

应用于电源监控芯片的高精度、低功耗 RC 振荡器设计

尚林林, 周盼, 赵鹏

(深圳市国微电子有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 基于 $0.35\ \mu\text{mBCD}$ 工艺, 设计了一种应用于电源监控芯片的单比较器结构的高精度、低功耗 RC 振荡器。RC 振荡器电路包括基准模块和 RC 电路产生模块。源于 RC 电路工作原理以及如何减少温度、电源电压的变化对振荡器频率的影响。引入新型电源电压补偿, 减少了由电源电压变化引起的比较器迟滞时间的变化, 导致振荡器频率发生改变。采用 MOS 管稳态导通电阻具有正温度系数特性, 补偿多晶电阻负温度系数特性的线性补偿方式, 抑制了振荡频率随温度的变化。同时设计了一种带 5 位译码器高精度、低功耗数字修调电路, 有效提高了 MOS 管导通电阻的精度, 克服了传统温度补偿电路补偿电阻阻值不精确的问题。Spectre 仿真结果显示, 电源电压在 $2.5\ \text{V}\sim 5.5\ \text{V}$ 范围变化, 振荡周期误差范围为 $-0.8\%\sim +0.14\%$, 温度在 $-40\ ^\circ\text{C}\sim 125\ ^\circ\text{C}$ 范围变化, 振荡周期误差范围为 $-0.3\%\sim +0.79\%$ 。整个 RC 振荡器电路最大工作电流为 $5.1\ \mu\text{A}$, 其中 RC 电路产生模块最大工作电流为 $0.9\ \mu\text{A}$ 。RC 电路产生模块结构简单, 降低了电路复杂性从而减少电路的实现成本, 该电路结构已成功应用于高精度、低功耗电源监控芯片中。

关键词: RC 振荡器; 温度补偿; 电源电压补偿; 数字修调电路

中图分类号: TM752

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222668

中文引用格式: 尚林林, 周盼, 赵鹏. 应用于电源监控芯片的高精度、低功耗 RC 振荡器设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 43-47, 53.

英文引用格式: Shang Linlin, Zhou Pan, Zhao Peng. Low power consumption, high precision RC oscillator for power monitoring chip [J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 43-47, 53.

Low power consumption, high precision RC oscillator for power monitoring chip

Shang Linlin, Zhou Pan, Zhao Peng

(Shenzhen Guowei Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: High precision and low power RC oscillator is designed which is applied to power monitoring chip. The circuit is fabricated in a $0.35\ \mu\text{mBCD}$ process. The RC oscillator includes reference module and RC circuit generation module. Based on the principle of RC oscillator and the intention of reducing the influence of temperature and power supply voltage changes on the oscillator frequency. In order to reduce oscillator period varies with the supply power, a new type of power supply voltage compensation is introduced to reduce the influence of the change of power supply voltage on the hysteresis time of the comparator. And to suppress the effect of temperature on oscillator frequency, the on-resistance and linear resistance of MOS tube are used for temperature compensation. To improve the accuracy of the on-resistance of the MOS tube, and overcome the problem of the traditional supplementing resistance inaccurate, a high precision and low power digital tuning circuit with 5 bit decoder is designed. The simulation results show that the input voltage range is $2.5\ \text{V}\sim 5.5\ \text{V}$, the oscillation period error range is $-0.8\%\sim +0.14\%$, the temperature range is $-40\ ^\circ\text{C}\sim 125\ ^\circ\text{C}$, and the oscillation period error range is $-0.3\%\sim +0.79\%$. The maximum quiescent current $5.1\ \mu\text{A}$, RC circuit generation module is $0.9\ \mu\text{A}$. This circuit is simple in structure, low in cost and easy to implement, applied to many power monitoring chips.

Key words: RC oscillator; temperature compensation; supply voltage compensation; digital tuning circuit

0 引言

常见的 DC-DC 电源、电源监控等电源芯片, 一般会使用振荡器电路产生时钟信号, 用于延迟、监控等。而完全集成的 RC 振荡器具有较好的温度变化性能, 可以用来取代晶体振荡器, 以减少电源芯片的尺寸和成本^[1-3]。RC 振荡器的频率和功耗是其主要的性能指标^[4-5]。但是 RC 振荡器的频率易受到电源电压、温度的影响, 传统

RC 振荡器结构中的比较器迟滞时间也会给振荡器频率带来误差^[6]。

如何减少温度、电源电压对振荡器周期的影响是设计高精度 RC 振荡器的主要难点。当前 RC 振荡器电路温度补偿的诸多方案中, 常见采用正负温度系数线性电阻叠加, 产生不受温度影响的充电电流^[7-8], 具有结构简单、容易实现等优点, 但是也存在线性补偿的电阻阻值

易受温度、电源电压发生较大的变化,阻值精度不够等缺陷。对于电源电压补偿的方案中,主要利用电源到地的分压电阻产生与电源电压成比例的翻转电平^[9],虽然这种结构可以有效地消除电源电压变化对振荡器周期的影响,但也存在不足之处,很难产生与电源电压相关而与温度无关的充电电流。对于比较器的迟滞时间带来的误差,一般采用的是对称结构的双比较器结构^[10],可以有效消除比较器迟滞时间带来的误差,但是也存在电容和比较器的失配造成的误差^[11],同时会增加电路的复杂程度,增加功耗和电路实现成本。

1 高精度、低功耗 RC 振荡器电路设计

如图 1 所示,本文设计的高精度、低功耗 RC 振荡器由基准模块和 RC 电路产生模块构成。其中基准模块包括基准产生电路和带 5 位译码器的高精度数字修调电路;RC 电路产生模块包括比较器、整形模块和 D 触发器构成。所设计的是一种单比较器结构的 RC 振荡器,采用窄脉冲触发的形式,产生固定占空比的振荡信号。比较器为固定参考电压 V_{REF} ,可以有效减小单比较器由于比较器参考电压的改变,导致时钟信号上升沿的时间和下降沿的时间不完全相等,带来时钟周期误差^[12],并通过引入电源电压补偿电路和温度补偿电路使其对电压、温度的敏感度降低,从而提供稳定且精确的时钟信号。同时 RC 振荡器产生电路只有一个比较器、整形模块和 D 触发器,电路具有结构简单、功耗较小、成本较低等特点。

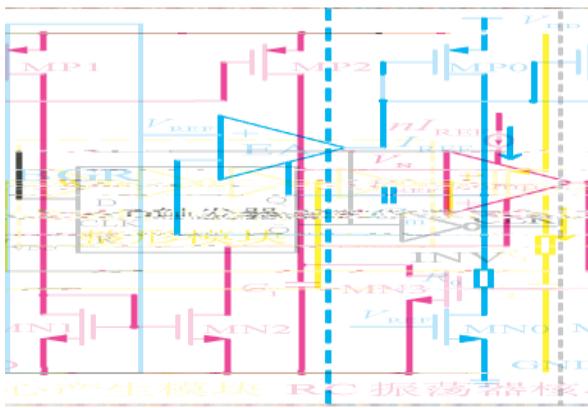


图 1 所设计的 RC 振荡器结构框图

1.1 RC 振荡器结构分析

本文所设计的 RC 振荡器其工作原理与一般比较器结构的 RC 振荡器类似,不同的是采用的单比较器加 D 触发器结构,采用的窄脉冲触发的形式,产生一定周期的时钟信号波形。其中 PMOS 管 MP0、MP1、MP2 的宽长比相同,NMOS 管 MN1 和 MN2 的宽长比相同,在比较器的输出端添加 C_2 为滤波电容,可以减小电源变化对施密特反相器翻转电平的干扰。图 2 所示为所设计的 RC 振荡器原理示意图,镜像电流 I_{REF} 对电容 C_1 充电,当电容 C_1 上的电压达到比较器参考电压 V_{REF} 时,比较器输

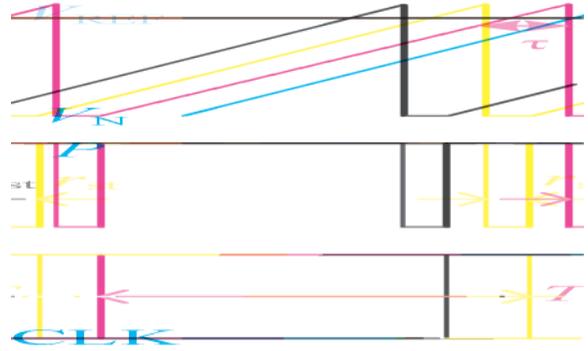


图 2 所设计的 RC 振荡器原理示意图

出端从高电平翻转为低电平,MN3 管打开,电容 C_1 快速放电到低电平;然后经过复位延迟时间 (r_{st}) 后,比较器输出端从低电平翻转为高电平,关闭 MN3 管;电容 C_1 开始充电,当电容 C_1 上的电压达到比较器参考电压 V_{REF} 时比较器输出端从高电平翻转为低电平,MN3 管打开。再通过整形模块减小电源对信号的干扰,反复进行在 P 点处产生周期性的窄脉冲方波信号最后通过 D 触发器,产生固定占空比的振荡信号。

1.2 振荡器周期

振荡器的周期主要由四部分时间组成:电容 C_1 充电到比较器 V_N 端电压的时间 t_1 ; 比较器输出端从高电平向低电平跳变的迟滞时间 t_f ; 比较器输出端从低电平向高电平跳变的迟滞时间 t_r ; RC 产生电路的传输延迟 τ 。振荡器周期 T 见式(1):

$$T=2(t_1+r_{st}+\tau) \tag{1}$$

$$r_{st}=t_f+t_d+t_{sw} \tag{2}$$

其中 r_{st} 、 t_d 、 t_{sw} 分别为复位延迟时间、整形模块延迟时间、开关管 MN3 的延迟时间。 t_d 、 t_f 、 t_{sw} 都在 10 ns 以内,对振荡器周期精度影响很小。所以振荡器周期 T 等效于:

$$T=2(t_1+t_r+\tau) \tag{3}$$

其中 RC 产生电路的传输延迟 τ 主要是比较器失配和电路传输延迟导致的。为了设计低失调电压比较器,增大了输入对管的面积,同时在版图上也进行了高精度匹配布局等。所设计电路没有高阻抗节点,整体电路的传输延迟比较小,对振荡器周期影响不大。下面具体计算 t_1 、 t_r 的值:

$$t_1 = \frac{C_1 V_{REF}}{I_{REF}} \tag{4}$$

$$t_r = \frac{C_2 V_H}{I_{REF} + I_{VDD}} \tag{5}$$

其中 V_{REF} 是与电源电压和温度无关的带隙基准电压; V_H 是施密特反相器的高电平翻转电压; I_{REF} 、 I_{VDD} 分别为受温度影响的电容 C_1 充电电流、受电源电压影响的 V_{DD} 对电容 C_2 的充电电流。通过式(4)、式(5)可知, t_1 、 t_r 受温度和电源电压的影响。

1.3 电源电压补偿电路

图 1 中整形使用的 CMOS 施密特反相器的结构如图 3 所示, 其翻转电压 V_H 和 V_L 与 MOS 管的宽长比有关。PMOS 管宽长比相同, NMOS 管的宽长比也相同时, 可以得到:

$$V_H = (V_{DD} + V_{THN})/2 \quad (6)$$

$$V_L = (V_{DD} - |V_{THP}|)/2 \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可以看出 V_H 、 V_L 与 V_{DD} 相关, 整形电路的阈值电压的变化会导致比较器迟滞时间的变化, 造成振荡器的频率随 V_{DD} 变化而变化。同时影响振荡器频率的主要是比较器输出由低电平翻转成高电平的迟滞时间 t_r 。

引入图 4 所示电源电压补偿电路, V_{DD} 可以对电容 C_2 充电, 当 V_{DD} 变大时, 施密特反相器的翻转电压 V_H 变大, 导致比较器输出翻转成高电平的迟滞时间变长, 但 V_{DD} 通过 MP3 对电容 C_2 充电电流也变大, 使电容 C_2 上的电压上升更快, 减小迟滞时间, 形成负反馈。利用这种负反馈作用, 可以减小 V_{DD} 对振荡频率的影响。

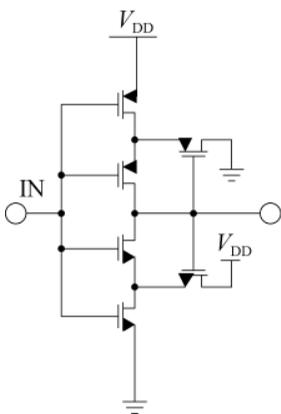


图 3 施密特反相器电路结构

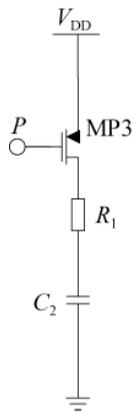


图 4 引入 V_{DD} 支路

当 V_N 端电压降到与 V_P 端电压相等后, 比较器偏置电流 nI_{REF} 对电容 C_2 充电。此时图 4 中的 MP3 管已经开启, V_{DD} 通过 R_4 对电容 C_2 充电, 从 0 充电至 V_H , 平均充电电流近似为

$$I_{VDD} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{V_H}{R_4} \right), \text{ 从低电平向高电平跳变的迟滞时间 } t_r \text{ 为:}$$

$$t_r = \frac{V_H}{nI_{REF} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_H}{R_4} \right)} \quad (8)$$

将式(8)带入式(5)中, 可得:

$$t_r = \frac{(V_{DD} + V_{THN})/2}{nI_{REF} + \frac{1}{2} \left(\frac{(V_{DD} + V_{THN})/2}{R_4} \right)} \quad (9)$$

其中 V_{THN} 为 NMOS 管的阈值电压, I_{REF} 是本文所要设计的与温度、电源电压无关的充电电流, n 为常数。理论上使 $I_{VDD} > nI_{REF}$, 可以忽略比较器偏置电流 nI_{REF} 的影响, 认为第二项分子与分母同时变化, 可以减小 V_{DD} 变化对周期的

影响, 稳定振荡频率, 达到电源补偿的目的。

1.4 温度补偿

MOSFET 进入稳态导通的情况下, 其导通电阻具有正温度特性^[13]。多晶电阻一般具有负温度特性, 两者之间进行温度系数的线性叠加, 产生零温度系数的电阻。具体实现方式如图 5 所示。

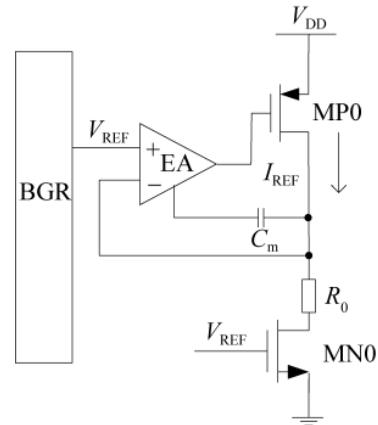


图 5 温度补偿电路

补偿电路中的电阻和电流的关系如下:

$$R = R_0 + R_{ON} \quad (10)$$

$$I_{REF} = \frac{V_{REF}}{R} = \frac{V_{REF}}{R_0 + R_{ON}} \quad (11)$$

其中 R_0 为多晶电阻, R_{ON} 为 MN0 的线性导通电阻, R 为补偿后的等效阻抗。将式(10)对温度求偏导有:

$$\partial R / \partial T = \partial R_0 / \partial T + \partial R_{ON} / \partial T \quad (12)$$

当式(12)的值为 0 时, R 对温度的偏导数为 0, 即该支路的等效电阻对温度不敏感, 理论上可以得到零温度系数电流 I_{REF} 。所以设计合适的 R_0 和 R_{ON} , 可以得到与温度无关的电阻 R , 达到温度补偿的目的。由于参考电压 V_{REF} 的偏差, 无法保证在各种条件下都能产生恒定值的零温度系数电流 I_{REF} , 因此引入带 5 位译码器高精度、低功耗数字修调电路, 确保在各种条件下都能产生恒定值的零温度系数电流 I_{REF} 。

1.5 高精度、低功耗数字修调电路

图 5 中的 NMOS 管 MN0 工作在线性区, 它的导通电阻 R_{ON} , 可表示为:

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu_n c_{ox} (W/L)_{MNO} (V_{REF} - V_{TH})} \quad (13)$$

其中 $\mu_n c_{ox}$ 为器件跨导参数, $(W/L)_{MNO}$ 为 MN0 管的宽长比, V_{GS} 、 V_{TH} 分别是栅-源电压和阈值电压。传统的一般使 $V_{GS} = V_{DD}$, 会导致 R_{ON} 的阻值随着 V_{DD} 变化, 造成支路等效电阻 R 的随着 V_{DD} 波动, 温度补偿难度增加。本文设计采用的 $V_{GS} = V_{REF}$, 保证 R_{ON} 具有较高的精度。图 6 为带隙基准电路, 包括启动电路、基准产生电路、修调电路。

图 7 是高精度、低功耗数字修调电路。包括低功耗

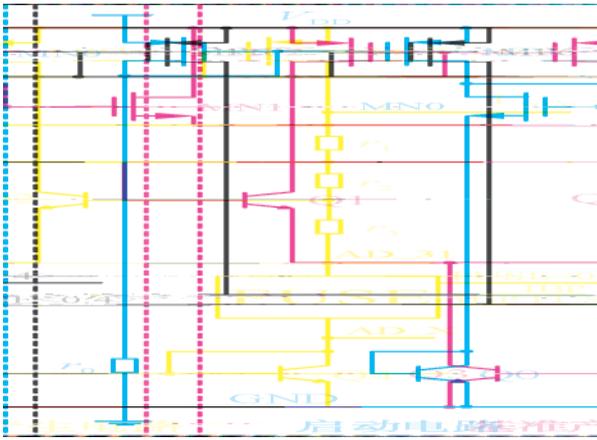


图6 带隙基准电路

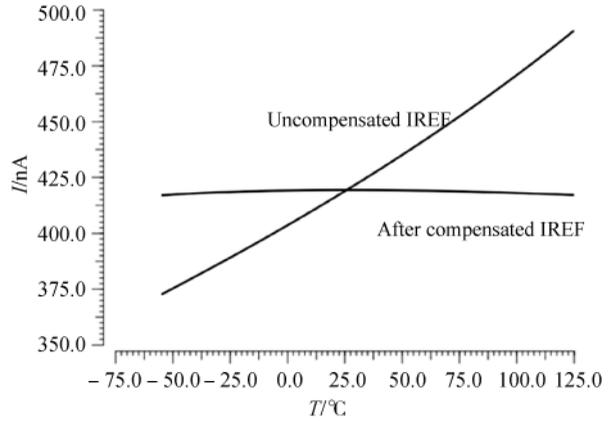


图8 I_{REF} 补偿前后对比

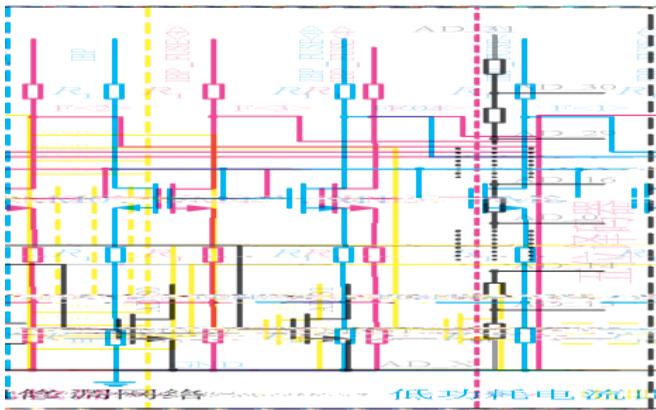


图7 高精度、低功耗数字修调电路

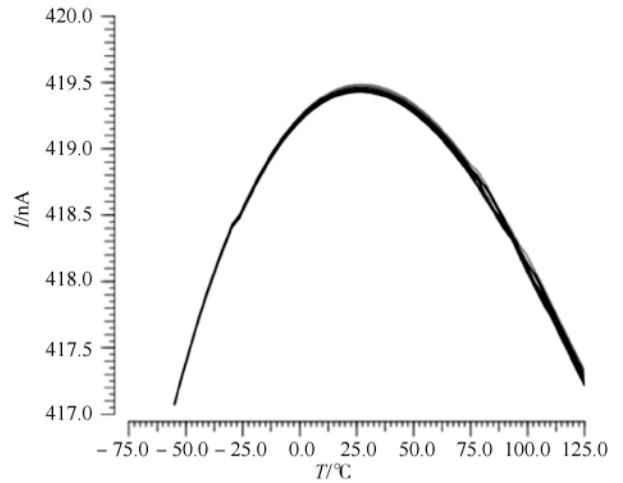


图9 I_{REF} 温度扫描曲线

的电流比较器模块、5位译码器、电阻修调网络。

如图7所示, FUSE<0:4>为熔丝 PAD, F<0:4>为所对应的控制信号, 作为译码器的输入信号。r_m为熔丝电阻(未烧断之前是 mΩ 级别, 烧断后 ≥1 MΩ), 电流比较器每条支路偏置电流相等, 其中 M1~M4 器件的宽长比相同, M0 的宽长比小于 M1 的宽长比。当 r_m 未熔断时, F<X>保持低电平, 当 r_m 熔断后, r_m 为高阻态, F<X>输出高电平。F<X>为译码器的输入信号, 译码器根据输入信号的代码情况输出相应的控制信号到电阻修调网络模块中, 控制级联电阻输出的个数, 实现修调的效果。本电路 V_{REF} 在 PVT 环境下, 变化范围为: -2.5%~2.5%, 数字修调电路可以实现正负 16 位修调, 修调精度为 0.3%, 可以满足 V_{REF} 修调的需要。所设计电流比较器是一种低功耗结构, 每条支路偏置电流为 100 nA 左右。图 8 为 I_{REF} 补偿前后对比图, 图 9 为 I_{REF} 在不同电源电压下温度扫描仿真情况。

2 仿真结果分析

本文 RC 振荡器基于 Cadence 平台, Spectre 仿真工具对整体电路进行仿真。仿真器电源电压范围为 2.5 V~5.5 V, 振荡器误差范围为 -0.8%~+0.14%, 仿真器温度范围为 -40°C~125°C, 振荡器误差范围为 -0.3%~+0.79%。

整个 RC 振荡器电路最大工作电流为 5.1 μA, 其中 RC 电路产生模块最大工作电流为 0.9 μA, 振荡器输出频率为 11.6 kHz。图 10 为振荡器时钟信号波形。

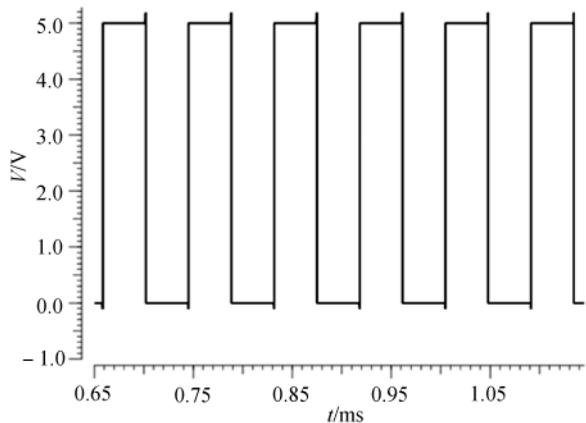


图10 振荡器时钟信号波形

图 11、图 12 分别是振荡器周期对电源电压和温度灵敏度仿真情况。

表 1 为本文与近年相关文献 [14-16] 的主要性能参数对比, 由表中数据可看到, 本文的振荡器对电

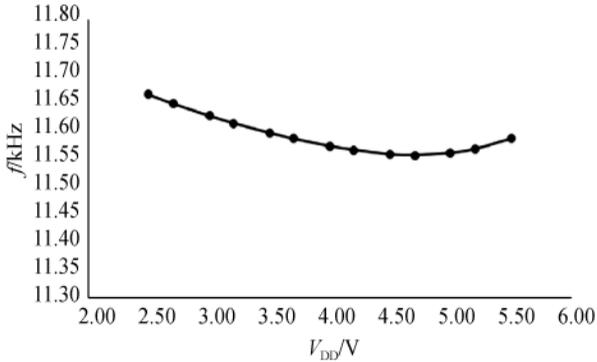


图 11 振荡器频率与电源电压变化

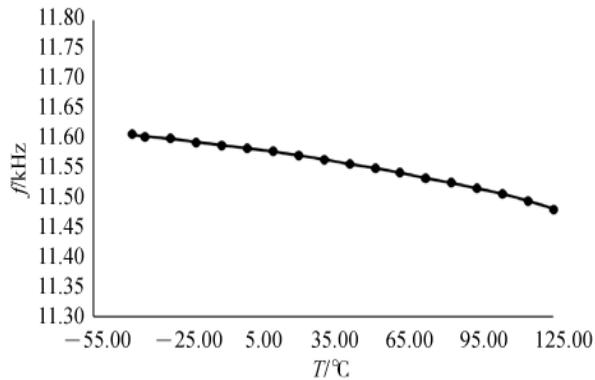


图 12 振荡器频率与温度变化

表 1 性能参数的比较

参数	本文	文献[14] (2019)	文献[15] (2017)	文献[16] (2016)
工艺	350 nm	180 nm	65 nm	180 nm
振荡器频率/kHz	11.6	444.9	1 300	10 500
最大电源 功耗/ μ W	28.6	21.3	0.94	219.8
电压敏感 系数/(%/V)	0.31	0.07	0.49	0.44
温度敏感系数 (ppm/ $^{\circ}$ C)	57	224	96	137
电源电压 范围/V	2.5~5.5	1.2~2.8	0.9~1.9	1.2~2.0
工作温度 范围/ $^{\circ}$ C	-40~ 125	-20~100	0~150	-40~125

源电压、温度的敏感性较弱,对比同类型的论文,在核心参数指标上面有一定的竞争性。

3 结论

本文提出了一种结构简单的单比较器结构的 RC 振荡器,避免了电路的复杂度,降低电路的实现成本。通过引入温度和电源电压补偿电路减小了振荡器频率对电源电压和温度的敏感度,设计了一种带 5 位译码器的高精度数字修调电路,有效地提高了修调电阻的精度。电

路采用 0.35 μ mBCD 工艺实现,仿真结果表明,振荡器周期对电压的敏感系数为 0.31%/V,对温度的敏感系数为 57 ppm/ $^{\circ}$ C,最大静态电流为 5.1 μ A,可满足高精度、低功耗电源监控芯片的性能需求。

参考文献

- [1] GRIFFITH D, ROINE P T, MURDOCK J, et al. A 190 nW 33 kHz RC oscillator with $\pm 0.21\%$ temperature stability and 4 ppm long-term stability [C]//IEEE Int. Solid State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers, 2014.
- [2] TYAGI V, KALLA S, RANA V A. 1 MHz PVT compensated RC oscillator with 8 ppm/ $^{\circ}$ C frequency stability [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2020, 105: 417-428.
- [3] GURLEYUK C, PEDALA L, SEBASTIANO F, et al. A CMOS dual-RC frequency reference with ± 250 ppm inaccuracy from -45° C to 85° C [C]//IEEE Int. Solid State Circuits conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers, 2018.
- [4] CHEN P Y, LI D, YU Z H, et al. A 0.84pJ/cycle wheatstone bridge based CMOS RC oscillator with reconfigurable Frequencies [C]//2019 IEEE Custom Intergrated Circuits Conference, 2019.
- [5] LU S Y, LIAO Y T. A 46 μ W, 8.2 MHz self-threshold-tracking differential relaxation oscillator with 7.66 psrms period jitter and 1.56 ppm allan deviation floor [C]//Proc. IEEE Custom Int. Circuits Conf., 2018: 1-4.
- [6] WANG J C, GOH W. A 12.4-kHz on-chip RC oscillator with comparator offset cancellation for PVT variation tolerance [C]//2016 International Symposium on Intergrated Circuits, 2016.
- [7] 邓玉清,葛兴杰,宣志斌.一种高精度 RC 振荡器的设计[J].电子与封装,2019,19(1):28-31.
- [8] 饶喜冰,李良,代高峰.一种高精度振荡电路设计[J].电子与封装,2019,19(3):14-17.
- [9] 熊立志,王振华,殷少飞,等.一种高精度低功耗 CMOS RC 振荡器[J].微电子学,2008,38(5):728-752.
- [10] 张键,尹志强,杨晓.适用于 MCU 的低功耗、高精度 RC 振荡电路设计[J].电子与封装,2020,20(11):1-7.
- [11] CHOE K, BERNAL O D, NUTTMAN D, et al. A precision relaxation oscillator with a self-clocked offset-cancellation scheme for implantable biomedical SoCs [C]//IEEE International Solid State Circuits Conference Digest of Technical Papers, 2009: 402-403.
- [12] 周小军,李平,杜涛.一种高精度数字可调 RC 振荡器设计[J].电子科技,2007(216):13-17.
- [13] YU S H, CHEN Y M, GUO W D. A digital-trim controlled on-chip RC oscillator [C]//Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2001.

(下转第 53 页)

表 1 测试用例通过率

测试环境	CCO 通过率	PCO 通过率	STA 通过率
信道质量正常	100	100	100
天线距离较远	93.6	92.2	94.6
衰减较大	90.4	92.6	93.8

由表 1 可知,在信道质量正常情况下,测试用例通过率能够达到 100%,在另外两种信道质量较差的情况下,测试通过率相对降低,但均在 90%以上,基本满足要求,说明测试系统稳定性达标。

5 结论

本文针对宽带微功率 MAC 层一致性测试进行研究,设计了一种软硬件测试平台相结合的一致性测试系统。相较于当前的宽带微功率一致性测试系统,该系统具有较高的时间精度,可实现 MAC 层时隙功能的精准测试。通过测试验证,证明该系统已实现所有功能和性能要求,可完成对宽带微功率 MAC 层的一致性测试,保证了 MAC 层通信的准确性,提高了产品的可靠性,为宽带微功率技术的发展奠定了基础。

参考文献

- [1] 马艺玮,刘明杰,朴昌浩,等.智能电网信息工程的专业课程群教学模式改革研究[J].科技与创新,2022(3):136-138.
- [2] COLAK I, BAYINDIR R, SAGIROGLU S. The effects of the smart grid system on the national grids[C]//2020 8th International Conference on Smart Grid. IEEE, 2020.
- [3] DUAN J, ZHAO B, GUO S. The design and implementation of smart grid SOC platform[C]//2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence(ICIBA). IEEE, 2020.
- [4] 刘晨,白泰,王家驹,等.用户用电信息采集系统的深化应用研究综述[J].电测与仪表,2022,59(2):1-8.
- [5] 韩娜,王婷,陈禹萌.低压用电信息采集系统的本地通信成功率分析[J].机电信息,2019(26):20-21.
- [6] 胡致远,宋洋洋,袁研根,等.微功率无线通信技术在电力线路中的适应性分析[J].电力系统自动化,2014,38(8):113-118.

(上接第 47 页)

- [14] KOO J, KIM B, SENIOR M. A quadrature RC oscillator with noise reduction by voltage swing control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2019, 66(8):3077-3088.
- [15] SAVANTH A, MYERS J, WEDDELL A, et al. A 0.68 nW/kHz supply-independent relaxation oscillator with $\pm 0.49\%$ /V and 96 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ stability [C]//IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers, 2017:96-97.
- [16] LEE J, GEORGE A, JE M. A 1.4 V 10.5 MHz swing-

- [7] WU J, LI Y, CHENG H. Research on wireless communication quality analysis method in electricity information collection[C]//2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence(ICIBA). IEEE, 2020.
 - [8] 钟晓欢.基于文本类型的应用层协议逆向解析技术的研究[D].北京:北京邮电大学,2014.
 - [9] 唐新竹,杨鹏飞,刘伟,等.电力微功率无线通信协议一致性测试系统设计与实现[J].电力信息与通信技术,2017,15(1):36-39.
 - [10] ZHANG H, LIU X, ZHENG K. Design of broadband PLC conformance testing system based on TTCN-3[C]//2018 International Conference on Information Systems and Computer Aided Education(ICISCAE). IEEE, 2018.
 - [11] 马畅.电力线通信协议测试系统设计[D].西安:西安电子科技大学,2018.
 - [12] WANG S, LI W. Technical research and platform implementation of the protocol conformance test of AFDX network switch[C]//2018 International Conference on Networking and Network Applications(NaNA). IEEE, 2018.
 - [13] 马润,王圣杰,华荣锦,等.电力物联网边缘物联代理的一致性测试系统研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(10):58-64.
 - [14] ISO/IEC 9646-2:IT-OSI-Conformance testing methodology and framework:Part 2:Abstract test suite specification[S]. 1996.
 - [15] 谭喜堂,王东响,朱琴跃,等.HDLC 协议一致性测试系统的研究[J].计算机测量与控制,2014,22(1):63-65.
- (收稿日期:2022-04-06)

作者简介:

江蓓(1997-),通信作者,女,硕士研究生,主要研究方向:协议一致性测试、性能测试,E-mail:1352301837@qq.com。

岳桂君(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:互操作性测试、多网络测试。

周欣(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:协议一致性测试。



扫码下载电子文档

boosted differential relaxation oscillator with 162.1 dBc/Hz FOM and 9.86 psrms period jitter in 0.18 μm CMOS [C]//IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers, 2016:106-108.

(收稿日期:2022-02-22)

作者简介:

尚林林(1983-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:模拟集成电路设计。

周盼(1993-),通信作者,男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:模拟电源设计,E-mail:zhoupan@ssmec.com。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所