 6.3 | 风洞测试        | (235) |
| 6.4 | 可变翼微型飞行器的设计 | (246) |
| 6.5 | 飞行测试        | (252) |
| 6.6 | 小结          | (256) |
|     | 致谢          | (256) |
|     | 参考文献        | (257) |
| 第7章 | 总结          | (260) |
|     | 支撑材料        | (264) |

# 第 1 章 微型飞行器发展概述

托马斯·J. 穆勒<sup>①</sup>  
印第安纳州圣母大学

## 1.1 引言

### 1.1.1 背景

1992 年 12 月, 兰德公司为美国国防部预先研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 进行了一项调研, 论证将微型装置应用于军事的可行性。该项研究认为在未来 10 年内, 研制出翼展 1cm (大约 0.4in<sup>②</sup>)、有效载荷小于 1g (0.035oz<sup>③</sup>) 的飞行器是有可能实现的。1993 年兰德公司针对能够遥控或自动飞行的微小型飞行器进行了可行性研究。随后在 1995 年, 林肯实验室开展了一项更为详细的研究, 这项研究促成了 1995 年秋 DARPA 举行的专题研讨会。与此同时, 美国海军研究实验室 (Naval Research Laboratory, NRL) 的 R. J. 福克和 DARPA 的 M. S. 弗朗西斯提议研制 15.24cm (6in) 的飞行器 (源自“与托马斯·J. 穆勒的谈话”, R. J. 福克于华盛顿美国海军研究实验室, 2004 年 5 月 11 日)。这类飞行器之所以具有技术可行性是一系列微技术发展的结果, 其中包括微机械系统和微电子元件技术。人们设想这些小巧的飞行器可由单人携带和操控, 并能完成特殊、有限续航时间的任务, 还可以携带视觉、听觉、化学或生物传感器。这类飞行器被称为微型飞行器 (Micro Air Vehicle, MAV), 它之所以引起人们的兴趣是由于电子侦测和监测传感设备的小型化, 使其有效载荷降至 18g (0.63oz) 或更少。最初的目标是研制一种最大尺寸小于 15.24cm (6in), 重量<sup>④</sup>小于 90g (3oz) 的飞行器 (“与托马斯·J. 穆勒的谈话”)。图 1-1 是由美国海军研究实验室的 R. J. 福克在 1995 年 11 月绘制的微型飞行器基准设计。在本章的历史展望部分会有关于 R. J. 福克如何设定这一最初目标的详细描述。

---

① 托马斯·J. 穆勒拥有本章内容的版权, 并授权给美国航空航天学会 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA) 出版。穆勒是 AIAA 会员, 并被授予罗斯-吉布森荣誉教授。

② 1in = 25.4mm。

③ 10oz = 28.3495g。

④ 本书“重量”均为质量 (mass) 概念, 单位为 kg 或 lb。

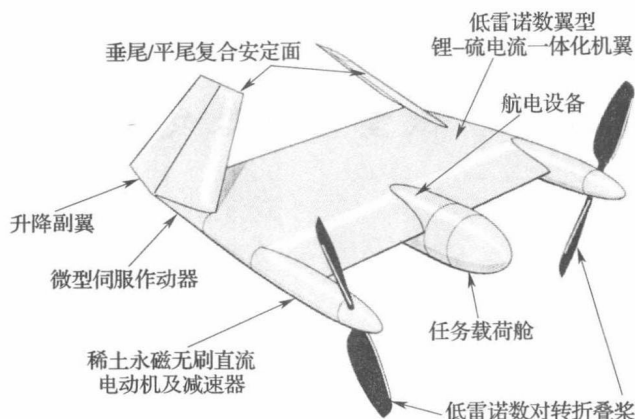


图 1-1 美国海军研究实验室 R. J. 福克设计的微型飞行器基准设计  
(华盛顿美国海军研究实验室授权发表)

固定翼微型飞行器吸引人的主要用途包括侦察、探测、通信和隐蔽传感器投放等。侦察任务包括视频获取（白天、黑夜）、战场（主要指“越障”的情况）和城市区域（主要指“探测拐角后方”情况）的红外成像，根据这些实时图像就能确定敌人的数量和位置。这类信息也能用于人质解救和缉毒行动。由于微型传感器是可用的，因此飞行器的探测任务包括生物药剂、化学物品和核物质（如放射性）的检测。微型飞行器还可用于提高信息实时性，特别是在城市环境中或其他要求保持不间断监视的情况。另一个可能的任务是在解救人质或缉毒行动中在建筑物外围放置声学传感器。

固定翼微型飞行器要求能在多种可能的环境下工作，例如城区、丛林、荒漠、海洋、高山和寒带地区。而且，微型飞行器必须能够在各种天气条件（例如降水、风切变和突风）下完成任务。由于这些飞行器通常在相对较低的高度（例如低于 100m）飞行，建筑物、树木、小山或者类似的障碍物都可能出现，因此还需要具备避障系统。

MAV 的发展需要解决气动和控制、推进和能源、导航以及通信等方面的技术问题。不同布局固定翼的气动效率是大家尤其重视的一个内容，因为微型飞行器在  $24 \sim 64 \text{ km/h}$  ( $15 \sim 40 \text{ mile}^{\text{①}}/\text{h}$ ) 的极低速度下飞行，相应的弦向雷诺数的范围只有  $5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ （弦向雷诺数是一个无量纲参数，是指巡航速度、平均气动弦长的乘积除以空气动力黏度），这使得微型飞行器处于完全不同于传统飞行器的特殊范畴。飞行器的总重  $W$  与弦向雷诺数  $Re$  的关系如图 1-2 所示，微型、小型和大型无人机的有效载荷  $W_L$  与翼展  $b$  的关系如图 1-3 所示。直到现在，有关低雷

① 1 mile = 1609.344m。