

基于变增益扩张状态观测器的永磁同步电机 转速环自抗扰控制器设计

王发良, 曾岳南, 谢传林, 许小龙, 沈志峰

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 线性扩张状态观测器(LESO)在观测初始阶段,系统状态量实际值与估计值误差较大。由于 LESO 高增益的影响,导致 LESO 在初始时刻的扰动估计输出出现很大的峰值,而且观测器增益越大,峰值现象越严重。针对上述问题,设计了一种变增益扩张状态观测器(TESO),其增益是一个时变函数,在初始时刻为较小的函数值,随着时间逐渐增大,直至趋于一个较大常数。利用李雅普诺夫变换和微分代数谱理论给出了参数整定公式。将线性自抗扰控制器(LADRC)中的扩张状态观测器替换为 TESO,并将其应用于永磁同步电机转速控制中,计算机仿真和系统试验验证了该控制器设计的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 自抗扰控制器; 变增益扩张状态观测器; 参数整定

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)11-0056-05

Design of Active Disturbance Rejection Controller for PMSM Speed Loop Based on Time-Varying Gain Extended State Observer

WANG Faliang, ZENG Yuenan, XIE Chuanlin, XU Xiaolong, SHEN Zhifeng

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The difference between the actual value and the estimated value of the system variable was large in the initial stages of observation using linear extended state observer (LESO). Since the gain of LESO was large, there was obvious peaking phenomenon, which affected the measurement of the disturbance. The larger the gain of the observer, the more severe of the peaking phenomenon. In order to solve the problems, a time-varying gain extended state observer (TESO) was designed. Its gain was a time varying function, which was a smaller value at the initial time, and then the function value increased with time to a larger constant. The parameters tuning formula was given based on Lyapunov transform and differential algebraic spectral theory. Replacing the extended state observer in the linear active disturbance rejection controller (LADRC) with TESO, the controller was applied to the speed control of permanent magnet synchronous motor regulation system. The effectiveness of the controller design was verified by the simulation and experimental results.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); active disturbance rejection controller; time-varying gain extended state observer; parameter tuning

0 引 言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有高功率密度、高转矩/惯量比和高效率等优点,广泛应用于伺服系统和高性能的

调速系统^[1]。PMSM 是一个典型的非线性多变量强耦合系统,线性控制难以满足其高控制性能的要求。

自抗扰控制作为应用于 PMSM 控制中的一种非线性算法,能够实时估计并补偿系统的内外

作者简介: 王发良(1994—),男,硕士研究生,研究方向为伺服驱动控制系统。

曾岳南(1962—),男,博士,教授,研究方向为电力电子功率变换器、电力传动运动控制。

扰动,具有结构简单、参数适应性广等优点。传统非线性自抗扰控制器(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)需要整定参数过多,高志强通过引入带宽的概念,将非线性 ADRC 线性化和参数化,同时给出了线性自抗扰控制器(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)参数整定公式,减少了 ADRC 的设计参数,便于工程应用^[2]。线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer, LESO)作为 LADRC 的核心部分,其观测品质直接决定了 ADRC 的控制性能。LESO 为保证较高的估计精度,往往采用高增益系数,导致 LESO 在初始时刻出现峰值现象^[3-4]。针对该问题,文献[5]采用了全局有界控制器的处理,但全局有界控制器所需要的界较难确定,文献[6]采用了具有时变增益扩张状态观测器(Time-Varying Gain Extended State Observer, TESO),但是参数的整定须基于经验。

本文提出了基于 TESO 的 PMSM 转速环 ADRC 的设计方案。针对 LESO 在状态观测初始时刻存在的峰值现象,设计了 TESO,并利用李雅普诺夫变换和微分代数谱理论给出了参数整定公式。仿真和试验结果表明,TESO 在保证观测精度的同时可以有效抑制初始时刻的峰值现象,从而使转速响应无超调。

1 PMSM 数学模型

PMSM 在 d, q 旋转坐标系下的电压和磁链方程可以表示为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩和运动方程为

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

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

式中: u_d, u_q ——定子 d, q 轴电压;

R_s ——定子电阻;

i_d, i_q ——定子 d, q 轴电流;

ψ_d, ψ_q ——定子磁链 d, q 轴分量;

ω ——转子电角速度;

L_d, L_q ——定子 d, q 轴等效电感;

ψ_f ——转子磁链;

T_e ——电机的电磁转矩;

p ——电机的极对数;

T_L ——电机负载转矩;

B ——电机的摩擦因数;

J ——转动惯量;

ω_r ——转子角速度。

对于表贴式 PMSM 有 $L_d = L_q$, 式(3)可简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (5)$$

2 基于 TESO 的转速环 ADRC 设计

ADRC 包括跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)以及状态误差反馈控制律(State Error Feedback Control Law, SEF)3个部分。因此,可以分3步进行转速环 ADRC 的设计:(1)设计线性跟踪微分器(Linear Tracking Differentiator, LTD),主要是对给定信号安排过渡过程;(2)设计 TESO,用来估计系统的“总扰动”,进行动态反馈补偿,并实现对峰值现象的有效抑制;(3)针对积分串联型对象,设计线性状态误差反馈控制律(Linear State Error Feedback Control Law, LSEF)。

2.1 转速环 LTD 设计

LTD 主要用于安排期望的转速过渡过程和抑制超调,其缓和了用连续变化的转速反馈去跟随不连续变化的转速阶跃给定的矛盾^[7]。为了简便设计,用一阶惯性环节 $1/(1+\tau s)$ 来实现。惯性时间常数越大,抑制超调的能力越强,反之越弱。

2.2 转速环 TESO 设计

转速控制器输入为转速给定值和反馈值,输出为转矩电流给定。根据 PMSM 的电磁转矩和运动方程可知,转速环 ADRC 输入输出的微分方程为一阶,因此采用一阶 ADRC。

TESO 主要用于观测系统状态以及总扰动。联立式(4)、式(5)可得:

$$\dot{\omega}_r = \frac{N i_q - T_L - B \omega_r}{J} \quad (6)$$

式中: N ——转矩电流系数, $N = \frac{3}{2} p \psi_f$ 。

将式(6)改写为

$$\dot{\omega}_r = f_\omega + b_0 i_q \quad (7)$$

式中: b_0 ——可调系数。

$$f_\omega = \frac{N i_q - T_L - B \omega_r}{J} - b_0 i_q \quad (8)$$

式中: f_ω ——转速环的总扰动量。

记 $x_1 = \omega_r, x_2 = f_\omega, u = i_q$, 将式(7)写成状态方程:

$$\dot{x}_1 = x_2 + b_0 u \quad (9)$$

为了方便设计 TESO, 将式(9)用矩阵表示为

$$\dot{x} = Ax + Bu + Eh \quad (10)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, h = \dot{f}_\omega$ 表示扰动量的一阶导数。

为了观测扰动量的大小, 根据式(10)设计 TESO 的方程为

$$\dot{z} = Az + Bu + L(x_1 - z_1) \quad (11)$$

式中: L ——TESO 的增益, $L = [l_1(t), l_2(t)]^T$;

z ——状态量的观测值;

x ——状态量的实际值。

TESO 与 LESO 的不同之处在于观测器增益是时变的。接下来给出观测器增益的整定公式。

将式(11)减去式(10), 可得观测误差的状态方程为

$$\dot{e} = A_e e + Eh \quad (12)$$

其中: $A_e = \begin{bmatrix} -l_1(t) & 1 \\ -l_2(t) & 0 \end{bmatrix}$ 。

利用李雅普诺夫变换和能控性矩阵可将式(12)转化为一种等效形式^[8]:

$$\dot{e}_c = A_c e_c + E_c h \quad (13)$$

其中: $A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1(t) & -a_2(t) \end{bmatrix}, E_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

定义 $e_c = T(t)e$, 则李雅普诺夫变换矩阵 $T(t)$ 可构造如下

$$T(t) = M_c(t)M^{-1}(t) \quad (14)$$

式中: $M(t), M_c(t)$ ——系统式(12)、式(13)的

能控性矩阵, $M(t) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, M_c(t) =$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & a_2(t) \end{bmatrix}。$$

由李雅普诺夫变换^[8], 可得:

$$\begin{cases} A_e = T^{-1}(t)[A_c T(t) - \dot{T}(t)] \\ E = T^{-1}(t)E_c \end{cases} \quad (15)$$

则由式(12)~式(15)可得 TESO 增益的表达式:

$$\begin{cases} l_1(t) = a_2(t) \\ l_2(t) = \dot{a}_2(t) + a_1(t) \end{cases} \quad (16)$$

观测器增益 $l_i(t)$ 已经转化为 $a_i(t)$ 以及其导数的表达式, 最后利用微分代数谱理论(Differential Algebraic Spectral Theory, DAST)分配合适的时变并行微分(PD)谱以保证观测器的收敛性。时变系统系数 $a_1(t), a_2(t)$ 以及相应的 PD 谱给定如下^[9]:

$$\begin{cases} a_1(t) = \omega_n^2(t) \\ a_2(t) = 2\zeta\omega_n(t) - \frac{\dot{\omega}_n(t)}{\omega_n(t)} \end{cases} \quad (17)$$

$\rho_{1,2}(t) =$

$$\begin{cases} -\zeta\omega_n(t) \pm j\omega_n(t)\sqrt{1-\zeta^2}, & 0 < |\zeta| < 1 \\ -\omega_n(t), -\omega_n(t) + \frac{\omega_n(t)}{\int \omega_n(t) dt}, & |\zeta| = 1 \\ -(\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n(t), & |\zeta| > 1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: ζ ——阻尼比;

$\omega_n(t)$ ——TESO 的带宽。

类似于线性时不变系统中的极点配置方法, 通过分配合适的 PD 谱就可得 TESO 的观测器增益为

$$\begin{cases} l_1(t) = 2\zeta\omega_n(t) - \frac{\dot{\omega}_n(t)}{\omega_n(t)} \\ l_2(t) = \omega_n^2(t) + \frac{\ddot{\omega}_n(t)}{\omega_n(t)} - 2\zeta\dot{\omega}_n(t) - \frac{\dot{\omega}_n^2(t)}{\omega_n^2(t)} \end{cases} \quad (19)$$

为便于实际应用, 通常令 $\zeta = 1$, 观测器增益变为带宽的函数。

设计观测器带宽为

$$\omega_n(t) = \omega_0 \omega(t) \quad (20)$$

式中: ω_0 ——LESO 的带宽;

$\omega(t)$ ——时变函数, 若选取 $\omega(t)$ 为常数, 则式(11)为固定增益的 ESO。

设计 $\omega(t)$ 为如下所示的时变函数:

$$\omega(t) = \frac{1}{1 + e^{-kt}} \tag{21}$$

其中: k 为常数。

2.3 转速环 LSEF 设计

LSEF 主要用于抵消扰动。根据式(7)可知,要抵消转速环扰动量的影响应选取 $b_0 i_q = u_0 - \hat{f}_\omega$ 。当忽略扰动估计误差时,式(7)可表示为

$$\dot{\omega}_r = u_0 + f_\omega - \hat{f}_\omega \approx u_0 \tag{22}$$

经过扰动补偿后,转速环可以等效成一个积分环节。选取线性控制律为比例控制,即:

$$u_0 = K_p(\omega_r^* - \hat{\omega}_r) \tag{23}$$

式中: ω_r^* ——转速给定值。

根据式(22)可知,经过扰动补偿后,转速环等效成一个积分环节,采用比例控制器后,比例增益即为转速闭环带宽 ω_{cv} ,因此:

$$K_p = \omega_{cv} \tag{24}$$

ESO 的带宽越大,就可以更快地观测并通过 LSEF 抵消扰动的作用,但是观测器带宽要受到系统噪声及采样频率的限制,通常取 $\omega_0 = (5 \sim 10) \omega_{cv}$ 即可^[2]。

基于 TESO 的转速环 ADRC 的结构如图 1 所示。

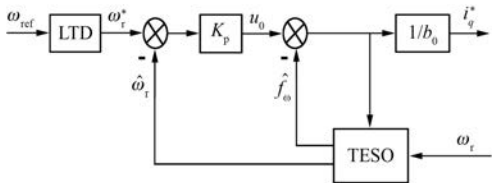


图 1 基于 TESO 的转速环 ADRC 结构图

3 仿真及分析

本节在 MATLAB/Simulink 平台上进行自抗扰伺服系统仿真试验,并和 LADRC 进行对比,以广州数控 110SJTM-060D 机床伺服电机为仿真对象模型。伺服电机参数如表 1 所示。

表 1 伺服电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
R/Ω	1.12	ψ_f/Wb	0.21
L_d/mH	2.758	p	4
L_q/mH	2.758	$n_N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	2 500
$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 36	I_N/A	10
$n_{\text{max}}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000	$T_N/(\text{N}\cdot\text{m})$	6

LADRC 参数整定采用基于带宽的整定方

法^[7],整定公式如表 2 所示。

表 2 转速环一阶 LADRC 整定公式

参数名称	整定公式	参数名称	整定公式
K_p	ω_{cv}	β_1	$2\omega_0$
τ	$1/\omega_{cv}$	β_2	ω_0^2

表 2 中, ω_{cv} 为转速闭环带宽, ω_0 表示观测器带宽,取 $\omega_0 = (5 \sim 10) \omega_{cv}$, τ 表示 LTD 的惯性时间常数。根据表 2 给出的计算方法即可完成 LADRC 的整定,而本文所提 ADRC 与 LADRC 的不同之处在于 ESO 的设计。首先对 LADRC 进行整定,取 $\omega_{cv} = 200 \text{ rad/s}$, $\omega_0 = 1\,000 \text{ rad/s}$, $b_0 = 50$ 。本文所提出的 ADRC 相比 LADRC 多了一个参数 k , k 值的选取与 TESO 的增益变化速度有关。 k 值越大,增益增大到较大常值增益的速度越快,对扰动跟踪也越快,但峰值现象也越明显。经过仿真和试验的反复验证,折中选取 $k = 30$ 。电流环均采用抗饱和 PI 控制器,PI 参数采用西门子对称整定方法。

转速环仿真试验:转速给定 $1\,000 \text{ r/min}$,空载启动时,转速环总扰动实际值、LESO 总扰动观测值以及 TESO 总扰动观测值波形如图 2 所示。LADRC 以及基于 TESO 的 ADRC 控制的系统转速响应如图 3 所示。

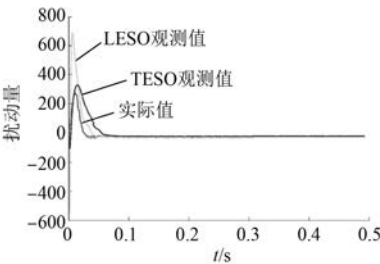


图 2 扰动观测曲线

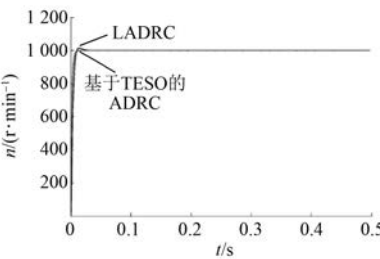


图 3 转速响应曲线

由图 2、图 3 可以看出,与 LESO 相比,TESO 可以有效减小初始时刻扰动量的观测误差,因此

基于 TESO 的 ADRC 控制的系统转速响应无超调。

4 试验及分析

在广州数控伺服驱动平台上进行了自抗扰调速系统的试验研究。试验对象为 110SJTM-060D 机床用伺服电机, 试验参数设置以及对比方案均和仿真相同。加载试验平台如图 4 所示。

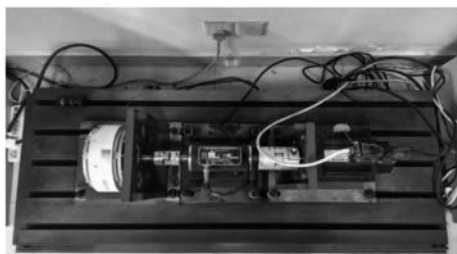


图 4 加载试验平台

转速跟随试验: 转速给定为 1 000 r/min 时, 以 LADRC 和基于 TESO 的 ADRC 作为转速环控制器的系统的转速响应如图 5 所示。

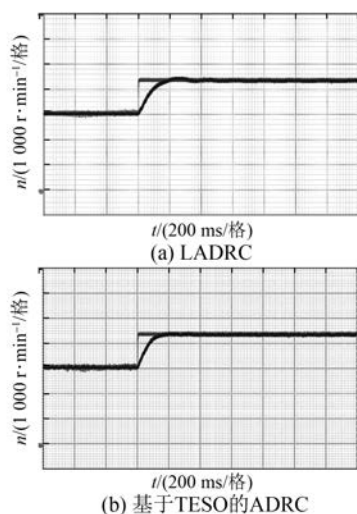


图 5 转速响应试验波形

LESO 存在峰值现象, 所以 LADRC 的转速响应存在超调, 而基于 TESO 的 ADRC 由于引入了时变增益使得峰值现象得到有效抑制, 所以转速响应不存在超调。

5 结 语

本文针对 LESO 在观测初始时刻存在的峰值现象, 设计了 TESO, 将传统 LADRC 中的 LESO 替换为 TESO, 并将其应用于 PMSM 调速系统转速控制。仿真和试验表明, 时变增益的引入可以有效抑制 LESO 的峰值现象, 从而使得转速响应无超调。

【参考文献】

- [1] HAN Y, LI H, LI W. Research on PMSM sensor-less system based on ADRC strategy [C] // IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2016: 1829-1834.
- [2] GAO Z Q. Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning [C] // America Control Conference, 2003: 4989-4996.
- [3] PU Z Q. A class of adaptive extend state observers for nonlinear disturbed systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5858-5869.
- [4] PU Z Q. Time-varying spectrum based active disturbance rejection control for hypersonic reentry vehicle [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automations, 2016: 1507-1512.
- [5] FREIDOVICH L B, KHALIL H K. Performance recovery of feedback-linearization based designs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(10): 2324-2334.
- [6] ZHAO Z L. The active disturbance rejection control for nonlinear systems using time-varying-gain [C] // 9th Asian Control Conference, 2013: 1-6.
- [7] 韩京清. 从 PID 技术到自抗扰控制技术[J]. 控制工程, 2011, 9(3): 13-18.
- [8] SILVERMAN L M. Transformation of time-variable systems to canonical (phase-variable) form[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1966, 11(2): 300-303.
- [9] ZHU J J. A unified spectral theory for linear time-varying systems-progress and challenges [C] // Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control, 1995: 2540-2546.

收稿日期: 2018-07-06