



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107994771 B

(45)授权公告日 2019.06.11

(21)申请号 201711395057.6

审查员 王璐

(22)申请日 2017.12.21

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107994771 A

(43)申请公布日 2018.05.04

(73)专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 续丹 马光亮 王斌 张乐

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200

代理人 张弘

(51)Int.Cl.

H02M 3/156(2006.01)

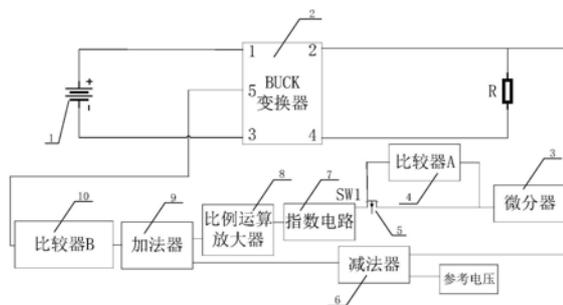
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件控制电路及控制方法

(57)摘要

一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件控制电路及控制方法,包括:直流电源、BUCK变换器、功率负载、参考电压模块、功率开关、加法器、减法器、微分器、指数电路、第一滞环比较器、第二滞环比较器和比例运算放大器;第二滞环比较器根据滑模面函数S计算值来决定高低电平输出:当S小于-h时,第二滞环比较器输出高电平,BUCK变换器中的功率开关导通;当S大于h时,第二滞环比较器输出低电平,BUCK变换器中的功率开关关断。本发明所产生的有益效果是:本发明BUCK直流变换器硬件控制电路结构简单,避免了控制器的使用与复杂编程,在提升系统可靠性的同时增加系统的经济性。



1. 一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,其特征在于,包括:直流电源、BUCK变换器、功率负载R、参考电压模块、功率开关SW1、加法器、减法器、微分器、指数电路、第一滞环比较器A、第二滞环比较器B和比例运算放大器;所述的直流电源输出端连接BUCK变换器第一接口,直流电源输入端连接BUCK变换器第三接口,BUCK变换器第二接口和第四接口分别连接功率负载R的输入端和输出端;功率负载R的输入端分别连接微分器输入端和减法器反相输入端;参考电压模块连接减法器同相输入端,减法器输出端连接加法器输入端;微分器输出端连接第一滞环比较器A的输入端和功率开关SW1的漏极,功率开关SW1的源极连接指数电路输入端,第一滞环比较器A的输出端连接功率开关SW1的栅极;指数电路输出端连接比例运算放大器输入端,比例运算放大器输出端连接加法器输入端;加法器输出端连接第二滞环比较器B的输入端,第二滞环比较器B的输出端连接BUCK变换器第五接口。

2. 根据权利要求1所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,其特征在于:所述的BUCK变换器由功率开关SW2、电感L、二极管D和电容C组成,功率开关SW2的漏极连接BUCK变换器第一接口,源极连接电感L和二极管D一端,电感L两端分别连接功率开关SW2源极、BUCK变换器第二接口,二极管D两端分别连接功率开关SW2源极、BUCK变换器第三接口,电容C两端分别连接第二、第四接口。

3. 根据权利要求1所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,其特征在于:加法器选用反相输入加法器,加法器后连接放大倍数为-1的比例运算放大器;比例运算放大器选用反相输入,比例运算放大器后连接放大倍数为-1的比例运算放大器。

4. 根据权利要求1所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,其特征在于:所述的指数电路包括对数电路和反对数电路;放大器A₁、晶体管T₁和放大器A₂、晶体管T₂构成具有温度补偿的对数电路,放大器A₃、晶体管T₃和放大器A₄、晶体管T₄构成具有温度补偿的反对数电路,进而对数电路和反对数电路整体构成指数电路。

5. 根据权利要求1所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,其特征在于:所述的功率开关SW1和功率开关SW2采用IGBT或场效应管。

6. 根据权利要求1所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,其特征在于:所述的指数电路为单相输入。

7. 根据权利要求1所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,其特征在于:所述的第一滞环比较器A根据输入端微分器输出值确定输出电平控制功率开关SW1导通与关断;所述的第二滞环比较器B根据输入端滑模面函数值确定输出电平控制功率开关SW2导通与关断。

8. 采用权利要求1至7中任意一项所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路的控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 直流变换器启动工作后,输出电压值与参考电压在减法器中进行比较,产生差值 x_1 ;对输出电压作微分运算,产生数值 x_2 ;

2) 微分器输出值 x_2 作为第一滞环比较器A的输入值,判断数值 x_2 的符号,若 x_2 为负,则功率开关SW1断开,避免以 x_2 为底数的指数运算;若 x_2 为正,则功率开关SW1导通,进行以 x_2 为底数的指数运算;

3) 调节指数电路参数实现以 p/q 为指数的指数运算,产生数值 $x_2^{\frac{p}{q}}$, p 和 q 均为正奇数且满

足 $p > q$;然后通过调节比例运算放大器参数对数值 $x_2^{\frac{p}{q}}$ 进行 $A^{\frac{p}{q}}$ 倍放大, $0 < A < 1$,与 x_1 相加产生滑模面函数值 S 来确定第二滞环比较器 B 的输出电平,进而控制功率开关 $SW2$ 以调节输出电压值。

9.根据权利要求8所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路的控制方法,其特征在于:当微分器输出值 x_2 小于 $-w$ 时,第一滞环比较器 A 输出低电平,功率开关关断并保持,直至 x_2 大于 w 进行切换;当 x_2 大于 w 时,第一滞环比较器 A 输出高电平,功率开关导通并保持,直至 x_2 小于 $-w$ 进行切换; w 为第一滞环比较器 A 正向过程的阈值电压, $-w$ 为负向过程的阈值电压。

10.根据权利要求8所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路的控制方法,其特征在于:当滑模面函数值 S 小于 $-h$ 时,第二滞环比较器 B 输出高电平,功率开关导通并保持,直至 S 大于 h 进行切换;当 S 大于 h 时,第二滞环比较器 B 输出低电平,功率开关关断并保持,直至 S 小于 $-h$ 进行切换; h 为第二滞环比较器 B 正向过程的阈值电压, $-h$ 为负向过程的阈值电压。

一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件控制电路及控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于直流变换器控制领域,涉及一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件控制电路及控制方法。

背景技术

[0002] 随着电子技术和计算机技术的发展,各种集成电路负载对DC-DC变换器供电模块的负载瞬态响应和稳态精度要求越来越高。负载突变将引起DC-DC变换器输出电压大幅波动,严重影响负载的工作品质,甚至导致负载无法正常工作,造成无可挽回的经济损失。另外输出电压大范围快速变化的燃料电池、太阳能电池等电源设备的输出不能直接满足负载要求的直流电压。因此,DC-DC变换器有着广阔的应用领域和良好的应用前景。

[0003] DC-DC变换器本质上是一个非线性时变系统,传统的线性控制器难以实现快速瞬态响应速度,需要采用非线性控制技术克服线性控制技术的不足。滑模控制以稳定性强、鲁棒性强、动态响应快速和执行简单等优点受到极大关注,但是目前为止,大多数滑模控制采用线性滑模面,系统对输出电压变化的瞬态响应不佳,不能在有限时间内达到收敛。为解决收敛问题,终端滑模控制采用的非线性滑模面函数有效缩短了收敛时间,但其面临的奇异问题需要另行设计新的滑模面进行克服。

[0004] 非奇异终端滑模控制策略可有效克服奇异问题带来的不利影响,但是其策略实现需要借助电压采集模块以及电流采集模块进行电压、电流采集,另外在对采集的信息处理后,不可避免的要以复杂编程的形式通过ARM控制器实现控制策略,这种通过软硬件结合实现控制策略的方式不仅需要进行繁琐的编程工作,而且硬件成本也会大大增加。目前还没有非奇异终端滑模策略能够实现纯硬件电路控制。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件控制电路及控制方法,并以纯硬件电路实现BUCK变换器的非奇异终端滑模控制。本发明的非奇异终端滑模硬件控制电路不仅能有效保证BUCK变换器的瞬态响应和稳态精度,还避免了电压、电流采集模块以及控制器的使用,在降低控制复杂性的同时,有效提高控制系统的经济性和可靠性。

[0006] 为实现上述功能,本发明提供的技术方案是:

[0007] 一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路,包括:直流电源、BUCK变换器、功率负载R、参考电压模块、功率开关SW1、加法器、减法器、微分器、指数电路、第一滞环比较器A、第二滞环比较器B和比例运算放大器;所述的直流电源输出端连接BUCK变换器第一接口,直流电源输入端连接BUCK变换器第三接口,BUCK变换器第二接口和第四接口分别连接功率负载R的输入端和输出端;功率负载R的输入端分别连接微分器输入端和减法器反相输入端;参考电压模块连接减法器同相输入端,减法器输出端连接加法器输入端;微分器输出端连接第一滞环比较器A的输入端和功率开关SW1的漏极,功率开关SW1的源极连接指数电路输入端,第一滞环比较器A的输出端连接功率开关SW1的栅极;指数电路输出端连接比例运算

放大器输入端,比例运算放大器输出端连接加法器输入端;加法器输出端连接第二滞环比较器B的输入端,第二滞环比较器B的输出端连接BUCK变换器第五接口。

[0008] 所述的BUCK变换器由功率开关SW2、电感L、二极管D和电容C组成,功率开关SW2的漏极连接BUCK变换器第一接口,源极连接电感L和二极管D一端,电感L两端分别连接功率开关SW2源极、BUCK变换器第二接口,二极管D两端分别连接功率开关SW2源极、BUCK变换器第三接口,电容C两端分别连接第二、第四接口。

[0009] 加法器选用反相输入加法器,加法器后连接放大倍数为-1的比例运算放大器;比例运算放大器选用反相输入,比例运算放大器后连接放大倍数为-1的比例运算放大器。

[0010] 所述的指数电路包括对数电路和反对数电路; A_1, T_1 和 A_2, T_2 构成具有温度补偿的对数电路, A_3, T_3 和 A_4, T_4 构成具有温度补偿的反对数电路,进而对数电路和反对数电路整体构成指数电路。

[0011] 所述的功率开关SW1和功率开关SW2采用IGBT或场效应管。

[0012] 所述的指数电路为单相输入。

[0013] 所述的第一滞环比较器A根据输入端微分器输出值确定输出电平控制功率开关SW1导通与关断;所述的第二滞环比较器B根据输入端滑模面函数值确定输出电平控制功率开关SW2导通与关断。

[0014] 采用所述的BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路的控制方法,包括以下步骤:

[0015] 1) 直流变换器启动工作后,输出电压值与参考电压在减法器中进行比较,产生差值 x_1 ;对输出电压作微分运算,产生数值 x_2 ;

[0016] 2) 微分器输出值 x_2 作为第一滞环比较器A的输入值,判断数值 x_2 的符号,若 x_2 为负,则功率开关SW1断开,避免以 x_2 为底数的指数运算;若 x_2 为正,则功率开关SW1导通,进行以 x_2 为底数的指数运算;

[0017] p

[0018] 3) 调节指数电路参数实现以 p/q 为指数的指数运算,产生数值 x_2^q , p 和 q 均为正奇数且满足 $p > q$;然后通过调节比例运算放大器参数对数值 $x_2^p q$ 进行 Aq^p 倍放大, $0 < A < 1$,与 x_1 相加产生滑模面函数值 S 来确定第二滞环比较器B的输出电平,进而控制功率开关SW2以调节输出电压值。

[0019] 作为本发明的进一步改进,当微分器输出值 x_2 小于 $-w$ 时,第一滞环比较器A输出低电平,功率开关关断并保持,直至 x_2 大于 w 进行切换;当 x_2 大于 w 时,第一滞环比较器A输出高电平,功率开关导通并保持,直至 x_2 小于 $-w$ 进行切换; w 为第一滞环比较器A正向过程的阈值电压, $-w$ 为负向过程的阈值电压。

[0020] 作为本发明的进一步改进,当滑模面函数值 S 小于 $-h$ 时,第二滞环比较器B输出高电平,功率开关导通并保持,直至 S 大于 h 进行切换;当 S 大于 h 时,第二滞环比较器B输出低电平,功率开关关断并保持,直至 S 小于 $-h$ 进行切换; h 为第二滞环比较器B正向过程的阈值电压, $-h$ 为负向过程的阈值电压。

[0021] 相对于现有技术,本发明所产生的有益效果是:

[0022] 本发明的非奇异终端滑模硬件控制电路由BUCK变换器、参考电压模块、加法器、减法器、微分器、指数电路、第一滞环比较器A、第二滞环比较器B和比例运算放大器等元件组成,其中BUCK变换器的特征在于通过控制功率开关实现降压作用,参考电压模块的特征在

于提供期望输出电压值,加法器的特征在于实现放大器输入值相加,减法器的特征在于实现放大器输入值相减,微分器的特征在于实现输入的微分变换;指数电路的特征在于实现输入的指数运算;滞环比较器的特征在于提高电压比较器的抗干扰能力,降低开关切换频率;比例运算放大器的特征在于对输入进行有限倍数放大。以纯硬件电路实现BUCK变换器的非奇异终端滑模控制。该电路利用纯硬件电路实现控制策略,不仅能有效保证BUCK变换器的瞬态响应和稳态精度,有效降低系统硬件成本;还避免了电压、电流采集模块以及控制器的使用,在降低控制复杂性的同时,有效提高控制系统的经济性和可靠性。

[0023] 非奇异终端滑模硬件电路所采用的控制方法能够对系统变化产生快速的瞬态响应,在有限时间内使系统达到收敛,并且稳态精度可以得到有效的保证。利用纯硬件电路实现控制策略,避免了电压采集模块、电流采集模块以及控制器的使用,有效降低了系统硬件成本;控制通过硬件电路实现,解决了繁琐的编程问题,进而降低了控制的复杂性,提高了系统的经济性和可靠性。

[0024] 进一步,针对微分器输出值,基于传统非奇异终端滑模函数定义新的切换滑模面函数,避免指数电路的双相输入,指数硬件电路得以实现。

附图说明

[0025] 图1是本发明实施例的控制结构原理图;

[0026] 图2是本发明实施例的BUCK变换器;

[0027] 图3是本发明实施例的电路结构,其中(a)为微分器电路结构、(b)为减法器电路结构、(c)为比例运算放大器电路结构、(d)为加法器电路结构和(e)为滞环比较器电路结构。

[0028] 图4是本发明实施例的指数电路;

[0029] 图5是本发明实施例的指数电路输入值仿真图;

[0030] 图6是本发明实施例的功率负载端输出电压仿真图。

具体实施方式

[0031] 下面结合附图对本发明作进一步说明,实施例用于说明本发明而不限本发明的范围,部分元件、模块及参数可根据具体使用情况作相应匹配调整。例如:实施例中选用的加法器和比例运算放大器可采用同相输入或反相输入,参考电压模块的具体数值可根据要求的输出电压进行相应调整。

[0032] 本实施例描述了一种BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件控制电路及控制方法,具体控制结构如图1所示,系统由直流电源1、BUCK变换器2、功率负载R、参考电压模块、功率开关(SW1)5、加法器9、减法器6、微分器3、指数电路7、第一滞环比较器(比较器A)4、第二滞环比较器(比较器B)10和比例运算放大器8组成。直流电源1的输出端连接BUCK变换器2的第一接口1,直流电源1的输入端连接BUCK变换器2的第三接口3,BUCK变换器2的第二接口2和第四接口4分别连接功率负载R的输入端和输出端;功率负载R的输入端分别连接微分器3的输入端和减法器6的反相输入端,参考电压模块连接减法器6的同相输入端,减法器6的输出端连接加法器9的输入端;微分器3的输出端连接第一滞环比较器(比较器A)4的输入端和功率开关(SW1)5的漏极,功率开关(SW1)5的源极连接指数电路7的输入端,第一滞环比较器(比较器A)4的输出端连接功率开关(SW1)5的栅极,根据输出电平高低控制功率开关(SW1)5的

导通与关断；指数电路7的输出端连接比例运算放大器8的输入端，比例运算放大器8的输出端连接加法器9的输入端；加法器9的输出端连接第二滞环比较器（比较器B）10的输入端，第二滞环比较器（比较器B）10的输出端连接BUCK变换器2的第五接口5，根据输出电平高低控制功率开关（SW2）的导通与关断。

[0033] 本实施例的BUCK变换器如图2所示，BUCK变换器由功率开关SW2、电感L、二极管D和电容C组成，功率开关SW2的漏极连接第一接口，源极连接电感L和二极管D一端，电感L两端分别连接功率开关SW2源极、第二接口，二极管D两端分别连接功率开关SW2源极、第三接口，电容C两端分别连接第二、第四接口；其中，直流电源1接左侧，功率负载R接右侧，通过控制功率开关（SW2）实现左侧到右侧的降压输出。

[0034] 本实施例的微分器、减法器、比例运算放大器、加法器和滞环比较器如图3所示，因同相输入加法电路需要进行复杂的电阻配平，其设计与调整不如反相输入加法电路方便，故加法器9选用反相输入加法器，具体实施中，加法器后连接放大倍数为-1的比例运算放大器以达到同相输入加法器效果；同样，考虑到反相输入比例放大器配平简单，比例运算放大器8选用反相输入，具体实施中，比例运算放大器8后连接放大倍数为-1的比例运算放大器以达到同相放大的效果。

[0035] 本实施例的指数电路如图4所示，该电路主要由对数放大电路、反对数放大电路及温度补偿电路组成。该电路利用半导体PN结的指数型伏安特性实现指数运算，其输出与半导体PN结的热电压 U_T 和反向饱和电流 I_S 有关，而 U_T 和 I_S 都是温度的函数，电路运算精度受温度影响较大，所以需要加入温度补偿电路。图4中，将晶体管 T_1 接入放大器 A_1 的反馈支路构成基本的对数运算电路，将晶体管 T_2 接入放大器 A_2 的反馈支路，选择晶体管 T_1 和 T_2 参数对称，利用两管特性的一致性，消除电流 I_S 的影响； R_5 选用具有正的温度系数的热敏电阻，可补偿温度对 U_T 的影响；将 T_4 接入放大器 A_4 的反相输入端构成基本的反对数运算电路，同对数运算电路一样，为了消除温度对运算精度的影响也要进行温度补偿，有关方面的物理解释是相似的，不再赘述。通过电阻参数调整，实现底数为 x_2 指数为 p/q 的指数运算。

[0036] 一种采用BUCK变换器的非奇异终端滑模硬件电路的控制方法，包括以下步骤：

[0037] 1) 直流变换器启动工作后，输出电压值与参考电压在减法器中进行比较，产生差值 x_1 ；对输出电压作微分运算，产生数值 x_2 ；

[0038] 2) 微分器输出值 x_2 作为第一滞环比较器（比较器A）的输入值，判断数值 x_2 的符号，若 x_2 为负，则功率开关SW1断开，避免以 x_2 为底数的指数运算；若 x_2 为正，则功率开关SW1导通，进行以 x_2 为底数的指数运算；参考图5，该步操作实现了指数运算的单相输入；

[0039] 3) 调节指数电路参数实现以 p/q 为指数的指数运算，产生数值 $x_2^{\frac{p}{q}}$ （ p 和 q 均为正奇数且满足 $p > q$ ）；然后通过调节比例运算放大器参数对数值 $x_2^{\frac{p}{q}}$ 进行 $A^{\frac{p}{q}}$ 倍放大（ $0 < A < 1$ ），与 x_1 相加产生滑模面函数值 S 来确定第二滞环比较器（比较器B）的输出电平，进而控制功率开关SW2以调节输出电压值；参考图6，输出电压最终趋近于参考电压值。

[0040] 控制方法具体是：针对微分器输出值，基于传统非奇异终端滑模函数定义新的切换滑模面函数，避免指数电路的双相输入，指数硬件电路得以实现。

[0041] 当微分器输出值 x_2 小于 $-w$ 时，第一滞环比较器A输出低电平，功率开关关断并保持，直至 x_2 大于 w 进行切换；当 x_2 大于 w 时，第一滞环比较器A输出高电平，功率开关导通并保

持,直至 x_2 小于 $-w$ 进行切换。

[0042] 当滑模面函数值 S 小于 $-h$ 时,第二滞环比较器 B 输出高电平,功率开关导通并保持,直至 S 大于 h 进行切换;当 S 大于 h 时,第二滞环比较器 B 输出低电平,功率开关关断并保持,直至 S 小于 $-h$ 进行切换。

[0043] 以上实施例只为体现本发明的技术构思与特点,并非用于限定本发明的保护范围,例如功率开关可采用IGBT或其他场效应管代替,凡在本发明的精神和原则内做等同替换或修饰,均涵盖在本发明保护范围内。

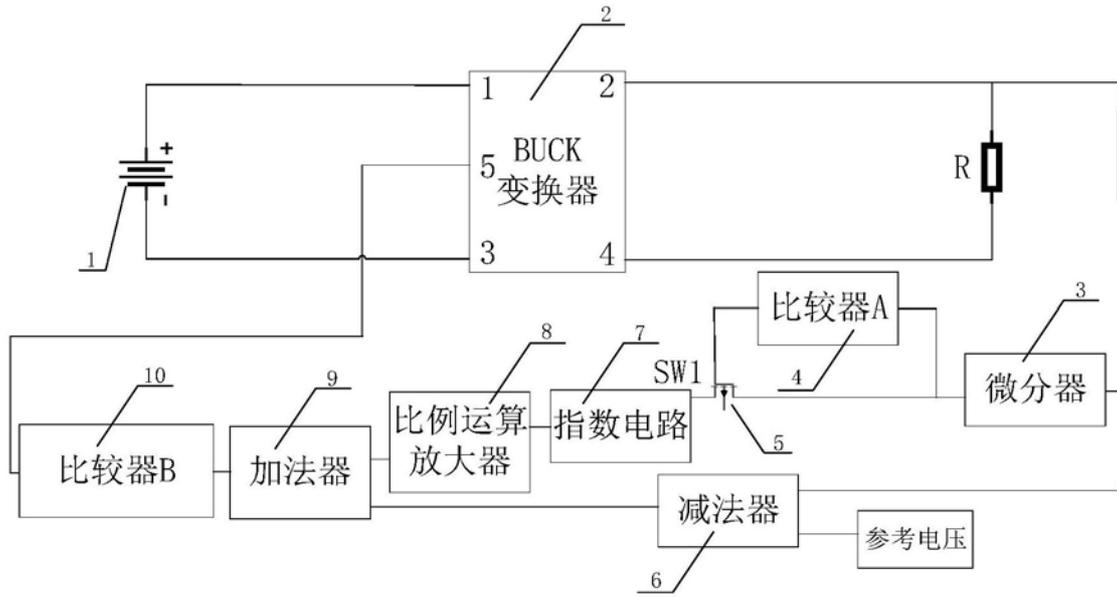


图1

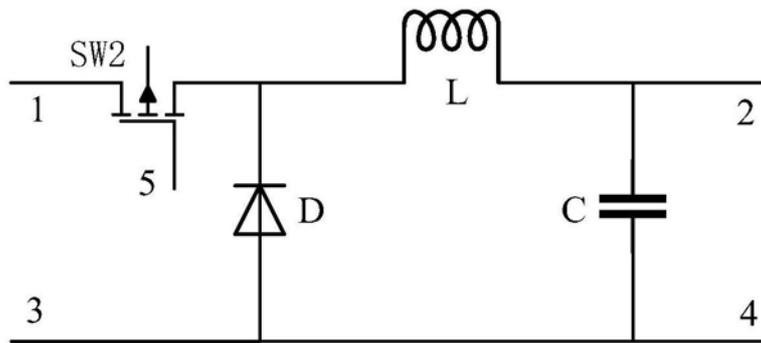


图2

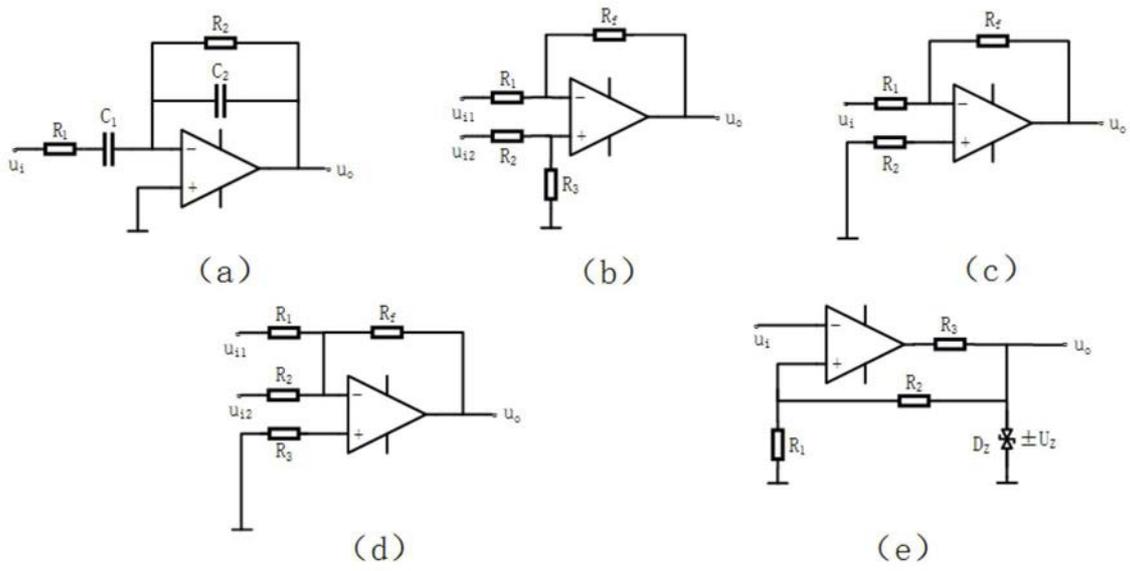


图3

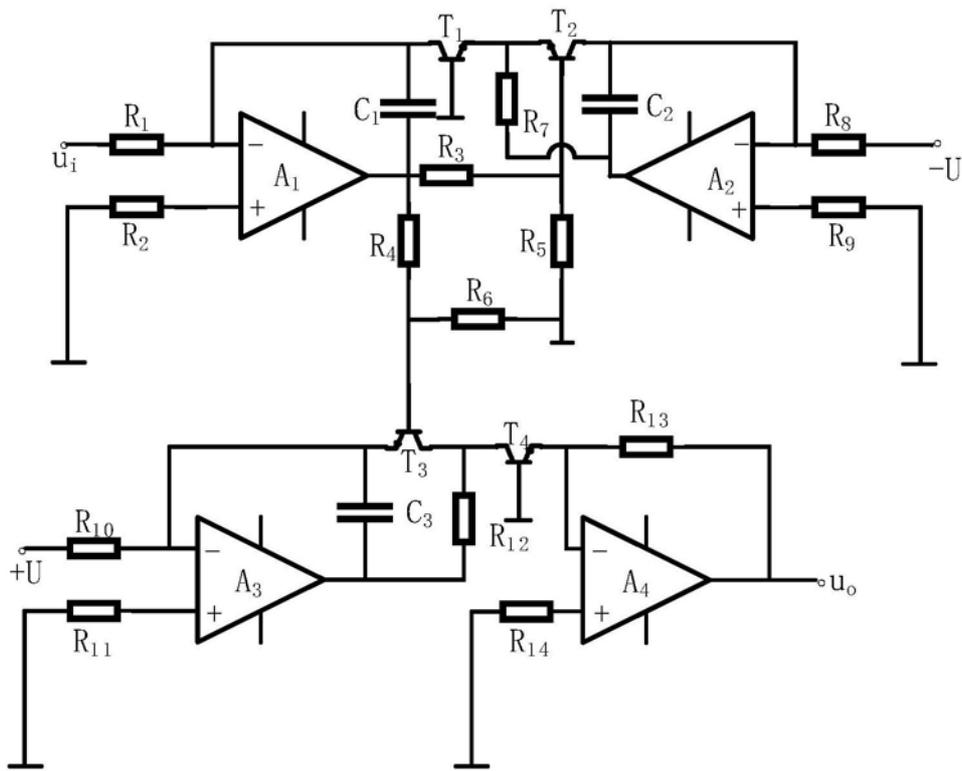


图4

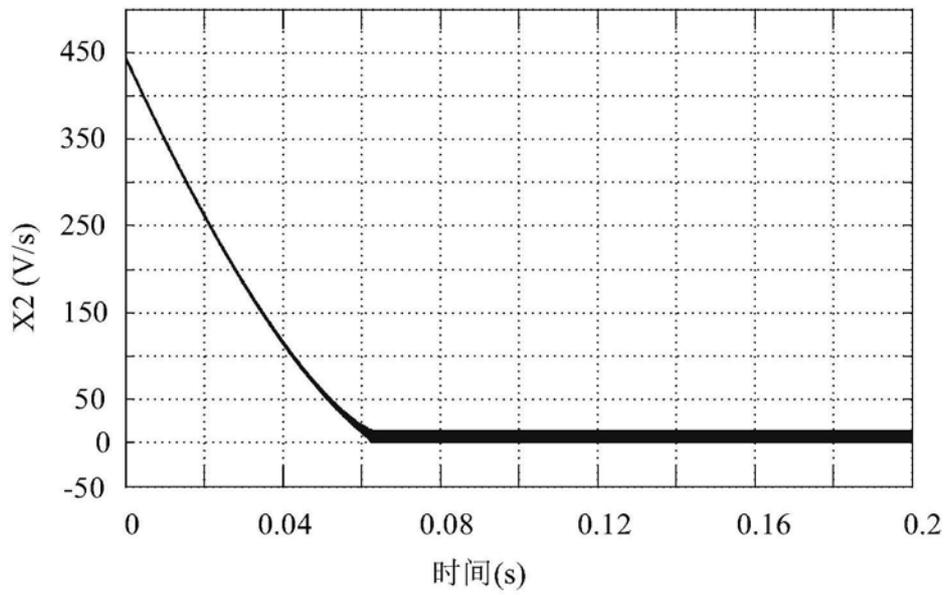


图5

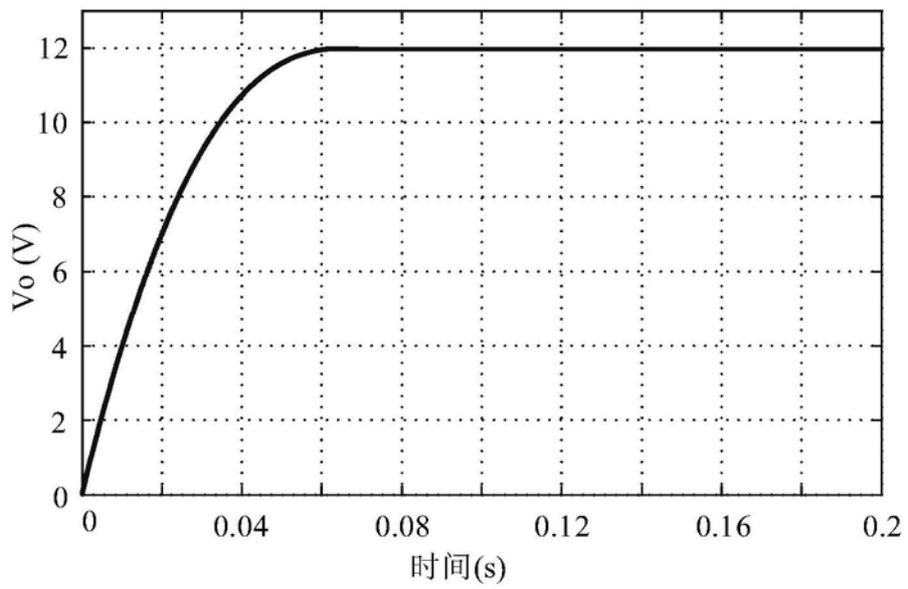


图6