



国防科技著作精品译丛

Morphing Aerospace Vehicles and Structures

# 变体飞行器与结构

[美] John Valasek 编著

刘华伟 刘 凌 冯国强 何 利 译  
冷智辉 谢文俊 张 亮 审



WILEY



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 变体飞行器与结构

Morphing Aerospace Vehicles and Structures

---

[美] John Valasek 编著

刘华伟 刘 凌 冯国强 何 利 译  
冷智辉 谢文俊 张 亮 审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字：军 -2012 -099 号

图书在版编目（CIP）数据

变体飞行器与结构/（美）约翰·瓦拉塞克（John Valasek）编著；  
刘华伟等译. — 北京：国防工业出版社，2017. 1  
（国防科技著作精品译丛）  
书名原文：Morphing Aerospace Vehicles and Structures  
ISBN 978-7-118-10968-9

I. ①变… II. ①约… ②刘… III. ①飞行器—研究 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 012717 号

Translation from the English Language edition:

*Morphing Aerospace Vehicles and Structures*

By John Valasek

Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd.

All rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defense Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书简体中文版有 John Wiley & Sons, Ltd. 授权国防工业出版社独家出版发行。  
版权所有，侵权必究。

变体飞行器与结构

[美] John Valasek 编著  
刘华伟 刘 凌 冯国强 何 利 译

---

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| 出版发行  | 国防工业出版社                 |
| 地址邮编  | 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048 |
| 经 售   | 新华书店                    |
| 印 刷   | 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司          |
| 开 本   | 710 × 1000 1/16         |
| 印 张   | 20½                     |
| 字 数   | 330 千字                  |
| 版 印 次 | 2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷  |
| 印 数   | 1—2000 册                |
| 定 价   | 106.00 元                |

---

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：(010) 88540777 发行邮购：(010) 88540776  
发行传真：(010) 88540755 发行业务：(010) 88540717

# 译者序

近年来,随着空气动力学和飞行控制技术的不断进步,从仿生学中发展起来的变体飞行器因其显著的灵活性和过机动优势得到了人们的重视。尤其是在材料技术和智能控制技术的支撑下,可变体的飞行器在航空航天领域显露出了巨大的应用前景,成为该领域研究中的一个热点。

本书作者 John Valasek 是美国得克萨斯农工大学教授,曾经在美国国防部高级研究计划局担任过项目经理,主要研究方向为空气动力学、飞行控制工程,具有丰富的教学和科研经验,尤其在飞行器设计和控制方面有着深厚的学术造诣。

本书主要内容为变体飞行器的空气动力、结构与控制问题,是飞行器技术中包含的相关学科和应用的综合。与国内其他介绍变体飞行器的书籍相比,本书分别阐述了变体飞行器的变体原理、控制与动力学、结构与材料等实现变体的核心问题。针对性、专业性和实用性更强,对于变体飞行器的研究设计具有更强的指导作用,对相关专业的研究生、高年级本科生、高校教师、科研人员和工程技术人员都具有很好的参考价值。

本书分为 3 个部分,共计 12 章,由刘华伟负责组织翻译和审校工作。参加翻译的人员有刘凌、冯国强、何利、张吉广、赵晓林、孟天麒、叶广强等。另外,参与整理排版和辅助工作的人员有张鹏等。中航工业江西洪都航空工业集团冷智辉高工,空军工程大学谢文俊教授、张亮副教授对全部译稿进行了认真校对并最终定稿。

由于译者水平有限,译文中难免存在不当之处,敬请广大读者批评指正。

译者

2016 年于西安

# 前言

变体系统是可重构系统, 不仅包括几何形状变化, 还包括色彩、辉光和电磁变化。变体飞机上伸缩自如的起落架、襟翼和前缘缝翼以及可变后掠角机翼这些今天看起来很普通的东西, 七八十年前却是不可想象的。如果那个时代的人看到商用喷气式飞机着陆时打开阻力板和副翼, 机翼自动变形, 怎能不啧啧称奇呢? 当然, 这些飞机所担负的是常规任务, 而本书论述的是面向未来的变体系统, 那时飞机将担负具有挑战性的任务, 采用今天的方法不能完成这些任务。

“Morphology”(形态) 这个术语我第一次看到是在 Holt Ashley 教授编著的《飞行器工程分析》这本书的定稿中, 该书第一章的标题就是“飞行器的形态”。Holt 是 20 世纪 60 年代末我在斯坦福大学的指导教师, 他是著名的学者、研究员、工程师和英语语言大师。我曾经提议他用别的词, 例如“形状”(Shape) 来替换“形态”这个词, 但他回答说“形态这个词太棒了, 描述得非常准确!” 就这样, 这个词沿用至今。

在担任美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Project Agency, DARPA) 的项目经理的 4 年期间, 我的工作之一就是发展全新的、具有军事用途的变体飞行器。DARPA 项目非常成功, 我们发现: ① 变体本身, 相较于其带来的好处, 花费不高; ② 当飞行器担负的任务与飞行器设计相冲突时, 即需要在大机翼大发动机和小机翼小发动机, 燃油需求小的飞行器之间进行取舍时, 变体概念就发挥了重要作用, 有时除了变体其他方法都行不通。

要想担负未来的飞行任务, 飞行器形状和特性都要发生改变, 而这

需要新的技术,从发动机、机翼机构、智能材料到先进的分析技术等各个方面的技术支持。本书仅为开展这些工作提供了一些有价值的信息。该书首先介绍的是生物界对变体的启示。俄罗斯工程师 Genrich Altshuller 说过“自然界里有很多隐藏的专利”。第 8 章是关于飞行器的栖息运动,提出了集成变体技术的使用方法。第 9 章介绍智能材料和变体设备的控制,为如何解决系统集成面临的问题提供了视角。

Oliver Wendell Holmes 曾经写到“人的大脑一旦注入了新想法就再也回不到原来的维度了”,该书为扩展思维提供了一个机会。我鼓励你们读这本书,从中获取一些有用的观点,希望对变体飞机的发展有所贡献。

Terry A. Weisshaar  
美国普渡大学  
西拉法叶校区荣誉教授

# 丛书序

航空航天是一个范围广、涉及面宽的领域,覆盖多种学科和专业,其中除了工程还有很多其他支撑产业,借助它们,航空航天工业制造出激动人心的技术先进的飞行器。而不同空天领域的专家需要把他们丰富的知识经验传授给业内的其他人,包括刚入行的大学毕业生。

“航空航天系列丛书”旨在成为一套实用的专题性丛书,适用于工程专业人员、操作人员、用户和相关职业者,如航空航天工业内的商业和法律高管。专题涉及范围很广,涵盖了飞机的设计与开发、制造、使用和保障以及研究和技术方面的基础项目研发,目的是为航空航天工作者提供一些有用的信息。

目前,世界范围内掀起了发展变体飞行器的热潮,意在使飞行器能够根据不断变化的飞行环境调整外形和结构/气动/控制特性,达到提高飞行性能,适应任务变化需求的目的。在这股热潮中涌现出很多概念,有一些还在一系列的原型机上进行了展示。

《变体飞行器与结构》是该丛书的第一本。该书对变体飞行器的现状进行了概述,指出了这项技术未来可能的发展方向。由于很多变体概念灵感来源于昆虫、鸟类和蝙蝠,该书首先介绍了这3类动物的仿生几何变化,其次介绍了与变体飞行器的飞行控制和力学相关的问题,最后介绍了智能材料的应用和变体的分层控制。我们很高兴这本书能入选“威利航空航天系列丛书”。

Peter Belobaba, Jonathan Cooper, Roy Langton 和 Allan Seabridge

# 致谢

本书能够面世要感谢很多人和组织,他们为本书的出版做出了很多卓有成效的工作。我的妻子 Stephanie 多年前就鼓励我写一本书,正是因为她即便在忙于毕业课题时也给予我的始终如一的支持和鼓励,才有了这本书的问世。我的研究生和本科生们也为这本书付出了辛勤的劳动,他们给我带来了快乐和灵感。我从他们身上学到了很多,并且将继续受益。我要感谢我在得克萨斯 A&M 大学各系的同事们,他们给我的研究提供了很多宝贵的意见和建议。特别感谢布朗大学的莎朗·M. 史沃兹博士对本书第 2 章提出的具体修改意见。

这本书起笔于我的“教师发展假期”,在这期间和之后的时间里,得克萨斯 A&M 大学航空航天工程系的领导们: Helen L. Reed 博士, Walter E. Haisler 博士和 Dimitris C. Lagoudas 博士不仅给予我鼓励,还给我提供了大量的便利条件,从而使这本书得以顺利完成。

赞助商们给这本书的所有撰写者都提供了资金支持,其中两位赞助商更是给予了全程特殊支持。美国空军科学研究办公室根据 FA-9550-08-1-0038 合同派出了技术指导 Scott Wells 博士、William M. Mceneaney 博士和 Fariba Fahroo 博士。美国国家航空航天局得克萨斯航空飞行器智能生物纳米材料与结构研究所给予了早期的帮助,其技术主管为 Tom Gates 博士。对此一并表示感谢。

位于奇切斯特的约翰·威力和桑斯有限公司的工作人员对这本书帮助也很大,和他们共事是件令人愉悦的事。组稿编辑 David Palmer 和 Debbie Cox 是这本书的原始构想者,他们和我进行沟通,耐心地鼓励我

完成书稿,并且在我完稿后把它推荐给了出版商。“工程技术”的项目编辑 Nicky Skinner 是个热心宽厚的人,我很高兴认识她并与她共事,她的突然离世令人伤心。这本书寄托了我和所有认识她对她的哀思。

最后,我要谢谢所有参与此书撰写和给出专家意见的人,我为能有你们这样的同事和合作伙伴而引以为荣,你们是我的朋友!

John Valasek  
美国得克萨斯大学站  
2011 年 7 月

# 目录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 概述 .....      | 1  |
| 1.1 简介 .....        | 1  |
| 1.2 早期: 仿生学 .....   | 2  |
| 1.3 中期: 可变布局 .....  | 5  |
| 1.4 后期: 回归仿生学 ..... | 9  |
| 1.5 结论 .....        | 10 |
| 参考文献 .....          | 10 |

## 第一部分 仿生学

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 2 章 昆虫、鸟类和蝙蝠的翅膀变形: 构造和功能 ..... | 13 |
| 2.1 概述 .....                     | 13 |
| 2.2 昆虫 .....                     | 14 |
| 2.2.1 翅膀的结构和机理 .....             | 15 |
| 2.2.2 全翅膀变形 .....                | 18 |
| 2.3 鸟类 .....                     | 24 |
| 2.3.1 翅膀的结构和机理 .....             | 25 |
| 2.3.2 全翅膀变形 .....                | 27 |
| 2.3.3 局部羽毛的弯曲 .....              | 30 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| 2.4 蝙蝠                   | 31        |
| 2.4.1 翅膀的结构和机理           | 33        |
| 2.4.2 全翅膀变形              | 34        |
| 2.5 结论                   | 36        |
| 致谢                       | 37        |
| 参考文献                     | 37        |
| <b>第 3 章 微型航空器的仿生学变形</b> | <b>43</b> |
| 3.1 微型航空器                | 43        |
| 3.2 微型航空器设计理念            | 46        |
| 3.3 MAV 的技术挑战            | 48        |
| 3.4 MAV 和 NAV 的飞行特性      | 50        |
| 3.5 MAV 的仿生变体概念          | 50        |
| 3.5.1 机翼平面形状             | 52        |
| 3.5.2 翼型                 | 52        |
| 3.5.3 尾翼调节               | 53        |
| 3.5.4 重心移动               | 53        |
| 3.5.5 扑动调节               | 53        |
| 3.6 MAV/NAV 变体展望         | 53        |
| 3.7 未来挑战                 | 54        |
| 3.8 结论                   | 56        |
| 参考文献                     | 56        |

## 第二部分 控制与动力

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>第 4 章 智能变体无人机的形状与飞行控制</b> | <b>61</b> |
| 4.1 简介                       | 61        |
| 4.2 自适应强化学习控制架构的功能           | 62        |
| 4.3 学习飞行器的形状变化               | 63        |
| 4.3.1 强化学习系统概述               | 63        |
| 4.3.2 变形学习 Agent 的实现         | 66        |
| 4.4 变体飞行器的数学模型               | 68        |
| 4.4.1 空气动力学模型                | 68        |
| 4.4.2 本构方程                   | 68        |

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 4.4.3 | 模型网格.....                    | 71 |
| 4.4.4 | 动力学建模.....                   | 73 |
| 4.4.5 | 参考航迹.....                    | 76 |
| 4.4.6 | 形状记忆合金驱动器动力学.....            | 76 |
| 4.4.7 | 变体翼的控制效应.....                | 78 |
| 4.5   | 变体控制律.....                   | 78 |
| 4.5.1 | 姿态控制的结构自适应模型逆 (SAMI) 控制..... | 78 |
| 4.5.2 | 更新律.....                     | 82 |
| 4.5.3 | 稳定性分析.....                   | 82 |
| 4.6   | 数值示例.....                    | 83 |
| 4.6.1 | 目标与范围.....                   | 83 |
| 4.6.2 | 例 1: 学习新的主要目标.....           | 83 |
| 4.6.3 | 例 2: 学习新的中间目标.....           | 87 |
| 4.7   | 总结.....                      | 90 |
|       | 致谢.....                      | 90 |
|       | 参考文献.....                    | 91 |

## 第 5 章 变体飞行器建模与仿真..... 94

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 5.1   | 简介.....           | 94  |
| 5.1.1 | 鸥形翼飞行器.....       | 94  |
| 5.2   | 变体的空气动力学建模.....   | 96  |
| 5.2.1 | 变体的涡格空气动力学.....   | 97  |
| 5.2.2 | 力与力矩的计算.....      | 99  |
| 5.2.3 | 鸥翼变形的空气动力学效应..... | 99  |
| 5.3   | 变体的飞行动力学建模.....   | 101 |
| 5.3.1 | 标准方法概述.....       | 101 |
| 5.3.2 | 扩展刚体动力学.....      | 104 |
| 5.3.3 | 变体建模.....         | 107 |
| 5.4   | 驱动器力矩与功率.....     | 112 |
| 5.5   | 开环机动与变体影响.....    | 116 |
| 5.5.1 | 纵向机动.....         | 117 |
| 5.5.2 | 转弯机动.....         | 122 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 5.6 使用变体控制的鸥翼飞行器 .....                   | 125        |
| 5.6.1 功率优化的变体增稳系统 .....                  | 126        |
| 5.7 小结 .....                             | 129        |
| 附录 .....                                 | 130        |
| 参考文献 .....                               | 131        |
| <br><b>第 6 章 仿鸟飞行器的飞行动力学建模 .....</b>     | <b>134</b> |
| 6.1 简介 .....                             | 134        |
| 6.2 扑翼飞行的特性 .....                        | 136        |
| 6.2.1 飞行平台试验研究 .....                     | 136        |
| 6.2.2 非定常空气动力学 .....                     | 137        |
| 6.2.3 与配置相关的质量分布 .....                   | 138        |
| 6.2.4 非线性飞行运动 .....                      | 140        |
| 6.3 飞行器运动方程 .....                        | 141        |
| 6.3.1 传统飞行器模型 .....                      | 141        |
| 6.3.2 多体模型的配置 .....                      | 144        |
| 6.3.3 运动学方程 .....                        | 145        |
| 6.3.4 动力学方程 .....                        | 146        |
| 6.4 系统辨识 .....                           | 148        |
| 6.4.1 耦合的驱动器模型 .....                     | 149        |
| 6.4.2 尾翼空气动力学 .....                      | 150        |
| 6.4.3 机翼空气动力学 .....                      | 152        |
| 6.5 仿真与反馈控制 .....                        | 153        |
| 6.6 小结 .....                             | 155        |
| 参考文献 .....                               | 156        |
| <br><b>第 7 章 具有时变惯量的变体飞行器飞行动力学 .....</b> | <b>159</b> |
| 7.1 概述 .....                             | 159        |
| 7.2 飞行器 .....                            | 160        |
| 7.2.1 设计 .....                           | 160        |
| 7.2.2 建模 .....                           | 164        |
| 7.3 运动方程 .....                           | 165        |
| 7.3.1 机体坐标系中的状态 .....                    | 165        |

|       |            |     |
|-------|------------|-----|
| 7.3.2 | 时变惯量的影响    | 166 |
| 7.3.3 | 力矩的非线性方程   | 166 |
| 7.3.4 | 力矩方程的线性化   | 167 |
| 7.3.5 | 飞行动力       | 170 |
| 7.4   | 时变极点       | 171 |
| 7.4.1 | 定义         | 171 |
| 7.4.2 | 讨论         | 173 |
| 7.4.3 | 模态解释       | 173 |
| 7.5   | 时变变体的飞行动力学 | 175 |
| 7.5.1 | 变体         | 175 |
| 7.5.2 | 模型         | 177 |
| 7.5.3 | 极点         | 178 |
| 7.5.4 | 模态解释       | 184 |
|       | 参考文献       | 186 |

## 第 8 章 关于变体飞行器在做栖息运动时的

### 最佳轨迹控制问题

|     |           |     |
|-----|-----------|-----|
| 8.1 | 简介        | 189 |
| 8.2 | 飞行器的描述    | 191 |
| 8.3 | 飞行器运动方程   | 193 |
| 8.4 | 空气动力学     | 198 |
| 8.5 | 栖息的最佳飞行轨迹 | 204 |
| 8.6 | 优化结果      | 210 |
| 8.7 | 结论        | 217 |
|     | 参考文献      | 217 |

## 第三部分 智能材料与结构

## 第 9 章 应用强化学习方法的变体智能材料驱动器控制

|       |            |     |
|-------|------------|-----|
| 9.1   | 智能材料介绍     | 223 |
| 9.1.1 | 压电材料       | 224 |
| 9.1.2 | 形状记忆合金     | 224 |
| 9.1.3 | 控制 SMA 的难点 | 225 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 9.2 强化学习的介绍 .....                    | 226        |
| 9.2.1 强化学习法问题 .....                  | 226        |
| 9.2.2 瞬时差分法 .....                    | 227        |
| 9.2.3 选取行动 .....                     | 230        |
| 9.2.4 函数逼近 .....                     | 231        |
| 9.3 作为强化学习问题的智能材料控制 .....            | 234        |
| 9.3.1 智能材料驱动器的状态空间和行动空间 .....        | 234        |
| 9.3.2 函数逼近选择 .....                   | 236        |
| 9.3.3 控制的开采行动 - 值函数 .....            | 237        |
| 9.4 示例 .....                         | 237        |
| 9.4.1 仿真 .....                       | 238        |
| 9.4.2 试验 .....                       | 243        |
| 9.5 结论 .....                         | 245        |
| 参考文献 .....                           | 246        |
| <b>第 10 章 SMA 驱动器嵌入变体飞行器构件 .....</b> | <b>249</b> |
| 10.1 SMA 简介 .....                    | 249        |
| 10.1.1 内在工作机理 .....                  | 250        |
| 10.1.2 独特工程效应 .....                  | 251        |
| 10.1.3 可选的形状记忆合金 .....               | 255        |
| 10.2 形状记忆合金的航空航天应用 .....             | 257        |
| 10.2.1 固定翼飞机 .....                   | 257        |
| 10.2.2 旋翼机 .....                     | 263        |
| 10.2.3 航天器 .....                     | 265        |
| 10.3 SMA 驱动器特性与系统分析 .....            | 266        |
| 10.3.1 试验技巧与注意事项 .....               | 266        |
| 10.3.2 构建分析工具 .....                  | 271        |
| 10.4 结论 .....                        | 274        |
| 参考文献 .....                           | 276        |
| <b>第 11 章 分级控制与先进变体系统的规划 .....</b>   | <b>285</b> |
| 11.1 介绍 .....                        | 285        |
| 11.1.1 分级控制原理 .....                  | 286        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 11.2 变体动力学和性能图 .....       | 288 |
| 11.2.1 通过图论离散化性能图 .....    | 289 |
| 11.2.2 变体图的规划 .....        | 294 |
| 11.3 先进变体结构中的应用 .....      | 295 |
| 11.3.1 变体图形的构造 .....       | 298 |
| 11.3.2 Kagomé 构架介绍 .....   | 300 |
| 11.3.3 Kagomé 构架变体实例 ..... | 303 |
| 11.4 结论 .....              | 306 |
| 参考文献 .....                 | 306 |

## 第 12 章 综合评估 ..... 309

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 12.1 环顾: 当前发展状况 ..... | 309 |
| 12.1.1 仿生学 .....      | 309 |
| 12.1.2 空气动力学 .....    | 309 |
| 12.1.3 结构 .....       | 310 |
| 12.1.4 自动控制 .....     | 310 |
| 12.2 前瞻: 前进之路 .....   | 310 |
| 12.2.1 材料 .....       | 311 |
| 12.2.2 推进技术 .....     | 311 |
| 12.3 结论 .....         | 312 |

# 第 1 章

## 概述

John Valasek

美国得克萨斯农工大学

鸟类可以飞翔,但机器绝不可能飞起来。

—— John Le Conte, 著名自然科学家,“飞行器面临的难题”, 大众科学月刊, 1888 (11):69.

### 1.1 简介

随着智能材料、传感器和驱动器及与之相关的硬件和微电子技术的发展,研究变体飞行器成为热潮。这些技术的发展使很多学科实现了重大突破,如果这些突破能充分应用于飞机,将会极大提高飞机的安全性、可负担性和环境适应性。几个世纪以来航空先驱们为了这些技术的发展和应做出了自己的贡献。本章旨在通过突出先驱们的研究成果,指出仿生学与航空工程之间的历史联系来简要描述变体飞行器技术的发展历程。第二个目的是勾画出过去 100 多年来变体飞行器领域发展螺旋递进的整个过程。鸟类给了那些寻找飞行空气动力学和控制问题解决方案的航空先驱们灵感。但是,让飞机具备像鸟类一样具有平滑和连续形状变化能力超出了当时的技术水平,所以基于传统的铰链和转轴变形的变几何概念使用了很多年。随着仿生学新研究成果和空气动力学、控制、结构、材料技术的发展,研究的焦点重新回到了实现最初梦想中那些平滑连续变形的飞行器的一系列手段和技术上。本章的主要内容仅限于来自公开的文献上报道的概念和飞行器。