

文章编号 1004-924X(2019)09-1935-08

## 电磁悬浮静电驱动旋转微镜控制系统设计

肖奇军<sup>1</sup>, 罗忠辉<sup>2\*</sup>

(1. 肇庆学院 电子与电气工程学院, 广东 肇庆 526061;

2. 广东技术师范大学 机电学院, 广东 广州 510665)

**摘要:** 为了实现对电磁悬浮微镜绕轴向 $-180^\circ$ 到 $+180^\circ$ 角度的旋转控制, 对该系统所采用的电磁悬浮、静电驱动、转角闭环控制等进行研究。首先, 设计和制造了电磁悬浮微镜的定子和转子结构。接着, 对通过线圈的电流频率、电流大小与悬浮高度的关系进行仿真和实验, 实验结果和仿真结果基本一致。然后, 在分析变电容驱动原理的基础上, 进行旋转控制实验, 说明在按相序通电情况下, 转子能实现旋转。最后, 介绍了采用高精度的电容检测的转角闭环控制系统。实验结果表明: 在激励电流峰-峰值是 0.5 A, 激励频率为 20 MHz 时, 转子悬浮到 100  $\mu\text{m}$  高度, 能够实现指定角度的控制, 基本满足电磁悬浮微镜的控制要求。

**关键词:** 电磁悬浮; 静电驱动; 微镜; 控制系统

**中图分类号:** TH703; TN703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192709.1935

## Control system for an electromagnetic suspension and electrostatically drive rotating micro mirror

XIAO Qi-jun<sup>1</sup>, LUO Zhong-hui<sup>2\*</sup>

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China;

2. School of Mechatronic, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

\* Corresponding author, E-mail: 1024968198@qq.com

**Abstract:** In order to realize the rotation control of an electromagnetic levitation micromirror from  $-180^\circ$  to  $+180^\circ$ , the electromagnetic levitation, electrostatic drive, and closed-loop angle control used in this system were studied. First, the stator and rotor structures were designed and fabricated. Then, the relationship between levitation height and the frequency and amplitude applied to the coil were simulated and tested. The experimental results showed good agreement with the simulation results. On the basis of the analysis of the driving principle of variable capacitance, the rotation control experiment was performed, which showed that the rotor can rotate under the energizing condition in the phase sequence. Finally, a closed-loop control system with high-precision capacitance detection was introduced. The experimental results show that when the excitation current p-p value is 0.5 A and the excitation frequency is 20 MHz, suspension of the rotor at height of 100  $\mu\text{m}$  can

收稿日期: 2019-05-23; 修订日期: 2019-07-20.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(No. 2016A030313846); 广东省教育厅特色创新项目(No. 2017KTSCX197)

control the specified angle and meet the control requirements of the electromagnetic suspension micromirror.

**Key words:** electromagnetic suspension; electrostatically drive; micro mirror; control system

## 1 引言

微机电系统 (Micro-electro-mechanical Systems, MEMS) 是在微电子技术基础上发展起来的多学科交叉的前沿研究领域, 经过四十多年的发展, 已成为世界瞩目的重大科技领域之一。它涉及电子、机械、材料、物理学、化学、生物学、医学等多种学科与技术, 具有广阔的应用前景。利用微加工技术制造出微型器件并进行相应处理电路设计, 可广泛应用于传感器和驱动器中。MEMS 微镜是其中一个典型应用, 它通过控制微镜和入射光之间的入射角来控制光线的偏转方向, 广泛应用于光纤相位调制器、光学衰减器、光谱仪、光开关等领域。

电磁悬浮器件及其技术得到广泛的研究。1995 年, 英国谢菲尔德大学的 C. Shearwood 等学者首次应用 MEMS 方法设计制作了交流电磁悬浮转子微陀螺<sup>[1-2]</sup>。上海交通大学于 2001 年开始研究交流电磁悬浮转子微陀螺, 该方案的特点是将悬浮稳定线圈和旋转线圈分离, 并在结构上设计了力矩线圈和检测用的电容极板。通过给定子稳定悬浮线圈、旋转线圈分别加 10, 2 MHz 的交流电, 直径为 2.2 mm, 厚 20  $\mu\text{m}$  的铝转子可靠悬浮在定子上, 抽真空时能够获得 5 000 r/min 的转速<sup>[3-4]</sup>。英国南安普顿大学的 Michael Kraft 等于 2014 年首次提出一种基于电磁悬浮, 静电驱动可用做微小物体加速的结构, 这个设计包括利用电磁力悬浮起 1 mm 宽, 7  $\mu\text{m}$  厚的矩形铝片, 能获得最大 75  $\mu\text{m}$  的悬浮高度, 并利用静电力驱动铝片直线运动, 可获得 3.6 mm/s 的线速度<sup>[5-6]</sup>。德国弗莱堡大学开发出一种可用作双稳态驱动器的电磁悬浮静电驱动器件, 悬浮高度为 90  $\mu\text{m}$  时, 绕垂直轴角位移为 37°, 频率为 1.5 Hz<sup>[7-8]</sup>。综上所述, 电磁悬浮、静电驱动应用在直线运动和旋转运动上, 具有发热小、能量损耗小等优势, 但无法实现线位移和角位移的检测和精确定位, 只能采用开环控制, 需要实现闭环控制提高它的应用前景。

为使 MEMS 微镜能倾斜一定角度, 现有的方法一般是把 MEMS 微镜安装在扭转梁上, 在直流电压的静电驱动下使扭转梁偏转, 从而带动微镜旋转一定的角度, 改变与入射光之间的入射角。受机械扭转梁刚度的限制, 这种方法最多实现  $\pm 20^\circ$  旋转角<sup>[9-12]</sup>, 无法实现微镜  $\pm 180^\circ$  的偏转。本文提出一种新颖的电磁悬浮微镜, 采用电磁悬浮结合静电驱动技术实现了微镜  $\pm 180^\circ$  的轴向大尺度旋转。

## 2 电磁悬浮控制系统的结构设计

在磁悬浮微镜中, 悬浮线圈通交变电流, 该交变电流产生的交变磁场与其在微转子导体中感应出的涡流作用产生电磁力, 使微转子悬浮起来, 稳定线圈使转子稳定悬浮在腔体中央。轴向旋转驱动电极为三相, 通电时产生的静电力驱动转子轴向旋转。如图 1 所示, 电磁悬浮微镜主要由定子和转子组成, 定子主要包括 6 块轴向旋转驱动电极、公共电极、悬浮线圈、稳定线圈及其引脚等组成的金属平面结构。其中 6 块轴向旋转驱动电

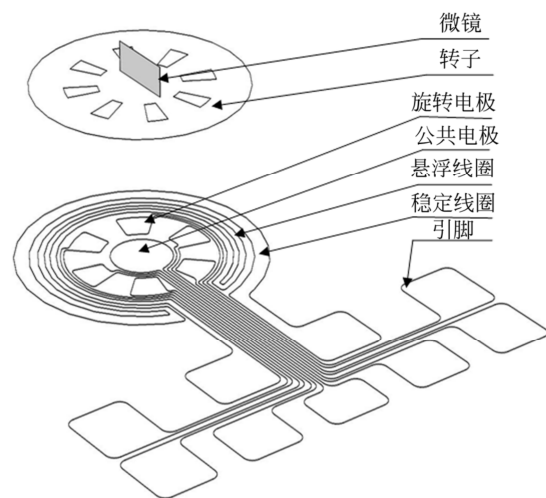


图 1 电磁悬浮微镜结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic suspension micro mirror

极相对的两块组成一相,分别组成 A 相、B 相和 C 相控制电极对,金属平面电极厚度为 15 μm,铝转子厚度为 8 μm,直径为 3.2 mm,四周有 8 个通孔,中心安装一个反射镜。当转子悬浮起来,需要对轴向旋转驱动电极加电控制转子带动反射镜旋转到指定角度,改变入射光的传播方向,以满足大角度成像的使用需要,公共电极引出检测信号。采用 UV 激光加工设备(Optec ws-flex)进行微加工,该设备具有 2 μm 的加工精度,可以加工出铝转子和平面电极结构,加工出来的铝转子和平面电极如图 2 所示。

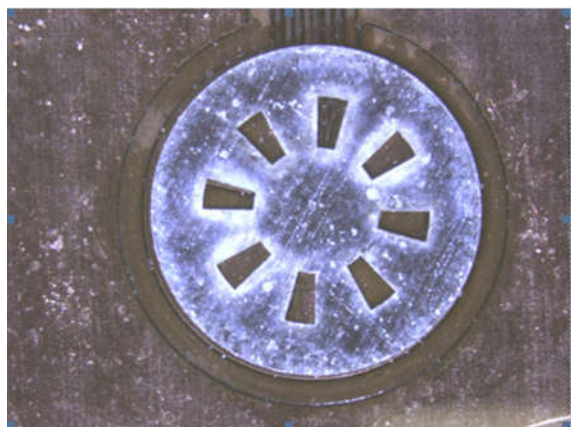


图 2 铝转子和平面电极

Fig. 2 Photo of fabricated aluminum rotor and planar electrode

### 3 控制系统的建模仿真和实验

#### 3.1 静电驱动的建模仿真

假设控制电极对 A 相通电,采用虚功方法求得静电力矩,即控制力矩为静电能  $W_e(\theta)$  对转子转角  $\theta$  的微分,则施加在转子上的控制力矩能表示为:

$$T_{ei} = \frac{\partial W_e(\theta)}{\partial \theta} = K_m \times V_R^2, \quad (1)$$

式中:  $K_m$  是转矩系数,  $V_R$  是施加的相电压。  $T_e$  表示 B 相和 C 相通电得到的转矩之和,则转矩平衡方程为:

$$J_z \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b_z \frac{d\theta}{dt} = T_e + T_d, \quad (2)$$

式中:  $J_z$  是微镜旋转所产生的转动惯量,  $b_z$  是空气阻尼系数,  $T_d$  是扰动力矩。为了减小空气阻

尼的影响,提高响应速度,微镜置于真空环境下,在这种情况下只考虑电阻尼。

由于控制电压和转角之间是非线性关系,为实现控制系统的线性化,将控制对象补偿为具有线性关系的伪线性系统,可采用无预载电压的控制方式,当转子运动到 A 相和 B 相控制区域,施加如下电压:

$$\begin{cases} V_1 = K_a \sqrt{V_f}, V_2 = 0, V_3 = 0 (V_f > 0) \\ V_1 = 0, V_2 = 0, V_3 = 0 (V_f = 0) \\ V_1 = 0, V_2 = K_a \sqrt{-V_f}, V_3 = 0 (V_f < 0) \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $V_1 \sim V_3$  分别为施加在 A 相、B 相和 C 相控制电极对的控制电压,  $K_a$  是高压放大器的放大倍数。若  $V_f$  大于零, A 相控制电极对的施加电压为  $V_1$ , B 相电极对的施加电压  $V_2$  和 C 相控制电极对的施加电压  $V_3$  均为零;若  $V_f$  小于零, B 相控制电极对的施加电压为  $V_2$ , A 相控制电极对的施加电压  $V_1$  和第三控制电极对的施加电压  $V_3$  均为零,即只对一个轴向旋转控制电极对施加电压,另外两个轴向旋转控制电极对的电压为零。其控制力矩  $T_e$  可表示为:

$$T_e = K_m \times V_1^2 - K_m \times V_2^2, \quad (4)$$

式中  $K_m$  为力矩系数。经过简化,式(2)可以表示为:

$$J_z \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b_z \frac{d\theta}{dt} = K_m K_a^2 V_f + T_d. \quad (5)$$

等式(5)两边进行拉普拉斯变换后,可得:

$$J_z s^2 \theta(s) + b_z s \theta(s) = K_m K_a^2 V_f(s) + T_d(s). \quad (6)$$

开环传递函数可表示为:

$$\frac{\theta(s)}{V_f(s)} = \frac{K_m K_a^2}{J_z s^2 + b_z s}. \quad (7)$$

角度闭环控制框图如图 3 所示。图中,  $K_a$  是放大器的放大倍数,  $\theta$  是输入转角,  $\theta_1$  是输出转角,  $G_c(s)$  为 PID 控制器的传递函数,它可以表示为:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (8)$$

式中:  $s$  是拉普拉斯算子,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  分别是比例系数、积分系数和微分系数。比例系数可增大系统频带和加快响应速度,积分系数用来消除稳态误差,微分系数提供足够的阻尼,增强系统稳定性。

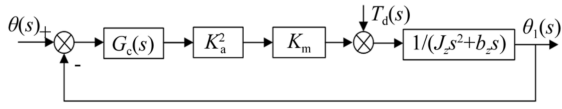


图 3 角度闭环控制原理框图

Fig. 3 Block diagram of angular close-loop control system

转角闭环控制传递函数可表示为:

$$\frac{\theta_i(s)}{\theta(s)} = \frac{K_m K_a^2 G_c(s)}{J_z s^2 + b_z s + K_m K_a^2 G_c(s)}. \quad (9)$$

系统特征方程可表示为:

$$J_z s^3 + (b_z + K_m K_a^2 K_d) s^2 + K_m K_a^2 K_p s + K_m K_a^2 K_i = 0. \quad (10)$$

根据劳斯判据,为了稳定系统,必须满足下列方程:

$$\begin{cases} b_z + K_m K_a^2 K_d > 0 \\ K_p b_z + K_p K_m K_a^2 K_d - K_i J_z > 0. \\ K_m K_a^2 K_p > 0 \end{cases} \quad (11)$$

$K_p$  和  $K_d$  必须满足等式:

$$\begin{cases} K_p > K_i J_z / (b_z + K_m K_a^2 K_d) \\ K_d > -b_z / (K_m K_a^2) \end{cases}. \quad (12)$$

微镜在大气中工作时,  $b_z$  大于零,  $K_d$  可为零,  $K_p > K_i J_z / b_z$ , 这些参数选择为实验提供理论依据。

### 3.2 电磁悬浮控制系统的工作原理

无预载电压控制原理框图如图 4 所示。若输入参考角度大于  $15^\circ$ , 则顺序加电, 转子以步进角度  $15^\circ$  旋转。当所需控制角度小于步进角度, 转子在控制电极对 A 相和控制电极对 B 相的控制范围内时, 则电容检测电路获取转子实际转角和参考值比较, 获得误差。经过 PID 控制器后获得输出电压  $V_f$ , 再通过式(3)计算后获得控制电压  $V_1, V_2, V_3$ , 分别施加到控制电极对 A 相、B 相和

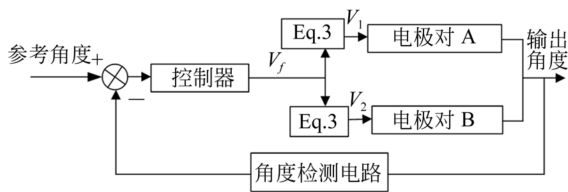


图 4 无预载电压控制原理框图

Fig. 4 Block diagram of control principal without preload voltage

C 相上, 控制转子绕轴向旋转到参考角度, 在对应控制极板对施加等量异号电压, 以保持转子为零位。

### 3.3 测试电路建模

采用频分复用技术实现对转子位置的测量, 频分复用工作原理是在控制电极对上叠加分别表示转子角位移的不同频率的高频载波电压。公共电极通过电容耦合将产生表示转子相应角位移的交流检测信号。此交流信号经过前置放大电路转换成交流检测电压信号。再经同步解调、低通滤波后产生转子转角位置信号, 经计算求得相应控制电极对上应加的直流控制电压, 从而使转子到达指定位置。图 5 为电容检测前置放大电路模型,  $C_{1P}$  和  $C_{1N}$  分别为 A 相控制电极对单个控制电极与转子之间的电容,  $C_{2P}$  和  $C_{2N}$  分别为 B 相控制电极对单个控制电极与转子之间的电容,  $C_{3P}$  和  $C_{3N}$  分别为 C 相控制电极对单个控制电极与转子之间的电容。它们施加等量异号电压使转子保持在零电位,  $C_C$  为转子与公共电极之间的电容,  $C_f$  为反馈电容,  $R_f$  为反馈电阻,  $C_p$  为连接公共电容与放大器虚地端的导线所引起的寄生电容。寄生电容一端接地, 一端接放大器的虚地端, 这样施加在寄生电容上的电压相等, 电容引线所引入的寄生电容  $C_p$  对电路没有影响, 因此寄生电容的影响可以忽略, 为尽可能减少寄生电容的影响, 连接导线要尽可能短。

前置放大器的输出可表示为:

$$V_{out} = -\frac{j\omega_1 R_f V_1}{[j\omega_1 C_f R_f + 1]} \times \frac{(C_{1P} + C_{1N}) C_C}{(C_{1P} + C_{1N} + C_C)} - \frac{j\omega_2 R_f V_2}{[j\omega_2 C_f R_f + 1]} \times \frac{(C_{2P} + C_{2N}) C_C}{(C_{2P} + C_{2N} + C_C)} - \frac{j\omega_3 R_f V_3}{[j\omega_3 C_f R_f + 1]} \times \frac{(C_{3P} + C_{3N}) C_C}{(C_{3P} + C_{3N} + C_C)}. \quad (13)$$

载波频率应满足:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \gg \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (i = 1 : 3). \quad (14)$$

另外, 由于  $C_C$  远远大于  $C_{1P} + C_{1N}, C_{2P} + C_{2N}$  和  $C_{3P} + C_{3N}$ , 式(13)可以简化为:

$$V_{out} = -\frac{V_1}{C_f} \times (C_{1P} + C_{1N}) - \frac{V_2}{C_f} \times (C_{2P} + C_{2N}) - \frac{V_3}{C_f} \times (C_{3P} + C_{3N}), \quad (15)$$

其中  $C_{1P}, C_{1N}, C_{2P}, C_{2N}, C_{3P}, C_{3N}$  表示为:

$$C_{1P} = C_{1N} = C_{2P} = C_{2N} = C_{3P} = C_{3N} = \epsilon \frac{S}{d}, \quad (16)$$

式中:  $\epsilon$  是介电常数,  $S$  为转子与单个控制电极之间的相对面积,  $d$  为悬浮高度。

式(15)可以简化为:

$$V_{out} = -\epsilon \frac{2V_1}{dC_f} - \epsilon \frac{2SV_2}{dC_f} - \epsilon \frac{2SV_3}{dC_f}. \quad (17)$$

经过放大、同步解调和低通滤波,同步解调即为和相应载波频率信号开关量相乘,低通滤波后将高频分量滤除,只剩下直流分量,第  $i$  相电容检测输出直流信号为:

$$V_i = \epsilon \frac{4KS V_m^2}{\pi d C_f} \quad (i = 1 : 3), \quad (18)$$

式中  $K$  为前置放大器的增益。可以看出,输出电压和  $S$  成正比,和  $d$  成反比。

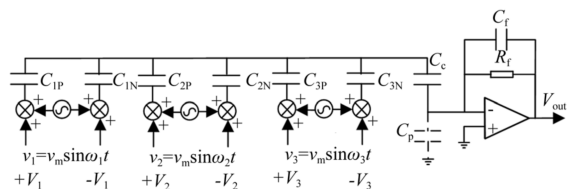


图 5 电容检测前置放大器

Fig. 5 Preamplifier for capacitance detection

### 3.4 测试控制实验

图 6 为测试和控制设置,信号发生器和功率放大器(LZY-22+)连接以产生 20 MHz 频率正弦波信号驱动悬浮线圈产生电磁悬浮力使转子悬浮,稳定线圈产生向中心的电磁力。当转子偏离中心位置时,产生的合力使转子回到中心位置,当转子悬浮时,由于电容减小,检测电压随高度的增加而减小。当悬浮到一定高度,检测电压与转子与驱动电极相对面积成正比,这样,可以通过电压的变化获得转子转角。检测板用于电容检测并将电容转换为转角和高度数据传送给控制板,控制板生成控制电压到控制电极,控制转子旋转到指定角度。

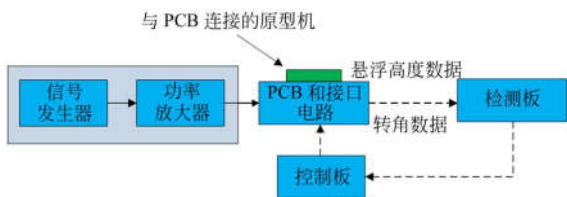


图 6 测试和控制设置

Fig. 6 Block diagram for test and control setup

角位移控制实验系统框图如图 7 所示。整个系统包括电容检测部分、DSP 数字信号处理器和控制电压放大和合成部分。电容检测部分包括多频率多路载波信号发生器、前置放大器、移相器、交流放大器、相敏解调和低通滤波。多频率载波发生器采用直接数字频率合成(DDS)技术,经过带通滤波后去除噪声和直流电压叠加施加在控制极板上。信号处理和控制器则采用 DSP 控制器,主要包括前置放大、信号发生器,控制信号合成,位置检测功能板和 DSP 控制板<sup>[13]</sup>。利用 VC 编写上位机程序,实现数据动态显示和存储等功能,编写 DSP 下位机控制程序对转子位置进行闭环控制。

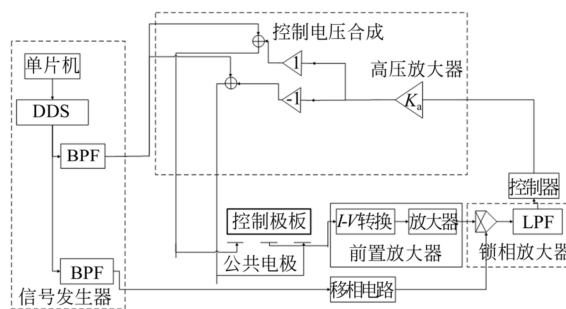


图 7 角度控制系统实验框图(单路角位移检测控制)

Fig. 7 Schematic diagram of angle control system (one channel)

### 3.5 实验结果

电磁悬浮实验中,由于实验室缺少光学检测设备以检测悬浮高度,采用 Leika 显微镜变焦距法测试,当转子位置变化时,通过调整焦距使图像清晰,焦距变化量即为悬浮高度变化。图 8 为在输入电流峰-峰值为 0.5 A 时,改变频率得到的悬浮高度。可以看出,频率为 8 MHz 时,转子开始悬浮,随着频率的增大,转子悬浮高度增大,频率增大到一定程度,悬浮高度改变不明显,进入饱和状态。仿真结果和实验结果曲线吻合。图 9 为输入电流频率为 20 MHz 时,改变电流得到的悬浮高度的变化。可以看出,随着电流的增大,悬浮高度也增大,但随着电流进一步的增大,悬浮高度增加缓慢,仿真结果和实验结果曲线基本吻合。

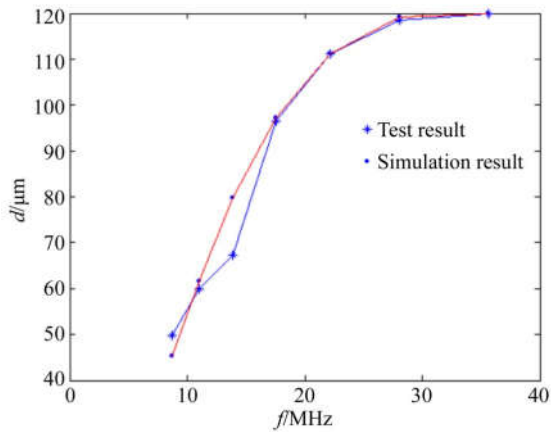


图 8 电流频率和悬浮高度之间的关系

Fig. 8 Variation of levitation height with frequency of input signal for a peak input current amplitude of 0.5 A

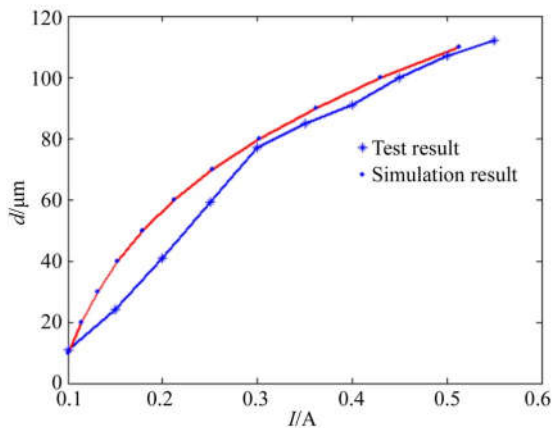


图 9 电流和悬浮高度之间的关系

Fig. 9 Variation of levitation height with supply current at a frequency of 20 MHz

图 10(a)为悬浮过程中检测电压的变化情况。在电流频率为 20 MHz, 电流峰-峰值为 0.5 A 时, 通电后, 转子经过 60 ms 悬浮到 100 μm 高度, 由于悬浮高度变大, 电容减小, 因此检测电压也随之减小, 如图 10(b)所示。断电后, 转子经过 100 ms 落回原位, 悬浮高度变小, 电容增大, 检测电压随之增大到悬浮前大小, 如图 10(c)所示。

图 11 为按照相序通电得到的转子位置变化, 转子顺时针以步距角 15°转动, 转动过程中各相电容变化如图 12 所示。转子在旋转角度为 15°, 30°, 45° 时, 转子与 A 相控制电极之间的重合角度为 30°, 15°, 15°, 重合角度为 30°的电容是重合

角度为 15°的电容的两倍。因此, 从如图 13 所示的转动过程中检测电压变化可以看出, 检测电压的低电压持续时间是高电压持续时间的 2 倍, 电容从 0.021 pF 变化到 0.042 pF, 检测电压从 -0.4 V 变化到 +0.5 V, 曲线不光滑的原因主要来源于检测电路噪声, 这些会影响到检测和控制

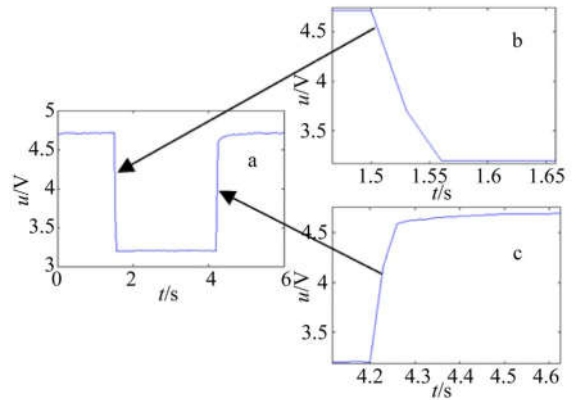


图 10 悬浮曲线

Fig. 10 Levitation curve

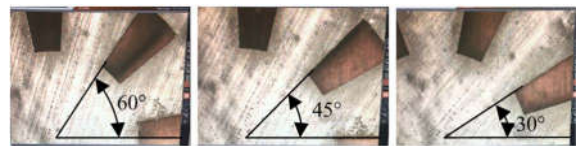


图 11 转子旋转过程中转角变化

Fig. 11 Angle change when rotor rotating

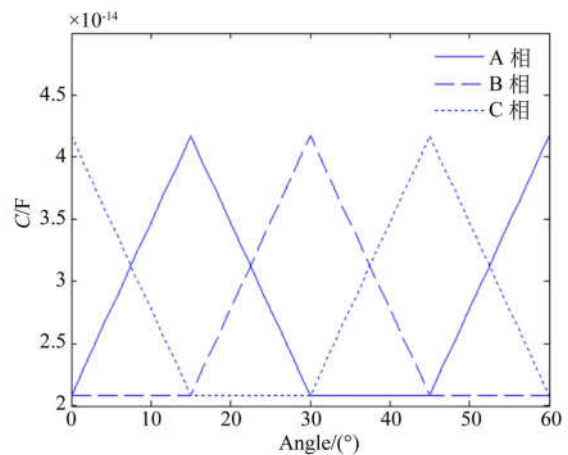


图 12 转子旋转过程中的电容变化

Fig. 12 Capacitance variation when rotor rotating

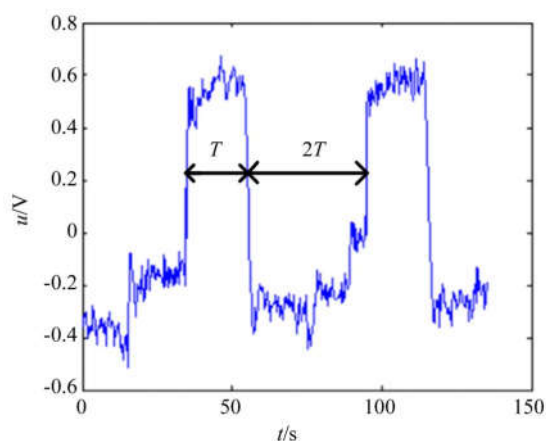


图13 转子旋转过程中检测电压的变化

Fig. 13 Variation of detection voltage when rotor rotating

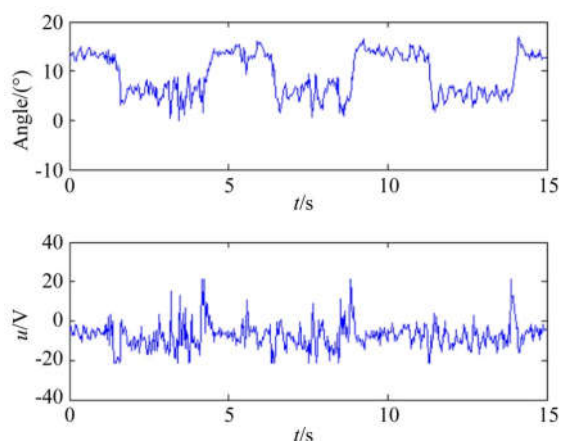


图14 无预载电压方波输入时间响应检测和控制电压的变化

Fig. 14 Variation of angle and control voltage during time response of square-wave input without preload voltage

精度。在接下来的工作中,将在结构优化设计、PCB布线、高精度电子元器件选择上加以改进,以减小电路噪声,获得更好的检测和控制性能。

图14为采用无预载电压方波输入角度时间响应曲线,上图为角度变化曲线,下图为控制电压变化曲线,可以看出,在控制电压作用下,转子可实现方波输入时间响应转角跟踪。

## 4 结 论

本文根据提高微镜转角范围的要求,提出了一种基于电磁悬浮静电驱动旋转的方法,可实现微镜 $\pm 180^\circ$ 的旋转。首先介绍了电磁悬浮微镜的结构和工作原理,然后研究了电磁悬浮控制系统的工作原理,对旋转驱动控制进行数学建模。最后建立测控装置,给出了角位移控制实验系统的结构和组成,进行悬浮和角度控制实验。实验结果表明:在激励电流峰-峰值为0.5 A,激励频率为20 MHz时,转子悬浮到100  $\mu\text{m}$ 高度,进行静电旋转驱动开环实验,采用基于PID控制的无预载电压控制方式旋转驱动,可以实现转子转角的控制,基本满足了电磁悬浮微镜的要求。下一步工作是提高控制性能,减小电路噪声并安装微镜,进行光学性能测试。

## 参考文献:

- [1] SHEARWOOD C, HO K Y, WILLIAMS C B, *et al.*. Development of a levitated micromotor for application as a gyroscope[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 83(1/2/3): 85-92.
- [2] SHEARWOOD C, MATTINGLEY A D, GIBBS M R J, *et al.*. Levitation of a micromachined rotor for application in a rotating gyroscope[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(21): 1845-1846.
- [3] WU X S, CHEN W Y, ZHAO X L, *et al.*. Development of a micromachined rotating gyroscope with electromagnetically levitated rotor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(10): 1993-1999.
- [4] ZHANG W P, CHEN W Y, ZHAO X L, *et al.*. The study of an electromagnetic levitating micromotor for application in a rotating gyroscope[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(2): 651-657.
- [5] SARI I, KRAFT M. A micro electrostatic linear accelerator based on electromagnetic levitation [C]//2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, June 5-

- 9, 2011. *Beijing, China. New York, USA: IEEE*, 2011.
- [6] SARI I, KRAFT M. A MEMS linear accelerator for levitated micro-objects[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 222: 15-23.
- [7] POLETKIN K V, CHERNOMORSKY A I, SHEARWOOD C. Proposal for micromachined accelerometer, based on a contactless suspension with zero spring constant[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(7): 2407-2413.
- [8] POLETKIN K, LU Z Q, WALLRABE U, *et al.*. A new hybrid micromachined contactless suspension with linear and angular positioning and adjustable dynamics[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(5): 1248-1250.
- [9] CHEN R T, NGUYEN H, WU M C. A low voltage micromachined optical switch by stress-induced bending[C]//*Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No. 99CH36291)*, January 21, 1999. *Orlando, FL, USA. New York, USA: IEEE*, 1999.
- [10] MILANOVIC V, LAST M, PISTER K S J. Laterally actuated torsional micromirrors for large static deflection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(2): 245-247.
- [11] 刘英明, 徐静, 钟少龙, 等. 垂直梳齿驱动的大尺寸 MOEMS 扫描镜[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2): 400-407.  
LIU Y M, XU J, ZHONG SH L, *et al.*. Large-scale MOEMS scanning mirror actuated by vertical comb[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 400-407. (in Chinese)
- [12] 李四华, 徐静, 龙亮, 等. 多台阶平板静电驱动的高占空比微镜阵列的研制[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(8): 1816-1823.  
LI S H, XU J, LONG L, *et al.*. Fabrication of high fill-factor micro-mirror array with multi-terraced-plate structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1816-1823. (in Chinese)
- [13] XIAO Q J, CHEN W Y, LI S Y, *et al.*. Modeling and simulation of levitation control for a micromachined electrostatically suspended gyroscope [J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(3): 357-366.

#### 作者简介:



肖奇军(1975—),男,湖南衡阳人,博士,副教授,2004年于广东工业大学获得硕士学位,2010年于上海交通大学获得博士学位,新加坡南洋理工大学博士后,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: shawqj@126.com

#### 通讯作者:



罗忠辉(1965—),男,江西泰和人,教授,1988年于华中理工大学获得学士学位,1995年于武汉工业大学获得硕士学位,2005年于广东工业大学获得博士学位,主要从事机电液传动与控制、现代检测技术、机械故障诊断理论与方法方面的教学与科研。E-mail: 1024968198@qq.com