

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.05.007

一种频率与温度无关的片内 RC 振荡器设计

赵宝财¹, 赵宏亮¹, 赵建中²

(1. 辽宁大学 物理学院, 辽宁 沈阳 110031; 2. 中国科学院微电子研究所 智能感知中心, 北京 100029)

摘要:文章基于 SMIC 0.18 μm 互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺,设计了一种频率与温度无关的片内电流模 RC 振荡器,该振荡器采用 1.8 V 电源供电,输出频率为 100 MHz,振荡器主要由温度补偿电流源、开关电容充放电回路、反相器比较延时单元以及时钟输出单元组成。通过 Cadence Spectre 仿真验证表明:在 $-40\sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,TT 工艺角条件下,振荡器的输出频率范围为 100.06~100.16 MHz,频率随温度变化为 0.10%,用温度系数表示为 $6.06\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;SS 工艺角条件下,振荡器的输出频率范围为 99.90~100.23 MHz,频率随温度变化为 0.33%,用温度系数表示为 $20.00\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;FF 工艺角条件下,振荡器的输出频率范围为 99.96~100.07 MHz,频率随温度变化为 0.11%,用温度系数表示为 $6.67\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

关键词:RC 振荡器;温度补偿;温度系数;电流模

中图分类号:TN432 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)05-0616-04

A design of on-chip RC oscillator with temperature-independent frequency

ZHAO Baocai¹, ZHAO Hongliang¹, ZHAO Jianzhong²

(1. School of Physics, Liaoning University, Shenyang 110031, China; 2. IntelliSense Center, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract:Based on the SMIC 0.18 μm complementary metal oxide semiconductor (CMOS) process, this paper designs an on-chip current-mode RC oscillator whose frequency is independent of temperature. The oscillator adopts a 1.8 V power supply and the output frequency is 100 MHz. The oscillator is mainly composed of a temperature-compensated current reference, a switched capacitor charging and discharging circuit, an inverter comparison delay unit and a clock output unit. The simulation verification by Cadence Spectre shows that in the range of $-40\text{ }^\circ\text{C}$ to $125\text{ }^\circ\text{C}$, the output frequency range of the oscillator is 100.06-100.16 MHz under the condition of TT process angle, and the frequency changes with temperature by 0.10%, expressed as $6.06\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ by the temperature coefficient; under the condition of SS process angle, the output frequency of the oscillator is in the range of 99.90 - 100.23 MHz, and the frequency changes with temperature by 0.33%, expressed as $20.00\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ by the temperature coefficient; under the condition of FF process angle, the output frequency of the oscillator is in the range of 99.96-100.07 MHz, and the frequency changes with temperature by 0.11%, expressed as $6.67\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ by the temperature coefficient.

Key words:RC oscillator; temperature compensation; temperature coefficient; current mode

得益于通讯、物联网、传感器和生物医学等领域的不断发展,信息技术的不断积累和半导体制造工艺的更新迭代,集更低成本、更低功耗以及更

稳定等众多优点于一体的片上系统^[1](system on circuits, SoC)芯片逐渐成为芯片发展的一个重要方向。而为这些片上电子系统提供一个性能稳定

收稿日期:2021-02-25;修回日期:2021-04-22

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX02301002001)

作者简介:赵宝财(1994—),男,甘肃庆阳人,辽宁大学硕士生;

赵建中(1983—),男,甘肃金昌人,博士,中国科学院微电子研究所高级工程师,通信作者,E-mail:zhaojianzhong@ime.ac.cn.

可靠的高精度时钟模块成了迫切需求。

晶体振荡器、LC 振荡器、环形振荡器和 RC 振荡器是最常用的 4 种振荡器^[2-4],其中:晶体振荡器受电源电压及温度波动的影响极小,但是晶体振荡器体积较大无法集成;LC 振荡器由于电感的存在,在标准互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺下实现需要增加额外的工艺步骤来提高片上电感的品质因数 Q ,并且片上集成电感的面积也比较大,会导致成本大幅度增加;环形振荡器方便采用标准 CMOS 工艺制造^[5],芯片面积较小,成本也较低,但环形振荡器有较强的非线性,抗干扰能力差,功耗较大,其振荡频率受温度变化影响明显;RC 振荡器作为振荡器的重要分支,由于其易于使用标准 CMOS 工艺设计制造,成本低廉、功耗较低、结构简单等优点一直备受人们关注,但 RC 振荡器存在输出频率随温度变化的缺陷,难以达到足够的精度并且输出频率较低,从而限制了其应用范围。

1 经典 RC 振荡器原理及误差分析

RC 振荡器可分为电压模和电流模 2 种,两者振荡频率均基于 RC 时间常数确定。电流模 RC 振荡器主要由 2 个镜像比例为 1:1 的电流源 I_1 和 I_2 、1 对匹配性良好的 NMOS 管 M_1 、 M_2 、电阻、电容、时钟缓冲器以及时钟输出 buffer 组成。虽然电流模 RC 振荡器没有比较器,但由于需要触发时钟 buffer 来切换电路状态,因此环路延时的影响依然不能忽略,要降低振荡频率的温度系数^[6-9],就必须对环路延时的温度漂移进行补偿。

电流模 RC 振荡器的原理框图如图 1 所示,参考电压 V_{ref} 是电流 I_1 流经电阻 R 产生的压降,初始态 S_1 断路,电流源 I_2 对电容 C 充电,当电容 C 两端的压降 V_C 逐渐增大,直到 V_C 等于 V_{ref} 时, M_2 漏极电压 V_{com} 与 M_1 管的漏极电压也相等,此时 V_{com} 将触发时钟缓冲器, V_{rst} 被拉到高电平,开关 S_1 闭合,与此同时电容 C 对地迅速放电 V_C 被置 0,从而 V_{com} 也下降,再次触发时钟缓冲器, V_{rst} 被拉低,开关 S_1 再次断开, V_C 再次增大重复前述过程产生振荡。

由于时钟缓冲器的输出电压 V_{rst} 是 1 个短暂的高电平脉冲,通过在其后面连接 1 个二分频连接的 D 触发器最终得到一个 50% 占空比的矩形波。

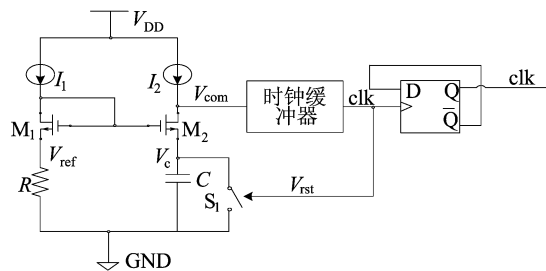


图 1 电流模 RC 振荡器的原理框图

电流模 RC 振荡器的工作波形如图 2 所示,振荡周期为 $T=2(\tau_{RC}+\tau_D)$,其中: τ_{RC} 为 RC 时间常数; τ_D 为环路延时。处于低频工作的 RC 振荡器,由于环路延时在振荡器整个振荡周期内所占的比例较小,此时环路延时对振荡器输出频率所带来的不利影响不太明显;然而当振荡器工作频率较高时,环路延时在振荡器整个振荡周期内所占的比例大大提高,此时环路延时对振荡器输出频率的影响不能忽略,更糟糕的是环路延时与温度变化具有很强的相关性,使得振荡器的输出频率对温度的变化影响很大,因此要提高输出频率的稳定性,对环路延时的温度漂移进行补偿就变得尤为重要。

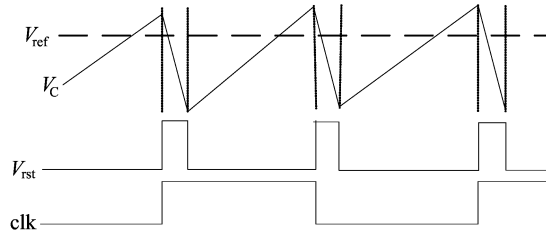


图 2 电流模 RC 振荡器的工作波形图

本文采用单相电流模 RC 振荡器拓扑结构,研究的重点是对电流模 RC 振荡器的非理想因素进行温度补偿,降低振荡频率的温度漂移,使 RC 振荡器在较高频率工作时仍然能得到稳定的输出频率,从而拓展 RC 振荡器的应用范围。

2 频率与温度无关的片内 RC 振荡器设计

本文采用的温度补偿电流源 I_0 的结构主要包括:用于产生负温度系数电流 I_{CTAT} 的负温度系数电流产生电路;用于产生正温度系数电流 I_{PTAT} 的正温度系数电流产生电路;用于避免零电流简并状态的启动电路;用于将正温度系数电流和负温度系数电流相加产生最终输出电流 I_{ref} 的电流输出电路。温度补偿电流源电路结构如图 3 所示。

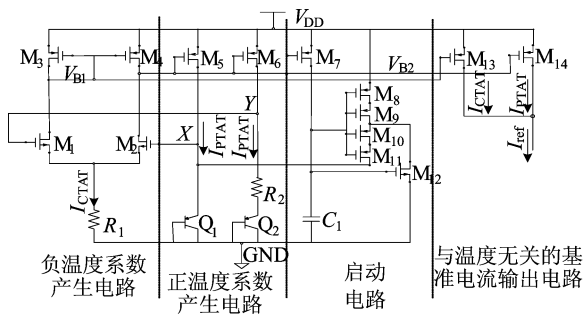


图 3 温度补偿电流源电路

其中产生正温度系数电流电路的工作原理是利用电路构成负反馈时放大器正负输入端虚短,即 X 和 Y 点的电压相等的特点,设置 M₅ 和 M₆ 管子的尺寸相同, Q₂ 的面积是 Q₁ 的 n 倍,由于 V_{BE1} 与 V_{BE2} 之差为一个正温度系数电压,因此便在电阻 R₂ 上得到了一个电流大小为 $I_{R_2} = (V_T \times \ln n) / R_2$ 的正温度系数电流。负温度系数电流产生电路的工作原理也是由于电路构成负反馈,放大器正负输入端虚短, X 和 Y 点的电压相等, M₁ 与 M₂ 的栅电压相等,即有 $V_{GSM1} = V_{GSM2} = V_X = V_{EB1}$, 于是流过电阻 R₁ 上的电流大小为 $I_{R_1} = (V_{GSM1} - V_{GSM1}) / R_1 = (V_{EB1} - V_{GSM1}) / R_1$, 又 V_{EB1} 具有负温度系数,因此 I_{R1} 为负温度系数电流,流过 M₃、M₄ 的电流大小相等为 I_{R1}/2, 且均为负温度系数电流,最后通过电流叠加模块将正负温度系数电流以合适的比例叠加产生 I_{ref} 输出电流。

本文设计的频率与温度无关的单相电流模片内 RC 振荡器的整体结构如图 4 所示,主要分为温度系数互补电流源 I₀、开关电容充放电回路、反相器比较延时单元以及时钟输出单元。

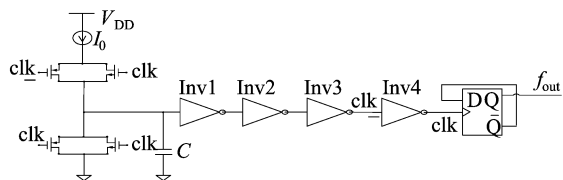


图 4 带温度补偿的电流模 RC 振荡器电路图

电路产生稳定振荡的原理是:初始上电时,电容 C 内部储存的电荷为 0, I_{NV1} 输入低电平,输出高电平, I_{NV2}、I_{NV3} 的驱动能力依次增大, I_{NV4} 的输入为高电平记为 clk₋, 输出为低电平记为 clk, 此时电流源 I₀ 对电容 C 充电,随着电容 C 内的电荷增加 I_{NV1} 的输入电平逐渐增大,此时 clk₋ 为高电平, clk 为低电平,始终保持不变,当电容 C 内的

电荷累积到使得 I_{NV1} 的输入电平达到 I_{NV1} 的翻转点时, I_{NV1} 的输出由之前的高电平被拉低到一个较低电平, I_{NV1} 输出的这个电平变化信息被之后的 I_{NV2} 和 I_{NV3} 逐级放大,使得 I_{NV4} 产生短暂的电平翻转脉冲,即 clk₋ 为低电平、clk 为高电平,这个短暂的翻转脉冲使得电容 C 开始对地快速放电, I_{NV1} 的输入电平迅速降低到 I_{NV1} 的翻转点以下, I_{NV1} 的输出由之前的低电平被拉高,这个拉高的信息再次经过 I_{NV2} 和 I_{NV3} 放大使得 clk 变为高电平, clk 变为低电平,电流源 I₀ 再次对 C 开始充电,如此往复循环。由于反相器比较延时单元的输出电压 clk 的占空比很低,必须在 clk 后面接二分频方式连接的 D 触发器作为时钟输出单元,才能最终得到占空比 50% 的输出频率。

3 仿真结果分析

本文设计的频率随温度变化极小的单相电流模片上 RC 振荡器基于 SMIC 的 0.18 μm CMOS 工艺,电源电压 1.8 V,使用 Spectre 仿真工具对电路进行仿真验证。

采用 PSS 仿真方式,分析带温度补偿的电流模 RC 振荡器的输出频率随温度变化波形,如图 5 所示,在 -40~125 °C 温度范围内,带温度补偿的电流模 RC 振荡器的输出频率在 100 MHz 附近,且随温度变化极小。

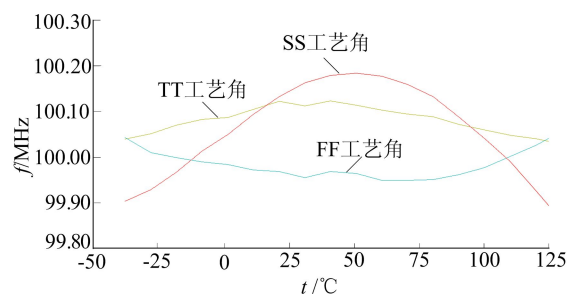


图 5 带温度补偿的电流模 RC 振荡器输出频率的温度特性曲线

本文所设计的电流模 RC 振荡器输出频率的温度特性见表 1 所列,从表 1 中可以看出,温度范围为 -40~125 °C,在 TT 工艺角下,振荡器输出频率为 100.06~100.16 MHz,输出频率随温度变化百分比为 0.10%,用温度系数表示为 $6.06 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;在 SS 工艺角下,振荡器输出频率为 99.90~100.23 MHz,输出频率随温度变化百分比为 0.33%,用温度系数表示为 $20.00 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;在 FF 工艺角下,振荡器输出频率为

(下转第 640 页)

- 华南理工大学, 2019.
- [6] 杨鹏飞, 王泉. 片上网络异构多核系统任务调度与映射[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 72-76, 125.
- [7] 赵姗, 杨秋松, 李明树. 性能非对称多核处理器下异构感知调度技术[J]. 软件学报, 2019, 30(4): 1164-1190.
- [8] 彭晋韬. 拥塞避免的批量点对点通信并行调度方法研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2020.
- [9] 唐麒. 多处理器片上系统实时流应用并行调度与性能分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [10] 王煜炜, 刘敏, 马诚, 等. 面向网络功能虚拟化的高性能负载均衡机制[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(4): 689-703.
- [11] 王艳. 多核计算系统中任务的调度和数据分配方法与技术[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [12] DIMITROULAKOS G, GALANIS M D, GOUTIS C E. Alleviating the data memory bandwidth bottleneck in coarse-grained reconfigurable arrays[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Application-Specific Systems, Architecture Processors (ASAP'05). [S. l.]: IEEE, 2005: 161-168.
- [13] 樊金斗. 高性能路由器中存储体系结构的研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [14] CAPALIJA D, ABDELRAHMAN T S. Microarchitecture of a coarse-grain out-of-order superscalar processor[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(2): 392-405.
- [15] XIAO J Q, LV P, LOU M, et al. A task-level superscalar microarchitecture for large scale chip multiprocessors[C]//2014 IEEE 20th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications. [S. l.]: s. n., 2014: 1-8.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 618 页)

99.96~100.07 MHz, 输出频率随温度变化百分比为 0.11%, 用温度系数表示为 $6.67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。仿真结果表明, 本文设计的单相电流模片上 RC 振荡器的输出频率对温度变化不敏感。

表 1 振荡器输出频率变化范围

工艺角	输出频率/ MHz	频率随温度 变化百分比/%	温度系数/ ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
TT	100.06~100.16	0.10	6.06
SS	99.90~100.23	0.33	20.00
FF	99.96~100.07	0.11	6.67

在 TT 工艺角下进行瞬态仿真, 得到振荡器的输出波形如图 6 所示, 仿真结果显示本文所设计的带温度补偿的电流模 RC 振荡器的输出波形为方波, 占空比为 50%。

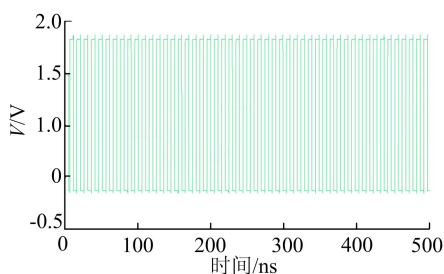


图 6 带温度补偿的电流模 RC 振荡器的输出波形

温度变化敏感的缺点, 设计了一款单相电流模片上 RC 振荡器。通过仿真验证表明, 本文所设计的带温度补偿的电流模 RC 振荡器不但获得了高达 100 MHz 的输出频率, 而且在 $-40 \sim 125 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温度范围内输出频率随温度变化极小, 极大改善了经典 RC 振荡器的不足, 拓展了 RC 振荡器的应用范围。

参 考 文 献

- [1] 朱明旺. 低压低功耗 CMOS 振荡器的研究与设计[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- [2] 胡二洋. 应用于 MCU 的低功耗高稳定度 RC 振荡器设计[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [3] 毕查德·拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 391-430.
- [4] 袁涛, 王华, 方健, 等. 一种 CMOS 电流控制振荡器的分析与设计[J]. 微电子学, 2005(6): 662-664.
- [5] 王文龙. 一种 CMOS 数字校准片上 RC 振荡器的设计[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [6] 滕谋艳. 使用 PTAT 电流补偿的基准电流源[J]. 科技视界, 2014(33): 106, 139.
- [7] 陈富涛. 一种高精度低功耗 RC 振荡器设计[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(6): 74-78.
- [8] 戴罡. 片上 RC 张弛振荡器的研究与设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [9] 唐俊龙, 罗磊, 肖仕勋, 等. 一种基于求和型 CMOS 基准电流源的 RC 振荡器[J]. 电子世界, 2019(3): 11-13.

(责任编辑 李 凯)

4 结 论

本文针对传统 RC 振荡器输出频率较低且随