

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 压电双晶片驱动的仿生柔性扑翼机构研究

王姝歆<sup>1</sup>, 陈国平<sup>1</sup>, 周建华<sup>2</sup>, 颜景平<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016;

2. 扬州大学 机械学院, 江苏 扬州 225000; 3. 东南大学 机械系, 江苏 南京 210096)

**摘要:**分析了昆虫的翅膀-胸部运动系统,并以此为基础,仿生设计出压电双晶片驱动,柔性双摇杆机构放大位移并带动仿生翅拍动的扑翼系统。分析了压电双晶片的工作原理,讨论了柔性四杆机构的自由度和运动学,并对整个系统的准静力学进行探讨,以确定能否产生足够的力克服空气阻尼。仿真和实验结果表明,通过柔性机构放大压电双晶片位移,能实现仿生翅所需运动,同时进一步的优化设计将有助于改进扑翼机构的运动性能。

**关键词:**压电双晶片;柔性机构;扑翼系统;微型扑翼飞行器

中图分类号:V241;TN384 文献标识码:A

## Study on insect-based flapping-wing system driven by piezoelectric bimorph

WANG Shu-xin<sup>1</sup>, CHEN Guo-ping<sup>1</sup>, ZHOU Jian-hua<sup>2</sup>, YAN Jing-ping<sup>3</sup>(1. *Nanjing University of aeronautics andastronautics, Nanjing, 210016, China;*2. *Yangzhou University, Yangzhou 225000, China;* 3. *Southeast University, Nanjing 210096, China)*

**Abstract:** On basis of the insect thorax-wing structure, a flapping - wing system consisting of the bimorph piezoelectric actuator, compliant mechanism, and bionic wing was presented. The principle of bimorph piezoelectric actuator was introduced, and the kinematics of compliant four-link mechanism was discussed. Using the quasi-state force theory, the output force at the insect-based wing for overcoming the aerodynamic damping was studied. The simulation results are helpful to determine the motion of insect-based wings. At the same time, the design of bimorph actuators and compliant mechanisms with optimal structure can improve the moving properties of flapping mechanism.

**Key words:** piezoelectric bimorph; compliant mechanism; flapping-wing mechanism; flapping micro air vehicle

## 1 引言

最近昆虫飞行机理,尤其是昆虫飞行的非定常空气动力学和昆虫飞行时的柔性变形能力引起

科学家们的特别关注。昆虫飞行依靠控制胸部弹性运动和作用于翅膀上的力实现,通过外骨骼、弹性关节、胸部变形以及收缩的肌肉向翅膀传递运动,多数小昆虫通过翅膀、胸部共振来产生高频大周期拍动<sup>[1-3]</sup>。从机械仿生角度考虑,昆虫飞行的

收稿日期:2005-04-05;修订日期:2006-04-10.

基金项目:211 工程振兴行动资助项目(No. 3008002102);南京航空航天大学科研启动基金资助。

翅膀-胸部运动系统类似于由驱动器、柔性机构和仿生翅组成的微型扑翼飞行器扑翼系统,其实质是一个具有高度柔性的振动系统。

微型扑翼飞行器将举升、悬停和推进功能集于一个扑翼系统,因此扑翼系统是研究的核心和关键所在,特别是驱动器要求耗能低、结构简单、易于微型化、位移输出和力输出大,线性控制性能好和动态响应快,以及与柔性扑翼机构构成最佳优化组合等。压电驱动器具有结构简单,设计灵活、体积小,精度高,驱动功率小,输出力大等特点,但压电驱动器的驱动位移小<sup>[4-5]</sup>;而柔性机构具有体积小、无机械摩擦、无间隙、运动灵敏性高等优点,将压电驱动器与柔性机构结合,不仅控制简单,而且能较好地模仿生物柔性,在微机器人、仿生飞行领域已得到广泛应用<sup>[5-9]</sup>,本文在系列电机驱动的扑翼飞行器样机实验研究基础上,以仿生学原理为基础,设计出压电双晶片驱动,柔性双摇杆机构放大,实现仿生翅拍动的扑翼系统,并进行了仿真和实验研究。

## 2 仿生原理

昆虫飞行依靠控制胸部弹性运动和作用于翅膀上的力实现,与飞行相关的结构主要集中于翅膀和胸部<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。昆虫通常有一对翅,翅由柔软的薄膜和硬且有弹性的翅脉组成,具有一定的柔性、弹性和刚度。与鸟不同,鸟可通过翅膀骨架上的肌肉控制翅膀各部分的相对运动,这使得鸟能在飞行时改变拍动频率和拍动模式。而昆虫的翅是薄膜,没有肌肉生长,它是通过外骨骼、弹性关节、胸部变形以及收缩-放松的肌肉向翅膀传递运动,这使得昆虫翅膀的拍动频率比鸟高得多。

昆虫的胸部翅膀结构为仿生设计提供了线索。分析昆虫胸部-翅膀运动系统,并进行简化,从中得到了以下仿生线索:(1)昆虫胸部肌肉类似于运动系统的驱动器;(2)昆虫的外骨骼和弹性关节类似于机械中的闭环柔性机构;(3)驱动器和柔性机构最好集成一体;(4)由驱动器、柔性铰链机构和翅膀组成的机械系统通过振动实现运动。从机械仿生角度,整个胸部翅膀结构类似于由能源、控制系统、驱动器、柔性机构和仿生翅组成的系统,如图 2 所示,其中驱动器、柔性机构和仿生翅

是实现飞行运动的重要组成部分。

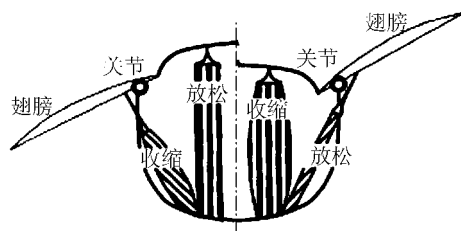


图 1 昆虫的胸部和翅膀结构<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Cross section of thorax of insect

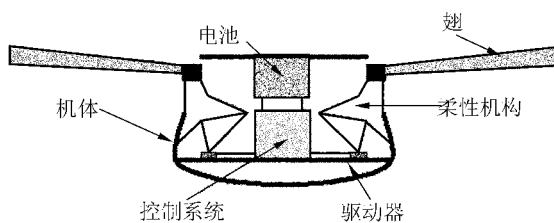


图 2 机械仿生角度的昆虫胸部结构

Fig. 2 Thorax of insect from mechanical bionic view

昆虫翅膀很轻,但通过高频振动,加上非正常空气动力学特性、变化的几何参数、灵活的变形以及快速的自适应生物系统来达到它们杰出的飞行性能,这些都是经过千百万年的进化得到的,其结构特征极具合理性,要用机械来完全模仿几乎是不可能的,只能模仿其结构和运动原理,进行仿生设计。对于仿生研究来说,大一些的扑翼系统,可以模仿大昆虫胸部结构,由驱动器提供足够的能量,通过运动机构传递给翅膀,对于小一些的扑翼系统,可以通过驱动器、运动系统和翅膀共振的方法来节省能量。

## 3 扑翼机构设计

压电驱动器是近 10 年发展起来的新型微位移部件,目前应用较多的压电微位移器主要有叠层结构和悬臂梁结构。叠层结构具有大输出力、小位移,响应时间快等特点,但尺寸大,质量大,加工方法复杂且成本高。悬臂梁具有大位移和小输出力,尺寸小、质量轻、加工简单和成本低等优点,但可以通过柔性机构加以放大,文献<sup>[5~8]</sup>研究的压电单晶片驱动实现拍动和转动的扑翼机构具有较小的位移和输出力,但双晶片和单晶片相比,具有双倍的位移和推力<sup>[6]</sup>,因此,在设计扑翼机构

时多选用压电双晶片作为驱动器。

扑翼机构应尽可能结构简单,控制方便,成本低,四杆机构是比较合适的选择。目前可供选择的四杆机构有曲柄摇杆机构、曲柄滑块机构和双摇杆机构,考虑到压电双晶片的特性,选用双摇杆机构。双摇杆机构以一定的传动比将压电双晶片的输入位移放大,并带动仿生翅实现高频和大幅度拍动,同时产生足够的力克服空气阻尼,起到实现运动、传递力和能量的作用。基于以上分析,本文设计了如图 3 所示的由压电双晶片驱动仿生翅拍动的仿生扑翼系统,整个系统由压电双晶片、柔性四杆机构和仿生翅组成,压电双晶片和仿生翅分别作为柔性四杆机构的输入和输出端,由翅筋和薄膜组成的仿生翅安装在图 3 中柔性四杆机构的翅梁上。

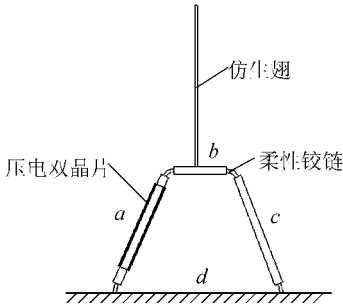


图 3 压电驱动的仿生扑翼机构

Fig. 3 Bionic flapping mechanism driven by bimorph

压电双晶片在给定电压下,用较小的力和位移驱动与仿生翅连接的柔性机构,带动仿生翅实现拍动,并产生足够的力克服空气阻尼。柔性四杆机构是全柔性机构,由刚性杆和复合材料制成的柔性铰链联接而成,相当于昆虫的胸部和外骨骼,将压电双晶片的输入转动转变成仿生翅的拍动,具有一定的传动比,起到实现运动、传递力和能量的作用。柔性四杆机构的放大倍数  $T$  可以定义为:  $T = \varphi_p / \theta_p$ , 其中  $\theta_p = \theta_{\max} - \theta_{\min}$ ,  $\varphi_p = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$ , 分别为输入杆和输出杆最大最小位移量。

### 3.1 压电双晶片

压电双晶片的工作原理如图 4 所示,驱动器的中间是弹性层,通常由钢、铝等材料制成,弹性层的上部和下部分别贴有压电陶瓷片。给悬臂梁施加如图所示电场时,上层压电陶瓷由于逆压电效应产生应变,沿长度方向伸长,而下层压电陶瓷产生伸缩,从而使压电悬臂梁产生图示的弯曲效

应。

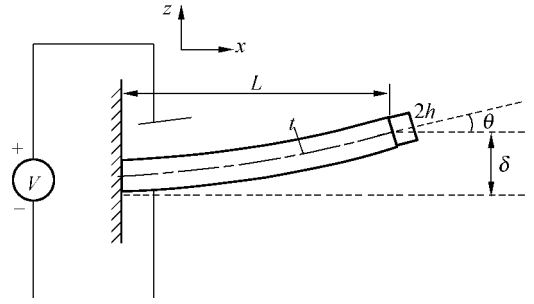


图 4 压电双晶片

Fig. 4 Bimorph

通常机械负载加在悬臂梁压电双晶片的自由端,所以自由端偏移量  $\delta_b$  和驱动力  $F_b$  是两个比较重要的特征参数。驱动力  $F_b$  垂直作用于悬臂式压电双晶片的自由端,与外加电场效应相反,从而使自由端位置保持不变的力,是由外加电场引起的弯曲或形变产生的力的最大值。Smits<sup>[4]</sup> 给出了悬臂梁式压电双晶片驱动力  $F_b$  和自由端偏移量  $\delta_b$  的计算公式:

$$\delta_b = \frac{6LAB(B+1)}{h_p^2 D} d_{31} V$$

$$F_b = \frac{3\omega h_p AB(B+1)}{2s_p l} \frac{d_{31} V}{AB+1}, \quad (1)$$

式中,  $A = E_s / E_p$ ,  $B = h_s / h_p$ ,  $C = \rho_s / \rho_p$ ,  $D = A^2 B^4 + 2A(2B + 3B^2 + 2B^3) + 1$ ,  $l$ 、 $\omega$  分别为压电杆的长度和宽度,  $V$  为压电杆的输入电压,  $d_{31}$  为压电常数,  $h_p$  和  $h_s$  分别为压电层和刚性层的厚度,  $E_p$  和  $E_s$  分别为压电层和刚性层的弹性模量,  $\rho_p$  和  $\rho_s$  分别为压电层和刚性层的密度。

为便于分析和设计,将压电双晶片的运动转化为驱动器的旋转运动,由于驱动器的自由端变形比较小,因此可将自由端偏移量  $\delta_b$  和驱动力  $F_b$  转换为压电双晶片的旋转角度  $\theta_a$  和输出转矩  $\tau_a$ :

$$\theta_a = \frac{\delta_b}{l} \frac{6LAB(B+1)}{h_p^2} \frac{d_{31} V}{D}$$

$$\tau_a = F_b l \frac{3\omega h_p AB(B+1)}{2s_p} \frac{d_{31} V}{AB+1}, \quad (2)$$

### 3.2 柔性机构分析

扑翼系统中柔性机构是新型柔性铰链与刚性杆组成的柔性机构,由四个刚性杆和四个复合型柔性铰链组成,其中连杆与仿生翅的翅梁为一体,如图 5 所示。图 6 所示的复合型柔性铰链是组合结构,铰链可采用高弹性材料和复合材料制作,具

有刚度高,转动范围大,抗疲劳强度好等特点,没有刚性机械结构上的间隙,体积小,无机械摩擦,运动灵敏性高,并且有弹性回复力,适于位置控制、存储释放能量以及实现高频周期性振动。根据柔性机构自由度计算公式可以得到柔性机构的自由度:

$$F_c = F_r + C = F_r + k_1 + k_2 + k_3 = 1 + 4 = 5$$

其中  $F_r$  为平面刚体机构的自由度,即将柔性机构中的柔性元素均视为刚性时的机构的自由度,因此可根据平面刚体机构的自由度计算公式来计算; $C$  为柔度,即柔性机构中柔性元素的变形所具有的自由度的和, $k_1, k_2, k_3$  分别为柔性含量等于 1, 2, 3 的柔性构件数。

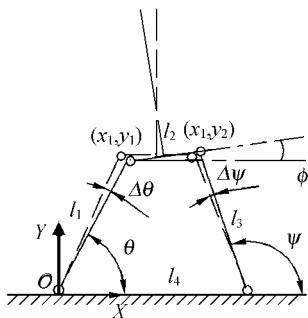


图 5 柔性四杆机构

Fig. 5 Compliant four link mechanism

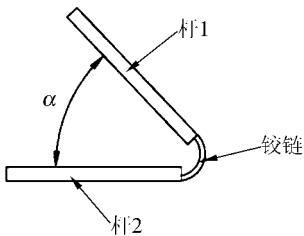


图 6 复合型柔性铰链

Fig. 6 Compound flexible hinge

由计算结果可以得到,该柔性机构具有五个自由度,比刚性机构多了四个自由度,这是由于柔性铰链的运动给整个机构又多增加了自由度,表明柔性机构具有较好的柔性变形能力和更好的可控能力,能较好的对昆虫柔性进行仿生。

目前,柔性机构的研究大多采用“伪刚体模型”法,即将弹性杆(或铰链)模型等效简化为相应的刚性杆模型,再沿用刚性体中对机构进行分析与综合的方法<sup>[10]</sup>,由此对柔性机构的运动学进行

分析。由图 5 中的坐标系,可以得到以下位置关系:

$$l_1 \sin \theta + l_2 \sin \varphi = l_3 \sin \psi$$

$$l_1 \cos \theta + l_2 \cos \varphi = l_4 + l_3 \cos \psi, \quad (3)$$

柔性机构中输入杆的角度为: $\theta = \theta_0 + \Delta\theta = \theta_0 + \theta_a$ ,输入杆的角度变化范围为:

$$\cos^{-1} \left( \frac{l_4^2 + l_1^2 - (l_2 - l_3)^2}{2l_1 l_4} \right) \leq \theta \leq \cos^{-1} \left( \frac{l_4^2 + l_1^2 - (l_2 + l_3)^2}{2l_1 l_4} \right), \quad (4)$$

将方程组(3)进行整理后可以得到输出摇杆和连杆的角位移:

$$\cos \varphi = (-A \pm B\sqrt{1 - A^2 + B^2}) / (1 + B^2)$$

$$\cos \varphi = (l_3 \cos \psi + l_4 - l_1 \cos \theta) / l_2, \quad (5)$$

式中, $A = (l_4^2 - 2l_1 l_4 \cos \theta + l_1^2 + l_2^2 - l_3^2) / 2l_3 (l_4 - l_1 \cos \theta)$ ,

$$B = l_1 \sin \theta / (l_4 - l_1 \cos \theta)。$$

### 4 系统准静力学分析

设计扑翼系统时不仅要使仿生翅实现一定频率和幅度的周期运动,还要有较大的输出力以克服空气阻尼,如果仿生翅上的输出力远小于由气动力产生的升力,则系统达不到所需性能<sup>[6]</sup>。由此对扑翼飞行时整个扑翼系统的准静力学性能进行分析。

压电驱动器在给定电压下的转动力矩为  $\tau_a$ , 并假定由柔性机构传递的输入和输出位移和力呈线性关系成立,则仿生翅的输出力  $F_\varphi$  为:

$$F_\varphi = \frac{\tau_a / T}{l_p} = \frac{\tau_a}{T l_p}, \quad (7)$$

由公式(7)可知,由扑翼系统产生的输出力在升力方向的分量为: $F_l = F_\varphi \cos \varphi$ ,而仿生翅经过估算产生的升力应该大于等于整个飞行器质量的一半,即  $F = W/2$ ,其中  $W$  为飞行器的质量。因此,只有扑翼系统一个周期内产生的输出力在升力方向的分量大于飞行器质量的一半即  $\bar{F}_l \geq F$  时,扑翼系统才产生足够的输出力克服空气阻尼。这些分析不仅分析了系统的准静力学,而且有助于驱动器和柔性机构尺寸和性能的确定。

### 5 仿真与实验结果

分别编制了压电双晶片、柔性四杆机构和系

统静力学分析软件,对系统性能进行仿真分析和计算。压电双晶片的弹性层采用不锈钢,弹性模量  $E_s = 210 \text{ GPa}$ ,密度  $\rho = 7.8 \text{ kg/m}^3$ ,压电层采用压电陶瓷,弹性模量  $E_p = 63 \text{ GPa}$ ,密度  $\rho = 7.5 \text{ kg/m}^3$ ,压电常数  $d_{31} = 255 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ ,分别取  $h_p = 70 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $h_s = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $l = 10 \text{ mm}$ ,  $w = 5 \text{ mm}$ ,  $V = 150 \sin \omega_0 t$ 。设定初始角度为  $60^\circ$ ,则可仿真得到压电双晶片的旋转角度  $\theta_a$  和输出转矩  $\tau_a$  在一个周期内的变化曲线如图 7,图 8 所示。

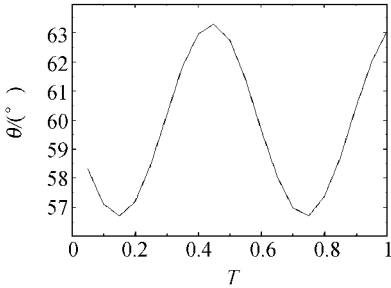


图 7 压电双晶片的旋转角度

Fig. 7 Rotational angle of biomorph

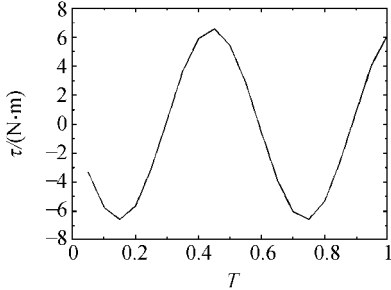


图 8 压电双晶片的输出转矩

Fig. 8 Output torque of biomorph

柔性机构各杆的长度分别取  $12 \text{ mm}$ ,  $1 \text{ mm}$ ,  $12 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ mm}$ , 一个周期内柔性机构中连杆输出角度的变化曲线如图 9 所示,这同时也表明仿生翅上下拍动的角度变化范围,由图 9 可以看出仿生翅的运动规律与生物运动规律类似。假定柔性机构的输入和输出位移和力成线性关系,则近似可以计算得到柔性机构的传动比为  $T \approx 20$ 。研制了实验平台,包括装夹平台、压电双晶片驱动的扑翼机构、压电陶瓷微位移器直流电源、电涡流传感器、示波器、数据采集和处理装置。通过调节施加于压电陶瓷驱动器两端的电压,测试微扑翼机构输出端的电压输出情况,并根据测试数据计算微

扑翼机构的输出位移。扑翼机构中的柔性铰链选用弹簧片,并通过多次实验确定了弹簧片的刚度。输出杆位移实验结果与仿真结果基本接近,但略有差别,经过分析可能有以下几个方面原因:(1)加工得到的实物机构与仿真机构存在一定的尺寸误差。(2)仿真分析中,忽略了机构变形时的一些因素,而对于柔性机构来说其机构中的各个环节对其实际性能皆有一定影响。(3)仿真结果得到的是系统静态条件下的结果,而在实验过程中是动态应用,柔性机构动态运动时的一些特点如能量储存、柔性变形与静态时不同,这对于机构性能也有一定的影响。因此下一步的工作是对系统进行动力学分析,并对压电双晶片和柔性机构进行优化设计,以进一步改进压电驱动柔性扑翼机构的运动特性。

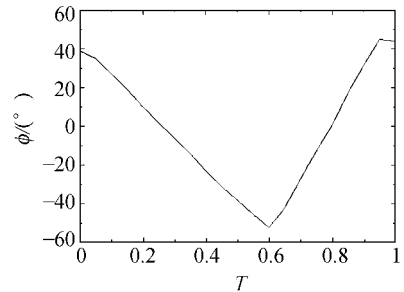


图 9 仿生翅梁拍动的角度变化范围

Fig. 9 Range of flapping angle of bionic wing

## 5 结 论

昆虫与飞行相关的结构主要集中于翅膀和胸部,从机械仿生角度考虑,昆虫翅膀-胸部结构类似于机械中驱动器、柔性机构和翅膀组成的具有高度柔性的振动系统。本文在仿生基础上,设计了由压电双晶片、柔性四杆机构和仿生翅组成的扑翼系统,分析了压电双晶片的工作原理,讨论了柔性四杆机构的自由度和运动学,并对整个系统的准静力学进行探讨。仿真和实验结果表明,压电双晶片驱动功率小、输出力大但位移很小,柔性机构与之结合不仅能实现运动,而且放大了压电双晶片位移,由此使系统具有无摩擦、无间隙和运动灵敏性高等特点,能较好地模仿生物柔性,实现所需高频周期性运动。但是,扑翼系统动态运动与静态时性能略有不同,需进一步对系统进行动

力学分析,以对压电双晶片和柔性机构优化设计, 从而进一步改进扑翼系统性能。

#### 参考文献:

- [1] SHIMOYAMA I, MIURA H, SUZUKI, *et al.* Insect-like microrobots with external skeletons[J]. *IEEE Control Systems*,1993,2:37-41.
- [2] KUBO Y, SHIMOYAMA I, KANEDA K, *et al.* Study on wings of flying microrobots[J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, 1994:834-839.
- [3] ELLINGTON C P. The novel aerodynamics of insect flight: Applications to micro-air vehicles[J]. *The Journal of Experimental Biology*,1999,202:3439-3448.
- [4] SMITS J, CHOI W. The constituent equations of piezoelectric heterogenous bimorphs[C]. *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1991, 38:256-270.
- [5] FEARING R S, CHIANG K H, DICKINSON M H, *et al.* Wing transmission for a micromechanical flying insect [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, USA, 2000,1509-1516.
- [6] SITTI M. PZT actuated four-bar mechanism with two flexible links for micromechanical flying insect thorax[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul Korea, 2001,3893-3900.
- [7] YAN J, WOOD R J, AVADHANULA S, *et al.* Towards flapping wing control for a micromechanical flying insect [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul Korea, 2001, 4: 3901 - 3908.
- [8] SITTI M, CAMPOLO D, YAN J,*et al.* Development of PZT and PZT-PT based unimorph actuators for micromechanical flapping mechanisms[C]. *International conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Krea, 2001: 1509-1516.
- [9] SHIMASAKI K, INOUE M, ARAI K I. A theory for analyzing the flap motion of wings of small flying elements driven by a magnetic torque[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(4):2096-2098.
- [10] 于靖军,宗光华,毕树生. 全柔性机构与 MEMS[J]. *光学精密工程*, 2005,13(1):1-5.  
YU J J,ZONG G H,BI SH SH. Fully compliant mechanisms and MEMS[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(1):1-5.

作者简介:王姝歆(1969—),女,江苏徐州人,东南大学机械系博士毕业,现在南京航空航天大学工程中心任讲师,研究方向为仿生机器人、微型机器人,已发表论文十余篇;

陈国平(1964—),男,江苏丹阳人,现为南京航空航天大学能源与动力学院高级工程师,已发表论文六篇;

周建华,男,现为扬州大学机电学院副教授,博士,已发表论文十余篇;

颜景平,男,现为东南大学机械系教授,博士生导师,已发表论文多篇。