

机电技术

基于模糊 PID 模型的无刷直流电机转速控制

徐伟 屈百达* 徐保国

(江南大学,无锡 214122)

摘要 无刷直流电机(BLDCM)是一种多变量、强耦合、非线性、时变的复杂控制系统,采用传统的PID控制很难实现无静差控制。针对无刷直流电机(BLDCM)提出了一种基于PID模型的转速控制方案,利用无刷直流电机的电压与转矩转速方程,通过调节PID参数来实现转速控制。采用模糊原理对PID参数进行模糊化,根据电机参数的变化,对PID参数进行在线调整,取得了高精度的转速控制。仿真和实验结果表明,采用模糊PID控制方法控制无刷直流电机,能够实现响应速度快、无超调、控制精度高;且系统对于干扰和参数变化具有较强的鲁棒性,动、静态性能均优于传统的PID控制和单纯的模糊控制。

关键词 无刷直流电机 模糊PID Matlab/Simulink 仿真 模糊控制

中图分类号 TM571; **文献标志码** A

无刷直流电机是永磁电机的一种,是伴随着微电子器件和电力电子器件的研究而出现的。对它的研究其实可以看作是对电机控制系统的研究,无刷电机的换向是通过外部的电子电路实现的。没有了电刷与换向器的接触就减少了电火花的产生,也大大降低了电机损耗和噪音,目前已经在许多高要求的电力驱动中得到了越来越广泛的应用。永磁无刷直流电机调速系统是一个非线性、多变量、时变系统^[1,2],参数整定困难,一组整定好的参数只能在较小的范围内有较好的控制效果,当参数变化超过一定范围时,系统控制效果变差,致使常规PID控制难以满足要求^[3,4]。

虽然将现代控制理论的一些新成果包括基于线性调节器的极点配置和最优控制、精确反馈线性化、模型参考自适应控制等引入电机控制技术中,有效地提高了无刷直流电机的运行性能,但是现代控制理论依然依赖于电机精确的数学模型,

系统性能易受电机参数变化及各种不确定性因素的影响^[5,6]。自从1965年美国加利福尼亚大学控制论专家Zadeh提出模糊数学以来,其理论和方法日臻完善,短短的几十年里,模糊控制(Fuzzy Control)广泛地应用于自然科学和社会科学和工程控制领域^[2,4]。模糊逻辑具有类似于人脑的自然语言表达能力,非常适合于描述复杂非线性系统。模糊控制不依赖于被控对象的精确数学模型^[5],能够克服非线性因素的影响,对调节对象的参数变化具有较强的鲁棒性^[4],但模糊规则的总结和模糊隶属度函数的调节主要依靠经验,有较大的主观性。单纯的模糊控制存在一定的稳定误差,稳态精度低^[3,6]。

本文提出一种基于模糊自适应PID模型的无刷直流电机速度控制系统。该模型将给定转速和实际转速之间的偏差及其偏差变化率作为模糊控制推理机的输入参量,通过模糊原理,对PID参数进行在线自适应调整,并在MATLAB中对控制系统进行仿真实验。仿真结果表明,该控制系统响应快、超调量小、鲁棒性强,动态特性明显优于传统PID控制和单纯的模糊控制。

2010年7月1日收到 国家自然科学基金项目(30971689)资助
第一作者简介:徐伟(1985—),女,山东临沂人,硕士研究生。研究方向:领域为无刷直流电机智能控制。

*通信作者简介:屈百达,(1956—),男,辽宁北镇人,博士,教授,硕士生导师。研究方向:现代控制技术与应用、模式识别和数据处理。

1 无刷直流电机数学模型

无刷直流电机具有矩形电流波形,梯形反电动势。定子和转子的互感是非线性的。因此,在分析和仿真 BLDCM 控制系统时,为简化仿真模型的建立,作以下的假设:三相绕组完全对称,气隙磁场为方波,定子电流、转子磁场分布皆对称;忽略齿槽效应、换相过程和电枢反映等影响;磁路不饱和、不计涡流和磁滞损耗。

BLDCM 的电压平衡方程^[3]

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

式中 u_a, u_b, u_c 为电机三相绕组的相电压; i_a, i_b, i_c 为电机三相绕组的相电流; e_a, e_b, e_c 为电机三相绕组的相反电动势; R, L, M 为三相绕组的相电阻,相自感和相间互感;

BLDCM 的电磁转矩方程

$$T_{em} = P_n(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_m$$

式中 ω_m 电机为机械角速度, P_n 为极对数; T_e 为电磁转矩^[4]。

电机的运动方程

$$T_e - T_L - B_\omega = J(d\omega/dt)$$

式中 T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, B 为阻尼系数, J 为转动惯量, ω 为电机机械角速度。

2 模糊自适应控制系统设计

无刷直流电机模糊 PID 控制系统结构图如图 1 所示。首先计算出电机实际转速 n 和给定转速 n_r 的偏差 e 和偏差变化率 e_c , 然后将它们模糊化, 模糊化后的 E 和 EC 由模糊控制规则推理, 解模糊后得到 k_p, k_i 和 k_d 。在控制过程中, 在线实时修改常规 PID 控制器的参数, 最后由常规的 PID 控制器调节

无刷直流电机转速。

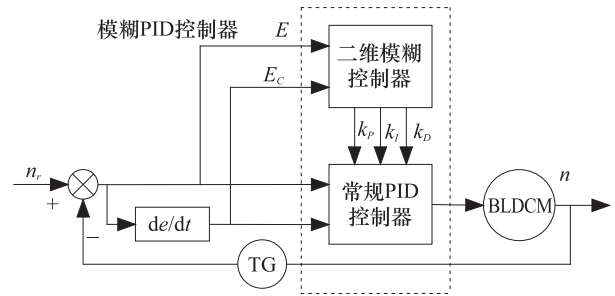


图 1 BLDCM 模糊 PID 控制系统结构图

模糊自适应 PID 控制系统的设计步骤如下: 控制器的输入变量取实际转速和给定转速的误差 e 和误差的变化率 e_c , 输出变量取经过调整后的 PID 参数 k_p, k_i, k_d 。论域为 $[-6, 6]$, 模糊语言变量选择 7 个: NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB。解模糊的方法采用重心法, 即加权平均法。

隶属度函数采用三角形函数分布。对 k_p, k_i, k_d 分别进行整定, 三者的模糊控制规则如表 1, 2, 3 所示。

表 1 K_p 的模糊控制规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	NS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 K_i 的模糊控制规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 的模糊控制规则表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	NS
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PM	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PM	PS	PB

根据无刷直流电机转速的控制特点,归纳出 K_p 、 K_i 和 K_d 的模糊控制规则,经过模糊推理推导出其内在的模糊关系,根据模糊关系和输入变量 E 、 EC 的情况推理合成得到输出 K_p 、 K_i 和 K_d 的语言变量,然后经过解模糊化操作将其转换为执行机构能够接受的精确转速值。

模糊推理采用 CRI(合成推理)的 Mandani 推理方法中的 max-min 合成法,即推理时,根据模糊蕴涵的关系,选择模糊算子 min 和 max,选择“极大与极小”运算作为合成运算,求出模糊输出值^[5]。解模糊采用加权平均法。为了实现实时控制,满足系统控制的快速性要求,本文采用离线计算形式,即把模糊控制规则离线转换为控制查询表,将推理过程简化为查表运算,通过查表很方便地实现模糊控制器的实时控制,提高系统的响应速度。

3 仿真结果

在 Matlab/Simulink 软件平台上建立系统仿真试验,系统参数为:额定功率为 3 kW;额定电压为 220 V;额定电流为 13.64 A;额定转矩为 22 N·m;额定转速为 1 460 r/min;转动惯量为 0.57 kg·m²;每相电阻为 0.21Ω;每相电感为 0.21 mH。仿真控制如图 2 所示。通过以上方法、采用以上参数设计的模糊 PID 控制在参数扰动和干扰输入情况下进行仿真试验,同时与传统的 PID 控制在同等参数下的仿真试验进行比较。仿真曲线如图 3、图 4、图 5 所示。

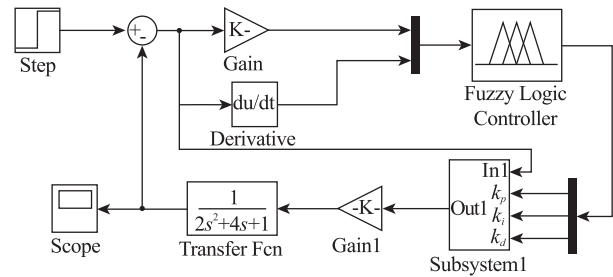


图 2 模糊 PID 控制系统仿真框图

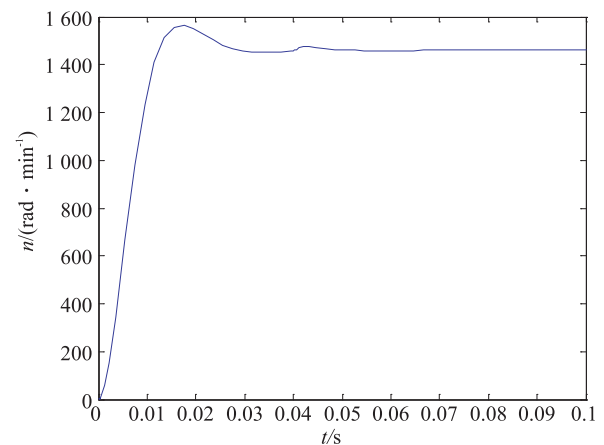


图 3 常规 PID 控制器转速仿真曲线

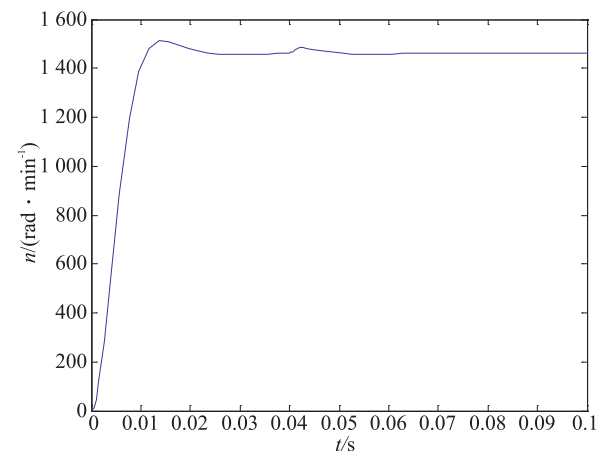


图 4 模糊控制器转速仿真曲线

表 4 三种控制器的性能参数表

三种控制器	超调量 $\delta/\%$	调节时间 t_s/s
常规 PID 控制器	9.85	0.029
模糊控制器	4.45	0.023
模糊 PID 控制器	0	0.011

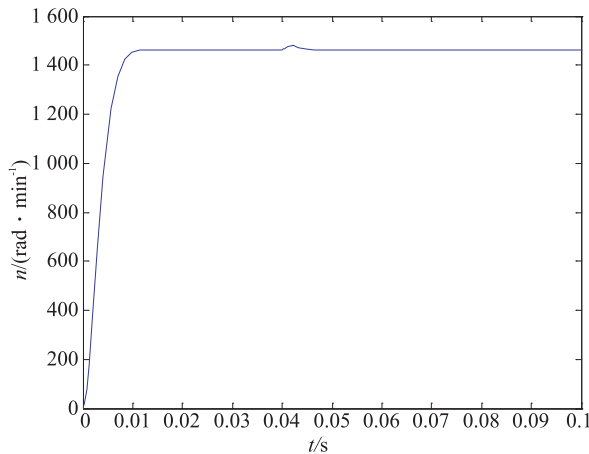


图5 模糊 PID 控制器转速仿真曲线

从仿真曲线及表 4 总结的三种控制器性能指标数据可以明显看出:利用模糊自适应 PID 控制的无刷直流电机转速响应快、无超调;在 $t=0.04\text{ s}$ 时,系统负载突变时的速度响应曲线波动较小,且迅速回到额定转速,调节时间短且抗干扰能力强,表现出良好的动态特性,大大提高了无刷直流电机调速系统的鲁棒性。

4 实验分析

实验采用 TI 公司的数字信号处理 TM320LF2812 为主控制器对无刷直流电机进行实验,其硬件系统控制结构图如图 6 所示。

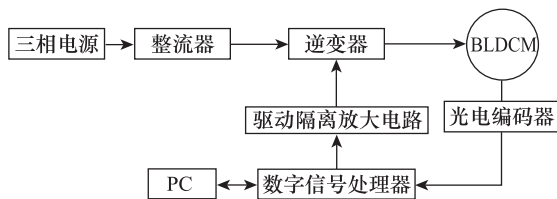


图6 控制系统实验结构框图

整流器采用三相全控桥,逆变器模块选用 6 个三菱 MG50Q2YS40 的绝缘栅双极晶体管 IGBT 模块。实验时,逆变模块输入直流电压 130 V。通过实验现场测试,采用模糊 PID 控制器时电机的实测转速曲线基本与前面计算机仿真曲线一致,从而验证本文提出的模糊 PID 控制器能够很好地抑制超调、负载扰动和转速波动,具有很强的鲁棒性和动态响应能力,较好地控制电机转速。

5 结论

本文设计了一种基于模糊 PID 控制器的无刷直流电机双闭环调速系统,电流环采用 PID 控制器,转速环采用模糊 PID 控制。基于输入参数的变化,采用模糊原理对 PID 参数进行在线自调整,通过对电机在启动和运行中突加负载的情况,在 MATLAB 上,进行了实验仿真。仿真结果表明,本文提出的模糊 PID 控制方案能够提高无刷直流电机调速系统的响应速度,抑制超调,提高控制精度,增强系统的鲁棒性和动、静态性能,其控制性能均优于常规的 PID 控制和单纯的模糊控制。

参 考 文 献

- 1 李 斌,唐永哲.模糊 PID 算法在无刷直流电机控制系统中的应用.微电机,2006;(2):14—15
- 2 屈 毅,宁 铎,刘飞航,等.模糊 PID 控制器的设计及其仿真.计算机仿真,2009;26(12):130—132
- 3 王 凌,刘卫国.基于模糊 PI 控制的无刷直流电机调速系统仿真.计算机仿真,2009;26(10):186—189
- 4 李军红,李兰君,杨武娇.无刷直流电机调速系统神经网络自适应滑模变结构控制.微计算机信息,2010(2):68—70
- 5 李国勇.智能控制及其 MATLAB 实现.北京:电子工业出版社,2005;5:252—260
- 6 张径周,杨伟静,张安祥.模糊自适应 PID 控制的研究及应用仿真.计算机仿真,2009;26(9):132—135

(下转第 7933 页)

Intrinsic Fabry-Perot Fiber Optic Sensor Technology

HUANG Zheng-yu, CAO Yan-feng¹, JIN Yong¹

(Beijing Raylens Ltd., Beijing 100083, P. R. China; China CNOOC Research Center, Beijing 100027, P. R. China)

[**Abstract**] The principle, fabrication, and characterization of a novel wavefront splitting intrinsic Fabry – Perot fiber temperature sensor are presented. The sensor is made by splicing a section of fused silica tubing to the tip of a single – mode fiber. The completed sensor has the same diameter as the fiber and the sensor length is less than 0.5 mm.

[**Key words**] fiber sensors Fabry-Perot splice

(上接第 7229 页)

Brushless DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID Control

XU Wei, QU Bai-da*, XU Bao-guo

(Jiangnan University, Wuxi 214122, P. R. China)

[**Abstract**] Brushless DC motor speed control system is a multivariate, strong coupling, nonlinear, time-varying complex system, but adopting traditional PID control method to carry out control is difficult to achieve good control effect. A kind of PID controller with fuzzy algorithm setting on-line PID parameters automatically was designed and applied in brushless DC motor speed control system, using the voltage, speed and torque equation of brushless DC motor, according to the parameters of the motor, the controller adopts fuzzy theory to adjust the PID parameters, in order to obtain high-precision speed control. Results of simulation experiment show that the fuzzy PID control method compared with normal PID control and pure fuzzy control is with better control performance, non overshoot, quick velocity response, higher control precision and good robustness, which is insensitive to the parameter chattering and many disturbances.

[**Key words**] brushless DC motor fuzzy PID control Matlab/Simulink simulation fuzzy control