

一种面向单片 DC/DC 的低压高效片上电流检测技术

魏海龙, 刘佑宝, 刘 智, 廖 雪

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710054)

摘 要: 本文提出并实现了一种面向电流模式单片开关 DC/DC 转换器的低压高效片上电流采样电路. 该电路利用功率管等效电阻电流检测技术和无需 OP 放大器的源极输入差分电压放大技术, 使电路的应用范围可低至 2.3V; -3dB 带宽 12MHz; 在最大负载电流情况下的静态电流峰值仅 $19\mu\text{A}$, 比常规采用功率管镜像电流检测技术的静态电流峰值低 1.5 个量级左右. 转换器基于 $0.5\mu\text{m}$ 2P3M Mixed Signal CMOS 工艺设计制作. 测试结果表明, 电流检测电路的最大检测电流 1.1A, 转换器的输入最低电压 2.3V, 重负载转换效率高于 93%.

关键词: 单片 DC/DC; 电流检测; 高效; 低输入电压

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0055-05

A Kind of Low-Voltage High-efficient On-chip Current Testing Technology for Monolithic DC/DC

WEI Hai-long, LIU You-bao, LIU Zhi, LIAO Xue

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

Abstract: In this paper, A kind of low-voltage high-efficient on-chip current sensing circuit for monolithic current-mode switch DC/DC converter is proposed. The circuit makes use of power transistor equivalent resistor current sensing technique and source-input differential voltage amplification technique. As a result, the power supply range can be as low as 2.3V, -3dB bandwidth is up to 12 MHz and the quiescent current peak is only $19\mu\text{A}$ under maximum load current, which is about 1.5 orders lower than the quiescent current peak using traditional power transistor mirror-current sensing. The converter is designed and fabricated in $0.5\mu\text{m}$ 2P3M Mixed Signal CMOS process. The test results show that the maximum sensing current of 1.1A, minimum power supply voltage of the converter is 2.3V, the conversion efficiency is higher than 93% under heavy load.

Key words: DC/DC converter; current-sensing; high-efficiency; low-voltage

1 引言

随着便携式电子产品市场份额的迅猛增长, 系统对低成本、小尺寸、低电压、高转换效率 DC/DC 转换器的需求日益迫切. 能较好解决这一需求的单片 CMOS/BiCMOS DC/DC 转换器成为研究热点^[1-2]. 电流模式开关 DC/DC 转换器因其所具有的自动限流保护和瞬态响应速度快的优势, 成为 DC-DC 转换器主流技术^[3].

电流检测电路是电流模式开关 DC/DC 转换器的核心电路, 决定了 DC/DC 转换器的驱动能力. 常

用的检测技术中, 感应电流技术^[4]需外部感应电阻, 而滤波技术^[5]和积分技术^[6]电路复杂, 均不适合单片电流检测. 功率管镜像电流检测技术^[7-8]是目前最流行的单片 DC/DC 转换电流检测技术, 虽然这种电流检测技术易于集成, 且检测精度高, 但这种方法消耗的静态电流较大, 对转换器转换效率影响较大, 不利于高效 DC/DC 转换芯片的设计. 另外, 这种电流镜像方法对制作工艺和版图布局均要求较高.

本文在对几种已实现的单片电流检测电路分析的基础上, 提出并设计了一种低压高效的片上电流检测电路.

2 DC/DC 整体电路拓扑结构

转换器整体上采用基于固定关断时间的电流模式 PWM 双环控制方式,以抑制基于固定频率的电流模式 PWM 控制方式中存在的转换效率随输入电压下降而减小的问题.其中电流检测、开关比较器、定时器、驱动器、开关管 M_8 和同步整流管 M_9 、输出网络(电感、电容 C_L 和负载电阻 R_L)组成电流环路;电压反馈网络 R_A/R_B 、误差放大器及电流环路组成了电压环路.通过模式比较器,转换器根据负载可在 PWM/PFM 工作模式间自动切换.在重负载电流情况下转换器采用 PWM 工作模式;在轻负载下采用 PFM 工作模式,以抑制轻负载时 PWM 工作模式下转换效率的降低^[8].如图 1 所示.

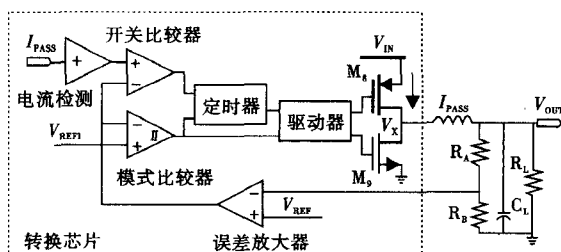


图 1 电流模式开关 DC/DC 转换器拓扑结构

3 片上电流检测电路设计

3.1 传统的功率管镜像电流检测技术

文献[7]的功率管镜像电流检测电路如图 2 所示.

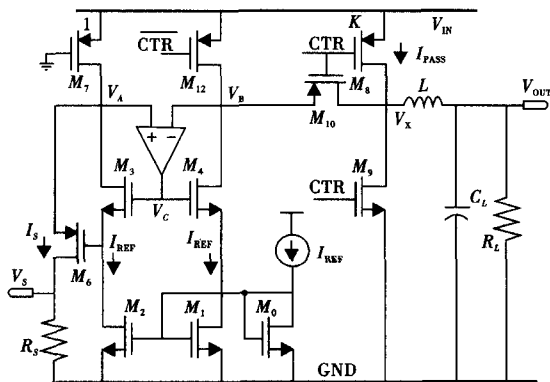


图 2 单片电流检测电路

M_8 为功率管,当 CTR 为低电平(导通状态)时, M_8 和 M_{10} 导通, V_A 与 V_X 相等, V_A 被 OP 放大器虚短到 V_B ,所以 V_B 和 V_X 相等.此时, M_7 和 M_8 的源栅漏端均相等, M_7 管以 $1/K$ 的比例因子镜像 M_8 管的电流 I_{PASS} . M_7 得到的镜像电流是 M_2 电流

I_{REF} 和 M_6 管电流 I_S 之和,其中 I_{REF} 固定不变,所以 I_S 随 M_7 电流线性变化,进而随 I_{PASS} 线性变化. I_S 通过 R_S 正比转换为 V_S ,所以 V_S 的变化能线性反映 I_{PASS} 的变化,从而实现了功率 PMOS 管的电流检测.当 CTR 为高电平(关断状态)时, M_8 和 M_{10} 关断, M_{12} 开启. V_A 提高到 V_{IN} ,保证在关断状态下 OP 放大器仍能正常工作.

虽然该电路可单片实现,但完成 M_7 和 M_8 的电流镜像功能所需的 OP 放大器的有限带宽会影响检测精度;电路中存在的 $V_A - V_C - M_4 - V_A$ 正反馈回路易造成电路振荡;由于 M_3 和 M_6 的共源串连结构, V_C 至少要大于 $2V_{GS}$,因此该电路结构的工作电压较高.

文献[8]给出的另一种无需 OP 放大器的功率管电流镜像电流检测电路对上述问题进行了有效改进,如图 3 所示.

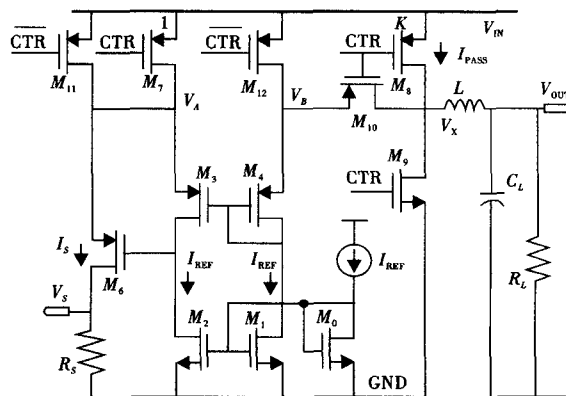


图 3 无 OP 单片电流检测电路

该电路的工作原理和图 2 电路相似. M_8 为功率 PMOS 管,当 CTR 为低电平时, M_8 和 M_{10} 导通, V_A 与 V_X 相等, V_A 被由 $M_1 \sim M_4$ 组成的共栅差分放大电路虚短到 V_B ,所以 V_B 和 V_X 相等.此时, M_7 和 M_8 的源栅漏端均相等, M_7 管以 $1/K$ 的比例因子镜像 M_8 管的电流 I_{PASS} . M_7 管的电流是 M_2 管电流 I_{REF} 和 M_6 管电流 I_S 之和,其中 I_{REF} 固定不变,所以 I_S 随 M_7 电流线性变化,进而随 I_{PASS} 线性变化. I_S 通过 R_S 正比转换为 V_S ,所以 V_S 的变化能线性反映 I_{PASS} 的变化,从而实现了功率 PMOS 管的电流检测.当 CTR 为高电平时, M_8 和 M_{10} 关断. M_{11} 和 M_{12} 开启,提供 $M_1 \sim M_4$ 共栅差分放大电路正常工作所需的电流通路, V_A 和 V_B 提高到输入电压 V_{IN} ,检测电流 I_S 降低到 0.

这种电流检测电路无需 OP 放大器,结构简单,且规避了正反馈引起的振荡风险. M_6 从 NMOS 改

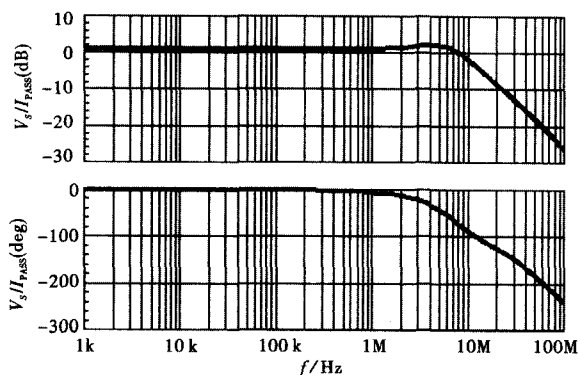
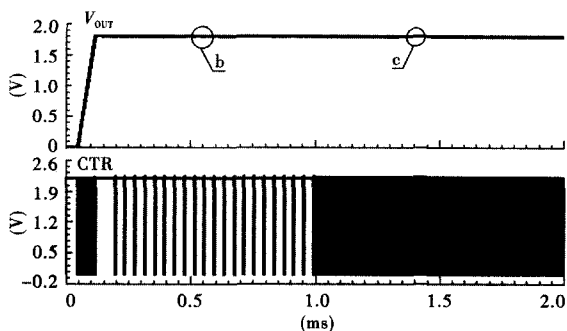
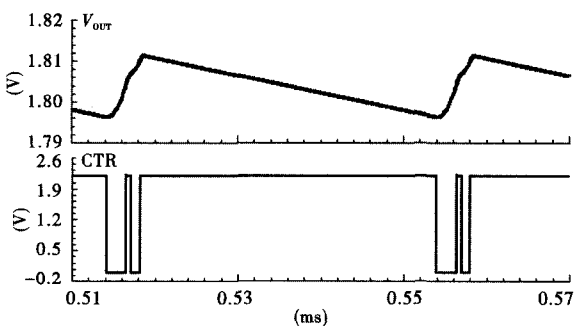


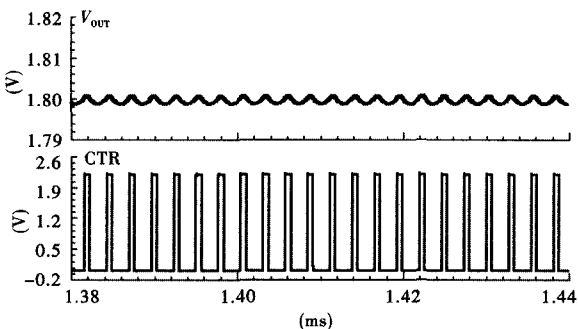
图5 电流检测电路频率特性



(a) DC/DC 转换器瞬态响应



(b) 轻负载条件下 PFM 工作模式局部放大

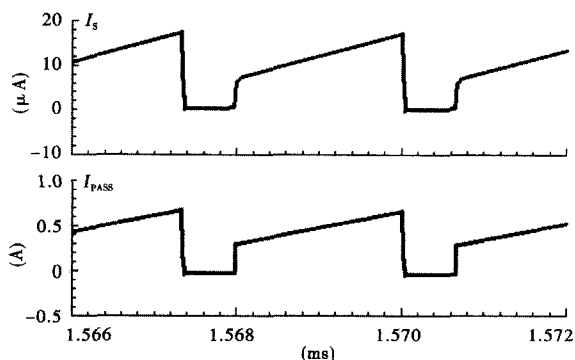


(c) 重负载条件下 PWM 工作模式局部放大

图6 转换器功能仿真

件下 DC/DC 转换器转换效率的下降。在 1 ms~2 ms, 输出负载电流为 500 mA 的重负载, 转换器处在 PWM 工作模式, 其局部放大波形如图 6(c)。仿

真结果结果表明, 在 $V_{IN}=2.2V$ 的低输入电压条件下, 转换器仍能正常工作。

图7 输出电流 I_{PASS} 和检测电流 I_s 瞬态响应局部放大

可以看出, 当 I_{PASS} 峰值电流为 700 mA 时, 检测电流 I_s 只有 19 μA 。两者比值约为 3.7×10^4 , 远大于目前主流检测技术中的 1000 倍, 检测电流的利用效率提高了 37 倍, 检测电流损耗降低了 1.5 个数量级。

另外, 在 500 mA 的重载条件下, 转换效率达 96%, 在 20 mA 的轻载条件下, 转换效率亦能达 93%。转换器的负载调整率为 7 mV/A, 线性调整率为 0.4%/V。

该转换器的显微照片如图 8 所示, 图中所围部分为电流检测电路。

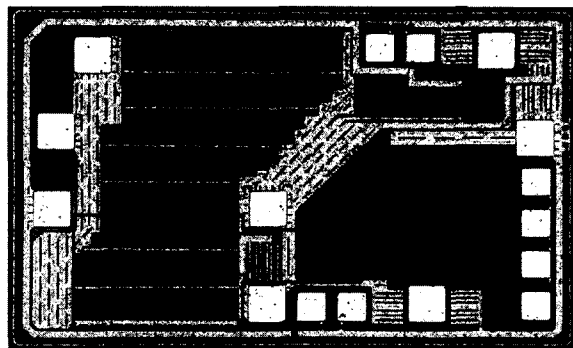


图8 DC/DC 转换器显微照片

芯片主要性能实测结果如表 1 所示。

表1 转换芯片主要性能测试结果

参数名	测试值	单位
输入电源范围	2.3~5.5	V
静态电流	114	μA
最大峰值电流	1.1	A
负载调整率	9	mV/A
线性调整率	0.6	%/V
重载转换效率	93	%
轻载转换效率	89	%

可以看出,负载调整率和线性调整率的测试结果与仿真结果基本一致.重负载条件下的转换效率达 93%,优于同类转换器^[7-8]的转换效率.

5 结束语

本文利用功率管等效电阻电流检测技术和无需 OP 放大器的源极输入差分电压放大技术,设计了一种面向电流模式单片开关 DC/DC 转换器的低压高效片上电流采样电路.该电路的 -3dB 带宽 12MHz,在最大负载电流情况下的静态电流峰值仅 19 μ A,比常规采用功率管镜像电流检测技术的静态电流峰值低 1.5 个量级左右.测试结果表明,转换器电源应用范围可低至 2.3V;500mA 重负载条件下的转换效率高达 93%,在轻负载条件下亦能达到 89%.

参考文献:

- [1] Vahid Yousefzadeh, Amir Babazadeh, Bhaskar Ramachandran, et al. Proximate time-optimal digital control for synchronous buck DC-DC converters [J]. IEEE Transactions On Power Electronics, 2008, 23(4):2018-2026.
- [2] 王帆,孙义和,胡俊材,等.一种 DC-DC 升压转换器中的误差放大器的设计[J].微电子学与计算机,2008,25(4):76-79.
- [3] Edoardo Bonizzoni, Fausto Borghetti, Piero malcovati. A 200mA 93%. Peak efficiency single-inductor dual-output DC-DC buck convert[C]// 2007 IEEE International Solid-State Circuits Conference. USA, 2007: 526-527.
- [4] Forghani-zadeh H P, Rincón-Mora. Current-sensing techniques for DC-DC converters[J]. IEEE Midwest Symp on Circuits and Systems, 2002(2):577-580.
- [5] Midya P, Greuel M, Krein P. Sensorless current mode control-an observer technique for DC-DC converters [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2001,16(4):522-526.
- [6] Dallago E, Passoni M, Sassone G. Lossless current-sensing in low-voltage high-current dc-dc modular supplies[J]. IEEE Trans. On Industrial Electronics, 2000,47(6):1249-1252.
- [7] Cheung Fai Lee, Philip K T Mok. A monolithic current-mode CMOS DC-DC converter with on-chip current-sensing technique [J]. IEEE Journal Of Solid-State Circuits, 2004,39(1): 3-14.
- [8] Kuo-Hsing Cheng, Chia-Wei Su, Hsin-Hsin Ko. A high accuracy and high-efficiency on-chip current sensing for current-mode control CMOS DC-DC buck converter[C]//15th IEEE Electronics, Circuits and Systems. USA; California, 2008:458-461.
- [9] 范然然,林争辉,冯晖.一种新型的 DC-DC 芯片设计[J].微电子学与计算机,2003,20(4):51-54.

(上接第 54 页)

作者简介:

武振平 女,(1986—),硕士研究生.研究方向为超大规模集成电路设计.

付方发 男,(1984—),博士研究生,讲师.研究方向为片上

网络、众核系统设计方法学.

肖立伊 女,(1961—),博士,教授,博士生导师.研究方向为 VHDL-AMS 混合信号模拟器设计、SoC/IP 核设计与标准化.