

静电驱动悬臂梁数模转换器设计、分析与模拟*

王立峰 黄庆安

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 提出了一种新型的微电子机械数模转换器(MEMDAC)——静电驱动悬臂梁数模转换器。与传统的静电驱动悬臂梁执行器相比, 新的结构能更精确地控制梁的挠度。文中给出了此 MEMDAC 的设计、分析和模拟过程。有限元(FEA)分析表明此 MEMDAC 的最大输出位移为 $1.51\mu\text{m}$, 分辨率为 $0.1\mu\text{m}$, 其最大非线性误差为 $0.03\mu\text{m}$ 。

关键词: 悬臂梁; 微执行器; 非线性误差; 数模转换器

EEACC: 1220B; 2180B; 2575F

中图分类号: TN722.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)06-0697-05

1 引言

微电子机械数模转换器(MEMDAC)在微光控制、纳米技术等领域有非常广泛的应用前景。目前已有一种不同结构和工作原理的 MEMDAC。Yeh 使用热执行器阵列驱动级联杠杆臂来实现数字量到位移量的转换^[1], 但其最大非线性误差达到了最大输出的 5%; Liu 利用基于新型双压电晶片的热执行器的结构来实现 MEMDAC^[2], 而此 MEMDAC 的不足之处是其响应较慢。文献[3~5]中提出了类似于电阻加权 DAC 的 MEMDAC 的设计原理, 如硬度加权、间隙加权等, 这对以后的 MEMDAC 的设计有十分重要的意义。

静电驱动悬臂梁结构在微电子机械系统中是一种较为常见的执行器结构, 这种结构可以在悬臂梁的顶端产生一定的挠度。传统的静电驱动悬臂梁执行器是以悬臂梁作为电极, 使用模拟电压来控制顶端挠度的大小。但是由于模拟电压容易受到外界的干扰和电压本身会有漂移, 所以此结构的受控误差较大。

本文提出了一种新型的静电驱动悬臂梁结构, 新结构将 4 个电极放置在梁上, 并将这 4 个电极作

为加权因子来控制梁顶端的挠度。控制电极的数量为 4 个, 即 MEMDAC 为 4 位位宽。通过 FEA 分析, 此 MEMDAC 的最大输出位移为 $1.51\mu\text{m}$, 最大非线性误差为 $0.03\mu\text{m}$ 。

2 MEMDAC 设计

2.1 结构设计

静电驱动数模转换器的简化结构如图 1 所示, 其结构可以用体微机械加工技术制备。悬臂梁的左端固定, 梁下的埋层 p^+ -Si 为接地电极, 梁上的 4 个电极为此 MEMDAC 的数字输入端, 梁顶端的挠度为输出量。从俯视图中可以看出 4 个电极在梁的长度方向上平行并列放置。如果电压不变, 当 4 个电极等面积时, 距离梁左端越远的电极, 其对应的梁顶端挠度越大。因此, MEMDAC 的输入数字量由高位到低位依次为 b3, b2, b1, b0。

4 位位宽的 MEMDAC 要求有 16 个输出值, 并且输入的数字量和输出值 δ 之间的理想关系为线性关系:

$$\delta = KB \quad (1)$$

其中 K 为线性比例常数; B 为输入的数字量。例如: 当电极 b3, b1 加电压, b2, b0 不加电压时, 输入

* 国家自然科学基金(批准号: 60076028) 和高等学校博士点基金(No. 2000028620) 资助项目

王立峰 男, 1981 年出生, 硕士研究生, 研究方向为 MEMS。

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师, 主要从事微电子技术教学和 MEMS 研究。

2003-05-31 收到, 2003-10-31 定稿

©2004 中国电子学会

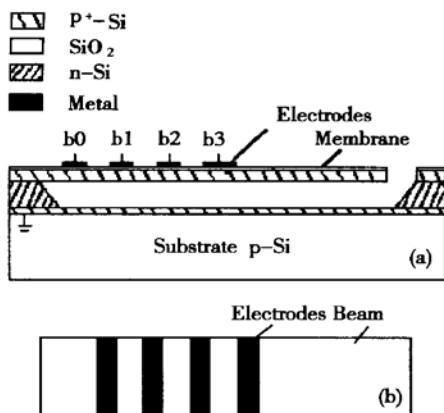


图 1 静电驱动数模转换器结构图 (a) 截面图; (b) 俯视图

Fig. 1 Structure of micro electro-mechanical digital-to-analog converter based on cantilever electrostatic actuator

的数字量为‘1010’，其对应的输出量应为 10K。

2.2 单电极输出分析

图 1 中梁上的某个电极 b_x 加上电压后, 由于此电极受到静电引力的作用, 悬臂梁将发生弯曲。假设此电极的长度(是指沿悬臂梁长度方向上电极的长度)为 a , 它的中点到梁的固定端的距离为 x , 悬臂梁的长度为 L ($L \gg a$), 梁厚为 H , 梁与下电极的间距为 g , 电极与梁等宽, 均为 W 。忽略边缘效应及绝缘层的厚度, 电极所受的静电引力 F_e 近似为^[6]

$$F_e \approx \frac{\epsilon^* a W V^2}{2(g + H - \delta(x))^2} \quad (2)$$

式中 ϵ^* 为等效介电常数; V 为电极上所加的电压; $\delta(x)$ 为 x 处电极 b_x 的挠度。

悬臂梁顶端挠度 δ 与梁上电极 b_x 所受的静电引力 F_e 的关系式为^[6]

$$\delta \approx \frac{x^2}{6EI}(3L - x) F_e \quad (3)$$

同时梁顶端的挠度与 x 处的挠度有如下的近似关系式^[6]

$$\delta(x) \approx \left[\frac{x}{L} \right]^2 \delta \quad (4)$$

结合(2)、(3)、(4)式得:

$$\delta = \frac{EH^3(g + H)L^2 - L^2\sqrt{\Delta}}{2EH^3x^2} \quad (5)$$

式中 $\Delta = E^2H^6(g + H)^2 - \frac{4}{L^2}EH^3\epsilon^* aV^2x^4(3L - x)$ 。可以看出顶端的挠度 δ 与电极的位置 x , 长度 a

都相关。因此, 电压一定时, 调节电极在梁上的位置及其长度, 就可以得到所要求大小的输出值 δ 。

假设此 DAC 的最大输出为 15K, 则由上面分析知道, 可以在梁上找到输出值分别为 $K, 2K, 4K, 8K$ 的电极的位置。然后通过 4 个电极的叠加作用可以得到其他数字量所要求的输出值。但是由于静电引力和梁的弹性回复力都是非线性的, 而且电极之间也会产生相互影响, 使得电极叠加时悬臂梁的顶端挠度并不一定等于各电极单独作用时顶端挠度和, 即顶端挠度与输入的数字量不一定满足(1)式, 从而可能会产生非线性误差。因此需要分析多电极叠加作用时产生的非线性误差, 以减小非线性误差, 优化 MEMDAC 传输特性。

2.3 多电极叠加作用的非线性误差分析

2.3.1 电极位置与非线性误差的关系

通过分析悬臂梁上电极所受的静电引力及机械回复力, 可以找出电极位置与非线性误差之间的关系。

由(2)、(4)式可以得到电极 b_x 所受的静电引力为:

$$F_e \approx \frac{\epsilon^* a W V^2}{2 \left[g + H - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \delta \right]^2} \quad (6)$$

由于悬臂梁的偏转为小角度偏转, 为了方便讨论, 取 $\frac{1}{8}g$ 处静电引力 F_e 随顶端挠度 δ 的增大率为其等效增大率 \bar{K}_e , 则:

$$\bar{K}_e \approx \frac{\epsilon^* a W V^2 x^2}{L^2(g + H)^3} \quad (7)$$

因为梁为小角度偏转, 则顶端的回复力 F_{rl} 为^[7]

$$F_{rl} = \frac{EWH^3 \delta}{4L^3} \quad (8)$$

则 x 处的电极所受回复力 F_r 为:

$$F_r = \frac{L}{x} F_{rl} = \frac{EWH^3 \delta}{x 4L^2} \quad (9)$$

将 F_r 对 δ 求导得到回复力 F_r 随顶端挠度 δ 的增大率为:

$$K_r = \frac{EWH^3}{x 4L^2} \quad (10)$$

令 $\bar{K}_e = K_r$, 得到电极 b_x 所受静电引力与回复力增大速率相等的位置 x_0 为:

$$x_0 \approx \left[\frac{EH^3(g + H)^3}{4a\epsilon^* V^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

位置 x_0 处的电极对非线性误差没有贡献。而在 x_0 的右边有 $K_e > K_r$, 即在 x_0 右边电极所受的静电引力的增大速率大于回复力的增大速率, 因此在叠加作用时, 此电极将对非线性误差有正的贡献; 相反在 x_0 的左边有 $K_e < K_r$, 因此在 x_0 左边的电极对非线性误差的贡献为负。由斜率分析得到非线性误差分布图如图 2 所示。其中, 横坐标 x 为电极在梁上的位置, 纵坐标 e_x 为位置 x 处的电极所对应的非线性误差, 最大正误差 e_L 与最大负误差 e_N 的值由静电驱动悬臂梁 MEMDAC 的结构参数决定。

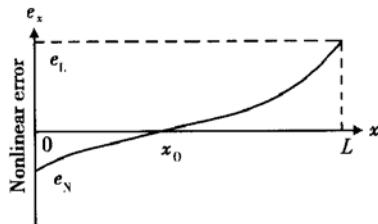


图 2 电极的位置与非线性误差的关系曲线

Fig. 2 Plot of position of electrode versus nonlinear error

从图 2 可以看出, 以 x_0 为中心, 离 x_0 越远的电极, 叠加作用时其绝对误差越大。因此, 要得到较小的非线性误差, 就要使 4 个电极的位置尽量靠近 x_0 , 即 4 个电极必须分布在 x_0 的两侧。

2.3.2 电极间距与非线性误差的关系

当悬臂梁上的两个电极相互之间靠近到足够近的距离时, 两电极产生的电场会相互叠加, 使两个电极所受的静电引力相互削弱, 即这两个电极叠加作用时产生了负误差。

利用 ANSYS 软件可以模拟出上述效应, 其误差分布如图 3 所示。其中, 横坐标 d 为两电极的间距, 纵坐标 e_d 为间距为 d 的两电极叠加作用时产生的非线性误差, 最大负误差 e_0 的值和在允许误差范围内的零误差的电极间距 d_0 也由静电驱动悬臂梁 MEMDAC 的结构参数决定。

从图 3 中可以看出, 对于给定的结构可以认为只有当两电极的间距在 d_0 以内时, 才会有相互影响, 因此间距在 d_0 以上的电极就不用考虑其相互之间的影响了。且由 ANSYS 模拟分析可知, 对于参数不同的结构, 其对应的 d_0 值变化不大, 一般取 $d_0=17\mu\text{m}$ 。

利用这种效应也可以减小电极叠加的非线性误差。例如: 在 x_0 右侧的两个电极叠加作用时会产生正的非线性误差, 通过减小这两个电极的间距(减小

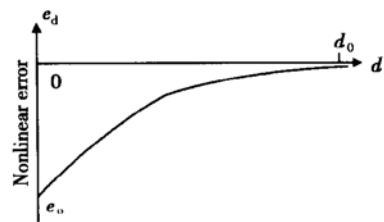


图 3 电极间距与非线性误差的关系曲线

Fig. 3 Plot of distance between electrodes versus nonlinear error

到 d_0 以内), 可以使其产生负的非线性误差, 这个负误差正好与原来的正误差相消, 从而减小了最终的非线性误差。

3 模拟

3.1 参数选取

首先选择最大输出 δ_{\max} 和分辨率 δ_0 , 但由于梁间距和驱动电压的限制, 最大输出 δ_{\max} 不能取得太大, 这里取 $\delta_{\max} = 1.5\mu\text{m}$, $\delta_0 = 0.1\mu\text{m}$ 。梁长 $L = 500\mu\text{m}$, 这个梁较长, 是因为较长的梁有利于减小驱动电压和在允许范围内增大 x_0 值的范围。梁与下电极的间距 g 值的选取非常关键。较小的 g 可以减小驱动电压 V , 但是从(11)式可以看出 g 太小会使 x_0 过于靠近梁的固定端, 这样 4 个电极都将分布在正误差区, 造成很大的非线性误差。因此, 适当的 g 值, 可以使电极分布在 x_0 值的两边, 从而使非线性误差减到最小, 考虑到此结构基于体硅加工, 因此选取 $g = 6\mu\text{m}$ 。选取梁宽 $W = 50\mu\text{m}$, 梁厚 $H = 2\mu\text{m}$, 梁材料为 Si, 因此取梁的杨氏模量 $E = 1.69 \times 10^{11}\text{N/m}^2$, 泊松比 $G = 0.22$ 。电极与梁等宽, 厚度 $h = 1\mu\text{m}$ 。

3.2 电极位置的确定及模拟结果

利用 2.3.1 中分析的电极的位置与非线性误差的关系来确定 4 个电极的位置。当静电驱动悬臂梁数模转换器梁上的 4 个电极分布在静电引力和回复力增大速率相等的位置 x_0 的两边时, 叠加误差较小。因此, 首先要找到 x_0 位置。但是静电引力 F_e 和回复力 F_r 的表达式均为近似公式, 因此(11)式只能作为 x_0 值的定性分析, 不能用来准确地得到 x_0 的值。要得到 x_0 的值, 必须通过计算机的模拟。对于 3.1 中建立的模型, 首先在悬臂梁上放置两个长度均为 $10\mu\text{m}$ 的试验电极(两电极的间距为 $17\mu\text{m}$, 即除

去电极间的相互影响), 然后根据图 2 给出的电极位置与非线性误差的关系, 调整两个电极的位置, 即可找出其非线性误差为零时两电极所在的位置, 即等斜率点 x_0 的位置。通过模拟调试, 测得在允许的误差范围内 x_0 的值为 60 到 $80\mu\text{m}$, 而将 3.1 中模型的结构参数代入(11)式计算得到的 x_0 值为 $183.3\mu\text{m}$, 此值与模拟得到的 x_0 值偏差较大, 因此(11)式不宜用来得到 x_0 的准确值, 但可作为计算机模拟的初始值。

由 $\delta_{\max} = 1.5\mu\text{m}$, $\delta_0 = 0.1\mu\text{m}$, 得到电极 b3, b2, b1, b0 单独作用时对应的输出值应分别为: $0.8\mu\text{m}$, $0.4\mu\text{m}$, $0.2\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$ 。

取 4 个电极的长度均为 $10\mu\text{m}$, 通过调节驱动电压到 $V = 92\text{V}$ 时, 可以使满足输出要求的这 4 个电极对称地分布在上面求出的 x_0 值的两侧, 其位置(以悬臂梁的固定端为原点)如下:(单位: μm)

b3: 123~133, b2: 85~95, b1: 58~68, b0: 39~49.

由于 b3, b2 处于 x_0 的右边, 而 b1, b0 则处于 x_0 的左边, 因此可以预测, b3, b2 叠加作用将使输出值产生正误差; 电极 b1, b0 叠加作用将使输出值产生负误差。

通过 FEA 分析后得到此 MEMDAC 的输出特性如图 4 所示。

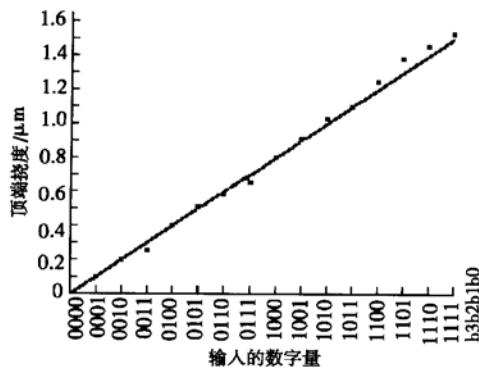


图 4 等长电极位于 x_0 两侧的静电驱动悬臂梁 MEMDAC 传输特性

Fig. 4 Performance of MEMDAC based on cantilever electrostatic actuator with its equilong electrodes located at both sides of x_0

从图 4 可以看出, 数字量 1100, 1101, 1110 的正误差较大, 表明电极 b3, b2 叠加作用使输出值产生了正误差; 而数字量 0011, 0111 的负误差较大, 表明

电极 b1, b0 叠加作用使输出值产生了负误差, 这与上面的误差分析吻合。

3.3 电极间距的调整及优化结果

利用 2.3.2 中的分析, 调节电极的间距, 将上面产生的误差减小, 使此 MEMDAC 的传输特性趋于线性。由于电极 b3, b2 叠加作用的 δ 值产生了正误差, 而电极 b1, b0 叠加作用的 δ 值产生了负误差。因此可以让电极 b3, b2 适当接近, 使电极产生较大的相互影响, 这样正负误差相抵消, 从而将正误差大大减小; 同样电极 b1, b0(间距为 $9\mu\text{m}$)可以适当远离, 减小电极之间的影响, 由于 b1, b0 的距离已经比较远, 因此 b1, b0 叠加作用产生的负误差的改进有限。调整后, 4 个电极的位置重新分布如下:(单位: μm)

b3: 117~129, b2: 93.2~100.2, b1: 58~68, b0: 32~47.

从以上的电极分布可以看出, 由于单个电极的输出值已被固定, 因此改变电极的位置时, 其长度也稍有变化。

模拟后得到优化了的传输特性曲线如图 5 所示。

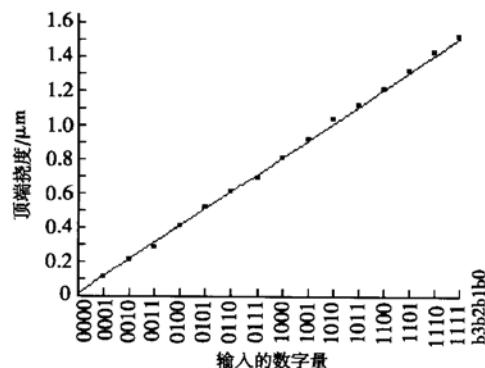


图 5 电极间距调整后的静电驱动数模转换器的传输特性

Fig. 5 Performance of MEMDAC based on cantilever electrostatic actuator after the distance between the electrodes being adjusted

从图 5 静电驱动数模转换器的传输特性可以看出, 电极 b3, b2 叠加作用的正误差大大减小, 而电极 b1, b0 叠加作用的负误差也有所改进。这与上面分析的预期效果相符合。通过电极间距的调整, 此 MEMDAC 的传输特性得到了改善, 输入输出的关系更趋近于线性, 最大非线性误差也从原来的 $0.08\mu\text{m}$ 降为 $0.03\mu\text{m}$ 。

4 结论

本文提出了静电驱动悬臂梁 MEMDAC, 利用悬臂梁上的 4 个电极来控制梁顶端的挠度, 结构简单。通过对电极叠加作用时非线性误差的分析, 得到了接近线性的传输特性。且由于此结构中的电极只作小尺寸偏移, 因此, 与传统的悬臂梁执行器不同, 此处的悬臂梁不会有“拉合(pull-in)”现象^[7]。通过进一步改进悬臂梁结构, 降低驱动电压, 该结构设计方法将有实际应用前景。

参考文献

- [1] Yeh R, Conant R A, Pister K S J. Mechanical digital-to-analog converters. Proc Transducers' 99, Japan, 1999: 998
- [2] Liu Q, Huang Q A. Micro-electro-mechanical digital-to-analog converter based on a novel bimorph thermal actuator. Proceedings of IEEE Int Sensors Conf, Orlando, USA, 2002: 1036
- [3] Liu Q, Huang Q A. Design and finite element analysis of weighted stiffness microelectromechanical digital-to-analogue converters. Electron Lett, 2001, 37(12) : 755
- [4] Liu Q, Huang Q A. Simulation and design optimization of a novel microelectromechanical digital-to-analog converter. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12) : 1543
- [5] Liu Q. Design and analysis of microelectromechanical digital-to-analog converters (MEMDAC) fabricated by polysilicon surface micromachining. MS Thesis of Southeast University, 2002
- [6] Petersen K E. Dynamic micromechanics on silicon techniques and devices. IEEE Trans Electron Devices, 1978, ED-25: 1241
- [7] Senturia S D. Microsystem design. Kluwer Academic, 2001

[1] Yeh R, Conant R A, Pister K S J. Mechanical digital-to-analog converters. Proc Transducers' 99, Japan, 1999: 998

Design, Analysis, and Simulation of Micro-Electro-Mechanical Digital/ Analog Converter Based on Cantilever Electrostatic Actuator*

Wang Lifeng and Huang Qing'an

(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A novel micro-electro-mechanical digital/ analog converter (MEMDAC)- electrostatic cantilever digital/ analog converter is presented. Compared with traditional electrostatic cantilever actuators, this device can control the deflection of the beam more accurately. The design, analysis, and simulation of the MEMDAC are given in details. Finite element analysis (FEA) shows that the maximum output displacement of this MEMDAC is 1.51 μ m, the resolution is 0.1 μ m and the maximum nonlinear error is 0.03 μ m.

Key words: cantilever; micro-actuators; nonlinear error; digital-to-analog converter

EEACC: 1220B; 2180B; 2575F

Article ID: 0253-4177(2004)06-0697-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60076028), Doctor Program Foundation of the Education Ministry of China(No. 2000028620)

Wang Lifeng male, was born in 1981, MS candidate. He is engaged in MEMS.

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor. He is interested in MEMS and microelectronic devices.

Received 31 May 2003, revised manuscript received 31 October 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics