



变体飞机技术*

Morphing Aircraft Technology

张亦波 刘牧东 熊峻江 / 北京航空航天大学交通科学与工程学院

摘要: 论述了变体飞机的发展过程及研究现状, 阐述了变体飞机的基本原理以及关键技术难点, 分析了几种典型的变体机翼及其变体方式, 并对变体飞机的未来发展和应用进行了展望。

Abstract: This paper discusses the development and research status of morphing aircraft, and elaborates the basic principles and key technical difficulties and analyses several typical morphing wings and morphing ways, and prospects the future development and application of morphing aircraft.

关键词: 变体飞机; 发展现状; 变体方式; 自适应

Keywords: morphing aircraft; development; morphing way; adaptive

0 引言

变体飞机(Morphing Aircraft)指在飞行过程中可以改变飞行形状的飞行器。变体飞机早期由机械装置实现, 现今致力于由智能材料实现。变体飞机可以根据飞行环境的不同, 自主地改变气动外形, 更有效地完成飞行任务, 是目前国内外飞行器领域的研究热点之一。变体飞机是从仿生学的角度提出的, 可以根据飞行任务及外界环境变化不断自适应地调整机翼形状, 以保持最佳翼载。通过改变弯度和扭转的分布, 达到机翼面积、后掠角、展弦比等的大尺寸范围变化, 以实现机翼效率的最大化。例如, 在低速飞行时飞机具有较大的展弦比和机翼面积, 而高速飞行时具有较小的展弦比和机翼面积。因此, 变体飞机具备适应多目标飞行任务的能力, 其作战效能比常规固定构型的飞机更高^[1]。真正的变体飞机是一种无缝的、气动效率

很高的飞机, 可光滑而持续地改变机翼形状, 采用智能材料、智能传感器和智能作动器等, 对流动、噪声、气动弹性性能等进行智能控制, 能适应多种任务模式并大幅度提升飞行性能^[2]。

1979年, 美国宇航局(NASA)与波音公司签订合同, 发展柔性复合材料“自适应机翼”, 该机翼可连续变化外形, 获得最大气动效率, 于1987年进行了飞行试验^[3]。1985~1992年, 美国空军、NASA兰利研究中心和罗克韦尔公司合作, 共同发起开展“主动柔性机翼(AFW)”工程计划^[4], 证明AFW是未来多用途战斗机设计的多功能关键技术之一。1996年, 开始了AFW第二阶段的研究, 在美国空军的支持下, 波音公司、NASA德莱顿研究中心和爱德华空军基地等联合开展了“主动气动弹性机翼(AAW)”技术的飞行试验研究^[5], 目的是使其技术进一步转化为实际工程。2002年11月, 装备了AAW的F/A-18A

试验机完成了首次飞行。与此同时, 美国国防部预研局(DARPA)、NASA和美国空军等开展“智能翼(Smart Wing)”研究, 展示了形状记忆合金等智能材料的应用潜力^[6,7]。2003年, DARPA正式启动了MAS (Morphing Aircraft Structures)研究计划, 以保持其绝对的空天作战能力^[8]。在此之前, NASA已经开展了类似的研究, 即Aircraft Morphing Program项目^[9]。MAS计划的目的是为军用飞机开发新一代技术。另外, 美国空军研究实验室(AFRL)、以大学为基地的几个研究机构等也参与了有关Morphing Aircraft的研究项目, 负责与变体系统相关的技术开发。与此同时, 欧洲也启动了由多个单位合作的3AS(Active Aeroelastic Aircraft Structures)计划, 将变体飞机的研制列入了研究日程, 以主动利用气动弹性来提高飞机的飞行效能^[10]。

1 基本原理与关键技术

变体飞机是一种能够改变外形,

* 基金项目: 国家自然科学基金(E050603)和航空科学基金(20095251024)联合资助。



以适应不同的飞行环境、改善空气动力学特性的飞行器。鸟类是变体飞行器在自然界的最好例证。鸟类具有改变翼面形状的能力,在低速飞行时伸展翼面,而在高速飞行时缩拢翼面。鸟类还能改变其翼型,增大翼型弧度能增加最大升力系数,减小失速速度,使其可以低速安全降落。鸟类在降落时还能够增加翼面的上反角,在下降过程中调整可以增加滚转的稳定性。变体飞机的基本原理就是利用智能材料或其他驱动器,根据飞行环境和飞行任务的变化,相应地改变外形,始终保持最优飞行状态。

由于变体飞机需根据不同飞行状态改变构型以适应任务要求,因此它的设计面临诸多复杂问题。要设计出在全飞行包线内均具有优良飞行性能和品质的变体飞机,需要在各种关键技术上取得新的突破。下面针对当前提出的几种不同形式变体飞机,分析了涉及的关键技术^[1,2],对变体飞机的设计具有一定参考价值。

1) 总体及气动协调设计

变体飞机可兼顾起降、巡航、机动等多任务需求,其在总体设计上的思想和方法与常规飞机有所不同。变体飞机的总体设计必须考虑多学科交叉综合,通过总体及气动协调优化设计来保证其在不同飞行条件下均具有较好的气动性能。

2) 智能机翼结构设计

变体飞机的机翼需要在不同飞行状态下均具有优良的性能,因此其机翼结构应具有自适应性。机翼的蒙皮材料和结构驱动技术是变体飞机设计的最大难点之一。

3) 可控性设计

变体飞机构型改变时,如何保证其飞行的可控性也是一个需要解决的

重要问题。通过对机翼变形前后的静态构型和变体动态过程的动态特性研究,可为飞行控制设计奠定基础。

4) 飞行控制系统设计

变体飞机所对应的最优性能与飞行条件和气动外形参数有关。在不同的飞行状态下,这些参数可能在相当大的范围内变化,给变体飞机的飞行控制系统设计带来挑战。变体飞机通过变形改变气动构型后,不同的飞行状态和飞行任务下飞机的操纵舵面的数量和功能会发生变化,因此,在设计变体飞机的控制时,需要研究多功能操纵面的管理问题。

2 典型的变体机翼与变体结构

在对变体飞机进行研究的过程中,了解到机翼几何形状参数对飞行性能的影响很大,表1列出了几种机翼几何形状参数对飞行性能的影响。如何优化机翼形状,使得飞机满足各种条件下最优化飞行就是一个一直以来

吸引人们研究的课题。

变体飞行器通过改变外形来适应不同的飞行环境,改善空气动力学特性。综合已有的变体飞行器的研究成果,按尺度将变体方式分为三类:一是大尺度变体,包括翼展长、后掠角、翼面积和翼面形状等的改变;二是中等尺度变体,包括翼型的弯度、厚度变化和翼的扭转变形等的改变;三是小尺度变体,即局部发生变形,如鼓包,以影响飞行器局部的流动特性。机翼外形对于飞行器的空气动力学特性影响最大。许多变体飞行器的研究集中在机翼变形方式上。例如,美国的MAS计划,寻求实现更大的机翼形变,大尺度的机翼平面形状改变的目标包括:面积改变50%,展弦比改变200%,机翼扭转50%,后掠角改变20°。在研究变体飞机的过程中,主要有以下5种可变机翼。

1) 主动气动弹性机翼

主动气动弹性机翼(Active

表1 机翼几何形状参数对飞行性能的影响

参数变化	对飞行性能的影响	
翼面积	增大	增大升力,增加机翼负载系数
	减小	减小寄生阻力
展弦比	增大	增大升阻比、巡航时间、距离、转弯半径;减小发动机能量消耗
	减小	增大最大速度;减小寄生阻力
上反角	增大	改善滚转性能和侧向稳定性
	减小	增大最大速度
后掠角	增大	增大临界马赫数、上反角效应;减小高速阻力
	减小	增大最大升力系数
根梢比	影响机翼效率(展向升力分布、诱导阻力等)	
扭转分布	阻止翼尖失速效应;影响展向升力分布	
弧度	影响零升迎角、翼型效率、气流分离等	
厚度/弦长比	增大	改善低速翼型性能
	减小	改善高速翼型性能
前缘半径	增大	改善低速翼型性能
	减小	改善高速翼型性能

Aeroelastic Wing, 简称AAW) 的根本特点是充分利用机翼的气动弹性效应, 借助于主动控制系统驱动控制面来控制飞机运动, 并能够达到性能优化和重量减轻的效果^[10]。装备在F/A-18A试验机上的AAW与原有机翼相比, 采用更轻、更具柔韧性的材料, 可以完成机翼的弯曲和扭转, 通过主动气动弹性变形提高飞机在跨、超声速的滚转等操纵控制能力。AAW可以使飞机航程更远、有效载荷更大、燃油更节省, 获得最优的飞行效果。

根据分析计算可知, AAW将使未来的亚声速战斗机重量减轻7%~10%,

使先进超声速战斗机的重量减少18%。通过验证机试验结果可知, AAW技术能获得如下收益: 增强飞行控制能力; 减小气动阻力; 减小机翼结构重量; 抑制颤振和提高颤振临界马赫数; 减缓阵风与机动载荷, 提高飞行机动性等。

2) 折叠机翼

由洛克希德·马丁公司开发的一种变体机翼技术, 其研究成果在一架执行空军任务的小型无人机上进行应用试验。折叠机翼分为内翼和外翼, 内外翼之间、翼身之间靠铰链相连, 采用柔性无缝蒙皮和新型压电作动器, 可将机翼部分或全部打开, 如图2所示。

飞行试验前的分析计算表明: 在40%弦长处测得的有效后掠角改变量达到30°; 机翼展开使有效翼展增加71%, 机翼面积增加180%, 最大升阻比增加52%; 机翼折叠时浸湿面积减小23%; 变体设计按典型的高-低-高剖面飞行时, 任务航程可增加30%~50%。折叠机翼采用了一种新型“紧凑式混合作动器(CHA)”, 以及一种特殊的记忆功能材料SMP, 可以折叠机翼构成不同外形, 并能重新组构恢复到初始形状。

3) 滑动蒙皮机翼

由Next Gen Aeronautics公司提出的变体机翼方案, 使用一架“火蜂”靶机作为它的设计平台, 使机翼在飞行中逐渐伸展或收起机翼, 通过改变机翼的面积和平面外形优化性能, 以满足起降、低速巡航和高速机动等不同飞行要求, 如图3所示。图3(a)显示的是滑动蒙皮模型图, 机翼上的蒙皮面积以及位置变化产生不同的飞行性能, 图3(b)是滑动蒙皮变后掠飞机的变形过程图。

该公司采用特殊材料制作变体机翼的蒙皮, 并自行开发了一种微结构热聚合激励器, 使机翼在改变外形的同时能够按要求控制机翼硬度, 承受不同的应力。滑动蒙皮机翼能够实现大尺寸范围的变化, 包括200%展弦比变化、40%展长变化、70%机翼面积变化、后掠角变化范围15°~45°, 机翼形状的变化能够适应不同的性能和设计要求。

4) 压缩机翼

在MAS计划资助下, 雷神公司获得了一项进行变体结构开发的工作合同。压缩机翼是其研发的一种变体技术, 在海军的一枚“战斧”巡航导弹的弹体上进行了设计研究(如图4所示)。压缩机翼预期可使巡航导弹能以高速飞向目标区, 在其上空待机盘旋, 然后飞向另一个目标。方案需要在机翼内

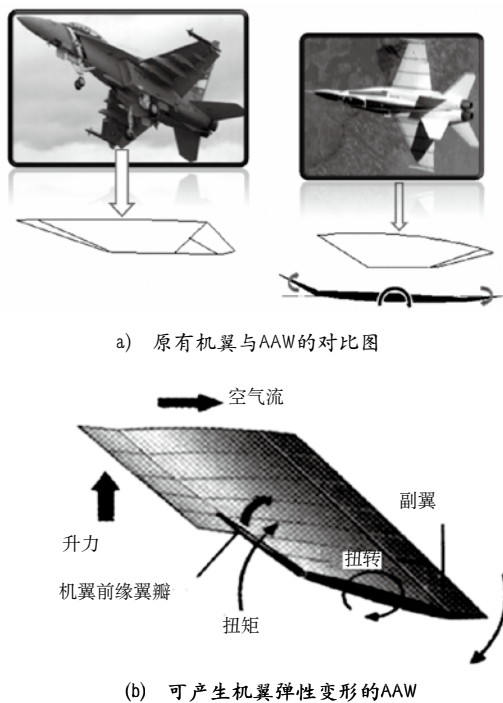


图1 装配在F/A-18A试验机上的AAW示意图

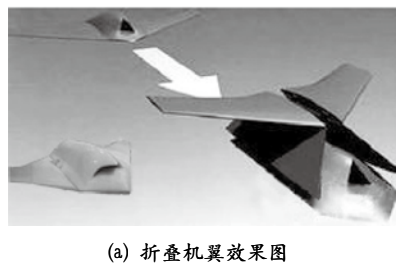
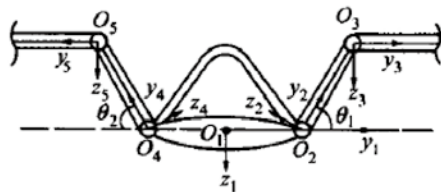
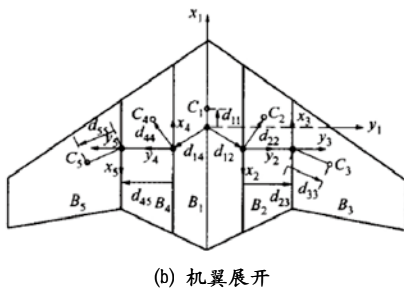


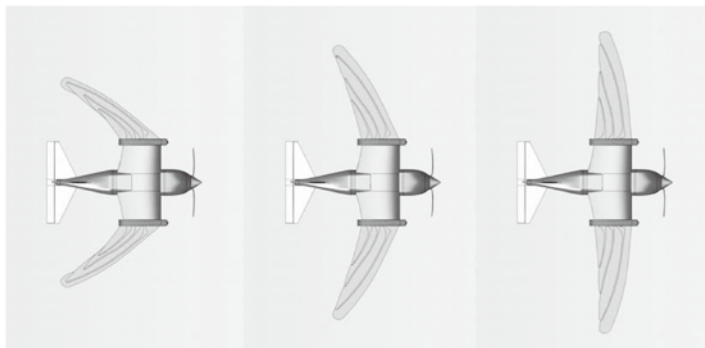
图2 折叠机翼



(c) 机翼部分折叠



(a) 模型图



(b) 滑动蒙皮变形后掠飞机

图3 滑动蒙皮机翼

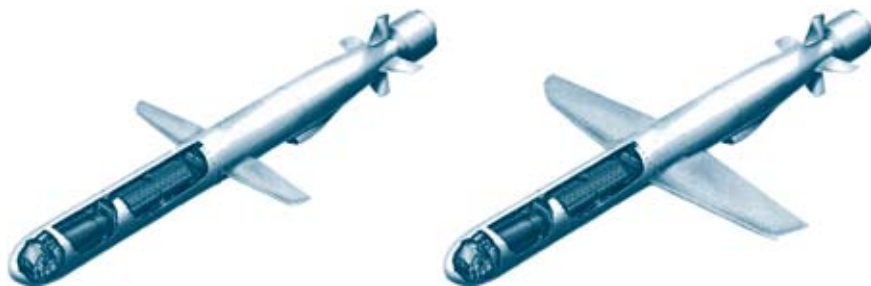


图4 压缩机翼

安放展开和收缩的作动机构,主要问题是“战斧”巡航导弹机翼承受的载荷很大,作动机构在不可能做得很小的情况下难以安装在很薄的机翼中,方案最终被弃用,但是,提出的变体思想对未来导弹飞行器的发展具有积极意义。

5) 自适应机翼

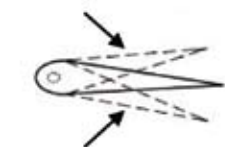
自适应机翼(adaptive wing)指的是在飞行中可根据飞行情况自动改变几何参数以获得最优性能的机翼。自适应机翼技术是飞行中采用偏转操纵面原理的继续发展,能随马赫数、迎角、大气扰动和机动飞行等飞行条件的改变而自动通过机翼内部的联动装置连续偏转其可动

构件从而改变机翼形状,并采用智能蒙皮组件以保持翼面变化的光滑连续性^[11]。

图5(d)所示的自适应机翼是机翼的外形及弯度可根据任务需要而改变的一种柔性机翼。它有很强的翼盒,鼓皮用玻璃纤维增强复合材料制成,有一段可偏转的前缘和一段可偏转的后缘。图5(a)是机翼的整体改变;图5(b)是机翼后缘的变化;图5(c)中,当翼尖的后缘向上偏,同时翼根的后缘向下偏转时,就可使压力中心内移,从而可在机动飞行中增大过载而不致引起翼根弯矩过大,左、右不对称偏转时又可实现横向操纵。苏-27也采用了前期的自适应技术,其机翼由基本机翼和全翼展布置的前缘机动襟翼、后缘的机动襟副翼组合在一起,可自动随任务改变机翼的外形和弯度,以获得最佳的气动特性,可在很宽的速度和仰角范围内作机动飞行,包括著名的以极小的瞬时表速,飞机处于垂直状态的过失速机动——“眼镜蛇”动作^[12]。

变体飞机的变形结构是使变

机翼整体向上转动



机翼整体向下转动

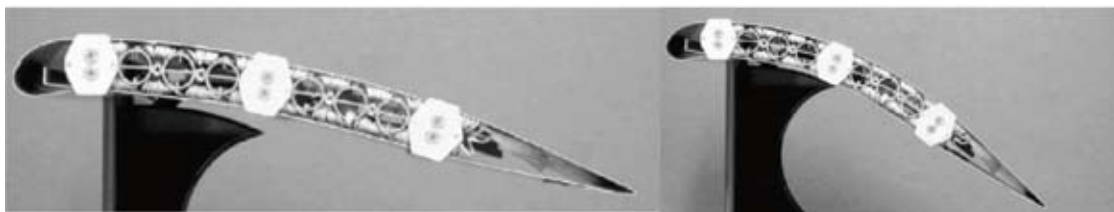
(a) 机翼整体转动



(b) 机翼局部弯曲变形



(c) 机翼前后缘可弯曲变形



(d) 自适应机翼局部弯曲变形前后图

图5 自适应机翼



体飞机实现“变体”的部件。目前的变体飞机研究中有集中驱动式和分布驱动式两种变形结构^[13]。集中驱动式变形结构制作较简单,但驱动器承受的载荷大,对其强度要求高,导致结构重量大,而且变形形式固定单一,如只能改变后掠角;驱动器故障时将导致飞行器失效。分布驱动式变形结构中,多个驱动器分担载荷,有助于减轻结构重量,变形形式灵活,鲁棒性强,在部分驱动器发生故障时能够保证飞行器具有足够的可控性。

3 未来发展

变体飞机在改善飞行器空气动力学性能、增加续航时间、扩大飞行包线(高度、速度),以及适应多种飞行任务等方面具有很大的潜能。发展变体飞机,实现智能化飞行,不仅是自然界的启示,也是现代飞行器研究的必然需求。随着空气动力学、材料与结构力学、控制技术、计算机信息等学科的发展,变体飞机的构想正在逐步成为现实,并对以下方面有着重要影响^[14,15]。

1) 新一代飞行器的突破性发展科学技术的进步为飞行器提出了更高要求,变体飞机作为一种多形态飞行器,具有按需应变的能力,有希望成为飞行器性能改进和新一代航空航天飞行器突破性发展的重要源泉。

2) 各学科领域及其研究的创新由于涉及众多学科领域的前沿问题,因此发展变体飞机将给科研工作提出许多新的课题,同时也给研究方法提出新的挑战,需要进行跨学科交叉,从基础理论入手开展创新性的研究工作。

3) 在未来军事作战任务中,变体飞机具有大空域范围的良好飞行性

能,扩展了传统飞行器的任务和综合作战效能,其在未来战争中的大量运用,必将引起军事作战模式、组织编制、武器装备设计思想的一系列变革。

AST

参考文献

[1] 桑为民,陈年旭.变体飞机的研究进展及其关键技术[J].飞行力学,27(6):5-9.

[2] 宋笔锋,冯晓强,胡峪.空天体系对抗下未来战斗机发展的一些思考[J].航空工程进展,2010,1(2):107-111.

[3] 崔尔杰,白鹏,杨基明.智能变形飞行器的发展道路[J].航空制造技术,2007,(8):38-41.

[4] Perry B. Summary of an Active Flexible Wing Program[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(1): 10-15

[5] Pendleton E W, Bessette D, Field P B, et al. Active aeroelastic wing flight research program: technical program and model analytical development[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(4): 554-561.

[6] Crowe C R, Sater J M. Smart aircraft structures[C]. AGARD Symposium on Future Aerospace Technology in the Services of the Alliance. CP-600. 1997, 1.

[7] Kudva J N, Martin C A, Scherer L B, et al. Overview of the DARPA/AFRL/NASA smart wing program[C]. 1999 Symposium on Smart Structures and Materials. International Society for Optics and Photonics, 1999: 230-236.

[8] Neal III D A. Design, Development, and Analysis of a Morphing Aircraft Model for Wind Tunnel Experimentation [D]. Virginia Polytechnic Institute and State

University, 2006.

[9] Wlezien R W, Horner G C, McGowan A M R, et al. Aircraft morphing program[C]. 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. International Society for Optics and Photonics, 1998: 176-187.

[10] 陈桂彬,邹丛青,杨超.气动弹性设计基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.

[11] 黄杰,葛文杰.自适应机翼的发展现状及其关键技术研究[J].航空兵器,2010,(2):8-12.

[12] 杨智春,解江.自适应机翼技术的分类和实现途径[J].飞行力学,2008,26(5):1-4.

[13] 朱华,刘卫东,赵淳生.变体飞行器及其变形驱动技术[J].机械制造与自动化,2010,39(2):8-14.

[14] 艾俊强,李士途.变体飞机典型形式的历史发展及其应用机型浅析[J].航空工程进展,2010,1(3):205-209

[15] 乐挺,王立新,艾俊强.变体飞机设计的主要关键技术[J].飞行力学,2009,27(5):6-10.

作者简介

张亦波,硕士研究生,主要研究方向为结构疲劳可靠性。

熊峻江,博士,教授,长期从事飞机结构适航性研究,先后主持国家自然科学基金与航空基金等基金项目11项、国防预研与型号课题20余项,获中国高校科技进步一等奖1项、部级科技进步二等奖2项、三等奖2项。发表SCI论文30余篇、EI论文60余篇。