

Design and Development of Integrated Differential Capacitive MEMS Miniature Electric Field Sensor^{*}

HUANG Guoping^{*}, CHEN Jinrong, WANG Yueqiang, LIAO Feng
(Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corp., Foshan Guangdong 528000, China)

Abstract: In the actual operation of relay protection, some hidden faults inside the screen cabinet will cause the pressure plate to throw back failure, which seriously threatens the safe and reliable operation of the power grid. In order to be able to reliably and effectively monitor the charged state or electrical conductivity of the exit pressure plate, a SOI differential capacitive MEMS electric field sensor is designed. The designed sensor is constructed with a reliable operating structure based on the physical design of micromechanical components and relies on a low-noise, high dynamic range interface IC to complete the operation. The designed interface IC can cope with pulsed intermittent operation while organizing an array of complementary devices to sense a variety of different measurement signals. The COMSOL Multiphysics simulation experiments show that the designed sensor is well suited to the demands of platen condition monitoring.

Key words: relay protection; electric field sensor; micro-electro-mechanical system (MEMS); connection piece

EEACC: 2575D; 7230M

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2024.01.014

集成差分电容式 MEMS 微型电场传感器设计与研制^{*}

黄国平^{*}, 陈锦荣, 王跃强, 廖 峰
(广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘 要: 在继电保护实际运行中, 屏柜内部一些隐性故障将造成压板投退失效, 严重威胁着电网的安全可靠运行。为了能够可靠、有效地监测出口压板的带电状态或电气导通性, 设计了一种 SOI 差分电容式 MEMS 电场传感器。所设计的传感器以微机械元件物理设计为基础, 构造出可靠的运行结构, 并且依靠一个低噪声、高动态范围的接口 IC 来完成操作。所设计的接口集成电路在应对脉冲式的间歇性操作的同时, 组织互补设备阵列以感应各种不同的测量信号。通过 COMSOL Multiphysics 仿真实验可以看出, 所设计的传感器能够很好地满足压板状态监测的需求。

关键词: 继电保护; 电场传感器; MEMS; 硬压板

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2024)01-0079-05

随着工业的发展和生活水平的提高, 人们对电力的需求不断增加, 继电保护硬压板作为一个人工设置的二次回路可断点, 为检修、运行提供了极大的方便, 但也使继电保护系统中增加了一个不能完全闭环监视的环节^[1]。当电场强度超过空气击穿场强时, 高压开关柜内部会发生局部放电^[2-3]。当电晕出现在高压开关柜内, 与极性相反的带电粒子在电场的作用下向电极移动, 在屏柜表面吸收或失去电子, 从而恢复电中性并产生电晕电流。此外, 同样的极性带电粒子被排除在屏柜之外, 沿着电场线移动, 逐渐扩散到屏柜周围的空间, 最后涌入大地。

介质产生的表面电荷通常会导致电场的适度扭曲, 而大型导体在其附近产生电场扭曲则更加危险。如果传感器的部分必须接地或连接到大型导体

以建立一个参考电位, 这个问题就变得更加严重。为了研究大气电场的产生机制及其与其他自然现象的关系, 研究人员利用电荷感应原理研究出四种类型的电场传感器, 即双探针电场仪、静电场计、光学传感器和 MEMS 传感器。双探针可以达到大约 $0.1 (\mu\text{V}/\text{m})/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率^[4], 但这种依赖于稀释的等离子体环境、精确形状的探针电极和探针之间的距离。由于电势探针通常是有源器件, 因此需要精心设计、主动屏蔽的吊杆, 以确保待测场的适度失真。测量低频电场的传统系统是静电场计, 其典型分辨率约为 $50 (\text{V}/\text{m})/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[5]。在过去的几十年里, 由于静电场计的稳定性与线性度, 最常用于测量电场^[6-7]。静电场计主要由屏蔽电极、感应电极和信号处理电路组成。周期性地旋转屏蔽电极, 将

项目来源: 南方电网公司科技项目 (030600KK52220011 (GDKJXM20220154))

收稿日期: 2022-10-14

修改日期: 2023-06-02

会导致传感电极周期性地暴露在电场中。因此,根据静电感应定律,传感电极的表面会出现不同数量的电荷。值得注意的是,屏蔽电极必须接地以排除离子流的影响,这表明这种解决方案在空间是不合适的。

近年来,一系列基于电荷感应原理的 MEMS 电场传感器陆续出现^[8]。这种传感器检测来自梳状电极的电场,其中感应电荷由谐振器调制。微型传感器由于低功耗、低成本、小尺寸和易于大规模生产,有望在未来得到广泛应用。环境适应性始终是 MEMS 传感器的一个难题,尤其是 MEMS 电场传感器,其芯片尺寸太小,容易被灰尘、雨水和低气压等恶劣环境损坏。本文设计了一种 SOI 差分电容式 MEMS 电场传感器,该器件依靠物理相互作用避免外部环境因素的影响。该封装依靠低噪声、高动态范围的接口 IC 对 MEMS 器件进行操作。所采用的容性器件具有响应速度快且易于 IC 集成的优点。

1 静电感应传导方案

静电感应效应是导电固体中自由电荷载流子的流动性的结果。如果一个导体被置于电场 $\mathbf{E}$ 中,导体内部的自由电荷载流子会重新分布,与格子状的反电荷形成对比。这种极化在场内补偿了 $\mathbf{E}$ 。因此,在导体表面发展出相反的电荷区域。这些表面区域中的载流子都经历了一个由于电场而产生的向外的约束力,而电场内的合力保持为零。如果我们把这些带电区域分开,在它们之间保持一种连接,那么会产生电场所导致的斥力^[9]。这是由于静电对各个带电表面的拉扯,以及连接的导电性,通过这种导电性保持了场内极化。在均匀场 $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_z$ 指向 z 方向($\mathbf{e}_z$ 是 z 方向的单位矢量)内半径为 R 的导电球体的情况下,总静电力可以用分析法计算^[10]:

$$\mathbf{F}_{es} = F_{es} \mathbf{e}_z, F_{es} = \frac{9}{4} \pi R^2 \epsilon_0 E_0^2 = a_s \epsilon_0 E_0^2 \quad (1)$$

式中: $a_s = 9\pi R^2/4$ 考虑了球体的高度对称的几何形状, ϵ_0 是真空介电常数。球体的左半边经历了一个同样强大的力,它指向相反的方向。因此,球体上的总力等于零。在基本的传感器操作中, $\mathbf{F}_{es}$ 的 x 分量被转换为弹簧悬吊的 MEMS 结构部分的相对位移 δx 。因此,这个系统可以用一个具有低通特性和传递函数的谐波振荡器来描述:

$$\tilde{H}(\omega) = \frac{1}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\gamma\omega)} \quad (2)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$, m 是质量, ω 表示激振力的角频率。式(2)中的共振频率 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 和衰减参数 $\gamma = d/2m$ 定

义了传导谱特性,其中 d 为阻尼系数。力-挠度转换的系统响应由 $\tilde{X} = \tilde{H} \cdot \tilde{F}_{es}$ 得到。式(1)中 $\mathbf{F}_{es}$ 对 $\mathbf{E}$ 的所施加力和电场间的非线性转换,涉及到谱域中的卷积 $\tilde{X} \propto \tilde{H} \cdot (\tilde{E} * \tilde{E})$ 。从这个基本关系中我们可以得出结论,只有当其通带上限小于机械系统 $\tilde{H}(\omega)$ 截止频率的一半时,才有可能由挠度测量到未知电场 $\tilde{E}(\omega)$ 。

2 MEMS 及接口 ICs 设计

为了有效地转移到硅微结构中,我们采用一种半覆盖结构,即与移动部件之间有一个相对狭窄的间隙,如图 1 所示。额外的硅本身受到静电感应可以在间隙内集中电场,这增加了移动硅部分所经受的力。

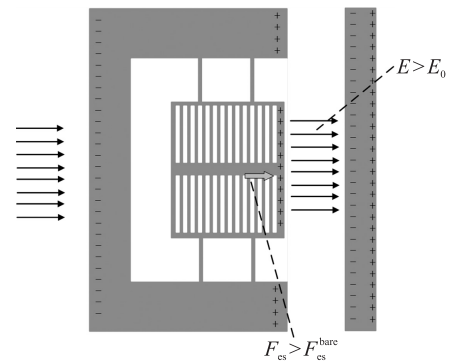


图 1 电场传感器布局

对于谐振器,典型的解决方案是将其与一个跨阻放大器 (Trans-Impedance Amplifier, TIA) 串联,如图 2 所示。在 TIA 设计中,需要考虑由谐振器本身引起的相移。为了引起共振,整个回路的相移需要是 360° 的某个倍数。因此,如果一个谐振器引起了相位偏移,TIA 或辅助电路必须将其取消。此外,可能会有几个频率的共振模式,所以在设计 MEMS 及接口时应该考虑抑制或避免这种情况出现。

对于谐振器, MEMS 从输入到输出的相移是 0° , 因为整个装置在固有频率处发生谐振,而其他模式的相移被设计成 180° , 所以已经抑制了相移,不需要额外的补偿或加载。在考虑了这些关键问题之

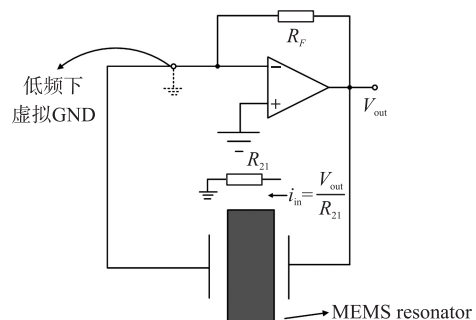


图 2 连接 TIA 和 MEMS 谐振器之间的简化电路

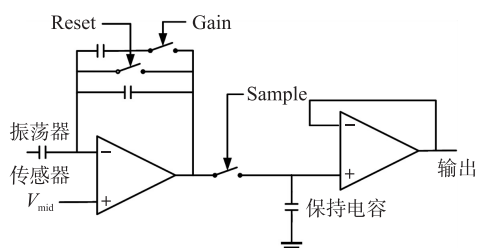
后,需要对电路进行优化,以实现低功耗和低相位噪声。可以通过选择低功耗的 TIA,用多级优化,没有过大的晶体管或电流来减少能源的使用。实现低相位噪声的最好方法是采用高 Q 值,因为相位噪声与它的平方成反比,相位噪声的形式如下:

$$L(f_m) = \frac{FkT}{C} \cdot \left[\frac{1}{8Q_{\text{loaded}}^2} \cdot \frac{(R_{\text{out}} + R_m)}{R_{\text{in}}} \cdot \left(\frac{f_0}{f_m} \right)^2 \right] \quad (3)$$

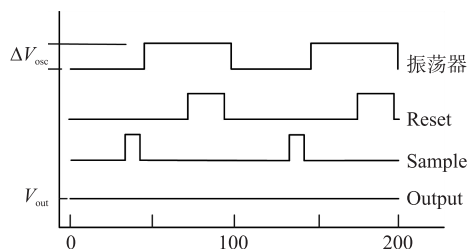
式中: F 是噪声系数, k 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, C 是载波功率, R_m 是谐振器的电阻, R_{out} 是放大器的输出阻抗, f_m 是共振的偏移频率。

接口集成电路如图 3 所示。在测量期间,传感器会产生一个与其电容直接相关的电荷。然后在采样期间,接口的第一级将其转换为电压,第二级将该值保持一定的时间。输出与输入的关系是:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{mid}} + \Delta V_{\text{osc}} \times \frac{C_{\text{sensor}}}{C_{\text{feedback}}} \quad (4)$$



(a) 充放电指示电路



(b) 控制和输出波形

将反馈电容 C_{feedback} 分别设置为 0.5 或 1.0 pF 来打开或关闭增益开关

图 3 充放电指示电路及其控制和输出波形

3 模型分析

假设采用 SOI 作为结构材料,长度和宽度分别为 $255 \mu\text{m}$ 和 $85 \mu\text{m}$,宽度为 $1 \mu\text{m}$ 的电极施加 1 V 电压激发谐振器的振动。差分电容式 MEMS 器件如图 4 所示。硅的容积密度为 2.3 g/cm^3 ,杨氏模量为 $1.90 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,空气的有效黏度为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,其他相关参数如表 1 所示。系统固有频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

式中: k 是弹性系数, m 是可动部分质量。

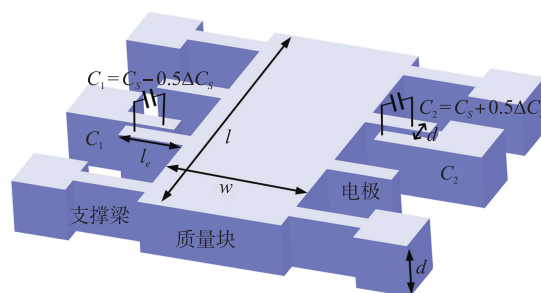


图 4 差分电容式 MEMS 器件三维结构

表 1 差分电容式 MEMS 器件的仿真参数

参数	数值	参数	数值
布朗噪声等效加速度 (BNEA)	$<20 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	电容间隙 (d)	$2 \mu\text{m}$
机械灵敏度	0.2 pF/g	器件层厚度	$40 \mu\text{m}$
VPULL-IN	$>2.0 \text{ V}$	总体尺寸	$<6 \times 6 \text{ mm}^2$
质量因数 (Q)	0.7	传感器带宽 (BW)	500 Hz

与分析方法相比,数值模拟的最大优势在于,结构变形可以在二维或三维图形中观察到。随着 0 ~ 1 V 变化的极化电压,三阶振动模式形状在差分电容式 MEMS 器件中的特征模式如图 5 所示,该特征模式在图中的条形带处没有单位。

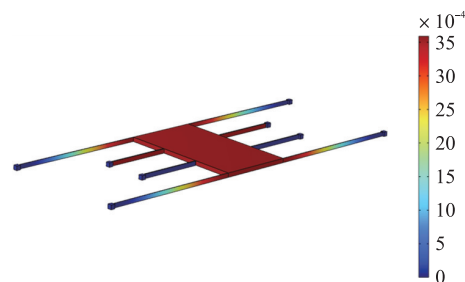
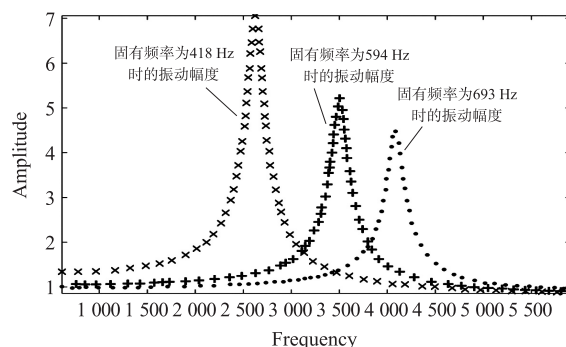


图 5 不同极化电压条件下器件的三阶振动模式形状

从图 5 可以看出,在施加该驱动电压后,电容两端形变量分别达到最大,较高的位移意味着更高的振幅频率震荡,这可以带来更好的性能。不同频率电压下的振幅如图 6 所示,其中“+”点曲线、“x”点



“+”点曲线代表固有频率为 418 Hz 时的振动幅度,“x”曲线代表固有频率为 594 Hz 时的振动幅度,实点曲线代表固有频率为 693 Hz 时的振动幅度

图 6 驱动频率与振幅的关系曲线

曲线和实心点曲线分别代表固有频率为 418 Hz、594 Hz 和 693 Hz 时的振动幅度。从中可以看出,仿真所得的谐振频率为 594 Hz,振幅为 $5.18 \mu\text{m}$,利用文献[11]中的方法分析得出谐振频率为 693 Hz,振幅为 $6.73 \mu\text{m}$ 。由表 1 相关参数可以获得系统固有频率为 596 Hz,虽然与实际情况存在一定差距,但在可接受范围内,所构建的设计在一定程度上可以反映实际情况。

4 结果验证

为验证本文所设计 MEMS 电场传感器的准确性,我们将封装后的传感器应用于继电保护出口压板带电状态的测量。传感器封装尺寸如图 7 所示。继电保护出口压板是继电保护跳闸回路或合闸回路

中的一个断开点,出口压板有一端带着保护装置里的动作接点的,另一端始终带负电,当动作接点闭合,则压板两端有电压,此时若将压板投入,断路器即跳闸或合闸。出口压板在继电保护出口回路中的位置如图 8 所示。

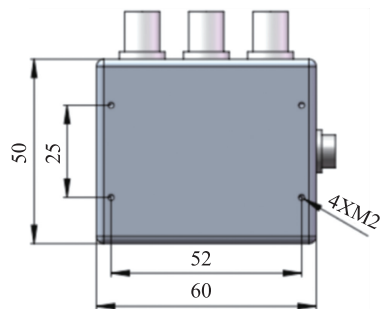


图 7 传感器尺寸

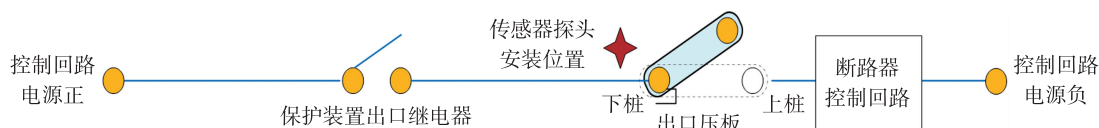


图 8 出口压板在继电保护出口回路中的位置

由于继电保护出口回路应用的电压为直流 220 V 或 110 V,只能形成直流电场,无法用磁感应的方式直接进行测量,因此本传感器基于 MEMS 静电场传感器来获取硬压板上桩或下桩的带不同极性直流电下的感应电荷变化量,通过对感应电荷变化产生的交变电流的测量来间接实现出口压板带电状态的测量,并通过带电状态的来识别出口压板位置。传感器的实物图和安装图见图 9。



(a) 实物图

(b) 安装图

图 9 传感器实物图和安装图

测试结果如图 10 所示,观察发现:输入和输出的关系是高度线性的,且存在 -396 mV 的偏移。这

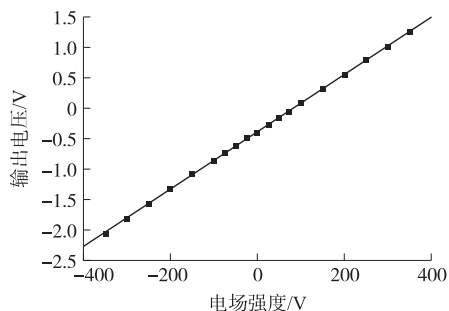


图 10 MEMS 电场传感器的标定曲线

个偏移可能是由于运算放大器的残余偏移被上调到载波。偏移在输入电场强度的范围内是恒定的,因此可以在标定后将其去除掉。

5 结论

在本文中,我们首先设计了一种实用的 MEMS 电场传感器,用于测量大气电场,在各种环境因素下具有很高的稳定性。该测量系统由一个基于微型制造的传感器芯片、一个接口集成电路和一个支架构成。有限元模拟结果和电场实验证明,该电场测量系统可以检测到小至 1 V/m 的电场。

参考文献:

- [1] 汪洋,黎恒恒,鄂士平,等. 基于深度学习的变电站硬压板状态检测与识别算法[J]. 沈阳工业大学学报, 2020,42(6):676-680.
- [2] 魏振,张强,齐波,等. 高压开关柜典型缺陷局部放电 TEV 特征的研究[J]. 高压电器,2014,50(2):60-67.
- [3] 高阳,谷彩连,刘宝良,等. 高压开关柜局部放电特性分析与抗干扰研究[J]. 电力电子技术,2020,54(3):15-19.
- [4] Bertheliet J J, Godefroy M, Leblanc F, et al. ICE, the Electric Field Experiment on DEMETER[J]. Planetary and Space Science. 2006,54(5):456-471.
- [5] Peng C, Yang P, Zhang H, et al. Design of a Novel Closed-Loop SOI MEMS Resonant Electrostatic Field Sensor[J]. Procedia Engineering. 2010,5:1482-1485.
- [6] Tant P, Bolsens B, Sels T, et al. Design and Application of

- a Field Mill as a High-Voltage DC Meter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(4):1459–1464.
- [7] 黄国平,黄华斌. 500 kV/220 kV 混压同塔四回输电线路接地开关的改造方案[J]. 广东电力, 2021, 34(11): 67–74.
- [8] Yan Z M, Liang J J, Hao Y C, et al. A Micro Resonant DC Electric Field Sensor Based on Mode Localization Phenomenon [C]//32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) IEEE, Seoul, South Korea, 2019:849–852.
- [9] 郭兴军,李朋伟,张文栋,等. 基于电容式 MEMS 器件的静电斥力驱动研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8):1738–1743.
- [10] Kainz A, Steiner H, Schalko J, et al. Distortion-Free Measurement of Electric Field Strength with a MEMS Sensor[J]. Nature Electronics, 2018, 1(1):68–73.
- [11] Yang P F, Peng C R, Fang D M, et al. Design, Fabrication and Application of an SOI-Based Resonant Electric Field Microsensor with Coplanar Comb-Shaped Electrodes[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2013, 23(5):055002.



黄国平(1972—),男,江西丰城人,学士学位,教授级高级工程师,主要从事电力系统运行管理工作,huangguoping1972@163.com。