

摘要：传统的机械开关由于机械结构的限制、寿命有限等优点，已逐渐被触控式开关所代替。常见的触控开关技术有电容式、电感式、电阻式以及光学式等，其中电感式触控开关因其抗干扰性强，能更好地应对金属盖板的结构设计等诸多优势，可应用于更多智能产品交互场景的设计。电涡流式传感器是电感式触控开关的技术核心，因此，该文从电涡流传感器原理出发，采用谐振测量法实现对位移变化量的有效测量，分析了传感器的灵敏度问题。由此提出一种激励信号源频率自校准实现方法，利用这种自校准方法实现对激励信号源频率校准以提高电感式触控传感器的灵敏度。

关键词：触控开关；电感式传感器；灵敏度；频率自校准

中图分类号：TP212.1 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2022)02-0024-06

收稿日期：2021-12-28

基于电感式触控传感器的激励信号源频率自校准方法研究

高峰 施亮

上海交通大学自动化系，上海 200240

0 前言

在涡流式传感器技术基础上发展的电涡流式开关也被称为电感式触控开关。相较于电容式触控开关，其优势在于可检测高介电常数物体（如金属材料盖板）表面的触控动作，以及抗干扰性强等。因此，针对高介电常数材料物体在以位移为检测量的应用场景下，电感式传感器的灵敏度及线性范围更具优势^[1]。

本文从电涡流式传感器的原理分析开始，推导出谐振法测量电路的理论公式，并依此设计出一种积分运算采样/保持电路，此电路可应用于互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺集成电路设计中，实现对有效小信号的积分保持，满足集成电路中的逐次逼近（SAR）型模数转换器（ADC）采样量化对输入端信号的要求，并运用梯度下降法，实现对激励信号源频率的自校准，达到谐振测量电路的最佳工作频率，提升电感式触控传感器的灵敏度。

此积分运算采样电路在完成激励信号源的频率自校准之后，同时也作为电感式触控系统级芯片（SoC）

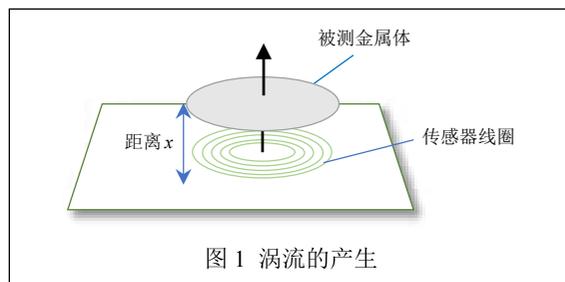
的检测通道，对压力触控动作或者转速进行有效检测。

1 电涡流传感器工作原理及灵敏度分析

1.1 电涡流式传感器工作原理

电涡流式传感器由传感器激励线圈和被测金属体组成。成块的金属置于变化的磁场中或者在固定的磁场中运动时，金属体内就会产生感应电流。这种电流的流线在金属体内是闭合的，所以叫涡流。涡流的产生如图1所示。传感器线圈受电涡流影响时的等效阻抗 Z 可表示为^[2]：

$$Z=F(\rho, \mu, t, f, x) \quad (1)$$



其中, Z ——传感器线圈受涡流影响时的等效阻抗;

ρ ——金属体的电阻率;

μ ——导磁率;

t ——被测金属体厚度;

f ——线圈的激励电流频率;

x ——线圈与金属的距离。

电涡流式传感器的变压器模型^[3]如图2所示,其中, R_L 和 L_1 是传感器线圈自身的电阻和电感(在未施加被测金属导体时); R_M 和 L_2 是被测金属导体的等效电阻和电感; M 是互感。

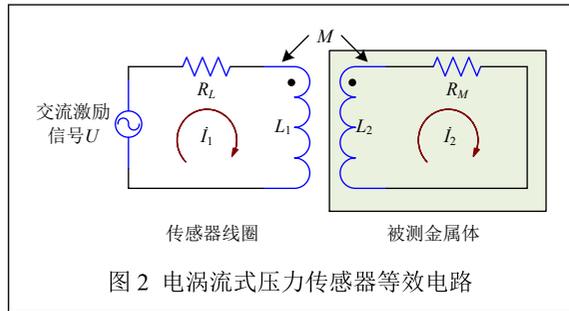


图2 电涡流式压力传感器等效电路

传感器线圈受涡流影响的等效阻抗:

$$Z = \frac{U}{I_1} = R_L + \frac{\omega^2 M^2}{R_M^2 + (\omega L_2)^2} R_M + j\omega \left[L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_M^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \right] \quad (2)$$

其中, U ——传感器线圈端口电压;

I_1 ——传感器线圈端等效电流;

R_L ——传感器线圈固有电阻;

L_1 ——传感器线圈固有电感;

R_M ——被测金属体等效电阻;

L_2 ——被测金属体等

效电感;

M ——传感器线圈与被测金属体的互感系数;

ω ——激励信号源角频率。

由式(2)可以看出,传感器线圈等效阻抗的实部和虚部分别表示其等效电阻和电感。被测金属体的加入

导致电阻变大,电感值变小。高频的情况下,可以认为 R_M 远小于 ωL_2 , 因此,式(2)中 L 的变化仅与互感系数 M 有关,即仅与被测金属到传感器线圈的距离 x 有关^[2]。采用谐振法测量电路将 $L \sim x$ 的关系转换成 $U \sim x$ 的关系。通过对电压 U 的测量,进而确定距离 x 的大小。

1.2 谐振法测量电路的原理分析

谐振法测量电路如图3所示,其本质为电感电容并联谐振选频电路,以下简称LC选频电路。通过GPIO(通用型输入输出接口)产生激励方波信号,频率为LC电路的谐振频率 f_0 ,经过选频网络之后输出频率为 f_0 的正弦信号,GPIO(R_x)接收正弦信号,量化获得正弦信号的幅度。

图3中,谐振回路的电感 L 为传感器线圈形成的电感, R_s 线圈阻抗。谐振电容 C 由电容和线圈寄生电容等效。当谐振电路谐振时,LC网络呈现电阻特性,即等效为 R_p 。谐振时,LC网络等效阻抗示意图如图4所示。

并联谐振回路的阻抗为:

$$Z_p = \left(\frac{1}{j\omega L + R_s} + j\omega C \right)^{-1} = \left(\frac{R_s}{(\omega L)^2 + R_s^2} - j \cdot \left(\frac{\omega L}{(\omega L)^2 + R_s^2} - \omega C \right) \right)^{-1} \quad (3)$$

其中, Z_p ——LC选频电路的等效阻抗;

ω ——LC选频电路工作的角频率;

L ——传感器线圈电感;

R_s ——传感器线圈阻抗;

C ——电路贴片电容和线圈寄生电容等效值。

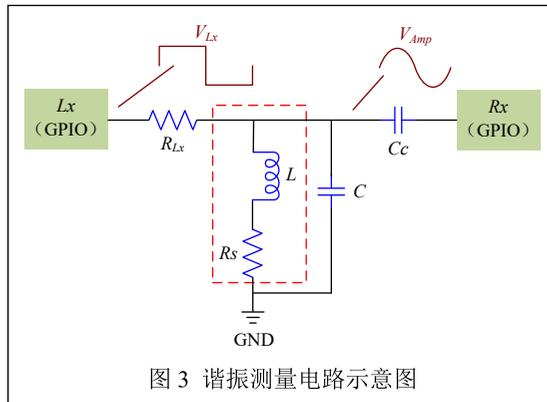


图3 谐振测量电路示意图

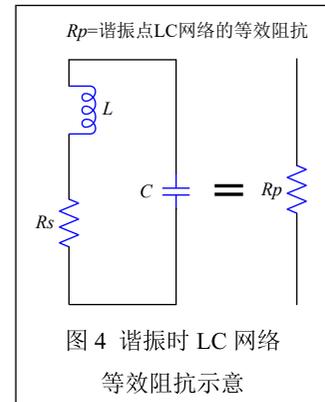


图4 谐振时LC网络等效阻抗示意

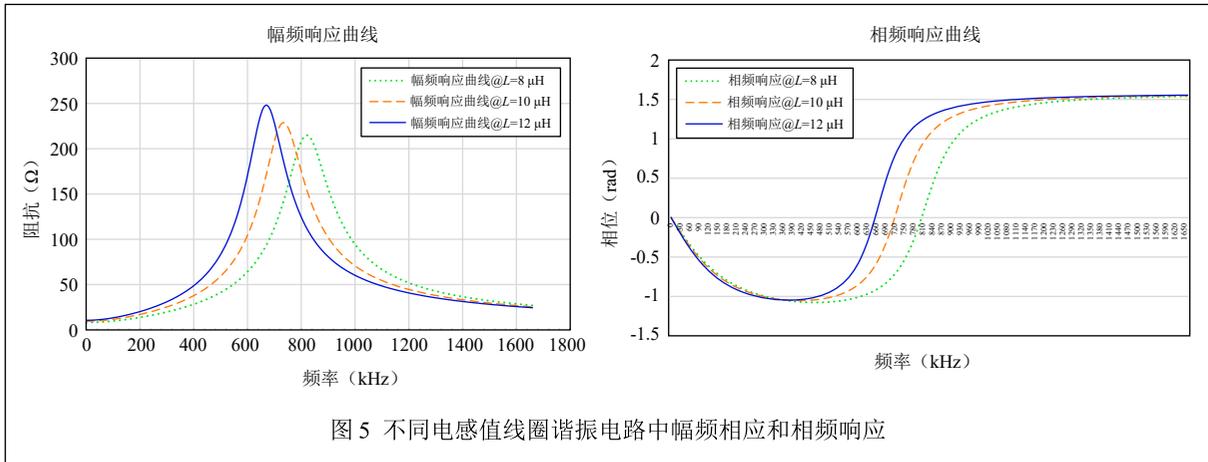


图5 不同电感值线圈谐振电路中幅频相应和相频响应

因传感器线圈在印刷电路板上绘制，受电路板层数、制板工艺和尺寸限制，常用的传感器线圈的电感量一般在 6~20 μH 之间。因此，8 μH、10 μH 和 12 μH 的不同电感值线圈在不同频率下对应电路的阻抗关系和相位关系如图 5 所示。

由图 5 可以看出，当谐振电路工作频率达到谐振频率时，谐振回路的阻抗最大，相位为 0。谐振点输出电压峰值 V_{AMP} 的表达式为：

$$V_{AMP} = \frac{R_p}{R_p + R_{LX}} \times V_{IN} \quad (4)$$

其中， V_{AMP} ——谐振点输出的峰值电压；

R_p ——LC 选频电路谐振时的等效电阻。

谐振时，电路呈现阻性，此时有：

$$\frac{\omega L}{(\omega L)^2 + R_s^2} = \omega C \quad (5)$$

从而得到谐振电路的谐振频率为：

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_s}{L}\right)^2} \quad (6)$$

初始设定传感器线圈与被测金属处于谐振状态，其输出电压值最大。一旦被测金属与传感器线圈之间距离 x 发生变化，由于涡流效应影响，谐振电路处于非谐振工作点，此时谐振电路输出电压变化幅值最大，即传感器灵敏度性能最优。

2 激励信号源频率自校准方法的实现

2.1 积分运算采样 / 保持电路的设计

印制电路板 (printed circuit board, PCB) 平面型

线圈稳态性能好并具有良好的线性度，将其与电感式触控传感器 (SoC) 一起设计到板级产品上，可实现电子产品的集成化生产。但现有研究给出的 PCB 型传感器线圈模型^[4]计算得到的参考电感值与实际测试通常有较大误差，由前文分析可知，当激励信号频率与 LC 网络 (图 3) 谐振频率相同时，谐振电路输出信号幅值最大，所以需要一种采样量化方法确定 LC 电路输出信号幅值最大时对应的谐振频率作为激励信号源的工作频率。

本文提出并设计一种积分运算保持电路，以实现对于谐振电路输出交流电压的有效积分，经 ADC 量化后，再运用梯度下降法，找到谐振电路输出信号的极值点，从而实现激励信号源工作频率的自校准，省去对于每一个传感器线圈因电感值差异引起的谐振频率点不同而需要手动校准这一繁复工作。该电路图如图 6 所示。

2.2 积分运算采样 / 保持电路直流工作点建立

图 6 积分运算电路中第一级为运放 (AMP) 跟随电路做缓冲器 (Buffer) 提升信噪比。为了得到较好的信号动态范围，增加有效可测量量程，因此将 Buffer 缓冲电路的偏置设置在模拟电压 (AVDD) 值的一半。积分运算电路的输入端增加 RC 高通滤波电路，其截止频率计算公式为：

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot R_{bias} \cdot C_c} \quad (7)$$

假定，将 R_{bias} 电阻值设定在 100 kΩ 以上，但不宜过大，因为 R_{bias} 取值过大，有可能会对工作点建立时间过长，由此引入 Start-Up 信号，在振荡开始时将

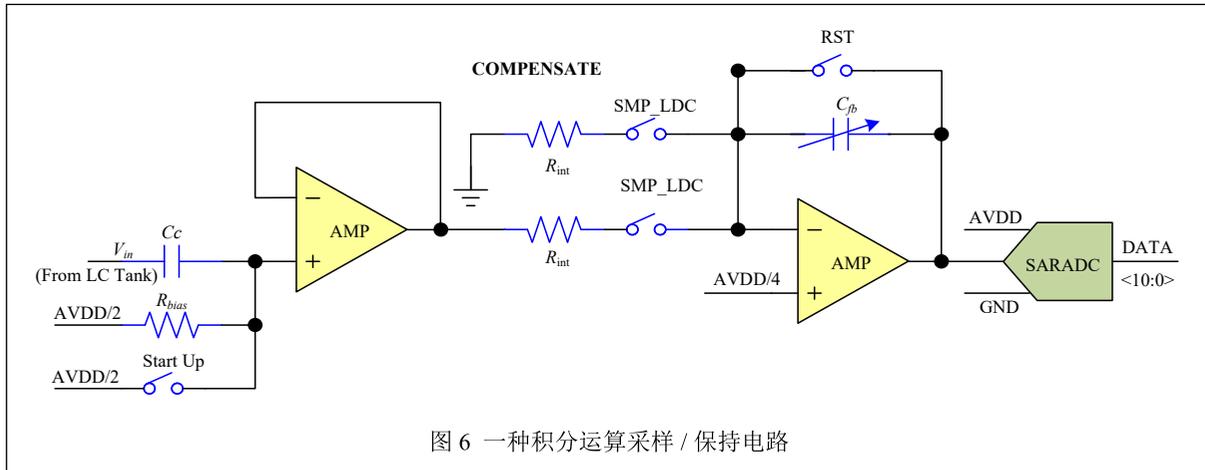


图6 一种积分运算采样/保持电路

Buffer 电路的工作点快速建立至 $AVDD/2$ 附近，随后断开 Start-Up 信号电路，由 R_{bias} 继续提供静态偏置。

2.3 积分运算采样/保持电路有效信号计算

LC 谐振腔振荡所得的信号直流分量和交流信号 V_{in} ，而第二级积分电路的参考点为 $AVDD/4$ ，因此积分输入信号的直流成分将快速累积使输出饱和。为此，在此电路设计上引入一路直流补偿支路 (COMPENSATE)，抵消该直流成分对积分器的影响。在设计此支路过程中需要注意，有效信号支路和补偿支路所采用的电阻需要尽可能地匹配，避免误差引入温漂等问题，则积分运算输出信号 V_{out} 可由下式计算得到：

$$\begin{cases} \frac{AVDD - \left(\frac{AVDD}{2} + V_{in}\right)}{R_{int}} + \frac{AVDD - 0}{R_{int}} = I_c(t) \\ V_c(t) = \frac{1}{C_{fb}} \cdot \int_{0^-}^t i(\tau) d\tau \\ V_c(t) = V_{out} - \frac{AVDD}{4} \end{cases} \quad (8)$$

将上述时域计算公式进行拉氏变换得到 s 域的计算公式：

$$V_c(s) = \frac{1}{sC_{fb}} \cdot I_c(s) + \frac{1}{s} \cdot V_c(0^-) \quad (9)$$

通常认为电容初始电压为 0，即 $V_c(0^-)=0$ ，所以可得 V_{out} 的 s 域表示式：

$$V_{out} = \frac{AVDD}{4} - \frac{V_{in}}{s \cdot R_{int} \cdot C_{fb}} \quad (10)$$

考虑到 Buffer 缓冲电路的设计以及信号动态范围，SMP_LDC 的开关控制信号与 Lx 方波激励信号同频同相，仅在激励信号为低时开关闭合进行采样，此时 V_{in} 为负半周期有效。

以谐振信号 $V_{in}=A \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t)$ 为例，积分幅度 ΔV_{out} 可由下式表示：

$$\begin{aligned} \Delta V_{out} &= -\frac{1}{R_{int} C_{fb}} \cdot \int_{T_0/2}^{T_0} A \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t) dt \\ &= -\frac{1}{R_{int} C_{fb}} \cdot \frac{-A}{2\pi f_0} [\cos(2\pi) - \cos(\pi)] \\ &= \frac{2A}{\pi R_{int}} \cdot \frac{1}{2f_0 C_{fb}} \end{aligned} \quad (11)$$

在得到有效积分信号之后，此运放积分采样电路最后一级设计集成了一个分辨率为 11 位的 SAR 型 ADC。通过此 ADC 将输入信号进行量化，然后运用优化算法（如梯度下降法），寻找目标函数（式 4）的最优值，其中， R_p 为频率 f 的函数。获得最优值对应的频率 f_0 ，即为电感式触控传感器的最佳工作频率。

3 实验设计及结果分析

上述积分运算采样/保持电路集成至电感式传感器 SoC 可广泛应用于门禁系统、水气表转速检测、厨电产品等场景。以 PCB 型电涡流式传感器线圈为例，其用于门禁系统作开关检测时，不同厚度的金属材质其位移变化范围为 $0 \sim 3,000 \mu\text{m}$ ，因此在设计电涡流式传感器时希望在这个范围内灵敏度效果最佳。同时，考虑到趋肤效应 (Skin Effect) [5] 影响，通常工作频率

选择 500 kHz ~ 3 MHz。

通过设计不同线圈得到确定电感值，然后根据电路谐振计算公式

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{LC}$$

以及线圈印制估算得到的 L 值，计算在频率 700 kHz、

900 kHz、1 MHz、1.2 MHz 下的电容 C ，因为常见电容为非连续值，根据计算得到的理论电容值选用标称电容 C 。确定谐振电路 LC 参数值之后，采用此激励信号源频率自校准方法，得到实验数据详见表 1。

由表 1 数据可以得知，在 PCB 型电涡流传感器线圈确定之后，该积分运算电路对交流电压进行积分保持后，经 SAR 型 ADC 采样量化结合特定算法可以实现最佳工作频率点的快速确定。

进一步设计实验进行方法验证，采用艾德堡仪器高精度位移测量设备 HP-500 进行位移测量，固定传感器线圈及被测金属体不变，在不同激励信号源工作频率下，以 ADC 采样量化值为参考，比较在达到相同 ADC 值的情况下，被测金属与传感器线圈所改变距离 Δx 的对比数据如表 2 所示。

表 1 梯度下降法确定的 ADC 取得极值点的工作频率

理论计算频率 (kHz)	C (nF)	L (μH)	ADC 取得极值点的工作频率 (kHz)
700	6.2	8	690
	5.1	10	683
	4.3	12	682
900	3.9	8	882
	3.2	10	872
	2.7	12	869
1000	3.2	8	977
	2.4	10	1012
	2.1	12	990
1200	2.2	8	1185
	1.8	10	1173
	1.5	12	1175

表 2 不同工作频率下的电感式传感器灵敏度比较

ADC 采样量化值	理论计算频率 960 kHz 下的 Δx (μm)	最佳工作频率 923 kHz 下的 Δx (μm)	优化百分比 (%)
55	2,000	1,560	22
117	2,100	1,600	23.80952
147	2,200	1,640	25.45455
186	2,300	1,710	25.65217
241	2,400	1,830	23.75
292	2,500	1,970	21.2

同等 ADC 采样量化值下，被测金属与传感器线圈之间的距离改变量 Δx 越小，表明施加压力越小，此时电感式触控开关灵敏度越高。由表 2 可以看出，在最佳工作频率激励的情况下，电感式触控传感器以较小的位移改变量即可获得相同的 ADC 采样值，反应到用户体验上就是采用更小的力度按压金属按键即可达到触控动作的识别。实验结果说明，此方法能够实现灵敏度提升的目的。

4 结束语

本文对电感式触控传感器工作原理进行阐述分析，并通过理论计算分析 LC 谐振网络的工作频率对灵敏度的影响。谐振电路的工作频率对传感器灵敏度、响应速度以及功耗均有较大影响，因此，在实际应用中需要平衡各项因素，从而选定最佳工作频率点。本文提出一种积分运算采样 / 保持电路，对输入模拟信号通过积分方式进行有效增益放大，以便满足 ADC 采样对输入端信号幅值的要求。经 ADC 采样量化后的信号再结合梯度下降算法，可快速有效确定最佳工作频率点。在完成激励信号源频率自校准之后，此电路同时作为电感式传感器 SoC 的输入检测通道，通过设定合适的判别阈值，有效进行压力触控动作或者转速检测等。通过实验证明，此电路高效稳定并切实有效，对 PCB 型电涡流式传感器在后续实践应用中具有积极意义。

参考文献

[1] GEORGE B, TAN Z, NIHTIANOV S. Advances in Capacitive, Eddy Current, and Magnetic Displacement Sensors and Corresponding Interfaces [C] in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9595-9607.

[2] 刘迎春, 叶湘滨. 传感器原理 设计及应用 4 版 [M]. 国防科技大学出版社, 2004.

[3] LI W, WANG H, FENG Z. Non-Contact Online Thickness Measurement System for Metal Films Based on Eddy Current Sensing with Distance Tracking Technique[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(4): 045005.

[4] 张卫民, 曾卫琴, 杨秀江, 秦峰, 于霞. 基于平面线圈阵列传感器的铝板材料裂纹电涡流检测 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(11): 1101-1105.

[5]DWIGHT, BRISTOL H. Skin Effect and Proximity Effect in Tubular Conductors[J]. Journal of the American Institute of Electrical Engineers, 1922, 41(3): 203-209.

Research on Elf-Calibration Method of Excitation Signal Source Frequency of the Inductive Touch Sensor

GAO Feng, SHI Liang

(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Traditional mechanical switches have been gradually replaced by touch switches due to the limitations of the mechanical structure, limited life and other shortcomings. Common touch switch technologies include capacitive, inductive, resistive and optical, among which inductive touch switches can be applied to the design of more intelligent product interactive scenarios due to their many advantages such as strong anti-interference and better response to the structural design of metal lids. The eddy current sensor is the technical core of the inductive touch switch, so the paper starts from the principle of eddy

current sensor, uses the resonance measurement method to realize the effective measurement of displacement change and analyzes the sensitivity of the sensor. The paper proposes a self-calibration method of excitation signal source frequency, and uses this self-calibration method to realize the calibration of excitation signal source frequency to improve the sensitivity of the inductive touch sensor.

Key words: touch switch; inductive sensor; sensitivity; frequency self-calibration

作者简介

高峰: 上海交通大学, 硕士研究生, 主要研究方向为微传感器、智能传感器等新型传感器在物联网领域的应用。

通信地址: 上海市闵行区东川路 800 号

邮编: 200240

邮箱: gaofeng_ic@126.com

施亮: 上海交通大学, 副教授, 研究方向为实时嵌入式系统、存储系统、数字控制系统。