

DC-DC转换器高集成度片上软启动电路

杨 骁^{1,2}, 李靖坤¹, 徐锦里¹, 陈国晏¹, 娄付军¹, 李 浩²

(1. 华侨大学信息科学与工程学院 福建 厦门 361021; 2. 女王大学电气与计算机系 加拿大 安大略省 金士顿 K7L 5C9)

【摘要】提出了一种可片内集成的软启动电路, 电路由斜坡电压产生电路和带软启动功能的误差放大器组成。斜坡电压产生电路采用脉冲吞咽和窄脉冲充电技术, 以小电容实现了缓慢上升的斜坡电压信号, 便于片内集成; 软启动完成后斜坡电压产生电路自动关闭, 节省了功耗。在传统误差放大器的基础上只增加两个晶体管便实现了软启动过程控制, 启动阶段误差放大器输出电压跟随斜坡信号上升, 控制转换器输出电压和电感电流缓慢上升; 在软启动结束时自动平滑地过渡到稳定工作状态, 避免了开关切换方法产生的电感电流扰动。该软启动电路集成到一款峰值电流模升压型DC-DC转换器电路中, 采用CSMC 0.5 μm BCD工艺实现。仿真结果表明, 软启动电路有效地消除了浪涌电流, 实现了输出电压平稳上升无过冲, 并能自动平滑地过渡到稳定工作状态。电路简单易实现, 便于片内集成。

关键词 DC-DC转换; 误差放大器; 浪涌电流; 斜坡电压产生器; 软启动电路
中图分类号 TN492 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.01.005

Compact On-Chip Soft-Start Circuit for DC-DC Converters

YANG Xiao^{1,2}, LI Jing-kun¹, XU Jin-li¹, CHEN Guo-yan¹, LOU Fu-jun¹, and LI Hao²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University Xiamen Fujian 361021;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Queen's University Kingston Ontario Canada K7L 5C9)

Abstract An on-chip soft-start circuit consisting of a ramp-up voltage generator and an error amplifier with soft-start function is presented. The ramp-up voltage with slow ramp rate is achieved with small capacitors by using techniques of pulse swallowing and pulse current charging. The ramp-up voltage generator shuts down automatically to save power after the start-up has finished. The controlling scheme of start-up is realized by just adding two extra transistors to the conventional error amplifier circuit. In the start-up period, the output voltage of the converter and the current of the inductor rise are slowly controlled by the error amplifier output voltage which follows the ramp-up voltage. When the start-up finishes, a smooth transition from start-up to the steady states is achieved without disturbance to the current of the inductor, which always happens in the conventional method by using transferring switch. The soft-start circuit is applied to a peak-current mode boost DC-DC converter implemented with CSMC 0.5 μm BCD process. Simulation results show that the inrush current during start-up is eliminated effectively, and the output voltage rises smoothly without overshoot. Moreover, a smooth transition to the steady states without disturbance is achieved. The soft-start circuit is compact and suitable for on-chip implementation.

Key words DC-DC converters; error amplifier; inrush current; ramp-up voltage generator; soft-start circuit

开关DC-DC转换器具有效率高、功耗低、体积小特点, 已广泛地应用在便携式电子产品中。DC-DC转换器开始工作时, 其输出电压值较小, 反馈信号使得误差放大器工作在非平衡状态, 功率开关管长时间导通, 电感上产生浪涌电流^[1-2]。软启动电路可以解决该问题, 它通过控制功率开关管导通占空比来限制电感电流, 从而消除浪涌电流, 使输出电压平稳上升, 无过冲^[3-6]。

软启动电路通常包括两部分: 斜坡电压产生电

路和软启动控制电路。传统斜坡电压产生电路利用恒定电流对片外大电容进行充电来实现缓慢上升的斜坡电压信号, 增加了芯片的面积和管脚数目^[7]。为了提高集成度, 出现了各种可片内集成的斜坡产生电路。文献[8-9]采用nA级微小电流对片上电容充电实现缓慢上升的斜坡电压, 但是微小电流难以精确控制, 容易受工艺影响。文献[10-11]采用数字DAC控制方式来产生斜坡电压, 即通过多位计数器控制电流镜阵列流过电阻得到斜坡电压^[10]或通过多位计

收稿日期: 2016-08-01; 修回日期: 2017-06-30

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2013H0029)

作者简介: 杨骁(1978-), 男, 博士, 主要从事模拟集成电路设计方面的研究。

数器控制电流源流过电阻阵列得到斜坡电压^[11], 其电路较复杂有毛刺出现, 并且随斜坡电压精度的提高其电路规模大大增加。传统软启动控制方法是在启动初始阶段用缓慢上升的斜坡信号替代误差放大器的输入参考电压, 控制功率开关管的导通时间逐渐增加, 电感电流和输出电压缓慢上升, 当斜坡信号增大到参考电压值后, 控制开关把误差放大器的输入信号从斜坡信号切换到参考电压信号, 实现从启动阶段到稳定工作状态的切换^[10,12]。从文献[10,12]的测试结果可以看出, 该方法在切换时刻电感电流会出现明显的波动, 过渡不够平滑; 同时该方法除了斜坡信号产生电路外还需要额外的电路。

本文提出了一种新颖的软启动电路, 其中斜坡电压产生电路采用脉冲吞咽技术和窄脉冲充电技术, 以小电容实现了缓慢上升的斜坡电压; 只在传统误差放大器中增加两个晶体管便实现了从启动状态自动平滑地过渡到稳定状态的软启动控制, 无需开关切换且无额外功耗。整个软启动电路简单易实现, 功耗低。

1 峰值电流模升压型转换器电路

本文峰值电流模升压型DC-DC转换器电路框图如图1所示, 采用轻载时从开关脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)模式切换到省电模式的控制方式来提高轻载转换效率^[13-14]。转换器基本工作

原理如下: 输出电压 V_o 经过电阻 R_1 、 R_2 分压后产生反馈信号 V_{FB} , 参考电压 V_{REF} 与反馈信号 V_{FB} 之间的差值经误差放大器放大后得到误差放大信号 V_{EA} ; 斜坡补偿电流 I_{SLOPE} 、采样电流 I_{SEN} 、直流工作点设置电流 I_{REF} 求和后流经电阻 R_4 产生电压信号 V_S 。当误差放大输出电压 V_{EA} 小于 V_S 时, 产生一个高电平脉冲, RS锁存器输出端Q变为低电平, 关断开关功率管 M_N , 实现对输出电压和电感电流的控制。比较器COMP翻转的临界电压 V_S 可表示为:

$$V_S = (I_{SLOPE} + I_{SEN_PEAK} + I_{REF})R_4 \quad (1)$$

式中, I_{SLOPE} 为斜坡补偿电流; I_{SEN_PEAK} 为电感的峰值电流; I_{REF} 为基准电流, 给比较器COMP提供直流工作点。由式(1)可得, 当斜坡补偿电流 I_{SLOPE} 和直流工作点电流 I_{REF} 确定后, 电感的峰值电流 I_{SEN_PEAK} 决定了比较器COMP翻转的临界电压 V_S 。因此误差放大器输出电压 V_{EA} 能够控制电感流过的最大峰值电流。本文中提出的软启动电路包括斜坡产生电路和软启动控制电路, 如图1所示。在软启动初始阶段使误差放大器输出电压 V_{EA} 跟随斜坡信号 V_{RAMP} 缓慢上升(此时误差放大器工作在非平衡状态); 当转换器输出电压上升到预定值后, 误差放大器工作在平衡状态, 其输出电压 V_{EA} 自动地不再跟随 V_{RAMP} 信号上升, 而是稳定在系统稳定工作时所对应的值, 整个过程无需进行开关切换, 自动平稳地从启动阶段过渡到稳定工作状态。

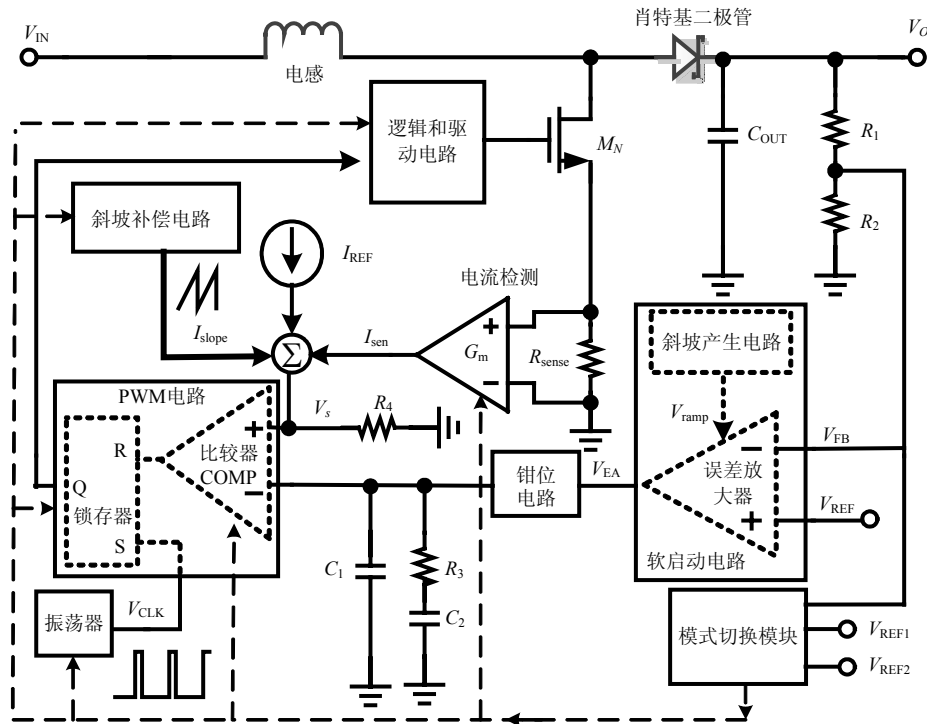


图1 峰值电流模升压型DC-DC转换器框图

2 软启动电路设计

2.1 斜坡电压产生电路

若采用恒定电流对电容充电来产生斜坡电压,在小电容值条件下,要得到缓慢上升的斜坡电压,需采用nA级的微小电流来实现,如此微小的电流源难以精确控制,容易受工艺影响。设计思想是采用脉冲电流对电容进行充电,使其等效的平均充电电流很小,从而实现小的上升斜率。本文斜坡产生电路首先产生如图2a所示的窄脉冲信号,然后在N个窄脉冲中吞咽掉(N-1)个窄脉冲,如图2b所示;再采用该窄脉冲对电容充电,产生如图2c所示的缓慢阶梯上升的斜坡电压。若窄脉冲宽度为 T_{on} ,周期为 T ,N个窄脉冲被吞咽掉(N-1)个脉冲,充电电流为 I ,充电电容为 C ,斜坡电压上升斜率可表示为:

$$S_{V_{RAMP}} = \frac{T_{on} I}{NT C} \quad (2)$$

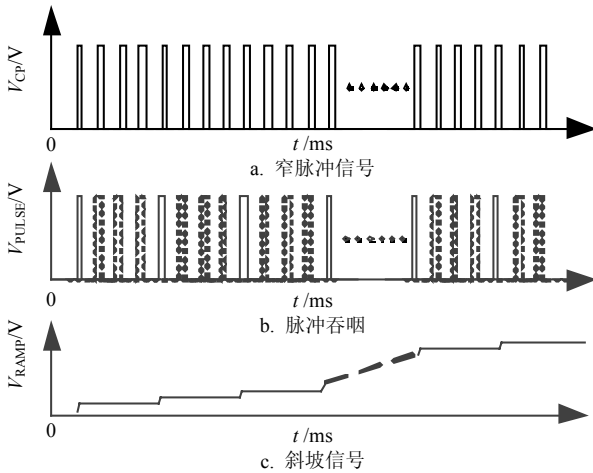


图2 斜坡电压产生电路设计思想

由于 T_{on}/NT 的比值很小,即充电的平均电流很小,从而可以采用小电容实现缓慢上升的斜坡电压。

基于上述设计思路,本文斜坡电压产生电路由窄脉冲产生电路、脉冲吞咽电路和脉冲充电电路3部分组成,如图3所示。其工作原理如下:使能信号 V_{EN} 为低电平时,与非门NAND输出高电平,MP1关断,整个电路不工作,同时反相器INV1输出高电平,MN12管导通,施密特触发器SMIT1输出信号 V_{TR} 为高电平;当使能信号 V_{EN} 高电平有效后,与非门NAND输出低电平使MP1导通,电流偏置电路MN1~MN5、NM7以及MP2~MP4导通工作,电容 C_2 通过MN7管进行放电,反相器INV2输出信号 V_{CP} 为低电平,使与门AND输出低电平,MN6关断,电流 I_1 对电容 C_1 充电。电容 C_1 的电压 V_{C1} 逐渐上升,当上升到使MN8管导通后,MN8管与MN7管构成源跟

随器结构, V_{C2} 跟随 V_{C1} 逐渐增大。 V_{C2} 增大到施密特触发器SMIT2的正向阈值电压 V_H 后,SMIT2输出发生翻转, V_{CP} 变为高电平使与门AND的输出变为高电平,MN6管导通对电容 C_1 进行放电,其电压 V_{C1} 迅速减小,从而使得MN8管关断,MN7管以电流 I_2 对电容 C_2 进行放电,电容 C_2 电压 V_{C2} 逐渐减小。当 V_{C2} 减小到SMIT2负向阈值电压 V_L 后,SMIT2输出发生翻转, V_{CP} 变为低电平并使与门AND输出低电平关断MN6管,电流 I_1 通过MP3管再次对电容 C_1 充电。如此反复,电容 C_1 和 C_2 上的电压 V_{C1} 、 V_{C2} 为三角波波形。其中电容 C_2 上的电压 V_{C2} 经过施密特触发器SMIT2和反相器INV2整形后,输出周期性的窄脉冲信号 V_{CP} ,其周期可表示为:

$$T = T_{off} + T_{on} = \frac{(V_H + V_{GS,MN8})C_1}{I_1} + \frac{(V_H - V_L)C_2}{I_2} \quad (3)$$

式中, T_{on} 为窄脉冲宽度; I_1 为电流源MP3管的电流; I_2 为电流源MN7管的电流; V_H 、 V_L 分别为施密特触发器SMIT2的正向阈值电压和负向阈值电压。

图3中间虚线框内为脉冲吞咽电路,其输入信号为窄脉冲信号 V_{CP} ,输出信号为 V_{PULSE} 。D触发器输出信号 Q_0 、 Q_1 分别为窄脉冲信号 V_{CP} 的2、4分频信号,将 Q_0 、 Q_1 与 V_{CP} 信号经过3输入与门AND3,便实现了每4个 V_{CP} 窄脉冲中3个脉冲被吞咽。

图3右边虚线框内为窄脉冲充电电路,其工作原理如下:使能信号 V_{EN} 高电平有效时,反相器INV1输出低电平,MN12关断;当 V_{PULSE} 为高电平时,MN13导通对电容 C_3 充电,充电电流大小为 I_3 ,斜坡电压信号 V_{RAMP} 上升;当 V_{PULSE} 为低电平时,MN13关断, V_{RAMP} 保持不变,从而实现了缓慢上升的阶梯斜坡电压。当 V_{RAMP} 增大到施密特触发器SMIT1的正向阈值电压后,其输出信号 V_{TR} 变为低电平使MP5管导通, V_{RAMP} 被上拉至电源电压;同时 V_{TR} 控制与非门NAND输出高电平使MP1关断,整个斜坡电压产生电路自动关闭。斜坡电压 V_{RAMP} 较小时,MN9~MN11管导通为电容 C_3 充电,使 V_{RAMP} 能够快速上升;当 V_{RAMP} 增大到一定值时,MN9~MN11自动关断,仅电流源 I_3 对电容 C_3 实行脉冲充电,此时由式(2)、式(3)可得斜坡电压台阶幅度为:

$$\Delta V = \frac{(V_H - V_L)C_2 I_3}{I_2 C_3} \quad (4)$$

上升斜率为:

$$S_{V_{RAMP}} = \frac{\Delta V}{NT} = \frac{(V_H - V_L)C_2 I_1 I_3}{NC_3 [(V_H + V_{GS,MN8})C_1 I_2 + (V_H - V_L)C_2 I_1]} \quad (5)$$

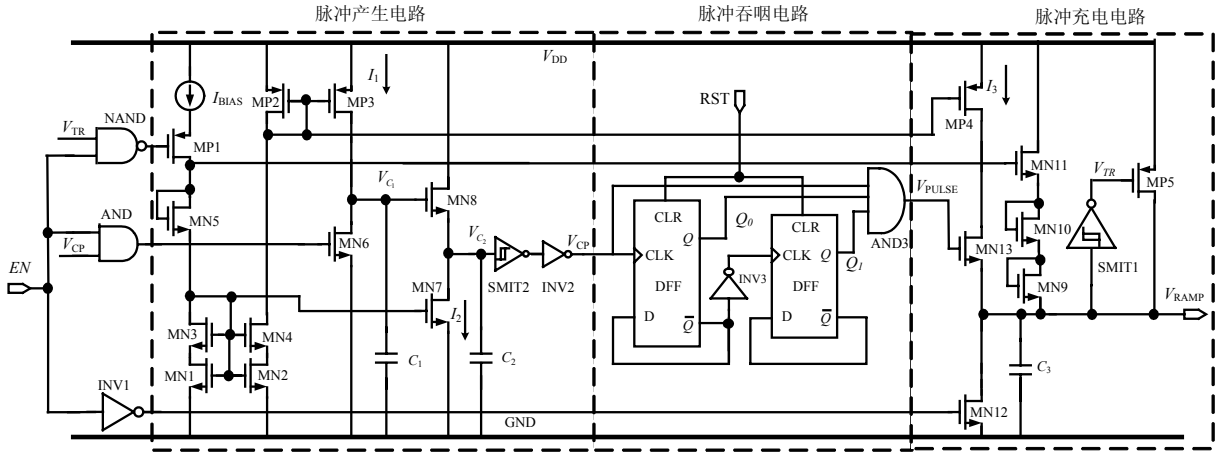


图3 本文提出的斜坡电压产生电路

2.2 带软启动功能的误差放大器电路

图4为本文带软启动功能的误差放大器，其电路是在经典两级运算放大器的基础上增加MN5管和MN6管实现。虚线框内为图1中的钳位电路，放在此图中是为了描述方便。图中 V_{FB} 为转换器的反馈电压， V_{REF} 为参考电压， V_{RAMP} 为斜坡电压， V_{EA} 为误差放大器输出信号， V_{EA_MIN} 为设定最小电感峰值电流的控制电压，偏置电流关系为 $I_1=2I_2=I_{SS}$ 。软启动控制电路工作原理如下：启动开始时，斜坡电压 V_{RAMP} 较小，MN5管关断，MP4、MP5管为电流镜且均关断，输出电压 V_{EA} 接近于0。由于 V_{EA} 小于 V_{EA_MIN} ，由OTA和MN7管构成的低电压钳位电路工作，即OTA的输出升高使MN7管导通， V_{EA} 钳在 V_{EA_MIN} 。当斜坡电压 V_{RAMP} 增大到使MN5导通后，缓慢上升的斜坡电压 V_{RAMP} 使得MN1/MN5/MP4支路电流逐渐增大，同时MP5管电流也逐渐增大(MP4、MP5管构成电流镜)。当流过MP5管的电流大于MN4管的下拉电流时， V_{EA} 升高，钳位电路失去作用，误差放大器输出信号 V_{EA} 由斜坡电压 V_{RAMP} 控制，其值可表示为：

$$V_{EA} = V_{RAMP} - V_{GS,MN5} + V_{GS,MN6} \quad (6)$$

即实现误差放大器输出信号 V_{EA} 跟随 V_{RAMP} 。缓慢上升的 V_{EA} 信号通过PWM调制电路控制功率开关管导通时间逐渐增加，转换器输出电压 V_o 和电感电流缓慢增大，直到转换器输出电压 V_o 接近期望值，使得反馈信号 V_{FB} 接近参考电压 V_{REF} ，误差放大器工作在平衡状态， V_{EA} 逐渐稳定在转换器稳定工作时所对应的 V_{EA} 值，转换器自动平稳地过渡到稳定工作状态。此后斜坡电压 V_{RAMP} 继续上升，增大到预定值后，斜坡产生电路将自动关断，同时 V_{RAMP} 被拉到电源电压，MN5管工作在深线性区，其漏源电压差极小，对误差放大器的性能影响较小。

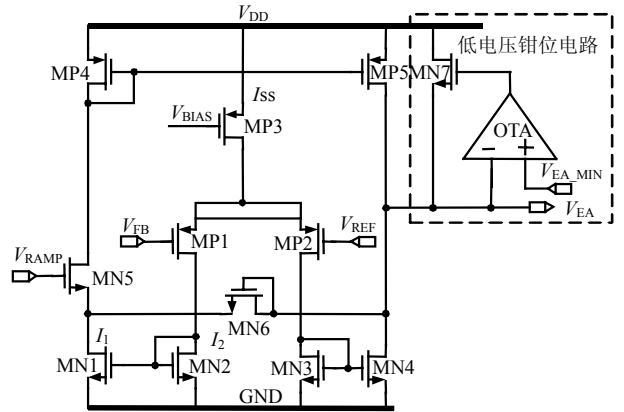


图4 带软启动功能的误差放大器电路

3 仿真结果及讨论

该软启动电路集成到峰值电流模升压型DC-DC开关转换器中，电路采用CSMC 0.5 μm BCD工艺实现。本设计中，斜坡电压产生电路中的偏置电流 $I_{BIAS}=0.8 \mu\text{A}$ ，电流 I_1 、 I_2 、 I_3 分别为0.2、4、0.2 μA ，电容 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为0.4、0.2、2.5 pF，总计3.1 pF。输入电压3.5 V，输出电压12 V，电感为10 μH ，输出电容为20 μF ，负载为30 Ω 的电阻。图5为斜坡电压产生电路仿真波形图(典型工艺角，温度27 $^\circ\text{C}$)，其中 V_{C1} 为电容 C_1 电压波形， V_{C2} 为电容 C_2 电压波形， V_{CP} 为脉冲吞咽电路输入信号， V_{PULSE} 为脉冲吞咽电路输出信号， V_{RAMP} 为输出斜坡电压，实现了斜率为0.18 mV/ μs ，台阶幅度为5.04 mV的斜坡电压。在各种不同工艺角(ff,fs,tt,sf,ss)和温度(-40~120 $^\circ\text{C}$)条件下仿真结果表明，斜坡电压 V_{RAMP} 的斜率变化范围为(0.15~0.2 mV/ μs)，台阶幅度变化范围为(4.4~5.4 mV)。

图6为软启动过程的仿真波形图，从上至下依次为软启动使能信号 V_{EN} ，误差放大器输出信号 V_{EA} 和

斜坡电压信号 V_{RAMP} ，电感电流 I_L 以及转换器输出信号 V_o 。在软启动使能信号 V_{EN} 有效后的T1时间段，斜坡产生电路中的MN9~MN11管导通，为电容 C_3 提供额外的充电电流，斜坡电压信号 V_{RAMP} 迅速上升；同时误差放大器输出信号 V_{EA} 被钳位于 V_{EA_MIN} 。当斜坡电压 V_{RAMP} 增大到一定值后，MN9~MN11关断，只有电流源 I_3 对电容 C_3 实行脉冲充电，斜坡电压 V_{RAMP} 以恒定的斜率上升。T2时间段，斜坡电压 V_{RAMP} 使误差放大器中MN5管导通后，误差放大器输出电压 V_{EA} 跟随斜坡电压缓慢上升，控制输出电压 V_o 和电感峰值电流 I_L 缓慢上升。T3时间段，输出电压 V_o 增大到期望值12 V附近，误差放大器逐渐工作在平衡状态，误差放大器输出信号 V_{EA} 不再随斜坡电压 V_{RAMP} 的升高而增大，而是逐渐稳定在转换器稳定工作时所对应的电压 V_{EA} ，转换器平稳过渡到稳定工作状态。此后， V_{RAMP} 上升到大于斜坡电压产生电路中施密特触发器SMIT2的正向阈值电压后， V_{RAMP} 被拉到电源电压，斜坡产生电路被关断。

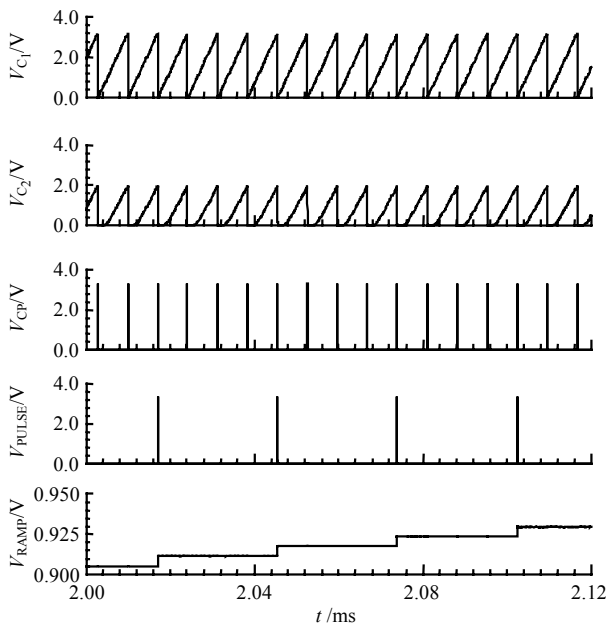


图5 斜坡电压产生电路仿真波形

斜坡信号 V_{RAMP} 每个台阶变化周期转换器的工作过程如下：当 V_{RAMP} 上升一个台阶高度时，PWM输出信号占空比产生一个阶跃，功率开关管导通时间增加，电感电流变大，电流检测电路检测电流并反馈到PWM输入端，形成负反馈，使功率开关管导通时间稳定到与 V_{RAMP} 信号大小相对应的值。电流环路的响应速度非常快，1~2个开关周期内即可稳定。稳定后，斜坡信号 V_{RAMP} 保持不变，每个开关周期功率开关管导通的时间不变，电感存储相同的能量对

滤波电容进行充电，输出电压以相同幅度上升(不考虑负载电流随输出电压上升而变大的影响)，直到斜坡信号的下一个跳变周期。因此斜坡信号 V_{RAMP} 值越大，滤波电容越小，输出电压上升越快，所需软启动时间越短。但是若斜坡信号上升斜率过大(即斜坡信号 V_{RAMP} 短时间内达到一个很大的值)，电感电流迅速增加，滤波电容电压迅速上升，当输出电压达到预定值后，误差放大器开始工作，电压环路形成闭环，误差放大器输出电压 V_{EA} 不再受斜坡信号 V_{RAMP} 的控制，而是迅速变小，导致电感电流急剧下降甚至降为0，启动过程将产生大的浪涌电流。对于相同斜率的斜坡信号，滤波电容越大，输出电压上升的速度越慢，其达到预定值的时间越长，则输出电压达到预定值时所对应的斜坡信号 V_{RAMP} 值越大，电感电流越大，产生的浪涌电流越大。因此斜坡信号上升斜率越大、滤波电容越大则启动过程中产生的浪涌电流越大，即转换器系统所允许的浪涌电流和纹波大小(纹波越小，滤波电容越大)决定了斜坡信号的上升斜率和启动时间。

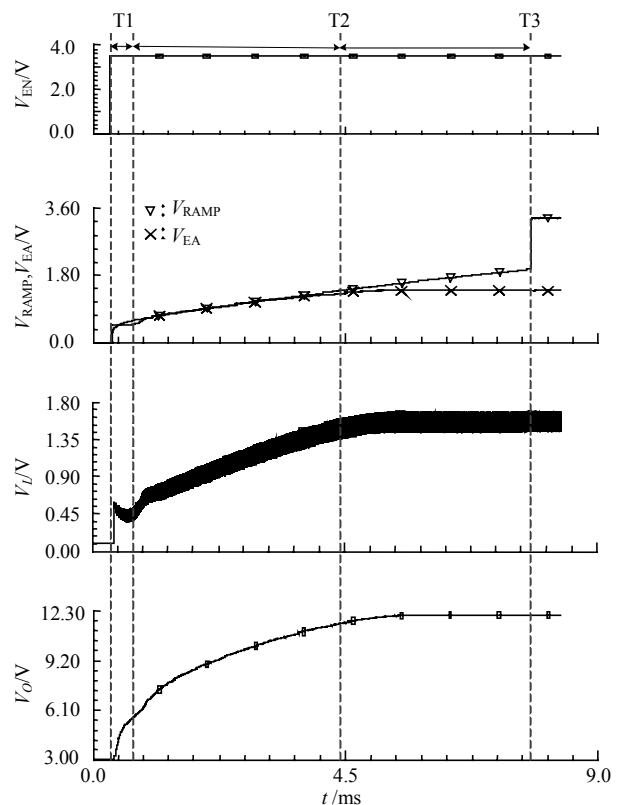


图6 软启动仿真波形

对于相同斜率的斜坡信号，根据式(3)~式(5)可以有不同的实现方式：大的台阶幅度和大的吞咽数或小的台阶幅度和小的吞咽数。假设两种实现方式的台阶幅度的比值为 M ，则大台阶幅度斜坡信号的

时间周期 $T_L=MT_S$, T_S 为小台阶幅度斜坡信号的时间周期。启动过程中, 对于大台阶幅度的斜坡信号电感电流跳变幅度大, 启动过程不够平滑, 但启动时间短; 小台阶幅度的斜坡信号电感电流跳变幅度小, 启动比较平滑, 但启动时间长。因为斜率相同, 在 M 值不是很大的情况下, 这两种方式所产生的最大浪涌电流和启动时间差别不大。由式(3)和式(4)可知, 在不改变窄脉冲信号 V_{CP} 周期的情况下(即电容 C_1 、 C_2 不变), 脉冲吞咽数每增加一倍, 相应地台阶幅度增加一倍(保持斜率不变), 则电容 C_3 的面积减小一倍, D 触发器增加一个。当电容 C_3 面积较大时(台阶幅度较小时), 增加脉冲吞咽数, 则电容 C_3 面积减小量相当可观, 并且台阶幅度绝对值增加量较小, 对启动过程中平稳性影响较小; 但是当电容 C_3 面积已经较小, 此时再增加脉冲吞咽数, 电容 C_3 面积减小量非常有限, 反而台阶幅度绝对值增大幅度较大, 导致启动过程中电感电流跳变幅度增大, 启动过程不平滑。通常设定脉冲吞咽数使电容 C_3 的值减小到pF级是个合适的选择。

采用CSMC 0.5 μm 2P3M BCD工艺进行版图设计, 软启动电路版图如图7所示, 其面积为 $210\times 89\ \mu\text{m}^2$ 。

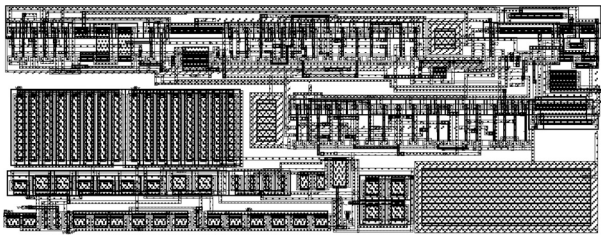


图7 软启动电路版图

本文软启动电路中的斜坡产生电路非常灵活, 可以选择不同的吞咽脉冲数和台阶幅度来满足不同的应用要求, 并且可以在电路面积与启动的平稳度能达到很好的折中。相对文献[6-8]采用电流对电容充电产生斜坡信号的方法而言, 本文斜坡产生电路在对启动平稳度影响较小的情况下, 极大地减小了电路面积; 由于高精度DAC实现难度大, 电路复杂, 文献[3,10-12]采用的DAC产生斜坡信号的方法使得斜坡信号的最小台阶幅度受到限制, 不适合于对启动过程平稳度要求高的应用。文献[10,12]软启动电路所产生的台阶幅度均为8 mV, 其版图面积分别为 $0.04\ \text{mm}^2$ 和 $0.043\ \text{mm}^2$, 若要进一步减小台阶幅度, 其电路复杂程度和面积将大幅度增加。相比而言, 本文软启动电路的台阶幅度为5 mV, 版图面积为 $0.018\ \text{mm}^2$, 消耗的面积较小, 并且避免了由于DAC计数器最高位从“0”变为“1”, 其他低位从“1”

变为“0”时产生的毛刺现象。同时本文软启动电路在传统误差放大器基础上仅增加两个晶体管就实现了软启动控制, 软启动过程无需开关切换, 避免了开关切换引起的电感电流的扰动。

4 结束语

本文提出了一种新颖的软启动电路, 实现了从启动状态自动平滑地过渡到稳定状态, 电感电流和输出电压平稳上升, 无浪涌电流和电压过冲现象出现。该电路简单灵活易实现, 便于片上集成。

参 考 文 献

- [1] AN T J, AHN G C, LEE S H. High-efficiency low-noise pulse-width modulation DC-DC buck converter based on multi-partition switching for mobile system-on-a-chip applications[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(3): 559-567.
- [2] HUANG C H, CHEN Chao-chun. A high-efficiency current-mode buck converter with a power-loss-aware switch-on-demand modulation technique for multifunction SoCs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8303-8316.
- [3] FAN Shi-quan, XUE Zhong-ming, GUO Zhuo-qi, et al. VRSPV soft-start strategy and AICS technique for boost converters to improve the start-up performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3663-3672.
- [4] JIANG Jin-guang, HUANG Fei, XIONG Zhi-hui. Adaptive switching frequency buck DC-DC converter with high-accuracy on-chip current sensor[J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(5): 111-119.
- [5] JIANG Jin-guang, TAN Gao-jian, ZHANG Ze-yu, et al. A novel dimmable LED driver with soft-start and UVLO circuits[J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(2): 135-143.
- [6] WANG Hong-yi, MA Yan-zhao, CHENG Jun. Soft-start method with small capacitor charged by pulse current and gain-degeneration error amplifier for on-chip DC-DC power converters[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2013, 21(8): 1447-1453.
- [7] LI Ya-jun, LAI Xin-quan, YE Qiang, et al. Novel short-circuit protection technique for DC-DC buck converters[J]. IET Circuits Devices & Systems, 2014, 8(2): 90-99.
- [8] ZHANG Chun-hong, YANG Hai-gang, SHI R. A wide load range, multi-mode synchronous buck DC-DC converter with a dynamic mode controller and adaptive slope compensation [J]. Journal of Semiconductors, 2013, 34(6): 065003.
- [9] MA Feng-fei, CHEN Wei-zen, WU Jin-chuan. A monolithic current-mode buck converter with advanced control and protection circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 1836-1846.
- [10] 李演明, 来新泉, 袁冰, 等. 一种DC-DC开关电源片上软启动电路[J]. 半导体学报, 2008, 29(6): 1210-1215.
LI Yan-ming, LAI Xin-quan, YUAN Bing, et al. An on-chip soft-start circuit for DC-DC switching regulators[J].

- Journal of Semiconductors, 2008, 29(6): 1210-1215.
- [11] 刘雨鑫, 刘诗斌, 李演明, 等. 一种高集成度的DC-DC开关电源软启动电路[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 108-111.
- LIU Yu-xin, LIU Shi-bin, LI Yan-ming, et al. Highly integrated soft-start circuit for DC-DC switching converters[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(2): 108-111.
- [12] 吕婧, 吴晓波, 赵梦恋. 开关型DC-DC控制芯片片上软启动电路设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2011, 31(2): 185-189.
- LÜ Jing, WU Xiao-bo, ZHAO Meng-lian. On-chip soft-start cell for switching DC-DC controller[J]. Research and Progress of SSE, 2011, 31(2): 185-189.
- [13] 袁冰, 朱新泉, 李演明, 等. 便携应用DC-DC轻负载高效率的实现[J]. 半导体学报, 2008, 29(6): 1198-1203.
- YUAN Bing, LAI Xin-quan, LI Yan-ming, et al. High efficiency realization of a DC-DC converter at light loads for portable applications[J]. Journal of Semiconductor, 2008, 29(6): 1198-1203.
- [14] ZHANG Zhang, WANG Xing, YU Wen-cheng, et al. 50 MHz dual-mode buck DC-DC converter[J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(8): 85-89.

编辑 税红

(上接第24页)

- [3] CHEN V C, LI F Y. Micro-doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 43(1): 2-21.
- [4] GEISHEIMER J L, GRENEKER E, MARSHALL W S. A high-resolution Doppler model of human gait[C]// Proceedings of SPIE on Radar Technology. [S.l.]: SPIE, 2002: 8-18.
- [5] THAYAPARAN T, ABROL S, RISEBOROUGH E. Micro-Doppler radar signatures for intelligent target recognition[R]. Ottawa, Canada: Technical memorandum DRDC Ottawa, 2004.
- [6] THAYAPARAN T, ABROL S, RISEBOROUGH E, et al. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data[J]. IET Radar Sonar Navigator, 2007, 1(4): 289-299.
- [7] LAI C P, RUAN Q, NARAYANAN R M. Hilbert-Huang transform (HHT) processing of through-wall noise radar data for human activity characterization[C]//IEEE Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics. [S.l.]: IEEE, 2007: 1-6.
- [8] QI Y, BIN D, HONGQIANG W, et al. Doppler aliasing free micro-motion parameter estimation algorithm based on the spliced time-frequency image and inverse Radon transform[C]//International Conference on Information and Communications Technologies. Nanjing: [s.n.], 2014.
- [9] TAHMOUSH D. Detection of small UAV helicopters using micro-Doppler[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9077(18): 5450-5453.
- [10] BAI X, ZHOU F, BAO Z. High-resolution three-dimensional imaging of space targets in micro motion[J]. IEEE J Sel Topics Appl Earth Observ Remote Sens, 2015, 8(7): 3428-3440.
- [11] LI J, PI Y. Target detection for Terahertz radar networks based on micro-Doppler signatures[J]. International Journal of Sensor Networks, 2015, 17(2): 115-121.

编辑 税红