

基于广义超螺旋算法的无速度传感器永磁同步电机 有限时间速度控制

张伟键¹, 都海波^{1†}, 朱文武², 王利楠¹

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230000; 2. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对三相表贴式永磁同步电机, 本文首先根据广义超螺旋算法(GSTA), 设计出广义超螺旋观测器, 能够估计电机的转子位置和转速. 然后基于上述设计的广义超螺旋无速度传感器, 结合有限时间控制理论, 设计出有限时间速度控制器, 可以实现基于无速度传感器下的有限时间速度调节. 通过仿真和实验验证了上述方法的有效性.

关键词: 永磁同步电机; 有限时间控制; 广义超螺旋; 无速度传感器; 速度控制

引用格式: 张伟键, 都海波, 朱文武, 等. 基于广义超螺旋算法的无速度传感器永磁同步电机有限时间速度控制. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 833 – 841

DOI: 10.7641/CTA.2021.00723

Finite-time speed sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on generalized super-twisting algorithm

ZHANG Wei-jian¹, DU Hai-bo^{1†}, ZHU Wen-wu², WANG Li-nan¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230000, China;
2. School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Aiming at the three-phase surface-mounted permanent magnet synchronous motor (PMSM), this paper firstly designs a generalized super-twisting observer based on the generalized super-twisting algorithm (GSTA), which can estimate the rotor position and speed of the motor. Secondly, based on the generalized super-twisting sensorless and combined with the finite-time control theory, a finite-time speed controller is designed, which can realize the finite-time speed regulation based on the sensorless. Simulation and experiment verify the effectiveness of the above methods.

Key words: permanent magnet synchronous motor; finite-time control; generalized super-twisting; sensorless; speed control

Citation: ZHANG Weijian, DU Haibo, ZHU Wenwu, et al. Finite-time speed sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on generalized super-twisting algorithm. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 833 – 841

1 引言

永磁同步电机由于具有高密度、高效率、高可靠性以及结构简单、体积小、重量轻等优点, 已得到广泛应用^[1-5]. 但因为永磁同步电机是一种具有时变参数、强耦合、不确定性和受外部干扰的复杂非线性系统, 导致控制系统设计相对复杂. 通过磁场定向控制, 可以克服永磁同步电机模型复杂性, 解耦出电机的转矩和磁通. 但磁场定向控制在旋转向量转换时, 需要电机转子位置和转速的信息. 常用的, 如编码器这种速度和位置传感器, 增加了系统的复杂性和成本^[6]. 此

外, 这些传感器容易受到噪声和环境因素的影响, 降低了电机驱动的可靠性.

在上述情况下, 使用无速度传感器代替机械传感器为一种有效途径. 另外, 为了保证永磁同步电机在各种环境下正常运行, 降低系统成本, 无速度传感器近年来已成为研究的热点之一. 近年来, 国内外学者提出了许多永磁同步电机无速度传感器控制的方法, 这些方法按其适用范围可分类两类: 1) 适用于静止或低速运行时的脉振高频注入法^[7]; 2) 适用于高速时的无传感器控制技术, 如模型参考自适应法^[8]、滑模观

收稿日期: 2020-10-18; 录用日期: 2021-01-05.

†通信作者. E-mail: haibo.du@hfut.edu.cn; Tel.: +86 18156062198.

本文责任编辑: 左志强.

国家自然科学基金项目(62073113, 62003122, 61673153), 安徽省自然科学基金项目(2008085UD03, 1808085MF180), 中央高校基本科研业务费项目(PA2020GDKC0016)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62073113, 62003122, 61673153), the Natural Science Foundation of Anhui Province of China (2008085UD03, 1808085MF180) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (PA2020GDKC0016).

测器法^[9]、扩展卡尔曼滤波法^[10]等。

其中滑模观测器因为其鲁棒性,对参数的不敏感性以及良好的实现性被广泛接受。文献[11–13]将滑模观测器应用在永磁同步电机无速度传感器中。文献[14–15]分别设计了基于滑模无速度传感器的积分滑模控制器和变结构控制器,实现了无速度传感器下的永磁同步电机控制。文献[16]提出了一种新的基于主动干扰抑制的永磁同步电机驱动滑模电流控制方案,增强了对内部干扰的鲁棒性。文献[17]结合非线性扰动观测器,提出了一种新的积分终端滑模控制,所设计的控制器具有良好的动态响应性能和较强的鲁棒性。

为进一步提高滑模观测器精度,不少学者在滑模观测器的基础上,提出了超螺旋滑模算法和广义超螺旋算法。文献[18]根据超螺旋算法设计出的永磁同步电机无速度传感器,相较滑模观测器,具有更快的收敛速度。所谓广义超螺旋算法(*generalized super-twisting algorithm, GSTA*),是在超螺旋算法上进行改进的,由于加上了线性修正项,使得广义超螺旋算法可以处理系统线性增长的扰动,这是一般超螺旋算法不能做到的。所以,广义超螺旋算法能够明显减少抖振在速度估计的影响,提供改进的稳态和瞬态性能,获得较好的速度估计精度和显著的降噪。但广义超螺旋算法目前尚未应用在永磁同步电机无速度传感器控制上。

本文主要贡献:1)将广义超螺旋算法应用在永磁同步电机无速度传感器,所设计的广义超螺旋无速度传感器,能够精确估计出电机的转子位置和转速。同时,由于有限时间控制系统具有良好的鲁棒性能和抗扰动性能^[19–23];2)将有限时间控制理论应用在永磁同步电机无速度传感系统上,所设计的有限时间速度控制器,可以改进传统速度控制器收敛速度慢,超调严重等问题,具有良好的动态性能。仿真和实验结果验证了所设计无速度传感器和控制器的有效性。

2 模型介绍及预备知识

2.1 永磁同步电机数学模型

本文主要研究三相表贴式永磁同步电机的速度调节问题。基于两相静止坐标系 $\alpha\beta$,电机的数学模型^[24]

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L}i_\alpha - \frac{1}{L}e_\alpha + \frac{1}{L}v_\alpha, \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L}i_\beta - \frac{1}{L}e_\beta + \frac{1}{L}v_\beta, \\ \dot{\omega}_m = \frac{3n_p\varphi_f}{2J}(-i_\alpha \sin \theta_e + i_\beta \cos \theta_e) - \frac{B}{J}\omega_m - \frac{T_L}{J}, \end{cases} \quad (1)$$

其中: i_α, i_β 为 $\alpha\beta$ 坐标系下定子电流; v_α, v_β 为 $\alpha\beta$ 坐标系下定子电压; R 为定子电阻; L 为定子电感; φ_f 是转子磁链; ω_m 是机械角速度; n_p 为极对数; B 为阻尼

系数; J 为转动惯量; T_L 为负载转矩; θ_e 为转子位置电角。

永磁同步电机反电动势方程^[25]

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e\varphi_f \sin \theta_e, \\ e_\beta = \omega_e\varphi_f \cos \theta_e, \end{cases} \quad (2)$$

其中: e_α 为 α 轴反电动势, e_β 为 β 轴反电动势, θ_e 为转子位置电角, ω_e 为转子电角速度。

为更好厘清电机中各变量之间的关系,有必要说明:电机的转子位置电角 θ_e 、电角速度 ω_e 、转子位置机械角 θ_m 、机械角速度 ω_m 、转速 N_r 关系如下:

$$\begin{cases} \theta_e = n_p\theta_m, \\ \omega_e = n_p\omega_m, \\ N_r = \frac{30}{\pi}\omega_m, \\ \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

2.2 问题描述

本文的主要目的是利用广义超螺旋算法设计出电机转子位置和速度观测器,用估计出转速作为电机转速反馈信号,设计出有限时间速度控制器。本文提高了无速度传感器的速度估计精度,减少了速度控制的收敛时间。

2.3 相关定义和引理

定义 1 对于如下系统^[26]:

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0, x \in U \subseteq \mathbb{R}^n, \quad (4)$$

其中 $f: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ 为开区域 U 上对 x 连续的函数,且开区域 U 包含原点。系统的解 $x = 0$ 为有限时间稳定当且仅当系统是稳定的且为有限时间收敛的。所谓有限时间收敛指的是:对 $\forall x_0 \in U_0 \subset \mathbb{R}$,存在一个连续函数 $T(x): U_0 \setminus \{0\} \rightarrow (0, +\infty)$,使得系统(4)的解 $x(t, x_0)$ 满足:当 $t \in [0, T(x_0))$ 时,有 $x(t, x_0) \in U_0 \setminus 0$ 和 $\lim_{x \rightarrow T(x_0)} x(t, x_0) = 0$;当 $t > T(x_0)$ 时,有 $x(t, x_0) = 0$ 。若 $U = U_0 = \mathbb{R}$,则系统是全局有限时间稳定的。

0.若 $U = U_0 = \mathbb{R}$,则系统是全局有限时间稳定的。

定义 2 对于任意 $0 \leq \alpha \leq 1, x \in \mathbb{R}$,非光滑非线性函数定义如下:

$$\text{sig}^\alpha(x) = \text{sgn } x|x|^\alpha, \quad (5)$$

其中 sgn 为符号函数。

引理 1 考虑定义1中的系统,假设存在连续可微函数 $V: U \rightarrow \mathbb{R}$ 满足下列条件^[26]

- 1) V 为正定函数;
- 2) 存在正实数 $c > 0$ 和 $\alpha \in (0, 1)$,以及一个包含原点的开邻域 $U_0 \subset U$,使得下列条件成立:

$$\dot{V}(x) + cV^\alpha(x) \leq 0, x \in U_0 \setminus \{0\}, \quad (6)$$

则系统有限时间稳定.

引理 2 对于如下系统^[27]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1 \text{sig}^{1/2} x_1 - k_2 x_1 + x_2 + \rho_1(t, x), \\ \dot{x}_2 = -k_3 \text{sgn} x_1 - k_4 x_1 + \rho_2(t, x), \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\rho_1(t, x), \rho_2(t, x)$ 为干扰项且满足

$$\begin{cases} |\rho_1(t, x)| \leq \delta_1 |x_1|^{1/2} + \delta_3 |x_1|, \\ |\rho_2(t, x)| \leq \delta_2 + \delta_4 |x_1|, \end{cases} \quad (8)$$

并且 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4 \geq 0$, 当正的控制增益 k_1, k_2, k_3, k_4 满足一定条件时, 则上述系统(7)为有限时间收敛的. 具体的证明过程见文献[27].

3 基于GSTA的永磁同步电机有限时间无速度传感器控制器设计

本节首先介绍了基于广义超螺旋无速度传感器的设计. 然后, 基于上述设计的无速度传感器, 设计出有限时间速度控制器.

3.1 基于GTSA的无速度传感器设计

对于永磁同步电机, 电压与电流是可测的, 反电动势是不可测的. 所以, 通过设计观测器, 估计出电机的反电动势, 可估计出电机转子位置和转速.

对于永磁同步电机模型(1)-(2), 根据广义超螺旋算法, 构造广义超螺旋观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_\alpha = -\frac{R}{L} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L} [v_\alpha - \hat{e}_\alpha - k_1 \text{sig}^{1/2}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) - k_2(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)], \\ \dot{\hat{i}}_\beta = -\frac{R}{L} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L} [v_\beta - \hat{e}_\beta - k_1 \text{sig}^{1/2}(\hat{i}_\beta - i_\beta) - k_2(\hat{i}_\beta - i_\beta)], \\ \dot{\hat{e}}_\alpha = k_3 \text{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) + k_4(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \\ \dot{\hat{e}}_\beta = k_3 \text{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) + k_4(\hat{i}_\beta - i_\beta), \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ 为 $\alpha\beta$ 坐标系下估计电流; $\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta$ 为 $\alpha\beta$ 坐标系下估计反电动势; k_1, k_2, k_3, k_4 为增益系数.

分析观测器系统的稳定性. 定义观测器误差

$$\begin{cases} x_{1\alpha} = \hat{i}_\alpha - i_\alpha, x_{1\beta} = \hat{i}_\beta - i_\beta, \\ x_{2\alpha} = e_\alpha - \hat{e}_\alpha, x_{2\beta} = e_\beta - \hat{e}_\beta. \end{cases} \quad (10)$$

以 α 轴为例, 结合系统(1)-(2)和观测器(9), 得到广义超螺旋观测器误差动态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{1\alpha} = \frac{1}{L} [-k_1 \text{sig}^{1/2} x_{1\alpha} - k_2 x_{1\alpha} + x_{2\alpha}], \\ \dot{x}_{2\alpha} = -k_3 \text{sgn} x_{1\alpha} - k_4 x_{1\alpha} - \omega_e e_\beta. \end{cases} \quad (11)$$

由引理2知, 存在合适的增益 k_1, k_2, k_3, k_4 使得上述构造的广义超螺旋观测器是有限时间稳定的, 也就是说 \hat{i}_α 在有限时间内收敛到 i_α , \hat{e}_α 在有限时间内收敛到 e_α .

同理地分析 β 轴估计电流、估计反电动势误差系统. 同样的, 有 \hat{i}_β 在有限时间内收敛到 i_β , \hat{e}_β 在有限时间内收敛到 e_β .

根据广义超螺旋观测器, 可以观测出电机的反电动势, 而通过反电动势可以进一步估计出电机的转子位置电角、转子点角速度、转子机械角速度等. 由式(2)可获得电机的转子位置电角估计公式

$$\hat{\theta}_e = \arctan \frac{-\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}; \quad (12)$$

转子电角速度估计值

$$\hat{\omega}_e = \frac{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}}{\varphi_f}. \quad (13)$$

结合式(3), 可得转子机械角速度估计值

$$\hat{\omega}_m = \frac{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}}{n_p \varphi_f}. \quad (14)$$

图1给出了基于广义超螺旋观测器的转子位置和转速估计的控制框图.

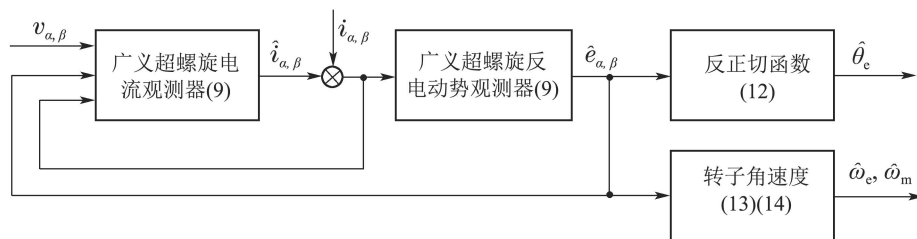


图 1 基于广义超螺旋观测器的转子位置和转速估计框图

Fig. 1 Block diagram of rotor position and speed estimation based on generalized super-twisting observer

3.2 基于GSTA的有限时间速度控制器设计

基于上节GTSA无速度传感器, 本节将给出有限时间速度控制器的设计. 首先定义电机机械角速度与期望的机械角速度误差为

$$e = \omega_m - \omega_m^*. \quad (15)$$

由式(1)得

$$\dot{\omega}_m = \frac{3n_p \varphi_f}{2J} (-i_\alpha \sin \theta_e + i_\beta \cos \theta_e) -$$

$$\frac{B}{J}\omega_m - \frac{T_L}{J}. \quad (16)$$

通过Park变换

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (17)$$

式(16)等效变换为

$$\dot{\omega}_m = \frac{3n_p\varphi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega_m - \frac{T_L}{J}. \quad (18)$$

令负载扰动项为

$$d = -\frac{B}{J}\omega_m^* - \frac{T_L}{J}, \quad (19)$$

则可以得到

$$\dot{e} = \frac{3n_p\varphi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}e + d. \quad (20)$$

为了实现速度调节,接下来设计基于GTSA无速度传感器的有限时间速度控制器.

定理 1 对于系统(1),如果速度控制器设计如下:

$$\begin{cases} i_q = -k_p \text{sig}^\alpha(e^*) - \frac{2J}{3n_p\varphi_f} \hat{d}, \\ e^* = \hat{\omega}_m - \omega_m^* = e + \hat{\omega}_m - \omega_m, \\ \dot{e} = \frac{3n_p\varphi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}e^* + \hat{d} - \\ \quad \beta_1 \text{sig}^{1/2}(\hat{e} - e^*) - \beta_2(\hat{e} - e^*), \\ \dot{\hat{d}} = -\beta_3 \text{sgn}(\hat{e} - e^*) - \beta_4(\hat{e} - e^*), \end{cases} \quad (21)$$

其中: $k_p > 0$, $0 < \alpha < 1$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4 \geq 0$, i_q 为 q 轴电流控制信号, \hat{d} 干扰估计项,那么电机的机械角速度 ω_m 能够有限时间达到期望角速度 ω_m^* .

证 首先,由于第3.1节所设计的广义超螺旋速度观测器是有限时间收敛的,所以存在一个时间 T_1 ,使得 $\forall t \geq T_1$, $\hat{\omega}_m = \omega_m$,也即

$$\forall t \geq T_1, e^* = e. \quad (22)$$

又因为上述设计的广义超螺旋干扰观测器 \hat{d} 是有限时间收敛的,所以存在一个时间 T_2 使得

$$\hat{d} = d, \forall t \geq T_2. \quad (23)$$

因此,稳定性分析将分为两个部分,首先证明系统状态在 $T_1 + T_2$ 时刻之前是有界的,然后证明闭环系统在时间 $T_1 + T_2$ 之后是有限时间稳定的.

步骤 1 考虑系统的状态在时间区域 $[0, T_1 + T_2]$ 的有界性.由于第3.1节设计的无速度传感器是有限时间稳定的,所以下式总是成立的:

$$|\omega_m - \hat{\omega}_m| < \gamma_1, \quad (24)$$

其中 $\gamma_1 > 0$.

接着分析干扰估计 \hat{d} ,定义干扰观测器估计误差为

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \hat{e} - e^*, \\ \bar{d} &= \hat{d} - d, \end{aligned} \quad (25)$$

那么

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}} &= -\beta_1 \text{sig}^{1/2}(\bar{e}) - \beta_2(\bar{e}) + \dot{\bar{d}}, \\ \dot{\bar{d}} &= -\beta_3 \text{sgn} \bar{e} - \beta_4(\bar{e}) - \dot{d}. \end{aligned} \quad (26)$$

很明显,上述系统符合广义超螺旋系统设计要求.由引理2可知,上述设计的广义超螺旋干扰观测器 \hat{d} 是有限时间收敛的,所以

$$|d - \hat{d}| < \gamma_2, \quad (27)$$

其中 $\gamma_2 > 0$.

取Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2}e^2, \quad (28)$$

那么

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e\dot{e} = e(-k \text{sig}^\alpha(e^*) - \frac{B}{J}e + d - \hat{d}) = \\ &e(-k \text{sig}^\alpha(e + \hat{\omega}_m - \omega_m) - \frac{B}{J}e + d - \hat{d}) \leq \\ &-ke[\text{sig}^\alpha(e + \hat{\omega}_m - \omega_m) - \text{sig}^\alpha(e) + \\ &\text{sig}^\alpha(e)] - \frac{B}{J}e^2 + \gamma_2|e| \leq \\ &k|e| \cdot 2^{1-\alpha}|\hat{\omega}_m - \omega_m|^\alpha - k|e|^{1+\alpha} - \\ &\frac{B}{J}e^2 + \gamma_2|e| \leq \\ &(k \cdot 2^{1-\alpha}\gamma_1^\alpha + \gamma_2)|e| - k|e|^{1+\alpha} - \frac{B}{J}e^2. \end{aligned} \quad (29)$$

当

$$|e| > \left(\frac{k \cdot 2^{1-\alpha}\gamma_1^\alpha + \gamma_2}{k}\right)^{1/\alpha} \quad (30)$$

时,有 $\dot{V} \leq -\frac{B}{J}e^2$.因此 e 显然是有界的.所以,系统状态在初始阶段总是有界的.

步骤 2 下面开始分析在 $T_1 + T_2$ 时刻之后系统的有限时间稳定问题.

结合式(20)–(21)可得

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \\ &\frac{3n_p\varphi_f}{2J}(-k_p \text{sig}^\alpha(e^*) - \frac{2J}{3n_p\varphi_f} \hat{d}) - \frac{B}{J}e + d = \\ &-k_p \frac{3n_p\varphi_f}{2J} \text{sig}^\alpha(e) - \frac{B}{J}e + \\ &k_p \frac{3n_p\varphi_f}{2J} (\text{sig}^\alpha(e) - \text{sig}^\alpha(e^*)) + (d - \hat{d}). \end{aligned} \quad (31)$$

当 $t \geq T_1$,上式等效变换为

$$\dot{e} = -k_p \frac{3n_p\varphi_f}{2J} \text{sig}^\alpha(e) - \frac{B}{J}e + (d - \hat{d}). \quad (32)$$

当 $t \geq T_1 + T_2$, 式(32)变换为

$$\dot{e} = -k_p \frac{3n_p \varphi_f}{2J} \text{sig}^\alpha(e) - \frac{B}{J} e. \quad (33)$$

令 $k = k_p \frac{3n_p \varphi_f}{2J}$, 可得

$$\dot{e} = -k \text{sig}^\alpha(e) - \frac{B}{J} e. \quad (34)$$

取相同的Lyapunov函数, 结合式(34)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = e\dot{e} &= e(-k \text{sig}^\alpha(e) - \frac{B}{J} e) = \\ &= -k|e|^{1+\alpha} - \frac{B}{J} e^2 = \\ &= -k(2V)^{\frac{1+\alpha}{2}} - \frac{B}{J} e^2. \end{aligned} \quad (35)$$

令 $c = k2^{\frac{1+\alpha}{2}}$, 可得

$$\dot{V} + cV^{\frac{1+\alpha}{2}} = -\frac{B}{J} e^2. \quad (36)$$

由于 $\frac{B}{J} > 0$, 故

$$\dot{V} + cV^{\frac{1+\alpha}{2}} \leq 0, \quad (37)$$

其中 $0 < \frac{1+\alpha}{2} < 1$.

所以, 由引理1可知, 本文设计的有限时间速度控制器(21)可以保证速度调节系统是渐进稳定并且是有限时间收敛的, 即在有限时间内, $\omega_m \rightarrow \omega_m^*$.

证毕.

4 仿真和实验结果

4.1 仿真结果

仿真实验采用 Simulink 环境下, 搭建整个系统模型, 对系统的有效性和稳定性进行了验证分析. Simulink 仿真中的步长为 2×10^{-7} s. 基于 GSTA 的无速度传感器的有限时间控制器下的永磁同步电机系统框图如图2所示.

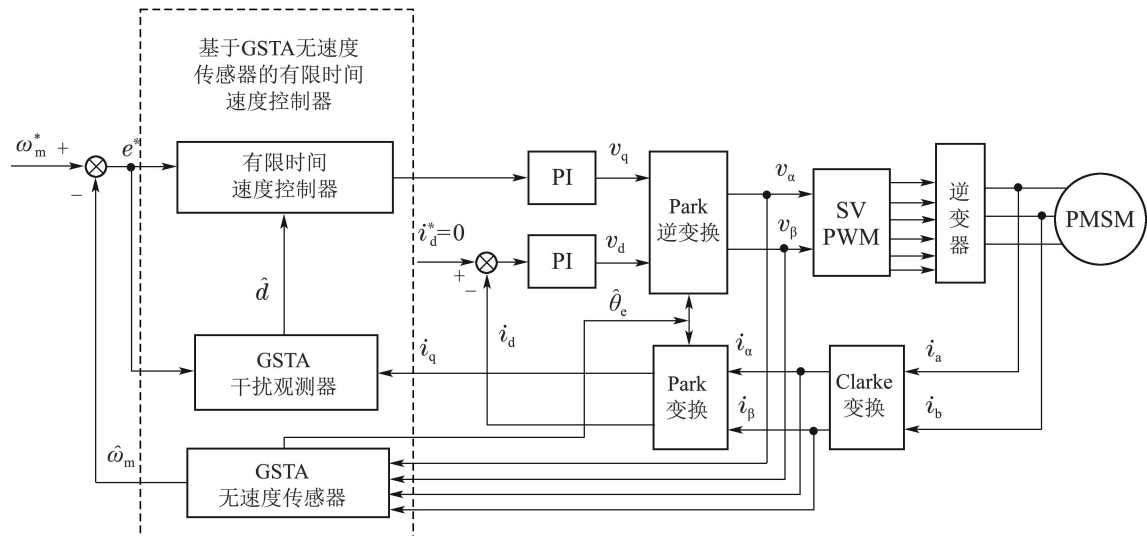


图 2 基于GSTA的无速度传感器的有限时间控制器下的永磁同步电机系统框图

Fig. 2 System block diagram of PMSM under finite-time controller based on GSTA sensorless

在仿真中, 永磁同步电机参数值如表1所示. 永磁同步电机控制系统仿真中, 经反复调试后, 各模块参数值如表2所示.

表 1 永磁同步电机参数值
Table 1 PMSM parameter value

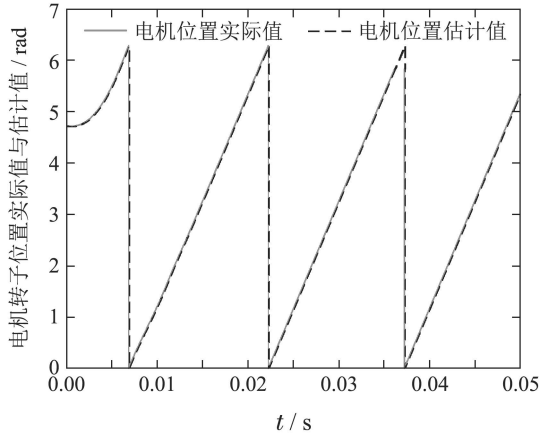
参数	数值
极对数 n_p	4
定子电阻 R/Ω	2.875
定子电感 L/mh	8.5
磁链 φ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.001
阻尼系数 B	7.403×10^5
直流侧电压 U_{dc}/V	311
开关频率 f_{pwm}/kHz	10

表 2 仿真中各模块参数值

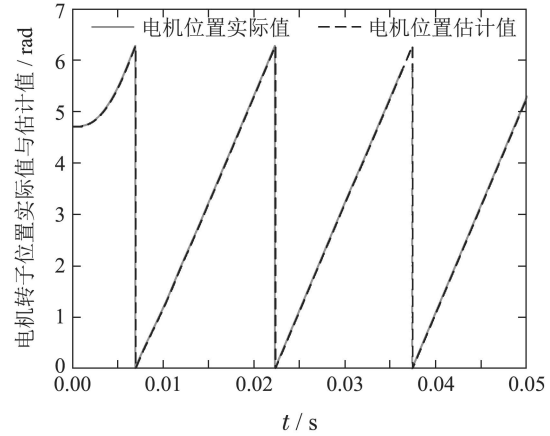
Table 2 Parameter value of each module in simulation

模块	参数取值
广义超螺旋观测器	$k_1 = 30, k_2 = 30$ $k_3 = 5 \times 10^4, k_4 = 1 \times 10^5$
有限时间速度控制器	$\beta_1 = 1.5 \times 10^4, \beta_2 = 1.5 \times 10^4$ $\beta_3 = 3.5 \times 10^6, \beta_4 = 3.5 \times 10^6$ $k_p = 5, \alpha = 1/2$
速度环PI控制器	$k_p = 6, k_i = 1.5$
电流环PI控制器	$k_p = 1000, k_i = 2000$

参考转速设定为 $N_{ref} = 1000$ r/min, 为了分析负载转矩变化带来的转速变化时的速度跟踪情况, 在 0.03 s 突加负载转矩为 $T_L = 10$ N. 在 PI 速度控制器下, 转子位置跟踪结果如图3所示, 转速跟踪结果如图4所示, 转速误差比较如图5所示.



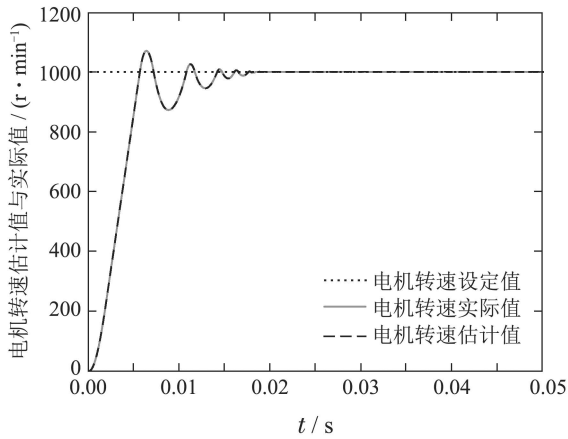
(a) 无负载



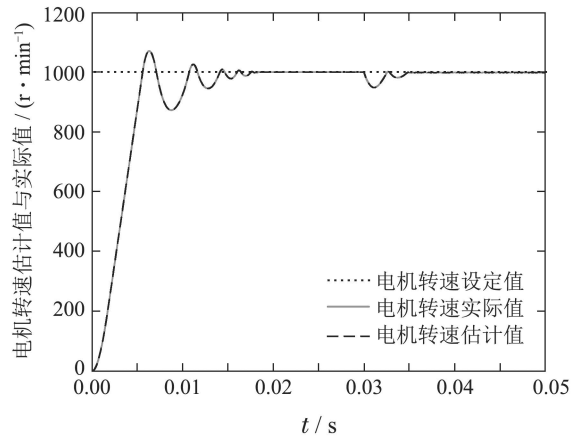
(b) 有负载($t = 0.03$ s时, 加入负载10 N)

图3 电机转子位置跟踪结果

Fig. 3 Motor rotor position tracking results



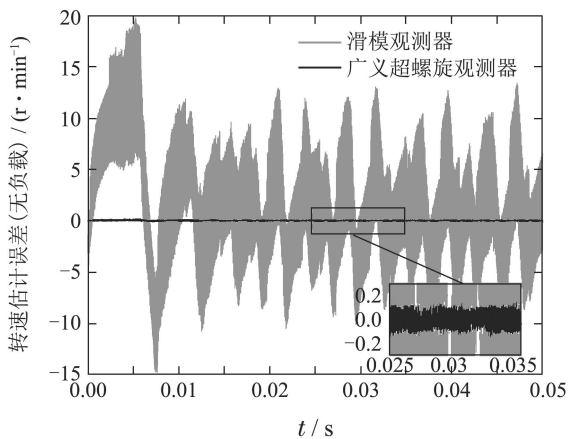
(a) 无负载



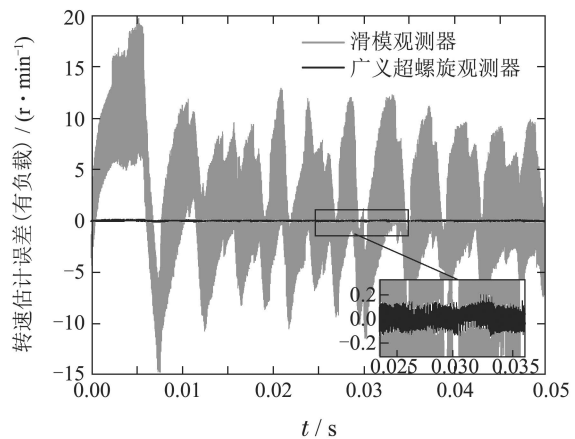
(b) 有负载($t = 0.03$ s时, 加入负载10 N)

图4 电机转速跟踪结果

Fig. 4 Motor speed tracking result



(a) 无负载



(b) 有负载($t = 0.03$ s时, 加入负载10 N)

图5 电机转速估计误差比较

Fig. 5 Comparison of motor speed estimation error

从上述结果可知, 通过PI速度控制器, 在无负载和有负载情况下, 所设计的广义超螺旋观测器均能很好

地估计电机转子位置与转速, 转子位置与转速均能很好地跟踪上真实值; 在 $t = 0.03$ s处, 扰动对电机位置

和速度的估计精度影响较小, 可以忽略. 与传统的基于滑模观测器的无速度传感器, 其转速误差达到 (-14 r/min~20 r/min); 相比之下, 基于本文设计的广义超螺旋无速度传感器, 其转速误差在 (-0.16 r/min~0.21 r/min) 之间, 可以发现本文设计的方法大大减小无速度传感器了对转速估计的误差. 由此可以说明, 通过取合适的参数, 基于广义超螺旋观测器的三相 PMSM 无速度传感器能很好地满足电机转子位置和转速高精度反馈的要求.

参考转速设定为 $N_{ref} = 1000 \text{ r/min}$, 在 0.03 s 突加负载转矩为 $T_L = 10 \text{ N}$. 在广义超螺旋无速度传感器下, 有限时间控制器实验结果, 如图 6 所示. 有限时间速度控制器各性能对比, 如表 3 所示. 实验数据表明, 在广义超螺旋无速度传感器下, 与传统 PI 速度控制器实验结果相比, 本文设计的有限时间速度控制器超调更小, 调节时间更快, 动态性能更好.

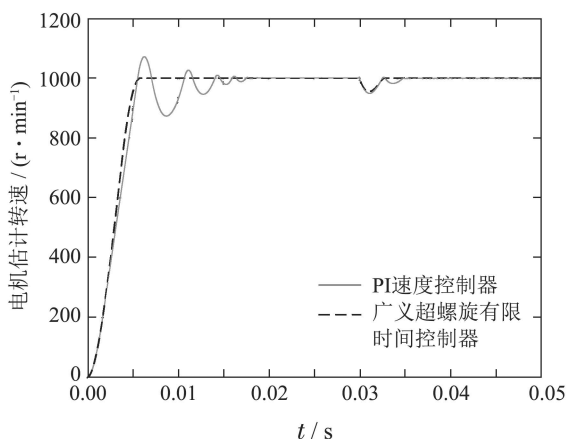


图 6 广义超螺旋无速度传感器下有限时间速度控制器与 PI 速度控制器对比 ($t = 0.03 \text{ s}$ 时, 加入负载 10 N)

Fig. 6 Comparison of a finite-time speed controller and PI speed controller under generalized super-twisting sensorless (when $t = 0.03 \text{ s}$, add load 10 N)

表 3 速度控制器性能比较

Table 3 Speed controller performance comparison

控制器	启动调节时间/s	抗干扰调节时间/s
PI速度控制器	0.0183	0.0049
有限时间速度控制器	0.0056	0.0028

4.2 实验结果

为进一步验证广义超螺旋无速度传感器与有限时间控制器的性能, 下面介绍实验结果. 本次实验测装置的配置如图 7 所示, 包括 PMSM (埃斯顿公司, 型号: EMJ-04APB22), 控制器和驱动器, 隔离变压器 (XH-1000VA), 电磁制动器 (盛泰科技公司, 型号: CD-HSY-50) 和张力控制器 (KTC800A) 等. C 代码由具有 60 MHz 实时时钟频率的数字信号处理器 (DSPF28035) 实现. 与仿真情况下一样, 参考速度为 1000 r/min.

表 4 列出了实验中各模块参数值. 实验结果图 8 为有限时间控制器 (finite-time controller, FC) 和 PI 控制器下电机的真实速度, 图 9 为 GSTSO 对转速估计的误差, 图 10 为 FC 控制器下抗干扰性能 ($t = 5 \text{ s}$ 时, 加入负载 10 N).



图 7 实验装置的配置

Fig. 7 Experimental setup

表 4 实验中各模块参数值

Table 4 Parameter values of each module in the experiment

模块	参数取值
广义超螺旋观测器	$k_1 = 0.1, k_2 = 0.2$ $k_3 = 5, k_4 = 10$
有限时间速度控制器	$\beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.7$ $\beta_3 = 20, \beta_4 = 30$ $k_p = 5, \alpha = 3/5$
速度环 PI 控制器	$k_p = 5, k_i = 0.001$
电流环 PI 控制器	$k_p = 0.04, k_i = 0.02$

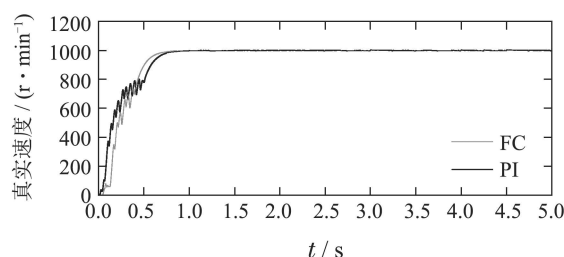


图 8 在 FC 控制器和 PI 控制器下电机的真实速度

Fig. 8 Real speed of the motor under FC controller and PI controller

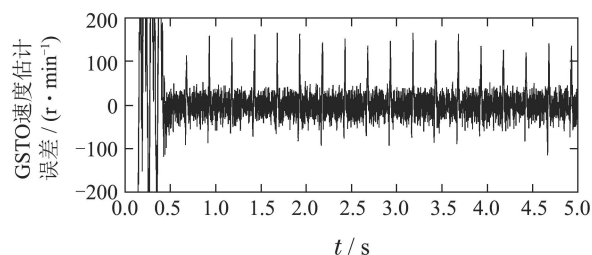


图 9 GSTSO 对转速估计的误差

Fig. 9 Speed estimation error by GSTSO

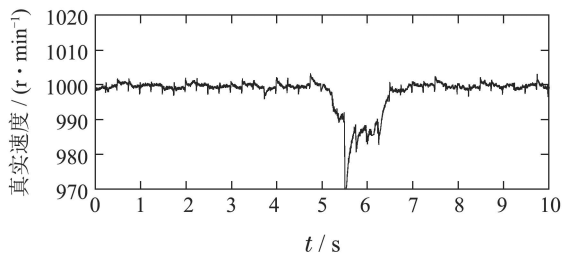


图10 在FC控制器下抗干扰性能($t = 5$ 时, 加入负载10N)
Fig. 10 Anti-interference performance under FC controller
(when $t = 5$ s, add load 10N)

从实验结果可知, 对比PI控制器, FC控制器启动阶段更快。GTSO的转速估计误差也在有界范围内, 同时FC控制器具有良好的抗干扰性能, 对于突加10N的干扰负载, 速度在1.4s内收敛到设定值。

5 结论

本文提出了一种广义超螺旋观测器, 估计出定子电流和反电动势, 从而计算出电机转子位置和转速。仿真和实验结果均表明, 与传统的滑模观测器, 广义超螺旋观测器估计的电机转子位置更加精确, 并且大大减小了转速估计误差, 实现了对永磁同步电机的位置和速度的较高精度的估计。本文所设计的有限时间速度控制器, 在上述广义超螺旋无速度传感器基础上, 亦有很好的动态性能和良好的抗干扰能力。结合两者, 本文既提高了无速度传感器的观测精度, 又减小了速度调节的收敛时间。

参考文献:

- [1] JACOB J, CHITRA A. Field oriented control of space vector modulated multilevel inverter fed PMSM drive. *Energy Procedia*, 2017, 117: 966 – 973.
- [2] WEI Haifeng, WEI Hanpei, ZHANG Yi. Harmonic parameters identification of surface mounted permanent magnet synchronous motor based on state observer. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(7): 988 – 993.
(魏海峰, 韦汉培, 张懿. 基于状态观测器的表贴式永磁同步电机谐波参数辨识. 控制理论与应用, 2018, 35(7): 988 – 993.)
- [3] TAO Ruichao, MA Jie, ZHAO Hui. Current controller design of permanent magnet synchronous motor based on indirect adaptive robust control. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(3): 296 – 302.
(陶瑞超, 马杰, 赵辉. 基于间接自适应鲁棒的永磁同步电机电流控制器设计. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 296 – 302.)
- [4] DAIGAVANE M B, VAISHNAV S R, SHRIWASTAVER G. Sensorless field oriented control of PMSM drive system for automotive application. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 2016, 8(3): 213 – 224.
- [5] ZHENG Jianfei, FENG Yong, LU Qiliang. High-order terminal sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(6): 697 – 700.
(郑剑飞, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 697 – 700.)
- [6] LI Yongdong, ZHU Hao. Overview of sensorless control of permanent magnet synchronous motors. *Electric Drive*, 2009, 39(9): 3 – 10.

- (李永东, 朱昊. 永磁同步电机无速度传感器控制综述. 电气传动, 2009, 39(9): 3 – 10.)
- [7] SUN Diansheng, ZHANG Yuejin. Sensorless control for interior permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection control and high frequency signal injection technique. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(4): 508 – 514.
(孙佃升, 章跃进. 自抗扰控制和高频信号注入的内嵌式永磁同步电机无位置传感器控制. 控制理论与应用, 2017, 34(4): 508 – 514.)
- [8] KESAVAN P, KARTHIKEYAN A. Electromagnetic torque-based model reference adaptive system speed estimator for sensorless surface mount permanent magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(7): 5936 – 5947.
- [9] MEHTA H, JOSHI V, KURULKAR P. Implementation issues of sliding mode observer for sensorless field oriented control of PMSM using TMS320F2812. *IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives*. Fiji: IEEE, 2016: 1 – 6.
- [10] TERMIZI M S, LAZI J M, IBRAHIM Z, et al. Sensorless PMSM drives using extended Kalman filter (EKF). *IEEE Conference on Energy Conversion*. Malaysia: IEEE, 2017: 145 – 150.
- [11] XU Chendong, YIN Quan, LUO Hui, et al. No estimation error speed sensorless control method for permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(12): 1 – 7.
(徐晨栋, 尹泉, 罗慧, 等. 永磁同步电机无位置估计误差的滑模观测器无速度传感器控制方法. 电机与控制应用, 2019, 46(12): 1 – 7.)
- [12] LI Jiangong. *Sensorless control of permanent magnet synchronous motor base on sliding-mode observer*. Shanghai: Shanghai Power Equipment Research Institute, 2010.
(李建功. 基于滑模观测器的永磁同步电机无速度传感器控制. 上海: 上海发电设备成套设计研究院, 2010.)
- [13] ZHENG Xuemei, LI Qiuming, SHI Hongyu, et al. Higher-order non-singular terminal-sliding-mode observer for permanent-magnet synchronous motor. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(10): 1467 – 1472.
(郑雪梅, 李秋明, 史宏宇, 等. 用于永磁同步电机的一种非奇异高阶终端滑模观测器. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1467 – 1472.)
- [14] RIZVI S A A, MEMON A Y. An extended observer based robust nonlinear speed sensorless controller for a PMSM. *International Journal of Control*, 2019, 92(9): 2123 – 2135.
- [15] ZHANG Xizheng, WANG Yaonan. Robust variable structure control of PMSM based on sliding mode observer. *Control and Decision*, 2009, 24(1): 157 – 160.
(张细政, 王耀南. 基于滑模观测器的永磁同步电机变结构鲁棒控制. 控制与决策, 2009, 24(1): 157 – 160.)
- [16] QU L, QIAO W, QU L. Active-disturbance-rejection-based sliding-mode current control for permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(1): 751 – 760.
- [17] ZHAO Y, LIU X, YU H, et al. Model-free adaptive discrete-time integral terminal sliding mode control for PMSM drive system with disturbance observer. *Iet Electric Power Applications*, 2020, 14(10): 1756 – 1765.
- [18] GENNARO S D, RIVERA J, CASTILLO-TOLEDO B. Super-twisting sensorless control of permanent magnet synchronous motors. *IEEE Conference on Decision & Control*. Atlanta, USA: IEEE, 2010: 4018 – 4023.
- [19] DING Shihong, LI Shihua. A survey for finite-time control problems. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 161 – 169.
(丁世宏, 李世华. 有限时间控制问题综述. 控制与决策, 2011, 26(2): 161 – 169.)
- [20] LIU Huixian, DING Shihong, LI Shihua, et al. Finite-time control of PMSM position servo system. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(3): 424 – 430.
(刘慧贤, 丁世宏, 李世华, 等. 永磁同步电机位置伺服系统的有限时间控制. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 424 – 430.)

- [21] ZHANG Xiaohua, LIU Huixian, DING Shihong, et al. PMSM speed-adjusting system based on disturbance observer and finite-time control. *Control and Decision*, 2009, 24(7): 1028 – 1032.
(张小华, 刘慧贤, 丁世宏, 等. 基于扰动观测器和有限时间控制的永磁同步电机调速系统. *控制与决策*, 2009, 24(7): 1028 – 1032.)
- [22] YU B, DU H, ZHOU J, et al. Global finite-time attitude stabilization for spacecraft under velocity constraint. *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*. China: IEEE, 2020: 376 – 380.
- [23] DU Haibo, LI Shihua, HE Yigang, et al. Distributed finite-time attitude cooperative control for roll channels of multiple bank-to-turn missiles. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(8): 956 – 963.
(都海波, 李世华, 何怡刚, 等. 多枚倾斜转弯导弹的滚转通道之分布式有限时间姿态协调控制. *控制理论与应用*, 2013, 30(8): 956 – 963.)
- [24] LIANG Yan, LI Yongdong. The state of art of sensor-less vector control of PMSM. *Electric Drive*, 2003, 2003(4): 4 – 9.
(梁艳, 李永东. 无传感器永磁同步电机矢量控制系统概述. *电气传动*, 2003, 2003(4): 4 – 9.)
- [25] SONG Yanyan. *Research on vector control of permanent magnet synchronous motor based on speed sensorless*. Xiangtan: Xiangtan University. 2018.
(宋彦彦. 基于无速度传感器的永磁同步电机矢量控制研究. 湘潭: 湘潭大学, 2018.)
- [26] BHATS P, BERNSTEIN S. Finite-time stability of continuous autonomous systems. *SIAM Journal Control Optimization*, 2000, 38(3): 751 – 766.
- [27] MORENOJ A, OSORIOM. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observer. *IEEE Conference on Decision and Control*. Mexico: IEEE, 2008: 2856 – 2861.

作者简介:

张伟键 硕士研究生, 目前研究方向为电机控制, E-mail: zhangvjian95@163.com;

都海波 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性控制理论、电力电子控制等, E-mail: haibo.du@hfut.edu.cn;

朱文武 博士研究生, 目前研究方向为电力电子控制系统, E-mail: wenwu.zhu.seu@gmail.com;

王利楠 硕士研究生, 目前研究方向为有限时间控制理论, E-mail: 2227815604@qq.com.