

Buck 型变换器非奇异固定时间滑模控制

钱宁, 陈强, 杨宇, 南余荣

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对存在参数不确定性的 Buck 变换器系统, 提出一种非奇异固定时间滑模控制方法; 首先, 设计非奇异固定时间滑模面, 并基于该滑模面设计固定时间控制器, 保证系统输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点的邻域内, 且其收敛时间上界与系统初始状态无关; 其次, 设计自适应律估计系统不确定干扰上界, 有效抑制不确定干扰对系统的影响, 该方法无需干扰上界的先验知识; 最后, 仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: Buck 型变换器; 非奇异终端滑模; 自适应控制; 固定时间控制

Non-singular Fixed Time Sliding Mode Control of Buck Converters

Qian Ning, Chen Qiang, Yang Yu, Nan Yurong

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

Abstract: In this paper, a non-singular fixed-time sliding mode control method is proposed for buck converters with parametric uncertainties. Firstly, the non-singular fixed-time sliding surface is designed, and a fixed time controller is investigated based on the sliding surface to ensure that the system output voltage error converges to the neighborhood near the equilibrium point in a fixed time, and the upper bound of convergence time is independent of system initial states. Then, the upper bound of the disturbance is estimated by an adaptive law to suppress the influence of the uncertainties on the system, and the estimation method does not need the prior knowledge of the upper bound. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation results.

Keywords: buck converter; non-singular terminal sliding mode; adaptive control; fixed-time control

0 引言

DC/DC 变换器广泛应用于需要直流电压变化或供电的直流设备, 比如, 工业电子设备, 通信设备和直流电机驱动器等。Buck 型降压变换器是 DC/DC 变换器的主要拓扑之一, 具有结构简单, 稳定性高, 易于分析等优点, 常用于将需要高直流输入电压转换为低直流输出电压的场合。由于 Buck 型降压变换器是非线性时变系统, 因此高性能控制策略的设计通常是一个具有挑战性的问题。目前, 已有不少非线性控制方法应用于 Buck 变换器, 如滑模控制、神经网络控制、模糊控制^[1-3]。在众多方法中, 滑模控制因其鲁棒性好, 稳定性高, 且易于实现等优点受到了广泛关注。文献 [1] 设计了基于滑模控制理论的反馈神经网络控制器用于 DC/DC 变换器的输出电压控制。文献 [2] 设计了一种实用的滑模控制器并应用于 Buck 变换器。针对满足无源性的 DC/DC 变换器, 文献 [4] 设计了一种全局滑模控制策略, 减弱了滑模控制器的固有抖振现象, 提高了

Buck 变换器的系统性能。文献 [5] 提出了一种基于 super-twisting 微分器 (STD) 的滑模控制器, 仅需获取输出电压值即可实现 Buck 变换器的稳压控制, 无需额外设计电流反馈电路。由于传统滑模在趋近运动阶段耗时较长, 且存在严重的抖振现象, 文献 [6] 提出了一种新型趋近律控制方法, 有效缩短了滑模控制中趋近运动所需时间, 并抑制了传统滑模控制器的固有抖振现象。然而, 普通线性滑模只能保证系统状态变量在无限时间内无限接近平衡点。因此, 为获得更好的跟踪性能, 近几年来, 在开关电源领域, 已有不少文献基于终端滑模理论设计了有限时间控制算法以保证系统状态变量在有限时间内可以收敛到平衡点。文献 [7] 基于终端滑模理论设计了有限时间滑模控制器, 实现了 Buck 变换器输出电压的快速收敛。同时, 文献 [8-9] 针对 Buck 型降压变换器中存在的不匹配干扰和负载突变问题, 设计了自适应有限时间控制器, 提高了系统的鲁棒性。文献 [7-9] 中有限时间控制器均可保证 Buck 变换器的输出电压误差在有限时间内收敛到平衡点, 但其收敛时间上界与系统状态变量初始值有关, 即系统收敛时间上界随系统状态变量初始值的变化而变化, 无法获取准确的系统状态变量收敛时间上界值。因此, 针对有限时间控制算法存在的问题, 文献 [10] 首次提出了固定时间控制理论, 保证系统状态变量能在固定时间内从任意初始位置收敛到平衡点, 其收敛时间上界不再依赖系统状态变量初始值而仅与控制参数有关。目前, 固定时间控制方法已在电力系统、航空航天、多智能体等多个领域得到了应用^[11-14]。

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-12。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403343); 浙江省自然科学基金资助项目(LY17F030018)。

作者简介: 钱宁(1994-), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事电力电子技术方向的研究。

陈强(1984-), 男, 山东德州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事非线性伺服系统建模与控制方向的研究。

南余荣(1966-), 男, 浙江乐清人, 教授, 博士生导师, 主要从事电力传动和电机控制方向的研究。

在实际电路运行时, Buck型变换器中的电感、电阻、电容等系统参数可能会受到温度等不确定的环境因素的影响而发生变化。上述文献中大多需要已知系统模型的相关参数,而对于系统存在参数不确定的情况研究较少。

针对存在参数不确定的 Buck 变换器系统,提出了一种非奇异固定时间滑模控制方法。首先,设计非奇异终端滑模面及固定时间控制器,保证系统输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点的邻域内,且其收敛时间上界与系统初始状态无关,仅与控制参数有关。其次,设计自适应更新律对系统的不确定干扰上界进行在线估计,从而抑制不确定项干扰对系统的影响。最后,通过李雅普诺夫定理分析 Buck 变换器系统输出电压误差的收敛性能。

1 模型描述

Buck 型降压变换器工作原理如图 1 所示。

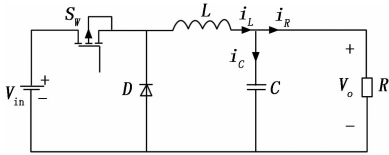


图 1 Buck 电路原理图

其中: i_C 为电容电流, V_o 为输出电压, V_m 为输入电压, D 是续流二极管, R 是输出负载电阻, S_w 是功率开关管, C 为电路输出电容, L 为功率电感, u 是控制器输入, 即为开关管 S_w 的占空比, 满足 $u \in [0, 1]$ 。Buck 型降压变换器存在以下两种工作状态: 1) 当功率开关管 S_w 导通时, 续流二极管 D 反向截止, 输出负载电阻 R 由输入电源供电, 同时功率电感 L 处于充电状态, 电感电流 i_L 随着时间以 $(V_i - V_o)/L$ 速率增大。当电感电流 i_L 比输出电流平均值 I_o 大时, 输出电容 C 充电, 吸收能量; 2) 当功率开关管 S_w 截止时, 续流二极管 D 导通, 输入电源与输出负载电阻 R 之间的回路被断开, 而由于功率电感 L 的存在, 电感电流 i_L 不会发生突变, 因此功率电感 L —续流二极管 D —输出电阻 R 构成电流回路, 功率电感 L 通过该回路向输出端负载电阻 R 输送能量; 此时电感电流 i_L 以 V_o/L 速率减小, 在当电感电流 i_L 大于或等于输出平均电流 I_o 时, 输出电容 C 充电, 吸收电感释放的部分能量; 当电感电流 i_L 小于输出平均电流 I_o 时, 输出电容 C 开始放电, 为负载电阻 R 提供部分能量。Buck 型降压变换器通过调节功率开关占空比实现输出电压收敛到参考电压, 并保持稳定。

选取 $x_1 = V_o - V_{ref}$ 为 Buck 型降压变换器系统输出电压误差, $x_2 = i_C$ 为输出电容电流, V_{ref} 为参考输出电压; 在连续导通模式下, Buck 变换器系统的状态空间模型可得如下^[2]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = C^{-1}x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{x_1}{L} - \frac{x_2}{RC} - \frac{V_{ref}}{L} + \frac{V_m}{L}u. \end{cases} \quad (1)$$

本文的控制目标是设计控制器实现 Buck 变换器输出电压误差 x_1 在固定时间内收敛到平衡点的邻域, 并通过扰动上界的自适应估计, 有效抑制不确定干扰对系统的影响,

提高其控制性能。

2 固定时间自适应控制

2.1 控制器设计

针对存在参数不确定性的 Buck 型降压变换器系统, 构造非奇异固定时间滑模面, 并在此基础上设计固定时间滑模控制器, 保证系统输出电压误差能在固定时间内收敛到平衡点的邻域内, 且其收敛时间上界仅与系统控制参数有关。设计非奇异固定时间滑模面如下:

$$s = x_1 + (\kappa x_2)^{q_1/p_1} \quad (2)$$

其中: $\kappa = (\alpha_1 x_1^{m_1/n_1 - p_1/q_1} + \beta_1)^{-1} \geq 0$, m_1, n_1, q_1, p_1 为正奇数, $m_1/n_1 - p_1/q_1 > 1$, $1 < q_1/p_1 < 2$, α_1, β_1 为正常数, $\alpha_1 > 0, \beta_1 > 0$ 。

根据式 (1) 和式 (2) 可知, 滑模面 s 的时间导数为:

$$\begin{aligned} \dot{s} = & C^{-1}x_2 + \varphi(\kappa(-\frac{x_1}{L} - \frac{x_2}{RC} - \frac{V_{ref}}{L} + \frac{V_m}{L}u) - \\ & C^{-1}\alpha_1(m_1/n_1 - p_1/q_1)x_1^{\frac{m_1}{n_1} - \frac{p_1}{q_1} - 1}x_2^2\kappa^2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\varphi = q_1 p_1^{-1} (\kappa x_2)^{q_1/p_1 - 1} \geq 0$ 。

在电路设计过程中, 由于电容、电感、电阻等电路元件的测量值与真实值存在误差, 因此 Buck 降压变换器中存在不确定项干扰 $\rho(x_1, x_2)$, 并且该不确定干扰 $\rho(x_1, x_2)$ 满足如下关系式:

$$\begin{aligned} \rho(x_1, x_2) = & -\kappa\Delta F(x_1, x_2) - \Delta M(x_1, x_2) \leq \\ & \rho_1 + \rho_2 |x_1| + \rho_3 |x_2|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\Delta M(x_1, x_2) = M(x_1, x_2) - M_o(x_1, x_2)$, $\Delta F(x_1, x_2) = F(x_1, x_2) - F_o(x_1, x_2)$, $\varphi = V_m/L$, $H(x_1, x_2) = \alpha_1(\frac{m_1}{n_1} - \frac{p_1}{q_1})x_1^{\frac{m_1}{n_1} - \frac{p_1}{q_1} - 1}x_2^2\kappa^2 - \frac{p_1}{q_1}\kappa^{1 - \frac{p_1}{q_1}}x_2^{2 - \frac{p_1}{q_1}}$, $F_o(x_1, x_2) = (x_1 + V_{ref})/V_m + (L_o x_2)/(V_m R_o C_o)$, $F(x_1, x_2) = (x_1 + V_{ref})/V_m + (L x_2)/(V_m R C)$, $M_o(x_1, x_2) = (H(x_1, x_2) L_o)/(V_m C_o)$, $M(x_1, x_2) = (\varphi C)^{-1} H(x_1, x_2)$, R_o, L_o, C_o 分别为输出电阻真值、功率电感真值及输出电容真值, ρ_i 为正常数, $i = 1, 2, 3$ 。

根据式 (1) 与式 (3) 可得, 固定时间滑模控制器 u 设计为:

$$\begin{aligned} u = & \kappa^{-1}M_o(x_1, x_2) + F_o(x_1, x_2) - \\ & \kappa^{-1}(\alpha_2 s^{m_2/n_2} + \beta_2 s^{p_2/q_2}) - \kappa^{-1}\hat{\rho} \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\hat{\rho} = \hat{\rho}_1 + \hat{\rho}_2 |x_1| + \hat{\rho}_3 |x_2|^2$, $\hat{\rho}$ 为 $\rho(x_1, x_2)$ 上界的估计值, m_2, n_2, p_2, q_2 均为正奇数, $m_2/n_2 > 1, 0 < p_2/q_2 < 1$, α_2, β_2 为正常数, $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数。针对系统不确定干扰, 设计自适应更新律为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\rho}}_1 = \varphi(\gamma_1 |s| - \eta_1 \hat{\rho}_1) \\ \dot{\hat{\rho}}_2 = \varphi(\gamma_2 |x_1| |s| - \eta_2 \hat{\rho}_2) \\ \dot{\hat{\rho}}_3 = \varphi(\gamma_3 |x_2|^2 |s| - \eta_3 \hat{\rho}_3) \end{cases} \quad (6)$$

其中: γ_i, η_i 为正常数。

2.2 稳定性证明

引理 1^[13] 对于任意实数 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m \geq 0$, 有以下不等式成立:

$$\sum_{i=1}^m \xi_i^{l_1} \geq (\sum_{i=1}^m \xi_i)^{l_1} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m \xi_i^{l_2} \geq m^{1-l_2} \sum_{i=1}^m (\xi_i)^{l_2} \quad (8)$$

其中: $0 < l_1 \leq 1, 1 < l_2 < \infty, m$ 为正整数。

引理 2^[14]: 对于任意正常数 $\delta > 1/2$, 有以下不等式成立:

$$\tilde{a} \leq \frac{-(2\delta-1)\tilde{a}^2}{2\delta} + \frac{\delta}{2} \tilde{a}^2 \quad (9)$$

其中: $\tilde{a} = a - \hat{a}, a \in R$ 。

引理 3^[11]: 考虑如下非线性系统:

$$\dot{x}(t) = F(x(t)) \quad (10)$$

其中: $x(0) = 0, F(0) = 0, x \in R^n$; 假设存在李雅普诺夫函数 $V(x)$, 满足下式:

$$\dot{V}(x) \leq -\alpha V(x)^p + \vartheta \quad (11)$$

其中: $\alpha > 0, 0 < p < 1, 0 < \vartheta < \infty$, 则系统 (10) 有限时间稳定。

引理 4^[12]: 考虑如式 (10) 非线性系统, 假设存在李雅普诺夫函数 $V(x)$, 满足下式:

$$\dot{V}(x) \leq -\alpha V(x)^p - \beta V(x)^g + \vartheta \quad (12)$$

其中: $\beta > 0, g > 1$, 则系统固定时间稳定, 且 $V(x)$ 可收敛至平衡点的邻域内, 且该邻域满足下式:

$$\left\{ \lim_{t \rightarrow T} V(x) \leq \min \left\{ \alpha^{-\frac{1}{p}} \left(\frac{\vartheta}{1-\theta} \right)^{\frac{1}{1-p}}, \beta^{-\frac{1}{g}} \left(\frac{\vartheta}{1-\theta} \right)^{\frac{1}{1-g}} \right\} \right\} \quad (13)$$

其中: θ 是常系数且满足 $0 < \theta < 1$, 则系统状态变量收敛时间上界满足下列不等式关系:

$$T \leq \frac{1}{\alpha\theta(1-p)} + \frac{1}{\beta(g-1)} \quad (14)$$

定理 1: 针对 Buck 变换器 (1), 采用滑模面 (2)、控制器 (5) 和自适应更新律 (6), 则上界参数估计误差有界, 系统输出电压误差 x_1 在固定时间内从任意初始位置收敛到平衡点的邻域内, 其收敛时间上界与系统状态变量初始值无关, 仅与控制参数有关, 其收敛时间满足如下关系:

$$t \leq T_{\max} = T_1 + T_2 \quad (15)$$

其中: $T_1 = \frac{1}{\theta\chi_1} \frac{n_2}{m_2 - n_2} + \frac{1}{\theta\chi_2} \frac{q_2}{q_2 - p_2}, T_2 = \frac{C}{\zeta\alpha_1} \frac{n_1}{m_1 - n_1} + \frac{C}{\zeta\beta_1} \frac{q_1}{q_1 - p_1}$, ζ 是常系数且满足 $0 < \zeta < 1, \chi_1 = \alpha_2(2\varphi)^{\frac{m_2}{n_2}}, \chi_2 = \beta_2(2\varphi)^{\frac{m_2}{n_2}}$ 。

证明: 构造如下李雅普诺夫函数:

$$V = (2\varphi)^{-1} s^2 + \sum_{i=1}^3 (2\gamma_i)^{-1} \tilde{\rho}_i^2 \quad (16)$$

其中: $\tilde{\rho}_i$ 为 ρ_i 的估计误差值, $\rho_i = \rho_i - \hat{\rho}_i, i = 1, 2, 3$ 。

对 V 求时间导数, 并将式 (3) 代入, 可得:

$$\dot{V} = s\varphi(-M(x_1, x_2) - \kappa F(x_1, x_2) + \kappa u) - \sum_{i=1}^3 \gamma_i^{-1} \tilde{\rho}_i \dot{\tilde{\rho}}_i \quad (17)$$

将式 (4)、控制器 (5) 与更新律 (6) 代入式 (17) 有:

$$\dot{V} \leq \varphi(-\alpha_2 s^{\frac{m_2}{n_2}+1} - \beta_2 s^{\frac{m_2}{n_2}+1} + \sum_{i=1}^3 \eta_i \tilde{\rho}_i \hat{\rho}_i) \quad (18)$$

根据文献 [14] 所给出的证明方法, 式 (18) 改写为:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \varphi(\chi_2 \left(\frac{1}{2\omega} s^2\right)^{\frac{m_2}{n_2}} - \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\eta_i(2\delta_i-1)}{2\delta_i} \rho_i^2\right)^{\frac{m_2}{n_2}} + \\ & \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\eta_i(2\delta_i-1)}{2\delta_i} \rho_i^2\right)^{\frac{m_2}{n_2}} + \sum_{i=1}^3 \eta_i \rho_i \rho_i) \leq \\ & \varphi(-\chi_2 V^{(q_2+p_2)/(2q_2)} + 3 + \sum_{i=1}^3 \frac{\eta_i \delta_i}{2} \rho_i^2) \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $\delta_i > 1/2, \delta_i$ 为正常数, $i = 1, 2, 3$ 。

因此, 据式 (19) 与引理 3 可知, 系统有限时间收敛, 其上界估计误差值 $\tilde{\rho}_i$ 有界且存在正常数 Δ_i , 使得 $|\tilde{\rho}_i| \leq \Delta_i, i = 1, 2, 3$ 。

此时, 为便于证明在所提控制方法下系统的固定时间收敛性能, 将状态空间划分为两个区域, 即 $\Phi_1 = \{(x_1, x_2) | \varphi > 1\}, \Phi_2 = \{(x_1, x_2) | \varphi \leq 1\}$ 。

1) 当系统状态变量在区域 Φ_1 时, 据引理 1 与引理 2 可知, 式 (19) 可改写为:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -x_1 \left(\frac{1}{2\phi} s^2\right)^{\frac{m_2}{n_2}} - x_2 V^{\frac{q_2+p_2}{2q_2}} + 3 + \sum_{i=1}^3 \frac{\eta_i \delta_i}{2} \rho_i^2 - \\ & \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\eta_i(2\delta_i-1)}{4\delta_i} \rho_i^2\right)^{\frac{m_2}{n_2}} + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\eta_i(2\delta_i-1)}{4\delta_i} \rho_i^2\right)^{\frac{m_2}{n_2}} \end{aligned} \quad (20)$$

令 $\gamma_i \geq \max\left(\frac{2\delta_i \chi_1^{\frac{2m_2}{n_2}}}{\eta_i(2\delta_i-1)}, \frac{2\delta_i \chi_2^{\frac{2m_2}{n_2}}}{\eta_i(2\delta_i-1)}\right)$, 根据引理 1 与引理 2 可知, 式 (20) 可简化为:

$$\dot{V} \leq -4 \sum_{i=1}^3 \gamma_i V^{\frac{m_2}{n_2}} - \chi_2 V^{\frac{q_2+p_2}{2q_2}} + \eta_0 \quad (21)$$

其中: $\eta_0 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\eta_i(2\delta_i-1)}{4\delta_i} \Delta_i^2\right)^{\frac{m_2}{n_2}} + \sum_{i=1}^3 \frac{\eta_i \delta_i}{2} \rho_i^2 + 3$ 。

由式 (21) 与引理 4 可知, 系统输出电压误差 x_1 可以在固定时间 T_1 内到达滑模面 $s = 0$ 的邻域内。

2) 当系统状态变量在区域 Φ_2 时, 如文献 [13] 中所述, 系统状态变量轨迹会从区域 Φ_2 进入区域 Φ_1 , 而不会停留在 Φ_2 。此外, 系统状态变量在区域 Φ_2 内停留时间很短。因此, 系统状态变量在区域 Φ_2 停留时间在计算系统收敛时间时几乎可以忽略。

由 1)、2) 可得, 系统输出电压误差 x_1 在固定时间 T_1 内收敛到 $s = 0$ 的邻域。当到达滑模面 $s = 0$ 的邻域时, 系统输出电压误差 x_1 满足如下关系:

$$x_2 \leq C^{-1}(-\alpha_1 x_1^{m_1/n_1} - \beta_1 x_1^{p_1/q_1} + \Phi) \quad (22)$$

根据式 (22) 与引理 4 可知, Buck 型降压变换器系统输出电压误差可以在固定时间 T_2 内从滑模面 $s = 0$ 收敛到平衡点的邻域。

综上所述, 在控制器 (5) 和更新律 (6) 作用下, Buck 型降压变换器系统上界估计误差有界, 输出电压误差可以在固定时间 T_{\max} 内从任意初始位置收敛到平衡点的邻域内, 其收敛时间上界不再依赖系统状态变量初始值, 仅与系统控制参数有关。证毕。

3 仿真分析

为了验证本文所提控制方法的有效性, 针对存在参数不确定的 Buck 变换器系统, 利用 MATLAB 软件建立仿真模型进行两种控制方法仿真结果对比。其中, 方法一为本文

所提出的非奇异固定时间自适应控制方法, 包含滑模面 (2)、控制器 (5) 及自适应更新律 (6)。方法二为文献 [14] 中的非奇异有限时间自适应控制方法, 其中非奇异有限时间滑模面为:

$$s_1 = x_1 + (\alpha_1^{-1} x_2)^{q_1/p_1} \quad (23)$$

非奇异有限时间自适应控制器为:

$$u_1 = \frac{x_1 + V_{ref}}{V_m} + \frac{L_o x_2}{V_m R_o C_o} - \frac{p_1 L_o \alpha_1^{q_1/p_1} x_2^{2-q_1/p_1}}{q_1 C_o V_m} - \alpha_2 s^{p_2/q_2} - (\hat{c}_1 + \hat{c}_2 |x_1| + \hat{c}_3 |x_2|^2) \text{sgn}(s) \quad (24)$$

其中: c_i 为系统不确定干扰上界参数, \hat{c}_i 为 c_i 的参数估计值, $i = 1, 2, 3$ 。

自适应更新律为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{c}}_1 = \mu(\gamma_1 |s| - \eta_1 \hat{c}_1) \\ \dot{\hat{c}}_2 = \mu(\gamma_2 |sx_1| - \eta_2 \hat{c}_2) \\ \dot{\hat{c}}_3 = \mu(\gamma_3 |sx_2^2| - \eta_3 \hat{c}_3) \end{cases} \quad (25)$$

其中: $\mu = q_1 p_1^{-1} \alpha_1^{-q_1/p_1} x_2^{q_1/p_1 - 1}$, μ 为实数。

3.1 系统参数设置

本节仿真中 Buck 型降压变换器系统状态变量初始值如表 1 所示, 系统控制参数如表 2 所示, Buck 型降压变换器系统参数选取为: 输入电压 $V_m = 10$ V, 额定电感值 $L = 1$ mH, 额定电容值为 $C = 1$ mF, 额定输出电阻为 $R = 10$ Ω , 参考输出电压为 $V_{ref} = 5$ V; 另外, 系统参数不确定项分别为 $\Delta R = 0.1 \sin(20\pi t)$ Ω , $\Delta L = 0.1 \sin(20\pi t)$ mH, $\Delta C = 0.1 \sin(20\pi t)$ μ F, 仿真结果如图 2~4 所示。

表 1 系统状态变量初始值

初始值	$x_1(0)$	$x_2(0)$	$\rho_1(0)/c_1(0)$	$\rho_2(0)/c_2(0)$	$\rho_3(0)/c_3(0)$
初始值 I	-5	0	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
初始值 II	-9	0	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-4}

表 2 控制参数

算法	控制参数
方法一	$p_1/q_1 = p_2/q_2 = 7/9, m_1/n_1 = m_2/n_2 = 1.8, \alpha_1 = \beta = 0.1, \alpha_2 = \beta_2 = 0.04, \gamma_1 = 0.05, \gamma_2 = 1 \times 10^{-4}, \gamma_3 = 1 \times 10^{-3}, \eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 0.001$ 。
方法二	$p_1/q_1, \alpha_1, p_2/q_2, \alpha_2, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ 与方法一相同。

3.2 仿真实例分析

针对 Buck 型降压变换器系统参数存在不确定性的情况, 为验证所提方法的固定时间收敛的特性, 方法一与方法二在两种系统状态变量初始值条件下进行仿真对比, 如图 2~3 所示。从图 2 可见, 当系统状态变量初始值从初始值 I 变为初始值 II 时, 在方法一作用下, 系统输出电压误差 x_1 的收敛时间基本不变, 均为 0.03 s 左右, 而方法二中的输出电压误差 x_1 的收敛时间由 0.04 s 变为 0.055 s。如图 3 所示, 在初始值 I 和初始值 II 下, 方法一的系统控制器输入信号收敛时间均为 0.03 s, 而在方法二作用下, 系统控制器输入信号收敛时间

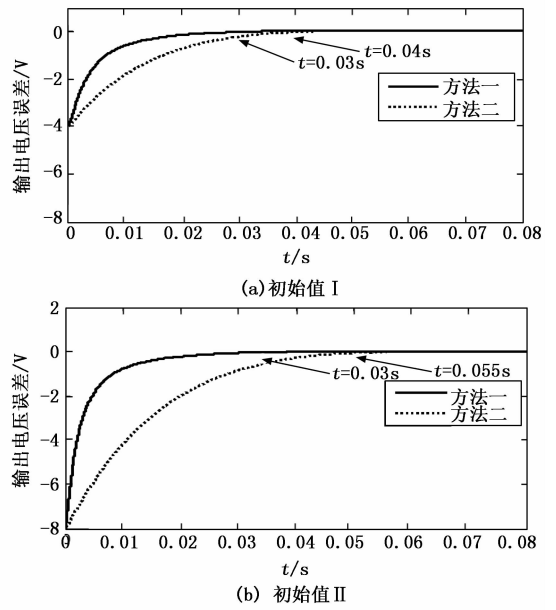


图 2 输出电压误差

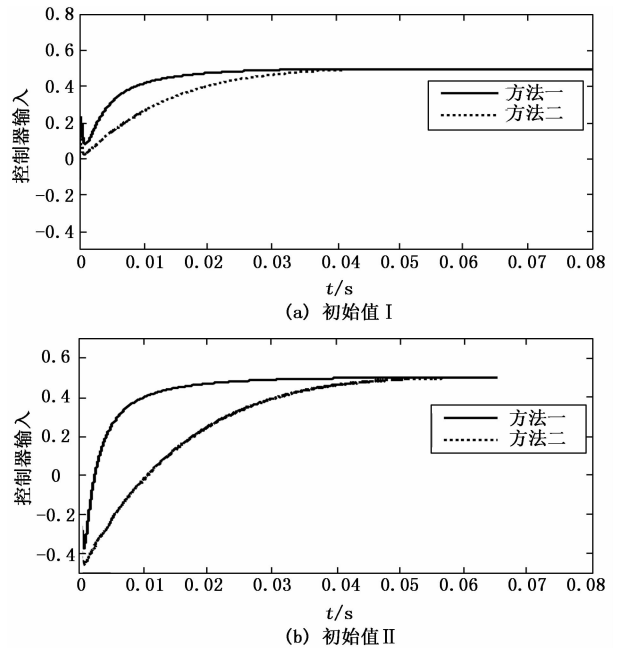


图 3 控制器输入

分别为 0.045 s 和 0.055 s。针对 Buck 型降压变换器系统中存在的不确定干扰, 方法一设计了自适应更新律以补偿系统不确定干扰对系统带来的影响。在初始值 II 条件下, 方法一的实际干扰信号和不确定干扰上界估计值曲线, 如图 4 所示。从图 4 可见, 不确定干扰上界估计值能在短时间内快速收敛, 且该上界干扰估计值均在系统实际干扰信号之上。因此, Buck 型降压变换器系统不确定干扰能够被有效抑制。此外, 由式 (15) 可知, 方法一控制下的系统输出电压误差收敛时间上界估计值为 0.11 s。