

容栅式微小位移传感器边缘效应研究

王睿, 李新娥, 杜红棉, 杨伟艺, 闵希凯

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要:针对微小位移测量难度大、测试环境空间狭小传感器安装受限,设计了基于容栅传感原理的微小位移传感器。针对容栅传感器存在边缘效应问题,利用 ANSYS Electronics Desktop 仿真软件,对栅条宽度、栅条间距、栅条宽度与间距比以及传感器结构等影响边缘效应的因素进行仿真分析。依据仿真结果对容栅传感器进行优化设计并进行测试。测试结果分析表明,选择最简梳状结构、减小栅极间距和栅条间距、增大栅条宽度,可以最大程度减小容栅传感器的边缘效应,增加等位环可消除边缘效应。

关键词:容栅;微小位移测量;边缘效应;ANSYS Electronics Desktop

本文引用格式:王睿,李新娥,杜红棉,等.容栅式微小位移传感器边缘效应研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(9):173-177.

Citation format:WANG Rui, LI Xin'e, DU Hongmian, et al. Research on Edge Effect of Capacitance Micro Displacement Sensor[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(9): 173-177.

中图分类号: TP206+.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)09-0173-05

Research on Edge Effect of Capacitance Micro Displacement Sensor

WANG Rui, LI Xin'e, DU Hongmian, YANG Weiyi, MIN Xikai

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement,
Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: This paper designed a minor displacement sensor based on capacitance-grating technology in order to solve problems of measurement accuracy, measurement space and mounting. ANSYS Electronics Desktop software was used in designing this system to analyze edge effects. This paper also did optimization and testing to the sensor according to the simulation results of grating width, distance between gratings and ratio of grating width to distance between gratings. The testing results shows that choose comb structure, shorten distance between gratings and enlargement grating width can reduce the edge effects to the maximum extend. Furthermore, adding some equipotential rings can also eliminate edge effects.

Key words: capacitance grid; micro displacement measurement; edge effect; ANSYS Electronics Desktop

目前,在国防和民用领域存在微小位移测量难度大、测试环境空间狭小传感器安装受限等问题^[1]。容栅传感器作为一种新型传感器,具有体积小、安装方便、灵敏度高以及具有多电极平均效应,减小了寄生电容的影响、提高了抗干扰能力,在轴转矩、转速、功率测量以及光学精密工程等方面应用广泛^[2-4]。

容栅传感器在微小位移测量中主要是将物体的微小位移转化为电容的变化量,在实际测试过程中电容变化量大多在 pF 级甚至更小,对传感器精度要求很高。然而,容栅传感器由于栅极边缘处电场分布不均匀产生边缘效应,导致容栅传感器灵敏度下降,非线性误差增大,严重影响测量精度^[5]。通过研究发现,梳齿电容由边缘效应产生的相对误差大于等

收稿日期:2019-03-04;修回日期:2019-03-25

基金项目:山西省“1331工程”重点创新团队建设计划资助项目(1331KIRT)

作者简介:王睿(1994—),男,硕士研究生,主要从事动态测试与智能仪器研究。

通讯作者:李新娥(1971—),女,博士,教授,主要从事动态测与校准试和智能测控研究,E-mail:Zn1lx@163.com。

于 16.47%^[6], 电容式电子测压器由边缘效应产生的相对误差大于 10%^[7]。

本文通过一系列的仿真, 深入研究了容栅传感器结构、栅条间距以及栅条宽度等因素改变对边缘效应的影响, 进一步优化容栅传感器的结构设计, 使容栅传感器具有更高的精度, 在微小位移测量中能够获得更加精确的测试结果。

1 容栅式微小位移传感器

1.1 传感器设计

1.1.1 容栅传感器的工作原理

容栅传感器等效于若干个平板电容并联, 可以同时测量 X 和 Y 两个方向的微小位移, 如图 1 所示。由物理学可知, 当忽略边缘效应的影响时, 电容值为

$$C = n \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 s}{4\pi k d} \quad (1)$$

其中, C 为电容值; n 为容栅传感器的栅条数; s 为容栅两栅条正对面积; d 为两极板之间的距离; ε_0 为真空介电常数(真空电容率), ε_0 近似为 8.854×10^{-12} F/m; ε_r 为极板间介质的相对介电常数, 空气的相对介电常数近似为 1。

由式(1)可知, 当容栅传感器的动栅随被测物体移动使两栅极间距减小 x 时, 容栅的电容量发生相应的变化, 变化的电容量 ΔC 为

$$\Delta C = C - C_0 = C_0 \frac{x/d}{1 - x/d} \quad (2)$$

当 $x/d \ll 1$ 时,

$$\frac{\Delta C}{C_0} = x/d \left[1 + \frac{x}{d} + \left(\frac{x}{d}\right)^2 + \left(\frac{x}{d}\right)^3 + \dots \right] \quad (3)$$

略去高次项, 得容栅传感器极距变化情况下的灵敏度为

$$k = \frac{\Delta C}{x} = \frac{C_0}{d} = \frac{n\varepsilon s}{d^2} \quad (4)$$

由式(4)可知, 只有用于小位移测量时, 电容的变化量才随着极距线性变化, 其灵敏度为常数。可通过减小初始极距 d 、增大容栅传感器初始有效正对面积 s 和增大栅条数 n 来提高灵敏度, 但是初始极距 d 过小时电容容易击穿或短路, 栅条数过多时又趋近于平板电容丧失了容栅传感器的优点, 所以极距不能过小, 栅条数不能过多。

由式(1)可知, 当容栅传感器动栅随被测物体移动与定栅产生相对位移时, 两个栅极之间的相对有效面积 s 发生变化, 当动栅移动 Δl 后, 电容值的变化量为

$$\Delta C = C - C_0 = -n \frac{\varepsilon b_0}{d} \Delta l = -n C_0 \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5)$$

容栅传感器面积变化情况下的灵敏度为

$$k = \frac{\Delta C}{\Delta l} = -n \frac{\varepsilon b_0}{d} \quad (6)$$

由式(6)可知, 变面积型容栅传感器的灵敏度为常数, 输出与输入呈线性关系。可通过增加栅极的宽度 b 和减小栅极间距 d (不能过小) 提高容栅传感器的灵敏度。

1.1.2 容栅传感器的结构设计

容栅传感器由动栅和静栅两个栅极组成, 结构上均为 N 个电极并联的形式。电极之间为绝缘介质, 宽度小于电极宽度。由式(1)可得, 容栅传感器的电容值在理想情况下只与栅极间距、栅极有效正对面积、栅极间相对介电常数有关, 和栅极厚度并不存在数理关系。但是, 电容值随着栅极厚度增加而增加, 为了尽可能减小栅极厚度对电容值的影响, 需要将栅极厚度设计的尽可能小, 结构示意图如图 1。上侧为动栅, 下侧为静栅, 动栅与静栅产生微小相对位移时, 会产生微小的电容变化, 精度为 20 pF/mm, 最小分辨率为 0.05 mm。

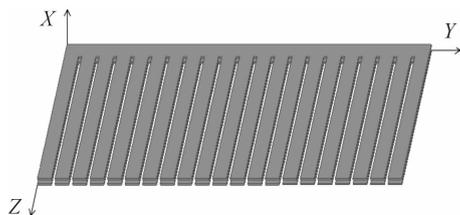


图 1 容栅传感器结构示意图

1.2 信号采集调理电路

基于容栅传感原理的微小位移测试系统及信号采集调理电路原理框图如图 2。

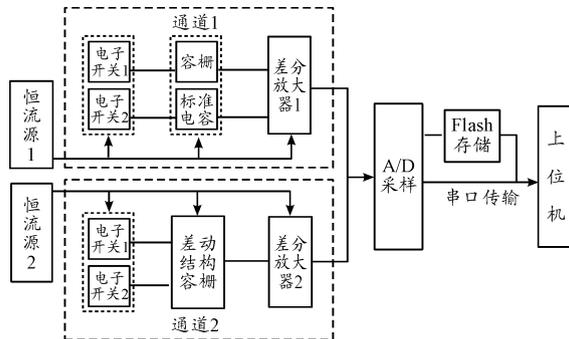


图 2 信号采集调理电路原理框图

本设计实现双通道信号采集调理, 电子开关(高电平有效)通断由 MCU 输出一定占空比的 PWM 波控制^[8]。通道 1 测量栅极间距变化引起的电容值的改变, 通道 2 测量容栅之间的相对位移引起的面积改变所产生的电容变化量, 可以判别微小位移发生的方向。

2 边缘效应研究

2.1 容栅传感器边缘效应理论分析

对于理想的无限大平板电容传感器而言, 静电场均匀分布于两极板所围成的空间, 在实际应用电容传感器只有中心部分区域静电场是均匀分布的, 在边缘部分电场并非均匀分布, 这就是边缘效应。边缘效应相当于传感器并联一个附加电容, 导致传感器的灵敏度下降和非线性增加。

由于存在边缘效应,容栅传感器的实际电容值大于利用经典平板电容公式计算的值^[9],其值为

$$C = C_{\text{理论}} + C_{\text{边缘效应}} \quad (6)$$

在微小位移测量中边缘效应是不可忽略的关键因素。考虑边缘效应时,容栅传感器电容值的计算方法有保角变换、施瓦兹多角变换、求解电场分布的拉普拉斯方程等,其中保角变换计算结果更为精确^[6]。对于梳齿状容栅来说,栅条的长度和宽度不可能远大于两栅极间距,所以每个栅条必须同时考虑两个方向上的边缘效应,利用保角变换求的容栅电容值为

$$C = \frac{\varepsilon ab}{d} + \frac{\varepsilon a}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[1 + \frac{2\pi b}{d} + \ln \left(1 + \frac{2\pi b}{d} \right) \right] \right\} + \frac{\varepsilon b}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[1 + \frac{2\pi a}{d} + \ln \left(1 + \frac{2\pi a}{d} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

其中,第二项和第三项为边缘效应产生的电容值, ε 为介电常数, a 为栅条宽度, b 为栅条长度, d 为两栅极间距。

2.2 容栅边缘效应验证

利用 ANSYS Electronics Desktop 对设计容栅结构模型进行静电场仿真^[10-11]。两栅极材料为铜,介质为空气,给动栅施加 1.5 V 的电压,静栅电压为 0 V。仿真结果全局如图 3 所示,局部剖面如图 4 所示。其中, a 与 b 分别是垂直于栅条方向两端的电场云局部剖面图, c 是平行于栅条方向的电场云局部剖面图。

由上述仿真结果可见,在容栅传感器边缘部分存在明显的不规则电场分布且数值相对较大,即容栅传感器存在边缘效应,影响测试精度。

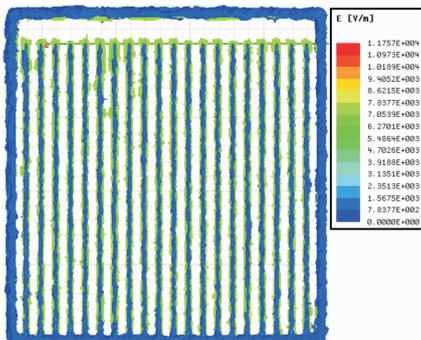


图3 容栅传感器边缘效应仿真全局示意图

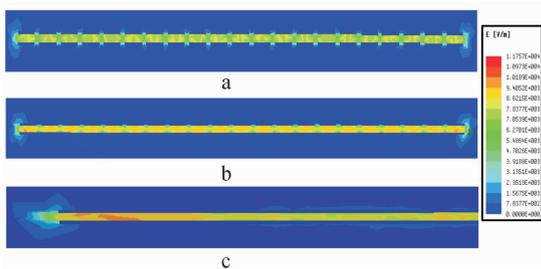


图4 容栅传感器边缘效应仿真局部示意图

2.3 边缘效应影响因素分析

考虑边缘效应的影响,容栅传感器实际电容值与栅极正

对面积、介电常数、栅极间距无法呈现理论的数学关系。通过武嘉俊、霍建华等人的研究发现,可以通过减小栅极厚度以及减小栅极间距等措施来减小边缘效应^[12-13],除此之外还存在其他影响容栅传感器边缘效应的因素。

2.3.1 栅条宽度对边缘效应的影响

在 ANSYS Electronics Desktop 中创建仿真结构模型,保持栅条厚度、间距、长度以及栅极间距不变,设置栅条宽度的初始值为 0.8 mm,步长为 0.04 mm,终止值为 2 mm,仿真结果如表 1 所示。

表1 栅条宽度对容栅边缘效应的仿真结果

栅条宽度/ mm	边缘效应 电容值/pF	栅条宽度/ mm	边缘效应 电容值/pF
0.80	4.220 5	1.60	10.089 8
0.92	5.108 0	1.68	10.692 4
1.00	5.678 8	1.76	11.426 5
1.32	8.078 5	1.88	12.285 1
1.48	9.234 4	2.00	13.195 9

利用 Matlab 软件绘制栅条宽度与理论值电容值、仿真值以及相对误差之间的关系曲线,如图 5 所示。容栅传感器边缘效应的影响与栅条宽度成反比关系,可以通过增大栅条宽度来减小边缘效应的影响。

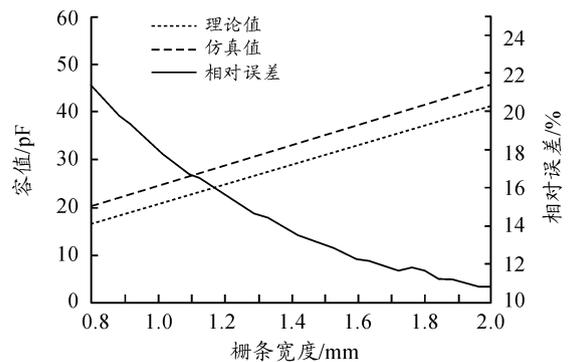


图5 栅条宽度对边缘效应的关系曲线

2.3.2 栅条间距对边缘效应的影响

在 ANSYS Electronics Desktop 中创建仿真结构模型,在仿真过程中栅极的厚度、宽度、长度以及栅极间距保持不变。设置栅条间距的初始值为 0.2 mm,步长为 0.04 mm,终止值为 2 mm。依据仿真结果利用 Matlab 绘制栅条宽度与理论值电容值、仿真值以及相对误差之间的关系曲线,如图 6 所示。

由图 6 可知,容栅传感器的电容值随着栅条间距增大而增大,即边缘效应随着栅条间距增大而增大;当栅条间距增大到一定程度时电容值变化幅度减缓,即边缘效应趋于稳定。在容栅传感器的设计中尽量减少栅条间距从而减小边缘效应的影响。

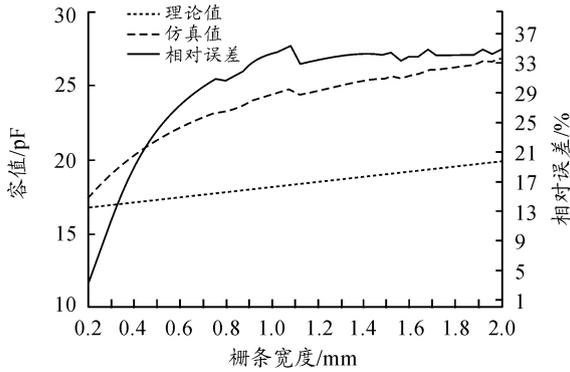


图6 栅条间距对边缘效应的关系曲线

2.3.3 栅条宽度与间距比例对边缘效应的影响

通过对容栅传感器栅条宽度以及栅条间距对边缘效应的影响发现,栅条宽度与间距比值也会对边缘效应产生影响。在 ANSYS Electronics Desktop 建立不同比值模型进行仿真计算,结果如表 2 所示。

表2 栅条宽度与间距比值对边缘效应的仿真结果

比值	相对误差/%	比值	相对误差/%	比值	相对误差/%
1	30.654 6	10	12.719 1	40	6.265 5
4	3.189 6	16	10.080 2	50	5.933 2
5	18.79 47	20	9.048 7	100	5.579 0
8	14.061 9	25	8.582 5		

利用 Matlab 软件绘制栅条宽度与间距对边缘效应的关系曲线,如图 7 所示。栅条宽度与间距最佳比值为 4。

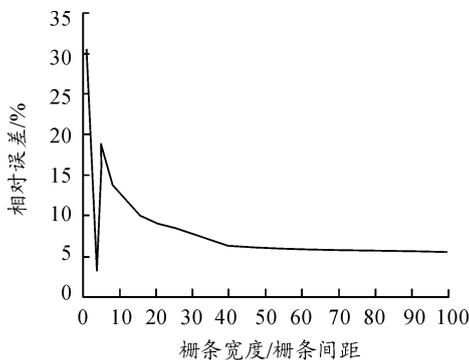


图7 栅条宽度与间距比值对边缘效应的关系曲线

2.3.4 容栅结构对边缘效应的影响

在 ANSYS Electronics Desktop 中建立不同的容栅传感器结构模型,如图 8 所示。分别进行仿真,得到电容值。利用式(1)分别计算各模型的理论电容值,仿真值与理论值的差值即边缘效应产生的电容值,如表 3 所示。

由表 3 结果所示,容栅传感器边缘效应的影响与结构有很大的关系,边缘效应对容栅传感器的影响随容栅栅极结构复杂程度增加而增大。为了减小边缘效应的影响,容栅传感

器的结构尽可能简单。

表3 不同结构容栅传感器对边缘效应的影响

结构模型	边缘效应值/pF	误差/%
a	2.983	26.77
b	3.929	35.26
c	2.280	31.58
d	4.154	32.19
e	3.558	37.23

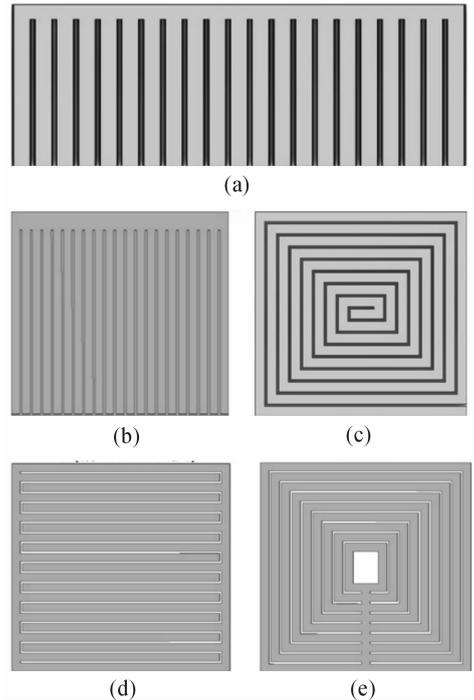


图8 不同结构的容栅传感器

3 测试结果及分析

依据上述仿真结果选择普通梳齿状容栅传感器进行优化设计。为了验证仿真结果以及优化效果,分别将容栅的两个栅极平整粘贴在模拟微小位移测试台的两个面上,如图 9 所示。模拟测试台有横向和纵向两个调节旋钮,两个调节旋钮可以分别实现容栅传感器变极距和变面积,分辨率为 0.01 mm。调节旋钮使栅极间距为 0.20 mm,正对面积最大的情况下,理论计算值为 16.123 5 pF。旋动横向旋钮改变栅极间距,用 LCR 表测量相应的电容值,如表 4 所示。

安捷伦 E4980A 型精密 LCR 表,工作频率在 20 Hz ~ 2 MHz 频率范围内,分辨率为 0.000 1。在并联等效电路-损耗因素(Cp-D)模式下,设置测试频率为 1 MHz,测试电压为 1.5 V。



图9 模拟微小位移测试实验台

表4 传感器优化设计测试结果

模型	位移量/mm	理论值/pF	实测均值/pF	测试位移量/mm	误差/%
0.8+0.05	+0.1	8.092 56	9.167 26	0.113 28	13.28
	-0.1	24.808 91	28.286 32	-0.114 02	14.02
0.8+0.2	+0.1	8.358 36	8.792 12	0.105 19	5.19
	-0.1	25.074 71	26.419 77	-0.105 36	5.36
加保护环	+0.1	8.092 56	8.169 44	0.100 95	0.95
	-0.1	24.808 91	25.064 44	-0.101 03	1.03

注: +表示极距增加, -表示极距减小

依据表4测量结果分析可知:优化设计以后得容栅传感器实测电容值更加接近理论值,边缘效应产生的影响相比之前明显减小,证明了上述仿真结果所得优化理论的正确性,在实际应用时可以加装保护环来消除边缘效应。

4 结论

仿真结果与实验数据分析表明,在加工工艺允许的前提下,选择最简结构模型(普通梳状)、尽可能减小栅极厚度和栅条间距、增大栅条宽度,可以减小容栅传感器的边缘效应,提高测试精度。由于加工工艺限制栅极厚度为0.07 mm,在优化的过程中栅条宽度与栅条间距最佳比值为4。此外,可以通过加装与栅极等电位的保护环以及采用栅极互补结构来消除边缘效应,同时要考虑制作工艺对传感器边缘效应的影响。

参考文献:

[1] 余建平. 面向精密定位的平面电容式多自由度位移测量传感器关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.

- [2] 谢锐,马铁华. 嵌入式容栅传感技术及轴功率测试研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(4):844-849.
- [3] 刘双红,靳鸿,张海龙,等. 分离式差分结构容栅传感器转速扭矩测试系统[J]. 探测与控制学报,2013,35(5):49-52.
- [4] 张德福,李显凌,葛川,等. 面向电容式传感器线性度标定的柔性微动机构设计[J]. 仪器仪表学报,2016,37(6):1210-1217.
- [5] 王文霞. 边缘电场传感器设计及应用研究[D]. 太原:中北大学,2018.
- [6] 郭占社,冯舟,庄海涵,等. 考虑制作工艺和边缘效应的梳齿电容理论[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(12):2009-2012.
- [7] 吴哲琼,范锦彪,王雪皎. 电容式电子测压器的边缘效应分析[J]. 中国测试,2018,44(5):142-146.
- [8] 闵希凯,李新娥,张红艳,等. 基于容栅传感器的微小位移测试系统[J]. 探测与控制学报,2018,40(6):89-93.
- [9] 武嘉俊,陈昌鑫,马铁华,等. 基于Ansoft的容栅传感器边缘效应分析[J]. 仪表技术与传感器,2016(2):1-3,11.
- [10] LI J, ZHANG P, WANG Y, et al. The three-dimensional electromagnetic simulation analysis of power transmission of loosely coupled transformer based on ANSYS[J]. North American Power Symposium,2014:1-4. 2014.
- [11] FEI Zhou, GUO MinLin, MIAO Shang, et al. Finite Element Analysis of Capacitance Sensor[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,3360(1200):940-943.
- [12] 雷建华. 极板厚度对电容边缘效应影响的理论和仿真分析[J]. 电脑与电信,2013(8):52-53,55.
- [13] 李晓钰,陈向东,姚尧,等. 复杂电极结构的单片式电容传感器研究[J]. 仪器仪表学报,2010,31(7):1541-1546.
- [14] XIA Sha, NIHTIANOV S. Capacitive sensor system for subnanometer displacement measurement [C]//2011 IEEE Sensors Conference. Electronic Instrumentation Laboratory, Delft University of Technology, the Netherlands, 2011:1173-1176.
- [15] 祖静,马铁华,裴东兴,等. 新概念动态测试[M]. 北京:国防工业出版社,2016.

(责任编辑 唐定国)