

文章编号: 1674-8190(2023)03-001-14

# 变形翼面内变形的研究现状及关键技术

冯文正<sup>1</sup>, 于菲<sup>1</sup>, 关玉明<sup>1</sup>, 刘智光<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

(2. 天津城建大学 控制与机械工程学院, 天津 300384)

**摘要:** 变形机翼作为未来飞机设计的重要发展方向之一, 其机翼面内变形的研究得到了广泛关注。本文分别从变展长、变掠角、变弦长、组合变形四个方面进行分析, 阐述面内变形机翼的国内外研究现状, 归纳总结变形机理及优缺点, 分析其发展趋势。针对该领域的研究现状以及变形机翼的应用要求, 提出变形机翼亟待解决的关键技术, 包括变形蒙皮技术、变形机构、智能驱动器、传感器和控制网络, 阐述各关键技术的应用要求, 分析其现存问题, 并对未来发展方向进行展望, 为面内变形机翼的设计和应用实现提供参考。

**关键词:** 变形机翼; 变展长; 变掠角; 变弦长; 关键技术

中图分类号: V224

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.03.01

## Research status and key technologies of in-plane deformation of morphing wing surface

FENG Wenzheng<sup>1</sup>, YU Fei<sup>1</sup>, GUAN Yuming<sup>1</sup>, LIU Zhiguang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2. School of Control and Mechanical Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Morphing wing is one of the important development directions of future aircraft design, and the study of in-plane deformation of the morphing wing surface has received widespread attention. In this paper, four aspects including variable span length, variable sweep angle, variable chord length and combined deformation are analyzed to describe the current status of domestic and international research on in-plane morphing wings, summarize the deformation mechanism and its advantages and disadvantages, and analyze the future development trend of morphing wing. In view of the current research situation and the application requirements of the morphing wing, the key technologies of the morphing wing are proposed, including the morphing skin technology, morphing mechanism, intelligent actuator, sensor and control network. The application requirements of each key technology and the existing problems are analyzed furthermore. The future development direction is summarized, which can provide some references for the design and application realization of in-plane morphing wings.

**Key words:** morphing wing; variable span; variable sweep angle; variable chord length; key technologies

收稿日期: 2022-05-15; 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2020KJ056)

通信作者: 于菲, feiyu529@126.com

引用格式: 冯文正, 于菲, 关玉明, 等. 变形翼面内变形的研究现状及关键技术[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 1-14.

FENG Wenzheng, YU Fei, GUAN Yuming, et al. Research status and key technologies of in-plane deformation of morphing wing surface[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 1-14. (in Chinese)

## 0 引言

自飞行器发明以来,设计者一直致力于研究如何提高其飞行能力,达到高速、灵活、安全的飞行目标<sup>[1-2]</sup>。传统的固定翼飞行器通常采用两种设计方法,一种是采用单目标设计优化,针对某一特定条件或任务(例如侦察、监视或战斗)优化设计,使其在该条件下具有最优的飞行性能,而其他工况下飞行性能有所下降;另一种是采用多目标优化,分析整个飞行包线的工况,进行折中设计,而在任何一个工况下都不是最优的<sup>[1,3]</sup>。随着飞行器设计研究经验的不断积累、各学科技术的不断发展与交融,为提高固定翼飞行器的飞行性能,研究者提出了变体飞行器的概念<sup>[2]</sup>。

广义的变体飞行器概念包括所有外流场、内流场中可以改变气动构型的方法,主要包括:机翼变形、机身变形、起落架收放、动力系统变形等<sup>[2-4]</sup>。目前常见飞机机翼上的襟翼属于广义概念。狭义的变体飞行器是以先进的结构设计为基础,结合新型智能材料、智能作动器、新型传感器等技术,飞行器自主地根据飞行环境和飞行任务等改变自身局部或整体外形,以此提高飞行器的飞行性能,保证飞行器在每个阶段都处于最优状态<sup>[5]</sup>。机翼是飞机中最关键的部分,提供飞机的绝大部分升力和操纵力,并且机翼的形状、尺寸等都对飞机的飞行效率起决定性作用,因此变体飞行器的研究重点主要为变形机翼。

本文从机翼面内变形的角度(变展长、变掠角、变弦长)出发,重点介绍变展长、变后掠角以及变弦长的实现途径,国内外研究现状,并指出其发展趋势;总结变形机翼涉及的各项关键技术(变形蒙皮技术、变形机构、智能驱动器、传感器及控制网络),介绍各关键技术的功能及应用要求,简述应用现状,从而分析其现存问题,并通过问题分析提出各关键技术的未来发展趋势,以期变形机翼在面内变形方面提供一定的理论和技术参考。

## 1 变形机翼的分类

变形机翼可以在飞行过程中改变机翼翼型、尺寸等,从而适应不断变化的飞行环境和飞行任务。同时,变形机翼也提高了飞机在整个飞行包线上的飞行性能。变形机翼以机翼平面为基准,分为四类,分别为面内变形、面外变形、翼型变形

以及组合变形,具体分类如图 1 所示。

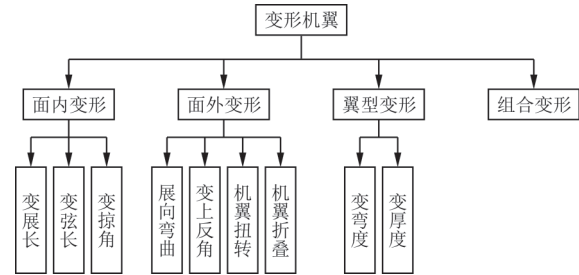


图 1 变形机翼分类<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Deformation wing classification<sup>[1]</sup>

飞机在整个飞行包线中,不同的飞行环境和任务对机翼的参数要求也不相同,要想到达最优性,对参数的要求也是矛盾的。例如,机翼大后掠角情况下可以减小阻力,提高飞机的机动性,适用于高速飞行,但其低速飞行性能较差;翼展增大,其升阻比提高,有利于飞机起飞,但导致机动性能变差。8种变形翼几何形状参数对飞行性能的影响如表 1 所示。

表 1 变形翼几何形状参数对飞行性能的影响<sup>[4]</sup>

Table 1 Influence of geometric parameters of deformable wing on flight performance<sup>[4]</sup>

| 参数     | 变化情况 | 对飞行性能的影响  |
|--------|------|---|
| 翼面积    | 增大   | 增大升力,提高承载能力   |
|        | 减小   | 减小寄生阻力  |
| 展弦比    | 增大   | 增大升阻比、巡航时间、巡航距离、转弯半径;减小发动机能量消耗、提高起降性能;缺乏可操作性、巡航速度相对较低 |
|        | 减小   | 增大最大速度、减小寄生阻力,机动性能提高                                  |
| 上反角    | 增大   | 改善滚转性能和侧向稳定性;转弯半径和转弯速度性能下降                            |
|        | 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   | 增大升力系数  |
| 翼型相对厚度 | 增大   | 改善低速翼型性能  |
|        | 减小   | 改善高速翼型性能  |
| 前缘弯曲半径 | 增大   | 改善低速翼型性能  |
|        | 减小   | 改善高速翼型性能  |
| 翼型弯度   | —    | 影响零升攻角,翼型效率,分离特性                                      |
| 机翼扭转   | —    | 影响翼尖失速及展向升力分布   |

## 2 面内变形机翼的研究现状

### 2.1 变展长机翼

变展长机翼是指机翼的展长可沿展向发生变

化的机翼。变展长机翼分为固定段和伸缩段,固定段机翼用于收纳伸缩段机翼以及伸缩机构,伸缩机构在动力驱动下将伸缩段机翼沿导轨进行伸出和收回,从而实现展长变化。机翼翼展伸长时,翼面积、展弦比同时增大,此时飞机的升阻比提高、起降距离缩短、续航时间增长;但翼展越大,飞机的可操作性会降低,其巡航速度也会降低。当机翼翼展缩短时,翼面积、展弦比均减小,飞机所受阻力减小,可提高飞行速度,有利于进行俯冲、攻击等任务,但空气动力学效率较差。伸缩段机翼可同步运动也可不同步运动,当机翼非对称运动时可以提高对飞机的滚转控制。

变展长属于大变形范围,其变形量较大,而现存蒙皮材料变形量达不到变翼展的要求,因此固定翼段和伸缩翼段两者存在过渡问题,导致翼面不连续,影响机翼的气动效率,为解决此问题,设计人员通常会在两翼段连接处铺设一层高弹性密封材料,保证机翼变形时翼段间不产生缝隙,但过渡处的变化仍会影响机翼的气动性能<sup>[3]</sup>。

变展长机翼的研究起步较早,时间较长,现阶段变展长机构已较为成熟。1929年,俄裔设计师Makhonine设计了一种气动可伸缩机翼的飞机MAK-10,如图2所示,该飞机通过采用气动方式驱动伸缩机构,带动机翼实现伸缩运动,经试验其展长在13~21 m之间变化,机翼面积在21~33 m<sup>2</sup>之间变化<sup>[6]</sup>。该飞机的设计为后来变展长机翼的设计提供了合理参考。

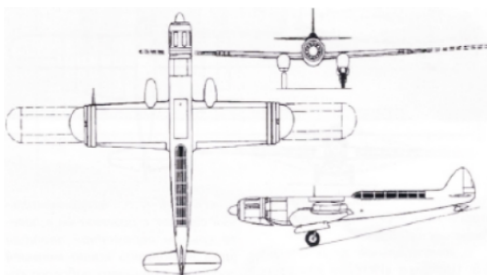


图2 MAK-10变展长飞机<sup>[6]</sup>  
Fig. 2 MAK-10 variable length aircraft<sup>[6]</sup>

为了增加展长的变化量,美国马里兰大学的J. Samuel等<sup>[7]</sup>以气动嵌套式伸缩梁作为伸缩机构,将肋板固定于伸缩梁上(如图3所示),可实现三种长度变化,机翼的展弦比可实现114%的变化,并设计了变展长机翼样机,对其进行了风洞测试。

结果表明,由于蒙皮材质和不同翼段间的接缝影响,该机翼产生了轻微的寄生阻力,但在完全展开的情况下,升阻比高达16。

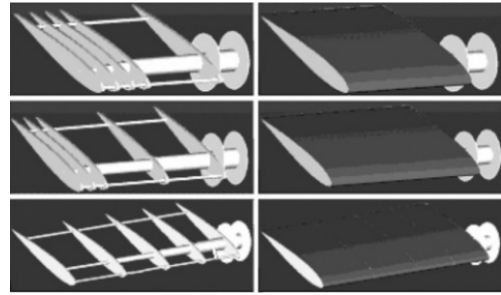


图3 J. Samuel等设计的气动伸缩翼<sup>[7]</sup>  
Fig. 3 Pneumatic telescopic wing designed by J. Samuel etc<sup>[7]</sup>

气动机构需要的气动源会占据飞机内部较大的空间,且对气密性要求较高。为了提高机身仓空间的利用,P. Santos等<sup>[8]</sup>设计了VSW概念机,如图4所示。该变展长的机翼采用了齿轮齿条伸缩机构,齿条采用铝合金材料以减轻重量,齿轮采用青铜材料以减轻摩擦;伺服电机驱动齿轮,均安装于机舱内部,齿条安装于机翼中带动机翼实现伸缩。该变展长机翼展长可在1.55~2.5 m变化,升阻比最高可提升35%,但相比于原机翼重量增加了59%。

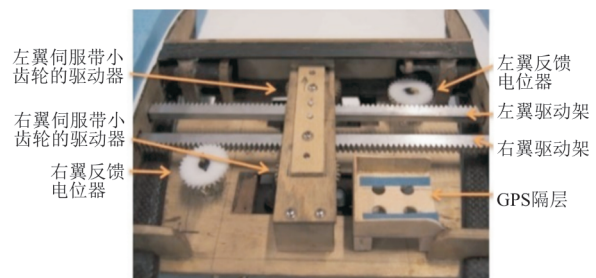
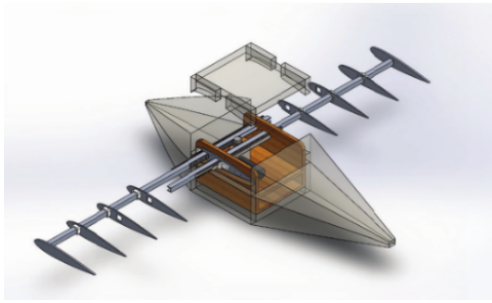


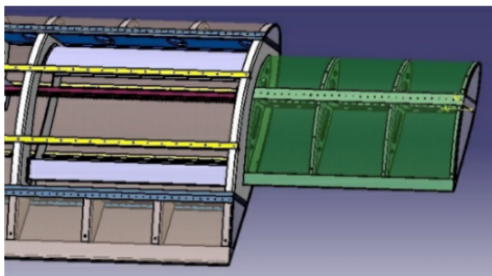
图4 VSW概念机<sup>[8]</sup>  
Fig. 4 VSW concept machine<sup>[8]</sup>

在改善机身内部空间利用率的情况下,为进一步提高对伸缩翼内部空间的利用率;R. M. Ajjaj等<sup>[9]</sup>同样设计了由齿轮齿条驱动的伸缩机翼,结构如图5所示,该机翼是由电机驱动蜗轮蜗杆,并传动到齿轮齿条,齿条带动机翼实现伸缩,且机翼两侧的翼梁比半跨度长,多余的翼梁部分存储在机翼和机身中,充分利用了机翼两侧的可用空间,降低了结构的重量。该机翼可变展长高达100%,重量轻,适用于小型无人机。



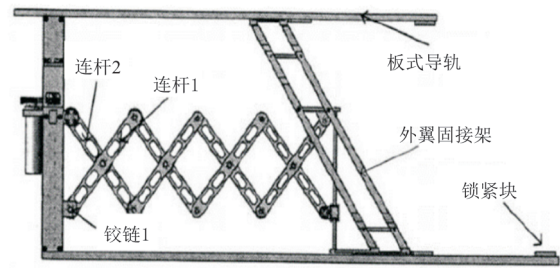
图 5 齿轮驱动的伸缩机翼结构<sup>[9]</sup>Fig. 5 Gear-driven telescopic wing structure<sup>[9]</sup>

当变展长机翼完全伸出时,机翼的刚度是个重要的问题。为了提高机翼的刚度,沈阳航空航天大学 A. Hossain 等<sup>[10]</sup>提出了一种组装式伸缩翼,固定翼段内部组装有一个翼肋框架,既提高了机翼的刚度,又保证了活动段机翼的伸缩,结构如图 6 所示。

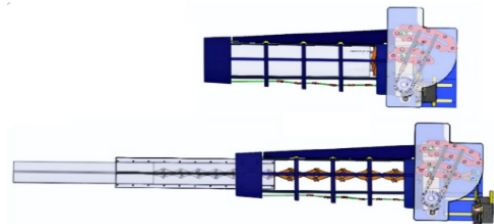
图 6 线性驱动的组装机翼<sup>[10]</sup>Fig. 6 Linear drive assembled wings<sup>[10]</sup>

利用齿轮齿条传动虽然能节省空间,提高空间利用率,但齿轮齿条不适合远距离传输,同时齿轮齿条也会增加机构的重量。为了使机翼的展长变化范围进一步增大,同时减轻重量,研究者又提出了新的驱动机构。

中国科学技术大学的李智等<sup>[11]</sup>提出了一种基于菱形机构的伸缩翼,如图 7 所示。该机构利用伺服电机驱动滚珠丝杆并带动铰链 1 上下移动,实现菱形机构末端的直线运动,机翼的伸缩变化量可达 75%。采用菱形机构可实现小驱动大变形,且采用连杆机构,通过优化,可大幅降低机构重量。该机构为了提高两侧机翼变形时的同步性,使用恒力弹簧预紧的方法,能够将同步误差减小 50%。对样机进行试验,验证了机构具有较好的稳定性和可靠性。

图 7 基于菱形机构的伸缩翼<sup>[11]</sup>Fig. 7 Telescopic wing based on diamond mechanism<sup>[11]</sup>

为增大伸缩量,在菱形机构的基础上,哈尔滨工业大学的王礼佳<sup>[12]</sup>提出了一种基于剪铰机构的可变展长机翼,如图 8 所示。该机翼在内部布置两组剪铰单元,形成两套联动的内藏式驱动结构,可实现三级伸缩,展向变形可达 150% 以上。进行样机测试后,其展向刚度符合要求。

图 8 基于剪铰机构的可变展长机翼<sup>[12]</sup>Fig. 8 Variable extension wing based on shear hinge mechanism<sup>[12]</sup>

以上机翼均未考虑翼面连续性问题,为此哈尔滨工业大学的张祖豪<sup>[13]</sup>提出了一种具有连续表面的伸缩式变形翼,该机翼结构如图 9 所示。该机翼通过电机带动双旋向丝杠来驱动机翼的展开和收缩。该机翼最大的特点就是伸缩完成后机翼还具备二次变形的能力,变形后伸缩段机翼可与固定段机翼保持同等大小翼型,实现了翼面连续性,保证机翼具有良好的气动性能。

图 9 具有连续表面的伸缩式变形翼<sup>[13]</sup>Fig. 9 Telescoping deformable wings with continuous surfaces<sup>[13]</sup>

除了结构,如何实现翼展的平滑变化也是关键。北京航空航天大学的董朝阳等<sup>[14]</sup>针对变展长系统平滑切换问题,设计了平滑切换线性变参数鲁棒H<sub>∞</sub>控制器,并通过仿真验证,设计后的系统具有良好的稳定性和鲁棒性,能够实现变形的平滑切换。

变展长机翼实质是通过机构实现活动段机翼的直线运动,但是变形机翼存在翼面连续性的问题,且受到刚度、翼内空间等方面的影响,实现150%以上的大跨度变化仍是较大的问题。截至

目前变展长机翼主要有气动机构、丝杠导轨机构、齿轮齿条机构、剪铰组合单元机构四种典型机构,对其归纳总结如表2所示,可以看出:四种机构各有优势,但又有缺点,满足高刚度要求的机构通常存在驱动距离短的问题;而驱动距离较长时,刚度通常较弱。变展长机翼的发展需要大变形高刚度蒙皮材料的研发,既能满足翼面连续问题,又能避免伸缩段机翼的存储空间问题,亟需设计出既具有高刚度又具有大展长的变形机翼。

表2 变展长机翼机构总结

Table 2 Summary of the variable extension wing mechanism

| 机构       | 原理                               | 优点                               | 缺点                        |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 气动机构     | 气缸推动伸缩机翼做直线运动                    | 重量轻、体积小                          | 要求较高的密封性、伸缩量控制能力差         |
| 丝杠导轨     | 电机驱动丝杠,丝杠推动机翼往复运动                | 控制精度高、展向刚度好                      | 受条件限制变形量不会超过45%,会出现卡死现象   |
| 齿轮齿条     | 电机驱动齿轮,齿轮啮合齿条,齿条推动机翼运动           | 传动力大、效率高,寿命长,工作平稳,可靠性高,能保证恒定的传动比 | 重量大,垂直剖面方向上的尺寸较大,不宜作远距离传动 |
| 剪铰单元组合结构 | 杆件组成四变形机构,一端连接直线驱动机构,另一端连接机翼实现运动 | 稳定性高,结构简单,伸缩性好                   | 占用空间大,展向刚度相对较弱            |

## 2.2 变掠角机翼

变掠角机翼是指机翼能够通过机构驱动,绕某一转轴沿机身方向前后转动的机翼。变掠角机翼又分为变前掠角机翼和变后掠角机翼,两者概念是相对的。当机翼向机头方向转动时,称为变前掠角机翼;相反,当机翼向机尾转动时,称为变后掠角机翼。变掠角机翼能够提高飞机在宽速域内的飞行效率,兼顾飞机高低速飞行,使飞机能够在各飞行速度时均保持较高的飞行能力。

1944年,德国的梅塞斯米特提出变后掠翼的概念,并设计了世界上第一架变后掠翼概念机Me P. 1101<sup>[15]</sup>;1953年,美国的贝尔实验室设计出在飞行中改变后掠角的贝尔X-5<sup>[16]</sup>。

美国马里兰大学的P. Marmier等<sup>[17]</sup>设计了一种采用气动机构的变后掠翼,如图10所示。该无人机将压缩空气罐置于机身,利用两个反向执行器的相对刚度实现变后掠运动;并通过电磁阀控制,可改变变形速度;采用NACA0012型机翼制作样机,并进行了风洞试验验证,机翼可实现0°~45°后掠角的变化。

图10 采用气动机构的变后掠翼<sup>[17]</sup>Fig. 10 Variable-sweep wing with aerodynamic mechanism<sup>[17]</sup>

为了实时根据外界环境变化调整后掠角度,提高变形的控制精度,在上述结构的基础上,美国弗吉尼亚理工大学的D. Neal等<sup>[18]</sup>设计了名为MORPHEUS的变后掠翼无人机。无人机底部安装比例流量控制阀,直接操纵流量作为气动系统的控制信号,提高对变后掠机构的精确控制。底部设有旋转机构,气缸带动机翼通过旋转机构实现机翼后掠角变化。该设计提高了机翼的承载能力,并采用更灵敏的嵌入式反馈,其结构如图11所示。

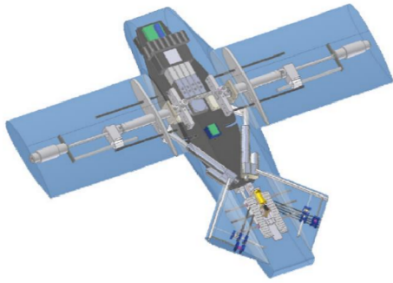


图 11 MORPHEUS 内部设计结构图<sup>[18]</sup>  
Fig. 11 MORPHEUS's internal design structure diagram<sup>[18]</sup>

虽然增加控制元件能够提高控制精度,但是控制系统在增加飞机的重量同时也加大了控制难度。为了减少控制系统对飞机的负面影响,自适应变后掠翼应运而生。南昌航空大学的王钊<sup>[19]</sup>设计了一种弹簧式自适应变后翼机构,结构如图 12 所示,弹簧一端连接机身,另一端连接滑块,滑块固定于机翼,带动机翼实现转动。结合最佳变后掠规律、空气动力学以及运动学等方案,选择最优方案,利用 CATIA 进行建模,将模型导入 ADAMS 中进行模拟仿真,验证了该机构的可行性。

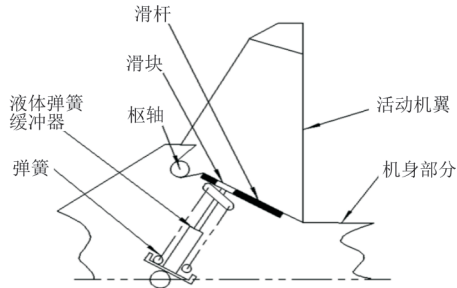
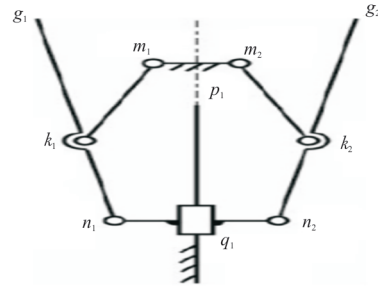


图 12 弹簧滑块机构<sup>[19]</sup>  
Fig. 12 spring slider mechanism<sup>[19]</sup>

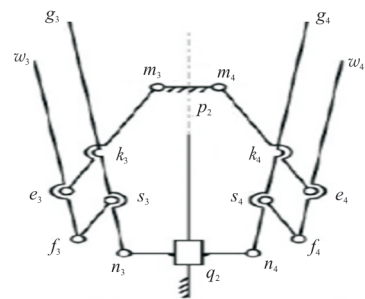
南昌航空大学的吕吉婵等<sup>[20]</sup>、西安航空学院的刘璐等<sup>[21]</sup>利用 CAITA 建立机翼组合体模型,采用 Fluent 软件模拟不同高度、不同速度的飞行环境,并利用 MATLAB 软件结合遗传算法研究了变后掠机翼在不同高度下的最佳变后掠规律;西北工业大学的马航等<sup>[22]</sup>研究了基于质心稳定的变后掠变形规律,用于指导变后掠机翼的设计。

驱动机构是变形翼至关重要的部分,关系到控制的精度、机构的重量、可靠性等。蔡智杰等<sup>[23]</sup>提出了两种变后掠翼驱动结构,一种是不变翼型变后掠驱动结构,该机构通过丝杠滑块机构驱动摇杆机构,在实现变后掠的动作同时保证翼型不变;另一种是变翼型变后掠驱动机构,该机构在前

一种结构的基础上,增加杆件,使机翼改为平行四边形机构,在变后掠的同时改变翼型,其结构简图如图 13 所示。



(a) 不变翼型变后掠驱动结构



(b) 变翼型变后掠驱动结构

图 13 两种变后掠翼驱动结构<sup>[23]</sup>

Fig. 13 Two variable sweep drive structure<sup>[23]</sup>

上述变后掠角形式均为“旋转式”,随着柔性蒙皮的发展,使得气动性能更优的“剪切式”变后掠翼结构得以实现。Ma T 等<sup>[24]</sup>设计了一种性能优良的带剪切蒙皮的无缝剪切变后掠机翼,结构如图 14 所示,在具有一个自由的结构基础上,固定在内翼上的曲柄在前后运动的驱动下,外翼的后掠角可改变  $30^\circ$ 。



图 14 带剪切蒙皮的变后掠翼<sup>[24]</sup>  
Fig. 14 Variable swept wing with shear skin<sup>[24]</sup>

北京航空航天大学的都显琛等<sup>[25]</sup>设计了一种变后掠联动机构,机构简图如图 15 所示,并利用机构综合方程以及 ADAMS 仿真软件进行机构尺寸



优化,优化后各构件尺寸大幅减小,解决了机构的可动性问题。

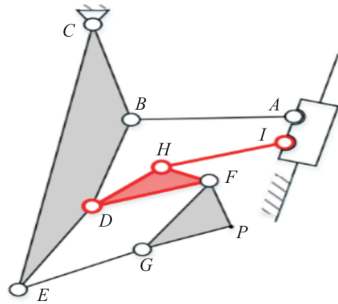


图 15 变后掠翼联动驱动机构<sup>[25]</sup>  
Fig. 15 Variable swept wing linkage drive mechanism<sup>[25]</sup>

前掠翼与后掠翼相比,具有较小的诱导阻力、良好的失速特性以及较轻的结构重量等优点。但是大多飞机机翼都采用薄翼型,因而机翼的抗扭转能力很差。前掠机翼会因迎角的增大,机翼产生更大的扭矩,导致气动性能大幅下降,甚至机翼损坏。随着复合材料的发展,复合材料结构的弯扭变形耦合效应运用到变前掠翼,将有效改善前掠翼的缺点。

郑州航空工业管理学院的张耀炯等<sup>[26]</sup>提出了一种基于丝杆传递方式的变前掠机翼方案,结构示意图如图 16 所示,该方案通过电机驱动丝杆,带动螺母和连杆移动,使得机翼绕固定轴转动。该方案能够在较大的载荷下进行 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的任意角度连续变化,且左右翼运动同步性好,经仿真验证其飞行的升阻比值和变化态势均有较大的提升。

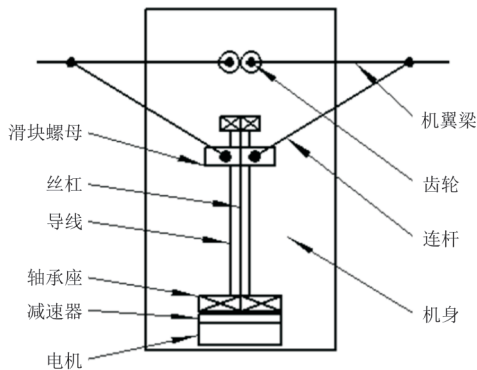


图 16 变前掠翼结构示意图<sup>[26]</sup>  
Fig. 16 Structural diagram of variable forward swept wing<sup>[26]</sup>

变后掠角机翼已成功应用于战斗机等大型飞机,但由于机构重量重、机构复杂程度高等限制,在无人机方面的应用尚在研究。应用于无人机的

变后掠机构需要较轻的重量,曲柄摇杆机构成为改进的重点,通过设计曲柄摇杆的形状和连接方式,能够有效提高两翼的同步性,减小误差。变后掠翼的变形驱动机构主要有液压机构、曲柄摇杆机构、滑块机构三种典型机构。这三种典型结构优缺点总结如表 3 所示,重量取决于驱动机构,高能量密度、大驱动力,如形状记忆合金丝的合理利用可有效减轻变后掠机构的复杂程度和重量。目前变后掠翼变形形式主要以“旋转式”为主,原因在于设计结构简单,刚性蒙皮可满足要求,但存在翼尖气动效率差的问题。“剪切式”变后掠翼具有较好的气动特性,因变形量大,只能采用柔性蒙皮,而柔性蒙皮刚度较低,应用较少。随着智能蒙皮的研究,“剪切式”变后掠翼逐渐成为研究的主要方向。

表 3 变掠角翼典型机构总结  
Table 3 Summary of typical mechanisms of variable sweep wings

| 机构名称   | 举例               | 优点                           | 缺点                        |
|--------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| 液压机构   | 液压驱动推杆           | 输出扭矩大,传动效率超高,变形过程有较高的安全性和稳定性 | 体积大,重量重                   |
| 曲柄摇杆机构 | 将电机输出的力变为摇杆的往复运动 | 重量轻,复杂程度低,加工制造较为容易,运动形式多样    | 同步性较低,稳定性较差,误差较大,不适用于高速传动 |
| 滑块机构   | 驱动滑块带动其他构件运动     | 稳定性好                         | 复杂程度较高,安装精度要求高            |

### 2.3 变弦长机翼

变弦长机翼可以通过改变弦长以改变展弦比及机翼面积,达到改善不同飞行环境下的升阻比,提高飞机飞行性能的目的。传统机翼通过改变前缘或后缘襟翼运动来改变机翼的平均弦长,但襟翼的运动会产生翼面不连续性。本文提到的变弦长机翼是在力求保证翼面连续变形的条件下实现弦长的改变,这对蒙皮材料也提出了较高要求。由于通常飞机机翼中安装油箱以及支撑翼面的翼梁、肋板等构件,因此变弦长机翼通常适合应用于机翼中空的无人机。

D. Perkins 等<sup>[27]</sup>设计了一种可变弦长机翼,其内部结构如图 17 所示。该机翼结构由相互穿插滑

动的铝合金肋和形状记忆聚合物泡沫 DMF 组成, DMF 包裹金属肋且内部布满用于加热的导线, 蒙皮采用波纹型, 以实现翼面的变化。通过加热 DMF 材料, 使其膨胀推动后缘运动实现弦长增加。DMF 材料热重构过程可以无限重复而不会失去材料的完整性, 但其依靠热源加热, 导线布置稀疏易产生加热不均匀问题, 导线布置密集易造成能源浪费, 因此驱动方面有待继续研究。

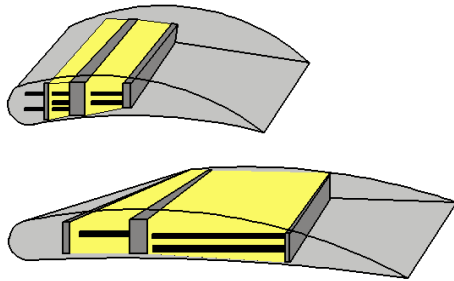


图 17 基于 DMF 的变弦长翼<sup>[27]</sup>

Fig. 17 DMF-based variable chord wing<sup>[27]</sup>

由于前期新型材料不成熟, 在变形刚度以及可靠性上存在一些问题, 由机械结构代替新型材料驱动弦长变化。J. L. Reed 等<sup>[28]</sup>设计了一种使用微型直流电机和丝杆驱动, 通过肋条相互穿插并可相对运动实现弦长变化的变弦长机翼, 其结构如图 18 所示。为克服蒙皮张力、飞行过程的气动载荷以及机翼空间的影响, 综合考虑采用微型直流电机和丝杆结构, 丝杆贯穿肋条中可节省空间同时保证机翼刚度, 为了避免弦长变化造成翼型变化的问题, 利用蜂窝结构的一个方向可进行大变形而垂直面尺寸不变的优点来保持翼型。同时提出蒙皮材料中加入导电材料解决蒙皮材料加热变形问题, 但仍需探究合适的材料。该设计方案可实现翼面积 80% 的增量, 能够有效改善飞行的气动性能, 但驱动结构较多易造成重量增加。

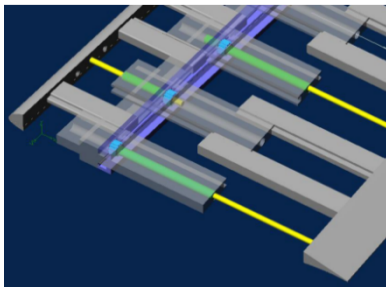


图 18 微直流电机驱动的变弦长机翼结构<sup>[28]</sup>

Fig. 18 Variable chord length wing structure driven by micro DC motor<sup>[28]</sup>

采用丝杆作为传动构件, 传动需要较高的精度, 当升力较大时, 升力传递到丝杆, 对丝杆的作用容易产生“卡死”现象。针对丝杆的缺点, 美国宾夕法尼亚州立大学的 O. Leon 等<sup>[29]</sup>设计了一种桁架伸缩结构的变弦长翼, 结构如图 19 所示。该机翼利用步进电机驱动桁架结构, 推动后缘平板伸缩实现弦长变化, 桁架与肋板之间采用滑块连接, 能够减少桁架上的弯矩以及节点之间的摩擦。该机翼应用于 UH-60 型直升机, 经实验测试该机翼能够实现弦长 28% 增加, 升阻比提高, 从而提高了飞机的飞行高度。



图 19 基于桁架结构的变弦长翼<sup>[29]</sup>

Fig. 19 Variable chord wing based on truss structure<sup>[29]</sup>

随着新型材料的发展, S. Barbarino 等<sup>[30]</sup>在文献<sup>[29]</sup>的研究基础上, 将桁架结构换成变形蜂窝结构, 设计了蜂窝结构的变弦长机翼, 结构如图 20 所示。利用蜂窝结构在变形方向可轻易产生大变形而在非变形方向刚度不变的优点, 蜂窝结构沿弦长方向安装滑轨, 方便滑动, 采用离心力驱动, 降低了机构的复杂性和重量, 可适用于旋翼机翼, 增加驱动源可用于直翼, 经试验, 机翼弦长变形量可达到 30%。



图 20 基于蜂窝结构的变弦长翼<sup>[30]</sup>

Fig. 20 Variable chord wing based on honeycomb structure<sup>[30]</sup>

M. S. Parancheerivilakkathil<sup>[31]</sup>设计了一种锯齿状变弦长机翼, 该机构如图 21 所示。机翼前缘



梁固定、后缘梁可动;前后缘之前采用锯齿状结构连接,由电机驱动齿轮齿条、齿条推动后缘梁移动,中间锯齿状结受力实现弦长方向移动。该机构能够实现弦长的15%变化,通过不同的驱动系统该机翼还能实现弯度的变化。

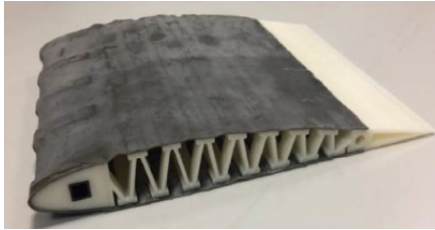


图21 锯齿状变弦长机翼<sup>[31]</sup>  
Fig. 21 serrated variable chord wing<sup>[31]</sup>

上述弦长变化均是沿展向作同样的变化,机翼展向每个截面翼型弦长均相同。沿展长方向,弦长变化不同,导致机翼由矩形翼变为梯形翼,在一定情况下能较好地提高机翼的气动特性。C. Balzarek等<sup>[32]</sup>提出了一种新型线性变弦长机翼,结构如图22所示。杆件绕机翼外侧处的固定连接点旋转,驱动由翼根的气动伸缩杆实现,翼根驱动元件驱动杆件沿弦长方向移动,实现翼根处弦长增大,并沿翼根部分到翼尖呈线性变化,经过风洞试验验证了该结构的可行性。

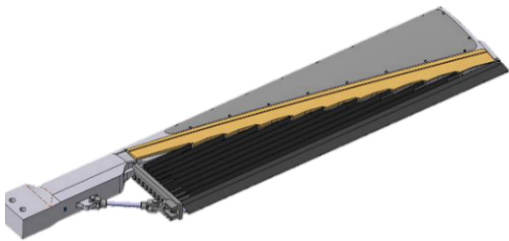


图22 线性变弦长机翼<sup>[32]</sup>  
Fig. 22 Linear variable chord wing<sup>[32]</sup>

变弦长机翼沿展长方向均需变化,因此分布式驱动更适合大跨度范围的变化,但分布式驱动的驱动源较多,易造成重量增加;通常变弦长机翼是利用新型材料进行柔性驱动,有利于在较多的材料下保持较小的重量。根据上述研究来看,变弦长机构充满机翼内部空间,缺少桁架结构支撑蒙皮,翼面刚度较弱,仅适用于低速小型无人机。相比于固定翼形式的飞机,变弦长机翼更适合旋翼无人机,能够通过离心力在无附加驱动下进行变形。对典型的变弦长方式优缺点进行总结,如

表4所示。

表4 变弦长方式总结  
Table 4 Summary of variable chord length methods

| 变形方式分类  | 原理                               | 优点                    | 缺点           |
|---------|----------------------------------|-----------------------|--------------|
| 机械式     | 通过合理的机械结构,驱动机构实现弦长方向直线往复运动,以改变弦长 | 结构刚度大,变形稳定可控,变形精度高    | 重量重,结构复杂     |
| 新型材料柔性式 | 利用柔性材料自身较大的弹性变形实现弦长方向的变化         | 重量轻,降低结构的复杂程度,可无动力源驱动 | 结构刚度较小,变形精度低 |

## 2.4 组合变形机翼

随着变形机翼技术的不断发展,研究人员不再局限于针对某一参数进行设计改变,转而进行某几种机翼参数的相互组合,设计多种变形形式共存的变形翼,进而优化飞机的飞行性能。

哈尔滨工业大学的尹协镇<sup>[33]</sup>提出了一种实现机翼厚度、展长、后掠角三参数变化的机翼,其结构如图23所示。该机翼利用四个形状记忆合金弹簧实现机翼厚度方向的变化;利用丝杠直线运动推动外翼伸缩运动,实现展长的变化;利用双蜗轮对称传动并采用不完全齿轮驱动实现机翼后掠角变化,不完全齿轮能够有效减轻机构重量。虽然经过校验该机翼在刚度和强度上满足设计要求,但机翼展长仍采用内外嵌套式,机翼翼面不连续,容易造成气动特性下降;机翼厚度方向仅靠四个形状记忆合金弹簧驱动,未能实现整个机翼展向上厚度的变化,且形状记忆合金弹簧的布置会影响外翼的长度。

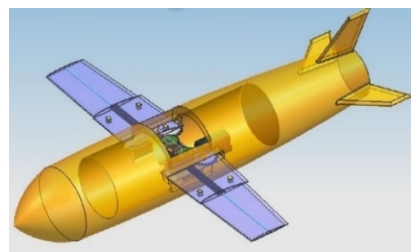


图23 变厚度展长后掠角机翼<sup>[33]</sup>  
Fig. 23 Variable-thickness stretched-sweep wing<sup>[33]</sup>

由三个参数变化到四个参数变化,北京理工大学的雷娟棉等<sup>[34]</sup>提出了一种可以改变机翼展长、后掠角、相对厚度、弯度的机翼结构,该结构如图24所示。根据平行四边形原理,通过气缸拉动

内部肋板实现机翼的后掠角变化;展向梁采用嵌套式,由梁套和梁轴组成,梁轴通过螺纹配合与电机驱动的丝杠连接,实现展长变化;沿弦长方向布置若干丝杆,利用电机驱动不同丝杆上下移动实现机翼不同位置的厚度变化,既能改变最大厚度的位置,又能改变相对厚度的大小;后缘同样依靠电机驱动后缘板,实现旋转以改变弯度。该结构运用气缸驱动后掠角,需要较好的密封性以及较大的气源存储空间,大量运用了电机驱动,同时实现厚度变化的伸缩柱数量较多,导致该机翼结构复杂且重量较重,每个点位均需电机控制,导致控制难度加大。

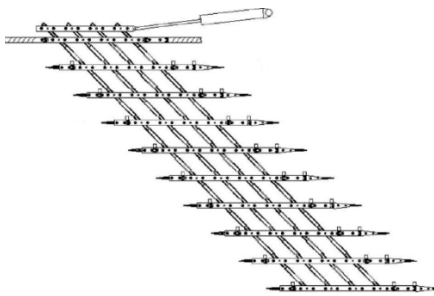


图 24 变形机翼机构<sup>[34]</sup>

Fig. 24 Morphing wing mechanism<sup>[34]</sup>

上述结构中每个参数都有独立的驱动元件,甚至每个参数的驱动元件不止一个,这不仅增加机构的重量和复杂程度,还加大了控制难度。为进行进一步优化,哈尔滨工业大学的王云飞等<sup>[35]</sup>设计了一种平行连杆式变形机翼,在保证多参数变化同时,可减轻机构重量,结构如图 25 所示。

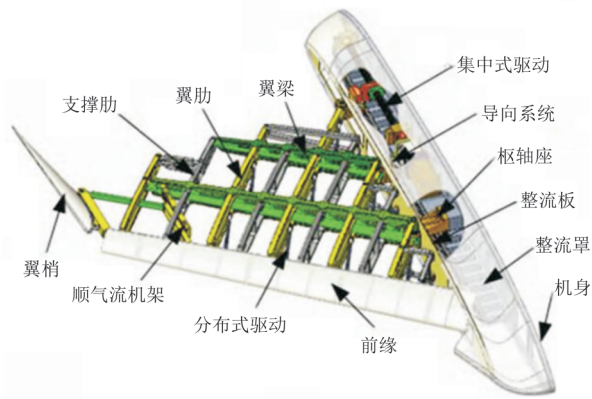


图 25 平面连杆机构变形翼<sup>[35]</sup>

Fig. 25 Planar linkage deformation wing<sup>[35]</sup>

该机翼采用分布式驱动器和集中驱动器相结合的方式,提高了驱动效率,能够减轻驱动机构的重量。机翼结构由若干菱形结构单元组成,通过

具有较高的能量密度智能驱动材料驱动菱形单元,能够实现机翼弦长、后掠角、翼面积、展弦比的变化。经样机测试,翼面积变化率可达 175%,展弦比可在 1~4.8 之间变化,相对厚度变化率为 5.64%,能够实现连续变形。该结构还设有翼尖小翼,能够有效改善翼尖涡的影响。

组合变形涉及的变化参数多,需要同时考虑变化参数对气动效率的影响;结构也相对复杂,加大了控制点数量和难度,对结构状态采集难度也加大了。但想要实现更高效的飞行,组合变形是发展的趋势。

### 3 关键技术

变形机翼包括变形蒙皮、变形机构、智能作动器、传感器和控制网络,每一部分都涉及若干学科,每一学科的进步都将推动整个变形机翼技术的发展。

#### 3.1 变形蒙皮

变形蒙皮可以通过自身材料属性或结构形式,顺应机翼内部结构变化,达到机翼表面连续光滑的目的。对于变形蒙皮而言存在着相互矛盾的要求,既要能产生连续光滑的大变形,又要具有足够刚度维持机翼的形状并传递载荷,因此对其材料性能要求极高。目前变形翼采用蒙皮实现变形的方式主要有三种,分别是材料弹性、机构变形和结构变形<sup>[36]</sup>。材料弹性是指材料本身具有足够的弹性产生所需的变形,例如合成橡胶、复合材料、形状记忆材料等。机构变形是指刚性蒙皮之间通过相对运动产生所需变形,例如鱼鳞式蒙皮、多个未粘合蒙皮组成的多层蒙皮<sup>[37]</sup>。结构变形是指蒙皮通过材料结构放大整体的小应变变形<sup>[38]</sup>,例如零泊松比的混合式蜂窝状结构蒙皮<sup>[39]</sup>。理想蒙皮材料是依靠自身的弹性变形,这样既能保证翼面的连续光滑变形,又能具有良好的气密性。但实际实验过程中形状记忆材料的加热装置存在加热不均匀或者因变形失效等问题;复合材料的研制虽然取得一定成果,但变形量仍未达到需求;且弹性材料在变形方面还存在变形精度问题,未来仍是蒙皮材料研究的重点。

#### 3.2 变形机构

变形机构是变形机翼实现变形的重要条件,

对变形机构的要求:足够的刚度、较高的变形精度、较轻的重量、可实现反复连续变形<sup>[40]</sup>。目前传统的变形机构存在重量大、结构复杂、变形翼面不连续的问题,导致大部分机构很难应用于实际。目前变形机构存在两种驱动方式,一是集中驱动式变形结构,该结构简单,但重量大,变形形式单一,如齿轮传动<sup>[8-9]</sup>、气压驱动<sup>[17]</sup>等;另一种是分布驱动式变形结构,其具有较高的控制精度,变形形式灵活等优点,如南京航空航天大学的随涛等<sup>[41]</sup>提出的多电机分布式驱动,分布式驱动结构也是今后研究的重点。将智能材料应用于变形结构中,以满足对变形机构的要求,是变形机构研究的重点。

### 3.3 智能作动器

智能作动器用以驱动变形机构运动,对其要求是:功率密度高、体积小、重量轻、响应速度快、输出力大、输出位移大、易控制、精度高等。目前形状记忆合金<sup>[42-44]</sup>由于输出力大、输出位移大等特点而广泛应用于航空行业,但也存在控制精度差、循环响应慢等缺点。智能作动器种类繁多,应用场合也不同,随着复合材料的发展,智能作动器的优势也会逐渐体现。

### 3.4 传感器和控制网络

飞机在飞行过程中,飞行环境复杂多变,传感器和控制网络要对环境及时检测并进行机翼变形<sup>[45]</sup>,才能有效提高飞行性能。传感器同时要感知外界环境变化和结构状态,这要求传感器既能检测到外界环境又要与内部结构相互融合,因此传感器位置的布置也是研究的重点。除此之外,传感器本身的稳定性、抗干扰性、灵敏度等<sup>[46]</sup>都是要考虑的重点。控制系统分为飞行控制系统和变形控制系统<sup>[47]</sup>,这两个系统相互关联,总控制系统需要对数据传输和计算能力具有较高水平,同时还要处理两个系统的协调问题。

## 4 现存问题与关键技术展望

### 4.1 面内变形翼现存问题及发展趋势

1) 变变展长机翼一般存在两类问题:一方面是翼面连续性的问题;另一方面是因变形长度受到震颤、刚度等方面的影响,难以实现大跨度变

形。根据目前存在的问题,其未来的发展趋势有以下方面:研发具有足够变形量和刚度的蒙皮材料,能够满足随机机构的伸缩;考虑刚性蒙皮与柔性蒙皮相结合,以达到连续且大变形的目的;机构创新,在保证刚度的情况下,提高机构伸缩量的同时减轻机构重量以及提高空间利用率。

2) 变掠角对解决竞速域飞行问题其至关重要的作用,目前变掠翼存在的问题在于:驱动机构的重量问题;适用于“剪切式”变形蒙皮不满足使用要求;“剪切式”变形机构的空间问题。根据目前存在的问题,其未来发展趋势有以下方面:设计高能量密度,大驱动力,高可靠性,轻质量的驱动机构;研发大变形、高刚度、耐高温的蒙皮,以满足“剪切式”变后掠机翼;机构创新,能够使“剪切式”变形方式产生较大的后掠角变形,避免机构干涉问题,同时机翼内部有足够的空间存储其他零部件。

3) 根据目前研究来看,变弦长机翼存在的缺点有:缺少桁架结构支撑蒙皮,结构刚度低,仅适用于低速小型无人机;变弦长机构充满机翼内部空间,空间占用率高,影响其他零部件的布置。根据目前的问题,其未来的发展趋势有:设计大跨度、小驱动的机械结构,以提高刚度,但需考虑重量问题;研发轻质、高刚度、适量变形的新型材料;对于结构空间问题,尽量减少结构空间的占用率;弦长沿展长方向线性变化与均布变化在不同飞行环境时的气动特性优劣,结构上是否可以相互结合,以提高机翼的气动特性。

4) 组合变形机翼涉及变化参数多,目前存在的问题主要有:对同时考虑多个变化参数对气动效率影响的研究较少,在不同环境下,参数相互耦合时的最佳变形规律难以掌握;结构相对更加复杂,要同时考虑参数变化与结构干涉问题,也加大了控制点数量和难度,结构状态采集难度加大,需要准确把握机翼参数状况。针对以上问题,其未来发展趋势在于:气动特性规律分析,多参数如何共同变化,提高机翼的气动性能;以较少的驱动,驱动较多的参数变化,以减轻机构的重量;创新结构,设计简单而联动的机构。

### 4.2 面内变形机翼关键技术展望

为进一步促进机翼主动变形技术在飞行器上的应用,未来需要着重解决的关键技术问题主要



有以下 4 点。

1) 变形蒙皮方面:足够的弹性形变,较高的刚度,同时有较高的变形精度是未来的研究重点,智能蒙皮虽然具有较大的变形量,但在刚度上不足,不适用于高速飞行。当飞行速度达到超声速时,还需考虑温度的影响。因此变形蒙皮的未来发展趋势在于如何将大变形、高刚度、耐高温三个特性相结合,研发出能够满足大变形、宽速域飞机的需求。

2) 变形机构方面:变形机构虽然起步较早,但由于受其他技术的限制,难以实现较大突破。目前变形机构的重点在于通过拓扑优化、遗传算法等手段进行驱动位置、驱动数量、机构重量等方面进行优化,在保证足够的变形精度和刚度的前提下,减小机构空间和重量。而未来的发展方向在掌握多参数最优变形规律的基础上,设计可联动的机械结构,以较少的驱动,驱动多个参数同时达到飞行环境下的最优条件。

3) 智能作动器方面:小体积下具有高功率密度的智能作动器对飞机能源消耗具有重要意义,能够增加飞机的航程,混合驱动能相互弥补缺点。未来的发展趋势在于设计体积小、重量轻、驱动力大的作动器,一方面可通过多种作动器串/并联形式,提高驱动性能;另一方面依靠新材料创新设计新作动器。

4) 传感器和控制网络方面:传感器和控制网络对于变形动作的稳定性和灵敏性起重要作用。未来的发展趋势在于:设计灵敏度高、探测范围广、可靠性高且稳定的传感器;将传感器更好地与变形机构和外部环境相结合;控制网络中以较少的计算量控制变形系统和飞行系统,减少控制系统的负担。

## 5 结束语

变形机翼已成为设计飞机、提高飞机飞行性能的重要研究对象,得到了广泛关注,并且进行了深入研究。从目前研究现状发现,变形机翼机构仍以传统机械结构应用为主,柔顺机构、智能材料仍处于研究阶段。传统机械结构虽具有变形精度高、传输力大等优点,但是体积大、重量大等限制了变形机翼的发展,未来对新型智能材料、智能柔

性机构、新型驱动器、新型传感器及智能控制网络的研究将是重点研究领域。

本文对面内变形机翼的研究现状进行了归纳总结,指出了未来趋势,提出了亟待解决的关键技术并对其进行展望,可以为内变形机翼结构的设计与实现提供一定的理论和技术参考。

## 参考文献

- [1] 段富海, 初雨田, 关文卿, 等. 变形机翼的发展现状综述[J]. 机电工程技术, 2021, 50(1): 12-18.  
DUAN Fuhai, CHU Yutian, GUAN Wenqing, et al. A review of development status of morphing wing[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(1): 12-18. (in Chinese)
- [2] 付俊兴, 洪厚全, 林海彬, 等. 国内变体飞行器研究进展[C]// 第九届中国航空学会青年科技论坛. 西安: 中国航空学会, 2020: 446-450.  
FU Junxing, HONG Houquan, LIN Haibin, et al. Research progress of variant aircraft in China[C]// The 9th Youth Science and Technology Forum of CAAC. Xi'an: CAAC, 2020: 446-450. (in Chinese)
- [3] 刘卫东. 变形机翼关键技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
LIU Weidong. Research on key technology of morphing wing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [4] 陆宇平, 何真, 吕毅. 变体飞行器技术[J]. 航空制造技术, 2008(22): 26-29.  
LU Yuping, HE Zhen, LYU Yi. Morphing aircraft technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(22): 26-29. (in Chinese)
- [5] 聂瑞. 变体机翼结构关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.  
NIE Rui. Research on key technologies of morphing wing structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [6] SPOONER S. The Makhonine way, flight: the aircraft engineer and airship[J]. The Royal Aero Club of the United Kingdom, 1932, 20: 417-418.
- [7] SAMUEL J, PINES D. Design and testing of a pneumatic telescopic wing for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4): 1088-1099.
- [8] SANTOS P, SOUSA J, GAMBOA P. Variable-span wing development for improved flight performance[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28(8): 961-978.
- [9] AJAJ R M, FRISWELL M I, BOURCHAK M, et al. Span morphing using the GNATSpar wing[J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 53: 38-46.
- [10] HOSSAIN A, WANG W, YUE H. Design and analysis of a linear servo-actuated variable-span morphing wing[J]. IN-

- CAS Bulletin, 2020, 12(4): 71-82.
- [11] 李智,董二宝,许旻,等. 伸缩翼变形机构设计与实验研究[J]. 机械与电子, 2013(7): 65-68.  
LI Zhi, DONG Erbao, XU Min, et al. Structural design and experimental research for the telescopic wing[J]. Machinery & Electronics, 2013(7): 65-68. (in Chinese)
- [12] 王礼佳. 无人机变形翼的方案设计与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
WANG Lijia. The scheme design of the UAV morphing wing and simulation analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] 张祖豪. 具有连续机翼表面的伸缩式变形翼研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
ZHANG Zuhao. Study on telescopic morphing wing with continue skin[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] 董朝阳,江未来,王青. 变翼展飞行器平滑切换LPV鲁棒 $H_{\infty}$ 控制[J]. 宇航学报, 2015, 36(11): 1270-1278.  
DONG Chaoyang, JIANG Weilai, WANG Qing. Smooth switching LPV robust  $H_{\infty}$  control for variable-span vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(11): 1270-1278. (in Chinese)
- [15] PERRY R. Variable-sweep aircraft: a case history of multiple re-innovation[C]// AIAA 3rd Annual Meeting. Boston: AIAA, 1966: 983.
- [16] FINCH T W, BRIGGS D W. Preliminary results of stability and control investigation of the bell X-5 research airplane[R]. US: NACA Research Memorandums, 1953.
- [17] MARMIER P, WERELEY N. Control of sweep using pneumatic actuators to morph wings of small scale UAVs[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. [S. l.]: AIAA, 2003: 1802.
- [18] NEAL D, FARMER J, INMAN D. Development of a morphing aircraft model for wind tunnel experimentation[C]// 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. [S. l.]: AIAA, 2006: 2141.
- [19] 王钊. 弹簧式自适应变后掠翼机构设计研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.  
WANG Zhao. Study on design of spring-type adaptive sweep wing mechanism[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017. (in Chinese)
- [20] 吕吉婵,董彦非,陈元恺. 中低空高度下变后掠翼的最佳变后掠规律[J]. 飞行力学, 2016, 34(2): 24-27.  
LYU Jichan, DONG Yanfei, CHEN Yuankai. Rules of the optimal variable sweep wing in low and medium height[J]. Flight Dynamics. 2016, 34(2): 24-27. (in Chinese)
- [21] 刘璐,董彦非. 基于空气动力学的变后掠翼翼身组合体变后掠规律基础研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(8): 76-80.  
LIU Lu, DONG Yanfei. Basic analysis of the best sweep variation rule about variable sweep wing-body based on aerodynamics[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(8): 76-80. (in Chinese)
- [22] 马航,宋笔锋,裴扬,等. 基于质心稳定的仿生变后掠翼最优变形规律研究[J]. 飞行力学, 2021, 39(4): 1-6, 12.  
MA Hang, SONG Bifeng, PEI Yang, et al. Study of optimal morphing law of biomimetic sweep wing based on stable centroid[J]. Flight Dynamics, 2021, 39(4): 1-6, 12. (in Chinese)
- [23] 蔡智杰,高则超. 可变后掠翼驱动机构设计与CFD仿真[J]. 机械设计, 2018, 35(9): 17-22.  
CAI Zhijie, GAO Zechao. Design of a variable sweep wing driving mechanism and CFD simulation[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(9): 17-22. (in Chinese)
- [24] MA T, FAN Y, CHANG N, et al. Design of a variable-sweep wing structure with flexible shear skin[J]. Aerospace Systems, 2022, 5: 1-10.
- [25] 都显琛,刘学翱,董洋,等. 可变后掠翼联动驱动机构设计与尺寸综合[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2502-2509.  
DU Xianchen, LIU Xueao, DONG Yang, et al. Design and dimensional synthesis of variable swept-wing linkage driving mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2502-2509. (in Chinese)
- [26] 张耀炯,付益博,苏文涛,等. 变前掠翼模型设计制作与空气动力仿真[C]// 第十八届北方七省市力学学会学术会议. 日照: 北京力学学会, 2021: 199-203.  
ZHANG Yaojiong, FU Yibo, SU Wentao, et al. Design and simulation of aerodynamic front swept wing[C]// The 18th Academic Conference of Mechanical Society of Seven Northern Provinces and Cities. Rizhao: STAM, 2021: 199-203. (in Chinese)
- [27] PERKINS D, REED J, HAVENS E. Morphing wing structures for loitering air vehicles[C]// 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Palm Springs: AIAA, 2004: 1888.
- [28] REED J L, HEMMELGARN C D, PELLEY B M, et al. Adaptive wing structures[C]// 2005 Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies Conference. San Diego: SPIE, 2005: 132-142.
- [29] LEON O, HAYDEN E, GANDHI F. Rotorcraft operating envelope expansion using extendable chord sections[C]// American Helicopter Society the 65th Annual Forum. [S. l.]: AIAA, 2009: 1940-1953.
- [30] BARBARINO S, GANDHI F, WEBSTER S D. Design of extendable chord sections for morphing helicopter rotor blades[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(9): 891-905.
- [31] PARANCHEERIVILAKKATHIL M S. A compliant polymorphing wing for small UAVs[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(10): 2575-2588.
- [32] BALZAREK C, KALOW S, RIEMENSCHNEIDER J, et al. Manufacturing and testing of a variable chord extension

- for helicopter rotor blades[J]. MDPI, 2022, 11(2): 53.
- [33] 尹协镇. 无人机变形翼升阻特性研究及其强度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
YIN Xiezheng. Study on lift-drag characteristics and strength analysis of unmanned aerial vehicle's deformed wing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [34] 雷娟棉, 王贤勇, 黄灿, 等. 变形翼机构: CN102673774B [P]. 2014-04-02.  
LEI Juanmian, WANG Xianyong, HUANG Can, et al. Morphing wing mechanism: CN102673774B [P]. 2014-04-02. (in Chinese)
- [35] 王云飞, 肖洪, 杨广, 等. 平行连杆式变形翼结构设计及分布式驱动配置[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(1): 65-72.  
WANG Yunfei, XIAO Hong, YANG Guang, et al. Structure design and distributed actuators configuration of a parallel linkage morphing wing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(1): 65-72. (in Chinese)
- [36] 尹维龙, 石庆华. 变体飞行器蒙皮材料与结构研究综述[J]. 航空制造技术, 2017(17): 24-29.  
YIN Weilong, SHI Qinghua. Review of research on skin materials and structures of variant aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(17): 24-29. (in Chinese)
- [37] RAMRAKHYANI D S, LESIEUTRE G A, FRECKER M, et al. Aircraft structural morphing using tendon actuated compliant cellular trusses[J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(6): 1614-1620.
- [38] 段富海, 初雨田, 关文卿, 等. 变形机翼的关键技术研究现状及其展望[J]. 空军预警学院学报, 2020, 34(3): 203-209, 213.  
DUAN Fuhai, CHU Yutian, GUAN Wenqing, et al. Research status and prospect of key technologies of deformable wing [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2020, 34(3): 203-209, 213. (in Chinese)
- [39] ZHAO C, ZHOU L, QIU T. Design and analysis of flexible skin based on zero Poisson's ratio hybrid honeycomb [C] // 2019 Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems Conference. [S. l.]: SPIE, 2019: 755-765.
- [40] 祝连庆, 孙广开, 李红, 等. 智能柔性变形机翼技术的应用与发展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 28-42.  
ZHU Lianqing, ZHANG Guangkai, LI Hong, et al. Intelligent and flexible morphing wing technology: a review [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 28-42. (in Chinese)
- [41] 随涛, 徐志伟. 柔性蒙皮变体机翼多电机分布式驱动系统研究[J/OL]. 机械科学与技术: 1-8 [2022-05-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.13433/j.cnki.10038728.20220096.html>
- SUI Tao, XU Zhiwei. Research on multi-motor distributed driving system of morphing wing with flexible skin [J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering: 1-8 [2022-05-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.13433/j.cnki.10038728.20220096.html>. (in Chinese)
- [42] 邓豪. 用于智能蒙皮的 SMA 驱动器设计及其线性控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.  
DENG Hao. Design and linear control of shape memory alloy actuator for intelligent skin [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [43] 茅志文. 双程形状记忆合金力学模型及驱动器应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.  
MAO Zhiwen. Modelling of two way shape memory alloy and its application on actuator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [44] 杨金川. 基于形状记忆合金的变体机翼结构设计与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.  
YANG Jinchuan. Design and experimental study of morphing wing based on shape memory alloys [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [45] 倪迎鸽, 杨宇. 自适应机翼翼型变形的研究现状及关键技术[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 297-308.  
NI Yingge, YANG Yu. Research on the status and key technology in morphing airfoil of adaptive wings [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 297-308. (in Chinese)
- [46] XU D, HUI Z, LIU Y, et al. Morphing control of a new bionic morphing UAV with deep reinforcement learning [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 92: 232-243.
- [47] 张传涛. 变形翼飞行器的鲁棒智能控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
ZHANG Chuantao. Study of morphing aircraft based on robust adaptive control [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

#### 作者简介:

冯文正(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:机电装配系统与控制,变形机翼。

于菲(1986—),女,博士,副教授。主要研究方向:国家技术创新方法与实施工具工程技术。

关玉明(1957—),男,硕士,教授。主要研究方向:机电装配系统与控制。

刘智光(1986—),男,博士,讲师。主要研究方向:智能机器人。

(编辑:丛艳娟)