

文章编号: 1000-8055(2004)04-0499-07

微扑翼飞行器驱动机构的设计 与动态特性研究

侯 宇, 方宗德, 刘 岚, 傅卫平, 吴立言
(西北工业大学 机械系, 陕西 西安 710072)

摘要: 微扑翼飞行器是一种新概念的飞行器, 在应用技术上它超出了传统的飞机设计和气动力的研究范畴, 同时开创了微机电系统技术(MEMS)在航空领域的应用。微扑翼驱动机构的设计、制作及其动态特性研究是飞行器设计中的关键环节。本文的研究对象是一个静电驱动的胸腔式微扑翼机构, 由于这种结构存在着强烈的静电和机械两个物理场的非线性耦合, 因此系统的动态特性是非常复杂的。本文从理论上分析了系统奇点的存在与稳定性; 在相空间中分析了无阻尼及有阻尼系统的非线性动态特性; 研究了初始条件和阻尼对临界拉入电压的影响; 最后分析了在不同激励电压信号下系统的响应。所得研究结论对微扑翼驱动机构的设计、制作和应用提供了一定的理论依据。

关键词: 航空、航天推进系统; 微扑翼飞行器; 微驱动机构; 机电耦合; 非线性动态特性

中图分类号: V 211

文献标识码: A

Design and Dynamic Characteristics Study of Micro Actuator of Flapping-Wing MAV

HOU Yu, FANG Zong-de, LIU Lan, FU Weiping, WU Liryan
(Mechanical Engineering Department, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

Abstract: Flapping-wing Micro Air Vehicles (FMAV) are new conceptual air vehicles. They surpass the research fields of traditional airplane design and aerodynamics in relation to application technologies, and initiate the applications of MEMS technologies to aviation fields. The design, fabrication and dynamic characteristics of micro flapping actuator are the keys of FMAV designing. This paper studies a micro flapping mechanism based upon insect thorax and actuated by electrostatic force. Because there are strong nonlinear couplings between the two physical domains, electrical and mechanical, the dynamic characteristics of this system are very complicated. In this paper, the stable properties of equilibrium points are analyzed, the nonlinear dynamic characteristics of the system without damping and with damping are studied in the phase space, and the effects of original conditions and damping on the pull-in voltage are discussed. In addition, dynamic responses of the system to different voltage signals are analyzed. The results are helpful to the design, fabrication and application of the micro flapping actuator.

收稿日期: 2003-09-06; **修订日期:** 2003-11-20

基金项目: 国防基础研究资助项目(2000BF1009); 西北工业大学博士论文创新基金资助项目

作者简介: 侯宇(1975-), 男, 陕西岐山县人, 西北工业大学机械系博士生, 主要从事微小扑翼飞行器飞行力学及其控制原理、基于MEMS技术的微驱动机构等研究

Key words aerospace propulsion system; Flapping-wing Micro Air Vehicle (FMAV); micro actuator; electromechanical coupling; nonlinear characteristics

微扑翼飞行器(Flapping-wing Micro Air Vehicle, FMAV)是一种模仿鸟类或昆虫飞行的新概念飞行器。与固定翼和旋翼飞行器相比,微小扑翼飞行器的主要特点是将举升、悬停和推进功能集于一个扑翼系统,可以用很小的能量进行长距离飞行,同时,具有较强的机动性。因此,更适于在长时间无能源补充及远距离条件下执行任务。自然界的飞行生物无一例外的采用扑翼飞行方式,这就给了我们一个启迪,同时根据仿生学和空气动力学研究结果可以预见的是,在翼展小于 15 cm 时,扑翼飞行比固定翼和旋翼飞行更具优势^[1]。

在我们身边有很多毫米级的昆虫,它们是开发基于昆虫模型微型飞行器的基础。开发仿昆虫的微扑翼飞行器必须基于新的设计概念。比如:必须设计无摩擦结构,避免出现常规的旋转关节,由于驱动机构的尺寸很小,摩擦力超过了其他的力,控制了系统的运动。在极端情况下,当系统受到普通致动力时甚至不能运动。飞行昆虫的一些有趣的特征如外部骨骼、弹性关节、伸缩肌肉等为我们设计微型飞行器提供了新的启迪和思路^[2,3]。

扑翼飞行与其他飞行方式不同之处就在于在它靠机翼的上下扑动来产生升力和推力,因此设计出高效可靠的扑翼驱动机构就显得尤为重要。要制作出类似“机器苍蝇”或“机器蜜蜂”大小的微扑翼飞行器,基于 MEMS 技术的微驱动机构的设计、制作以及其动态特性研究是其中的关键环节。

1 驱动机构设计

微型致动器是将电、光、热等多种形式的能量转换为机械运动的微型换能器。就致动原理而言,包括静电、电磁、压电、超声、形状记忆合金、化学、热和光致动等方式。从驱动方面考虑,与尺寸的 3 次方以下成比例关系的驱动原理可以使致动器单位体积的力输出随尺寸减小反而增大,提高致动效率。在常规和宏观机电系统中,电磁→机械能量转换方式的致动器——电磁马达的应用最为普遍。与电磁能量转换相比,静电型换能机构由于能量密度低而很少实际应用。但是,随着尺寸的微小化,静电换能显示出其优越之处,静电驱动由于具有电压驱动、易于集成和控制的特点,同时随着半

导体微细加工技术的发展,特别是牺牲层刻蚀技术的开发,为静电致动器的研究提供了可能的技术背景,使静电致动在微型致动器的研究开发中占据了突出的位置^[4,5]。

在运动微结构中摩擦是一个很严重的问题。在微尺寸效应下,摩擦力正比于表面积并且相对于惯性力成为占主导地位的力。像传统的旋转关节那种存在很大表面摩擦力的结构已经不适合于微系统的要求。采用柔性铰链以取代旋转关节成为微驱动机构设计时的一种优先选择。

基于以上原因,所设计的微扑翼驱动机构采用静电致动方式。整个驱动机构的形式仿照昆虫的胸腔式结构,其结构简图如图 1 所示。系统的主体由上下平行的两块极板组成,其中一块固定在基体上,另一块可移动板与两边的连杆相连接,并通过连杆带动两边的翅膀上下扑动。整个机构没有轴承和转轴之类的运动部件,各支点和连接处(A、B、C 等处)均采用柔性铰链连接(柔性铰链可考虑采用聚酰亚胺(polyimide)树脂材料,用沉积、涂布等微加工方法实现^[2],因为柔性铰链的弹性模量很小,加上适当的结构设计,可以保证它只具有很小的运动阻力)。当在上下极板间加上交变电压时,机翼就会在交变电场的作用下上下扑动^[2]。

2 驱动机构动力学模型的建立

对于图 1 所示模型,假设可移动板为完全刚性,即假设其没有转角变形或者它的转角变形很小以致于可以忽略不计。各连接杆件起支撑及约束作用,通过柔性铰链起到弹簧及阻尼器的作用,

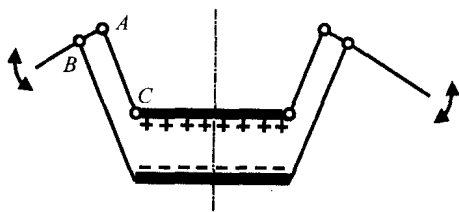


图 1 胸腔式静电驱动扑翼机械简图

Fig 1 Micro electrostatic flapping mechanism based upon insect thorax

假设它们的变形在其弹性范围内,并假设其当量刚度在极板运动方向为线性变化,则扑翼驱动机

构的动力学模型简图如图 2 所示。

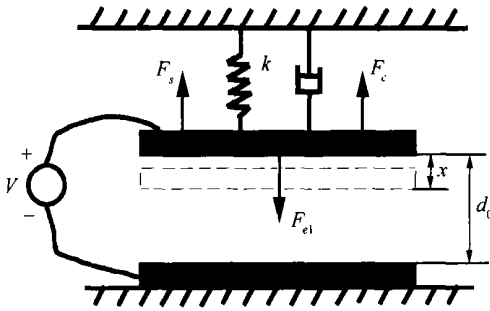


图 2 动力学模型图
Fig 2 Dynamic model of micro actuator

初始时系统处于平衡位置, 当在两块平行极板之间施加一个电压时, 则这两块平行板构成一个电容器, 并且由于板上的电荷相互吸引而产生静电力, 进而使上极板移动并带动各柔性铰产生变形。上下极板间的距离影响着静电力的大小; 而静电力的变化又使得可移动板的移动距离发生变化, 即静电场与力场之间存在耦合作用。当所加电压超过临界电压(拉入电压)时, 上极板被吸合到下极板上。

图中 k 为弹簧刚度, d_0 为无电压作用时两极板间的初始间距。 x 为上极板相对于初始位置的位移。

下极板固定, 作用在上极板上的静电力为:

$$F_{el} = \frac{1}{2} \epsilon_0 A \frac{U^2}{(d_0 - x)^2} \tag{1}$$

其中: A 为极板面积; x 为极板位移; U 为加在两极板间的电压; ϵ_0 为真空条件下的介电常数 ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)。

作用在上极板上的弹簧力为:

$$F_s = kx \tag{2}$$

微扑翼飞行器设计飞行速度一般为 $3 \sim 5 \text{ m/s}$ 左右, 飞行时处于低雷诺数下, 因此当极板带动机翼扑动时, 所受到的空气阻尼力可以近似表示为速度的线性函数:

$$F_c = c_0 \dot{x} \tag{3}$$

此外, 系统还受到结构阻尼以及两极板间的空气挤压膜阻尼力, 但它们比机翼所受的空气阻尼力要小得多, 故在此忽略不计。

由以上可得相应的系统动力学方程为:

$$m_p \frac{d^2x}{dt^2} + c_0 \frac{dx}{dt} + kx = \frac{1}{2} \epsilon_0 A \frac{U^2}{(d_0 - x)^2} \tag{4}$$

其中 m_p 为上极板质量; c_0 为阻尼系数。

对系统方程(4)进行无量纲化处理。令 $y = x/d_0$, 并引入无量纲的时间单位 $\tau = \omega_b t$, 其中 ω_b 为系统的固有频率: $\omega_b = \sqrt{k/m_p}$, 则有:

$$m_p \omega_b^2 \frac{d^2y}{d\tau^2} + c_0 \omega_b^2 \frac{dy}{d\tau} + ky = \frac{1}{2} \epsilon_0 A \frac{U^2}{d_0^3 (1 - y)^2} \tag{5}$$

令 $\zeta = \frac{c_0}{2m_p \omega_b}$, $D = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{k d_0^3}$ 化简可得:

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} + 2\zeta \frac{dy}{d\tau} + y = D \frac{U^2}{(1 - y)^2} \tag{6}$$

上式即为机电耦合的微扑翼驱动机构的非线性动力学方程。

3 奇点稳定性分析

将微分方程(6)化成两个一阶微分方程, 即:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = -2\zeta y_2 - y_1 + D \frac{U^2}{(1 - y_1)^2} \end{cases} \tag{7}$$

这是一个二维自治动力系统。首先求出系统平衡点的位置, 对应于每一个电压值, 令上式右端为零, 可解出 3 个零点, 其中只有一个零点符合实际的物理意义, 因此该系统存在一个孤立的平衡点(见表 1)。

则系统在该平衡点处的 Jacobi 矩阵为:

$$D(y_1^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} \end{bmatrix}_{y_1^*} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 + 2D \frac{U^2}{(1 - y_1^*)^3} & -2\zeta \end{bmatrix} \tag{8}$$

将所求不同电压对应的平衡点 y_1^* 的值带入上述矩阵, 分别求出其在无阻尼($\zeta = 0$)和有阻尼($\zeta = 0.1$)时的特征根。计算结果见表 1。

根据 Lyapunov 稳定性判别定理可得出以下结论:

- (1) 在范围 $-1 \leq y_1 \leq 1$ 内, 对应某一电压下, 该系统存在一个孤立的平衡点;
- (2) 该平衡点位置随电压增大而增大, 即沿 y_1 轴增大方向偏移, 见表 1 数据;
- (3) 无阻尼($\zeta = 0$)时, 系统的 Jacobi 矩阵在平衡点处的特征根是纯虚数, 因此, 平衡点附近系统运动是稳定的, 且周期运动的轨线为椭圆;
- (4) 有阻尼($\zeta \neq 0$)时, 系统的 Jacobi 矩阵在

表 1 平衡点的位置及其对应 Jacobi 矩阵特征根随电压变化情况

Table 1 Equilibrium points and the eigenvalues of its Jacobimatrix in different voltages

电压值/V	平衡点 y_1^*	无阻尼特征根($\zeta=0$)	有阻尼特征根($\zeta=0.1$)
20.0	0.031 44	$\pm 0.967\ 0i$	$-0.1\pm 0.961\ 8i$
25.0	0.051 20	$\pm 0.944\ 5i$	$-0.1\pm 0.939\ 2i$
30.0	0.078 09	$\pm 0.911\ 4i$	$-0.1\pm 0.905\ 9i$
35.0	0.115 47	$\pm 0.859\ 6i$	$-0.1\pm 0.853\ 8i$
40.0	0.172 19	$\pm 0.764\ 2i$	$-0.1\pm 0.757\ 6i$
42.0	0.206 74	$\pm 0.691\ 9i$	$-0.1\pm 0.684\ 6i$

平衡点处的特征根具有负的实部, 因此, 平衡点是渐进稳定平衡点。

这些分析结论在图 3、图 4 的相图分析中同样可以得到验证。

4 在相空间中分析无阻尼系统的非线性动态特性

系统无阻尼影响时, 方程可写成:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = -y_1 + D \frac{U^2}{(1-y_1)^2} \end{cases} \quad (9)$$

为了求解方程在相空间中的动态特性, 本文采用四阶 Runge-Kutta 数值直接积分法, 对不同电压, 不同初始条件下系统相轨迹求解如图 3 所示。图中曲线对应电压由左向右增大。

由图 3 可看出:

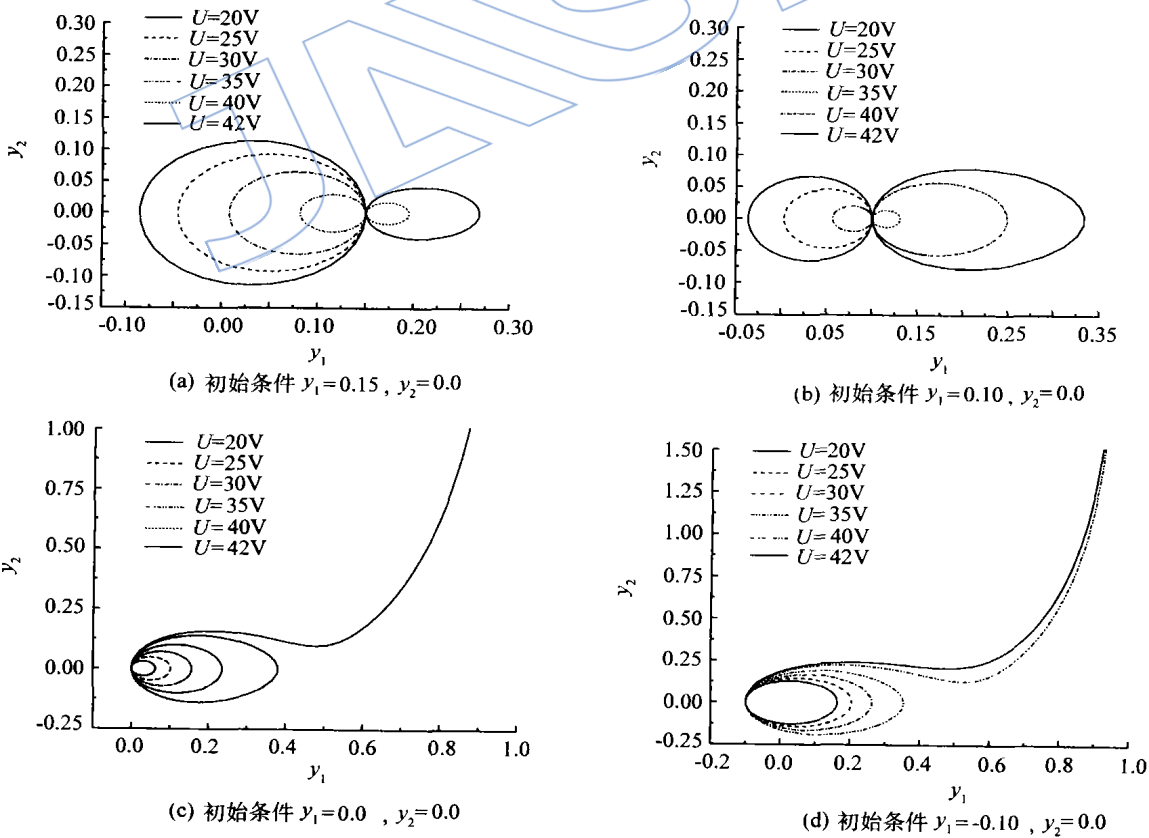


图 3 在不同的初始条件下无阻尼系统的相轨迹随电压的变化图

Fig 3 Phase space orbits of system without damping in different original conditions

- (1) 在相平面的 y_1 轴上 ($y_2=0$) 有一个平衡点, 且为中心, 在平衡位置附近的轨道形成一个闭合的椭圆曲线, 表示其为周期运动;
- (2) 在拉入电压范围内, 不论初始条件取何值, 在不同的电压下, 运动中心随电压增大而向右偏移, 表明当驱动机构工作时, 电压越大, 上极板位移也越大, 这与表 1 所得出的结论一致;
- (3) 当激励电压小于拉入电压时, 系统运动为周期运动; 当激励电压大于拉入电压时, 相轨线紊乱, 系统运动为非周期运动;
- (4) 当取不同初值时, 相图性态有所不同, 初值会影响拉入电压的大小。如图所示初始位移由正向负变化时, 拉入电压值减小;
- (5) 在 $y_1=1$ 这一点轨线出现奇异, 在该点附近, 相轨迹不再是周期轨道, 这一点可以从系统方程本身明显看出。

5 在相空间中分析有阻尼系统的非线性动态特性

在考虑阻尼时系统方程如式(7)。系统在不同阻尼情况下相轨迹会随电压发生变化。分别取阻尼比 $\zeta=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$, 初始条件为 $y_1=0.0, y_2=0.0$, 进行计算, 其结果图 4 所示。

由图 4 可看出:

- (1) 有阻尼时, 在相平面的 y_1 轴上 ($y_2=0$) 有一个平衡点, 且为稳定焦点, 在平衡位置附近的轨道形成一个方向朝向内部的螺旋线, 此时系统无周期解; 当电压大于拉入电压时, 相轨线发生紊乱;
- (2) 有阻尼时, 系统的平衡点仍然随着电压的增大向右偏移, 这与无阻尼时的结论一致;
- (3) 随着阻尼的增大, 临界拉入电压值亦随之增大, 从图 5 可看出, 当阻尼比从 0.05 增大到 0.3 时, 临界拉入电压从 42.1 V 增大到 44.6 V。

6 系统在不同激励电压信号下的响应

微扑翼驱动机构在实际工作时, 上极板上所加的交变电压使其上下拍动, 产生扑翼运动。对于实际的扑翼飞行器, 受重量及升压电路的限制, 我们希望能用尽可能低的电压产生尽可能大的扑翼角度, 这样就有必要考虑在不同激励电压信号下系统的响应。同时当外激励频率等于系统固有频率时, 系统共振, 此时可以获得较大的扑翼运动幅

值。

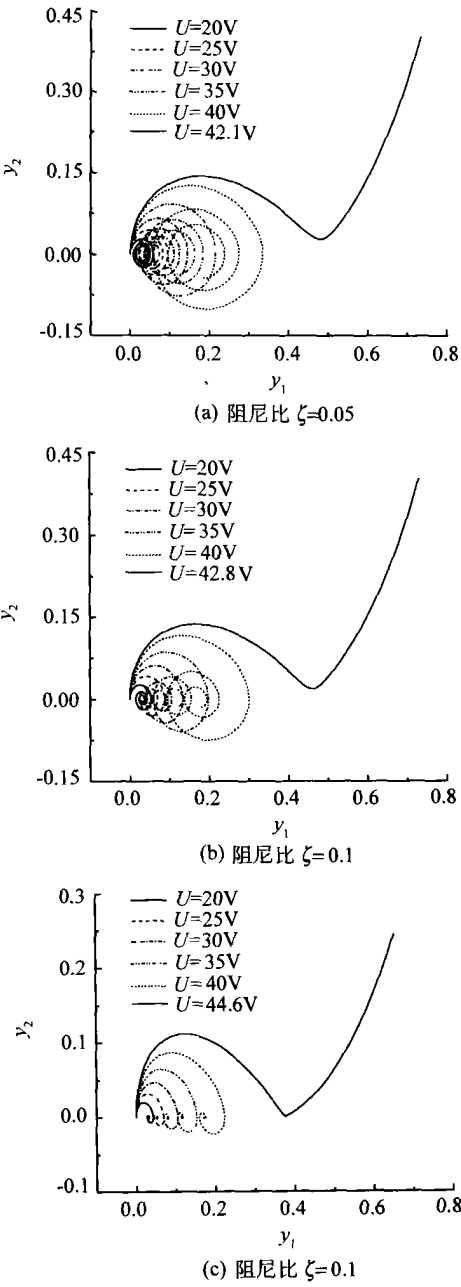


图 4 取不同的阻尼比时系统相轨迹随电压的变化图

Fig 4 Phase space orbits of system in different damping ratio

电压随时间变化时的系统动力学方程可写成:

$$m_p \frac{d^2x}{dt^2} + c_a \frac{dx}{dt} + kx = \frac{1}{2} \epsilon_0 A \frac{(U(t))^2}{(d_0 - x)^2} \tag{10}$$

- (1) 若交变电压 $U(t)$ 为正弦激励信号, 即有 $U(t) = U \sin(\omega t)$, 则对于不同的频率比 $\gamma = \omega/\omega_n$,

系统的动态特性如图 5 所示。

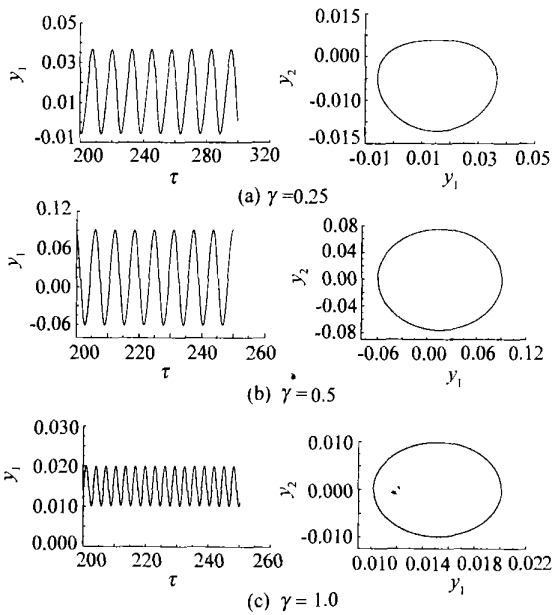


图 5 正弦激励信号下的系统特性

Fig 5 System characteristics in sine signal

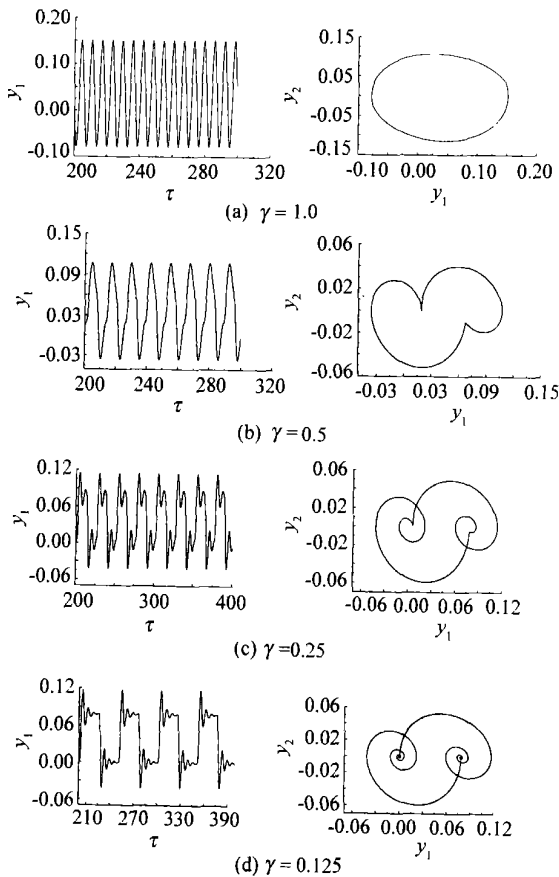


图 6 方波激励信号下的系统特性

Fig 6 System characteristics in square signal

从上图可看出 $\gamma = 0.5$ 时的位移最大, 这是由于方程(10)的右端项可以化成 $\cos(2\gamma\tau)$ 的函数, 故当 $\gamma = 0.5$ 时, 系统发生共振, 此时上极板振幅最大。

(2) 若交变电压 $U(t)$ 为方波激励信号, 即有 $U(t) = \begin{cases} V & 0 \leq t < T/2 \\ 0 & T/2 \leq t < T \end{cases}$, 则对于不同的频率比 $\gamma = \omega/\omega_n$, 系统的动态特性如图 6 所示。

(3) 若交变电压 $U(t)$ 为锯齿波激励信号, 即有 $U(t) = (2t/T - 1)V$, 则对于不同的频率比 $\gamma = \omega/\omega_n$, 系统的动态特性如图 7 所示。

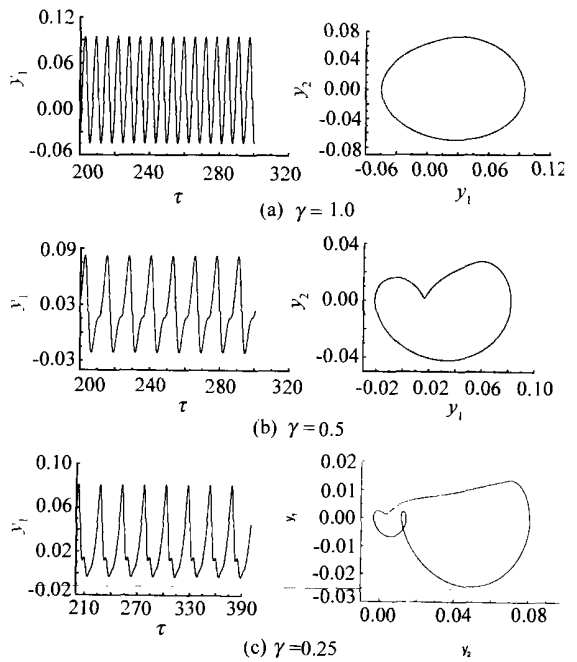


图 7 锯齿波激励信号下的系统特性

Fig 7 System characteristics in zigzag signal

以上 3 种激励情况下, 当电压同取 20 V 时, 相比较可看出方波激励信号在共振时的振幅最大, 因此实际设计的微扑翼飞行器应考虑采用方波信号。

7 结 论

微扑翼驱动机构的设计、制作及其动态特性研究是微扑翼飞行器设计中的关键环节。本文根据昆虫胸腔结构和扑翼运动的机理, 设计了一种静电驱动的胸腔式微扑翼机构。通过数值计算和相轨迹分析, 研究了该机电耦合系统的非线性动态特性, 得到以下结论:

(1) 该机电耦合系统存在一个孤立的平衡点, 无阻尼时, 平衡点附近系统运动是稳定的, 有阻尼时为渐进稳定的, 且平衡点的位置随电压增

大而增大。

(2) 无阻尼时, 在拉入电压范围内, 相轨道为封闭的椭圆, 对应的系统运动为周期运动; 当电压大于拉入电压时, 相轨线紊乱, 系统运动为非周期运动。

(3) 考虑阻尼时, 临界拉入电压值随阻尼的增大而增大, 相轨线不再是稳定的闭合椭圆曲线, 而成为渐进稳定轨道; 当电压大于拉入电压时, 相轨线紊乱。

(4) 当取不同初值时, 相图性态有所不同, 初值会影响拉入电压的大小。

(5) 由于扑翼飞行器所用的锂电池具有恒定的电压输出, 而此时在方波信号激励下具有最大的扑翼幅值, 因此有更强的飞行能力, 更适合作为驱动机构的激励信号。若要进一步考虑飞行器的续航能力, 就有必要讨论各种形式的激励下扑翼运动幅值对消耗的能量之比, 这是下一步的研究工作。

扑翼本身是一个弹性体, 其在运动过程中除了本身的振动变形外, 还受到气流的作用, 是一个

流固耦合问题, 分析比较复杂。本文主要研究驱动机构的机电耦合问题, 因此对扑翼进行了简化。为全面考虑, 有必要把弹性翼和驱动机构结合起来, 进行动力学分析, 这也是本文下一步的研究工作。

参考文献

[1] McMichael J M, Francis M S Micro Air Vehicles-Toward a New Dimension in Flight[R]. US DARPA/TTO Report, 1997.

[2] Shimoyama Isao, Miura H, Suzuki K. Insect-Like Micro Robots with External skeletons[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1993, 2: 37- 41.

[3] Suzuki Kenji, Shimoyama Isao. Insect-Model Based Micro Robot with Elastic Hinges[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1994, 3(1): 4- 9.

[4] Fischer M, Giusouf M, Schaepperle J. Electrostatically Deflectable Polysilicon Micro Mirrors-Dynamic Behavior and Comparison with the Results from FEM Modeling with ANSYS[J]. Sensors and Actuators A 67, 1998: 89- 95.

[5] Patrick B Chu, Phyllis R Nelson, Mark L Tachiki, et al Dynamics of Polysilicon Parallel-Plate Electrostatic Actuators [J]. Sensors and Actuators A 52, 1996: 216- 220.