



变体飞行器技术

Morphing Aircraft Technology

南京航空航天大学 陆宇平 何真 吕毅



陆宇平

南京航空航天大学教授、博士生导师，航天学院院长。国家高新技术研究发展计划(“863”计划)专家；中国航空学会自动控制专业委员会副主任；中国宇航学会空间控制专委会委员。1996年获中国航空工业总公司“优秀留学回国人员”荣誉称号。长期从事飞行控制系统与导航技术研究，研究领域包括：先进飞行控制技术，高超声速飞行控制，复杂系统建模和控制，远程控制等。

变体飞行器是一种能够改变外形，以适应不同的飞行环境、改善空

当前，民用和军事领域都对飞行器提出了更高的要求，要求新一代飞行器能够在变化很大的飞行环境(高度、马赫数等)下和在执行多种任务(如起降、巡航、机动、盘旋、攻击等)时始终保持良好性能。固定外形的飞行器难以满足这个要求。

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，而在高速飞行时收缩翼面。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。

当前，民用和军事领域都对飞行器提出了更高的要求，要求新一代飞行器能够在变化很大的飞行环境(高度、马赫数等)下和在执行多种任务(如起降、巡航、机动、盘旋、攻击等)时始终保持良好性能。固定外形的飞行器难以满足这个要求。例如，

F-16 战机的布局设计适合高机动高速飞行，而全球鹰无人机适合长航时侦察飞行。另一方面民用和军事领域还提出了对具有特殊性能的飞行器的需求，包括高超声速空天飞行器、低速临近空间飞行器和微型飞行器等。高超声速空天飞行器的飞行状态跨越低速和高超声速，需要既保证高速性能，又兼顾低速性能。微型飞行器尺寸小、重量轻、隐蔽性好、成本低，具有广泛的军事用途。但是随着飞行器尺寸的减小，使用常规布局的微型飞行器会存在因尺寸限制而引起升力不足的问题，以及因低雷诺数引起推进系统效率大大降低的问题。临近空间飞行器在遥感和监测方面比卫星观测更清楚，在通信方面

需要的发射功率比卫星通信小,而且可灵活布置覆盖范围。在临近空间的飞行环境里,大气密度很低,作为通信侦察平台的低速临近空间飞行器雷诺数很小,也会存在升力不足和推进效率低的问题。

变体飞行器的研究随着这些需求而蓬勃发展起来。变体飞行器能够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。研究还表明,变体飞行器是克服低雷诺数、提高飞行器气动效率的一个非常有前景的方法。

变体飞行器的发展

变体飞行器的研究基础是各种主动柔性翼和主动气动弹性机翼研究。美国于1979年开始研制AFTI/F111自适应机翼,研制了无铰链机翼。这种机翼无铰链,利用机翼内部的液压驱动机构调节机翼前后缘的曲度来获得最大的空气动力效率。1986年的试飞结果表明,自适应机翼提高了飞机的升阻比和操纵性能。1985年开展了主动柔性翼(AFW)计划,并于1996年后扩展为主动气动弹性机翼(AAW)计划。1995年,开展了智能机翼(Smart Wing)项目,采用形状记忆合金构成的驱动机构来代替常规的机翼铰链。该项目采用由形状记忆合金(SMA)构成的集成驱动机构来代替常规的铰链控制舵面。智能机翼在不同的飞行状态下,能提供相应的最优气动外形。风洞试验表明,该项目的设计可以改善飞机俯仰和滚转力矩系数,减小控制面的偏转。2003年启动了变形飞机结构(MAS)项目,提出了折叠机翼、滑动蒙皮变形机翼和伸缩机翼的概念。欧洲在A340验证机上应用了主动吸气技术、自适应鼓包、柔性后缘技术等自适应机翼控制技术,获得了比原型机更好的气动效能。

变体飞行器的变形方式

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°。

表1列出了几种机翼几何形状参数对飞行性能的影响。

变体飞行器的变形结构

变体飞行器的变形结构是使变体飞行器实现“变体”的部件。目前的变体飞行器研究中出现的有集中驱动式和分布驱动式两种变形结构。

(1) 集中驱动式变形结构。

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。

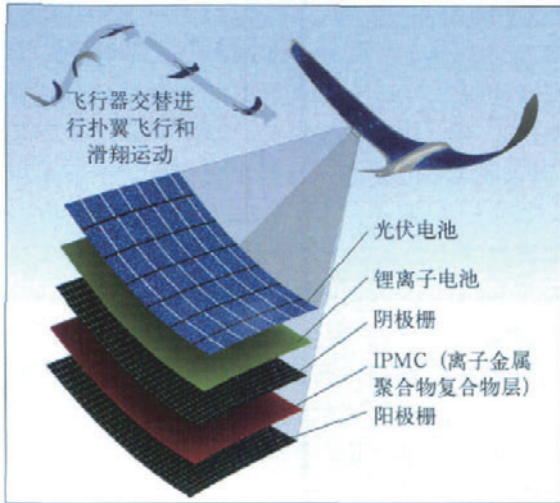
(2) 分布驱动式变形结构。

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。

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		影响零升攻角、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

美国 Grumman 公司研究中心设计了自适应桁架翼肋结构。用于



柔性扑翼飞行器概念设计图

改变机翼横截面翼型,其直线驱动器安置在桁架元件的自适应肋上。美国 Dayton 研究学院与空军研究实验室等设计了使用分布式驱动器网络的剪形机翼机构。可以改变机翼面积和后掠角,每个结构单元包含 4 根连杆,1 个驱动器。NASA 设计了一种可以改变展向弯度的机翼,称为超椭圆弧形翼(HECS),它沿翼展方向的曲率可以不断改变。这种方式在机翼后缘使用了一种无铰链的嵌板作为操纵面,使用形状记忆合金 SMA 进行驱动。美国 NextGen 航空公司为 MAS 项目设计的滑动蒙皮变形机翼也采用了分布式驱动结构,其机械结构由多个四连杆单元连接而成。

目前,所开发的智能材料还不能在全尺寸模型上应用,原因是单个驱动器输出的力和位移较小。因此,产生了“柔性机构”的概念。柔性机构通过组件的弹性变形传递力或位移,使某些节点处很小的弯曲或位移转变为较大的整体变形。这样,就可以将智能驱动器与柔性机构结合起来,发挥各自的优点。这种结构具有重量轻、制造简单、无摩擦等优点。

美国 Penn. 州立大学设计以八面体腱驱动柔顺细胞桁架

(Compliant Cellular Truss) 作为变体飞行器的主动结构单元。每个单元的桁架杆件通过柔性铰链(SMA)连接。机翼由八面体的结构单元组成,在不同的负载情况下,通过拉紧或放松绳索驱动结构变形。通过积累局部的小形变使得整体完成全局的光滑形变。

欧洲资助的 3AS 计划(Active Aeroelastic Aircraft Structures)中通过改变飞行器内部结构,利用作用在机翼上的空气动力提供扭转机翼的力矩,控制机翼的弯曲、扭转。相比利用驱动器扭转机翼并保持形状而言,利用外部的空气动力提供变形的力矩,需要的能量要小得多。

(3) 变形结构的驱动器与传感器。

变形结构的驱动器用于驱动变形结构运动。国内外研究中的变体飞行器的变形结构采用的驱动器及其特点总结如下:

- 压电驱动器: 不能提供机翼扭曲的足够的应变。可以设计高度可变形机构 HDM 等机械结构,将它们与压电驱动器结合起来,以克服压电驱动器不能提供机翼扭曲的足够的应变的缺点。

- 电活性高聚物(电致形变材料): 驱动力的能级不够高。

- 形状记忆合金: 对敏捷的机动飞行而言,带宽不够大,响应时间不够快)。

- 气动活塞: 驱动力大、速度快,行程大,而且重量比液压和机电驱动器轻。但需要储存气体,难以安装在机翼里。

- 充气驱动器

(如烟火驱动器和气囊): 驱动力大,但需要空间储存,需要多个充气袋。

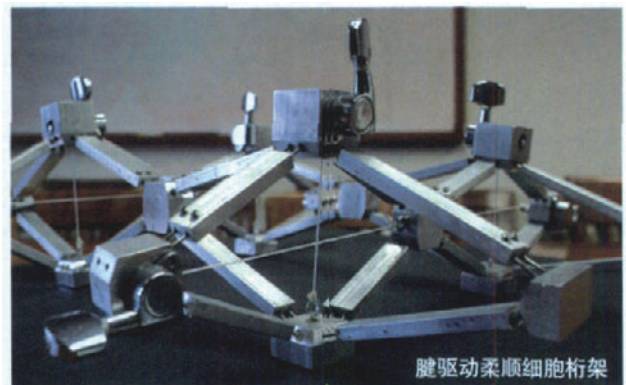
- 电动液压驱动器: 技术成熟,但结构很复杂,且变换速度较慢,重量和体积很大。

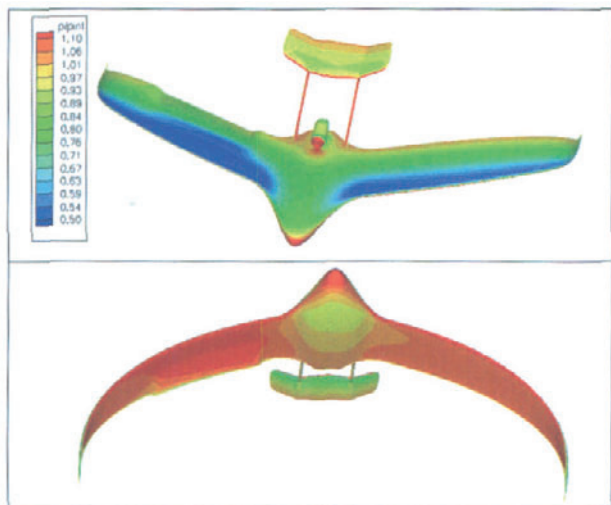
- 线性机电驱动器(如滚珠螺旋致动器): 输出力大,在负载下不会回退,可以抵御空气动力,廉价,易于购得,但是速度较慢。

- 偏心杠杆: 用电超声电机驱动,偏心杠杆将电机的转动转化为杠杆另一端的垂直力,响应速度快。

- 绳索驱动: 多根绳索与桁架组成柔顺机构作为驱动器,用绳索的伸缩来驱动结构的变形,可以减轻重量,并能实现分布式驱动,但变形机构设计比较复杂,如张拉整体结构的设计和计算。

变形结构的传感器用于反馈变形结构的位置、形状。可以在每个驱动器上安置一个内部电位计用于反馈线性位置,或使用内部旋转电位计来测量智能操纵面的倾转角度。也有研究用线性可变差动变压器(LVDTs)测量变形结构的线性位移。用应变片结合模态变换算法测量变形结构位移。有研究用摄影测量方法测量形状,即用两个摄像机来测量机翼上标记的位移。用视频模型扭曲测量系统(VMD),投射叠纹干涉法(PMI)等测量方法测量机翼外形。有实验室用光纤机翼形状测量系统,该系统使用多路纤维 Bragg 光栅传感器(FBG),共使用了 36 个 FBG 传感器,并利用神经网络方法





仿生变体飞行器的空气动力学特性分析

对传感器进行训练。

除了选择和设计合适的驱动器 and 传感器器件,还需要研究驱动器和传感器元件之间的连线问题;由多个传感器获得整体信息的问题,如神经网络学习,模态变换算法等。大多数变体飞行器使用大数目、小体积、分布式驱动器阵列,以代替典型的飞行控制驱动器,即小数目、高权限的集中驱动方式。但是变形结构,如机翼,在装备分布式驱动器和传感器后,空间很狭小,留给布线的空间十分有限。如果每个元件都点对点地连接到控制器,布线将占据很大空间。如图8所示,美国Langley研究中心做的变形结构的传感器实验中,应变片的电线束几乎与变形结构一样宽。这种连线方式占用的空间太大,不适合实际的变形机翼。采用网络连接变体飞行器的分布式元件则可以节省布线空间,降低连线的复杂性。

变体飞行器关键技术研究

变体飞行器的研究内容涉及多个学科的交叉,包括气动、材料、结构、控制和优化等。气动方面涉及非定常空气动力学的研究;材料方面涉及智能材料与结构的研制;结构方面涉及机械动力学系统的研究。变体飞行器的控制可分为两个层次:

顶层为控制飞行器机动的飞行控制,底层为控制飞行器变形的基础控制。本节重点讨论变体飞行器控制方面的研究。

变体飞行器的飞行控制器根据飞行任务的要求,感知飞行环境信息和飞行器姿态等状态信息,将需要的飞行器静态形状和动态变化特征传输给变形控制器;变形

控制器控制变形部位,达到变形的动态和静态要求。

变体飞行器飞行环境变化大,飞行任务多,不断切换外形状态,时变和非线性特性严重。变体飞行器具有大型的变形结构,不能像常规飞行器那样将飞行器作为单个刚体来建模。大尺度变形的变体飞行器具有多刚体系统的特点。中尺度和小尺度变形的变形飞行器具有柔性体的特点。这给变体飞行器的模型建立和飞行控制的研究带来了挑战。

变形结构是由分布式作动器驱动机械连杆结构,需做较大幅度的运动,其动力学特性变化大,且具有很强的非线性特性。变体飞行器的

变形控制系统,是在网络结构下,实现对多执行机构的控制问题。变体飞行器上分布设置了数目巨大的驱动器。单个驱动器功能简单,因此,需要全体驱动器协作来完成复杂的动作,是一个大数目输入/输出系统。各驱动器和传感器通过总线连接组成网络结构。驱动器间以及驱动器与传感器间有局部通信,也有与中心控制器的通信,通信速率受约束。因此,需要针对这些特点设计变形结构控制器。

结束语

变体飞行器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。变体飞行器涉及的学科很广,需要解决的问题很多,而且各方面的问题之间相互耦合,例如,气动机理研究和变体飞行器的设计之间是交叉的,要进行气动机理研究就需要有变体飞行器风洞模型,要设计变体飞行器需要了解气动机理。所以变体飞行器的发展应当采取分散难点、各个突破、相互推进的方法,即开展一些侧重于不同难点的项目,使得各个项目既能解决其所针对的难点问题,又能促进其他难点的研究。(责编 晓霏)



NASA的主动气动弹性机翼F/A-18喷气机