

Buck型功率变换器无抖振滑模控制器设计

马莉 王常青 丁世宏 赵德安

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对传统比例积分微分(PID)控制方法运用于直流 Buck 变换器时, 在干扰较大的情况下, 很难取得满意的控制效果问题, 利用二阶滑模控制技术, 提出了一种无抖振的滑模控制方法, 以改善大扰动条件下 Buck 变换器的鲁棒性。将占空比变量的导数看作虚拟控制器, 设计非连续的二阶滑模控制器; 实际控制器则为非连续控制器的积分, 从而避免了控制器的抖振。在此基础上, 采用 PWM 定频控制方式将该算法运用在 Buck 电路上。通过和 PID 控制算法进行仿真和实验对比, 验证了该滑模控制器的可靠性与优越性。结果表明: 系统启动时间缩短了近 50%; 当突变负载和输入电压改变时, 系统输出电压变化幅度明显减小。

关键词: Buck 变换器; 二阶滑模控制; 定频控制

中图分类号: TM46; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0388-07

Design of Chattering-free Sliding Mode Controller for Buck Converters

Ma Li Wang Changqing Ding Shihong Zhao Dean

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Under the traditional proportional integral differential (PID) controllers, it is usually not easy to obtain a satisfactory control performance for Buck converters subject to large disturbances. Aiming at this problem, a chattering-free control method based on the second order sliding mode control was proposed to improve the robustness of the Buck converters. Firstly, the average state-space model of Buck converter was established and the design of the chattering-free sliding mode controller was associated with controlling the output voltage of the Buck converter by selecting an appropriate sliding mode surface. The control design was accomplished by designing a discontinuous second order sliding mode controller where the derivative of the duty ratio was regarded as a virtual controller. The actual controller was the integration of the discontinuous second-order sliding mode controller, and thus the chattering problem can be avoided. On this basis, taking a direct discretization on the proposed algorithm by using Euler method, the chattering-free sliding mode controller can be implemented by the way of fixed-frequency PWM control technique based on a LabVIEW platform. Finally, the reliability and superiority of the chattering-free sliding mode controller were verified by comparing PID controller through simulation and experimentation. It can be shown that: the system startup time can be shortened by nearly 50%; the variation range of system output voltage is significantly reduced under the conditions of load perturbation and input voltage change.

Key words: Buck converter; second order sliding mode control; fixed-frequency control

收稿日期: 2015-10-11 修回日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203054、61573170、31571571)、中国博士后科学基金项目(2015M571687)、江苏省高校优势学科建设工程项目(苏政办发[2011]6号)和复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室开放基金项目(MCCSE2014A01)

作者简介: 马莉(1982—), 女, 副教授, 主要从事随机系统理论、开关电源研究, E-mail: mali@mail. ujs. edu. cn

通信作者: 丁世宏(1983—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事非线性系统控制、DC-DC 变换器研究, E-mail: dsh@mail. ujs. edu. cn

引言

近年来,Buck 型功率变换器被广泛运用到各类直流降压场合,如电动汽车、LED 照明技术^[1]、直流电机^[2]、新能源发电^[3]、工业仪器仪表和军事航天等领域。PID 控制方法由于控制简单、易于掌握等优点常被用于各种电路的控制中。但 PID 控制系统参数往往需要大量的实验及寻优才能找出参考值。功率变换器内部具有复杂性和时变性,同时存在较大外部干扰,这对动态响应速度和控制精度等提出了更高要求。文献[4]通过建立 Buck 变换器系统稳定性与 PID 参数之间的函数关系,采用遗传算法进行参数优化,改善了系统的控制效果,但是需要以建立精确的数学模型为基础,难以在实际工程中实现。文献[5]首先建立了分数阶降压变换器的数学模型,然后利用自身优化算法应用于分数阶 PID 控制器的设计,提高了直流变换器系统的稳定性,但该方法没有考虑一些非线性因素的影响。

功率变换器输入电压突增突降、负载突变等大扰动情况下,传统 PID 控制方法难以满足实际控制需求。为了改善系统的控制性能,各种非线性控制算法已经在功率变换器控制中得以应用。这些新算法主要包括模糊控制^[6-7]、神经网络控制^[8-9]、自适应控制^[10-11]以及滑模控制^[12-13]等。例如,文献[14]运用自适应控制,通过在线辨识并调整控制器参数,降低了闭环系统的稳态误差,改善了系统的动态性能。文献[15]基于模糊逻辑控制技术设计了模糊控制器,使系统能很好地适应非线性因素引起的扰动情况。

滑模控制器可以使得闭环系统具有鲁棒性强、收敛速度快等优点,因而在功率变换器的控制设计中被广泛采用。文献[16]提出了一种自适应终端滑模控制策略,提高了系统跟踪控制的速度和精度,理论上可以使得误差在有限时间内收敛到零。文献[17]通过分析滑动模态区与滑模系数和 Buck 变换器电路参数的关系,结合功率变换器的瞬态电压变化范围,提出一种滑模系数的设计方法。普通滑模控制具有较好的鲁棒性,但控制器的非连续性导致系统产生抖振,使输出信号的跟踪效果受到影响,甚至会影响系统的稳定性。另外,切换频率过高也使控制器难以实现。二阶滑模控制技术作为普通滑模控制的推广,除了可以获得良好的鲁棒性和瞬态特性,还能够消除传统滑模控制中广泛存在的抖振问题。此外,二阶滑模控制算法作为高阶滑模算法的特殊情形,具有有限时间收敛、设计相对简单等优点,受到广大学者的关注。目前,二阶滑模控制算法

已经被应用到众多领域,如机器人控制^[18]、同步电机控制^[19]等。

基于以上考虑,本文采用二阶滑模控制理论,针对 Buck 变换器控制系统,设计一种无抖振的滑模控制器,以增强系统的鲁棒性,加快系统跟踪性能,并通过仿真和实验进行验证。

1 问题描述

Buck 电路基本结构如图 1 所示。

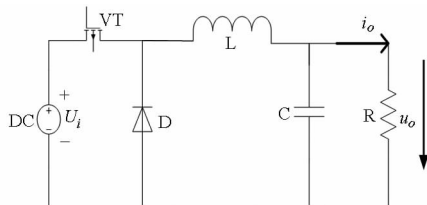


图 1 Buck 变换器原理图

Fig. 1 Principle diagram of Buck converter

图中,DC 为直流电压源,VT 为开关管,D 为二极管,L 为电感器,C 为电容器,R 为负载电阻, i_o 为负载电流, u_o 为负载电压, U_i 为电源电压。

Buck 电路的工作方式可以分为 2 种模式:

(1)当开关管 VT 处于闭合状态时,二极管 D 截止,电容器 C 处于充电状态。根据基尔霍夫电压定律有

$$L \frac{di_L}{dt} = U_i - u_o \tag{1}$$

式中 L ——电感器 L 的电感

i_L ——电感电流

(2)当开关管 VT 处于断开状态时,二极管 D 续流,与电容器 C、电感器 L 构成放电回路。此时满足关系

$$L \frac{di_L}{dt} = -u_o \tag{2}$$

合并一个周期 2 种状态(式(1)、(2))可得

$$L \frac{di_L}{dt} = \alpha(U_i - u_o) + (1 - \alpha)(-u_o) = U_i \alpha - u_o \tag{3}$$

式中 α ——开关管导通时间 t 与周期 T 的比值

同理,根据基尔霍夫电流定律还可以得到

$$C \frac{du_o}{dt} = i_L - \frac{u_o}{R} \tag{4}$$

式中 C ——电容器 C 的电容

整理式(3)、(4),结合电容两端电压等于输出电压得到其状态空间表达式^[20]

$$\begin{bmatrix} \frac{du_c}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{CR} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{U_i}{L} \end{bmatrix} \alpha \tag{5}$$

式中 u_c ——电容两端电压

Buck 型功率变换器系统(式(5))事实上包含了一些不确定性因素,主要有输入电压的变化、负载的突变等。这些不确定因素会使功率变换器性能恶化,降低了输出信号的动态和稳态品质。

本文控制目标为:在大扰动工况条件下,包括启动、负载突变和输入电压突变等,利用二阶滑模控制理论设计无抖振的滑模控制器,以提高 Buck 变换器的电压跟踪性能。

2 控制器设计

2.1 二阶滑模分析

考虑非线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{x}=f(t,x)+g(t,x)u \\ s=s(t,x) \end{cases} \tag{6}$$

式中 x ——系统的状态变量, $x \in \mathbf{R}^n$

u ——系统的控制输入, $u \in \mathbf{R}$

$s(t,x)$ ——输出函数,称为滑模量

$f(t,x)$ 、 $g(t,x)$ ——不确定光滑函数

假设函数是 $s(t,x)$ 有 r 阶导数,则由式(6)定义的集合

$$s(t,x)=\dot{s}(t,x)\cdots=s^{r-1}(t,x)=0 \tag{7}$$

称为在 Filippov 意义局部可积条件下的 r 阶滑模集,系统满足式(7)的相关运动则称为 r 阶滑模。因此,假设滑动变量具有相对阶 2,通过非连续二阶滑模控制器 u ,使得滑动变量 s 、 $\dot{s}$ 在有限时间内达到稳定,保证有 $s=\dot{s}=0$,则为二阶滑模控制。一般来说,滑动变量 s 的二阶导数显含控制输入信号 u ,且满足

$$\ddot{s}=a(t,x)+b(t,x)u \tag{8}$$

式中, $a(t,x)=\ddot{s}|_{u=0}$ 、 $b(t,x)=\partial\ddot{s}/\partial u$ 为不确定项。

一般情况下,不确定项满足如下假设:存在非负常数 $\overline{a}>0$ 和 $\underline{b}>0$,使得条件

$$\begin{cases} |a(t,x)|\leqslant\overline{a} \\ b(t,x)\geqslant\underline{b} \end{cases} \tag{9}$$

成立。

在上述假设前提下,定义

$$\begin{cases} \gamma_1=1 \\ \gamma_2=\gamma_1+\tau \\ \gamma_3=\gamma_2+\tau \end{cases} \tag{10}$$

式中 τ 属于区间 $(-1/2,0)$ 的有理数, $\tau=\frac{-\tau_1}{\tau_2}$,且

τ_1 是偶数, τ_2 是奇数,则有:

引理^[21]: 针对非线性控制系统式(6),若二阶滑模控制器设计为

$$u=-\beta_2\left[\sigma\left(\dot{s}^{\frac{1}{\gamma_2}}+\beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}}\sigma(s)\right)\right]^{\gamma_3}-\frac{\overline{a}}{\underline{b}}\text{sign}\left(\dot{s}^{\frac{1}{\gamma_2}}+\beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}}\sigma(s)\right) \tag{11}$$

式中饱和函数 $\sigma(x)$ 定义为

$$\sigma(x)=\begin{cases} \varepsilon\text{sign}(x) & (|x|>\varepsilon) \\ x & (|x|\leqslant\varepsilon) \end{cases} \quad (\forall \varepsilon>0) \tag{12}$$

以及

$$\begin{cases} \beta_1>1 \\ \beta_2>\max(c_1,c_2) \end{cases} \tag{13}$$

$$c_1=\frac{\gamma_2}{\underline{b}}\beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}}(1+\beta_1)^{2-\frac{1}{\gamma_2}} \tag{14}$$

$$c_2=\frac{2^{\frac{-4\tau}{1+\tau}}\left(\frac{1-\tau}{\beta_1}\right)^{\frac{1-\tau}{1+\tau}}+2^{-\tau}\beta_1^{\frac{1}{1+\tau}}+(1-\tau)\beta_1^{\frac{3-\tau^2}{1-\tau^2}}}{\underline{b}} \tag{15}$$

则滑动变量 s 、 $\dot{s}$ 在有限时间内稳定。

2.2 BUCK 变换器的无抖振滑模控制器设计

设计二阶滑模控制器,首先要确定适当的滑模面函数 $s(x)$ 。设输出电压偏差为 $x_1=u_c-U_{\text{ref}}$, U_{ref} 为参考输出电压,结合式(5),对 x_1 求导得到电压偏差变化率 x_2 ,即

$$x_2=\dot{x}_1=-\frac{1}{CR}u_c+\frac{1}{C}i_L \tag{16}$$

再对 x_2 求导,得

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}\left(\frac{di_L}{dt}-\frac{1}{R}\frac{du_c}{dt}\right)= \\ &= -\frac{1}{LC}x_1-\frac{1}{LC}x_2+\frac{U_i}{LC}\alpha-\frac{1}{LC}U_{\text{ref}} \end{aligned} \tag{17}$$

设计滑模面函数 $s=x_1+x_2$,则若能将 s 控制到零,则必然有 $x_1=0$,即 $u_c=U_{\text{ref}}$ 。

结合式(16)、(17),有

$$\begin{aligned} \dot{s} &= x_2+\dot{x}_2= \\ &= -\frac{1}{LC}x_1+\left(1-\frac{1}{RC}\right)x_2+\frac{U_i}{LC}\alpha-\frac{1}{LC}U_{\text{ref}} \end{aligned} \tag{18}$$

对式(18)继续求导可得

$$\begin{aligned} \ddot{s} &= \frac{1}{LC}\left(\frac{1}{RC}-1\right)x_1+\left[\frac{1}{RC}\left(\frac{1}{RC}-1\right)-\frac{1}{LC}\right]x_2+ \\ &= \left(1-\frac{1}{RC}\right)\left(\frac{U_i}{LC}\alpha-\frac{U_{\text{ref}}}{LC}\right)+\frac{U_i}{LC}\dot{\alpha} \end{aligned} \tag{19}$$

令

$$\begin{aligned} a(t,x) &= \frac{1}{LC}\left(\frac{1}{RC}-1\right)x_1+\left[\frac{1}{RC}\left(\frac{1}{RC}-1\right)-\frac{1}{LC}\right]x_2+ \\ &= \left(1-\frac{1}{RC}\right)\left(\frac{U_i}{LC}\alpha-\frac{U_{\text{ref}}}{LC}\right) \end{aligned} \tag{20}$$

$$b(t,x)=\frac{U_i}{LC} \tag{21}$$

则式(19)可以改写为式(8)的形式。

由式(20)、(21)及 x_1 、 x_2 的定义可知 $a(t, x)$ 和 $b(t, x)$ 中所有变量或参数都为有界量, 因此 $a(t, x)$ 、 $b(t, x)$ 满足式(9)的常数限定条件。根据引理 1 可以设计控制器为

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} = & -\beta_2 \left[\sigma \left(\dot{s}^{\frac{1}{\gamma_2}} + \beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}} \sigma(s) \right) \right]^{\gamma_3} - \\ & \frac{\bar{a}}{\bar{b}} \operatorname{sign} \left(\dot{s}^{\frac{1}{\gamma_2}} + \beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}} \sigma(s) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

则实际控制器为

$$\begin{aligned} \alpha = & -\beta_2 \int \left[\sigma \left(\dot{s}^{\frac{1}{\gamma_2}} + \beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}} \sigma(s) \right) \right]^{\gamma_3} dt - \\ & \int \frac{\bar{a}}{\bar{b}} \operatorname{sign} \left(\dot{s}^{\frac{1}{\gamma_2}} + \beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}} \sigma(s) \right) dt \end{aligned} \quad (23)$$

对控制器进行离散化处理:

根据前面 Buck 变换器的电路分析, 采用欧拉后向差分法, 用差商来近似代替导数, 可以得到离散的电压偏差为 $e(k) = u_o(k) - U_{\text{ref}}$ 。则电压偏差率可以表示为

$$de(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{t_s} \quad (24)$$

式中 t_s ——采样周期

对 $de(k)$ 求导得

$$d(de(k)) = \frac{de(k) - de(k-1)}{t_s} \quad (25)$$

则离散化的滑模面函数可表示为

$$\begin{cases} s(k) = e(k) + de(k) \\ ds(k) = de(k) + d(de(k)) \end{cases} \quad (26)$$

综上, 离散化的二阶滑模控制器为

$$\begin{cases} d\alpha(k) = -\beta_2 \left[\sigma \left(ds(k)^{\frac{1}{\gamma_2}} + \beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}} \sigma(s(k)) \right) \right]^{\gamma_3} - \\ \quad \frac{\bar{a}}{\bar{b}} \operatorname{sign} \left(ds(k)^{\frac{1}{\gamma_2}} + \beta_1^{\frac{1}{\gamma_2}} \sigma(s(k)) \right) \\ \alpha(k) = \alpha(k-1) + d\alpha(k) t_s \end{cases} \quad (27)$$

3 仿真及分析

为了验证设计的控制算法可行性, 根据 Buck 变换器的数学模型和相关算法, 在 Matlab 2014a 中的 Simulink 环境下进行仿真, 并和传统 PID 控制算法对比研究。

设定输入电压为 18 V, 期望输出电压为 12 V, 仿真采用离散模式, 采样周期 0.01 ms。由条件式(12)~(15), 仿真参数设定 $\varepsilon = 1$, $\tau = -2/7$, $\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = 5/7$, $\gamma_3 = 3/7$, $\beta_1 = 1.2$, $\beta_2 = 5$ 。令比例系数 $k_p = 5$, 积分系数 $k_i = 3.5$, 微分系数 $k_d = 1$ 。

图 2 是输出电压在启动阶段的仿真波形。图中蓝色虚线表示 PID 控制器作用下的输出电压波形, 黑色实线表示二阶滑模控制器作用下的输出电压波形, 用 SOSM 标记。相比 PID 控制器而言, 二阶滑模

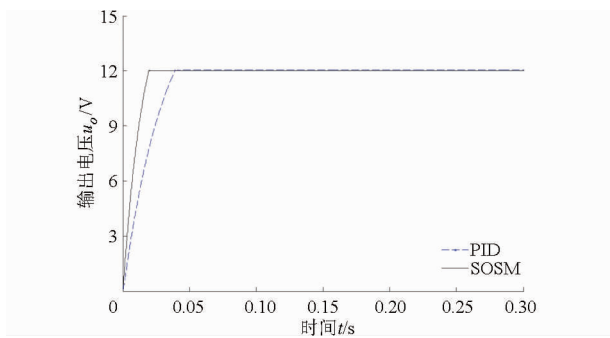


图 2 系统启动时输出电压仿真波形
Fig. 2 Simulation waveform of output voltage when system starts

控制器的调节时间较短。

为了验证二阶滑模控制具有较好的稳定性, 设计了 2 种扰动, 图 3 是负载电阻由 110 Ω 突变到 50 Ω 时的输出电压仿真波形, 图 4 是输入电压由 18 V 变化到 24 V 时的输出电压仿真波形。由图 3 和图 4 的仿真结果可知, 滑模控制器与 PID 控制相比, 具有更强的抗扰动性能。

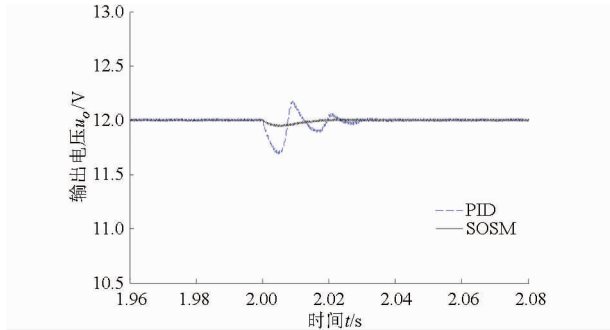


图 3 系统负载突变时输出电压仿真波形
Fig. 3 Simulation waveform of output voltage when load changes

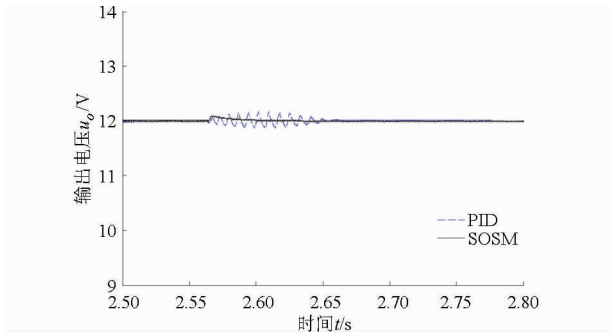


图 4 系统输入电压改变时输出电压仿真波形
Fig. 4 Simulation waveform of output voltage when inputting voltage changes

此外, 参数 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 值由取值在区间 $(-1/2, 0)$ 的有理数 τ 决定, τ 对控制器的性能会产生影响。图 5 表示当负载变化时不同 τ 值下滑模控制器对系统输出电压的影响。可知当 τ 在有效区间中取值越小, 二阶滑模控制器的非光滑性越强, 抗扰动性能也越好, 但过小也会使非连续性增强, 恢复时间延长。

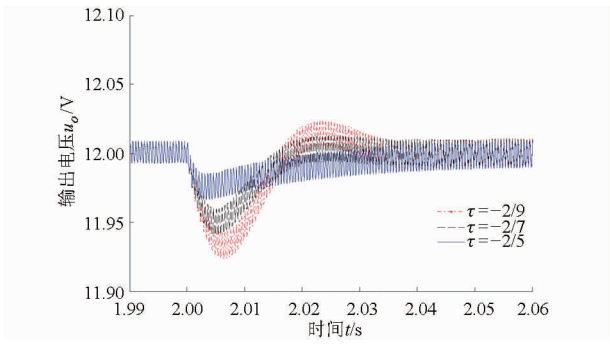


图 5 控制器参数 τ 取不同值时的输出电压仿真波形
Fig. 5 Simulation waveform of output voltage under controller with different τ

4 实验与结果分析

4.1 实验平台搭建

实验平台的底层电路主体部分是典型的 Buck 变换器电路。采用的控制开关管是美国 IR 公司的 NMOS 管 IRF630。Buck 电路的驱动方法主要有光耦法、伏地法、变压器法、自举法。本文采用美国 IR 公司 IR2110 自举芯片设计驱动电路,利用 IR2110 的引脚 HIN 抬高门极电压,使得 IRF630 满足开通条件。与其他方法相比,自举法具有频率要求低、反应灵敏、后续电路设计简单等优点;缺点是电路设计成本高,并不适宜输入电压较高的应用场合。PWM 发生电路采用由 TI 德州仪器公司生产的 DC-DC 集成控制器芯片 TL494。此芯片可通过电阻 R_T 、电容 C_T 来调节频率,计算公式为 $f=1.1/(C_T R_T)$,实验取 $R_T=51\text{ k}\Omega$, $C_T=1\text{ 000 pF}$,产生固定频率为 21.57 kHz 的锯齿波。Feedback (FB) 引脚与数据采集卡输出引脚相连,根据 FB 输入引脚的电压,将数据采集卡输出信号与锯齿波信号比较,输出频率不变,占空比不同的 PWM 方波。实验平台采用阿尔泰公司 PCIE9554 型数据采集卡,通过负载电阻并联 2 个高精度电阻实现分压采集输出电压信号。负载电阻经过分压电压采集电压,从而保证输出电压在数据采集卡电压采集范围内。图 6 是实验平台实物图,硬件电路图如图 7 所示。

图 8 为 Buck 变换器定频实验平台的总体设计思路:实时采集 Buck 电路的输出电压 $u_o(t)$,经过 LabVIEW 开发板自带模块进行 A/D 转换,在经过数据处理得到离散电压偏差 $e(k)$;基于 LabVIEW 开发平台,利用第 2 节所给结论设计滑模控制器或 PID 控制器;控制器根据离散电压偏差得到控制量 $\alpha(k)$;底层硬件电路依据所给控制量 α 得到频率不变、占空比变化的 PWM 方波,最终实现控制 Buck 变换器的目的。

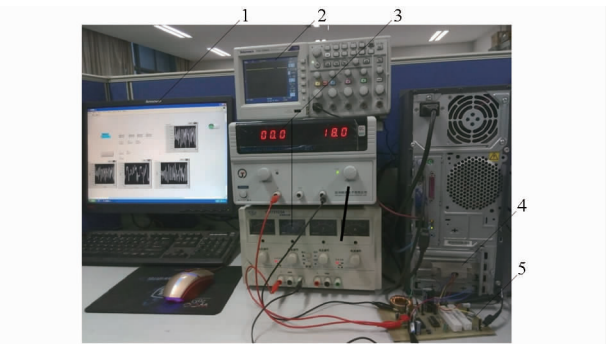


图 6 Buck 变换器实验平台实物图
Fig. 6 Figure of experimental platform for Buck converter
1. LabVIEW 软件 2. 示波器 3. 直流电源 4. 数据采集卡
5. 降压变换器

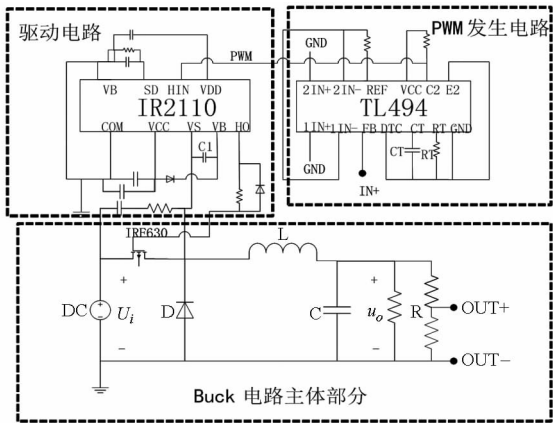


图 7 底层电路原理图
Fig. 7 Schematic of hardware

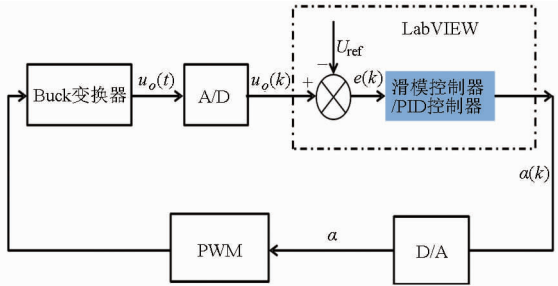


图 8 Buck 变换器实验平台总体设计框图
Fig. 8 Block diagram of Buck converter experimental platform

4.2 实验结果

设定 Buck 电路中电感 L 为 330 μH ,电容 C 为 1 000 pF,负载电阻 R 为 110 Ω , $k_p=0.2$, $k_i=2$, $k_d=1$,采样周期 $t_s=0.001\text{ s}$,再令 $\beta_1=1.2$, $\varepsilon=1$, $\tau=-2/5$ 。经计算有: $\beta_2=10$, $\gamma_2=3/5$, $\gamma_3=1/5$, $\bar{a}/\bar{b}=1.1$,根据式(27),有

$$\begin{cases} d\alpha(k) = -10[\sigma(ds(k)^{\frac{5}{3}} + \beta_1^{\frac{5}{3}}\sigma(s(k)))]^{\frac{1}{5}} - \\ \quad 1.1\text{sign}(ds(k)^{\frac{5}{3}} + \beta_1^{\frac{5}{3}}\sigma(s(k))) \\ \alpha(k) = \alpha(k-1) + 0.001d\alpha(k) \end{cases} \quad (28)$$

在二阶滑模控制器和 PID 控制器的作用下,得

到 Buck 变换器输出电压的实验结果如图 9 所示。其中,图 9a 是 Buck 电路分别在 PID 和二阶滑模控制器作用下启动时的输出电压波形。2 种控制器的控制目标为输出电压为 12 V。通过对比可以看到,在稳态误差相差不大的条件下,二阶滑模控制器的启动时间比 PID 控制器的启动时间短。图 9b 反映了在 2 种控制器的控制下负载由 110 Ω 突变到 50 Ω

时的输出电压波形。图 9c 则反映了在 2 种控制器的控制下输入电压由 18 V 变化到 24 V 时的输出电压波形。PID 控制器有明显的瞬态电压变化,而二阶滑模控制器的输出电压变化相对很小。由此可见,相对于 PID 控制算法来说,二阶滑模控制算法的抗扰动性能较好。

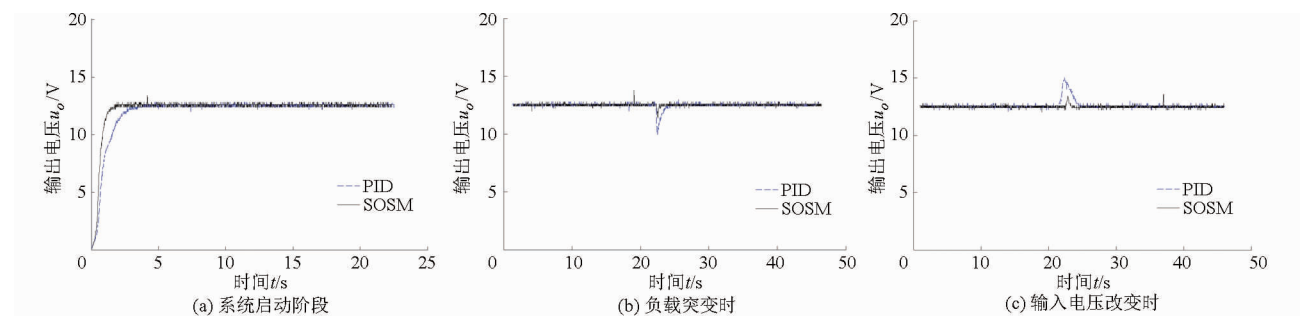


图 9 PID 控制与二阶滑模控制的输出电压波形

Fig. 9 Waveform of output voltage with PID controller and second order slide mode controller

5 结束语

针对 Buck 变换器,首先建立数学模型,通过选取适当的滑动变量,使得 Buck 变换器的跟踪控制问题转换为二阶滑模控制设计问题。其次,利用二阶滑模控制理论设计了无抖振滑模控制算法,并对最终算法进行离散化处理。在保证闭环系统不降低鲁棒性的前提下,消除了传统一阶滑模中普遍存在的

抖振问题,理论上实现了有限时间跟踪。在控制方式上,采用 PWM 定频控制方式进行数字化实现。通过仿真与实验实现了与 PID 控制算法的对比。结果表明,相比传统 PID 控制器,滑模控制算法使系统的启动调节时间缩短了近一倍;在突变负载和输入电压改变时,滑模控制器使得输出电压变化幅度明显减小;证明了二阶滑模控制算法相比于传统的 PID 控制算法具有鲁棒性强,动态响应快的优点。

参 考 文 献

- CHEN Y, NAN Y R, KONG Q G. A loss-adaptiveself-oscillating Buck converter for LED driving[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4321 – 4328.
- 李文琢,房建成,李海涛. 基于 Buck 变换器调压的无刷直流电机功率变换器单管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15):124 – 132.
LI Wenzhuo, FANG Jiancheng, LI Haitao. Single switch open-circuit fault diagnosis in brushless DC motor drivers with Buck converters[J]. Proceedings of the CSEE,2013, 33(15):124 – 132. (in Chinese)
- SAHIN M E, OKUMUS H I, AYDEMIR M T. Implementation of an electrolysis system with DC/DC synchronous buck converter [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(13):6802 – 6812.
- 马红波,冯全源. Buck 型开关变换器最优 PID 控制器设计[J]. 电机与控制学报,2008,12(6):639 – 643.
MA Hongbo, FENG Quanyuan. Optimized PID controller design for Buck DC – DC switching converters[J]. Electric Machines and Control,2008,12(6): 639 – 643. (in Chinese)
- ZHU D R, LIU L, LIU C X. Optimal fractional-order PID control of chaos in the fractional-order Buck converter[C] //Proceedings of IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2014:787 – 791.
- SAHIN M E, OKUMUS H I. Fuzzy logic controlled parallel connected synchronous Buck DC – DC converter for water electrolysis [J]. IEEE Journal of Research,2013,59(3): 280 – 288.
- BETIN F, SIVERT A, YAZIDI A, et al. Determination of scaling factors for fuzzy logic control using the sliding-mode approach: application to control of a DC machine drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 296 – 309.
- PIAZZA M C D, PUCCI M, RAGUSA A, et al. Analytical versus neural real-time simulation of a photovoltaic generator based on a DC – DC converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2501 – 2510.
- LIN B R, HOFT R G. Neural networks and fuzzy logic in power electronics[J]. Control Engineering Practice, 1994, 2(1): 113 – 121.
- MA D, KI W H, TSUI C Y. An integrated one-cycle control Buck converter with adaptive output and dual loops for output error correction[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(1):140 – 149.
- 陈龙,施德华,汪若尘,等. 馈能悬架自适应离线神经网络逆控制[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):281 – 287.
CHEN Long, SHI Dehua, WANG Ruochen, et al. Adaptive off-line neural network inverse control for energy harvesting suspension

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):281–287. (in Chinese)
- 12 TAN S C, LAI Y M, TSE C K, et al. A fixed-frequency pulsewidth modulation based quasi-sliding-mode controller for Buck converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6):1379–1392.
- 13 TAN S C, LAI Y M, CHEUNG M K H, et al. On the practical design of a sliding mode voltage controlled Buck converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(2):425–437.
- 14 HE Y, LUO F L. Design and analysis of adaptive sliding-mode-like controller for DC–DC converters[J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(3):401–410.
- 15 WANG P, SHEN W, ZHANG K. A Buck converter based on fuzzy control[J]. Power Electronics, 2006, 40(4):68–69.
- 16 KOMURCUGIL H. Adaptive terminal sliding-mode control strategy for DC–DC Buck converters[J]. ISA Transactions, 2012, 51(6):673–681.
- 17 倪雨, 许建平, 于海坤, 等. 控制受限滑模控制 Buck 变换器设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18):26–32.
NI Yu, XU Jianping, YU Haikun, et al. Design of sliding mode control Buck converter with bounded input[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18):26–32. (in Chinese)
- 18 凌睿, 柴毅. 悬臂式掘进机器人截割臂建模与二阶滑模控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(8):1037–1046.
LING Rui, CHAI Yi. Dynamic modeling and design of second-order sliding-mode controller for arm of roadheader robot[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(8):1037–1046. (in Chinese)
- 19 凌睿, 柴毅. 永磁直线同步电机多变量二阶滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36):60–66.
LING Rui, CHAI Yi. Dynamic modeling and design of second-order sliding-mode controller for arm of roadheader robot[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36):60–66. (in Chinese)
- 20 丁世宏, 王加典, 黄振跃, 等. Buck 变换器扰动补偿控制算法及实现[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):214–220.
DING Shihong, WANG Jiadian, HUANG Zhenyue, et al. Disturbance compensation controller algorithm and implementation for Buck converters[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8):214–220. (in Chinese)
- 21 DING S H, LI S H, ZHENG W X. New approach to second-order sliding mode control design[J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(18):2188–2196.
-

(上接第 400 页)

- 9 MENG Fei, SHI Peng, KARIMI Hamid Reza, et al. Optimal design of an electro-hydraulic valve for heavy-duty vehicle clutch actuator with certain constraints[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 68–69:491–503.
- 10 ANTTI Ylinen, HEIKKI Marjamäki, JARI Mäkinen. A hydraulic cylinder model for multibody simulations [J]. Computers and Structures, 2014, 138:62–72.
- 11 王松峰, 赵虎, 权龙. 新型比例方向阀动态特性仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(6):34–39.
WANG Songfeng, ZHAO Hu, QUAN Long. Simulation of the dynamic characteristics for a new type proportional direction valve [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2013, 33(6):34–39. (in Chinese)
- 12 YANG Lijie, NIE Songlin, YIN Shuai, et al. Numerical and experimental investigation on torque characteristics of seawater hydraulic axial piston motor for underwater tool system [J]. Ocean Engineering, 2015, 104:168–184.
- 13 苗中华, 李振华, 王旭永, 等. 中空液压马达系统建模与摩擦动态补偿算法研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12):314–320.
MIAO Zhonghua, LI Zhenhua, WANG Xuyong, et al. Modeling and friction dynamic compensation for ultra-large-diametered hollow hydraulic motor servo system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):314–320. (in Chinese)
- 14 杨阳, 权龙, 杨敬. 轴向柱塞泵非止点配流窗口过渡区压力脉动特性分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24):128–134.
YANG Yang, QUAN Long, YANG Jing. Pressure pulsation characteristic analysis of the non-dead spots transition zone between flow distribution windows of axial piston pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24):128–134. (in Chinese)
- 15 顾临怡, 王庆丰, 路甬祥. 液压驱动的大惯性负载加减速特性研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10):46–49.
GU Linyi, WANG Qingfeng, LU Yongxiang. Research on acceleration and deceleration characteristic for high inertia loads driven by hydraulic [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10):46–49. (in Chinese)