

基于 ARM 的模糊 PID 直流电机控制系统^①

袁 帅, 汪 明, 韩 颖, 宋亮亮

(山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101)

摘 要: 直流电机具有调速范围广、调速性能平稳光滑、启动转矩较大、易于起停车等优点, 特别适合用在调速要求比较高的场合. 传统 PID 直流调速控制在工况变化情况下需要调整参数, 过程复杂且难以自适应, 针对这个问题, 设计了一个模糊 PID 直流调速控制系统, 首先分析了直流电机工作特性, 构建了 PID 参数调节的模糊规则表, 进行了理论分析和仿真; 在此基础上, 设计实现了一模糊 PID 直流调速控制系统, 实现了对直流电机转速的自适应控制与显示. 系统包含上位机程序和下位控制器两部分, 其中上位机程序采用 Visual Basic 编写, 用于设置 PID 参数、通信端口、转速显示等; 下位控制器采用 ARM S3C2440 作为核心控制单元, 包括 IGBT 驱动部分、H 桥可逆电路、通信电路、电源电路、转速反馈电路等. 仿真和实际实验显示该系统不仅提高了自适应性, 而且大大提高了调速快速性和准确性. 此外, 该系统结构模块化, 易于推广, 可用于实际调速场合和教育培训实验台, 具有一定理论价值和实际意义.

关键词: 直流调速系统; 模糊控制; PID 控制; 嵌入式系统

ARM-Based Fuzzy PID DC Motor Control System

YUAN Shuai, WANG Ming, HAN Ying, SONG Liang-Liang

(School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: DC motor has a wide speed range, steady and smooth speed performance. The starting torque is large, easy-to-play parking, etc., especially suitable for use in high speed requirements of the occasion. Traditional PID DC speed control changes in working conditions need to adjust the parameters of the adaptive process is complex and difficult. The paper addresses this issue. This paper analyzes the operating characteristics of the DC motor constructed fuzzy rule table PID parameter adjustment, the theoretical analysis and simulation. On this basis, we design and implement a fuzzy PID DC speed control system for DC motor speed to control and display self-adaptively. We design a fuzzy PID DC speed control system. The system consists of two parts and lower PC program controller, which uses the host computer program written in Visual Basic, is used to set the PID parameters, communication ports, speed display; lower controller uses ARM S3C2440 as the core control unit, including the IGBT drive section, H-bridge reversible circuits, communications circuits, power, speed feedback circuit. Simulation and practical experiments show that the system not only improves the adaptability, but also improves the speed and accuracy quickly. In addition, the modular system structure, easy to spread, can be used for the actual speed of occasions and education and training bench, has some theoretical and practical significance.

Key words: DC speed control system; fuzzy control; PID control; embedded systems

直流电机与交流异步电机相比较, 具有调速范围广、调速精确、性能稳定平滑、易于启停等优点, 在高精度的调速场合, 直流电机应用范围十分广泛, 比

如在电力机车、无轨电车、轧钢车、机床和起重设备等经常启动并调速的电气传动装置中. 传统 PID 直流电机调速已经相对成熟, 但是通常情况下, 是通过“试

^① 基金项目:国家自然科学基金(61273326);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2013DX018)

收稿时间:2014-07-13;收到修改稿时间:2014-09-02

凑法”来确定最佳的 PID 参数,这不仅降低系统设计效率,而且严重影响了系统性能的调节.此外,在调速系统工况改变的情况下,需要再次整定 PID 参数,过程复杂且难以自适应.针对这种情况,本文采用模糊规则来调整 PID 参数,从而解决 PID 参数整定的问题.模糊控制采用语言型控制规则,从现场控制人员的实际经验出发,不需要精确的数学模型,鲁棒性强,特别适合于非线性、强耦合时变、滞后系统调节^{[1][2]}.而模糊 PID 直流电机调速方法结合了两者的优点,不仅调速更加快速,而且调速更加精确.

电子技术的发展使得直流电机调速从模拟化调速转变为数字化调速,特别是如“雨后春笋”般的新型微控制器面世,更是将控制技术推向了一个崭新的平台.采用 ARM 或 DSP 等作为调速控制系统的核心控制单元,通过编程配置和调节系统参数,可以有效快速的精确的实现对整个系统的控制^[3].

本文结合了模糊 PID 控制和嵌入式系统技术设计实现了一套全新的直流调速控制系统.模糊 PID 控制是将传统 PID 与模糊控制相结合,根据转速的偏差和偏差变化率来调节直流电机转速.该系统包含上位机程序和下位控制器两部分,其中上位机程序采用 Visual Basic 编写,用于设置 PID 参数、通信端口、转速显示等;下位控制器采用 ARM S3C2440 作为核心控制单元,包括 IGBT 驱动部分、H 桥可逆电路、通信电路、电源电路、转速反馈电路等.

1 直流电机的传统PID控制

直流它励电动机励磁和转速分别由励磁绕组和电枢绕组产生,二者可认为相互独立,因此控制实现起来较容易.忽略磁饱和现象,仅考虑直流电机的基波分量,则电枢电压方程和转矩平衡方程可表示为:

$$\begin{cases} R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C_e n = U_a \\ J \frac{dn}{dt} + fn - C_e i_a = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_a 为直流电机的电枢回路电压, R_a 为电机等效电阻, i_a 为电机等效电流, L_a 为电机等效电感, n 为电机转速, J 为电机转动惯量, f 为转速阻尼系数.

经典 PID 控制理论中,常用的控制方法有 PI 控制、PD 控制和 PID 控制.其中 D 控制不能单独使用^[4].PID 控制算法如下:

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{k_i} \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2)$$

式中, $u(t)$ 表示控制器的输入信号; $e(t) = r(t) - c(t)$ 表示被控量的误差信号, $r(t)$ 表示控制器的参考输入, $c(t)$ 表示被控对象的输入反馈信号, k_p 表示比例系数, k_i 表示积分时间, k_d 表示微分常数.

PID 控制是一种基于误差的控制方法,在工程实际中相关参数的确定通常使用“试凑法”,即首先通过试凑法来确定 P 参数,然后确定 I 环节参数,满足系统静差要求,最后根据需要加入 D 环节,提高整体系统动态性能.PID 控制算法应用广泛,对于宽域有较强的抗干扰能力,但是“试凑法”设计效率较低,如果控制对象发生变化,PID 参数不能进行自适应性地改变,最终会导致系统控制性能变坏^[5].

2 直流电机的模糊PID控制

2.1 模糊 PID 控制算法的原理

调速系统中常用的转速、电流双闭环直流调速控制系统是一种串级调速系统,分为外环和内环,其中外环指的是转速环,内环指的是电流环.转速环主要通过采集直流电机转速转换为电压构成转速负反馈,核心作用是实现转速稳态无静差;电流环主要是采集电枢电流构成电流负反馈,用于提高系统动态性能,限制电流过大^[6,7].

传统 PID 应用在直流电机双闭环调速系统中,具有调速精确、控制简单的优点,但是 PID 参数是固定不变的,所以在控制上面存在的诸多不足,比如调速实时性不足,信号处理简单,控制过程会出现“跳变”造成初始误差较大的现象,并且很难应用到非线性系统中,而模糊控制很好的“解决”了参数固定的问题,自适应能力大大提高,PID 参数根据系统实际情况进行自适应调整,模糊控制通过模糊推理,用模糊语言列写控制规则并进行模糊运算,最后去模糊得出精确控制量,是一种智能化控制方法,具有适应能力强的特点^[8,9].本文采用模糊 PID 直流调速控制系统结构框图如图 1 所示,其中转速调节采用了模糊 PID 控制方法.图 1 中,模糊控制器接收转速的偏差和偏差变化率,通过模糊化、模糊推理及去模糊化等步骤,最后得出 PID 三个参数变化量并输出给 PID 控制器,从而确定 PID 参数.

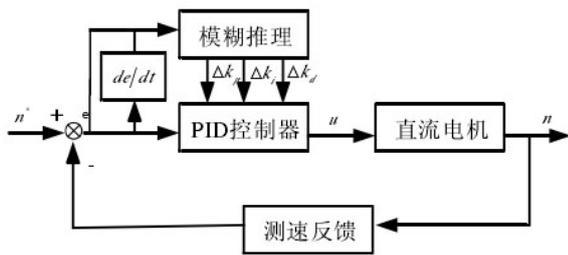


图1 直流电机模糊PID算法调速控制

2.2 模糊PID控制算法规则表

本控制系统以偏差 $E(k)$ 和偏差变化率 $Ec(k)$ 为控制器输入, 根据 $E(k)$ 和 $Ec(k)$ 的变化而自动调整参数 k_p 、 k_i 和 k_d 。当 $E(k)$ 变化较大的时候, 系统相应速度较快, 此时系统容易产生微分溢出的现象. 为保证系统稳定, 同时减小系统超调, 应当选取较大的 k_p , 较小的 k_i 和较小的 k_d 。当 $E(k)$ 变化为中等大小的时候, 为了减小系统的超调量, 同时提高响应速度, 应当选取较小的 k_p , 适中的 k_i 和 k_d 。当 $E(k)$ 变化较小的时候, 为了减小稳态误差, k_p 和 k_i 应该取较大的值. 为了避免震荡, 同时考虑系统抗干扰能力, 当 $Ec(k)$ 较大的时候, k_d 应该选取中等大小的值.

模糊控制的输入语言变量 $E(k)$ 和 $Ec(k)$ 为7个模糊子集, 可以表示为正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(Z)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB). 模糊控制的输入 $E(k)$ 和 $Ec(k)$ 的正大(PB)和负大(NB)的隶属度函数均采用高斯函数, 而正中(PM)、正小(PS)、零(Z)、负小(NS)和负中(NM)均采用三角函数作为隶属度函数. 模糊控制的输出变量为 k'_p 、 k'_i 、 k'_d 用语言值正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(Z)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB)设置与 $E(k)$ 相同. 模糊控制规则表如表1所示.

表1 PID模糊规则推理表

k'_p k'_i k'_d			$E(k)$						
			NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$Ec(k)$	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	
		NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	
		PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS	
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	
		NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO	
		PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO	
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	
		NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	
		ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	

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

直流电机调速控制系统的PID控制器参数按下式

确定:

$$\begin{cases} k'_p = k_p + \Delta k_p \\ k'_i = k_i + \Delta k_i \\ k'_d = k_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (3)$$

系统可自动调整参数, 参数确定的顺序是首先确定 Δk_p , 当 $\Delta k_p > 0$ 时, 电机反映速度变快; 其次确定 Δk_i , 消除静态误差, 当 $\Delta k_i > 0$ 时, 系统响应速度变慢; 最后确定 Δk_d , 提高系统调速快速性.

2.3 模糊PID控制仿真

为验证所设计的模糊PID控制系统的可行性, 我们以龙门刨床的直流伺服电机为控制对象进行了仿真. 该直流电机的基本参数见表2所示.

表2 直流电机基本参数

额定电压(V)	额定电枢电流(A)	额定转速(r/min)	电枢电阻(Ω)	电枢电感(mH)	电动势常数(V min/r)	转速反馈系数(Vmin/r)
220	15.4	1500	0.8	16	0.113	0.006

通过计算将PID参数确定为 $k_p = 0.40$, $k_i = 1.00$, $k_d = 0.00$. 模糊PID控制在MATLAB环境下仿真得到的结果如图2所示.

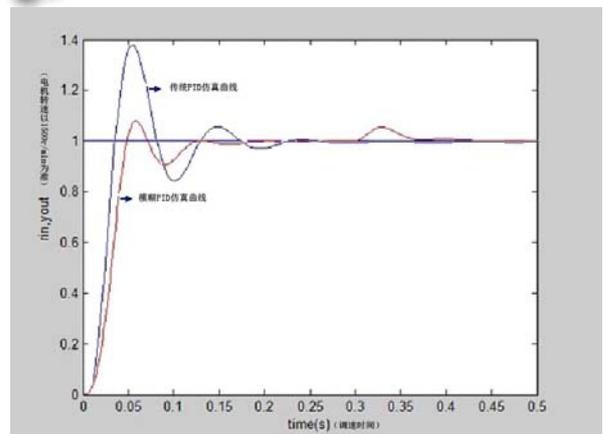


图2 模糊PID仿真结果图

从图2可以看出, 模糊PID调节的响应时间大大

小于传统 PID 调节响应时间, 系统调节时间也得到了改善, 超调量更小. 模糊 PID 调节性能远远好于传统 PID 调节.

3 直流电机模糊PID调速控制系统实现

3.1 系统构架

直流电机调速可选用转速、电流双闭环系统, 本文设计了一套具有上位监控软件和下位控制器的直流调速系统, 其系统架构如图 3 所示. 从图 3 可看出, 下位控制器部分采用 ARM S3C2440 作为核心控制单元, 产生 PWM 波形直接作用于驱动电路, 再经过 H 桥可逆电路控制直流电机. TG 测速发电机将直流电机转速转化成电压, 经过隔离、整形等过程, 之后由 AD 将模拟电压转化为数字电压输入到 ARM 中. ARM S3C2440 中央控制器运行模糊 PID 程序, 通过接收 PC 机发送的控制信息来控制电机转速, 并将电机转速和模糊 PID 控制参数传到 PC 机进行显示.

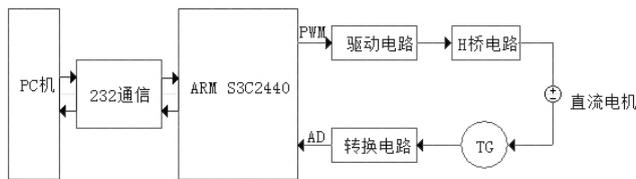


图 3 系统整体设计框图

3.2 核心控制单元设计

核心控制单元设计采用三星生产的 ARM S3C2440 微控制器, 如图 4 所示, 其中包括电源模块设计、晶振电路设计、存储电路设计、通信接口设计等. ARM S3C2440 微控制器具有 5 级流水线, 执行效率高, 采用哈佛 32 位指令集, 程序运行高效, 接口丰富, 能够大大减少成本投入, 降低系统设备期间的需求, 完全能够满足直流电机调速控制系统静态要求.



图 4 核心控制单元设计

由于系统需要 3.3V 电源, 故电源模块采用了 SPXIII7-3.3 提供电压转换. 晶振电路采用 12MHz 晶振,

通过控制时钟控制寄存器来得到所需要的时钟分频. 为以后调速系统故障诊断做准备, 更多地存储的系统参数和状态, 系统存储器采用了低功耗、大容量的 SDRAM 存储器, 型号为 HY57V56162. 通信电路设计采用 MAX232 芯片, 实现模糊 PID 控制器和 PC 机通信, 完成信息传输功能.

3.3 驱动电路设计

为实现直流电机正反转, 本系统采用了 IGBT 桥式可逆电路. IGBT 具有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点, 驱动功率小, 而且饱和压降低, 驱动电路设计简单. IGBT 的驱动电路如图 5 所示.

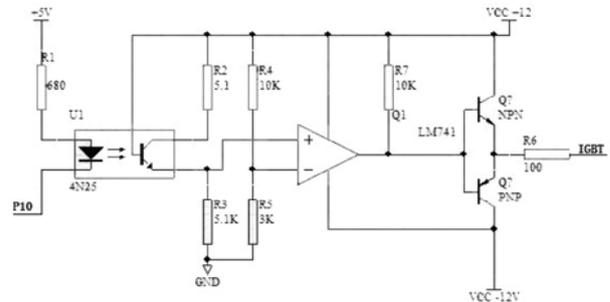


图 5 驱动隔离电路原理图

图 5 中 U1 是光电隔离器件, 功能是实现光电隔离. 比较电路的输出和单片机端口输出有关, 当单片机端口输出低电平的时候, 比较器输出为低, 接 IGBT 管输出为低电平(-15V); 当单片机端口输出高电平的时候, 比较器输出为高, 接 IGBT 管输出为高电平(+15V). 该驱动电路可为 IGBT 控制电路提供驱动电流, 提高开关速度, 保证波形有足够的上升和下降速度. 此外, 它实现了核心控制芯片和 H 桥电路的电气隔离, 提高了电路抗干扰能力.

3.4 H 桥可逆电路设计

H 桥可逆电路主要功能是实现直流电机正反转, 如图 6 所示. 当 W1 和 W3 导通, W2 和 W4 截止的时候, 直流电机处于正转状态, 反之, 直流电机处于反转状态. 为保护功率开关器件, 在 IGBT 两端并联了二极管, 提供续流保护. 电路中电容 C1 起到滤波和稳压作用, 旨在消除电网的高频谐波.

3.5 模糊 PID 控制器嵌入式软件实现

模糊 PID 控制器嵌入式软件设计与实现的部分主要包括: 初始化程序、PWM 程序、转速采样与计算程序、RS232 通信程序和模糊 PID 程序. 其中模糊 PID

程序设计是整个系统程序设计的核心. 模糊 PID 控制算法程序流程图如图 7 所示.

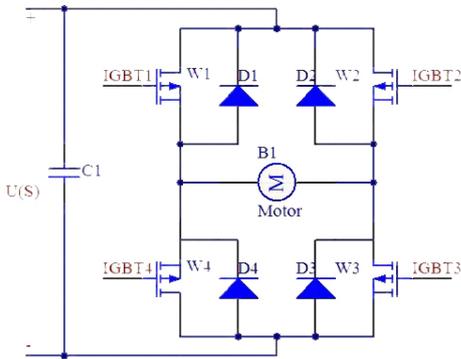


图 6 直流电机的 H 桥可逆电路

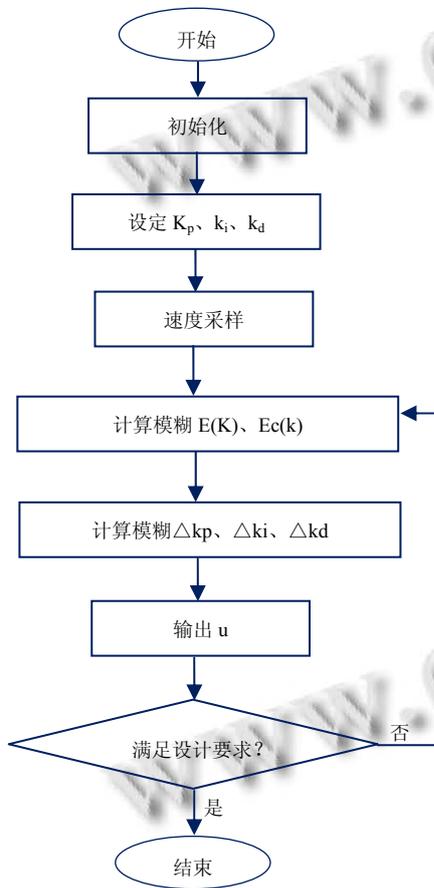


图 7 模糊 PID 控制程序流程图

程序设计和调试的过程中, 应该先进行分块设计和调试, 然后综合调试运行. 将部分程序加入到整体主程序, 然后编译链接生成 hex 文件下载到系统硬件中. 根据实际运行情况, 将程序稍作修改, 比如 PWM 死区解决问题等等.

3.6 系统上位机软件实现

系统管理软件主要是为了读取电动机运行状态, 同时控制电机运行, 方便整个系统的人性化管理和维护. 软件采用 Visual Basic 6.0 提供的串口控件 MSComm, 通过修改 MSComm 的属性参数读取串口信息, 同时发送数据, 完成事件驱动. 基本步骤是: 插入控件、设置控件 ID、初始化控件、设置控件属性、添加消息处理函数、实现处理响应. 系统设计并实现后的应用界面见图 8. 在图 8 中所示的界面中, 可进行以下操作, 包括端口设置、参数设置、转速给定、数据采集、转速实际曲线显示和软件说明, 从而实现直流电机运行状态的数据采集和相应模糊 PID 控制. 由于不仅可以更改参数设置, 而且可实时观察转速曲线, 因此该系统非常适合用于控制算法教学.

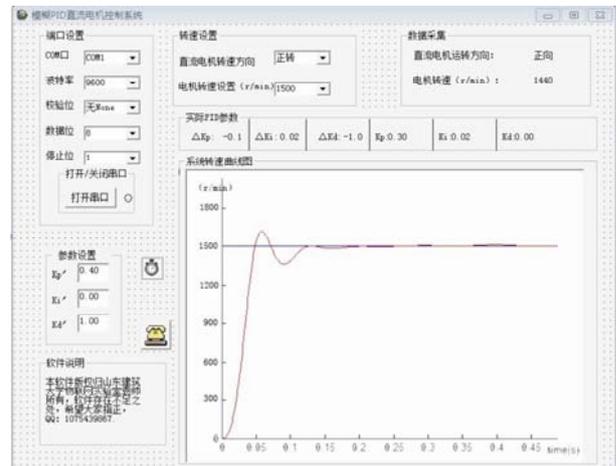


图 8 上位机监控软件的人机界面

4 结论

本文设计并实现了一种自适应的直流电机模糊 PID 调速控制系统, 其包含上位机监控软件和下位控制器两部分. 下位控制器设计了基于 ARM 的核心控制单元、IGBT 驱动电路、H 桥可逆电路、RS232 电路等; 上位机监控软件可进行 PID 参数、电机转向、通信端口参数等设置, 并能进行转速显示. 该系统经过实际测试具有运行可靠、鲁棒性强、调速精确、使用范围广的特点, 并已应用到模糊 PID 教学实验台上, 效果良好.

参考文献

- 1 徐三玲. 基于变论域模糊 PID 的数控机床伺服系统研究[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

- 2 王振臣,刘建旺,张聪,程菊.基于遗传算法和模糊 PID 的采煤机滚筒调高系统研究.中国矿业,2014,(1):2-3.
- 3 金传波,纪合溪.钢厂循环发电工程中煤气压力的模糊 PID 控制,2011,(4):7-9.
- 4 雷艳敏,朱齐丹,关秀丽,冯志彬.基于双层模糊控制器的动态路径规划,2011,39(9):57-61.
- 5 徐涛,王海霞,金艳.基于 VB、Oracle 及 Matlab 的航空发动机振动分析系统及接口设计.测控技术,2014,(2):3-4.
- 6 付光杰,赵子明.基于改进模糊 PI 控制的无位置传感器无刷直流电机调速研究.微电机,2014,(2):1-2.
- 7 刘春艳,闻玉凤.基于 MATLAB/Simulink 双闭环直流调速系统的仿真研究.山西大同大学学报,2014,(3):1-2.
- 8 吕威,郭孔辉,张建伟.电动助力转向综合前馈和模糊 PID 反馈的电流控制算法,2010,41(8):10-15.
- 9 Kamel RM, Chauachi A, Nagasaka K. Wind power smoothing using fuzzy logic pitch controller and energy capacitor system for improvement micro-grid performance in islanding mode. Energy, 2010, 35: 2119-2129.