

无刷直流电机模糊与 PI 双闭环调速系统的研究

王 军, 冯能莲*, 张春强, 张星宇

(安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘 要: 根据无刷直流电机的发展, 将转速外环模糊控制和电流内环 PI 控制相结合, 设计了双闭环直流调速系统控制方案。通过模块化、集成设计, 试制了无刷直流电机控制器样板, 以 C 语言编程实现了转速环模糊控制算法和电流环 PI 控制算法。搭建了无刷直流电机调速系统试验平台, 试验结果表明所设计的无刷直流电机控制器, 响应快、超调小、实时性好, 保证了良好的稳态和动态性能。

关键词: 无刷直流电机; 双闭环控制; 模糊控制

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)04-0662-05

Research on a speed regulating system for the brushless DC motor using fuzzy and PI controller

WANG Jun, FENG Nenglian, ZHANG Chunqiang, ZHANG Xingyu

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: With the development of the brushless DC Motor, a double close-loop BLDC speed control system was designed based on the fuzzy control of speed outer loop and PI control of the inner current loop. Through modular and integrated design, a prototype model of the BLDC controller was trial-manufactured and a C language programming was applied into the speed loop fuzzy control and current loop PI control algorithm. A BLDCM speed regulating system test platform was built. The results showed that the BLDCM control system has advantages of fast response and little overshoot, which can ensure its excellent static and dynamic performance.

Key words: brushless DC motor; double closed loop; fuzzy control

无刷直流电机 (brushless direct current motor, BLDCM) 既有交流电机的结构简单、运行可靠、维护方便等优点, 又有直流电机运行效率高, 调速特性好等优势, 并且由于没有机械换相的限制, 容易做到体积小、重量轻、转速高等特性。因此, 近年来得到了广泛应用^[1-3]。然而无刷直流电机是一个多变量、强耦合、非线性、时变性的复杂系统, 对它的动态响应、稳定性、安全性、精度有着更为严格的要求, 而一般经典的 PI 控制已很难满足。采用转速环模糊控制和电流环 PI 控制, 构成双闭环调速系统, 充分结合两者的优点, 既发挥了模糊控制超调量小、动态响应快、鲁棒性强的优点, 又克服了 PI 控制参数不能随环境变化而调整的缺点^[4-5]。

本研究以 32 位的 STM32F103 单片机作为主控芯片, 转速外环模糊控制, 电流内环 PI 控制, 实现

了无刷直流电机的双闭环调速控制。

1 控制系统方案设计

控制对象为 80BL130-330 型无刷直流电机, 其具体参数: 型号 80BL130-330, 额定电压 36 V, 额定转速 3000 r·min⁻¹, 额定转矩 1.2 N·m, 额定功率 350 W。整个系统以 STM32F103 单片机为控制核心, 以 PWM 输出脉宽为控制变量, 调节逆变桥 MOSFET 的开关频率来实现电机的调速控制。

1.1 双闭环调速系统

双闭环调速系统的结构框图如图 1 所示, 外环为转速调节, 内环为电流调节。给定转速与电机实际转速的偏差作为转速控制器的输入, 计算得出的参考电流值作为电流控制器的输入; 电流控制器根据参考电流值和实际电流值计算得到 PWM 输出脉

收稿日期: 2016-01-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51075010) 和北京市教育委员会重点项目 (KZ200910005007) 共同资助。

作者简介: 王 军, 硕士研究生。E-mail: 18755118260@163.com

* 通信作者: 冯能莲, 博士, 教授。E-mail: fengnl@bjut.edu.cn

宽调制信号, 实现电机的调速控制^[6,7]。电机的实际转速由转子位置信号计算得出, 电机的实际电流由采样电路实时检测得出。

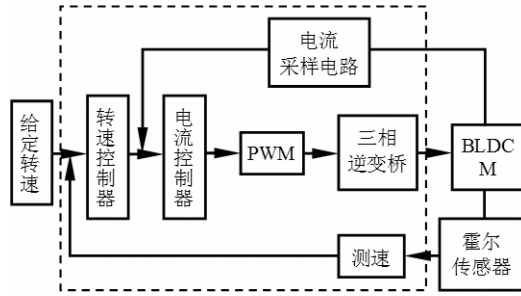


图 1 双闭环调速系统结构框图

Figure 1 The diagram of double close-loop speed regulating system

1.2 转速环模糊控制器

模糊控制 (Fuzzy Control) 是基于模糊数学思想和理论的现代智能控制方法, 主要由规则库、模糊化、模糊推理和解模糊化等四部分组成, 控制精度高、超调量小、稳定性好, 是目前工业生产控制中应用较好的一种智能控制方法^[8-9]。

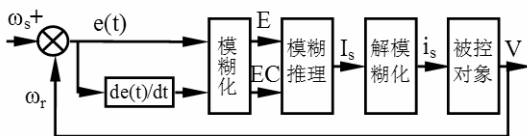


图 2 模糊控制器结构框图

Figure 2 The diagram of fuzzy control

如图 2 所示, 为外环转速控制器所采用的二维模糊控制器 (两个输入量和一个输出量) 结构框图。系统用给定的转速 ω_s 与检测到的电机实际转速 ω_r 来计算 $e(t)$ (转速偏差) 和 $de(t)/dt$ (转速偏差一阶导数) 进行模糊化处理, 得到模糊输入量 E 和 EC, 根据模糊控制算法规则进行模糊推理运算, 计算得到模糊控制量 I_s , 再经解模糊化处理得出精确输出量 i_s , 最后把 i_s 输入给内环电流控制器。

表 1 I_s 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules of I_s

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
Z	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

模糊控制器的输入变量 E 和 EC 的基本论域设为 $[-3,3]$, 其五级模糊子集为 $\{NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB\}$, 并将其作为输入模糊量 E 和 EC, 模糊推理后的输出模糊变量 I_s 的语言变量论域, 此外精确输出量 i_s 的基本论域为 $[-10,10]$ 。模糊控制量 I_s 的控制规则如表 1 所示。

1.3 电流环 PI 控制器

PID 作为发展最为成熟的控制, 由于控制算法简单, 可靠性高, 在控制领域被广泛使用^[10]。

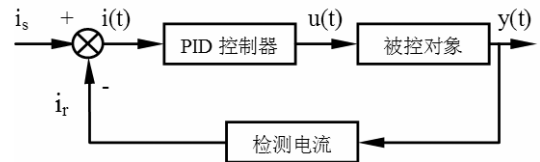


图 3 PID 控制系统结构框图

Figure 3 The diagram of PID control

如图 3 所示, 为内环电流控制器所采用的 PID 控制器结构框图。参考电流 i_s 与检测到的实际电流 i_r 来计算 $i(t)$ (电流偏差) 作为 PID 控制器的输入, 计算得到 PWM 脉宽的调制信号 $u(t)$, 实现电机的调速。PID 控制器的输入 $i(t)$ 和输出 $u(t)$ 的关系为

$$u(t) = K_p [i(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t i(t) dt + T_d \frac{di(t)}{dt}] \quad (1)$$

伴随着计算机技术的发展, 数字化控制逐渐取代传统的模拟控制, 在数字 PID 控制中, 相对于位置式 PID, 增量式 PID 所需内存容量较小, 更适合在单片机中实现, 因此, 本文采用增量式 PID 控制^[11-12]。

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p \{ [i(k) - i(k-1)] + K_i i(k) \\ &\quad + K_d [i(k) - 2i(k-1) + i(k-2)] \} \end{aligned} \quad (2)$$

上式中 $\Delta u(k)$ 为第 k 个采样时刻控制量与第 $k-1$ 个采样时刻的控制量的差值, $i(k)$ 为第 k 个时刻的偏差值。

由于一般调速系统的要求以动态稳定性和稳态精度为主, 对快速性的要求稍低, 因此, 省略微分环节, 采用 PI 控制即可达到预期效果。

2 控制系统硬件实现

无刷直流电机控制器包括电源电路、控制电路、信号隔离电路、检测反馈电路以及驱动电路等五部分组成。

控制器的硬件框图如图 4 所示。36V 的电池电压经降压稳压电路后给驱动电路提供 15V 工作电

压，给单片机提供 3.3V 工作电压。单片机端口 A 为数字量输出，连接指示灯显示电机的工作状态；端口 B 为数字量输入，连接控制按键采集控制信号；端口 C 为模拟量输入，包括采集调速信号、电流信号、电压信号等。程序中各个模块初始化后，检测起动按键，当确认按下时，分析位置传感器信号和调速电位器电压，计算处理后，调整 PWM 的输出脉宽，输出对应的电机驱动信号。

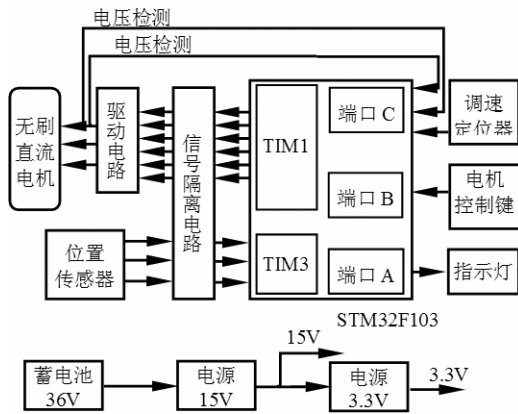


图 4 控制系统硬件框图
Figure 4 The hardware block diagram

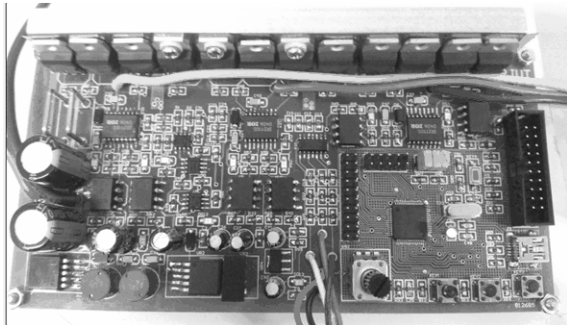


图 5 基于 STM32F103 的无刷直流电机控制器
Figure 5 Brushless DC motor controller based on STM32F103

根据以上方案，以 STM32F103 单片机为控制核心，以 IR2110S 为驱动芯片，12 个场效应管 75NF75 组成三相桥式逆变电路。设计了无刷直流电机控制器，试制的样板如图 5 所示。

3 控制系统算法实现

无刷直流电机调速系统软件的编译采用模块化思想、C 语言编程。实现了转速环模糊控制算法和电流环 PI 控制算法的双闭环控制。

3.1 转速环模糊控制算法实现

无刷直流电机调速系统的转速环采用模糊控制，当转速计数器达到给定值时，就进入转速调节子程序。根据给定转速 ω_s 与电机实际转速 ω_r ，计算转速偏差 e 和偏差变化率 ec ，进行模糊化处理，再

通过模糊推理和解模糊，得出参考电流 i_s 输入给电流环控制器（具体程序流程图如图 6 所示）。

根据表 2 的模糊控制规则建立一维模糊规则数组 $rem[]$ ，由设定转速 ω_s 与电机实际转速 ω_r ，得到转速偏差 $e(k)$ 和偏差变化率 $ec(k)$ 。

$$\begin{cases} e(k) = \omega_s(k) - \omega_r(k) \\ ec(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

将公式(3)进行模糊化处理，得到转速模糊控制器的输入量 $E(k)$ 和 $EC(k)$ 。

$$\begin{cases} E(k) = e(k)/100 \\ EC(k) = EC(k)/10 \end{cases} \quad (4)$$

若 $E(k) > 3$ 或者 $E(k) < -3$ ，说明电机正处于起动或者停机状态，模糊控制器直接输出 $I_s = 3$ 或者 $I_s = -3$ 的极限值，其余情况则进行模糊推理，按照模糊控制规则数组 $rem[]$ 得到模糊控制器的输出量 I_s 。

$$\begin{cases} F_i = [EC(k) + 6] \times \frac{7}{2} + [E(k) + 6] \times \frac{7}{2} \\ I_s = rem(F_i) \end{cases} \quad (5)$$

对模糊控制器的输出量进行解模糊处理，即得到精确的参考电流 $i_s = I_s * 10/3$ 。

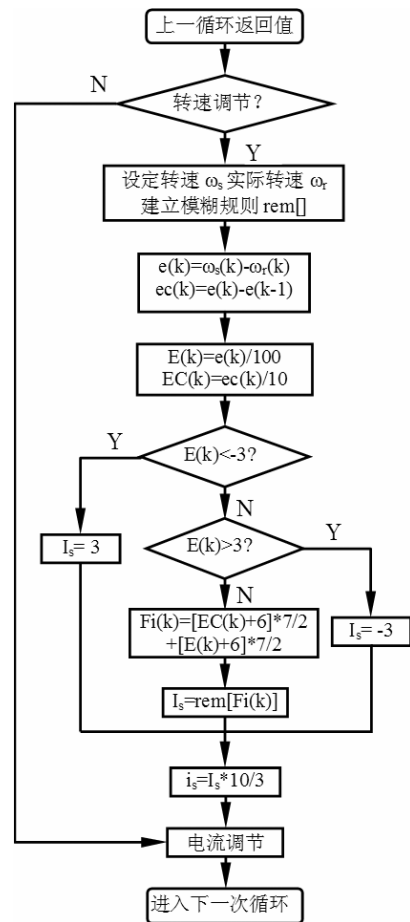


图 6 转速模糊控制程序流程图
Figure 6 The program diagram of fuzzy control

3.2 电流环 PI 控制算法实现

电流环的 PI 控制器的输入为转速环得到参考电流 i_s 与实际电流值 i_r 之差, 输出为用于驱动逆变电路模块的 PWM 脉宽调制信号。具体程序流程图如图 7 所示。

由参考电流 i_s 与电机实际电流值 i_r , 得到电流偏差 $i(k)$ 。

$$i(k) = i_s(k) - i_r(k) \quad (6)$$

电流偏差 $i(k)$ 作为增量式 PI 控制器的输入, $u(k)$ 为第 k 个采样时刻用于逆变电路模块的 PWM 脉宽调制信号, $i(k)$ 为第 k 个采样时刻电流差值。

$$u(k) = u(k-1) + K_p \{ [i(k) - i(k-1)] + K_i i(k) \} \quad (7)$$

如果计算得到的 PWM 脉宽调制信号 $u(k)$ 超过设定的最大值 PWM_max, 则把当前的 PWM 脉宽调制信号 $u(k)$ 设置为最大值 PWM_max, 然后保存当前的电流偏差为下一次循环使用。

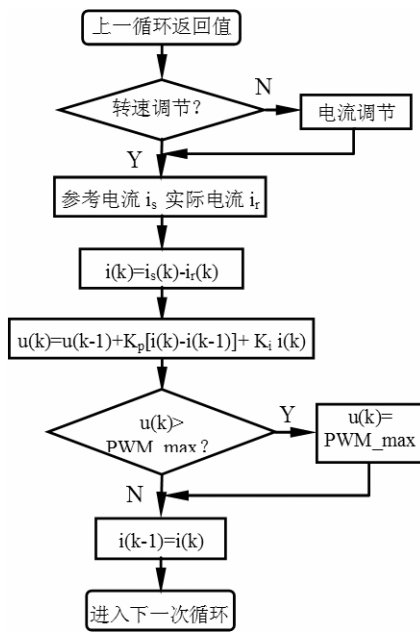


图 7 电流环程序流程图

Figure 7 The program diagram of PID control

4 试验分析

为测试所设计的无刷直流电机控制器的功能和性能, 搭建了以 80BL130-330 型无刷直流电机为被控对象的调速系统试验平台, 如图 8 所示。

试验平台由机械、电气、控制三部分构成, 在功能上则分为功率输出系统和集成控制系统。

功率输出系统主要包括无刷直流电机、转矩/转速传感器、惯量盘 (模拟车重)、磁粉制动器 (模拟机械制动)。集成控制系统主要包括无刷直流电机

控制器、电压/电流传感器、转矩/转速控制仪、数据采集卡及工控机等, 主要进行转速的给定与电机相关信息的采集。

为实现转速给定值的设置和试验结果的采集与分析, 在 MATLAB/Simulink 中搭建相应程序, 并通过数据采集卡实现相应的功能。转速给定如图 9 所示, 在 2s 时给定 2V 的起动电压, 在 10s 时给定 3V 的调速电压。

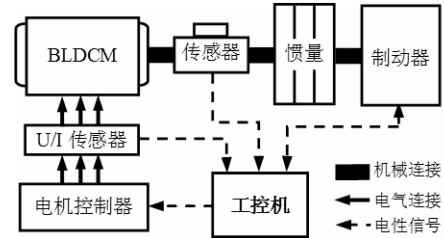


图 8 电机调速系统试验平台结构示意图

Figure 8 Motor speed regulating system bench test

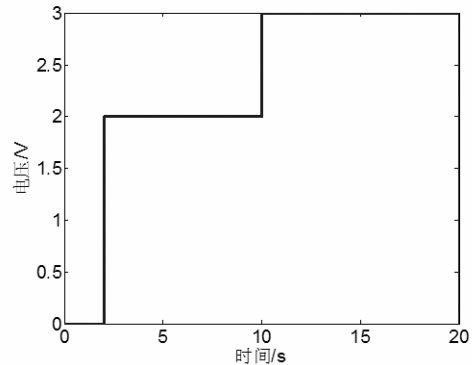


图 9 电机调速电压-时间波形图

Figure 9 The relationship between voltage and time in motor speed regulating

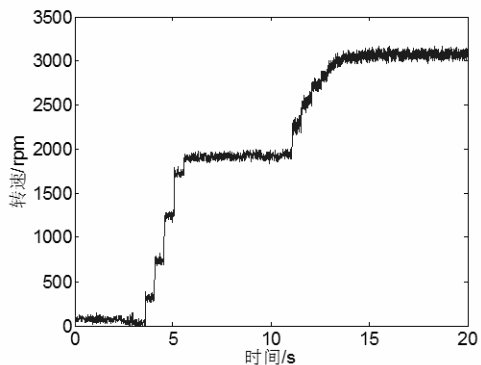


图 10 模糊与 PI 控制下电机转速-时间波形图

Figure 10 The relationship between speed and time under fuzzy logic + PID control

从图 10 可以看出, 在模糊与 PI 控制下, 电机 3.5 s 时起动, 于 6 s 时达到稳定转速 $2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; 电机 10.5 s 时开始加速, 于 14 s 时达到稳定转速 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。为验证本文论述方法的控制结果, 进行了双 PI 控制试验, 其结果如图 11 所示, 电机 4.5s

时起动, 于 7.5 s 时达到稳定转速 $2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; 电机 11 s 时开始加速, 于 15.5 s 时达到稳定转速 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

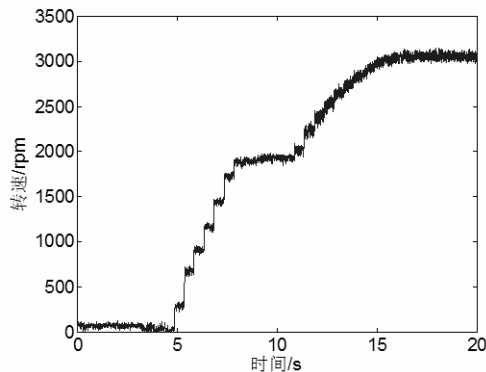


图 11 双 PI 控制下电机起动转速-时间波形图

Figure 11 The relationship between speed and time under double PI control

图 9 中 2 s 时给定 2V 的起动电压, 模糊与 PI 控制下电机在 3.5 s 时起动, 起动反应时间为 1.5 s; 双 PI 控制下电机在 4.5 s 时起动, 起动反应时间为 2.5 s。图 9 中 10 s 时给定 3V 的加速电压, 模糊与 PI 控制下电机在 10.5 s 时开始加速, 加速反应时间为 0.5 s; 双 PI 控制下电机在 11 s 时开始加速, 加速反应时间为 1 s。由此可以看出, 在相同的运行工况下, 模糊与 PI 控制相对于双 PI 控制, 电机起动反应时间与加速反应时间都要更短, 实时性更好。

由图 10 与图 11 的对比可知, 同样的运行工况下, 电机转速从 0 加速到 $2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 模糊与 PI 控制需要 2.5 s, 双 PI 控制需要 3 s。电机转速从 $2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 加速到 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 模糊与 PI 控制需要 3.5 s, 双 PI 控制需要 4.5 s。由此可以看出, 模糊与 PI 控制相对于双 PI 控制, 电机从 0 加速到 $2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 以及从 $2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 加速到 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 所需要的时间都更短, 更快的达到目标转速, 具有更快的响应。

5 结论

由转速环模糊控制与电流环 PI 控制所构成的直流调速系统可以实现无刷直流电机的调速, 且与双 PI 控制的直流调速系统相比, 响应快, 实时性好, 具有更佳的控制效果。因此, 模糊控制与 PI 控制相结合, 在无刷直流电机调速系统中可达到更好的预期效果, 具有更好的应用和发展前景。

参考文献:

- [1] XIA C L. Permanent magnet brushless DC motor drives and controls [M]. Singapore: John & Wiley Inc, 2012: 65-80.
- [2] 詹瑜坤. 直流无刷电机原理及其数字化控制发展方向[J]. 中国科技信息, 2010, 20: 151-152.
- [3] 刘刚, 王志强, 房建成, 等. 永磁无刷直流电机控制技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 5-10.
- [4] 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 21-34.
- [5] 纪志成, 沈艳霞, 姜建国. 一种新型的无刷直流电机调速系统的模糊 PI 智能控制[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(3): 248-254.
- [6] WALTER N A, STEPHEN L H. Electric motor control [M]. Australia: Thomson/Delmar Learning, 2003: 41-45.
- [7] CHEN C H, CHENG M Y. Implementation of a highly reliable hybrid electric scooter drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 3462-2473.
- [8] WU Y Y, DENG Z Q, WANG X L, et al. Position senseless control based on coordinate transformation for brushless DC motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 2010, 24(2): 1322-1341.
- [9] 雷丹, 赵金. 一种小功率无刷直流电机控制系统的设计[J]. 微电机, 2012, 45(4): 37-40.
- [10] 李峰, 吴一辉, 武俊峰, 等. 直流无刷电机高精度电流采样系统设计[J]. 电力电子技术, 2010, 44(5): 41-43.
- [11] 夏长亮, 方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 26-33.
- [12] 夏长亮, 张茂发, 王迎发, 等. 永磁无刷直流电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 104-109.