

# Buck 变换器的新型非奇异固定时间滑模控制

黄曦,刘宜成,涂海燕,周凯

(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

**摘要:**针对 Buck 变换器中电压收敛速度慢、抗负载干扰能力差的问题,提出了一种快速非奇异固定时间终端滑模控制方法。基于固定时间稳定理论,构造了一种新型固定时间滑模面和滑模趋近律,与传统固定时间控制方法相比提高了远离系统原点时的收敛速率,保证系统能在固定时间内稳定。结合 Buck 变换器电路模型设计了新型非奇异固定时间控制器,通过仿真和实验与传统固定时间控制方法和 PI 控制器进行对比,其结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** Buck 变换器;固定时间稳定;新型滑模面;趋近律;非奇异

**中图分类号:** TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22314

## A Novel Non-singular Fixed-time Sliding Mode Control for Buck Converter

HUANG Xi, LIU Yicheng, TU Haiyan, ZHOU Kai

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** A fast non-singular fixed-time terminal sliding mode control method was proposed to solve the problems of slow voltage convergence and poor load resistance in Buck converter. Based on the fixed time stability theory, a new fixed time sliding mode surface and sliding mode approach law were constructed. Compared with the traditional fixed time control method, the convergence rate was improved when the system is far from the origin, so that the system can be stable in fixed time. Combined with the Buck converter circuit model, a new non-singular fixed time controller was designed. Comparing the traditional fixed time control method and PI controller by the simulation and experiment, the results verify the effectiveness of the method.

**Key words:** Buck converter; fixed time stability; new sliding surface; reaching law; non-singular

Buck 变换器的应用非常广泛,其控制策略一直是电力电子技术研究的重要内容。其中 PID 控制<sup>[1-3]</sup>、模糊控制<sup>[4-5]</sup>和滑模控制<sup>[6-10]</sup>等控制方法常被应用于 DC-DC 变换器中,Buck 变换器是 DC-DC 变换器中的一种,其在实际应用中存在着系统性能对参数变化敏感等问题,例如电路器件实际值与理想值存在误差,负载可能随时发生突变等,因而对系统鲁棒性能有较高的要求。

滑模控制对内部参数变化和外部扰动不敏感,具有很强的鲁棒性,非常适用于 Buck 变换器这种典型的开关非线性系统<sup>[11-12]</sup>。文献[6-7]对 Buck 变换器输出电压采用了有限时间控制。然而,有限时间控制不能保证系统独立于系统初始条件在有界时间内收敛,这使得在系统初始条件

事先未知的情况下,有限时间控制很难应用于实际系统中。文献[13]提出了固定时间稳定理论,系统收敛时间存在上界,其收敛时间上界与系统初始条件无关,仅与设计的滑模参数有关,固定时间控制可以克服这个缺点。文献[14]采用饱和和函数来解决滑模控制中遇到奇异性问题。目前固定时间控制方法已经在许多非线性系统得到广泛应用<sup>[15-16]</sup>,但在 Buck 变换器中应用固定时间控制方法还比较少。

针对 Buck 变换器这类非线性系统,提出了一种新型非奇异固定时间滑模控制方法。首先设计了一种快速固定时间稳定系统,与传统的固定时间稳定系统<sup>[17]</sup>相比具有更快的收敛速率。然后构造了新型固定时间滑模面和滑模趋近律,结合

基金项目:四川省智能制造与机器人重大专项课题(2019ZDZX0019)

作者简介:黄曦(1995—),男,硕士研究生,Email:413543133@qq.com

通讯作者:刘宜成(1975—),男,博士,副教授,硕士生导师,Email:liuyicheng@scu.edu.cn

Buck变换器电路模型,设计了Buck变换器新型非奇异固定时间控制器。基于Lyapunov稳定性理论证明了系统的稳定性,保证系统能在固定时间内收敛,收敛时间上界不受系统初始条件影响,仅与设计的滑模参数相关。通过仿真和实验与传统固定时间控制方法和PI控制器进行对比,结果表明,本文设计的新型非奇异固定时间控制器使得输出电压误差具有更快的收敛速度,同时还具有较强的抗负载变化能力,体现了良好的鲁棒性。

### 1 理论准备

定义1<sup>[13]</sup> 考虑如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f[x(t)] \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (1)$$

如果系统平衡点是在有限时间稳定的,且收敛时间  $T(x_0)$  有界,即存在时间常数  $T_{max}$ ,对任意的  $x_0 \in R^n$  都存在一个  $T_{max}$  使得  $T(x_0) < T_{max}$ ,则称系统在平衡点是固定时间稳定的。

引理1 考虑一类非线性系统:

$$\dot{y} = -ay^{\frac{m}{n}} - by^{\frac{1}{2} + \frac{p}{2q} + (\frac{1}{2} - \frac{p}{2q})\text{sign}(|y| - 1)} \quad (2)$$

当  $a > 0, b > 0, m, n, q, p$  都为正奇数,且满足  $m > n, q > p$ ,那么系统的平衡点是在固定时间内稳定的,收敛时间上界  $T_{sup}$  的表达式如下:

$$T_{sup} < \frac{n}{b(m-n)} \ln(1 + \frac{b}{a}) + \frac{q}{(q-p)} \frac{1}{b} \quad (3)$$

证明:系统表达式(2)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{y} = -ay^{\frac{m}{n}} - by & |y| > 1 \\ \dot{y} = -ay^{\frac{m}{n}} - by^{\frac{p}{q}} & |y| < 1 \end{cases} \quad (4)$$

当  $|y| > 1$  时,令  $z = 1 + \ln|y|$ ;当  $|y| < 1$ ,令  $z = |y|^{1-\frac{p}{q}}$ ,则式(4)所示系统可以转化为

$$\begin{cases} \dot{z} = -ae^{(m/n-1)(z-1)} - b & |z| > 1 \\ \dot{z} = (1-p/q)(-az^{\frac{m/n-p/q}{1-p/q}} - b) & 0 < |z| < 1 \end{cases} \quad (5)$$

求如式(5)所示系统收敛时间上界  $T_{sup}$  可得:

$$\begin{aligned} T_{sup} &= \lim_{z_0 \rightarrow \infty} T(z_0) \\ &= \lim_{z_0 \rightarrow \infty} [ \int_1^{z_0} \frac{1}{ae^{(\frac{m}{n}-1)(z-1)} + b} dz + \int_0^1 \frac{1}{(1-\frac{p}{q}) az^{\frac{m/n-p/q}{1-p/q}} + b} dz ] \\ &< \lim_{z_0 \rightarrow \infty} \int_1^{z_0} \frac{1}{ae^{(\frac{m}{n}-1)(z-1)} + b} dz + \frac{q}{q-p} \cdot \frac{1}{b} \end{aligned} \quad (6)$$

令  $\varepsilon = e^{(m/n-1)(z-1)}$ ,式(6)可转化为

$$\begin{aligned} T_{sup} &< \lim_{\varepsilon_0 \rightarrow \infty} \int_1^{\varepsilon_0} \frac{1}{(\frac{m}{n}-1)} \frac{1}{\varepsilon} \frac{1}{a\varepsilon + b} d\varepsilon + \frac{q}{q-p} \frac{1}{b} \\ &= \frac{n}{b(m-n)} \ln(1 + \frac{b}{a}) + \frac{q}{q-p} \frac{1}{b} \end{aligned} \quad (7)$$

证明完毕。

文献[17]给出了传统固定时间收敛系统  $\dot{y} = -ay^{\frac{m}{n}} - by^{\frac{p}{q}}$  的收敛时间上界:

$$T < \frac{n}{m-n} \frac{1}{a} + \frac{q}{q-p} \frac{1}{b} \quad (8)$$

由于不等式  $\ln(1 + \frac{b}{a}) < \frac{b}{a}$ ,所以式(7)中的  $\frac{n}{b(m-n)} \ln(1 + \frac{b}{a}) < \frac{n}{b(m-n)} \frac{b}{a}$ ,与式(8)相比可得本文设计的新型固定时间收敛系统收敛时间上界更小,与文献[17]中的传统固定时间稳定系统相比具有更快的收敛速率。

### 2 Buck变换器新型非奇异固定时间控制

#### 2.1 Buck变换器电路模型

图1为Buck变换器的电路拓扑结构。图中,  $U_{in}$  为输入电压;  $U_o$  为实际输出电压;  $R, L, C$  分别为电阻、电感和电容。

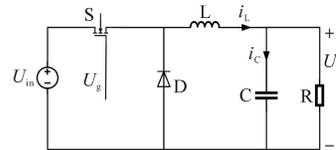


图1 Buck变换器拓扑结构

Fig.1 Topology of Buck converter

令输出电压误差  $x_1 = U_{ref} - U_o$ ,  $U_{ref}$  为参考电压,输出电压误差变化率  $x_2 = dx_1/dt$ , Buck变换器工作在电流连续状态下的状态空间平均模型如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{U_{in}}{LC} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{U_{ref}}{LC} \end{bmatrix} \quad (9)$$

#### 2.2 Buck变换器新型非奇异固定时间控制器设计

本文根据引理1构造的新型固定时间滑模面如下:

$$s = a_1 x_1^{\frac{m_1}{n_1}} + b_1 x_1^{\frac{1}{2} + \frac{p_1}{2q_1} + (\frac{1}{2} - \frac{p_1}{2q_1})\text{sign}(|x_1| - 1)} + x_2 \quad (10)$$

式中:  $a_1, b_1$  均为正实数;  $m_1, n_1, q_1, p_1$  均为正奇数,

且  $m_1 > n_1, q_1 > p_1$ 。

基于如式(10)所示滑模面,设计一种滑模趋近律为

$$\dot{s} = -a_2 s^{\frac{m_2}{n_2}} - b_2 s^{\frac{1}{2} + \frac{p_2}{2q_2} + (\frac{1}{2} - \frac{p_2}{2q_2})\text{sign}(|s|-1)} \quad (11)$$

式中:  $a_2, b_2$  均为正实数;  $m_2, n_2, q_2, p_2$  均为正奇数, 且  $m_2 > n_2, q_2 > p_2$ 。

基于式(9)所示的 Buck 变换器状态空间平均模型, 结合式(10)所示的滑模面和式(11)所示的滑模趋近律, 设计 Buck 新型固定时间控制器  $u$  如下所示:

$$u = \frac{LC}{U_{in}} \left\{ \frac{U_{ref}}{LC} - \frac{1}{LC} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 + a_1 \frac{m_1}{n_1} x_1^{\frac{m_1}{n_1}-1} x_2 + \text{sat} \left\{ b_1 \left[ \frac{1}{2} + \frac{p_1}{2q_1} + \left( \frac{1}{2} - \frac{p_1}{2q_1} \right) \text{sign}(|x_1|-1) \right] \times x_1^{\frac{1}{2} + \frac{p_1}{2q_1} + (\frac{1}{2} - \frac{p_1}{2q_1})\text{sign}(|x_1|-1)-1} x_2, h \right\} + a_2 s^{\frac{m_2}{n_2}} + b_2 s^{\frac{1}{2} + \frac{p_2}{2q_2} + (\frac{1}{2} - \frac{p_2}{2q_2})\text{sign}(|s|-1)} \right\} \quad (12)$$

根据文献[14], 在式(12)所示控制器中采用饱和函数来解决控制器中可能引起的奇异性问题。饱和函数定义为

$$\text{sat}(x, y) = \begin{cases} x & |x| < y \\ y \text{sign}(x) & |x| > y \end{cases} \quad (13)$$

**定理 1** 在如式(12)所示的 Buck 新型非奇异固定时间控制器的作用下, 系统能在固定时间内稳定。

证明: 构造 Lyapunov 函数如下:

$$V = s^2 \quad (14)$$

对式(14)结合式(9)对  $t$  求导, 再将控制器代入, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2s \left( -a_2 s^{\frac{m_2}{n_2}} - b_2 s^{\frac{1}{2} + \frac{p_2}{2q_2} + (\frac{1}{2} - \frac{p_2}{2q_2})\text{sign}(|s|-1)} \right) \\ &= -2a_2 V^{\frac{\frac{m_2}{n_2} + 1}{2}} - 2b_2 V^{\frac{\frac{1}{2} + \frac{p_2}{2q_2} + (\frac{1}{2} - \frac{p_2}{2q_2})\text{sign}(|s|-1) + 1}{2}} \end{aligned} \quad (15)$$

当  $|s| \geq 1$  时, 有:

$$\dot{V} = -2a_2 V^{\frac{m_2/n_2 + 1}{2}} - 2b_2 V \quad (16)$$

当  $|s| < 1$  时, 有:

$$\dot{V} = -2a_2 V^{\frac{m_2/n_2 + 1}{2}} - 2b_2 V^{\frac{p_2/q_2 + 1}{2}} \quad (17)$$

根据引理 1 可得, 系统可以在固定时间  $T_1$  内收敛到滑模面上,  $T_1$  满足如下关系式:

$$T_1 < \frac{n_2}{2b_2(m_2 - n_2)} \ln \left( 1 + \frac{b_2}{a_2} \right) + \frac{q_2}{2b_2(q_2 - p_2)} \quad (18)$$

注意, 当饱和函数项中出现  $|b_1 [ \frac{1}{2} + \frac{p_1}{2q_1} + (\frac{1}{2} - \frac{p_1}{2q_1}) \text{sign}(|x_1|-1) ] x_1^{\frac{1}{2} + \frac{p_1}{2q_1} + (\frac{1}{2} - \frac{p_1}{2q_1})\text{sign}(|x_1|-1)-1} x_2| > h$

时, 根据式(9)可以得到  $x_1(t)$  的解为

$$x_1(t) = x_1(0) + \int_0^t x_2(t) dt \quad (19)$$

文献[14]指出了此类系统的系统状态不会一直停留在奇异区域, 而是在有限时间内离开奇异区域, 系统可以达到滑模面  $s = 0$ , 奇异区域的存在并不影响稳定性分析的结果。

当运动到滑模面  $s = 0$  时, 系统运动方程可以表示为

$$\dot{x}_1 = x_2 = ax_1^{\frac{m_1}{n_1}} + b_1 x_1^{\frac{1}{2} + \frac{p_1}{2q_1} + (\frac{1}{2} - \frac{p_1}{2q_1})\text{sign}(|x_1|-1)} \quad (20)$$

根据引理 1 可得, 误差  $x_1$  可以在固定时间  $T_2$  内收敛到平衡点,  $T_2$  满足如下关系式:

$$T_2 < \frac{n_1}{b_1(m_1 - n_1)} \ln \left( 1 + \frac{b_1}{a_1} \right) + \frac{q_1}{(q_1 - p_1)b_1} \quad (21)$$

综上可得, 系统状态  $x_1$  可以在有限时间  $T$  内收敛到平衡点, 且  $T$  存在上界, 收敛时间  $T$  满足:

$$T = T_1 + T_2 < \frac{n_2}{2b_2(m_2 - n_2)} \ln \left( 1 + \frac{b_2}{a_2} \right) + \frac{q_2}{2b_2(q_2 - p_2)} + \frac{n_1}{b_1(m_1 - n_1)} \ln \left( 1 + \frac{b_1}{a_1} \right) + \frac{q_1}{(q_1 - p_1)b_1} \quad (22)$$

证明完毕。

### 3 数值仿真

为了验证本文提出的新型固定时间控制方法的有效性, 通过 Matlab/Simulink 建立 Buck 变换器仿真模型进行仿真验证, 本文将传统固定时间控制方法的控制器  $u'$  设计为

$$u' = \frac{LC}{U_{in}} \left[ \frac{U_{ref}}{LC} - \frac{1}{LC} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 + a_1 \frac{m_1}{n_1} x_1^{\frac{m_1}{n_1}-1} x_2 + \text{sat} \left( b_1 \frac{p_1}{q_1} x_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} x_2, h \right) + a_2 s^{\frac{m_2}{n_2}} + b_2 s^{\frac{p_2}{q_2}} \right] \quad (23)$$

式(12)和式(23)的控制器参数设计和电路参数如下: 输入电压  $U_{in} = 30 \text{ V}$ , 参考电压  $U_{ref} = 10 \text{ V}$ , 电阻  $R = 30 \text{ } \Omega$ , 电感  $L = 700 \text{ } \mu\text{H}$ , 电容  $C = 470 \text{ } \mu\text{F}$ ,  $m_1 =$

$m_2=13, n_1=n_2=11, p_1=p_2=5, q_1=q_2=9, a_1=a_2=10, b_1=b_2=80, h=0.1$ 。将本文方法与传统固定方法进行对比,图2和图3分别是误差收敛和输出电压对比图。

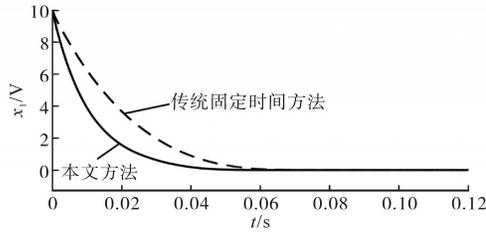


图2 误差收敛对比

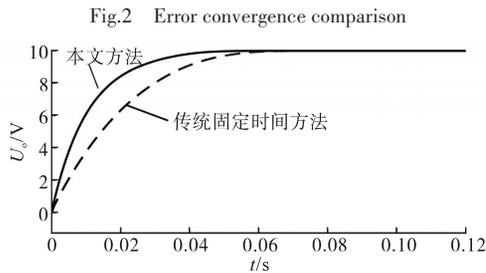


图3 输出电压对比  
Fig.3 Output voltage comparison

根据图2可以得出,当输出电压误差为10V时,在本文方法的作用下,输出电压误差收敛时间大概为0.056s。在传统固定时间控制方法的作用下,误差收敛时间大概为0.069s,可见本文方法收敛速度比传统固定时间方法快了约0.013s。根据式(22)再结合上述仿真参数,可以计算出本文方法作用下的收敛时间上界约为0.268s,结果证明在本文方法作用下收敛时间在0.268s内。结合图2和图3的仿真结果可以得出,本文方法实现了输出电压误差在固定时间内快速收敛到平衡点,且收敛速度优于传统固定时间控制方法。

### 4 实验分析

本文利用DSPF28335来做实验的控制,开关频率设置为20kHz。实验采用本文设计的Buck新型固定时间控制器与PI控制器和传统固定时间控制器进行对比,对比了在0V启动和负载突变两种情况下的实验结果。

PI控制器参数设计为: $k_p=20, k_i=10$ 。Buck变换器电路参数参照上述控制器电路参数。图4为0V启动时输出电压 $U_o$ 和负载电流 $I_o$ 对比图,图5为负载由30Ω突变到18Ω时输出电压、电流对比。

由图4可知,Buck变换器从0V启动时,在PI控制器的作用下输出电压稳定时间大概在100ms,且有2V左右的超调量。在传统固定时间控制器作用下输出电压大约在70ms左右稳

定。而在新型固定时间控制器作用下,输出电压在56ms左右到达额定值,电压调节速度比另外两种方法快,且无超调量。

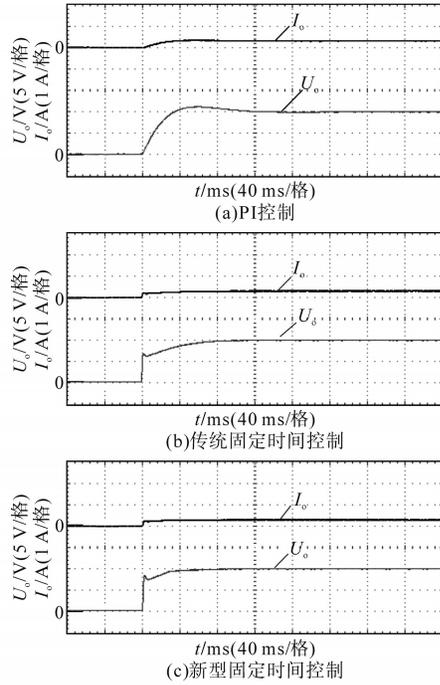


图4 0V启动时输出电压、电流对比

Fig.4 Comparison of output voltage and current at 0V startup

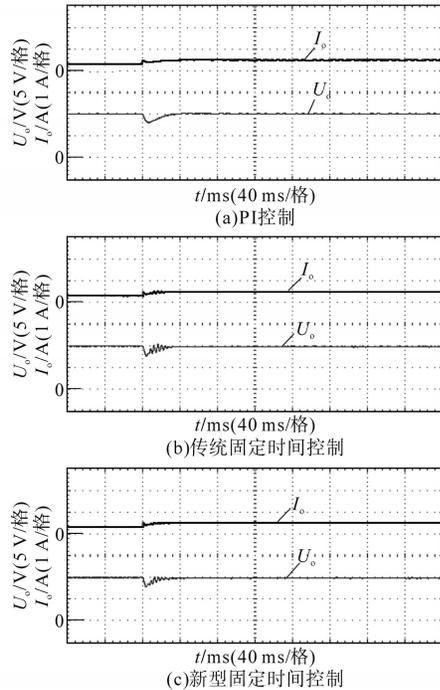


图5 负载由30Ω突变到18Ω时输出电压、电流对比

Fig.5 Comparison of output voltage and current at load mutation from 30Ω to 18Ω

由图5可知,当负载由30Ω突变到18Ω时,在新型固定时间控制器作用下,输出电压大概20ms左右恢复到10V,电压波动小。而在PI控制器下

则需要 32 ms 才能恢复,在传统固定时间控制器作用下大约在 26 ms 恢复稳定。由上述实验结果得知,本文提出的新型固定时间控制方法调节速度更快,启动时输出电压没有超调量,在负载发生变化时输出电压能更快恢复到额定值,具有良好的鲁棒性。

## 5 结论

本文构造了一种新型固定时间滑面和滑模趋近律,证明了系统状态能在固定时间内收敛到平衡点,其收敛速率优于传统固定时间控制方法。结合 Buck 变换器电路模型设计了新型非奇异固定时间控制器。通过仿真和实验与传统固定时间控制方法和 PI 控制器进行了对比,仿真和实验结果均表明了本文方法能使输出电压具有更快的调节速度,且启动时无超调量,在负载变化时体现了良好的动态响应,具有良好的鲁棒性。

### 参考文献

- [1] 李虹,尚佳宁,陈姚,等.基于fal函数的非线性PI控制器在DC-DC变换器中的应用[J].电工技术学报,2014,29(S1):326-331.  
Li Hong, Shang Jianing, Chen Yao, *et al.* The applications of nonlinear PI controller based on the fal function in the DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 326-331.
- [2] 李书舟,容慧.离散PID控制在Buck变换器中的应用研究[J].现代电子技术,2014,37(15):133-135.  
Li Shuzhou, Rong Hui. Application of discrete PID control in Buck converter[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(15): 133-135.
- [3] 孔维功,李丽荣,贾耀华.基于数字控制Buck电路的DC-DC电源变换器仿真研究[J].电气传动,2017,47(10):33-38.  
Kong Weigong, Li Lirong, Jia Yaohua. Simulation study on the DC-DC power source converter based on digital control Buck circuit[J]. Electric Drive, 2017, 47(10): 33-38.
- [4] Elmas C, Deperlioglu O, Sayan H H. Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converters[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 1540-1548.
- [5] 王宝瑛,朱方明,曹秉刚,等.电动汽车用DC/DC变换器模糊自整定PI控制[J].电力电子技术,2007(1):48-50.  
Wang Baoying, Zhu Fangming, Cao Binggang, *et al.* Study on fuzzy self-tuning PI control for DC/DC converter of electric vehicle [J]. Power Electronics, 2007(1): 48-50.
- [6] 杨晨,程盈盈,都海波,等. Buck型变换器自适应有限时间降压控制算法研究[J].自动化学报,2016,42(2):315-320.  
Yang Chen, Cheng Yingying, Du Haiibo, *et al.* An adaptive finite-time control algorithm for Buck converter systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(2): 315-320.
- [7] 杨晨.基于有限时间控制技术的Buck型DC-DC变换器控制系统研究[D].合肥:合肥工业大学,2017:1-46.  
Yang Chen. Research on Buck type DC-DC converter control system based on finite-time control technique[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 1-46.
- [8] 王攘攘,张广明,梅磊.基于状态观测器的DC-DC升压变换器滑模控制[J].电气传动,2019,49(5):55-58,78.  
Wang Rangrang, Zhang Guangming, Mei Lei. State observer-based sliding mode control for DC-DC Boost converter[J]. Electric Drive, 2019, 49(5): 55-58, 78.
- [9] Chiu C S, Shen C T. Finite-time control of DC-DC Buck converters via integral terminal sliding modes[J]. International Journal of Electronics, 2012, 99(5): 643-655.
- [10] 刘彦呈,古龙瑞,张勤进. DC-DC变换器新型趋近律滑模控制[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(1):64-68.  
Liu Yancheng, Gu Longrui, Zhang Qinjin. Sliding mode control of DC-DC converter based on novel reaching law[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 64-68.
- [11] 刘斌,杜量,许飞,等. Buck型变换器滑模控制技术及其发展综述[J].机电工程,2007(7):1-4.  
Liu Bin, Du Liang, Xu Fei, *et al.* Overview of sliding mode controller for Buck-kind converters[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2007(7): 1-4.
- [12] 张波.电力电子学亟待解决的若干基础问题探讨[J].电工技术学报,2006(3):24-35.  
Zhang Bo. Discussion on several fundamental problems necessary to be solved in power electronics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006(3): 24-35.
- [13] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [14] Feng Y, Yu X H, Han F L. On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems[J]. Automatica, 2013, 49(6): 1715-1722.
- [15] 孙延超,赵文锐,李传江,等.固定时间稳定航天器相对轨道悬停控制[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(4):26-31.  
Sun Yanchao, Zhao Wenrui, Li Chuanjiang, *et al.* Hovering control for spacecraft in relative orbit based on fixed-time stabilization theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(4): 26-31.
- [16] 张宽桥,杨锁昌,李宝晨,等.考虑驾驶仪动态特性的固定时间收敛制导律[J].航空学报,2019,40(11):259-273.  
Zhang Kuanqiao, Yang Suochang, Li Baochen, *et al.* Fixed-time convergent guidance law considering autopilot dynamics[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2019, 40(11): 259-273.
- [17] Zuo Z Y. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of non-linear systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9(4): 545-552.

收稿日期:2020-08-18

修改稿日期:2020-09-24