

基于模糊自适应 PI 控制的无刷直流电机无级调速系统

李 聪, 尹文庆*, 冯学斌, 张 祎
(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

摘要:针对传统 PID 控制策略对电机转速控制响应速度慢、控制精度低,以及电机调速系统负载或参数变化时很难达到预期效果等问题,提出了新型模糊自适应 PI 控制策略,并对该策略在无刷直流电机调速系统中的应用进行了仿真研究;以 TI 公司的 TMS320F2812 为主控芯片,IR2136 为驱动芯片搭建了无刷直流电机无级调速系统的硬件平台。试验分析结果表明,模糊自适应 PI 控制策略能加快电机调速系统的响应速度,具有稳定性好、精度高、鲁棒性强等优点,并得到了良好的控制效果,具有较高的应用价值。

关键词:无刷直流电机;模糊自适应 PI 控制;数字信号处理器;无级调速系统

中图分类号: TH39;TH33;TP272

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)01-0049-04

Brushless DC motor stepless speed regulation system based on fuzzy adaptive PI controller

LI Cong, YIN Wen-qing, FENG Xue-bin, ZHANG Yi

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to solve the problems of slow response, low control precision of the motor speed control, and traditional PID control strategy is difficult to achieve the expected effect when load or parameters of the motor speed system change, a new fuzzy adaptive PI control strategy was investigated, also, the simulation was studied to this strategy in the applications of brushless DC motor speed control system. The TI company's TMS320F2812 was considered as the main control chip, and the IR2136 was taken as the drive chip to design the hardware platform on stepless speed regulation system of brushless DC motor. The experimental results show that the fuzzy adaptive PI control strategy can speed up the response speed of motor speed control system, and it has good stability, high precision, and strong robustness, so it gets a good control effect, has a high application value.

Key words: brushless DC motor;fuzzy adaptive PI controller;digital signal processor(DSP);stepless speed regulation system

0 引 言

无刷直流电机是随着电机技术的迅速发展而发展起来的新型直流电机,已经在机器人、电动车辆、医疗设备等很多领域取得了广泛的应用^[1]。20 世纪 70 年代,主要采用单片机通过简单的 PID 控制算法实现电机的转速控制,然而对于系统负载及参数的变化,传统

的 PID 控制策略已不能达到预期的效果。随着 DSP 的推出使电机转速在硬件上达到了很好的控制要求。对于高质量的调速系统,控制精度、稳定性和抗干扰能力是衡量系统性能的重要因素,因此其控制算法起着重要作用。模糊控制无需建立被控对象的数学模型,在偏离工作点区域可明显改善系统动态性能,对干扰有较强的抑制能力,鲁棒性好^[2]。

本研究对无刷直流电机的调速策略进行研究,针

收稿日期:2011-08-26

作者简介:李 聪(1987-),男,山东泰安人,主要从事机电一体化方面的研究。E-mail:licy_licy@126.com

通信联系人:尹文庆,男,教授,博士生导师。E-mail:yinwq@njau.edu.cn

对 PID 控制的缺陷,设计了模糊自适应 PI 控制器,它具有模糊控制的鲁棒性强、超调小、上升时间快、动态相应好的特点,又具有 PID 控制很好的动态跟踪品质和稳定精度的特点。

1 无刷直流电机数学模型

无刷直流电机系统主要由电机本体、位置传感器、控制器和电子开关线路 4 部分组成,电机本体主要包括定子和转子两部分^[3-4]。对于星形连接的三相无刷直流电机,在理想条件下,任何时刻只有两相定子绕组通电。当处于稳态时的电压平衡方程式为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & -M & 0 & 0 \\ 0 & L & -M & 0 \\ 0 & 0 & L & -M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_a, U_b, U_c —定子相绕组电压; e_a, e_b, e_c —定子相绕组反电动势; i_a, i_b, i_c —定子相绕组电流; R_a, R_b, R_c —定子相绕组电阻; L —定子相绕组自感; M —定子相绕组互感。

转速的表达式为:

$$n = \frac{u_s - iR}{2K_e} \quad (2)$$

式中: K_e —电机的反电势系数。

由式(2)可以看出,无刷直流电机的转速变换可以通过改变绕组上的平均电压 u_s 实现,本研究主要通过调节 PWM 信号的占空比来调节平均电压 u_s ,从而实现电机的调速功能。

无刷直流电机的电磁转矩是由于定子绕组的电流与转子产生的磁场相互作用:

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{w} \quad (3)$$

式中: w —电机的角速度。

从式(3)中可以看出电磁转矩的大小与磁通和电流成正比,只要控制方波电流的幅值就可以控制电机的电磁转矩。由于任何时刻定子绕组只有两相导通,电磁转矩可以表示为:

$$T_e = \frac{P_e}{w} = \frac{2E_s I_s}{w} \quad (4)$$

式中: T_e —电磁转矩, dw/dt —转子角加速度。

2 模糊自适应 PI 控制策略

2.1 控制系统结构

传统的无刷直流电机双闭环控制系统电流环与转速环均采用 PID 控制。算法简单,难以满足动态响应和高性能、高精度的要求。当被控对象参数发生改变或受非线性因素影响时,参数不能随之改变。因此,对双闭环控制系统进行了改善,转速外环采用参数自整定模糊 PI 控制,电流内环采用 PI 控制。其模糊自适应 PI 控制器结构如图 1 所示。转速误差与误差变化率作为模糊推理的输入,采用模糊推理对 PI 控制器参数 K_p, K_i 进行在线整定,满足系统对 PI 参数的实时要求,实现系统的精确控制。

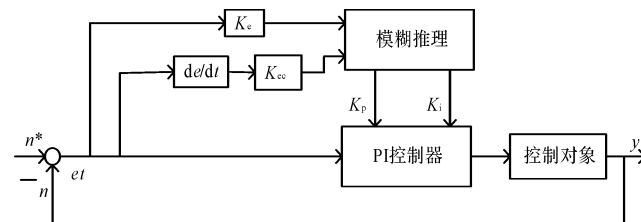


图 1 模糊自适应 PI 控制系统框图

模糊自适应 PI 控制器的核心就是找出 P、I 两个参数与 e 和 ec 之间的模糊关系^[5],由前人经验归纳出 K_p, K_i 的自整定规则:

- (1) 初始阶段, $|e|$ 较大,为了使响应速度加快,应取较大的 K_p 。同时为了避免系统出现较大的超调,应对积分作用加以限制,通常取 $K_i = 0$ 。
- (2) 当 $|e|$ 中等大小,即进入稳态的前一阶段,为了使系统超调量减小,并保证一定的响应速度,应取较小的 K_p, K_i 大小适中。
- (3) 系统进入稳态阶段, $|e|$ 较小,为了使系统具有良好的稳态性能,应增大 K_p 和 K_i 的值。

2.2 模糊控制器设计

该控制器为二维模糊控制器,输入变量为转速误差 e 及误差变化率 ec ,输出变量为 K_p, K_i 。输入量取 7 个模糊子集,输出量取 5 个模糊子集,隶属度函数形状都为三角形。 e 与 ec 的论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$; K_p, K_i 的论域为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。模糊语言:NL 为负大、NM 为负中、NS 为负小、ZE 为零、PS 为正小、PM 为正中、PL 为正大。根据经验总结 K_p, K_i 的模糊自适应 PI 控制规则如表 1、表 2 所示。

表 1 K_p 模糊控制规则表

K_p	ec 模糊量							
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	
e 模糊量	NL	PL	PL	PM	PS	PS	ZE	ZE
	NM	PL	PL	PM	PS	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	NS	ZE	NS	NM	NM	NM	NL
	PL	ZE	ZE	NM	NM	NM	NL	NL

表 2 K_i 模糊控制规则表

K_i	ec 模糊量							
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	
e 模糊量	NL	NL	NL	NM	NM	NS	ZE	ZE
	NM	NL	NL	NM	NM	NS	ZE	ZE
	NS	NL	NM	NM	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PL
	PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PL	PL
	PL	ZE	ZE	PM	PM	PM	PL	PL

根据模糊关系和输入变量 e 、 ec 的值进行推理合成输出 K_p 、 K_i 的语言变量,然后经过解模糊化将其转化为精确值。模糊推理采用 CRI(合成推理)Mandani 推理方法中的 max-min 合成法,根据模糊蕴含关系选择“极大与极小”运算,求得模糊输出值。解模糊采用加权平均法。为了使系统快速控制,本研究将控制规则离线转换为控制查询表,以便实现模糊控制器的实时控制^[6]。

2.3 系统换向模型

Simulink 仿真^[7]模型的建立主要是霍尔信号转化及换向模块,电机模块采用工具箱里面的电机模型。在此主要介绍电机换向模块。无刷直流电机驱动分为半桥和全桥驱动,本研究采用全桥驱动、两相导通三相六状态工作方式,在电机运行过程中,霍尔位置传感器不断检测电机当前位置,控制器根据当前位置信息来判断电子换向器的导通顺序^[8]。

当定子绕组的某一相通电时,该电流所产生的磁场与转子磁极所产生的磁场相互作用而产生转矩,驱动转子旋转。位置传感器将转子位置变换成电信号,

传送到 DSP,信号经过 DSP 处理后去控制电子开关线路,从而使定子各相绕组按一定次序导通,定子相电流随转子位置的变化而按一定的次序换相。电机正常运行时,霍尔传感器输出位置信号与功率开关管通断的对应关系图如图 2 所示(其中, H_1, H_2 和 H_3 分别表示霍尔位置传感器的信号; i_A, i_B, i_C 为三相绕组上的电流)。

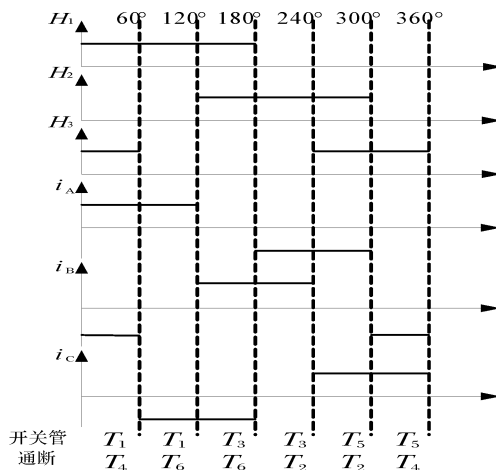


图 2 传感器信号与功率开关管通断关系图

由图 2 可知导通状态有 6 种形式,分别为 $T_1 T_4$, $T_1 T_6, T_3 T_6, T_3 T_2, T_5 T_2, T_5 T_4$ 。当霍尔传感器的位置信号位于 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时,此时开关管 $T_1 T_4$ 导通,电流经过 T_1 流向 A 相绕组,再流经 B 相线圈,经过 T_4 流向电源负极。当位于 $60^\circ \sim 120^\circ, 120^\circ \sim 180^\circ, 180^\circ \sim 240^\circ, 240^\circ \sim 300^\circ, 300^\circ \sim 360^\circ$ 时,分别对应开关管的 $T_1 T_6, T_3 T_6, T_3 T_2, T_5 T_2, T_5 T_4$ 导通。根据传感器信号与开关管通断关系设计出仿真模型如图 3 所示。

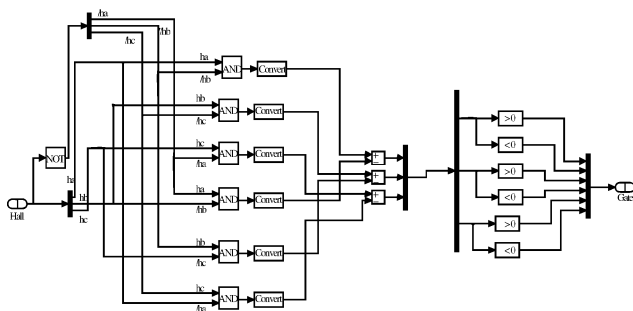


图 3 传感器信号与功率开关管通断仿真模型

3 无级调速控制系统硬件设计

在该控制系统中,笔者以 TI 公司的 TMS320F2812 作为控制电路的主控芯片,采用 IR2136 逆变器的驱动控制芯片。无刷直流电机参数:电压 24 V,电流 4 A,功率 100 W,扭矩 0.4 N·m,额定转速 2 500 r·min⁻¹。

无刷直流电机无级调速系统的总体结构框图如图 4 所示。

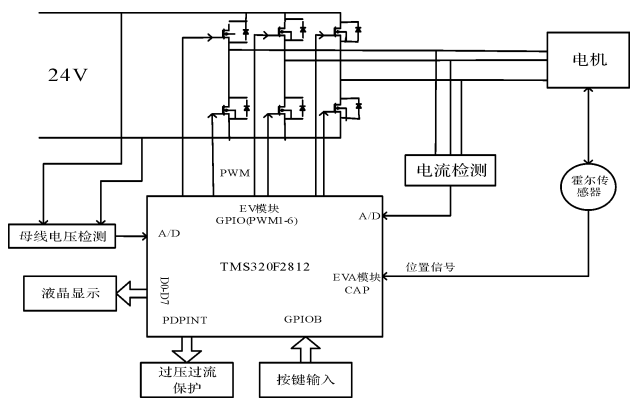


图 4 无刷直流电机无级调速系统框图

DSP 输出的 PWM 波形不能直接驱动大功率 MOSFET,所以要在 DSP 和 MOSFET 之间建立驱动电路,采用 IR2136S 驱动芯片驱动 MOSFET,具有集成度高、6 路驱动、偏置电压最大 600 V、过流关断、欠压封锁功能; TMS320F2812 输出的 PWM 信号经过 IR2132S 控制 IGBT 的通断,进而控制电机的转动。定子电流检测主要是过流检测,由于电流比较小,采用串电阻检测方法。小电阻分压经过滤波放大后经过隔离送入 DSP 的模数转换器 A/D 进行采样检测获得电流的大小。在闭环调速系统中,位置传感器是一个不可缺少的重要组成部分。三相霍尔信号通过光耦送往 DSP 的捕获单元。由于传感器输出信号带有干扰信号,在送入 DSP 之前通过施密特反相器反向滤波。本研究设计了按键和显示电路,通过 2×2 矩阵按键达到开始、停止、加速、减速功能,并通过 12864 液晶屏实时显示当前转速,液晶屏用 ST7920 控制芯片控制。通过液晶的实时显示来获得给定的稳定转速。

4 试验结果及分析

本研究分别对常规 PID 控制与模糊 PI 控制建立的仿真模型进行仿真,设定转速为 2 000 r/min。采样时间为 0.2 s,设定在 0.1 s 突加 0.3 N·m 的负载转矩。其仿真波形比较如图 5、图 6 所示。

从图 6 可以看出在设定转速为 2 000 r/min 的情况下,系统响应比普通 PID 控制快,而且转速平稳,没有太大的波动。在 0.1 s 时突加 0.3 N·m 的负载转矩,转速突降,但能在 0.115 s 迅速恢复到平稳状态,超调小,运行时无静差。普通 PID 控制在 0.1 s 转速迅速降低,恢复时间慢,到 0.14 s 才进入稳定状态。仿真结果证明了模糊自适应 PI 控制方法的可靠性。

通过对系统软硬件的设计,本研究搭建了试验系

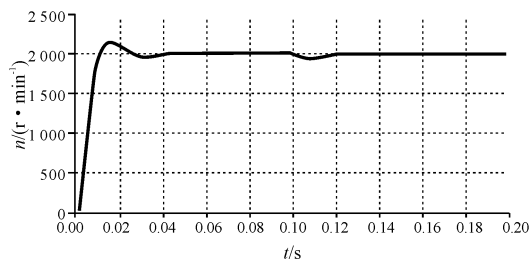


图 5 常规 PID 控制转速响应曲线

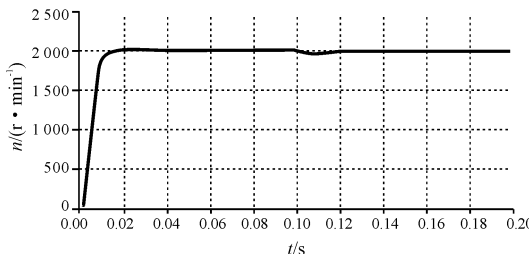


图 6 模糊自适应 PI 控制转速响应曲线

统,进行了调速系统试验, CCS 软件测得转速波形如图 7 所示。

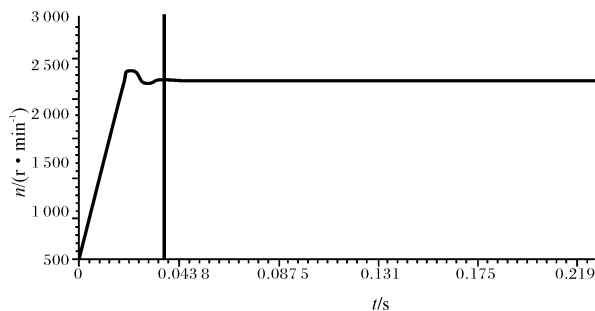


图 7 实测系统转速波形

从图 7 可以看出在开始时速度有起伏波动,然而在 0.037 5 s 时转速达到 2 200 r/min,迅速进入稳定状态。试验结果验证了系统的可靠性。

5 结束语

本研究设计了一种基于模糊自适应 PI 控制的无刷直流电机无级调速系统,转速环采用模糊 PI 控制,电流环采用 PID 控制。通过与传统的 PID 控制方法比较及平台搭建试验,可以明显地看出该控制方法在控制精度、稳定性和抗干扰方面都有很好的改善。模糊推理对 PID 参数进行在线自整定,针对不同的被控对象,对相应的参变量作适当的修改,即可使系统满足稳定性和灵活性要求。软件仿真和硬件设计试验结果验证了模糊自适应 PI 控制方法比常规 PID 控制更优越,响应速度快,稳定性好,精度高,具有很好的应用价值。

(下转第 73 页)

5 为未加入电流校正环节时检测,图 6 为加入电流校正环节后检测),可以看出,在越高的输入频率下,控制信号和电流信号之间的幅值衰减和相位滞后越明显。

电流控制模块的幅频特性和相频特性如图 7 所示。

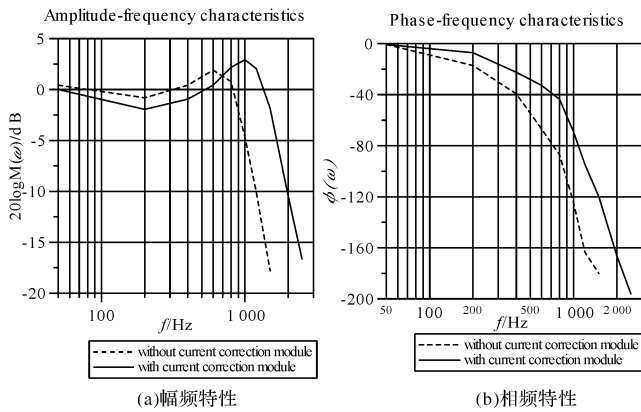


图 7 电流控制模块相频特性图

控制器通过角位移传感器能够直接读出转子的绝对角位置值 θ ,并通过专门的仿真软件将控制信号和电机转子角度保存在工控机中。转子角度 θ 的波形如图 8 所示。

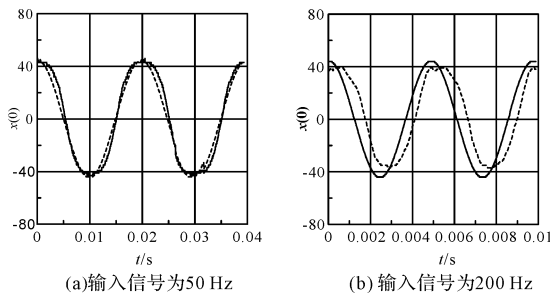


图 8 转子角度波形

4 结束语

本研究中选用的直流伺服电机是数字伺服阀的动力执行机构,利用文中介绍的控制系统对电机进行位置控制和电流控制,能够使其实现精确定位和更快速响应控制。实验结果表明加入校正模块后电流环的频响能从 600 Hz 达到 1 000 Hz,相位滞后小于 65°。控制系统在 200 Hz 的输入信号下,转子能对输入信号进行实时跟踪,幅值衰减为 -0.5 dB,相位滞后为 -30°。本研究的实验结论为进一步提高数字伺服阀的频响研究打下基础。

参考文献 (References):

[1] 沈建新,方宗喜. 现代电机发展方向与关键技术[J]. 微特电机,2008,38(6):55-56.
 [2] 阮健,李胜,裴翔,等. 数字阀的分级控制及非线性[J]. 机械工程学报,2005,41(11):91-97.
 [3] 蔡卓剑,赵荣祥,程方斌. 电机转速和转子位置数字测量方法的研究[J]. 电气传动,2007,37(8):12-14.
 [4] 梅晓榕,庄显义. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2002.
 [5] 郑舒. PWM 驱动电机的电流环设计[J]. 华东地质学院学报,2002,25(2):571-572.
 [6] FAN Qi-fu, SHI Song-jiao. On the well-posedness of the PWM control system[J]. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, 2006,5(1):105-110.
 [7] RUAN Jian, BURTON R. A new approach of direct digital control for spool valves[J]. *ASME, The Fluid Power and Systems Technology Division*, 2002, 9(6):146-147.
 [8] 阮健. 电液(气)直接数字控制技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2000.

[编辑:张翔]

(上接第 52 页)

参考文献 (References):

[1] 于硕君. 无刷直流电机调速控制系统[D]. 沈阳:沈阳大学信息工程学院,2011.
 [2] WANG L B, LI H, SUN Y K F. Fuzzy Control Based on Self-adjusted Parameter for Brushless DC Motor[C]//International Conference on Mechatronics and Automation, 2007: 2352-2356.
 [3] 左旭坤. 基于 DSP 的无刷直流电机伺服调速控制系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学电气与自动化工程学院,2006.
 [4] YU J S. Wavelet Neural Networks in Nonlinear System Mod-

eling and Motor Drives[D]. USA: University of South Carolina, 2005.

[5] 刘鼎. 基于 DSP 的永磁无刷直流电机模糊控制系统的研究与实现[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2010.
 [6] 张文栋. 基于 DSP 的无刷直流电机智能控制器的研究与设计[D]. 南京:河海大学电气工程学院,2007.
 [7] 宋受俊,刘景林. 无刷直流电机建模及其现代化调速方法的仿真[J]. 微特电机,2004(9):21-24.
 [8] 付磊. 基于 DSP 的无刷直流电机模糊控制系统设计和仿真研究[D]. 南昌:南昌大学信息与工程学院,2008.

[编辑:张翔]