

采用两步式数字校准的低温漂松弛振荡器

裴磊, 韩佳利, 张程跃, 齐欢欢, 张杰, 许江涛, 王晓飞, 张鸿

(西安交通大学微电子学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统片上振荡器设计面临的时钟频率难以实现高精度校准的问题, 提出基于二分搜索法的数字校准方法, 实现了振荡频率校准并提高了校准的线性度。校准算法采用了粗校准加细校准的两步式校准过程, 大大增加了频率校准范围。针对振荡频率的温度漂移问题, 提出了新的温度补偿方案, 在传统一阶温度补偿的基础上, 增加了亚阈值电流自补偿的高阶补偿机制, 大大降低了温度变化对输出频率的影响。在校准电路的设计中, 合理设置开关电阻阵列的温度系数以保证输出频率的校准不影响输出频率的温度稳定性。对振荡器版图提取了寄生参数, 并进行了仿真, 仿真结果表明: 经过所提频率校准和温度补偿方案, 典型情况下振荡频率误差小于 0.04%; 在 $-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 温度范围内频率误差小于 $\pm 0.12\%$; $2.5 \sim 5.5\text{ V}$ 电源电压范围内频率随电源电压变化误差小于 $\pm 0.13\%$; 电路工作电流为 $47.6\text{ }\mu\text{A}$, 完成一次校准时长不超过 2.7 ms 。该振荡器可用于物联网、处理器等应用, 可以取代片外晶体振荡器, 能够降低系统成本和体积。

关键词: 松弛振荡器; 高精度; 两步式数字校准; 高阶温度补偿

中图分类号: TN432 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202408017 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0166-09

A High-Precision Low-Power and Low-Temperature-Drift Relaxation Oscillator with Two-Step Digital Calibration

PEI Lei, HAN Jiali, ZHANG Chengyue, QI Huanhuan, ZHANG Jie,

XU Jiangtao, WANG Xiaofei, ZHANG Hong

(School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Given the difficulty in achieving high-precision clock frequency calibration of traditional on-chip oscillators, this study proposes a digital calibration method based on a binary search algorithm and realizes frequency calibration with high linearity for a relaxation oscillator. The calibration algorithm adopts a two-step calibration approach, consisting of coarse calibration and fine calibration, which significantly expands the frequency calibration range. To solve the problem of temperature drift of oscillation frequency, a new temperature compensation scheme is proposed in this study. This scheme introduces a high-order compensation mechanism of subthreshold current self-compensation on the basis of the traditional first-order temperature compensation, which greatly reduces the influence of temperature changes on the output frequency. Additionally, the temperature coefficient of the switch resistor array is reasonably set to ensure that the frequency-temperature characteristics of the oscillator frees from the negligible

收稿日期: 2024-01-09。 作者简介: 裴磊(2000—), 男, 硕士生; 张鸿(通信作者), 男, 教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62174149); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2404902)。

网络出版时间: 2024-04-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240425.0928.002>

effect by the calibration of the output frequency. Parasitic parameters are also extracted for the oscillator layout and simulated. The simulation results demonstrate that with the frequency calibration and temperature compensation schemes in place, the frequency error is lower than 0.04% under typical circumstances. The frequency errors are less than $\pm 0.12\%$ and $\pm 0.13\%$ within the temperature range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, and supply voltage range of 2.5 V to 5.5 V, respectively. The overall circuit operates with a current of $47.6\text{ }\mu\text{A}$, and the duration of a single calibration process is shorter than 2.7 ms. The oscillator can be used in applications such as IoT and microprocessors to replace crystal oscillators, thereby decreasing the system cost and volume.

Keywords: relaxation oscillator; high precision; two-step digital calibration; high-order temperature compensation

随着生物学传感器、微型计算机以及高速接口等应用系统不断小型化,用片上可实现的低成本、小面积、可校准的振荡器来替代传统晶体振荡器成为近年来振荡器设计领域的研究热点^[1-3]。对于广泛的中低频集成电路,电感电容型(LC)振荡器需要较大的电容以及电感,难以在片内集成^[4];环形振荡器精度较低,增加了校准模块以及补偿模块的设计难度,达不到参考时钟要求的精度。相比而言,松弛振荡器易于调节和设计,更适用于中低频的场景。然而,由于工艺偏差以及寄生参数等非理想因素的影响,松弛振荡器的频率校准和温度补偿的片上实现方案往往面临校准精度与电路开销的折衷;其次,松弛振荡器中的比较器延时随温度、电源电压波动,导致输出时钟频率变化,增加了频率校准的难度;振荡频率随时间漂移也是振荡器需要解决的重要问题。

针对松弛振荡器的设计问题,文献[5]提出了一种利用反转电容放电机制过滤比较器噪声的方法,通过在电路中引入负反馈机制,使得振荡器的周期更加稳定,该机制降低了振荡器对于比较器、基准电压稳定度的设计要求。但是,该结构中包含电流源,因此仍然存在频率的时漂问题。文献[6]提出了一种摆幅增强型的差分松弛振荡器,通过使单个电容上的电压摆幅加倍,使得差分电压摆幅变为原有的4倍,从而降低比较器失调对振荡器输出频率的影响;大的电压摆幅对比较器和电流源的噪声起到了抑制作用,但该结构没有解决输出频率的温漂问题,需要引入额外的补偿和校准电路。文献[7]提出的松弛振荡器通过采用集成误差反馈机制,抑制了比较器延时对于振荡频率的影响,通过反馈机制动态调整比较器翻转条件,使得输出频率更加稳定,但是该结构输出时钟频率对于电源电压的变化较敏感。文献[8]提出了基于平均电压反馈机制(VAF)的松

弛振荡器,削弱了比较器延时波动对于振荡频率的影响,并且其天然地抑制了电源电压波动而产生的输出频率偏移,但是该文献中频率校准方案较复杂,难以实现片上校准,其温度补偿效果欠佳。文献[9]为了能够降低滤波器的低频闪烁噪声,使用了斩波技术(Chop)。闪烁噪声实际上可以等效为一个缓慢的时变失调电压,而斩波技术将其搬移至高频,再被系统的低通特性滤除,从而可以显著降低闪烁噪声对振荡器相位噪声的贡献。

本文在 VAF 松弛振荡器的基础上引入了额外的低功耗电源(LDO)进一步降低电源电压波动的影响,并提出了两步式片上数字频率校准方案,使用粗校准加细校准的方式,实现宽范围、高精度的频率绝对精度的校准。在一阶温度补偿的基础上采用亚阈值电流自补偿的方式实现更好的温度特性。本文在反馈环路中引入了斩波电路以降低闪烁噪声对输出时钟的影响,基于 180 nm CMOS 工艺,设计了一款高精度、低功耗且可校准的片上松弛振荡器。

1 基于 VAF 的松弛振荡器原理

本文的松弛振荡器基于 VAF 机制设计,其基本电路结构如图 1 所示。图中 I_{fb} 、 I_{comp} 代表积分器运放与比较器的偏置电流,CLK 为输出时钟,NRST 为复位信号。VAF 松弛振荡器左右两部分轮流对电阻 R 、电容 C 构成的路径进行充放电,一侧比较器完成一次跳变后也就代表着半个振荡周期的结束,在反复迭代的过程中,输出电压 V_{osc} 的电压平均值最终趋近于参考电压 V_{ref} ,若电阻 R_1 远大于电阻 R ,则对电容 C 进行充电时, V_{osc} 与时间 t 的关系为

$$V_{osc}(t) = V_{dd}(1 - e^{-t/RC}) \quad (1)$$

式中: V_{dd} 为电源电压。

由于电压 V_{osc} 的平均值在经过多个周期过后会

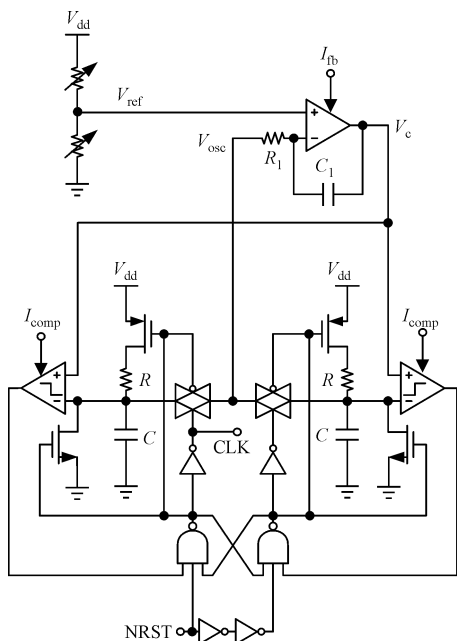


图1 采用VAF机制的松弛振荡器结构

Fig. 1 Relaxation oscillator structure with VAF mechanism

接近于 V_{ref} ，因此有

$$\frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{osc}(t) dt = V_{ref} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)，可得

$$\frac{(1-\alpha)T}{2RC} = 1 - e^{-T/2RC} \quad (3)$$

$$\frac{1-\alpha}{2fRC} = 1 - e^{-1/2fRC} \quad (4)$$

式中： T 为振荡周期； f 为振荡频率； $\alpha = V_{ref}/V_{dd}$ 。由式(4)可知：振荡频率 f 仅与时间常数、电压比例 α 有关，由于 VAF 环路会自适应调整低通滤波器 (LPF) 的输出 V_c ，使得 V_{osc} 的平均值与 V_{ref} 相等，从而得到稳定的期望频率，这一特性极大地降低了比较器延时对输出频率的影响，从而降低了比较器的设计要求和功耗开销；振荡频率与 V_{ref} 、 V_{dd} 的比值 α 有关，所以当产生这两个电压的 LDO 电路结构相同时，电源波动对振荡频率的影响被天然地抑制了，这意味着 LDO 的性能要求随之降低；振荡频率与 RC 直接相关，而 RC 会受到工艺波动的影响，如果不加以校准则无法得到准确的输出频率。为了精确控制输出频率的值，利用 α 来补偿 RC 参数的工艺波动，从而实现两步式的输出频率校准。

2 电路设计

2.1 总体结构

基于 VAF 的松弛振荡器的基本原理，本文设

计的振荡器整体结构如图 2 所示。所提松弛振荡器在 VAF 机制的基础之上使用了两个相同结构的低功耗 LDO^[10]，一路用于产生电压 V_{ido} 给振荡器核心电路供电，另一路 LDO 则用于产生电压 V_{ido_trim} 给 V_{ref} 所在电阻串供电。通过片上的数字校准电路以及外界输入的 1 MHz 参考时钟，使用先粗校再细校的方式产生多位频率修调码 F_{trim} ，调整电压比例 α 的大小，可以实现宽带的调频范围，最终得到高精度的输出时钟。

本文参考温度传感器设计中使用的两点温度校准法^[11]，根据频率校准后振荡器在除室温外两个温度点处的输出频率测量值，通过一阶线性近似即可得到一阶温度系数，从而确定一阶温度补偿的区间，得到多位一阶温度补偿码 T_{trim} ；通过该温度补偿码调整振荡器中电阻 R 的温度特性，从而完成振荡器的一阶温度补偿。在此基础之上，本文提出了一种高阶温度自补偿的方法，利用低温段以及高温段的 MOS 亚阈值指数电流，可以实现低温段和高温段的温度补偿，得到优良的频率-温度特性。振荡器中还包括了带隙基准，用于给振荡器核心电路产生必要的偏置电流 I_{b1} 、 I_{b2} 和带隙电压 V_{bgr} 。

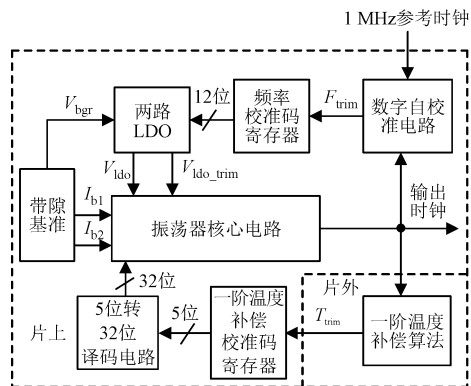


图2 本文松弛振荡器结构框图

Fig. 2 Proposed relaxation oscillator block diagram

2.2 振荡器核心电路设计

本文设计的振荡器核心电路主要包括比较器、VAF 反馈环路、斩波电路，结构如图 3 所示。振荡频率的绝对值取决于电阻 R 、电容 C 以及 α 的大小，考虑到 C 的大小随温度的变化很小，因此振荡频率的温度特性主要取决于 R 与 α 的温度系数 T_c 。若将电阻 R_2 、 R_c 、 R_3 都选取为相同类型的电阻，则 α 的温度系数几乎可以忽略，需要实现零温度系数的 R 才能得到较好的振荡频率-温度系数^[12-15]。

由于芯片上的电阻温度系数通常较大，所以基

于这种思路的温度补偿方案和振荡频率校准存在较大矛盾,为避免此矛盾,本文提出了一阶温度补偿方案和频率校准方案。该方案的设计方向不是实现近零温度系数的 α 、 R ,而是使 α 、 R 的温度系数相反,通过调节电压 V_{ldo_trim} ,来改变 α 的绝对值实现频率校准,从而使得频率校准不影响 α 的温度系数,在引入 V_{ldo_trim} 后, α 可表示为

$$\alpha = \frac{R_3}{R_2 + R_3 + R_c} \frac{V_{ldo_trim}}{V_{ldo}} \tag{5}$$

从式(5)可知,引入 V_{ldo_trim} 对 V_{ref} 供电,可以在不改变 α 温度系数的同时校准输出频率。

本文所提松弛振荡器在 VAF 环路中引入了斩波电路^[9],用于降滤波器闪烁噪声对输出时钟相位噪声的影响,采用斩波电路后,振荡器对对反馈运放的要求可进一步降低。斩波电路的代价仅是引入了一个信号选择通路,其时钟可以直接使用输出时钟,不需要额外的时钟电路。为了保证电路初始状态正常,引入了信号 V_{setup} 进行复位操作。

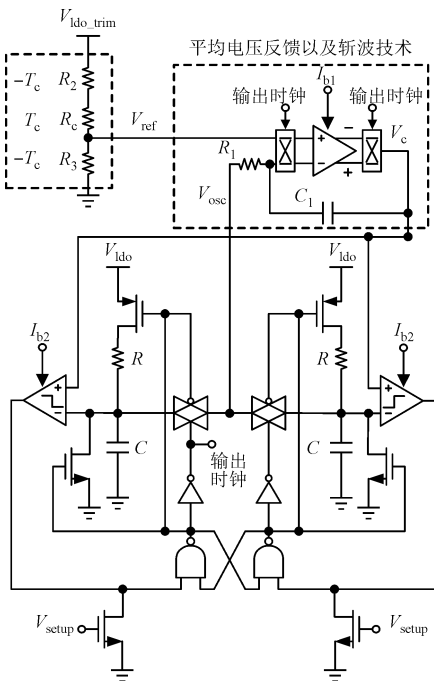


图 3 本文振荡器核心电路

Fig. 3 Proposed oscillator core circuit

2.3 两步式数字校准方案

基于输出频率,式(4)对 α 进行拟合,可得 α 与输出频率 f 关系,如图 4 所示,可知 α 与输出频率之间存在明显的非线性关系,在 α 可调范围内对应的频率范围也较小。为了拓宽可调频率范围,本文提出了两步式调频方式,粗校通过修调电阻 R 大小直接对频率进行较大范围的调整,细校通过前文所述方法

调整 α ,实现高精度的频率校准。

考虑到 α 与输出频率的线性度较差,不适合使用线性搜索法^[16-19]进行频率校准。因此,本文提出基于二分搜索的频率校准算法,原理如图 5 所示。通过频率检测电路,可得振荡器输出频率 f_{osc} 与理想输出频率 f_{ref} 之间的误差 Δf ,该误差大小经过校准算法量化得到 Δf_{trim} ,然后得到数字校准码。通过多次逼近,最终将频率锁定在要求的精度范围内,实现输出时钟频率的校准。

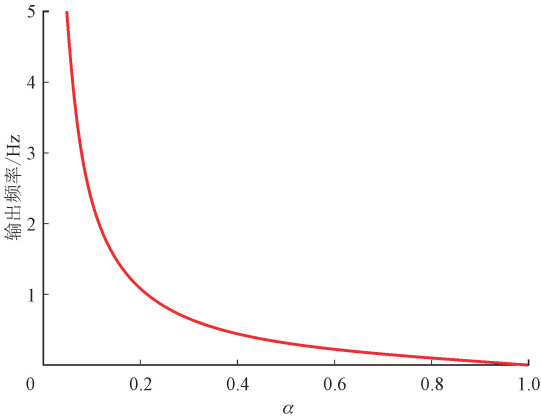


图 4 输出频率与 α 关系图

Fig. 4 Output frequency versus α

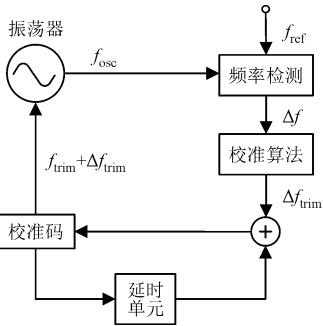


图 5 数字频率校准算法原理框图

Fig. 5 Block diagram of digital frequency calibration algorithm

频率检测与校准电路由两个计数器以及一个除法器组成,而基于二分法思想的除法过程可以通过加减不同的权重来实现,因此可以使用一个加法器来替代复杂的除法器电路。同时,逐次逼近的过程只需要改变加法器权重即可实现模块复用,节省了硬件资源,数字校准电路的具体实现如图 6 所示。

本文所提数字频率校准算法是依据计数器的计数值来量化实际输出频率与理想频率的差值。根据该差值结合校准算法调整输出频率,使最终输出频率收敛于理想频率,校准精度取决于计数长度。

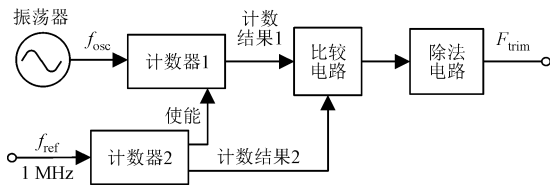


图 6 数字频率校准具体实现方案

Fig. 6 Digital frequency calibration implementation

本文设计的目标频率为 2 MHz,在 1 MHz 的参考时钟下,计数为 512,因此可实现 0.003 9 MHz 的校准精度,即 $\pm 0.19\%$ 的分辨率,粗校准耗时 5 μs ,细校准耗时 2.304 ms。最终两步式校准时长不长于 2.7 ms,数字校准方案分辨率与校准时长如表 1 所示。

表 1 数字校准方案分辨率与校准时长

Table 1 Digital calibration scheme resolution and calibration duration

校准方案	校准位数	频差分辨率/MHz	校准时长/ μs
粗校	2	± 0.4	5
细校	12	$\pm 0.003\ 9$	2 304

2.4 温度补偿方案

为了抑制输出频率随温度的变化,本文使 α 、 R 的温度系数互补,实现了一定程度的温度补偿。在此基础上,本文提出采用可调温度系数的 R 进行一阶温度补偿。由于振荡频率较低,因此 R 的绝对值较大,从而可以用开关电阻阵列的形式调整 R 来补偿温度系数,可调温度系数电阻阵列如图 7 所示。

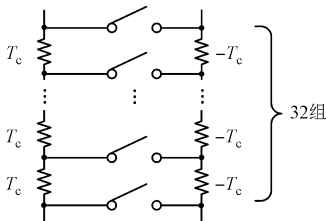


图 7 可调温度系数电阻阵列

Fig. 7 Adjustable temperature coefficient resistor array

在完成振荡器的频率校准后,只需要测定两个不同温度点的振荡器输出频率,通过数学拟合即可得到一阶温度补偿挡位,该一阶温度补偿方式并不影响振荡器的绝对频率精度。

在完成一阶温度补偿后,振荡器的频率-温度曲线已经修调为“扁担”形状。为了实现更低的温度系数,本文提出了在两个极端温度附近通过亚阈值电流进行电流注入来降低 α ,从而起到提高输出频率

的自补偿方式,将“扁担”曲线补偿为“W”型曲线,指数电流生成电路如图 8 所示。图 8 中 I_{ref} 是较小的零温度系数电流,晶体管 M_{P0} 、 M_{P1} 宽长比相同且足够大,从而保证两者工作在亚阈值区。 V_{ctat} 为带隙基准中的负温度系数电压, V_{ref} 为带隙基准中的基准电压,若 V_{ctat} 电压比 V_{ref} 电压小的多,则能保证 I_{ref} 仅有很少的电流流过 M_{P1} ,此时的 I_{comp} 近似为指数电流,可表示为

$$I_{\text{comp}} \approx \exp\left(\frac{V_{\text{ctat}} - V_{\text{ref}}}{\zeta V_{\text{T}}}\right) I_{\text{ref}} \quad (6)$$

$$V_{\text{ctat}} = -\alpha_{\text{ctat}}(T - T_0) + V_{\text{ref}} \quad (7)$$

式中: V_{T} 为热电压; ζ 为亚阈值斜率因子; α_{ctat} 为 V_{ctat} 的温度系数; T 为工作温度; T_0 为两个电压相等时的温度,处于工作温度范围外。联立式(6)、(7)可得

$$I_{\text{comp}} \approx \exp\left[-\frac{\alpha_{\text{ctat}}}{\zeta V_{\text{T}}}(T - T_0)\right] I_{\text{ref}} \quad (8)$$

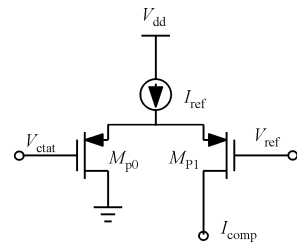


图 8 指数电流生成电路

Fig. 8 Exponential current generation circuit

通过该指数电流生成电路,得到了一个随温度升高而以指数形式下降的电流;同理,交换 V_{ctat} 、 V_{ref} 的连接方式,可得一个随温度升高而以指数形式上升的电流。

本文采用的高阶温度补偿电路如图 9 所示,图中 V_{ctat} 由带隙基准中三极管的基极/发射极电压 V_{be} 产生, V_{ref1} 、 V_{ref2} 来自频率校准所用 LDO 的零温度系数电压。

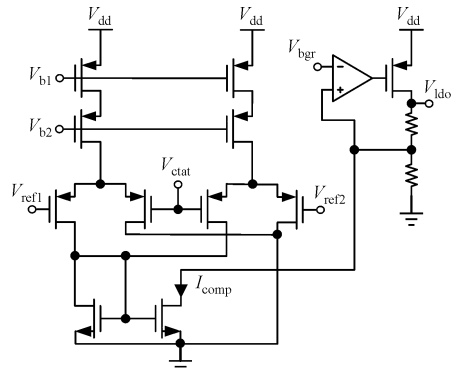


图 9 高阶温度补偿电路

Fig. 9 High order temperature compensation circuit

该电路能够在高温与低温段生成一个较大的电流,注入到带隙基准的电阻中,起到提高 V_{ldo} 、降低 α 的作用,在高温与低温段实现了频率的提升。在常温段,该电路产生的电流可忽略不计。因此,该指数补偿电流能够将振荡频率随温度变化的“扁担”形状曲线补偿为“W”型曲线。

3 低功耗控制方案

将片上振荡器应用于生物传感器、便携式设备等领域,这需要其有极低的功耗,本文设计了电路的使能模式控制。使能无效时,电路的关态电流将达到 nA 级别,使能有效时,电路开始正常工作输出时钟。需要强调的是,时钟振荡频率的校准是在芯片出厂前一次性完成,而振荡器芯片在实际工作中不需要加入外接参考时钟。低功耗控制方案的时序如图 10 所示。

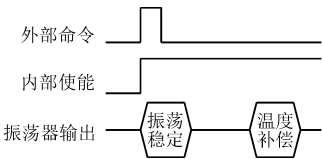


图 10 低功耗数字控制时序图

Fig. 10 Low power digital control timing diagram

4 版图设计与仿真结果

本文松弛振荡器电路采用 180 nm CMOS 工艺进行设计,核心电路的版图面积为 0.11 mm^2 ,如图 11 所示。

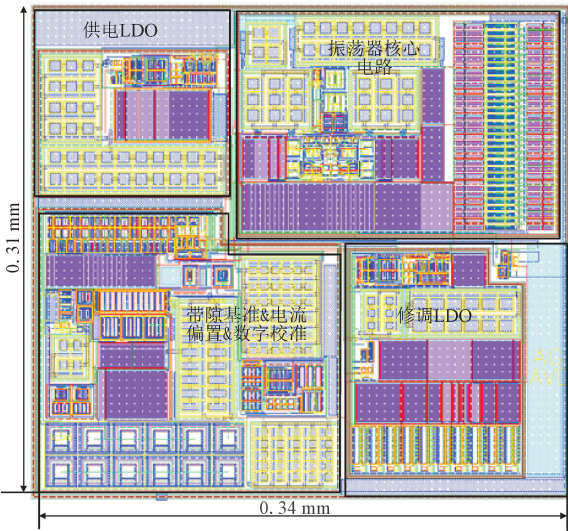


图 11 本文松弛振荡器芯片版图

Fig. 11 Proposed relaxation oscillator layout

提取版图寄生参数后的仿真结果显示,该松弛振荡器在 $-40\sim125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、全部工艺角以及 $2.5\sim5.5\text{ V}$ 电源电压下,经过频率校准以及温度补偿后的振荡器均可达到十分优良的性能。 4 V 电源电压、tt 工艺角 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的典型条件下,振荡器频率为 1.999 6 MHz ,不校准的情况下精度可达到 0.02% 。振荡器在 tt 工艺角不同温度下的电过程,后仿结果表明电路最慢上电时间为 $23\text{ }\mu\text{s}$,如图 12 所示。

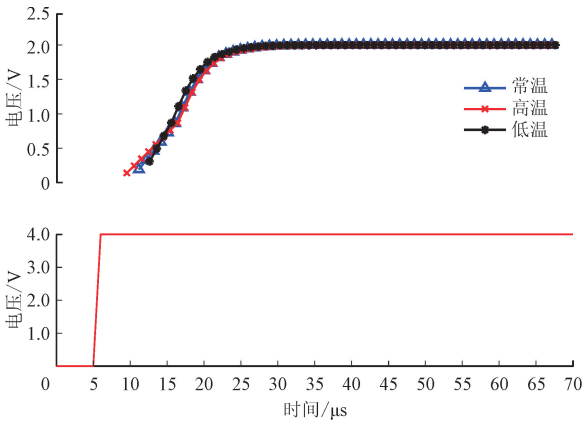


图 12 典型条件下不同温度的上电过程

Fig. 12 Power-up process at different temperatures under typical conditions

在电路正常工作时,tt 工艺角、 4.0 V 电源电压下全温度范围内的系统平均功耗仿真结果如图 13 所示,后仿结果表明,在 ff 工艺角、 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 5.5 V 电源电压下系统最大电流为 $47.6\text{ }\mu\text{A}$ 。

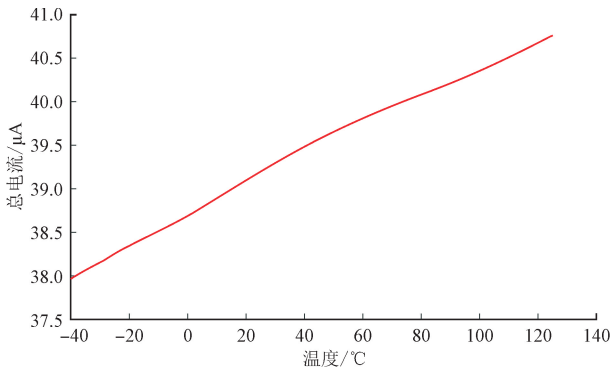


图 13 典型条件下系统功耗随温度变化结果

Fig. 13 Results of system power consumption versus temperature under typical conditions

在电路正常工作且完成频率校准以及温度补偿后,tt 工艺角、3 个电源电压下频率随温度变化的仿真结果如图 14 所示。后仿结果表明,在 ss 工艺角、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,频率随电源电压变化的范围最大为 $\pm 0.13\%$ 。在 ss 工艺角、 2.5 V 电源电压下,频

率随温度变化的范围最大,为 $\pm 0.12\%$ 。

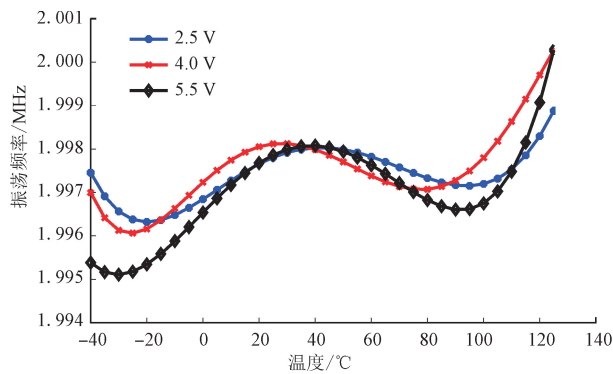


图 14 3 个电源电压下频率随温度变化结果
Fig. 14 Frequency versus temperature results under three different supply voltages

本文加入斩波电路后,振荡器的 $1/f$ 噪声得到了很好的抑制。本文松弛振荡器在典型条件下输出时钟的相位噪声仿真结果如图 15 所示,可知 1 MHz 频偏处的相位噪声为 -115 dB/Hz 。

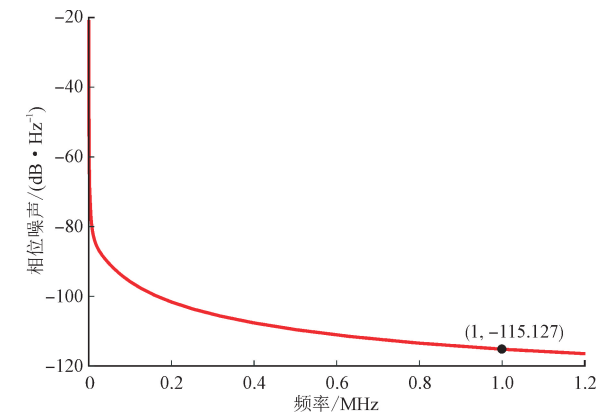


图 15 本文松弛振荡器相位噪声曲线仿真结果
Fig. 15 Simulation results of phase noise of proposed relaxation oscillator

本文设计的片上二步式频率校准方案,通过粗校加细校的两步式策略,极大的减小了硬件开销以

及校准时间,还实现了很高的校准精度,各个工艺角下频率校准的过程如图 16 所示。在典型条件下,校准后的振荡频率可达 $1.999\,2\text{ MHz}$,精度为 0.04% 。

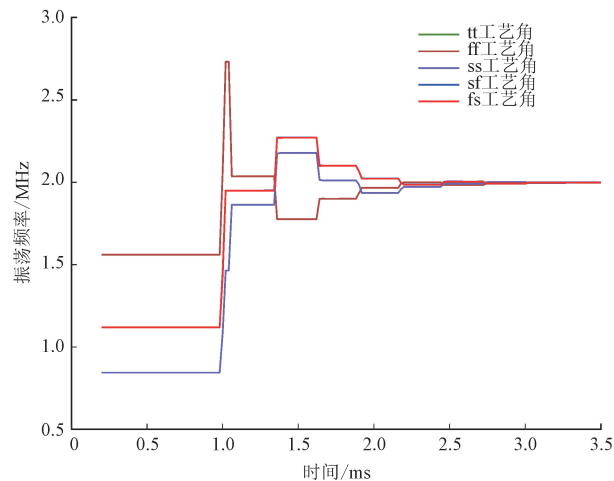


图 16 各个工艺角下频率校准过程
Fig. 16 Frequency calibration process at various process

考虑到元器件的参数失配对振荡频率影响后,本文进行了 200 个样本点的蒙特卡罗仿真。校准前后输出时钟频率的统计分布情况如图 17 所示,从仿真结果可以看到,校准前均值为 2.00 MHz ,标准差为 4.11 kHz ,在经过数字校准后,同样在 200 样本点的统计下,校准后的频率均值仍保持 2.00 MHz ,但标准差降为 0.81 kHz , $\pm 4.5\sigma$ 范围为 $1.996\,2\sim 2.003\,5\text{ MHz}$,表明在经过数字校准后,振荡器良率可以达到量产水平。

本文对振荡器的后仿性能进行了总结,并与近年来的相关文献中提出的振荡器测试结果进行了对比,如表 2 所示。本文振荡器从仿真结果上来看,在更宽的温度范围内实现了更好的频率-温度特性,在更宽的电源电压范围内实现了更好的频率-电压特性,同时本文设计的振荡器在单位振荡频率下的功耗开销也更小。

表 2 8 种振荡器性能总结与对比

Table 2 Eight oscillators performance summaries and comparisons

振荡器来源	振荡器类型	沟道长/ μm	面积/ mm^2	频率/ MHz	工作电流/ μA	不同电压下频率变化率		不同温度下频率变化率	
						频率变化率/%	电压区间/V	频率变化率/%	温度区间/ $^{\circ}\text{C}$
文献[12]	环形	0.25	1.14	7	600	± 0.31	[2.4, 2.75]	± 0.84	[−40, 125]
文献[20]	松弛	0.5	0.19	11.6	133	± 0.8	[3.5, 5]	± 2.5	[−40, 125]
文献[21]	混合型	0.35	0.09	5	20	± 0.95	[1.1, 3]	± 0.7	[−20, 60]
文献[22]	松弛	0.13	0.07	3.2	25.6	± 0.4	[1.4, 1.6]	± 0.25	[20, 60]
文献[23]	松弛	0.35	0.05	4	280	± 0.3	[2.4, 4]	± 0.41	[−30, 120]
文献[24]	松弛	0.11		24		± 0.83	[1.4, 1.6]	± 0.42	[−40, 85]
文献[25]	松弛	0.18	0.019 6	3.01	22	± 1.2	[1.4, 2.0]	± 0.6	[−20, 100]
本文	松弛	0.04	0.11	2	47.6	± 0.13	[2.5, 5.5]	± 0.12	[−40, 125]

本文频率校准所用的 1 MHz 输入参考时钟,该频率大小并不固定,可以通过寄存器配置数字校准模块中的计数点数进行修改,在芯片出厂前的频率校准过程中,可以根据实际所用的参考时钟频率来配置计数点个数,只需保证检测精度大于最小修调步长,最终也同样可以实现振荡器频率的高精度校准,因此本文的数字校准模块相对于其余校准方案更加鲁棒,并不会因为外界参考时钟改变而导致输出时钟的频率无法校准,也不会影响频率校准的精度。

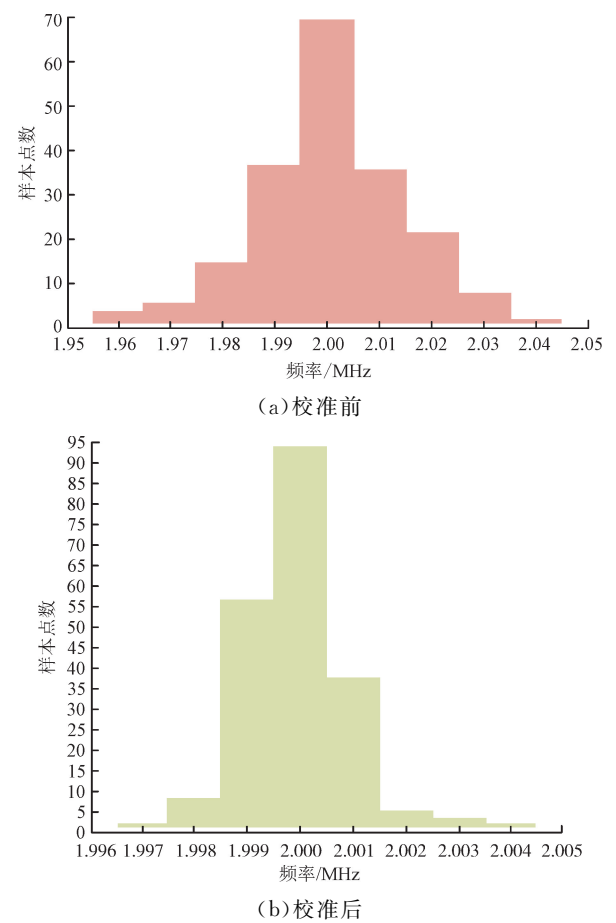


图 17 校准前、后频率统计分布

Fig. 17 Frequency statistics distribution after calibration and before calibration

5 结 论

本文提出了一种 VAF 松弛振荡器,采用片上两步式数字频率校准算法,很大程度减小了硬件开销,实现了 0.04% 的频率精度,完成一次校准的时间小于 2.7 ms。在温度补偿方面,提出了一阶温度补偿加高阶指数电流自补偿的方法,在整个温度范围内,频率最大变化 $\pm 0.12\%$ 。在 2.5~5.5 V 电源

电压范围内,频率最大变化 $\pm 0.13\%$ 。通过引入低功耗控制方案,振荡器正常工作的最大平均电流仅为 47.6 μA ,关态电流小于 10 nA。该片上松弛振荡器可应用在生物医学传感器、便携式设备、HDMI 高速接口等应用中,为功能电路提供参考时钟。

参考文献:

[1] 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.

[2] 周朝阳, 刘云涛, 王立晶, 等. 一种基于斩波拓扑的高精度 RC 振荡器 [J]. 微电子学, 2024, 54(1): 73-78.

ZHOU Chaoyang, LIU Yuntao, WANG Lijing, et al. A high precision RC oscillator based on chopper topology [J]. Microelectronics, 2024, 54(1): 73-78.

[3] XU Zhentao, WANG Wei, NING Ning, et al. A supply voltage and temperature variation-tolerant relaxation oscillator for biomedical systems based on dynamic threshold and switched resistors [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2015, 23(4): 786-790.

[4] JAIN S, JANG S L. Triple-band transformer-coupled LC oscillator with large output voltage swing [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(7): 475-477.

[5] GERAEDTS P F J, VAN TUIJL E, KLUMPERINK E A M, et al. A 90 μW 12 MHz relaxation oscillator with a -162 dB FOM [C]//2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 348-618.

[6] LEE J, GEORGE A, JE M. 5.10 A 1.4 V 10.5 MHz swing-boosted differential relaxation oscillator with 162.1 dBc/Hz FOM and 9.86 psrms period jitter in 0.18 μm CMOS [C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 106-108.

[7] TSAI Y K, LU L H. A 51.3 MHz 21.8 ppm/°C CMOS relaxation oscillator with temperature compensation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: II Express Briefs, 2017, 64(5): 490-494.

[8] TOKUNAGA Y, SAKIYAMA S, MATSUMOTO A, et al. An on-chip CMOS relaxation oscillator with power averaging feedback using a reference proportional to supply voltage [C]//2009 IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 404-405.

[9] NAVID R, LEE T H, DUTTON R W. Minimum achievable phase noise of RC oscillators [J]. IEEE

- Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40 (3): 630-637.
- [10] 王玉伟, 张鸿, 张瑞智. 一种超低功耗的低电压全金属氧化物半导体基准电压源 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(8): 47-52.
- WANG Yuwei, ZHANG Hong, ZHANG Ruizhi. A low-voltage all-metal oxide semiconductor voltage reference with ultra-low power [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(8): 47-52.
- [11] 陈阳, 张瑞智, 金锴, 等. 采用电荷平衡模数转换器的高精度 CMOS 温度传感器 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(10): 124-131.
- CHEN Yang, ZHANG Ruizhi, JIN Kai, et al. A CMOS temperature sensor with high-precision using a charge-balance analog-to-digital converter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(10): 124-131.
- [12] SUNDARESAN K, ALLEN P E, AYAZI F. Process and temperature compensation in a 7 MHz CMOS clock oscillator [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(2): 433-442.
- [13] XIAO Kanglin, WANG Bo, LIN Xiaoqi, et al. A balanced hybrid ring oscillator for precise temperature compensation [C]//The 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 336-339.
- [14] HWANG H, JEONG C H, KWON C, et al. A 6 MHz CMOS reference clock generator with temperature and supply voltage compensation [C]//The 11th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-3.
- [15] SATOH Y, KOBAYASHI H, MIYABA T, et al. A 2.9 mW, ± 85 ppm accuracy reference clock generator based on RC oscillator with on-chip temperature calibration [C]//2014 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-2.
- [16] LU S Y, LIAO Y T. A low-power, differential relaxation oscillator with the self-threshold-tracking and swing-boosting techniques in $0.18 \mu\text{m}$ CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(2): 392-402.
- [17] MIKULIC J, SCHATZBERGER G, BARIC A. post-manufacturing process and temperature calibration of a 2 MHz on-chip relaxation oscillator [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Regular Papers, 2021, 68(10): 4076-4089.
- [18] CHEN Yang, JIAO Zihao, GUAN Weijun, et al. A $\pm 0.66/-0.73^\circ\text{C}$ inaccuracy, $1.99 \mu\text{W}$ time-domain CMOS temperature sensor with second-order $\Delta\Sigma$ modulator and on-chip reference clock [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Regular Papers, 2020, 67(11): 3815-3827.
- [19] 王海金. 一种数控反馈自校准温度补偿 RC 振荡器 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [20] VILAS B, OLMOS A. A temperature compensated digitally trimmable on-chip IC oscillator with low voltage inhibit capability [C]//2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 501-504.
- [21] LASANEN K, RAISANEN-RUOTSALAINEN E, KOSTAMOVAARA J. A 1 V, self adjusting, 5 MHz CMOS RC-oscillator [C]//2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 377-380.
- [22] CHOE K, BERNAL O D, NUTTMAN D, et al. A precision relaxation oscillator with a self-clocked off-set-cancellation scheme for implantable biomedical SoCs [C]//2009 IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 402-403.
- [23] XU Zhentao, WANG Wei, NING Ning, et al. A supply voltage and temperature variation-tolerant relaxation oscillator for biomedical systems based on dynamic threshold and switched resistors [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2015, 23(4): 786-790.
- [24] LIU Zhenyang, JIN Leisheng, ZHANG Ming, et al. A 24 MHz relaxation oscillator without comparators [C]//The 6th International Conference on Electronics Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 377-381.
- [25] NGUYEN H V, KIM J, KIM S Y. Temperature and supply voltage insensitive relaxation oscillator using voltage reference [C]//TENCON: 2018 IEEE Region 10 Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 555-558.

(编辑 赵炜)