

引用格式:武琪,邵元超,王漪婷. 一种基于恒 β PNP 结构的大电流 LDO 稳定性设计[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(8): 68-71. [WU Q, SHAO Y C, WANG Y T. A stability design of the large current LDO based on the constant β PNP structure [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(8): 68-71.]

一种基于恒 β PNP 结构的大电流 LDO 稳定性设计

武 琪,邵元超,王漪婷

(西安微电子技术研究所,陕西 西安 710054)

摘 要: 本文在分析了传统 LDO 补偿方式的基础上,介绍了一种基于恒 β PNP 结构的适用于大电流、双极性 LDO 的稳定性设计技术.该结构有效地克服了传统的靠增大输出电容而牺牲瞬态性能和 ESR 补偿方式对输出电容要求苛刻的缺点.采用该结构设计的 LDO 采用 $3\ \mu\text{m}$ 18V 双极工艺进行了流片验证,效果显著.

关键词: LDO; 稳定性; PNP; 电流放大倍数 β

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2019)08—0068—04

A stability design of the large current LDO based on the constant β PNP structure

WU Qi, SHAO Yuan-chao, WANG Yi-ting

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an, 710054, China)

Abstract: Based on the analysis of the traditional LDO compensation methods, this paper introduces a stability structure based on constant β PNP structure. It is suitable for high current and bipolar LDO. This structure effectively overcomes the drawbacks of relying on increasing the output capacitance while sacrificing transient performance and the harsh demand for output capacitance of ESR compensation method. The LDO adopting the structure is verified by $3\ \mu\text{m}$ 18V bipolar process, and the effect is remarkable.

Key words: LDO; stability; PNP; current amplifier β

1 引言

低压差线性稳压器(Low Dropout Regulator, LDO)的主要功能是对外提供直流稳压电源.一款 LDO 是否能够应用于实际电子系统中,稳定性是先决条件.输出电压的震荡会带来电源效率的降低、影响数字电路的逻辑关系、干扰信号的正常传递及产生浪涌电压或者电流等不利影响.因此,只有在输出电压波形稳定的前提下,考察其其它诸如输出精度、线性调整率、负载调整率、输入-输出压差、静态电流、电源抑制比等参数才有实际意义.

LDO 根据调整管的器件和结构的不同可以分为双极型 LDO 和 MOS 型 LDO;其中双极性 LDO

又分为 NPN 型和 PNP 型 LDO.在正电源双极型 LDO 设计中,PNP 管由于具有输入-输出压差低等优点而被大量采用^[1].

2 双极型 LDO 的典型结构及补偿方式

典型的 PNP 型 LDO 的原理如图 1 所示,主要电路由误差放大器、缓冲驱动级、功率调整管、分压电阻网络和输出电容组成^[1].其中, C_L 为输出负载电容, R_{ESR} 为输出电容 C_L 的等效串联电阻.

该结构构成了一个负反馈系统,其稳定性取决于系统内各节点所产生的零极点频率的位置^{[2][3]}.对其稳定性进行分析时,可以将 LDO 看成三级放大电路,分别由误差放大器、缓冲驱动级、功率调整

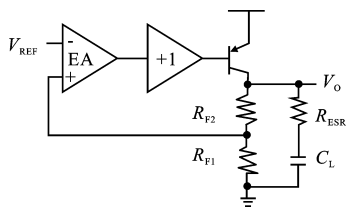


图 1 典型的 LDO 原理图

管构成,其等效结构如图 2 所示:

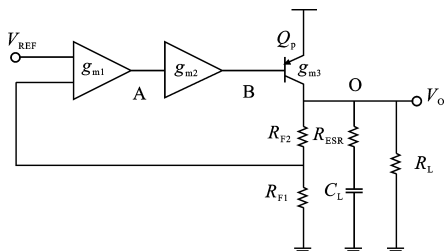


图 2 典型的 LDO 的等效小型号模型

其中, g_{m1} 、 g_{m2} 和 g_{m3} 分别代表差放大器、缓冲驱动级、功率调整管的等效跨导。

由图 2 可知,在不进行任何补偿的情况下,该系统在 A 节点、B 节点及输出节点处共存在 3 个极点。

因为输出电容 C_L 比较大,一般为 μF 量级,所以输出极点一般位于单位增益带宽以内,对环路稳定性产生影响;极点 P_A 位于误差放大器的输出端,由于必须保证尽量大的增益,误差放大器的输出阻抗一般很大,所以该极点一般也位于单位增益带宽以内,对环路的稳定性产生影响^[6];极点 P_B 位于驱动级的输出端,由于驱动电路的输出端连接功率管的基极,对于大电流输出的 LDO 来说,功率调整管的面积较大,会产生较大的 B-C 结电容和衬底电容,因此该节点也会产生一个低频节点,对环路稳定性产生影响。

在以上 LDO 负反馈环路中存在三个极点,如果单位增益带宽内存在两个或者两个以上的极点时,相位就会发生 180° 的相移,而导致系统不稳定。所以需要采用频率补偿的方法,保证相移小于 180° 。常见的补偿方式包括^{[4][5]} (1) 选用 ESR 较大的电容,在输出节点产生一个左半平面零点; (2) 在节点 A-输出或者节点 A-B 之间接入密勒电容使得极点分离,将高频极点推出增益带宽以外; (3) 在节点 A-输出或者节点 A-B 之间接入密勒电容及调零电阻使得极点分离的同时产生左半平面零点;实现系统稳定。但以上补偿方式,用在大电流 LDO 结构中,均存在一定的局限性。

3 本文介绍的稳定性设计方法

3.1 理论分析

对于大电流输出的 LDO 来讲,以 3 A 为例,假如其允许的最小负载电流为 1 mA(包含分压电阻网络中的电流),其输出电流变化最大可达 3 000 倍,对应输出节点的阻抗变化 3 000 倍,在输出电容 C_L 一定的情况下,输出节点的极点频率 P_O 随着输出电流的变化也发生 3 个数量级的变化。当负载由轻载到重载变化时, P_O 的极点频率由低频向高频移动^[7]。

$$P_O = \frac{1}{r_o \times C_L} \quad (1)$$

$$r_o = r_{O_PASS} // R_L = \frac{V_A // V_O}{I_O} \propto \frac{1}{I_O} \quad (2)$$

式中, r_o 为输出节点的等效阻抗; r_{O_PASS} 为输出功率管的小信号阻抗; V_A 为 PNP 型调整管的厄利电压; V_O 为 LDO 的输出电压; I_O 为 LDO 的负载电流。所以:

$$P_O \propto I_O \quad (3)$$

其次,对于图 2 中所示的极点 P_B ,其频率点取决于该节点的等效阻抗及等效电容,如图 1 中所示:

$$\text{该节点的等效阻抗: } r_B = \frac{\beta_{PASS}}{g_{m_PASS}} \quad (4)$$

考虑密勒效应,该节点的等效对地电容:

$$C_B = g_{m_PASS} \times r_o \times C_{B-C_PASS} \quad (5)$$

式中, g_{m_PASS} 为功率管的跨导; C_{B-C_PASS} 为功率管的 B-C 结寄生电容。

则该节点的极点频率,可表示为:

$$P_B = \frac{1}{\beta_{PASS} \times r_o \times C_{B-C_PASS}} \quad (6)$$

$$P_B = \frac{1}{\beta_{PASS} \times r_o \times C_{B-C_PASS}} \propto \frac{I_O}{\beta_{PASS}} \propto I_B \quad (7)$$

式中, β_{PASS} 为调整管的电流放大倍数。可见,该极点的频率与调整管基极驱动电流呈正比例变化,该极点的频率随着基极驱动电流的增大而增大。

调整管一般采用横向 PNP 管,其电流放大倍数随着集电极电流的变化剧烈变化,如图 3 所示:

由上图可以看出随着集电极电流的增大,电流放大倍数 β 在减小。以上述的 3A 电流能力的 LDO 为例,调整管版图共包含 4 000 个发射区直径为 5 μm 的横向 PNP 单元,每个单元的输出电流最大值约为 800 μA 。当输出电流从 1mA~3A 变化 3 000 倍时,根据图 3 中的数据,基极电流的变化约为 20 000 倍。

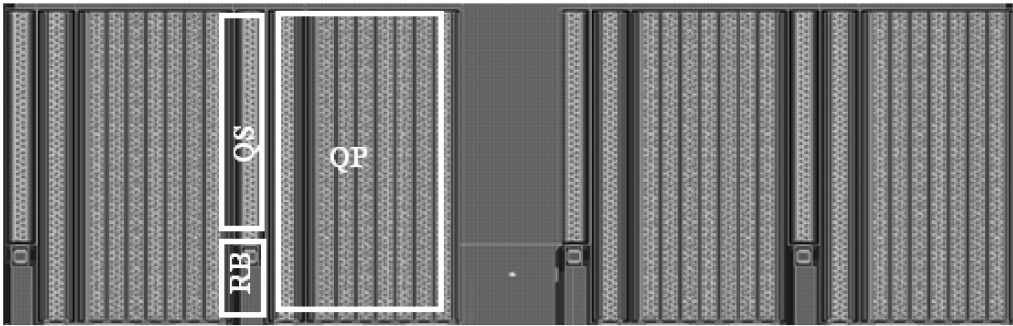


图 5 本文设计的恒 β PNP 结构版图实现

表 1 不同结构,相同负载电流下等效基极电流对比

负载电流 (mA)	等效基极电流(mA)	
	典型结构	恒 β 结构
30	0.06	0.41
300	0.79	4
1000	4.69	12.8
3000	37.9	37.9

本文设计的线路结构,在轻载时,有效地抑制了电流放大倍数;使 LDO 在输出电流变化过程中,等效电流放大倍数趋于一直数值。在重载时,等效电流放大倍数随输出电流的变化如图 6 所示,其中两条曲线的起始重合点可以通过调节电阻 R_B 的大小进行设置。

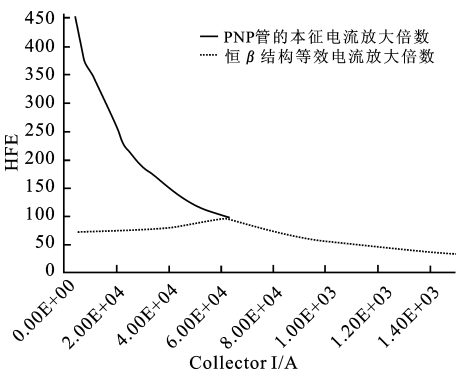


图 6 PNP 管本征电流放大倍数 VS 恒 β 结构等效电流放大倍数

5 结束语

本文针对大电流输出的双极型 LDO 普遍存在的稳定性问题,设计了一种恒 β PNP 结构的功率输出单元;通过在轻载条件下增大驱动电流,减小的调整管等效电流放大倍数;有效地改善了传统大电流 LDO 通过增大输出电容 C_L 、牺牲响应时间强制将

输出节点置为主极点的方法. 这种结构并且通过流片验证,效果显著.

参考文献:

[1] G. A. Rincon-Mora. LDO 模拟集成电路设计[M]. (谭旻). 北京:科学出版社,2012.

[2] PE Allen 著,冯军等译. CMOS 模拟集成电路设计[M]. 第二版. 北京:电子工业出版社,2005.

[3] 拉扎维著,. 陈贵灿等译. 模拟集成电路设计[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

[4] Kwok K C, Mok P K T. Pole-zero tracking frequency compensation for low dropout regulator[C]// Circuits and Systems, 2002. ISCAS 2002. IEEE International Symposium on. IEEE, 2002;IV-735-IV-738 vol. 4

[5] Instruments T. ESR, stability, and the LDO regulator [J]. Texas Instruments Inc. , SLVA115, Dallas, TX, USA, 2002.

[6] King B M. Understanding the load-transient response of LDOs[J]. Texas Instruments Incorporated. Analog Applications Journal, 2000; 19-23.

[7] K. N. Leung, P K. T. Mok, W. H Ki etc. Three-Stage Large Capacitive Load Amplifier with Damping-Factor-Control Frequency Compensation [J]. IEEE Transations on Solid-State Circuits, 35(2);221-230.

作者简介:

武 琪 男,(1987-),工程师. 研究方向为模拟集成电路设计. Email:wq2437@163. com.

邵元超 男,(1984-),工程师. 研究方向为模拟集成电路设计.

王漪婷 女,(1988-),工程师. 研究方向为模拟集成电路设计.