

基于自适应模糊 PID 无刷直流电机控制研究

蒋旭益 王立标

(台州学院机械工程学院,台州 318000)

摘要 无刷直流电机具有高度的非线性特性。为了提高电机转速控制的稳态和动态特性,设计了无刷直流电机自适应模糊 PID 控制系统,并在 MATLAB/Simulink 平台上与传统 PID 控制系统进行了对比仿真实验。仿真结果表明:在突变负载干扰下该控制方法能有效提高转速的响应能力,降低了转速超调量和转矩脉动,大大增强了系统的鲁棒性。

关键词 无刷直流电机 自适应模糊 PID 鲁棒性

中图法分类号 TM383.41; **文献标志码** A

无刷直流电机(Brushless DC Motors, BLDCM)因其具有简单的结构,良好的调速性能,大转矩等特点,在工业中得到了广泛的应用^[1]。但是由于无刷直流电机具有高度的非线性系统,使得 PID 控制器很难提高系统的动态特性。本文将模糊控制与传统 PID 控制相结合,设计了一种自适应模糊 PID 无刷直流电机控制系统,提高了系统的鲁棒性。

1 无刷直流电机模型

忽略电机的齿槽效应、略磁路饱和电枢反应,无刷直流电机的等效电路如图 1 所示^[2]。

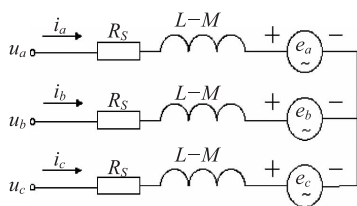


图1 无刷直流电机等效电路图

无刷直流电机电压平衡方程式如下表示:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: u_a, u_b, u_c 分别为三相绕组相电压; i_a, i_b, i_c 分别为三相绕组相电流; e_a, e_b, e_c 分别为三相绕组相反电动势; L 为三相绕组的自感; M 为三相绕组的互感。由于在任意时刻 BLDCM 的电磁功率为三相绕组电磁功率的和,故 BLDCM 的电磁转矩方程可表示如式(2)。

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega} \quad (2)$$

式(2)中: ω 为电机的角速度。

无刷直流电机的运动方程表示如下:

$$T_e = T_L + F\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式(3)中: T_L 为电机的负载转矩; F 为黏滞摩擦系数; J 为电机的转动惯量。

2 自适应模糊 PID 控制器的设计

2.1 自适应 PID 模块设计

BLDCM 的自适应模糊-PID 控制系统的结构原

理图如图 2 所示,根据系统响应情况,以转速偏差 E 和偏差变化率 EC 作为输入,利用模糊控制规则进行模糊推理和模糊决策,在线对 PID 参数进行调整。

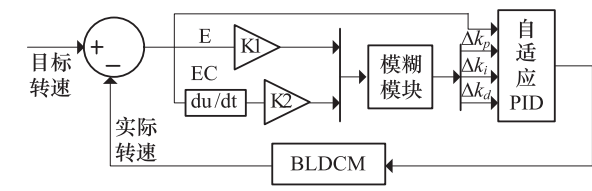


图 2 BLDCM 自适应模糊 PID 控制结构

运行中模糊模块不断检测偏差 E 和偏差变化率 EC ,根据模糊控制原理对 PID 参数进行在线修改,公式如下:

$$k_p = k_{p0} + \Delta k_p g_1 \tag{2}$$

$$k_i = k_{i0} + \Delta k_i g_2 \tag{3}$$

$$k_d = k_{d0} + \Delta k_d g_3 \tag{4}$$

式中, k_{p0} , k_{i0} , k_{d0} 分别是在不同状态下用常规 PID 参数整定法得到的初值,而 Δk_p , Δk_i , Δk_d 为模糊控制器的 3 个输出,可根据被控对象的状态自动调整 k_p , k_i , k_d 的值, g_1 , g_2 , g_3 为 Δk_p , Δk_i , Δk_d 输出的比例因子,从而实现 PID 控制参数的自适应调整。

2.2 语言变量及隶属度函数的确定

采用两输入三输出的形式,转速偏差 E 和转速偏差的变化率 EC 为模糊输入量,对应的模糊输出量比例、积分、微分作用对应的变化量 Δk_p , Δk_i , Δk_d 作为输出语言变量。将输入变量和输出变量的模糊语言集全部定义为: {NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}。

其中,PB 代表正大,PM 代表正中,PS 代表正小,ZO 代表零,NS 代表负小,NM 代表负中,NB 代表负大。输入变量、输出变量的模糊子集论域为: { -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6 }。

隶属度函数中间采用分辨率极强的三角型函数,边缘采用高斯型函数,如图 3—图 4。

2.3 模糊控制规则的建立

PID 参数的调整必须考虑 3 个参数的作用以及相互关系。一般情况下,在不同的偏差和偏差变化率 EC 下,被控过程对 k_p , k_i , k_d 的要求可总结成以下规律^[3]。

(1) 当偏差与偏差变化率同号时,被控量是朝

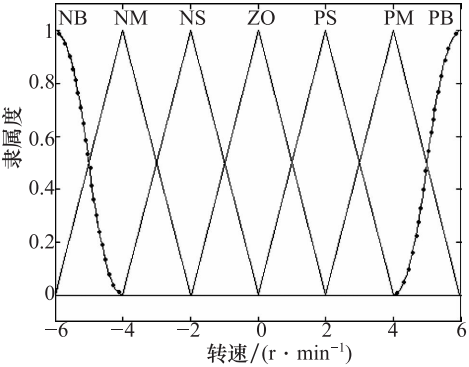


图 3 输入 E 和 EC 的隶属度函数

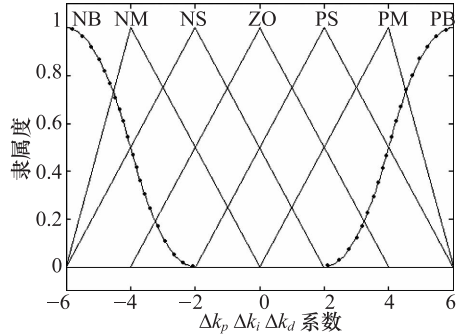


图 4 输出比例积分微分的隶属度函数

偏离既定值方向变化, k_p 值取大值;在偏差比较大时,偏差变化率与偏差异号时, k_p 值取小值,以加快控制的动态过程。

(2) 偏差变化率的大小表明偏差变化的速率, EC 越大, k_p 取值越小, k_i 取值越大,反之亦然。同时,要结合偏差大小来考虑。

(3) 微分作用可改善系统的动态特性,阻止偏差的变化,有助于减小超调量,消除振荡,缩短调节时间,允许加大 k_d ,使系统稳态误差减小,提高控制精度,达到满意的控制效果。所以,在 E 比较大时, k_d 取零,实际为 PI 控制;在 E 比较小时, k_d 取正值,实行 PID 控制。

2.4 模糊推理和去模糊化

模糊推理由条件聚合、推理和累加三部分组成。模糊推理首先计算控制率中每条规则条件的满足程度,然后依据条件的满足程度推断单一规则输出的大小,最后将所有规则的输出累加,得到总的模糊输出。本文选用 Mamdani 型推理^[4],该方法

是目前最常用且比较简便的一种推理方法。模糊推理完成后,采用重心法求取精确控制值。

输出的精确控制值 u 可以表示为:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_i y_i}{\sum_{i=1}^k \mu_i} \tag{5}$$

式(5)中 μ_i —为第 i 个模糊输出量的隶属度;
 y_i —为第 i 个模糊输出量的单点位置;
 k —为模糊输出个数。

3 仿真实验研究

为验证上述控制方法的有效性,在 Matlab / Simulink 平台上建立无刷直流电机模型以及本文提出的基于自适应模糊 PID 控制系统,对图 2 所示 BLDCM 控制系统进行了仿真研究。

图 5、图 6 为样机在额定转速 3 000 r/min 下, 0.01 s 时加入负载转矩 0.3 N · m 干扰时与传统 PID 控制器的对比曲线。从图中可知,在自适应模糊 PID 控制下,转速响应速度快、无超调,突加转矩干扰时,转速过度平滑,转矩波动较小,系统具有较强的鲁棒性。

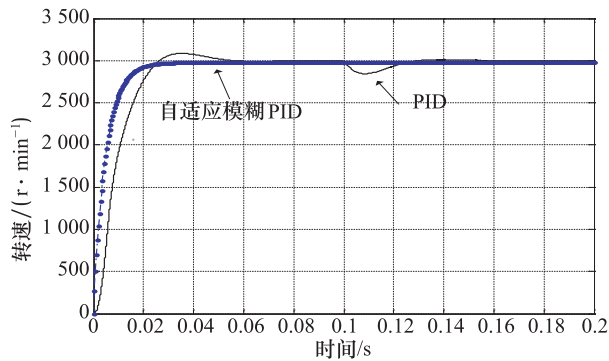


图 5 电机转速对比曲线

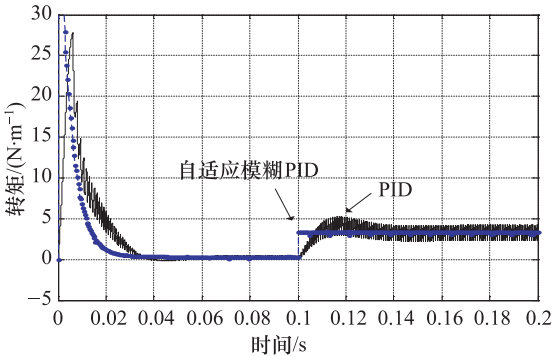


图 6 电机电磁转矩对比曲线

4 结论

基于自适应模糊 PID 无刷直流电机控制系统与传统 PID 控制系统的曲线对比,有效提高了电机转速的响应能力,降低了超调量。在突变负载转矩干扰时,电机的电磁转矩响应快、脉动小,大大提高了系统的鲁棒性。

参 考 文 献

- 1 夏长亮,李志强,王迎发. 无刷直流电机小脑模型网络与 PID 复合控制. 电机与控制学报,2008;12(3):254—259
- 2 张 强,吴红星,谢宗武. 基于单片机的电动机控制技术. 北京: 中国电力出版社,2008;297—299
- 3 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京: 电子工业出版社,2004
- 4 张国良,邓方林. 模糊控制及其 MATLAB 应用. 西安: 西安交通大学出版社,2002

Research on Brushless DC Motors Based on Self-adaptive Fuzzy PID Control

JIANG Xu-yi, WANG Li-biao

(Faculty of Mechanical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, P. R. China)

[**Abstract**] In order to improve the control motor speed of steady state and dynamic characteristics because of brushless DC motor has highly nonlinear characteristics, a self-adaptive Fuzzy-PID control for the brushless DC motor is design, and with traditional PID control compared by simulink simulation of MATLAB/Simulink platform. The results show that self-adaptive Fuzzy-PID control improve the speed of response ability, reduce the overshoot and torque ripple, which has high robustness.

[**Key words**] brushless DC motors self-adaptive fuzzy PID robustness



(上接第 6719 页)

试验三:观察运行过程中的液位变化与蒸发量变化关系。蒸发量由 19 t/h 降至 12 t/h 时,液位波动 18 mm ~ 62 mm,波动量小于 ± 28 mm。正常情况下蒸发量波动 3 t/h 左右,液位波动 25 mm—48 mm。波动量小于 ± 13 mm。

6 结束语

本项目旨在“花最少的钱,办最大的事”。利用

现有设备,开发设备潜在能力,节约资金。改造后至今已运行 5 个月,运行稳定,可以克服原控制方式的诸多不利影响。保证了锅炉的稳定运行,创造了长期的经济效益。

参 考 文 献

1 蒋思敬,姚士春. 压力计量. 北京:中国计量出版社. 1991

2 王 森. 仪表常用数据手册. 北京:化学工业出版社. 1998

The Reason and Solution of Boiler Steam Drum Water Fluctuation

LIU Ya-kun

(CERI Yingkou Equipment Development and Manufacturing Co. , Ltd, Yingkou 115004, P. R. China)

[**Abstract**] CERI Yingkou Equipment Development and Manufacturing Co. , Ltd boiler factory supply steam for manufacture. The boiler factory has 4 boilers now, 3 of them are made in China, they has some problems at steam drum water fluctuation. Sometimes its cause the boiler emergency stop. The essay discuss one of the solution that use the existing equipment. The solution only adjust some parameter of automatic system and change some process engineering . Using this solution not only save the money but insure the boiler steady running. Long time economic benefits is gained.

[**Key words**] boiler water level regulating valve PID control