

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.007

# 基于永磁调速直流电机模糊 PID 伺服控制系统

李广伟<sup>1</sup>, 张红萍<sup>1</sup>, 刘涵睿<sup>2</sup>, 周进良<sup>2</sup>, 陈松波<sup>2</sup>

(1. 陆军装备部驻重庆地区军事代表局驻广元地区军事代表室, 四川 广元 628017;  
2. 中国兵器装备集团火控技术中心, 四川 成都 611731)

**摘要:** 为改善永磁调速直流电机调速系统的性能, 提出一种模糊 PID 控制策略。根据模糊理论的基本规则, 使用 Matlab 生成模糊控制器, 选取电机的实际参数, 依据伺服控制策略, 将模糊理论与 PID 控制技术相结合, 使用重心法解模糊化, 得到 PID 的控制参数, 并通过 Matlab 仿真对比模糊 PID 控制与单独 PID 控制对信号的影响。仿真结果表明: 模糊 PID 控制性能要优于单独 PID 控制, 可满足直流电机的高精度平稳运行。

**关键词:** 直流电机; PID 控制; 模糊理论

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Fuzzy PID Servo Control System Based on Permanent Magnet Speed-regulating DC Motor

Li Guangwei<sup>1</sup>, Zhang Hongping<sup>1</sup>, Liu Hanrui<sup>2</sup>, Zhou Jinliang<sup>2</sup>, Chen Songbo<sup>2</sup>

(1. Military Representative Office in Guangyuan District, Military Representative Bureau of Army Equipment Department in Chongqing, Guangyuan 628017, China;

2. Fire Control Technology Center of China South Industries Group Corporation, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of the speed control system of permanent magnet speed-regulated DC motor, a fuzzy PID control strategy is proposed. According to the basic rules of fuzzy theory, use Matlab to generate a fuzzy controller, select the actual parameters of the motor, combine the fuzzy theory with PID control technology according to the servo control strategy, use the center of gravity method for fuzzification, get the PID control parameters, and pass Matlab simulation contrasts the influence of fuzzy PID control and individual PID control on the signal. The simulation results show that the fuzzy PID control performance is better than the single PID control, which can meet the high precision and smooth operation of the DC motor.

**Keywords:** DC motor; PID control; fuzzy theory

### 0 引言

永磁调速直流电机作为调速系统具有结构简单、体积小、质量轻、效率高、功率因数高等优势。永磁同步电机调速的好坏成为决定电机性能优劣的重要指标。模糊 PID 通过对 3 个参数的调整, 使系统的控制性能得到改善, 并且系统的响应迅速, 鲁棒性更好, 且具有良好的动、静特性。

### 1 永磁同步电机双闭环调速设计

#### 1.1 永磁同步电机双闭环调速基本原理

在永磁同步电机运行的过程中, 电源电压波动、负载变化都会引起转速的改变。此时, 通过引入电流反馈调节及速度反馈调节, 既能有效控制电机转速的波动, 又能保持电机良好的动态性能。

转速、电流双闭环控制系统工作流程如图 1 所示。通过在系统中设置 2 个反馈调节器: 将转速

调节器 (automatic speed regulator) 的输出反馈到电流调节器 (automatic current regulator) 作为输入; 将电流调节器的输出反馈到 PWM 占空比作为输入。通过改变 PWM 占空比来实现电枢电压的调节, 从而实现调节电机转速的效果。作为此系统的主导调节器, 转速调节器的主要功能在于, 既能在动态时使电机的转速跟随其给定值而变化, 又能在稳态时使转速尽可能减小静差。

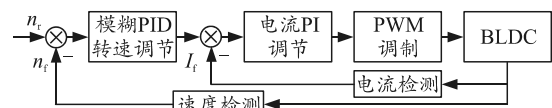


图 1 转速、电流双闭环控制系统

#### 1.2 PI 控制器调速原理

PI 控制器<sup>[1]</sup>的结构如图 2 所示。系统的实际值与反馈值相减得到系统误差, 产生的误差分别经过比例、积分后两者相加为参数  $u$ 。参数  $u$  经过限幅

收稿日期: 2020-09-04; 修回日期: 2020-10-07

作者简介: 李广伟(1982—), 男, 吉林人, 学士, 工程师, 从事雷达电子及质量监督研究。E-mail: 51214858@qq.com。

环节得到输出量  $u_{\text{tot}}$ ，两者相减再与抗积分饱和系数  $k_c$  做积反馈到积分环节前端，以构成抗积分饱和结构。 $k_c$  的值需按工程经验取值。

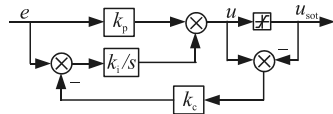


图 2 PI 控制器的结构

### 1.3 数字 PID 控制器调速原理

数字 PID 控制<sup>[2]</sup>是目前工业控制系统中应用较广泛的控制算法，借助于计算机技术的发展，通过计算机的逻辑组合及运算将模拟 PID 数字化，促使 PID 控制算法更加灵活使用，现已被广泛应用于机电、冶金、化工、精密仪器等行业中<sup>[3-4]</sup>。PID 控制系统结构原理如图 3 所示。

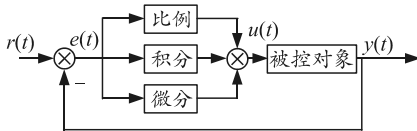


图 3 PID 控制原理

PID 控制的基本原理是基于确定的给定值  $r(t)$  与实际的输出值  $y(t)$  之间的偏差  $e(t)$ ，根据比例-积分-微分的线性组合关系确定出控制量  $u(t)$ ，再通过改变控制量来控制被控对象，相比于 PI 控制，两者都是基于误差控制，但 PID 控制多了一个微分环节，使得控制过程的运算更为复杂多变<sup>[5]</sup>，但控制结果更为精确可靠。PID 控制规律为

$$u(t) = k_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

## 2 模糊 PID 控制器的设计

### 2.1 模糊 PID 控制器的基本原理

模糊控制理论<sup>[6]</sup>是一种利用模糊数学，将控制量模糊化，然后根据实际经验和专家制定的规则进行模糊推理来控制的一种智能控制方式。将数字 PID 控制同模糊控制相结合，可综合利用二者的优点，同时提高系统的稳定性和鲁棒性<sup>[7]</sup>。

模糊 PID 控制器的结构原理如图 4 所示。该控制器的工作原理是：转速传感器实时检测电机的转速，将检测出的转速与定子转速比较，得到转速的偏差  $e$ ，转速偏差经过微分得到转速偏差率  $e_c$ ，定义  $e$  和  $e_c$  的模糊子集均为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，其分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。将偏差  $e$  与偏差率  $e_c$  作为模糊控制器的输入，然后输出 3 个 PID 参数  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  分

别作为常规 PID 控制器的比例、积分、微分参数的修正值输入量，并定义其模糊子集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

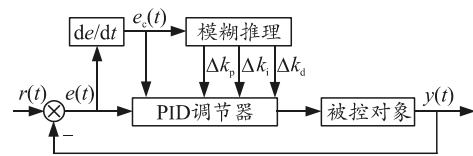


图 4 模糊 PID 控制器结构原理

解模糊常用的方法主要包括重心法、最大隶属度法、系数加权平均法等。

解模糊常用的是重心法，通过将取推理结论模糊集合隶属函数曲线和坐标轴所围成面积的重心作为代表点来实现，即：

$$u = \int x u_N(x) dx / \int u_N(x) dx \quad (2)$$

当输出变量的隶属函数为离散单点集时，则

$$u = \sum x_i u_N(x_i) / \sum u_N(x_i) \quad (3)$$

### 2.2 模糊 PID 控制器的基本规则

模糊控制规则由自然语言变量所表达的模糊条件语句组成，是控制目标和该领域专家的控制策略<sup>[8-9]</sup>，优劣性能直接影响系统的好坏。

若偏差  $e$  较大，为保证系统具有较好的快速跟踪性能，则需取偏大的比例修正值  $\Delta k_p$  及偏小的微分修正值  $\Delta k_d$ 。通过偏小的积分修正值  $\Delta k_i$ ，以免系统会出现较大的超调量。

若偏差  $e$  处于中等大小，为保证系统的响应有较小的超调量，则应取得较小比例的修正值  $\Delta k_p$ ，积分修正值  $\Delta k_i$  和微分修正值  $\Delta k_d$  的大小适中保证了系统的响应速度。

当偏差  $e$  较小时，为保证系统具有较好的稳定性性能，比例修正值  $\Delta k_p$  和积分修正值  $\Delta k_i$  应取得大一些，同时为避免系统在设定值附近出现振荡现象；当偏差率  $e_c$  较小时，微分修正值  $\Delta k_d$  可取得大些；当偏差率  $e_c$  较大时，可取偏小的微分修正值  $\Delta k_d$ 。

基于上述原则，通过“IF A and B THEN C and D and E”的形式，最终确立的  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  模糊规则如表 1—3 所示。

表 1  $\Delta k_p$  的模糊规则

$e_c$	$e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
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	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2  $\Delta k_i$  的模糊规则

$e_c$	$e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	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  $\Delta k_d$  的模糊规则

$e_c$	$e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
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	PB	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PB

图 5 是采用 Matlab 生成的模糊控制离线调整表：当转速偏差  $e=0.985$ ，转速偏差率  $e_c=0.36$ ，对应的 PID 各参数值分别为比例修正值  $\Delta k_p=-0.0181$ 、积分修正值  $\Delta k_i=-0.00025$ 、微分修正值  $\Delta k_d=-0.00453$ 。

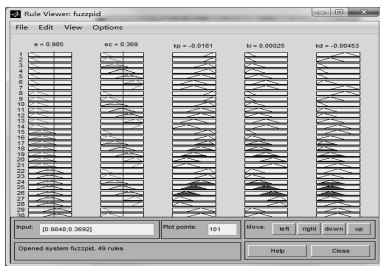


图 5 Matlab 生成模糊控制离线调整

图 6—8 为比例修正值  $\Delta k_p$ 、积分修正值  $\Delta k_i$ 、微分修正值  $\Delta k_d$  对应偏差  $e$ 、偏差率  $e_c$  得到的曲面图。

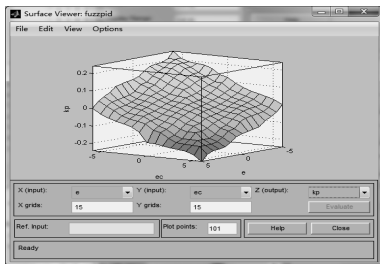


图 6  $\Delta k_p$  输出曲面图

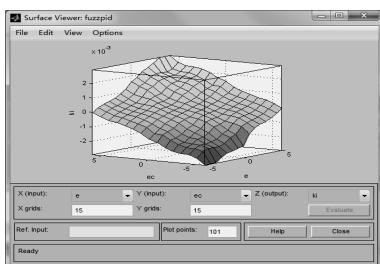


图 7  $\Delta k_i$  输出曲面图

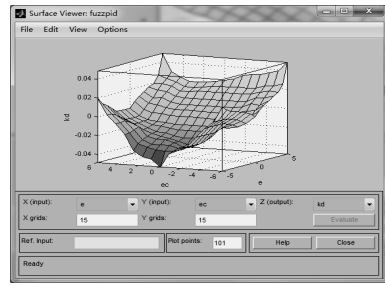


图 8  $\Delta k_d$  输出曲面图

### 2.3 模糊 PID 控制器的基本过程

使用重心法解模糊化，得到  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$ ，之后根据式(4)计算出 PID 3 个控制参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 。其中  $k_{p0}$ 、 $k_{i0}$ 、 $k_{d0}$  为数字 PID 参数。

$$\left. \begin{aligned} k_p &= \Delta k_p + k_{p0} \\ k_i &= \Delta k_i + k_{i0} \\ k_d &= \Delta k_d + k_{d0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

模糊 PID 算法实现流程如图 9 所示。

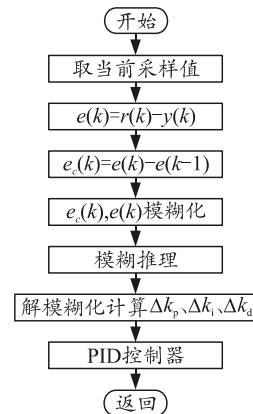


图 9 模糊 PID 工作流程

如图 10 所示，为方便程序设计，简化实时控制中的运算量，借助 Matlab 设计“二输入三输出”的模糊控制器。

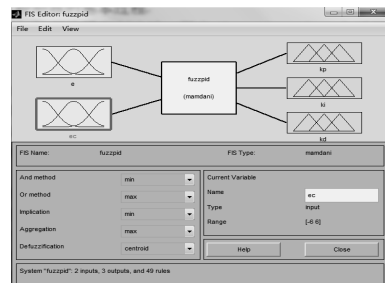


图 10 Matlab 中生成的模糊控制器

在进行模糊 PID 控制程序的编写时，只需要借助偏差  $e$  和偏差率  $e_c$ ，便可以查询调整表内的对应内容，从而确定 PID 控制参数的修正值  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  输出值，再代入式(4)中进行计算，得到 PID 的当前控制参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ ，进一步控制电机。

### 3 双闭环控制器

#### 3.1 电流环建模

电流环控制可以抑制起、制动电流，加快电流的响应过程。在实际工程中，电流环一般采用 PI 控制，并将其等效成 I 型系统<sup>[10]</sup>。

电枢的交轴电压方程为：

$$U_q = Ri_q + L_q \left( \frac{di_q}{dt} \right) + P_n \omega_r \psi_f \quad (5)$$

将直流永磁电机近似等效为一阶惯性环节：

$$i_q / U_q = 1 / (R_m + Ls) = (1/R_m) / (T_s s + 1) \quad (6)$$

式中： $T_s = L_q / R$  为电机电枢回路时间常数。

根据调节器工程的设计方法，可把电流环校正成为典型 I 型系统。电流调节器函数

$$G_{pi} = k_i \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (7)$$

式中： $\tau_i$  为电流控制器积分的时间常数； $k_i$  为电流控制器的比例增益。

忽略不计 PWM 占空比控制的死区时间对电流环的影响，把 PWM 逆变器环节等效为比例环节，则放大倍数为  $k_{PWM}$ 。得到电流环逆变器传递函数

$$G_{PWM}(s) = k_{PWM} / (1 + T_{PWM}s) \quad (8)$$

通过合并小惯性环节、PWM 逆变器环节与电流滤波器环节，可得出简化后的电流环控制框图如图 11 所示。

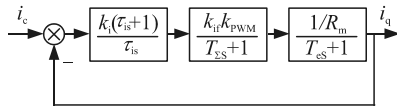


图 11 电流环简化框图

其中  $T_\Sigma = T_i + T_{PWM}$ 。

由于 PWM 逆变器时间常数  $T_{PWM}$  远小于电机的电气时间常数  $T_s$ ，为提高电流环的响应速度，抑制大惯性环节对系统延迟作用，设置控制器时间常数  $\tau_i$  与电机电气时间常数  $T_s$  相等，即取：

$$\tau_i = T_s \quad (9)$$

于是，得到系统中电流环开环传递函数为：

$$G_{ai}(s) = (k_{it} k_i k_{PWM} / R_m) / (\tau_i s (T_\Sigma s + 1)) \quad (10)$$

因为电流环在进行整定时，通常将其整定为一个典型的 I 型系统，在增加 PI 控制器后，电流环为 2 阶系统。所以可将电流环设计成 2 阶“最佳”系统得出：

$$(k_{it} k_i k_{PWM}) / (R_m \tau_i) = 0.5 \quad (11)$$

则电流环整定后的开环传递函数  $G_{ai}(s)$  为：

$$G_{ai}(s) = \frac{1}{T_\Sigma s} \approx \frac{1}{2T_\Sigma s} \quad (12)$$

从式(12)可以看出： $T_\Sigma$  值很小，电流环闭环特征可以近似为时间常数为  $2T_\Sigma$  的 1 阶惯性环节。得到电流环的闭环传递函数为：

$$G_{ad}(s) = \frac{1}{2T_\Sigma s + 1} \quad (13)$$

#### 3.2 速度环建模

电流环是速度环的内环，同时电流环的响应速度为速度环的 8~10 倍。将电流环等效为速度环的一个 1 阶惯性环节。通过等效处理，得出简化后的速度环框图如图 12 所示。

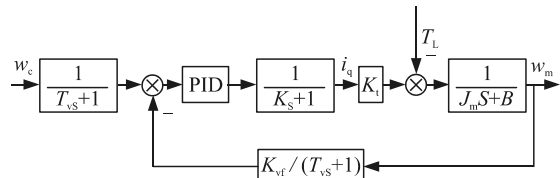


图 12 速度环简化框图

在忽略负载扰动  $T_L$  的影响时，由图 12 可得到没有设置速度控制器前系开环传递函数：

$$G_{vol}(s) = \frac{k_{vf} k_t}{(J_m s + B)(T_v s + 1)(K_s s + 1)} \quad (14)$$

式中： $K = 2T_\Sigma$ ； $T_v$  为速度环滤波器的时间常数； $K_{vf}$  为速度环检测环节的反馈系数； $K_t$  为转矩系数。

笔者采用电机为宏达 132SYX 系列稀土永磁调速伺服电动机，其详细参数如表 4 所示。

基于表中参数，可得到速度环传递函数：

$$G_v(s) = k_t / ((J_m s + B)(K_s s + 1)) = 502\,569.96 / (s^2 + 5\,884.24s + 11\,411.856) \quad (15)$$

表 4 电机参数

参数	数值
额定功率/kW	1.5
额定转速/(r/min)	3 000
额定电流/A	11.2
电枢电感/mH	2.4
机械时间常数/ms	14.6
转动惯量/(N·mS <sup>2</sup> ×10 <sup>-6</sup> )	5 150
电流环反馈滤波常数/μs	35
速度检测放大系数 $K_{vf}$	1
额定转矩/(N·m)	5
额定电压/V	160
直流电阻/Ω	0.56
反电势系数 $V/K_r$	47
电气时间常数/ms	4.3
转矩系数/(N·m/A)	0.44
PWM 时间常数/μs	50

### 3.3 模糊 PID 控制与 PID 控制速度环的比较

如图 13、图 14，在 Simulink 中建立直流电机的模糊 PID 速度环控制器。

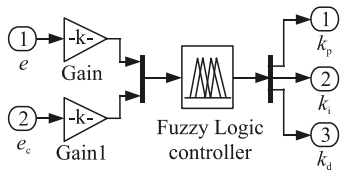


图 13 直流电机模糊 PID 控制模糊模块

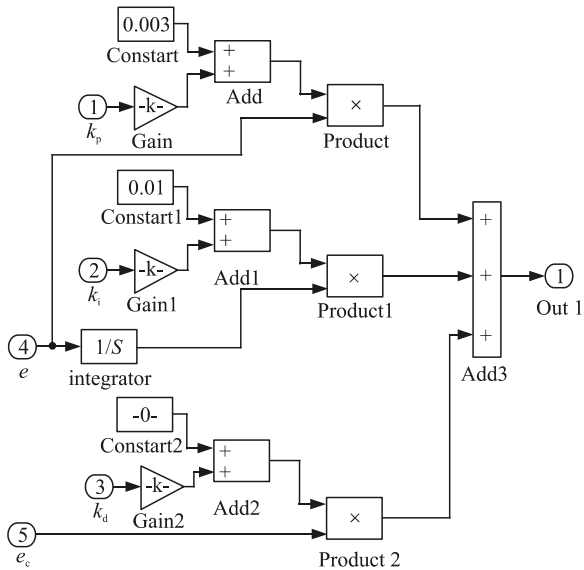


图 14 直流电机模糊 PID 控制解模糊模块

基于模糊 PID 控制器的直流电机伺服控制系统的工作流程如下：

- 1) 把误差  $e$  及其变化率  $e_c$  与量化因子  $k_e$  和  $k_{e_c}$  相乘，变换到模糊论域 E 和 EC；
- 2) 通过 E 和 EC 的模糊隶属图，确定误差及其变化率所在的模糊区间和隶属度；
- 3) 通过模糊化后的误差及其变化率，依据  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  模糊规则表，找出被激活的模糊规则，并通过计算得出每条被激活规则相对应的隶属度；
- 4) 基于  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的模糊隶属图，用重心解模糊法，得出精确的  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  所对应的模糊推理值，将其与响应比例因子  $K_{pG}$ 、 $K_{iG}$ 、 $K_{dG}$  相乘，得到各参数修正值  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$ ；
- 5) 将计算出的  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  与之前设定的 PID 参数值  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$  和  $K_{d0}$  相叠加，可得 PID 的控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ ，再把调节好的参数值按 PID 控制原理进行运算处理，最后结果便可用于控制直流电机的运动。

将模糊环节与解模糊环节进行封装，并将 PID 控制器与模糊 PID 控制器并联，共用一个信号源与

示波器<sup>[11]</sup>，将速度环的开环被控对象模型放入控制器中。图 15 为直流电机模糊 PID 控制与 PID 控制，图 16 为 2 种控制方法的单位阶跃响应曲线。

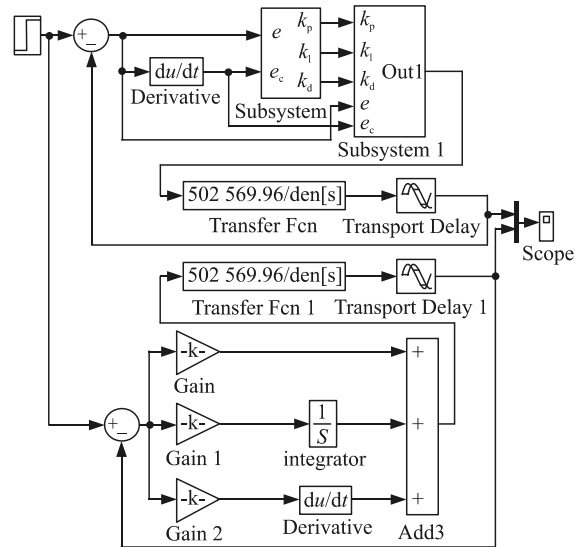


图 15 直流电机模糊 PID 控制与 PID 控制

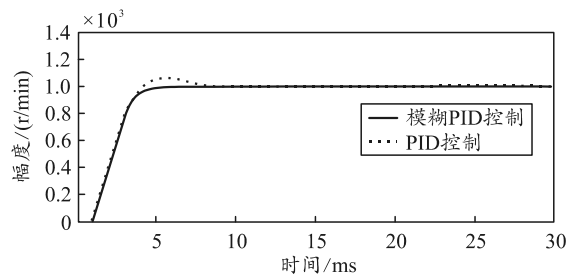


图 16 2 种控制方法的单位阶跃响应曲线

表 5 列出了 2 种控制器的调节时间  $t_s$ 、超调量  $\sigma\%$ 、上升时间  $t_r$ 、峰值时间  $t_p$  和稳态误差  $e_{ss}$ 。

表 5 2 种控制方法的性能指标

控制方法	$t_r/ms$	$\sigma/\%$	$t_s/ms$	$t_p/ms$	$e_{ss}$
PID	2.33	6.2	5.11	1.28	0
模糊 PID	2.28	0	0.82	0	0

从表中可以看出：模糊 PID 的上升速度、响应速度和调节速度均要优于 PID 控制，且 2 种控制方式的稳态误差均为 0。

## 4 结论

总体来说，理想状态下搭建的直流电机控制模型，在忽略电机运动过程中的外界干扰及负载扰动等因素的影响时，2 种控制方法下的控制性能均表现较好。基于较好的控制效果基础上，通过对比 2 种控制方法下的仿真结果可得出，模糊控制可提高系统的响应速度及精度。模糊 PID 控制要优于单独 PID 控制。