

一种具有频率扩展功能的低温漂振荡器设计

赵晨光,冯全源,王 丹

(西南交通大学 微电子研究所,四川 成都 610031)

摘 要: 设计了一种结构简单,低温漂,具有频率扩展功能的振荡器. 该电路利用温度补偿电路输出无温度系数的电流,通过 TRIMMING 电路精确调节电流的大小,在逻辑控制下对电容充放电,经过双门限比较器和整形电路产生稳定的 200 kHz 的方波信号. 同时,分频电路产生逻辑信号控制振荡器的扩展电容大小,使振荡器具备频率扩展功能,可以有效地降低电磁干扰,增强系统的电磁兼容能力. 本电路采用 0.5 μm BICMOS 工艺,利用 Hspice 和 Cadence 软件进行仿真,在芯片系统典型应用环境下仿真得到振荡频率为 200.8 kHz,当温度在 $-40\sim 125^\circ\text{C}$ 之间变化时,振荡器的频率随温度的偏移在 $\pm 1\%$ 以内. 频率扩展范围在中心频率附近浮动 $\pm 5\%$ 左右,该振荡器已经成功应用于一款 AC/DC 电源管理芯片的设计之中.

关键词: 开关电源;振荡器;低温漂;频率扩展;电磁兼容

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)03-0127-05

Design of Frequency Extension and Low Temperature Drift Oscillator

ZHAO Chen-guang, FENG Quan-yuan, WANG Dan

(Institute of Microelectronics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A simple structure frequency extension and low temperature drift oscillator is presented. By temperature compensation and trimming circuit a low temperature current is used to charge and discharge a capacity. Compared with double-threshold comparator and shaping circuit, 200 kHz signal is obtained. Meanwhile, the oscillator with frequency extension by divider circuit generating logic signals to control the expansion capacitor size to reduce the electromagnetic interference and enhance electromagnetic compatibility of the system. The oscillator based on 0.5 μm BICMOS technology library, Cadence and Hspice are used to circuit simulation to get the oscillation frequency of 200.8 kHz under the typical applications. The frequency varies migration range is within $\pm 1\%$ and $\pm 5\%$ floating with temperature changing in $-40\sim 125^\circ\text{C}$. The oscillator has been successfully applied to the design of an AC/DC fly-back power management chip.

Key words: switching power supply; oscillator; low temperature drift; frequency extension; EMC

1 引言

科技迅速发展对振荡器的稳定性要求越来越严格. 在温度变化时,振荡器要具有很好的低温漂性能^[1]. 此外,开关电源在快速开关的工作模式下,功率开关管在开关瞬间迅速变化的电流和电压会引入电压与电流的高次谐波分量,受系统中电容和电感

的影响有可能产生振荡,从而产生严重的电磁干扰^[2]. 通过频率扩展功能,使开关频率在一定的范围内变化,而不是集中于固定频率,可以有效地改善电源的 EMI 特性^[3].

普通振荡器的输出频率在所有温度下温漂为 $\pm 5\%$ 左右^[4]. 本文设计的振荡器通过正负温度补偿电路产生无温度系数电流作用于电容使振荡器具有

收稿日期: 2014-05-18; 修回日期: 2014-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271090); 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)重大项目(2012AA012305)

很好的低温漂性能,能够控制温度稳定度在 $\pm 1\%$ 以内,该指标在低温漂振荡器的设计中已经是很高的精度.此外,通过分频电路产生的逻辑信号控制振荡器扩展电容的大小,实现频率扩展功能,使振荡器输出的频率在中心频率附 $90\sim 210$ kHz 的范围内平稳波动,降低芯片的电磁干扰,使芯片更好地用于对电磁兼容要求比较高的系统中.

2 电路结构与原理分析

2.1 整体电路框架及原理

本文所设计的振荡器如图 1 所示,温度补偿模

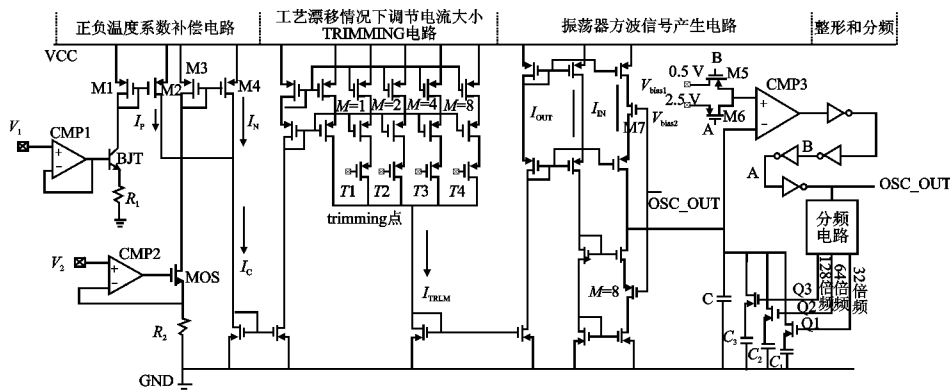


图 1 本文的振荡器结构框图

2.2 低温漂振荡器的设计

2.2.1 低温漂振荡器的工作原理

基准电压 V_1 通过 BJT 跟随比较器的输出以及 M_2 和 M_1 管子组成的电流镜的偏置,产生电流 I_P :

$$I_P = \frac{V_1 - V_{BE}}{R_1} \times \frac{(W/L)_{M2}}{(W/L)_{M1}} \quad (1)$$

由于 BJT 的 V_{BE} 随着温度的升高而降低^[5],故 I_P 电流具有正温度系数. R_1, R_2 为正温电阻,基准电压 V_2 通过 MOS 管跟随的比较器在电阻 R_2 上产生负温度系数的一路电流 I_N . 适当地调节 M_1, M_2, M_3, M_4 管子的宽长比,对 I_P 和 I_N 进行正负温度系数补偿可以得到无温度系数的电流 I_C .

I_C 通过电流镜偏置产生作用于振荡器的电流 I_{TRIM} ,在不同的工艺角下,控制 T_1, T_2, T_3, T_4 点的导通情况,可以改变作用于振荡器的电流的大小. 由于 TRIMMING 电路的四个支路管子宽长比的差异,四路电流的大小比为 $1:2:4:8$,随着四个 TRIMMING 点的导通情况不同,总共可以产生 16 种不同大小的电流,这种设计可以实现在所有工艺角下对电流的精确调节. I_{TRIM} 经过电流镜镜像,产生充放电电流,在逻辑的控制下对电容充放电产生锯齿波

块产生一路无温度系数的电流 I_C ,在不同的工艺角下,通过 TRIMMING 电路调节电流的大小,使振荡器的输出时钟稳定在 200 kHz 左右. 电流 I_{TRIM} 经过电流镜的偏置,在逻辑的控制下作用于电容 C 产生锯齿波信号,经过比较器和整形电路后产生标准的方波输出信号. 振荡器的输出经过分频电路产生的分频信号作用于几个小的扩展电容上,这样可以简单的通过周期性的改变振荡器电容的大小,实现频率扩展功能.

信号.

振荡器的方波产生电路采用双门限比较器,比较器有两个大小不同的门限 V_{bias1} 和 V_{bias2} . 起初时刻 OSC_OUT 电平为 0, M_6 导通, M_5 关断, CMP3 的比较门限为 V_{bias2} (2.5 V),与此同时, M_7 导通, M_8 关闭, I_{IN} 电流开始对电容充电,电容上的电势逐渐上升,当电势高于 2.5 V 时,比较器输出翻转, OSC_OUT 为高电平, CMP3 的比较门限降低为 V_{bias1} (0.5 V), M_7 截止,充电结束, M_8 导通,电容以 I_{OUT} 大小的电流放电,电容上的电势逐渐降低到 0.5 V 后,比较器再次翻转,以此反复便得到了周期性的方波信号.

2.2.2 输出频率的计算

振荡器的输出频率是通过电流对电容的充放电时间决定的. 若充电时间为 T_1 ,充电电流为 I_{IN} ,放电时间为 T_2 ,放电电流为 I_{OUT} ,在振荡器的电容充电过程中:

$$I_{IN} = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = \frac{(V_{bias2} - V_{bias1})C}{T_1} \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{(V_{bias2} - V_{bias1})C}{I_{IN}} \quad (3)$$

在电容 C 的放电过程中:

$$I_{OUT} = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = \frac{(V_{bias2} - V_{bias1})C}{T_2} \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{(V_{bias2} - V_{bias1})C}{I_{OUT}} \quad (5)$$

振荡器的输出频率为

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{(V_{bias2} - V_{bias1})C} \times \frac{I_{IN} \cdot I_{OUT}}{I_{IN} + I_{OUT}} \quad (6)$$

输出的占空比为

$$D = \frac{T_1}{T_1 + T_2} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN} + I_{OUT}} \quad (7)$$

调整充放电支路电流镜的管子宽长比,可以改变对电容的充放电电流的大小, I_{IN} 和 I_{OUT} 的大小决定着输出的占空比. 电流不变的情况下,改变电容的大小可以改变振荡器频率. 基于这点设计了振荡器的频率扩展模块.

2.3 频率扩展功能的实现

频率扩展功能是通过周期性信号控制扩展电容 C_1, C_2, C_3 的导通情况,从而周期性改变输出频率实现的. 控制信号由分频电路产生,通过二分频器的串联累积,可以实现对输出信号的高次分频.

2.3.1 频率扩展降低电磁干扰原理

在系统工作环境下,若振荡器输出的开关频率是固定的,在开关瞬间能量集中在某一个固定的频率上,在频谱上形成峰值很高的狭窄噪声频带,导致系统的电磁兼容性差. 使用频率扩展技术使振荡器的频率在一定的范围内变化,产生 Δf 的频率差,在频域范围内,基波带宽展宽 Δf ,二次谐波为 $2\Delta f$,高次谐波展宽为 $n\Delta f$,在噪声总能量不变的情况下,其噪声峰值会大幅减小,在高次谐波时减幅更为明显^[6],这样可以有效增加系统的电磁兼容能力.

2.3.2 分频电路的控制逻辑设计

由低温漂振荡器产生的输出信号 OSC_OUT 给分频器提供时钟信号,经过二分频电路的叠加产生 32 倍频,64 倍频,128 倍频的信号,这些信号经过 256 倍频信号为使能端的 2 选 1 数据选择器,作用于扩展电容,如图 2 所示.

分频的逻辑控制由分频器和 2 选 1 数据选择器组成. Q_4 为数据选择器的使能端,当 $Q_4=0$ 时,输出选择 B 端信号,当 $Q_4=1$ 时,输出选择 A 信号.

Q_1, Q_2, Q_3 分别用来控制 MC1, MC2, MC3 管的导通情况. 电路工作时,若 Q_4 为低电平, Q_1, Q_2, Q_3 电平信号逻辑为 000-001-010-011-100-101-110-

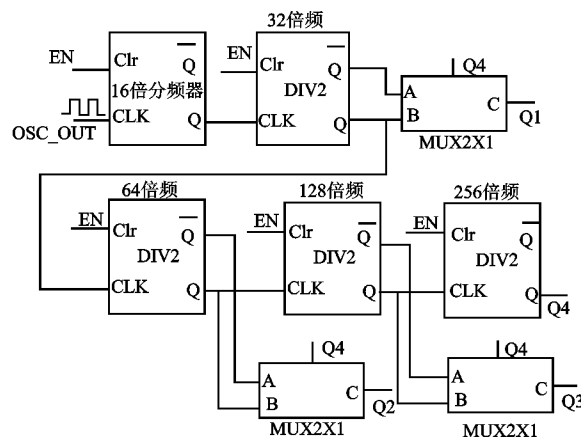


图 2 分频电路的控制逻辑

111. 随后 Q_4 变为高电平, Q_1, Q_2, Q_3 选择分频器的端, 三者逻辑变为 111-110-101-100-011-010-001-000.

分频的控制逻辑如图 3 所示.

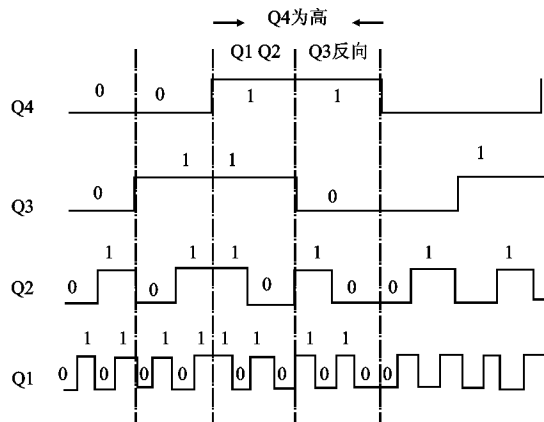


图 3 分频电路的输出逻辑

若电容的尺寸比为 $C_1 : C_2 : C_3 = 1 : 2 : 4$, 随着控制信号的变化, 总电容的大小有八种变化情况.

其中电容的变化极值为

$$\Delta C_{\max} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8)$$

$$\Delta C_{\min} = 0 \quad (9)$$

电容变化时, 振荡器输出频率也会随之改变, 由式(6)可知, 振荡器输出频率的最大最小值如下所示:

$$f_{\max} = \frac{1}{(V_{bias2} - V_{bias1})C} \times \frac{I_{IN} \cdot I_{OUT}}{I_{IN} + I_{OUT}} \quad (10)$$

$$f_{\min} = \frac{1}{(V_{bias2} - V_{bias1})(C + \Delta C_{\max})} \times \frac{I_{IN} \cdot I_{OUT}}{I_{IN} + I_{OUT}} \quad (11)$$

在分频器的逻辑控制下振荡器的总电容大小呈锯齿波状逐渐递增到最大值, 再逐渐递减至最低值,

输出频率也会以锯齿波状渐进式变化. 这种渐进性递增和递减的频率扩展设计,不但可以有效地减小系统的 EMI,还可以保证系统的工作频率趋于平稳,更有利于系统的稳定性. 设计合适的扩展电容的值可以使中心频率仍为 200 kHz 左右,输出频率范围为 190~210 kHz,频率扩展范围控制在中心频率 $\pm 5\%$ 左右.

3 仿真结果与分析

设计的振荡器电路基于 0.5 μm BICOMS 工艺,运用 Cadence 和 Hspice 软件对电路仿真,结果如下.

图 4 是电流补偿模块的仿真结果,在所有温度下, I_P 的容差为 2.17 μA ,和 I_N 经过温度补偿后的电流 I_C 的容差降低为 0.45 μA ,较低的温度系数是振荡器具有低温漂特性的必要条件.

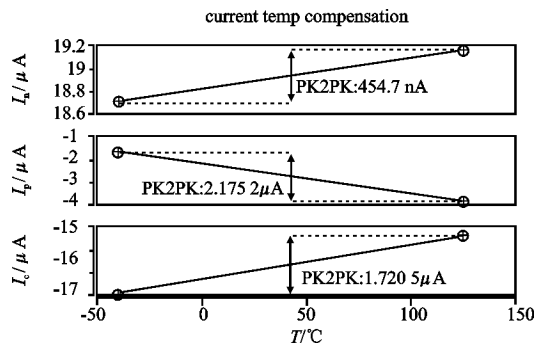


图 4 电流的温度系数补偿

在所有工艺角下,振荡器具有很高的精度和低温漂特性. 图 5 是频率扩展模块不工作时,振荡器的输出结果. 振荡器的中心频率在 $-40\sim 125^\circ\text{C}$ 温度下的温漂小于 2 kHz,温漂在 $\pm 1\%$ 以内. 所有 CASE 的工艺角下,振荡器的输出稳定在 200 kHz 附近,输出频率随工艺漂移在 $\pm 4\%$ 以内.

振荡器的输出精度很高,得益于 TRIMMING 电路对电流的精确调节控制. TRIMMING 结果以及工艺漂移下振荡器输出的中心频率如表 1 所示.

表 1 TRIMMING 结果及对应的中心频率

	T1	T2	T3	T4	中心频率/kHz
Case0	0	0	0	1	200.8
Case1	0	1	1	1	207
Case2	0	0	1	1	204
Case3	0	0	0	0	201
Case4	0	0	0	1	199
Case5	0	0	0	1	202

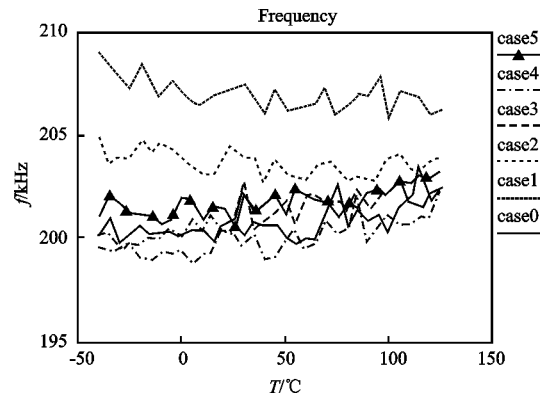


图 5 $-40\sim 125^\circ\text{C}$ 下振荡器频率的温漂

表 2 所示为本文的振荡器与近些年低温漂振荡器研究文献的比较结果. 温漂在 $\pm 3\%$ 以内即是低温漂振荡器,而本文设计振荡器在下,温漂在 $\pm 1\%$ 以内,温度稳定性十分显著.

表 2 振荡器输出频率的温漂性能对比

	文献[6]	文献[7]	文献[8]	本文
工艺/ μm	0.5	0.5	0.18	0.5
	BCD	CMOS	CMOS	BICMOS
频率/kHz	66.8	1210	120	200
$\Delta T/^\circ\text{C}$	$-25\sim 125$	$-40\sim 120$	$-40\sim 85$	$-40\sim 125$
温漂/%	$-0.1\sim 4.8$	1.036	$-6.5\sim 1.3$	$-0.4\sim 1$

振荡器的输出经过分频电路控制扩展电容,实现频率扩展功能,使振荡器的工作频率在中心频率附近渐进性变化,图 6 所示为振荡器的频率扩展功能的仿真结果,振荡器随时间变化输出频率在 192~208 kHz 之间. 频率扩展范围在中心频率附近的 $\pm 5\%$ 左右,周期性锯齿波形平稳变化的输出频率可以防止系统因频率突变时不稳定情况的发生,使系统工作时稳定性更强.

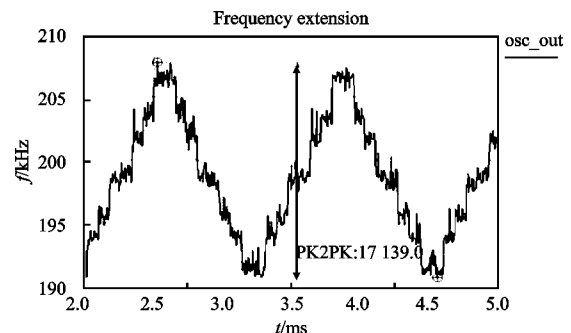


图 6 振荡器的频率扩展仿真结果

4 结束语

本文基于 0.5 μm BICMOS 工艺,设计了一种具

有频率扩展功能的低温漂振荡器电路.通过对正负温度系数电流进行温度补偿的设计,使振荡器的输出温漂很低, $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$ 下通过对电流大小进行 TRIMMING,使工艺漂移情况下振荡器的频率均能维持在 200 kHz 左右,可以很好地满足对温度变化时精度要求比较高的系统需求.此外,振荡器具备频率扩展功能,振荡器的输出频率随时间在中心频率附近渐进性变化,有效地增强了系统的电磁兼容能力.仿真结果显示,振荡器输出频率的温漂在 $\pm 1\%$ 以内,频率扩展的范围在 $\pm 5\%$ 以内,振荡器的性能很好地满足开关电源对振荡器的设计要求.该振荡器已经成功运用在一款 AC/DC 电源管理芯片中.

参考文献:

- [1] 虞晓凡,林平分.一种带温度和工艺补偿的片上时钟振荡器[J].微电子学与计算机,2009,26(1):1-6.
- [2] Franc M, Dejan K. Reduced conductive EMI in switched-mode DC-DC Power converters without EMI filters: PWM versus Randomized PWM[J]. IEEE Power Electronics Society,2006,21(6):1783-1794.
- [3] Kuisma M, Variable frequency switching in Power supply EMI-control: an overview [J]. Aerospace and e-

lectronic systems magazine,2003,18(12):18-22.

- [4] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计(修订版)[M].北京:电子工业出版社,2006.81-86.
- [5] 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,2003:309-327.
- [6] 姜树法,张国俊.一种带频率抖动功能的振荡器电路的设计[J].微电子学,2013,43(4):1-2.
- [7] 李波,吕坚,蒋亚东.一种基于 0.5umCMOS 工艺的补偿性电流控制振荡器设计[J].电子器件,2009,32(1):4-8.
- [8] 王小曼,原义栋,田勇.一种频率稳定的低功耗振荡器电路设计[J].电子技术应用,2012,38(10):3.

作者简介:

赵晨光 男,(1990-),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计. E-mail:594781604@qq.com

冯全源 男,(1963-),博士,教授,博士生导师.研究方向为集成电路设计、RFID 技术、功率半导体技术、电磁兼容与环境电磁学、微波器件及材料等. E-mail: fengquanyuan@163.com

王丹 男,(1955-),副教授.研究方向为可编程集成电路应用电子电路、集成电路设计. E-mail: dwang55@126.com

(上接第 126 页)

- [8] Bosch R. CAN specification version 2.0[M]. Bosch: Sep, 1991.

作者简介:

吕易俗 男,(1990-),硕士.研究方向为低功耗数字集成电路设计. E-mail:lvysu@mail. tsinghua. edu. cn.

田文杰 男,(1962-),博士,教授.研究方向为新型传感器

及其敏感材料、石英惯性传感器.

李翔宇 男,(1977-),博士,副教授.研究方向为 SOC 系统设计、核电子学、密码芯片的硬件安全.

殷树娟 女,(1981-),博士,讲师.研究方向为混合信号电路设计.

包舒 男,(1990-),硕士.研究方向为数字集成电路设计.

孙少东 男,(1990-),硕士.研究方向为数字集成电路设计.