

一种 DC-DC 转换器中斜坡与反斜坡补偿电路的设计

万 超,代辛恩,张国俊

(电子科技大学 薄膜与器件国家重点实验室,四川 成都 610054)

摘 要: 介绍了一种基于 $2\ \mu\text{m}$ BJT 工艺的斜坡和反斜坡补偿电路. 分析了分段线性斜坡补偿给负载能力带来的影响,提出了反斜坡补偿电路结构. 该结构在保证斜坡补偿的补偿效果情况下,消除了斜坡补偿使峰值限制电流下降的缺点,有效地提高了电路的负载能力. 最后基于 $2\ \mu\text{m}$ BJT 工艺对电路进行了仿真,得到了较为理想的结果.

关键词: 分段线性斜坡补偿;反斜坡补偿;峰值电流;带负载能力

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0147-04

Design of Slope and Antislope Compensation in DC-DC Buck Converter

WAN Chao, DAI Xi-nen, ZHANG Guo-jun

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronics Science
and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A kind of slope and antislope compensation circuit based on $2\ \mu\text{m}$ BJT IC process is presented. The effects of piecewise linear slope compensation to the load capacity are analyzed. Based on the analysis we propose the antislope compensation circuit structure. The structure overcomes slope compensation's shortcoming which is the compensation decreases the peak current. And at the same time, the structure guarantees the effect of slope compensation and improves load capacity. At the end of this article, results of the simulation based on $2\ \mu\text{m}$ BJT process are presented, which obtain that the structure performs well.

Key words: piecewise linear slope compensation; antislope compensation; peak current; load capacity

1 引言

随着现代电子技术的快速发展,各种电子产品对电源变换器品质的要求也越来越高. 开关电源作为一种高效、宽输出电压、是可高度集成化的一种电源形式,受到越来越多的重视. 相比于电压模式的开关电源,电流模式以其对输入电压响应快、消除了磁通不平衡、控制电路容易设计和输出瞬态响应较好等优点^[1]得到了广泛的使用.

然而在电感电流峰值控制模式中,当变换器的输出电压过于接近输入电压时,为了维持输出稳定,开关电源的导通时间增大,占空比增加. 当占空比超过一定程度时,如果因为某种原因导致初始电流出

现偏差,就会在下一个开关周期将这个偏差放大,如果任其累积下去,将会引起输出震荡. 此时就需要斜坡补偿电路来消除这种放大效应,维持这种电路架构的稳定性^[2].

在普通的斜坡补偿电路中,通常采用在峰值电流处叠加斜坡信号来减小峰值电流,这样做显然会影响电路的带负载能力,甚至在占空比较大时无法向负载输出足够的电流. 这就需要反斜坡补偿电路将“损失”的带负载能力补偿回来.

本文首先从一般的分段线性补偿电路入手,通过分析分段补偿对峰值电流的影响,进一步推导和设计出一种反斜坡补偿电路,在不影响稳定性的情况下,将下降的峰值电流补偿回来.

2 斜坡与反斜坡补偿的设计背景和基本原理

2.1 反斜坡补偿的设计背景

本文设计的电路是应用于一款 500 kHz 的电流模式 BUCK 型开关电源芯片. 其等效电路框图如图 1 所示.

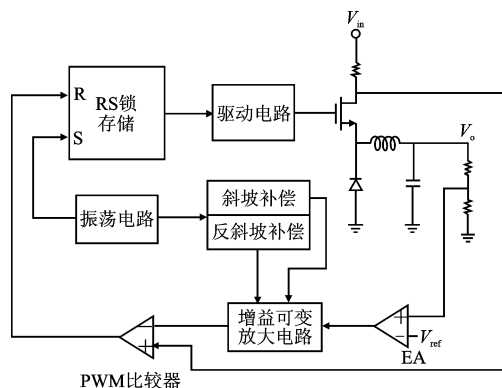


图 1 峰值电流模式开关电源芯片控制原理

反馈电阻会实时监测输出电压 V_o 的大小, 将其分压后与基准电压进行比较, 比较的结果经过斜坡补偿和 PWM 控制器和锁存器后反馈到驱动电路, 最终通过调整开关信号占空比控制输出电压 V_o .

2.2 斜坡补偿与反斜坡补偿的基本原理

如图 2 所示, 假如没有斜坡补偿, 当占空比小于 50% 时, 输出扰动电流 Δi_{L0} 在经过一个周期后会被衰减, 这样的衰减保证了电路的稳定性^[3]. 一旦占空比大于 50% 之后, 电流扰动会被逐级放大, 最终产生输出震荡.

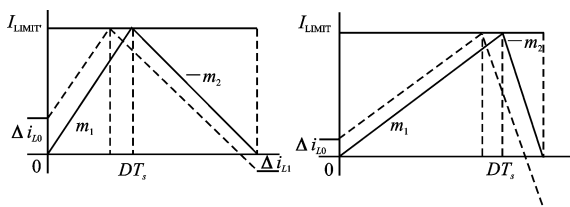


图 2 占空比变化时 I_L 的扰动过程

如图 3 所示, 在占空比大于 50% 的时候, 可以使用降低电感峰值电流得方法, 使得电流扰动不在下一个周期被放大. 令 $\Delta I_o = \Delta I_o'$, 可以得到:

$$\frac{\partial I_{LIMIT}}{\partial t} = m = \frac{1}{2}(m_2 - m_1) \quad (1)$$

也就是说, 普通的斜坡补偿是以降低电源的驱动能力 (I_{LIMIT}) 为代价提高电路稳定性的. 占空比超过 50% 时, 电流峰值会加速下降, 下降到最后甚至

有可能低于 $\frac{V_o}{R_{load}}$, 使得输出电流低于设计值, 严重影响开关电源带负载能力.

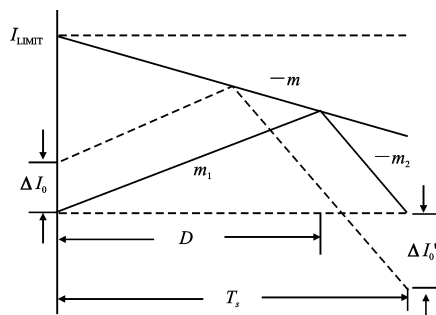


图 3 加入斜坡补偿后 I_L 的扰动过程

仔细考察斜坡补偿的原理发现, 斜坡补偿电路只要在峰值电流处产生一个值为 m 的斜率, 就可以保证电流扰动不在下一个周期被放大, 而对峰值电流 I_{LIMIT} 的实际大小并没有要求. 反斜坡补偿的目的就是不改变斜率 m 的情况下增大 I_{LIMIT} , 抵消斜坡补偿对电路负载能力的影响.

3 斜坡与反斜坡补偿的电路设计

在图 4 所示的电路中, V_{osc} 端是来自振荡器的锯齿波信号. 图中 Q1、Q2、Q3 和 Q4 和一个电阻网络组成了一个三段的斜坡补偿电流产生电路. 设 Q1、Q2、Q3 的开启电压分别为 V_{T1} 、 V_{T2} 和 V_{T3} . 通过调整电阻网络, 可以分别调整 V_{T1} 、 V_{T2} 和 V_{T3} 的大小. 当占空比小于 50% 时, V_{osc} 小于 V_{T1} , Q1、Q2、Q3 均为关闭状态, 不提供斜坡补偿电流; 当占空比大于 50% 小于 67% 时, V_{osc} 大于 V_{T1} 小于 V_{T2} , Q1 开启, Q2、Q3 关闭, 开始进行斜坡补偿; 当占空比大于 67% 小于 84% 时, V_{osc} 大于 V_{T2} 小于 V_{T3} , Q1、Q2 开启, Q3 关闭; 当占空比大于 84%, V_{osc} 大于 V_{T3} , Q1、Q2、Q3 开启.

随着 Q1、Q2、Q3 的依次开启, Q4 上的电流分为三个阶段逐渐增加. 而且每一个阶段的上升斜率都比前一个阶段大, 这样就可以近似模拟出式(1)所示的补偿曲线. 最终的补偿电流如图 5 所示.

图 4 中, Q8 晶体管对斜坡补偿电路进行镜像, 并将电流施加在 Q9 的集电极上, 构成了斜坡补偿电路; Q5、Q6 和 Q7 也对斜坡补偿电流进行镜像, 并从 Q9 的发射极将斜坡补偿电流吸走, 构成了反斜坡补偿电路. 电路工作时应保证 Q8 和 Q7 流过的电流相等, 即:

$$I_{Q8} = I_{Q7} = KI_{Q4} \quad (K \text{ 为比例系数}) \quad (2)$$

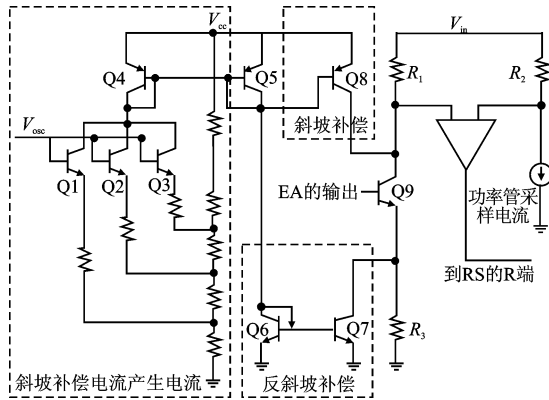


图4 斜坡与反斜坡补偿的电路设计

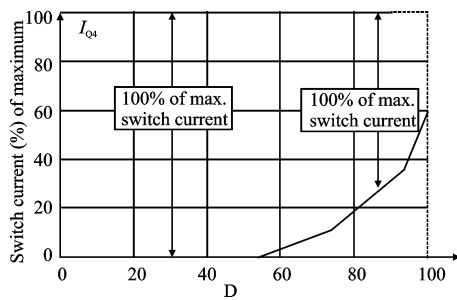


图5 三段斜坡补偿电流

图4中Q9与R3组成了图1中“增益可变放大电路”模块。对于晶体管Q9:

$$g_{m9} = \frac{I_{Q9}}{V_T} \quad (\text{其中 } V_T \approx 0.026 \text{ V}) \quad (3)$$

g_{m9} 对时间 t 求导数得到:

$$\frac{\partial g_{m9}}{\partial t} = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial I_{Q9}}{\partial t} = \frac{K}{V_T} \cdot \frac{\partial I_{Q4}}{\partial t} \quad (4)$$

因为 I_{Q4} 是斜坡补偿电流, 所以斜坡补偿电流随时间变化的斜率就按照 $\frac{K}{V_T}$ 的比例被复制到 Q9 的小信号跨导上, 如图6所示。

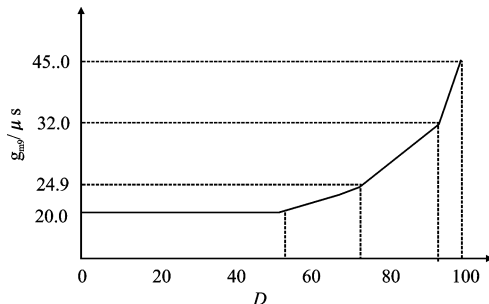


图6 Q9小信号跨导随占空比的变化

假如输出电流不存在扰动, Q9基极电压保持稳定, 又因为流过Q8与Q7的电流相等, 所以不论Q8与Q7上流过多少电流, 都可以保证Q9的集电

极电压恒定不变, 进而保证 R_1 上的电压降保持不变, 即电源比较器的峰值电流不受斜坡补偿电流的影响, 带负载能力不变。

若输出电流产生扰动, 以电流突然增加为例。如果此时占空比小于50%, 则斜坡补偿电路还未工作, 电路维持正常峰值电流; 如果占空比超过50%, 则斜坡补偿电路和反斜坡补偿电路会增加Q9的静态电流, 使Q9的跨导增加。此时如果出现小信号扰动, 扰动信号通过外部分压电阻、EA放大器后, 在Q9处被进一步放大, 会使流经 R_1 的电流迅速增大, 结果就是: 只有输出电流达到更大的值时, 才有可能使功率管关断, 等效于在峰值电流处叠加了一个斜率为 m 的增益, 起到了斜坡补偿的作用。

4 仿真结果与分析

此斜坡补偿电路被应用于一款500 kHz的大电流BULK型DC-DC转换器, 基于 $2 \mu\text{m}$ 的bipolar工艺。经过Hspice软件进行仿真, 得到的仿真结果如图7所示。

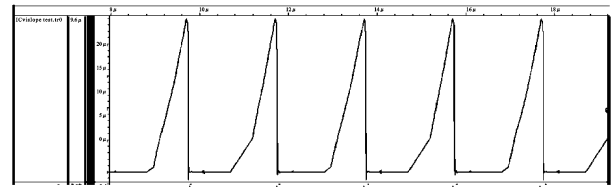
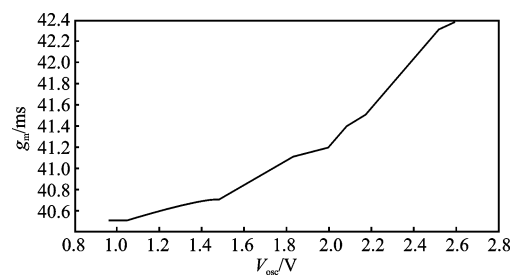


图7 斜坡补偿电流随时间的变化规律

通过仿真结果可以得到, 当占空比较小时, 斜坡补偿电路不提供补偿电流; 当占空比较大时, 提供一个3段的线性补偿电流。

以不同条件下的 V_{osc} 为参变量, 对Q9的跨导进行交流分析, 得到 g_{m9} 随锯齿电压 V_{osc} 的变化规律, 如图8所示。

图8 g_{m9} 随锯齿电压 V_{osc} 的变化规律

从图8可以看出, 随着占空比的变大, 增益可变放大器模块为小信号扰动提供了越来越大的小信号增益, 获得了与普通斜坡补偿相同补偿效果。

图 9 表示对电阻 R_1 上的电流仿真,可以看出,在整个补偿周期内, R_1 上的电流变化始终在 $1.6 \mu\text{A}$ 的范围内,仅占总电流的 3.5% ,非常稳定.由于 R_1 上的电流代表了电流控制模式下的峰值电流的大小, R_1 的电流保持稳定,也就是峰值电流保持稳定,完全解决了普通斜坡补偿电路降低峰值电流的问题.

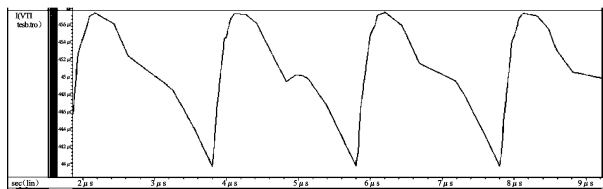


图 9 对整个周期内 R_1 上电流的仿真

5 结束语

本文讨论了分段线性斜坡补偿和反斜坡补偿的原理,并设计了一款不降低峰值电流的斜坡补偿电路.该电路可以很好地工作在一款 500 kHz 的大电流 DC-DC 转换器中.本电路同样适用于升

压电路.

参考文献:

- [1] Abraham I Pressman. Switching power supply design, third edition[M]. America: The McGraw-Hill Companies Inc, 1999.
- [2] Karl Edwards. Cancellation of slope compensation effect on current limit[P]. US: US6498466 B1, 2002.
- [3] Kazimierzuk MK. Transfer function of current modulator in PWM converters with converters with current-mode control [J]. IEEE Trans Circuits Sys, 2000, 47 (9): 1407-1412.

作者简介:

万超男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计. E-mail: once0423 <once0425@sina.com>.

代辛恩男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计.

张国俊男, (1960-), 教授. 研究方向为新型功率半导体器件与集成电路和系统.

(上接第 146 页)

- [5] Grzegorz Malewicz, Matthew H Austern, Aart J C Bik, et al. Pregel: a system for large-scale graph processing[C]// Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data. Indiana: ACM, 2010: 135-146.
- [6] Semih Salihoglu, Jennifer Widom. GPS: a graph processing system[C]// Proceedings of the 25th International Conference on Scientific and Statistical Database Management. New York: ACM, 2013: 1-12.
- [7] Sangwon Seo, Edward J Yoon, Jaehong Kim, et al. HAMA: An efficient matrix computation with the map reduce framework[C]// Proceedings of the Second International Conference on Cloud Computing Technology and Science. Indianapolis, IN: IEEE,

2010: 721-726

- [8] Leslie G Valiant. A bridging model for parallel computation [J]. Communications of the ACM, 1990, 33(8): 103-111.
- [9] Gene M Amdahl. Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities [C]// Proceedings of the AFIPS Spring Joint Computer Conference. New York: ACM, 1967: 483-485.

作者简介:

刘晓东男, (1981-), 博士, 讲师. 研究方向为云计算、虚拟化. E-mail: liuxiaodongxht@qq.com;

王淼男, (1981-), 博士, 副教授. 研究方向为空间查询、空间推理.