

文章编号: 1000-6893(2000)01-0091-03

# 电流变柔性微致动器驱动电源的研究

吴忠, 苑伟政, 彭炎午

(西北工业大学 宇航制造工程系, 陕西 西安 710072)

## STUDY ON THE POWER SUPPLIES OF FLEXIBLE MICRO-ACTUATORS WITH ELECTRO-RHEOLOGICAL FLUID

WU Zhong, YUAN Wei-zheng, PENG Yan-wu

(Dept. of Aeronautic Manufacturing Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘要:** 针对电流变柔性微致动器所用的驱动电源, 在理论上探讨了采用交流或直流供电方式的特点, 并以此为基础设计了驱动电源的电路结构, 然后针对驱动电源的关键技术做了分析, 提出了稳定性补偿方案并进行了试验研究。试验结果表明电流变微致动器的分布电容对驱动电源的动态响应有很大影响。

**关键词:** 电流变柔性微致动器; 驱动电源; 微机械; 电流变液

**中图分类号:** V 242.2 **文献标识码:** A

**Abstract:** The principles of power supplies for ER flexible micro-actuators and an electrical model of the ER flexible micro-actuator are established. The response of ER flexible micro-actuators both to a direct and to an alternating electric field was analyzed based on R-C model. A prototype of high voltage power supplies is designed based on the principles of switching power supplies. The stability of the high voltage supplies was analyzed theoretically. Both the static and dynamic experiments were carried out for the supplies. It was observed that the distributed capacity of the ER flexible micro-actuator is the main cause that limits the response of the supplies.

**Key words:** ER flexible micro-actuators; power supplies; micro-electro-mechanical system; electro-rheological fluid

### 1 电流变柔性微致动器的工作原理及其对驱动电源的要求

电流变柔性微致动器(以下简称微致动器)的致动主要依靠作用于微致动器工作头的电流变(Electro-Rheological Fluid——ERF)有效压力<sup>[1]</sup>, 在流场内的 ERF 的流体压力为恒定的条件下, 当电场作用时 ERF 的粘度将变大, 从而产生 ERF 液体阻尼阀效应<sup>[2]</sup>。在一定范围内, 微致动器所产生的位移随着电场强度的增大而增大, 因此只要改变对微致动器施加的电压就可以对其实施控制。ERF 微致动器主要应用于微机械领域。

为了有效地控制微致动器, 使用的电场强度约为 1~5kV/mm<sup>[3]</sup>; 另一方面, 微致动器的许多应用领域对动态响应特性提出了很高的要求, 因此需要研制能够输出数千伏电压, 而且可以快速高精度地跟踪微机 D/A 转换板输出弱电控制信号的驱动电源。虽然 ERF 介质对电场的响应速度

很快( $10^{-3} \sim 10^{-6}$  s)<sup>[4]</sup>, 但是研制具有同样响应速度的电源却十分困难, 国内外虽有这方面的报道, 但都未给出具体的性能指标。

### 2 ERF 柔性微致动器的等效电路负载模型

(1) ERF 柔性微致动器的等效电路模型 虽然微致动器的结构形式很多, 但都可以看成是在两个平行的极板之间充满 ERF 介质, 这里用阻容并联负载模型近似模拟微致动器的电特性。

(2) ERF 微致动器对外加电场的响应 ERF 微致动器和交流驱动电源所组成系统的等效电路可用图 1 表示, 图中  $i$  为流经 ERF 微致动器的电流;  $R$  为 ERF 微致动器的等效电阻;  $C$  为 ERF 微致动器的等效电容;  $u(t)$  为驱动电源输出电压, 且  $u(t) = A \sin \omega t$ ,  $\omega = 2\pi f$ ;  $Z$  为 ERF 微致动器等效

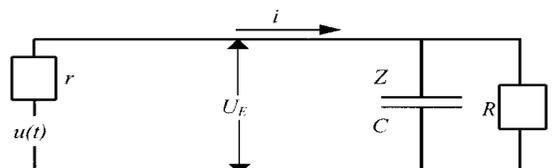


图 1 微致动器-交流电源系统等效电路

收稿日期: 1998-11-25; 修订日期: 1999-03-20  
基金项目: 国家自然科学基金(69485006)资助项目  
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2000/01/0091/>

电路的阻抗;  $U_E$  为 ERF 微致动器获得的电压。

于是有

$$Z = \frac{R}{1 + \omega CR} \quad (1)$$

$$i = \frac{A(1 + \omega CR) \sin(\omega t)}{r + \omega CRr + R} \quad (2)$$

电容器  $C$  两端的电压即微致动器获得的电压

$$U_E = \frac{RA \sin(\omega t)}{r + \omega CRr + R} \quad (3)$$

通常  $R \gg r$ , 由式(3)可得

$$U_E = \frac{A \sin(\omega t)}{\omega Cr + 1} \quad (4)$$

由式(4)可知当交流电压峰值  $A$  不变时, 若交流电压频率  $f$  增大, 或电源内阻  $r$  增大时,  $U_E$  的有效值减小, 这将导致 ERF 效应减弱, 因此驱动电源采用交流输出方式时, 输出交流电压频率  $f$  将受到限制, 这对于提高电源的动态响应特性是不利的。

(3) ERF 微致动器对阶跃直流电场的响应系统的等效电路模型见图 2, 图中:  $U$  为直流电源的电动势。

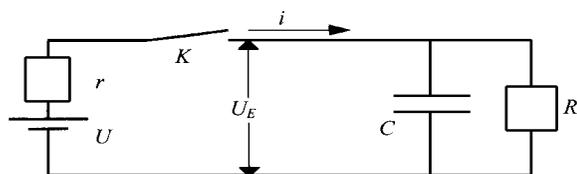


图2 微致动器-直流电源系统等效电路

设  $t = 0$  时刻开关  $K$  闭合, 则

$$U_E = \frac{RU}{R + r} [1 - e^{-t/(RrC/(R+r))}] \quad (5)$$

驱动电源对  $C$  充电的时间常数为  $\tau = RrC/(R+r)$ , 由于  $R \gg r$ , 因此  $\tau \approx rC$ , 所以减小驱动电源的内阻  $r$  可以加快 ERF 微致动器的电压上升速率。

(4) ERF 微致动器驱动电源方案与参数选择

由于受目前 ERF 介质性能的影响和微致动器结构尺寸的限制, 驱动电源的最大输出电压应达到  $4kV$  才能满足工程应用的需要。根据前面的分析可知微致动器的交流供电方式限制了驱动电源动态响应性能的提高, 所以应选择直流供电方案。

### 3 驱动电源工作原理及关键技术研究

(1) 驱动电源的结构 经过反复试验确定的电源结构框图如图 3 所示。

图 3 中, 功率转换电路从串联线性调压电路取得电压供给功率晶体管, 功率晶体管的输出由

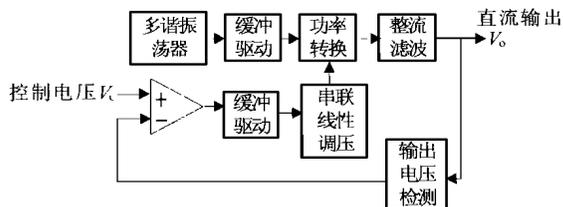


图3 驱动电源结构框图

脉冲变压器变换为高压脉冲后经整流滤波输出。误差放大器的输出经缓冲后驱动串联线性调压电路, 串联线性调压电路的输出电压可由控制电压  $V_c$  实现线性控制, 这就完成了控制电压  $V_c$  对高压直流输出  $V_o$  的动态线性控制。

(2) 关键技术研究 ERF 微致动器一般在高速动态环境下工作, 因此对其驱动电源频率响应特性、稳定性和跟踪精度提出了较高的要求, 良好的稳定性是驱动电源成败的关键。

微致动器驱动电源从控制到输出的传递函数主要包括: 功率转换电路的传递函数、串联线性调压电路的增益和输出滤波器的增益等<sup>[5]</sup>。

图 3 中的误差放大器是一个高增益的运算放大器, 它是影响驱动电源稳定性的主要因素, 可以给误差放大器设计一个补偿网络, 使开环传递函数的总增益曲线和零分贝线相交处的斜率为  $-1$ , 这样就可以保证系统的稳定性。

实际电路采用了如图 4 所示的具有 2 个补偿零点和 2 个极点的误差放大器。

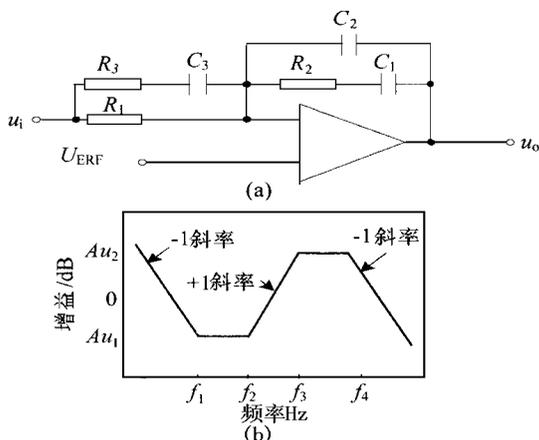


图4 具有稳定性补偿的误差放大器

(a) 电路图; (b) 增益 Bode 图

图 4 所示的补偿网络在误差放大器原有频率特性的表达式中引入了 2 个新的零点和极点, 其中 1 个零点 ( $f_1$ ) 产生的超前相位和放大器原有极点的滞后相位相抵消; 另外 1 个零点 ( $f_2$ ) 提供的  $90^\circ$  超前相位使放大器的增益曲线按  $+1$  斜率增

加, 这对改善电源的稳定性非常有利。试验证明采用这种补偿网络的误差放大器具有良好的稳定性。

#### 4 试验结果

针对某种 ERF 微致动器研制了驱动电源样机, 其最大输出功率为 5W, 控制电压  $V_c$  变化范围是 0~ 5V, 输出直流电压范围是 0~ 4200V, 测试时将驱动电源与微致动器连接, 在控制电压  $V_c$  输入端用稳压电源输入 0~ 5V 稳定电压, 测得电源的跟踪曲线如图 5 所示。

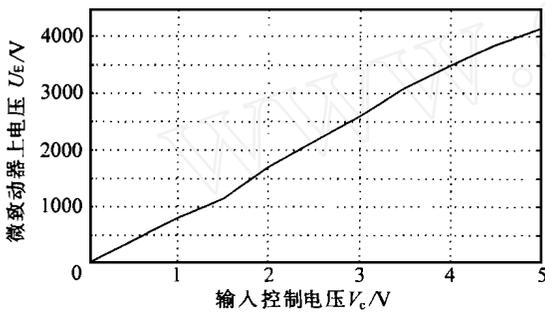


图 5 微致动器上电压

在  $V_c$  输入端输入频率为 10Hz 和 100Hz, 峰值为 5V 的方波, 测得微致动器上电压响应曲线如图 6 所示。



图 6 动态跟踪特性曲线

(a) 电源对 10Hz 方波的响应; (b) 电源对 100Hz 方波的响应

#### 5 微机控制方案

微致动器微机控制方案如图 7 所示。微致动器上装有力传感器和位移传感器, 可将采集到的力和位移信号通过 A/D 转换器输入微机。输入控制指令用来设置微致动器的输出位移、力、加速度

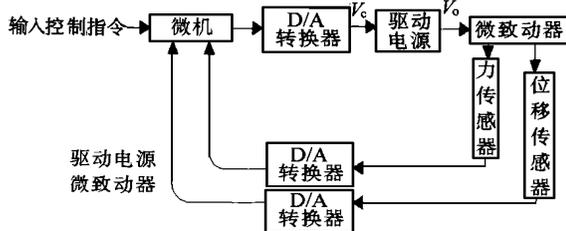


图 7 ERF 微致动器微机控制方案

等参数, 微机根据输入控制指令和传感器的输出计算出驱动电源的控制电压  $V_c$ , 驱动电源产生与  $V_c$  成正比的高压直流输出驱动微致动器, 完成致动过程。

#### 6 结 论

由试验结果可知驱动电源的静态跟踪精度较好, 控制与输出基本呈线性关系, 而电源对方波信号的跟踪有较大误差, 且方波频率越高误差越大, 特别是输出电压波形的下降沿不陡, 这是由于微致动器分布电容上的电荷不能及时泄放造成的, 因此在电流变柔性微致动器设计时应尽量减小分布电容。

#### 参 考 文 献

- [1] 苑伟政, 胡晓江 电流变柔性微致动器研究[J]. 微米纳米科学与技术, 1997, 3(1): 14~ 18
- [2] 胡晓江 电流变柔性微致动器操纵机理研究及致动过程仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 1997.
- [3] 苑伟政, 胡晓江 电流变柔性微致动器致动过程研究[J]. 航空学报, 1997, 18(5): 637~ 638
- [4] 朱克勤, Tao R. 电流变液和电流变效应[J]. 力学进展, 1994, 24(2): 154~ 162
- [5] 叶治政, 叶靖国 开关稳压电源[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. 300~ 321.

作者简介:



吴 忠 男, 1968 年 12 月生, 博士生, 从事计算机集成制造方面的研究。发表论文 8 篇。电话: 029-8486529。



苑伟政 男, 1961 年 2 月生, 博士, 教授。任西北工业大学现代制造工程研究所所长。从事微机械与微细加工技术、数控加工技术、CMS、难加工材料精密切削加工等方面的研究。现已发表论文 30 余篇, 专著一部。获省部级科技成果奖 4 项。联系电话: 029-8492840; E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn。

彭炎午 男, 1925 年 4 月生, 教授, 博士生导师, 从事 CMS 和数控系统的研究。发表论文 70 余篇。联系电话: 029-84933341。