

一种用于 DC-DC 的双模控制功率管分段驱动电路

陈剑洛, 罗 萍, 耿 煜

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

摘 要: 提出了一种用于 DC-DC 的双模控制功率管分段驱动电路。该电路通过检测负载电流的变化, 优化功率管大小, 从而提高转换效率; 提出根据负载电流大小自动切换至 PSM 控制模式的解决方案, 进一步提高极轻负载下的效率。电路基于标准 0.13 μm CMOS 工艺进行设计与仿真, 仿真结果表明, 与传统不分段 DC-DC 变换器相比, 提出的双模控制分段驱动电路在 15 mA 负载时效率提升 5.3%。

关键词: 双模控制; 功率管分段; PSM 控制; 轻负载

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1004-3365(2014)05-0644-03

An Adaptive Segment Output Stage with Dual-Mode Control in DC-DC Converter

CHEN Jianluo, LUO Ping, GENG Yu

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, P. R. China)

Abstract: An adaptive segment output stage with dual-mode control in DC-DC converter was proposed. According to the load current, optimizing width of the power MOSFET facilitated enhancing conversion efficiency. Specially, in order to improve the efficiency at very light load conditions, PSM controller was included in system which could switch dynamically based on the load current. A dual-mode buck DC-DC converter with the adaptive segment output stage was designed and simulated in a 0.13 μm standard CMOS process. The simulation results showed that the maximum efficiency improvement of the converter with adaptive segment reached 5.3% at 15 mA compared to converter without segment.

Key words: Dual-mode control; Segment output stage; PSM control; Light load condition

1 引 言

目前 DC-DC 变换器广泛应用于手机、MP3、数码相机、便携式媒体播放器等产品中。DC-DC 变换器的控制模式分为: PWM(脉冲宽度调制)控制模式、PFM(脉冲频率调制)控制模式、PSM(脉冲跨周期调制模式)控制模式^[3], 以及混合控制模式(上述两种或多种控制模式的组合)。PFM, PSM 模式通常用于轻载(负载电流较小)的情况下, 用以提高变

换器的转换效率, 但输出纹波较大; PWM 控制模式在重负载条件下效率较高, 并具有良好的输出电压纹波和噪声。因此, PWM 仍是当前主要采用的控制模式。

在重负载条件下, PWM 控制型变换器总耗损中的功率管导通损耗占主导地位; 在轻载条件下, 变换器的损耗主要体现在功率管的驱动损耗和开关损耗。尤其是超过几兆赫兹的高频变换器, MOSFET 开关和栅极驱动损耗显著, 并且随着负载电流的减小, 转换效率降低, 因此, 轻负载效率成为低压低功

收稿日期: 2013-07-19; 定稿日期: 2013-10-09

作者简介: 陈剑洛(1989—)男(汉族), 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要研究方向为模拟集成电路设计。

罗 萍(1968—)女(汉族), 博士, 教授, 主要研究方向为模拟集成电路设计。

耗设计的焦点。近年来,基于器件、电路和系统级提高轻负载效率的研究工作已广泛开展,旨在较宽的负载范围内达到最佳效率。

在参考文献[1]中,提出了一种基于数字控制 DC-DC 变换器的分段驱动电路,优化了轻负载下的效率;在参考文献[2]中,提出了一种在 PWM 控制模式下的功率管分段驱动电路。上述两篇文献中提出的解决方案都提高了变换器在轻负载下的转化效率,但同时也存在一定的缺陷。文献[1]中受控制方法的限制,局限在数字 DC-DC 中的应用;而文献[2]中由于是在 PWM 控制模式下工作,本身在轻负载下的效率值有限。

本文提出了一种基于 Buck 拓扑的双模控制分段驱动电路,可以提高宽负载范围的效率。电路工作在 DCM 模式时,根据检测功率管导通时间反应得到的负载电流大小,将功率管对应分成六个部分,同时在极轻负载条件下,系统将自动切换至 PSM 工作模式。

2 功率管的计算

在高的开关频率下,DC-DC 变换器中功率管的损耗是芯片损耗的主要来源,即是影响转换效率的主要因素。因此,通常在设计功率管时主要考虑转换效率和电流能力。功率管的损耗主要分为两部分:驱动损耗和导通损耗,尤其在轻负载下,驱动损耗显著。本文主要讨论如何在轻负载下进行效率的提升。首先,在 DCM 模式下,导通损耗与功率管的总宽度的关系为^[4]:

$$E_R = \frac{2R_{on}M^3T_s^2}{3LV_g^2V_o} \sqrt{\frac{2i_{Load}L}{(1-M)V_oT_s}} W^{-1} = AW^{-1} \quad (1)$$

令, $A = \frac{2R_{on}M^3T_s^2}{3LV_g^2V_o} \sqrt{\frac{2i_{Load}L}{(1-M)V_oT_s}}$, $M = \frac{V_o}{V_g}$ 。其中, W 是功率管总宽度, L 是电感, T_s 表示开关周期, V_g 表示输入电压。从(1)式中可以得到,导通损耗和功率管总宽度成反比。另一方面,驱动损耗和功率管总宽度的关系为:

$$E_C = \frac{1}{2}V_g^2C_{eq}W = BW \quad (2)$$

其中, $B = \frac{1}{2}V_g^2C_{eq}$, V_g 是输入电压, C_{eq} 是功率管的总等效电容。结合(1)、(2)式可得:

$$E_{total} = E_C + E_R = BW + AW^{-1} \geq 2\sqrt{BA} \quad (3)$$

由此得到最优功率管总宽度与负载电流的关系为:

$$W_{opt} = \sqrt{\frac{A}{B}} = f(i_{Load}) \quad (4)$$

通过以上的分析和计算,得到了最优功率管大小与负载电流的近似关系,如表 1 所示。本文根据仿真将功率管分成六个部分。

表 1 优化后的功率管大小和对应负载电流

负载电流/ mA	(W/L) _{PMOS} / ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	(W/L) _{NMOS} / ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
<10	5 000/0.3	1 600/0.35
10~20	10 000/0.3	3 200/0.35
20~40	15 000/0.3	4 800/0.35
40~60	20 000/0.3	6 400/0.35
60~80	25 000/0.3	8 000/0.35
>80	30 000/0.3	9 600/0.35

3 整体电路设计

3.1 电路整体架构

图 1 所示为 DC-DC 转换器的整体结构框图,电路以 BUCK 型 DC-DC 为基础,功率管被分为 6 个大段。

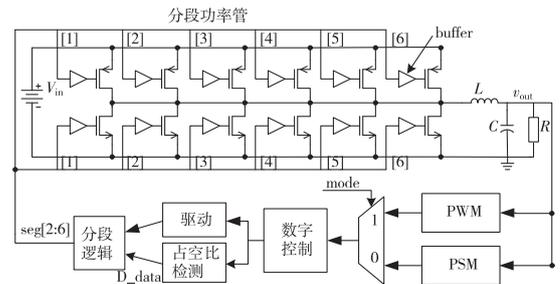


图 1 DC-DC 转换器整体电路结构框图

在 DCM 模式下,以 TDC 结构为主的占空比检测电路反馈功率管栅信号的占空比,以此作为功率管分段导通的依据。转换器主要工作在两种工作模式下:PWM 工作模式和 PSM 工作模式。数字控制模块主要负责电感峰值电流限制、死区时间控制、过零比较。该模块将功率管开关信号传送到占空比检测模块,分段逻辑模块通过内建占空比与负载电流的查找表来决定功率管工作的最优段数。随着负载电流的减小,通过判断分段逻辑模块输出 $seg < 2 >$ 的翻转,DC-DC 变换器将自动切换进入 PSM 工作模式,以达到进一步提高轻负载下效率的目的。

3.2 自动分段控制

根据表 1 中功率管大小与负载电流的关系,本文将功率管分为六段。为保证系统能够正常工作,其中一段功率管保持常开,其它五段由五位控制码 seg[2:6]控制。在 DCM 工作模式下,导通时间与负载电流的关系如下^[5]:

$$T_{on} = D_{dcm} \times T_s = \sqrt{\frac{2L \times i_{Load} \times T_s \times V_o}{(V_g - V_o)V_g}} \quad (5)$$

根据(5)式,通过内建查找表的方式,检测导通时间反映负载电流的大小,具体由图 1 中占空比检测模块对数字控制模块输出的功率管驱动信号进行检测。五位控制码 D_data 的六种状态分别反映分段的六个负载电流范围,并通过分段逻辑模块对功率管进行分段控制,具体如表 2 所示。

表 2 负载电流对应功率管控制码 D_data

负载电流/mA	D_data
<10	00000
10-20	00001
20-40	00011
40-60	00111
60-80	01111
>80	11111

3.3 模式切换

为了简化电路设计,电路借助功率管只打开一段为边界条件,即负载电流对应大小为 10 mA 时,DC-DC 变换器在更轻负载下切换到 PSM 模式,图 2 是模式切换的状态图。

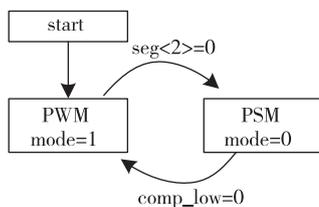


图 2 模式切换状态示意图

DC-DC 转换器启动完成之后进入 PWM 模式,然后根据分段逻辑模块的输出 seg<2>,判断是否由 PWM 切换至 PSM 模式。seg<2>=0,(根据表 2,功率管只打开一段)表示负载电流小于 10 mA,系统切换至 PSM;当 comp_low=0,表示输出电压远小于基准电压,即超出 PSM 控制模式所能维持输出电压的最大能力,系统切换至 PWM。本文利用不同的转换条件,保证了 PWM,PSM 自动模式切换的稳定性。输出信号 mode 是模式切换模块的输出,mode = 1,表示 PWM 模式;mode = 0,表示 PSM 模式。

图 3 是 PSM 控制模式的示意图,comp_out 为周期检测比较器的输出。当 DC-DC 变换器工作在 PSM 控制模式时,comp_out=0,则一固定导通时间输送到功率管栅极;comp_out=1,则功率管一直保持关断。

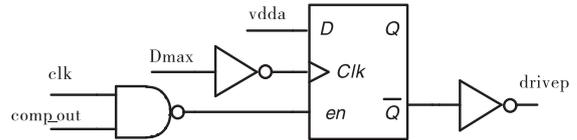


图 3 PSM 控制简单示意图

4 仿真

本文提出的双模控制分段驱动电路基于标准的 0.13 μm CMOS 工艺进行设计与仿真,仿真结果如图 4 所示。当负载电流从 90 mA 以 20 mA 步进依次减小时,功率管打开段数也依次减少,与设计相符。当负载电流减小至 10 mA 时,模式信号 mode 由 1 跳变为 0,系统进入 PSM 控制模式,此时占空比检测电路模块使能无效,停止工作;当负载电流再一次升高到 40 mA 时,mode 信号跳变为 1,系统进入 PWM 控制模式。

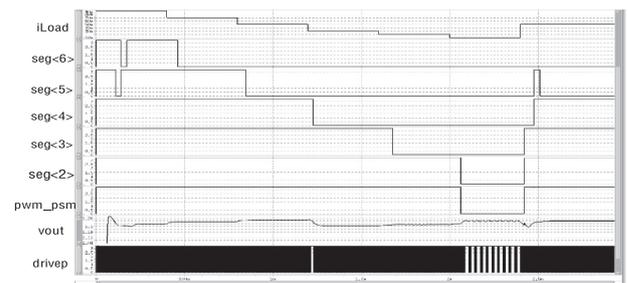


图 4 不同负载电流下自动分段效果图

图 5 是与传统不分段的 DC-DC 电路的效率对比图。可以看出,在轻负载下负载效率得到提升,并保持在 70% 以上;在 15 mA 处通过分段控制后,效率提升 5.3%。

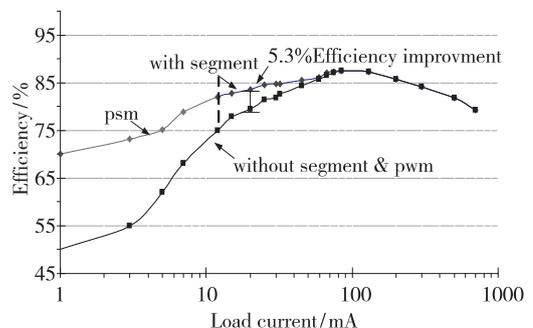


图 5 分段前后效率对比图

控制软件,进行了三温测试,测试结果如表1所示。由测试结果可知,本系统的性能指标能够满足要求,并且,由于本系统的高低温误差和量化误差相对于晶振本身的误差而言非常小,对晶振的输出频率精度几乎没有影响。

表1 测试结果

参数	设计值	测试值
输出频率精度	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-8}
压控范围/Hz	± 5	± 5
压控步进/Hz	0.125	0.02
控制电压/V	0~3	0~3

6 结论

通过软件和硬件相结合的方式,给出了一种微调晶振频率的软件实现方法。重点对各单元电路关键参数的选择作了分析,给出了提高数控电位器分辨率的方法及其控制程序流程图。对系统的误差做了分析,微调精度达到了 1.5×10^{-13} 。晶振的频率精度一般为 10^{-9} 量级,微调精度可满足晶振频率校

准的需求,能够应用在各种通信系统中,满足在线频率校准的要求,具有较强的实用价值。目前该电路已经批量应用于某频率综合电路中,实现了晶振频率的在线调节。本方案可以推广应用到其他的需要精细调节电压的场合,因系统的噪声极低,尤其适合应用于对噪声要求较高的模拟电路中。

参考文献:

- [1] 徐维涛,郝晓弘,杨新华. 恒温晶振(OCXO)精密恒温箱温度控制电路分析[J]. 仪表技术与传感器, 2005, 8(8): 41-43.
- [2] 王佳斌,戴在平. 温补晶振的一种实现方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007, 4(4): 376-378.
- [3] 张迎新,雷文,姚静波. C8051F系列SOC单片机原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [4] 潘琢金,施国君. C8051Fxxx高速SOC单片机原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.
- [5] 张国晨. 基于数字电位器的直流偏置技术[J]. 电子科技, 2011, 24(7): 10-15.
- [6] 陈富安,张莹. C8051F35X单片机内部Flash存储器的擦写方法[J]. 电子设计工程, 2010, 18(2): 105-106.

(上接第646页)

5 结论

本文提出了一种基于Buck拓扑双模控制功率管分段驱动电路。通过负载电流变化,优化功率管大小,从而提高转换效率,尤其在极轻负载下,系统自动切换至PSM控制模式,进一步提高了效率。整个电路基于标准的 $0.13 \mu\text{m}$ CMOS工艺进行设计与仿真,仿真结果表明,与传统不分段转换器相比,本文提出的双模控制分段驱动电路在15 mA负载时效率提升5.3%,并在轻负载下效率保持在70%以上。

参考文献:

- [1] TRESCASES O, NG W T, NISHIO H, et al. A

digitally controlled DC-DC converter module with a segmented output stage for optimized efficiency [C] // IEEE Int Symp Power Semiconductor Devices and IC's, Naples, Italy. 2006:1.

- [2] LUO M, LUO P, MO Yi-Kun. An adaptive segment output stage for PWM DC-DC converter[C] // IEEE 11th Int Conf Sol Sta Integr Circ Techn, Xi'an, China. 2012: 1-3.
- [3] 罗萍,李肇基,熊富贵,等. 开关变换器的跨周期调制模式[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(1): 984-988.
- [4] ERICKSON R W, MAKSIMOVIC D. Fundamentals of power electronics [M]. New York: Springer Press, 2001.
- [5] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计(修订版) [M]. 北京:电子工业出版社, 2004.