

一种频率稳定的改进型 CMOS 环形振荡器

吕洁如, 秦会斌*, 黄海云

(杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:介绍了一种频率为 1.2 MHz 的 CMOS 环形振荡器的设计, 工作电压范围是 3 V ~ 6 V, 工作温度范围是 -40 °C ~ 85 °C。CMOS 振荡器使用了 Cadence 软件仿真工具设计, 并采用无锡上华(CSMC)的标准 0.5 μm 双多晶硅、三层金属 CMOS 工艺制作。为解决振荡频率随电压电源变化较大的问题, 在分析传统的环形振荡器的基础上, 提出了一种改进型的环形振荡器; 然后使用 Cadence 软件, 在不同工艺角下, 对电路进行仿真和分析, 得到了电源电压和振荡频率的对应关系。研究表明, 电源电压从 3 V 变化到 6 V, 振荡器输出频率最大变化范围为 $\pm 5\%$ 。

关键词: CMOS 集成电路; 振荡器; 环形振荡器

中图分类号: TM13; TN432.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)02-0251-04

Improved CMOS ring oscillator with stable frequency

LV Jie-ru, QIN Hui-bin, HUANG Hai-yun

(College of Electronic and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: 1.2 MHz CMOS ring oscillator operates under voltage range 3 V ~ 6 V and temperature range -40 °C ~ 85 °C was presented. This oscillator circuit was designed with Cadence software, and was fabricated in the standard 0.5 μm double-poly, triple metal CMOS process of Wuxi CSMC. Aiming at the problem of oscillation frequency changes with the power supply voltage, a modified ring oscillator was presented, based on the analysis of the traditional ring oscillator. Then the corresponding relation of power supply voltage and oscillation frequency was received through circuit simulation and analysis by using Cadence software. The results indicate that output frequency vary $\pm 5\%$ from the nominal frequency in the whole power supply voltage range 3 V ~ 6 V.

Key words: CMOS IC; oscillator; ring oscillator

0 引 言

LED 具有寿命长、节能、环保等显著的特点, 被誉为 21 世纪的新型绿色照明光源, 其市场规模正在逐年扩大。据市场调查公司 Strategies Unlimited 预测, 在 2010 年, LED 市场份额将猛增 53%, 达到 82 亿美元; 到 2014 年, LED 市场的复合年均增长率(CAGR)将增至 30.6%, 达到 202 亿美元^[1]。巨大的市场需求推动了 LED 驱动 IC 的发展, 而振荡器是驱动芯片中一个重要的模块。LED 驱动芯片中控制开关的信号频率是由振荡器产生的方波信号频率所决定, 要提高芯片

的开关速度, 就要提高振荡的频率, 逻辑控制的时钟信号也是由振荡电路产生。所以, 高频高性能的振荡器设计, 是芯片至关重要的环节之一。环形振荡器由于结构简单, 广泛用于多种集成电路芯片的设计。但传统环形振荡器的振荡频率受电源电压变化的影响很大, 当电源电压降低 50% 时, 频率降低 50% 以上。

本研究采用新方法设计 CMOS 环形振荡器, 可以进一步改善因电源电压变化而引起振荡器输出频率变化较大的问题(约 5%), 更利于电子系统的稳定工作, 在芯片设计中有相当广阔的应用前景。

1 CMOS 环形振荡器的原理

环形振荡器是由奇数个反向增益级电路首尾相连构成的,基本的环形振荡器结构如图 1 所示,设计的振荡器电路采用了 5 级反相器。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^[2]:

- (1) $|H(j\omega_0)| \geq 1$;
- (2) $\angle H(j\omega_0) = 180^\circ$ 。

那么电路就会在频率 ω_0 处振荡,这两个条件是必要条件,而不是充分条件。反相器的延时就是通过对图 1 中电容的充放电完成的。

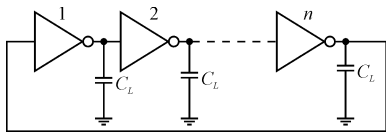


图 1 基本的环形振荡器结构

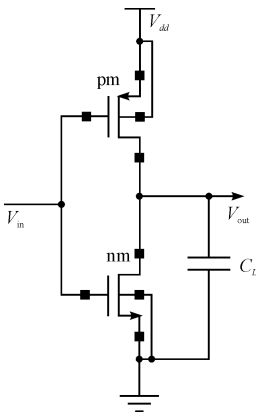


图 2 基本的带负载的反相器结构

基本的反相器结构如图 2 所示,CMOS 反相器对电容进行充放电造成的时延,可分成上升时延和下降时延来分析,令反相器传输时延为 t_p ,输出上升时延为 t_r ,输出下降时延为 t_f ,则振荡器的输出波形周期^[3-6]:

$$T = n \cdot t_p = n \cdot (t_r + t_f) / 2 \quad (1)$$

1.1 传统的环形振荡器

首先分析 t_r ,假定 V_{dd} 对电容 C_L 充电时,PMOS 管都处于饱和状态,则充电饱和电流为:

$$I_{dl} = \frac{\beta_p \cdot (V_{gs} - |V_{tp}|)^2}{2} \quad (2)$$

式中: $\beta_p = K_p \frac{W}{L}$, K_p —与工艺材料有关的参数, W/L —PMOS 管的宽长比, V_{gs} —栅源电压, V_{tp} —阈值电压。

将 I_{dl} 看作恒流,则输出电压为:

$$V_{out} = \frac{I_{dl} \cdot t}{C_L} \quad (3)$$

t 即为 t_r , 并且 V_{out} 最大值等于 V_{dd} , 因此上升时延为:

$$t_r = \frac{2V_{dd} \cdot C_L}{\beta_p \cdot (V_{dd} - |V_{tp}|)^2} \quad (4)$$

同理可得下降时延为:

$$t_f = \frac{2V_{dd} \cdot C_L}{\beta_n \cdot (V_{dd} - V_{tn})^2} \quad (5)$$

式中: $\beta_n = K_n \frac{W}{L}$, K_n —与工艺材料有关的参数, W/L —NMOS 管的宽长比, V_{tn} —阈值电压。

将式(4)和式(5)代入式(1),可得 n 级反相器的环形振荡器的振荡周期:

$$T = \frac{n \cdot V_{dd} \cdot C_L}{(V_{dd} - V_t)^2} \left(\frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_p} \right) \quad (6)$$

其中,假设 $V_t = V_{tn} = |V_{tp}|$ 。

因此,振荡器频率 $f = 1/T$, 振荡频率可以通过改变反相器的级数或反相器的时延来改变。通过式(6)可知,当 V_t 一定时,随 V_{dd} 减小振荡周期 T 增大,频率 f 减小。

1.2 改进的环形振荡器

本研究采用在 NMOS 管下面串联一个耗尽型 NMOS 管的方法来降低 V_{dd} 对电路的影响^[7-9]。根据上面的计算方法可以分析出,反相器的上升时延不变,仍为式(4),随电源电压增大,上升时延减小。下降时延发生了变化,由耗尽型管子决定,在放电过程中,耗尽型始终处于饱和状态,相当于一个电流源,跨导相当大。其漏源饱和电流为:

$$I_{ds} = \frac{\beta_{nd} \cdot (V_{gs} - V_{tnd})^2}{2} = \frac{\beta_{nd} \cdot V_{tnd}^2}{2} \quad (7)$$

式中: β_{nd} , V_{tnd} —耗尽型管子的跨导参数和阈值电压。

因此可得下降时延为:

$$t_f = \frac{2 \cdot C_L \cdot V_{dd}}{\beta_{nd} \cdot V_{tnd}^2} \quad (8)$$

由式(7)可知,随电源电压增大,下降时延增大。

振荡器包含 5 级反相器,则振荡周期为:

$$T = 5 \cdot t_p = 5 \cdot \frac{t_r + t_f}{2} = \frac{V_{dd} \cdot C_L}{\beta_p \cdot (V_{dd} - |V_{tp}|)^2} + \frac{C_L \cdot V_{dd}}{\beta_{nd} \cdot V_{tnd}^2} = 5 \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\beta_p \cdot \left(1 - \frac{|V_{tp}|}{V_{dd}}\right)^2} + \frac{V_{dd}}{\beta_{nd} \cdot V_{tnd}^2} \right) \quad (9)$$

式(9)中括号内两项有相互抵消趋势,前一项随电源电压变化是 2 阶的,后一项则是 1 阶的,因此只在一定的电源电压下才能得到零变化率。

2 仿真结果

2.1 仿真模型及工具

本研究采用的 SPICE 模型为无锡上华(CSMC)的标准0.5 μm 双多晶硅、三层金属 CMOS 工艺库,其中,增强型 NMOS 和 PMOS 的阈值电压分别为 -0.95 V 和 0.70 V ,耗尽型 NMOS 阈值电压为 -0.53 V ,仿真工具采用 Cadence 的 Spectre 软件^[10]。

2.2 元件参数

环形振荡器的完整电路图如图 3 所示,振荡器核心电路中第一级和最后一级的输出分别接到 RS 触发器的 S 端和 R 端,产生占空比为 85% 的波形,右边为两级反相器整形电路,将输出振荡波形整形平滑,消除毛刺。pm1 ~ pm5 的宽长比 W/L 为 $40\text{ }\mu\text{m}/1\text{ }\mu\text{m}$,pm6 ~ pm9 的 W/L 为 $6\text{ }\mu\text{m}/1\text{ }\mu\text{m}$,pm10 和 pm11 的 W/L 为 $40\text{ }\mu\text{m}/1\text{ }\mu\text{m}$,nm1 ~ nm5 的 W/L 为 $10\text{ }\mu\text{m}/1\text{ }\mu\text{m}$,nm6 ~ nm9 的 W/L 为 $3\text{ }\mu\text{m}/1\text{ }\mu\text{m}$,nm10 和 nm11 的 W/L 为 $20\text{ }\mu\text{m}/1\text{ }\mu\text{m}$,dnm1 ~ dnm5 的 W/L 为 $2\text{ }\mu\text{m}/$

$2\text{ }\mu\text{m}$, $C_1 \sim C_5$ 的 W/L 为 $60\text{ }\mu\text{m}/34\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.3 仿真结果

环形振荡器在 $3\text{ V} \sim 6\text{ V}$ 宽输入电源电压范围内,在 tt、ss、ff 工艺角下振荡频率的仿真图如图 4 ~ 图 6 所示。从图中可以看出,在 tt 工艺角下,随电压变化,振荡频率 f 的变化范围为 $1.185\text{ MHz} \sim 1.21\text{ MHz}$;ss 工艺角下,振荡频率 f 的变化范围为 $371\text{ kHz} \sim 383.5\text{ kHz}$;ff 工艺角下,振荡频率 f 的变化范围为 $2.881\text{ MHz} \sim 2.915\text{ MHz}$ 。可看出,各工艺角下频率偏移量非常小,都在 5% 以下,符合要求;但各工艺角之间, f 之间差别较大,这与制造工艺和误差有关,制造工艺导致管子的 β_n 发生较大偏移,使得芯片流片后,各芯片间的振荡频率存在较大差异。这也为后续的逻辑模块设计提出较高要求,即需设计出符合各工艺角下振荡频率的逻辑控制模块。

电路在 4.2 V 典型电源电压下,环形振荡器输出占空比为 85% 的波形如图 7 所示。从波形上看,平滑整齐,占空比均匀,符合要求。

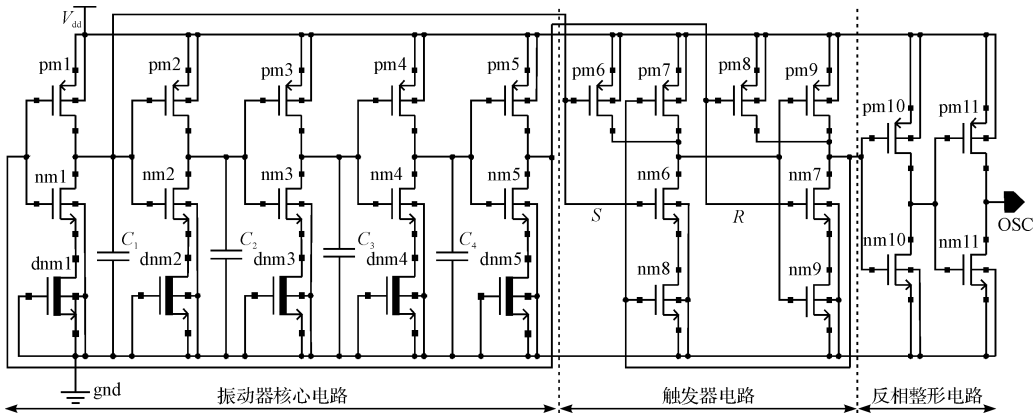


图 3 振荡器结构图

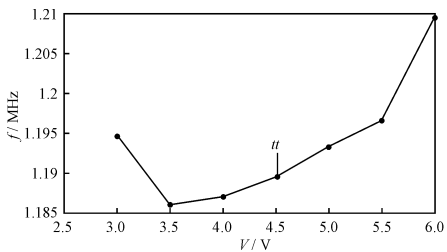


图 4 tt 工艺角下振荡频率随电源电压变化情况

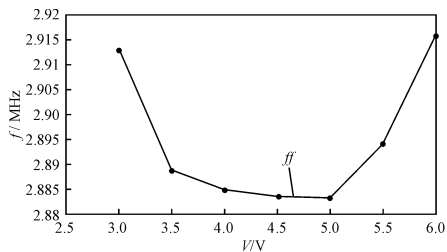


图 6 ff 工艺角下振荡频率随电源电压变化情况

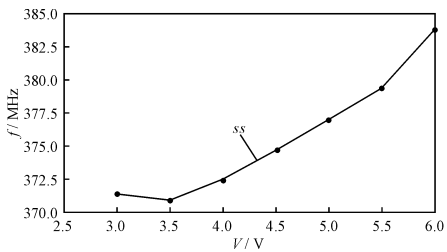


图 5 ss 工艺角下振荡频率随电源电压变化情况

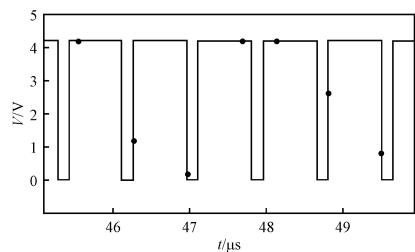


图 7 电源电压 4.2 V 时振荡器输出波形

3 结束语

从仿真结果可看出,所采用的改进型 CMOS 环形振荡器电路对电压具有较强的容忍度,其频率随电压的变化小于 5%,满足了驱动芯片对振荡器的要求。不足之处在于,电路在不同的工艺角下,振荡频率值的变化比较大。总体而言,此振荡器完全可满足 DC/DC 转换器、充电器等电源管理芯片的振荡器要求,且线路简单,十分适合低成本电源管理芯片的应用。

参考文献 (References):

- [1] STEELE R V, HAUSKEN T. High-Brightness LED Market Review and Forecast 2009[R]. Strategies Unlimited,2009.
- [2] RAZAVI B. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿,译. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [3] ALLEN P E, HOLBERG D R. CMOS 模拟集成电路设计[M]. 马 军,译. 北京:电子工业出版社,2005.

(上接第 250 页)

实验参数:输入直流电源 48 V;直流电感 2.5 mH;谐振电容 1 μ F;谐振电感 64 μ H;谐振频率由谐振回路参数决定 $f=1/(2\pi\sqrt{L_pC_p})=20$ kHz。

从实验波形可以看出,没有加入频率跟踪电路的输出波形如图 8(a)所示,可以看出波形在过零点时有些许畸变,原因是由于控制信号的时延(包括两组控制信号切换的时间差)造成的;加入了频率跟踪电路的输出波形如图 8(b)所示,对比图 8(a)可以得到频率跟踪电路的加入一定程度上改善了输出波形的质量。

5 结束语

本研究在分析谐振逆变器工作原理的基础上,给出了并联谐振网络的频率响应表达式,并针对谐振开关逆变器输出波形过零点畸变问题,设计了频率跟踪电路,给出了频率跟踪芯片 CD4046 的外围连接图。

研究结果表明该频率跟踪电路能很好的实现输出信号与输入信号的零相位跟踪。针对外围的无源低通滤波器,做了详细的推导并给出了传递函数表达式。最后,通过实验验证了频率跟踪电路的跟踪效果达到了预期效果。

参考文献 (References):

- [1] 马 皓,周雯琪. 电流型松散耦合电能传输系统的建模分析[J]. 电工技术学报,2005,20(10):66-71.
- [2] REIS A D, ROCHA J F, GAMEIRO A S, et al. Synchro-

- [4] BAKER R J, HARRY W U, BOYCE D E. CMOS Circuit Design, Layout and Simulation[M]. IEEE Press,1998.
- [5] 张兆华,乐瑞峰,刘理天. 以环形振荡器作为敏感单元的加速度传感器[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(1):81-84.
- [6] ZHANG Zhao-hua, LIU Li-tian. A novel accelerometer using MOS ring oscillators[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology. Shanghai:[s. n.],2001:843-846.
- [7] 叶春晖,冯勇建. 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[J]. 厦门大学学报,2008,47(4):519-523.
- [8] 胡二虎,汪东旭. 一种频率稳定的集成 CMOS 环形振荡器[J]. 微电子学,2003,33(3):259-261.
- [9] 陈 康. 电流控制模式白光 LED 驱动芯片设计[D]. 电子科技大学微固学院,2006:27-32.
- [10] Analog IC Design Tutorial for Schematic Design and Analysis using Spectre[S]. Cadence Design Systems, Inc., USA.

[编辑:张 翔]

nizers based on carrier phase lock Loop and on symbol phase lock loop[C]//ICECS 2008. 15th IEEE,2008:279-282.

- [3] 刘爱忠,刘俊华,肖 岚. 数字锁相技术在逆变器并联系统中的应用[J]. 电力电子技术,2007,41(7):16-20.
- [4] 熊腊森,全亚杰. CD4046 锁相环在感应加热电源中的应用[J]. 研究与设计:电焊机,2000(6):14-16.
- [5] 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [6] ZHOU Guo-liang, SHI Xin-chun, FU Chao, et al. Operation of a Three-phase Soft Phase Locked Loop Under Distorted Voltage Conditions Using Intelligent PI Controller[C]//ICECS 2006. 13th IEEE,2006:368-377.
- [7] BOYS J T, GREEN A W. Inductively coupled power transmission concept-design and application[J]. IPENZ rans, 1995,22(1):1-9.
- [8] RHO Sung-chan. A study on power transmission system using resonant frequency tracking method and contactless transformer with multiple primary winding[C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines,2007:1635-1639.
- [9] MA Hao, ZHOU Wen-qi. Modeling a current source push-pull resonant converter for loosely coupled power transfer systems[C]//The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,2004(2):1024-1029.
- [10] 王照峰,王仕成,苏德伦. 锁相环电路的基本概念及应用研究[J]. 电气应用,2005,24(8):34-39.

[编辑:张 翔]