

一种利用比较器实现可靠启动的带隙基准电压源

郭家荣, 冉 峰

(上海大学 机电学院, 上海 200072)

摘 要: 提出一种在启动电路中使用比较器配置的带隙基准电压源, 解决了带隙基准电压源由于使用双极型晶体管而存在的潜在启动失败问题. 该带隙基准电压源通过启动电路的比较器来正确判断启动和关闭点以保证电路启动到理想的工作点, 并在电路启动后正常关闭启动电路以缩减功耗消耗, 同时避免了其它启动电路存在的问题: 引起电路抖动或者求助一些系统中很少使用的上电复位信号等. 该带隙电压基准电路提供 0.9V 的带隙基准电压时, 可以工作的电压范围和温度范围分别是 1.2V~3.6V 和 $-40\sim 110^{\circ}\text{C}$, 而且该输出电压在给定的电压和温度范围内仅有 5% 的变化.

关键词: 带隙基准电压源; 比较器; 低压; 启动电路

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)05-0117-04

A Bandgap Voltage Reference Implementing Reliable Startup by Using Comparator

GUO Jia-rong, RAN Feng

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper presents a bandgap voltage references (BGRs) with a comparator configuration in startup circuit, solving potential issue of failure startup due to the using of bipolar transistors in the BGRs. This BGR guarantees the core circuit to reach ideal work point by using the comparator in the startup circuit to adjust correctly startup and turnoff point and is turned off after the startup of core circuit, avoiding the problems existing in other startup circuits such as perturbation or sorting to seldom available POR signal in some system. The BGR can work with the supply voltage range of 1.2V~3.6V and the temperature range of $-40^{\circ}\sim 110^{\circ}$, providing the output voltage of 0.9V. What's more, the output voltage varies within 5% with given supply voltage and temperature range.

Key words: bandgap voltage reference; camparator; low voltage; startup circuit

1 引言

随着便携式电池供电产品的发展,低功耗和低压成为带隙基准电压源的目标. 为了降低电源电压,不同的带隙基准电压源技术在文献[1-6]中被提出,然而这些带隙基准电压源存在三个操作点,分别是零电流操作点(也叫简并偏置点),双极型晶体管没有被正常导通时的操作点和理想的操作点,而前两个操作点是不希望出现的. 因此,必须加入启动电路. 但现有的带隙基准启动电路只能很容易地消除零电流操作点,而且使用的启动方法在一些系统中很难提供(求

助 POR 信号)或者会在电路中引起抖动等.

为了解决启动问题并在电路启动以后能正常关闭启动电路以缩减功耗消耗,本文提出一种带隙基准电压源电路. 该启动电路使用比较器正确判断启动和关闭点,解决了带隙基准电压源潜在的启动失败问题,并具有高电源抑制和低温漂性能.

2 传统的带隙基准电压源

通常的带隙基准电压源设计有两种模式,一种是电压模式,采用正负两种温度系数的电压加权和来得到零温度系数的输出电压. 另外一个电流模式,通

过电阻性的驱动网络把两个具有相反温度变化的电流和转换成电压. 图 1 展示了典型的电压模式的带隙基准电压源的实现结构, 基准电压 V_{ref} 表达式为

$$V_{ref} = I_3 R_2 + V_{EB3} = \frac{V_T \ln N}{R_1} \cdot R_2 + V_{EB3} \quad (1)$$

根据产生零温度系数基准电压的原理, 输出电压 $V_{ref} \approx 1.25V$, 输入电压要高于该输出电压, 因此这种方法限制了带隙基准电压源的低压设计.

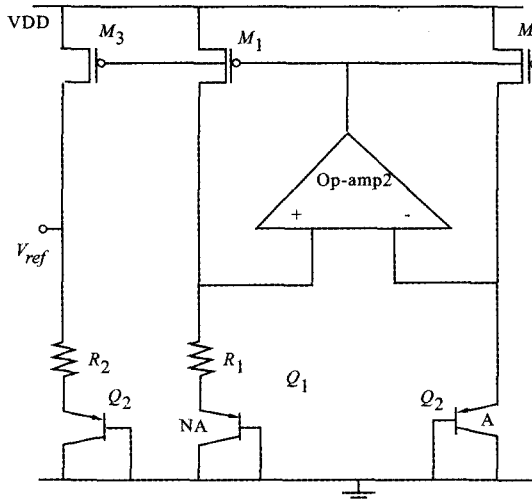


图 1 基于电压的带隙基准源电路示意图

电流模式的开发满足了低压的要求. 图 2 给出了一种电流模式的低压带隙基准源. 图中, 运放的两个输入 V_a 和 V_b 是相等的, P_1, P_2 和 P_3 有相同的面率, $I_1 = I_2 = I_3$, 基准电压 V_{ref} 的表达式为

$$V_{ref} = I_3 R_4 = \frac{R_4}{R_2} \left(\frac{R_2}{R_3} \cdot V_T \cdot \ln N + V_{EB1} \right) \quad (2)$$

通过设置 R_4 和 R_2 的比率, 输出电压能够按比例缩减. 因此, 这个电流模式结构能够很好地减少输出电压进而满足低压的需求.

但是这类电路有三个稳定操作点, 分别是零电流操作点, 双极型晶体管不能正常导通的操作点和理想的操作点, 而前两个操作点是不希望在电路中发生的. 文献[1-4]中的启动电路能很容易删除零电流操作点, 但不能保证电路在电源上电后到达希望的工作状态. 另外, 启动电路中采用的方法有一些缺点, 例如引起电路抖动, 或者求助在一些系统中不可供的 POR 信号. 为了解决这个问题, 并能在电路启动后正常关闭启动电路, 启动电路中配置比较器来正确判断启动和关闭点的带隙基准电压源电路被提出.

3 提出的带隙基准电压源

提出的带隙基准电压源结构如图 3 所示. 完整的实现如图 4 所示. 该电路由核电路和启动两部分构成.

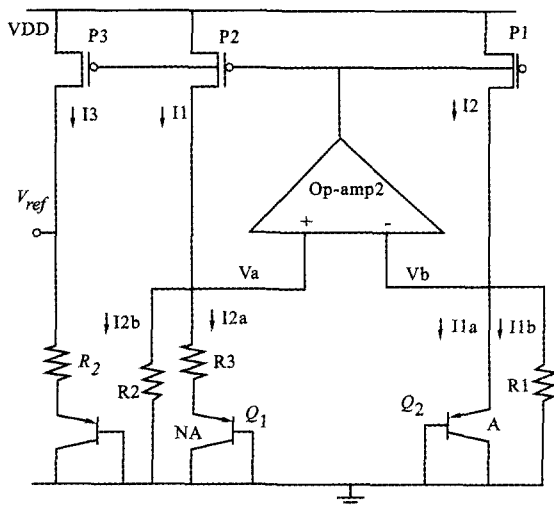


图 2 典型的电流模式的低压带隙基准源电路示意图

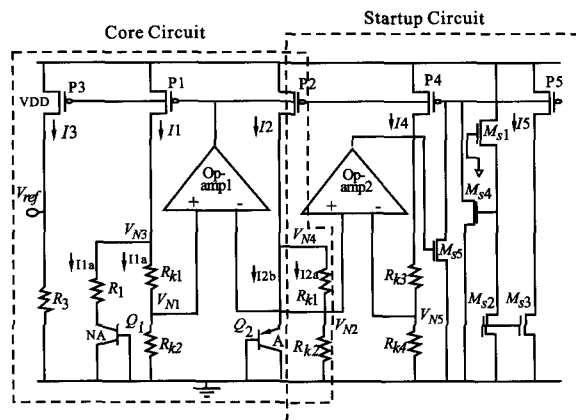


图 3 提出的带隙基准源的电路结构图

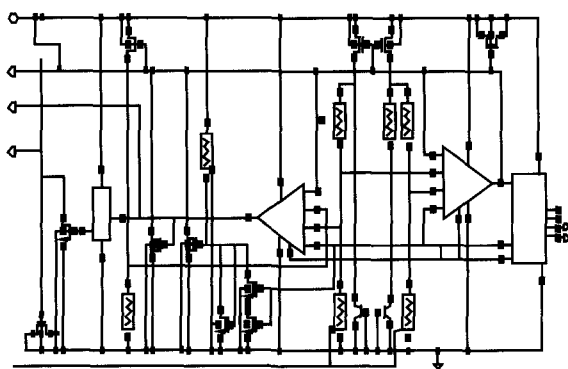


图 4 提出的带隙基准源的完整实现

3.1 核电路结构

核电路采用通常的电流和模式的结构, 用来产生目标电压. 电路中 P_1, P_2, P_3, P_4 和 P_5 有着面比关系 $1:1:1:1:M$. 因此 $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = MI_5$.

图 3 中运算放大器 Op-amp1 迫使两个输入 V_{N1} 和 V_{N2} 相等, 因此, V_{N3} 和 V_{N4} 也是相等的. 得到电流 I_1 是两个具有相反温度系数的电流和, 设 $R_2 = R_{K1} + R_{K2}$, 则计算电流 I_1 如下

$$I_1 = I_{1a} + I_{1b} = \frac{1}{R_2} \left(R_2 \cdot \frac{V_T \ln N}{R_1} + V_{EB2} \right) \quad (3)$$

相应的输出电压 V_{ref} 计算如下

$$V_{ref} = I_3 R_3 = \frac{R_3}{R_2} \left(R_2 \frac{V_T \ln N}{R_1} + V_{EB2} \right) \quad (4)$$

因此如果取 $\frac{R_2 \ln N}{R_1} = 17.2$, 理论上, 零温度系数的输出电压值可以通过调整 R_3 和 R_2 的比率得到任意值。

3.2 启动电路

启动电路分成两部分, 第一部分由晶体管 $M_{S1} \sim M_{S4}$ 和 P_5 构成, 在电源启动时首先为电路提供电流。第二部分由运算放大器 OP-amp2, PMOS 晶体管 P_4 和 P_5 , 电阻 R_{K3} 和 R_{K4} , 和 NMOS 晶体管 M_{S5} 构成。当第一部分提供的电流不足够大时, 第二部分的比较器 OP-amp2 根据两端的输入电压进行判断, 进而迫使电路继续提供电流到电路。详细工作过程如下: 当电路上电时, M_{S1} 首先导通, 与 M_{S1} 漏端相连的 M_{S4} 的栅端电压被拉高, 进而 $P_1 \sim P_5$ 的栅端电压被拉低, 从而注入电流到电路。同时, 由于 P_5 栅端电压被拉低, M_{S2} 和 M_{S3} 的栅端电压也被拉低, 直至被关断。如果第一部分提供的电流没有能够使双极型晶体管导通, 第二部分比较器基于输入 V_{N2} 和 V_{N5} 的比较产生拉高 M_{S5} 的栅端电压的输出电压, 进而拉低 P_1 和 P_2 的栅端电压然后继续注入电流到核心电路直到核电路启动到理想的工作点。

下面详细分析如何使电路具有可靠启动。

由启动电路的工作过程可以看出, 如果第一部分没有产生足够大的电流导通 Q_1 和 Q_2 , 第二部分的比较器 OP-amp2 必须产生拉高 M_{S5} 栅端电压的输出来继续核电路的启动。所以这时 OP-amp2 的两个输入 V_{N2} 和 V_{N5} 必须满足

$$V_{N2} - V_{N5} \geq \Delta V > 0 \quad (5)$$

其中 ΔV 必须足够高以致比较器的输出可以使 M_{S5} 导通, 这时根据图 3, 可得 $V_{N2} = I_{2a} \cdot R_{K2}$ 和 $V_{N5} = (I_{2a} + I_{2b}) \cdot R_{K4}$, 设双极型晶体管刚刚被导通, 则取 $I_{2a} = I_{1a} = \frac{V_{EB2}}{R_{K1} + R_{K2}}$, $I_{2b} = 0$, 考虑设计余量, 本设计取 $\Delta V = 150 \text{ mV}$, 将这些量代入(5)得

$$\frac{V_{EB2}}{R_{K1} + R_{K2}} (R_{K2} - R_{K4}) = 150 \text{ mV} \quad (6)$$

另外, 在核心电路启动到理想状态后, 比较器的输入 V_{N2} 和 V_{N5} 还要满足关系式(7), 以使比较器的输出可以关断 M_{S5} 以缩减功耗消耗。

$$\begin{aligned} V_{N5} - V_{N2} &= \Delta V \\ &= I_{2a} (R_{K4} - R_{K2}) + I_{2b} R_{K4} = 150 \text{ mV} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{其中 } I_{2a} = I_{1a} = \frac{V_{EB2}}{R_{K1} + R_{K2}} \text{ 和 } I_{2b} = I_{1b} = \frac{V_T \ln N}{R_1}.$$

因此, 从(6)和(7)可以推出

$$\frac{R_{K4}}{R_{K2}} = \frac{2V_{EB}}{2V_{EB} + 17.2V_T} \quad (8)$$

所以电路中的电阻 R_{K4} 和 R_{K2} 必须满足公式(8)的关系, 该启动电路才可以完全启动核电路。本设计中取 $V_{EB} = 0.67 \text{ V}$, 得到 R_{K4} 和 R_{K2} 比率是 0.6979, 就可保证带隙基准电压源启动到希望的工作点, 并且启动后关闭启动电路。图 5 给出了模拟的启动波形。可以看出, 当运算放大器 Op-amp2 的差分输入值高于 100 mV 时, 启动电路能工作的很好。图 6 给出了在不同温度下, 电源电压在 $1.2 \text{ V} \sim 3.6 \text{ V}$ 范围内变化时, 模拟的输出电压变化。很显然, 该电路具有可靠的启动性能。图 7 展示了输出 0.9 V 时的 Monte-Carlo 模拟结果, 与绝对输出值比较, 仅仅有 $\pm 35 \text{ mV}$ 变化(跑 1000 次), 并且由失配引起温度系数变化也是可接受的。

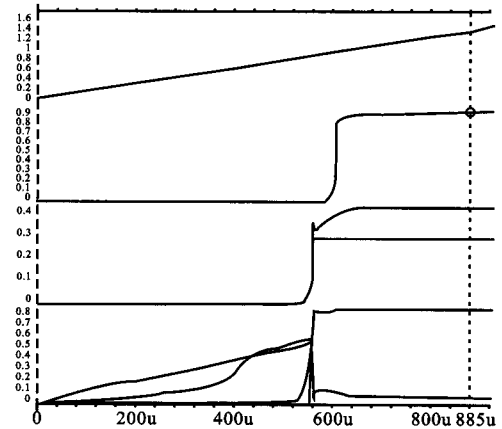


图5 模拟的启动波形

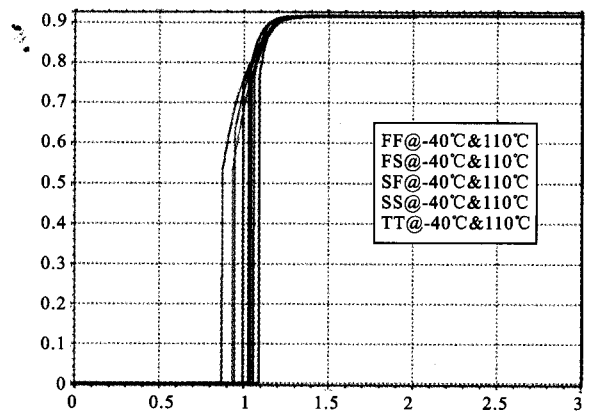


图6 不同温度下输入输出特性

4 实验结果

提出的带隙基准电压源采用 90 nm CMOS 技术, 相应的设计版图被显示在图 8。图 9 展示了在三

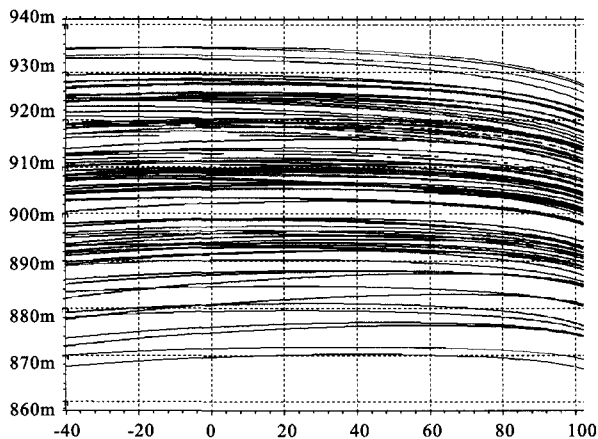


图7 Monte-Carlo 分析

个不同温度下(-40°C , 25°C 和 110°C), 测量的电源电压变化对输出电压的影响. 从图 9 可以看出, 平均基准电压接近于 905mV , 并且在室温条件下, 当电源电压从 1.2V 变化到 3.6V 时, 基准电压变化了 2.5mV . 图 10 描述了在不同电源电压(1.2V , 1.6V 和 3.6V). 图 10 测量的输出电压在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$ 温度范围的变化, 而且在这个温度范围内仅仅有 17mV 的变化. 这些测量结果强调了该电路结构很好地解决了带隙基准电压源电路中潜在启动失败问题, 同时对温度和电源电压具有最低的灵敏度性能. 表 1 总括了测量的性能参数.

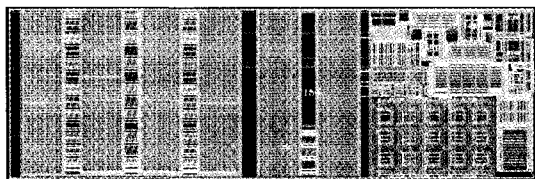


图8 提出的带隙基准源版图

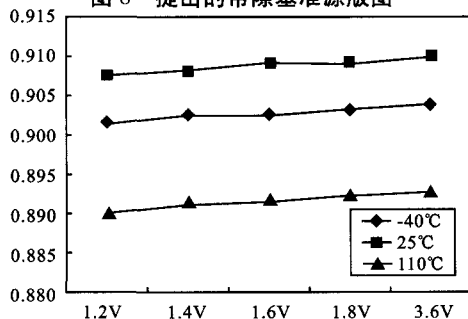


图9 在电源电压范围内测量的输出电压

表1 带隙基准源的性能比较

	文献[4]	文献[6]	本文
工艺	$0.6\mu\text{m}$	130nm	90nm
阈值电压/V	$V_{\text{thp}} = -0.9$ $V_{\text{thn}} = +0.9$	$V_{\text{thp}} = -0.45$ $V_{\text{thn}} = +0.4$	$V_{\text{thp}} = -0.67$ $V_{\text{thn}} = +0.67$
最低输入电压/V	0.98	1	1.2
输出电压/mV	603	798	905
温度系数	$15\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$	$6.64\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$	$11\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$
温度范围	$0 \sim 100^{\circ}\text{C}$	$-50 \sim 160^{\circ}\text{C}$	$-40 \sim 110^{\circ}\text{C}$

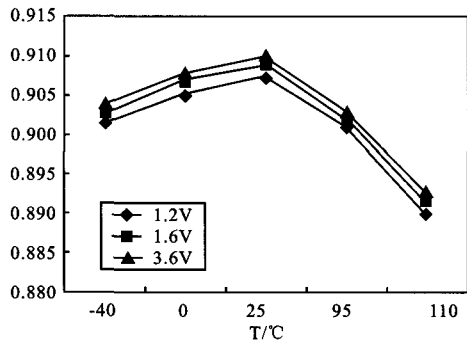


图10 不同温度下测量的输出电压

5 结束语

文中提出了一种基于电流和模式的带隙基准电压源, 该基准通过启动电路的比较器配置使该电路具有可靠启动机制, 解决了存在于带隙基准电压源中的潜在启动失败问题, 即保证在上电后该电路启动到希望的操作点, 并在该电路启动后正常关闭启动电路以缩减功耗消耗. 该结构在电源电压 1.2V 到 3.6V 范围内提供 0.9V 输出电压, 输出变化在 5% 内.

参考文献:

- [1] 肖海鹏, 马卓, 张民选, 等. 一种低成本高精度 CMOS 基准电压源设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 121-124.
- [2] 周庆波, 龚敏, 郭齐荣. 一种宽电源电压的高精度带隙基准电路的设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(10): 128-131.
- [3] Lee E K F. A low voltage CMOS bandgap reference without using an opamp [C]// IEEE International Symposium Circuits and Systems, 2009: 2533-2536.
- [4] Ka Nang Leung, Mok P K T. A sub-1-V 15-ppm C CMOS bandgap voltage reference without requiring low threshold voltage[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2002, 37(4): 526-530.
- [5] Banba H, Shiga H, Umezawa, et al. A CMOS bandgap reference circuit with sub-1-V operation [J]. IEEE J Solid-State Circuits, 1999, 34(5): 670-674.
- [6] A Cabrini, G De Sandre, L Gobbi, et al. A 1 V, 26 μW extended temperature range band-gap reference in 130-nm CMOS technology[C]//proceedings of the 31st European Solid-state Circuits Conference, Italy: IEEE, 2005: 503-506.

作者简介:

郭家荣 女, (1980-), 讲师, 博士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计.