

doi: 10.7690/bgzdh.2024.06.007

## 一种量化因子改进型的模糊自适应 PID 控制算法

赵欣<sup>1</sup>, 彭章君<sup>2</sup>, 刘昱博<sup>3</sup>, 郭研捷<sup>1</sup>, 施怡乐<sup>3</sup>

(1. 绵阳职业技术学院电子与信息学院, 四川 绵阳 621000; 2. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621000;  
3. 中国工程物理研究院战略技术装备发展中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对模糊 PID 控制下的动态性能问题, 提出一种量化因子改进型的模糊自适应 PID (Fuzzy-PID) 控制算法。在模糊量化环节引入模糊论域量化因子在线调整函数, 实现对模糊量化因子的实时调整; 将传统 PID 控制、传统模糊 PID 控制和量化因子改进型模糊 PID 控制, 分别在 100 kHz 和 200 kHz 的系统频率下, 进行单位阶跃输入信号下的动态性能对比实验。结果表明: 该算法在 2 种系统频率下均能实现无超调, 调节时间不超过 0.15 s, 其动态性能相较传统控制算法具有明显提升。

**关键词:** 移相全桥; 数字电源; 模糊 PID; 量化因子; 动态性能

**中图分类号:** TP17 **文献标志码:** A

## An Improved Fuzzy Adaptive PID Control Algorithm Based on Quantization Factor

Zhao Xin<sup>1</sup>, Peng Zhangjun<sup>2</sup>, Liu Yubo<sup>3</sup>, Guo Yanjie<sup>1</sup>, Shi Yile<sup>3</sup>

(1. College of Electronics and Information, Mianyang Vocational and Technical College, Mianyang 621000, China;  
2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China;  
3. Strategic Technology and Equipment Development Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of dynamic performance under fuzzy PID control, a fuzzy-PID control algorithm based on improved quantitative factor is proposed. The online adjustment function of fuzzy domain quantization factor is introduced in the fuzzy quantization link to realize the real-time adjustment of fuzzy quantization factor. The dynamic performance comparison experiments of the traditional PID control, the traditional fuzzy PID control and the quantization factor improved fuzzy PID control are carried out under the unit step input signal at the system frequency of 100 kHz and 200 kHz, respectively. The results show that the algorithm can achieve no overshoot under two system frequencies, and the settling time is less than 0.15 s, and its dynamic performance is significantly improved compared with the traditional control algorithm.

**Keywords:** phase shifted full bridge; digital power supply; fuzzy PID; quantization factor; dynamic performance

### 0 引言

模糊集合论于 1965 年由美国 L.A.Zadeh 创立, 并于 1973 年给出了模糊控制的定义和相关理论。1974 年英国 E.H.Mamdani 率先利用模糊控制语句组成模糊控制器, 并用于锅炉蒸汽的控制。随着电力电子技术的发展, 将模糊控制与传统 PID 控制相结合的模糊自适应 PID 控制具有高效、简单且易于实现的优势, 已被广泛应用于控制领域中<sup>[1-3]</sup>。

王景芳<sup>[4]</sup>提出通过增加模糊子集的方式来提高模糊论域量化精度, 实现高精度控制量输出, 但该方法使模糊规则成指数增长, 易造成模糊决策时间增加。姜庆丰等<sup>[5]</sup>提出采用非线性隶属度函数来提高模糊输入到模糊输出的量化精度。曲兴田等<sup>[6]</sup>利用增设变量判断的方法, 来提高两极端集下的判断效率。刘栩等<sup>[7]</sup>提出将模糊自适应 PID 与预测控制

相结合, 基于模糊自适应 PID 非线性控制优势的基础上利用预测模型提前预测系统输出, 实现控制量的超前计算。

在大功率电源应用领域中, 将移相控制与数字控制相结合的移相全桥数字电源, 具有高功率密度、高智能化, 已成为 500 W 以上电源应用领域的首选<sup>[8]</sup>。然而大功率移相全桥数字电源的输出具有高电压或大电流的输出特性, 当输入出现波动时, 将引发系统输出的大范围波动, 且该波动具有振幅大、难以预估的特性<sup>[9]</sup>, 采用传统模糊自适应 PID 控制难以实现模糊论域到实际输出域的全映射, 使得模糊控制量缺失, 造成系统输出波动振幅大、时间长的动态性能问题。

为提高移相全桥数字电源的动态性能, 减小系统输出波动振幅, 缩短波动调节时间, 笔者提出一种量化因子改进型的模糊自适应 PID 控制算法, 在

收稿日期: 2024-02-19; 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51979261)

第一作者: 赵欣(1963—), 女, 四川人, 硕士。

量化环节中引入模糊论域量化因子在线调整函数，该函数可根据系统当前时刻采样误差和误差变化率，对模糊量化因子进行实时调整。为验证改进型模糊自适应 PID 控制算法的有效性，将传统 PID 控制、传统模糊 PID 控制和量化因子改进性模糊 PID 控制，分别在 100 kHz 和 200 kHz 的系统频率下，进行单位阶跃输入的动态性能响应对比实验，结果表明该算法相较传统控制算法具有更好的动态性能表现。

### 1 模糊自适应 PID 控制

Fuzzy-PID 利用模糊逻辑并根据一定的模糊规则对 PID 参数进行实时优化，以克服传统 PID 控制无法实时调整 PID 控制参数、难以实现非线性控制的缺点。如图 1 所示，Fuzzy-PID 将系统输出误差和误差变化率作为控制输入，通过模糊量化、模糊决策和解模糊化 3 个环节，得到控制调整量输出作用于原控制量，实现控制量的非线性调整。

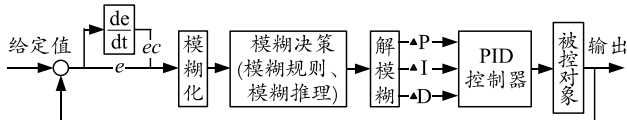


图 1 模糊自适应 PID 控制流程模糊量化

在进行模糊控制之前，首先需将系统输出实值进行模糊化处理。传统的模糊化环节，均是根据经验判断系统输出，并依据该输出范围设定模糊子集，完成模糊量化过程。此过程中模糊量化以人为判断系统输出范围为思想核心，量化因子的选择为固定常数，对系统输出进行等比例缩放处理。

$$E=e/k_1; \tag{1}$$

$$EC=ec/k_2. \tag{2}$$

式中： $e$  和  $ec$  分别为系统实际输出的误差、误差变化率； $k_1$  和  $k_2$  分别为经验预测下的量化因子比例系数； $E$  和  $EC$  分别为通过模糊量化以后得到的模糊量，量化环节将模糊量化以后的  $E$  和  $EC$  送入模糊决策环节。 $E$  和  $EC$  模糊子集的隶属函数关系如图 2 和 3 所示。

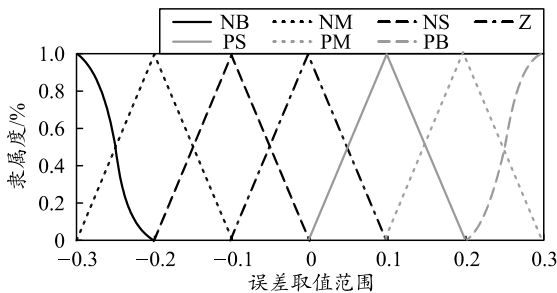


图 2 误差隶属函数区间

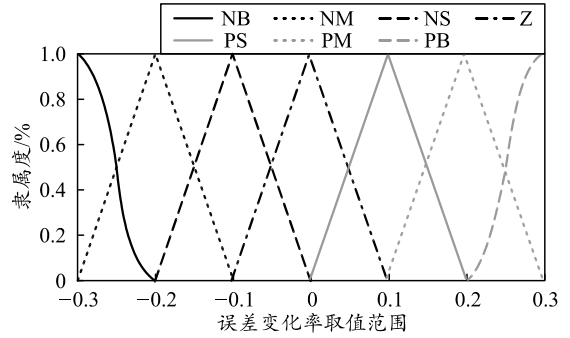


图 3 误差变化率隶属函数区间

#### 1.1 模糊决策

模糊决策环节在接收到模糊量化环节送入的模糊量  $E$  和  $EC$ ，依据预先设定的模糊规则和模糊推理机制完成模糊决策。模糊决策中包括模糊规则和模糊推理 2 个步骤。

在模糊规则中，将模糊量范围按照子集个数进行区域划分，得到基于模糊量  $E$  和  $EC$  的 2 维模糊规则如表 1—3 所示。

表 1  $K_P$  控制参数

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

表 2  $K_I$  控制参数

$e$	$ec$						
	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  $K_D$  控制参数

$e$	$ec$						
	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	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

模糊量  $E$  和  $EC$  的模糊区间，依照上表所示的 P、I、D 3 个控制参数的模糊规则表，得到与 P、I、D 3 个控制参数所对应的模糊区间。然后将得到的模糊区间经过如下所示的模糊推理以后，最终得到 P、I、D 控制参数调整量的模糊值。模糊推理机制如图 4 所示。

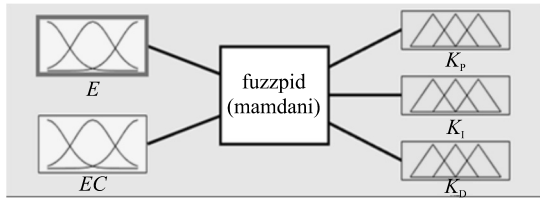


图 4 模糊推理机制

### 1.2 解模糊化

解模糊化为模糊控制的最后一个环节，将模糊决策环节最终得到 P、I、D 控制参数调整量的模糊值，经过解模糊化，得到最终用于 PID 在线调整的实值。解模糊化同模糊量化环节相似，属于模糊量化的逆向操作。解模糊化后的 PID 控制参数的隶属函数关系如图 5—7 所示。

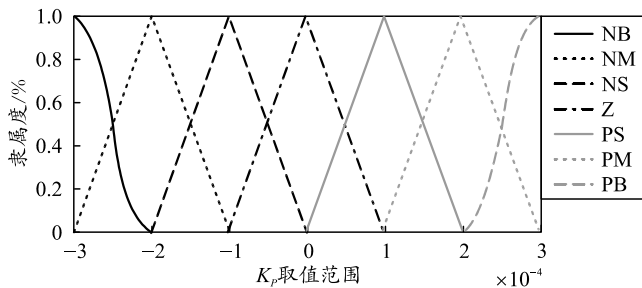


图 5 控制参数调整值 P 隶属函数区间

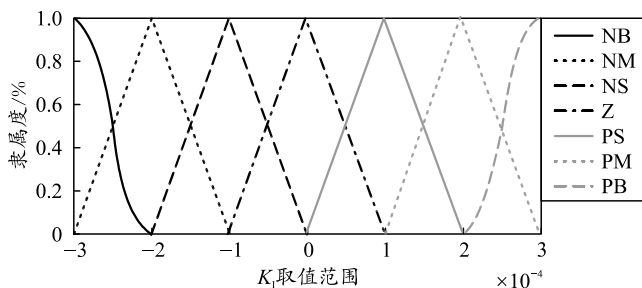


图 6 控制参数调整值 I 隶属函数区间

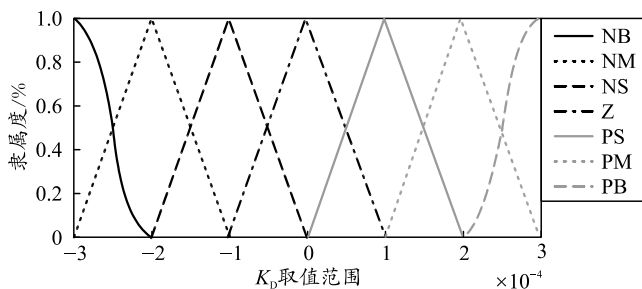


图 7 控制参数调整值 D 隶属函数区间

## 2 改进型模糊自适应 PID 控制

通过分析发现，移相全桥数字电源具有非线性、时变以及高频开关的系统特性，其实际输出与给定值的误差  $e$  和误差变化率  $ec$  的变化范围往往难以预估。根据经验设定的固定量化因子，难以实现输出域到模糊域的全映射，使模糊控制量在某些误差和

误差变化率的极值上出现模糊量部分丢失，造成控制量缺失，出现控制量长时间寻优即系统输出出现长时间、大范围波动的现象；因此，笔者提出引入误差和误差变化率量化因子在线调整函数构成具有自适应量化的改进型模糊自适应 PID 控制算法，弥补因实际输出与给定值的误差和误差变化率的范围难以预估的缺陷，提升其动态性能品质。

### 2.1 误差量化因子在线调整函数

移相全桥数字电源的系统输出具有非线性，在实际误差范围到模糊论域的量化因子  $K_e$  的函数设计时，结合了 Bang-bang 算法的控制思想；且考虑到当前误差值大于模糊论域范围的边界值时，其量化因子因随着当前误差值的增大而减小的反比例关系，且系统具有采样频率高、时间间隔小的特性，取值往往较小，正好满足当误差值极大时量化因子应适当缩小的关系；当误差值处于进入稳态的中间阶段时，误差  $e(k)$  的量化应随其增加而增加，且应考虑论域边界值与量化因子的反比关系。综上所述，建立模糊控制输入误差  $e(k)$  的量化因子在线调整函数：

$$K_e = \begin{cases} t_s/e(k); & e(k) > M \text{ 或 } e(k) < L \\ e(k)/M; & L < e(k) < M \end{cases} \quad (3)$$

式中： $M$ 、 $L$  分别为论域的上下边界； $t_s$  为采样时间间隔。改进以后的模糊误差量化因子为：

$$E = e/K_e \quad (4)$$

### 2.2 误差变化率量化因子在线调整函数

移相全桥数字电源系统本身是一个标准的离散系统，其实际输出也通过离散采样的方式得到。根据香浓定理，采样频率应大于其系统的开关频率，采用高频开关的移相全桥，其开关频率大多为 100 kHz 以上；因此，采样的时间间隔很短，并结合前面分析的误差  $e(k)$  波动可知，其误差变化率  $ec(k)$  实际输出范围到模糊论域的量化范围更大。相较于  $e(k)$  的量化， $ec(k)$  的量化则更多是受采样时间间隔和当前时刻误差  $e(k)$  以及上一个时刻误差  $e(k-1)$  的影响。

在误差变化率  $ec$  的量化因子  $K_{ec}$  在线调整函数设计时，主要考虑以当前时刻的误差变化率  $ec(k)$  和采样时间间隔  $t_s$  2 个系统参数。其中  $K_{ec}$  应与  $ec(k)$  成反比关系，且采样时间间隔较小，可将其设为比例常数实现误差变化率量化因子的等比例缩小。综上所述，建立了模糊 PID 控制误差变化率  $ec(k)$  的

化因子在线调整函数:

$$K_{ec} = t_s / ((e(k) - e(k-1)) / t_s + t_s) \quad (5)$$

式中  $t_s$  为采样时间间隔, 改进以后的模糊误差变化率量化因子为:

$$EC = ec / K_{ec} \quad (6)$$

### 3 仿真实验与分析

为保证实验结果的真实性和有效性, 采用文献 [10] 中的移相全桥数字电源小信号动态模型传递函数, 构建控制信号 (占空比) 到输出信号 (输出电压) 的小信号扰动量动态模型如式 (7) 所示。对其进行 Z 变换, 得到如 (7) 式所示离散化传递函数。笔者选用自适应模糊 PID 的初始控制参数分别以 PID 控制参数的 80% 取值, 设置为  $P=0.028$ 、 $I=0.008$ 、 $D=0$ 。

$$G_{vd} = \frac{2.073 \times 10^{10}}{s^2 + 1.059 \times 10^5 s + 1.587 \times 10^9}; \quad (7)$$

$$G(z) = (11.5z^2 + 23z + 11.5) / (z^2 + 1.765z + 0.765) \quad (8)$$

基于上式所示移相全桥数字电源小信号动态模型的传递函数, 并以  $P=0.028$ 、 $I=0.008$ 、 $D=0$  为模糊自适应 PID 初始参数, 对传统 PID 控制、传统模糊 PID 控制与采用模糊量化因子在线调整的模糊自适应 PID 控制算法的移相全桥数字电源分别在 100 和 200 kHz 的系统频率下, 进行单位阶跃输入下的动态性能对比实验, 其 Matlab 仿真实验的结果如图 8 所示。

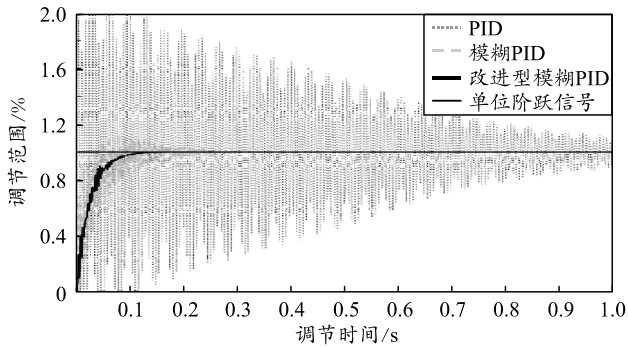


图 8 100 kHz 系统频率下阶跃信号输出响应对比

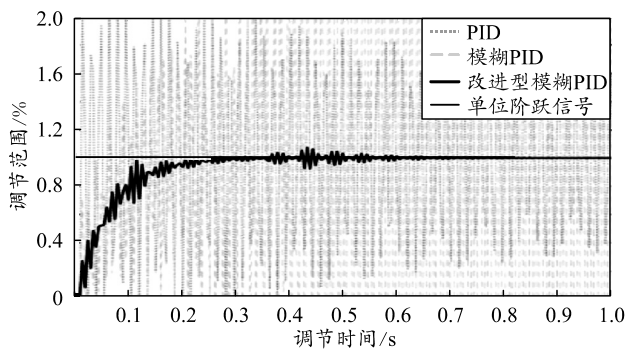


图 9 200 kHz 系统频率下阶跃信号输出响应对比

采用传统 PID 控制的移相全桥数字电源在阶跃响应下的超调量约为 40%, 调节时间约为 0.8 s, 在到达稳态以前伴有高频震荡现象; 采用模糊 PID 控制的移相全桥数字电源在阶跃响应下的超调约为 10% 左右, 调节时间约为 0.15 s, 在稳态到达之前伴有高频等幅震荡现象; 所提量化因子改进型模糊自适应 PID 控制下的移相全桥数字电源在 100 和 200 kHz 系统频率下的阶跃响应下, 其动态性能具有明显提升。仿真结果对比如表 4 所示。

表 4 仿真结果对比

控制策略	频率/Hz	超调量/%	调节时间/s
传统 PID	100	40	0.80
	200	∞	∞
传统模糊 PID	100	10	0.15
	200	∞	∞
量化因子改进型	100	无超调	0.08
模糊 PID	200	无超调	0.15

### 4 结论

笔者分析了模糊自适应 PID 的控制流程, 在传统的模糊自适应 PID 控制的基础上引入模糊量化因子在线调整函数, 用于系统实际输出区间到模糊量化区间的柔性缩放。基于标准的移相全桥数字电源小信号扰动模型, 对传统 PID、传统模糊 PID 以及量化因子改进型模糊自适应 PID, 分别在 100 和 200 kHz 系统频率下, 进行单位阶跃输入动态性能对比试验。结果表明: 引入量化因子在线调整函数的模糊自适应 PID 控制算法在 2 种系统频率下均能够实现无超调、调节时间不超过 0.15 s, 其动态性能相较于传统控制算法具有明显提升, 证明了所提改进算法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 曾祥吉, 鄢锋, 潘岩, 等. 基于模糊 PID 算法的火法炼锌配料控制系统[J]. 冶金自动化, 2020, 45(1): 44-50.
- [2] 周艳平, 庄岩. 一种粒子群模糊 PID 控制算法在温室中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(8): 116-119.
- [3] 胡包钢, 应浩. 模糊 PID 控制技术研究发展回顾及其面临的若干重要问题[J]. 自动化学报, 2001, 27(4): 567-584.
- [4] 王景芳. 移相全桥软开关直流变换器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [5] 姜庆丰, 曾文杰, 于涛, 等. 基于变论域模糊 PID 的液态熔盐堆堆芯功率控制[J]. 核动力工程, 2020, 41(2): 109-113.