

# 嵌入式静电驱动控制电源设计

杨会生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 分析了静电驱动原理以及失效原因, 针对静电驱动的特点设计了用于静电驱动的控制电源, 该电源采用内嵌 DAC 的 ADuC842 系统作为控制芯片, 与信号采集及反馈电路一同构成闭环控制系统, 控制 DC-DC 变换器产生大范围的稳定电压。输出电压范围 15~80 V, 电压纹波 < 800 mV。

**关键词:** 静电驱动; ADuC842; DC-DC 变换器

**中图分类号:** TP273                      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112804.0039

## Embedded Source Design for Electrostatic Actuator

YANG Hui-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

**Abstract:** In this paper, a source is designed for electrostatic actuator based on the analysis of electrostatic comb-drive. A controlling IC ADuC842 with DAC inside and signal acquisition circuit constitute a close-loop control system which control the DC-DC converter to generate a big range of voltage. The output voltage range is 15~80 V, and the voltage ripple is less than 800 mV.

**Keywords:** electrostatic actuate; ADuC842; DC-DC converter

### 1 引 言

随着 MEMS 技术的发展, 对微操作与微装配技术的需求日益迫切<sup>[1]</sup>。静电驱动工艺兼容性好, 可以

采用体硅和表面微机械加工工艺, 便于实现系统集成, 能够实现 MEMS 器件的小型化, 是微机械执行器的重要发展趋势之一<sup>[2]</sup>。

由于静电驱动器所加驱动电压纹波过大导致

梳齿驱动失稳, 在不同的工作条件下梳齿间的击穿电场不同, 驱动电压不稳也会造成梳齿击穿。同时, 针对执行器的要求, 驱动电压要能够可控且具有较大的可调范围。针对上述问题, 设计了一种适用于静电驱动控制电源, 该控制电源输出电压纹波小、电压稳定、精度高, 同时输出电压幅值可控。

## 2 静电驱动机理及失效分析

静电驱动的原理是梳齿电容在电压的作用下产生静电力, 固定梳齿与运动梳齿发生相对位移, 带动微夹持臂产生位移<sup>[3]</sup>; 当撤掉电压后, 微夹持臂依靠自身弹性回复到平衡位置。梳齿静电驱动结构如图1所示。

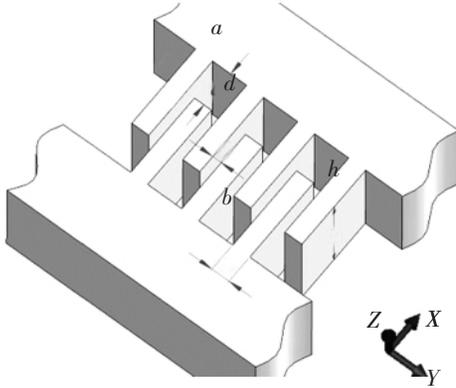


图1 梳齿结构示意图

静电驱动器平稳工作时静电梳齿驱动结构如图2所示。

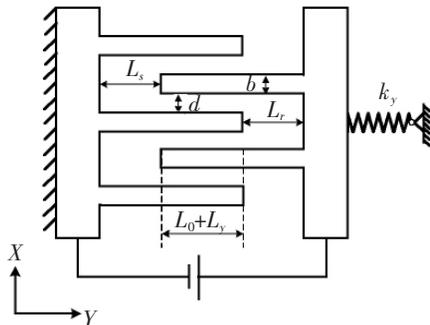


图2 静电梳齿驱动模型

梳齿初始重叠长度为 $L_0$ , 固定梳齿根部到运动梳齿端部的距离为 $L_s$ , 运动梳齿根部到固定梳齿端部的距离为 $L_r$ , 梳齿宽度为 $b$ , 梳齿间隙为 $d$ , 梳齿

沿 $Z$ 方向的厚度为 $h$ 。梳齿驱动器各梳齿之间总电容量 $C$ :

$$C = \varepsilon_0 h \left[ \frac{n(L_0 + L_s)}{d - L_x} + \frac{n(L_0 + L_s)}{d + L_x} + \frac{nb}{L_s - L_y} + \frac{(n+1)b}{L_r - L_y} \right] \quad (1)$$

其中,  $\varepsilon_0$  为空气介电常数,  $n$  为梳齿电极的总对数,  $L_x$  为运动梳齿沿 $X$ 方向上的位移,  $L_y$  为运动梳齿沿 $Y$ 方向上的位移。驱动器正常工作时静电平衡, 动齿电极不发生偏转, 即 $L_x=0$ , 且初始条件下 $L_y=L_s=L_r$ , 梳齿电容中存储的电场能 $E$ :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{\varepsilon_0 h}{2} \left[ \frac{2n(L_0 + L_s)}{d} + \frac{(2n+1)b}{L - L_y} \right] V^2 \quad (2)$$

则静电力 $F_{ey}$ 为:

$$F_{ey} = \frac{dE}{dy} = n\varepsilon_0 V^2 \frac{h}{d} + \left( n + \frac{1}{2} \right) \frac{bh\varepsilon_0 V^2}{(L - L_y)^2} \quad (3)$$

由于 $L - L_y \gg b$ , 为了简化计算, 将公式(3)中的第二项忽略, 则:

$$F_{ey} = \frac{n\varepsilon_0 h}{d} V^2 \quad (4)$$

由公式(4)可知, 静电力同驱动电压的平方成正比。

静电力由梳齿电容产生, 当运动梳齿与固定梳齿粘附在一起, 或者驱动器在电压作用下通过很大电流、造成梳齿击穿时, 会使驱动失效。

理论上梳齿两侧的静电驱动力大小相等方向相反, 可以相互抵消, 从而保证运动梳齿沿着相邻两个固定梳齿之间的轴线运动, 但器件在实际加工过程中, 由于掩模版的制造误差、光刻精度和结构释放过程中的刻蚀误差等原因, 以及驱动器在工作过程中受到外界环境的影响, 都会使运动梳齿偏离轴向运动, 导致梳齿两侧的静电力失去平衡, 如果驱动器沿 $X$ 方向上的弹性系数不能保持运动梳齿在相邻两个固定梳齿之间处于平衡状态, 运动梳齿最终将与固定梳齿黏附在一起。梳齿驱动存在一个临界失稳电压值<sup>[4]</sup>, 当驱动电压高于临界失稳电压值或电压纹波过大时, 就会造成静电梳齿驱动失稳。

## 3 设计综述

静电驱动微夹持器控制电源由控制器、比较电路、DC-DC变换器、输出采样电路、键盘输入电路、

显示电路及与上位机进行通讯的电路构成。通过键盘输入电路向控制器输入预期的驱动电压，控制器控制 DAC 输出相应电压与 DC-DC 变换器的输出采样信号进行比较，比较电路的输出来控制 DC-DC 变换器，构成一个闭环系统。控制器通过显示电路显示输出电压及控制状态。控制电源硬件原理图如图 3 所示。

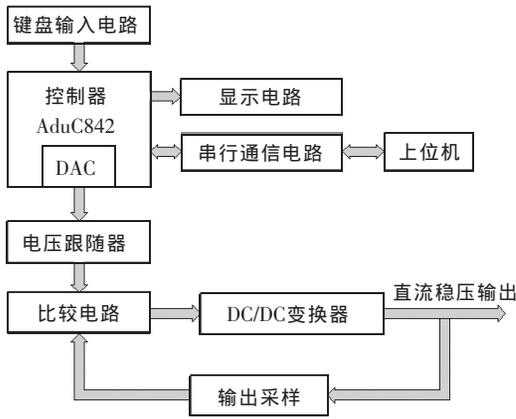


图 3 控制电源硬件原理图

## 4 各功能模块设计

### 4.1 DAC 控制设计

采用 AD 公司生产的 ADuC842 作为电源嵌入式控制芯片。这是一款基于 8052 内核的、内部集成了 2 路高速 12 位 DAC、且机器周期可达 16.78 MHz 的高性能单片机系统<sup>[4]</sup>。

在 ADuC842 的 DAC 输出端连接低功耗集成运算放大器 LM358 构成电压跟随器，可有效减小电压偏移量及增益误差，如图 4 所示。

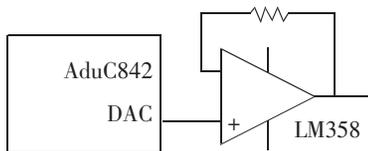


图 4 DAC 电压跟随输出

### 4.2 DC-DC 变换器

设计单开关式 Boost 升压电路，降低开关损耗。选用 Motorola 公司生产的单片双极性集成电路 MC34063，专用于 DC-DC 变换器控制部分。片内含

有温度补偿带隙基准源、一个占空比周期控制振荡器、驱动器和大电流输出开关，能够输出 1.5 A 的开关电流。它能够使用最少的外接元件构成开关式升压变换器。DC-DC 变换器电路如图 5 所示。

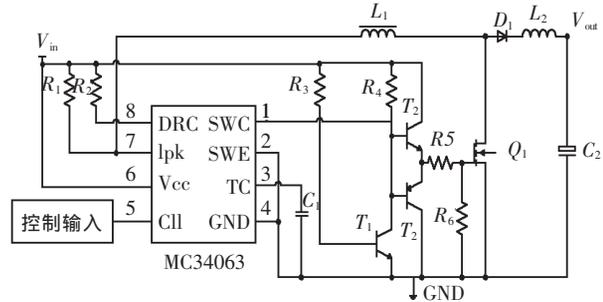


图 5 DC-DC 变换器原理图

DC-DC 变换器设计规范：

开关管导通：

$$t_{on} = \frac{CT}{4 \times 10^{-5}} \quad (5)$$

其中， $CT$  为定时电容容量。定时电容容量过小会导致电感储能不足，输出电压幅值过小；定时电容容量过大会导致开关管导通时间过长，电路发热严重。实验选取定时电容容量 2 000 pF。

开关管截止时间：

$$\left(\frac{t_{on}}{t_{off}}\right)_{\max} = \frac{V_{out} + V_F}{V_{in} - V_{sat}} \quad (6)$$

其中， $V_F$  为整流二极管正向压降。

电流检测端电流：

$$I_{pk} = 2I_{out(max)} \frac{t_{on} - t_{off}}{t_{off}} \quad (7)$$

电流检测端连接电阻：

$$R_{sc} = \frac{0.3}{I_{pk}} \quad (8)$$

输出滤波电容：

$$C_o = \frac{I_{out} \cdot I_{on}}{V_{ripple(p-p)}} \quad (9)$$

其中， $V_{ripple(p-p)}$  为理想输出电压纹波。

### 4.3 输出信号采集与反馈闭环控制设计

对输出电压进行实时采集，并将信号反馈给比较电路，与控制器的 DAC 信号进行比较，比较器输出作为控制信号控制 DC-DC 变换器。输出信号采集

与反馈模块硬件原理图如图 6 所示。

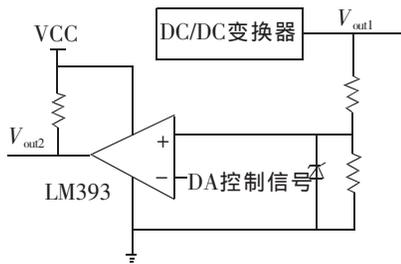


图 6 输出信号采样与反馈原理图

DC-DC 变换器输出采样信号波形为锯齿波，与 DAC 输出电压比较后，转变为方波信号。

比较器的输出为一定占空比的方波信号，引入 MC34063 的第 5 引脚，是 MC34063 内部比较器的反向输入端，用来控制 MC34063 内部开关晶体管，形成闭环反馈控制。MC34063 的内部框图如图 7 所示。

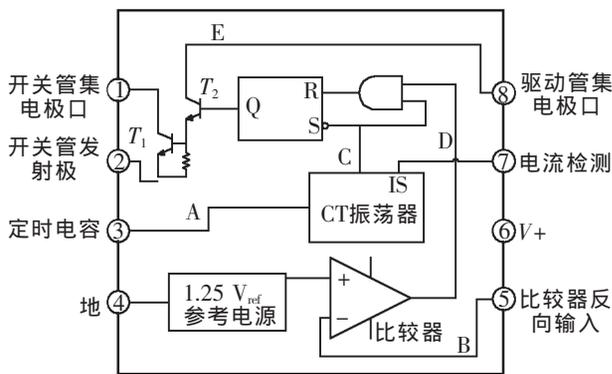


图 7 MC34063 的内部框图

#### 4.4 显示模块设计

由于 LCM 液晶显示器件具有显示信息丰富、功耗低、体积小、重量轻等优点，因而采用 LCM12864 液晶显示器作为静电驱动电源的显示器件。为节省

#### 参考文献

- [1] 徐泰然. MEMS 和微系统——设计与制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 丁衡高. 微机电系统的科学研究与技术开发[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(9): 1-5.
- [3] Chen C C, Lee C K. Design and modeling for comb drive actuator with enlarged static displacement[J]. *Sensor and Actuators*, 2004, A115: 530-539.
- [4] ADuC842 Datasheet[EB/OL]. [2005] <http://www.analog.com/zh/index.html>

作者简介: 杨会生 (1982-), 男, 河北献县人, 硕士, 实习研究员, 2009 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事机电一体化、空间光学系统等方面的研究。E-mail: yanghuisheng@126.com

引脚资源, 通过串行控制液晶显示, 由 ADuC842 的 P3.7 控制 cs 片选信号, P3.6 控制 std 指令数据选择信号, P3.5 控制 sclk 时序脉冲信号。

#### 5 控制电源实验

对静电驱动控制系统进行测试, 测试结果: 输出电压幅值范围 15~80 V, 输出纹波最大值为 800 mV; 在 15~80 V 范围内, 每隔 5 V 输出电压, 利用精密数字电压检测装置测量输出电压值, 绘制静电驱动系统输出曲线, 如图 8 所示。将实测数据拟合后和理论输出曲线进行比较, 其误差最大点的电压偏差为 11 mV, 该电源输出的非线性 < 0.01%。

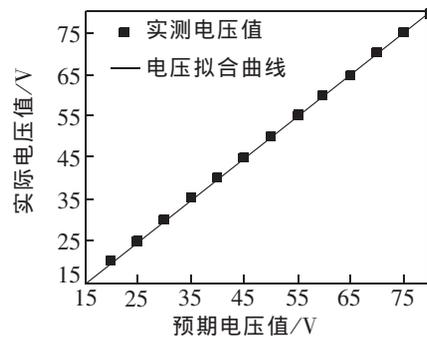


图 8 电压输出曲线

静电驱动控制系统在静电驱动平台、静电驱动微夹持器上做驱动实验, 工作稳定。

#### 6 结论

本控制电源可适应静电驱动器的特点, 控制方便, 输出电压稳定, 波形好, 输出电压纹波小, 可满足静电驱动微夹持器的工作要求。