

文章编号: 1001-0920(2003)05-0540-05

异步电动机的自抗扰控制器及其参数整定

刘 鸣, 邵 诚

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对异步电动机的控制问题设计一种自抗扰控制器, 并给出了该控制器的参数整定方案。仿真实验表明, 该方案可以快速有效地得到自抗扰控制器的有效参数, 使闭环系统具有快速稳定的跟踪性能。所提出的参数整定方案对自抗扰控制器的使用和推广具有参考价值。

关键词: 自抗扰控制器; 参数整定; 异步电动机

中图分类号: TP301

文献标识码: A

Auto-disturbances-rejection controller and its parameter adjusting for a synchronous motor

L I U M ing, S H A O Cheng

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Auto-disturbances-rejection controller and its parameter-adjusting scheme for asynchronous motor are presented. Computer simulation shows that the auto-disturbances-rejection controller tunes effectively and quickly, which ensures quicker and more stable tracking characteristic of the closed loop system. The parameter-adjusting scheme is helpful for the auto-disturbances-rejection controller to be applied to other nonlinear processes.

Key words: Auto-disturbances-rejection controller; Parameter adjusting; A synchronous motor

1 引 言

自抗扰控制器^[1]继承了 PD 控制器不依赖于对象模型的优点, 利用非线性结构从根本上克服了经典 PD 所固有的缺陷, 其基本思想和方法与传统控制器相比有很大的突破。大量仿真实验表明, 该控制器的适应性和鲁棒性都很强, 而且在一定类型对象范围内具有“通用性”。然而, 由于实际工业过程的复杂性, 自抗扰控制器在实际应用中还有待于完善。特别是自抗扰控制方法的参数整定问题, 已成为实际应用所要解决的一个最基本问题。

异步电动机变频调速时需要进行电压和频率的协调控制, 其控制系统是一个多输入多输出系统。由

于输入变量(电压、频率)与输出变量(转速)相互影响, 使得它又是一个强耦合的多变量系统; 磁通乘以电流产生转矩, 转速乘以磁通得到旋转感应电动势, 各个变量同时变化, 其数学模型中含有两个变量的乘积项, 使其数学模型成为非线性; 由于三相异步电动机定子有 3 个绕组, 转子也可等效为 3 个绕组, 每个绕组产生磁通时都有自己的电磁惯性, 加上运动系统的机电惯性, 使系统成为一个高阶系统。总之, 异步电动机的数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。基于上述原因, 本文以异步电动机的自抗扰控制为例, 对自抗扰控制器的参数整定问题进行讨论。

收稿日期: 2002-05-27; 修回日期: 2002-07-10。

基金项目: 国家科技攻关计划资助项目(2001BA 204B 01); 高等学校骨干教师资助计划项目。

作者简介: 刘鸣(1978—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士生, 从事复杂系统的建模与分析等研究; 邵诚(1958—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事鲁棒自适应控制、复杂工业过程智能控制等研究。

2 自抗扰控制器的基本算法

2.1 自抗扰控制器结构

自抗扰控制器由非线性跟踪-微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和误差非线性反馈律^[2]组成。以二阶受控对象为例,其结构如图 1 所示。

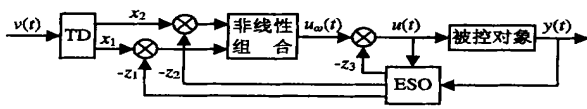


图 1 自抗扰控制器结构图

自抗扰控制器利用跟踪-微分器(TD)为参数输入安排过渡过程,得到光滑的输入信号,并提取其微分信号。利用扩张状态观测器(ESO)对对象进行估计,不仅能得到各个状态变量的估计,而且能得到对象方程右端估计,即扰动估计。对跟踪-微分器输出与扩张状态观测器给出的状态变量估计取误差,形成状态变量误差。这个状态变量误差的非线性反馈与扩张状态观测器对未知作用力估计的补偿量一起组成控制量。自抗扰控制器是自动检测系统模型与外扰实时作用并予以补偿的新型控制器。补偿分量并不区分内扰和外扰,直接检测并补偿它们的总和和作用——对系统的总扰动。补偿分量的作用实质上是一种抗扰作用,因此本文将该控制器称为“自抗扰控制器(ADRC)”。

2.2 自抗扰控制器主要组成部分

设被控对象为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_0(x_1, x_2) + f_1(x_1, x_2, \omega(t)) + b_0 u + b_1 \dot{u} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $f_0(x_1, x_2)$ 和 b_0 是已知的函数和参数, $f_1(x_1, x_2, \omega(t))$ 和 b_1 是未知的作用力(包括外扰)和参数。

2.2.1 跟踪-微分器(TD)

非线性跟踪微分器的一般形式为^[3]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = R^n f \left(x_1 - v(t), \frac{x_2}{R}, \dots, \frac{x_n}{R^{n-1}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $v(t)$ 为输入信号。只要适当选取 $f(x_1, \dots, x_n)$, 便有

$$x_1 = v(t), \dots, x_n = x_1^{(n-1)}, \quad t \quad (3)$$

2.2.2 扩张状态观测器(ESO)

文献[4]针对一类不确定系统,利用观测器形

式的跟踪-微分器,给出了“扩张状态观测器”的一般形式。即假设有受未知外扰作用的非线性不确定对象

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t) + \omega(t) \quad (4)$$

其中: $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t)$ 为未知函数, $\omega(t)$ 为未知外扰。扩张状态观测器的一般形式为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - g_1(z_1 - x(t)) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - g_n(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_{n+1} = -g_{n+1}(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (5)$$

由于扩张状态变量 $x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t), x^{(n)}(t)$ 是观测的各阶导数,只要适当选取非线性函数 $g_1(z), \dots, g_n(z), g_{n+1}(z)$ 以及相应的参数,就能很好地跟踪一类不确定对象的扩张状态。即有 $z_1(t) \approx x(t), \dots, z_{n+1}(t) \approx x^{(n)}(t)$ 。

通常情况下,让非线性函数 $g_1(z), \dots, g_n(z)$ 和 $g_{n+1}(z)$ 相同,并选择为

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (6)$$

2.2.3 控制律

利用跟踪-微分器的输出与扩张状态观测器给出的状态估计之间的误差,进行非线性反馈,并结合扩张状态观测器对未知作用力估计的补偿量,一起组成非线性控制律。

3 异步电动机的自抗扰控制方案

由于异步电动机同步旋转坐标系中定子电压方程存在的非线性耦合作用,使得电动机定子电流的转矩分量与励磁分量相互影响,极大地影响系统的品质,使之成为一个高阶非线性系统。如果能采取某种控制策略抵消和估计出电动机内部耦合作用,就能达到解耦的目的。基于以上原因,本文利用自抗扰控制器对这一典型非线性系统进行控制。

3.1 被控对象模型^[5]

在坐标变换、矢量控制的基础上,将耦合项当作系统内扰,由扩张状态观测器估计出后,再给予补偿。则系统可重新描述为如下 3 个子系统:

1) 转子磁链子系统

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_{d2} = -\frac{1}{T_r} \Psi_{d2} + \frac{L_m}{T_r} k_2 \Psi_{d2} + \frac{L_m}{T_r \sigma} u_{d0} \\ u_{d0} = \frac{w_1(t)}{L_m / (T_r \sigma)} + u_{d1} \\ w_1(t) = \frac{L_m}{T_r} (-k_1 i_{d1} + i_{q1} \omega) \end{cases} \quad (7)$$

2) 转速子系统

$$\begin{cases} \dot{\omega} = k_3 \Psi_{d2} I_{q0} \\ I_{q0} = i_{q1} + \frac{w_2(t)}{k_3 \Psi_{d2}} \\ w_2(t) = -\frac{n_p}{J} T_L \end{cases} \quad (8)$$

3) q 轴定子电流子系统

$$\begin{cases} \dot{i}_{q1} = -k_1 i_{q1} + \frac{1}{\sigma} u_{q0} \\ u_{q0} = w_3(t) \sigma + u_{q1} \\ w_2 = -\frac{L_m}{\alpha_r} \Psi_{d2} \dot{\omega} - i_{d1} \omega \end{cases} \quad (9)$$

在上述3个子系统方程中： u_{d1} 和 u_{q1} 分别为定子侧d轴和q轴电压，是系统的控制输入； Ψ_{d2} 和 ω 分别为转子侧d轴磁链和异步电动机转子转速，是系统的被控量； i_{d1} 和 i_{q1} 为定子侧d轴和q轴电流。电机参数为

$$\begin{aligned} R_r &= 1.18 \Omega, & R_s &= 2.92 \Omega \\ L_r &= 0.285 \text{ H}, & L_s &= 0.285 \text{ H} \\ L_m &= 0.253 \text{ H}, & J &= 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ n_p &= 2, & n &= 1430 \text{ r/min} \\ T_r &= \frac{L_r}{R_r}, & \sigma &= L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \\ k_1 &= \frac{R L_m^2 + R L_r^2}{\alpha_r^2}, & k_2 &= \frac{R L_m}{\alpha_r^2}, & k_3 &= \frac{n_p^2 L_m}{J L_r} \end{aligned}$$

3.2 控制方案

由于自抗扰控制器具有对抗扰动的实时监测和补偿作用，从而能实现准确解耦。首先利用一个二阶自抗扰控制器来控制转子磁链系统；然后分别利用两个一阶自抗扰控制器来控制转速系统和q轴电流系统(见图2)。

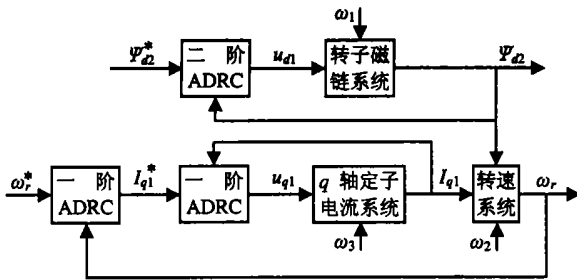


图2 带自抗扰控制器的异步电动机控制系统仿真实验采用的自抗扰控制器具体形式为：跟踪-微分器^[6]

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \text{fst}_2(x_1(k), x_2(k), v(k), r, h) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{fst}_2 = \begin{cases} -r \text{sign}(a), & |a| > \delta \\ -r \frac{a}{\delta}, & |a| \leq \delta \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta &= rh, & \delta_0 &= \delta h \\ y(k) &= x_1(k) - v(k) + h x_2(k) \\ a_0 &= \sqrt{\delta^2 + 8r |y(k)|} \\ a &= \begin{cases} x_2(k) + \frac{a_0 - \delta}{2} \text{sign}(y(k)), & |y(k)| > \delta \\ x_2(k) + h y(k), & |y(k)| \leq \delta \end{cases} \end{aligned}$$

h 为积分步长， r 为决定跟踪快慢的参数， fst_2 称为离散时间系统最优控制综合函数。

扩张状态观测器

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01} e(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02} \text{fal}(e(k), 1/2, \delta) + f_0(z_1(k), z_2(k)) + b_{ou}(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \beta_{03} \text{fal}(e(k), 1/4, \delta) \end{cases} \quad (12)$$

其中 β_{01} 、 β_{02} 和 β_{03} 为输出误差校正增益。

控制律

$$\begin{cases} e_1(k+1) = x_1(k+1) - z_1(k+1) \\ e_2(k+1) = x_2(k+1) - z_2(k+1) \\ u(k+1) = u_{00}(k+1) - \frac{z_3(k+1) + f_0(z_1(k+1), z_2(k+1))}{b_0} \\ u_{00}(k+1) = \beta_1 \text{fal}(e_1(k+1), \alpha_1, \delta_1) + \beta_2 \text{fal}(e_2(k+1), \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (13)$$

4 异步电动机转子磁链系统的控制器参数整定

在自抗扰控制器结构确定的情况下，其控制性能主要取决于参数的选取。虽然自抗扰控制器的鲁棒性很好(一旦选好参数，实际对象在一定范围内变化时，不会影响控制性能)，但如果没有参数的选取规则，则应用起来很不方便，这便限制了自抗扰控制器的应用与推广。为此，本文通过大量数值仿真，对自抗扰控制器参数整定问题进行系统研究，给出了如下整定原则，并结合异步电动机的控制问题进行讨论。

(1) 跟踪-微分器参数

跟踪-微分器参数整定比较简单，可以根据对

过渡过程的要求确定参数 r , r 越大安排的过渡过程越短。

(2) 控制器参数

由于扩张状态观测器对扰动的估计和补偿作用,在扰动幅值不很大,变化不很剧烈的情况下,完全可以实现精确补偿。所以可在假设扰动为零的情况下,对控制器的 β_1 和 β_2 进行初始值设定。其参数整定原则如下(假设扰动为零):

- 1) 根据 b_0 确定参数 β_1 和 β_2 的初始值, b_0 较大时, β_1 和 β_2 取较小值; b_0 较小时, β_1 和 β_2 取较大值。
- 2) 当 $b_0 = 100$ 时,可使 b_0 和 β_1 的乘积近似于 100; 当 $b_0 > 100$ 时,可使 b_0 和 β_1 的乘积近似为 2。
- 3) 当 $\beta_1 = 1$ 时, β_1 近似为 β_2 的 10 倍; 当 $\beta_1 < 1$ 时, β_1 近似为 β_2 的 1/10。

按上述规律可初步调整出较好的控制效果。这里只给出一种方法,参数大小的其他组合方式也能达到类似的效果。

要获得更好的控制性能,还应根据具体对象进一步调整。当然,在扰动幅值很大,变化很剧烈的情况下,扩张状态观测器不能完全实现精确补偿,还需对 β_1 和 β_2 进一步整定。

4) 适当增大参数 β_2 , 可以抑制过渡过程中出现的超调。

5) 适当增大参数 β_1 , 可以加快响应速度,缩短过渡过程。但是,对控制器参数的进一步整定只能在一定范围内改善控制性能,因而一般可作为微调使用。

(3) 扩张状态观测器参数

1) 首先确定参数范围,扰动幅值越大,相应的参数 β_{01} , β_{02} 和 β_{03} 也越大,尤其是 β_{03} 。

2) 对扰动估计滞后的大小主要取决于参数 β_{03} , β_{03} 越大滞后越小,但 β_{03} 过大会导致估计值振荡。适当增大 β_{01} 和 β_{02} , 能有效地抑制 β_{03} 过大引起的振荡。

3) 同理, β_{01} 和 β_{02} 过大会引起估计值发散。因此, β_{01} , β_{02} 和 β_{03} 要协调调整,在主要调整 β_{03} 的同时,适当协调调整 β_{01} 和 β_{02} , 不断改善估计效果。

(4) 参数整定

下面根据上述参数整定原则,对异步电动机转子磁链系统进行参数整定。

控制器参数整定: 在无扰动情况下,磁链子系统 $b_0 = 173.447$, 根据以上原则,选取 $\beta_1 = 0.01$, $\beta_2 = 0.1$, 给定的参考输出为 1。该组参数得到了较好的控制性能。

加入扰动(在启动过程中加入负载转矩 $10\text{N}\cdot\text{m}$)后,首先整定扩张状态观测器参数,以减小扰动对系统输出的影响。

由于该扰动幅值较大,所以初步确定 β_{01} , β_{02} 和 β_{03} 分别为 200, 200, 1 000。在 0~2 s 之间,估计值仍有较大滞后,对被控对象的响应输出产生了很大影响,如图 3 曲线 所示。

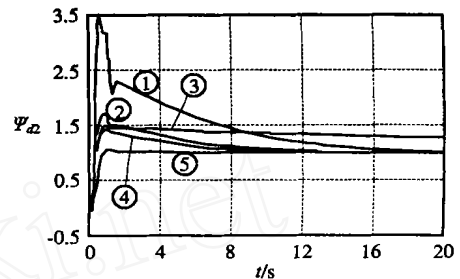


图3 转子磁链系统被控对象的输出响应

为了进一步改善控制性能,首先应提高扩张状态观测器对扰动估计的能力。针对估计值滞后较大,增大 β_{03} 为 2 000; 这与 β_{03} 为 1 000 相比,滞后大大减小了。但是由于对扰动跟踪速度的加快,实验中产生了很大的振荡。为了抑制振荡,改善对扰动的估计效果,增大 β_{01} 为 210, β_{02} 为 350。结果表明,振荡得到了明显抑制。此时被控对象的输出响应如图 3 曲线 所示。与图 3 曲线 比较,超调量大大减小,控制性能得到了显著改善。

由于扰动幅值较大,而被控对象给定值相对较小,扩张状态观测器很难对扰动实现精确补偿。在这种情况下,进一步对控制器参数进行调整,也可以改善扰动对控制性能的影响。

针对超调量较大,增大 β_2 为 0.8, 控制结果如图 3 曲线 所示。与图 3 曲线 比较,最大超调量减小了近 20%, 但由最大超调量回到稳态值的时间却延长了。

为了加快回到稳态值的速度,增加 β_1 到 0.08, 控制结果如图 3 曲线 所示。与图 3 曲线 比较,易见回到稳态值所需的时间大大缩短了。

当然,调整控制器参数一般只能在一定范围内改善控制性能(如本例所示)。如果对控制效果仍不满意,则需进一步整定扩张状态观测器参数,以提高对扰动估计的精度。

进一步调整扩张状态观测器参数为 $\beta_{01} = 220$, $\beta_{02} = 550$, $\beta_{03} = 5 000$, 控制器参数不变,控制结果如图 3 曲线 所示,被控对象输出基本与给定的参考输出重合。

5 转速系统和 q 轴定子电流系统的控制参数整定

转速系统和 q 轴定子电流系统均为一阶系统。一般而言,对于一阶系统,当扰动为零时,控制器参数 β_1 与 b_0 乘积近似为 10,其他参数与二阶系统相同。参数整定比较简单,不再赘述。

仿真实验结果如下:

转速系统的控制结果如图 4 所示; q 轴定子电流系统的控制结果如图 5 所示。由于扩张状态观测器对扰动进行了较为精确的估计,并予以补偿,使得闭环系统获得了快速稳定的跟踪性能。

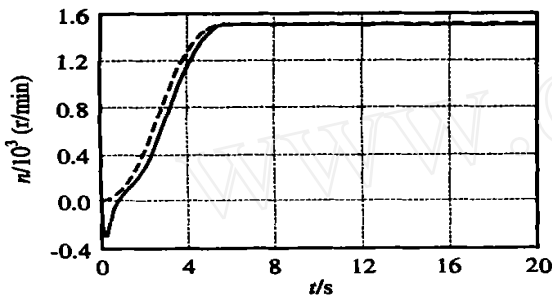


图 4 转速系统的控制结果

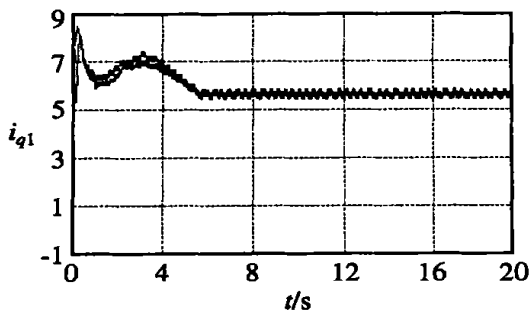


图 5 q 轴定子电流系统控制结果

6 结 论

仿真实验结果表明,自抗扰控制器对大而剧烈的扰动具有较好的适应性和鲁棒性,其非线性结构在对非线性系统的控制中取得了较好的控制性能。本文提出的自抗扰控制器参数整定原则,可以快速有效地针对控制性能进行控制器设计。此外,在本文工作的基础上,还可以利用扩张状态观测器估计出

被控对象的“时间尺度”^[7],针对不同被控对象得到不同“时间尺度”下的控制器参数,这对于自抗扰控制器的使用与推广具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 韩京清 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-32
(Han J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-32)
- [2] 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
(Han J Q. Nonlinear state error feedback control law—NLSEF[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(3): 221-225)
- [3] 韩京清, 王伟 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183
(Han J Q, Wang W. Nonlinear tracking-differentiator[J]. *J System Science and Math Sciences*, 1994, 14(2): 177-183)
- [4] 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
(Han J Q. The extended state observer of a class of uncertain systems[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 85-88)
- [5] 冯光, 黄立培, 朱东起 异步电机的新型非线性自抗扰控制器的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(3): 30-33
(Feng G, Huang L P, Zhu D Q. Nonlinear control algorithm for induction motors[J]. *J of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1999, 39(3): 30-33)
- [6] 韩京清, 袁露林 跟踪-微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(3): 268-273
(Han J Q, Yuan L L. The discrete form of tracking-differentiator[J]. *J of System Science and Math Sciences*, 1999, 19(3): 268-273)
- [7] 韩京清 一种新型控制器—NLPD[J]. 控制与决策, 1994, 9(6): 401-407.
(Han J Q. A new type of controller—NLPD[J]. *Control and Decision*, 1994, 9(6): 401-407.)

(上接第 526 页)

- [7] 杨节 轧制过程数学模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993 200-201.
- [8] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计[M]. 北京: 清华大学

- 出版社, 1996 163-165
- [9] 熊世和 机电系统计算机控制技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1993 123-126