

一种用于大电流 LED 驱动的高侧电流检测电路

刘 岩,冯勇建*,夏荣菲

(厦门大学航空航天学院,福建 厦门 361005)

摘要: 针对 LED 驱动中宽输入电压范围和高精度检测的要求,提出了一种高侧电流检测电路.采用互补金属氧化物半导体(CMOS)器件作为放大器,通过检测串联在电路中的采样电阻两端电压差的大小,用滞回控制方法控制电流回路的通断,能精确控制 0.5~5 A 的输出电流,在 5~40 V 电压下达到了 3% 的检测精度.该电路结构简单,通过 0.6 μm 5~40 V CMOS-双重扩散金属氧化物半导体(CDMOS)工艺流片验证,芯片测试结果表明电路工作良好,能满足要求.

关键词: 高侧电流检测;高精度;LED 驱动

中图分类号: TN 431

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2016)04-0592-04

LED 被称为第四代照明光源,其具有高效、节能、环保、使用寿命长的优点^[1],从而被越来越广泛地应用于室内装饰照明、交通信号灯、汽车照明,甚至园艺照明等领域^[2-3].LED 是一种半导体器件,其正向电流与正向电压的关系遵循二极管的特性,很小的电压变化就能引起很大的电流变化.因此,照明系统中 LED 驱动方式多采用恒流方式,主要有:线性恒流型和开关电源型^[4].其中开关电源型又包含降压型、升压型以及升降压型.不论采用何种控制方式,都需要对流过 LED 的电流进行精确检测.

在电路中串联一个电阻,当有电流流过时,该电阻上会有一个压降,通过放大这个电压值,可以得到与线路中电流成比例的信号,从而达到检测线路中电流的目的.该检测方式是当前使用最广泛,也最灵活的方法^[5],它的限制在于功耗与测量精度之间的折中:考虑到功耗要求,检测电压应尽可能小;而要保证足够的检测精度,则希望检测压足够大,以便后续电路处理.但是,不同的应用环境和检测电阻的位置,给设计这种感测放大器带来了困难,例如:如果感应电阻串接在负载与地之间,所产生的电压降可以使用一个普通的运算放大器进行放大,这种结构被称为低侧电流检测,它的检测电路为单端输入,被测信号是检测电阻上对地的压降,因而来自地的干扰会严重影响检

测精度,更大负载电流意味着更大的干扰;此外,这种结构的检测电阻容易被短路,从而导致无法正确感应到线路中的电流,造成线路中电流持续增大而烧毁.

对于感应电阻串接在电源及负载之间,其共模信号接近电源电压,这种结构被称为高侧电流检测.相比低侧电流检测电路,这种连接法能有效地避免地信号的干扰.文献[6]介绍了一种宽范围高侧电流检测电路,它采用双极-互补金属氧化物-双重扩散金属氧化物半导体(bipolar-CMOS-DMOS,BCD)工艺以及高压三极管作为输入级.本文中提出的电路全部采用 CMOS 器件,在常用的 CMOS 工艺下实现了 5~40 V 宽共模输入,且具有较高的检测精度.

1 普通高侧电流检测放大器

对于普通电源(5 V)的低压应用,高侧检测放大器只需是一个共模信号接近电源的运算放大器就可实现功能.当电源电压超过 5 V 时,则需要先通过电阻分压来降低高边检测的共模电压,让其落入放大器允许的共模输入信号范围之内.

如图 1 所示的检测电路中,被测信号先被电阻分压,然后经减法器电路得到差分信号,再被放大器 OP2 放大后输出.CMOS 运算放大器的共模输入电压范围一般不超过 5 V,要实现输入电压 5~40 V 的工

收稿日期:2015-11-09 录用日期:2016-03-08

* 通信作者:yjfeng@xmu.edu.cn

引文格式:刘岩,冯勇建,夏荣菲.一种用于大电流 LED 驱动的高侧电流检测电路[J].厦门大学学报(自然科学版),2016,55(4):592-595.

Citation:LIU Y, FENG Y J, XIA R F. A high-side current sensing circuit for high-brightness LED drivers[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2016, 55(4): 592-595. (in Chinese)



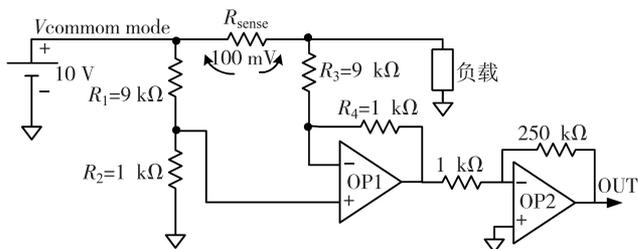


图 1 高侧检测电路

Fig. 1 High-side current sense

作范围,分压要取到它的 1/8 以下。

设 R_{sense} 上压降为 ΔV , 则理论计算的输出电压为:

$$V_{out} = \frac{\beta}{1 - \beta} \Delta V k, \quad (1)$$

其中, β 为电阻分压之比, k 为后一级放大倍数. 图中取 $\beta = 1/10, k = 250$.

假设放大器 OP1 的输入失调电压为 V_{os} , 改写式 (1) 得实际输出电压:

$$V_{out}^* = \frac{1}{1 - \beta} (\beta \Delta V + V_{os}) k. \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 放大器 OP1 的输入失调电压被无衰减地传输到其输出端, 同时被 OP2 放大. 电路的检测精度为:

$$\sigma = (V_{out}^* - V_{out}) / V_{out} \times 100\% = \frac{V_{os}}{\beta \Delta V} \times 100\%, \quad (3)$$

可见放大器输入失调电压相当于被放大了 $1/\beta$ 倍. 且 β 越小, 电流检测的误差越大, 这样的检测精度是不能满足要求的.

2 本文中采用的高侧电流检测电路

根据上述分析, 前级分压线路严重影响了检测电路的精度. 因此, 本文中提出了一种直接放大被测信号的电路. 不仅可以检测共模电压较高的信号, 也有很高的检测精度, 如图 2 所示.

V_{cc} 接 5 V, 高压 N 型绝缘栅场效应管 (NMOS) 用作隔离高压. VIN 和 SNS 端分别接 R_{sense} 的两端, 若 R_{sense} 中有电流, 则 VIN 和 SNS Pin 脚之间会有电压差. 通过 M1~M4 组成的环路, 可使得 A、B 两点电压相等, 则流过 R_1 、 R_2 的电流有差别. 又 M3、M4 组成的电流镜结构使 $I_1 = I_2$, R_1 中多余的电流将从 M5 流走. 设计 $R_1 = R_2$, 流过 R_1 、 R_2 、 R_3 的电流为

$$I_{R1} = (V_{VIN} - V_A) / R_1, \quad (4)$$

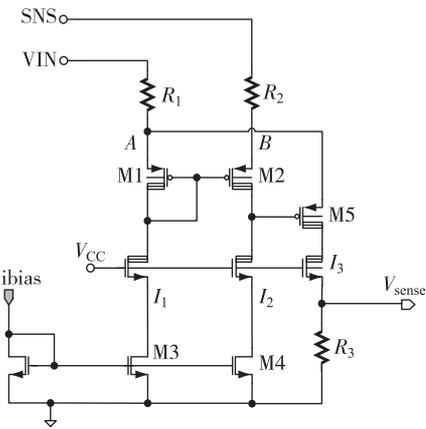


图 2 电流检测电路

Fig. 2 Current sense circuit

$$I_{R2} = (V_{SNS} - V_B) / R_2, \quad (5)$$

$$I_{R3} = I_{R1} - I_1. \quad (6)$$

电路中 M2 与 M3 组成 1:1 的电流镜, 故有 $I_{R2} = I_1 = I_2$; 又 $V_A = V_B, R_1 = R_2$, 联立式 (4)~(6) 可得

$$V_{sense} = I_{R3} R_3 = [(V_{VIN} - V_A) / R_1 - (V_{SNS} - V_B) / R_1] \times R_3 = R_3 / R_1 \Delta V, \quad (7)$$

其中 $\Delta V = V_{VIN} - V_{SNS}$.

3 误差分析及仿真

上述电路中, 输出的误差主要来源: 1) 低压 MOS 管 M3、M4 在版图设计中结构失配造成电流 I_1 与 I_2 不严格相等, 则误差电流 ΔI 会全部流经 R_3 ; 2) 实际生产的高压 MOS 管 M1、M2、M5 的阈值电压 V_T 不完全相等造成的 A、B 两点的电压差 ΔV_{AB} ; 3) R_1 、 R_2 、 R_3 之间的失配, 设不匹配系数为 k , 根据误差来源, 将式 (7) 改写为:

$$V_{sense} = I_{R3} R_3 = \left\{ (V_{VIN} - V_A) / R_1 - [(V_{SNS} - V_B) / R_2 - \Delta I] \right\} R_3 = (R_3 / R_1 + k) [(V_{VIN} - V_{SNS}) + (V_B - V_A)] + \Delta I R_3, \quad (8)$$

其中 $R_3 / R_1 (V_{VIN} - V_{SNS})$ 为理论值, 可知实际值误差项如下:

$$\Delta V_{sense} = k (\Delta V + \Delta V_{AB}) + \frac{R_3}{R_1} \Delta V_{AB} + \Delta I R_3, \quad (9)$$

误差系数:

$$\sigma = \frac{\Delta V_{sense}}{V_{sense}} \times 100\% = \left[k \frac{R_1}{R_3} \left(1 + \frac{\Delta V_{AB}}{\Delta V} \right) + \frac{\Delta V_{AB}}{\Delta V} + \frac{\Delta I}{I_{R3}} \right] \times 100\%, \quad (10)$$

式中,第 1 项是电阻匹配误差,其值取决于版图设计的好坏.采用长度相等的方块电阻,用电阻个数的比值来替代其阻值的比值进行匹配,并在芯片版图中做成交叉、中心对称的图形,可以做到很高的匹配精度^[7-8];第 2 项是 V_T 的不同造成的,主要受到制造工艺的影响,有一定的随机性,只能通过参数微调技术^[9](流片后,通过烧断电路中预设的保险丝来改变电路中的某些参数,通常是电阻的比例)等进行技术修正,另外,增大检测电压 ΔV 的值对提高精度有好处;第 3 项也可以表示为 $\Delta I/I_3 = (\Delta I/I_1) \times (I_1/I_3)$,可从两方面采取措施减小误差:1) 提高电流镜的匹配精度 $\Delta I/I_1$,引入共源共栅结构(如图 3),能将输入电阻增大 $g_m r_{ds}$ 倍(g_m 是晶体管的跨导, r_{ds} 是晶体管漏端看进去的输入阻抗),从而将电流误差缩小相同的倍数^[10-11];2) 增大 I_3 , $I_3 = \Delta V/R_1$,由此可知,适当减小 R_1 或者增大检测电压 ΔV 都能提高精度.

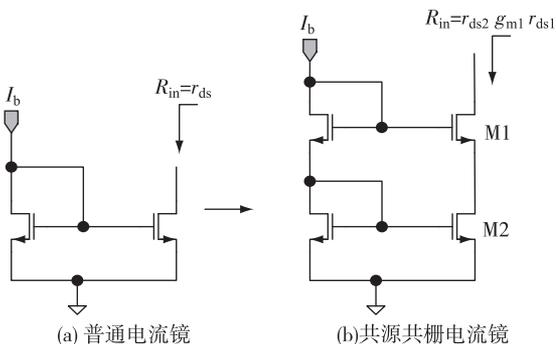


图 3 共源共栅增大输入电阻

Fig. 3 cascode current mirror ensures high gain

完整的电流检测电路及控制回路如图 4 所示.当功率管 M1 打开时,电流经检测电阻 R_{sense} 、LED、电感及 M1 到地,且逐渐增大,检测电阻上的压降被放大为电压 V_{sense} ,电流达到一定值时, V_{sense} 超过基准电压 V_{ref} ,滞回比较器翻转,从而关断功率管 M1;此时,电感、肖特基二极管 D1、检测电阻和 LED 组成了电流回路.随着电感的放电,回路中电流减小, V_{sense} 电压降低,直至低于滞回比较器的翻转阈值,M1 再次打开.如此循环,维持 LED 中电流恒定.

接入检测电阻 $R_{sense} = 1 \Omega$,对电路进行仿真,结果如图 5 所示.由图 5(a)和(b)可看出 V_{sense} 波形和 V_{IN} 、SNS 节点电压之差的波形一致;由图 1(c)可知检测电路输出电压 V_{sense} 与 LED 电流有很好的线性度.

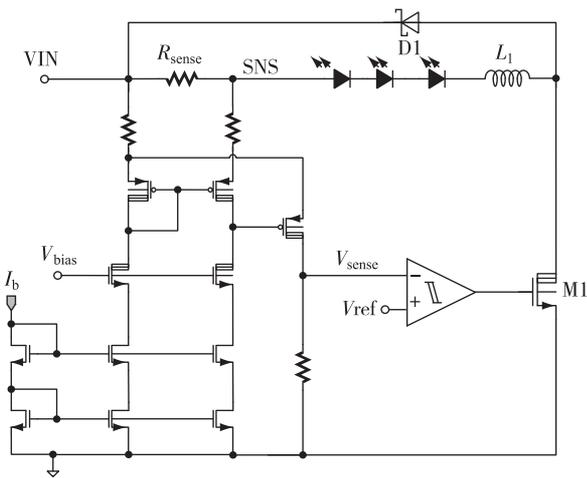


图 4 电流检测整体电路

Fig. 4 The whole circuit of current sense circuit

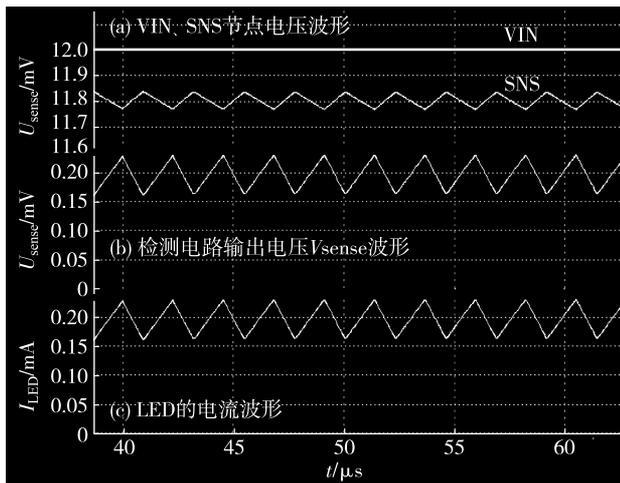


图 5 电流检测线路仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of current sense

4 实验结果与分析

本线路已应用在一款降压型 LED 驱动芯片中,其版图面积为 0.038 mm^2 ,仅占整体芯片的 4%.

针对宽工作电压(5~40 V)要求,本文中设计了一系列实验,在不同的输入输出电压以及不同的输出电流情况下,对流片后的芯片进行了测试,图 6 是检测电阻 $R_{sense} = 0.22 \Omega$,输入 12 V,输出 2 个 LED 串联时回路中的电流波形.LED 中平均电流为 897 mA,比设定值 $0.2/0.22 = 909 \text{ mA}$ 小了 1.32%;滞回(电流纹波系数)大小 $\pm 11\%$,比设计值 $\pm 10\%$ 稍大.表 1 则列出了不同输入电压及检测电阻情况下测得的 LED 电流值,可知本文中设计的电流检测电路达到了

设计要求,能精确检测及控制输出电流.

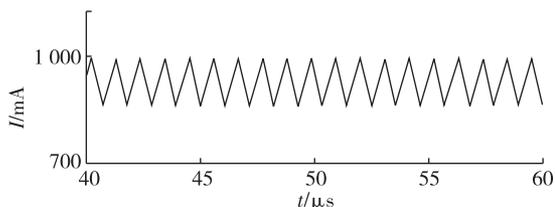


图 6 检测电阻 0.22 Ω 时电流波形

Fig. 6 LED current waveform when $R_{sense} = 0.22 \Omega$

表 1 不同输入电压及 R_{sense} 值下的实验数据

Tab.1 Experimental data of different V_{IN} and R_{sense}

输入电压 V_{IN}/V	检测电阻 R_{sense}/Ω	实测输出电流 I_{LED}/A	目标电流值 I_{out}/A	偏差/ %
5	0.40	0.497	0.500	-0.60
12	0.22	0.897	0.909	-1.32
24	0.01	2.010	2.050	-1.95
36	0.05	3.900	4.000	-2.50
40	0.04	4.850	5.000	-3.00

5 结 论

电流检测电路是 LED 驱动不可或缺的功能模块,其性能直接影响驱动芯片的精确性和可靠性.本研究提出的高侧电流检测电路输入级采用 CMOS 器件,有着较好的工艺兼容性;利用电阻比值进行匹配,提高了检测精度.该电路结构简单,经流片验证安全可靠,且在 5~40 V 宽范围输入电压、0.5~5 A 输出电流范围内达到了 3% 的检测精度,在大电流 LED 驱动照明领域具有很高的实用价值.

参考文献:

[1] 宋贤杰,屠其非,周伟,等.高亮度发光二极管及其在照明领域中的应用[J].半导体光电,2002,23(5):356-360.

[2] 方志烈.发光二极管材料与器件的历史、现状和展望[J].物理,2003,32(5):295-301.

[3] MORROW R C.LED lighting in horticulture[J].Hort-science,2008,43(7):1947-1950.

[4] 林方盛,蒋晓波,江磊,等.LED 驱动电源综述[J].照明工程学报,2012,23(增刊 1):96-101.

[5] FORGHANI-ZADEH H P,RINCON-MORA G A.Current-sensing techniques for DC-DC converters [C] // MWSCAS-2002.The 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems.Tulsa: IEEE,2002,577-580.

[6] LIN J,CHENG H,XING J.A high side current sensing circuit with high PSRR based on BCD process[C]//2011 IEEE International Conference on Anti-counterfeiting,Security and Identification(ASID).Xiamen:IEEE,2011:177-179.

[7] 吕江平.集成电路(IC)中电阻的设计[J].集成电路通讯,2005,23(3):18-22.

[8] LIN Y,CHEN D,GEIGER R.Yield enhancement with optimal area allocation for ratio-critical analog circuits[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers,2006,53(3):534-553.

[9] GE G,ZHANG C,HOOZGAAD G,et al.A single-trim CMOS bandgap reference with a inaccuracy of 0.15% from 40 C to 125 C[J].IEEE Journal of Solid-State Circuits,2011,46(11):2693-2701.

[10] AKIYA M,NAKASHIMA S.High-precision MOS current mirror[J].IEE Proceedings I:Solid-State and Electron Devices,1984,131(5):170-175.

[11] WANG Z.Analytical determination of output resistance and DC matching errors in MOS current mirrors[J].IEE Proceedings G,1990,137(5):397-404.

A High-side Current Sensing Circuit for High-brightness LED Drivers

LIU Yan, FENG Yongjian*, XIA Rongfei

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper proposes a high-side current sensing complementary metal oxide semiconductor (CMOS) circuit which is applied to high-brightness LED drivers. By detecting the voltage drop of a sense resistor in series and applying hysteresis control strategies, it controls the on-off of the current loop and has achieved a 3% accuracy while the output current varies from 0.5-5 A at 5-40 V input voltage. The circuit has been implanted in 0.6 μm 5-40 V BCD MOS process, and the test shows that the circuit exhibits a satisfactory performance and can meet requirements.

Key words: high-side current sense; high accuracy; LED driver