

# 模糊 PID 算法在极向场电源控制系统中的仿真

张明<sup>1</sup>, 傅鹏<sup>2</sup>, 刘克富<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**在托卡马克装置中,极向场电源系统的负载线圈由于受等离子体电流的影响,其参数具有时变、非线性、不确定等因素,常规 PID 控制虽然原理简单,容易实现,但难以实现对其进行较高精度的控制。该文将智能控制和 PID 控制结合起来,研究了一种模糊自适应 PID 控制算法,利用这种控制算法在线推理 PID 控制器的三个参数  $k_p, k_i, k_d$ , 来实现对这种时变非线性系统的实时反馈控制,并采用 MATLAB 语言编程仿真,仿真结果显示,此算法灵敏度高,有较好的稳定性和鲁棒性,用于极向场电源的控制系统中,将可以达到较好的控制效果。

**关键词:**模糊控制;极向场;仿真

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A

## The Simulation of Fuzzy - PID Arithmetic in PF Power Supply System

ZHANG Ming<sup>1</sup>, FU Peng<sup>2</sup>, LIU Ke - Fu<sup>1</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei Anhui 230031, China)

**ABSTRACT:** In TOKMAK experimental equipment, the parameters of poloidal field (PF) power supply load coils are variable, nonlinear and uncertain, for the mutual inductance of the plasma current. Conventional PID controller is simple and actualized easily, but it is not good at high precision control for the system. This paper studies a fuzzy adaptive PID control arithmetic combining the intelligent control with PID control which can compute three parameters  $k_p, k_i, k_d$  of PID controller online, to achieve real - time feedback control to the nonlinear and variable system, and simulate with MATLAB language. Simulation results show that the arithmetic is high sensitive, and has very stable and robust performance. The control efficiency will be better used in PF power supply control system.

**KEYWORDS:** Fuzzy control; Poloidal field; Simulation

### 1 引言

极向场电源是托卡马克装置的重要子系统,它为等离子体的产生和加热提供能量,为等离子体的约束和维持提供必要的磁场位形,也为等离子体电流、位置、形状、分布和破裂提供必要的控制手段。准确实时地跟踪预设电流波形,这对于聚变实验的成败与效率,有着至关重要的作用。常规的 PID 控制原理简单、容易实现、稳态无静差,长期以来在控制领域有着广泛的应用,并取得了良好的控制效果。传统的 PID 控制主要是控制具有确切模型的线性过程,极向场线圈由于其运行条件的限制,其模型参数具有非线性、时变性和不确定性,常规的 PID 控制实现对其精确控制有一定的困难。模糊控制对数学模型的依赖性弱,不需要建立过程的精确数学模型,因此,模糊 PID 控制系统能在控制过程中对不确定的条件、参数、延迟和干扰等因素进行检测分析,采用模糊推理的方法实现 PID 参数  $k_p, k_i$  和  $k_d$  的在线自整定,不仅

保持了常规 PID 控制系统的原理简单、使用方便、鲁棒性较强等特点,而且具有更大的灵活性、适应性、精确性等特性,是目前较为先进的一种控制系统。本文研究了参数模糊自整定 PID 控制器,应用模糊推理的方法实现对 PID 参数进行在线整定,并用 MATLAB 语言进行编程仿真。仿真结果表明,这种模糊 PID 算法在极向场电源控制系统中可以过到较好的控制性能。

### 2 自适应模糊 PID 控制器的原理与设计

#### 2.1 PID 控制器的原理

常规 PID 控制器可用以下的位置算法来描述:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

式中  $k$ ——采样序号,  $k = 0, 1, 2$

$u(k)$ ——第  $k$  次采样时刻的输出值;

$e(k)$ ——第  $k$  次采样时刻输入的偏差值;

$e(k-1)$ ——第  $k-1$  次采样时刻输入的偏差值;

$k_p$ ——比例系数  
 $k_i$ ——积分系数  
 $k_d$ ——微分系数

从系统的稳定性,响应速度,超调量和稳态精度等各方面来考虑, $k_p, k_i, k_d$ 的作用如下:

1) 比例系数  $k_p$  的作用是加快系统的响应速度,提高系统的调节精度。 $k_p$  越大,系统的响应速度越快,系统的调节精度越高,但容易产生超调,甚至会导致系统不稳定。 $k_p$  取值过小,则会降低调节精度,使响应速度缓慢,延长调节时间,使系统静态,动态特性变坏。

2) 积分系数  $k_i$  的作用是消除系统的稳态误差。 $k_i$  越大,系统的静态误差消除越快,但过大,在响应过程初期会产生积分饱和现象,从而引起响应过程的较大超调。若过小,将使系统静态误差难以消除,影响系统的调节精度。

3) 微分系数  $k_d$  的作用是改善系统的动态特性,其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化,对偏差变化进行提前预报。但  $k_d$  过大,会使响应过程提前制动,从而延长调节时间,而且会降低系统的抗干扰性能。

PID 参数的整定必须考虑到在不同时刻三个参数的作用以及相互之间的关系。

### 2.2 模糊自适应 PID 控制系统的结构

模糊自适应 PID 控制系统主要由参数可调整 PID 控制器和模糊推理两部分组成,模糊自适应 PID 控制器以误差  $e$  和误差变化率  $ec$  作为输入,可以满足不同时刻的  $e$  和  $ec$  对 PID 参数自整定的要求。利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改,便构成了自适应模糊 PID 控制器,其结构如图 1 所示。

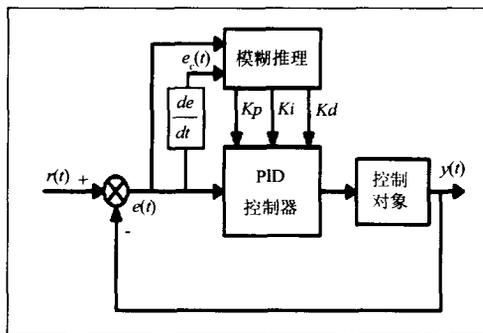


图 1 自适应模糊 PID 控制器结构

PID 参数模糊自整定是找出 PID 三个参数与  $e$  和  $ec$  之间的模糊关系,在运行中通过不断检测  $e$  和  $ec$ ,根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线修改,以满足不同  $e$  和  $ec$  时控制参数的不同要求,而使被控制对象有良好的动态和静态性能。

### 2.3 输入量和的模糊化

控制变量误差  $e$  和误差变化率  $ec$  都是计算机的采样和计算出的精确数据,而模糊推理是基于对模糊量进行逻辑判断来进行的,所以必须对  $e$  和  $ec$  进行模糊化处理,才能实现模糊控制算法。在这个模糊 PID 控制器中,输入和输出变量的模糊子集均为  $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ ,子集中元素分别代表负大,负中,

负小,零,正小,正中,正大。各变量的隶属度函数中间采用灵敏度高三角函数,两边采用正态分布函数,如图 2 所示。

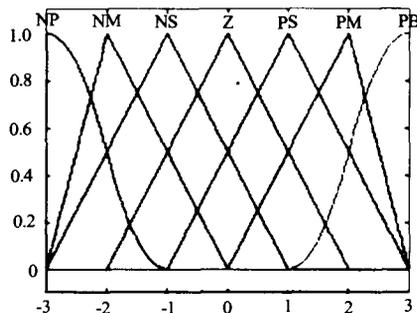


图 2 隶属度函数

由于极向场电源电流稳态运行值较大,可达几十千安,在开始运行时,将产生较大误差和误差变化率,如果以此误差和误差变化率的范围作为基本论域,将对稳态运行时控制的灵敏度产生影响。因此,在开始运行时,采用大比例系数的 PI 控制,迅速将误差缩小到一定范围,然后采用模糊 PID 控制,这样在系统开始运行时达到了较快的响应速度,在稳态运行时提高了调节精度和抗干扰性能。在这里取最大误差的 10% 作为进入模糊控制的阈值,即在  $|e| < 2000$  时,采用模糊控制,在  $|e| > 2000$  时,采用 PI 控制。

- $e$  的基本论域是  $\{-2000, 2000\}$ ;
- $ec$  的基本论域是  $\{-20000, 20000\}$ ;
- $\Delta k_p$  的基本论域是  $\{-0.06, 0.06\}$ ;
- $\Delta k_i$  的基本论域是  $\{-0.03, 0.03\}$ ;
- $\Delta k_d$  的基本论域是  $\{-0.0003, 0.0003\}$ ;
- 模糊集论域是  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ;

### 2.4 模糊控制规则及模糊推理

模糊控制规则基于 mamdani 控制规则并根据仿真情况调整,如下表 1—表 3 所示。

表 1  $k_p$  的模糊控制规则

$\Delta k_p$ \ $e$ \ $ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	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	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 2  $k_i$  的模糊控制规则

$\Delta k_i$ \ $e$ \ $ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	ZO	NB	NM	NS	ZO	ZO
NM	ZO	ZO	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	ZO	ZO	NS	NS	ZO	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	NS	NS	PS	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	PS	PS	ZO	ZO

PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	ZO	ZO
PB	ZO	ZO	NS	PM	PB	ZO	ZO

表 3  $kd$  的模糊控制规则

$\Delta kd$ \ $ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e$ 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						
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

对应于每个误差  $e$  和误差变化率  $ec$ , 都可以从模糊规则表中查出  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  对应的模糊量。对这三个模糊量采用常用的重心法去模糊, 转化为精确量, 分别代入式(1)、(2)、(3), 计算出  $k_p, k_i$  和  $k_d$ , 完成对 PID 参数的在线自校正。

$$k_p = k_{p0} + |e, ec|_p \quad (2)$$

$$k_i = k_{i0} + |e, ec|_i \quad (3)$$

$$k_d = k_{d0} + |e, ec|_d \quad (4)$$

### 3 仿真结果

根据极向场电源的实验参数建立一阶惯性滞后数学模型, 用 MATLAB 语言编程进行仿真计算, 程序中初始 PID 参数由 Z-N 法结合 SIMULINKS 的 NCD 工具整定得出, 电源输出电压范围为  $(-200, +200)$  V, 预设回路电流最大为 25KA。系统数学模型如下:

$$G(s) = \frac{1000e^{-0.00033s}}{2s + 2.75} \quad (5)$$

仿真程序中, 电流预设值采用实际电源中使用的斜坡平顶函数, 并在 1.5s 时对输出电压值加 10V 干扰, 在 2s 时对电流采样值加 1000A 干扰, 在 2.5s 时对电流预设值加 5000A 阶跃, 它们的响应波形如图 3 所示, 图 4 为这一过程的误差波形, 图 5 为这一个过程中电源的电压波形。

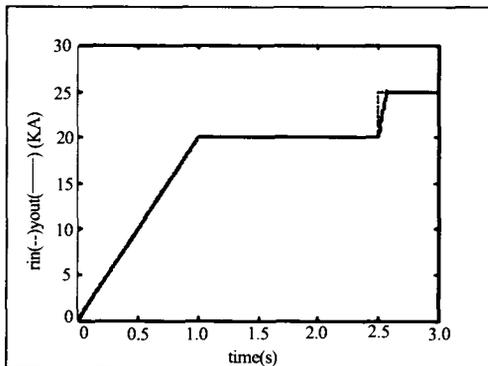


图 3 预设与响应波形

(-----是预设 rin 的波形; —是响应 yout 的波形)

### 4 结论

从上面仿真波形可以看出, 响应波形能很好地跟踪预设波形, 并具有较强的抗干扰性, 模糊自适应算法能够达到较好

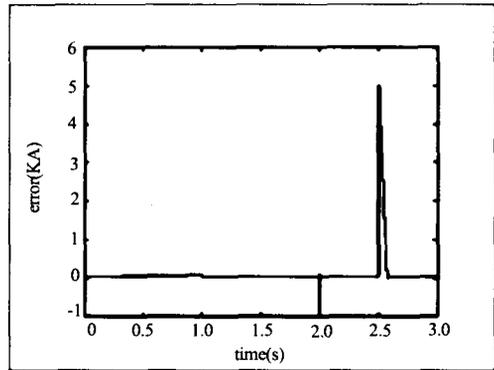


图 4 误差波形

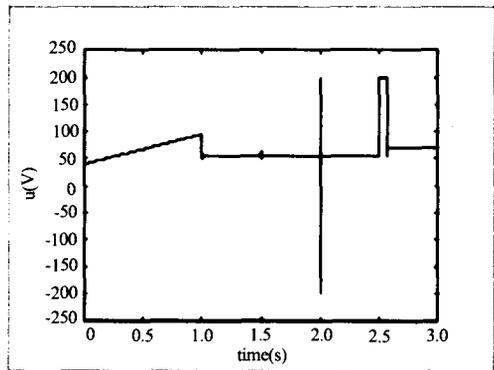


图 5 电源电压波形

的控制精度, 使系统具有较强的鲁棒性, 用于极向场电源的控制中, 可以达到较好的控制性能。

### 参考文献:

- [1] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 李士勇. 模糊控制. 神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- [4] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [5] 张会敏, 何永义. Fuzzy-PID 算法在炉温控制中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2002. 3: 27-30.

### [作者简介]



张 明(1980-), 男(汉族), 河南光山人, 华中科技大学电气与电子工程学院硕士研究生, 主要从事脉冲功率技术和核聚变装置电源的设计和控制在方面的研究;

傅 鹏(1962-), 男(汉族), 湖北荆州人, 中国科学院等离子体物理研究所研究员, 博士生导师, 主要从事核聚变装置电源的设计和控制在方面的研究;

刘克富(1963-), 男(汉族), 安徽桐城人, 华中科技大学电气与电子工程学院教授, 硕士生导师, 主要从事脉冲功率技术和等离子体物理应用等方面的研究。