

DOI: 10.7652/xjtuxb201704016

Buck 变换器的自适应终端滑模控制策略

汪建林^{1,2}, 续丹¹, 周欢¹, 鲁伟¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 宁夏医科大学理学院, 750021, 银川)

摘要: 针对 Buck 变换器的传统滑模控制方法存在滑模系数不易确定, 以及系统的动态响应和鲁棒性难以同时提升的问题, 提出了一种基于电感电流建立双闭环结构的自适应终端滑模控制策略。该算法基于电感电流建立滑模面切换函数, 利用输出电压误差跟踪基准电感电流, 通过对李雅普诺夫稳定性的求解确定跟踪系数, 规避了常规滑模系数难以确定和基准电感电流不易测量的问题; 在该滑模面切换函数上构建了非线性环节, 实现了终端双闭环滑模控制方法; 通过卡尔曼滤波增益理论对非线性环节的阶数自适应选择, 同时提高了趋近速度和收敛速度, 有效改善了滑模控制策略的动态特性和鲁棒性互相制约的问题。自适应终端双闭环滑模控制 Buck 变换器在启动环节能够获得最优的瞬态响应, 并有效地抑制电压的过冲量, 在负载突变情况下具有最小的电压跌落量和最快的调节时间, 有效地解决了动态响应与鲁棒性互相制约的问题, 同时提升了系统控制的动态响应和鲁棒性。自适应终端双闭环滑模控制策略物理实现相对简单, 在 Buck 变换器以及其他 DC-DC 变换器的高精度控制领域具有一定的实用价值。

关键词: Buck 变换器; 自适应终端滑模控制; 双闭环滑模控制; 动态响应; 鲁棒性

中图分类号: TM46; TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0103-06

Adaptive Control Method of Terminal Sliding Mode with Double Loop for Buck Converters

WANG Jianlin^{1,2}, XU Dan¹, ZHOU Huan¹, LU Wei¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Science, Ningxia Medical University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: A sliding mode switching function with double closed-loop is proposed based on inductance current to deal with the problems that the sliding coefficients are often difficult to determine and the robustness control of a system conflicts with dynamic quality. Benchmark inductor currents are tracked by the output voltage and tracing coefficients are determined by solving the Lyapunov functions, which avoids the difficulties to determine conventional sliding mode coefficients and to measure the benchmark inductor currents. Moreover, the arithmetic builds a nonlinear link on the sliding mode switching function, and derives an adaptive control method of terminal sliding modes with double closed-loop. In order to obtain an optimal control strategy of terminal sliding modes, the present method improves the approach speed and the convergence speed simultaneously by implementing the adaptive selection of terminal sliding modes, effectively suppresses the output voltage impulse in the start-up phase, and improves the transient response and robustness of a system simultaneously. Simulation verifies the

收稿日期: 2016-12-07。 作者简介: 汪建林(1983—), 男, 博士生; 续丹(通信作者), 女, 教授, 硕士生导师。 基金项目: 宁夏医科大学校内科研基金资助项目(XM201414)。

网络出版时间: 2017-03-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170303.0925.010.html>

applicability of the present method in accurate control of Buck converters.

Keywords: Buck converter; adaptive terminal sliding mode control; double closed-loop sliding mode control; transient response; robustness

Buck 变换器是一个非线性时变系统,由于其开关操作的特性,高性能控制策略的设计通常是一个具有挑战性的问题^[1]。滑模控制是一种非线性控制策略,具有较好的鲁棒性和快速动态响应,且容易物理实现^[2]。滑模控制的设计一般包括滑模面和控制律的设计,合适的滑模面和控制律可以使系统的状态被迫趋向滑模面做滑模运动直到达到平衡点。一般滑模控制的滑模面都是通过一个定常系数构建基于系统状态误差的线性组合,滑模系数较难确定,使得在变换器的输入电压或负载发生变化时,造成瞬态响应不理想,出现瞬态响应与鲁棒性互相制约和无限时间收敛于平衡点的问题^[3]。

基于电感电流建立滑模面切换函数,运用输出电压误差跟踪基准电感电流,构成双闭环滑模控制结构。对该滑模面的稳定性进行了证明并在满足李雅普诺夫稳定条件的情况下,确定了跟踪系数的域值范围,该方法比传统滑模系数的确定更为便捷。双闭环滑模结构在一定程度上加快了 Buck 变换器的电容充放电过程,可有效地抑制启动阶段的输出电压过冲量并减小了稳态误差^[4],但是该方法依然存在无限时间收敛于平衡点的问题。

为了解决这一问题,在双闭环滑模面切换函数上构建了非线性环节,并对非线性环节的分数阶数进行了分析,提出了一种终端滑模阶数自适应的法,有效缩短了滑模状态收敛于平衡点的时间,并进一步提高了系统控制的动态响应和鲁棒性。

1 Buck 变换器模型

Buck 变换器拓扑结构如图 1 所示,图中开关为 MOS 场效应管开关元件, V_{in} 为输入电压, R 为负载。对 Buck 变换器进行电路分析,可得

$$di_L/dt = (uV_{in} - V_o/R)/L \quad (1)$$

$$dV_o/dt = (i_L - V_o/R)/C \quad (2)$$

式中: u 为开关状态,定义为

$$u = \begin{cases} 1, & \text{开关闭合} \\ 0, & \text{开关断开} \end{cases} \quad (3)$$

定义输出电压误差为

$$x_1 = V_o - V_{ref} \quad (4)$$

式中: V_{ref} 为基准输出电压,则输出电压变化率为

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{V}_o - \dot{V}_{ref} \approx \dot{V}_o \quad (5)$$

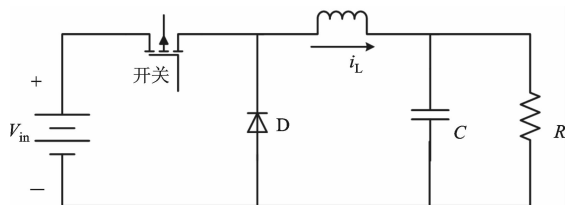


图 1 Buck 变换器的电路结构

结合式(1)~式(4),进一步得出系统的状态空间模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{uV_{in} - V_{ref}}{LC} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 双闭环滑模控制方法

双闭环滑模控制方法是将变换器的输出电压和电感电流分别作为反馈量,从而构成了双闭环控制结构。其中:内环为电流环,是基于电感电流误差构建的滑模控制结构;外环为电压环,利用输出电压误差函数来跟踪基准电感电流,解决了基准电感电流难以测量的问题。

基于电感电流误差建立滑模面

$$S = i_L(t) - \hat{I}_{ref}(t) \quad (7)$$

基准电感电流项由输出电压误差函数定义为

$$\hat{I}_{ref}(t) = k_a x_1 + k_b \int_0^t x_1 d\tau \quad (8)$$

其中 k_a 、 k_b 为跟踪系数,则滑模面可另写为

$$S = i_L(t) - k_a x_1 - k_b \int_0^t x_1 d\tau \quad (9)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V = S^2/2 \quad (10)$$

$$\dot{S} = \dot{i}_L(t) - k_a \dot{V}_o - k_b (V_o - V_{ref}) \quad (11)$$

将式(5)代入式(11),得

$$\dot{S} = (uV_{in} - V_o)/L - k_a (i_L - V_o/R)/C - k_b (V_o - V_{ref}) \quad (12)$$

考虑到场效应管的开关频率限制和实际工作情况,采用滞环控制^[5], u 被重新改写为

$$u = \begin{cases} 1, & S < h \\ 0, & S > -h \end{cases} \quad (13)$$

其中 $2h$ 为滞环宽度。图 2 为滞环调制的示意图, S_H 、 S_L 分别为滞环调制的上下切换边界。

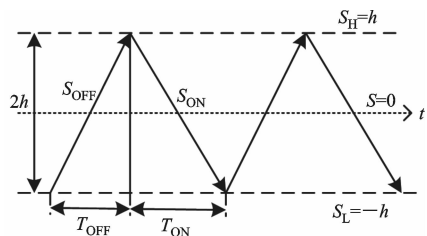


图 2 滞环调制的示意图

假设滞环调制的开关控制信号产生规则为:当 $S < S_L$ 时,功率开关管截止即 $u = 0$,定义此时系统切换函数为 S_{OFF} ;当 $S > S_H$ 时,功率开关管导通即 $u = 1$,定义此时系统切换函数为 S_{ON} 。 T_{ON} 表示功率开关导通时间, T_{OFF} 表示功率开关截止时间^[6]。由图 2 可以看出,开关频率与滞环宽度的关系为

$$\dot{S}_{OFF} = 2h/T_{OFF} \tag{14}$$

$$\dot{S}_{ON} = -2h/T_{ON} \tag{15}$$

$$f = 1/(T_{ON} + T_{OFF}) = \dot{S}_{ON}\dot{S}_{OFF}/2h(\dot{S}_{ON} - \dot{S}_{OFF}) \tag{16}$$

依据 Lyapunov 稳定原理,若系统状态能够达到滑模面且存在滑模运动,需满足 $S\dot{S} < 0$ 。

当 $u = 1$ 时, $S < 0$,需要满足 $\dot{S} > 0$,即

$$(V_{in} - V_o)/L - k_a(i_L - V_o/R)/C - k_b(V_o - V_{ref}) > 0 \tag{17}$$

当 $u = 0$ 时, $S > 0$,需要满足 $\dot{S} < 0$,即

$$-V_o/L - k_a(i_L - V_o/R)/C - k_b(V_o - V_{ref}) < 0 \tag{18}$$

k_a 和 k_b 的取值若满足上述不等式方程组,则可满足李亚普诺夫稳定条件。选用的 Buck 变换器电路参数见表 1。通过对电路分析可知,电感电流较小,可对上述不等式中跟踪系数的估计值 $\hat{k}_a$ 、 $\hat{k}_b$ 做如下近似

$$0 < \hat{k}_a < CR/L \tag{19}$$

$$0 < \hat{k}_b \approx k_a/CR \tag{20}$$

依据表 1 参数计算近似可得

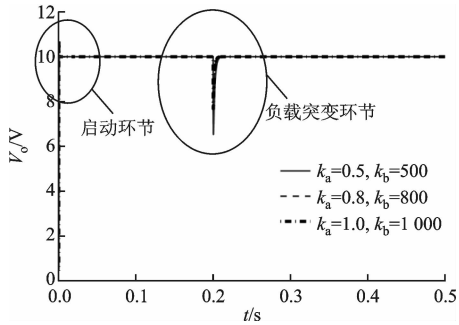
$$0 < \hat{k}_a < 1.1; \quad 0 < \hat{k}_b \leq 1\,000 \hat{k}_a$$

考虑到工程应用过程中负载的变化问题,分别

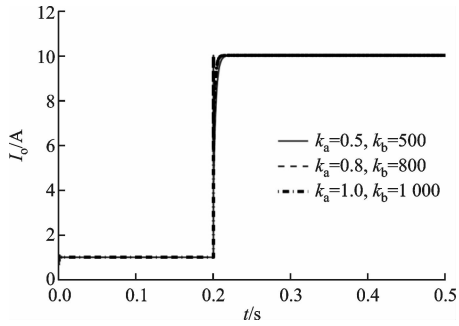
表 1 Buck 变换器电路参数

电路参数	数值
电容/ μF	100
电感/ μH	260
输入电压/V	25
基准电压/V	10
开关频率/MHz	2.5

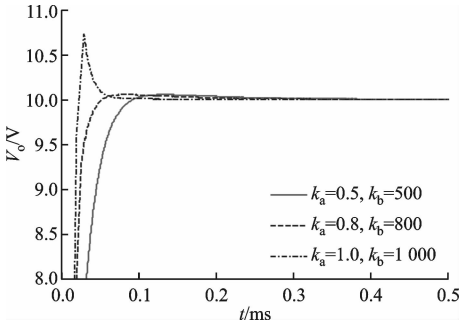
选择 $k_a = 0.5$ 、 $k_a = 0.8$ 、 $k_a = 1$ 时, $k_b = 1\,000k_a$,在 Simulink 软件中进行仿真,且在仿真过程中 $t = 0.2\text{ s}$ 时将负载从 $10\,\Omega$ 突变为 $1\,\Omega$,仿真结果如图 3 所示。



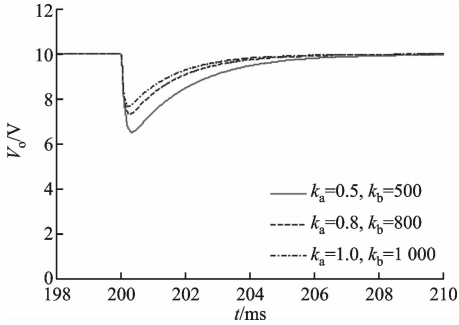
(a)输出电压响应



(b)输出电流响应



(c)启动环节输出电压响应



(d)负载突变环节输出电压响应

图 3 双闭环滑模控制下的系统响应

实验结果分析见表 2,综合启动环节的电压超调量、调节时间和负载突变环节的电压跌落量,认为

$k_a=0.8$ 、 $k_b=800$ 为较合适的参数取值。

表 2 双闭环滑模控制取不同参数值时的对比分析

参数选择	电压超调量 /%	调节时间 /ms	电压跌落量 /V
$k_a=0.5,k_b=500$	7.8	0.51	2.3
$k_a=0.8,k_b=800$	1.1	0.63	2.6
$k_a=0.5,k_b=1\ 000$	0.93	1.2	3.5

与 Buck 变换器的一般滑模控制方法相比,双闭环滑模控制策略虽然需要确定 2 个参数,但是通过对电路分析简化和求解李雅普诺夫稳定条件的不等式方程组,可得到接近最优参数值的估计值,使得参数的确定比一般滑模控制方法的滑模系数的确定更简便,并且具有更好的稳态响应^[7]。

3 自适应终端双闭环滑模控制方法

一般滑模控制方法的性能取决于滑模系数的选择,选取合适的滑模系数可以使滑模控制动态响应变快,但无论如何选取都无法克服动态响应与鲁棒性间相互制约的问题,并且还可能存在状态跟踪误差无限时间收敛的问题。双闭环滑模控制方法虽然避免了滑模系数难以确定的问题,但是依然存在状态跟踪误差无限时间收敛的问题。终端滑模是在滑模面的设计中引入非线性环节,使滑动模态跟踪误差能够在有限时间收敛至 0^[8-9]。在双闭环滑模控制方法的滑模面切换函数上,构建非线性环节建立新的滑模面

$$S=i_L(t)-k_ax_1^\gamma-k_b\int_0^tx_1^\gamma d\tau \tag{21}$$

式中: $0<(\gamma=p/q)<1$, p 、 q 均为正实数,当 $\gamma=1$ 时,终端双闭环滑模等效为上述的双闭环滑模控制方法。当系统的终端滑模面 $S=0$ 时,令

$$y=\int_0^tx_1^\gamma d\tau \tag{22}$$

其动态性能可以用非线性方程表示为

$$k_a\dot{y}=i_L(t)-k_by \tag{23}$$

所谓的终端滑模即收敛于平衡点的时间为有限值,上式改写成

$$dt=\frac{k_a dy}{(i_L-k_by)} \tag{24}$$

对式(24)两边进行积分,可得到收敛于平衡点所需的时间为

$$t=-k_a\ln(i_L-k_b x_1(0)^{1+\gamma}/(1+\gamma))/k_b \tag{25}$$

式(25)说明在初始条件 $x_1(0)\neq 0$ 的条件下,收敛于平衡点 $x_1(t)=0$ 的时间取决于 k_a 、 k_b 和 γ ,并且与

k_a/k_b 成正比^[10]。

当系统状态接近滑模面时,即 $|x_1|<1$,在非线环节作用下存在 $|x_1|^\gamma>|x_1|$,也就是系统状态在接近滑模面或已经到达滑模面做滑模运动时,到达速度和收敛速度均会随 γ 减小而变快,当 γ 非常小且接近 0 时,会因为到达速度过快而引起明显的超调和抖振现象。当系统状态离滑模切换面较远时,即 $|x_1|>1$,在非线环节作用下,存在 $|x_1|^\gamma<|x_1|$,随着 γ 减小趋近速度会变慢。

在 $k_a=0.8$ 、 $k_b=800$ 的取值条件下, γ 取不同值时,系统响应结果如图 4 所示。在启动环节, $\gamma=1$ 有更快的趋近速度,但接近滑模面时有明显的电压超调现象且收敛速度慢; $\gamma=0.2$ 有更快的收敛速度但是具有明显的抖振; $\gamma=0.5$ 具有较好的收敛特性和稳定性。在 0.2 s 时负载电阻由 10 Ω 突变为 1 Ω ,输出电压存在明显的跌落现象,且电压跌落值随非线性环节的终端滑模阶数 γ 的减小而增加,但动态调节时间随终端滑模阶数 γ 的减小而缩短。

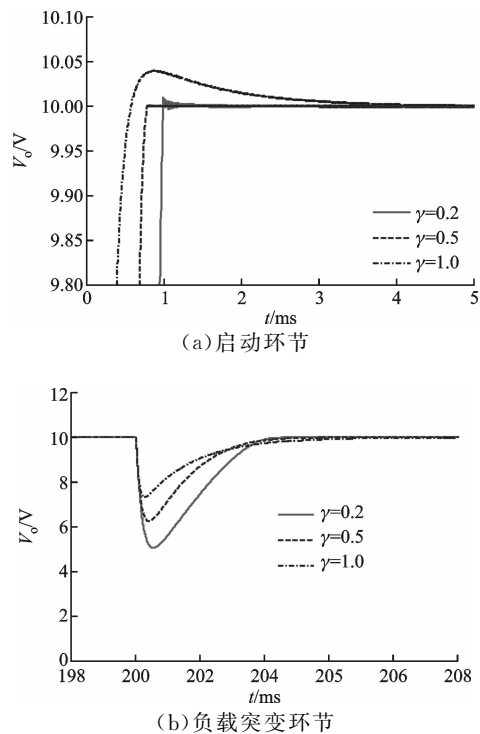


图 4 不同终端滑模阶数下的输出电压响应

依据上述结果分析,提出一种基于最优卡尔曼增益理论自适应确定终端滑模阶数的方法,即系统状态在做趋近运动时等效为系统误差 $|x_1|>1$,此时选取较大的终端滑模阶数 γ 值,使系统具有较快的趋近速度和较好的鲁棒性;在系统状态接近滑模面或做滑模运动时等效为系统误差 $|x_1|<1$,此时选取较小的 γ 值,使系统获得更快的收敛速度。

依据卡尔曼滤波增益理论^[11-12],将系统状态误差的协方差定义为

$$\hat{p}_k = \text{cov}(\mathbf{x}_{1,k} - \hat{\mathbf{x}}_{1,k}) \tag{26}$$

式中: $\mathbf{x}_{1,k}$ 为 k 时刻的误差测量值; $\hat{\mathbf{x}}_{1,k}$ 为 k 时刻的系统误差估计值。

最优的卡尔曼增益是后验估计 $\hat{\mathbf{x}}_{1,k}$ 的协方差 $\hat{p}_k$ 达到最小,也就是向量 $\mathbf{x}_{1,k} - \hat{\mathbf{x}}_{1,k}$ 的二范数的数学期望最小化的一个过程^[12],即

$$\mathbf{K}_k = \hat{p}_k \mathbf{H}^T / (\mathbf{H} \hat{p}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R}) \tag{27}$$

式中: $\mathbf{H}$ 为矩阵常量; $\hat{p}_k$ 为过程激励噪声的协方差; $\mathbf{R}$ 为误差测量噪声协方差矩阵。

当 $\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{0}$ 时, $\lim_{\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{0}} \mathbf{K}_k = \mathbf{H}^{-1}$; 当 $\hat{p}_k \rightarrow \mathbf{0}$ 时, $\lim_{\hat{p}_k \rightarrow \mathbf{0}} \mathbf{K}_k = \mathbf{0}$ 。考虑到较小的 γ 值会引起滑模运动的过冲而导致明显的抖振,使输出电压出现较大的纹波,定义常数矩阵 $|\mathbf{H}^{-1}| = 0.6, |\mathbf{K}_k| \in [0 \ 0.6]$ 。

对于一维的情况,系统状态误差越大, $\mathbf{K}_k$ 取值越小,系统状态误差越小, $\mathbf{K}_k$ 取值越大。结合卡尔曼最优增益理论,自适应终端滑模阶数定义为

$$\hat{\gamma} = 1 - |\mathbf{K}_k| \tag{28}$$

自适应终端双闭环滑模控制策略仿真结果如图 5 所示,自适应终端滑模阶数 γ 的控制策略在启动阶段获得了较快的收敛速度且没有电压超调现象,在负载突变情况下电压跌落量最小且调节时间最

短。该方法在传统滑模控制的基础上分别提高了系统控制的动态性能和鲁棒性,克服了传统滑模控制方法动态性能和鲁棒性相互制约的问题。

4 结 论

参照 Buck 变换器的一般滑模控制方法,建立了基于电感电流的双闭环滑模控制结构,克服了基准电感电流难以测量的问题。在双闭环滑模控制结构上构建了非线性环节,在提供相对稳定的输出电压和电感电流的同时,改善了系统控制的动态性能,并解决了系统状态无限时间收敛的问题。针对终端滑模非线性阶数进行了对比分析,提出了一种自适应终端滑模阶数的控制方法,在系统状态做趋近运动时,选取较大的终端滑模阶数,加快趋近速度;在系统状态做滑模运动时,选取较小的滑模阶数,加快收敛速度。

仿真实验结果表明,自适应终端滑模控制方法在系统的启动环节和干扰环节,分别获得了更理想的动态性能和鲁棒性。该方法有效地提高了系统控制的动态性能和鲁棒性,解决了传统滑模控制方法因滑模系数难以确定而导致的在获取高动态性能的同时鲁棒性较差的问题。自适应终端双闭环滑模控制方法在 Buck 变换器以及其他 DC-DC 变换器的高精度控制方面具有一定的使用价值。

参考文献:

[1] NAMUDURI C, SEN P C. A servo-control system using a self-controlled synchronous motor (SCSM) with Sliding mode controller [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 23(2): 283-295.

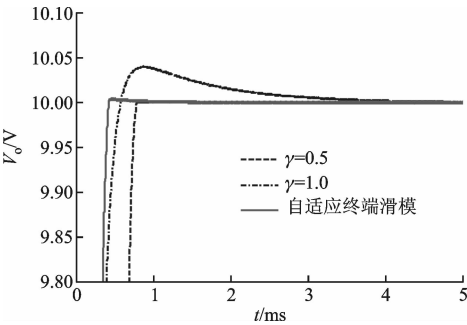
[2] BOIKO I. LPRS analysis of sliding mode Buck converter [J]. Journal of the Franklin Institute, 2016, 353(18): 5137-5150.

[3] 倪雨, 许建平, 王金平, 等. 滞环调制全局滑模控制 Buck 变换器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2010(21): 1-6.

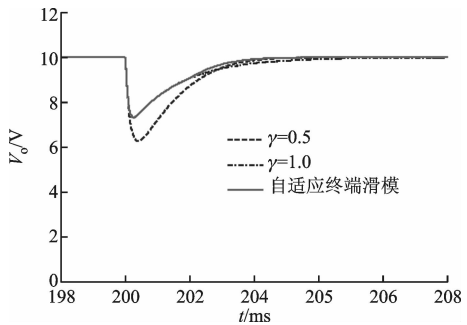
NI Yu, XU Jianping, WANG Jinping, et al. Design of global sliding mode control Buck converter with hysteresis modulation [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2010(21): 1-6.

[4] 许佳妮, 皇甫宜耿, 卓生荣, 等. 大扰动下 Buck 电源变换 PCL 控制器设计 [J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(1): 73-78.

XU Jiani, HUANGFU Yigeng, ZHOU Shengrong, et al. PCL sliding mode controller design for Buck converter under larger disturbances [J]. Journal of North-



(a)启动环节



(b)负载突变环节

图 5 自适应终端滑模控制下的输出电压响应

- western Polytechnical University, 2016, 34(1): 73-78.
- [5] 张黎, 丘水生. 比例积分滑模控制 Buck 变换器分析与实现 [J]. 电力电子技术, 2005, 39(2): 26-28.
ZHANG Li, QIU Shuisheng. Analysis and implementation of Buck converter with proportional integral sliding mode control [J]. Power Electronic Technology, 2005, 39(2): 26-28.
- [6] 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 电动汽车的多模式复合电源能量管理自适应优化 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 130-136.
WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Adaptive optimization of energy management strategy for a multi-mode hybrid energy storage system in electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 130-136.
- [7] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang. Design of a novel hybrid power for EV [C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference and Expo in Transportation Electrification. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [8] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2015, 281: 432-443.
- [9] KOMURCUGIL H. Adaptive terminal sliding-mode control strategy for DC-DC buck converters [J]. Isa Transactions, 2012, 51(6): 673-681.
- [10] BAYRAMOGLU H, KOMURCUGIL H. Time-varying sliding-coefficient-based terminal sliding mode control methods for a class of fourth-order nonlinear systems [J]. Isa Transactions, 2014, 53(4): 1044-1053.
- [11] AZOU B S, LUCA M B, BUREL G. The problem of gain control in a Kalman filter based synchronization chaotic receiver [J]. IEEE-Communications, 2015, 4(7): 40-49.
- [12] WANG Junxiao, LI Shihua, YANG Jun, et al. Finite-time disturbance observer based non-singular terminal sliding-mode control for pulse width modulation based DC-DC buck converters with mismatched load disturbances [J]. Iet Power Electronics, 2016, 9(9): 1995-2002.

(编辑 武红江)

(上接第 71 页)

- [8] GAO X J, CAO J W, CHENG L F, et al. Effect of carbon content on mechanical properties of SiC/B₄C prepared by reaction sintering [J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(1): 102-106.
- [9] AROATI S, CAFRI M, DILMAN H, et al. Preparation of reaction bonded silicon carbide (RBSC) using boron carbide as an alternative source of carbon [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(5): 841-845.
- [10] 鲍崇高, 宋索成, 赵黎明. 反应烧结碳化硅陶瓷中碳化硼-碳纤维联合增强机制 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(S1): 229-232.
BAO Chonggao, SONG Suocheng, ZHAO Liming. Combined strengthening mechanism of carbon fiber/boron carbide in reaction bonded silicon carbide ceramic [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(S1): 229-232.
- [11] HAN I S, LEE K S, SEO D W, et al. Improvement of mechanical properties in RBSC by boron carbide addition [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(9): 703-706.
- [12] HAYUN S, DILMAN H, DARIEL M P, et al. The effect of aluminum on the microstructure and phase composition of boron carbide infiltrated with silicon [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 118(2): 490-495.
- [13] HAYUN S, FRAGE N, DARIEL M P. The morphology of ceramic phases in B₄C-SiC-Si infiltrated composites [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2006, 179(9): 2875-2879.

(编辑 刘杨)