

# 基于集中参数模型的后缘小翼驱动机构分析

张仕明,高乐,宋彬,胡和平

(中国直升机设计研究所 直升机旋翼动力学重点实验室,江西景德镇 333001)

**摘要:**菱形压电驱动器是主动控制襟翼(ACF)系统实现直升机减振、降噪的关键。该文基于菱形放大机构的集中参数模型,发展了可用于负载性能计算的电路等效模型和简化模型。建立了分布式和集中式两种柔性放大机构的参数模型,并通过 ABAQUS 有限元进行了模型的有效性验证。对比分析了 3 种典型构型菱形框和压电堆的弹性变形对作动器输出位移和力的影响,揭示了其性能差异的原因。弹簧负载性能分析表明,当负载等效弹簧刚度等于作动器刚度时,作动器输出能量达到最大。

**关键词:**作动器;压电陶瓷;后缘小翼;柔性机构;旋翼

**中图分类号:** TN384; V211

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.026

## Analysis of Trailing-edge Flap Driving Mechanism Based on Lumped Parameter Model

ZHANG Shiming, GAO Le, SONG Bin, HU Heping

(Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics Laboratory,

China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

**Abstract:** The rhomb piezoelectric actuator is the key to vibration control and noise reduction of helicopter with active control flap (ACF) system. Based on the lumped parameter model of rhomb amplification actuator, the equivalent circuit model and simplified model for loading performance computation are developed. The parameter models of distributed and concentrated compliant amplification mechanism are established, and the effectiveness of model is verified by ABAQUS software. The influences of the elastic deformation of rhombic frame and piezoelectric stack with 3 typical configurations on the output displacement and force are analyzed. The reasons for the difference in performance are revealed. The result of spring loaded performance analysis indicates that the output energy is up to maximum when the stiffness of the load equivalent spring is equal to that of the actuator.

**Key words:** actuator; piezoelectric ceramics; trailing-edge flap; flexible structure; rotor

### 0 引言

直升机以其独特的垂直起降、定点悬停、低空低速等能力,被称为万用的飞行器。直升机飞行过程中旋翼引起的振动和噪声严重影响了仪器、仪表的使用寿命和乘员的舒适性。近十几年发展起来的直升机振动主动控制技术——主动控制襟翼(ACF)已成为当前的研究热点之一。其通过作动器驱动桨叶后缘处的附加襟翼按给定规律做偏转运动,进而改变旋翼的气动力,从而减小桨毂处的交变载荷或抑制桨盘平面噪声,达到减振或降噪的目的。

近十多年来,欧美许多高校和科研机构相继开

展了一系列 ACF 旋翼主动控制技术的理论研究和试验验证工作。驱动装置作为 ACF 旋翼主动控制的关键技术之一,现阶段以压电驱动的作动器为主,其发展经历了双压电晶片、L 型、双 L 型、X 型、菱形等构型。菱形压电驱动器具有结构简单、无间隙、机械效率高等优点,已应用在欧直 BK117<sup>[1-3]</sup> 演示验证平台上,成功完成了飞行演示验证。

本文利用菱形类放大机构的集中参数模型及其简化模型<sup>[4]</sup>,分析比较了 3 种构型菱形框的放大特性,发展了菱形压电作动器的性能-载荷分析方法,指出了后缘襟翼驱动力臂的设计原则,为后续的 ACF 旋翼设计提供了支撑。

### 1 理想菱形压电作动器原理

理想菱形压电作动器模型如图 1 所示,图中灰色部分为压电堆,其高为  $h_1$ ,长为  $w_1$ 。假设所有的梁为纯刚体,所有节点为纯旋转体。当斜梁与水平方向夹角  $\theta < 45^\circ$  时,呈放大特性。当压电堆伸长时,菱形框高  $d_1$  在垂直方向收缩。假设压电堆伸长,则有

$$d'_1 = \sqrt{d_1^2 - (\epsilon_0^2 + 2\epsilon_0)w_1^2/4 + w_1 b_1 \epsilon_0/2} \quad (1)$$

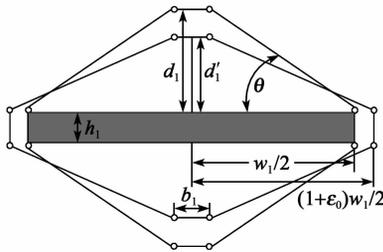


图 1 菱形压电作动器放大示意图

位移放大系数  $a_1 = \frac{2(d_1 - d'_1)}{\epsilon_0 w_1}$ , 当压电堆应变

$\epsilon_0$  较小时,  $a_1 \approx \cot \theta$ 。由此可看出,斜梁的  $\theta$  角越小,  $a_1$  越大。但若  $\theta$  角过小,可导致斜梁在外力作用下屈服。

PZT 压电堆模型<sup>[5]</sup>如图 2 所示,其长、宽、高分别为  $l_{PZT}$ 、 $w_{PZT}$ 、 $h_{PZT}$ 。无负载时压电堆位移  $\Delta x_{PZT} = Nd_{33}V$ ,其中  $N$  为压电堆驱动方向的 PZT 薄膜的片数,  $d_{33}$  为压电系数,  $V(>0)$  为施加到每个压电片上的电压。本文假设  $d_{33}$  为常量,压电堆的固有刚度为

$$k_{PZT} = \frac{E_{PZT} h_{PZT} w_{PZT}}{l_{PZT}} \quad (2)$$

式中  $E_{PZT}$  为 PZT 材料的弹性模量。

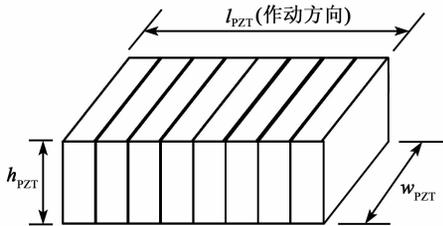


图 2 PZT 压电堆

### 2 菱形放大机构模型

#### 2.1 集中参数模型

为了准确地表述菱形压电作动器的输出力和位移,Jun Ueda<sup>[6]</sup>提出了一种适用于大多数菱形类放大机构的集中参数模型(见图 3),其带有 3 个弹簧单元  $k_j$ 、 $k_{BI}$ 、 $k_{BO}$  和一个放大系数  $a$ 。该模型引入了结

构的弹性变形,并将菱形框中分布的弹性等效为两种集中弹性单元。如图 4(a)所示,  $k_j$  为绕结点转动的扭簧,属于旋转域。如图 4(b)所示,将斜梁的弹性应变能用 2 个正交的刚度  $k_{BI}$  和  $k_{BO}$  表示,属于平动域。 $\Delta x_1$  为作动器输出位移,  $\Delta x_{PZT}$  为压电堆位移,  $\Delta x_c$  为虚拟位移。当弹簧常量  $k_{BI}$ 、 $k_{BO}$  趋于无穷大,  $k_j = 0$  时,其表示理想菱形压电作动器。

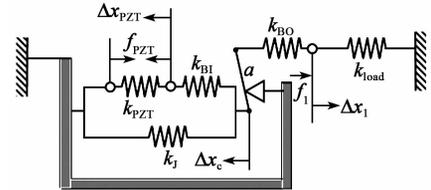


图 3 菱形机构集中参数模型

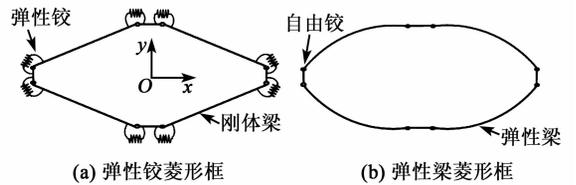


图 4 结构弹性对菱形框影响

当 PZT 压电堆输出力达到最大  $f_{PZT \max}$ , 压电作动器阻塞力为

$$f_1^{\text{block}} = \frac{ak_{BI}k_{BO}f_{PZT \max}}{(a^2k_{BI}k_{BO} + k_{BI}k_j) + k_{PZT}(a^2k_{BO} + k_j + k_{BI})} \quad (3)$$

同理,压电作动器的最大自由位移为

$$\Delta x_1^{\text{free}} = \frac{ak_{BI}}{k_{PZT}(k_j + k_{BI}) + k_{BI}k_j} f_{PZT \max} \quad (4)$$

本文根据参数模型之间的能量传递关系,提出了如图 5 所示的电路等效模型,其中力对应于电压、位移对应于电流、弹簧刚度对应于电阻。由图可见各元素对作动器性能的影响,即刚度  $k_j$  应尽量小,而刚度  $k_{BI}$ 、 $k_{BO}$  应尽量大,以提高作动器的输出力和位移。

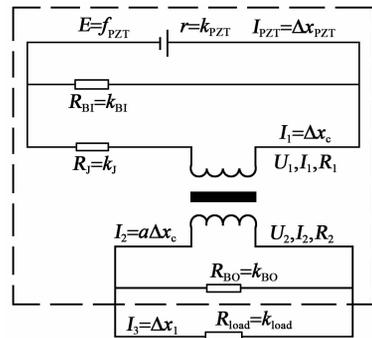


图 5 集中参数模型电路等效图

## 2.2 简化模型

根据电压源和电流源转换关系及电路简化原则,将集中参数模型简化,得到模型如图6所示。

### 1) 电压源简化模型

$$f_{\text{ISA}} = (k_{\text{load}} + k_a)u_1 \quad (5)$$

其中,根据电路等效模型计算得到

$$f_{\text{ISA}} = \frac{ak_{\text{BI}}k_{\text{BO}} \cdot f_{\text{PZT}}}{(a^2k_{\text{BI}}k_{\text{BO}} + k_{\text{BI}}k_{\text{J}}) + k_{\text{PZT}}(a^2k_{\text{BO}} + k_{\text{J}} + k_{\text{BI}})} \quad (6)$$

$$k_a = \frac{k_{\text{BO}}(k_{\text{BI}}k_{\text{J}} + k_{\text{PZT}}k_{\text{J}} + k_{\text{PZT}}k_{\text{BI}})}{(a^2k_{\text{BI}}k_{\text{BO}} + k_{\text{BI}}k_{\text{J}}) + k_{\text{PZT}}(a^2k_{\text{BO}} + k_{\text{J}} + k_{\text{BI}})} \quad (7)$$

### 2) 电流源简化模型

$$u_1 = \frac{1}{1+r}u_{\text{ISA}} \quad (8)$$

$$r = \frac{k_{\text{load}}}{k_a} \quad (9)$$

式中: $u_1$ 为输出位移信号; $r$ 为刚度比。

其中,

$$u_{\text{ISA}} = f_{\text{ISA}}/k_a \quad (10)$$

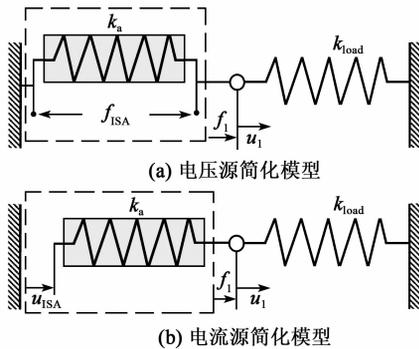


图6 简化模型

## 3 菱形压电驱动器参数建模及验证

### 3.1 菱形框参数模型建模

国内外主动控制后缘襟翼试验中所用的菱形压电驱动器,根据斜梁的截面特征可分为均匀分布梁和带柔性铰链梁两类,根据斜梁的曲率变化可分为直线式和弧线式等。本文选择了3种典型结构的菱形框,其斜梁分别为均匀分布椭圆型梁、均匀分布直线型梁及带柔性铰链直线型梁,其有限元(FEM)法模型如图7所示。上述3种结构的厚、长和高相等,分别为10 mm、145 mm、55 mm,其中结构1、2的斜梁厚度均为3.35 mm,结构2、3的直线型斜梁角度均为 $10.5^\circ$ 。压电堆的几何尺寸为10 mm×10 mm×120 mm。菱形放大机构的材料属性和压电堆(电场

强度2 kV/mm)仿真<sup>[7]</sup>得到的性能参数如表1所示。

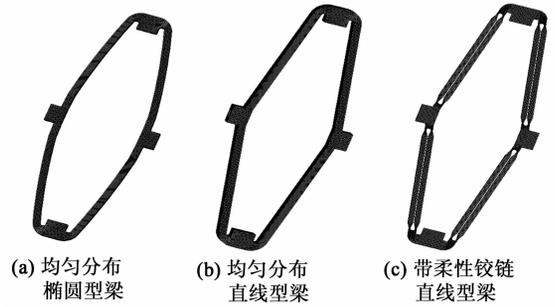


图7 菱形放大机构 FEM 模型

表1 菱形压电驱动器材料属性

菱形框材料	钢	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 800
		杨氏模量/GPa	210
		泊松比	0.3
压电堆	Soft PZT-5H	等效杨氏模量/GPa	48.36
		最大阻塞力/N	$5.70 \times 10^3$
		最大自由位移/m	$1.41 \times 10^{-4}$

集中参数模型包含4个未知参数,分别为 $a, k_{\text{J}}, k_{\text{BI}}, k_{\text{BO}}$ ,其可通过阻塞( $k_{\text{load}} \rightarrow \infty$ )和无负载( $k_{\text{load}} = 0$ )两种状态的位移和力来确定。对菱形框 FEM 模型施加一个力 $f_{\text{PZT}}$ ,测得阻塞状态的 $\Delta x_{\text{PZT}}^{\text{block}}, f_1^{\text{block}}$ 和无负载状态的 $\Delta x_{\text{PZT}}^{\text{free}}, \Delta x_1^{\text{free}}$ ,根据图5集中参数电路等效图可得

$$\frac{f_{\text{PZT}}^{\text{block}}}{\Delta x_{\text{PZT}}^{\text{block}}} = \frac{a^2k_{\text{BI}}k_{\text{BO}} + k_{\text{BI}}k_{\text{J}}}{a^2k_{\text{BO}} + k_{\text{J}} + k_{\text{BI}}} + k_{\text{PZT}} = X_1 \quad (11)$$

$$\frac{f_1^{\text{block}}}{\Delta x_{\text{PZT}}^{\text{block}}} = \frac{ak_{\text{BI}}k_{\text{BO}}}{a^2k_{\text{BO}} + k_{\text{J}} + k_{\text{BI}}} = X_2 \quad (12)$$

$$\frac{\Delta x_1^{\text{free}}}{\Delta x_{\text{PZT}}^{\text{free}}} = \frac{ak_{\text{BI}}}{k_{\text{J}} + k_{\text{BI}}} = X_3 \quad (13)$$

$$\frac{f_{\text{PZT}}^{\text{free}}}{\Delta x_1^{\text{free}}} = \frac{k_{\text{BI}}k_{\text{J}} + k_{\text{PZT}}(k_{\text{BI}} + k_{\text{J}})}{ak_{\text{BI}}} = X_4 \quad (14)$$

式(11)~(14)的独立个数为3,其可通过等式 $X_1 = X_3(X_2 + X_4)$ 来确认。因此,关于 $a, k_{\text{J}}, k_{\text{BI}}, k_{\text{BO}}$ 的求解是个病态问题。若 $a$ 已知,可得:

$$\begin{cases} \hat{k}_{\text{J}} = \hat{a}(X_4 - k_{\text{PZT}}/X_3) \\ \hat{k}_{\text{BI}} = X_3\hat{k}_{\text{J}}/(\hat{a} - X_3) \\ \hat{k}_{\text{BO}} = (\hat{k}_{\text{BI}} + \hat{k}_{\text{J}})X_2/(\hat{a}\hat{k}_{\text{BI}} - \hat{a}^2X_2) \end{cases} \quad (15)$$

为使模型有物理意义,名义放大系数 $\hat{a}$ 必须满足所有弹簧的刚度为正,则 $\hat{a}$ 的取值范围为 $X_3 < \hat{a} < [(X_3 \cdot X_4 - k_{\text{PZT}})/X_2 + X_3]$ 。

目前,PZT压电堆的无负载应变一般约为 $(1\ 000 \sim 1\ 200) \times 10^{-6}$ ,故菱形框放大器一般工作

在线性放大状态。为了避免菱形框 FEM 模型仿真时施加的  $f_{PZT}$  驱动力过大,导致菱形框斜梁发生大角度偏转,偏离真实状态,本文在菱形框内建立了一个弹簧单元,其与压电堆的刚度等效。当施加输入力  $f_{PZT} = 1$  kN 时,3 个结构的 FEM 模型观测结果如表 2 所示。菱形放大机构的集中参数估计如表 3 所示。名义放大系数是根据弹簧刚度为  $\hat{a}$  来确定的,其中结构 1 的名义放大系数选择区域如图 8 中灰色部分所示。表 2 中结果显示,结构 2 的自由位移和阻塞力比结构 1 的分别大 4.32% 和 8.83%;结构 3 的自由位移比结构 2 的自由位移大 29.2%,而两者的阻塞力相当。分析表明,在相同尺寸下,直线型结构比椭圆结构在放大性能方面更有优势,带柔性铰链结构位移放大性能最优。

表 2 FEM 模型计算值

	结构 1	结构 2	结构 3
$\Delta x_{PZT}^{free} / m$	$2.18 \times 10^{-5}$	$2.18 \times 10^{-5}$	$2.46 \times 10^{-5}$
$\Delta x_1^{free} / m$	$9.79 \times 10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-4}$
$\Delta x_{PZT}^{block} / m$	$1.09 \times 10^{-5}$	$9.40 \times 10^{-6}$	$9.43 \times 10^{-6}$
$f_1^{block} / N$	112	122	115
$X_1$	$9.18 \times 10^7$	$1.06 \times 10^8$	$1.06 \times 10^8$
$X_2$	$1.02 \times 10^7$	$1.29 \times 10^7$	$1.22 \times 10^7$
$X_3$	4.49	4.69	5.37
$X_4$	$1.02 \times 10^7$	$9.79 \times 10^6$	$7.57 \times 10^6$

表 3 集中参数估计

	结构 1	结构 2	结构 3
$\hat{a}$	4.75	4.90	5.39
$\hat{k}_J / (N \cdot m^{-1})$	$5.88 \times 10^6$	$5.85 \times 10^6$	$3.94 \times 10^5$
$\hat{k}_{BI} / (N \cdot m^{-1})$	$1.00 \times 10^8$	$1.30 \times 10^8$	$1.32 \times 10^8$
$\hat{k}_{BO} / (N \cdot m^{-1})$	$4.44 \times 10^6$	$5.39 \times 10^6$	$4.53 \times 10^6$
$\hat{k}_B / (N \cdot m^{-1})$	$5.02 \times 10^7$	$6.48 \times 10^7$	$6.58 \times 10^7$
应力 $\sigma_{max} / (N \cdot m^{-2})$	$1.77 \times 10^8$	$1.80 \times 10^8$	$2.45 \times 10^8$

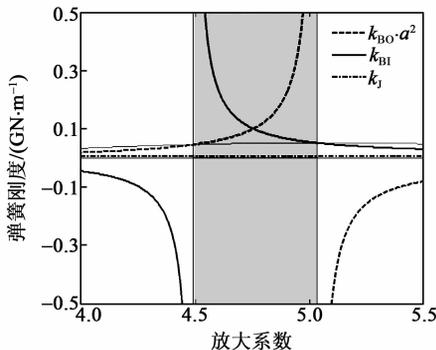


图 8 结构 1 放大系数  $\hat{a}$  选择

定义带弹性斜梁的平动域刚度为

$$\bar{k}_B = \frac{1}{1/k_{BI} + 1/(a^2 k_{BO})} \quad (16)$$

根据式(16)得到 3 个结构的平动域刚度见表 3。结果显示,在旋转域刚度  $k_J$  方面,结构 3 < 结构 2 < 结构 1;在平动域刚度  $\bar{k}_B$  上,结构 3 > 结构 2 > 结构 1。同时也解释了 3 种结构在放大性能方面优劣的原因。尽管结构 3 的放大性能很好,但其在设计和使用时必须注意其薄截面处应力集中引起的强度问题。当阻塞力达到最大时,放大机构的最大应力见表 3。

### 3.2 模型验证

为了验证参数模型的准确性,将菱形机构输出端与弹性载荷相连,施加输入力  $f_{PZT} = 1$  kN,检查比较集中参数模型和 FEM 模型中  $\Delta x_{PZT}$  和  $\Delta x_1$  的结果。采用 3 个不同刚度的弹簧进行测试,其中结构 3 的参数模型计算结果估计值相对 FEM 模型分析结果的误差如表 4 所示。由表可见,估计值与真值吻合,验证了所建参数模型的准确性。

表 4 结构 3 参数模型位移估计

$k_{load} / (N \cdot \mu m^{-1})$		FEM	集中参数模型	误差/%
0.1	$\Delta x_1 / \mu m$	118.32	118.40	0.067
	$\Delta x_{PZT} / \mu m$	23.01	23.01	0
0.4	$\Delta x_1 / \mu m$	90.30	90.43	0.144
	$\Delta x_{PZT} / \mu m$	19.80	19.80	0
0.8	$\Delta x_1 / \mu m$	68.67	68.77	0.146
	$\Delta x_{PZT} / \mu m$	17.32	17.31	0.058
平均误差/%				0.069

## 4 菱形压电驱动器负载性能分析

### 4.1 3 种结构压电作动器性能分析

针对压电堆的应力大而应变小的特点,菱形放大机构的设计应使位移放大系数尽量大,而力缩小系数尽量小,同时机械效率越高越好。根据第 3 节中参数模型计算结果,可得到 3 种结构的压电驱动器性能参数如表 5 所示。分析表明,结构 2 压电驱动器的放大性能优于结构 1,结构 3 压电驱动器的机械效率最高。

表 5 压电作动器性能参数

作动器类型	结构 1	结构 2	结构 3
自由位移 $u_a / \mu m$	558	582	752
最大阻塞力 $F_a / N$	635	691	654
刚度 $k_a / (N \cdot \mu m^{-1})$	1.14	1.19	0.87

续表

作动器类型		结构 1	结构 2	结构 3
长/cm		12	12	12
截面积/cm <sup>2</sup>		1	1	1
压电堆数据	无负载应变 $S_p / 10^{-6}$	1 178	1 178	1 178
	阻塞应力/MPa	57	57	57
	无负载位移 $u_p / \mu\text{m}$	141	141	141
	阻塞力 $F_p / \text{N}$	5 698	5 698	5 698
放大分析	位移放大系数 $A_u$	3.95	4.12	5.32
	力缩小系数 $A_f$	8.97	8.24	8.71
	机械效率 $\eta / \%$	44.02	49.97	61.09

其中,  $A_u = u_a / u_p$ ,  $A_f = F_p / F_a$ ,  $\eta = \frac{u_a F_a}{u_p F_p}$ 。

### 4.2 载荷影响分析

以结构 1 压电作动器为例,分析压电作动器在负载下的位移输出能力。根据小翼轴铰链力矩的特点,将小翼载荷简化为恒力和弹簧。作动器在弹簧负载作用下的电流源简化模型见图 6(b)。假定压电作动器输入为满量程的单频正弦激励信号,如

$$u_{\text{ISA}} = \frac{u_a}{2} + \frac{u_a}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t)。$$

当负载为弹簧,输出位移信号  $u_1$  的幅值  $u_{\text{amp}}$  与弹簧载荷  $k_{\text{load}}$  的关系为

$$u_{\text{amp}} = \frac{u_a}{2(1+r)} \quad (17)$$

$$r = \frac{k_{\text{load}}}{k_a} \quad (18)$$

当负载为恒定载荷时,输出位移信号  $u_1$  的幅值  $u_{\text{amp}}$  与恒定外力  $F$  无关,  $u_{\text{amp}}$  保持不变,即:

$$u_{\text{amp}} = u_a / 2 \quad (19)$$

当负载为弹簧加恒定外力时,输出位移信号  $u_1$  的幅值  $u_{\text{amp}}$  与载荷的关系与式(17)、(18)一致。

综上所述,影响作动器位移输出幅值的因素为载荷弹簧刚度,即小翼铰链力矩随小翼偏转角度的变化,而与恒定外力大小无关。

结构 1 压电驱动器输出位移幅值  $u_{\text{amp}}$  和最大出力  $f_1$  随刚度比  $r$  的变化如图 9 所示。由图可见,

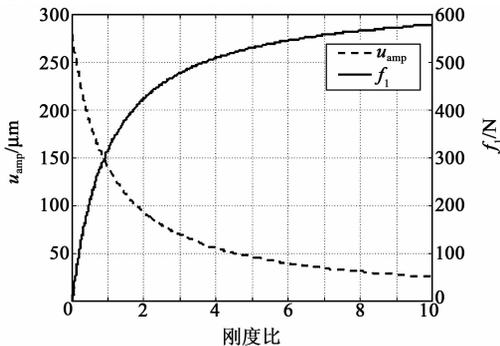


图 9 作动器输出位移、力与刚度比的关系

驱动器在正弦激励信号输入下的输出位移幅值随弹簧载荷刚度增大而减小,最大出力随弹簧载荷刚度增大而增大。

根据电流源简化模型(位移输入模型),当负载为弹簧时,压电作动器最大输出能量与载荷刚度比  $r$  的表达式为

$$E_e(r) = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot \left(\frac{1}{2} k_a u_a^2\right) \quad (20)$$

图 10 为驱动器输出能量与弹簧刚度比的关系。

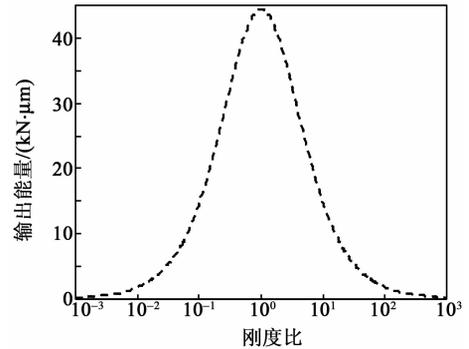


图 10 驱动器输出能量与弹簧刚度比的关系

由式(20)和图 10 可得出,当弹簧载荷刚度等于驱动器刚度时,输出能量达到最大。

### 4.3 压电堆参数影响分析

以压电堆长度  $l_{\text{PZT}}$  变化对压电作动器性能影响为例进行分析,  $l_{\text{PZT}}$  为变量,其他压电堆参数不变。当压电堆输入电压  $V$  达到最大时,根据压电堆阻塞力

$$f_{\text{PZT max}} = k_{\text{PZT}} \beta V = E_{\text{PZT}} \cdot A_{\text{PZT}} \cdot d_{33} \cdot V / t \quad (21)$$

压电堆阻塞力  $f_{\text{PZT max}}$  保持不变( $t$  为压电陶瓷薄膜厚度),以结构 1 压电作动器为例,根据 3 弹簧集中参数模型,可得压电作动器最大阻塞力  $F_a$  和最大自由位移  $u_a$  随  $l_{\text{PZT}}$  变化如图 11 所示。由图可见,压电作动器刚度  $k_a$  随  $l_{\text{PZT}}$  增大而减小,因此,  $l_{\text{PZT}}$  可

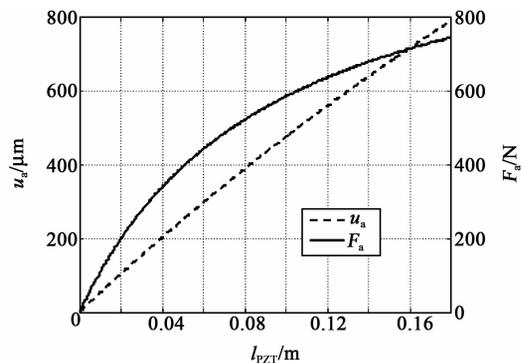


图 11 作动器自由位移和阻塞力与压电堆长度的关系

作为调节作动器刚度的一个途径。

#### 4.4 后缘小翼力臂计算

压电作动器通过驱动杆连接小翼并使其绕轴转动,如图12所示,作动器输出的横向位移经力臂 $H$ 转换成偏转运动。选取JP Kang<sup>[8]</sup>计算的某个迎角下小翼偏转 $10^\circ$ 时的力矩 $0.3249\text{ N}\cdot\text{m}$ 作为临界力矩值,根据小翼铰链力矩随小翼转角的变化关系可得小翼载荷的等效弹簧刚度随小翼力臂变化。以文中的3个压电作动器驱动小翼,根据4.2节的分析,得到最大小翼偏角幅值与小翼力臂的关系如图13所示。由图13可见,当小翼力臂使得小翼铰链力矩转化的等效刚度等于压电作动器刚度时,小翼偏角幅值达到最大。

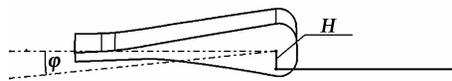


图12 小翼连接机构

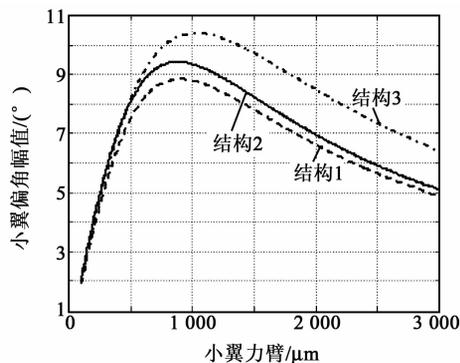


图13 小翼偏角与力臂长度关系

## 5 结论

本文建立并验证了3种构型压电作动器的集中参数模型,对比分析了菱形框的结构弹性对作动器输出力、位移及负载能力的影响。结果表明:

- 1) 直线型菱形框放大性能优于椭圆弧线框。
- 2) 带柔性铰链菱形框位移放大能力、机械效率最优,但须注意应力集中。

3) 菱形压电作动器连接弹簧负载后,能量输出效率随负载弹簧刚度增大呈先增大后减小,当负载刚度与作动器刚度相等时达到最大。

4) 已知小翼的铰链力矩随小翼偏角的变化关系,根据压电作动器简化模型,即可计算得到最优小翼力臂长度。

菱形压电作动器的参数模型计算结果与FEM模型分析结果几乎一致,能较准确地反应压电作动器的输入、输出关系,可根据需求进行压电作动器的设计和分析。

#### 参考文献:

- [1] ROTH D, ENENKL B, DIETERICHRL O. Active rotor control by flaps for vibration reduction[C]//Maastricht, Netherlands: 32<sup>nd</sup> European Rotorcraft Forum, 2006.
- [2] AHCI-EZGI E, PFALLER R, DENECKE U. Piezo active rotor blade-challenges and solutions[C]//Phoenix, Arizona: American Helicopter Society 69th Annual Forum Proceedings, 2013:1-14.
- [3] LETTY R L. Amplified piezoelectric actuators: static & dynamic applications[J]. Ferroelectrics, 2007, 35(1): 3-14.
- [4] MA H W, YAO S M, WANG L Q, et al. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type flexure hinge [J]. Sensors and Actuators, 2006, 132: 730-736.
- [5] 曹江. 叠堆型压电陶瓷特性测试及建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] UEDA J. Large effective-strain piezoelectric actuators using nested cellular architecture with exponential strain amplification mechanisms [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(5): 770-782.
- [7] 鲁庆庆. 基于压电驱动器的直升机主动后缘襟翼技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] KANG J P. Design Improvements of smart active trailing-edge flap for rotating test[C]//S. I. :56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA, 2015.

## 《压电与声光》免费索阅卡

姓名: \_\_\_\_\_ 职务: \_\_\_\_\_ 职称: \_\_\_\_\_ 单位: \_\_\_\_\_  
 地址: \_\_\_\_\_ 邮编: \_\_\_\_\_ 电话: \_\_\_\_\_  
 企业产品: \_\_\_\_\_

索阅期号: \_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月(每次仅限壹期)

复印有效