

一种具有超低待机功耗的片上供电电源

赵 磊, 黄水龙, 李东岳, 张海英

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 在分析无线数码产品控制电路在正常工作状态和待机状态下对供电电源的不同要求的基础上, 本文提出了一款能够满足这一系列要求的片上供电电路。该供电电路具有在正常工作模式下稳定输出电压、在待机模式下将整个系统消耗的电流限制在超低电流的作用, 并通过开关管等结构保证了分别在两种模式下负责供电的电路不会互相干扰。从而既能够保证控制电路在工作模式下的正常工作, 又能够实现系统在待机模式下的超低功耗。

关键词: 超低待机功耗; LDO; 状态监视器

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)05-0148-04

A On-chip Power-supply Circuit with Very-low Power Consumption

ZHAO Lei, HUANG Shui-long, LI Dong-yue, ZHANG Hai-ying

(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Basing on analyzing the requirements to power supply circuits which the digital control-circuits of wireless digital products expect, this paper proposes one circuit that can meet these requirements all. This power supply circuit can provide a steady output voltage under the normal-working mode of the whole system, and provide a very weak current under the standby mode. In this way, the power supply circuit can ensure the control-circuit's normal working under the normal working mode, and the ultra-low power consumption under standby mode.

Key words: very-low power consumption; LDO; standby mode

1 引言

便携式数码产品对于电路功耗有着很高的要求, 低功耗可以提高产品的市场竞争力。按工作状态分, 电路功耗可以分为工作功耗和待机功耗两部分。其中待机功耗是指在待机工作模式下整个电路的功耗, 此时, 仅有状态监视器和为其供电的电源电路工作, 电路的其它各部分均被关断而不消耗能量。无线传感器、无线鼠标等数码产品其待机时间往往远大于其工作时间, 这样, 尽管其待机功耗与工作功耗相比已经很小, 却可能成为功率消耗的主要因素。因此, 待机状态下的系统设计也就成了此类产品低功耗设计的主要内容。而电源设计, 便是这一设计的首要环节^[1]

本文所述的供电系统, 其负载为无线电子产品

的控制模块。这一控制模块的工作状态包括正常工作模式和待机模式两种。其中, 正常工作模式要求作为电源的供电系统能够提供稳定、无干扰、不随负载变化而变化的电源电压, 这需要供电电路有一个小的输出电阻和良好的调节能力; 而待机模式则需要供电系统为状态监视器提供一个十分微弱的电流, 此时的供电系统要有极大的输出阻抗和极小的自身电流。这些近乎矛盾的要求向供电系统的设计提出了极大的挑战。

为了满足上述要求, 本文设计的供电系统被划分成主从两部分。其中主电路为一改进的 LDO, 它在工作状态下为负载提供稳定的电压, 并在待机状态下被可靠地与负载隔离。从电路则由一系列电流镜镜像的方式实现了极低的自功耗, 并为待机状态的监视器提供微弱的待机电流。

2 电路设计

2.1 传统 LDO 的工作原理

无线通信射频前端的各个模块通常需要 LDO 作为供电电源,来提供稳定、无干扰的工作电压。图 1 所示为传统 LDO 的电路原理图。电阻 R_1 、 R_2 构成反馈阵列,将输出电压分压后反馈给误差放大器。误差放大器将这一电压与来自基准电压源的基准电压比较,产生调整管 MP_{PASS} 的栅极控制电压,改变该管的沟道电阻,使输出电压稳定在预设值^[2]。

出于功耗控制的考虑,误差放大器和基准电压源均带有使能端 EN,在非工作状态下可以将其关断,以降低整个系统在该状态下的功耗。

值得注意的是,从图 1 中可以看出,电阻 R_1 、 R_2 组成的电阻分压阵列与负载电路是并联关系。受芯片面积等因素的影响,电阻 R_1 、 R_2 的值通常为几十 $k\Omega$ 至上百 $k\Omega$ 。这个阻抗值远大于与之并联的正常工作状态下的输出端的阻抗,因此其对负载的正常工作不会产生影响。但是,当负载处于待机状态时,其消耗的电流将会大大降低(低至微安量级甚至更低),其阻抗也大为增加,以至于远大于 R_1 和 R_2 的

阻值。此时,电阻 R_1 、 R_2 成为并联系统的主要决定因素,对负载产生严重的影响。因此,为了配合负载的待机模式,需要对传统的 LDO 电路做出一定的修改。

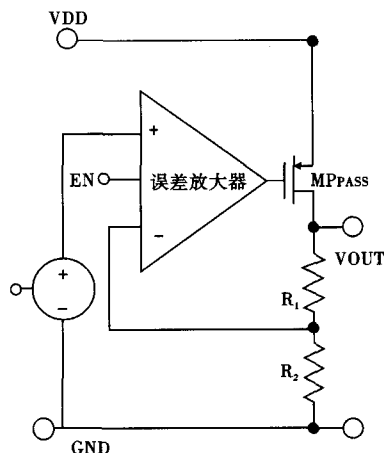


图 1 传统 LDO 原理图

2.2 主电路设计

图 2 所示为本文所述电路的整体电路图,其中主电路与从电路分别以虚线框出。

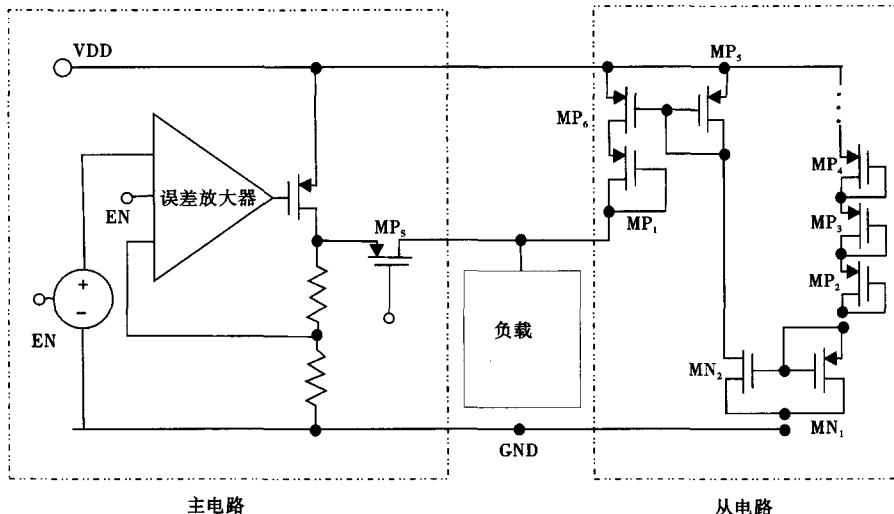


图 2 整体电路原理图

在主电路的输出端,开关管 MP_5 被用来将负载与主电路隔离,当 MP_5 关断时,LDO 的输出端与负载隔离。

图 3 为主电路 LDO 的实际电路图。为了稳定输出电压,LDO 的误差放大器通常需要使用两级放大器以达到足够的增益。两级放大器、调整管、输出端的负载电阻和输出电容等构成复杂的零极点结构,加上 LDO 固有的反馈结构,如果不特别设计其频

率补偿系统,该电路通常是无法稳定工作的^[3-4]。

本文所述的电源电路,其负载是无线通信射频前端电路的数字控制系统。为了滤除数字电路的噪声,避免其对射频电路产生大的干扰,需要在其电源,也就是本电源电路的输出端与地之间跨接一个大的滤波电容。这一大电容直接影响了系统的主极点,并使频率补偿在电路内部难以实现。这一难题可以通过在电源的输出处串接一个小的电阻来解决。

通过将大电容与电阻串联,一个左半平面零点被引入电路中,实现了频率补偿^[5].图4展示了该电路的相位裕度 AC 仿真结果.可以看出,相位裕度满足稳

定要求.同时,由于所串接的电阻只有十欧姆量级,并不会对滤波效果产生影响.

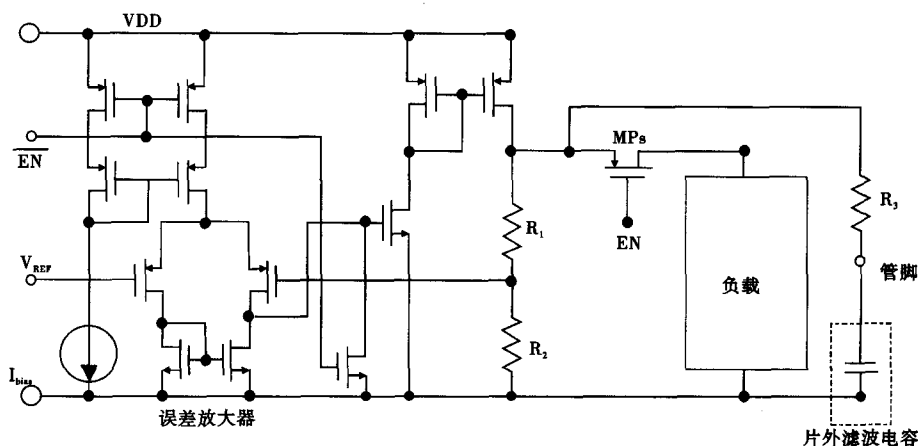


图3 主电路 LDO 电路原理图

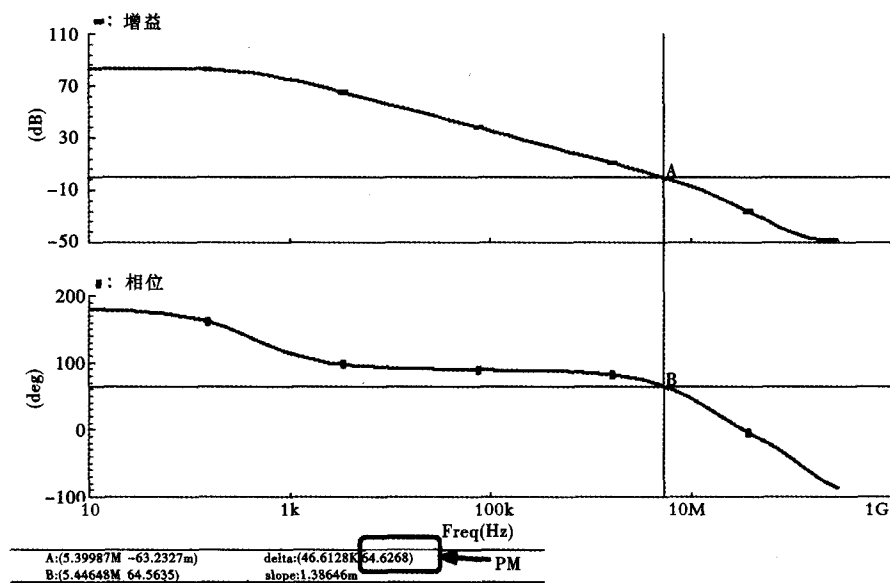


图4 相位裕度仿真曲线

需要指出的是,在功能上,电压基准虽是 LDO 电路正常工作不可或缺的一个组成部分,但从结构上讲电压基准又完全独立于 LDO.而本文所述电路的结构、性能特征不受电压基准影响,任何输出电压满足电路需要的电压基准电路都可以被用于本文所述的主电路 LDO 中.为了突出论述重点,文章略去了对于所用电压基准电路的阐述^[1].

2.3 从电路的设计

正如前文所指出,尽管待机状态电路只消耗很小的功耗,但是电路处于待机状态的时间远大于工作时间,因此待机状态的功耗在总功耗中占据很大

比例.为了合理使用便携式电子设备,射频前端电路在待机状态下几乎完全关断,仅有状态监视器以微弱的电流工作等待控制信号将射频电路开启.通常,状态监视器及供电电路在待机状态下的电流被设定在 $1\mu\text{A}$ 以下,这样苛刻的要求是主电路 LDO 所无法完成的.因此,需要设计从电路来协助其实现为状态监视器供电的功能.

对于从电路,其设计受到若干条件的制约.首先,受功耗限制,从电路结构必须十分简单.其次,从电路的存在不能影响主电路的正常工作.

一组以微弱电流工作的电流镜恰好能够满足这些条件.图2右侧部分所示即为从电路的具体电路图. MP_2 、 MP_3 、 MP_4 等足够多的PMOS管接成三极管连接形式,将NOMS管 MN_1 的 V_{DS} (同时也是 V_{GS})限制在比较小的值.从而使流过 MN_1 的电流被限制在一个很小的值^[6],电源电压为标称值(3V)时只有几十nA,若电源电压降到标称值以下,则这一电流会更小.NMOS管 MN_2 将 MN_1 的电流镜像放大,再经 MP_5 、 MP_6 的第二级放大,在 MP_6 处得到接近 $1\mu A$ 的电流.由于流过 MP_6 的电流十分微弱,其 V_{DS} 也很小.为了使输出端的电压不至于过高,三极管连接形式的P管 MP_1 被串接在 MP_6 的漏极和负载之间,起电平位移的作用.

当电路处于待机模式时,主电路被关断,不消耗电流.同时开关管 MP_5 截止,LDO输出电阻与负载隔离.此时整个供电系统仅有从电路为负载提供工作电流,由于 MN_1 的电流被限制以及各个电流镜之间的比例关系,整个从电路所流过的电流被限制在 $1\mu A$ 左右,实现了待机状态下的超低功耗.

当电路处于工作状态时,主电路开启,同时开关管 MP_5 导通,负载消耗的电流也升高至数十到数百微安.此时从电路仍处于工作状态.

3 仿真结果

图4所示为主电路LDO的开环相位裕度仿真曲线.仿真结果显示,电路的相位裕度达到了 60° 以上,足以满足稳定性判据的要求,电路可以稳定地工作.

图5所示为待机状态(负载以 $900nA$ 计)下输出电压的仿真曲线.可以看出,当电路处于待机工作模式时,当输入电压在 $1.9V$ 至 $4.0V$ 间浮动时,供电系统可以输出 $1.2V$ 至 $3V$ 的供电电压,这一电压符合状态监视器待机工作所需要的电压.

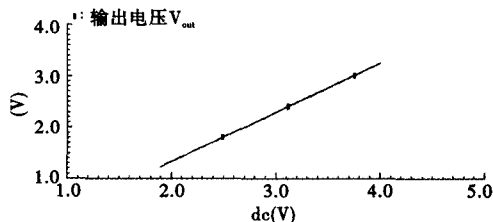


图5 待机状态下输出电压随输入电压的变化曲线

图6所示为负载为 $1mA$ 时输出电压随输入电压变化曲线.可以看出,在正常工作状态下,在输入电源从 $1.9V$ 变化到 $4V$ 的情况下,输出电压都稳定地保持在 $1.8V$.尽管此时从电路也处于工作状态,但是由于其负载能力十分微弱,相对于工作电流可以忽略不计,因此没有对主电路的工作造成影响.

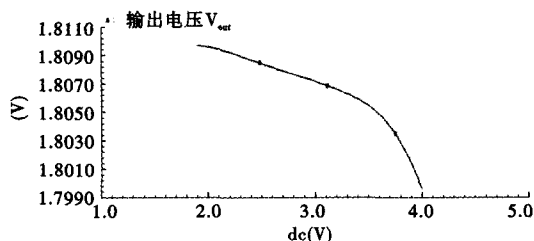


图6 负载为 $1mA$ 时输出电压随输入电压变化曲线

4 结束语

本文提出了一款供电电路,这一电路由主电路和从电路两部分构成.主电路为正常工作状态的控制模块提供稳定无干扰的工作电源,并在待机模式下被关断以及与负载隔离;从电路以极低的自身功耗为待机模式下的状态监视器提供微弱的工作电流,特别设计保证不会对正常工作状态下的主电路产生不良影响.仿真结果充分印证了所设计的电路功能符合所要求.

参考文献:

- [1] 毕查德拉扎维. 模拟CMOS集成电路设计 [M]. 陈贵灿,译. 西安:西安交通大学出版社,2003.
- [2] Willy M C. Sansen 模拟集成电路设计精粹 [M] 陈莹梅 译. 北京:清华大学出版社 2008.
- [3] 王进军,田泽. 一种应用于LDO的CMOS误差放大器设计 [J]. 微电子学与计算机, 2007,24(4):216-219.
- [4] 杨锦文,冯全源. 基于嵌入式米勒补偿技术的LDO放大器设计 [J]. 微电子学与计算机, 2006,23(3):198-200.
- [5] Xuewen Wang, Fengge Wang, Zhongwei Li. The analysis of LDO and the stability of loop compensation [C]// Proceedings of the2010 International Conference, Electrical and Control Engineering (ICECE), washington, DC, USA;IEEE, 2010; 4368-4371.
- [6] Paul R Gray, Paul J Hurst, Analysis and design of analog integrated circuits [M]. 4th edition. JOHN WILEY New York; & SONS,INC, 2001, 254-334.