

一种带自动稳幅的新型电流模 LC 振荡器

高兴波, 赵毅强, 宋益伟

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

摘 要: 介绍了一种新型电流模结构的 LC 振荡器, 主要用于向电磁感应式的传感器提供激励信号。自动稳幅设计用于克服线圈在 PCB 加工过程中的工艺离散性。与传统的交叉耦合式 VCO 结构不同, 本设计采用电流模式工作, 可更容易实现振幅的校准。LC 谐振单元集成于 PCB 上, 处理电路则以标准 $0.35\ \mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺实现。电路工作于 $3.3\ \text{MHz}$, 在 $5\ \text{V}$ 的电源电压下消耗 $0.7\sim 1.9\ \text{mA}$ 的电流。振荡幅度能够至少保持在中心为 $4.19\ \text{V}$ 的 $\pm 5\ \text{mV}$ 范围内。本设计经过 RF 仿真被证实可用于高频应用。

关键词: 电流模式; 电磁感应传感器; 自动稳幅; LC 振荡器; CMOS

中图分类号: TM 344.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)06-0046-05

A New Current-mode LC Oscillator with Automatic Amplitude Calibration

GAO Xing-bo, ZHAO Yi-qiang, SONG Yi-wei

(School of Electronic Information and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A new circuit structure of current-mode LC oscillator, which is designed for electromagnetic induction sensor with automatic amplitude calibration (AAC) to correct the PCB process dispersion of the coils, is presented. Different from traditional VCO structure, the new one works through current mode, which makes the amplitude calibration easily. The LC tank is integrated in the PCB and the circuit is implemented in a standard $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS process. It works at $3.3\ \text{MHz}$ (low frequency) and draws between 0.7 and $1.9\ \text{mA}$ from a $5\ \text{V}$ supply. Consider the amplitude, it can be calibrated within $5\ \text{mV}$ around $4.19\ \text{V}$ conservatively. The new design can be used for high frequency application on the result of RF simulation.

Key words: current-mode; electromagnetic induction sensor; automatic amplitude calibration; LC oscillator; CMOS

1 引言

电磁感应式传感器^[1]是一种传统的非接触式测量工具, 它通过不同线圈间的电磁感应机制进行工作。随着现代集成技术的发展, 这种传统传感器的测量精度大幅度提高。由于同时具有高精度和低成本的双重优点, 这种传感器引起越来越多的关注并得到广泛应用。本文研究的振荡器基于一种以 PCB 方式集成的电磁传感器, 用于向 PCB 线圈提供正弦激励, 振荡电路及其他处理电路以芯片的形式实现。

根据电磁式传感器的工作原理, 这种传感器的测量精度主要取决于驱动线圈的正弦信号的质量

(主要指振幅的稳定性)。因此, 设计一款能够提供精确、稳定振幅的振荡器是整个电路设计中的关键。

2 LC 振荡器的实现

根据振荡器工作的基本原理: 为实现振幅的可调节, 振荡器应工作在电流限制区。为了实现振幅可调, 传统的差分交叉耦合 VCO 电路需含有尾电流源。但尾电流源会引入额外的噪声, 产生衬偏调制效应, 影响震荡波形的稳定。而且传统结构的 LC 振荡电路一般为电压控制模式, 无法对电流大小进行精确控制。本文采用全新电流控制模式的电路结构, 可实现对电流大小的精确控制。根据能量补偿理论, 当

工作频率一定时,振荡幅度大小与注入谐振回路电流大小成正比,因此选用电流控制模式的振荡器结构,可通过精确控制注入 LC 谐振回路补偿电流的大小,实现对振幅的精确控制。

本文设计的振荡器,采用图 1 所示的整体结构,包括电压-电流转换模块、电流增益级、LC 谐振回路和振幅控制模块。其中电压-电流转换模块、电流增益级、LC 谐振回路三部分组成振荡环路,振幅控制模块用以实现对振幅的自动控制。

电压-电流转换模块和电流增益级均由两个完全相同的电路部分组成。电压-电流转换模块用于将

谐振回路两端的电压反馈电压 V_1 、 V_2 转换为易于调节大小的四路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 。电流增益级的作用是将输入的两组电流 I_1 、 I_2 和 I_3 、 I_4 放大至注入 LC 谐振回路两端的补偿电流 I_{11} 、 I_{12} ,并可通过控制电流的增益调节注入电流的大小。振幅控制模块首先检测振幅大小,并通过两个电压比较器确定振幅的范围,然后通过一定的数字控制算法顺序(FSM 方式)调节电流增益级的电流增益以使振幅达到稳定。(电流 I_1 与 I_3 、 I_2 与 I_4 、 I_{11} 与 I_{12} 为对称的三组电流信号。)

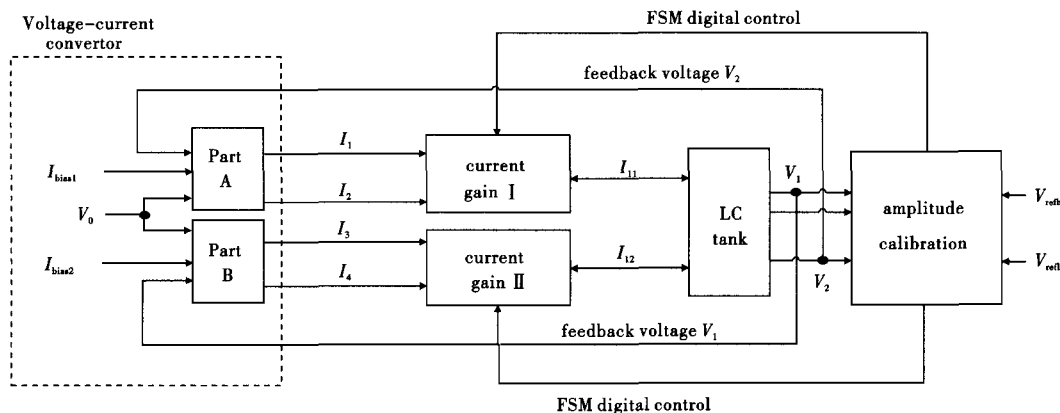


图 1 振荡器的整体结构图

3 CMOS 电路实现

3.1 LC 谐振回路

由于 PCB 加工过程中的工艺离散性,电磁感应线圈的有效串联电阻 R_0 在不同批次的 PCB 板上也有相应的离散性。考虑到振幅的稳定性要求及振幅对 R_0 的依赖关系,电阻 R_0 的这种离散变化通常是不能忽略的。在 LC 振荡回路中,品质因数 $Q = \frac{1}{R_0}$

$\sqrt{\frac{L}{C}}$,由于品质因数直接影响振幅的大小,因此电感线圈的等效串联电阻 R_0 的微小变化会引起振幅的较大变化。

3.2 电压-电流转换模块

电压-电流转换模块是整个振荡电路设计中的核心,它由完全相同的 A、B 两部分组成,其中 A 部分的电路图如图 2 所示。电流 I_{bias1} 是由基准源提供的大小适当的初始偏置电流,电压 V_0 等于 $V_{DD}/2$,电压 V_2 是 LC 谐振回路反馈电压,电流 I_1 和 I_2 是该模块的输出信号, I_1 、 I_2 是电流增益级的输入信号。

在该电路中:

$$I_5 = I_6 + I_7 + I_8 + I_9 = K_1 \cdot I_{bias1}$$

电压 V_0 调制电流 I_6 、 I_7 的变化,同时电压 V_2 调制电流 I_8 、 I_9 的变化。当 MOS 管 MP6 和 MP12 工作在饱和区时, $I_7 = I_8 = K \cdot I_{10} = K_2 \cdot I_{bias1}$ 。电路有两种工作状态:当 $V_0 > V_2$ 时,满足 $I_5 = I_8 + I_9$,因此有:

$$I_9 = I_5 - I_8 = (K_1 - K_2) \cdot I_{bias1} = K_3 \cdot I_{bias1}$$

当 $V_0 < V_2$ 时, $I_5 = I_7 + I_6$,因此:

$$I_6 = I_5 - I_7 = (K_1 - K_2) \cdot I_{bias1} = K_3 \cdot I_{bias1}$$

最终,电流 I_1 、 I_2 由电流 I_9 、 I_6 镜像得到。

3.3 电流增益级

电流以电流镜的方式被放大,电流支路的数量影响总注入电流的精度。最大电流支路始终处于导通状态,为维持启振的基本电流。其余的电流支路,电流大小为初始注入电流 I_1 、 I_2 的 2^n 倍关系 ($n = 1, 2, 3 \dots$),通过数字部分的控制可实现电流的调制即成比例放大。总注入电流的变化范围在 $350 \sim 900 \mu A$ 之间,这些注入电流能够补偿 LC 谐振回路的能量损失。

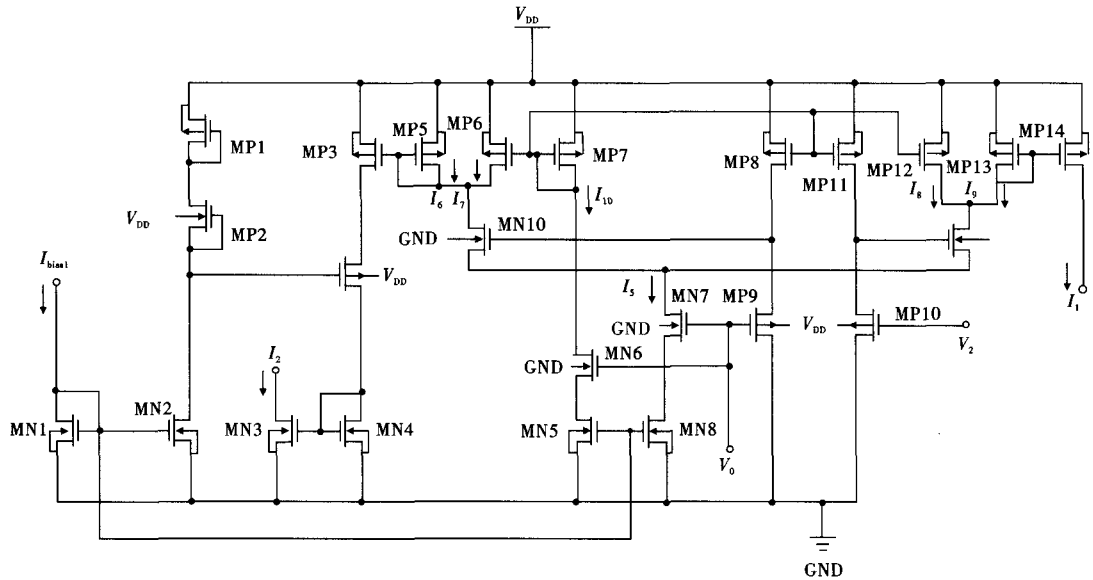


图 2 电压-电流转换模块的 A 部分

由电压-电流转换模块的工作原理可知, I_1 、 I_2 在各自的半个周期内交替提供电流. 由于实际中的电流可能过大或过小, 因此需要能够同时增大或减小电流, 因此电流增益级采用一半导通、一半截止的初始开关状态. 当检测到电流过大或过小时, FSM 按照一定算法依次调节各个开关, 直至电流大小合适. 具体的 FSM 调整过程如自动幅度校准模块的原理所述.

3.4 自动幅度校准模块

如图 3 所示, 自动幅度校准模块^[2-7]的原理图由振幅检测、判别逻辑和以有限状态机(FSM)方式实现的数字控制时序逻辑组成.

振幅检测电路是将全波整流后的波形 $B + A_1 |\sin \omega_0 t|$ (B 为直流偏置电压), 通过低通滤波器滤掉偶次谐波, 将波形转化为有效直流电平, 该直流电平幅值与正弦波峰值成正比. 两路完全反相的正弦振荡波 V_1 、 V_2 分别接入全波整流电路的 M1、M2 管的栅极. 当 $V_1 > V_2$ 时, M1 管导通, M2 管截止, 当 $V_1 < V_2$ 时, M2 管导通, M1 管截止, 考虑 M1、M2 的衬偏效应, 输出电压为

$$V_A = V_{MID} + |A_0 \sin \omega_0 t| - \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L}}} - V_{TH0} -$$

$$\gamma(\sqrt{2\varphi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\varphi_F}).$$

式中, V_{MID} 为振荡器输出波形的中心电平, I_{SS} 为流过 M3 的尾电流大小, $\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_{sub}}}{C_{OX}}$, 其典型值在 $0.3 \text{ V}^{1/2}$ 到 $0.4 \text{ V}^{1/2}$ 之间. 其中 $\gamma(\sqrt{2\varphi_F + V_{SB}} -$

$\sqrt{2\varphi_F}) = \gamma(\sqrt{2\varphi_F + V_A} - \sqrt{2\varphi_F})$ 项中仍含有输出电压 V_A , 因此 V_A 中除了含有偶次谐波外, 还含有其他次谐波信号.

幅值大小判别逻辑电路由两个比较器构成, 两个参考电平 V_{refh} (大) 和 V_{refl} (小) ($V_{refh} - V_{refl} = 10 \text{ mV}$) 分别接比较器的正、负端, 当 B 点的电压 V_B 介于两个参考电平之间时, 两比较器输出 11, 当 B 点的电压 V_B 大于 V_{refh} 时两比较器输出 01, 当 B 点的电压 V_B 小于 V_{refl} 时两比较器输出 10.

输出 11 时, FSM 的输出不作任何变化; 输出 01 时, FSM 控制电流线性增加, 即按照 2、4、6 倍的顺序增加, 直至判别电路输出 11 为止; 输出 10 时, FSM 控制电流线性减小, 即按照 2、4、6 倍的顺序减小, 直至判别电路输出 11 为止. 当振荡器的振幅进入理想范围时, FSM 将停止工作, 并切断自稳幅部分与振荡器的模拟电路连接.

4 仿真及测试结果

考虑到由于 PCB 工艺的离散性引起的 R_0 的离散变化, 针对 R_0 的变化进行的系统的仿真与测试工作. 通过多组自制 PCB 线圈的测量^[8], 室温下电阻 R_0 集中在 1.280Ω 左右. 考虑到 PCB 布线电阻具有较高的温度系数, 电阻 R_0 变化范围比预测值要大. 在实际的测试中, 为了模拟电阻 R_0 的变化, 使用独立的电感元件和高精度可变电阻代替 PCB 线圈. 电阻变化与幅值变化的仿真结果如图 4(a) 所示; 等效测试得结果, 如图 4(b) 所示. 从图 5 可见由于芯片内部布线引起的寄生电阻影响测试结果中的

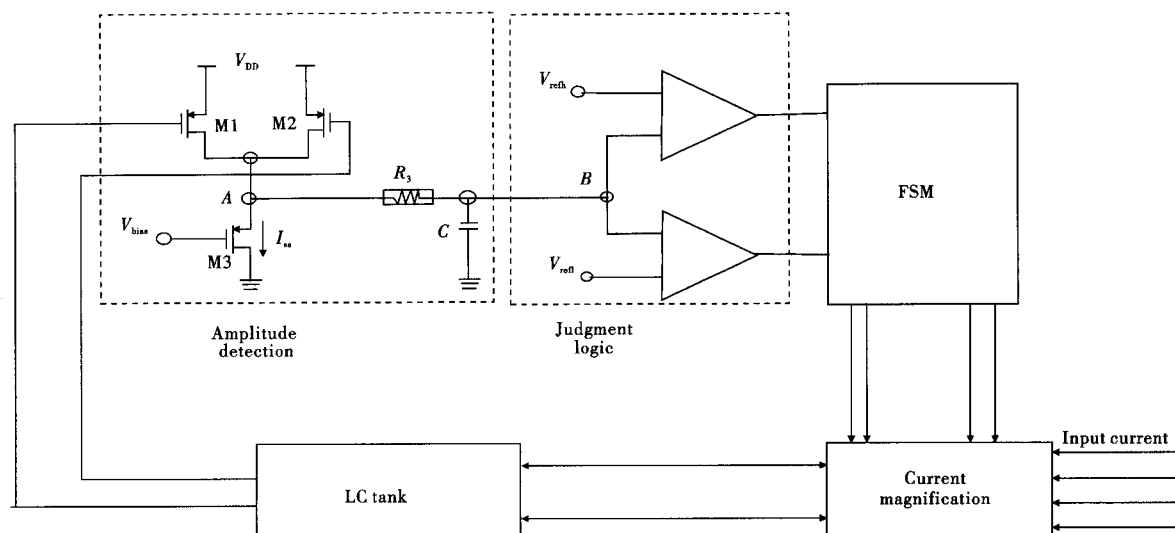


图3 自动幅度校准模块的结构图

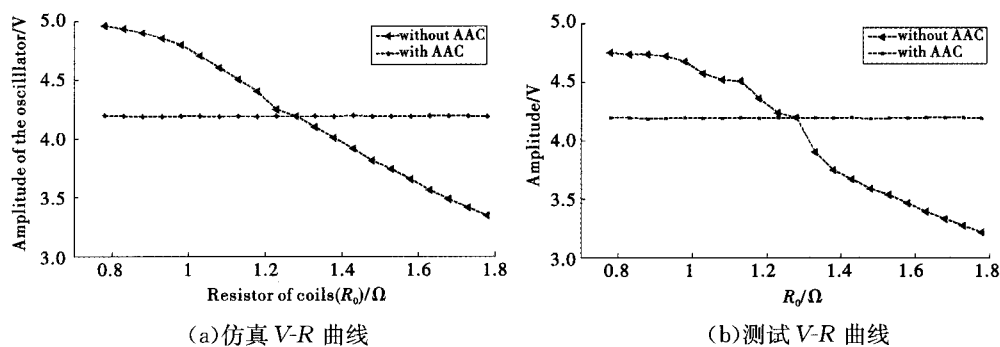


图4 仿真V-R曲线与测试V-R曲线

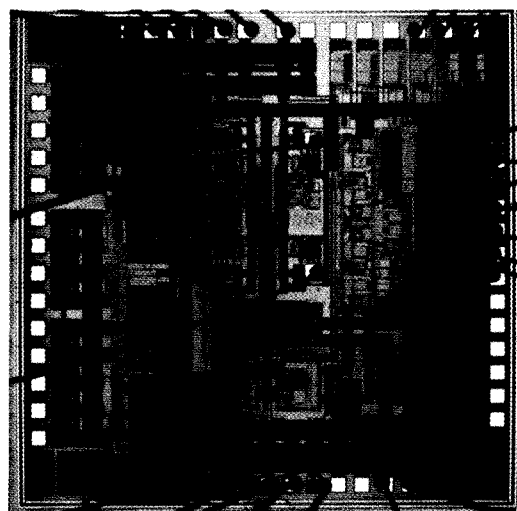


图5 振荡器芯片照片

振荡值小于仿真结果. 最终, 在启动稳幅电路后振幅变化基本稳定在 $\pm 5 \text{ mV}$ 以内.

振荡器的芯片(带 bonding)照片如图5所示.

该振荡器经过标准 $0.35 \mu\text{m}$ CMOS 工艺验证, 有效芯片面积为 $350 \mu\text{m} \times 1200 \mu\text{m}$. 该振荡器工作在 3.3 MHz , 在 5 V 电源电压下消耗 $0.7 \sim 1.9 \text{ mA}$ 的电流. 该振荡电路能够提供在 $\pm 5 \text{ mV}$ 范围内以 4.19 V 为中心的正弦激励, 满足电磁感应式传感器的精度要求.

5 结束语

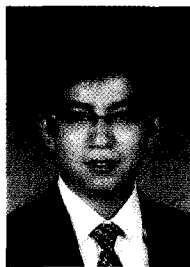
文中介绍了一种带自稳幅功能的新型电流模结构的 LC 振荡器电路, 能够校正由于 PCB 线圈工艺离散型引起的振幅变化. 其中电压-电流转换模块的设计是本文的创新之处, 自稳幅电路能够实现理想的精度. 而且, 该电路能够在高频下工作, 对于 RF 设计是一种有用的结构.

参考文献:

- [1] 张晓燕, 季学武. 电磁感应式转向盘转速传感器的研究[J], 仪器仪表学报, 2009, 30(12): 2551-2556.

- [2] Fatemeh Ataei, Mohammad Yavari. A wideband dual-mode VCO with analog and digital automatic amplitude control circuitry[C]// Electrical Engineering (ICEE), Ireland, 2011.
- [3] Lin He, Yong Ping Xu, Palaniapan M. A state-space phase-noise model for nonlinear MEMS oscillators employing automatic amplitude control[C]// Circuits and Systems I: Regular Papers. Kazan2010, IEEE Transactions on. 2010; 189-199.
- [4] ElKassir B, Wane S, Jarry B, et al. Comparative analysis of CML and MOS differential automatic amplitude Level control regulators for built-in-self-test applications[C]// Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), 2010 IEEE. USA, Oregon, 2010: 228-231.
- [5] Zhuo Zhang, Jun Li, Yuanfeng Sun, et al. A digitally reconfigurable auto amplitude calibration method for wide tuning range VCO design[C]// Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 10th IEEE International Conference on. China; Shanghai, 2010: 542-544.
- [6] Yingying Song, Wen Sun, Jianhui Wu. A 80 ~ 900MHz CMOS VCO with tunable AAC circuit[J]. Solid-State and Integrated Circuit Technology, ICSICT '06. 8th International Conference on. China; Shanghai, 2006;1607-1609.
- [7] Owen Casha, Ivan Grech, Joseph Micallef, et al. Design of a 1.2 V low phase noise 1.6 GHz CMOS buffered quadrature output VCO with automatic amplitude control[C] // Electronics, Circuits and Systems, ICECS'06, 13th IEEE International Conference on. France; Uice, 2006;192-195.
- [8] 唐晓莉, 苏桦, 张怀武. 一种新型无芯 PCB 平面电感器研究[J]. 电子器件, 2002, 25(4): 319-323.

作者简介:



高兴波 男, 硕士. 研究方向为专用集成电路设计.

(上接第 45 页)

6 结束语

本文基于 IEEE Std1500, 从外壳架构、TAM 设计、TAM 控制器设计等几个模块展开芯核的测试性设计, 通过 quartus II 平台仿真验证了设计的合理性. 该方法为芯核的可测试性设计提供了一种参考, 并且基于 JTAG 端口的 TAM 控制器设计, 为兼容 IEEE Std1149.1 结构的电路板测试和兼容 IEEE Std1500 结构的芯核测试提供了结合点, 具有实用意义.

参考文献:

- [1] 王永生. 系统级芯片可测试性结构及其优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [2] 胡瑜, 韩银和. SOC 可测试性设计与测试技术[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 153-162.
- [3] IEEE Std1500, IEEE Standard Testability Method for Embedded Core-Based Integrated Circuits[S]. 2005.
- [4] 杨鹏等. 嵌入式芯核测试标准 IEEE Std 1500 综述[J]. 测控技术, 2006, 25(8): 40-43.
- [5] 郑伟东. 基于 SOPC 的数字电路边界扫描测试研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2009.

作者简介:

李广进 男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为数字芯核可测试性设计.