



超声电机在变体飞行器创新效应器中的应用*

Application of Ultrasonic Motor in Innovative Effector of Morphing Aircraft

李锋 张亚洲 田一松 邵明平 / 西安飞行自动控制研究所

摘要:从变体飞行器驱动的关键技术入手,对基于超声电机的变体飞机创新效应器进行了研究,包括基于超声电机的创新效应器的组成、工作原理及优点,为用于变体飞行器的创新效应器工程化研究奠定了基础。

关键词: 变体飞行器; 创新效应器; 超声电机

Keywords: morphing aircraft; innovative effector; ultrasonic motor

0 概述

变体飞行器是一种柔性的具有结构自适应能力的飞行器,可以在飞行中改变外形,以满足不同任务要求。创新效应器是一种全新概念的飞行器舵面驱动装置,可单体使用,也可按需求分布在效应器的翼面中,使舵面产生面变形或体变形,从而达到改变飞行器的气动特性以控制飞行姿态的目的。创新效应器是变体飞行器的自适应结构(自适应机翼)和飞机智能结构的重要组成部分,从使用功能上来说,也可以将其定义为作动器的一种。

1 应用于变体飞行器的创新效应器技术

1.1 变体飞行器变形驱动的关键技术

在飞行器的所有部件中,机翼对飞行器的升阻比、极限速度、机动性、操控及稳定性、经济性、安全性等有着极其重要的影响。变形机翼可以根据飞行任务和流场条件要求,通过精确的主动变形,始终保持飞行所需的最佳形状,从而保证较高的气动操纵效率。变体机翼结构设计的关键

问题主要集中在三个方面。

1) 变体机翼的构型研究

国外对变体机翼的构型研究较多。由于可以应用在机翼上的单个作动器的输出功率较小,因此机翼主要采用柔性机构形式,对某些节点处进行很小的弯曲或位移,通过组件的弹性变形传递,转变为较大的整体变形。智能驱动器与柔性机构相结合,所构成的结构具有质量轻、制造简单、无摩擦等优点。其中,采用最多的构型形式是以桁架为承力主体,以形状记忆合金(SMA)或压电驱动器为作动器。机翼的构型决定了机翼的结构设计、作动器和控制器的配置及其控制方法等,最佳构型方案可以使机翼获得较高的气动操纵效率,减少能量消耗,简化作动器和控制器的设计。因此,确定最佳构型方案是关键问题之一。

2) 创新效应器技术

在变体方式中,翼面积、翼面形状的改变,翼型的弯度、厚度变化,翼的扭转、鼓包,以及仿生扑翼等,都要求变形是连续平滑、灵活可控和

可逆的,这就对驱动结构提出了分布式和智能化的要求。面向飞行器的超声电机作动器不仅对其输出性能有一定的要求,而且要求力矩/质量比应尽可能大、效率尽可能高,耐久性和可靠性都应满足一定要求。

3) 变体机翼的无缝一体化设计

机翼外形的不连续将造成气流分离,从而影响气动特性与操纵效率。因此,如何保证变形过程中机翼外形的光滑、柔顺,是蒙皮材料、驱动系统与传感器一体化设计中必须解决的关键问题。

1.2 创新效应器实现方式对比

综合国外的研究现状,应用于变体飞行器创新效应器的实现方式大部分集中于新型智能材料在驱动小型、轻质量飞行器机翼变形方面的探索^[1]。但这些设计方案在实际的工程应用中将面临许多问题。如SMA作动器由于响应较慢,不能及时产生所需的变形,将影响机翼的飞行控制特性;设计自锁装置将导致可变体机构的结构复杂,质量增加,可靠性下降。表1比较了目前各种智能作动器的性能^[2]。综合分析,超声电机是性能最为优越的一种创新效应器的实现方式,适合小

* 基金项目: 航空科学基金(20080718001)资助

表1 各种智能作动器的性能比较

作动器	响应速度	能量密度	输出力	输出位移	刚度	自锁
SMA	慢	高	大	大	大	否
SMP	慢	低	小	大	小	否
电致伸缩	快	中	中	小	大	否
磁致伸缩	快	中	中	小	大	否
压电聚合物	中	低	小	小	小	否
压电陶瓷	快	高	中	小	大	否
超声电机	快	高	中	大	大	能

型变体飞行器的变形驱动。

2 超声电机技术

2.1 超声电机特点

超声电机的工作原理和工作效果与电磁电机完全不同，超声电机的一个主要特点是在获得较低转速的同时输出较大的力矩，无需减速机构，直接带动负载。此外，超声电机还具有以下特点^[3]。

1) 电磁辐射小。传统电机产生的强电磁干扰会使相关电气的正常工作受到影响，超声电机不使用电磁场作为驱动力，因此电磁辐射小，不需要进行过多的电磁屏蔽处理。

2) 断电自锁。超声电机通过定子、转子之间的接触摩擦来驱动，关闭电源后转子马上停止转动，并在摩擦力的作用下固定不动；而步进电磁电机若要将所驱动的部件固定在一个位置上则需要电流来维持。

3) 高响应。超声电机的响应时间较短，一般在十几毫秒以内。

4) 低成本。超声电机没有电磁线圈，可以不用铜材，节省原料成本。

5) 转速调节灵活。超声电机的转速可以通过改变驱动频率来进行调节，方式灵活。

6) 体积小。小尺寸电磁电机的效

率急剧降低，而超声电机却可以在很小尺寸下有效地工作。

2.2 超声电机的分类

超声电机分为环式和棒式两大类。

环式超声电机利用行波进行驱动，也称为行波超声电机。其定子振动体和压在其上的转子都是圆环形薄片，如图1所示。电机工作时，在定子圆环上产生的是弯曲振动的行波，行波沿着圆环的周向行进，圆环表面质点的振动轨迹为椭圆形。表面质点在波峰处，位移有一个平行于静止圆环的分量，这个分量通过摩擦驱动与之接触的环形转子。环形行波超声电机的输出力矩一般不大。

棒式超声电机分为弯曲旋转型和扭纵型。

弯曲旋转型棒式超声电机的定子和转子都采用圆盘形，转子的中心与输出力矩的轴相联。定子、转子的相互作用发生在圆盘的边

缘处，定子为圆柱形。振动时圆柱的轴线发生弯曲，定子端面上只有一个点与转子相接触。改变圆柱弯曲的方向，接触点的位置也相应改变。如果让接触点绕原轴线旋转，与定子相接触的转子即被摩擦力驱动而随着接触点发生转动。由于此类棒式超声电机的定子进行弯曲旋转运动，所以也被称为弯曲旋转超声电机，工作原理如图2所示。

扭纵型棒式超声电机沿着轴线纵振动，同时围绕轴线扭转振动。纵振动使定子、转子之间交替分离和接触。在扭转振动的前半个周期，定子与转子接触，通过摩擦驱动向一个方向转动；扭转振动的后半周期，定

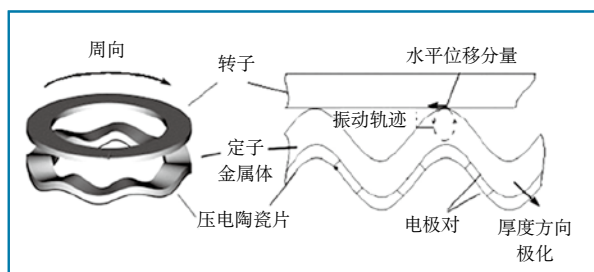


图1 行波超声电机工作原理

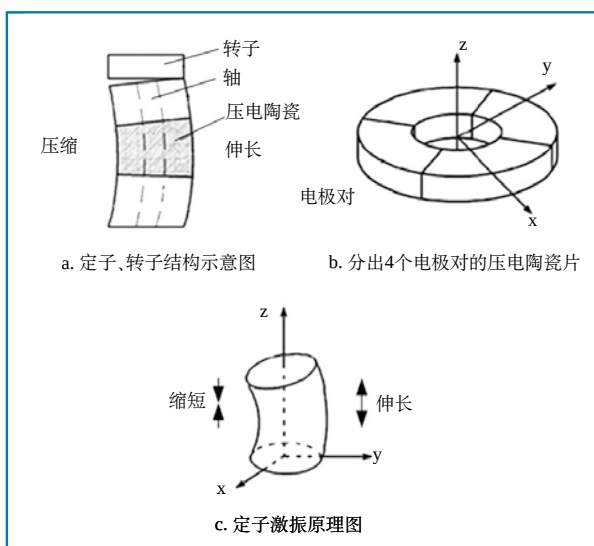


图2 弯曲旋转超声电机工作原理图

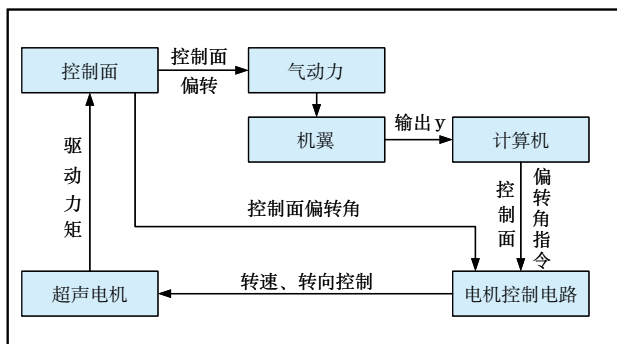


图3 控制流程

子反方向扭动，但此时定子、转子恰呈分离状态，转子不会反方向运动。每个周期都重复上述过程，转子就保持向同一个方向旋转。扭纵超声电机的输出力矩可以很大，目前能达到40牛米。由于这种电机产生两种振动，根据设计规律，要求具有很大的轴向尺寸，因而限制了其应用范围。

2.3 振动的形成

超声电机需要振动源，一般采用压电陶瓷将电能转换成机械能。压电材料有一个极化方向，施加电压时，当电场方向与极化方向一致或相反时，压电材料在极化方向上发生伸长或缩短变形；当电场方向垂直于极化方向时，就会产生剪切变形。当电压方向交替变化时，就产生交变的机械变形，即发生机械振动。振动的频率与交流电的频率一致。

3 超声电机技术在创新效应器中的应用

3.1 基于超声电机的创新效应器组成

基于超声电机的创新效应器由压电陶瓷的逆压电效应和超声振动产生转动和输出力矩，主要包括超声电机、控制器和角位移传感器三部分。

其中，超声电机是主要的功率输出部分，根据转速和转向指令提供对应的力矩输出，驱动相应的控制面进

行偏转；角位移传感器实时测量超声电极的角度输出，并将此信号反馈至控制器；控制器接受飞控计算机的控制指令，与角位移传感器采集的指令进行综合，输出超声电机的转速和转向指令，对超声电机进行控制。

3.2 基于超声电机的创新效应器工作原理

基于超声电机的创新效应器作为飞行控制系统中分布式的功率输出单元，在整个飞行器的飞行控制中的工作原理如图3所示。飞行中的气动力作用于飞机翼面，使机翼产生相应的位移输出，该信号被飞控计算机采集，根据飞行状态和控制律进行计算后，由飞控计算机给出机翼上相应的控制面应该调整的偏转角指令，控制器通过对控制面的偏转指令与控制面当前的偏转角进行对比，输出基于超声电机的经由创新效应器调整的转速、转向控制，驱动控制面，改变偏转角度的控制面对气动力进行反作用，达到了闭环的控制过程。

3.3 基于超声电机的变体飞机驱动技术的优点

采用基于超声电机驱动技术对变体飞行器进行控制，除具有低速大扭矩、断电自锁、响应快和扭矩质量比大等优点外，同时也具有对机翼颤振主动抑制的优点。

南京航空航天大学采用超声电机及其驱动与控制器实现了风洞模型颤振的主动抑制。图4所示为二维机翼段控制系统结构图。数值仿真和风洞模型实验研究表明，以超声电机作为控制面的作动器可以有效抑制机翼

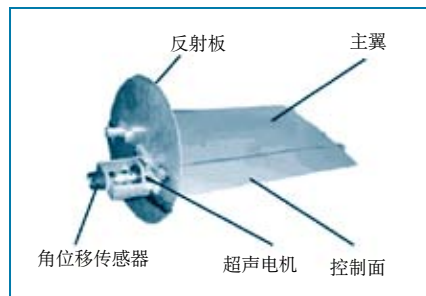


图4 二维机翼段控制系统结构图

颤振，并将机翼颤振临界速度提高了13.4%^[4]，之后又分别利用H_∞控制器和μ控制器将临界速度提高了23.4%。

4 结论

本文介绍了变体飞行器驱动的关键技术，在此基础上对创新效应器的实现方式进行了对比分析，并对超声电机的分类、振动形成进行了说明，最后研究了基于超声电机的创新效应器，详细说明了其组成、工作原理及优点，为用于变体飞行器的创新效应器工程化研究奠定了基础。 **AST**

参考文献

- [1] 陈宇,付华龄. 超声电机[J]. 现代物理知识,2010,22(4): 31-34.
- [2] 于明礼,胡海岩. 基于超声电机作动器的翼段颤振主动抑制[J]. 振动工程学报, 2005,18(4):18-425.
- [3] 于明礼,文浩,等.二维翼段颤振的H_∞控制器[J]. 振动工程学报, 2006,19(3): 326-330.
- [4] 于明礼,文浩,等. 二维翼段颤振的μ控制[J]. 航空学报,2007,28(2): 340-343.

作者简介

李锋, 工程师, 主要从事航空液压伺服控制技术的研究工作。