

基于前馈补偿的永磁同步电机自抗扰控制^{*}

迟世伟, 刘慧博

(内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 针对负载转矩扰动对永磁同步电机(PMSM)控制造成的影响, 提出了一种基于前馈补偿的PMSM自抗扰控制(ADRC)策略。通过线性自抗扰控制(LADRC)改进传统PID控制器快速性和超调之间的矛盾, 并且通过引入负载转矩前馈补偿的方法, 将负载转矩观测器观测到的转矩按比例反馈到电流环中, 在负载转矩发生突变时进行补偿。仿真结果表明, 增加了前馈补偿的LADRC系统对PMSM的控制效果明显优化, 有效地抑制了因负载转矩突变引起的转速波动, 验证了所提策略的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 线性自抗扰控制; 负载转矩观测器; 前馈补偿

中图分类号: TM341; TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)01-0009-05

doi: 10.12177/emca.2022.141

ADRC Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on the Feedforward Compensation^{*}

CHI Shiwei, LIU Huibo

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology,
Baotou 014010, China)

Abstract: In view of the load torque disturbance effect on the control of the permanent magnet synchronous motor (PMSM), an active disturbance rejection control (ADRC) strategy for PMSM based on feedforward compensation is proposed. The linear active disturbance-rejection control (LADRC) is used to improve the contradiction between the rapidity and overshoot of the traditional PID controller, and the load torque feedforward compensation method is introduced. The torque observed by the load torque observer feeds back to the current loop in proportion when the load torque changes suddenly. The simulation results show that the control effect of the LADRC system with feedforward compensation is obviously optimized for the PMSM, and the speed fluctuation caused by the sudden load torque is effectively suppressed, which verifies the effectiveness of the strategy.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); linear active disturbance rejection control (LADRC); load torque observer; forward compensation

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)由于具有高能量密度、高效率、转矩波动小、低速时运行稳定、可靠性高等特点, PMSM控制系统中的应用极其广泛^[1]。然而, PMSM控制系统是一种非线性、强耦合的时

变复杂系统。电机控制系统一般采用双环PI控制器串级结构对PMSM进行控制, 但是经典PID控制对系统所受的不同扰动抗干扰能力较弱, 鲁棒性不强。在系统出现负载突变等情况时会出现较大的转速波动, 进行高精度的控制时难以满足要求, 不能精确地跟踪指定的过程, 面对有高精度

收稿日期: 2022-08-19; 收到修改稿日期: 2022-10-20

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(62063027)

作者简介: 迟世伟(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机控制与应用。

刘慧博(1972—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制理论与应用。

需求的场景时往往效果不够理想。

自抗扰控制器(ADRC)基于PID通过误差进行反馈调节的思想,自抗扰的特点是通过状态观测器观测系统的内外扰动并对其进行补偿,以减少误差对系统的影响^[2-4]。但当负载转矩较大时,会加重观测器的负担,使观测精度降低,导致不能完全补偿负载转矩带来的影响。针对此问题引入负载转矩前馈补偿的策略,利用观测器观测到的负载转矩对系统进行进一步的补偿。如文献[5]中负载转矩观测器由负载转矩公式变形而来,计算简单,但观测效果一般。文献[6]设计的一种全维观测器观测精度较高,但是观测量较多且结构较复杂。文献[7]使用一种改进型降维负载转矩观测器,一定程度上简化了观测器结构。文献[8-9]使用传统滑模观测器(SMO)对负载转矩进行观测,但因为使用的符号函数存在跳变,所以不可避免地会出现抖振的问题。

本文采用线性自抗扰控制(LADRC)取代PI控制来提升系统的鲁棒性。设计了一种可变增益的SMO将观测到的负载转矩进行前馈补偿来提高系统对负载转矩观测的响应速度,最后通过仿真验证了可行性。

1 PMSM 数学模型

为了简化分析,以表贴式PMSM为例,假设其为理想电机,满足以下条件:铁心磁路不饱和,不计涡流和磁滞损耗,空间磁场为正弦分布。

d - q 轴坐标系下的电机转速方程为

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q}i_q - \frac{p\varphi_f}{L_q}\omega_r + \frac{u_q}{L_q} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3p\varphi_f i_q}{2J} - \frac{B}{J}\omega_r - \frac{T_L}{J} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)整理得:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} & -\frac{p\varphi_f}{L_q} \\ \frac{3p\varphi_f}{2J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L_q} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: R 为等效电阻; φ_f 为转子等效磁链; ω_r 为转子机械角速度; T_L 为负载转矩; p 为极对数; L_d 为 d 轴电感; L_q 为 q 轴电感; i_q 为 q 轴电流; i_d 为 d 轴电流; J 为转动惯量; B 为黏滞摩擦系数。

2 ADRC 设计

2.1 速度环控制器设计

在PMSM系统运行过程中速度环一般采用一阶ADRC,考虑到提升系统的实时性,以及参数调节的复杂性,本文根据ADRC自身特点对其进行了改进,根据图1得出一阶ADRC模型分别由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、非线性状态误差反馈率(NLSEF)组成。其中TD是用来提取微分信号和安排过渡过程,但是针对一阶ADRC模型TD对ESO进行输出时并没有微分输出,只起到了滤波作用。因此,为了提高实时性,降低调参难度,省去TD环节^[10]。

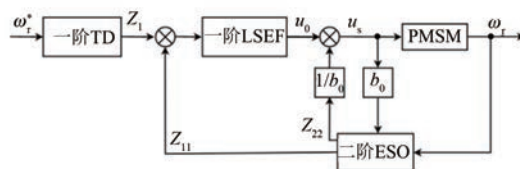


图1 一阶自抗扰模型

将式(2)方程变形为ADRC动态方程形式:

$$\dot{\omega} = b_s i_q + a_s(t) \quad (3)$$

式中: b_s 为控制量系数, $b_s = \frac{3p\varphi_f}{2J}$; a_s 为内外部扰动总和,

$a_s(t) = -\frac{T_L + B\omega_r}{J}$; i_q 为被控量,即 q 轴电流。

对电机转子角速度设计ESO:

$$\begin{cases} e = z_1 - \omega_r \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \text{fal}(e, \alpha, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 \text{fal}(e, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: z_1 为其估计值; e 为误差; z_2 为扩张状态变量实时观测值; β_1 、 β_2 分别为ESO的控制增益; b_0 为控制器增益参数。

非线性函数 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 定义为

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中含有 α 、 δ 两个未知参数,在调参时会十分的困难反而影响控制效果,此时如果令

$F = \frac{\text{fal}(e, \alpha, \delta)}{e}$,可以得到如下形式的ESO方程:

$$\begin{cases} e = z_1 - \omega_r \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 Fe + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 Fe \end{cases} \quad (6)$$

其中 fal 函数和 e 同号, 所以 $F = \frac{\text{fal}(e, \alpha, \delta)}{e} > 0$, 当 $\text{fal}(e, \alpha, \delta) = e$ 时称这种 ESO 为线性 ESO, 将 ESO 线性化后由于参数数量的减少, 在参数整定时会更加简便。

设计线性状态误差反馈率 (LSEF) 为

$$\begin{cases} u_0 = k(\omega_r - z_1) \\ u = u_0 - \frac{z_2}{b} \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 为比例增益系数; u 为 ADRC 最终输出的控制量。

通过 Gao 等^[11-12] 总结的线性自抗扰参数整定方法可得出:

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\omega_c \\ \beta_2 = \omega_c^2 \\ k = \omega_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω_c 为闭环系统带宽; ω_0 为线性 ESO 带宽。

经过参数测试, 本文中 ω_0 取 2 倍的 ω_c 。

2.2 电流环控制器设计

电流环作为整个控制系统的内环对相应的快速性要求更高, 且内环受到的干扰相对速度环更少。根据式(2)写出电流环控制器的一阶 ADRC 动态方程:

$$i_q = a_q(t) + b_q u_q \quad (9)$$

式中: $a_q(t)$ 为 q 轴电流总扰动, $a_q(t) = -\frac{R}{L}i_q - \frac{p\varphi_f}{L}$; b_q 为控制量系数。

电流环设计与转速环相同, 以 u_q 为被控量设计 ESO 和线性误差反馈率, 可参照 2.1 节搭建。

3 负载转矩观测器设计

以表贴式 PMSM 为例, PMSM 运动方程如下:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (10)$$

式中: T_e 为电磁转矩, $T_e = \frac{3}{2}p\varphi_f i_q$

综合式(10)和式(2)可以得到 PMSM 的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = \frac{3p\varphi_f i_q}{2J} - \frac{B\omega_r}{J} + \frac{T_L}{J} \\ \dot{T}_L = 0 \end{cases} \quad (11)$$

由于控制器的开关频率较高, 一般认为在控制周期内负载转矩的变化近似为 0, 即 $\dot{T}_L = 0$ ^[13]。此时以电机转速和负载转矩为观测对象, 建立 SMO:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_r = \frac{3p\varphi_f \hat{i}_q}{2J} - \frac{B\hat{\omega}_r}{J} + \hat{T}_L + u_{smo} \\ \hat{T}_L = l u_{smo} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)减式(11)可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{1}{J}e_2 - \frac{B}{J}e_1 + u_{smo} \\ \dot{e}_2 = l u_{smo} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $u_{smo} = k \text{sign}(\hat{\omega}_r - \omega_r)$, k 为滑模增益; e_1 为速度误差, $e_1 = \hat{\omega}_r - \omega_r$; e_2 为负载转矩估计误差, $e_2 = \hat{T}_L - T_L$; $\hat{\omega}_r$ 、 $\hat{T}_L$ 分别为角速度估计值和负载转矩估计值; l 为反馈增益。

定义滑模面 $s = e_1 = \hat{\omega}_r - \omega_r$, 为了使观测器稳定, 由滑模控制理论可知, 广义滑模可达到的条件为 $s\dot{s} \leq 0$, 此时构建 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2}s^2$, 则:

$$s\dot{s} = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left[-\frac{1}{J}e_2 - \frac{B}{J}e_1 + k \text{sign}(e_1) \right] \quad (14)$$

当 $k < \left| \frac{1}{J}(Be_1 + e_2) \right|$ 时, 会存在 $s\dot{s} \leq 0$, 当进入滑动模态动时, $s = \dot{s} = 0$, 这时 $e_1 = \dot{e}_1 = 0$, 此时有 $k < \left| \frac{e_2}{J} \right|$, 且 $l < 0$, 则负载转矩观测器误差为

$$e_2 = T_L - \hat{T}_L = c e^{\frac{l}{J}t} \quad (15)$$

c 为常数, 随着时间 t 增加, 观测误差将逐渐减少到 0, 其收敛速度由反馈增益 l 决定。

反馈增益在负载转矩观测器中的效果为, 当 l 越大, 转矩观测越慢, 但是其波动更小; l 越小则效果正好相反。为了更好地利用这一特性以达到更好的观测效果, 本文采用一种可变增益的算法对 l 进行调节, 在负载波动小时, 增益选取较大值, 波动大时选取较小值。

假设 $\hat{T}_{L0}$ 为观测器上一时刻和下一时刻采样值之差, $l_{\max}$ 为最大增益, $l_{\min}$ 为最小增益。这时

设定一个比较值 δ 作为增益切换值,在辨识开始时先选择小增益 $l_{\min}$ 提升快速性。在负载转矩观测值波动较大时选择增益为 $l_{\min}$,当波动较小时选择增益为 $l_{\max}$,这样使反馈增益在不同情况下拥有更好的控制效果,经过测试本文取 $l_{\min} = -10, l_{\max} = -1$ 。变增益算法流程如图 2 所示。

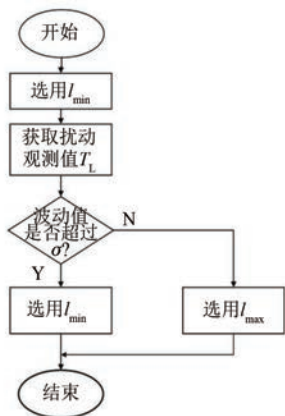


图2 变增益算法流程图

将算法加入传统 SMO 中,得到改进负载转矩观测器如图 3 所示。

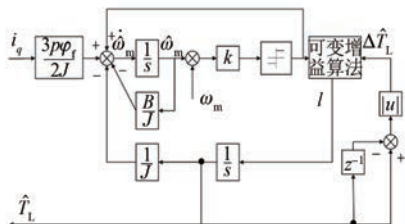


图3 负载转矩观测器框图

在传统的 SMO 中对于误差信号采用的是符号函数,鲁棒性虽然强于一般的连续系统,但符号函数的不连续性往往会让系统产生抖动,则本文选用具有连续性的 Sigmoid 函数:

$$\text{Sigmoid}(x) = \frac{2}{1 + e^{-ax}} - 1 \quad (16)$$

进一步削减系统抖动,其中 a 为正实数。

4 转矩前馈控制策略

转矩前馈补偿的中心思想就是将负载转矩观测器所观测到的负载转矩按照比例补偿到转矩电流中,形成对抗扰动的前馈补偿效果,其中补偿系数为 $K_t = 1.5p\phi_f$,系统框图如图 4 所示。

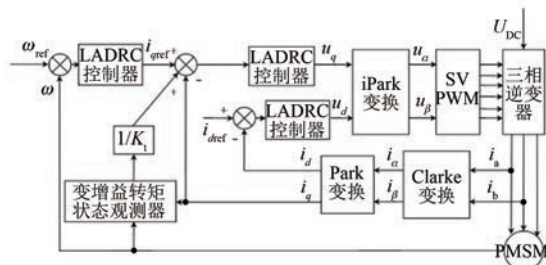


图4 系统控制框图

5 仿真验证

5.1 负载转矩辨识

利用 MATLAB/Simulink 对基于前馈补偿的 LADRC 系统进行仿真,本次仿真所用的电机参数如下:电机极对数 $p=3$,定子电阻 $R_s = 1.8 \Omega$,定子电感 $L_s = 0.0108 \text{ mH}$,转子磁链 $\phi_f = 0.191 \text{ Wb}$,转动惯量 $J = 0.0145 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,摩擦因数 $B = 0.0001$,仿真结果如图 5 所示。

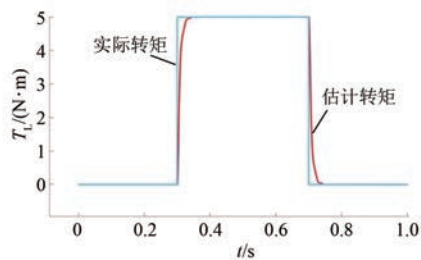


图5 负载转矩观测图

通过图 5 可以看出,在负载转矩突变为 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,观测转矩超调量为 $0.025 \text{ N} \cdot \text{m}$,稳态响应时间为 0.03 s ,在负载转矩由 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 减小到 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,观测转矩超调量为 $0.03 \text{ N} \cdot \text{m}$,稳态响应时间为 0.05 s ,因此负载观测器可以在电机稳态时快速准确地辨识出负载转矩并且在负载波动时起到较好的跟踪效果。

5.2 基于前馈补偿的 LADRC

在转速为 1000 r/min 时进行测试,在 0.45 s 改变负载,分别测试负载转矩从 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 突然增加到 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$,以及将负载转矩从 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 突然减小到 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。对比 PI 控制和带有前馈补偿的 LADRC 控制效果,如图 6 和图 7 所示。

通过图 6 和图 7 可以看出,使用普通 PID 的控制,在电机从起动到进入稳态运行时,转速超调达到 36.6 r/min ,调节时间为 0.1583 s ,而基

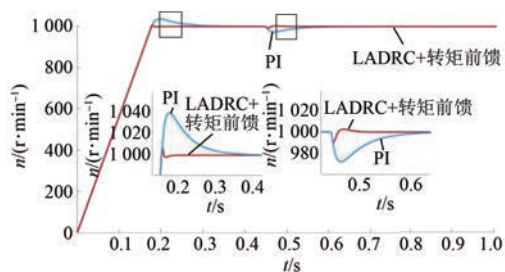


图6 突增负载时转速响应曲线

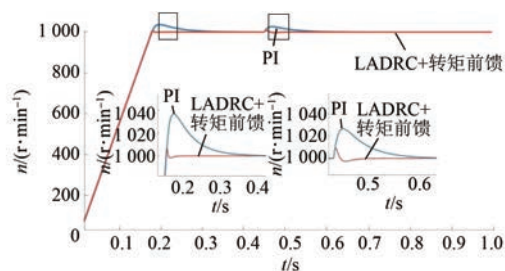


图7 突减负载时转速响应曲线

于前馈补偿的线性自抗扰算法转速超调可以减小到 7.5 r/min, 调节时间为 0.035 s。

通过图 6 所示, 在 0.45 s 时将负载由 0 N·m 突然增加到 5 N·m, 基于前馈补偿的线性自抗扰算法转速超调为 9.5 r/min, 调节时间为 0.05 s, 而使用普通 PID 控制的超调量为 26.7 r/min, 调节时间为 0.2 s。

通过图 7 所示, 在 0.45 s 时将负载由 5 N·m 突然减小到 0 N·m 时, 基于前馈补偿的 LADRC 转速超调 10.8 r/min, 调节时间为 0.045 s, 而使用普通 PID 控制时超调量为 24 r/min, 调节时间为 0.18 s。

通过比较上述试验结果可以得出, 与普通 PID 控制相比, 基于前馈补偿的 LADRC, 不但在电机动态进入稳态阶段具有更小的超调, 并且在突增负载或减小负载时, 转速超调更小, 响应速度更快。所设计的 LADRC 可以进一步减少系统的误差, 提升系统的稳定性和鲁棒性, 证明了本设计的可行性。

6 结 语

本文从电机驱动系统控制要求出发, 针对传统 PID 的缺陷, 设计了 LADRC 并进行优化。针对负载端扰动设计了一套变增益负载转矩 SMO, 提出了一种基于前馈控制的 LADRC 系统, 将反馈的负载端扰动转换为电流补偿回电流环中, 使

系统在负载端出现扰动时仍有较好的控制效果, 解决了电机驱动系统在复杂工况下因为外界扰动而造成的控制效果不佳等问题, 并通过仿真证明了本设计的有效性与可行性。

【参考文献】

- [1] SHI J, LIU T, CHANG Y. Position control of an interior permanent-magnet synchronous motor without using a shaft position sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1989.
- [2] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1): 24.
- [4] 韩京清. 控制理论—模型论还是控制论[J]. 系统科学与数学, 1989(4): 328.
- [5] 余致廷, 邹薇, 董旺华, 等. 扩展卡尔曼滤波结合前馈补偿永磁同步电机位置估计[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(10): 1312.
- [6] 徐婧玥, 孙西龙, 赵蔚, 等. 基于负载扰动观测器的永磁同步电机预测控制研究[J]. 通信电源技术, 2018, 35(8): 16.
- [7] LEE K, CHOI C, LEE W. Estimation of load torque for motorized seat belt system with reduced-order observer[C]//2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, 2011.
- [8] ZHANG X, HOU B. Novel reaching law-based sliding-mode load torque observer for PMSM[C]//2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.
- [9] ZHENG C, ZHANG J, LIU W, et al. A novel reduced-order load torque observer based discrete-time sliding mode control for PMSM speed servo system[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017.
- [10] 盖江涛, 黄守道, 黄庆, 等. 基于负载观测的永磁电机驱动系统自抗扰控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 29.
- [11] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller-tuning[C]. Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.
- [12] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498.
- [13] 徐勇. 交流伺服系统转动惯量在线辨识及负载转矩观测[J]. 微电机, 2016, 49(9): 58.