

一种集成数字开关电源补偿器设计*

沈旭真, 吴晓波*, 赵梦恋, 秦琳

(浙江大学 超大规模集成电路研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 片上集成的数字开关电源(SMPS)控制器采用数字方式的补偿器,能够实现较为复杂的控制策略以达到高性能电源管理。针对普通数字补偿器通常占用较大的片上面积问题,通过分析 Boost 电路模拟补偿器的数字化方法,提出了全集成的数字补偿器电路方案,并采用了非线性寻址查找存储补偿系数,实现了面积和瞬态响应优化;所提出的方案具有面积小、功耗低、结构简单、易于综合的特点。现场可编程门阵列(FPGA)验证结果表明,采用该补偿器的控制器可应用于数字电源的控制。

关键词: 数字开关电源控制器;数字补偿器;非线性查找表;现场可编程门阵列

中图分类号:TM311

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)08-0996-04

Design of digital compensator for switching power supply

SHEN Xu-zhen, WU Xiao-bo, ZHAO Meng-lian, QIN Lin

(Institute of VLSI Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Digital type of compensator integrated in digital switched mode power supply(SMPS) controller can be implemented with more complicated control strategy to achieve high performance power management. Aiming at the large size problem of ordinary digital compensator, the digitalization of analog compensator of a Boost SMPS was analyzed. The design and optimization method of integrated digital compensator with nonlinear look up table was introduced, which was used to store the coefficient of the compensator. By the nonlinear look up table, the size was reduced and transient response was improved. The proposed architecture gains the features of small size, low power consumption, and it is easy to synthesis. The results based on field programmable gate array(FPGA) verification indicate that this compensator is suitable for digital SMPS.

Key words: digital switching power supply (SMPS) controller; digital compensator; nonlinear look up table; field programmable gate array (FPGA)

0 引言

由于数字开关电源具有灵活、可编程、易于配置复杂控制算法和时序等特点,并可实现即时通讯,近年来发展迅速。然而,传统的数字开关电源要利用数字信号处理器(DSP)作为数字开关电源的控制器,整机设计复杂,面积与功耗较大,尤其在便携式设备的市场占有率越来越大的今天其应用受到限制。随着半导体工艺的特征尺寸不断下降,将数字开关电源控制器集成到芯片中已经成为趋势^[1-3]。

本研究提出一种直流到直流升压开关电源(Boost)的数字补偿器。电源的开关频率为 500 kHz,采用电压模式补偿,为了完成整个数字控制器的功能,在系统测试电路中还配置了一个 7 位模数转换器(ADC)和一个 11 位的数字脉宽调制器(DPWM)。该控制器可以很方便地扩展应用到降压(Buck),交流转直流(AC-DC)等其他类型的电源系统中。

1 数字补偿器设计

传统的模拟开关电源控制器原理如图 1 所示。输

收稿日期:2010-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60906012)

作者简介:沈旭真(1983-),男,重庆彭水人,主要从事电源管理 IC 电路方面的研究. E-mail:shenxz@vlsi.zju.edu.cn

通信联系人:吴晓波,男,教授,博士生导师. E-mail:wuxb@vlsi.zju.edu.cn

出电压经过采样,然后由控制器内部的误差放大器进行处理,实现比例积分微分(PID)等补偿。经过补偿后,电压信号与斜坡信号进行比较完成脉宽调制,最后输出给开关元件作为驱动。由于误差放大器的结构限制,模拟控制器难以实现复杂的时序和控制方法。

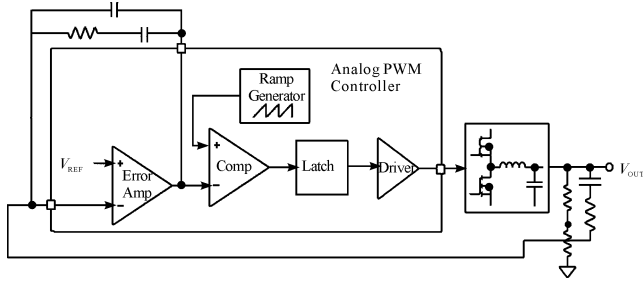


图1 模拟开关电源控制器

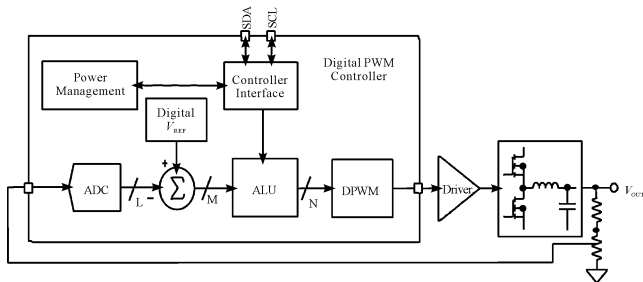


图2 数字开关电源控制器

数字开关电源控制器如图2所示。输出电压经过模数转换器(ADC)采样转换为数字电压量,数字补偿器对数字电压量进行计算处理,达到补偿效果。处理后的数字量输入到数字脉宽调制器(DPWM)以完成脉宽调制,最后输出给开关元件作为驱动。数字补偿器可以通过数字方法任意定制,配合自动化程度很高的数字前后端综合流程,因此数字开关电源控制器可以实现复杂的算法,甚至可以拥有自己的中央处理器(CPU)。

1.1 Boost 电路模型及数字补偿方法

Boost 电路拓扑如图3所示。利用状态空间平均法可得到的传递函数的波特图^[4]如图4所示。

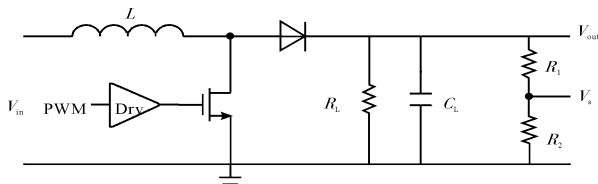


图3 Boost 电路

传递函数为:

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(1-D)V_o \left(1 - \frac{Ls}{(1-D)^2 R}\right)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1-D)^2} \quad (1)$$

通过传递函数式(1)可以看出 Boost 电路的相位

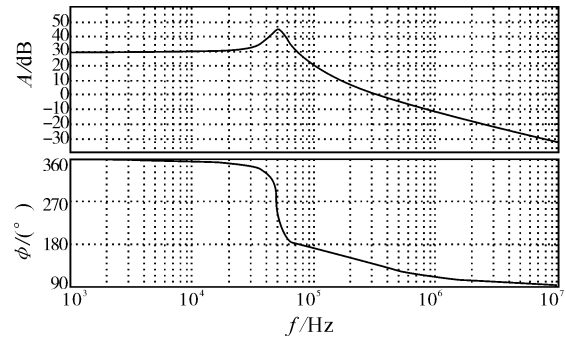


图4 传递函数波特图

裕度小于0,处于不稳定状态。为此要添加补偿器抬高环路传递函数的相位裕度。

根据经验,本研究采用如图5所示的系统补偿结构,其中 G 为Boost电路传递函数, C 为补偿函数, H 为反馈系数。求得补偿函数为:

$$\frac{\hat{d}(s)}{\hat{v}_{err}(s)} = K \frac{\left(1 + \frac{s}{z_1}\right) \left(1 + \frac{s}{z_2}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{p}\right)} \quad (2)$$

经过补偿后的系统传递函数对应的波特图如图6所示,可以看到系统稳定,相位裕度约为 45° 。

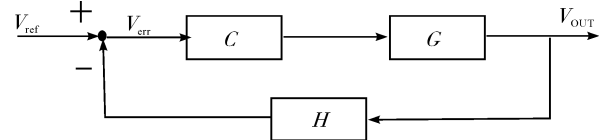


图5 系统补偿结构

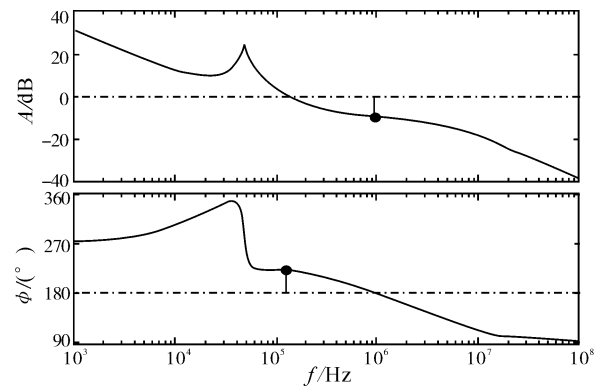


图6 经补偿的传递函数波特图

为了使补偿函数得以用数字电路实现,需要将式(2)从连续域转换到离散域。可采用零阶保持法^[5],采样频率与开关频率一致(为500 kHz),转换得到的传递函数为:

$$\frac{\hat{d}(z)}{\hat{v}_{err}(z)} = \frac{Az^2 - Bz + C}{z^2 - Ez + F} \quad (3)$$

然后将式(3)改写为差分方程:

$$d[n] = Av_{err}[n] - Bv_{err}[n-1] + Cv_{err}[n-2] +$$

$$Ed[n-1] - Fd[n-2] \quad (4)$$

从式(4)中可以看到输出占空比是如何经过输出电压计算得到的。

式中: $v_{\text{err}}[n]$, $v_{\text{err}}[n-1]$ 和 $v_{\text{err}}[n-2]$ —当前拍, 上一拍和上两拍时刻的误差电压值; $d[n]$, $d[n-1]$ —当前拍和上一拍的输出数字占空比。

要完成上式所示的数字计算, 必须配置乘法器, 这将带来较大的硬件和功率消耗。为此在不影响补偿性能的基础上, 对式(3)进行修改, 得到:

$$\frac{\hat{d}(z)}{\hat{v}_{\text{err}}(z)} = \frac{Az^2 - Bz + C}{z^2 - z} \quad (5)$$

$$d[n] = Av_{\text{err}}[n] - Bv_{\text{err}}[n-1] + Cv_{\text{err}}[n-2] + d[n-1] \quad (6)$$

从式(3)和式(5)的波特图比较可以看出, 两者只有很小的差别, 不会对系统性能带来太大影响。对于式(6), 就可以利用最简单的查找表进行配置, 从而减少硬件开销。

1.2 数字补偿器结构设计

本研究根据式(6)设计数字补偿器结构, 其中 v_o

$[n]$ 、 $v_o[n-1]$ 和 $v_o[n-2]$ 分别代表当前拍, 上一拍和上两拍时刻的采样电压值, $d[n]$ 和 $d[n-1]$ 分别代表当前拍和上一拍的输出数字占空比。由于式(6)中电压值会分别与系数 A 、 B 和 C 相乘, 为了省去乘法器, 该算术逻辑单元中采用了查找表(LUT)式结构, ADC 输出的数字电压值作为地址码, 而对应的电压值与系数的乘积作为该地址中存储的数值。按照传统查找表式结构设计, 若 ADC 输出为 N 位, 则需要 2^N 项查找表用以存储采样值查找的系数, 这会耗费较大的芯片面积。

对于直流开关电源, 控制器的目标是将其输出电压控制在某一固定的直流电压。数字控制器内部的 ADC 对电源的输出电压进行采样, 然后经过数字补偿器计算得到占空比, 当开关电源稳定时, 采样电压数值与参考电压数值相等。ADC 的采样精度决定了数字开关电源的稳态精度, 并且只需要在参考电压附近具有足够的精度^[6]。根据这一特点, 本研究在 ADC 输出端连接了一个非线性查找表(如图 7 所示), 用以寻址数字补偿器的各个参数, 在参考电压数值附近寻址密集, 远离参考电压处则寻址稀疏。该数字补偿器的结构如图 8 所示。

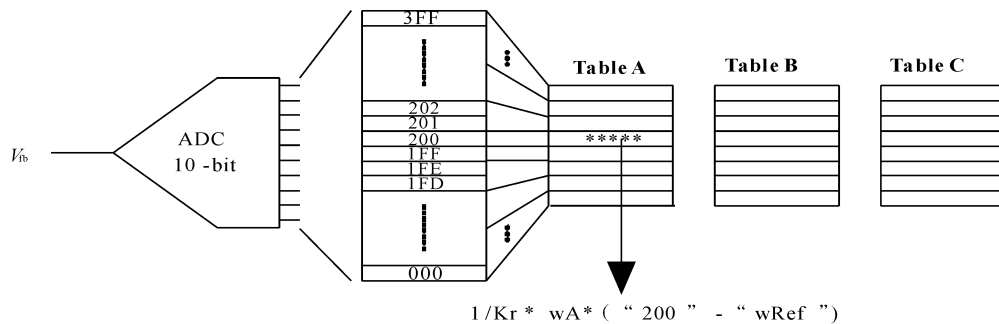


图 7 非线性寻址查找表

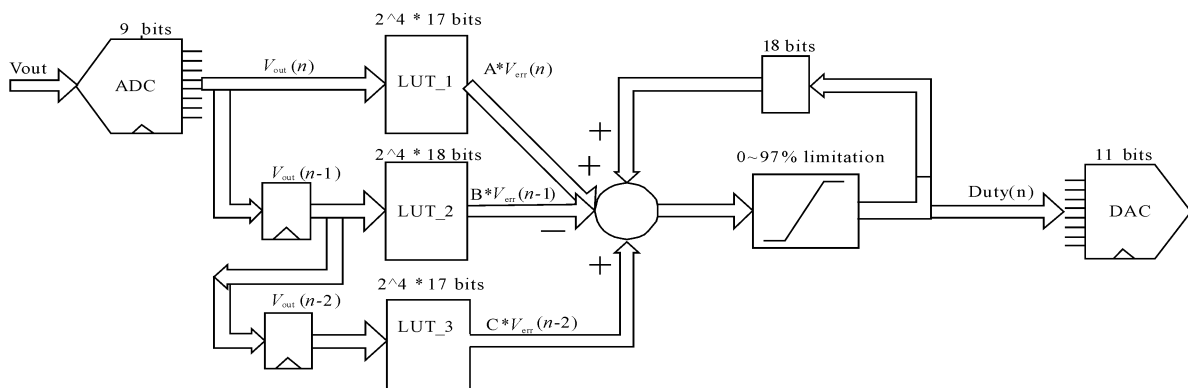


图 8 数字补偿器结构框图

2 系统测试结果

一个完整的数字开关电源控制系统用于验证该数

字补偿器设计, 电源电路参数如表 1 所示。对于控制器部分, ADC 选用了独立产品元件 AD9201, 数字补偿器和 DPWM 则是由 FPGA 编程综合实现的, 其中 DP-

WM 采用延迟线结构^[7-8]。为了避免极限环振荡^[9-10],在测试时笔者将 ADC 的有效位数取 7 位,而 DPWM 输出取 11 位。测试电路实物如图 9 所示。

表 1 Boost 电路参数

输入电压	5 V
输出电压	12 V
开关频率	500 kHz
电感	22 μ H
电容	100 μ F
输出电流	100 mA ~ 500 mA
ADC 采样位数	7-bit
DPWM 输出位数	11-bit

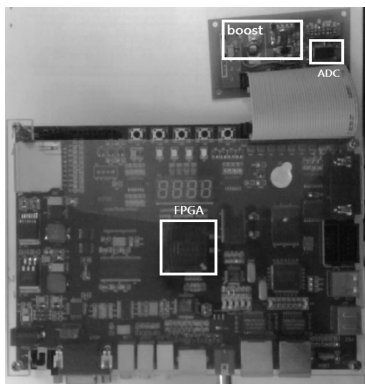


图 9 测试电路

Boost 电路稳态输出波形如图 10 所示,可以看到输出保持稳定在 11.4 V,纹波为 100 mV。

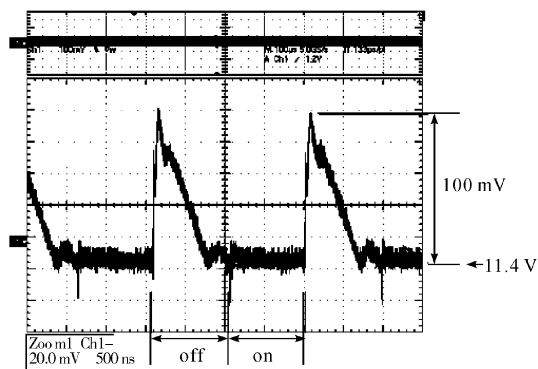


图 10 Boost 电路稳态响应波形(其中 $I_o = 500$ mA)

Boost 电路瞬态响应波形如图 11 所示,负载电流为 100 mA 和 500 mA 之间跳变。由于轻载时候电路变成断续模式,环路传递函数发生变化相位裕度减小,导致在轻载时有一定的振荡。

3 结束语

本研究以一个 Boost 型开关电源为控制目标,设计了一种数字型补偿器。该补偿器通过 verilog 代码实现,并配合 ADC 和 DPWM 模块完成了对 Boost 电路的控制,实现了基本的功能。基于非线性寻址查找表的数字补偿器具有面积小,功耗低的特点,控制方法也

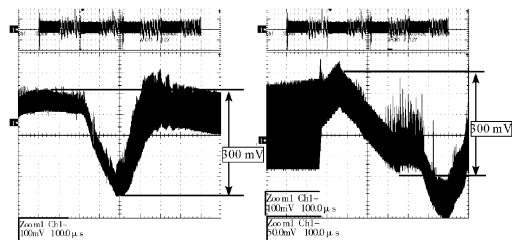


图 11 Boost 电路瞬态响应波形

相对简单。

由于整个控制器采用可综合语言设计,因此能够采用数字电路前后端综合流程完成设计验证到版图实现,能够缩短芯片开发时间。这也为实现更复杂的电源控制打下了基础。

接下来的工作将是在芯片上用数字流程实现数字补偿器设计,同时将 ADC 和 DPWM 部件集成到一起,完成一个完整的数字开关电源控制器。

参考文献 (References) :

- [1] Intersil Corporation. Digital Power Control Exceeds the Capability of Analog Control [M]. Intersil Corporation, 2008.
- [2] DANCY A P, CHANDRAKASAN A P. Ultra low power control circuits for PWM converters [C]//Proceeding of IEEE PESC Conference, 1997:21-28.
- [3] Silicon Laboratories, . Datasheet Si8250/1/2 Digital Power Controller[M]. Silicon Laboratories, 2005.
- [4] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [5] 高金源. 计算机控制系统-理论,设计与实现[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [6] TSO C H, WUE J C. An integrated digital PWM DC/DC converter[C]. ICECS, 2000.
- [7] PRODIC A, MAKSIMOVIC D, ERICSON R. Design and implementation of a digital PWM controller for a higfrequency switching DC-DC power converter[C]// IEEE IECON Conference, 2002:331-362.
- [8] WU A M, XIAO J, MARKOVIC D, et al. Digital PWM control: application in voltage regulation modules [C]//IEEE Power Electrical, Specialists Conference, 1999: 77-83.
- [9] PETERCHEV A V, AND SANDERS S R. Quantization resolution and limit cycling in digitally controlled PWM converters [C]//IEEE Power Electrical Specialists Conference, 2001:465-471.
- [10] PATELLA B J, PRODI A, ZIRGER A, et al. High-frequency digital PWM controller IC for DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1):438-446.

[编辑:张翔]