

电流型 PWM DC-DC 升压转换器的稳定性分析与实现

郑朝霞 邹雪城 邵轲 李阳

(华中科技大学集成电路设计中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 文章先对影响电流型 DC-DC 升压转换器电路的系统稳定性的因素进行分析, 然后在电路设计实现上提出了具体的改进办法: 在误差放大器模块增加频率补偿电路来消除放大器反馈环路可能存在的振荡现象; 采用斜坡补偿电路来增强反馈电流环路的稳定; 为了提高电压反馈环路的稳定性, 创新提出在芯片外部增加 COMP 管脚, 内部增加环路补偿电路; 输入管脚增加旁路电容以减少噪声; 输出管脚增加旁路电容以增强芯片反馈系统的稳定性; 通过采取这些措施, 保证了芯片电路的稳定性, 并极大的提高了输出电压的精度, 设计取得了很大成功。

关键词: 脉冲宽度调制, 电容寄生等效电阻, 斜坡补偿, 环路补偿

中图分类号: TN452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2006)06-229-04

An Analysis and Implementation on the Stability of Current Type PWM DC-DC Boost Converter

ZHENG Zhao-xia, ZOU Xue-cheng, SHAO Ke, LI Yang

(IC Design Center, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074 China)

Abstract: Based on the analysis of the principle of current type PWM DC-DC Boost converter and the factors which cause the circuit unstable, several methods have been developed to improve the circuit stability: miller compensation, slope compensation and loop compensation circuit as well as output bypass capacitor and Input bypass capacitor have been added for loop circuit stability. The whole DC-DC boost converter Hspice simulation result shows the output voltage has a high accuracy.

Key words: Pulse width modulation, ESR, Slope compensation, Loop compensation

1 引言

在电流型 DC-DC 升压芯片的设计中, 电路的稳定性是一个非常关键的指标, 它必须在比如输入电压、负载发生变化等各种不太稳定的情况下, 尽量保持一个恒定的输出电压, 用作其他应用电路的电源电压, 同时, 电路的稳定性又会影响电路的效率、功耗等其它重要指标。

本文的目标就是通过对升压转换器电路中存在的影 响电路稳定性的因素进行研究, 然后在电路的设计实现上, 除了采用一些传统的措施, 比如尽可能提高误差放大器的增益、尽可能提高基准电压的精度方法外, 还提出了其它的改进办法, 创新提出了增加 COMP 管脚并增加环路补偿电路, 来保证电压反馈环路的稳定, 最后设计的电路通过 Hspice 仿真, 在电源电压由 2.6V 到 5.5V 变化时, 转换器的线性调整率达到 0.02%/V; 在负载电流由 1mA 到 100mA 变化时, 其负载调整率为 -0.3%/mA,

输出电压的波动很小, 电路的稳定性非常好。

2 电流型 PWM 升压转换器原理分析

2.1 电路结构与工作原理

本文研究所涉及的双环电流型 PWM 升压转换器, 其电路框图如图 1 所示。主要由振荡器模块、基准电压产生电路、斜坡补偿电路、误差放大器、脉宽调制比较器、开关功率 NMOS 管及其控制和驱动电路等模块组成。另外, 还包括软启动模块和输入欠压保护等辅助电路。

其工作原理是, 在 1.2MHz 固定频率下, 通过两条反馈环路——系统的内环是一个良好的受控电流放大器, 把误差电流采样信号转变成电压信号和来自于斜坡补偿电路的斜坡电压叠加后输入到 PWM 比较器的同相输入端; 而外环则是把经过电阻网络分压的输出电压反馈到误差放大器, 与基准电压比较后产生误差电压, 后输入到 PWM 比较器的反相输入端。PWM 比较器的输出信号和其它一

收稿日期: 2005-09-01

些控制信号一起,在周期脉冲上控制功率管的开关状态,使输出电压保持稳定。

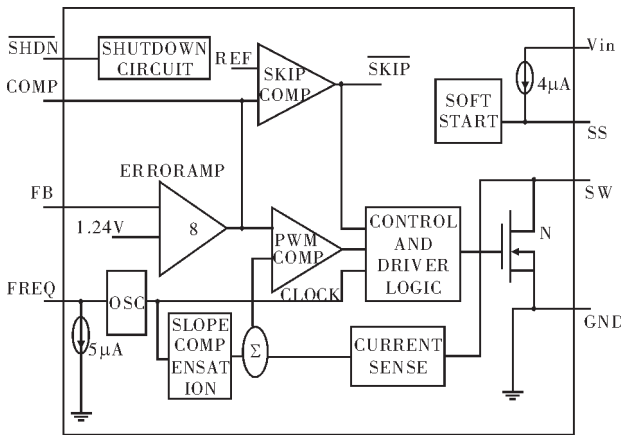


图1 电流型PWM DC-DC升压器框图

2.2 影响转换器稳定性的几个主要方面

电流型 DC-DC 升压转换器的稳定性是由误差放大器增益变化、反馈环路起振、取样电阻的容差、基准电压的精度、以及噪声干扰等因素决定的。误差放大器如果反馈过深,发生相移,使相位裕度小于 60°,电路就可能不能稳定工作,出现振荡现象;电源电压、温度的变化会使基准电压发生漂移,也会影响输出电压的稳定性。开关电源中的噪声干扰源很多,影响最大的噪声干扰源可归纳为:二极管的反向恢复时间引入的干扰;开关管工作时产生的谐波干扰;交流输入回路产生的干扰。当控制电路出现噪声时,由于控制环路增益较高,IC 的微小扰动 IC,将造成占空比 D 的变化量 D 很大。

判断 DC-DC 升压转换器的电路稳定性,有两个重要技术指标:线性调整率与负载调整率。线性调整率即输入电压大小变化对输出电压的影响程度,计算公式为 $\frac{V_o}{V_i V_{\alpha(NM)}} \times 100\%$, 这里 V_o 是输入电压变化引起的输出电压变化,一般来说,基准电压电源电压抑止比越高,该项指标性能就越好;负载调整率定义了输出负载大小变化对输出电压的影响程度,计算公式为 $\frac{V_o}{I_o V_{\alpha(NM)}} \times 100\%$, 这里 V_o 是输出负载变化引起的输出电压变化。一般来说,升压器直流开环增益越高,该项指标性能就越好。

3 提高稳定性的办法

3.1 电路内部采用的补偿方法

3.1.1 误差放大器增加频率补偿电路

该误差放大器是一个宽共模输入范围、高增益

的两级 BiCMOS 运放。从图 2 可以看出,第一级放大器采用折叠式共集——共基结构,具有输入阻抗大,差模输入电压及共模输入电压范围大,输出摆幅大,频率相应特性好等优点,但增益不是太高;第二级采用电流源作负载的共射极放大器,能够保证高的电压增益和高的输出阻抗;C3 和 R44 串联,加在输出级 Q30 的输入与输出之间,构成米勒补偿电路,用来保证系统的稳定性。

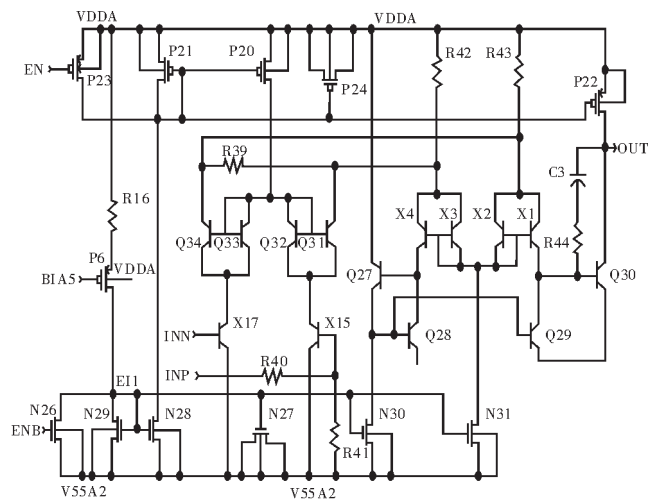


图2 误差放大电路图

对图 2 进行稳定性分析,可看出系统有五个极点:第一个极点 p_1 为输出端极点,由于负载电容可能很大,所以这个极点可能非常靠近原点。第二个极点 p_2 对应于第一级的输出,即 Q30 的基极,由于第一级的输出阻抗很大,所以这个极点也很靠近原点。第三个极点 p_3 对应于 X12 的集电极,是一个镜像极点,它与前两个相比,离原点远些。第四个极点 p_4 对应于 X12(X14) 的发射极,由于对地电阻很小,是一个高频极点,离原点最远。第五个极点 p_5 对应于 X17(X16) 的射极,由于该点对地的阻抗比较小,因此也是一个高频极点。

综上,电路有两个主极点,即第一级的输出端的极点 p_2 和电路的输出端极点 p_1 ,它们两个谁更靠近原点和负载电容大小有关。

由于补偿后的单位增益带宽不可能超过开环系统的第二极点的频率,所以如果采用在第一级输出节点和地之间加补偿电容的方式,则电路可达到的带宽被限制在一个较低的值,约为 p_1 。而且,要求主极点变为很小的值,这需要一个很大的补偿电容。于是我们采用密勒补偿方法,密勒补偿不仅可以用较小的电容实现两级间的极点向原点移动,而且使输出极点向离开原点的方向移动。同时,与单

纯的在级间节点与地之间连接一个补偿电容相比较,密勒补偿提供大得多的带宽。但单纯的在第一级输出与第二级输出间加一个电容的密勒补偿法,会引入一个右半平面的零点,其值约为 $z = g_{mQ30} / (C_{C3030} + C_C)$ 。这是由于 $C_{C3030} + C_C$ 形成从输入到输出的寄生信号通路。这个零点增加了相移,同时减缓了增益的下降,因而使增益交点 (gain crossover point) 外推,更远离原点,结果大大降低了稳定性。针对这种情况,我们采用另一种方法,增加一个与补偿电容串联的电阻,从而改善零点频率。增加串联电阻后,零点为:

$$z = \frac{1}{C3(g_{mQ30}^{-1} - R44)} \quad (1)$$

因此,如果 $R44 \geq g_{mQ30}^{-1}$, 则 $z \leq 0$ 。且可以把零点移到左半平面,以便消除第一个非主极点。这种情况发生的条件是:

$$\frac{1}{C3(g_{mQ30}^{-1} - R44)} = \frac{-g_{mQ30}}{C_L + C_{O1}} \quad (2)$$

其中 C_L 为负载电容, C_{O1} 为第一级输出端的对地电容。即:

$$R44 = \frac{C_L + C_{O1} + C3}{g_{mQ30} C3} = \frac{C_L + C3}{g_{mQ30} C3}$$

与此同时,电路的主极点 (-3dB 极点) 为:

$$\omega_{pdom1} = \frac{1}{R_{O1}[(1+g_{mQ30})(C3+C_{C3030})+C_{O1}]+R_L(C3+C_{C3030}+C_L)}$$

没有进行零点移动前,第一个非主极点为 $\omega_{pnondom1} = \frac{g_{mQ30}}{C_{O1}+C_L}$, 在零点抵消后,第一个非主极点为 $\omega_{pnondom1} = \frac{1}{(r_{dx12} // r_{OQ28}) C_{eq}}$ 这个极点频率比 $\omega_{pnondom1}$ 高得多。

图3是增加密勒补偿电路后误差放大器的增益与相位曲线图,从图上可以看出,增加密勒补偿

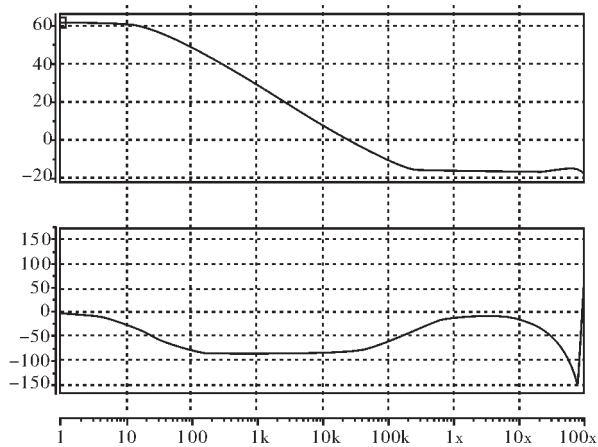


图3 误差放大器的增益与相位曲线

电路后误差放大器的相位裕度约为 90°, 足以保证系统的稳定。

3.1.2 斜坡补偿电路

在占空比大于 50% 时, 电流反馈环不稳定, 主要表现为: 扰动信号产生的误差被逐渐放大, 将导致系统失控, 电源的抗干扰性能差; 输出轻载或空载时电源失控。可以采用斜坡电流补偿技术, 使电流环的不稳定问题得到改善。同时, 由于占空比的使用范围增大, 提高了开关电源变压器的利用效率, 在输出相同功率时可使用体积更小的变压器, 提高电源小型化和轻量化。

图4是该种补偿方法的原理框图。通过斜坡补偿电路, 在电流反馈电压上叠加由振荡器振荡波形形成的斜坡补偿电压, 产生反馈电压输入到 PWM 比较器的一端, 与 PWM 比较器另一端的电压进行比较, 去控制电源的占空比。

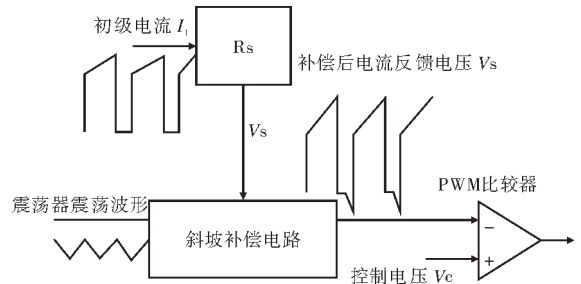


图4 在Vs处加斜坡补偿原理图

3.2 电路外部采用的补偿方法

3.2.1 环路补偿电路

电压反馈环路需要合适的补偿才能避免由电路不稳定引起的过大的电压波动和很低的效率。在 COMP 管脚和 GND 之间以串联方式连接一个电阻 R4 和一个电容 C4, 再连接一个电容 C5 就可以解决问题, 如图 5 所示。

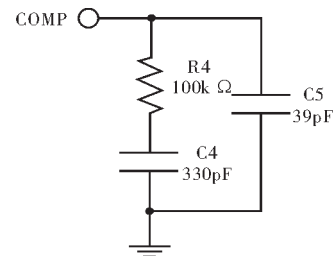


图5 电流型DC-DC升压转换器外部环路补偿电路

选择 R4 来设置高频积分增益是为了快速瞬态响应; 选择 C4 来设置积分零点是为了保持环路稳定; 第二个电容 C5, 是为了抵消由输出电容的 ESR 而引入的零点。为了达到性能最优化, 使用以下公

式来选择参数:

$$R4 = \frac{315 \times V_{IN} \times V_{OUT} \times C_{OUT}}{L \times I_{MAIN(MAX)}} \quad (3)$$

$$C4 = \frac{V_{OUT} \times C_{OUT}}{10 \times I_{MAIN(MAX)} \times R_{COMP}} \quad (4)$$

$$C5 = \frac{0.0036 \times R_{ESR} \times L \times I_{MAIN(MAX)}}{V_{IN} \times V_{OUT}} \quad (5)$$

对于陶瓷电容,其 ESR 很小。频率补偿正确性的最佳判断方法是对瞬态响应分析,调整 R4 和 C4 的值可获得最佳的瞬态性能。

3.2.2 输入管脚增加旁路电容

增加输入电容 C1 能减少输入端漏电流的峰值,并且能减少转换器的输入噪声。在典型的工作电路下,因为有高的源级阻抗(source impedance),故使用一个 10 μF 的陶瓷电容。足够大的 C1 可以保证 IN 端的低噪声。另外,如果输入端使用一个 RC 低通滤波器从 C1 中去耦合,C1 也能够承受更大的电压变化范围。

3.2.3 输出管脚增加旁路电容

在输出管脚 V_{OUT} 和 GND 之间连接一个电容,利用其输出电容的寄生等效电阻(ESR)来产生一个零点,从而抵消有极点引起的相移和增益下降。本芯片最后选择一个 2.2μF 的电容,确保在整个温度和输入电压范围内,空载和满载的情况下,整个系统无条件的稳定。大的电容有良好的瞬态特性,该电容可以无限制的增大;但是该电容的 ESR 应该小

于 3Ω,并且谐振频率在 1MHz 以上。

4 结束语

电流型 PWM DC-DC 升压转换器工作原理并不复杂,但是要设计一个高效率、高稳定性的转换器却存在相当大的难度,本文首先分析转换器的工作原理,明确了影响电路稳定性设计的关键因素,然后在具体实现电路上,既采用了传统的补偿电路,又提出了新的改进办法,增加一个 COMP 端,在电压反馈环路上引入环路补偿电路,在不增加电路复杂性的前提下,显著的提高了转换器输出电压的稳定性,并在仿真结果中得到了很好的验证。

参考文献

- [1] 毕查德·拉扎维. 陈贵灿等译. 模拟 CMOS 集成电路设计. 西安交通大学出版社, 2003: 113~120
- [2] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998: 56~250
- [3] C C Fang, E H Abed. Sampled-data modeling and analysis of closed-loop PWM DC-DC converters. IEEE ISCAS, 1999, 5: 110~115
- [4] Falin J ESR. Stability, and the LDO regulator [Z]. TI Company Inc, 2002

郑朝霞 女, (1975-), 博士研究生。研究方向为大规模数模混合集成电路设计。

(上接第 228 页)

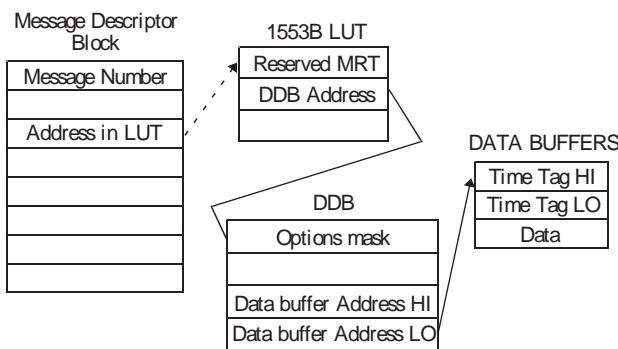


图 1 部分存储器结构图

5 结束语

由于采用了定长指令字格式,因此大大的简化了译码逻辑的设计,同时,为满足 1553B 实际应用中多路实时通信的要求,将寄存器进行分块设计,

使数据的传输、保存、校验等可以并行执行,提高了程序的性能,也增强了数据的可靠性。

参考文献

- [1] SBS Technologies Inc. An Interpretation of MIL-STD-1553B, 2002. 3
- [2] Western Avionics Ltd. MIL-STD-1553B Intelligent Interface Board User Manual. 2000. 4
- [3] 余少波, 王保柱. 新的工业控制总线-1553B 总线. 工业控制计算机, 1993, 3: 14~17
- [4] 曲英杰, 刘卫东, 战嘉瑾. 可重构密码协处理器指令系统的设计方法. 计算机工程与应用, 2004, 2: 10~13
- [5] 顾明剑, 殷德奎. 1553B 控制方法研究. 红外, 2004, 12: 21~27

刘建明 男, (1982-), 硕士研究生。研究方向为嵌入式系统。

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>