

微型机械鱼的研制与特性分析

周新宇 徐锡林

(上海交通大学仪器工程系, 上海 200030)

摘要:通过对一压电陶瓷驱动的小型机械鱼的结构与特性分析,结合它的动静态实验数据,证明这是一种功耗小,输出放大比大的新型水中驱动器,并提出进一步微小化的设想以及实用化的前景。

关键词:微机械;微型机械鱼;柔性铰链

1 引言

微机械是八十年代后期崛起的具有强大生命力的新兴学科领域,它具有体积小,能耗低的特点,能够进入一般机械无法进入的微小空间进行微小尺度的精细操作。它在医学、生物学、航空航天,信息电子工业方面有着广泛的应用前景。压电驱动是微机械驱动研究的一个重要方向,压电驱动输出力大,响应速度快、控制电压较小,被认为是理想的微机械驱动方式。

微机械鱼采用独石结构积层型压电陶瓷作为中心驱动材料,利用鱼形的外围结构,能在液体中产生向前的推力。本设计通过材料的选择和结构参数的优化,得到了理想的输出放大比,而且其动静特性实验结果与理论计算值十分对应。本设计中采用了适于平面整体化加工的柔性铰链结构,并根据其力学特性进行结构和参数设计,有可能成为能在液体管道中游动的新颖机器人的雏型。

2 微机械鱼的结构与动作原理

微机械鱼的结构如图1所示

鱼体中心为独石结构压电陶瓷,外围是两级采用柔性铰链作转动关节的杠杆增幅机构。压电陶瓷产生的微小位移输出通过增幅机构放大以后,推动两条鱼尾一张一合,在液体中就可产生向前的推动力。当压电陶瓷两端加以与鱼体结构共振频率相同的交变电压时,鱼尾就产生共振输出,振幅可达到其静态输出位移的数十倍,从而使压电陶瓷的微米级输出被放大到毫米级的摆动,使机械鱼能够在水中游动。在前期实验中发现柔性铰链的剪切应力对整体的转动有较大的影响,因此设计中尽量满足使各杆剪切应力对传动点取矩为零,对无法避免的部分在理论计算中应予以考虑。具体制作过程中,压电陶瓷与鱼体的装配成为一个关键问题,设计要求是

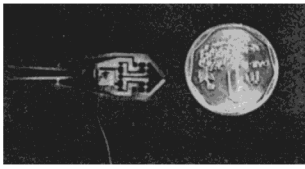


图1 微型机械鱼的结构

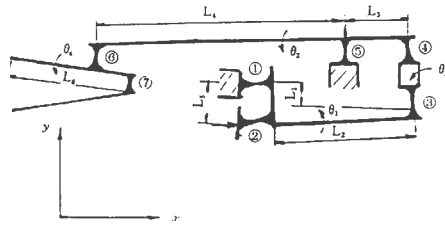


图2 微型鱼外框结构静力学模型

只有几个微米的过盈装配,实际上通过精密研磨达到了这一要求。

3 静态放大比的理论计算

微型鱼的外框结构静力学模型如图2所示,其中柔性铰链部分的设计是保证整个机构性能的关键,由于铰链部位相对其余部分要薄弱得多,所以仅考虑铰链部位为弹性体,而将其余部分视为刚体。柔性铰链作为一个弹性受力单元,具有由其几何参数与材料决定的拉压刚度、剪切刚度和转角刚度。具体公式如下:

$$K_c = \frac{1}{Eb} \left[\pi \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} \right] - 2.57$$

$$K_d = \frac{1}{Gb} \left[\pi \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} \right] - 2.57$$

$$K_s = \frac{9\pi R^{3/2}}{2Eb t^{5/2}}$$

其中 R 为铰链半径, t 为铰链厚度。

由于鱼体是对称结构,因此仅考虑图中所示的半边受力情况,根据静力学力和力矩的平衡关系,以及结构的几何约束条件,可以得出以下方程组。

$$K_{c2} \cdot \Delta X_2 = K_{c1} \Delta X_1 - K_{c3} \cdot \Delta X_3 \quad (1)$$

$$K_{c3} \cdot \Delta Y_3 = K_{d1} \Delta Y_1 + K_{d2} \cdot \Delta Y_2 \quad (2)$$

$$K_{c2} \cdot \Delta X_2 \cdot L_2 = K_{c3} \Delta Y_3 \cdot L_3 + K_{c3} \cdot \Delta X_3 \cdot L_3 + K_s (3\theta_1 + \theta_3) \quad (3)$$

$$K_{c1} \cdot \Delta Y_1 + K_{c3} \Delta Y_3 = K_{c5} \cdot \Delta Y_5 \quad (4)$$

$$K_{c1} \cdot \Delta Y_1 \cdot L_1 = K_{c3} \Delta Y_3 \cdot L_3 + K_s (3\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \quad (5)$$

$$K_{c4} \cdot \Delta Y_4 = K_{c7} \cdot \Delta Y_7 \quad (6)$$

$$K_{c7} \cdot \Delta Y_7 = K_{c4} \cdot \Delta Y_4 \quad (7)$$

$$\theta_1 = (X_0 - \Delta X_1 - \Delta X_2) / L_1 \quad (8)$$

$$\theta_2 = (L_2 \theta_1 - \Delta Y_2 - \Delta Y_3 - \Delta Y_4 - \Delta Y_5) / L_3 \quad (9)$$

$$\Delta X_3 = 2r(\theta_1 + \theta_2) \quad (10)$$

$$\Delta X_3 = -L_7 \theta_1 + \Delta X_1 + (4r + L_9)(\theta_1 + \theta_2) \quad (11)$$

$$\Delta Y_5 = 2r\theta_2 \quad (12)$$

$$\theta_3 = (\theta_1 + \theta_2) / 2 \tag{13}$$

$$Y = L_0 \theta_4 + \Delta Y_7 \tag{14}$$

将具体数值代入后解得放大比

$$K = Y / X = 46.08$$

4 微型机械鱼静动态实验结果

实验中采用光干涉仪测量压电陶瓷位移输出,测得位移与电压关系如图 3 所示,微型鱼尾

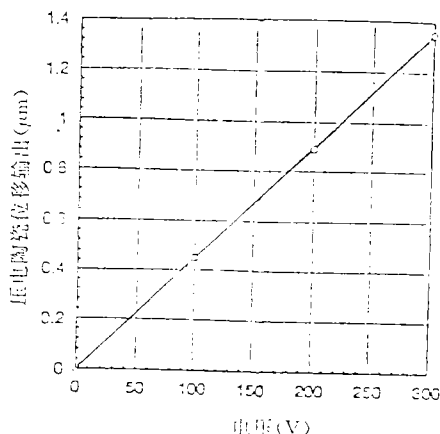


图 3 压电陶瓷位移输出与电压的关系

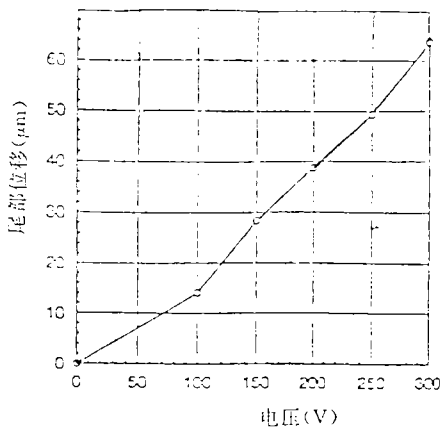


图 4 尾部位移与电压的关系

部输出用电容式测微仪测量结果如图 4 所示。

将两组数据比较得到实测放大比为 44.3

倍。微型鱼的动态幅频响应曲线如图 5 所示,电压交变幅度为 100V。当鱼体在 22.43Hz 的共振频率下振动时,压电陶瓷输出的微米级振幅被扩大肉眼可辨的几百微米的振幅,较好地达到了设计要求。

5 进一步试验与改进设想

微型机械鱼的水中游动试验及进一步的微小化改进都在进行之中,压电材料的选择直接影响到输出和体积。采用类似 IC 工艺的方法,在薄膜压电材料周围基片上蚀刻出鱼体形状,如能解决绝缘的问题,机械鱼的向微米级发展是完全可能的。届时在血管中游动的机器人就会有其充分的机械驱动基础。

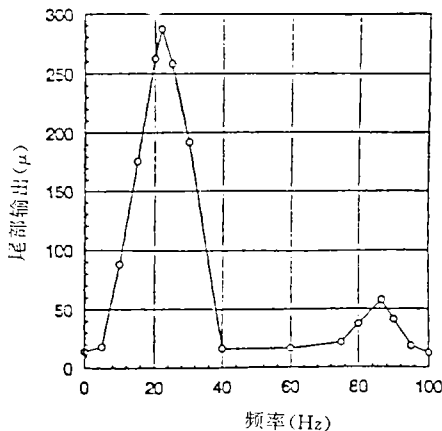


图 5 微型鱼动态幅频响应曲线

6 结束语

本文叙述了一种新颖的微型水中驱动器的特性与结构制作原理,驱动器的体积适于进一步微小化,可望成为液体环境中操作的微机器人的动力机构。

参 考 文 献

- [1] 薛实福, 李庆祥, 精密机械设计. 北京: 清华大学出版社
[2] J. M. Paros et al. , How to Design Flexure Hinges. Machine Design, 1965

Development and Characteristic Analysis with Micro-fish

Zhou Xinyu, Xu Xilin and Lin Liangming
(Dept of Instrument Engineering, Shanghai
Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract

Micro swimming robot is very useful in many engineering area. A Micro-fish has been developed in the lab by the authors. The paper discusses its mech-animal structure and analyzes its mechanic models and experimental data. The Micro-fish is looking forward to be a new actuator of Micro swimming robot.

Key words: Micro machine, Micro-fish, Flexure hinge