

# 永磁同步电机的线性自抗扰控制及其参数整定研究

栾东雪, 许鸣珠, 刘进志

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**针对永磁同步电机调速系统存在的非线性、强耦合、多变量、参数摄动等问题。研究基于自抗扰技术的交流永磁同步电机直接转矩控制系统。为简化设计采用线性化的自抗扰控制算法,并对算法中的参数调整给出经验性的选取原则。仿真结果表明,该控制算法能够提高永磁同步电机调速系统的响应速度,减小稳态误差,无超调量,且抗干扰性和鲁棒性较强。

**关键词:**永磁同步电机;交流调速系统;线性自抗扰控制;参数整定

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)03-0062-05

## 0 引言

自抗扰控制是20世纪90年代末产生的一种不依赖系统精确模型,能够实时估计和补偿系统内外扰动的新型控制技术<sup>[1]</sup>,具有良好的动静态性能和较强的抗干扰能力,被广泛应用于非线性控制领域。永磁同步电机(PMSM)是一个强耦合、多参量的非线性系统,但其体积小、效率高、转动惯量低,已经逐渐成为现代交流伺服控制系统的主流,也吸引了众多的研究者。文献[2-3]采用基于模糊控制的永磁同步电动机控制系统;文献[4-5]研究神经网络控制策略实现了永磁同步电机转速的准确跟踪控制;文献[6-7]将滑模变结构应用于永磁同步电机的位置伺服系统中;文献[8-9]将自适应控制应用到永磁同步电机的电流控制。这些算法不同程度地改善了PMSM的调速性能,但也存在一些缺点,例如:模糊控制规律的确定多数要依靠经验,且稳态误差大;神经网络控制系统较为复杂;滑膜变结构方法存在抖振现象;自适应算法的计算量大、数据更新慢,限制了其在实际中的应用。本文将自抗扰控制技术应用于永磁同步电机的调速系统,弥补了上述算法的不足,提高了转速控制精度。

永磁同步电机的主要控制策略有矢量控制和直接转矩(DTC)控制,已经有人将自抗扰控制器应用于永磁同步电机矢量控制的仿真研究。相比基于旋转坐标系的矢量控制,基于定子磁场的DTC,采用bang-bang控制方法直接控制定子磁链和电磁转矩,具有控制简单,运算量小,对电机参数依赖少等优点,静态和动态性能都比较高。但是由于转子转速和定子电流的强耦合使系统具有很强的非线性,特别在系统存在未知扰动时,这种非线性使系统难以达到高精度的控制要求。本文将自抗扰控制技术与直接转矩控制相结合,提出新的控制算法。考虑到自抗扰控制器参数较多,采用一种简化的线性化自抗扰控制算法,并将其应用于交流永磁同步电机的调速系统中,实现了高品质控制。同时,通过大量的仿真研究,得到线性自抗扰控制器参数整定的相关规律,为实际工程操作提供有价值的参考。

## 1 线性自抗扰控制

自抗扰控制器(ADRC)由传统的PID控制器发展而来,为了得到更优的控制效果,ADRC运用了3项重要技术<sup>[10-14]</sup>:一是利用跟踪微分器(TD),跟踪并控制系统的状态变量及它们的各阶微分,解决了传统PID控制系统中响应速度与超调量之间的矛盾;二是由扩张状态观测器(ESO)对系统的综合扰动和广

收稿日期:2014-04-25 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.03.12

作者简介:栾东雪(1988-),女,硕士研究生,研究方向为检测技术与自动化装置。E-mail:706650091@qq.com

通讯作者:许鸣珠(1967-),女,教授,研究方向为控制理论与应用,信号检测与处理。E-mail:xumz@stdu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(11372198);河北省教育厅重点项目(Z9900451);石家庄市科技局项目(131080151A)

栾东雪,许鸣珠,刘进志. 永磁同步电机的线性自抗扰控制及其参数整定研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(3):62-66.

义输出进行观测,再对扰动项实施前馈补偿,实现了被控系统的前馈线性化;三是采用非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)得到系统的控制量。ADRC 工作时首先利用非线性状态误差反馈输入的参考信号,并按控制器的阶数给出参考输入的微分信号;然后,由 ESO 对系统输出及其各阶导数进行观测,同时对系统的扰动项进行估计,在扰动项中,ADRC 把被控对象自身的不确定性当作内扰,把外界扰动当作外扰,由它们一起构成系统的总扰动,也由 ESO 进行观测;最后通过 NLSEF 对参考输入及其扩张状态的误差信号的线性组合进行控制,并对 ESO 检测的综合扰动进行补偿。

为方便仿真和实际应用本文采用一阶 TD、二阶 ESO 及一阶 NLSEF 的线性自抗扰控制器对永磁同步电机的调速系统进行控制,其结构图如图 1 所示。

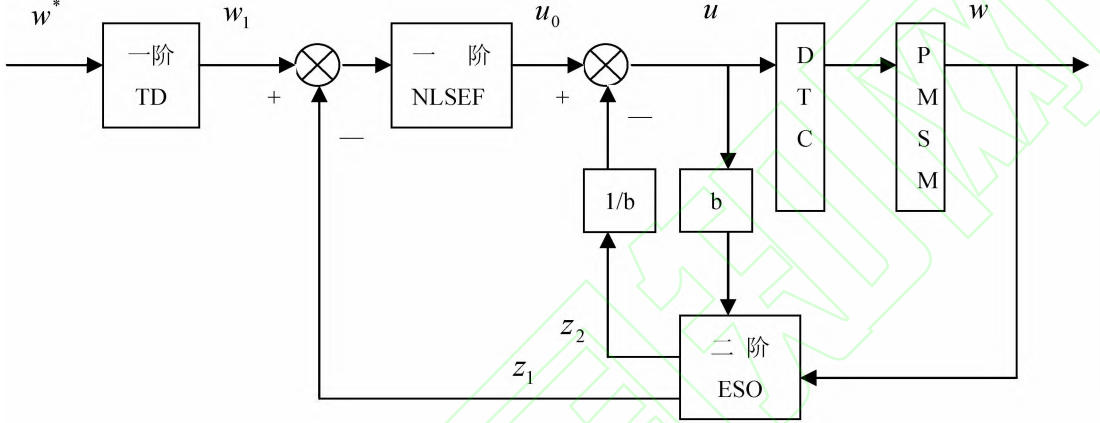


图 1 自抗扰控制器结构图

图 1 中,  $w^*$  是给定的输入转速信号,  $w_1$  是一阶 TD 安排过渡过程后的输出转速,  $z_1$  是观测的转速输出,  $z_2$  是 ESO 观测的系统总扰动,用于系统的前馈补偿,补偿系数为  $1/b$ ,  $u_0$  是非线性反馈控制律输出的控制信号,  $u$  是经扰动补偿后的控制信号,即输出的给定转矩值,对永磁同步电机的直接转矩控制系统进行调速控制。

按照图 1 中的结构设计 PMSM 的自抗扰控制器<sup>[15]</sup>,首先对给定的参考转速指令设计跟踪微分器,这样不仅可以为给定转速安排适当的过渡过程,而且还能得到生成控制律要用到的给定转速的微分信号,根据电机特点设计一阶线性化 TD,其表达式为

$$\begin{cases} e_1 = w_1 - w^* \\ n_1 = -re_1 \end{cases} \quad (1)$$

然后设计扩张状态观测器,对系统的输出作实时观测,且能估计系统的总扰动,所设计的二阶线性化 ESO 方程为

$$\begin{cases} e_2 = z_1 - w \\ z_1 = z_2 - \beta_1 e_2 + bu \\ z_2 = \beta_2 e_2 \end{cases} \quad (2)$$

最后是非线性状态误差反馈控制器的设计,由 TD 和 ESO 输出的差值经过 NLSEF 和综合扰动的前馈作用一起,作为 PMSM 调速系统的控制作用。一阶线性化 NLSEF 表达式为

$$\begin{cases} e = z_1 - z_2 \\ u_0 = \beta_3 e \\ u = u_0 - z_2/b \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $r, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  为线性 ADRC 的 4 个可调参数;  $b$  是唯一需要参数的量,它表示控制输入的增益,  $b = n_p^2 \psi_f / J$ ,  $u = T_e^*$ 。

根据以上的理论分析和线性化方程,可以在 MATLAB 中搭建 ADRC 的仿真框图,如图 2 所示。

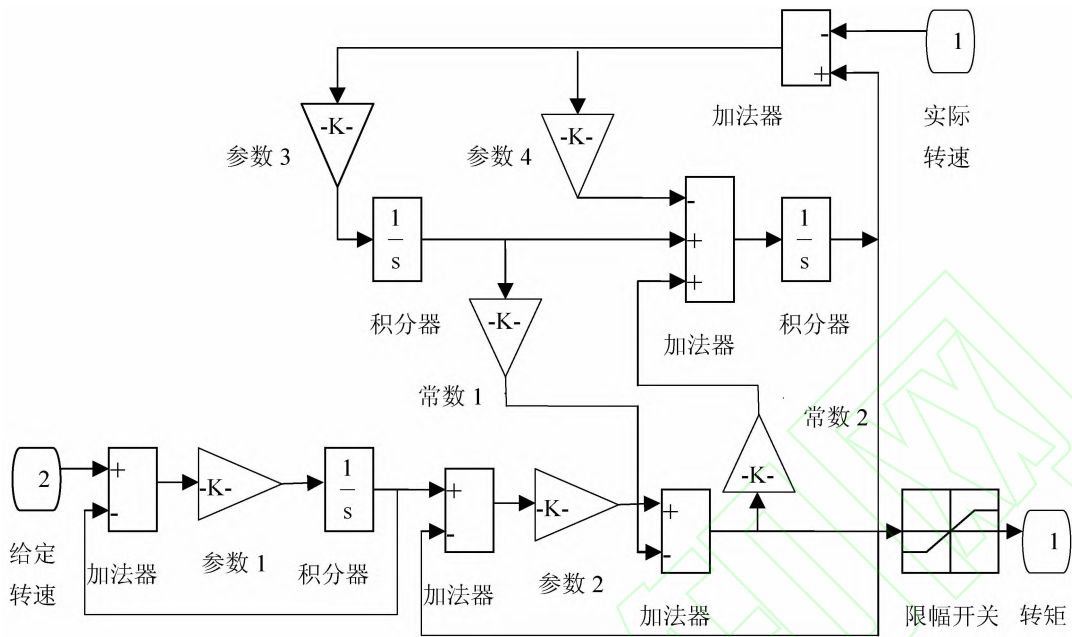


图 2 ADRC 仿真模块

2 仿真和结果

为了更好地分析交流永磁同步电机采用自抗扰控制技术后的控制性能,并验证加入自抗扰控制器后的控制效果,在 MATLAB 的 SIMULINK 中搭建了永磁同步电机基于线性自抗扰控制技术的调速系统模型,并进行了仿真实验研究。仿真中采用的永磁同步电机参数如下:定子电阻  $R_s = 3 \Omega$ ,极对数  $n_p = 2$ , 直交轴等效电感  $L_d = L_q = 8.5 \times 10^{-3} \text{ H}$ ,粘滞系数  $B = 0$ ,转子磁链  $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$ ,磁链给定  $|\psi_s|^* = 1 \text{ Wb} \cdot \text{匝}$ ,转动惯量  $J = 0.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。设定转速  $\omega^* = 80 \text{ rad/s}$ ,空载起动且  $t = 0.25 \text{ s}$  时突加额定负载  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$  的条件下,得到 ADRC 和 PI 的转速仿真结果如图 3 和图 4 所示。

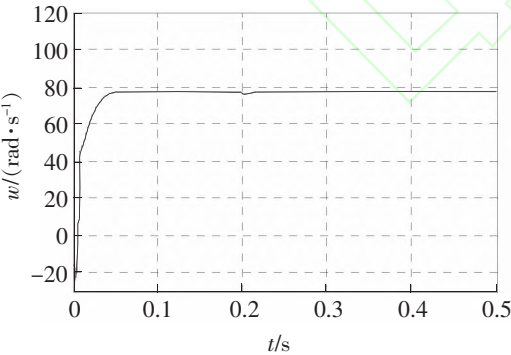


图 3 ADRC 转速响应曲线

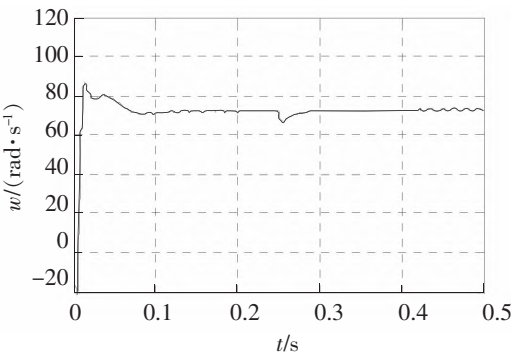


图 4 PI 转速响应曲线

对比以上转速仿真图可得:通过 ADRC 获得的转速响应特性曲线要比 PI 控制方法的更好。采用 ADRC 控制器时,系统不存在超调现象且响应速度快、调节时间较短。而采用 PI 控制器时,PMSM 系统存在约为 10% 的超调量,调节时间为 0.015 s。同时,ADRC 的抗干扰能力较强,负载扰动对转速的影响小且系统能迅速恢复;而 PI 控制器在这些方面的能力都不如自抗扰控制器。仿真结果证明线性化的 ADRC 是可行的,它不仅能较准确的估计出转速,而且对扰动具有很强的抗干扰能力。

3 线性 ADRC 的参数整定

ADRC 的参数调整是控制器设计的一个关键环节,经线性化后需要调整的参数有 4 个,且可按照“分离性原理”分别对 TD、ESO、NLSEF 进行独立设计,再通过组合即可得到完整的自抗扰控制器。本文在

参数调整方面进行了大量的仿真研究,得出了线性化 ADRC 参数整定的相关规律。

TD 安排合适的过渡过程跟踪输入信号,其中需要调整的参数只有一个,也相对简单。 $r$  是决定跟踪给定输入速度的参数,称为“速度因子”,其取值越大过渡过程也就越短,系统的响应速度也就越快,但取值过大将会出现超调与噪声,相应 TD 的输出品质也会变差,因此在调整时需在保证跟踪速度的前提条件下选取尽量小的数值。

ESO 是 ADRC 的核心,观测器对干扰的准确估计是进行下一步前馈补偿的关键,因此需很好地整定此部分的参数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 。参数  $\beta_1$  和  $\beta_2$  是系统状态误差的反馈增益,取值越大则系统调节速度越快,但是取值过大将会出现振荡及超调现象, $\beta_1$  过小会导致 ESO 的跟踪能力变坏, $\beta_2$  过小将会加大系统的振荡次数和振荡幅值,通常情况下, $\beta_2$  的取值要比  $\beta_1$  的大 1~2 个数量级。

NLSEF 是通过非线性反馈来产生系统的控制量,以有效补偿 ESO 估计到的系统内外扰动之和,NLSEF 可调的参数为  $\beta_3$ ,它与系统的响应速度和负载突变时的速度变化存在一定的关系,在一定的范围内,其取值越大,系统的响应特性越好。

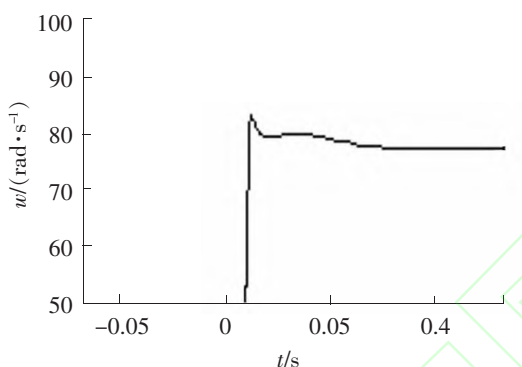


图5  $r$  较大时系统转速局部轨迹图

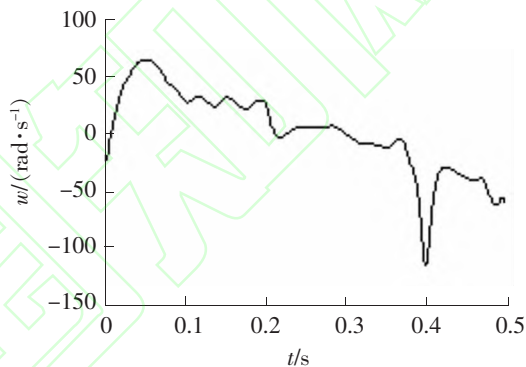


图6  $\beta_1$  过小时系统转速轨迹图

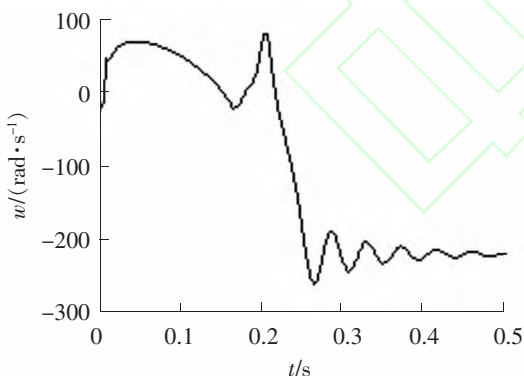


图7  $\beta_2$  过大时系统转速曲线图

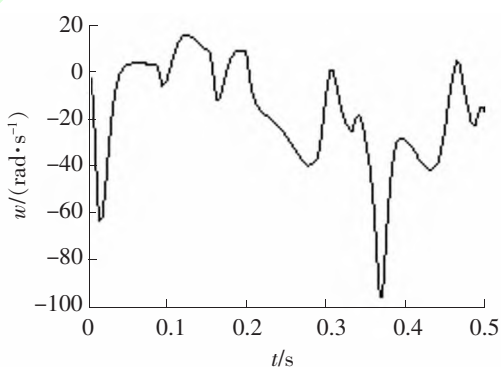


图8  $\beta_3$  过小时系统转速曲线图

图5~图8给出了在仿真实验过程中由于参数选择不当而得到的 PMSM 转速曲线图,它们也从反面验证了本文总结的参数整定规律的正确性。图5显示  $r$  较大时系统的响应速度确实是缩短了,但是会出现超调现象,影响了 TD 的输出;图6显示较小的  $\beta_1$  使系统的转速调节能力大幅下降;图7显示  $\beta_2$  较大时电机调速系统存在震荡,且幅值也无法跟踪给定的输入转速;图8显示  $\beta_3$  参数较小时,系统调速控制能力变坏,甚至完全丧失跟踪转速的能力。

## 4 结论

本文应用线性自抗扰控制理论设计了 PMSM 调速系统中的转矩控制器,对 ADRC 参数整定进行了深入研究,将其应用到 PMSM 的 DTC 控制系统中,能够简化系统结构,减少整定参数。仿真结果表明,线性自抗扰控制能够提高电机调速系统的抗干扰性和鲁棒性,实现响应迅速和无超调的很好结合。

## 参 考 文 献

- [1] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [2] 冉振亚, 杨超, 曹文明, 等. 永磁同步电动机调速系统的模糊控制与仿真[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2004, 27(7): 32-35.
- [3] Isa S N M, Ibrahim Z, Patkar F. Comparative Study of Fuzzy Logic Speed Controller in Vector Controlled PMSM Drive: Minimum Number of Fuzzy Rule-base[C]//Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications. Kuala Lumpur: Malaysla Press, 2009: 112-118.
- [4] Wang Jian, Wang Honghua, Xueqin Zhang, et al. Neural Network Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive [C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Singapore: kinokunya Press, 2008: 542-546.
- [5] 郝东丽, 郭丹颖, 贾凯. 基于神经网络的永磁同步电机矢量控制[J]. 电力电子技术, 2004, 38(4): 54-55, 61.
- [6] 胡强晖, 胡勤丰. 全局滑模控制在永磁同步电机位置伺服中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 30(18): 61-66.
- [7] Baik I, Kim K, Youn M. Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding mode control technique[J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2000, 8(1): 47-54.
- [8] Liu Tian-hua, Cheng Chien-ping. Adaptive control of a sensorless permanent magnet synchronous motor drive[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electron Systems, 1994, 30(3): 900-909.
- [9] 许强, 贾正春, 李郎如. 永磁同步电动机模型参考自适应速度控制[J]. 电气传动, 1998, 28(5): 3-7.
- [10] 孙凯. 自抗扰控制策略在永磁同步电动机伺服系统中的应用研究与实现[D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2007.
- [11] 黄焕袍, 万辉, 韩京清. 安排过渡过程是提高闭环系统“鲁棒性、适应性和稳定性”的一种有效方法[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(增刊): 89-94.
- [12] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
- [13] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律 - NLSEF[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 221-225.
- [14] 王久和. 交流电动机的非线性控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [15] 崔晓光. 基于自抗扰控制技术的永磁同步电机速度控制研究[D]. 济南: 山东大学电气工程学院, 2013.

## Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System Based on Linear Active Disturbance Rejection Control and its Parameter Adjustment

Luan Dongxue, Xu Mingzhu, Liu Jinzhi

(College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** An Active Disturbance Rejection Control (ADRC) algorithm for the permanent magnet synchronous motor (PMSM) direct torque control system is designed, for the PMSM is a nonlinear, strong coupling, multi-parameter perturbation variable system. The algorithm proposes a way of linear of the ADRC controller owing to the difficulty in parameters adjustment of ADRC. The simulation results show that this method can not only quicken the speed-response of system without over-shooting, but also reduce the error of the steady state. Further more, it is more robust to the load-mutation and load-disturbance.

**Key words:** PMSM; speed regulating system; linear active disturbance rejection control; parameter adjustment