

一种快速瞬态响应的无片外电容 LDO 的设计

杨 洁, 曾 云

(湖南大学 物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 基于上华 $0.5\ \mu\text{m}$ 工艺, 设计了输入电压范围为 $3.5\sim 6.5\ \text{V}$, 输出电压为 $3.3\ \text{V}$, 最大输出电流为 $100\ \text{mA}$ 的 CMOS 无片外电容的低压差线性稳压器. 提出了一种自动检测网络用来快速感应负载电流的变化, 抑制输出电压的跳变, 改善了负载瞬态响应. 在稳定性方面, 采用 miller 补偿, 加之第二级采用了输出电阻很小的 buffer 结构^[1], 这样主极点和次极点分离很远使得系统稳定. 仿真表明, 该 LDO 在 $V_{\text{IN}}=6.5\ \text{V}$ 和 $V_{\text{IN}}=3.5\ \text{V}$ 下 undershoot 分别为 $156\ \text{mV}$ 和 $135\ \text{mV}$, overshoot 分别为 $145\ \text{mV}$ 和 $60\ \text{mV}$, 线性调整率和负载调整率分别为 0.023% 和 0.5% .

关键词: 无片外电容; 自动检测网络; 瞬态响应

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)08-0123-04

The Design of a Fast Transient Response and Capacitor-free LDO

YANG Jie, ZENG Yun

(College of Physics and Microelectronics Science, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on $0.5\ \mu\text{m}$ process, designed an off-chip capacitor-free CMOS low dropout linear regulator (LDO) the input voltage range is $3.5\sim 6.5\ \text{V}$, the output voltage is $3.3\ \text{V}$, maximum output current $100\ \text{mA}$. This LDO use automatic detection of network to sense load current changes rapidly and give inhibition of the output voltage transitions, improving the load transient response. In terms of stability, with miller compensation, couple with the second stage use a buffer with small output resistance^[1] make the system achieve stable. The simulation result shows when $V_{\text{IN}}=6.5\ \text{V}$ and $V_{\text{IN}}=3.5\ \text{V}$, the LDOs undershoot is $156\ \text{mV}$ and $135\ \text{mV}$, overshoot is $145\ \text{mV}$ and $60\ \text{mV}$, the line regulation and load regulation are 0.023% and 0.5% .

Key words: capacitor-free; auto sense network; transient response

1 引言

随着集成电路的不断发展, 电源管理类 IC 芯片的市场越来越广, 被广泛应用于计算机, 通信设备以及便携类电子产品, 目前常用的电源芯片主要包括开关型电源转换器 (DC/DC) 和低压差线性稳压器 (LDO). 其中 DC/DC 效率高, 静态电流少, 但同时生产成本也相对较高, 而且输出电压纹波较高; 虽然 LDO 的效率不如 DC/DC, 但由于它体积小, 片外器件少, 输入输出响应快, 输出电压中的噪声小, 低纹波电压等特性, 使得 LDO 广泛用于许多便携式产品中.

传统 LDO 由于有输出端大电容, 故具有良好的瞬态响应, 但由于片外电容较大, 导致面积较大,

不利用片内集成. 对于无片外大电容 LDO, 如果不加相应的改进瞬态响应的电路, 那么当负载电流发生跳变时, 其输出电压往往会有很大的过冲. 本文提出了一种负载瞬态响应提高电路来对无片外电容的 LDO 负载瞬态响应进行改善, 使其在负载电流发生变化时输出电压过冲不会太大.

2 无片外电容 LDO 瞬态响应分析

LDO 的负载瞬态响应是由于负载电流和输出电流暂时不匹配引起的^[1], 它反映的是负载电流变化时输出电压跳变的最大值, 对于无片外电容 LDO 而言, 当负载电流从最小值 I_{min} 跳变到最大值 I_{max} 时, 负载瞬态响应公式表示为

$$\Delta V_{\max} = \frac{I_{\max}}{C_L} \Delta t \quad (1)$$

式中, Δt 为 LDO 的环路带宽的倒数; C_L 为 LDO 输出端负载电容, 本文的 C_L 取的是 50 pF.

当负载电流瞬间发生很大的跳变时, 输出电压下降, 导致反馈电压 V_{fb} 下降, 从而调整管的栅极电压 V_G 下降, 最终通过误差放大器和调整管组成的负反馈环路使得输出电压上升, 从式(1)可以看出, 由于误差放大器的 GBW 保持在普通情况下的 100 ~ 500 MHz 范围内, 如果输出电容很小的话, 就会导致输出电压跳变很大, 除非增大电流使得误差放大器的 GBW 提高, 但是这样功耗会大大增加, 成本增大, 而且实际应用中也不允许功耗大的 LDO. 如图 1 所示, 在调整管和输出端之间加一个快速响应电路, 该电路直接将输出电压的变化反映到调整管的栅极处而不是通过主环路来慢慢响应, 这样误差放大器(EA)的 GBW 就可以不用做太大, 节省了功耗, 同时也改善了 LDO 的负载瞬态响应能力.

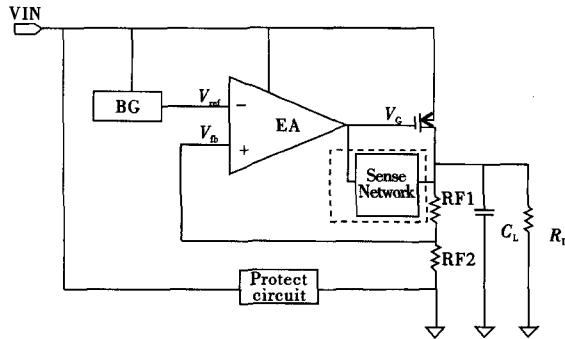


图 1 LDO 结构图

3 快速响应 LDO 的设计

3.1 瞬态响应提高电路

图 2 所示为自动检测网络电路, 用于提高 LDO 的瞬态响应, 如图 2 所示, 由于 ms6 与 ms5 之间存在失调, 故当 V_{OUT} 没有下降时 Q1 点为低电平, ms9 始终关闭直至负载电流增大, 从而 V_{OUT} 下降, 由于电容两端电压差不能突变, 电容 C_F 能够快速采样到输出电压的下降, 然后引起 ms3 源极电压的减少使得 Q1 点电压上升从而导通, 加快了功率调整管栅极的放电速度。同理, 由于 ms7 与 ms8 存在失调, 当 V_{OUT} 没有上升时, Q2 点为高电平, ms10 关闭直至负载电流减少, V_{OUT} 上升, 使得 Q2 点电压下降从而导通, 瞬间产生大电流对功率调整管的栅极电容进行快速充电。由于 LDO 正常工作时, ms9 和 ms10 关闭, C_F 容值较小(0.5 pF), 因此对主环路不

构成影响。

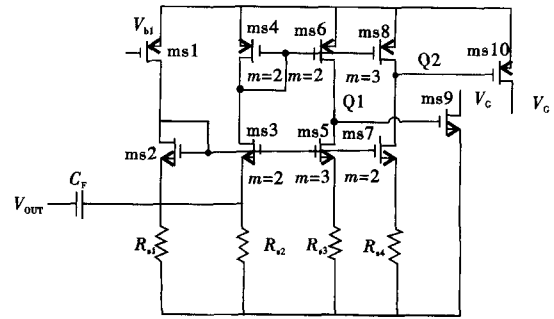


图 2 自动检测网络电路示意图

3.2 LDO 电路结构

本文设计的 LDO 误差放大器采用的是两级结构, 如图 3 所示, 第一级采用折叠共源共栅(fold cascode)结构, 既能保证共模电压输入范围, 也能保证直流增益。第二级采用低输出电阻的 buffer 结构^[2], 如图 3 中虚线框, 该结构由两个环路组成, 其中一个环由 m13 和 m15 构成, 另一个环由 m13, ms16, m17 构成, 这个并联负反馈网络提高了反馈增益所以使得该结构比传统 buffer 结构的输出电阻低很多, 该 buffer 的输出电阻为

$$R_{o2} = \frac{1}{g_{m13}g_{m15}r_{13} + g_{m13}g_{m17}g_{m16}r_{13}r_{17}} \quad (2)$$

3.3 稳定性分析

如图 3 所示, 该 LDO 采用了传统的 miller 补偿使主极点 p_1 , 次极点 p_2 分离达到到补偿的效果, 在补偿电容 C_c 前串联一个 buffer 消除前馈^[3], 从而不会产生右半平面的零点。

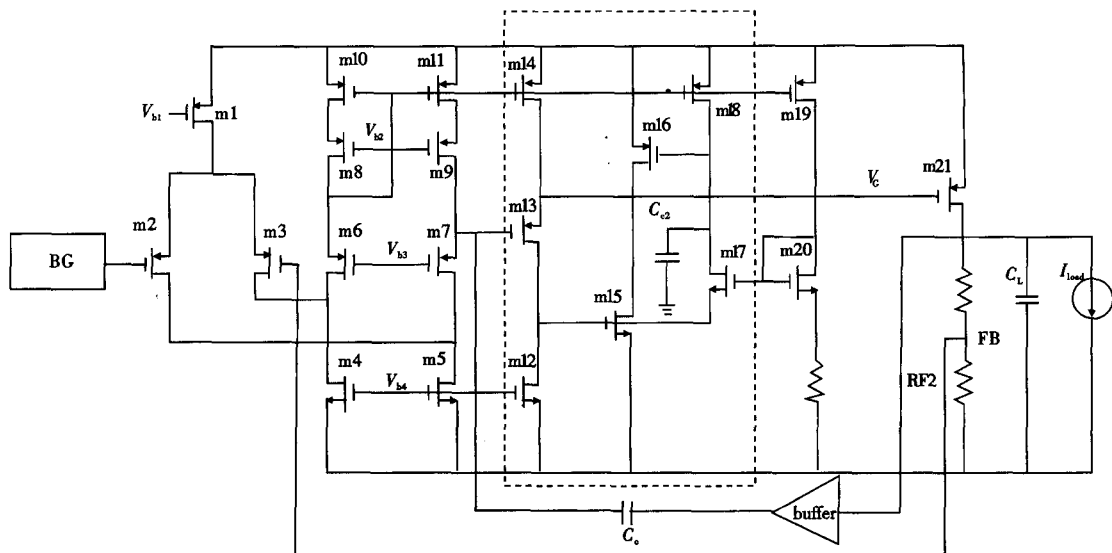
$$p_1 = \frac{1}{R_{o1}(1 + A_2A_3)C_c} \quad (3)$$

$$p_2 = \frac{1}{R_{o2}C_p} \quad (4)$$

$$p_3 = \frac{G_{m3}}{C_L} \quad (5)$$

$$GBW = \frac{G_{m1}}{C_c} \quad (6)$$

式中, G_{m3} 和 C_p 分别为功率调整管的跨导和寄生电容, 其中 $C_p = C_{gs} + C_{gd}(1 + G_{m3}R_{o3})$, G_{m1} 为输入对管的跨导, G_{m2} 为第二级的跨导, C_L 为负载电容, C_c 为补偿电容, A_2 和 A_3 分别为第二级和输出级的增益。通常情况下, 在轻载时由于 $G_{m3}R_{o3}$ 比较大, 故此时 p_2 比较远, 但在重载时由于调整管处于线性区导致 G_{m3} 很小导致 p_2 离 GBW 比较近, 所以 p_2 是随负载电流变化的。通过采用低输出电阻的 buffer 结构可以保证 p_2 在重载情况下仍然处于 GBW 之外, 保证



稳定性.

4 仿真结果

本文提出的 LDO 采用上华 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 工艺进行设计,并用 Cadence 软件里的 spectre 工具进行仿真,其中 V_{IN} 为 $3.5\sim 6.5\text{ V}$, V_{OUT} 为 3.3 V ,负载电流 I_{load} 范围为 $1\sim 100\text{ mA}$.

图 4 所示为 PSRR 的仿真结果,从图中可以看出 LDO 的低频 PSRR 约为 70 dB,满足一般电路的要求。图 5 给出了负载电流在 1 μ m 内发生 1 ~ 100 mA 和 100 ~ 1 mA 时 LDO 的负载瞬态响应情况:在 $V_{IN}=6.5$ V 和 $V_{IN}=3.5$ V 下 undershoot 分别为 156 mV 和 135 mV, overshoot 分别为 145 mV 和 60 mV。

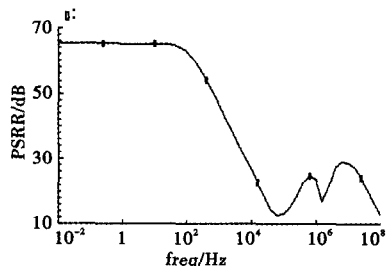
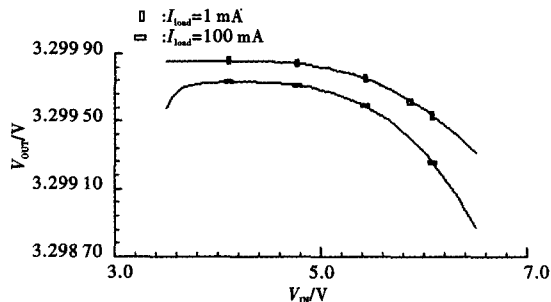
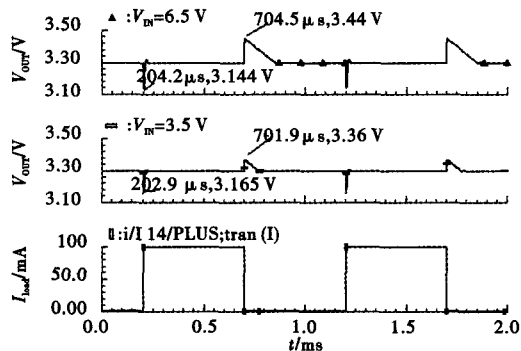


图 6 给出了 LDO 的线性调整率(Line Regulation),扫描输入电压从 3.5 V 变化到 6.5 V,输出电压分别在负载电流为 1 mA 和 100 mA 时变化了 0.5 mV 和 0.7 mV. 图 7 为 LDO 负载调整率(Load Regulation)的仿真结果,输出端负载电流从 1mA 变化到 100mA 时,输出电压在 V_{IN} 为 3.5 V 和 6.5



V 时,分别变化了 0.3 mV 和 0.5 mV,所以该 LDO 的线性调整率和负载调整率分别为 0.023% 和 0.5%。

5 结束语

文中设计的 LDO 采用了自动检测网络用来减少输出电压跳变范围,使得 undershoot 电压和 overshoot 电压分别约为 156 mV 和 145 mV,抑制了

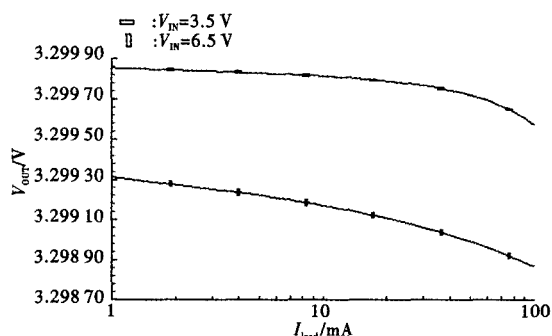


图7 LDO 的负载调整率

输出电压的过冲,从而很好的改善了 LDO 的负载瞬态响应. 由于第二级采用的是低输出电阻的 buffer,这样既可以把第二个极点推得很远,节省了补偿电容的面积,也能够很好地驱动调整管的栅极大电容,减少了 LDO 的静态功耗. 仿真结果显示,线性调整率和负载调整率分别为 0.023% 和 0.5% 左右,达到了期望的值.

参考文献:

- [1] 宁志华,何乐年,刘磊. 一种低功耗、高稳定性的无片外电容线性稳压器[J]. 电路与系统学报,2009,4(2):84-

(上接第 122 页)

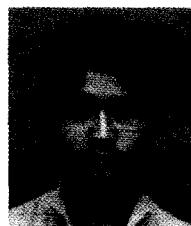
参考文献:

- [1] 罗万,彭泽润. 高浓缩汉语拼音拼写方案及其原理[J]. 北华大学学报,2006,(6):1-10.
- [2] Ma Zhiqiang, Su Yila, Ma Yao. The study of chinese dictionary mechanism based on the suboptimal search tree[C]// The International Conference on Computer and Automation Engineerin (ICCAE 2010). [S. L]: ACM Press,2010:65-69
- [3] 马志强. 一种给批量汉字加注有声调拼音的方法[J]. 微电子学与计算机,2008,25(4):185-187.
- [4] 梁南元. 汉语计算机自动分词知识[J]. 中文信息学报,1990(2):29-33.
- [5] 郭翠珍,朱巧明,李培峰,等. 基于信息网格的分词服务的研究 [J]. 微电子学与计算机,2006,23(5):121-123.
- [6] 冯尚友. 信息熵与最大熵原理[J]. 水利电力科技,1995,22(3):24-29.
- [7] 刘培玉,贾丽洁. 基于最大熵模型的分词技术研究[J].

89.

- [2] Jun Choi,Jungeui Park,Wooju jeong,et al. Design of LDO linear regulator with ultra low-output impedance buffer [J]. IEEE J Solid-State Circuits,2009,37(9):1323-1972.
- [3] Sansen, Willy M C, 陈莹梅. 模拟集成电路精粹[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

作者简介:



杨洁 男,(1987-),硕士研究生. 研究方向为 CMOS 模拟集成电路设计.



曾云 男,(1956-),教授,博士生导师. 研究方向为新型和高性能电子器件、电子器件应用、CMOS 图像传感器.

计算机软件与理论,2007(4):18-21.

- [8] 张仰森,曹元大,俞士汶. 最大熵方法中特征选择算法的改进与纠错排歧[J]. 北京理工大学学报,2006,26(1):36-40.
- [9] 宋国杰,唐世渭,杨冬青,等. 基于最大熵原理的空间特征选择方法[J]. 软件学报,2003,14(9):1544-1550.
- [10] Yu Shiwen, Duan Huiming, Zhu Xuefeng, et al. The specification of basic processing of contemporary chinese Corpus [J]. Journal of Chinese Information Processing, 2002.

作者简介:



张丽青 女,(1984-),硕士,研究生. 研究方向为人工智能、中文分词.