

# 直流开关降压电路提升负载动态响应方法研究

## Research on Dynamic Response Method of DC Switching Buck Circuit to Lift Load

王再岳 桂志明 董兆龙

Zaiyue Wang Zhiming Gui Zhaolong Dong

合肥联宝信息有限公司 中国·安徽 合肥 230031

Hefei Lianbao Information Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230031, China

**摘要:** 本研究针对开关降压电路在小型设备应用中遇到的瓶颈,即快速的动态负载变化要求在输出端增加足够容量的电容才能保证电源纹波符合设备规范,这对设备体积和成本都是很大的挑战,论文提出了创新的改善方案。

**Abstract:** This study aims at the bottleneck of switching buck circuit in small equipment application, that is, the rapid dynamic load change requires adding enough capacitance at the output to ensure that the power ripple meets the equipment specifications, which is a great challenge to the equipment size and cost. This paper puts forward innovative improvement schemes.

**关键词:** 开关降压电路; 动态响应; 创新方案

**Keywords:** switching buck circuit; dynamic response; innovative scheme

**DOI:** 10.12346/etr.v3i7.3940

## 1 引言

直流开关降压电路普遍被应用各种低压工作设备供电,如计算机中的中央处理器、芯片组、内存颗粒等,开关降压电路具有输出电流大,效率高,体积小等特点,特别适合高功率高性能小型设备,随着电子设备性能越来越强,其负载电流也越来越大,负载的动态变化越来越快速,这给开关电源的负载动态响应能力带来了很大的挑战。

## 2 研究背景

开关电源的负载动态响应分为两个部分:下冲(undershoot)响应和过冲(overshoot)响应,其中下冲发生在负载电流从低突然上升到高的瞬间,过冲发生在负载电流从高突然下降到低的瞬间(见图1)。

开关降压电路的输出级是由LC电路组成的,当负载电流突然由低变高时,输出电感的电流来不及变化,此时负载电流突然增加的部分先由输出电容提供,导致输出电压会产生瞬间跌落,形成下冲,当负载电流突然由高变低时,输出

电感的电流同样来不及变化,此时多余的电感电流会流入输出电容,导致输出电压瞬间抬高,形成过冲。

当下冲发生时,开关降压电路控制芯片检测到输出电压降低,会通过增大开关的占空比,迅速提升输出电感的电流来响应负载的电流变化,由于开关频率设计越来越高,控制芯片响应速度越来越快,因此下冲会被迅速调整,一般不容易超出设备的电压纹波规范,而当过冲发生时,开关降压电路控制芯片检测到输出电压升高,只能关闭开关脉冲,此时输出电感上多余的能量只能通过输出电容吸收,控制芯片没有有效的方法去抑制过冲电压,所以一般过冲电压很容易超出设备的电压纹波规范,而要解决过冲电压问题,当前的设计只能通过增加输出电容容量(数量)来解决,小型化设备由于空间的限制,输出都采用MLCC(陶瓷电容)或者MLCC加晶片电容的混合方案,这两种电容的容量都很难做得很大,只能通过不断增加输出电容的数量来提升输出电容的总容量,这一方面增加了成本,另一方面对小型化设备有限的空间提出了很大的挑战<sup>[1]</sup>。

【作者简介】王再岳(1970-),男,中国浙江湖州人,硕士,工程师,任职联宝科技研发副总经理、联宝科技企业技术中心副主任、边缘计算开发部负责人,从事半导体器件与微电子研究。

如图 2 可知, 当负载电流突然由高变低时, 由于电感电流不能突变, 电感电流和负载电流之间的差值会全部流入输入输出电容中, 因此会在输出电容上形成电压过冲, 过冲电压  $\Delta V = \Delta I^2 \times L_o / (2V_o \times C_o)$ , 其中  $\Delta I$  是电流的变化量,  $L_o$  是输出电感感量,  $V_o$  是输出电压值,  $C_o$  是输出电容总容量。由这个式子可以看出, 在电路参数确定情况下, 只能通过增大  $C_o$  来减小电压过冲  $\Delta V$ 。

### 3 创新解决方案研究与应用

从上面的分析可知, 开关降压电路过冲响应不佳主要是因为当过冲发生时, 控制芯片没有有效的方法来泄放电感中储存的多余能量, 所以我们需要设计一个泄放路径来将多余的能量泄放掉, 方法是在输出端连接一个开关泄放路径, 再设计一个比较电路, 将输出电压与基准电压作比较, 当输出电压高于基准电压时, 立即将开关打开, 多余的能量通过开

关泄放到地或更低的电压准位处<sup>[2]</sup>。

以上这个方法很容易想到, 但是这样做会有明显的缺点, 即开关电源转换效率降低: 过冲的能量都被放弃, 由于负载动态变化是频繁发生的, 每次动态变化产生的过冲能量都被放弃, 将会明显降低开关电源转换的效率。

本研究提出了一种简易能量回收电路, 在过冲发生时, 将过冲的能量储存起来并回收回到电源输入端, 实现了能量的循环使用。具体电路做法如图 3 所示。

图 3 中 U1 是一个比较器, 其同相输入端连接输出电压端, 反相输入端连接基准电压, 这个基准电压可以设置为比输出电压稍高的电压。例如,  $V_o + 20mV$ , U1 的输出端驱动泄放开关 Q3, Q3 串联一颗泄放电容  $C_s$ , 当输出电压因负载动态变化发生过冲时, U1 检测到过冲电压大于  $V_o + 20mV$ , 输出由低变高, 泄放开关 Q3 导通, 多余的能量会迅速泄放到电容  $C_s$  中, 在  $C_s$  电容上建立起电压  $V_s$ , 再

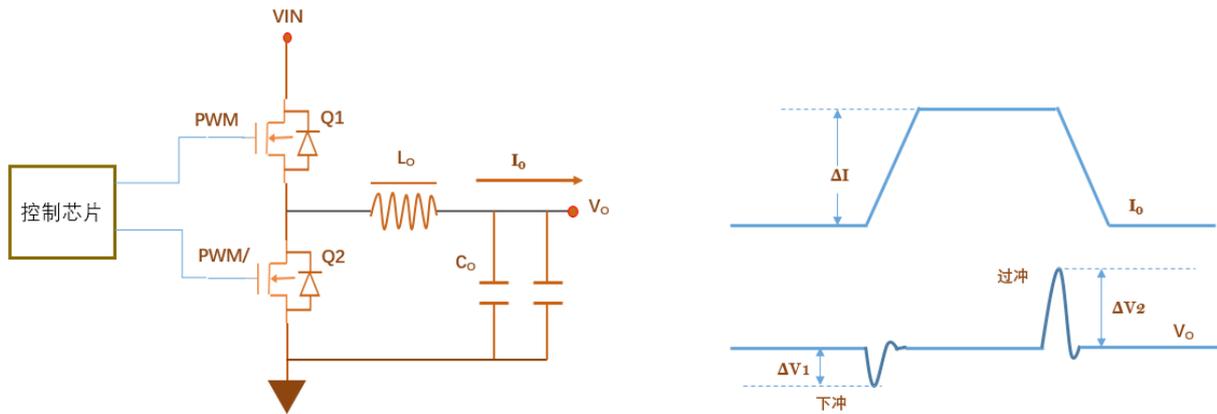


图 1 开关电源架构和负载动态响应示意图

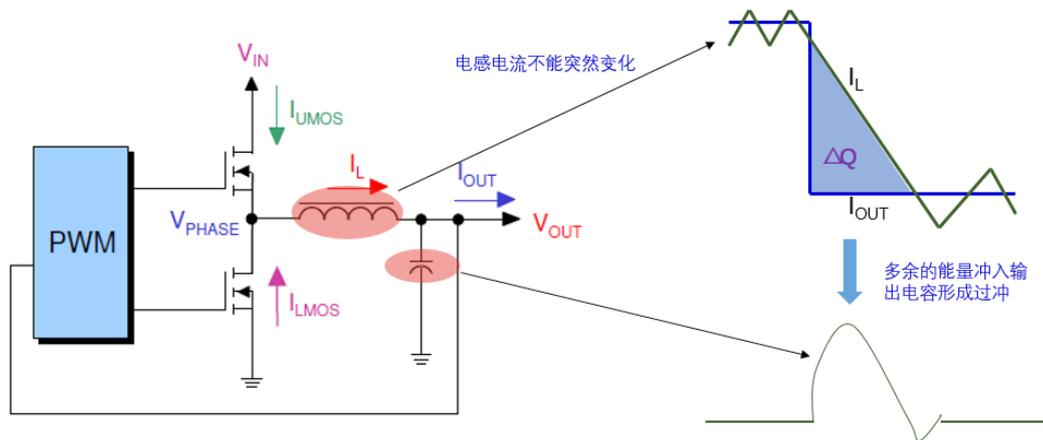


图 2 电压过冲产生示意图

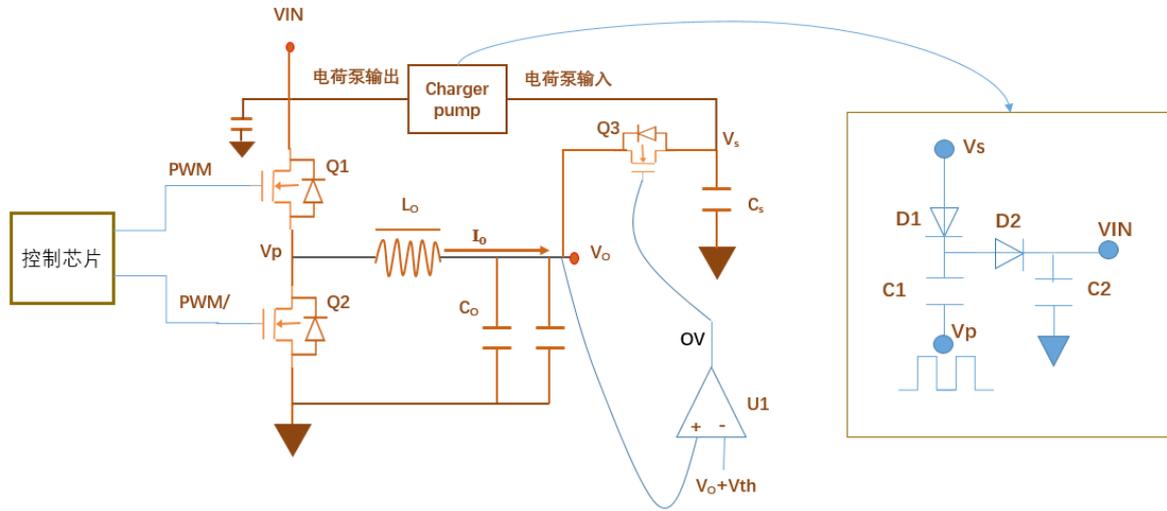


图 3 过冲电压消除并实现能量回收示意图

设计一个电荷泵线路，将  $V_s$  作为电荷泵的输入端，电荷泵将电压升高之后输出到开关电路的输入端  $V_{IN}$ ，由此，能量实现了回收<sup>[3]</sup>。

电荷泵电路结构简单，如图 3 所示，只需要两颗陶瓷电容和两颗二极管即可实现，然而电荷泵需要脉冲驱动信号才能实现电压的抬升，在我们这个电路里，恰好可以利用开关电路的开关节点信号，如图 3 中  $V_p$  点电压信号。由于  $V_p$  点电压是幅值为  $V_{in}$  的方波信号，且驱动能力特别强，把其当作电荷泵的脉冲驱动信号，电荷泵的输入电压是  $V_s$ ，因此电荷泵的输出电压等于  $V_{in}+V_s$ ，恰好高于  $V_{in}$ ，所以能够将能量传递回输入端，形成能量循环回收。

我们举一个例子来说明上述电路对消除过冲电压的效果：假设输出电压为 1.2V，输出电容为  $10 \times 22\mu F$ ，初始方案过冲电压为 100mV，则可知多余的能量  $Q=\Delta V \times C=0.1V \times 220\mu F=22\mu C$ ，若想将过冲电压降低为 50mV，则输出电容的容量需要增加到  $C=22\mu C/50mV=440\mu F$ ，相当于容量翻倍，输出电容需要从 10 颗增加到 20 颗。

如果使用新的方法，由于泄放电容  $C_s$  是完全空电荷状态，当泄放开关打开时，电容  $C_s$  上的电压从 0V 开始上升，假设上升到等于  $V_o=1.2V$ ，那么对于  $C_s$  来说其充入的

电荷  $Q=C_s \times \Delta V=C_s \times 1.2V$ ，要降低过冲电压到 50mV，只需吸收掉一半  $Q=22/2\mu C=11\mu C$ ，这个电荷被  $C_s$  吸收，只需  $C_s=Q/1.2V=11\mu C/1.2V=10\mu F$  就可以完全吸收掉。

由上计算可知，同样将过冲电压降低一半，新的方案新增的电容容量不到原来的 1/20，原方案需要增加 10 颗 22uF 电容，新方案只需 1 颗 10uF 就可达到同样效果。

#### 4 结语

本创新设计方案设计的利用导通泄放电容泄放能量，可以有效地降低开关降压电路负载动态变化引起的电压过冲，又巧妙地利用开关节点信号驱动电荷泵来将过冲能量回收至输入端，不仅解决了过冲问题，还保证了电源转换效率不受影响，同时还大幅降低了成本。

#### 参考文献

- [1] 张纯亚,何林,章治国.开关电源技术发展综述[J].微电子学, 2016(2):255-260+272.
- [2] 杨枫.开关电源的新技术及应用[J].电子世界,2019(23):159-160.
- [3] 李美芳.阻容降压型直流电源的设计与仿真[J].电子设计工程,2017(17):120-123.