

基于自适应 PID 的异步电机电流控制^{*}

孟庆硕, 许鸣珠, 李玲瑞

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 在异步电机矢量控制电流环中采用参数自适应 PID 算法。该算法采用带遗忘因子的递推最小二乘法对 PID 参数进行在线估计, 能够根据不同情况实时调整 PID 参数。试验结果表明, 该算法鲁棒性强、稳定性好、自适应性强、计算量小, 能够满足对电流控制的要求, 并且提高了速度的抗干扰能力。

关键词: 异步电机; 带遗忘因子的递推最小二乘法; 自适应 PID; 电流控制

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0039-05

Asynchronous Motor Current Control Based on Adaptive PID^{*}

MENG Qingshuo, XU Mingzhu, LI Lingrui

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

Abstract: Used parameters adaptive PID algorithm on the current loop of the asynchronous motor vector control. This algorithm adopts the recursive least square method with forgetting factor to estimate the PID parameters online. Can real-time adjust PID parameters according to different situations. The experimental results showed that this algorithm was good robustness, stability, strong adaptability, small amount of calculation and could meet the requirement of current control, and improve the anti-interference ability of the speed.

Key words: asynchronous motor; the recursive least square method with forgetting factor; adaptive PID; current control

0 引言

传统的异步电机采用双闭环矢量控制, 其电流采用 PI 控制, 在调速过程中经常出现不稳定现象, 对电流的控制效果往往欠佳。造成这一现象的主要原因是 PID 参数的整定不方便, 其整定结果严重影响控制效果, 甚至对控制系统的鲁棒性和稳定性都会产生影响。异步电机是一个多变量、强耦合、非线性的高阶时变系统^[1], 单一的 PID 参数无法适应工况环境的变化, 因此, 传统的 PID 不能实现自适应控制, 无法满足高性能的控制要求, 鲁棒性较差。

针对工业环境下被控对象特性的变化、漂移以及工况环境对控制系统的影响, 本文将自适应控制

与 PID 调节器相结合, 形成了自适应 PID 控制。基本思想是通过对被控对象参数进行在线辨识, 及时调整 PID 参数, 逐渐降低甚至消除外界干扰的影响。

自适应 PID 控制结合了自适应控制与传统 PID 调节器两方面的优点: 首先, 其能够自动辨识被控过程参数、自动整定控制器参数、自动适应被控过程参数变化; 其次, 其具有传统 PID 调节器结构简单、工作稳定、鲁棒性强、被现场工作人员和设计工程师们所熟悉等优点^[2]。

在自适应 PID 电流控制方面, 很多学者做了大量的研究, 提出了许多有效的电流控制方法, 其中主要包括采用人工神经网络、模糊控制、遗传算法构造自适应 PID 算法^[3-8]。这些算法实现过程比较复杂, 在实际应用中对硬件的要求高, 适用面

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11372198); 河北省教育厅科学技术重点项目(ZD20131098)

作者简介: 孟庆硕(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程。

许鸣珠(1967—), 女, 硕士生导师, 教授, 研究方向为控制理论与应用。

李玲瑞(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能检测技术与控制系统。

也较窄。本文采用了一种用带遗忘因子的递推最小二乘参数估计方法构造自适应 PID 控制器,来代替异步电机矢量控制中的 PI 电流控制器。该方法简单,计算量小,便于硬件实现,既能增强对电流的控制,还能够提高速度的自适应性和抗干扰能力;并且设计了硬件电路,在 DSP 控制平台上验证该算法的可靠性以及实用性。

1 电流环自适应 PID 控制器设计

在工业生产中大多数受控对象都是有自平衡能力的非振荡衰减过程^[9]。其传递函数可以用二阶惯性加滞后 $G(s)$ 来表示:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

PID 控制器传递函数可以用 $D(s)$ 表示:

$$D(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

则系统的闭环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)} = e^{-\tau s} \quad (3)$$

在已知 $G(s)$ 时,可以根据系统要求设计闭环传递函数 $G_c(s)$,则有:

$$D(s) = \frac{1}{G(s)} \cdot \frac{G_c(s)}{1 - G_c(s)} \quad (4)$$

将式(1)、式(3)代入式(4),对 $e^{-\tau s}$ 取一阶近似得到 $e^{-\tau s} = 1 - \tau s$,代入,进一步与式(2)对照可知:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{K\tau}; T_i = T_1 + T_2; T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$$

由此求 PID 的参数便转换成求受控对象的系统参数。将受控对象的传递函数 $G(s)$ 进行离散化处理。令 $\tau = LT$,取 $e^{\tau s} = z^{-1}$,并对 $G(s)$ 采用后向差分变换 $s = (1 - z^{-1})/T^{[10]}$,于是有:

$$G(z) = \frac{\theta_2 z^{-1}}{1 - \theta_0 z^{-1} - \theta_1 z^{-2}} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \theta_0 = \frac{T_i(T + 2T_d)}{TT_i + T_i T_d + T^2} \\ \theta_1 = -\frac{T_i T_d}{TT_i + T_i T_d + T^2} \\ \theta_2 = \frac{TT_i}{(TT_i + T_i T_d + T^2)K_p L} \end{cases}$$

式(5)则可以写成满足递推最小二乘估计的线性化模型如式(6):

$$y(t) = \theta_0 y(t-1) + \theta_1 y(t-2) + \theta_2 u(t-L) = (\theta_0, \theta_1, \theta_2) \begin{pmatrix} y(t-1) \\ y(t-2) \\ u(t-L) \end{pmatrix} \quad (6)$$

令 $\varphi^T(t) = [y(t-1) \ y(t-2) \ u(t-L)]$,得到采用带遗忘因子的递推最小二乘法进行参数估计的式(7):

$$\begin{cases} P(k) = [1 - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1)/\lambda \\ K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \\ \theta(k) = \theta(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\theta(k-1)] \end{cases} \quad (7)$$

得到估计值 $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_0 \ \hat{\theta}_1 \ \hat{\theta}_2]^T$ 。

因此,

$$\hat{K}_p = \frac{\hat{\theta}_0 + 2\hat{\theta}_1}{\hat{\theta}_2 L}; \hat{T}_i = \frac{(\hat{\theta}_0 + 2\hat{\theta}_1)T}{1 - \hat{\theta}_0 - \hat{\theta}_1}; \hat{T}_d = \frac{\hat{\theta}_1 T}{\hat{\theta}_0 + 2\hat{\theta}_1}$$

自适应 PID 控制器的结构原理如图 1 所示。其属于隐式自校正控制器,通过对系统过程中的电流偏差 $e(k)$ 、PID 输出 $u(k)$ 以及受控对象输出 $y(k)$ 进行不断的检测,并将结果作为递推最小二乘估计算法的输入,对 PID 的参数进行实时的校正。

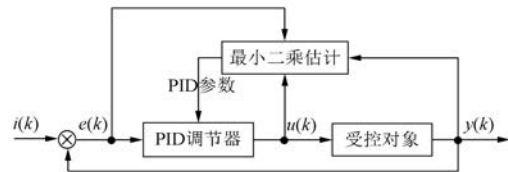


图1 自适应PID控制器原理图

2 试验系统设计

2.1 硬件设计

为了能够将自适应PID控制器算法数字化,应用到异步电机控制中,本文设计了以TMS320F2812为核心的异步电机控制器,其中包括控制电路,驱动电路,显示电路(包括键盘),检测电路,信号调制电路;并且空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)驱动信号通过高速光耦完全隔离高压与低压侧,保证驱动板不受高压干扰。控制器结构图如图2所示。

控制系统硬件通过键盘设定目标转速,通过

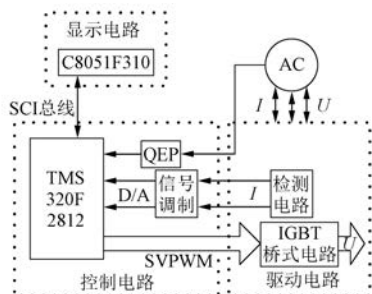


图2 控制器硬件结构图

速度PI控制器,转换成自适应PID的参考输入,并输送给DSP。利用DSP芯片自身的事件管理器计算PWM的占空比,通过定时器产生所需要的SVPWM信号,经过线性驱动后输出给IR2110驱动芯片。由驱动芯片将信号传给IGBT桥式电路,输出逆变信号给异步电机AC。利用由霍尔电流传感器构成的检测电路,将采样信号传输给DSP进行滤波、整形、A/D转换,作为电流环自适应PID控制器的反馈信号。电压信号采样通过测试母线电压,利用电压重构技术得到A、B、C相电压。正交编码脉冲电路(QEP模块)检测异步电机的转速,作为速度反馈,即实现了异步电机的双闭环控制。

2.2 软件设计

试验利用C语言编程,在CCS6.0开发平台进行实现,采用模块化编程的方法。主要包括主程序,事件管理器下溢中断程序,编码器测速中断程序,SCI中断程序,显示程序。程序流程图如图3所示。DSP系统时钟为150 MHz, PWM信号调制频率为15 kHz,信号采样频率 $f=15\text{ kHz}$,测速环节采用一阶低通滤波器,其截止频率为10 Hz。

3 试验结果及分析

试验用异步电机额定参数为: $P_n=250\text{ W}$, $U_n=36\text{ V}$, $I_n=9\text{ A}$, $\omega_n=1\,400\text{ r/min}$,极对数 $p=2$ 。

通过多次试验得到了一组传统PID的各参数: $K_p=0.6$, $K_i=0.005\,4$, $K_d=0$ 。在自适应PID控制器中,取遗忘因子 $\lambda=0.95$, $L=5$, $T=1/15\,000$ 。控制系统结构图如图4所示。

虽然存在M、T轴两个电流环,但无需两个自适应PID控制器,利用T轴数据进行参数估计,得到PID参数同时赋给M、T轴即可。在试验中

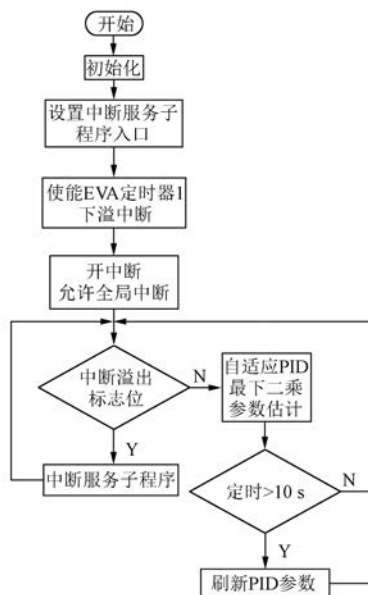


图3 程序流程图

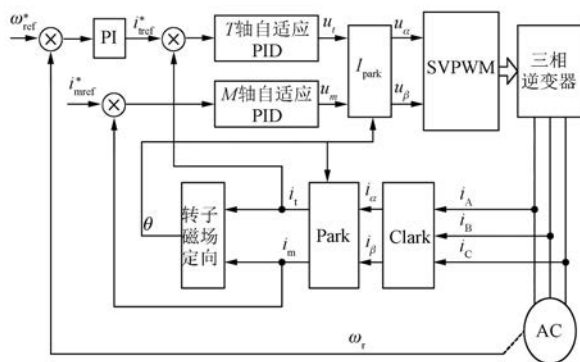


图4 控制系统结构图

选取电机转速、电流的合成矢量的标量值 $|I_s|$ 和M、T轴的自适应PID控制器的偏差量作为观察对象。

为了避免由于不合适的PID参数造成系统启动电流过大引起的系统报警,系统先采用开环启动,进而再进行闭环运行。在系统运行超过10 s后才对PID的参数进行更新,也是为了避免不稳定的校正值影响系统运行,所以速度曲线在开始时波动较大,在60 s时自适应PID控制器才开始对PID的参数进行校正。

对比图5和图6速度曲线可以看出,在低速时传统PID控制器与自适应PID控制器的控制效果差异不大;在升速和降速方面自适应PID控制器表现出更好的特性,由升速造成的超调更小;

在 1 400 r/min 时传统 PID 控制器出现了较大波动,而自适应 PID 控制器效果依旧良好,这是因为选取的单一 PID 参数无法满足所有速度段的需求。

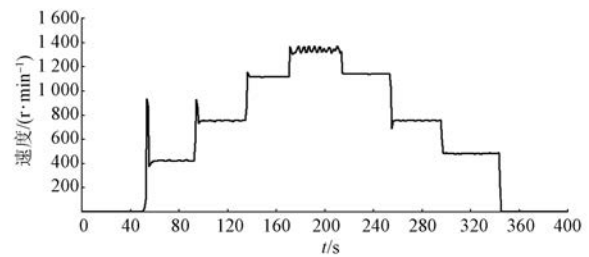


图 5 传统 PID 速度曲线

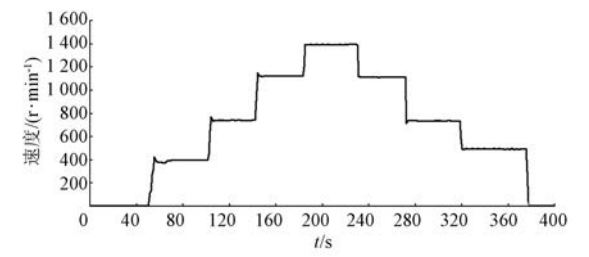


图 6 自适应 PID 速度曲线

对比图 7 与图 8 电流曲线可以看出,传统 PID 控制器对电流的控制较差,经常会出现大幅度的波动,而自适应 PID 控制器在同一速度下的波动可以控制在-0.1~0.1;在调速过程中电流的波动也较平缓。因此,完全满足对电流控制的要求。

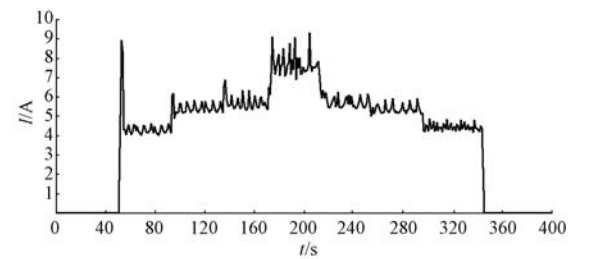


图 7 传统 PID 电流

对比图 9、图 10 和图 11、图 12,传统 PID 控制器 T 、 M 轴电流参考值与电流反馈值的偏差基本保持在-0.5~0.5 波动,有时甚至会更大;自适应 PID 控制器 T 、 M 轴电流参考值与电流反馈值的偏差基本上保持在-0.1~0.1;在高速和低速段偏差较小,表现出了更好的稳定性。

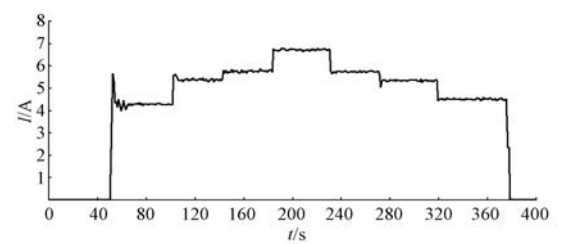


图 8 自适应 PID 电流

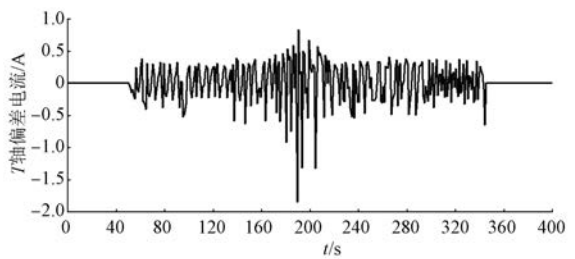


图 9 传统 PID T 轴偏差电流

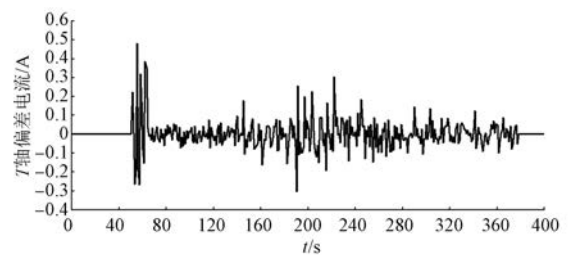


图 10 自适应 PID T 轴偏差电流

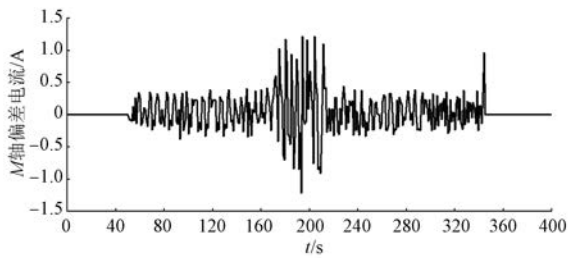


图 11 传统 PID M 轴偏差电流

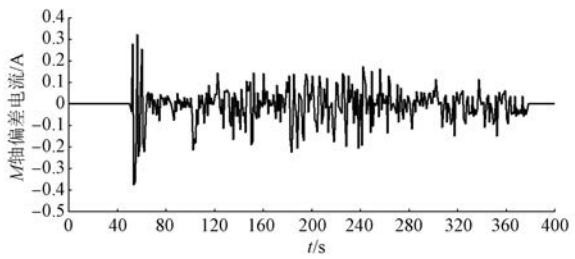


图 12 自适应 PID M 轴偏差电流

4 结 语

本文采用的带遗忘因子递推最小二乘法参数估计的方法对 PID 参数进行校正。在电流控制方面具有较好的鲁棒性和稳定性,能很快适应速度的变化,对 PID 参数进行调整,从而提高了速度的自适应性和抗干扰能力。该算法计算量小,结合 TMS320F2812 DSP 芯片运算速度快,可以与其他对电流有更高要求的高级算法结合使用,取得更好的效果,因此对此作深入的研究具有重要价值。

【参考文献】

- [1] 宋绍楼,丁永峰,范永锋.三相异步电机的模糊自适应 PID 控制系统[J].计算机系统应用,2012,12(7): 119-122.
- [2] 蒋新华.自适应 PID 控制(综述)[J].信息与控制,1988,17(5): 41-49.
- [3] 李玲瑞,许鸣珠,高旭东.基于自适应 PID 的永磁
- [4] 王瑞明,尤小军.鲁棒自适应 PID 控制的感应电机伺服系统[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(4): 107-112.
- [5] 张承进,程金路.高性能感应电机电流控制方法分析与比较[J].控制工程,2006,13(2): 97-101.
- [6] 付华,冯爱伟,徐耀松.基于自适应 PID 控制器的异步电机矢量控制[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1): 73-75.
- [7] 张典林.永磁同步电机智能 PID 控制[D].天津:天津大学,2007.
- [8] 国珍.改进遗传算法在无刷直流电机调速系统 PID 参数优化中的应用[J].组合机床与自动化加工技术,2013(7): 90-91.
- [9] 任勇.一种抗强干扰自适应 PID 控制算法[D].哈尔滨:黑龙江大学,2012.
- [10] 赵建华,沈永良.一种自适应 PID 控制算法[J].自动化学报,2001,27(3): 417-420.
- [11] 齐昕,周晓敏,马祥华,等.感应电机预测控制改进算法[J].电机与控制学报,2013,17(3): 62-69.
- [12] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [13] FNAIEC M A, BETIN F, NAHID B, et al. Control position of a faulted Six Phase Induction Machine (6PIM) using sliding mode control [C] // Electrotechnical Conference, 2008 Melecon 2008 the IEEE Mediterranean, IEEE, 2008: 502-507.
- [14] 侯利民,蔡柯,李勇,等.无速度传感器 PMSM 混沌运动的非奇异快速终端滑模控制[J].信息与控制,2016,45(6): 666-670.
- [15] 毛亮亮,周凯,王旭东.永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J].电机与控制学报,2016,20(4): 106-111.
- [16] 王建敏,董小萌,吴云洁.高超声速飞行器 RBF 神经网络滑模变结构控制[J].电机与控制学报,2016,20(5): 103-110.
- [17] 赵国荣,韩旭,胡正高,等.基于模糊滑模方法的双舵控制导弹制导控制一体化[J].控制与决策,2016(2): 267-272.
- [18] 赫广杰.矿用电机车滑模变结构直接转矩控制系统的研究[J].煤矿机电,2014(5): 41-43.

同步电机电流控制[J].微特电机,2016,44(10): 58-61.

- [19] 刘颖,周波,方斯琛.基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9): 80-85.
- [20] 郑泽东,李永东,肖曦,等.永磁同步电机负载转矩观测器[J].电工技术学报,2010,25(2): 30-36.
- [21] 李政,胡广大,崔家瑞,等.永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2014,34(3): 431-437.
- [22] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统:运动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [23] 王鑫,李铁鹰.基于改进灰色预测自校正 PID 控制的矿车直流调速系统设计[J].煤炭技术,2014,33(8): 178-181.
- [24] 缪仲翠,党建武,张鑫.基于励磁电流的感应电机速度滑模观测[J].控制工程,2016,23(11): 1719-1724.
- [25] 冯晓云.电力牵引交流传动及其控制系统[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [26] 宋雷鸣.动车组传动与控制[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [27] 郭世明.机车动车牵引交流传动技术[M].北京:机械工业出版社,2012.

收稿日期: 2017 -08 -29

(上接第 7 页)

- [19] 刘颖,周波,方斯琛.基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9): 80-85.
- [20] 郑泽东,李永东,肖曦,等.永磁同步电机负载转矩观测器[J].电工技术学报,2010,25(2): 30-36.
- [21] 李政,胡广大,崔家瑞,等.永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2014,34(3): 431-437.
- [22] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统:运动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [23] 王鑫,李铁鹰.基于改进灰色预测自校正 PID 控制的矿车直流调速系统设计[J].煤炭技术,2014,33(8): 178-181.
- [24] 缪仲翠,党建武,张鑫.基于励磁电流的感应电机速度滑模观测[J].控制工程,2016,23(11): 1719-1724.
- [25] 冯晓云.电力牵引交流传动及其控制系统[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [26] 宋雷鸣.动车组传动与控制[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [27] 郭世明.机车动车牵引交流传动技术[M].北京:机械工业出版社,2012.

收稿日期: 2017 -09 -27