

压电致动器扑翼结构动力学仿真*

田卫军^{1,2}, 张亚锋², 李郁²

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072;
2. 西北工业大学明德学院机电工程系, 西安 710124)

[摘要] 采用传统扑动机构的微型扑翼, 气动效率低、扑动能耗大。采用压电致动器的微型扑翼通过压电材料进行致动使机翼产生上下扑动, 有效地将扑动机构和机翼两个主要系统进行集成, 不仅节省重量, 同时它具有任务变形自适应能力强、气动效率高和扑动能耗小的特点。通过 PCL 语言建立采用压电致动器的扑翼有限元模型, 结合同尺寸扑翼气动力试验数据, 进行采用压电致动器扑翼结构仿真。利用仿真结果研制采用压电致动器扑翼原理样机, 研究表明, 采用压电致动器后扑翼扑动频率得到明显提高, 压电片可有效控制机翼的弯扭变形, 有助于提高扑翼的气动效率。

关键词: 压电致动器; 扑动频率; 扑翼; 结构仿真

Dynamic Simulation Analysis of Piezoelectrically Driven Flapping Wing

TIAN Weijun^{1,2}, ZHANG Yafeng², LI Yu²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Ming De College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710124, China)

[ABSTRACT] The aerodynamic efficiency is low, the energy consumption is high for flapping to micro flapping wing used traditional mechanism. The bionic flapping wing driven by piezoelectric materials effectively integrates flapping mechanism and the wings. It is not only to save weight but also to be the task of deformation and strong adaptive ability, high aerodynamic efficiency, low energy consumption characteristics of mechanism. It is to establish finite element model of piezoelectric flapping wing by PCL language. The structure simulation of piezoelectrically driven bionic flapping wing is carried out with the size of the aerodynamic force of the experimental data. The piezoelectrically driven bionic flapping wing is developed by using simulation results. The studies show flapping frequency of bionic flapping wing is improved obviously after using piezoelectric actuator. The piezoelectric patches can effectively control wing bending and torsion deformation, and help to improve aerodynamic efficiency of flapping wing.

Keywords: Piezoelectric; Flapping frequency; Flapping wing; Structure simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.14.068

扑翼飞行器是一种通过机翼的上下扑动来产生升力和推力的新概念飞行器。空气动力学的研究成果表明^[1], 对于主尺度小于 15cm 的微型飞行器, 扑翼飞行方式比固定翼和旋翼飞行方式具有更大的升阻比, 更强的抗扰动能力和更加灵活的机动性。

常规的扑动机构由于自身原因无法实现高频率扑动而使扑翼的气动效率较低, 很大程度上制约了扑翼飞行器的发展。随着压电材料的发展, 采用压电致动器的

扑翼机构是实现扑翼高频率扑动的一种有效手段。与其他驱动机构相比, 压电致动器具有独特的优点: 工作频率范围宽、动态范围大、频响速度快、灵敏度高、温度稳定性好 (-20~150℃)、质量轻、结构简单, 既可以粘贴在结构表面, 还可以通过一定的工艺措施耦合到结构之中。特别是牺牲层刻蚀技术的开发, 为压电致动器在扑翼飞行器上的应用提供技术背景^[2]。

目前, 国内对于压电驱动的新型扑动机构研究还处于理论探索阶段。具有代表性的有西北工业大学的张西金等^[3]对电磁振动式微型扑翼机构设计和动力学特

* 基金项目: 陕西省教育厅 2015 (15JK2166)。

性进行研究,分析了不同电磁力激励下系统动态响应,并获得了系统的固有频率;西北工业大学的侯宇等^[4]根据昆虫扑翼飞行节律运动的原理,设计了一个压电驱动的两自由度扑动机构。南京航空航天大学的王姝歆等^[5]对压电双晶片驱动的仿生柔性扑翼机构进行研究,设计出了压电双晶片驱动柔性双摇杆机构放大位移并带动仿生翅拍动的扑翼系统。国外关于压电材料应用于扑翼机翼的研究也处于原理探索阶段。其中具有代表性的有:由 SRI 和 Toronto University 合作研制的 Mentor 概念机^[6]。

机翼由一种电致伸缩的聚合物 EPAM (Electrostrictive Polymer Actuated Muscle) 驱动。EPAM 通过快速改变电压值来实现收缩和伸长,装置尤其适用于快速摇摆运动,如扑翼运动。英国克兰菲尔德大学 Chung 等进行了应用压电材料的扑翼飞行器仿真研究^[7]。Chung 从扑动相位、频率等不同角度对机翼扑动进行了仿真研究。韩国 Konkuk 大学的 Nquven 等^[8]结合仿真和试验研究了带有压电致动器的仿生扑翼产生的气动力以及扑动特性。美国 Calif Berkeley 大学的 Campolo^[9]利用压电致动器研制了昆虫量级的微型飞行器。印度 Bangalore 大学的 Sujoy 等^[10]对采用压电致动器仿蜻蜓扑翼动力学特性进行研究。美国 Vanderbilt 大学的 Cox^[11]对采用压电致动器的可悬停扑翼的升力和功率特性进行了研究。本文通过分析压电致动器扑翼驱动原理,结合已有同尺寸扑翼气动力和惯性力试验数据,通过 PCL 参数化结构仿真,模拟压电致动器扑翼结构动力学特性,为压电致动器扑翼研制提供理论指导。

1 压电致动器扑翼

1.1 驱动原理

采用压电致动器的翅翼(如图 2 所示)是一种利用压电致动器(PZT)带动翅翼产生主动变形的新概念翅翼结构形式。压电材料通过胶接平行布置于翅翼根部,主要利用压电片在面内的伸缩特性,通过驱动两翼的压电致动器遵循共振原理实现翅翼的高频扑动,改善翅翼的结构特性;同时通过调节输入电压可使两翼扑动幅

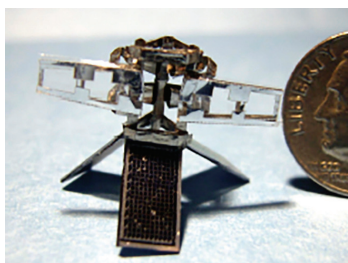


图1 机器蝇

Fig.1 Micromechanical flying insect

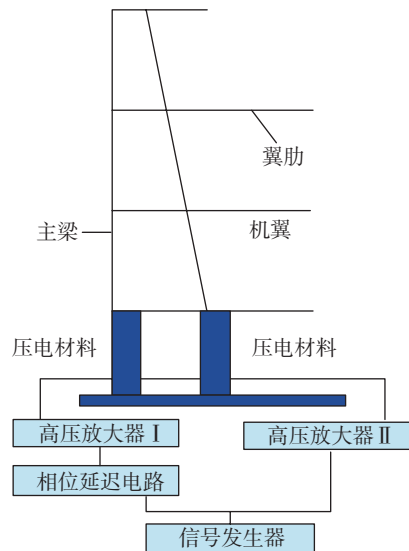


图2 采用压电致动器的翼驱动原理图

Fig.2 Principle diagram of piezoelectrically driven wing

值不同从而改变翅翼上气动力,如图 2 所示。这种扑动机构的优点为:(1)通过采用适当频率的电压驱动,利用系统共振可以实现高频扑动(较小的驱动电压实现较大的扑动角);(2)通过改变驱动电压的幅值可以调节扑动角的大小,便于扑翼飞行器控制以及姿态变换;(3)易于向微型化方向发展。

1.2 机翼模型

机翼为翼展 400mm,弦长 100mm 的矩形机翼。机翼主要由碳纤维梁和蒙皮构成;机翼骨架由碳杆构成,蒙皮由聚四氟乙烯薄膜构成。压电片(PZT)粘贴于机翼根部,机翼模型如图 3 所示,有限元仿真材料属性及尺寸见表 1,质量为 4g,机翼质心位于半展向 0.1m 处。

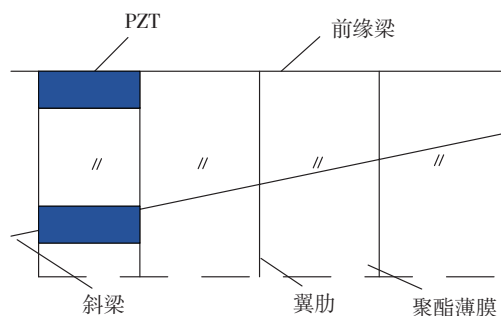


图3 压电扑翼机翼模型

Fig.3 Piezoelectrically driven flapping wing

表1 有限元仿真材料属性及尺寸

参数	PZT	梁碳杆	肋碳杆	聚酯薄膜
弹性模量 /GPa	62	150	100	1.4
泊松比	—	0.33	0.33	0.40
密度 / (g·mm ⁻³)	7.8	1.5	1.5	1.2

2 PCL 参数化结构仿真

2.1 有限元模型

利用有限元软件 Patran 中 PCL 模块对采用压电致动器的机翼进行结构仿真。梁采用 beam 单元,单元适合于分析从细长到中等粗短的梁结构,该单元基于铁木辛哥梁结构理论,并考虑碳纤维杆剪切变形的影响。翼肋采用 Bar 单元,薄膜采用 shell 单元,PZT 压电片采用 shell 单元,机翼外形定义如图 4 所示,网格划分如图 5 所示。

2.2 边界条件

机翼仅存在绕 x 轴旋转的自由度,当体坐标系和 x 轴上的节点以同机翼相同的角频率在惯性坐标系中旋转时,根弦处于相对静止状态,不存在平移、转动和沉浮运动。将机翼前缘和斜梁根部作固支处理。扑翼机翼最大扑动角为 70°,扑动频率 7.8Hz。上下扑动对称,在单个上扑角或下扑角中,水平线以上扑动角为 45° 大于水平线以下扑动角 25°;带有被动的弦向扭转变形。

2.3 载荷

机翼上的载荷包括气动力和惯性力。气动力沿机翼展向分解后直接施加于机翼翼肋上。惯性力采用均布载荷的形式也直接施加于机翼翼肋上。

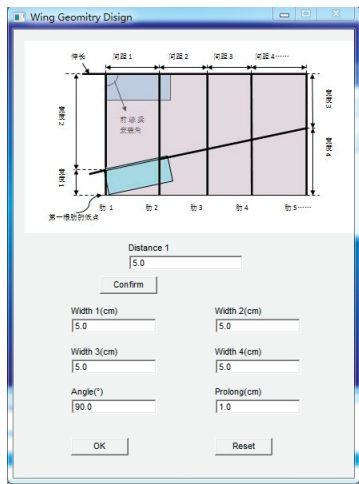


图4 机翼外形及尺寸设置窗口

Fig.4 Wing shape and size setting window

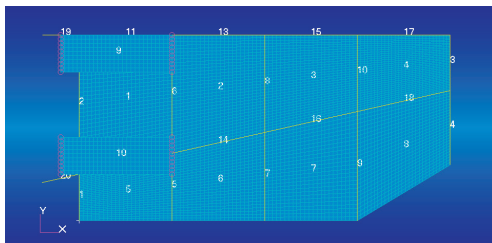


图5 网格划分

Fig.5 Meshing division

(1) 气动力。

扑翼机翼上的作用力包括气动力和惯性力。文中对同尺寸扑翼模型在来流速度为 10m/s,扑动频率为 7.8Hz,机身中轴线与来流夹角为 0° 的情况下进行了风洞试验。升力、阻力与瞬时扑动角的对应关系如图 6 所示。升力沿展向分布,具体展向分布参照文献 [12]。

(2) 机翼上的惯性力。

当机翼进行周期性扑动时,机翼上随之产生周期性惯性力。惯性力计算公式如下:

$$F_{inertial} = - \sum_{i=1}^n m_i a_i \quad (1)$$

式中, m_i 为机翼第 i 个微元的质量, a_i 为第 i 个质量微元所对应的线加速度。

由于机翼惯性力是阻滞机翼运动的一种假象力,惯性力越大其驱动机翼扑动需要的输入功率就越大,能量消耗越严重。因而在设计时应尽量减小惯性力对机翼变形的影响。机翼的惯性力最大正值为 0.689N,最小负值为 -0.515N^[12]。

2.4 结果与讨论

经有限元仿真,模型的一阶模态固有频率为 6.74Hz,如图 7 所示;二阶模态固有频率为 19.39Hz,如图 8 所示;三阶固有频率为 25.49 Hz,如图 9 所示。当作用力的频率与某一固有频率接近时,可能引起结构共

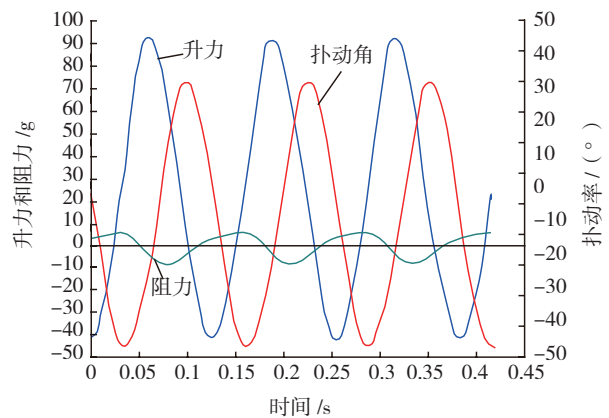


图6 升力、阻力与瞬时扑动角

Fig.6 Lift and drag versus instantaneous flapping phase

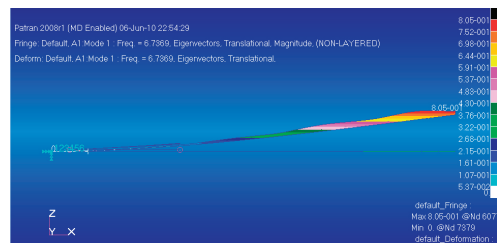


图7 一阶模态

Fig.7 The first step model

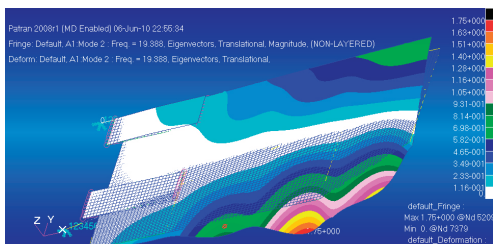


图8 二阶模态

Fig.8 The second step model

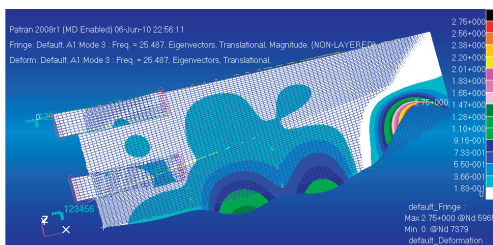


图9 三阶模态

Fig.9 The third step model

振,结构将产生强烈的振动,从而实现高频扑动。通过采用有限元分析方法对机翼结构进行动力学分析,研究了机翼结构与其固有频率和振型的关系,从而为研究机翼的动力学问题和改进设计提供了一定的依据。现已研制出的压电致动器扑翼飞行器扑动频率为 12Hz,故而有限元模型模拟的结果比较接近真实情况。

3 压电致动器机翼研制

结合仿真结果研制了采用压电致动器扑翼机翼,试验中功率放大器采用双通道供电,试验电压为 160V,当扑动频率和机翼共振频率一致时,压电机翼产生的扑动频率为 12Hz,压电扑翼机翼翼尖最大变形为 $\pm 32\text{mm}$ 。压电致动器机翼如图 10 所示,压电致动器扑翼扑动试验如图 11 所示。

4 结论

通过 PCL 语言建立采用压电致动器的扑翼有限元模型,结合同尺寸扑翼气动力试验数据,进行压电致动器扑翼结构动力学仿真。研究表明,采用压电致动器后扑翼扑动频率从 8Hz 明显提高到 12Hz,为研究机翼的动力学问题和改进设计提供了一定的依据。随着将来 MEMS 技术的发展,功率放大器、压电片等部件的质量将大幅度减小,扑动频率将显著增加。根据以往研究结果可知,扑动频率的增加,有助于推力的增加,频率对升力的影响相对较小,因此采用压电致动器后有助于提高扑翼的气动效率。最后结合仿真结果研制出采用压电致动器扑翼原理样机,实现了压电片对机翼弯扭变形的有效控制。

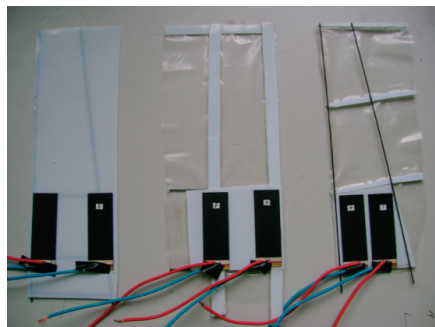


图10 压电致动器机翼

Fig.10 Piezoelectric actuator wing



图11 压电机翼试验

Fig.11 Experiment of piezoelectric wing

参考文献

- [1] 崔尔杰. 生物运动仿生力学与智能微型飞行器[J]. 力学与实践, 2004, 26(2): 1-8.
- [2] CUI Erjie. Biomimatics of flying animals and intelligent micro air vehicle[J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26(2): 1-8.
- [3] 宋颖, 王志臣, 杜彦良. 压电传感测试技术的应用研究进展[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(5): 8-11.
- [4] SONG Ying, WANG Zhichen, DU Yanliang. Research progress of piezoelectric sensing measurement technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(5): 8-11.
- [5] 张西金, 方宗德, 张明伟. 电磁振动式微扑翼机构设计和动力学研究[J]. 机器人, 2007, 129(6): 575-580.
- [6] ZHANG Xijin, FANG Zongde, ZHANG Mingwei. Design of the electromagnetic vibratory mechanism for fmax and the research on its dynamics[J]. Robot, 2007, 129(6): 575-580.
- [7] 侯宇, 方宗德, 孔建益. 扑翼节律运动的产生与控制[J]. 中国机械工程, 2006, 117(22): 2410-2414.
- [8] HOU Yu, FANG Zongde, KONG Jianyi. Generation and control of flapping-wing rhythmic movement[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 117(22): 2410-2414.
- [9] 王姝歆, 陈国平, 周建华. 压电双晶片驱动的仿生柔性扑翼机构研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 617-622.
- [10] WANG Shuxin, CHEN Guoping, ZHOU Jianhua. Study on insect-based flapping-wing system driven by piezoelectric bimorph[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 617-622.

(下转第76页)