[文章编号] 1003－4684(2026)02-0050-06

基于非线性滑模自抗扰的 PMSM 调速系统控制

潘 健，易深华，李子修，邵 冰，舒 军
（湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 基于传统滑模自抗扰控制(SMADRC)的永磁同步电机(PMSM)调速系统，存在系统动态跟踪性能和滑模抖振间的矛盾。针对上述矛盾提出了一种基于扩张状态观测器(ESO)的非线性滑模自抗扰控制器(NSMADRC)，利用 ESO 对系统未知扰动进行估计并补偿，以提高系统抗扰动性能。NSMADRC 中包含一种在线性滑模面基础上引入指数项和双曲正切项的非线性滑模面。其中的指数项可减小滑模趋近时间，提升系统动态跟踪性能。当系统进入滑模态和稳态后，可通过预先设定的双曲正切项增益近似定量地减小滑模抖振。通过 Lyapunov 理论证明了闭环系统稳定性。仿真结果表明，相比 PID、SMADRC，该提控制器具有更好的动态跟踪性能，滑模抖振更小，抗扰动性能更强。

[关键词] 永磁同步电机；速度控制；扩张状态观测器；滑模自抗扰控制
[中图分类号] TM341 [文献标识码] A

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor，PMSM)因其结构简单、高效、高功率密度等优势在工业、生活等领域得到了广泛应用[1-2]。PMSM 速度控制是实现 PMSM 应用的前提，但 PMSM 数学模型具有强耦合、多变量、时变非线性等特点，且运行过程中易受参数变化和未知扰动等因素影响，因此对速度控制器性能提出了较高要求。

PID 控制因安装实现简单，不依赖系统数学模型等优势在工业控制中占据绝对优势[3]。然而，PID 对参数变化和扰动敏感，故只能满足一般控制性能[4]。为提升 PMSM 调速系统控制性能，国内外研究人员提出了很多其他控制方法，如滑模控制[5-6]、自抗扰控制[7]、鲁棒控制[8]等，这些方法在不同方面改善了系统控制性能。

以扩张状态观测器(extended state observer，ESO)为核心的自抗扰控制(active disturbance rejection control，ADRC)，具有不依赖系统精确数学模型和较强鲁棒性的特点，但 ADRC 设计中的非线性误差反馈控制律参数较多且整定复杂[9]，一定程度上限制了其应用。滑模控制(sliding mode control，SMC) 是先预设系统轨迹，然后系统状态按照预定轨迹趋于平衡点，参数较少且整定方便，具有鲁棒性强、对参数变化和有界扰动不敏感的特点。SMC 的设计通常需要选择较大切换项增益以保证上述优良特性，但切换项增益较大会引起严重的滑模抖振现象[10]。为抑制滑模抖振，文献[11]用饱和函数代替符号函数，减少了滑模抖振，但同时降低了系统鲁棒性。文献[5]提出的自适应趋近律，切换项增益根据跟踪误差自动调整，跟踪误差小时切换增益小，有效减小了滑模抖振，但初始跟踪误差大时会产生非常大的切换项增益(过度自适应问题)，这将严重加剧抖振现象，破坏 PMSM 系统速度控制性能。

SMC 对参数变化和有界扰动的不敏感性是在滑模阶段实现的，趋近阶段控制器抗扰动能力不足[12]。为解决这个问题，文献[13]提出的自适应趋近律方法自适应调整切换项增益，缓解了动态跟踪性能和滑模抖振间的矛盾，但也存在过度自适应问题。文献[14]设计了积分滑模面使系统轨迹一开始就在滑模面上，消除了趋近阶段，改善了系统鲁棒性和滑模抖振，但实际应用困难，如需要知道很多不可测系统状态。

受上述研究方法启发，本文针对 PMSM 调速系统，结合 ADRC 与 SMC 各自优点，构建了一种基于 ESO 的非线性滑模自抗扰控制器(nonlinear sliding mode active disturbance rejection control，NS-

[收稿日期] 2023－06－29
[基金项目] 太阳能发电及储能运行控制湖北省重点实验室开放基金（HBSEES201902）
[第一作者] 潘 健(1962－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学教授，研究方向为电力电子与电力拖动、控制工程。
[通信作者] 易深华(1997－)，男，江西宜春人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为永磁同步电机控制。

MADRC)。NSMADRC 与传统滑模自抗扰控制器(SMADRC) 相比能减小滑模趋近时间,提升系统动态跟踪性能;此外,当系统进入滑模态和稳态后,可通过预先设定的双曲正切项增益近似定量地减小滑模抖振,缓解了 SMADRC 中存在的动态跟踪性能和滑模抖振间的矛盾。

1　永磁同步电机模型

1.1　数学模型

d−q 坐标系下理想表贴式 PMSM 数学模型可描述如下[12]:

$$\dot{i}_d = (u_d - Ri_d + P_n\omega Li_q)/L \tag{1}$$

$$\dot{i}_q = (u_q - Ri_q - P_n\omega Li_d - P_n\omega\psi_f)/L \tag{2}$$

$$\dot{\omega} = (1.5P_n\psi_f i_q - B\omega - T_L)/J \tag{3}$$

其中:i_d,i_q,u_d,u_q分别表示 d 轴和 q 轴的定子电流和电压;R,P_n,L,B,T_L,J 分别表示定子电阻,极对数,定子电感,阻尼系数,负载转矩和转动惯量;ω 是机械角速度;ψ_f 是永磁体磁链。

为方便解耦和获得最大转矩电流比,d 轴参考电流 i_d^* 通常设置为 0。控制器性能良好情况下,可认为 d 轴实际电流 i_d 和参考电流相等。然后,式(2)可简化如下:

$$\dot{i}_q = (u_q - Ri_q - P_n\omega\psi_f)/L \tag{4}$$

对式(3)进行一次微分运算并将式(4)代入,得到 PMSM 非串级二阶等式为:

$$\ddot{\omega} = a_1u_q - a_2i_q - a_3\omega - a_4 \tag{5}$$

其中:$a_1 = \dfrac{1.5P_n\psi_f}{JL}$,$a_2 = 1.5P_n\psi_f\left(\dfrac{R}{JL} + \dfrac{B}{J^2}\right)$,$a_3 = \dfrac{1.5P_n^2\psi_f^2}{JL} - \dfrac{B^2}{J^2}$,$a_4 = \dfrac{BT_L}{J^2} - \dfrac{\dot{T}_L}{J}$。

考虑系统不确定性和扰动时,式(5)可表示为:

$$\ddot{\omega} = a_1u_q - a_2i_q - a_3\omega - a_4 + d \tag{6}$$

其中:$d = \Delta a_1u_q - \Delta a_2i_q - \Delta a_3\omega - \Delta a_4$,$\Delta a_1$,$\Delta a_2$,$\Delta a_3$,$\Delta a_4$ 是参数 a_1,a_2,a_3,a_4 的变化量。

1.2　矢量控制模型

矢量控制目的是让 PMSM 实际速度跟踪参考速度,同时在系统存在不确定性和扰动时,保持良好的跟踪性能和抗扰动能力。针对 PMSM 调速系统,定义其状态变量如下:

$$x_1 = \omega \tag{7}$$

状态 x_1 的微分 x_2 为:

$$x_2 = \dot{\omega} \tag{8}$$

根据式(6)−(8),可得到 PMSM 矢量控制模型如下:

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2\\ \dot{x}_2 = u + d_1\end{cases} \tag{9}$$

其中:控制器 $u = a_1u_q$,$d_1 = -a_2i_q - a_3\omega - a_4 + d$ 代表系统未知总扰动。因为实际物理系统的限制,所以可认为系统(9)中的总扰动 d_1 有界且其微分存在和有界,即 $|d_1| \leqslant D_1$,$|\dot{d}_1| \leqslant D_2$,$D_1$ 和 D_2 是正常数。

2　控制器设计

2.1　扩张状态观测器

系统未知扰动若不加以处理,会对控制器性能产生不利影响。为了消除这种不利影响,提高系统的抗扰动性能。本小节设计 ESO 用以对未知扰动 d_1 进行估计并补偿。通过定义额外状态变量 $x_3 = d_1$,则式(9)可扩展为:

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2\\ \dot{x}_2 = u + x_3\\ \dot{x}_3 = h\end{cases} \tag{10}$$

其中:h 是状态 x_3 的微分,假设 x_3 和 h 都有界。

然后,根据文献[15]将 ESO 设计为:

$$\begin{cases}\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \beta_1(x_1 - \hat{x}_1)\\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + u + \beta_2(x_1 - \hat{x}_1)\\ \dot{\hat{x}}_3 = \beta_3(x_1 - \hat{x}_1)\end{cases} \tag{11}$$

其中:$\hat{x}_1$,$\hat{x}_2$,$\hat{x}_3$ 分别是对 x_1,x_2,x_3 的估计;β_1,β_2,β_3 是 ESO 的正可调增益。

定义 ESO 的状态估计误差 $\eta_1 = x_1 - \hat{x}_1$,$\eta_2 = x_2 - \hat{x}_2$,$\eta_3 = x_3 - \hat{x}_3$,用式(10)减去式(11),得系统误差模型如下:

$$\begin{bmatrix}\dot{\eta}_1\\ \dot{\eta}_2\\ \dot{\eta}_3\end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix}-\beta_1 & 1 & 0\\ -\beta_2 & 0 & 1\\ -\beta_3 & 0 & 0\end{bmatrix}}_{A}\begin{bmatrix}\eta_1\\ \eta_2\\ \eta_3\end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 1\end{bmatrix}}_{B}h \tag{12}$$

如果 $\beta_1\beta_2 > \beta_3$,则矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是 hurwitz 矩阵。根据极点配置方法,引入 ESO 的带宽 $\omega_0 > 0$,令 $\beta_1 = 3\omega_0$,$\beta_2 = 3\omega_0^2$,$\beta_3 = \omega_0^3$,得矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征多项式方程为:

$$\lambda(s) = s^3 + \beta_1s^2 + \beta_2s + \beta_3 = (s + \omega_0)^3 \tag{13}$$

由此可知,系统极点位于复平面的左半平面,ESO 满足全局渐近稳定条件。根据文献[16]知,对于 $\forall t \geqslant 0$,$\| \eta_i \| \leqslant \Delta$ $(i = 1, 2, 3)$,Δ 是与 ESO 带宽联系的数值,其数值通常被认为很小,即 ESO 能够实现对未知总扰动 d_1 的估计。

2.2　NSMADRC

NSMADRC 是将 ESO 的扰动估计值 $\hat{x}_3$ 应用于前馈补偿,并代替系统未知扰动 d_1,然后遵循滑模控制理论设计控制器。针对 PMSM 调速系统,定

义速度误差 e_1 及其微分 e_2 如下：

$$\begin{cases} e_1 = x_{1r} - x_1 \\ e_2 = \dot{x}_{1r} - x_2 \end{cases} \tag{14}$$

其中，x_{1r} 表示参考速度；$\dot{x}_{1r}$ 是参考速度的一次微分。

结合式(9)和(14)，并用 $\hat{x}_3$ 代替 d_1，可得 PMSM 二阶误差模型为：

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = \ddot{x}_{1r} - u - \hat{x}_3 \end{cases} \tag{15}$$

针对系统(15)，根据滑模控制理论[11]，设计线性滑模面 $s = ce_1 + e_2$，c > 0，选择等速趋近律 $\dot{s} = -k\ \mathrm{sgn}\ s$，$k > 0$，便可得到 SMADRC 如下：

$$u = ce_2 + \ddot{x}_{1r} - \hat{x}_3 + k\mathrm{sgn}s \tag{16}$$

式(16)中包含的不连续函数 $k\mathrm{sgn}s$ 将引起滑模抖振现象，抖振强度取决于 k 的大小。等速趋近律积分可得滑模趋近时间

$$t_r = |\ s(0)\ |\ /k \tag{17}$$

其中，$s(0)$ 代表滑模函数 $t = 0$ 时刻的值。

式(17)表明 |s(0)| 值越小，滑模趋近时间 t_r 越短，即系统动态跟踪性能越好。从式(16)和(17)可知，SMADRC 中存在动态跟踪性能和滑模抖振间的矛盾。为缓解这个矛盾，本文提出一种非线性滑模面如下：

$$\begin{cases} s_1 = ce_1 + e_2 + k_1 \tanh s - k_2 \exp(-\alpha t) \\ s = ce_1 + e_2 \end{cases} \tag{18}$$

其中：$k_1 \geqslant 0$ 和 $\alpha > 0$ 是待设计常数；k_2 是可变常数。控制器设计时选择趋近律 $\dot{s}_1 = -k\mathrm{sgn}s_1$，则趋近时间 $t_{r1} = |s_1(0)|/k$ 。

据式(18)可得：

$$\begin{cases} s_1(0) = ce_1(0) + e_2(0) + k_1 \tanh s(0) - k_2 \\ s(0) = ce_1(0) + e_2(0) \end{cases} \tag{19}$$

其中，$k_1 \tanh s(0) \in (-k_1, k_1)$，那么通过选择适当的 k_1、k_2 保证 $|s_1(0)|$ 小于 $|s(0)|$，即可减少趋近时间 t_{r1}，提升系统动态跟踪性能，用数学方程描述为：

$$|s_1(0)| = |s(0) + k_1 \tanh s(0) - k_2| < |s(0)| \tag{20}$$

可变常数 k_2 值根据 $|s(0)|$ 大小决定，具体可分为下列两种情形。

情形 1：$s(0) > 0$，根据式(20)有

$$0 \leqslant k_1 \tanh s(0) < k_2 < 2s(0) + k_1 \tanh s(0) \tag{21}$$

情形 2：$s(0) < 0$，根据式(20)有

$$2s(0) + k_1 \tanh s(0) < k_2 < k_1 \tanh s(0) \leqslant 0 \tag{22}$$

当系统轨迹进入滑模态或稳态，即对 $\forall t > t_{r1}$，有 $s_1(t) = 0$，通过选择一个足够大的 α，可保证在时间 t_{r1} 后，$\exp(-\alpha t) \to 0$ 始终成立。此后，非线性滑模面式(18)可写为：

$$s_1 = ce_1 + e_2 + k_1 \tanh s = 0, \quad \forall t \geqslant t_{r1} \tag{23}$$

因为 $ce_1 + e_2$ 和 $k_1 \tanh s$ 同号，所以对 $\forall t \geqslant t_{r1}$，有 $s_1 = ce_1 + e_2 = 0$，即可认为系统进入滑模态和稳态后，非线性滑模面与线性滑模面形式上等效，后续说明内容上不同。结合式(15)和式(18)有：

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= ce_2 + \dot{e}_2 + k_1 \frac{4(ce_2 + \dot{e}_2)}{(\exp s + \exp(-s))^2} + k_2 \alpha \exp(-\alpha t) \\ &= cme_2 + m\dot{e}_2 + k_2 \alpha \exp(-\alpha t) \\ &= m(ce_2 + \ddot{x}_{1r} - u - \hat{x}_3) + k_2 \alpha \exp(-\alpha t) \\ &= -k\mathrm{sgn}s_1 \end{aligned} \tag{24}$$

其中

$$m = 1 + \frac{4k_1}{(\exp s + \exp(-s))^2} \tag{25}$$

根据式(24)，计算得到 NSMADRC 如下：

$$u = ce_2 + \ddot{x}_{1r} - \hat{x}_3 + \frac{k\mathrm{sgn}s_1}{m} + \frac{k_2 \alpha}{m \exp(\alpha t)} \tag{26}$$

分析式(25)—(26)可知，若 |s| 增大，m 将收敛为 1，$k\ /\ m$ 收敛为 k；反之若 |s| 减小进入滑模态或稳态($s = 0$)，m 将收敛为 $1 + k_1$，$k\ /\ m$ 收敛为 $k\ /\ (1 + k_1)$。当系统进入滑模态和稳态后，能通过预先设计的 k_1 大小近似定量减少滑模抖振，这就是非线性滑模面与线性滑模面的本质区别。此外，设计 k_2 值能减小滑模趋近时间，提升系统动态跟踪性能。所以从理论上来说，NSMADRC 缓解了 SMADRC 中存在的动态跟踪性能和滑模抖振间的矛盾。

2.3 闭环稳定性分析

构建 Lyapunov 函数

$$V = 0.5s_1^2 \tag{27}$$

结合式(15)，(18)，(25)和(26)，对函数 V 求一次导有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_1 \dot{s}_1 \\ &= s_1(cme_2 + m\dot{e}_2 + k_2 \alpha \exp(-\alpha t)) \\ &= s_1(-k\mathrm{sgn}s_1 - m(x_3 - \hat{x}_3)) \\ &\leqslant (m\ |\ \eta_3\ | - k)\ |\ s_1\ | \end{aligned} \tag{28}$$

因为 ESO 已经证明 $|\eta_3| \to 0$，另外 $k > 0$，所以 $\dot{V} \leqslant 0$，根据 LaSalle 不变性原理，可以证明闭环系统渐近稳定。

3 仿真验证

为验证 NSMADRC 的有效性，基于 Matlab/Simulink 进行了仿真实验，并将仿真结果与 PID，SMADRC 进行了数值比较。PMSM 的参数设置见表 1。

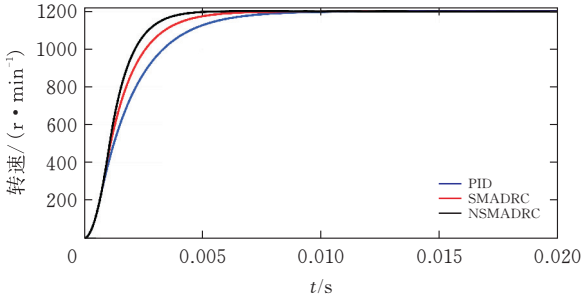
表 1　永磁同步电机参数

名称	数值
定子电阻 R	0.33 Ω
定子电感 L	0.9 mH
极对数 P_n	4
永磁体磁链 ψ_f	0.0145 Wb
转动惯量 J	1.89×10^{-5} kg·m^2
阻尼系数 B	0 N·m·s
额定电压 U_N	24 V
额定功率 P_N	100 W

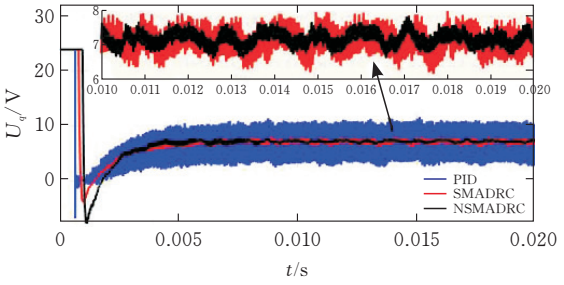
PMSM 的参考速度都设为 1200 r/min，实验中充分考虑了系统稳定性、动态特性和抗扰动性能等因素，经过试错法折中选出控制器参数。PID 的控制参数 $k_p=120$，$k_i=80$，$k_d=0.2$。SMADRC 的控制参数 $c=2e4$，$k=2e5$，为比较的公平性，NSMADRC 的控制参数 $c=2e4$，$k=2e5$，k_1 选择较自由，先取 $k_1=1$，根据式(21)计算确定 $k_2\in(1,1+2.4e7)$，选取该范围内的一个数值 $k_2=8e6$，最后经实验确定 $\alpha=1000$。ESO 的带宽 $\omega_0=1000$，观测器增益 $\beta_1=3\omega_0$，$\beta_2=3\omega_0^2$，$\beta_3=\omega_0^3$。

仿真实验分为 3 组：第 1 组是 PMSM 速度跟踪，用以验证 NSMADRC 的动态跟踪性能；第 2 组是稳定运行时负载发生变化，主要验证 NSMADRC 抗扰动能力；第 3 组是改变 k_1 数值，进一步验证系统进入滑模态和稳态后，通过预先设定 k_1 能近似定量减小滑模抖振。实验考虑了电压饱和现象，故将所有控制算法的控制输入限制在 $\pm24V$ 范围内。

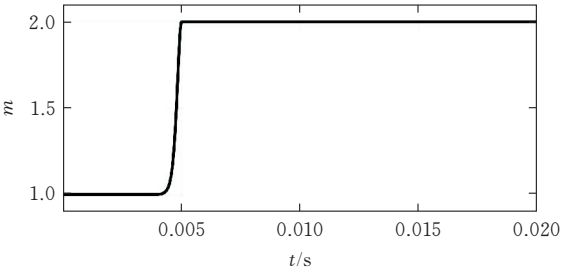
仿真 1：PMSM 无负载启动，仿真结果如图 1 所示。从图 1a 中可以看到 NSMADRC 的动态跟踪性能优于 SMADRC 和 PID，调节时间分别为 5 ms，7 ms，9 ms。由图 1b 可知系统进入稳态后，PID 的抖振强度明显大于 SMADRC 和 NSMADRC。SMADRC 的控制输入在 6.07～8.12，NSMADRC 的控制输入在 6.73～7.81，计算得出 NSMADRC 的抖振强度相比 SMADRC 降低了 47.3%，与图 1c 中函数 m 的变化曲线基本符合，即 k_1 起到了近似定量减小滑模抖振效果。



(a)空载速度响应曲线



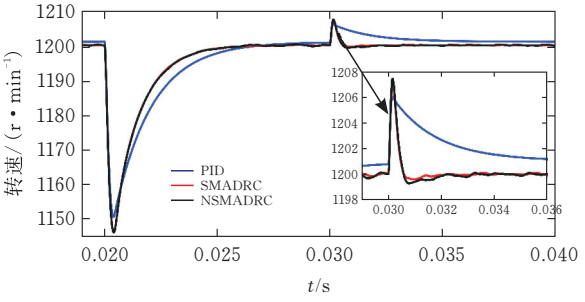
(b)空载控制器输出曲线



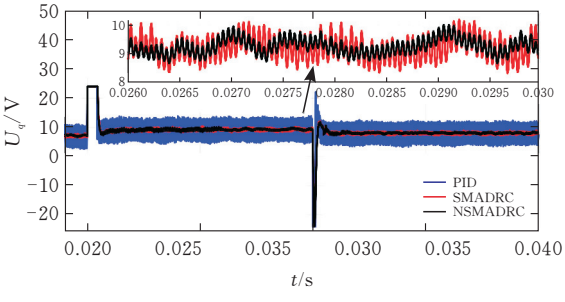
(c)NSMADRC 中的函数 m 变化曲线

图 1　不同算法下的空载速度控制效果

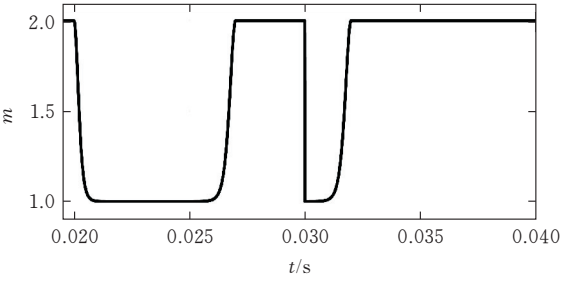
仿真 2：PMSM 空载启动后稳定运行时，在 $t=0.02$ s时突然增加 0.5 Nm 负载，随后在 $t=0.03$ s 时负载突然减少为 0.2 Nm，仿真结果如图 2 所示。



(a)负载速度响应曲线



(b)负载控制器输出曲线

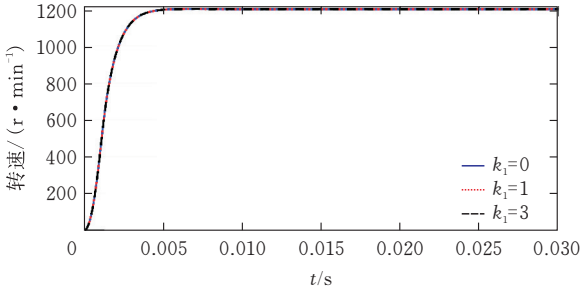


(c)NSMADRC 中的函数 m 变化曲线

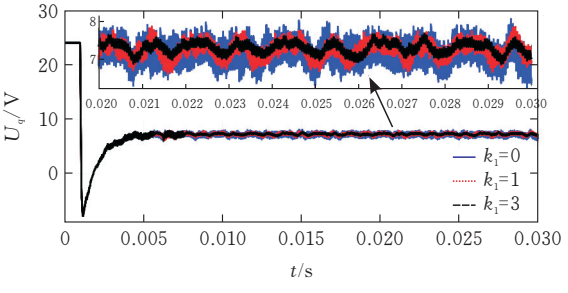
图 2　不同算法下的抗负载扰动效果

从图 2a 可以看到，加减负载后各控制算法的速度波动大小近似相等，但 SMADRC 和 NSMADRC 的恢复时间短，从这个意义上说，SMADRC 和 NSMADRC 的抗扰动性能优于 PID。图 2b 显示 PID 的抖振强度明显大于 SMADRC 和 NSMADRC。加载和减载恢复稳态后，SMADRC 的控制输入分别在 8.07～10.25 和 7.04～8.98，NSMADRC 的控制输入分别在 8.82～10 和 7.46～8.54，计算得出 NSMADRC的抖振强度相比 SMADRC 分别降低了 46.9%和 46.5%。加减载后的抖振改善程度，与图 2c 中函数 m 的变化曲线基本符合，即 k_1 起到了近似定量减小滑模抖振效果。

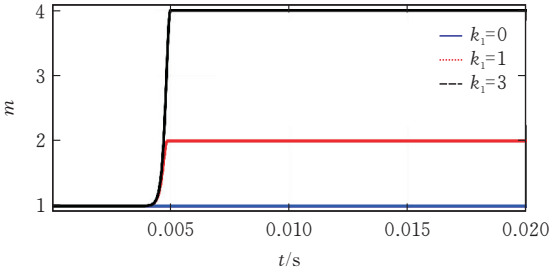
仿真 3：为进一步验证系统进入滑模态和稳态后，预先设定的 k_1 能近似定量减小滑模抖振。保证 NSMADRC 其他参数不变，PMSM 空载启动，k_1 分别取 0，1，3，仿真结果如图 3 所示。



(a)空载速度响应曲线



(b)空载控制器输出曲线



(c)不同 k_1 下的函数 m 变化曲线

图 3 不同 k_1 下的空载速度控制效果

图 3a 显示 k_1 不影响 NSMADRC 的动态跟踪性能。由图 3b 可知系统进入滑模态和稳态后，NSMADRC中 k_1 为 0，1，3 时所对应的控制输入范围分别在 6.07～8.15，6.7～7.78，6.92～7.54，计算得到 $k_1=1$ 和 $k_1=3$ 时的 NSMADRC 相比 $k_1=0$ 时，其抖振强度分别降低了 48%和 71.2%。这和图 3c 中函数 m 的变化曲线基本符合，即 k_1 起到了近似定量减小滑模抖振效果。

4 结论

本文针对 PMSM 调速系统，将 PMSM 串级控制结构转换为非串级控制结构后，考虑系统不确定性和扰动情况，提出了一种基于扩张状态观测器的非线性滑模自抗扰控制器。通过仿真实验可得出以下结论：1)NSMADRC 相比 PID、SMADRC 的初始动态跟踪性能更优且可实现无超调；2)系统进入滑模态和稳态后，NSMADRC 能通过预先设定的 k_1 值近似定量地减小滑模抖振；3)NSMADRC 抗扰动性能良好，加减负载后的恢复时间较 PID 有所提升。

[参 考 文 献]

[1] 李思毅，苏健勇，杨贵杰. 基于自抗扰控制的永磁同步电机弱磁控制策略[J]. 电工技术学报，2022，37(23)：6135-6144.

[2] 赵云，聂雅萍，王晓光. 交流伺服系统控制器参数在线自整定[J]. 湖北工业大学学报，2022，37(05)：28-32.

[3] 张智鑫，刘旭东. 基于 ESO 的永磁同步电机伺服系统快速终端滑模控制[J]. 控制理论与应用：1-9[2023-06-24]. http：// kns. cnki. net/kcms/detail/44. 1240. TP. 20221107.1006.008.html.

[4] 张洪帅，王平，韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报，2014，34(12)：1889-1896.

[5] NGUYEN T H，NGUYEN T T T，NGUYEN T，V Q，et al. An adaptive sliding-mode controller with a modified reduced-order proportional integral observer for speed regulation of a permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2022，69(07)：7181-7191.

[6] 武志涛，李帅，程万胜. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁直线同步电机定结构滑模位置跟踪控制[J]. 电工技术学报，2022，37(10)：2503-2512.

[7] NGUYEN T H V，SULEIMENOV K，NGUYEN T B H，et al. Dynamical delay unification of disturbance observation techniques for PMSM drives control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2022，27(06)：5560-5571.

[8] DAHAL R，KARI. Robust tracking control of nonlinear unmatched uncertain systems via event-based adaptive dynamic programming[J]. Nonlinear Dynamics，2022，109(04)：2831-2850.

[9] 侯利民，任一夫，王怀震，等. 永磁同步电机调速系统

的滑模自抗扰控制[J]. 控制工程，2019，26(08)：1460-1465.

[10] SUN X D，CAO J H，LEI G，et al. A composite sliding mode control for SPMSM drives based on a new hybrid reaching law with disturbance compensation[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2021，7(03)：1427-1436.

[11] XIONG J X，PAN J，CHEN G Y，et al. Sliding mode dual-channel disturbance rejection attitude control for a quadrotor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2022，69(10)：10489-10499.

[12] 刘金坤. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真：基本理论与设计方法[M]. 北京：清华大学出版社，2019.

[13] ZHANG X G，SUN L Z，ZHAO K，et al. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2013，38(03)：1358-1365.

[14] ERAY O，TOKAT S. The design of a fractional-order sliding mode controller with a time-varying sliding surface[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control，2020，42(16)：3196-3215.

[15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth- parameterization based controller tuning[C]. Proceedings of the 2003 American Control Conference，2003，6：4989-4996.

[16] GUO B Z，ZHAO Z L. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty[J]. Systems & Control Letters，2011，60(06)：420-430.

Control of PMSM Speed Regulation System Based on Nonlinear Sliding Mode Active Disturbance Rejection

PAN Jian，YI Shenhua，LI Zixiu，SHAO Bing，SHU Jun

(*School of Electrical and Engineering，Hubei Univ. of Tech.，Wuhan* 430068，*China*)

Abstract：The permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control based on the traditional sliding mode active disturbance rejection control (SMADRC) has the contradiction between the system dynamic tracking performance and sliding mode chattering. To solve this contradiction，a nonlinear sliding mode active disturbance rejection controller (NSMADRC) based on an extended state observer (ESO) is proposed in this paper. First，the unknown disturbance is estimated and compensated by ESO to improve the disturbance rejection performance of the system. The NSMADRC contains a nonlinear sliding mode surface which introduces an exponential term and hyperbolic tangent term on the basis of a linear sliding mode surface. The exponential term can reduce the sliding mode approach time and improve the dynamic tracking performance of the system. Once the system enters sliding mode phase and stabilization，the chattering can be reduced approximately quantitative by preset hyperbolic tangential gain. Then，the stability of the closed loop system is proved by Lyapunov theory. Finally，the simulations show that the proposed controller has better dynamic tracking performance compared to PID and SMADRC，with less chattering and strong anti—disturbance performance.

Keywords：permanent magnet synchronous motor；speed control；extended state observer；sliding mode active disturbance rejection control

[责任编校：赵　瞳]