

# 基于模糊控制的双闭环直流可逆调速系统的设计

张 镭, 谢 玮, 姜 珊

(哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院, 山东 威海 264209)

**摘要:** 对于双闭环直流可逆调速系统, 提出了一种将模糊控制与常规 PI 控制相结合应用在转速调节器设计的方法; 根据工程经验与专家知识所确定的模糊控制规则, 进行模糊推理, 实现转速调节器参数的动态整定; 应用 Matlab 软件构建了双闭环直流可逆调速系统的仿真模型, 并对转速环分别采用模糊 PI 控制器和常规 PI 控制器的直流可逆调速系统分别进行仿真实验并对比结果; 从仿真结果可以得出采用模糊控制可以对直流可逆调速系统的动态与静态特性、抗扰性能、恢复性能以及跟踪性能有比较明显的改善与提高。

**关键词:** 模糊控制; 双闭环直流可逆调速系统; Matlab 仿真; PI 控制

## Design of Double Closed—Loop DC Reversible Speed Regulation System Based on Fuzzy Control

Zhang Lei, Xie Wei, Jiang Shan

(School of information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

**Abstract:** For the double closed—loop DC reversible speed control system, a method combining fuzzy control with conventional PI control is proposed on the design of speed—loop regulator. According to the engineering rules and expertise knowledge to determine the rules of fuzzy control, the parameters of speed—loop regulator can achieve dynamic tuning based on fuzzy reasoning. The simulation model of double closed—loop DC reversible speed control system is constructed by Matlab software, and the simulation of DC reversible speed regulation system with fuzzy PI controller and conventional PI controller are compared respectively. The simulation results have shown that fuzzy control can obviously improve the dynamic and static characteristics, anti—disturbance performance, recovery performance, and tracking performance of DC reversible speed control system.

**Keywords:** fuzzy control; double closed—loop DC reversible speed control system; Matlab simulation; PI control

### 0 引言

传统直流可逆调速系统一般采用双闭环进行控制, 即转速调节作为外环, 电流调节作为内环。转速环与电流环一般都使用 PI 调节器进行控制, 以便得到较为理想的系统特性。但是在对于一些如可逆轧机、龙门刨床等需要快速实现正、反转的设备, 只采用 PI 调节器来进行控制很难实现稳定快速的调速<sup>[1]</sup>。或者在对一些对负载扰动敏感、要求控制精度高的精密仪器如医疗康复器械进行控制时<sup>[2]</sup>, 只用双 PI 调节器来控制很难实现系统对较高抗扰性的要求; 并且由于很多电机的拖动负载具有间隙、弹性等非线性因素, 其参数特性经常会产生变化<sup>[3]</sup>, 更是对系统的抗扰性能提出更严格的要求。因此仅用常规的 PI 调节器来进行控制, 很难满足很多直流可逆调速系统的性能指标的要求。

伴随着科学技术的飞速发展, 模糊理论在工程科技以及人文科学等很多领域都得到了大量的应用, 尤其是在智能控制等相关领域的应用愈加广泛<sup>[4]</sup>。由于模糊控制不完全依靠被控对象精确的数学模型, 可以方便高效地运用操作人员或专家的策略与经验<sup>[5]</sup>, 并且能够较好地处理合解决对象参数不确定和非

线性的问题<sup>[6]</sup>。由于模糊控制所具备的这些优点, 将模糊控制理论应用在直流可逆调速系统的设计上具有较大的意义。

本文的目的是将模糊控制应用在转速环 PI 调节器的设计上, 设计成转速环基于模糊 PI 控制的直流可逆调速系统。与转速环只采用常规 PI 控制的直流可逆调速系统进行对比仿真, 从而验证应用模糊控制的调速系统的动态与静态特性、抗扰性能、恢复性能以及跟踪性能。

### 1 双闭环直流可逆调速系统

双闭环直流调速系统原理图如图 1 所示, 转速调节器与电流调节器两者嵌套相连。转速调节器为主调节器, 可以有效抑制拖动负载所产生的扰动, 使得输出转速可以快速地跟随指令电压信号的变化达到指定的转速。而电流调节器的作用则是紧紧跟随转速调节器的输出变化, 来加快电机的起动过程, 并且对电网电压波动起到有效的抑制作用。由于有转速环和电流环这样的双闭环设计存在, 使得直流电机能够快速地起动与制动并保持转速稳定。

为了实现直流电机正反转切换, 本文中电力电子变换器采用的是桥式可逆 PWM 变换器, 并且采用最常用的双极性控制。即 4 个开关器件分成两组, 这两组开关器件的驱动信号工作在互补工作状态。通过控制驱动信号来改变桥式变换器输出电压的正负进而改变直流电机两端电压的正负, 从而实现控制直流电机的正转与反转。

### 2 常规 PI 控制器设计

实现双闭环直流可逆调速系统的关键是对双闭环中两个控

收稿日期: 2017-04-14; 修回日期: 2017-10-23。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2016106); 哈尔滨工业大学研究生教育教学改革研究项目(JGYJ-201626)。

作者简介: 通讯作者: 张 镭(1995-), 男, 吉林长春人, 主要从事机器人控制方向的研究。

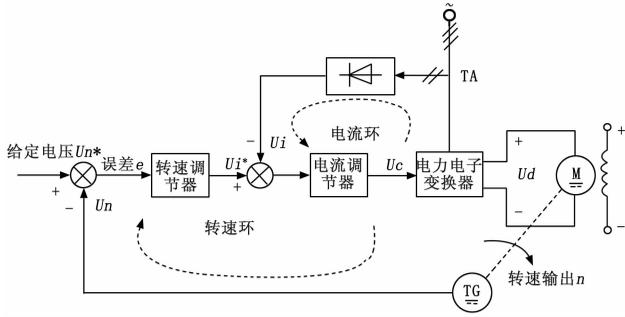


图 1 双闭环直流调速系统原理图

制器即转速调节器和电流调节器的设计。本文所采用的直流电机的主要参数如下: 额定电压  $U_N$ : 110 V, 额定电流  $I_N$ : 3 A, 额定转速  $n_N$ : 2 400 r/min, 电枢电阻  $R_a$ : 3.5  $\Omega$ , 电枢电感  $L_a$ : 60 mH, 励磁电压  $U_f$ : 110 V, 励磁电流  $I_f$ : 0.5 A, 转动惯量  $J$ : 0.015  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。经过常规 PI 控制器参数的计算方法<sup>[7]</sup>设计得到转速环调节器系数比例系数  $K_p = 24$ , 积分系数  $K_i = 0.002$ , 电流环调节器比例系数  $K_p = 36$ , 积分系数  $K_i = 0.001$ 。常规转速环 PI 调节器和电流环 PI 调节器的设计结果如图 2、图 3 所示。

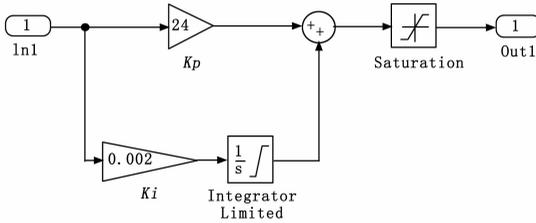


图 2 转速环 PI 调节器

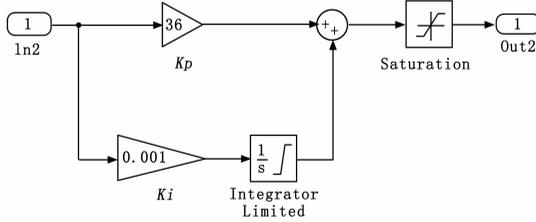


图 3 电流环 PI 调节器

### 3 模糊 PI 控制器设计

#### 3.1 模糊控制系统

模糊控制系统框图如图 4 所示。其中模糊控制器是模糊控制系统中的最主要且不同于常规控制系统的部分。通过模糊化、知识库(数据库与规则库)、模糊推理和清晰化这 4 个部分的互相作用, 以控制变量作为输入, 在不需要被控对象精确的数学模型的情况就可以实现对系统较为理想的控制。

#### 3.2 转速环模糊 PI 控制器设计

确定转速环模糊 PI 控制器以偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  为控制输入量, 以比例系数增量  $\Delta k_p$  和积分系数增量  $\Delta k_i$  作为输出量。由于三角形隶属度函数具有计算简便、易于实现和控制性能较好等特点<sup>[8]</sup>, 所以以三角形隶属度函数作为本文的隶属度函数。

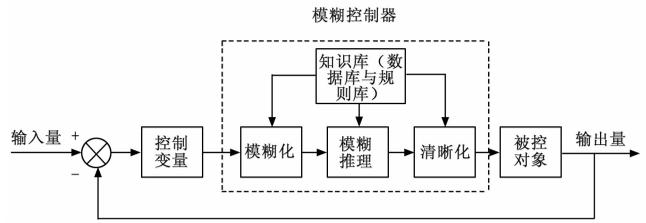


图 4 模糊控制系统框图

#### 3.2.1 输入输出及隶属度函数

根据电机及仿真的相关参数, 经预实验确定输入部分的偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  的基本论域分别为  $[-10, 10]$  和  $[-14, 14]$ , 模糊论域均选取  $[-6, 6]$ 。为了满足精度高的要求, 将模糊子集划分为 7 个等级, 模糊量的子集均选择  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。求得量化因子  $K_e = 0.6$ ,  $K_{ec} = 0.4$ 。二者对应隶属度函数如图 5 所示。

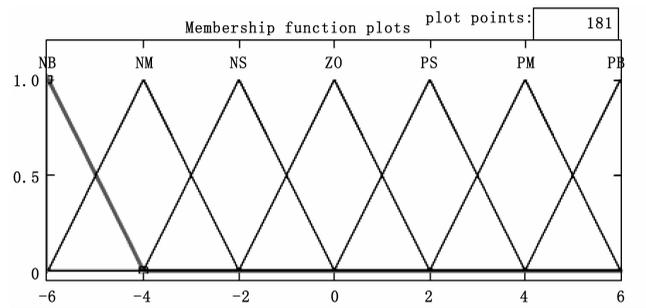


图 5  $e$  和  $ec$  的隶属度函数

同理再确定输出部分, 比例系数增量  $\Delta k_p$  和积分系数增量  $\Delta k_i$  的基本论域分别为  $[0, 25]$  和  $[0, 0.002]$ , 模糊论域均选择  $[0, 6]$ , 模糊量子集均选择  $\{ZO, PS, PM, PB\}$ 。求得比例因子  $K_p = 4.2$ ,  $K_i = 0.0003$ 。二者对应隶属度函数如图 6 所示。

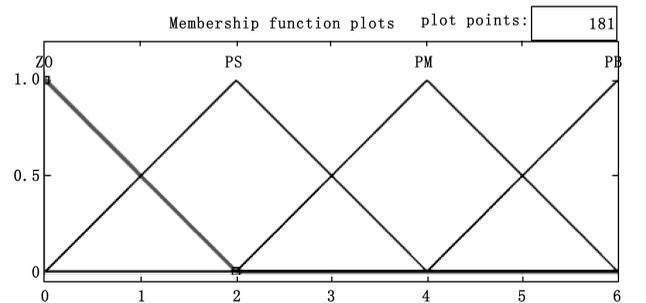


图 6  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  的隶属度函数

#### 3.2.2 模糊规则与模糊推理

模糊规则主要是根据工程人员或是专家的经验来总结并按照人的思维方式来进行语言表达的一种规则形式。表 1 和表 2 分别是基于工程经验以及操作策略所总结的比例系数增量和积分系数增量的模糊规则。按照表 1 和表 2 在 Matlab 中的 fuzzy 工具箱逐条输入 “If 条件, Then 结果” 的语句形式的控制规则。选择最为常用并且易于用图形进行解释的 Mamdani 推理法作为模糊逻辑推理方法。

表 1 比例系数  $\Delta k_p$  增量的模糊规则

$E_c$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
E	NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z
	NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS
	Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM
	PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM
	PM	PS	Z	NS	NM	NM	NB
	PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB

表 2 积分系数  $\Delta k_i$  增量的模糊规则

$E_c$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NM	NS	Z	Z
	NM	NB	NB	NM	NS	Z	Z
	NS	NB	NM	NS	Z	PS	PS
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM
	PS	NM	NS	Z	PS	PS	PB
	PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB
	PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB

### 3.2.3 清晰化

清晰化的主要作用是将推理决策得到的模糊量回复为可用于系统进行控制的精确的数值。本文采用工程上普遍应用的加权平均法作为清晰化的方法。最后将比例和积分系数原始值  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$  分别与模糊推理得到的其对应的增量值  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$  相加，得到最终的比例系数  $K_p$  以及积分系数  $K_i$ 。从而实现了模糊控制对常规 PI 控制器的比例系数和积分系数的调整。综上，由图 7 所示的为设计后的转速环模糊 PI 控制器。

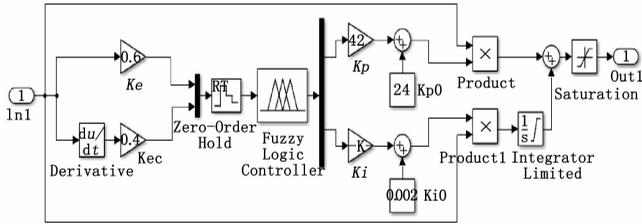


图 7 转速环模糊 PI 控制器

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真模型的建立

采用 Matlab 软件中的可视化仿真工具 Simulink 来对双闭环直流 PWM 可逆调速系统进行建模与仿真 (图 8)。由于电流环 PI 调节器不会对负载变化所产生的干扰有抑制作用，故对比仿真时保持不变，只改变转速调节器。转速环调节器则分别采用模糊 PI 控制器和常规 PI 控制器，并用示波器观察并对转速变化情况进行比对，从而来验证采用模糊 PI 控制对于系统动态与静态特性、抗扰性能、恢复性能以及跟踪性能的增强与改善。

其中 PWM 控制模块的设计如图 9 所示。由于本文采取双极性调制，所以选取两个 PWM Generator 模块分别产生两组开关器件的驱动脉冲信号。加入选择器模块主要的目的是通过调整驱动脉冲的次序保证两组开关器件可以工作在互补工作的状态。但是双极性 PWM 控制有个缺点就是在开关切换时上下

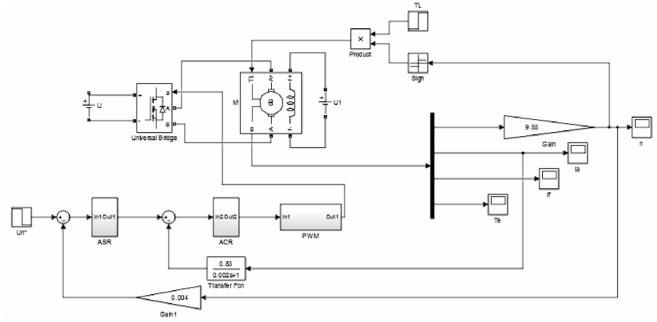


图 8 双闭环直流 PWM 可逆调速系统

桥臂可能会发生直通的现象。为了避免这个问题发生，需要在下方的 PWM 生成模块的驱动控制信号增加 0.01，从而保证可逆变换器的 4 个开关器件不会同时导通或关断。

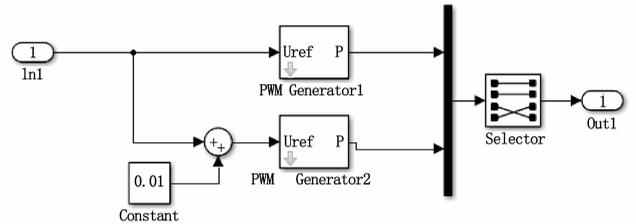


图 9 双极性 PWM 控制模块

### 4.2 仿真参数的设置

仿真主要模型参数如表 3 所示。

表 3 仿真模型参数

仿真模块	主要参数
直流电源 U	$U = 270 \text{ V}$
励磁电源 U1	$U_1 = 110 \text{ V}$
直流电机 M	$L_a = 0.06 \text{ H}, R_a = 3.5 \Omega, L_f = 0, R_f = 220 \Omega,$ $L_{af} = 0.8 \text{ HJ} = 0.015 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, n_N = 2400 \text{ r/min}$

### 4.3 仿真结果与分析

为了模拟可逆直流调速系统完整的启动与正反转切换过程。设置仿真总时间为 5 秒，给定阶跃电压  $U_n^*$  的初始值为 10 V，直流电动机 M 逐步由零转速加速到转速额定值 2400 r/min，并保持恒定。在 2 秒时，给定电压  $U_n^*$  阶跃变化到 -10 V，直流电动机 M 开始逐渐减速，减速到零时开始反向加速到反向转速额定值 2400 r/min，并保持恒定。仿真实现了直流电动机的启动以及从正转到反转的切换。完整仿真过程如图 10 所示。

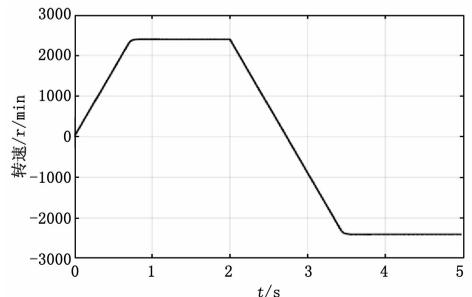


图 10 直流可逆调速系统完整仿真过程

### 4.3.1 理想空载分析

设置直流电动机负载转矩  $T_l$  为零, 在理想空载状态下对系统仿真, 仿真结果如图 11 和图 12。模糊 PI 控制的系统在 0.8 秒时便达到转速给定值, 而 PI 控制的系统则在 0.9 秒左右的时间才达到转速稳定值。仿真结果表明, 电机正转时有模糊控制的系统明显比单纯的 PI 控制系统的响应时间要快; 同理当直流电机切换到反转时, 模糊 PI 控制的系统在 3.5 秒时即达到转速稳定值, 而 PI 控制的系统在 3.6 秒才达到稳定。综上, 在理想空载状态下, 模糊 PI 控制的调速系统可以更快的响应给定电压信号并保持转速恒定。因此模糊 PI 控制的直流可逆调速系统可以应用在对系统动态特性要求较高的设备当中。

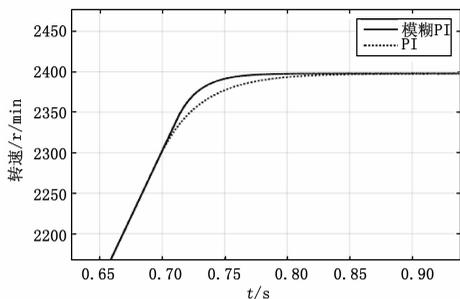


图 11 理想空载仿真结果 (正转)

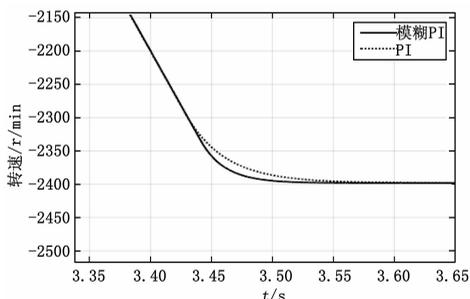


图 12 理想空载仿真结果 (反转)

### 4.3.2 带有恒定负载转矩分析

设置直流电动机负载转矩  $T_l$  为额定负载转矩  $1.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 并进行仿真。仿真结果如图 13 和图 14。电机正转时, 模糊 PI 控制的系统在 1 秒左右时达到转速 2 380 r/min, PI 控制的系统则在 1.1 秒左右达到转速稳定值 2 370 r/min。电机切换到反转后, 模糊 PI 控制的系统在 3.6 秒时达到转速稳定值 2 380 r/min, PI 控制的系统则在 3.7 秒实现转速稳定值 2 370 r/min。仿真结果表明在电机正转或者切换到反转时, 模糊 PI 控制的调速系统明显比 PI 控制的系统更快地达到指定转速并保持稳定。由于双闭环直流可逆调速系统实际静特性曲线与理想静特性曲线有一些差别, 并且由于有恒定的负载转矩存在, 两者相比理想空载状态下都有一定的转速降落, 但是模糊 PI 控制的调速系统具有更小的转速降落值。因此, 应用模糊 PI 控制的直流可逆调速系统具有更优良的静特性与调速性能。

### 4.3.3 突加负载转矩分析

设置直流电动机负载转矩  $T_l$  初始值为零 (理想空载状态), 1.4 秒时突加负载转矩到额定负载转矩  $1.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 并持续 0.2 秒的时间然后撤除。仿真结果如图 15 所示。模糊 PI 控

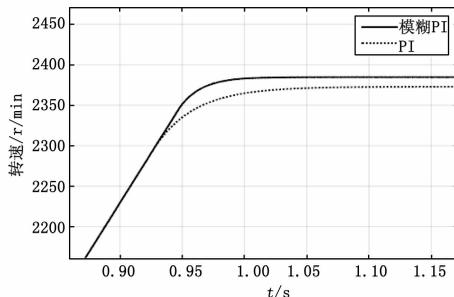


图 13 恒定负载转矩结果 (正转)

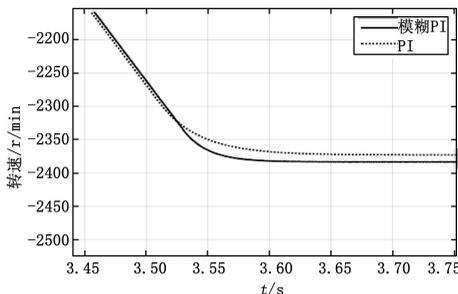


图 14 恒定负载转矩结果 (反转)

制的系统在 1.45 秒时, 降落到 2 380 r/min, 并保持恒定。PI 控制的系统在 1.55 秒左右转速降落到 2 370 r/min 并保持恒定。当负载干扰撤除后, 模糊 PI 控制的系统也是比 PI 控制的系统更迅速地恢复到原来的额定转速值。由仿真结果可知, 模糊 PI 控制的调速系统在负载突变时能更快地降落到新的转速, 而且转速降落较小, 更快速地保持稳定。并且在突变负载恢复后能更快地回到原来的转速。从而证明了模糊 PI 控制的调速系统在受到扰动时有更强的抗扰能力和更快速的恢复能力。因此, 模糊 PI 控制可应用在易受干扰影响或负载干扰比较敏感的设备当中。

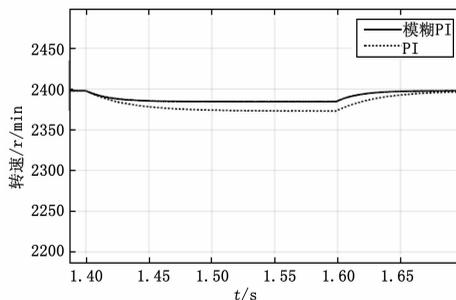


图 15 突加负载转矩结果

### 4.3.4 快速正反转切换分析

设置仿真在理想空载条件下, 即负载转矩  $T_l$  为零。给定电压  $U_n^*$  设置为周期为 1 秒, 幅值为 1 V 的方波电压信号。在双闭环可逆直流 PWM 调速系统中, 直流电机由零转速开始启动, 转速迅速上升直至到达正向给定转速值 240 r/min 并保持恒定。在 0.5 秒后方波电压信号由 1 V 阶跃变化到 -1 V, 直流电机逐渐减速到零并反向加速到反向转速给定值 240 r/min 保持稳定完成一个周期的正反转切换。仿真结果如图 16 所示。模糊 PI 控制的调速系统比 PI 控制的系统能更快地跟踪给定方