

一种具有高输出精度及电源电压抑制能力的 CMOS 环形振荡器的设计

叶春晖, 冯勇建*

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 振荡器是许多电子系统的主要部分. 相对于晶体振荡器, 基于 CMOS 工艺的环形振荡器具有良好的抗震动及抗电磁干扰性能, 在车载系统等震动及电磁干扰条件较为严酷的应用场合表现出优势. 本文介绍了一种频率为 8 MHz 的 CMOS 环形振荡器的设计, 工作电压范围是 2.7 ~ 5.5 V, 工作温度范围是 -40 ~ 125 °C. 该振荡器对 CMOS 环形振荡器的固有缺点进行了针对性的设计. 设计中使用的改进的延时单元以及激光校准电路克服了 CMOS 环形振荡器输出频率片间偏差较大的缺点; 使用内部电压源以及电源电压无关的电流源, 克服了其易受电源电压影响的弱点. 该 CMOS 振荡器使用 HSPICE 软件仿真工具设计, 并采用 UMC 0.6 μm 工艺制作, 测试验证结果表明, 电源电压从 2.7 V 变化到 5.5 V, 振荡器输出频率最大变化范围为 ±4 %.

关键词: 环形振荡器; 电源电压无关的电流源; 内部电压源; 输出缓冲; 激光校准

中图分类号: TN 432

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2008)04-0519-05

目前振荡器正广泛应用于许多微电子系统电路中, 例如锁相环、频率综合器以及时钟产生电路. 常见振荡器的有晶体振荡器、LC 振荡器和 CMOS 环形振荡器. 晶体振荡器具有相当高的输出精度, 但是抗震动及抗电磁干扰性能差. LC 振荡器主要应用于产生 GHz 频段的频率, 原因是它的噪声性能较高^[1], 在高频下受电源噪声的影响较小, 但是 LC 振荡器给芯片设计带来了面积和成本增加的问题. CMOS 环形振荡器因其良好的抗震动、抗电磁干扰特性, 以及结构简单、成本低而越来越多应用于集成电路内部, 随着 CMOS 工艺的不断改进, 设计输出稳定的 CMOS 环形振荡器已经成为研究的热点. 针对 CMOS 环形振荡器输出频率片间偏差较大且易受电源电压影响的弱点, 本文给出了一种有较高输出精度及电源电压抑制特性的 CMOS 环形振荡器的结构与原理. 它通过激光校准电路来控制输出频率初始精度; 通过高电源抑制比的电压电流转换器产生稳定的内部电流, 减小电源噪声对振荡器充电时间的影响, 同时对延时单元采用内部恒压源的供电方式, 很大程度地减少了外部电源噪声的影响.

1 CMOS 环形振荡器的原理

收稿日期: 2007-11-21

基金项目: 福建省自然科学基金(2002 H020) 资助

* 通讯作者: yjfeng@xmu.edu.cn

环形振荡器的电路如图 1 所示, 奇数个具有一定延时的反向器组成一个负反馈电路. 根据巴克豪森准则, 如果一个负反馈电路的环路增益满足两个条件:

$$(1) |H(j\omega)| = 1,$$

$$(2) \angle H(j\omega) = 180^\circ,$$

电路就会在频率 ω_0 振荡. 这两个条件是必要的但还不充分^[2]. 在存在温度和工艺变化的情况下, 为了确保振荡, 必须选择环路增益至少 2 倍或 3 倍于所要求的值. 图 1 中的电容可以仅仅是反相器的 MOS 管的寄生电容来实现, 也可以接外部的电容. 反相器的延时就是通过对电容的充放电来实现的. 如图 2 所示, 假定 MOS 管在充放电过程一直处于饱和状态, 则充电时间为

$$T_1 = \frac{2CV_{dd}}{K_p W/L (V_{dd} - |V_{THP}|)^2},$$

放电时间为:

$$T_2 = \frac{2CV_{dd}}{K_n W/L (V_{dd} - |V_{THN}|)^2}.$$

由 N 个反相器组成的振荡器的振荡周期

$$T = 2N(T_1 + T_2),$$

为了简化计算, 假设

$$|V_{THP}| = |V_{THN}| = |V_{TH}|,$$

则振荡频率为

$$f = 1/T = \frac{(V_{dd} - |V_{TH}|)^2}{4N CV_{dd} \left(\frac{1}{K_p L} - \frac{1}{K_n L} \right)},$$

由上式可知, 通过设定电容 C 的值或 MOS 管的宽长比就可以得到所需要的频率, 但是从中也可以看出电

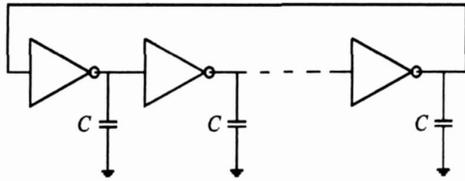


图 1 环形振荡器电路

Fig. 1 The simplified structure of ring oscillator

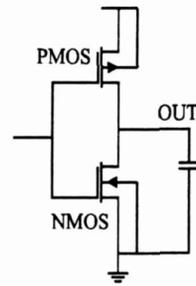


图 2 反相器电路

Fig. 2 The circuit of inverter

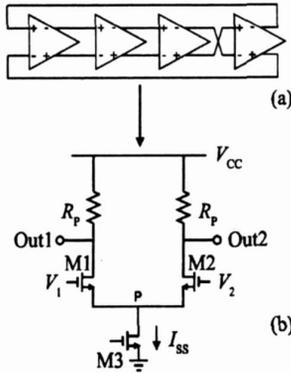


图 3 差动环振荡器电路

(a) 整体拓扑图; (b) 差动延时单元

Fig. 3 The differential ring oscillator

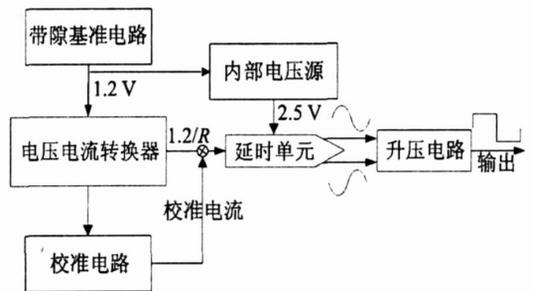


图 4 振荡器的结构框图

Fig. 4 The block diagram of oscillator

源电压 V_{dd} 会对频率产生影响,这是我们不希望得到的。

目前设计中常用的是改进的差动形式的环形振荡器(图 3)。这种差动形式的振荡器和前面介绍的反相器连接的振荡器工作原理相同,其优点是输出波形受噪音的影响更小,而且充放电电流只与偏置电流有关,不受电源电压的影响^[3],这样能改变输出频率的只有电路中的 R 、 C ,这些都是设计中能控制的。另外差动形式振荡器的延时单元可以是偶数,只要将其中的一级接成非反相的,这种灵活性是差动形式的另一个优点。

2 电路结构

图 4 是本设计的电路结构框图,带隙基准电路产生大约 1.2 V 的与温度和电源电压变化无关的基准电压。基准电压经过电压电流转换器后形成与电源电压无关的电流源。该电流源的输出电流与来自激光校准单元的电流相加后作为振荡环路的偏置电流源。这样,振荡环路的偏置电流相对电源电压保持恒定。通过控制激光校准单元的输出电流,可以控制环形振荡器的输出精度。将基准电压经缓冲放大后形成的与电源电压无关的基准电压作为振荡环路的供电电压源,这样,振荡环路的供电电源相对于外部电压源电压保持恒定。振荡环路是整个电路的核心,它由四级差动延时单

元组成,其中三级作为反馈环路,另外一级作为输出缓冲,它的作用是将振荡环路与后续电路相隔离,保持其核心部分的一致性。为了能输出方波脉冲,在电路输出端增加了升压电路,它使输出波形的高低电平分别为电源电压和地电压。

2.1 延时单元

本设计所改进的延时单元如图 5 所示,两个二极管连接的 MOS 管 M3、M4 代替图 3 中的电阻,这是因为 CMOS 工艺中缺乏制作高质量电阻的方式,而且 CMOS 工艺的电阻占用很大的面积,用 MOS 管代替可以节约成本。PMOS 管 M6 提供充放电的偏置电流,

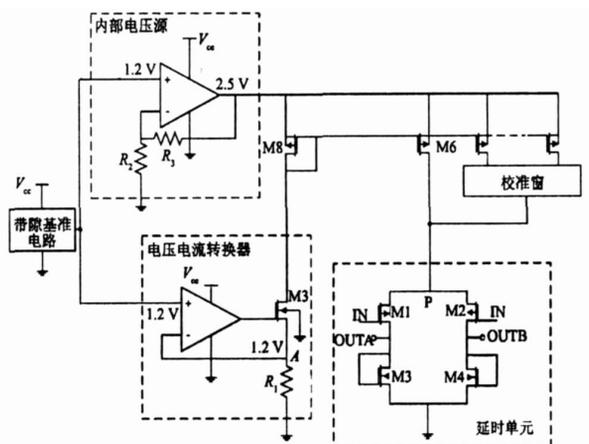


图 5 振荡器的电路结构图

Fig. 5 The schematic diagram of oscillator

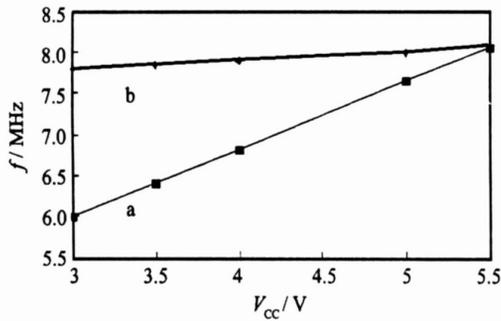


图 6 两种形式的振荡器输出频率随电源电压变化图
a. 反相器形式的振荡器; b. 差分振荡器

Fig. 6 Output frequency vs. power supply voltage of two kinds of oscillator

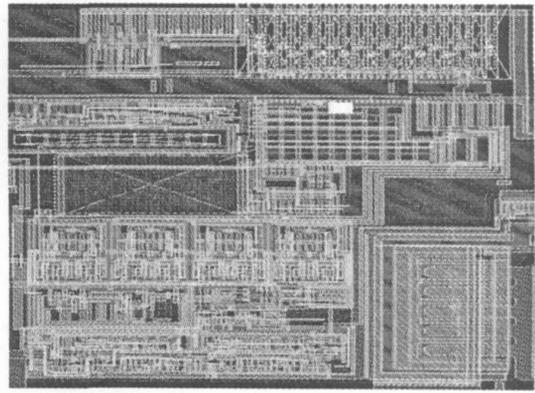


图 7 振荡器的版图

Fig. 7 The layout of oscillator

适当取大该电流镜 MOS 管的 L 值以保证复制电流的良好精确性. $M3$ 和 $M4$ 的宽长比必须设定合理, 宽长比偏大会使延时单元的增益过小而不满足巴克豪森准则, 使得振荡器无法振荡; 宽长比偏小会提高 $M3$ 和 $M4$ 的栅源电压, 使得 OUTA 点、OUTB 点和 P 点的电压随之升高, 从而限制了环形振荡器可以达到的摆幅. 仿真结果表明, 延时单元的充放电电流基本不随电源电压的变化而改变, 满足本设计的要求.

2.2 电压电流转换器

电压电流转换器结构(如图 5)的功能是把基准电压转换成基准电流. 带隙基准电路输出 1.2 V 的稳定电压基准, 放大器和 $M5$ 组成的负反馈电路把 A 点钳制在 1.2 V, 因此得到的基准电流 $I = 1.2 / R$, 设计合理的放大器使得 A 点的电压始终跟随带隙基准的稳定输出, 因此电阻 R_1 是影响基准电流的主要因素, 这就要求在版图布线的时候要特别注意电阻 R_1 的版图, 以保证基准电流的准确性.

2.3 内部电压源

内部电压源的结构(如图 5)功能是把基准电压放大, 可以让环形振荡器正常工作, 并且提供一定的带负载能力. 如图 $V_{out} = 1.2 \times (R_3 + R_2) / R_2$. 运算放大器的设计要注意其必须提供一定的电流源负载及电容负

载的驱动能力并注意其稳定性设计. 在版图时要注意 R_2, R_3 的匹配以保持 V_{out} 输出的精确性.

2.4 激光校准电路

激光校准电路的功能是控制环形振荡器的偏置电流, 从而控制输出频率. 如图 5, 校准窗中有多支开关, 每个开关对应控制一路电流源. 这些开关一半为常开, 一半为常闭, 常闭支上的电流进入环形振荡器的偏置中. 通过激光控制各支上开关的开闭, 就可以达到增大或减小输出电流的目的. 需要注意的是各支的电流须良好配置, 使激光校准既有较大的范围又能达到一定的精度.

3 仿真与测试结果

本设计采用 UMC 公司的 $0.6 \mu\text{m}$ 模型进行仿真, 仿真工具使用 Hspice 软件. 主要模型参数 $V_{tn} = 0.756 \text{ V}$, $V_{tp} = -0.796 \text{ V}$. 图 6 给出了传统的反相器形式的振荡器和改进的差分振荡器的电压频率图, 曲线 a 为反相器形式的振荡器, 曲线 b 为差分振荡器. 从曲线 a、b 可以看出传统的振荡器频率受电源电压变化的影响很大. 当电源电压下降 50% 时, 振荡频率降低了 30% ~ 40%, 这与前面计算频率的公式相吻合, 而改进后的振荡器频率则相当稳定, 电源电压从 5.5 V 变化

表 1 振荡器在不同电压下的测量结果(未经激光校准)

Tab. 1 The test result of oscillator under different voltage

样片编号	输出频率/ MHz				电压范围内的 频率总变化量/ %
	$V_{cc} = 2.7 \text{ V}$	$V_{cc} = 3 \text{ V}$	$V_{cc} = 4 \text{ V}$	$V_{cc} = 6 \text{ V}$	
1	7.570	7.720	7.790	7.890	4.23
2	7.746	7.876	7.996	8.070	4.18
3	7.582	7.685	7.817	7.879	3.92
4	7.692	7.871	7.903	7.991	3.89
5	7.730	7.870	7.822	7.983	3.27

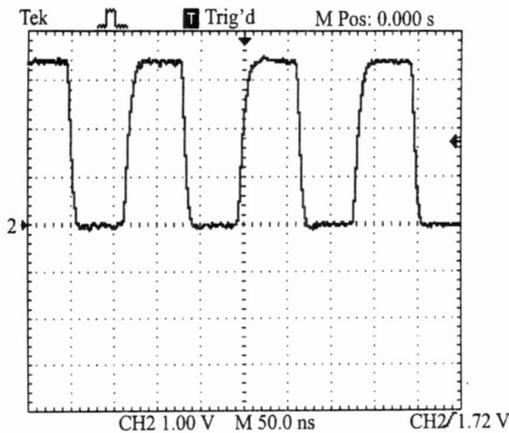


图8 振荡器的输出波形

Fig. 8 Output waveform of oscillator

到 2.7 V, 输出频率的变化只有 1.8%。

电路的版图设计在 Cadence 环境下完成, 版图设计如图 7 所示, 整个电路占用的面积很小, 只有 0.6 mm × 0.4 mm, 有效地降低了成本。

图 8 给出了振荡器测试电路及芯片在示波器上的输出波形。实际测量结果为芯片正常工作的电源电压为 2.7 ~ 6.2 V, 占空比约等于 49%, 输出波形的峰值等于电源电压。表 1 所示的是 5 颗芯片在不同电压下的输出频率, 可以看出输出频率随电源电压的变化在 3% ~ 4%。由于表中的数据是从未经激光校准的芯片得到, 因而呈现出片误差, 经过激光校准其总体精度可以控制在 4% 左右。

4 相位噪声分析

相位噪声和抖动是振荡器十分关键的性能参数, 主要表现在输出频率的波动, 它直接影响定时的精度, 增加了一定信噪比情况下的信号传输的误码率, 不能实现最佳传输。相位和频率的波动因此成为国内外理论界研究热点。目前建立了适用于各种振荡器的模型, 其中最主要的是线性时不变 (LTI) 模型和线性时变 (LTV) 模型^[4-6]。它们都详细解释了各种噪声源转化为相位和幅度变化的机理, 在相位噪声谱线的邻近载频的 $1/f^3$ 区主要受 $1/f$ 噪声影响。低频的 $1/f$ 噪声正是由于有源器件在关断过程中的非线性调制而影响输出频谱的。在 $1/f^2$ 区主要受白噪声的影响。本电路中白噪声主要包括 MOS 管沟道热噪声和栅电阻热噪声, 减小跨导可以降低噪声^[7-8]。作为恒流源的管子则可采用栅长较长的管子。对于栅宽较大的管子可通过交叉型版图设计来减小栅电阻热噪声。对于 $1/f$ 噪声可以通过增大管子面积来减小。电流源适当选择大一

点的管子。一般认为 PMOS 比 NMOS 有更小的 $1/f$ 噪声, 因为前者沟道中载流子为空穴, 后者的为电子。电源噪声和衬底噪声对相位噪声的影响不能忽略, 它与级数有关。由于振荡器每一级都受到相同的干扰, 呈现完全相关的噪声。在频率一定时, 级数越多则电源噪声对相位噪声越多, 所以振荡器一般选择 3 个延时单元^[5]。

5 结论

本文介绍了差动 CMOS 环形振荡器。通过对延时单元的合理设计, 使之在电源电压变化很大的情况下, 振荡频率基本稳定。激光校准电路可将初始输出频率精度控制在 $\pm 2\%$, 并且电路在减小相位噪声上做了改进, 可以应用到数字噪声干扰较大的数模混合微电子系统中。芯片的测试结果证明了本设计的可行性, 由于采用 CMOS 工艺, 本设计具有成本低、功耗小的优点, 有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Chi Baoyong, Shi Bingxue. A 214 GHz CMOS quadrature voltage-controlled oscillator based on symmetrical spiral inductors and differential diodes [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(2): 131.
- [2] Razavi Behzad. Design of analog CMOS integrated circuit [M]. 陈贵灿, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [3] Iravani K, Miller G. VCOs with very low sensitivity to noise on the power supply [C]// Custom Integrated Circuits Conference. California: Proceedings of the IEEE, 1998: 515 - 518.
- [4] Hajimiri A, Lee T H. General theory of phase noise in electrical oscillators [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1998, 33: 179.
- [5] Razavi Behzad. A study of phase noise in CMOS oscillators [J]. IEEE Journal Solid-State Circuits, 1996, 31(3): 331 - 343.
- [6] Hajimiri A, Limotyrakis S, Lee T H. Jitter and phase noise in ring oscillators [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1999, 34(6): 790.
- [7] 王雪艳. 11 GHz CMOS 环形压控振荡器设计 [J]. 半导体学报, 2005(1): 187 - 191.
- [8] Maneatis John G. Low-jitter process-independent DLL and PLL based on self-biased techniques [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1996, 31(11): 1723 - 1732.

The Design of a CMOS Ring Oscillator with Superior Output Accuracy and Resistance to Power Supply Voltage

YE Chun-hui, FENG Yong-jian*

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract : Oscillator is an integral part of many electronic systems. Unlike crystal oscillator circuits, the CMOS ring oscillator is highly resistant to vibration and EMI, this feature makes it a good choice in the high vibrancies or EMI occasions such as automobile environments. An 8 MHz CMOS ring oscillator operates under supply voltage range 2.7 ~ 5.5 V and temperature range -40 ~ 125 is presented. Special design considerations are included for the disadvantage in CMOS ring oscillator. The improved delay cell and laser trim circuit increase the output frequency accuracy. The internal power supply and the power supply voltage independent current source reduce CMOS ring oscillator's reliance on power supply voltage. This oscillate circuit is designed with HSPICE tool, and be fabricated in UMC 0.6 μm process. Test results illustrate that output frequency vary $\pm 4\%$ from the nominal frequency 8 MHz in the whole power supply voltage range 2.7 ~ 5.5 V.

Key words : ring oscillator; power supply voltage independent current source; internal power supply; output buffer; laser trim

· 简 讯 ·

2007 年度厦门大学获专利权项目一览表(III)

序号	专利号	专利类型	发明创造名称	发明人
33	200510085673.2	发明	壳囊孢菌素 B 在制备抗真菌药物中的应用	徐庆妍, 黄耀坚, 郑忠辉, 宋思扬, 苏文金
34	200510085694.4	发明	基于聚合物/粘土插层改性技术的隧道防火涂料修饰剂及其制备方法	戴李宗, 张卓, 庄勋港, 雷光财, 黄晓平, 许一婷
35	200410084811.0	发明	化合物球形 羟基氧化镍与制备方法及其应用	廖代伟, 符显珠, 李俊, 林敬东, 卢成慧
36	200510053239.6	发明	锯缘青蟹抗菌肽及其基因和基因的克隆方法	王克坚, 黄文树, 李少菁, 王桂忠
37	200510078718.3	发明	一种松材线虫疫木的处理装置及其处理方法	潘沧桑, 秦复牛, 张慧波, 陈阳, 林竞
38	200510074523.1	发明	全光纤磁光开关	翁梓华, 黄元庆, 陈智敏, 朱赞
39	200510078731.9	发明	1052nm 连续波瓦级 Nd:YAG 全固体激光器	蔡志平, 汪玉树, 陈昭炫, 邱万兴
40	200510088063.8	发明	复合微孔聚合物电解质及其制备方法	姜艳霞, 陈作锋, 陈声培, 孙世刚
41	200510118987.8	发明	牡蛎壳填料硝化曝气生物滤池	熊小京, 叶志隆, 芦敏, 欧阳通
42	200510129960.9	发明	氧化锡空心纳米材料的制备方法	匡勤, 周樾, 徐韬, 林水潮, 江智渊, 谢兆雄, 谢素原, 黄荣彬, 郑兰荪
43	200510000290.0	发明	一种邻苯二酚检测传感器与制备方法及其应用	许一婷, 戴李宗, 陈江枫, 吴辉煌
44	200510086119.6	发明	无人驾驶自动返回式深潜器	王德祥, 柯才焕
45	200510118988.2	发明	磷酸铁锂正极材料及其制备方法	董全峰, 刘善科, 郑明森, 孙世刚, 詹亚丁, 林祖赓
46	200620062461.2	实用新型	多柱式固相萃取装置	陈浩, 孙小颖, 郭祥群
47	200410082377.2	发明	合成气制低碳混合醇碳纳米管促进钴-铜基催化剂及其制备方法	张鸿斌, 董鑫, 梁雪莲, 林国栋
48	200510078717.9	发明	激光二极管端面泵浦平凸非稳腔激光器	蔡志平, 许惠英, 马沂
49	200410064377.X	发明	N-酰基-天冬氨酸-二肽衍生物制备方法	陈安齐, 张金钟, 梁希

厦门大学科技处