

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205908

# MEMS 电容型器件边缘效应研究\*

胡钧铭<sup>1</sup> 戴强<sup>1</sup> 刘军<sup>2</sup> 徐江<sup>3</sup> 宋丹路<sup>1</sup>

(1. 制造过程测试技术教育部重点实验室 绵阳 621010; 2. 电子科技大学通信抗干扰国家级重点实验室 成都 610054;

3. 中国电科芯片技术研究院 重庆 401332)

**摘要:** MEMS 电容型器件在工作过程中,其电容通常情况下为非正对的极板,边缘效应不容忽视。为解决此问题,基于保角映射变换和复变函数相关理论,通过继承传统模型并加以修正,得出电容极板在非正对情况下的边缘效应模型。经过与有限元仿真、传统 Heerens 模型、Huang 模型的对比,表明当电容极板从正对到完全移开的过程中,本文模型与有限元仿真的误差在 10%~20% 之间,优于传统 Heerens 模型与 Huang 模型。进一步,根据本文模型,当极板重合度低于 40% 时,边缘效应呈快速增长,此时其电容值可用本文模型进行计算。以上结论均得到了 MEMS 阵列电容数字式实验验证。研究对电容型 MEMS 器件的设计与性能分析具参考作用。

**关键词:** 边缘效应模型; MEMS 电容型器件; 保角映射变换; 有限元仿真

**中图分类号:** TN401; TH701; TM53 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4010

## Research on fringing effect of MEMS capacitive devices

Hu Junming<sup>1</sup> Dai Qiang<sup>1</sup> Liu Jun<sup>2</sup> Xu Jiang<sup>3</sup> Song Danlu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education, Mianyang 621010, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, Chengdu 610054, China;

3. China Electronics Chip Technology Research Institute, Chongqing 401332, China)

**Abstract:** In the working process of MEMS capacitive devices, the capacitor plates are usually not in the very opposite position but in an inclined position, which will induce the fringing field effect and cannot be ignored. Based on conformal mapping transformation and complex function correlation theory, the fringing effect model is proposed by inheriting the traditional models and modifying them. Compared with the traditional Heerens' and Huang's model, the proposed model is better because the error between the proposed model and the finite element simulation, which is from 10% to 20% when the capacitor plate is moved from perfectly aligned to completely misaligned, is less than that between the traditional Heerens's and Huang's model. Furthermore, according to the proposed model, when the plate coincidence degree is lower than 40%, the fringing effect increases rapidly. As a result, the proposed model should be applied to correct the capacitance. All above are verified by a digital experiment concerned with MEMS differential capacitor array. The research is helpful for the design and performance analysis of capacitive MEMS devices.

**Keywords:** MEMS capacitive device; fringing effect model; conformal mapping transformation; finite element simulation

## 0 引言

MEMS 传感器与执行器中有很多电容型器件<sup>[1-4]</sup>,其工作原理严重依赖于电容值的大小<sup>[5-8]</sup>。然而在大多数

情况下,器件在工作过程中,电容极板是非正对的<sup>[9-11]</sup>,因此存在边缘效应。未计及边缘效应的不准确的传统电容计算模型严重制约了器件设计与性能估算。在电容边缘效应计算方面,Pamela<sup>[12]</sup>、Leus 等<sup>[13]</sup>、Huang 等<sup>[14]</sup>基于保角映射变换推导出了不同的边缘效应模型,

收稿日期: 2022-10-13 Received Date: 2022-10-13

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1807700)、中国电子科技集团 2021 产业资金(C211)项目资助

Heerens<sup>[15]</sup>通过保角变换和复变函数相关理论,并使用在柱坐标下求解拉普拉斯方程时所用到的第一类和第二类修正贝塞尔函数推出了以极板端点坐标进行运算的平板电容计算模型。

但以上模型在研究中发现均不能很好地描述边缘效应。因此,本文将在以上基础上,对 MEMS 传感器中常见的电容极板进行分析,提出新的计算模型,并进行有限元分析验证,进一步得出边缘效应对电容型 MEMS 器件的影响程度。

### 1 MEMS 器件电容边缘效应模型

MEMS 器件工作状态下,通常极板为非正对状态,存在边缘效应。针对电容极板的边缘效应,多位学者<sup>[12-14]</sup>使用 Schwarz-Christoffel 保角映射变换推导出了计及边缘效应的单位长度平行板电容器的电容计算模型,其边缘效应部分电容表示如图 1 所示。

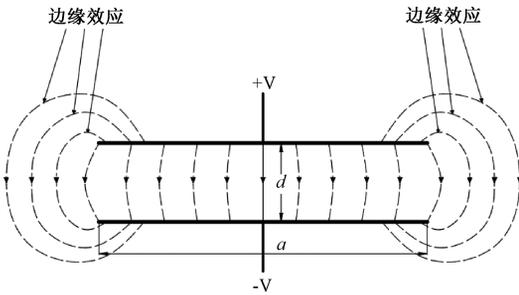


图 1 平行板电容器边缘效应电场分布示意图  
Fig. 1 Fringing effect electric field distribution of parallel plate capacitor

$$C_{\text{边缘效应}} = \frac{\varepsilon}{\pi} \left[ 1 + \ln \left( 1 + \frac{2\pi a}{d} \right) + \ln \left( 1 + \frac{2\pi a}{d} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  是空气介电常数,  $a$  和  $d$  分别为平板电容器的宽度和极板间距。根据该模型, Huang 等<sup>[14]</sup>提出单位长度的平行板电容器电容计算模型:

$$C_{\text{Huang}} = \varepsilon \frac{a}{d} + \frac{\varepsilon}{\pi} \left[ 1 + \ln \left( 1 + \frac{2\pi a}{d} \right) + \ln \left( 1 + \frac{2\pi a}{d} \right) \right] \quad (2)$$

但该模型只描述了正对极板之间的电容及其边缘效应。为描述非正对极板之间的边缘效应, Heerens 通过保角变换和复变函数相关理论,并使用在柱坐标下求解拉普拉斯方程时所用到的第一类和第二类修正贝塞尔函数首先推导出了由在圆柱体上下表面的环形电极和扇形电极所形成电容器的电容解析式  $C_{\text{环-扇}}$ , 如图 2 所示, 其中,  $R_4 \geq R_2 > R_1 \geq R_3$ 。

$$C_{\text{环-扇}} = \frac{2\varepsilon\varphi d}{\pi^2} \left( \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ \rho_3 I_1(n\rho_3) \left[ \rho_1 K_1(n\rho_1) - \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \rho_2 K_1(n\rho_2) \right] - \rho_4 K_1(n\rho_4) \left[ \rho_1 I_1(n\rho_1) - \rho_2 I_1(n\rho_2) \right] \right\} + \frac{1}{4} (\rho_2^2 - \rho_1^2) \right) \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon$  是空气介电常数,  $\varphi$  为扇形电极的圆心角,  $d$  为圆柱上下表面的距离,  $\rho_j = \pi R_j/d$ ,  $I_v(z)$  是第一类修正贝塞尔函数, 其具体的表达式为:  $I_v(z) = (z/2)^v \sum_{k=0}^{\infty} \{ 1/[k! \Gamma(v+k+1)] \}$ ,  $K_v(z)$  是第二类修正贝塞尔函数, 其具体的表达式为:  $K_v(z) = [I_v(z) \cos(v\pi) - I_{-v}(z)]/\sin(v\pi)$ 。

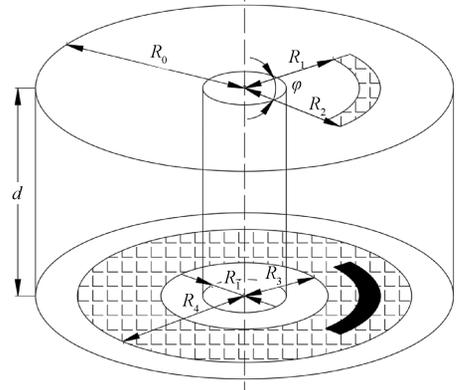


图 2 环形电极  
Fig. 2 The ring electrodes

为进一步获得图 3 所示的有限长矩形电极的电容计算公式, 此时不再是圆柱坐标系, 对于较大的半径  $R$ , Heerens 将式(3)中的贝塞尔函数修改为指数函数, 圆柱坐标  $R_i$  转换为笛卡尔坐标  $x_i$ , 最终推导出以极板端点坐标进行运算的矩形平行极板电容计算模型:

$$C_{\text{Heerens}} = \frac{\varepsilon L}{\pi} \ln \left\{ \frac{\cosh \left[ \frac{\pi}{2d} (x_2 - x_3) \right] \cosh \left[ \frac{\pi}{2d} (x_1 - x_4) \right]}{\cosh \left[ \frac{\pi}{2d} (x_1 - x_3) \right] \cosh \left[ \frac{\pi}{2d} (x_2 - x_4) \right]} \right\} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon$  是空气介电常数,  $x_1, x_2, x_3, x_4$  为电极端点坐标。

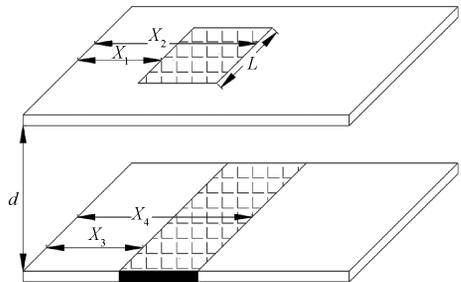


图 3 矩形电极  
Fig. 3 Rectangular electrodes

综合以上分析,在参考以上模型的基础上,对非正对

平行极板电容计算模型提出修正。首先结合 Heerens 模型中的正对极板电容和 Huang 模型中二维平行极板边缘效应电容的计算,提出了修正的正对极板电容模型:

$$C_1 = \frac{\varepsilon L}{\pi} \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\cosh\left(\frac{\pi a}{d}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi x}{d}\right)} \right] + 1 + \ln \left[ 1 + \frac{2\pi(a-x)}{d} + \ln \left( 1 + \frac{2\pi(a-x)}{d} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

其次,根据 Huang 模型中的二维平行极板边缘效应电容计算公式,补充修正了三维平行极板边缘效应电容的计算模型:

$$C_n = \frac{\varepsilon(a-x)}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left( 1 + \frac{2\pi L}{d} \right) + \ln \left( 1 + \frac{2\pi L}{d} \right) \right\} \quad (6)$$

最后基于保角映射变换补充了非正对平行极板的电容模型:

$$C_m = \frac{\varepsilon L}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{4\pi x}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{x+a}{2}\right)^2}} \right) + \frac{\varepsilon x}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{4\pi L}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{x+a}{2}\right)^2}} \right) \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon$  是空气介电常数,  $x$  是电容两极板间相对错开距离,  $a$  和  $L$  分别是极板宽度和长度。因此,提出如图 4 所示的非正对平行板电容器的电容模型为:

$$C = C_1 + C_n + C_m \quad (8)$$

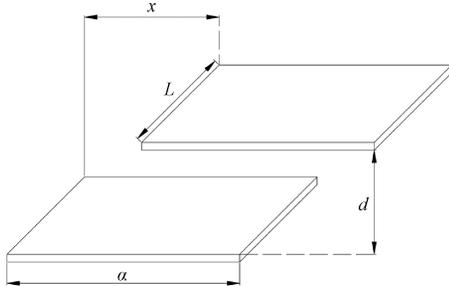


图 4 非正对平行板电容器模型

Fig. 4 Unaligned parallel plate capacitor model

## 2 仿真分析与讨论

为讨论本文模型以及传统模型对边缘效应的描述情况,采用有限元仿真与各模型进行对比。对比时,移动电容器的其中一个极板 B,使其边  $L$  沿  $x$  轴从坐标原点  $O$  移动  $\Delta x$ 。并且,为观察各模型对不同几何尺寸下电容极板的适用情况,变动极板 A, B 的尺寸,保持极板  $y$  方向长度  $L = 100 \mu\text{m}$  不变,极板宽度  $a$  分别取 10、50、100、

200  $\mu\text{m}$ ,如图 5 所示。有限元仿真采用电场仿真软件 Maxwell 16.0,极板材质设置为金,极板间距  $d = 15 \mu\text{m}$ ,两极板分别加上 +5 V 和 -5 V 的电压,仿真计算区域的介质设置为空气。为充分考虑电容器的边缘效应,仿真计算区域应尽可能多得包含极板以外的电场线,通过对仿真计算区域进行参数化分析,设置仿真计算区域为模型大小的 600%。

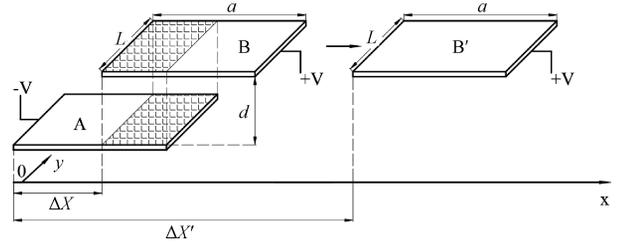


图 5 电容极板移动过程

Fig. 5 The process of moving the capacitor plate

图 6 展示了不同尺寸下的极板 B 移动过程中,平板电容器电容的各模型与有限元仿真值变化的过程。

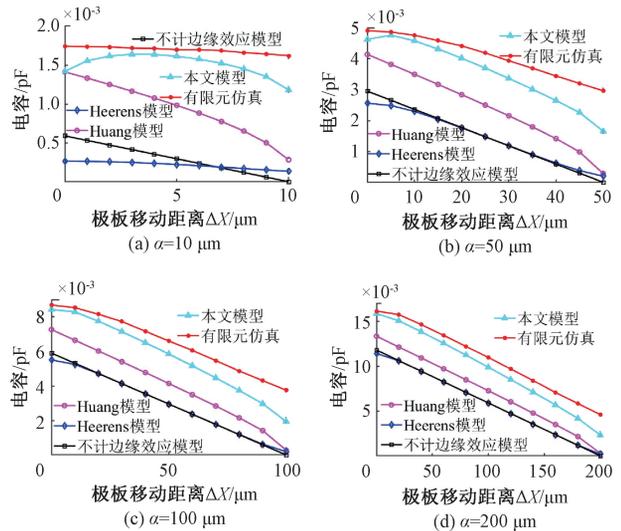


图 6 极板移动过程中电容值的变化 ( $\Delta x < a$ )

Fig. 6 Change of capacitance value during plate movement ( $\Delta x < a$ )

由图 6(a) ~ (d) 可知,在极板 B 的移动过程中,本文模型相比于 Heerens 模型和 Huang 模型,更接近有限元仿真值。当  $a = 10 \mu\text{m}$  时,随着极板 B 相对 A 的移动,Heerens 模型在 0.000 25 pF 到 0.000 2 pF 的区间变动,而 Huang 模型从约 0.001 4 pF 下降到约 0.000 28 pF,本文模型从约 0.001 4 pF 成弧形靠近有限元仿真值,而包含边缘效应的有限元仿真值在约 0.001 72 pF 到约 0.001 64 pF 的区间;当  $a = 50 \mu\text{m}$  时,随着极板 B 相对 A 的移动,Heerens 模型在 0.002 6 pF 到 0.000 2 pF 的区间

变动, Huang 模型从约 0.004 1 pF 下降到 0.000 28 pF, 本文模型从约 0.004 6 pF 成弧形靠近有限元仿真值, 而包含边缘效应的有限元仿真值在约 0.005 pF 到约 0.003 pF 的区间; 当  $a = 100 \mu\text{m}$  时, 随着极板 B 相对 A 的移动, Heerens 模型在 0.005 5 pF 到 0.000 2 pF 的区间变动, Huang 模型从约 0.007 2 pF 下降到 0.000 28 pF, 本文模型从约 0.008 4 pF 成弧形靠近有限元仿真值, 而包含边缘效应的有限元仿真值在约 0.008 6 pF 到约 0.003 7 pF 的区间; 当  $a = 200 \mu\text{m}$  时, 随着极板 B 相对 A 的移动, Heerens 模型在 0.011 pF 到 0.000 2 pF 的区间变动, Huang 模型从约 0.013 pF 下降到 0.000 28 pF, 本文模型从约 0.015 88 pF 成弧形靠近有限元仿真值, 而包含边缘效应的有限元仿真值在约 0.016 pF 到约 0.004 6 pF 的区间。

为量化各模型对比有限元仿真的相对误差, 令:

$$\delta = \frac{\text{有限元仿真值} - \text{模型值}}{\text{有限元仿真值}} \times 100\% \quad (9)$$

$\delta$  值在极板移动过程中的变化如图 7 所示。由图 7 (a) ~ (d) 可知, Heerens 模型与不计边缘效应模型很接近, 说明 Heerens 模型在此种情况下基本不能表达边缘效应。Huang 模型在极板移动初期, 与有限元仿真的误差在 20% 左右, 随着极板的移动, 误差逐渐增大。本文模型在极板从完全重合移动到总宽度的 60% 时, 误差均小于 20%, 仅在重合度小于 40% 时, 误差增大, 但仍远远小于 Huang 模型。因此, 本文模型优于 Heerens 模型和 Huang 模型, 更接近包含边缘效应的有限元仿真值。

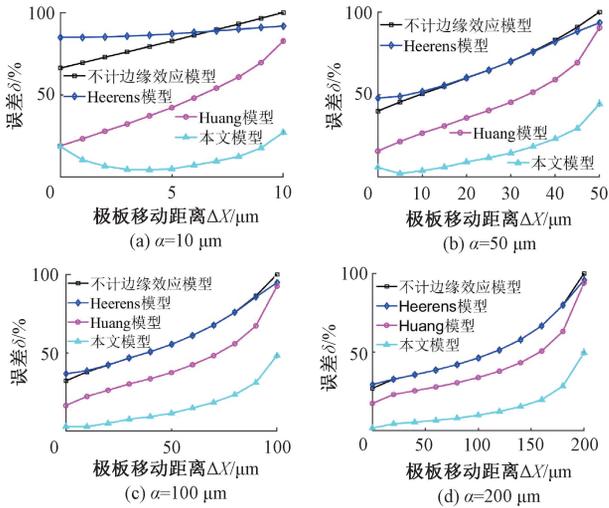


图 7 各模型与有限元仿真的相对误差 ( $\Delta x < a$ )

Fig. 7 Relative error between each model and finite element simulation ( $\Delta x < a$ )

当极板 B 移动至与 A 不重合后, 即图 5 中极板 B 的 L 边从坐标原点 O 移动至  $\Delta x'$  时, Huang 模型已不能适用

于此种情况, 仅本文模型与 Heerens 模型能继续描述, 由于 A、B 极板再无重叠部分且非正对部分极板的尺寸不再随  $\Delta x'$  改变, 故此种情况下, 本文模型变形为:

$$C = \frac{\varepsilon l}{\pi} \ln \left[ 1 + \frac{\cosh\left(\frac{\pi a}{d}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi x}{d}\right)} \right] + \frac{\varepsilon l}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{4\pi a}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{x+a}{2}\right)^2}} \right) + \frac{\varepsilon a}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{4\pi l}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{x+a}{2}\right)^2}} \right) \quad (10)$$

图 8 和 9 分别为本文模型、Heerens 模型与有限元仿真的对比。

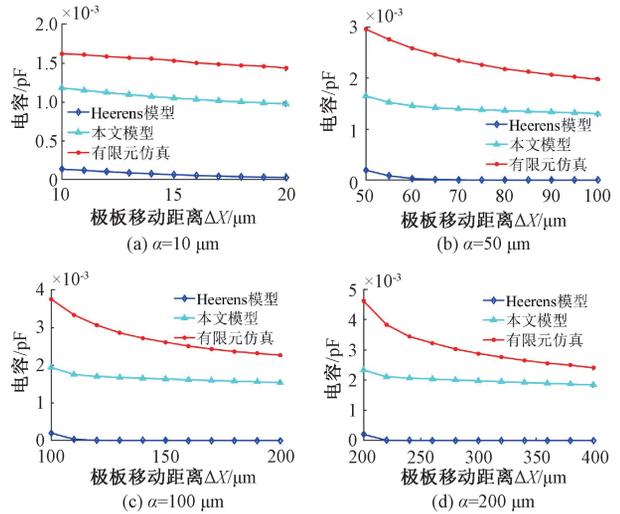


图 8 极板移动过程中电容值的变化 ( $\Delta x' > a$ )

Fig. 8 Change of capacitance value during plate movement ( $\Delta x' > a$ )

由图 8 和 9 可知, 当极板 B 与极板 A 无重叠部分时, 由于电容的边缘效应, 两极板之间仍有不可忽略的电容存在。在本文尺寸下, 边缘效应的电容值仍高达 0.002 ~ 0.005 pF。而 Heerens 模型虽然理论上能继续描述此种情况, 但在各个尺寸情况下, 其值都已非常接近于 0, 与仿真值的相对误差均高达 95% 以上。而本文模型仍以相似的变化趋势接近于仿真值: 当  $a = 10 \mu\text{m}$  时, 本文模型与仿真值的相对误差保持在 30% 左右; 当  $a = 50 \mu\text{m}$  时, 本文模型与仿真值的相对误差在 30% ~ 40% 左右; 当  $a = 100 \mu\text{m}$  时, 本文模型与仿真值的相对误差在 30% ~ 48% 左右; 当  $a = 200 \mu\text{m}$  时, 本文模型与仿真值的相对误差在 20% ~ 50% 左右。

为评估边缘效应对 MEMS 电容的影响, 令:

$$\gamma = \frac{\text{边缘效应}}{\text{非边缘效应}} \quad (11)$$

图 10 绘出了极板移动过程中边缘效应与传统不计及边缘效应的电容计算公式  $\varepsilon A/d$  的比值  $\gamma$ 。

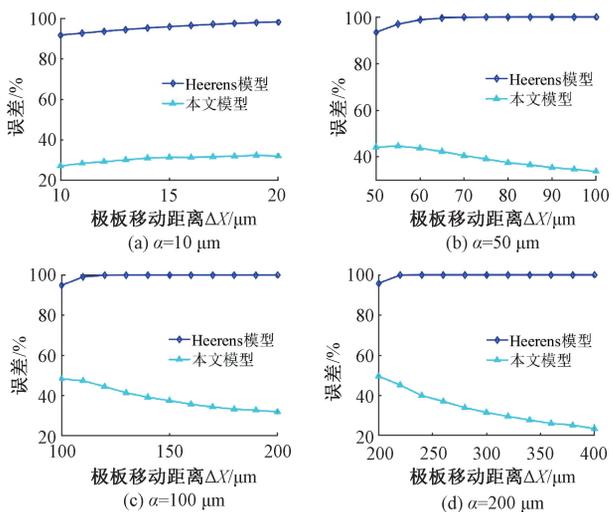


图 9 各模型与有限元仿真的相对误差 ( $\Delta x' > a$ )

Fig. 9 Relative error between each model and finite element simulation ( $\Delta x' > a$ )

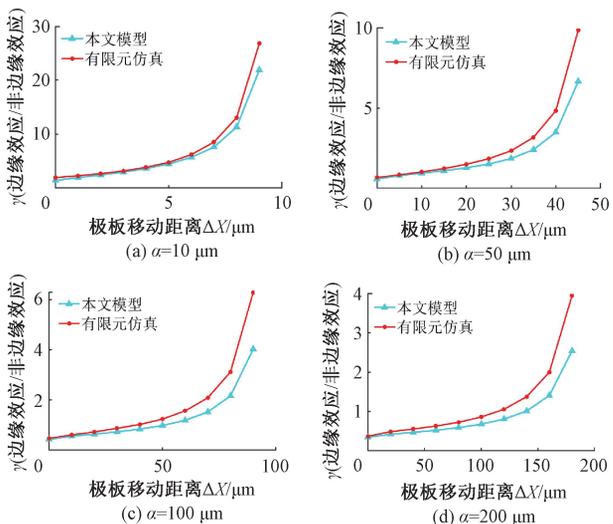


图 10 极板移动过程中电容边缘效应与不计边缘效应之比

Fig. 10 Ratio of capacitor fringing effects to non-fringing effects during plate movement

由图 10(a)~(d) 可知,极板移动至其总长度的 60% 时,边缘效应呈快速增长趋势。因此,根据本文模型与有限元仿真,可知如果在此时不计入边缘效应,仅根据  $\epsilon A/d$  计算,其误差将严重影响器件的设计与研究。此时可依据本文模型进行计算。

### 3 阵列电容数字式实验

电容位移检测是 MEMS 电容型器件的一种常见应用<sup>[16-20]</sup>。为验证本文结论,特选择以文献[21]中电容位移检测阵列为例,利用其已测量的灵敏度数据,构建数字

式实验,研究各模型在差分电容阵列中的适用情况。差分电容阵列如图 11 所示。因阵列电容具有周期性和对称性等特点,分析时只考虑其中一个可动极板与其相邻 5 对固定极板之间的电容变化情况,各极板尺寸与其相对位置如图 11 所示 ( $d_0 = 90 \mu\text{m}$ )。

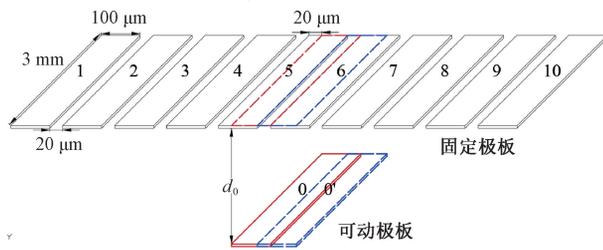


图 11 差分电容阵列示意图

Fig. 11 Schematic of differential capacitor array

仿真仍然采用电场仿真软件 Maxwell 16.0。其中奇数编号的定极板相互并联且加上 +5 V 的电压;偶数编号的定极板相互并联且加上 -5 V 的电压;动极板 0 加上 0 V 的电压。在可动极板 0 从图 12 中三角形位置移动到菱形位置 0' 的过程中,将位移前后可动极板与固定极板之间的电容作差,即可得到差分电容阵列的电容变化量  $\Delta C$ 。用  $C_{0-i}$  表示动极板 0 位移前与定极板  $i$  之间的电容,  $C'_{0-i}$  表示动极板 0 位移后与定极板  $i$  之间的电容,令  $\Delta C_{0-i} = C'_{0-i} - C_{0-i}$ 。则有:

$$\Delta C = \Delta C_{0-\text{偶}} - \Delta C_{0-\text{奇}} \quad (12)$$

在可动极板 0 移动过程中,该阵列极板差分电容变化的灵敏度为可动极板单位位移所产生的电容变化量,用  $\Delta C/\Delta x$  表示。则各模型的灵敏度理论计算曲线、有限元仿真曲线及实测标定曲线的对比如图 12 所示。

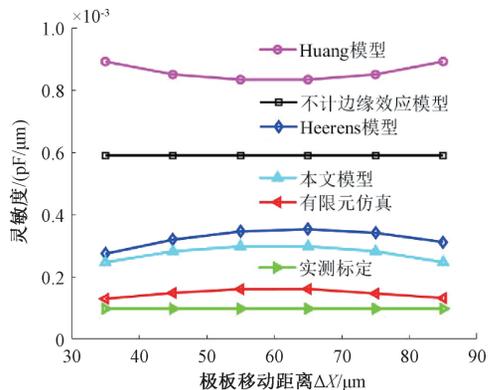


图 12 各模型差分阵列灵敏度对比

Fig. 12 Comparison of differential array sensitivities of different models

由图 12 可知,文献[21]中实际测量标定的灵敏度为  $0.000\ 097\ 8 \text{ pF}/\mu\text{m}$ ;不计边缘效应模型只计算了可动极板 0 与固定极板 5、固定极板 6 形成的差分电容,其灵敏

度曲线为定值  $0.00059 \text{ pF}/\mu\text{m}$ ; Heerens 模型灵敏度曲线略低于不计边缘效应模型; Huang 模型曲线由于计算了正对极板部分的边缘效应, 其灵敏度曲线在约  $0.00083 \text{ pF}/\mu\text{m}$  左右浮动; 而本文模型考虑了与可动极板 0 没有正对面积的其他固定极板, 所以其灵敏度曲线最接近有限元仿真曲线和实测标定曲线, 约为  $0.00029 \text{ pF}/\mu\text{m}$ 。由此可知, 与可动极板没有正对面积的固定极板带来了电容测量灵敏度的衰减, 其电容不应被忽略。各模型曲线两端的拐角也印证了当极板重合度小于 40% 时, 边缘效应增长显著的结论。

差分电容阵列实验表明, 在 MEMS 电容型器件的电容计算中, 本文模型优于传统 Heerens 模型与 Huang 模型, 更接近有限元仿真; 当极板重合度小于 40% 时, 边缘效应增长显著。

## 4 结 论

依据保角映射和复变函数相关理论, 在传统电容边缘效应模型基础上, 发展出描述 MEMS 器件电容边缘效应的模型。通过与有限元仿真, 传统 Heerens 模型和 Huang 模型的对比, 表明当 MEMS 器件电容极板从正对到错开的过程中, 本文模型与有限元仿真的误差在 10%~20% 区间, 优于传统 Heerens 模型与 Huang 模型。进一步, 根据本文模型, 当极板重合度低于 40% 时, 边缘效应呈快速增长, 此时其电容值可用本文模型进行计算。

以上结论均获得了阵列电容数字式实验支持, 研究对 MEMS 电容型器件的设计与性能分析具参考作用。

## 参考文献

- [ 1 ] 代志双, 徐亮, 谢亮, 等. 应用于 MEMS 加速度计的电容式检测电路设计 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 77-80.  
DAI ZH SH, XU L, XIE J, et al. Design of capacitive detection circuit applied to MEMS accelerometer [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 77-80.
- [ 2 ] 周岩, 李彦哲, 李金平, 等. 一种低噪声 MEMS 电容式加速度传感器的设计 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(12): 105-107.  
ZHOU Y, LI Y ZH, LI J P, et al. Design of a low noise MEMS capacitive acceleration sensor [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(12): 105-107.
- [ 3 ] 殷苏民, 李正阳, 万翔, 等. 电容式 MEMS 加速度传感器在气囊系统中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2015, 34(7): 151-154.  
YIN S M, LI ZH Y, WAN X, et al. Application of capacitive

MEMS acceleration sensor in airbag system [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(7): 151-154.

- [ 4 ] 王呈祥, 韩晓东, 李得天, 等. MEMS 型电容薄膜真空计的关键技术研究进展 [J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(1): 24-33.  
WANG CH X, HAN X D, LI D T, et al. Research progress on key technologies of MEMS capacitive film vacuum gauge [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(1): 24-33.
- [ 5 ] 李开富, 蒋婷, 郭小伟, 等. 三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 193-201.  
LI K F, JIANG T, GUO X W, et al. Design of three-mass MEMS three-axis capacitive accelerometer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 193-201.
- [ 6 ] 刘再兴, 王海刚. 同心圆环区域电容层析成像传感器数目优化 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 94-104.  
LIU Z X, WANG H G. Optimization of capacitance tomography sensor number in concentric ring region [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 94-104.
- [ 7 ] 张洪朋, 郑文博, 李伟, 等. 交叉电容式传感器研究进展综述 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(7): 117-124.  
ZHANG H P, ZHENG W B, LI W, et al. Review on research progress of cross-capacitor sensors [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(7): 117-124.
- [ 8 ] 李昕娣, 黄海, 吕玉嫦. 湿敏电容传感器迟滞特性及偏移校正方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 23-26.  
LI X D, HUANG H, LYU Y CH. Study on hysteresis characteristics and offset correction method of wet-sensitive capacitance sensor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(6): 23-26.
- [ 9 ] WU W J, LIU J Q, FAN J, et al. A nano-g micromachined seismic sensor for levelling-free measurements [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018: 280.
- [ 10 ] 王秋, 刘骅锋, 许强伟, 等.  $0.3 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$  超高灵敏度 MEMS 加速度计研究进展 [J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(1): 100-105.  
WANG Q, LIU H F, XU Q W, et al. Research progress of  $0.3 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$  ultra-high sensitivity MEMS accelerometer [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(1): 100-105.
- [ 11 ] 伍文杰. 高精度大动态范围硅基挠性加速度计研制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
WU W J. Development of silicon based flexible

- accelerometer with high precision and large dynamic range [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [ 12 ] PALMER H B. The capacitance of a parallel-plate capacitor by the schwartz-christoffel transformation [ J ]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1937, 56(3) : 363-366.
- [ 13 ] LEUS V, ELATA D. Fringing field effect in electrostatic actuators [ J ]. Technion-Israel Institute of Technology, 2004, 2: 1-15.
- [ 14 ] HUANG Z X, WANG X J. Theory and technology of microwave transmission [ J ]. Science Press, Beijing, 1996: 102-106.
- [ 15 ] HEERENS W C. Application of capacitance techniques in sensor design [ J ]. Journal of physics E scientific Instruments, 1986, 19(11) : 897.
- [ 16 ] 朱涛. 基于变面积电容传感的大量程 MEMS 加速度计加工工艺研究 [ D ]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
ZHU T. Research on machining technology of large range MEMS accelerometer based on variable area capacitive sensing [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [ 17 ] 楼森. 电容式位移传感器测量系统的研究 [ D ]. 上海: 东华大学, 2018.  
LOU S. Research on measuring system of capacitive displacement sensor [ D ]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [ 18 ] 海静, 卢文科. 基于最小二乘法的差动变面积式电容传感器非线性拟合 [ J ]. 仪表技术, 2014(2) : 11-13.  
HAI J, LU W K. Nonlinear fitting of differential area variable capacitive sensor based on least square method [ J ]. Instrument Technology, 2014(2) : 11-13.
- [ 19 ] 海静. 基于位移测量的差动电容传感器研究 [ D ]. 上海: 东华大学, 2014.

HAI J. Research on differential capacitance sensor based on displacement measurement [ D ]. Shanghai: Donghua University, 2014.

- [ 20 ] 郑盼盼. 电容式微机械加速度计“三明治”结构封装技术研究 [ D ]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
ZHENG P P. Research on “Sandwich” structure packaging technology of capacitive micromechanical accelerometer [ D ]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [ 21 ] WU W J, ZHENG P P, LIU J Q, et al. High-sensitivity encoder-like micro area-changed capacitive transducer for a nano-g micro accelerometer [ J ]. Sensors, 2017, 17(9) : 2158.

### 作者简介



**胡钧铭**, 2020 年于西南科技大学获得学士学位, 现为西南科技大学硕士研究生。主要研究方向为微机电系统 (MEMS)。

E-mail: 741716186@qq.com

**Hu Junming** received his B. Sc. degree from Southwest University of Science and Technology in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Southwest University of Science and Technology. His main research interest includes MEMS.



**戴强** (通信作者), 2010 年于电子科技大学获得博士学位, 现为西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室副研究员。主要研究方向为微机电系统、机电一体化。

E-mail: uestc\_dai@163.com

**Dai Qiang** ( Corresponding author ) received his Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology in 2010. He is currently a researcher in Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education. His main research interests include micro-electromechanical systems and mechatronics.