

文章编号: 2095-4980(2015)06-0967-04

## 峰值电流型 PWM 调制 buck DC-DC 的建模与仿真分析

曾会平<sup>1,2</sup>, 金湘亮<sup>1,2\*</sup>, 周阿铖<sup>1,2</sup>

(1.湘潭大学 物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2.微光电与系统集成湖南省工程实验室, 湖南 湘潭 411105)

**摘 要:** 针对目前直流转直流(DC-DC)变换器系统建模方法受限于实际电路的局限性, 提出了一种新型的Cadence系统建模方法。利用Cadence工具及其理想元器件, 建立脉宽调制(PWM)峰值电流型buck DC-DC的系统模型。为验证模型的性能, 在旺宏0.5  $\mu\text{m}$  BCD工艺条件下, 用电路结构替换理想模型, 得到电路系统, 并将其与系统模型的仿真结果进行对比。仿真结果表明, 以该系统模型为指导设计的buck DC-DC芯片在340 kHz工作频率下具有宽输出电压范围, 并能提供2 A的大负载电流, 从而验证了该设计方法的可行性。

**关键词:** 系统建模; PWM 调制; 峰值电流型; 直流转直流

**中图分类号:** TN866

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201506.0967

## Modeling and simulation analysis of peak current-mode controlled PWM buck DC-DC converter

ZENG Huiping<sup>1,2</sup>, JIN Xiangliang<sup>1,2\*</sup>, ZHOU Acheng<sup>1,2</sup>

(1.Faculty of Materials, Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;

2.Hunan Engineering Laboratory for Microelectronics, Optoelectronics and System on A Chip, Xiangtan Hunan 411105, China)

**Abstract:** From the perspective of engineering practice, a new Cadence system modeling method is proposed considering the limitations of the Direct Current to Direct Current(DC-DC) system modeling methods in circuit application. A peak current-mode controlled DC-DC Pulse Width Modulation(PWM) buck converter system model is presented, which adopts ideal components in the Cadence platform to build model. A new circuit system is achieved by replacing the ideal system model with circuit construction in MXIC standard 0.5  $\mu\text{m}$  BCD process in order to verify the performance of the model. Compared with the circuit system, the buck DC-DC converter chip based on the system model has a wide output voltage range and a large load current of 2 A at 340 kHz operating frequency.

**Key words:** system modeling; Pulse Width Modulation; peak-current-mode; Direct Current to Direct Current

开关电源是通过控制半导体功率开关器件导通和关断的时间比率, 维持稳定输出电压的一种电源。目前开关电源主要应用在电子、通信、电气、能源、航空航天、军事及家电等领域<sup>[1-2]</sup>, 在市场上已被广泛应用。

脉宽调制(PWM)开关主要由基本拓扑结构和控制部分组成。在 PWM 调制型开关电源中, 系统的建模与分析是研究其拓扑结构和控制方法的基础。通过系统建模, 在一定程度上能指导电路设计, 为系统关键参数的选取提供参考。目前直流转直流(DC-DC)变换器系统建模主要有状态空间平均法、等效电源平均法, 三端 PWM 开关模型等方法<sup>[3-4]</sup>。这 3 种建模方法能得到具体的参数方程, 但从电路设计的角度来说不够直观, 且适用条件受限于实际电路。这 3 种方法均属于电路平均法的范畴, 具有以下特点: 在低频范围内精确度很高, 但在负载突变、电源波动情况下, 其精确度将大大降低; 由于对信号进行了平均处理而不能有效进行纹波分析; 储能元件所产生的自然频率必须远低于开关频率<sup>[5]</sup>。基于这些条件的限制, 本文提出了一种新型的 PWM 调制 buck DC-DC 的 Cadence 建模方法。

收稿日期: 2014-10-11; 修回日期: 2014-11-10

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX05008-005-04-02); 国家自然科学基金资助项目(61274043, 61233010)

\*通信作者: 金湘亮 email:jinxl@xtu.edu.cn

## 1 DC-DC 系统设计目标与模型的建立

### 1.1 系统模型设计指标

从适用性和能耗的角度,本文设计了具有如下指标的开关电源系统模型。具体设计指标如表1所示。

表1 系统设计指标

Table1 System design specifications

| input voltage/V | output voltage/V | frequency/kHz | load current/A | ripple voltage/mV | efficiency/% | control-to-output transconductance/(A·V <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|------------------|---------------|----------------|-------------------|--------------|---------------------------------------------------------|
| 4.750~18        | 0.923~15         | 340           | 0~2            | <20               | >85          | 3.500                                                   |

从表1可以看到,系统具有4.750 V~18 V的宽输入范围,因此在外部供电环境变化较大的情况下仍能保证输出电压稳定,纹波电压小;另一方面,0.923 V~15 V的宽输出范围能够使设计的电源芯片应用于多种场合;2 A的大负载电流能够使电源快速完成充电,减少了充电时间。

### 1.2 系统模型的搭建

系统模型如图1所示,主要包括buck DC-DC拓扑结构、误差放大器、PWM调制比较器、电流检测放大电路和振荡器<sup>[6]</sup>等模块。其中,误差放大器是电压外环的核心,电流检测是电流内环的核心,它们的性能会影响整个系统的稳定性<sup>[7]</sup>。

系统工作原理如下:电流环路随时检测输出电压,该电压经电阻分压后,以负反馈的形式加入到误差放大器的反相输入端。基准电压输入到该运放的同相输入端,基准电压和输出的反馈电压通过差分放大后产生控制信号 $U_e$ ,该控制信号与电感电流的采样信号 $U_{sen}$ 通过PWM比较器比较后,产生一个占空比可调的逻辑电平信号PWM\_OUT,输入到RS触发器的R端,通过RS触发器来控制开关的导通和关断,从而达到稳定输出电压的目的。

本文设计了一个峰值电流型<sup>[8]</sup>PWM调制DC-DC变换器模型,在负载和输入电压变化情况下,能够通过电流内环和电压外环的共同作用来稳定输出电压。当输入电压确定,负载变化时,电压反馈外环控制电路起调节占空比的主要作用,保证输出电压能够稳定;当负载确定,输入电压变化时,电流反馈内环控制电路,起调节占空比的主要作用,保证得到稳定的输出电压。

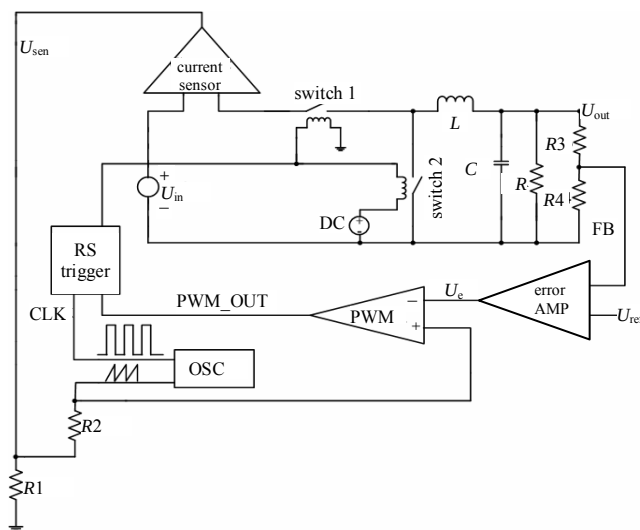


Fig.1 DC-DC system model

图1 DC-DC 系统模型

## 2 仿真结果与分析

开关变换器的占空比由电感电流达到阈值的时间来确定,而参考控制信号决定阈值的大小。2个控制环中,外环检测输出电压,得到控制信号并提供给内环,内环检测开关管上的电流并以脉冲序列为基础,维持输出电压恒定。对于给定的工作周期,开关管的导通时刻与时钟脉冲一致,关断时刻为电感电流的模拟电压接近误差电压的时刻。电流模式PWM控制策略主要缺点是系统不稳定,主要原因是峰值电流型控制开关电源在占空比大于50%时,存在次谐波振荡的危险。针对这个问题,电流环路必须采用斜坡补偿技术<sup>[9]</sup>。本系统在反馈调节的过程中,电流检测放大器利用跨阻增益将所检测的电感电流放大后,转换成输出电压,然后与斜坡补偿电压进行叠加,得到的叠加信号作为PWM比较器的同相输入端。如图1所示,由于2个电压叠加不精确,通常先将2个电压信号先转换成电流信号,然后再将2个电流信号流经相同的电阻R1来获得所需要的叠加信号。基于上面的模型,针对典型输入输出情况:即 $U_{in}=12\text{ V}$ , $U_{out}=3.3\text{ V}$ , $D=27.5\%$ , $D$ 代表占空比,在旺宏0.5  $\mu\text{m}$  BCD工艺环境下,在spectre中对整体系统模型参数进行仿真。

1) 图2分别为电流检测输出及其经斜坡补偿后输出的仿真波形。对电流环的电流检测输出电压进行斜坡补偿,平均补偿70 mV左右,调节电阻R1和R2的比例关系和阻值,可以调整斜坡补偿的大小,其中斜坡电压是由振荡器产生的频率为340 kHz、振幅为3.7 V的电压信号。

2) PWM比较器的仿真波形如图3所示,COMP表示误差放大器的输出,RAMP\_CS表示经斜坡补偿后的电流检测输出,PWM\_OUT表示PWM比较器的输出,PWM比较器的同相输入端为经斜坡补偿后的电流检测输出,

反相输入端为误差放大器的输出。图 3 显示误差放大器的输出决定了检测到电感电流的峰值,检测到的电感电流转化成了电压。当该电压低于误差电压时,PWM 比较器输出高电平,一旦达到误差放大器输出的电压值,则 PWM 比较器的输出立刻进行翻转,变为低电平。即每一个时钟的上升沿和对应电感电流的模拟电压接近误差电压的时刻都会导致 PWM 比较器翻转。

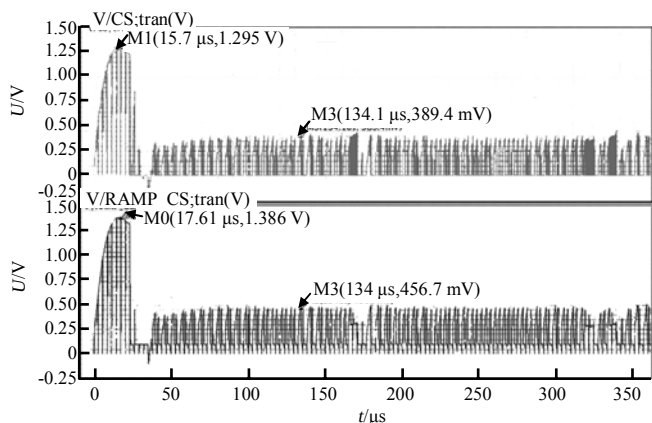


Fig.2 Curves of current sense  
图 2 电流检测输出

3) 电流环路仿真结果如图 4 所示,误差放大器的输出 COMP 端通过 PWM 比较器后输出 PWM\_OUT,得到了周期固定而占空比可调的脉冲信号,输出电压在经过调整后输出带有一定纹波的稳定电压,满足  $U_{in}=U_{out} \times D$ 。

在上面模型结果的基础上,将 DC-DC 系统模型中的理想子模块用相应的电路功能模块替代,并将拓扑结构中的理想开关用旺宏 0.5  $\mu\text{m}$  BCD 库中的模型管来代替。选取  $U_{in}=12\text{ V}$ ,  $U_{out}=3.3\text{ V}$  的典型应用情况进行仿真,得到的波形如图 5、图 6 和图 7 所示。

结果如图 5 所示,输入电压为 12 V,输出电压约为 3.319 V~3.320 V,纹波电压为 10 mV,占空比为 27.5%,系统时钟周期为 2.936  $\mu\text{s}$ ,即 340.6 kHz,输出负载电流基本稳定在 2 A,输出稳定时峰值电感电流为 2.334 A。图 6~图 7 显示误差放大器的输出一直钳位在电流检测输出电压的峰值,很好地实现了电流模式下的环路控制,得到输入电压调整时间约 40  $\mu\text{s}$ ~50  $\mu\text{s}$ ,负载调整时间约为 70  $\mu\text{s}$ ~80  $\mu\text{s}$ 。

### 3 结论

根据降压型 DC-DC 的工作原理,在旺宏 0.5  $\mu\text{m}$  BCD 工艺下基于 Cadence 工具中的理想元件建模,搭建了 PWM 调制下 buck DC-DC 系统模型,其中包括了误差放大器、PWM 调制比较器、电流检测模块、振荡器模型以及 RS 触发器。Cadence 模型仿真结果显示,该模型实现了芯片设计所要求的功能和主要指标。通过替换系统模型得到的电路仿真结果与模型结果对比,验证了 Cadence 建模方法的可行性和准确性。

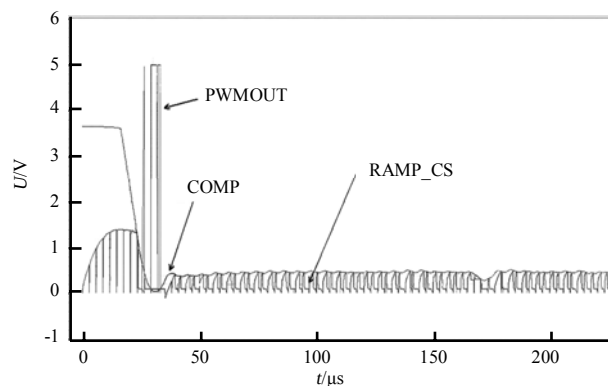


Fig.3 Curves of PWM output-voltage  
图 3 PWM 调制器输出波形

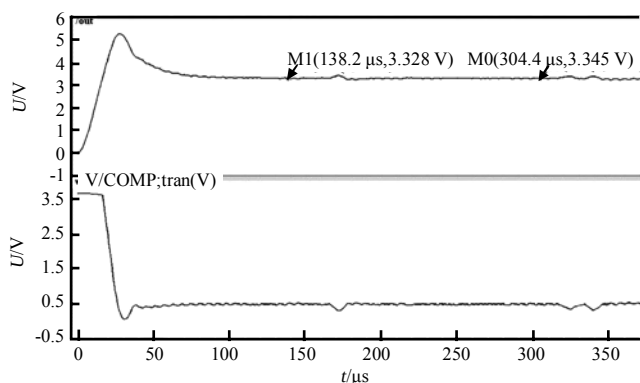


Fig.4 Curves of 12 V input-voltage converted to 3.3 V output-voltage  
图 4 12 V/3.3 V 系统输出波形

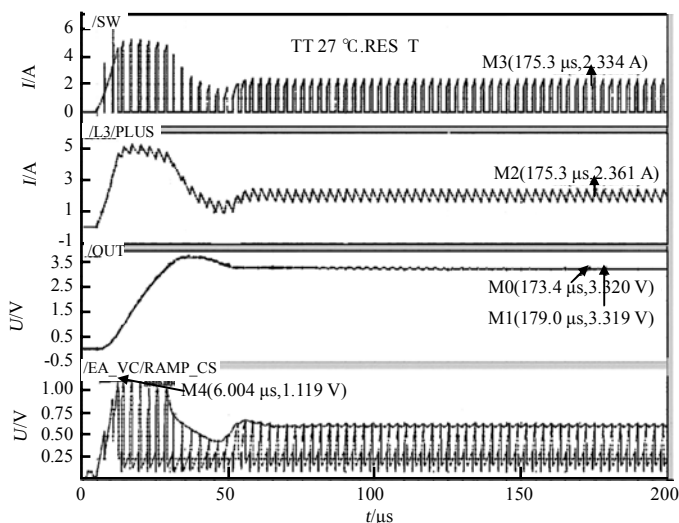


Fig.5 Curves of 12 V input-voltage converted to 3.3 V output-voltage  
图 5 在 TT、常温下 12 V/3.3 V 输出波形

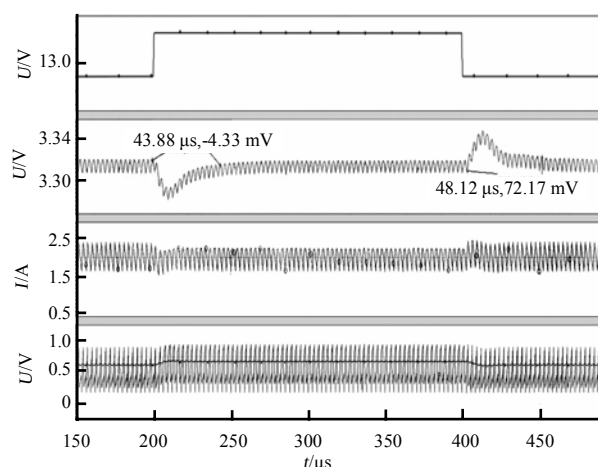


Fig.6 Curves of output-voltage with input voltage stepping from 12 V to 15 V  
图 6 输入电压 12 V~15 V 间跳变时的输出波形

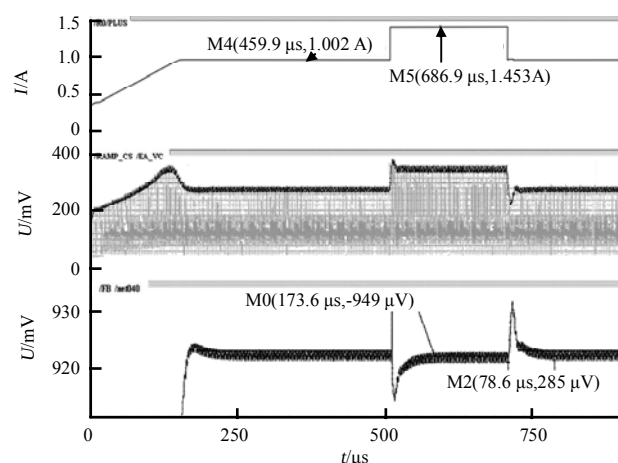


Fig.7 Curves of output voltage with load stepping from 1 A to 2 A  
图 7 负载在 1 A~2 A 间跳变时的输出波形

### 参考文献:

- [1] Weaver W W, Krein P T. Analysis and applications of a current-sourced buck converter[C]// Applied Power Electronics Conference, APEC 2007—Twenty Second Annual IEEE. [S.l.]: IEEE, 2007: 1664–1670.
- [2] XIAO J, Peterchev A V, ZHANG J, et al. A 4  $\mu$ A quiescent-current dual-mode digitally controlled buck converter IC for cellular phone applications[J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2004, 39(12): 2342–2348.
- [3] Mohammed S Al-Numay. Discrete-time averaging of continuous conduction mode PWM DC–DC converters with feedback considering conduction losses[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2012, 7(1): 13–28.
- [4] ZHANG S, YU X. An unified analytical modeling of the interleaved pulse width modulation(PWM) DC–DC converter and its applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5147–5158.
- [5] Cantillo A. Stability issues in peak-current-controlled SEPIC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 551–562.
- [6] 吕志强, 陈岚. 一种带有开关电流源的低相噪压控振荡器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3): 466–470. (LV Zhiqiang, CHEN Lan. A low phase noise VCO with switched current source[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(3): 466–470.)
- [7] 郭秀宏. 基于 Buck 型 DC–DC 转换器的高性能误差放大器设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (GUO Xiuhong. High performance error amplifier design based on Buck DC–DC converter[D]. Chengdu, Sichuan, China: Southwest Jiaotong University, 2009.)
- [8] Kondrath N, Kazimierczuk M K. Control-to-output transfer function of peak current-mode controlled PWM DC–DC boost converter in CCM[J]. Electronics Letters, 2011, 47(17): 991–993.
- [9] 陈春鹏. Buck DC–DC 变换器芯片的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009. (CHEN Chunpeng. Research and design of buck DC/DC converter chip[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2009.)

### 作者简介:



曾会平(1989–), 女, 湖南省衡阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为模拟集成电路设计。

金湘亮(1974–), 男, 湖南省邵阳市人, 博士, 教授, 主要研究方向为 CMOS 图像传感器和 SOC 设计. email: jinxl@xtu.edu.cn.

周阿铨(1988–), 女, 湖南省汨罗市人, 硕士, 主要研究方向为模拟集成电路设计。