

# 控制与决策

Control and Decision

## Buck型变换器固定时间自适应控制

陈强, 钱宁, 南余荣

引用本文:

陈强, 钱宁, 南余荣. Buck型变换器固定时间自适应控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1183–1190.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0847>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 含执行机构未知动态的液压伺服系统输出反馈控制

Output feedback control for hydraulic servo systems with unknown actuator dynamics

控制与决策. 2020, 35(5): 1077–1084 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1252>

### 基于鲁棒伺服思想的尾坐式飞行器悬停姿态控制

Hover attitude control of a tail-sitter UAV based on robust servomechanism controller

控制与决策. 2020, 35(2): 339–348 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0926>

### 基于鲁棒伺服思想的尾坐式飞行器悬停姿态控制

Hover attitude control of a tail-sitter UAV based on robust servomechanism controller

控制与决策. 2020, 35(2): 339–348 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0926>

### 多无人机完全分布式有限时间编队控制

Fully distributed finite-time formation control for multiple UAVs

控制与决策. 2019, 34(12): 2656–2660 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0314>

### 一种基于时变干扰观测器的高超声速飞行器容错控制策略设计

A FTC scheme for hypersonic vehicle based on adaptive disturbance observer

控制与决策. 2018, 33(10): 1893–1900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0645>

### 基于鲁棒自适应滑模观测器的多故障重构

Design of the robust adaptive sliding mode observer for multiple fault reconstruction

控制与决策. 2016, 31(7): 1219–1224 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0659>

### 输入饱和和受限下的刚体飞行器姿态系统的有限时间镇定

Finite-time attitude stabilization of rigid spacecraft under input saturation

控制与决策. 2015, 30(8): 1386–1392 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0840>

### 板球系统的间接模糊自适应控制

Fuzzy indirect adaptive control for ball and plate system

控制与决策. 2015(2): 303–310 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1768>

# Buck型变换器固定时间自适应控制

陈 强, 钱 宁, 南余荣<sup>†</sup>

(浙江工业大学 信息学院, 杭州 310023)

**摘要:** 针对 Buck 型 DC/DC 变换器系统, 提出一种固定时间自适应降压控制方法. 首先, 针对系统参数已知情况, 设计固定时间滑模面和控制律, 保证系统输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点, 且其收敛时间上界与系统初始状态无关, 仅由控制参数决定. 针对电阻、电感等参数值受温度及外部干扰影响发生变化且无法准确获取的问题, 进一步设计自适应更新律估计系统所有未知参数, 并在此基础上设计固定时间自适应控制器, 保证输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点附近的邻域内. 最后通过仿真和实验对比结果验证所提出控制方法的有效性.

**关键词:** 固定时间控制; 自适应控制; Buck 型变换器; 滑模控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Fixed-time adaptive control for Buck converters

CHEN Qiang, QIAN Ning, NAN Yu-rong<sup>†</sup>

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** A fixed-time adaptive control scheme is proposed for Buck DC/DC converters. Firstly, the fixed-time sliding mode surface and corresponding controller are developed for the system with known parameters to guarantee that the output voltage error converges to the equilibrium point within a fixed time, and the upper bound of the convergence time is independent of system initial states but determined by the control parameters. In the case that the value of some parameters including resistances and inductances is not precisely obtained under the effect of temperature and external disturbances, the adaptive update laws are designed for estimating all the unknown parameters of the Buck converters. Then, the fixed-time adaptive controller is proposed such that the output voltage error can converge to a small region around the equilibrium point within a fixed time. Simulation and experimental comparison results show the effectiveness of the proposed control scheme.

**Keywords:** fixed-time control; adaptive control; Buck converter; sliding mode control

## 0 引言

DC/DC 变换器是一种实现直流电路电压转换的电力电子设备, 其基本拓扑可以分为 Buck 变换器、Boost 变换器、Buck-Boost 变换器等. 其中 Buck 变换器又称降压变换器, 因其具有降压的特性以及结构简单、稳定性高、易于分析等特点而被广泛使用. 随着电源变换器的性能要求日益提高, 越来越多非线性控制技术被应用于 Buck 变换器, 如反步法<sup>[1]</sup>、模糊控制<sup>[2]</sup>、神经网络<sup>[3]</sup>、自适应动态规划<sup>[4]</sup>、滑模控制<sup>[5-10]</sup>等. 其中滑模控制方法具有稳定范围宽、动态响应快、鲁棒性强、控制实现简单等优点. 文献[5]将滑模控制方法应用于 Buck 变换器, 并采用 PWM 调制方法, 以降低开关频率变化的影响; 文献[6]基于扩张状态观测器和滑模控制方法, 设计了一种基于扰动补偿

的滑模控制律以提高系统抗干扰能力并实现系统渐进稳定; 文献[7-8]基于终端滑模理论设计了 Buck 变换器系统的有限时间控制器, 实现了变换器输出电压的快速跟踪控制; 文献[9-10]设计了有限时间自适应控制器, 用于解决 Buck 电路中系统不匹配干扰问题以及输出负载变化问题. 然而, 文献[7-10]中系统收敛时间上界与系统初始状态变化有关, 即当系统初始状态变化时, 其收敛时间上界也随之发生变化. 2012 年, 文献[11]提出了固定时间控制方法, 保证系统收敛时间一致有界, 且其时间上界与系统初始条件无关. 目前, 固定时间控制方法已被应用于多智能体、电力系统、航天器等诸多领域<sup>[12-20]</sup>, 但在 DC/DC 变换器控制领域尚未见报道. 此外, Buck 变换器中电阻、电感、电容受温度及外部干扰影响, 其参数值易发

收稿日期: 2018-06-21; 修回日期: 2019-04-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403343); 浙江省自然科学基金项目(LY17F030018).

责任编辑: 刘德荣.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: nyr@zjut.edu.cn.

生变化且不易准确测得,因此控制器设计需要考虑电容、电感等参数变化对控制器效果的影响。

本文针对Buck型DC/DC变换器系统,提出一种新的固定时间自适应降压控制方法.针对参数已知的Buck变换器系统,设计固定时间终端滑模面和控制器的,保证系统输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点,且其收敛时间与系统初始状态无关,仅由控制参数决定.针对Buck变换器系统参数易发生变化且不易准确测得的问题,本文进一步提出自适应参数更新律估计系统中所有未知参数,并在此基础上设计固定时间自适应控制器,保证在系统参数未知的情况下,输出电压误差能够在固定时间内收敛至平衡点附近的邻域内。

### 1 系统描述及预备知识

#### 1.1 Buck型DC/DC变换器模型描述

Buck型DC/DC变换器工作原理如图1所示。

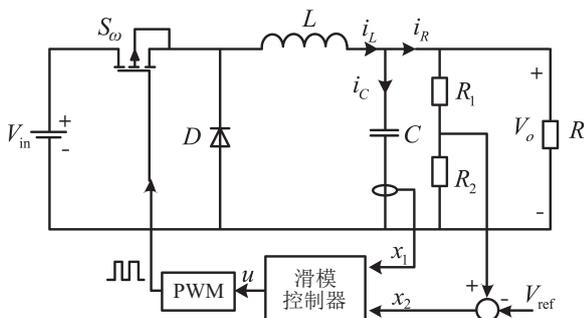


图1 Buck变换器电路图

其中:  $V_o$ 、 $V_{in}$ 、 $i_C$  分别是输出电压、输入电压和输出电容电流;  $S_w$  是MOS场效应管开关元件;  $D$  是续流二极管;  $C$  是输出电容;  $L$  是输入电感;  $R$  是负载电阻;  $u$  是控制器输出,即为MOS场效应管开关元件  $S_w$  的占空比,满足  $u \in [0, 1]$ . 如图1所示,根据开关的通断情况,Buck变换器的数学模型<sup>[5]</sup>可表示如下:

当开关导通时,可得

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} - \frac{\dot{V}_o}{R}, \quad \frac{dV_o}{dt} = \frac{i_C}{C}; \quad (1)$$

当开关截止时,可得

$$\frac{di_C}{dt} = -\frac{V_o}{L} - \frac{\dot{V}_o}{R}, \quad \frac{dV_o}{dt} = \frac{i_C}{C}. \quad (2)$$

由式(1)和(2)可知,在连续导通模式下的Buck变换器平均模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{V}_o = \frac{1}{C}i_C, \\ \dot{i}_C = \frac{uV_{in} - V_o}{L} - \frac{\dot{V}_o}{R}. \end{cases} \quad (3)$$

假设  $V_{ref}$  为期望参考输出电压,令  $x_1 = V_o - V_{ref}$  为输出电压误差,  $x_2 = i_C$  为输出电容电流,则式(3)

可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{x_2}{C}, \\ \dot{x}_2 = -\frac{x_1}{L} - \frac{x_2}{RC} - \frac{V_{ref}}{L} + \frac{V_{in}}{L}u. \end{cases} \quad (4)$$

本文控制目的是设计控制器保证系统(4)的输出电压误差  $x_1$  在固定时间内收敛。

#### 1.2 预备知识

引理1<sup>[13]</sup> 考虑如下系统:

$$\dot{y} = -l_1 \text{sig}^{m_1} y - l_2 \text{sig}^{m_2} y, \quad y(0) = y_0. \quad (5)$$

其中:  $\text{sig}^{m_1} y = \text{sign } y \cdot |y|^{m_1}$ ,  $l_1 > 0, l_2 > 0, m_1 > 1, 0 < m_2 < 1$ . 则系统(5)的平衡点是固定时间稳定,且收敛时间  $T$  满足

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{l_1} \cdot \frac{1}{m_1 - 1} + \frac{1}{l_2} \cdot \frac{1}{1 - m_2}. \quad (6)$$

引理2<sup>[19]</sup> 考虑非线性系统(5),假设存在一个李雅谱诺夫函数  $V(x)$ , 常量  $\alpha, \beta > 0, 0 < \lambda_1 < 1, \lambda_2 > 1$  以及  $0 < \eta_0 < \infty$ , 可以得到如下公式:

$$\dot{V}(x) \leq -\alpha V(x)^{\lambda_1} - \beta V(x)^{\lambda_2} + \eta_0, \quad (7)$$

则  $V(x)$  可以在固定时间内收敛到平衡点附近的邻域,且该邻域可表示为

$$y = \left\{ \lim_{t \rightarrow T} x | V(x) \leq \min \left\{ \alpha^{-1/\lambda_1} \left( \frac{\eta_0}{1 - \theta} \right)^{1/\lambda_1}, \beta^{-1/\lambda_2} \left( \frac{\eta_0}{1 - \theta} \right)^{1/\lambda_2} \right\} \right\}. \quad (8)$$

其中:  $\theta$  是一个常量,满足  $0 < \theta < 1$ . 系统状态变量收敛到邻域(8)所需时间满足如下关系:

$$T \leq \frac{1}{\theta \alpha} \cdot \frac{1}{1 - \lambda_1} + \frac{1}{\theta \beta} \cdot \frac{1}{\lambda_2 - 1}. \quad (9)$$

引理3<sup>[20]</sup> 对于任意  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m \geq 0$ , 存在如下关系成立:

$$\sum_{i=1}^m \theta_i^{\lambda_1} \geq \left( \sum_{i=1}^m \theta_i \right)^{\lambda_1}, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m \theta_i^{\lambda_2} \geq m^{1-\lambda_2} \left( \sum_{i=1}^m \theta_i \right)^{\lambda_2}. \quad (11)$$

其中:  $0 < \lambda_1 < 1, 1 < \lambda_2 < \infty$ .

### 2 固定时间控制

本节考虑Buck变换器(4)参数已知的情况,设计固定时间滑模面为

$$s = k_1 \text{sig}^{a_1} x_1 + k_2 \text{sig}^{a_2} x_1 + x_2. \quad (12)$$

其中:  $k_1, k_2, a_1, a_2$  是正常数,  $k_1 > 0, k_2 > 0, 0 < a_1 < 1, a_2 > 1$ .

由式(4)和(12)可得  $s$  导数为

$$\dot{s} = C^{-1} k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2 + C^{-1} k_2 a_2 |x_1|^{a_2-1} x_2 - \frac{x_1}{L} - \frac{x_2}{RC} - \frac{V_{ref}}{L} + \frac{V_{in}}{L}u, \quad (13)$$

则固定时间控制器  $u$  设计为

$$u = \frac{x_1}{V_{in}} + \frac{Lx_2}{V_{in}RC} + \frac{V_{ref}}{V_{in}} - \alpha \text{sig}^{\lambda_1} s - \beta \text{sig}^{\lambda_2} s - \frac{L}{V_{in}C} (\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2, \tau) + k_2 a_2 |x_1|^{a_2-1} x_2). \quad (14)$$

其中  $\tau, \alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2$  是正常数,  $0 < \lambda_1 < 1, \lambda_2 > 1$ , 且有

$$\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2, \tau) = \begin{cases} k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2, & |k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| < \tau; \\ \tau \text{sgn}(x_2), & |k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| \geq \tau. \end{cases} \quad (15)$$

饱和函数项  $\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2, \tau)$  有助于避免由  $k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2$  引起的奇异值问题,  $\tau$  是正常数.

**定理1** 针对系统(4), 设计滑模面(12)和控制器(14), 则系统输出电压误差  $x_1$  在固定时间  $T_{\max}$  内收敛到平衡点, 且收敛时间  $T$  满足

$$T \leq T_{\max} = T_1 + T_2. \quad (16)$$

其中:

$$T_1 = \frac{1}{\delta_1} \cdot \frac{1}{1 - \lambda_1} + \frac{1}{\delta_2} \cdot \frac{1}{\lambda_2 - 1}, \quad (17)$$

$$T_2 = \frac{C}{k_1} \cdot \frac{1}{1 - a_1} + \frac{C}{k_2} \cdot \frac{1}{a_2 - 1}, \quad (18)$$

且有  $\delta_1 = \alpha(2\psi)^{\frac{\lambda_1+1}{2}}, \delta_2 = \beta(2\psi)^{\frac{\lambda_2+1}{2}}, \psi = \frac{V_{in}}{L}$ .

**证明** 选取如下 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2\psi} s^2. \quad (19)$$

对式(19)求导可得

$$\dot{V}_1 = \frac{s}{\psi C} (k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2 + k_2 a_2 |x_1|^{a_2-1} x_2) + s \left( -\frac{x_1}{V_{in}} - \frac{Lx_2}{V_{in}RC} - \frac{V_{ref}}{V_{in}} + u \right). \quad (20)$$

当  $|k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| < \tau$  时, 将式(14)代入(20)可得

$$\dot{V}_1 = -\alpha |s|^{\lambda_1+1} - \beta |s|^{\lambda_2+1} = -\delta_1 V^{\frac{\lambda_1+1}{2}} - \delta_2 V^{\frac{\lambda_2+1}{2}}. \quad (21)$$

由于  $0 < (\lambda_1 + 1)/2 < 1, (\lambda_2 + 1)/2 > 1$ , 由引理1可得, 系统输出电压误差  $x_1$  可以在固定时间  $T_1$  内收敛到  $s = 0$  的滑模面上, 其中  $T_1$  满足关系式  $T_1 = \frac{1}{\delta_1} \cdot \frac{1}{1 - \lambda_1} + \frac{1}{\delta_2} \cdot \frac{1}{\lambda_2 - 1}$ .

当  $|k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| \geq \tau$  时, 由式(4)可得  $x_1(t)$  的解为

$$x_1(t) = x_1(0) + \int_0^t C^{-1} x_2(t) dt. \quad (22)$$

由式(22)可知: 当  $x_2(t) > 0$  时,  $x_1(t)$  单调递增并离开不等式  $|k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| \geq \tau$  所在区域. 当

$x_2(t) < 0$  时,  $x_1(t)$  单调递减并离开该区域. 从以上两种情况可知, 输出电压误差  $x_1$  不会停留在该区域, 且能够在有限时间内穿过该区域. 因此, 不等式  $|k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| \geq \tau$  所在区域的存在并不影响系统稳定性分析的结果. 由于系统输出电压误差  $x_1$  在该区域停留时间很短, 系统收敛时间估计上界仍可用式(16)表示. 为保证  $s = 0$  不在该区域内,  $\tau$  的取值应满足如下关系:

$$\tau > |k_1 a_1 |x_{1\max}|^{a_1-1} (k_1 \text{sig}^{a_1} x_{1\max} + k_2 \text{sig}^{a_2} x_{1\max})|. \quad (23)$$

其中:  $|x_1| < x_{1\max}, x_{1\max}$  为输出电压误差上界.

当到达滑模面  $s = 0$  时, 系统运动方程可表示为

$$x_2 = -k_1 \text{sig}^{a_1} x_1 - k_2 \text{sig}^{a_2} x_1. \quad (24)$$

由式(4)中的  $\dot{x}_1 = C^{-1} x_2$  可得

$$\dot{x}_1 = -k_1 C^{-1} \text{sig}^{a_1} x_1 - k_2 C^{-1} \text{sig}^{a_2} x_1. \quad (25)$$

由引理1可得, 系统输出电压误差  $x_1$  可以在固定时间  $T_2$  内从滑模面  $s = 0$  收敛到平衡点, 其中收敛时间  $T_2$  满足关系式  $T_2 = \frac{C}{k_1} \cdot \frac{1}{1 - a_1} + \frac{C}{k_2} \cdot \frac{1}{a_2 - 1}$ .

综上, 在控制器(14)的作用下, 系统输出电压误差  $x_1$  在固定时间  $T_{\max}$  内收敛到平衡点, 其收敛时间  $T$  满足  $T \leq T_{\max} = T_1 + T_2$ .  $\square$

### 3 固定时间自适应控制

本节考虑 Buck 变换器(4)参数未知的情况, 设计自适应参数更新律在线估计所有未知参数, 并根据参数估计值设计固定时间自适应控制器, 其中固定时间滑模面设计如式(12)所示. 根据式(14), 定义待估计参数  $c_1, c_2, c_3$  为

$$\begin{cases} c_1 = 1/V_{in}, \\ c_2 = L/(V_{in}RC), \\ c_3 = L/(V_{in}C), \end{cases} \quad (26)$$

则固定时间自适应控制器设计为

$$u = \hat{c}_1(x_1 + V_{ref}) + \hat{c}_2 x_2 - \alpha \text{sig}^{\lambda_1} s - \beta \text{sig}^{\lambda_2} s - \hat{c}_3 (\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2, \tau) + k_2 a_2 |x_1|^{a_2-1} x_2). \quad (27)$$

其中:  $\hat{c}_i$  为  $c_i$  的估计值,  $i = 1, 2, 3$ , 且自适应参数更新律设计为

$$\begin{cases} \dot{\hat{c}}_1 = -\gamma_1 s(x_1 + V_{ref}), \\ \dot{\hat{c}}_2 = -\gamma_2 s x_2, \\ \dot{\hat{c}}_3 = \gamma_3 s (\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2, \tau) + k_2 a_2 |x_1|^{a_2-1} x_2). \end{cases} \quad (28)$$

这里:  $\gamma_i > 0, i = 1, 2, 3$ .

**定理2** 针对Buck变换器系统(4),设计滑模面(12)、控制器(27)及参数自适应更新律(28),则系统输出电压误差 $x_1$ 在固定时间 $T'_{\max}$ 内收敛至平衡点附近的邻域内,且收敛时间 $T'$ 满足

$$T' \leq T'_{\max} = T'_1 + T'_2. \quad (29)$$

其中:

$$T'_1 = \frac{2}{\theta\delta_1} \cdot \frac{1}{1-\lambda_1} + \frac{2\lambda_2}{\theta\delta_2} \cdot \frac{1}{\lambda_2-1}, \quad (30)$$

$$T'_2 = \frac{C}{k_1\sigma} \cdot \frac{1}{1-a_1} + \frac{C}{k_2\sigma} \cdot \frac{1}{a_2-1}, \quad (31)$$

且有 $\sigma, \theta$ 是常数,满足 $0 < \sigma < 1, 0 < \theta < 1$ .

**证明** 选取如下Lyapunov函数:

$$V_2 = \frac{1}{2\psi} s^2 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{c}_i^2, \quad (32)$$

其中 $\tilde{c}_i = c_i - \hat{c}_i$ 是 $c_i$ 的估计误差( $i = 1, 2, 3$ ).

对 $V_2$ 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{1}{\psi} s\dot{s} - \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \tilde{c}_i \dot{\tilde{c}}_i = \\ &- c_1 s(x_1 + V_{\text{ref}}) - c_2 s x_2 + u s - \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \tilde{c}_i \dot{\tilde{c}}_i + \\ &c_3 s(k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2 + k_2 a_2 |x_1|^{a_2-1} x_2). \end{aligned} \quad (33)$$

当 $|k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| < \tau$ 时,将控制器(27)代入(33)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\tilde{c}_1(s(x_1 + V_{\text{ref}}) + \gamma_1^{-1} \dot{\tilde{c}}_1) - \tilde{c}_2(s x_2 + \gamma_2^{-1} \dot{\tilde{c}}_2) + \\ &\tilde{c}_3((s(k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2 + k_2 a_2 |x_1|^{a_2-1} x_2) - \\ &\gamma_3^{-1} \dot{\tilde{c}}_3) - \alpha |s|^{\lambda_1+1} - \beta |s|^{\lambda_2+1}). \end{aligned} \quad (34)$$

将式(28)代入(34)可得

$$\dot{V}_2 = -\alpha |s|^{\lambda_1+1} - \beta |s|^{\lambda_2+1} \leq 0. \quad (35)$$

由式(35)可以看出, $s$ 和 $\tilde{c}_i$ 有界且存在正常数 $\Delta_i$ ,满足 $|\tilde{c}_i| \leq \Delta_i, i = 1, 2, 3$ .因此,式(35)可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\delta_1 \left| \frac{1}{2\psi} s^2 \right|^{\frac{\lambda_1+1}{2}} - \delta_2 \left| \frac{1}{2\psi} s^2 \right|^{\frac{\lambda_2+1}{2}} - \\ &\sum_{i=1}^3 (\eta_i \tilde{c}_i^2)^{\frac{\lambda_1+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 (\eta_i \tilde{c}_i^2)^{\frac{\lambda_1+1}{2}} - \\ &\sum_{i=1}^3 (\eta_i \tilde{c}_i^2)^{\frac{\lambda_2+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 (\eta_i \tilde{c}_i^2)^{\frac{\lambda_2+1}{2}}, \end{aligned} \quad (36)$$

其中 $\eta_i$ 为正常数( $i = 1, 2, 3$ ).

令 $\gamma_i \geq \max\left(\frac{\delta_1^{\frac{1}{1+\lambda_1}}}{2\eta_i}, \frac{\delta_2^{\frac{1}{1+\lambda_2}}}{2\eta_i}\right)$ ,则式(36)改写为

$$\dot{V}_2 \leq -\delta_1 \left( \left| \frac{1}{2\psi} s^2 \right|^{\frac{\lambda_1+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{c}_i^2 \right)^{\frac{\lambda_1+1}{2}} \right) -$$

$$\begin{aligned} &\delta_2 \left( \left| \frac{1}{2\psi} s^2 \right|^{\frac{\lambda_2+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{c}_i^2 \right)^{\frac{\lambda_2+1}{2}} \right) + \\ &\sum_{i=1}^3 (\eta_i \tilde{c}_i^2)^{\frac{\lambda_1+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 (\eta_i \tilde{c}_i^2)^{\frac{\lambda_2+1}{2}}. \end{aligned} \quad (37)$$

由引理3可知,式(37)可改写为

$$\dot{V}_2 \leq -\delta_1 V_2^{\frac{\lambda_1+1}{2}} - 4^{\frac{1-\lambda_2}{2}} \delta_2 V_2^{\frac{\lambda_2+1}{2}} + \eta_0, \quad (38)$$

$$\text{其中 } \eta_0 = \sum_{i=1}^3 (\eta_i \Delta_i^2)^{\frac{\lambda_1+1}{2}} + \sum_{i=1}^3 (\eta_i \Delta_i^2)^{\frac{\lambda_2+1}{2}}.$$

由引理2可知,输出电压误差 $x_1$ 可以在固定时间 $T_1$ 内收敛至滑模面 $s = 0$ 附近的邻域 $D$ 内,其中

$$D = \left\{ \lim_{t \rightarrow T_2} s \mid |s| \leq \Phi = \min(C_1, C_2) \right\}. \quad (39)$$

其中: $C_1 = \sqrt{2\psi} \left( \frac{4^{\frac{\lambda_2-1}{2}} \eta_0}{(1-\theta)\delta_2} \right)^{\frac{1}{\lambda_2+1}}$ , $\Phi$ 是正常数, $C_2 = \sqrt{2\psi} \left( \frac{\eta_0}{(1-\theta)\delta_1} \right)^{\frac{1}{\lambda_1+1}}$ .

当 $|k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| \geq \tau$ 时,与定理1的分析类似,由式(22)可知,系统输出电压误差 $x_1$ 不会停留在 $|k_1 a_1 |x_1|^{a_1-1} x_2| \geq \tau$ 所在区域内且能够在有限时间内穿过该区域.因此,该区域的存在并不影响系统稳定性分析的结果.由于系统输出电压误差 $x_1$ 在该区域停留时间很短,系统收敛时间上界仍可用式(29)表示.

由式(4)和(39)可知,当到达滑模面 $s = 0$ 附近的邻域时,系统运动方程为

$$\dot{x}_1 \leq C^{-1}(-k_1 \text{sig}^{a_1} x_1 - k_2 \text{sig}^{a_2} x_1 + \Phi). \quad (40)$$

由引理2可知,输出电压误差 $x_1$ 在固定时间 $T'_2$ 内从滑模面 $s = 0$ 收敛到平衡点附近的邻域,即

$$M = \left\{ \lim_{t \rightarrow T'} (x_1, x_2) \mid |x_1| \leq \Omega, |x_2| \leq \Omega_1 \right\}. \quad (41)$$

其中

$$\Omega_1 \leq \Phi + k_1 \Omega^{a_1} + k_2 \Omega^{a_2},$$

$$\Omega = \min \left( \left( \frac{\Phi}{k_1(1-\sigma)} \right)^{\frac{1}{a_1}}, \left( \frac{\Phi}{k_2(1-\sigma)} \right)^{\frac{1}{a_2}} \right).$$

综上,在控制器(27)和自适应律(28)作用下,系统输出电压误差 $x_1$ 在固定时间 $T'_{\max}$ 内收敛到平衡点附近的邻域内,即输出电压 $V_o$ 在固定时间内收敛到期望参考输出电压 $V_{\text{ref}}$ 附近的邻域内,且其收敛时间 $T'$ 满足 $T' \leq T'_{\max} = T'_1 + T'_2$ .  $\square$

## 4 仿真分析

为了验证本文方法的有效性,针对Buck变换器系统(4)参数已知和未知两种情况,利用Matlab/Simulink仿真软件分别进行4种方法的对比仿真.

针对参数已知情况,方法1表示本文提出的固定时间控制方法,包括滑模面(12)和控制器(14).方法2表示有限时间控制方法,其中滑模面为

$$s = k_1 \text{sig}^{\alpha_1} x_1 + k_2 x_1 + x_2, \quad (42)$$

控制器设计为

$$u = \frac{x_1}{V_{in}} + \frac{Lx_2}{V_{in}RC} + \frac{V_{ref}}{V_{in}} - \alpha \text{sig}^{\lambda_1} s - \beta s - \frac{L}{V_{in}C} (\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{\alpha_1-1} x_2, \tau) + k_2 x_2). \quad (43)$$

$$(44)$$

针对系统(4)参数未知情况,方法3表示本文提出的固定时间自适应控制方法,包括滑模面(12)、控制器(27)和自适应更新律(28).方法4表示有限时间自适应控制方法,其中滑模面如式(43)所示,控制器设计为

$$u = \hat{c}_1(x_1 + V_{ref}) + \hat{c}_2 x_2 - \alpha \text{sig}^{\lambda_1} s - \beta s - \hat{c}_3 (\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{\alpha_1-1} x_2, \tau) + k_2 x_2), \quad (45)$$

自适应更新律设计为

$$\begin{cases} \dot{\hat{c}}_1 = -\gamma_1(x_1 + V_{ref})s, \\ \dot{\hat{c}}_2 = -\gamma_2 x_2 s, \\ \dot{\hat{c}}_3 = \gamma_3 (\text{sat}(k_1 a_1 |x_1|^{\alpha_1-1} x_2, \tau) + k_2 x_2)s. \end{cases} \quad (46)$$

### 4.1 系统参数设置

本节给出两组仿真结果,各组仿真中系统状态变量初始值如表1所示,Buck变换器模型参数如表2所示,控制参数如表3所示.

为了得到最优的控制效果,表3中的控制参数均采用试错法获取.仿真结果如图2~图6所示.

表1 系统状态变量初始值

描述	$x_1(0)$	$x_2(0)$	$c_1(0)$	$c_2(0)$	$c_3(0)$
初值I	-5	0	-	-	-
初值II	-9	0	-	-	-
初值III	-5	0	0.01	0.008	0.2

表2 Buck变换器系统模型参数

描述	参数	数值
输入电压/V	$V_{min}$	17
参考输出电压/V	$V_{ref}$	5
电阻/ $\Omega$	$R$	10
电感/ $\mu\text{H}$	$L$	100
电容/ $\mu\text{F}$	$C$	1000

表3 控制参数

控制方法	控制参数
方法1	$a_1 = 7/9, a_2 = 1.7, k_1 = k_2 = 0.1, \lambda_1 = 0.6,$ $\lambda_2 = 1.7, \alpha = \beta = 0.02$
方法2	控制参数 $a_1, k_1, k_2, \lambda_1, \alpha, \beta$ 均与方法1相同
方法3	$\gamma_1 = 8, \gamma_2 = 0.9, \gamma_3 = 99, \tau = 0.2$ , 其余控制参数 $a_1, a_2, k_1, k_2, \lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta$ 均与方法1相同
方法4	控制参数 $a_1, a_2, k_1, k_2, \lambda_1, \lambda_2, \alpha, \beta,$ $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \tau$ 均与方法3相同

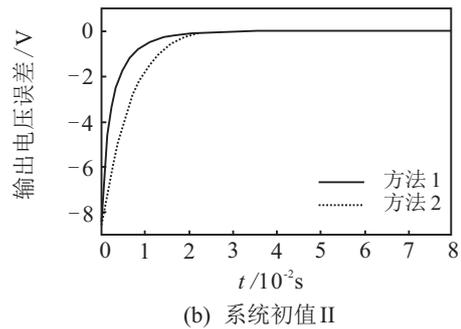
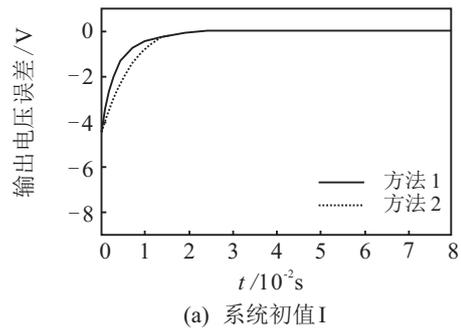


图2 输出电压误差  $x_1$

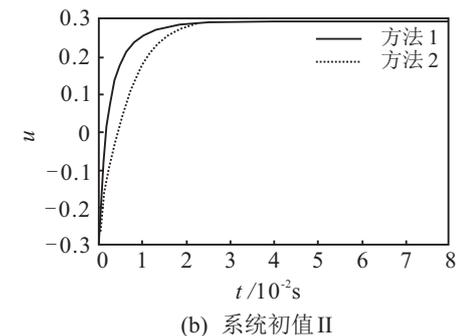
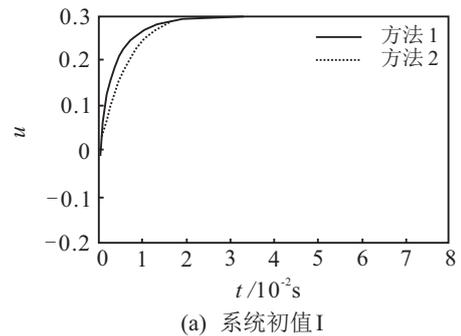


图3 控制器输出  $u$

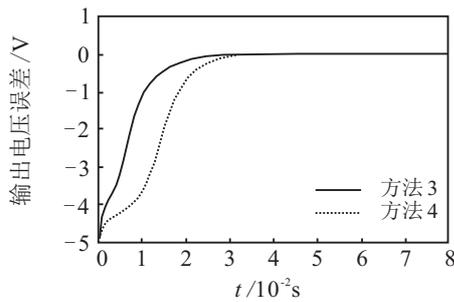


图4 输出电压误差  $x_1$ (方法3和方法4)

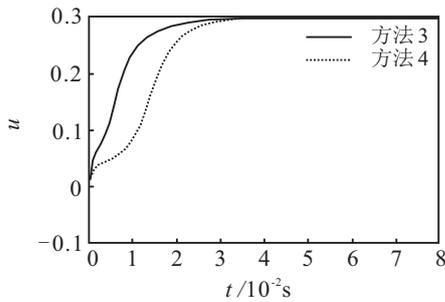
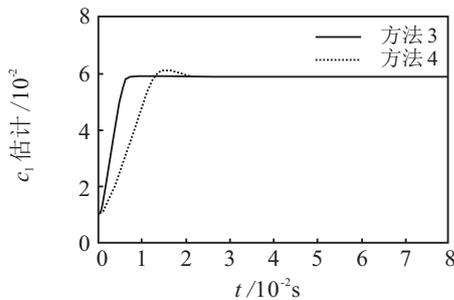
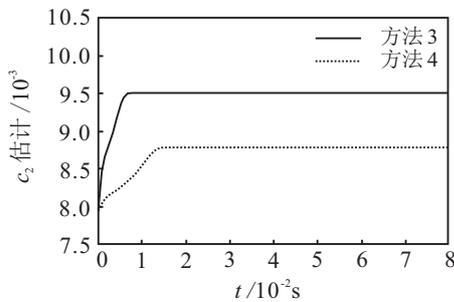


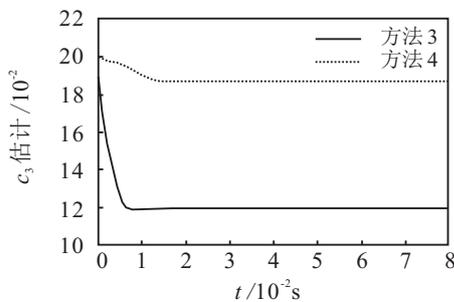
图5 控制器输出  $u$ (方法3和方法4)



(a) 估计参数  $c_1$



(b) 估计参数  $c_2$



(c) 估计参数  $c_3$

图6 参数估计

4.2 仿真实例1: Buck变换器(4)参数已知

仿真实例1为考虑Buck变换器(4)参数  $V_{in}$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $C$  均已知的前提下,方法1与方法2的仿真对比,如

图2和图3所示. 由图2可知,当系统初始状态由初值I变为系统初值II时,在方法1的作用下,系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间均在0.02s左右,而在方法2作用下,系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间则从0.02s增加到0.025s. 由图3可见,当系统初始状态由初值I变为系统初值II时,在方法1的作用下,系统控制器输出  $u$  收敛时间均在0.02s左右,而方法2中系统控制器输出  $u$  收敛时间则由0.02s变到0.025s.

由图2和图3可见,当系统初始状态变化时,相对于方法2,方法1中系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间基本不变. 此外,由式(16)可得,方法1中系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间估计上界为0.083s,而当系统初始状态变化时,在方法1控制下,系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间均在0.083s内,可见,方法1中输出电压误差  $x_1$  能在固定时间内收敛到平衡点,且其收敛时间上界与系统初始状态无关.

4.3 仿真实例2: Buck变换器(4)参数未知

仿真实例2为考虑Buck变换器(4)参数  $V_{in}$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $C$  均未知的情况下,方法3与方法4在系统初值III条件下的仿真对比,如图4~图6所示. 由图4可见,在方法3的作用下,系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间为0.028s,而方法4中系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间则为0.032s. 由图5可知,方法3中控制器输出  $u$  收敛时间为0.028s,而方法4中控制器输出  $u$  为0.032s. 由式(26)可知,  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  分别为0.0588,  $5.88 \times 10^{-4}$ , 0.00588. 从图6可知,方法3中系统参数估计值  $\hat{c}_1$ 、 $\hat{c}_2$ 、 $\hat{c}_3$  分别收敛到0.058, 0.0095, 0.12, 其收敛时间均为0.008s,而方法4中系统参数估计值分别收敛到0.058, 0.0087, 0.184, 其收敛时间均为0.015s. 可见,方法3中系统参数估计值误差更小.

由图4~图6可知,相比于方法4,在方法3作用下,系统输出电压误差  $x_1$  收敛速度更快. 由式(29)可得,方法3作用下的系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间估计上界为0.11s,而方法3中系统输出电压误差  $x_1$  收敛时间在0.11s内,且仅使用控制参数即可实现系统输出电压的快速收敛. 可见,方法3可以在系统参数未知的情况下,保证系统输出电压误差  $x_1$  在固定时间内收敛至平衡点附近的邻域内.

5 实验分析

如图7所示,Buck变换器的实验测试系统采用DSP28335作为控制芯片,开关频率设置为50kHz,且系统参数如表2所示. 图8和图9给出了在负载电流发生突变的情况下,本文提出的固定时间自适应控

制方法(即方法3)与传统PI控制算法的实验对比结果,其中图8表示负载电流从0.5 A突然减小到0 A,图9表示从0 A突然增加到0.5 A,图8和图9中局部放大图坐标刻度均为500 mV/div, 2 ms/div.

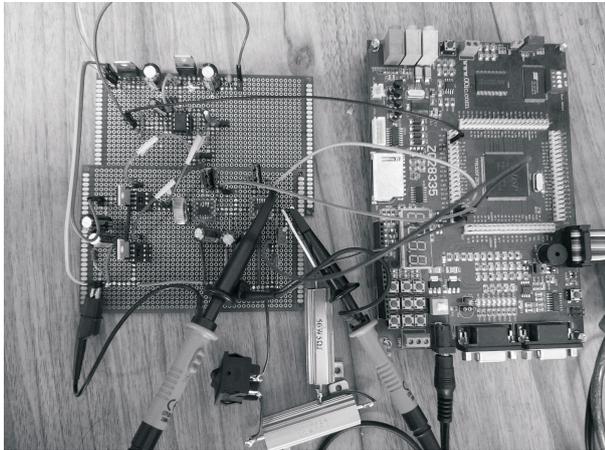
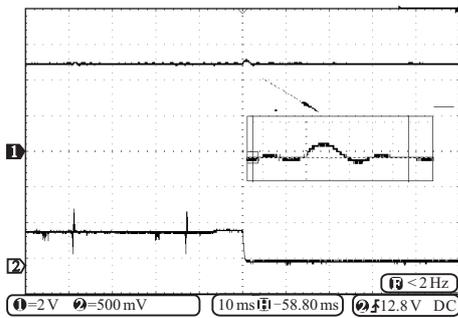
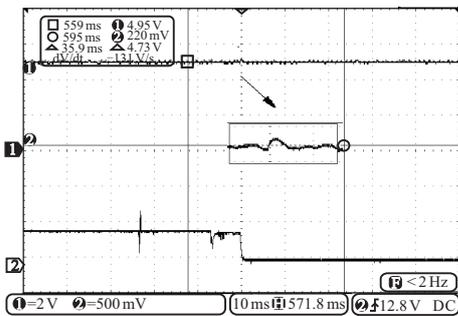


图7 Buck变换器的实验测试系统



(a) PID

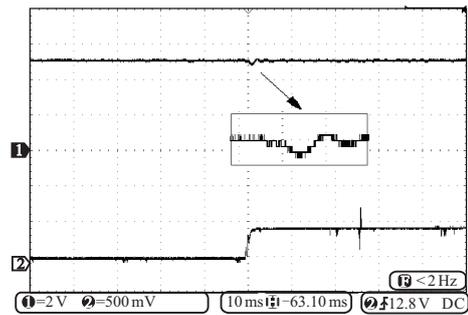


(b) 方法3

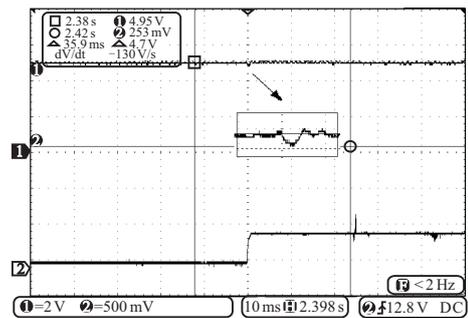
图8 负载突减时输出电压(上)和电流(下)

控制器设计中,PI参数设置为 $k_p = 0.05, k_i = 0.05$ ,本文提出的方法3的控制参数设置为 $a_1 = 7/9, a_2 = 1.7, k_1 = k_2 = 0.2, \lambda_1 = 0.6, \lambda_2 = 1.7, \alpha = \beta = 0.0035$ .如图8所示,当负载电流从0.5 A减小到0 A时,PI控制下的Buck变换器瞬态响应时间和输出电压超调量分别为2 ms和200 mV,而本文提出的方法3则分别为1 ms和180 mV.

如图9所示,当负载电流从0 A增加到0.5 A时,方法3控制下的Buck变换器瞬态响应时间为1 ms左右,输出电压超调量为200 mV左右,而在PI控制控制下



(a) PID



(b) 方法3

图9 负载突增时输出电压(上)与电流(下)

的Buck变换器瞬态响应时间和输出电压超调量分别为2 ms和300 mV.因此,上述实验结果对比说明,相对于PI控制算法,本文提出的固定时间自适应控制方法收敛速度较快,瞬态电压波动较小,且抗负载变化能力更强.同时,当系统参数发生变化时,本文方法具有更强的鲁棒性.

## 6 结论

本文针对Buck型变换器,提出了一种固定时间自适应控制方法.针对系统参数已知的情况,设计固定时间终端滑模面和控制律,保证输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点且其收敛时间上界与系统初始状态无关.设计自适应参数更新律在线估计系统所有未知参数,并在此基础上设计固定时间自适应控制方法,保证在系统参数未知的情况下,输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点附近的邻域内.仿真与实验对比结果验证了所提出的方法的有效性.

## 参考文献(References)

- [1] Alvarez-Ramirez J, Espinosa-Pérez G, Noriega-Pineda D. Current-mode control of DC-DC power converters: a backstepping approach[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2003, 13(5): 421-442.
- [2] 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.
- [3] Chen Q, Ren X, Oliver J A. Identifier-based adaptive neural dynamic surface control for uncertain

- DC-DC Buck converter system with input constraint[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(4): 1871-1883.
- [4] 李健, 沈艳军, 刘允刚, 等. Buck型变换器输出跟踪的自适应动态规划算法[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(3): 393-400.  
(Li J, Shen Y J, Liu Y G, et al. Adaptive dynamic programming algorithms for the output tracking of Buck converter systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(3): 393-400.)
- [5] 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.
- [6] Wang J, Li S, Yang J, et al. Extended state observer-based sliding mode control for PWM-based DC-DC Buck power converter systems with mismatched disturbances[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2015, 9(4): 579-586.
- [7] Komurcugil H. Adaptive terminal sliding-mode control strategy for DC-DC Buck converters[J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(6): 673-681.
- [8] Komurcugil H. Non-singular terminal sliding-mode control of DC-DC Buck converters[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(3): 321-332.
- [9] Wang J, Li S, Yang J, 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.
- [10] 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 C, Cheng Y Y, Du H B, et al. An adaptive finite-time control algorithm for Buck converter systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(2): 315-320.)
- [11] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [12] 李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 498-502.  
(Li H J, Cai Y L. Sliding mode control with double power reaching law[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 498-502.)
- [13] Li H, Cai Y. On SFTSM control with fixed-time convergence[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2017, 11(6): 766-773.
- [14] Zuo Z. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of non-linear systems[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2015, 9(4): 545-552.
- [15] Ni J, Liu L, Liu C, et al. Fast fixed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application to chaos suppression in power system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 64(2): 151-155.
- [16] Zhao L, Yu J, Lin C, et al. Distributed adaptive fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent systems using modified terminal sliding mode[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 312(11): 23-35.
- [17] Zuo Z, Han Q L, Ning B, et al. An overview of recent advances in fixed—Time cooperative control of multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(6): 2322-2334.
- [18] Chen Q, Xie S, Sun M, et al. Adaptive non-singular fixed-time attitude stabilization of uncertain spacecraft[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 2937-2950.
- [19] Jiang B, Hu Q, Friswell M I. Fixed-time attitude control for rigid spacecraft with actuator saturation and faults[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(5): 1892-1898.
- [20] Zuo Z. Nonsingular fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent networks[J]. *Automatica*, 2015, 54(4): 305-309.

### 作者简介

陈强(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事非线性伺服系统建模与控制等研究, E-mail: sdnjchq@zjut.edu.cn;

钱宁(1994—), 男, 硕士生, 从事电力电子技术的研究, E-mail: 1194045437@qq.com;

南余荣(1966—), 男, 教授, 博士, 从事电机控制、电力电子及其应用等研究, E-mail: nyr@zjut.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)