

# 一种低温度系数的带隙基准电压源设计

张 瑛,王 剑,周洪敏

(南京邮电大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210046)

**摘 要:**基准电压源是集成电路系统中的重要组成部分,其性能直接影响系统的稳定性和鲁棒性。温度系数是基准电压源的重要性能指标之一,而高阶温度补偿技术是降低基准源温度系数的有效方法。基于标准  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺,设计了一种低温度系数的带隙基准电压源,采用电流模结构的带隙基准电路实现了低电源电压工作,并通过 VBE 线性化补偿技术实现了在低压下的高阶温度补偿。所设计的 CMOS 带隙基准电压源在  $-40\sim 125\ ^\circ\text{C}$  的范围内,温度系数为  $6.855\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ ,低频时电源电压抑制比达到了  $-95\ \text{dB}$ ,而电源电压在  $0.6\sim 1.8\ \text{V}$  范围内变化时线性调整率仅为  $0.2\%$ 。仿真实验结果表明,该电路结构能够有效提升带隙基准电压源的温度性能。

**关键词:**带隙基准;温度系数;电流模;电源电压抑制比

**中图分类号:** TN47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2016)02-0150-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-629X.2016.02.034

## Design of a Bandgap Voltage Reference with a Low Temperature Coefficient

ZHANG Ying, WANG Jian, ZHOU Hong-min

(College of Electronics Science & Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** The reference voltage source is an important part of the integrated circuit system, and it has a direct impact on the stability and robustness of the system. The temperature coefficient is one of the important performances of the reference voltage source, and the high-order temperature compensation technology is an effective way to reduce the temperature coefficient. A bandgap voltage reference with a low temperature coefficient is designed based on standard  $0.18\ \mu\text{m}$  Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) process. The current mode structure is used to make the circuit working under the low power supply voltage, and the linear compensation technology is applied to complete the high order temperature compensation. The designed voltage reference gives a good low temperature coefficient of  $6.855\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$  in the temperature range from  $-40$  to  $125$  degree, and provides a good Power Supply Rejection Ratio (PSRR) of  $-95\ \text{dB}$  in the low frequency band. The voltage linear regulation of the bandgap voltage reference is only  $0.2\%$  while the supply voltage changes from  $0.6\ \text{V}$  to  $1.8\ \text{V}$ . The simulation results show that the circuit structure can improve the temperature performance of the bandgap reference voltage source effectively.

**Key words:** bandgap reference; temperature coefficient; current mode; power supply rejection ratio

## 0 引 言

基准电压源作为集成电路系统中的重要组成部分,其性能直接影响系统的稳定性和鲁棒性。基准电压源可分为电流模带隙基准电压源<sup>[1-3]</sup>和电压模带隙基准电压源。与电压模带隙基准电压源相比,电流模带隙基准电压源的输出范围不再固定,而是可以根据系统需求进行调整,同时能够满足低压系统的工作要求。

随着便携式、穿戴式等应用系统对低压低功耗的要求不断提高,使得带隙基准电路的工作电压也越来越低,譬如 David C. W. Ng 等提出了一种带隙基准电路,该电路能够在  $1.0\ \text{V}$  电压下工作,功耗只有  $26\ \mu\text{W}$ ,可以应用在低压差线性稳压器中<sup>[4]</sup>。Mahesh Kumar Adimulam 等提出了一种新型结构的带隙基准电路,降低工作电压的同时也改善了温度系数<sup>[5]</sup>。Edward K. F. Lee 通过对传统的电流模带隙基准源的

收稿日期:2015-05-18

修回日期:2015-08-20

网络出版时间:2016-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61106021);江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB510020)

作者简介:张 瑛(1980-),男,博士,副教授,研究方向为射频与微波集成电路设计。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160126.1520.052.html>

改进,使该电路同样可以在 1.0 V 电压下工作<sup>[6]</sup>。用于亚阈值区的 MOS 管取代带隙基准中的 PNP 管连接成的二极管也可以有效降低电路功耗,譬如 Camacho Galeano 等基于工作在亚阈值区的器件,设计出超低功耗的参考源<sup>[7]</sup>。此外,采用特殊制造工艺从而获得低功耗器件,也可以实现低功耗的带隙电压基准。譬如 Bhupendra 等利用浮栅 CMOS 设计了一种高精度的功耗只有 500 nA 的带隙电压基准<sup>[8]</sup>。

温度系数是带隙基准电压源的另一重要性能指标,在带隙基准电路中加入高阶温度补偿结构是降低基准源温度系数的有效方法。一般零阶温度系数约为 1.5 ~ 5 mV/°C,当对带隙基准源进行一阶温度补偿之后,其温度系数可以达到 50 ~ 100 ppm/°C,而采用高阶补偿策略则可以获得更低的温度系数<sup>[9-13]</sup>。VBE 线性化技术利用不同工艺结构的电阻具有的不同温度系数对电路进行温度补偿。譬如 Feiyan Mu 等通过线性补偿以及在核心电路中引入前置调节器,设计出在 -55 °C 至 125 °C 范围内温度系数为 5.8 ppm/°C 的基准源<sup>[14]</sup>。而 Abhisek Dey 等通过对带隙基准源启动电路的改进以及指数补偿,设计出在 -20 °C 至 100 °C 范围内温度系数为 5.5 ppm/°C 的基准源<sup>[15]</sup>。

文中基于标准 0.18 μm CMOS 工艺,设计了一种低温度系数的带隙基准电压源,通过采用电流模结构和 VBE 线性化补偿技术实现了在低电源电压下的高阶温度补偿。仿真实验结果表明,在 -40 ~ 125 °C 范围内该带隙基准电压源的温度系数仅为 6.855 ppm/°C,低频时电源电压抑制比为 -95 dB,电源电压在 0.6 ~ 1.8 V 范围内变化时线性调整率为 0.2%。

## 1 带隙基准电压源基本原理

带隙基准电压源首先产生两个分别具有正温度系数的电压  $V_+$  和具有负温度系数的电压  $V_-$ ,并使输出电压  $V_{REF}$  满足:

$$V_{REF} = \alpha V_+ + \beta V_- \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  是待确定的设计参数,通过选择合适的  $\alpha$  和  $\beta$  使得  $V_{REF}$  的温度系数为零,即

$$\alpha \cdot \partial V_+ / \partial T + \beta \cdot \partial V_- / \partial T = 0 \quad (2)$$

下面介绍如何获得具有正负温度系数的电压。

### 1.1 负温度系数电压

双极型晶体管集电极电流  $I_c$  与基极-发射极电压  $V_{BE}$  之间的关系可表示为:

$$I_c = I_s \exp(V_{BE}/V_T) \quad (3)$$

其中,  $I_s$  是双极型晶体管的饱和电流;  $V_T = kT/q$ ,  $k$  为玻尔兹曼常量,  $q$  为电子电荷。

根据饱和电流  $I_s$  的计算公式,可以得到  $V_{BE}$  电压的温度系数为:

$$\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} = \frac{V_{BE} - (4 + m)V_T - E_g/q}{T} \quad (4)$$

其中,参数  $m$  取为 -1.5;  $E_g = 1.12$  eV 是硅的带隙能量。

当  $V_{BE} = 750$  mV,  $T = 300$  K 时,  $\partial V_{BE}/\partial T \approx -1.5$  mV/°C。

由式(4)可知,  $V_{BE}$  具有负的温度系数,但其受到温度变化的影响,因此带隙基准只能在一个温度点上获得真正的零温度系数。此外,负温度系数的电压会产生一个与温度成反比(Contrary To Absolute Temperature, CTAT)的电流。

### 1.2 正温度系数电压

设两个相同工艺的晶体管的集电极电流分别为  $nI_0$  和  $I_0$ ,并忽略它们的集电极电流,那么它们基极-发射极电压的差值可表示为:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln \frac{nI_0}{I_0} - V_T \ln \frac{I_0}{nI_0} = V_T \ln n \quad (5)$$

因此  $V_{BE}$  的差值表现出了正温度系数,即

$$\frac{\partial \Delta V_{BE}}{\partial T} = \frac{k}{q} \ln n > 0 \quad (6)$$

从式(6)可知,这个温度系数与温度本身以及集电极电流无关。正温度系数电压会产生与温度成正比(Proportional To Absolute Temperature, PTAT)的电流。

## 2 电路设计

对于正向工作的三极管, Tsividis 在 1980 年推导出  $V_{BE}$  和温度及工艺相关的等式为<sup>[16]</sup>:

$$V_{BE}(T) = V_{g0} - [V_{g0} - V_{BE}(T_\tau)] \left( \frac{T}{T_\tau} \right) - (\eta - \alpha) V_T \ln \left( \frac{T}{T_\tau} \right) \quad (7)$$

其中,  $V_{g0}$  是在 0 K 时硅的带隙电压;  $T$  是绝对温度;  $\eta$  是一个与温度无关而与工艺相关的参数,其值大约在 3.6 ~ 4 之间;  $\alpha$  是一个流过三极管偏置电流的温度依赖参数,当偏置电流是一个 PTAT 电流时取值为 1,当偏置电流与温度无关时取值为 0。

将式(7)整理得:

$$V_{BE}(T) = a_0 - a_1 T - a_2 T \ln T \quad (8)$$

其中,  $a_0 = V_{g0}$ ,  $a_1 = \frac{V_{g0} - V_{BE}(T_\tau)}{T_\tau} - \frac{k(\eta - \alpha)}{q}$

$$\ln T_\tau, a_2 = \frac{k(\eta - \alpha)}{q}。$$

根据式(8)可知,  $V_{BE}$  含有高阶项,因此仅通过一阶温度补偿很难得到温度系数很低的带隙基准,为此需要进行高阶温度补偿。对  $V_{BE}$  进行高阶温度补偿通常有两种方法:一是利用数学中的泰勒公式对高阶项

$T\ln T$  进行展开,然后通过电路设计的方法抵消高阶项;二是直接设计出能够抵消掉高阶项  $T\ln T$  的电路或是与  $T\ln T$  曲线变化大致相似的电路,从而消除多余项对基准源的影响,譬如指数型曲率补偿方法。这里采用第二种补偿方法。

所设计的带隙基准电压源的电路原理图如图 1 所示。其中,三极管  $Q_1$  具有和绝对温度成正比的电流偏置,因此对应的  $\alpha$  为 1,而三极管  $Q_2$  是与温度无关的电流偏置,因此对应的  $\alpha$  为 0。

根据式(7),  $Q_1$  和  $Q_2$  的基极-发射极电压可分别表示为:

$$V_{BE1}(T) = V_{g0} - (V_{g0} - V_{BE}(T_r)) \left( \frac{T}{T_r} \right) - (\eta - 1) V_T \ln \left( \frac{T}{T_r} \right) \quad (9)$$

$$V_{BE2}(T) = V_{g0} - (V_{g0} - V_{BE}(T_r)) \left( \frac{T}{T_r} \right) - \eta V_T \ln \left( \frac{T}{T_r} \right) \quad (10)$$

$V_{BE1}$  和  $V_{BE2}$  的电压差加在线性补偿电阻  $R_3$  上,会产生一个含有  $T\ln T$  项的电流  $I_{NL}$ ,即

$$I_{NL} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_3} = \frac{V_T}{R_3} \ln \left( \frac{T}{T_r} \right) \quad (11)$$

而输出的基准电压  $V_{ref}$  则可以表示为:

$$V_{ref} = (I_1 + I_2 + I_{NL}) R_4 = \left[ \frac{V_T \ln N}{R_1} + \frac{V_{BE1}}{R_2} + \frac{V_T \ln(T/T_r)}{R_3} \right] R_4 = \frac{R_4}{R_2} \left[ V_{BE1} + \frac{R_2}{R_1} V_T \ln N + \frac{R_2}{R_3} V_T \ln(T/T_r) \right] \quad (12)$$

由式(9)、(10)、(12)可知,当  $R_2/R_3$  的值为  $\eta - 1$  时,就可以消除  $V_{BE1}$  中的非线性项。根据上述理论最终优化出图 1 中电阻  $R_1 \sim R_4$  的取值分别为:5.4 k $\Omega$ , 44 k $\Omega$ , 16.6 k $\Omega$  和 47 k $\Omega$ 。

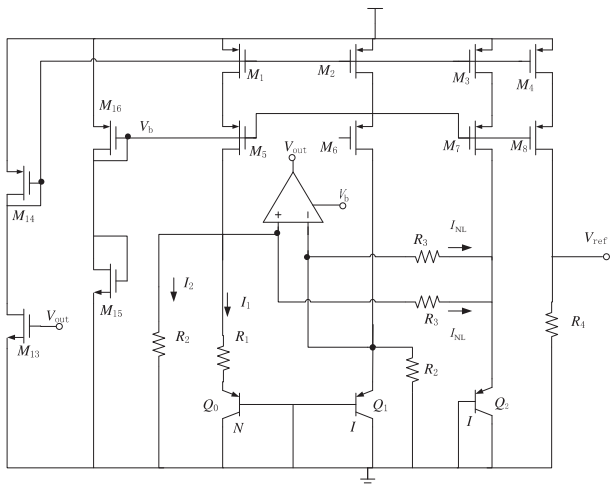


图 1 带隙基准电压源的电路原理图

图 1 中的运算放大器需要具有较大的增益和较好

的稳定性,因此采用了具有米勒补偿的两级放大器结构,电路原理图如图 2 所示。图 3 为运算放大器频率特性曲线,可以看出低频增益约为 101.9 dB,单位增益带宽为 17.72 MHz,相位裕度约为 93.6°,性能满足要求。

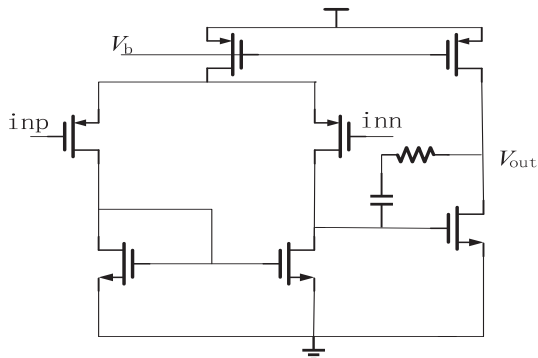


图 2 运算放大器的电路原理图

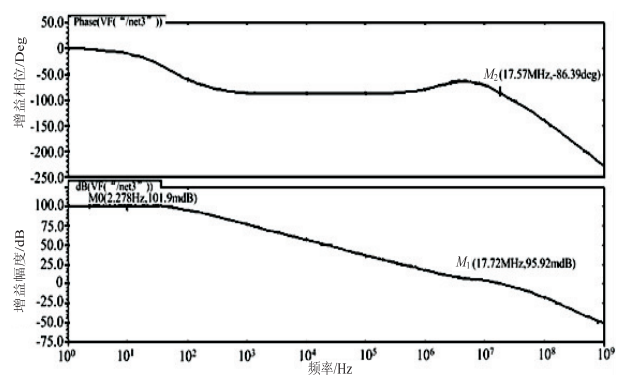


图 3 运算放大器的频率特性曲线

三极管  $Q_0$  和  $Q_1$  的发射极面积比设为  $N$ ,如果  $N$  太小,那么为了保证基准源得到零温度系数,电阻必然会取大值,这将导致电阻占用基准电路版图的面积会很大;如果  $N$  太大,那么相应的三极管将占据基准电路版图的面积会很大。因此将  $N$  取为 8,并且三极管的版图布局采用共质心法,其优点在于其外面的八个管子结构上将中间的管子包围,这样可以使中心管和外管在工艺上误差小,匹配度好。此外,电路中的电流镜管采用了低压共源共栅电流镜,减小了电流镜中晶体管的失配以及衬偏效应对电流镜准确度的影响。

### 3 仿真结果

基于标准 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺库,实现了低温度系数的带隙基准电压源的设计和仿真。电压源线性调整率的仿真结果如图 4 所示。可以看出,当电源电压达到 0.8 V 时电路即可正常工作,说明该电路符合低压工作条件。由图 4 可知,电源电压在 1 V 时输出电压为 701.96 mV,在 1.8 V 时输出电压为 700.1 mV,则其根据定义可以算得电压源的电源调制率为:

$$S_{LR,T_{(nom)}} = \frac{\Delta V_{REF,T_{(nom)}}}{\Delta V_{IN}} (\Delta V_{IN}) \approx 0.2\%$$

在-40 ~ 85 ℃ 的宽温度范围内进行温度扫描,得到的输出电压曲线如图 5 所示。根据温度系数的定义可以计算得到电压源的温度系数为:

$$T = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{min}(T_{max} - T_{min})} \times 10^6 = 6.855(\text{ppm}/^{\circ}\text{C})$$

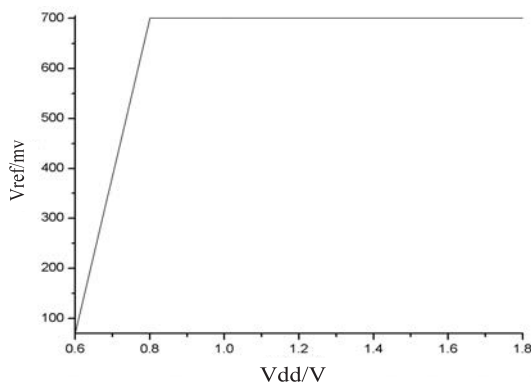


图 4 输出电压随电源电压变化的曲线

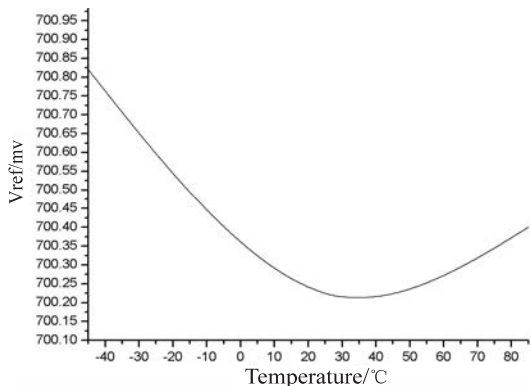


图 5 输出参考电压的温度特性

图 6 为带隙基准电压源的电源抑制比(Power Supply Rejection Ratio, PSRR)曲线。由图 6 可知,电路在低频时的 PSRR 达到了-95 dB,表现出良好的抑制电源干扰特性。

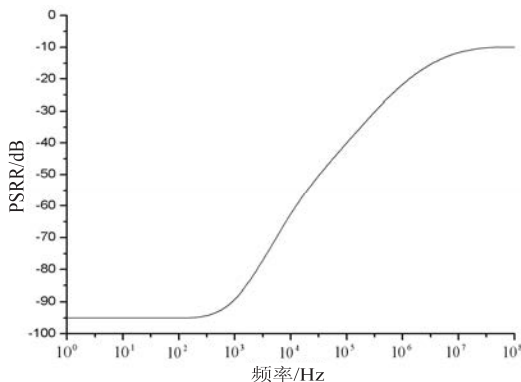


图 6 电路的电源抑制特性

由于存在工艺的随机扰动等一些不可预计的因素,集成电路加工过程中器件的尺寸会发生偏差,而片上的电阻产生较大偏差,因此就需要验证在电阻  $R_1 \sim$

$R_4$  产生的变化对电路输出电压的影响。当温度补偿电阻  $R_3$  阻值发生变化时,带隙基准源温度系数也会产生变化,如图 7 所示。

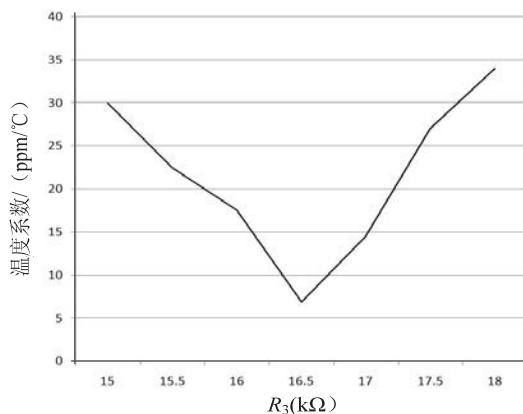


图 7 线性补偿电阻  $R_3$  的偏差对输出电压的影响

由图 7 可看出,当电阻  $R_3$  的阻值为 16.66 kΩ 时,电路输出电压的温度系数达到最小,而当  $R_3$  发生变化时温度系数也会相应变大,因此在进行版图设计时需要通过增大面积、采用对称结构以及增加 dummy 电阻等方法来减小集成电路加工中电阻  $R_3$  可能产生的偏差。

## 4 结束语

基准电压源是集成电路系统中的重要组成部分,文中基于标准 0.18 μm CMOS 工艺设计了一种低温度系数的带隙基准电压源。仿真实验结果表明,所设计的电压源电路在-40 ~ 125 ℃ 范围内温度系数仅为 6.855 ppm/℃,低频时电源电压抑制比达到-95 dB,并且电源电压在 0.6 ~ 1.8 V 内变化时线性调整率为 0.2%,表现出了良好的综合性能。

## 参考文献:

- [1] 孙金中,冯炳军. 一种新型 CMOS 电流模带隙基准源的设计[J]. 固体电子学研究进展,2010,30(4):554-558.
- [2] 李沛林,杨建红. 一种高精度 BiCMOS 电流模带隙基准源[J]. 现代电子技术,2010,33(16):202-204.
- [3] 盛诗敏,宋志成,李 威. 一种基于阈值电压的新型基准电压源设计[J]. 微电子学,2014,44(3):293-296.
- [4] Neg D C W, Kwong D K K, Wong A N. A sub-1V, 26W, low-output-impedance CMOS bandgap reference with a low drop-out or source follower mode[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2011, 19(7):1305-1309.
- [5] Adimulam M K, Movva K K. A low power CMOS current mode bandgap reference circuit with low temperature coefficient of output voltage[C]//Proc of Asia Pacific conference on post-graduate research in microelectronic and electronics. [s. l.]: [s. n.], 2012:144-149.



这种与界面大小无关的控件自适应缩放与自动布局充分体现了 WPF 的强大,其将编程人员从繁琐的界面布局逻辑中完全解放出来,从而可以更加专注于核心业务代码设计,对于程序开发效率和用户体验的提升具有划时代的意义。

## 4 结束语

根据 Farnsworth-Munsell 色相测试系统实物使用特点及原有软件的不足之处,文中提出了基于 WPF 技术的色相子仿真交互界面设计方案。该方案充分利用到 .Net 的图形界面优势,综合运用依赖项属性、触发器、故事板、泛型等 .Net 和 WPF 的优势特性,具有界面外观可拓展性强、更接近实际物理特性的层次效果和仿真排序过渡动画、与分辨率无关的界面自适应缩放与布局调整等特点,并对涉及的关键技术进行了详细介绍。在 Win32 应用逐渐落伍,个性化、富媒体化跨平台应用日益崛起的大背景下,文中介绍的 .Net 框架下的 WPF 相关技术,对于图形化界面与人机交互类的应用开发都有一定的借鉴意义。文中示例在 Windows XP 系统 Visual Studio 2010 C#开发环境下编译,Win XP、Win 8 操作系统测试通过。

## 参考文献:

- [1] Troelsen A. C#与 .Net 4 高级程序设计[M]. 朱 晔,肖 遼,姚琪琳,等,译. 第 5 版. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [2] MacDonald M. WPF 编程宝典—C#2010 版[M]. 王德才,译. 北
- [6] Lee E K. A low voltage low output impedance CMOS bandgap voltage reference[C]//Proc of IEEE international symposium on circuits & systems. [s. l. ]:IEEE,2013:1482-1483.
- [7] Camacho-Galeano E M, Galup-Montoro C, Schneider M C. A 2nW 1.1V self-biased current reference in CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II,2005,52(2):61-65.
- [8] Ahuja B K, Vu H, Laber C A, et al. A very high precision 500-nA CMOS floating-gate analog voltage reference[J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits,2005,40(12):2364-2372.
- [9] 王永顺,井冰洁. 带有曲率补偿的高精度带隙基准电压源设计[J]. 半导体技术,2014,39(1):14-18.
- [10] 吴贵能,周 玮,李儒章,等. 通用二阶曲率补偿带隙基准电压源[J]. 微电子学,2010,40(2):204-208.
- [11] 来新泉,郝 琦,袁 冰,等. 一种二阶曲率补偿的高精度带隙基准电压源[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学

京:清华大学出版社,2011.

- [3] Petzold C. Windows Presentation Foundation 程序设计指南[M]. 蔡学镛,译. 北京:电子工业出版社,2008.
- [4] 王 鹏,崔 静. 新一代界面技术 WPF 的架构及应用[J]. 成都纺织高等专科学校学报,2011,28(1):18-20.
- [5] 张京明,曹国忠,张承业,等. 创新方法与交互设计结合的探讨[J]. 价值工程,2012,31(10):10-11.
- [6] 李 颖. 基于 WPF 的课堂教学管理系统研究与设计[J]. 中国教育技术装备,2011(24):85-87.
- [7] 袁云云,周之昊. 基于 WPF 的医疗辅助软件设计与开发[J]. 数字技术与应用,2012(2):132-132.
- [8] 李成刚,冯 静,凌 玲. 基于 WPF 的交互式绘图系统的开发[J]. 微型机与应用,2011,30(6):50-52.
- [9] Macdonald M. Pro WPF in C# 2008; Windows Presentation Foundation with .NET 3.5[M]. New York: Apress,2008.
- [10] Farnsworth D. The Farnsworth-Munsell 100 hue and Dichotomous tests for color vision[J]. Journal of the Optical Society of America B-optical Physics,1943,33:568-578.
- [11] Hidajat R R, Hidayat J R, McLay J L, et al. A fast system for reporting the Farnsworth - Munsell 100-hue colour vision test[J]. Documenta Ophthalmologica,2004,109(2):109-114.
- [12] Ghose S, Parmar T, Dada T, et al. A new computer-based Farnsworth-Munsell 100-hue test for evaluation of color vision[J]. International Ophthalmology,2014,34(4):747-751.
- [13] Melamud A, Simpson E, Traboulsi E I. Introducing a new computer-based test for the clinical evaluation of color discrimination[J]. American Journal of Ophthalmology,2006,142(6):953-960.
- [14] 张洪定,孟冬梅. 基于 Expression Blend 4 中文版 WPF 和 Silverlight 项目设计基础[M]. 北京:清华大学出版社,2011.

版,2010,37(5):911-915.

- [12] 张宗航,赵毅强,耿俊峰. 一种二阶曲率补偿带隙基准电压源[J]. 微电子学与计算机,2012,29(5):15-19.
- [13] 杨 鹏,吴志明,吕 坚,等. 一种二阶补偿的低压 CMOS 带隙基准电压源[J]. 微电子学,2007,37(6):891-894.
- [14] Du F M A M. A 5.8ppm/°C bandgap reference with a preregulator[C]//Proc of ICEE. [s. l. ]:[s. n. ],2011.
- [15] Dey A, Bhattacharyya T K. A CMOS bandgap reference with high PSRR and improved temperature stability for system-on-chip applications [C]//Proc of EDSSC. [s. l. ]:[s. n. ],2011:17-21.
- [16] Khan Q A, Wadhwa S K, Misri K. A low voltage switched-capacitor current reference circuit with low dependence on process, voltage and temperature [C]//Proceedings of the 16th international conference on VLSI design. [s. l. ]:[s. n. ],2003:504-506.

# 一种低温度系数的带隙基准电压源设计

作者：[张瑛](#)，[王剑](#)，[周洪敏](#)，[ZHANG Ying](#)，[WANG Jian](#)，[ZHOU Hong-min](#)

作者单位：[南京邮电大学 电子科学与工程学院](#)，[江苏 南京](#)，[210046](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

年，卷(期)：2016 (2)

引用本文格式：[张瑛](#)，[王剑](#)，[周洪敏](#)，[ZHANG Ying](#)，[WANG Jian](#)，[ZHOU Hong-min](#) [一种低温度系数的带隙基准电压源设计](#)

[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2016 (2)