

基于改进自适应趋近率的永磁同步电机无模型控制系统设计

储禹丞¹, 张兰红¹, 程梦坤²

(1. 盐城工学院 电气工程学院, 江苏 盐城 224051; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211100)

摘要: 传统的速度环控制在永磁同步电机负载突变时, 会引起转速波动较大从而影响电机运行的稳定性, 为了抑制转速波动, 并实现电机转速的快速响应, 采用了一种基于扩展滑模扰动观测器的改进型趋近率控制方法; 新算法通过引入含有外部扰动的电机运动方程, 并将扰动进行扩展分析, 建立了扰动观测器的数学模型, 增加扰动观测的准确性; 为了减少滑模控制器的抖振, 提高响应速度, 提出了一种改进型的滑模趋近率, 新控制器采用增益自适应、幂次自适应的方法, 实现动态调节控制增益的目的; 将新算法分别与基于传统指数趋近律的无模型算法和 PI 控制策略进行仿真对比, 仿真结果验证了所提控制策略在提高系统响应速度以及抗干扰能力方面的优异性能。

关键词: 永磁同步电机; 扩展滑模扰动观测器; 改进自适应趋近率; 抗干扰能力; 无模型控制

Model-free Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Adaptive Reaching Law

CHU Yucheng¹, ZHANG Lanhong¹, CHENG Mengkun²

(1. School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: When the traditional speed control encounters the abrupt load, it will cause a large speed fluctuations which may affect the stability of the motor operation. In order to reduce the speed fluctuations and improve the response speed of the motor speed, an improved adaptive reaching law model-free control method based on the extended sliding-mode disturbance observer was proposed. The disturbance is extended for analysis by introducing the motor motion equation, and the mathematical model of the disturbance observer is established to increase the accuracy of disturbance observation. In order to reduce the chattering of the slide controller and improve the response speed, the new algorithm adopts an improved adaptive slide reaching law. By adopting the method of gain adaptation, controller can adjust the speed of approaching the sliding mode. By verifying the excellent performance of the new control strategy in improving the system response speed and anti-interference capability through the simulation comparison of the new algorithm with model-free control based on exponential reaching law and the PI control strategy.

Keywords: PMSM; extended sliding-mode disturbance observer; improved adaptive reaching law; anti-interference capability; model-free control

0 引言

永磁同步电机 (PMSM, permanent magnet synchronous motor) 因具有高效率、高功率密度、高可靠性等特点, 广泛应用于电动汽车、工业自动化、家用电器、航空航天等领域, 随着永磁同步电机应用领域的不断扩大, 对于其转速的响应速度、抗干扰性能的要求也不断提高, 传统的 PI 控制因为处理非线性困难、抗干扰能力较差等缺陷^[1], 不能满足对电机动、静态性能要求较高的场合。随着控制理论不断发展, 针对永磁同步电机的高精度控制, 涌现出了很多有效的控制理论, 诸如模型预测^[2-4]、模型参

考自适应^[5-7], 这些算法自提出以来便受到了广泛的关注, 但是这些算法的控制性能取决于控制对象精确模型的获取。永磁同步电机作为一个强非线性、强耦合的控制系统, 其精确的数学模型较难获得, 并且电机实际运行过程中, 电机模型中的参数并非保持不变的^[8], 故而以上算法具有一定的局限, 需要做进一步的优化和改进。

为了减少转速控制性能对电机精确模型的依赖, 提高电机的响应速度和抗干扰能力, 无模型控制自 20 世纪 70 年代提出以来便受到了广泛关注。在 1994 年, 侯忠生教授提出了无模型自适应控制策略, 在文献 [9] 中, 侯忠生教授

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-04-30。

作者简介: 储禹丞(2005-), 男, 大学本科。

通讯作者: 张兰红(1968-), 女, 博士, 教授。

引用格式: 储禹丞, 张兰红, 程梦坤. 基于改进自适应趋近率的永磁同步电机无模型控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 137-143.

引入伪梯度的概念进行动态数学模型的在线估计,而后法国学者 M. Fliess 借助基于超局部结构 (ultra local model) 的无模型控制方案^[10],提出了智能 PID 的控制方式,相比于传统的 PI 控制,所提算法可以明显提高控制系统的响应速度和抗干扰能力。而为了进一步提高算法的响应速度和处理非线性控制对象的能力,便有学者将滑模控制用于无模型控制器的设计^[11]。滑模控制具有不依赖于精确模型、响应速度快、抗干扰能力强等特点,但是其采用非连续的控制模式会带来系统抖振问题,严重甚至会影响系统的稳定性。

滑模控制器的设计,文献 [12] 采用了递归非奇异的终端滑模控制结构,增加响应速度的同时也可以减少滑模的抖振现象,但是该算法实现较为复杂,并且需要设计的参数较多。文献 [13] 采用一种改进的指数趋近率,引入指数项,减少抖振的同时通过加入含有滑模面信息的可变增益项实现整体鲁棒性的提高。文献 [14] 采用自适应滑模趋近率方式并将滑模趋近率进行离散化处理,但是该方法实现复杂,稳定性判定较为困难。对于扰动观测器的设计,文献 [15] 采用的是扩张状态观测器 (ESO) 进行外界扰动的在线估计,但是该方法具有稳定性判断困难,且响应速度较慢的问题,文献 [16] 采用扩展滑模扰动观测器进行扰动估计,该方法需要调节的参数较少,并且系统鲁棒性较强,响应速度较快。文献 [17] 采用类超螺旋滑模算法进行固定时间扰动观测器的设计,在减少抖振的同时还可以提高响应速度,但是该估计方法的稳定性判断复杂,需要整定参数较多。

以上述研究为基础,提出了一种新型的无模型控制算法并应用于转速环中,以取代传统的 PI 控制。新算法一方面采用超局部模型进行基于改进滑模自适应趋近率 (IARL, improved adaptive reaching law) 控制器的设计,自适应增益的方式减少了传统滑模控制所固有的抖振,并且相比于传统滑模控制方法,新算法可以进一步提高响应速度。另一方面,将电机运动方程中引入扰动项,并对扰动进行扩展分析,建立了改进扩展滑模扰动观测器 (IESMDO, improved extended sliding-mode disturbance observer) 进行扰动的在线估计,增加扰动估计的准确性。

1 永磁同步电机数学模型

由于实际的永磁同步电机存在非线性特性,以及各类损耗、外界环境等因素对电机的参数和性能也会产生影响,使得 PMSM 准确的数学模型难以建立,为了简化数学模型,在永磁同步电机数学模型正式建立之前,需要对其作如下假设^[18]:

- 1) PMSM 的磁场沿气隙圆周呈正弦分布。
- 2) 忽略电机参数的变化。
- 3) 忽略定子绕组的齿槽对气隙磁场的影响。
- 4) 假设铁心的磁导率无穷大,忽略定子铁心和转子铁心中的磁滞损耗与涡流损耗。

对永磁同步电机磁场正弦分布的理想化假设主要是为

了简化磁场分布的描述,便于实现数学建模,而电机的参数受外界环境的影响是会发生变化的,所以为了简化分析,也需要假设其不发生变化,而忽略定子绕组齿槽对气隙磁场的影响则是为了保证气隙磁场为正弦形式,铁心的磁导率为无穷大则是为了忽略定子铁心和转子铁心中的磁滞损耗和涡流损耗。这四个条件是永磁同步电机数学模型得以建立的前提条件。

在上述 4 个假设同时满足的情况下,永磁同步电机在 D-Q 旋转坐标系下的数学模型可分为下列 3 组方程:

$$\begin{cases} u_d = (R_s + L_d p) i_d - L_q \omega_e i_q \\ u_q = L_d \omega_e i_d + (R_s + L_q p) i_q + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q] \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3)$$

式 (1) 中, u_d, u_q 表示定子电压在 d, q 轴的电压分量,同理, i_d, i_q 为定子电流在 d, q 轴的电流分量, R_s 为定子电阻, L_d, L_q 分别为定子电感在 d, q 轴上的分量, p 为微分算子, ω_e 为电角速度, ψ_f 为转子永磁体磁链, p_n 永磁体的极对数。式 (3) 中 J 为 PMSM 的转动惯量, ω_m 为电机的机械角速度, T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, B 为阻尼系数。

在电机实际运行过程中,上述理想假设是很难时刻成立的,使得精确的数学模型难以准确获得,在上述数学模型基础之上,在引入各种扰动之后,电机的数学模型变为:

$$\begin{cases} u_d = (R_{s0} + L_{d0} p) i_d - L_{q0} \omega_e i_q + \Delta u_d \\ u_q = L_{d0} \omega_e i_d + (R_{s0} + L_{q0} p) i_q + \omega_e \psi_{f0} + \Delta u_q \end{cases} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [(L_{d0} - L_{q0}) i_d i_q + \psi_{f0} i_q] + \Delta T_e \quad (5)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B_0 \omega_m + \Delta T \quad (6)$$

式中,下标形如 A_0 的表示对应物理量的标称值,而 $\Delta u_d, \Delta u_q, \Delta T_e, \Delta T$ 则表示采用理想模型同实际电机运行时的偏差量。

由 (5)、(6) 可知,在考虑外界扰动的情况下,电机的实际模型表示为^[19]:

$$J \frac{d\omega_e}{dt} = p_n \left(\frac{3}{2} p_n \psi_{e0} i_q + \Delta T_e - T_L - B_0 \omega_m + \Delta T \right) \quad (7)$$

式 (7) 表明,在实际运行的电机系统中,获取电机准确模型的难度较高,需要调速系统的控制性能降低对精确控制模型的严重依赖。并且要求控制策略具有较强的抗干扰能力和及时补偿的能力。

2 新型无模型滑模控制器设计

2.1 超局部模型

对于单输入单输出非线性系统的数学模型可以使用以下的超局部模型表示:

$$y^{(\nu)} = F + au \quad (8)$$

式中, y 表示输出量, ν 表示微分的阶数, F 表示未知扰动,包括匹配扰动和非匹配扰动, u 为控制器的输出, a 是一个常数,为保证 au 与 $y^{(\nu)}$ 具有相同的量级。

将式 (8) 用于 PMSM 调速系统中, 构建超局部模型:

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \alpha i_q + F \quad (9)$$

由式 (9), 可以得到转速环的控制率为:

$$i_q^* = \frac{F - \dot{\omega}_e^* - u_c}{\alpha} \quad (10)$$

结合式 (9), (10) 得到:

$$u_c = -(\dot{\omega}_e^* - \dot{\omega}_e) \quad (11)$$

基于超局部结构的无模型控制方案的结构图如图 1 所示。

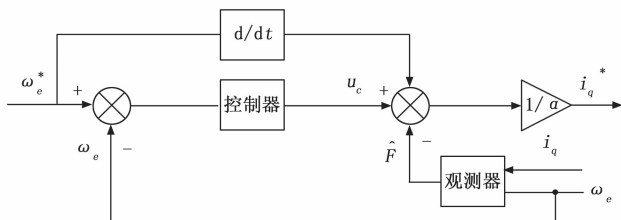


图 1 超局部模型控制结构

由图 1 可以得到无模型控制的整体控制结构, 无模型控制模型主要由无模型控制器和无模型扰动观测器构成, 后续也是按照无模型新型自适应趋近率滑模控制器设计和无模型扩展滑膜扰动观测器设计的顺序展开论述的。

2.2 无模型新型自适应趋近率滑模控制器

2.2.1 新型滑模趋近率

传统的指数趋近率 (ERL, exponent reaching law) 的数学表达式如式 (12):

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (12)$$

式中, s 为滑模面, $\epsilon, k > 0$ 为待设计的参数。

借助欧拉前向近似化简为离散形式得到^[20]:

$$\frac{s(n+1) - s(n)}{T_s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s(n)) - ks(n) \quad (13)$$

式中, T_s 为开关频率 (控制频率)。

当 $s(n) \rightarrow 0$ 时, 由于控制输出并非瞬间作用到被控对象上, 所以 $s(n)$ 会收敛到 $s(n) = 0$ 一个较小的邻域内, 此时有下式:

$$s(n+1) = \begin{cases} -T_s \epsilon & s(n) = 0^+ \\ T_s \epsilon & s(n) = 0^- \end{cases} \quad (14)$$

由式 (14) 可得, 控制状态会在滑模面上作“Z”形运动, 同时为了保证趋近速度, ϵ 通常是一个较大的值。这使得控制状态在趋近滑模面 ($s \rightarrow 0$) 时, 会遇到明显的抖振现象, 除此之外, 控制状态在滑模面上以较大增益反复变化也会影响系统的稳定性。

针对传统指数趋近率趋近速度和减小抖振之间的矛盾, 便提出了新型的自适应趋近率, 新趋近率是在原有指数趋近率基础上的改进, 改进的自适应指数趋近率 (IAERL, improved adaptive exponential reaching law) 的数学模型如式 (15) 所示:

$$\dot{s} = -\frac{k_1}{\beta(1+k_1 e^{-\beta|s|})} |s| \operatorname{sgn}(s) - k_2 |s|^{\beta \operatorname{sgn}(|s|^{-1})} s \quad (15)$$

式中, $k_1, k_2 > 0, 0 < \beta, \beta < 1$ 为待设计的参数。

将新型滑膜趋近率对应于指数趋近率的增益部分的表达式列出如式 (16)、(17) 所示:

$$\frac{k_1}{\beta(1+k_1 e^{-\beta|s|})} = \begin{cases} \frac{k_1}{\beta(1+k_1)}, & s = 0 \\ \frac{k_1}{\beta}, & s \rightarrow \infty \end{cases} \quad (16)$$

$$k_2 |s|^{\beta \operatorname{sgn}(|s|^{-1})} s = \begin{cases} k_2 |s|^{\beta} s, & |s| > 1 \\ k_2 |s|^{-\beta} s, & |s| < 1 \end{cases} \quad (17)$$

改进型的自适应滑模趋近率区别于传统指数趋近律, 主要可分为两部分; 第一部分如式 (16) 所示, 采用增益可变的原则, 此处通过选取两个极限值进行定性分析。为保证趋近速度, k_1, k_2 要比 β 大几个量级, 这样是为了保证趋近滑膜面的速度, 假设初始控制状态距离滑膜面较远, 即 s 较大, 此时对应的增益趋近于 $\frac{k_1}{\beta}$, 可认为是一个较大的增益, 实现快速趋近滑膜面的目的, 而当到达滑膜面上时, 即 $s \rightarrow 0$ 时, 此时式 (16) 的增益趋近于 $\frac{k_1}{\beta(1+k_1)}$ 而由于

$\frac{k_1}{\beta(1+k_1)} \ll \frac{k_1}{\beta}$, 大大减小了控制状态在靠近滑膜面上滑动时引起的抖振, 同时这种设计增强了滑模控制系统的鲁棒性。第二部分如式 (17) 所示, 采用的是幂次可变的趋近方式, 在 $|s| \rightarrow 1$ 时, 指数项的幂次会发生变化, 而 $k_2 |s|^{-\beta} s > k_2 |s|^{\beta} s$, 所以相比于传统幂次, 在 $|s| < 1$ 时趋近速度也有保证。

为了验证新型滑模趋近率的性能, 进行初步验证。假设有一被控系统结构为:

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha u + \beta x + d(t) \\ y = x \end{cases} \quad (18)$$

式中, x 为系统状态, $\alpha > 0, \beta > 0$ 为常数, $d(t)$ 为一与时间相关的扰动, 并令 $d(t) = 5 \cos(40\pi t)$ 。

该结构同永磁同步电机的转速环超局部模型是对应的, 但是增加了两项扰动项, 分别为同控制状态呈线性状态的已知扰动项 βx 和未知扰动 $d(t)$, 扰动项的加入增加了被控对象的控制难度, 以此来验证新型滑膜趋近率的抗扰动能力。

假设控制指令为:

$$y^* = \cos(4\pi t) \quad (19)$$

跟踪误差:

$$e = y^* - y \quad (20)$$

借助 MATLAB 进行仿真验证, 在不单独设计扰动补偿方案的情况下, 其跟踪误差仿真结果如图 2 所示, 由仿真对比结果可以发现改进趋近率相对于传统的指数趋近律具有收敛速度更快, 并且抗外界扰动能力更强的特点。

2.2.2 无模型滑模控制器设计

将转速误差值作为状态变量, 即:

$$e = \omega_e^* - \omega_e \quad (21)$$

式 (21) 求导得到:

$$\dot{e} = \dot{\omega}_e^* - \dot{\omega}_e = -u_c \quad (22)$$

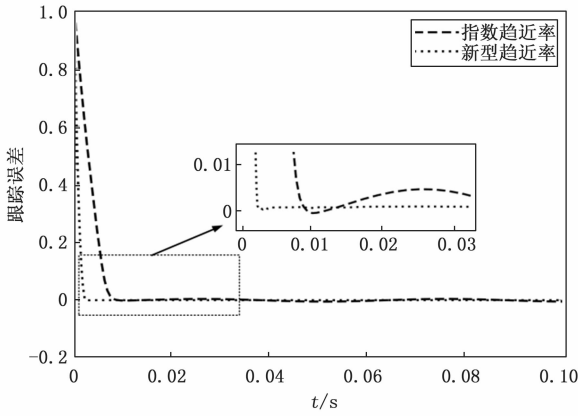


图 2 跟踪误差仿真对比

选取滑模面并求导：

$$\begin{cases} \dot{s} = C e \\ \dot{s} = \dot{C} e \end{cases} \quad (23)$$

由式 (22)、式 (23)、式 (15) 可得：

$$u_c = -\frac{\dot{s}}{C} = \frac{1}{C} \left(\frac{k_1}{\beta(1+k_1 e^{-\beta|s|})} |s| \operatorname{sgn}(s) + k_2 |s|^{\beta \operatorname{sgn}(|s|^{-1})} s \right) \quad (24)$$

结合式 (10)、(24) 可得基于新型滑模趋近率的控制器如式 (25) 所示：

$$i_q^* = \frac{\dot{\omega}_e^* + \frac{1}{C} \left(\frac{k_1}{\beta(1+k_1 e^{-\beta|s|})} |s| \operatorname{sgn}(s) + k_2 |s|^{\beta \operatorname{sgn}(|s|^{-1})} s \right) - \hat{F}}{\alpha} \quad (25)$$

式中， \hat{F} 为采用扰动观测器对扰动 F 的在线估计值。

2.3 新型趋近率稳定性证明

假设存在一个动态系统满足^[21]：

$$\dot{x} = f(x, t) \quad x(t_0) = x_0, x \in R^n \quad (26)$$

式中， $x(t_0) = x_0$ 为系统的初始状态，并且我们假设 $f(x, t)$ 满足解存在的唯一性条件。

定理 1：对于如式 (25) 的动态系统，存在 σ ，当满足 $\|x(t_0)\| < \sigma$ 时，当 $t \geq t_0$ 时，对于任意 $\epsilon > 0$ ，总有 $\|x(t)\| \leq \epsilon$ ，则称该系统在 $x(t_0) = x_0$ 具有 Lyapunov 稳定性。

定理 2：如果系统在 $x(t_0) = x_0$ 稳定，并且存在 σ ，当满足 $\|x(t_0)\| < \sigma$ 时， $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ ，则称系统渐近稳定。

定理 3：如果存在一连续可导并且正定的函数 $V: R^n \rightarrow R$ 能够保证 $\dot{V} < 0, \forall x \in R^n / \{0\}$ ，则称系统是渐近稳定的。

借助 Lyapunov 稳定性理论，构建 Lyapunov 函数：

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (27)$$

求导得到：

$$\dot{V} = s \dot{s} \quad (28)$$

采用式 (15) 将 \dot{s} 替换成新型自适应滑膜趋近率，得到：

$$\dot{V} = -s \left(\frac{k_1}{\beta(1+k_1 e^{-\beta|s|})} |s| \operatorname{sgn}(s) + k_2 |s|^{\beta \operatorname{sgn}(|s|^{-1})} s \right) =$$

$$-\left(\frac{k_1}{\beta(1+k_1 e^{-\beta|s|})} + k_2 |s|^{\beta \operatorname{sgn}(|s|^{-1})} \right) |s|^2 \leq -\frac{k_1}{\beta(1+k_1)} |s|^2 \leq 0 \quad (29)$$

根据定理 3 可得到，所设计的无模型滑模控制器可以实现渐进收敛。

3 扩展滑模扰动观测器设计

传统基于超局部模型的滑模扰动观测器数学模型：

$$\dot{\omega}_e = \alpha i_q + \hat{F} \quad (30)$$

结合式 (9) 和式 (30)，得到转速环误差方程为：

$$\dot{e}_s = \hat{F} - F \quad (31)$$

式中， $e_s = \hat{\omega} - \omega$ 。

选用滑模面为：

$$s = C e_s \quad (32)$$

对式 (32) 求导得到：

$$\dot{s} = C \dot{e}_s = C(\hat{F} - F) \quad (33)$$

选取 Lyapunov 函数为：

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (34)$$

对式 (34) 进行求导得到：

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(C\hat{F} - CF) \quad (35)$$

假设式 (35) 满足： $\max(C|F|) < \eta_1$ ，便有：

$$C|F|s \leq C|F_s| < \eta_1 s \operatorname{sgn}(s) \quad (36)$$

则对于式 (35) 便有：

$$\dot{V} \leq s(C\hat{F} + C|F|) < s(C\hat{F} + \eta_1 \operatorname{sgn}(s)) \leq s(C\hat{F} + \eta_1 \operatorname{sgn}(s) + \eta_2 s) \quad (37)$$

为使得 $\dot{V} \leq 0$ (等号仅在 $s = 0$ 时) 成立，则扰动观测器控制器为：

$$\hat{F} = -\frac{1}{C} (\eta_1 \operatorname{sgn}(s) + \eta_2 s) \quad (38)$$

式中， $\eta_1 \geq \max(C|F|), \eta_2 > 0$ 。

传统滑模观测器对 η_1 的数值要求较为严格，且为实现滑模观测器的稳定性和响应速度，通常 η_1 设置为一较大的数值，这样导致扰动观测器的波动会较大，降低估计的准确性。

为了提高扰动观测器的响应速度和提高估计准确性，本文采用的是扩展滑模扰动观测器的控制结构。

转速环的扩展扰动数学模型为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\hat{F}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \end{bmatrix} i_q + \begin{bmatrix} F \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (39)$$

式中， κ 为未知扰动 F 的变化率。

根据转速环的扩展模型，建立扰动观测器模型：

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\hat{F}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \end{bmatrix} i_q + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{F} + \begin{bmatrix} 1 \\ \chi \end{bmatrix} u_{\text{smc}} \quad (40)$$

式中 $\hat{\omega}_e$ 为转速的估计量， \hat{F} 为未知扰动的估计量， u_{smc} 为扰动观测器的滑模控制器， χ 为该控制器的增益。

将式 (29) 与式 (28) 相减得：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_s \\ \dot{e}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \chi \end{bmatrix} u_{smc} + \begin{bmatrix} e_d \\ -\kappa \end{bmatrix} \quad (41)$$

式中, $e_s = \hat{\omega}_e - \omega_e, e_d = \hat{F} - F$ 。

而后选择滑模趋近率为:

$$\dot{s} = -c_{sm} \operatorname{sgn}(s) - k_{sm} |s|^a \operatorname{sgn}(s) \quad (42)$$

式中, $c_{sm}, k_{sm} > 0, 0 < a < 1$ 。

令 $s = Ce_s$, 得到滑模控制器为:

$$u_{smc} = -\frac{1}{C}(c_{sm} \operatorname{sgn}(s) + k_{sm} |s|^a \operatorname{sgn}(s)) \quad (43)$$

选取 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (44)$$

对式 (34) 求导得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -Cs(u_{smc} + e_d) \quad (45)$$

结合式 (43)、式 (45) 得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -(c_{sm} |s| + k_{sm} |s|^a |s| - Ce_d s) \leq \\ & -((c_{sm} - C |e_d|) |s| + k_{sm} |s|^a |s|) \end{aligned} \quad (46)$$

若式 (46) 满足 $c_{sm} \geq C |e_d| > 0, k_{sm} > 0$, 则有:

$$\dot{V} \leq 0 \quad (47)$$

所以可以得到 $\dot{V} \leq 0$, 等号仅在 $s = 0$ 时成立, 根据定理 3 可得到, 观测器可以实现渐进收敛。

4 仿真验证与分析

为验证所提算法的有效性, 借助 MATLAB, 搭建了基于改进自适应趋近率的无模型控制 (MFCIARL, model free control based on improved adaptive reaching law) 算法仿真模型, 并将新算法同基于传统指数滑模趋近率的无模型控制 (MFCTESMRL, model free control based on traditional exponential reaching law) 方案和 PI 方案进行了仿真对比。

仿真所用的电机参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数

| 电机参数 | 数值 |
|---|-------------|
| 直流母线电压/V | 270 |
| 定子电阻 R_s / Ω | 0.3 |
| 直轴电感 L_d / mH | 1.0 |
| 交轴电感 L_q / mH | 1.5 |
| 永磁体磁链 ϕ_f / Wb | 0.046 |
| 转动惯量 $J / \text{kg} \cdot \text{m}^2$ | 0.000 48 |
| 粘滞系数 $B / \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ | 0.000 161 9 |
| 极对数 p_n | 3 |

仿真中所采用的开关频率为 10 kHz。仿真主要分为两种工况, 第一种工况为空载启动而后在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时突加 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载。第二种工况为以 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 恒载启动, 而后在 $t = 0.2 \text{ s}$ 突降载至 $T_L = 3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

1) 进行空载启动, 在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时, 突加 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载。

基于传统指数趋近率的无模型方案 (MFCTESMRL) 和 PI 的转速波形对比仿真如图 3 所示, 基于新型趋近率的

无模型控制方案 (MFCIARL) 同传统指数趋近率的无模型仿真方案对比仿真波形如图 4 所示。

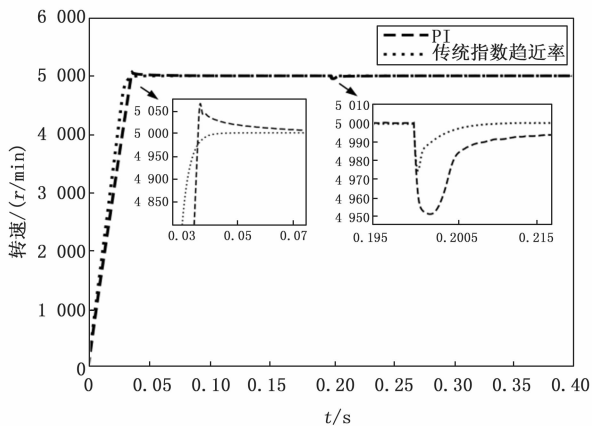


图 3 MFCTESMRL 和 PI 转速仿真对比波形

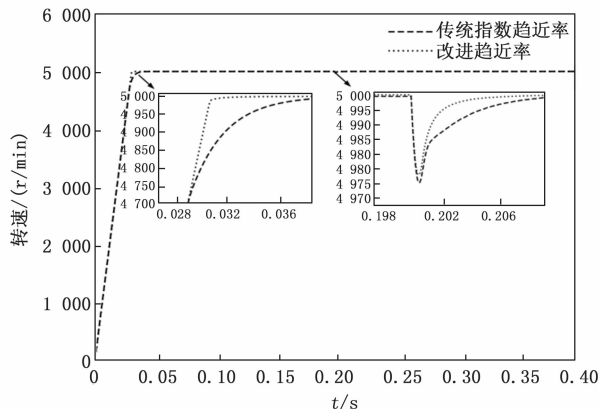


图 4 MFCIARL 和 MFCTESMRL 转速仿真波形对比

由图 3 的仿真结果可知, 基于传统指数趋近律的无模型控制算法的响应速度是要明显快于传统 PI 算法的, 并且无模型算法对于减小转速超调也有一定优势, 在 $t = 0.2 \text{ s}$, 外界突加负载时, 传统指数趋近律的无模型控制算法的转速降落也是要小于传统 PI 控制结构的, 并且无模型算法的转速重新恢复到给定转速的速度也是要明显快于传统 PI 算法的, 初步验证了无模型算法的有效性, 而后由图 4 可知, 在保证传统无模型算法优异性能的同时, 新型滑模趋近率进一步的提高了转速的响应速度和抗干扰能力, 采用新型滑模趋近率的控制算法可以在提高转速响应速度的同时, 不产生转速的超调, 实现优异的转速控制性能。新型滑模趋近率虽然在响应速度方面相比于传统指数趋近律有较大的优势, 但是在外界突加负载时, 在减少转速降落方面所表现出的性能优势不明显。

2) 以 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 恒载启动, 而后在 $t = 0.2 \text{ s}$ 突降载至 $T_L = 3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

在第二种工况情况下, 基于传统指数趋近律的无模型控制算法同传统 PI 算法在转速响应仿真对比波形如图 5 (a) 所示, 传统 PI 算法的转矩仿真波形如图 5 (b) 所示,

传统指数趋近率无模型算法的转矩仿真波形如图 5 (c) 所示。而基于传统指数趋近律的无模型控制算法和基于新型滑模趋近率在转速转矩的仿真波形如图 6 (a) 所示, 新型滑模趋近率无模型算法的转矩仿真波形如图 6 (b) 所示。图 7 为 3 种方法对应的总谐波失真 (THD, total harmonic distortion)。

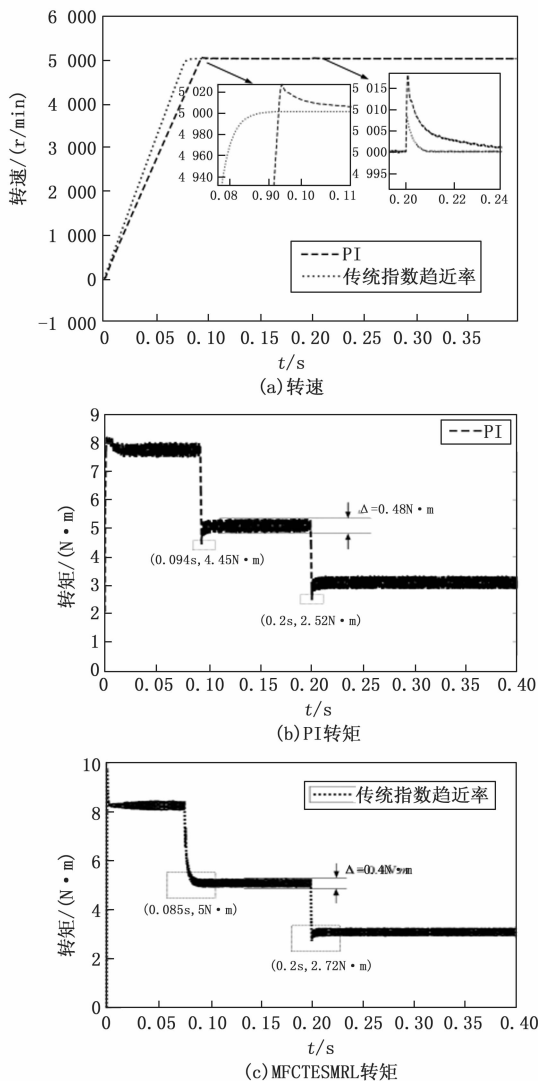


图 5 MFCTESMRL 和 PI 恒载启动仿真波形对比

由图 5 可以发现, 基于传统指数趋近率的无模型控制算法在恒载启动的工况下依然保持相比于传统 PI 较快的转速响应速度, 在 $t=0.2\text{ s}$ 时, 突减负载时, 通过仿真发现无模型控制方案的转速波动要明显小于基于 PI 控制方案的, 由图 5 (b) 和图 5 (c) 的仿真对比可以发现, PI 控制在恒载启动时, 电磁转矩跟随上负载转矩的时间是要大于 0.094 s , 并且会在 0.094 s 电磁转矩会产生较大波动, 而对于传统指数趋近律的无模型算法, 其在 0.085 s 时, 电磁转矩便跟随上负载转矩, 而且电磁转矩过渡平缓, 没有产生过大的波动, 展现出较好的响应速度以及抗扰能力。

由图 6 的基于传统指数趋近律的无模型控制方案同基

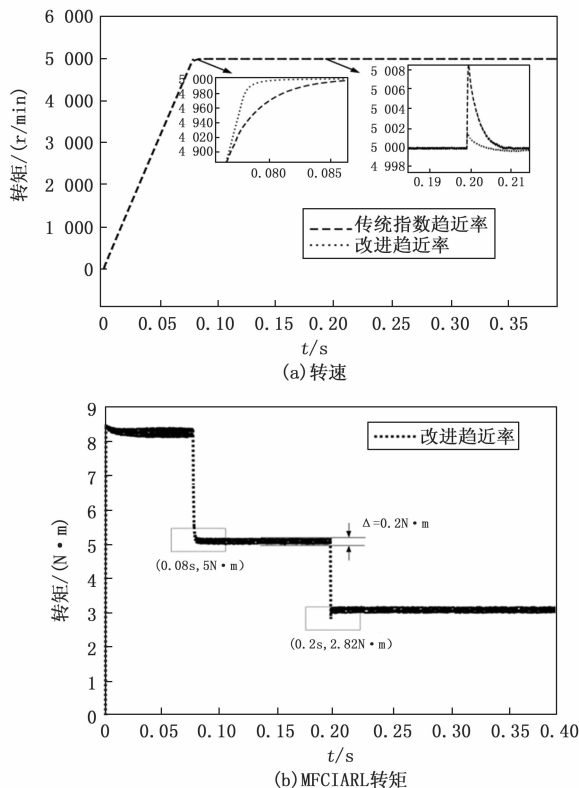


图 6 MFCIARL 和 MFCTESMRL 恒载启动仿真波形对比

于改进自适应指数趋近律的无模型控制方案的对比可以看出在恒载启动的情况下, 基于改进型趋近率无模型算法的启动速度是要快于传统指数趋近律的, 并且在突降载的情况下, 其转速抬升更少, 恢复给定转速的时间更短, 在电磁转矩的响应特性方面, 可以清楚看出由于采用了变增益和变幂次的措施, 改进趋近率方法稳态时的转矩波动仅为 $0.2\text{ N}\cdot\text{m}$ 是要明显小于传统 PI 和传统无模型算法的, 由上述仿真结果可以发现, 新无模型算法在实现转速快速响应的同时, 也保证了电磁转矩的波动在 3 种算法中最小。

从图 7 的 THD 分析可以看出, 基于新型改进趋近率的无模型控制算相比于传统 PI 算法和传统的指数趋近律的无模型控制算法, 在提高转速响应速度的同时, 也可以较为显著的降低电流谐波。

5 结束语

针对传统控制算法在永磁同步电机负载突变时电机转速波动较大的问题, 采用基于新型自适应滑模趋近率的控制算法。新控制算法采用增益可变、幂次可变的方法实现转速响应快速响应的同时, 减小了转矩的波动, 减少了电流谐波。并且依据电机运动方程建立了电机的扩展扰动模型, 搭建了电机的扩展滑模扰动观测器进行未知扰动的估计。经仿真验证了改进无模型控制算法相对于传统无模型控制算法和 PI 算法在实现转速的快速响应方面表现出优异性能。但是, 针对改进无模型控制算法的参数选取是根据 Lyapunov 稳定性判据初步得到参数大致范围, 而后根据经

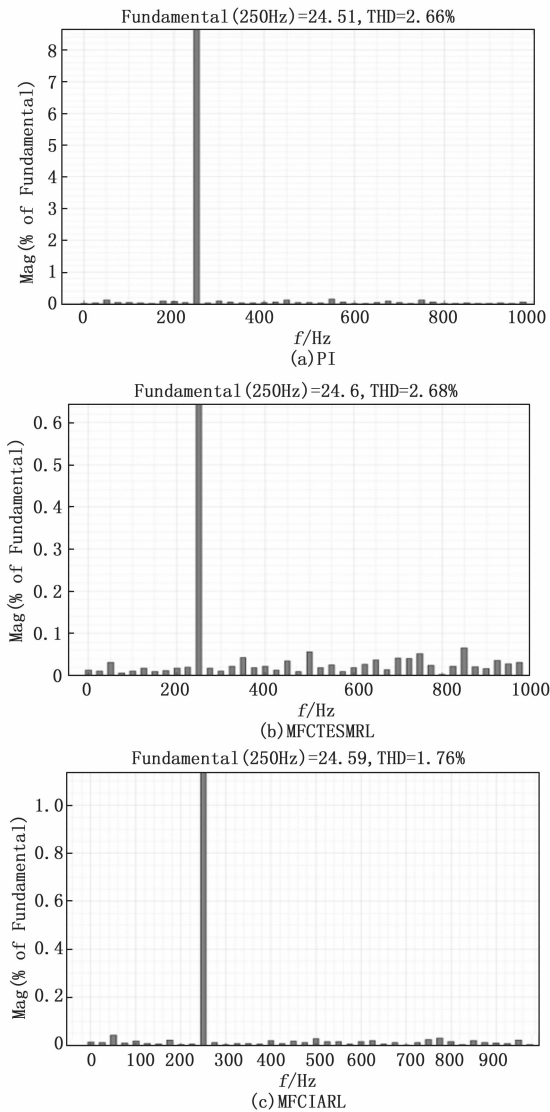


图7 3种算法下THD分析

验进行参数调节, 没能得到参数更精确的范围, 后续需要针对其参数定量选取进行优化和改进。

参考文献:

- [1] 冯浩文, 黄海波, 付为伟, 等. 基于改进ADRC的PMSM无位置传感器转速控制[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 79-85.
- [2] 路宏广, 赵树恩. 基于鲁棒模型预测的智能汽车轨迹跟踪控制研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 31(1): 79-85.
- [3] 张云飞, 齐蓉. 永磁同步电机低开关损耗模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7): 155-162.
- [4] 李耀华, 王孝宇, 刘子焜, 等. 表贴式永磁同步电机多步模型预测电流控制简化策略[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 85-95.
- [5] 石磊, 高鹏飞, 安耿宁. 交互式模型参考自适应滑模控制矢量控制系统[J]. 自动化应用, 2024, 65(2): 78-81.
- [6] 张懿, 徐斌, 魏海峰, 等. 新型模型参考自适应的PMSM无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27

- (9): 157-167.
- [7] 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 基于变结构模型参考自适应系统的永磁同步电机转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2008(9): 71-75.
- [8] 陈炜, 郭照升, 夏长亮, 等. 基于转动惯量辨识的交流伺服系统自适应扰动观测器设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 34-42.
- [9] 侯忠生, 韩志刚. 非线性系统鲁棒无模型学习自适应控制[J]. 控制与决策, 1995(2): 137-142.
- [10] MICHEL FLIESS, CÉDRIC JOIN. Model-free control[J]. International Journal of Control, 2013, 86(12): 2228-2252.
- [11] PRECUP R E, RADAC M B, DRAGOS C A, et al. Model-free tuning solution for sliding mode control of servo systems, 2014 IEEE International Systems Conference Proceedings [C] // Ottawa, Canada: IEEE, 2014, 30-35.
- [12] 张会林, 林新才, 张建平. 基于分数阶扩展滑模扰动观测器的PMSM转速环无模型递归非奇异终端滑模控制[J/OL]. 信息与控制: 1-12. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MuKJieOJLT3IrfFh_T7dUFYkopqdfuN2ZGkQzoZoJ2zxPuhRenin2Qg5a1gGwaKCmMROg0C-tOu7yPP8X17XjwBLkYuwE_gdkbq6gWhNgyP_O1XseVO0M06KKYVKIzXDX78EUfggvHA=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [13] MOZAYAN S M, SAAD M, VAHEDI H, et al. Sliding mode control of PMSG wind turbine based on enhanced exponential reaching law[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6148-6159.
- [14] MA H, XIONG Z, Li Y, et al. Sliding mode control for uncertain discretetime systems using an adaptive reaching law[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(2): 722-726.
- [15] 许令亮, 陈桂明, 李乔扬. 基于ESO的超局部无模型PMSM转速预测控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(11): 2204-2214.
- [16] 赵凯辉, 戴旺珂, 周瑞睿, 等. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁同步电机新型无模型滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2375-2386.
- [17] ULLAH I, PEI H L. Fixed time disturbance observer based sliding mode control for a miniature unmanned helicopter hover operations in presence of external disturbances[J]. IEEE Access, 2020, 8: 73173-73181.
- [18] 吴靖. 电机传动系统参数辨识方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [19] 黄宜山, 唐润忠, 旷明秋, 等. 基于快速趋近律的永磁同步电机驱动系统改进无模型滑模控制[J]. 机车电传动, 2022(3): 148-155.
- [20] WANG Y, FENG Y, ZHANG X, et al. A new reaching law for antidisturbance sliding mode control of PMSM speed regulation system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (ISSN1941-0107) 2020, 35(4): 4117-4126.
- [21] HAMIDOUCHE B, GUESMI K, ESSOUNBOULI N. Control and stabilization of chaotic systems using lyapunov stability theory [C] //2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT), Batna, Algeria, 2023: 1-5.