

升压型 DC-DC 转换器的设计与研究

程梦璋, 凌朝东, 李国刚

(华侨大学, 福建 厦门 362021)

摘 要: 主要研究了一种高转换效率、低输出纹波的升压型 DC-DC 转换器. 该转换器具有很高的转换效率、低工作电压、欠电流与过电流检测和节电模式控制等特性. 通过带隙基准电压源对转换器内部工作点提供偏置, 大大地提高了系统的稳定性, 提高了抗电源电压波动, 温度的变化以及噪声引起的干扰的抑制. 采用 $0.25\mu\text{m}$ CMOS 工艺, 其转换效率可达到 90% 以上. 在输入电压为 2.5V 的条件下, 输出电压为标准的 3.3V 和 5V.

关键词: DC-DC 转换器; 转换效率; 节电模式; 带隙电压源

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)07-0099-04

The Study and Design of the Boost DC-DC Converter

CHENG Meng-zhang, LING Zhao-dong, LI Guo-gang

(Huaqiao University, Xiamen 362021, China)

Abstract: A high efficiency, low output ripple boost DC-DC converter was studied and designed. The DC-DC converter achieves high dc to dc converting efficiency, low power supply, low current and over current detection, saving mode control. The bias voltage of nodes inside of DC-DC converter are set by the bandgap reference voltage circuit, therefore, the system stability, suppressed power supply noise and effect of temperature variation is enhanced. The circuit simulation is based on the $0.25\mu\text{m}$ process, its conversion rate is grater than 90%. When input voltage is 2.5V, the output voltage are standard 3.3V and 5V.

Key words: DC-DC converter; converting efficiency; saving mode; bandgap reference voltage

1 引言

直流稳压电源作为电源系统的一个分支, 广泛应用于通信、计算机、家用电器等领域中. 稳压电源分为线性稳压源和开关稳压源两大类. 线性稳压源的主要特点是调整管工作在线性放大状态, 具有稳定度高、可靠性好、成本较低等优点, 缺点是转换效率低, 功耗大、体积大, 限制了线性稳压电源的应用. 开关电源被称为高效节能电源, 近年来, 随着电子器件、电磁材料、电压变换技术的快速发展, 开关电源技术得到了相当大的突破, 已经可以逐渐替代线性稳压电源, 成为稳压电源的主流产品. 开关电源内部关键元器件工作在高频开关状态, 本身的消耗能量很低, 电源效率可达 90% 以上, 比普通线性稳压电

源效率提高近一倍^[1].

本文提出一种高转换效率、低输出纹波的升压型脉冲宽度调制式 DC-DC 转换器电路结构, 从高转换效率、低输出纹波分析的角度出发, 在理论和设计上对这种 DC-DC 转换器进行详细的计算和分析.

2 升压型 DC-DC 转换器的工作原理

升压型 DC-DC 转换器的基本结构见图 1 所示. 图中, L 为电感、 C 为滤波电容、 M 为 NMOS 功率开关管、 R_L 为负载电阻、 D 为续流二极管、脉冲宽度调制式控制器产生控制脉冲控制开关管的工作. 其工作原理如下:

功率开关管受输入脉冲控制导通或截止. 当开关管导通时, 电源向电感储能, 电感电流增加, 其感

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2012-11-17

基金项目: 福建省自然科学基金项目(Z0516008); 华侨大学科研启动费项目(09BS403)

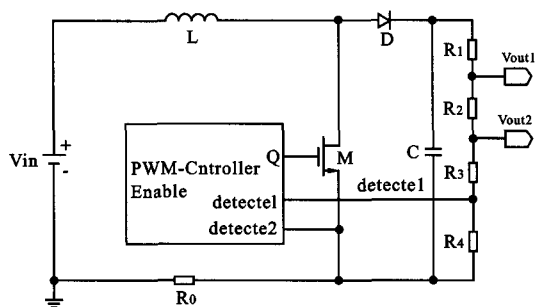


图1 升压型DC-DC转换器基本结构图

应电动势为左正右负。由于开关管导通电阻接近于零,电容上的电压为上正下负,则二极管处于反向截止状态,电容上的电压通过负载电阻放电;当开关管截止,电感电流减少,电感上的感应电动势为左负右正,此时二极管处于正向导通,电源电压和电感电压相加向电容充电。因此,在一个脉冲周期,经电容滤波后的输出电压平均值将高于输入电压。

在电感电流连续的情况下,设定MOS管的控制脉冲周期为 T ,MOS管导通时间为 $0 \sim T_1$;MOS管截止时间为 $T_1 \sim T$,且电感上的电流变化在MOS管导通和截止时间相等(ΔI),则电路工作按图1中MOS管导通和截止分为两种情况:

(1) MOS管导通期间,此时续流二极管截止,电感中的电流上升,其电路的表达式为:

$$V_{in} = L \frac{I_2 - I_1}{T_1} = L \frac{\Delta I}{T_1} \quad (1)$$

(2) MOS管截止期间,由于电感上的电流不能突变,则续流二极管导通,其电路的表达式为:

$$V_{out} - V_{in} = L \frac{\Delta I}{T_2} \quad (2)$$

$$\text{则 } \Delta I = \frac{V_{in} T_1}{L} = \frac{(V_{out} - V_{in}) T_2}{L} \quad (3)$$

设控制脉冲的占空比为 k ,MOS管导通时间为 $T_1 = kT$;MOS管截止时间为 $T_2 = (1 - k)T$ 。将 T_1, T_2 代入式(3)得:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - k} \quad (4)$$

从上式可以看出,由于 k 小于1,则该DC-DC转换器是升压型转换器,转换器的输出电压大于输入电压^[2-3]。

本文设计的DC-DC转换器性能指标见表1。

表1 DC-DC转换器的性能指标

性能	数值
输出电压	3.3 V/5V
转换效率	$\geq 90\%$
输出电压纹波	$\leq 40 \text{ mV}$
输出最大电流	100 mA

3 DC-DC转换器控制单元的设计

DC-DC转换器NMOS功率开关管的控制脉冲是由脉冲控制器提供,典型的DCDC转换器的控制方式有脉冲宽度调制式(PWM)和脉冲频率调制式(PFM)。本文采用脉冲宽度调制式控制,其电路结构见图2。

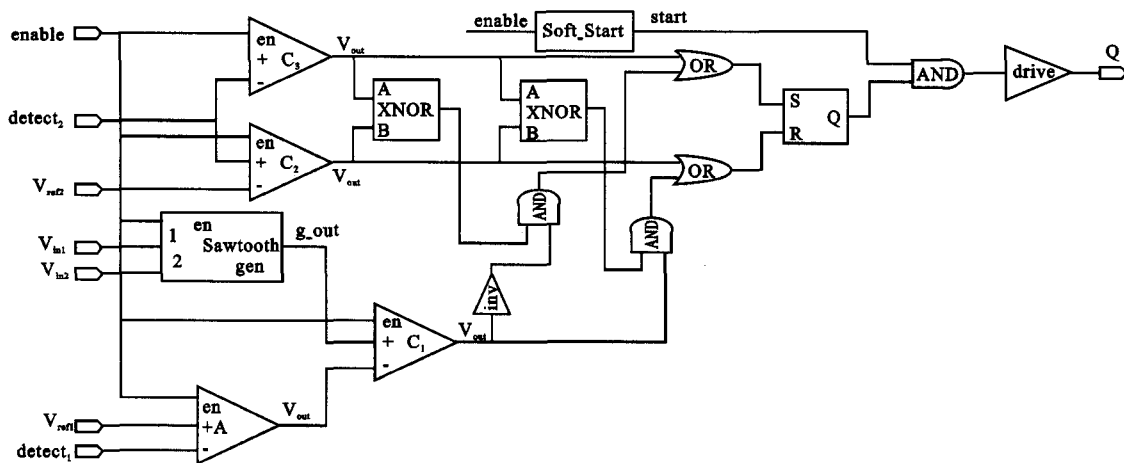


图2 PWM控制电路结构图

该控制器的工作原理如下:当enable为“0”时,芯片处于节电状态;当enable为“1”时,芯片处于正常工作状态。detect1检测到的电压信号,经误差运算放大器与2.5V标准电压比较后产生误差信号,该

误差信号接到主比较器的负输入端,主比较器的正输入端接锯齿波发生器的输出。主比较器在锯齿波信号和误差信号的共同作用下产生一个输出占空比随误差电压信号变化的脉冲。当detect2检测到的电

压信号在 10mV 到 500mV 之间时,欠电流比较器和过电流比较器的输出均为“0”,经同或门输出为“1”,该信号作为与门的输入信号,则与门的输出仅仅决定于主比较器的输出信号;同时欠电流比较器和过电流比较器的低电平信号输出作为或门的输入,或门的输出也仅仅取决于主比较器的输出信号.当 detect_1 检测到的信号低于 2.5V,主比较器输出占空比较大的脉冲信号一路送到 RS 触发器的 R 输入端,另一路信号经反相器反相后送到 RS 触发器的 S 输入端,所以 RS 触发器的输出经电流驱动后使主电路的电流上升.反之,当 detect_1 检测到的信号高于 2.5V,主电路的电流下降.改变控制脉冲信号占空比能够调节主电路的电流,所以这种控制方式称为脉冲宽度调制方式(Pulse Width Modulation, PWM).

当主电路检测端 detect_2 检测到的电压信号低于 10mV,欠电流和过电流比较器输出分别为“1”和“0”,同或门输出为“0”,该低电平输出将两个与门屏蔽,RS 触发器的 S 端都被置“1”,R 端被置“0”,所以输出 Q 为“1”,使主回路电流迅速上升,从而确保电路工作在连续工作状态(CCM).同样,主电路检测端 detect_2 检测到的电压信号高于 500mV,过电流比较器输出为“1”,欠电流比较器输出为“0”,主比较器被屏蔽,RS 触发器的 S 端都被置为“0”,同时 R 端被置为“1”,输出 Q 置为“0”,使主回路电流迅速下降,从而有效地防止了功率开关管过电流而毁坏. PWM 控制器中还设有软启动电路,防止电路的启动电流过大^[4-5].

4 控制单元中主要模块的设计分析

主比较器是控制单元中的关键模块,主比较器的电路结构如图 3 所示.

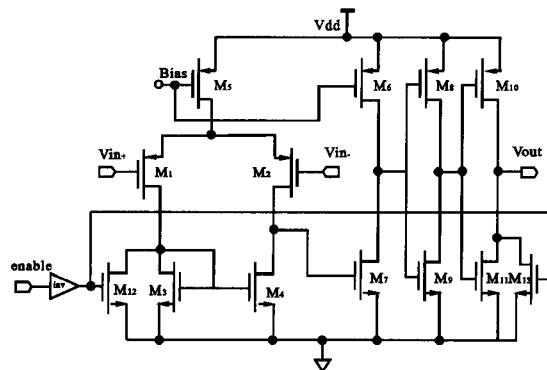


图 3 主比较器的电路图

主比较器电路结构可以分为模拟部分和数字部

分. 模拟部分为两级差分放大电路:第一级运放为差分放大器,第二级为共源放大器.第一级运放将锯齿波发生器的输出信号和误差运算放大器的输出信号进行比较,产生的输出信号经共源放大器放大作为模拟/数字转换电路的输入信号.数字部分是两级标准 CMOS 反相器,其功能是将比较结果的模拟信号转换为数字信号,并提高其电流驱动能力^[6-7].

灵敏度作为主比较器的重要性能指标之一,由于在主电路中 detect_2 的检测点上的电压不能小于 10 mV,所以主比较器的灵敏度要高于 10mV. 图 4 为主比较器的灵敏度分析仿真结果.从图中可以看出,输入直流电压从 2.495 V 到 2.505 V,其输出曲线从低电平到高电平的两个转折点分别为 2.499 V 和 2.501 V,所以主比较器的灵敏度近似于 1mV,满足了控制器的要求.

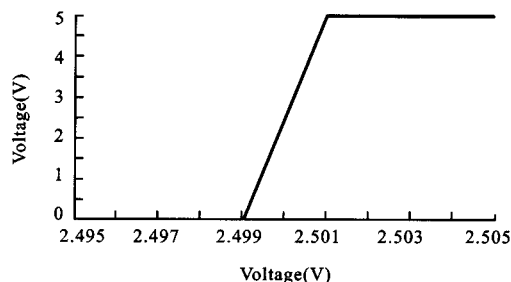


图 4 主比较器的灵敏度分析

欠电流比较器的设计是整体电路设计的难点,比较器要检测低于 10 mV 的电压,则欠电流比较器的输入电压灵敏度要小于 1 mV. 为了增加比较器的灵敏度,本设计在主比较器电路的输入级增加了电压提升电路,其电路如图 5 所示.

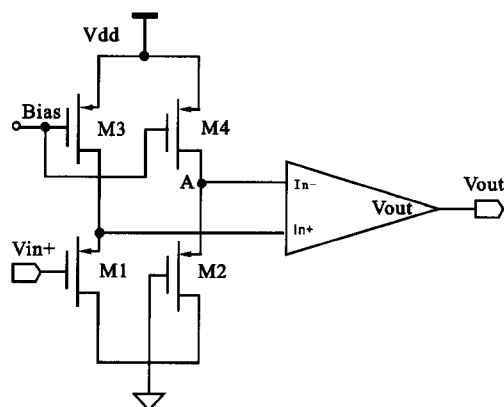


图 5 欠电流比较器的电路图

电压提升电路由 $M_1 \sim M_4$ 四个 PMOS 管组成. 将 A 点的比较器阈值电压调到 10 mV,则 V_{in+} 在主回路检测点 detect_2 处得到的非常微弱的检测电压经 M_1 放大后与 10 mV 电压比较,因此提高了比较

器的灵敏度. 图 6 是欠电流比较器的灵敏度仿真.

从图中可以看出, V_{in+} 的输入电压从 9.5 mV 到 10.5 mV, 其输出曲线从低电平到高电平的两个转折点分别为 9.95 mV 和 10.05 mV, 所以主比较器的灵敏度近似于 0.05 mV, 满足了系统的需要.

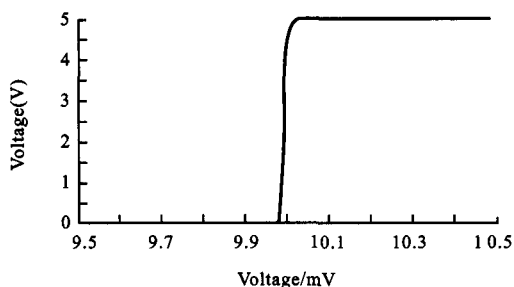


图 6 欠电流比较器的灵敏度分析

DC-DC 转换器的仿真结果见图 7 所示. 其仿真条件是: 电源电压 5V; 2.5V 的输入电压在时间 1ms 时加入, 电路工作于连续模式. 从仿真结果可以得到: 输出电压分别为 3.3V 和 5V; 过冲电压为 0.5V ~ 0.8V; 纹波电压小于 30mV; 输出稳定时间大约为 1.2ms.

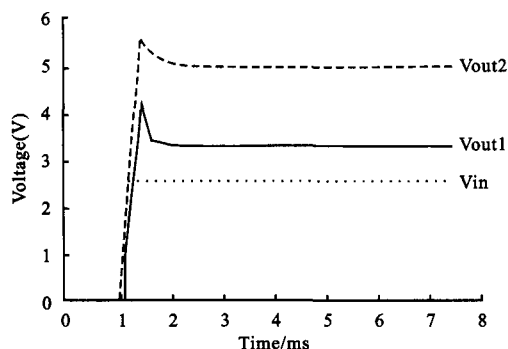


图 7 升压型 PWM DC-DC 转换器的仿真图

表 2 为输入电压 2.5V DC-DC 转换器的输入输出转换效率计算. 从表中可以看出, 当电路工作在轻负载时, 效率可达 97%, 重负载时效率为 90%.

表 2 DC-DC 转换器的转换效率

输出电流 (mA)	输入电流 (mA)	转换效率 (η %)
0.1	0.23	97
0.5	1.2	93
1	2.43	92
2	4.825	91.5
5	12.3	91
10	24.7	90.5
20	50	90

5 结束语

本文从实现高转换效率、低输出纹波的目的出发, 设计和分析了一种升压型脉冲宽度调制式 DC-DC 转换器. 详细介绍和分析了转换器的主电路和脉冲控制器的结构、原理和特性, 重点突出了对控制器中比较器的设计技术分析. 整体的仿真结果表明, 该升压型脉冲宽度调制式 DC-DC 转换器达到了设计指标要求: 转换效率在 90% 以上; 输出纹波小于 30 mV; 输出最大电流可达 100 mA, 可用于常用的电子设备之中.

参考文献:

- [1] Allen P E, Holberg D R. CMOS analog circuit design [M]. Oxford University Press Inc, 2002.
- [2] Li X, Oruganti R. Soft switched PWM dc/dc converter with synchronous rectifiers[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2004, 38(3): 20-28.
- [3] Georgios A P, Nikos I M. Calculation and stability investigation of periodic steady states of the voltage converter buck DC-DC converter[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 19 (7): 969-970.
- [4] Lee C F, Mok P K T. A monolithic current mode CMOS DC-DC converter with on-chip current sensing technique[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2004, 39 (1): 3-14.
- [5] Deng H F, Duan X M. A monolithically integrated boost converter based on 0.5 μ m CMOS process[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2005, 20 (3): 628-638.
- [6] Sheikhaei S, Mirabbasi S, Ivanov A. A 0.35 μ m CMOS comparator circuit for high-speed ADC application[J]. IEEE International Symposium on Circuits and System, 2005(6): 6134-6144.
- [7] Sahu B, Rincon-Mora G A. A high-efficiency, dual-mode, dynamic, buck-boost power supply IC for portable application[J]. IEEE International Conference on VLSI Design, 2005(21): 858-861.

作者简介:

程梦璋 男, (1987—), 教授. 研究方向为模数混合集成电路.