

一种 DC-DC 开关电源片上软启动电路

李演明^{1,†} 来新泉¹ 袁冰¹ 叶强¹ 贾新章²

(1 西安电子科技大学电路 CAD 研究所, 西安 710071)

(2 西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

摘要: 提出了一种基于 DAC (digital-to-analog converter) 控制的数字软启动电路, 利用 DAC 控制和软启动电压检测技术, 有效抑制了 DC-DC 开关电源启动过程中产生的浪涌电流和输出电压过冲, 实现了输出电压从零到调整值的平坦上升. 在启动完成后启动电路的偏置电流被彻底关断, 实现了低功耗设计. 该软启动电路采用 CMOS 器件设计, 无需任何外围元件, 便于被 DC-DC 开关电源集成. 该电路已成功集成到一款 Buck 型 PWM (pulse width modulation) 控制器当中, 测试结果表明: 在整个负载范围内, DC-DC 在启动过程中电感电流平稳变化, 输出电压平滑上升、无过冲, 启动时间控制在 1.2ms.

关键词: 软启动; DC-DC 开关电源; 浪涌电流; 过冲

EEACC: 2570; 1280; 8110B

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)06-1210-06

1 引言

随着便携式电子产品在通信、计算机及消费类电子(3C)等领域中的不断增长, 对电源管理 IC 的需求也呈上升趋势. 而 DC-DC 开关电源在宽输入电压范围和宽负载范围条件下具有杰出的效率表现, 而被广泛应用. 开关电源是通过将误差信号转换成占空比控制信号驱动开关而工作的. 在启动阶段, 误差放大器处于非平衡状态, 使得环路处于 100% 占空比工作, 因此会有很大的浪涌电流灌入输出电容, 使得输出电压产生较大的过冲, 浪涌电流也有可能损耗开关管和其他器件^[1,2]. 为此软启动电路应运而生, 它的设计思想是通过限制占空比或限制开关电流来消除浪涌电流, 避免输出电压过冲. 随着电子系统趋于复杂化, 系统对电源电压的上电时序和上电的平稳度有了更高的要求.

本文首先比较了几种传统软启动电路的设计思想及优缺点. 在此基础上, 提出一种基于数字 DAC 控制的单片集成式 CMOS 软启动电路. 为了避免软启动电压精度对 DC-DC 环路的影响和开关切换时的毛刺干扰, 设计了软启动电压检测控制和毛刺电压消除电路, 从而有效保证了启动过程的稳定性. 同时, 在启动完成后启动电路的偏置电流被彻底关断, 实现了低功耗设计. 最后结合作者设计的一款 Buck 型 PWM 控制器, 讨论了测试结果.

2 传统软启动电路比较

图 1 给出了一款典型的 Buck 型 DC-DC 转换器控制框图. 在启动初始阶段, 输出电压远低于设定值, 所以 FB 电压远低于基准电压, 使得误差放大器处于非平衡

状态, 误差放大器(EA)输出 V_C 为高电平, 此时环路处于 100% 占空比工作, 因此会有很大的浪涌电流灌入输出电容.

为了消除启动时的浪涌电流实现输出软启动, 通常有两种方法: 一种是电压限制的方法; 另一种是电流限制的方法. 电压限制方法的设计思想是通过限制误差放大器(EA)输出信号 V_C 的电压值, 从而限制启动时的占空比, 该方法又可以分为直接限制 V_C 电压和限制 EA 输入信号两种. 传统的做法是通过一个电流源给电容充电得到斜坡上升的软启动电压, 用软启动电压代替 V_{REF} 或 V_C 电压^[3-5], 从而达到软启动的目的. 这种方法的优点是简单易用, 缺点是需要一个软启动电容来控制软启动时间, 该电容往往很大, 不能集成在芯片上, 这将增加应用面积和应用成本.

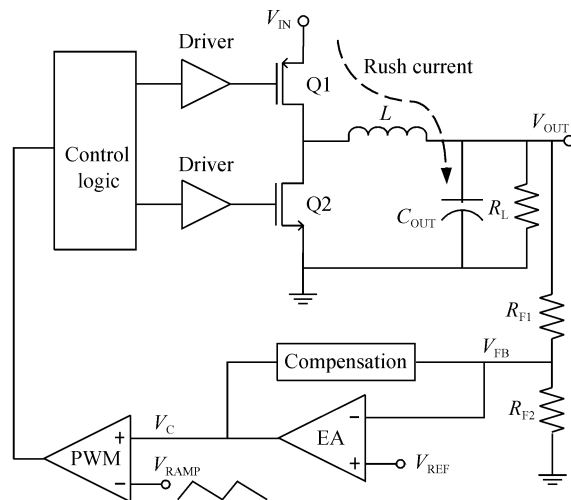


图 1 典型的 Buck 型 DC-DC 转换器控制框图

Fig.1 Typical structure of buck DC-DC converter

† 通信作者. Email: ymli2004@126.com

2007-11-06 收到, 2007-11-29 定稿

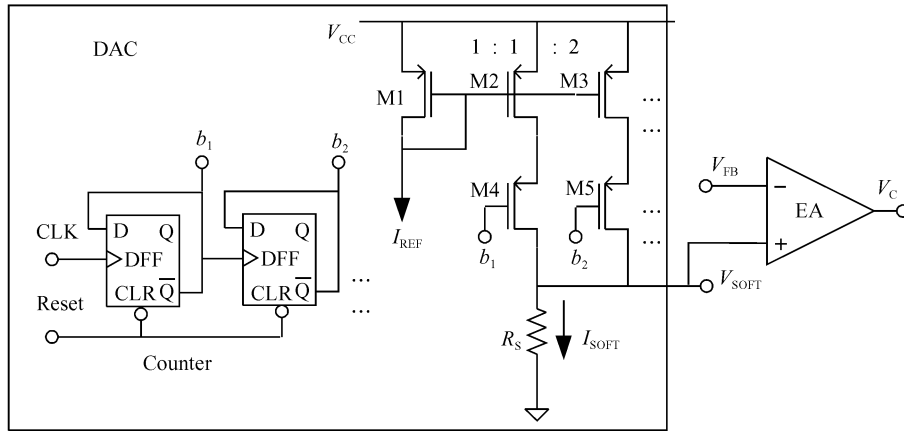


图 2 DAC 控制的软启动电路
Fig.2 Soft-start circuit with DAC control

电流限制的方法是通过检测开关管的电流并由电流比较电路来限制开关管的电流,消除浪涌.考虑到电流限制值一般大于工作电流的最大值,开始就以电流限制值工作可能会造成输出过冲,为此,一般通过阶梯型增加电流限制阈值的方法来实现软启动^[6].这种方法的缺点是需要增加电流检测和电流比较电路,不适合于没有电流限制功能的开关电源电路,而且电流限制值的切换往往并不平稳.

此外,我们在参考文献[7]中提出了一种数字软启动的方法,通过 DAC 控制软启动电流实现了软启动电路内部集成.但该方法的缺点是,由于软启动电压加在反馈电阻上,因此对反馈电阻有限制,不适合于反馈电阻变化大的情况.

3 新型软启动电路

3.1 数字软启动电路的控制方式

为了便于芯片集成,提高软启动过程的精确控制,我们提出了一种数字软启动方法,该方法不需要软启动电容和软启动引脚,其设计思想是利用 DAC 控制产生逐步升高的基准电压,作为 DC-DC 环路误差放大器的比较参考电平.图 2 和图 3 分别给出了 DAC 控制的软启动电路和软启动波形.

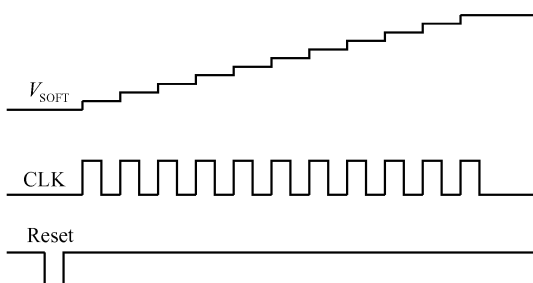


图 3 软启动波形
Fig.3 Waveforms of soft-start

图 2 框内的电路构成电流型 DAC 结构,为了避免重复和简化分析,图中只给出了两个 D 触发器和两路电流镜,省略了其余 D 触发器和电流镜电路. D 触发器构成计数器,由时钟信号 CLK 来控制计数,Reset 是一低脉冲输入信号,它是软启动电路的复位信号,低脉冲对计数器清零,使能软启动过程.计数器的计数值 $(b_1 b_2 b_3 \dots b_n)$ 作为 DAC 的输入信号,通过控制左边电流镜的通与断(电流镜镜像比例为 $1 : 1 : 2 : 4 \dots$,成倍递增),产生了软启动电流 I_{SOFT} ,公式表示为:

$$I_{SOFT} = I_{REF}(b_1 + 2b_2 + 4b_3 + \dots + 2^{n-1}b_n) = I_{REF} \sum_{i=1}^n 2^{i-1} b_i \quad (1)$$

其中 I_{REF} 为基准电流输入信号; n 为 DAC 的位数,等于 D 触发器的个数^[8].软启动电流流过电阻 R_S 产生软启动电压 V_{SOFT} ,表示为:

$$V_{SOFT} = I_{SOFT} R_S = I_{REF} R_S \sum_{i=1}^n 2^{i-1} b_i \quad (2)$$

其中 $I_{REF} R_S$ 为 DAC 的分辨率,它决定着软启动电压每个周期上升的幅度.可以通过基准电流与软启动电阻的匹配来提高 DAC 的精度,基准电流 I_{REF} 通过带隙基准电压除以电阻产生,表示为:

$$I_{SOFT} = \frac{V_{BG}}{R} \quad (3)$$

则

$$I_{REF} R_S = \frac{V_{BG}}{R} R_S = k V_{BG} \quad (4)$$

其中 k 为常数,选取 R 和 R_S 为同类型电阻并通过版图的交叉匹配法则可以提高软启动电压的精度.

但是由于电流镜失配的存在,必然会对 V_{SOFT} 造成误差,尤其当 DAC 的位数增加时,电流镜比例也增大,这个误差将加剧.由于 V_{REF} 是作为 DC-DC 反馈比较的基准电平,因此这个误差将直接引入到系统中.如果要通过提高 DAC 精度来减小这一误差将使得电路复杂化.为此,我们提出了一种软启动电压检测电路,当软启动电压达到设定值时,就终止软启动,并将软启动电压

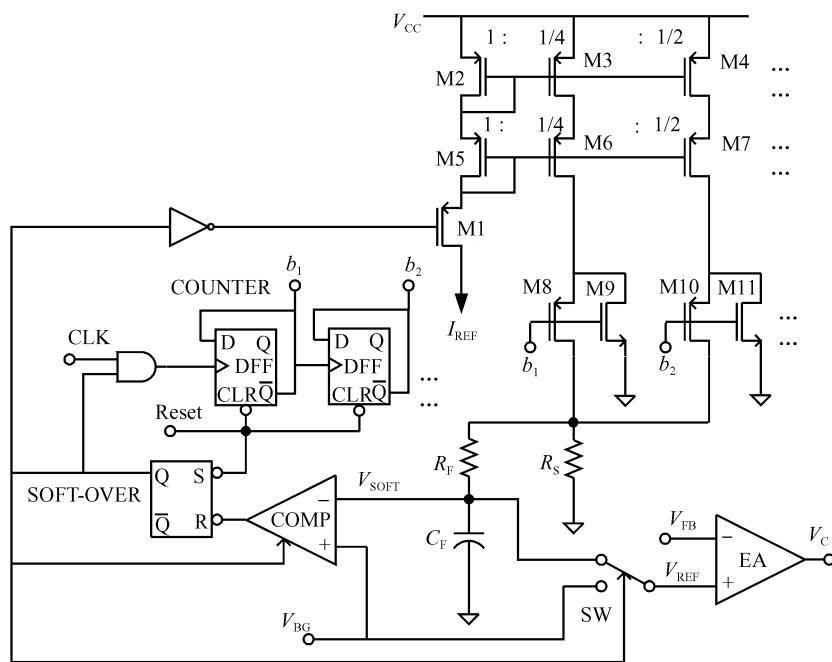


图 4 改进的 DAC 控制软启动电路(SOFT-OVER:软启动结束信号,COMP:比较器,SW:开关)

Fig.4 Soft-start circuit with improved DAC control

切换到基准电压,这样既保证了软启动过程的平滑,也保证了反馈比较基准电压的精度。

3.2 新型 DAC 控制的软启动电路

图 4 给出了新型 DAC 控制的软启动电路,与图 2 相比增加了软启动电压检测和控制电路,它主要由比较器(COMP)、RS 触发器、切换开关 SW 构成。电流镜采用 cascode 电流镜结构提高镜像精度。另外,增加了 nMOS 开关 M9 和 M11 减小电流镜开关时产生的毛刺电压, R_F 和 C_F 组成 RC 滤波网络进一步虑除毛刺电压的干扰。

比较器(COMP)检测软启动电压 V_{SOFT} ,当 V_{SOFT} 高于带隙基准(band-gap)电压 V_{BG} 时,比较器输出低电平。RS 触发器(“0”输入有效)的作用是锁定比较器(COMP)输出的低信号,并输出软启动结束信号 SOFT-OVER 去关断计数器时钟信号,停止计数,同时将误差放大器的基准电压输入切换到精确的带隙基准电压 V_{BG} ,保证 DC-DC 工作环路的精度不受 DAC 精度的影响。此外,SOFT-OVER 信号通过开关管 M1 关断软启动电流镜并关断比较器(COMP)的偏置电流,因此在软启动结束后整个软启动电路将被彻底关断,不消耗任何功耗。软启动电压检测电路的引入既避免了 DAC 的精度问题,又使得软启动电路具有了自关断功能,在软启动结束后实现了零功耗,实际上启动时间在 DC-DC 的整个工作过程中可以忽略,因此可以认为该软启动电路是零功耗的。

图 2 所示的电流镜电路在开关管 M4 和 M5 导通的瞬间会在 V_{SOFT} 上产生一个很大的毛刺电压。为此我们增加了毛刺消除电路,以其中一路电流镜为例进行分析。如图 5 所示, V_1 和 V_2 分别表示 cascode 电流镜

pMOS 管 M3 和 M6 的漏极电位, M9 为增加的用来减小毛刺电压的 nMOS 开关管, C_{P1}, C_{P2} 分别表示 M3 和 M4 漏极到电源 V_{CC} 的寄生电容。首先假设没有 M9 的情况,开关管 M8 关断时,有 $V_1 = V_{CC}, V_2 = V_{CC}$; 开关管 M8 开启时,有 $V'_1 = V_{CC} - |V_{GS}|, V'_2 = V_{SOFT}$, 其中 V_{GS} 近似等于 M2 的栅源电压。在 M8 关断和开启前后 V_1 和 V_2 的变化为

$$\begin{cases} \Delta V_1 = V_1 - V'_1 = |V_{GS}| \\ \Delta V_2 = V_2 - V'_2 = V_{CC} - V_{SOFT} \end{cases} \quad (5)$$

这个电压的变化量在寄生电容 C_{P1} 和 C_{P2} 上产生的能量变化分别为 $\Delta P_1 = \Delta V_1 C_{P1}, \Delta P_2 = \Delta V_2 C_{P2}$, 这两部分变化的能量在开关管 M8 开启时全部流过 R_s , 因此会在 V_{SOFT} 上产生毛刺,而且随着电流镜 pMOS 管尺寸的增大,寄生电容就会增大,因此毛刺电压也会增大。由于多路电流镜的电流都汇集到了 R_s 上,因此该毛刺电压也就会被累加。

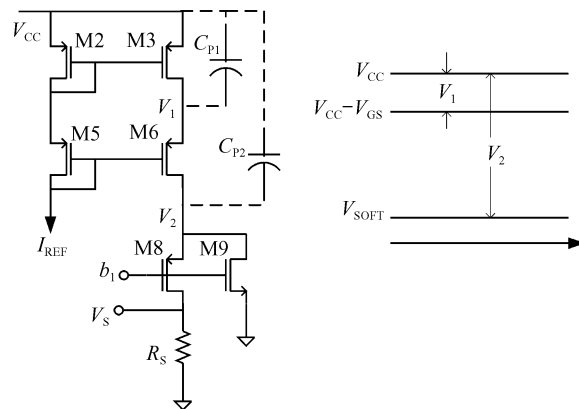


图 5 电流镜毛刺消除电路

Fig.5 Circuit to eliminate the burr of current mirror

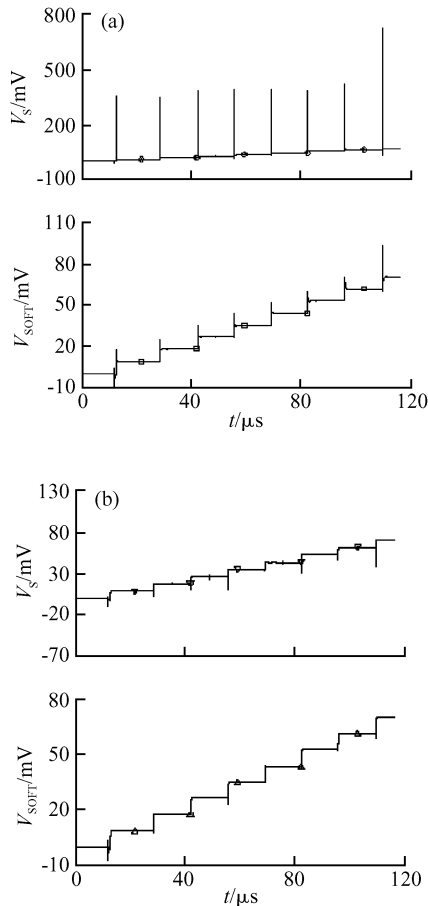


图 6 nMOS 开关管的作用比较 (a) 无 nMOS 开关的情况; (b) 增加了 nMOS 开关的情况
Fig. 6 Comparison of soft-start with (b) and without (a) nMOS switches

从上面的推导可以看出, 要降低该毛刺电压有两种方法, 减小寄生电容 C_{P1} 和 C_{P2} 或减小 V_1 和 V_2 的变化量, 为了保证电流镜像的比例, 减小 C_{P1} 和 C_{P2} 不大可行, 我们选择了后者. 此处我们增加了 NMOS 开关管 M9, M8 和 M9 交替导通, 保证电流镜电路一直导通, 在 M8 导通时, 有 $V_1 = V_{CC} - V_{GS}$, $V_2 = V_{SOFT}$; M9 导通时, 有 $V'_1 = V_{CC} - V_{GS}$, $V'_2 = 0$, 因此开关切换前后 V_1 和 V_2 的变化为

$$\begin{cases} \Delta V_1 = V_1 - V'_1 = 0 \\ \Delta V_2 = V_2 - V'_2 = V_{SOFT} \end{cases} \quad (6)$$

比较 (6) 和 (5) 式, 不难发现毛刺电压被明显降低了, 虽然 M9 会带来功耗的增加, 但是软启动结束后软启动电路的电流被彻底关断. 实际上, 在启动过程中增加的这部分功耗对系统效率的影响是可以忽略的. 为了进一步过滤残留的毛刺电压, 我们还增加了 RC 滤波网络, 由 R_F 和 C_F 组成 (其中 $R_F = 20k\Omega$, $C_F = 3pF$), 这样就可以达到较理想的效果. 图 6 是增加 nMOS 开关前后毛刺电压的仿真结果, 结果表明: 增加了 nMOS 开关后明显抑制了毛刺电压, 虽然仍有向低跳的小毛刺, 但是通过 RC 滤波基本上已经消除, 实际中软启动电压向高方向跳会造成电感电流向高跳, 对系统来说更不利.

时钟输入信号 CLK 决定着 DAC 开关周期, DC-

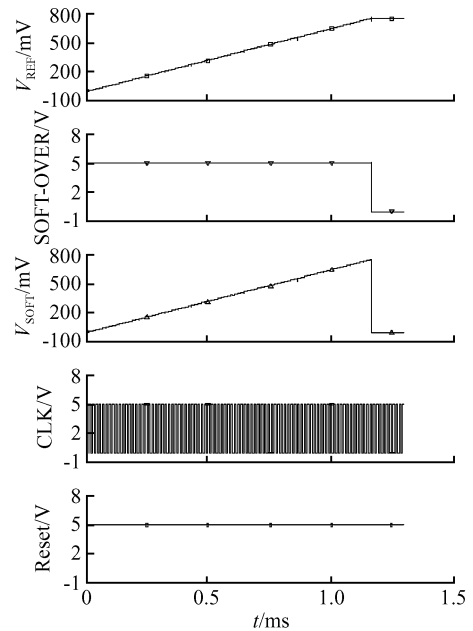


图 7 软启动仿真波形
Fig. 7 Simulated waveforms of soft-start

DC 振荡器信号可以作为 CLK 输入. 实际上为了保证软启动过程的平稳和起到可靠的浪涌电流限制作用, DAC 开关周期应大于 DC-DC 开关周期. 在实际设计的电路中 DAC 的开关周期为 $12\mu s$, DC-DC 开关周期是 $3\mu s$, CLK 由 DC-DC 振荡器进行了 4 分频得到.

软启动电压每个周期上升的幅值同样影响启动过程的平稳和浪涌电流限制质量, 如果幅值太大, 电感电流在单个软启动周期会冲的很高, 输出电压上升也会变得不平稳. 如果太小又会增加 DAC 位数, 因此增加版图面积. 实际设计的电路中软启动电压每个周期上升 $8mV$, DAC 由 7 位构成. 计数器计满, 软启动电压上升的总电压是 $128 \times 8mV = 1024mV$, 而带隙基准电压 $V_{BG} = 750mV$, 对于软启动电压检测来说有 $1024mV - 750mV = 274mV$ 的余量, 可以满足 DAC 中电流镜失配误差的需要. 在 7 位 DAC 电流镜设计上, 我们并没有采用 $1:1:2:4:8:16:32:64$ 镜像比例, 而采用的镜像比例是 $1:1/4:1/2:1:2:4:8:16$, 这样可以将面积缩小为 $1/4$. 图 7 给出了软启动电路的仿真波形, 仿真结果显示: V_{REF} 电压在启动过程中以恒定斜率稳定上升, 软启动结束的切换过程连续自然, SOFT-OVER 信号在启动结束后变为低电平, 将软启动电路关断, V_{SOFT} 电压降为零, 启动时间等于 $1.2ms$.

4 实验结果

本文设计的软启动电路已成功集成到了作者设计的一款高压 Buck 型 DC-DC 控制器当中, 采用 UMC $0.6\mu m$ BCD 工艺投片验证, 图 8 给出了该 IC 的版图照片, 其中左下角的白色框标示了软启动电路在版图上的位置, 整个软启动电路所占面积为 $0.04mm^2$.

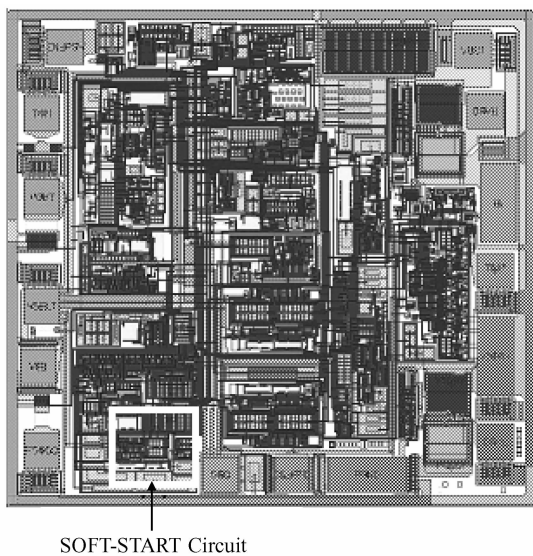
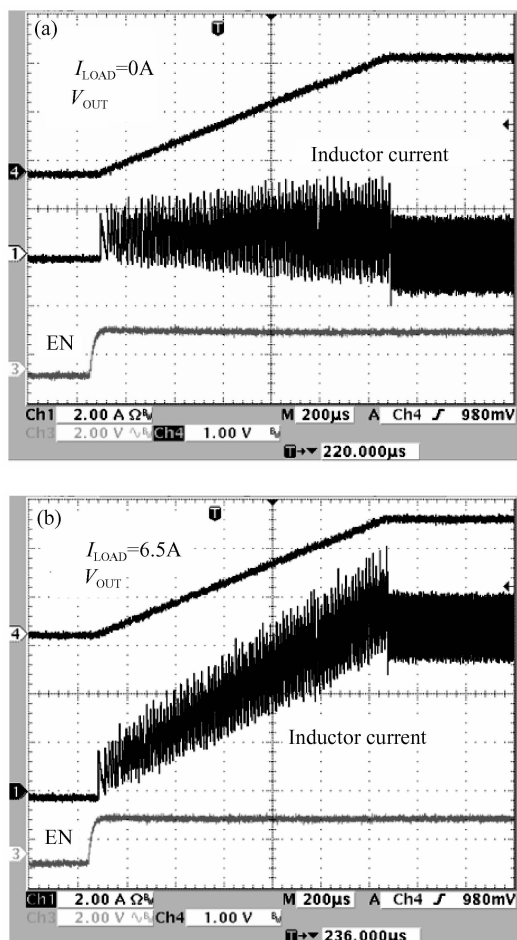


图 8 采用新型软启动电路的 Buck 型控制器版图照片

Fig. 8 Die photo of buck controller with proposed soft-start circuit

图 9 DC-DC 启动测试波形 ($V_{IN} = 5V$, $V_{OUT} = 2.4V$, $C_{OUT} = 300\mu F$)
(a)空载启动;(b)带载启动Fig. 9 Measured waveforms of soft-start ($V_{IN} = 5V$, $V_{OUT} = 2.4V$, $C_{OUT} = 300\mu F$)

通过对上述 Buck 型 DC-DC 的测试,我们发现:从空载到满载的整个负载范围内,DC-DC 的启动过程都非常平稳,电感电流变化稳定,输出电压以恒定的斜率上升,无过冲,非常平滑;启动时间等于 $1.2ms$,与负载、输入电压及输出电压的大小无关.图 9 给出了在输出电压等于 $2.4V$,输出电容等于 $300\mu F$ 的情况下,空载和 $6.5A$ 负载下 DC-DC 启动过程的测试波形.

5 结论

针对开关电源在启动过程中产生输出过冲及出现浪涌电流的问题,在分析传统软启动电路的基础上,设计了一种无需软启动引脚和片外软启动电容的新型数字软启动电路.采用 DAC 控制和软启动电压检测技术,不仅有效抑制了 DC-DC 开关电源启动过程中产生的浪涌电流,而且保证了输出电压上升的平稳性和可靠性.在启动完成后启动电路的偏置电流被彻底关断,实现了低功耗设计.测试结果表明:在整个负载范围内,启动过程都非常平稳,电感电流变化稳定,输出电压上升平滑、无过冲;启动时间等于 $1.2ms$,与负载、输入电压及输出电压的大小无关.作者设计的软启动电路全部由 CMOS 器件构成,可以方便地移植到其他 DC-DC 开关电源当中.

参考文献

- [1] Wang Haiyong, Li Yongming, Chen Hongyi. A novel soft-start circuit for DC/DC switching regulator using voltage compensation technique. *Microelectronics*, 2002, 32(1): 20 (in Chinese) [王海永,李永明,陈弘毅.一种采用电压补偿技术的 DC/DC 开关电源软启动电路. *微电子学*, 2002, 32(1): 20]
- [2] Penzin S H, Crain W R, Crawford K B, et al. The SEU pulse width modulation controllers with soft start and shutdown circuits. *Radiation Effects Data Workshop, IEEE, Issue*, 1997: 73
- [3] Texas Instruments. Low-input voltage-mode synchronous buck controller. [Online] Available: <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/tps40001.pdf>
- [4] Intersil Corporation. Buck and synchronous rectifier pulse-width modulator (PWM) controller. [Online] Available: <http://www.intersil.com/data/fn/FN9030.pdf>
- [5] Linear Tech Corp. 1.1A Step-up DC/DC converter with integrated soft-start. [Online] Available: <http://www.linear.com/pc/downloadDocument.do?navId=H0,C1,C1003,C1042,C1035,P2337,D3329>
- [6] Maxim Integrated Products. 1.8V to 28V input, PWM step-up controllers in μ MAX. [Online] Available: <http://www.maximic.com.cn/pdfserv/en/ds/MAX668-MAX669.pdf>
- [7] Lai Xinquan, Guo Jianping, Yu Weixue, et al. A novel digital soft-start circuit for DC-DC switching regulator. *6th International Conference On ASIC Proceedings*, 2005: 554
- [8] Allen P E, Holberg D R. *CMOS analog circuit design*. 2nd ed. Publishing House of Electronics Industry, 2002: 612

An On-Chip Soft-Start Circuit for DC-DC Switching Regulators

Li Yanming^{1,†}, Lai Xinquan¹, Yuan Bing¹, Ye Qiang¹, and Jia Xinzhang²

(1 *Institute of Electronic CAD, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(2 *Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: A soft-start circuit based on DAC (digital-to-analog converter) control for DC-DC switching regulator is presented. Using the techniques of DAC control and soft-start voltage sense, the rush current and overshoot of the output voltage during start-up are eliminated effectively, allowing for a smooth output voltage ramp from zero to regulation. At the end of start-up, the biased current of the soft-start circuit is cut off completely. Consequently, it is power-efficient. The circuit is designed using CMOS devices without the need of any external components, so it is suitable for integration in DC-DC switching regulators. The proposed soft-start circuit has been applied to a Buck PWM controller successfully. The experimental results show that in the entire load range the output of the system can start up smoothly, the inductor current remains stable, the output voltage rises smoothly without overshoot, and the soft-start time is about 1.2ms.

Key words: soft-start; DC-DC switching regulator; rush current; overshoot

EEACC: 2570; 1280; 8110B

Article ID: 0253-4177(2008)06-1210-06

† Corresponding author. Email: ymli2004@126.com

Received 6 November 2007, revised manuscript received 29 November 2007