

基于自适应增益扰动观测器的快速变转速滑膜 PMSM 速度控制

吴铭杰

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月19日; 发布日期: 2024年11月26日

摘要

滑模控制虽然因其强大的鲁棒性和对系统参数变化及外部扰动的有效抑制能力而受到广泛关注, 但滑模控制的鲁棒性只在滑模面上表现出最佳效果, 在系统状态未达到滑模面时, 控制器的鲁棒性较弱。为了追求更高的快速性, 必然带来超调量的产生, 所以需要研究如何同时实现快速性和无超调。由此, 本文提出了一种快速变速趋近律(Fast Variable Speed Reaching Law, FVSRL)的设计, 以提高滑模控制的性能。所构造的趋近率基于变速项、指数项和快速项, 保证了快速收敛且无超调。同时, 为了减少扰动带来的影响, 在系统中增加了一个自适应增益扰动观测器进行前馈补偿。最后, 将本文提出的新型趋近律与另两种作比较。实验结果表明, FVSRL的收敛速度更快、抖振更小、抗扰性能更优秀。

关键词

永磁同步电机, 滑膜控制, 快速变速趋近律, 自适应扰动观测器

Speed Control for PMSM with Fast Variable-Speed Sliding Mode Control via Adaptive Gain Disturbance Observer

Mingjie Wu

School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 19th, 2024; published: Nov. 26th, 2024

Abstract

Although sliding mode control (SMC) has garnered significant attention due to its strong robustness

文章引用: 吴铭杰. 基于自适应增益扰动观测器的快速变转速滑膜 PMSM 速度控制[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6299-6311. DOI: 10.12677/mos.2024.136577

and its effective suppression of system parameter variations and external disturbances, its robustness is optimal only on the sliding surface. When the system state has not yet reached the sliding surface, the controller's robustness is relatively weak. The pursuit of higher speed inevitably leads to the generation of overshoot, thus necessitating research into how to achieve both rapidity and zero overshoot simultaneously. To this end, this paper proposes the design of a Fast Variable Speed Reaching Law (FVSRL) to enhance the performance of sliding mode control. The constructed reaching law is based on variable speed terms, exponential terms, and fast terms, ensuring fast convergence without overshoot. At the same time, to mitigate the impact of disturbances, an adaptive gain disturbance observer is introduced into the system for feedforward compensation. Finally, the new reaching law proposed in this paper is compared with two other approaches. Experimental results show that FVSRL achieves faster convergence, reduced chattering, and superior disturbance rejection performance.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Sliding Mode Control (SMC), Fast Variable Speed Reaching Law (FVSRL), Adaptive Gain Disturbance Observer (AGDO)

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)由于其高性能、高功率密度、结构简单和重量轻等优点,在机器人、电动汽车、数控机床和航空航天等许多现代交流伺服系统中得到越来越广泛的应用[1]。最经典的控制策略是比例-积分(Proportional-Integral, PI)控制,因其结构简单、稳定性好等优点被广泛应用于线性定常系统中[2]。然而, PMSM 是一个多变量强耦合的非线性系统[3]。在实际应用中, PMSM 会受到各种扰动的影响,如外部负载扰动和内部参数不匹配等[4]。这些因素都使得 PI 控制策略难以达到较高的控制性能。

近几十年来,为了克服传统 PI 控制器所带来的一些问题,许多非线性控制理论被提出和发展。这些方法包括模糊控制[5], 自抗扰控制[6], 模型预测控制[7]和滑模控制(Sliding Mode Controller, SMC) [8]。其中, SMC 因其结构简单、对模型精度要求低、对扰动不敏感等优点在控制领域引起了高度关注[9]。目前, SMC 已成功应用于电机调速系统[10]。然而, 滑模存在固有的抖振问题, 在传统的滑模控制中, 系统的不连续性和滑模趋近律中的切换项引起的抖振对控制过程非常不利[11], 因此, 抖振现象是 SMC 需要解决的重要问题之一。此外, SMC 仅在滑动模态下具有鲁棒性, 不能保证系统的全局鲁棒性。综上, 消除抖振和针对全局鲁棒性不足的补救措施是 SMC 的两个重要领域。趋近律的选择尤为关键, 因为它影响着系统状态向滑模面前进的方式[12]。

传统指数趋近律(Continuous Exponential Reaching Law, CERL) [13]最初由高卫斌院士提出并设计。一种基于新型滑模趋近律(New Sliding Mode Reaching Law, NSMRL)的新型滑模控制方法被提出。这种方法有效地减少了固有的抖振, 并提高了系统状态到达滑模面的速度[14]。针对离散时间系统的滑模控制, 提出了一种新的分级投切式趋近律。改进的趋近律保证了被控对象比早期方法更快的收敛性和更好的鲁棒性, 同时也有助于满足系统中重要信号的约束[15]。

由于扰动观测器可以容纳外部扰动, 因此可以提高系统的控制品质。通过引入干扰观测器来估计随机

偶然干扰[16],然后将这些估计前馈到 SMC 中,可以获得较好的控制性能。基于上述研究,本文提出了一种通过引入自适应增益扰动观测器(Adaptive Gain Disturbance Observer, AGDO)和快速变速滑模控制(FVSSMC)算法的复合控制策略,以实现 PMSM 系统更好的速度控制性能。此外,为了缩短调节时间,在 FVSSMC 中加入了一种新的快速变速趋近律(FVSRL)。在保证收敛时间无超调的同时,鲁棒性大大提高。

2. 永磁同步电机数学模型

本文以表贴式永磁同步电机为例,假设绕组对称,忽略铁心饱和,忽略涡流损耗和磁滞损耗,根据文献[15]中的电机控制理论,可以得到 PMSM 的数学模型。在 $d-q$ 同步旋转坐标系下的定子电压方程如下所示:

$$U_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (1)$$

$$U_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \quad (2)$$

式中: U_d 、 U_q 、 i_d 和 i_q 分别为 $d-q$ 坐标系下的定子电压和电流。 ω_e 是电角速度, R 是电机定子绕组的电阻。 $\psi_d = L_d i_d + \psi_f$ 和 $\psi_q = L_q i_q$ 分别是在 $d-q$ 坐标系下的定子磁链, L_d 和 L_q 是 $d-q$ 坐标系下的电子绕组的电感, ψ_f 是永磁体磁链。

永磁同步电机的电磁转矩方程表示如下:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

其中 T_e 为电磁转矩, n_p 为极对数,运动方程表示如下:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (4)$$

其中 J 为转动惯量, ω_m 为机械角速度, T_L 为负载转矩, B 为粘滞摩擦系数。

当考虑到存在参数变化不匹配情况时,式(4)可以被改写为式(5):

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_m}{dt} &= -\left(\frac{B}{J} + \Delta a\right)\omega_m - \left(\frac{T_L}{J} + \Delta c\right) + \left(\frac{3p\psi_f}{2J}i_q - \Delta b\right)i_q \\ &= a\omega_m + bu - d \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $a = -B/J$, $b = 3p\psi_f/2J$, $u = i_q$ 表示要设计的控制率; Δa 、 Δb 、 Δc 表示电机参数的变化情况, d 表示参数和负载变化引起的扰动,其表达式如下:

$$d = \Delta a\omega_m + \Delta bu + \Delta c + \frac{T_L}{J} \quad (6)$$

3. 控制器设计

3.1. 快速终端变速趋近律的设计

滑模变结构控制是一种特殊的变结构控制,本质上是一种非线性控制。SMC 的控制特性可以迫使系统状态沿着一个可设计的、与系统参数和扰动无关的滑模运动。因此,一旦系统状态轨迹到达滑模面,系统具有较强的鲁棒性。系统状态轨迹的运动分为两个过程,趋近运动和滑模运动,系统轨迹进入滑模运动过程后,其运动轨迹将沿滑模面 $s=0$ 作小幅度高频运动。因此,趋近律的设计直接影响系统状态的轨迹。高卫斌[13]提出了收敛速度的概念,并设计了一种应用广泛的 CERL 方法,表示为:

$$\dot{s} = -\mu \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (7)$$

其中 s 为滑膜面, μ 为趋近律, q 为趋近系数, $\mu > 0$ 且 $q > 0$ 。CERL 的相位图如图 1(a)所示。

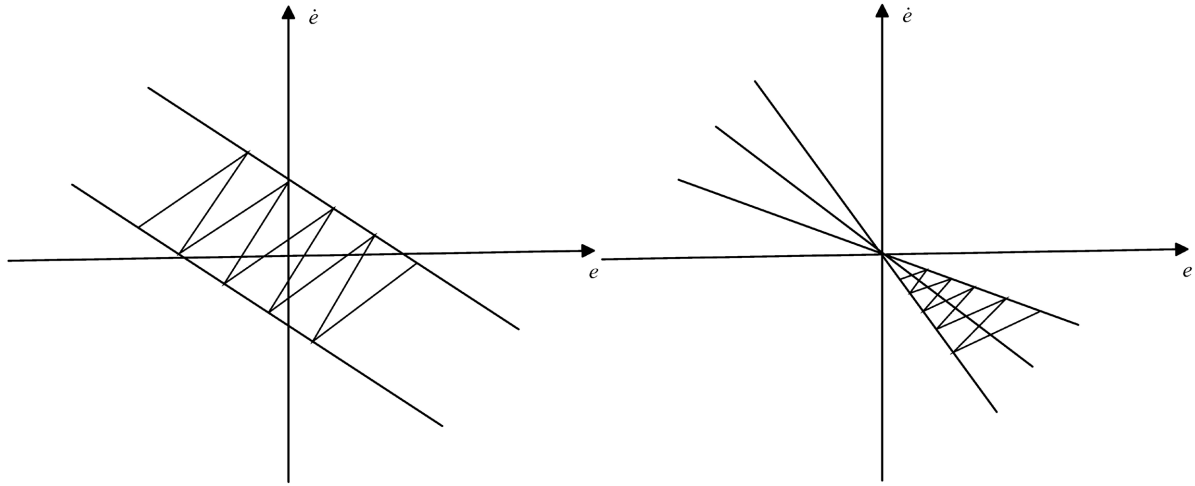


Figure 1. (a) CERL, (b) NSMRL

图 1. (a) CERL, (b) NSMRL

纯指数趋近律尽管在许多应用中都很实用,但是在某些情况下,系统的实际收敛速度可能比理论预测慢,尤其是在初始条件接近稳态时,无法在有限时间内到达滑膜面。为了解决这个问题,在原有的基础上增加了一个等速项 $\mu \operatorname{sgn}(s)$, 确保当 s 接近零时,到达速度为 μ 而不是零,保证了运动点在有限时间内到达, $\mu \operatorname{sgn}(s)$ 也可以作为切换函数来克服外部扰动项 d 。然而,当 μ 较小时,趋近速度较慢,当 μ 较大时,运动点以较大的速度到达滑膜面,会引起较大的抖振现象。综上可知,系统状态到达滑膜面的速度越快,引起的抖振也越大,因此为了解决滑模趋近速度与抖振之间的矛盾,对上述指数趋近律进行改进,得到一种新型快速变速趋近律(FVSRL),表示为:

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = -\mu |x| \tanh(\lambda s) - k |s|^\beta \operatorname{sgn}(s) - qs \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |x| = 0, \mu > 0, q > 0, k > 0, 0 < \beta < 1 \end{cases} \quad (8)$$

在恒速趋近项中引入系统状态变量,其中 x 为期望值与真实值之间的误差,由于变量项的引入,使得在系统状态从远离滑膜面到趋近滑膜面的过程中,恒速趋近项从较大值逐渐减小,保证了趋近速度的合理变化,减小了抖振。此外,将符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 替换为双曲正切函数 $\tanh(\lambda s)$, 进一步减小抖振。当系统状态远离滑膜面时, $-k |s|^\beta \operatorname{sgn}(s)$ 和 $-qs$ 起主要作用。当系统趋近于滑膜面时,指数项 $-k |s|^\beta \operatorname{sgn}(s)$ 和 $-qs$ 趋近于零,其影响变小,速度项 $-\mu |x| \tanh(\lambda s)$ 起主要作用。系统进入滑模过程,选定的状态量 x 进入滑膜面并向原点运动,此时,速度项 $-\mu |x| \tanh(\lambda s)$ 也随着 x 的减小而减小,最后稳定在原点。当 x 减小到零时,速度项变为零,抖振得到抑制。FVSRL 的相图如图 1(b)所示。

3.2. 滑膜控制器设计

基于 AGDO 和 FVSSMC, 整个 PMSM 控制框图如图 2 所示。PMSM 的状态变量由方程(5)给出:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{cmd} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \quad (9)$$

方程中 ω_{cmd} 表示目标转速, ω_m 表示电机输出转速。联立式(9)并对其求导可得式(10):

3) 当 $\|t\| \rightarrow \infty$ 时, 有 $V(x) \rightarrow \infty$ 。

则系统原点 $x = 0$ 的平衡状态为大范围一致渐近稳定。

证明: 为了证明基于 FVSSMC 的滑模控制器下系统的稳定性, 选择李雅普诺夫稳定性定理(即定理 1)来扩展证明。构造了如下形式的 Lyapunov 函数。

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (16)$$

v 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(c\dot{x}_1 - b\dot{i}_q + a\dot{\omega}_m - \dot{d}) \end{aligned} \quad (17)$$

将方程(13)带入方程(16), 得到方程(17)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s \left(c\dot{x}_1 - b \left\{ \frac{1}{b} \left[c\dot{x}_1 + a\dot{\omega}_m + \mu|x|\tanh(\lambda s) + k|s|^\beta \operatorname{sgn}(s) + qs - \dot{\hat{d}} \right] \right\} + a\dot{\omega}_m - \dot{d} \right) \\ &= -s \left(\mu|x|\tanh(\lambda s) + k|s|^\beta \operatorname{sgn}(s) + qs + \dot{d} - \dot{\hat{d}} \right) \\ &= -s \left(\mu|x|\tanh(\lambda s) + k|s|^\beta \operatorname{sgn}(s) + qs \right) \end{aligned} \quad (18)$$

其中, μ , k 均为正的常数, 双曲正切函数 $\tanh(\lambda s)$ 与符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 同正同负, 使得式(17)满足

$$\dot{V}(x) \leq 0 \quad (19)$$

保证了滑模控制的到达条件和李雅普诺夫稳定性条件。

4. 采用自适应增益干扰观测器的扰动估计

4.1. 自适应增益干扰观测器的设计

在控制对象模型(5)中, 系统的总扰动 d 在实际应用中无法测量。为了进一步提高滑模控制的鲁棒性, 本文设计了一种 SMDO。该观测器能够观测电机转速和扰动, 并将观测到的扰动补偿到控制输入中, 从而提高了系统的鲁棒性。将 d 扩展为系统状态变量, 则(5)扩展为如下形式的系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}_m \\ \dot{\hat{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (21)$$

4.1.1 自适应增益设计

对于所提出的自适应增益方法, 可以表示如下:

$$k_n(t) = c \int (|s| - \sigma k_n(t)) dt \quad (22)$$

其中, c 是一个可以调整系统响应速度的常数。 σ 是一个正的常数, 范围为 $0 < \sigma < 1$ 。 σ 的值越小, 自适应增益越大, 但可能会引起一些振荡。可以从公式(22)中得出结论, $k_n(t)$ 会根据当前误差的变化, 在变化的操作条件下改善系统性能。

4.1.2 新型趋近律

取滑模面为 $s = \omega_m - \hat{\omega}_m$ ，传统的趋近律为：

$$\dot{s} = -k|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \quad k > 0, 1 > \alpha > 0 \quad (23)$$

当 $s \neq 0$ 时，可以通过对方程(23)从 0 到 t 积分，计算系统根据逼近法到达滑模面的时间。此时，系统状态的初始值为 $s(0) = s_0$ 。当系统状态到达滑模面，即 $s(t) = 0$ 时，系统的到达时间为：

$$t_1 = \frac{|s_0|^{1-\alpha}}{(1-\alpha)k_1} \quad (24)$$

然而，根据公式(24)，如果控制系统的初始状态远离平衡点，收敛法则的收敛速度会较慢，从而导致较长的收敛时间，影响系统的动态性能。基于上述传统的功率趋近法则，提出了一种改进的快速功率趋近法则。该新法则保留了传统功率趋近法则的优点，并进一步加快了全局收敛速度，提高了系统的响应速度，同时有效抑制了系统振荡现象。其具体形式如下：

$$\dot{s} = -k_1|s|^\alpha g(s) - k_2s$$

$$g(s) = \begin{cases} \tanh(\lambda s) & |s| \geq \varepsilon \\ \tanh(\lambda s) \left(\frac{|s|}{\varepsilon} \right)^\varepsilon & |s| < \varepsilon \end{cases} \quad (25)$$

其中 $k_1 > 0, k_2 > 0, 0 < \alpha < 1, \alpha + \varepsilon > 0$ 。式(25)里，在新的趋近律中，前一部分是功率项，后一部分是幂指数项。

当系统远离滑模面时，功率项和指数项共同作用，收敛速度较快，收敛时间较短；当系统接近滑模面时，指数项逐渐趋近于 0，此时系统状态的收敛速度主要由功率项决定，从而减弱了指数项引起的抖动问题，同时保证了全局收敛速度。

这其中， $g(s)$ 为分段函数， ε 是边界层，在边界层外用开关切换控制。在边界层内，系统状态接近滑模面是缓慢收敛，确保收敛速度并减少高频切换引起的振荡。当系统的误差较大时，增益会自动增加，使得干扰观测器的响应加快；当误差较小时，增益会减小，避免系统的过度响应。

4.2. 观测器稳定性分析

构造 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2}s^2$ ，根据式(24)可得：

$$\dot{V} = s\dot{s} = -k_1|s|^{\alpha+1}g(s) - k_2s^2 \quad (26)$$

当 $k_1 > 0, k_2 > 0, 1 > \alpha > 0$ ，可以得出 $\dot{V}(x) \leq 0$ ，满足稳定性条件，证明收敛率可以保证系统在有限时间内收敛到滑模面。

5. 仿真实验与分析

为了验证本研究提出的 FVSSMC 的有效性，本部分比较了 CERL、NSMRL 和 FVSRL 结合 AGDO 控制策略在电机启动、变速运行和突加负载等几种工况下的转速和电流波形。图 2 给出了基于 FVSSMC 和 AGDO 的 PMSM 伺服系统结构图。采用 FVSSMC 和 AGDO 作为速度控制器，其中 AGDO 观测系统

的估计总扰动 d ，然后将估计总扰动补偿给 FVSSMC，最后由 FVSSMC 输出电流环的参考电流。

本研究使用的 PMSM 仿真参数如表 1 所示。为保证对比实验的有效性，所有实验的电流环控制器均采用相同参数的 PI 控制。

Table 1. Parameters of the PMSM
表 1. 永磁同步电机参数

参数	数值	参数	数值
极对数 p	4	定子磁链 ψ_f/Wb	0.175
定子电阻 R_s/Ω	2.875	转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
d 轴电感 L_d/mH	8.5	直流母线电压/V	311
q 轴电感 L_q/mH	8.5	阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008

5.1. 电机启动仿真实验与性能比较

实验一对比了 CERL、NSMRL、FVSRL 控制策略下的电机启动效果，图 3 为三种控制策略下电机启动实验的转速波形并显示了三种控制策略下电机启动速度波形的局部缩放，仿真所得的各项实验数据如表 2 所示。参考转速给定为 1000 r/min。如图 3 所示，FTSVRL 在最短的时间 0.076 s 内达到期望转速，而 CERL 和 NSMRL 分别需要 0.282 s 和 0.245 s。因此，这种比较表明 FTSVRL 优于 CERL 和 NSMRL。图 4 表示相应的电流变化，代表了控制输入的变化，显示了电流的差异。综合比较，FVSSMC 性能最好，响应时间最快，误差最小。

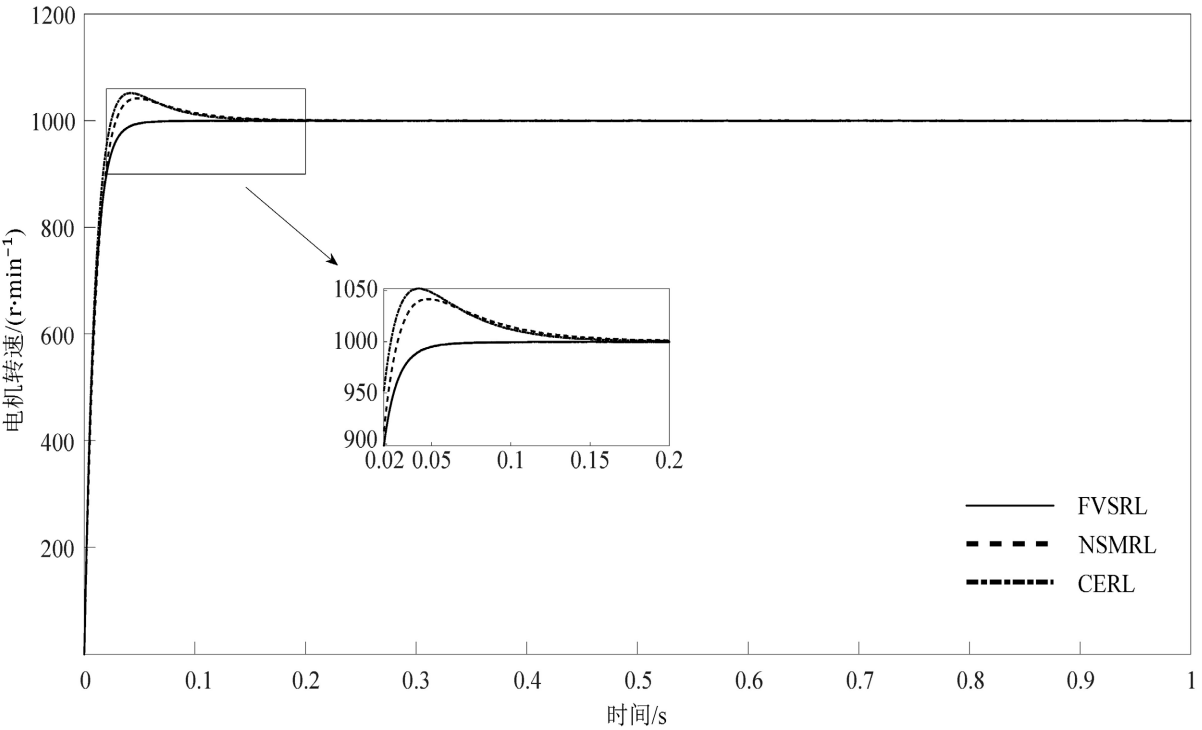


Figure 3. No-load startup speed simulation waveform
图 3. 空载启动转速仿真波形

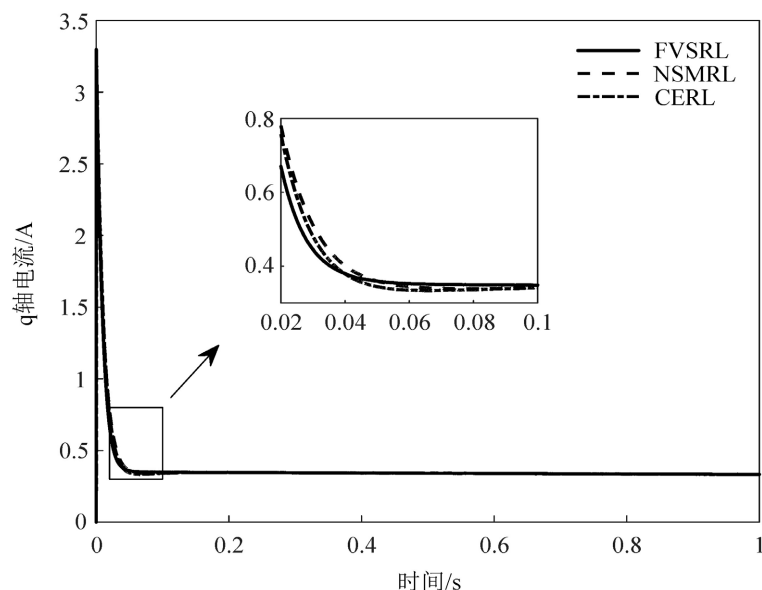


Figure 4. No-load startup control input simulation waveform

图 4. 空载启动控制输入仿真波形

Table 2. No-Load start data Indicators

表 2. 空载启动数据指标

控制方式	转速峰值/(r·min ⁻¹)	转速超调/%	调节时间/s	稳态误差/(r·min ⁻¹)
CERL	1056	5.6	0.19	0.45
NSMRL	1043	4.3	0.18	0.15
FVSRL	1002	0.2	0.08	0.02

5.2. 电机变速实验与性能分析

实验二对比了 CERL、NSMRL、FVSRL 控制策略下电机变转速运行的实验效果。图 5 给出了 CERL、NSMRL 和 FVSRL 的速度跟踪性能对比。期望转速在 0 s 时从 0 变化到 1000 r/min，在 0.5 s 时从 1000 r/min 变化到 1500 r/min。图 6 显示了电流的相应变化，代表了控制输入。

从表 3 和图 5 的局部放大图可以看出，CERL 和 NSMRL 的速度超调明显，响应时间较长。CERL 和 NSMRL 控制策略通常会通过提高系统的动态响应速度来保证系统的快速性，然而，滑模控制中常见的抖振现象容易引起系统的不稳定性，尤其在趋近律中如果控制增益设置较大时，会引起系统振荡和超调。CERL 的高频抖振问题比较明显，而 NSMRL 尽管通过改进滑模趋近律可以减小抖振，但仍可能在某些动态条件下响应较慢，造成速度超调现象。FVSRL 控制策略的转速波形均能很好地跟随参考转速。综上所述，FVSRL 的跟踪性能优于 CERL 和 NSMRL。

Table 3. Variable speed operation metrics data

表 3. 变速运行数据指标

控制方式	转速峰值/(r·min ⁻¹)	转速超调/%	调节时间/s	稳态误差/(r·min ⁻¹)
CERL	1525	1.67	0.168	0.44
NSMRL	1519	1.27	0.164	0.27
FVSRL	1503	0.2	0.084	0.05

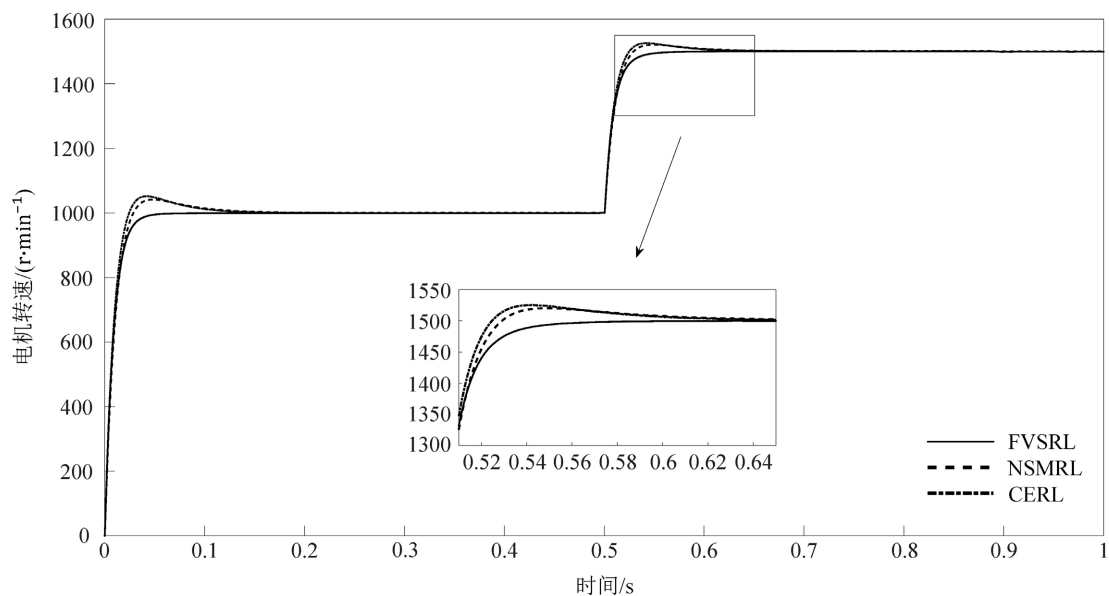


Figure 5. Variable-speed operation simulation waveform

图 5. 变速运行转速仿真波形

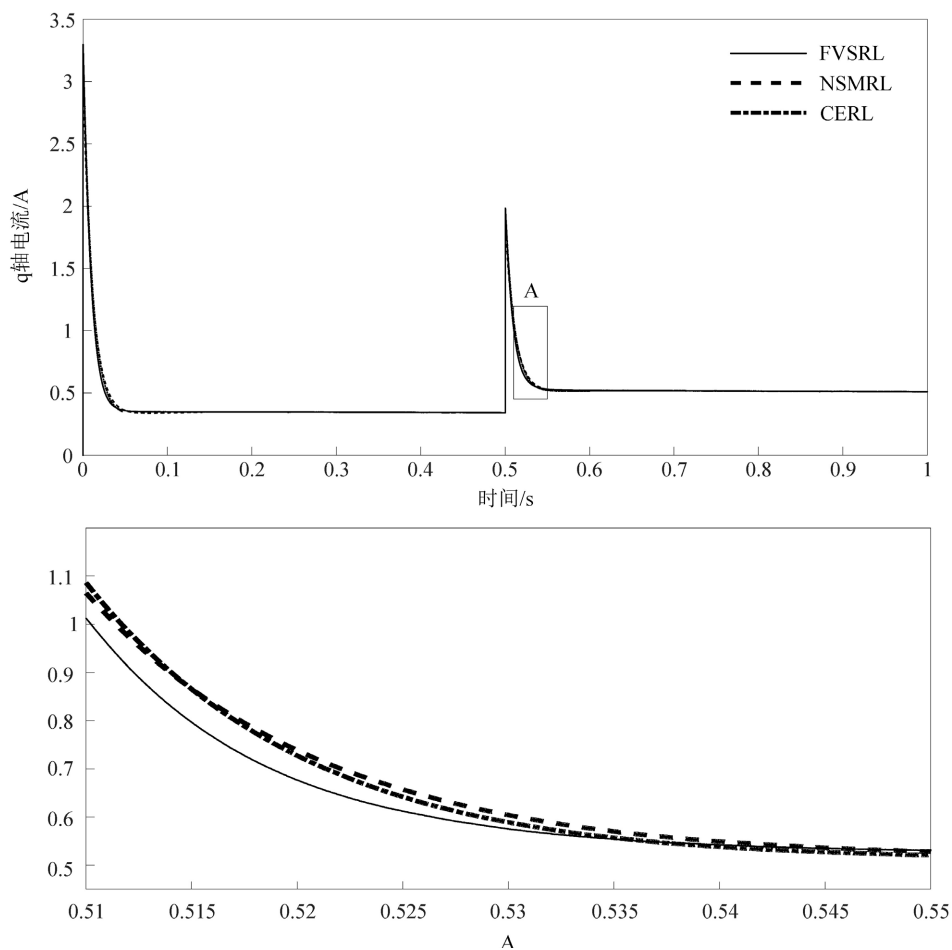


Figure 6. Variable-speed control input simulation waveform

图 6. 变速运行控制输入仿真波形

5.3. 电机变负载实验与性能分析

实验三是突加负载转矩在 CERL、NSMRL、FVSRL 控制策略下的实验效果对比。表 4~5 和图 7 显示了电机在转速为 1000 r/min, 0.3 s 时对 1.5 N·m 突加负载的速度响应, 负荷持续时间为 0.4 s, 即在 0.3 s 时施加负荷, 并在 0.7 s 时移除负荷。如图 7 所示, FVSRL 分别比 CERL 和 NSMRL 实现了更小的速度偏离期望速度, 相应的电流变化如图 8 所示。综合分析表明, CERL、NSMRL、FVSRL 的最大转速跌落值依次减小, 调节时间也依次减小。也就是说, 所提出的 FVSSMC 具有更好的抗扰动性能。

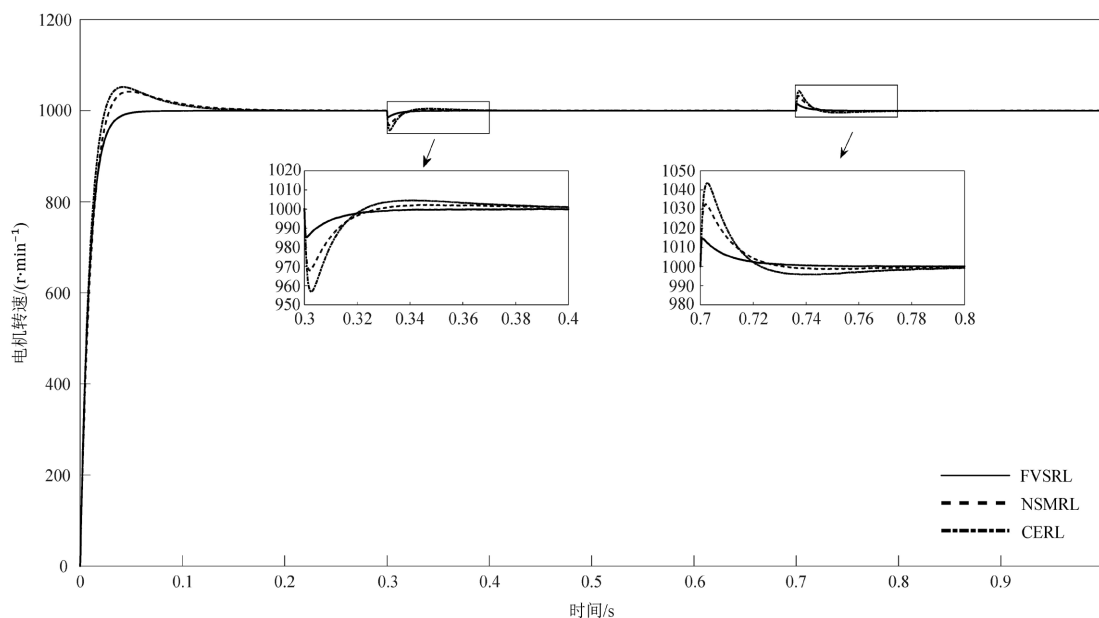


Figure 7. Variable-load speed simulation waveform

图 7. 变负载转速仿真波形

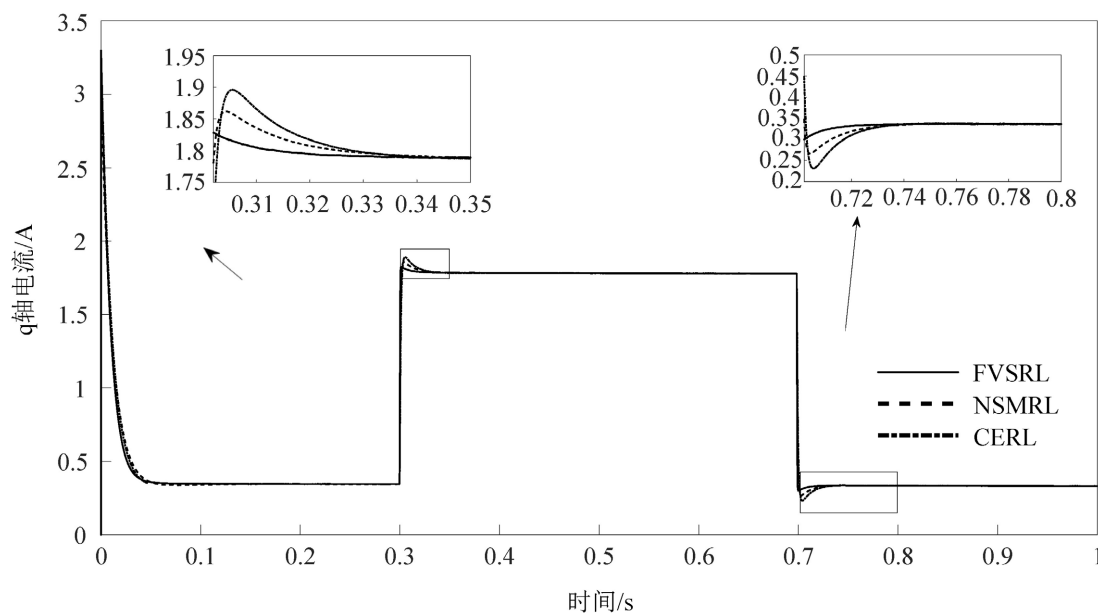


Figure 8. Variable-load control input simulation waveform

图 8. 变负载控制输入仿真波形

Table 4. Performance indicators under sudden load increase
表 4. 突加负载时的数据指标

控制方式	转速峰值/(r·min ⁻¹)	转速超调/%	调节时间/s	稳态误差/(r·min ⁻¹)
CERL	957	4.3	0.072	0.057
NSMRL	968	3.2	0.036	0.032
FVSRL	985	1.5	0.025	0.005

Table 5. Performance indicators under sudden load decrease
表 5. 突减负载时的数据指标

控制方式	转速峰值/(r·min ⁻¹)	转速超调/%	调节时间/s	稳态误差/(r·min ⁻¹)
CERL	1043	4.3	0.079	0.045
NSMRL	1032	3.2	0.061	0.025
FVSRL	1014	1.4	0.031	0.004

6. 结语

为了提高永磁同步电机的快速响应和抗干扰能力,本文提出了 FVSRL 控制率,并设计了基于 FVSRL 的滑模控制器。然后设计 AGDO 来观测系统的总扰动,并将估计的总扰动补偿给 FVSSMC,以提高系统的抗扰动性能。利用李雅普诺夫稳定性定理证明了采用 FVSSMC 控制策略时系统的稳定性。

本文研究的主要结论可以归纳为以下几点:

1) 快速变速趋近律(FVSRL)的优越性: 本文提出的快速变速趋近律(FVSRL)能有效改善滑模控制的性能。与传统的 CERL 和 NSMRL 相比, FVSRL 具有更快的收敛速度、抖振更小,同时避免了速度超调的问题,尤其在电机启动和变速运行时表现出更优的控制效果。

2) 自适应增益扰动观测器(AGDO)的引入: 通过设计自适应增益扰动观测器, 本文的控制系统能够有效估计并补偿系统中的总扰动, 提高了系统的抗扰性能。这使得电机在面对外部负载变化和内部参数不匹配时, 依然能够保持良好的控制效果。

3) 鲁棒性和系统稳定性: 利用李雅普诺夫稳定性理论证明了所设计的滑模控制器(FVSSMC)在引入 AGDO 后, 系统在电机启动、变速、突加负载等多种工况下均能保持较高的稳定性和鲁棒性。

4) 仿真实验验证: 通过仿真实验对比 CERL、NSMRL 和 FVSRL 的控制性能, 本文验证了 FVSRL 结合 AGDO 的复合控制策略在电机启动、变速运行及突加负载扰动等情况下表现优于其他两种策略, 尤其在响应速度、抖振控制和抗扰动方面具有显著优势。

参考文献

- [1] Deng, Y., Wang, J., Li, H., Liu, J. and Tian, D. (2019) Adaptive Sliding Mode Current Control with Sliding Mode Disturbance Observer for PMSM Drives. *ISA Transactions*, **88**, 113-126. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.11.039>
- [2] Jung, J., Leu, V.Q., Do, T.D., Kim, E. and Choi, H.H. (2015) Adaptive PID Speed Control Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 900-908. <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2311462>
- [3] Guo, B., Bacha, S. and Alamir, M. (2017) A Review on ADRC Based PMSM Control Designs. *IECON 2017—43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, 29 October-1 November 2017, 1747-1753. <https://doi.org/10.1109/iecon.2017.8216296>
- [4] Qu, L., Qiao, W. and Qu, L. (2021) An Extended-State-Observer-Based Sliding-Mode Speed Control for Permanent-Magnet Synchronous Motors. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **9**, 1605-1613.

- <https://doi.org/10.1109/jestpe.2020.2990442>
- [5] Lin, F. and Lin, C. (2004) A Permanent-Magnet Synchronous Motor Servo Drive Using Self-Constructing Fuzzy Neural Network Controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **19**, 66-72. <https://doi.org/10.1109/tec.2003.821835>
- [6] 迟世伟, 刘慧博. 基于前馈补偿的永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 9-13.
- [7] Zhou, Y., Li, H., Liu, R. and Mao, J. (2019) Continuous Voltage Vector Model-Free Predictive Current Control of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **34**, 899-908. <https://doi.org/10.1109/tec.2018.2867218>
- [8] Zwerger, T. and Mercorelli, P. (2024) Optimal Control Strategies for PMSM with a Decoupling Super Twisting SMC and Inductance Estimation in the Presence of Saturation. *Journal of the Franklin Institute*, **361**, Article ID: 106934. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2024.106934>
- [9] Sun, G., Ma, Z. and Yu, J. (2018) Discrete-time Fractional Order Terminal Sliding Mode Tracking Control for Linear Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **65**, 3386-3394. <https://doi.org/10.1109/tie.2017.2748045>
- [10] Zaihidee, F.M., Mekhilef, S. and Mubin, M. (2019) Application of Fractional Order Sliding Mode Control for Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Access*, **7**, 101765-101774. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2931324>
- [11] Wang, Y., Feng, Y., Zhang, X., Liang, J. and Cheng, X. (2019) New Reaching Law Control for Permanent Magnet Synchronous Motor with Extended Disturbance Observer. *IEEE Access*, **7**, 186296-186307. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2956846>
- [12] Ma, H., Wu, J. and Xiong, Z. (2017) A Novel Exponential Reaching Law of Discrete-Time Sliding-Mode Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**, 3840-3850. <https://doi.org/10.1109/tie.2017.2652390>
- [13] Weibing Gao, and Hung, J.C. (1993) Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **40**, 45-55. <https://doi.org/10.1109/41.184820>
- [14] Hou, Q. and Ding, S. (2022) Finite-time Extended State Observer-Based Super-Twisting Sliding Mode Controller for PMSM Drives with Inertia Identification. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **8**, 1918-1929. <https://doi.org/10.1109/tte.2021.3123646>
- [15] Bartoszewicz, A. and Lesniewski, P. (2016) New Switching and Nonswitching Type Reaching Laws for SMC of Discrete Time Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **24**, 670-677. <https://doi.org/10.1109/tcst.2015.2440175>
- [16] 刘京, 李洪文, 邓永停. 基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 933-944.