

# 水轮机组调节的模糊控制算法研究

刘益剑

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 从提高模糊控制精度出发,提出了一种混合参数自调整模糊 PID 控制器结构,融合了常规 PID 控制器和模糊控制的优点. 控制器主要包括了常规 PID 控制器、增益调整型模糊控制器和直接控制型模糊控制器 3 个部分,能根据对象参数的变化合理地调整控制器的参数. 叙述了混合参数自调整模糊 PID 控制器各部分的功能和参数的选择. 针对水轮机组控制的仿真实验表明了该控制策略的有效性,与常规 PID 控制器的对比结果表明该控制算法能够提高系统的响应速度和鲁棒性.

[关键词] 模糊 PID, 水轮机, 自调整

[中图分类号] TK 73 TP273 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2005)01-0035-04

## Research on the Fuzzy Control Algorithm of Hydraulic System

LU Yijian

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210042, China)

**Abstract** To improve the control accuracy of fuzzy controller, the paper proposes a kind of hybrid parameter self-tuning fuzzy PID controller in combination with the advantages of conventional PID controller and fuzzy controller. The controller consists of three parts: the conventional PID controller, the gain-tuning fuzzy controller and the direct-action fuzzy controller, and can adjust the controller parameters with the variation of controlled objects. The functions and parameters selection of every part in the hybrid controller are described in detail. The simulation experiment on the control of hydraulic system shows that the hybrid fuzzy PID control method is effective, and the contrastive results with conventional PID controller shows that the control algorithm can improve the response and the robustness of controlled system.

**Key words** fuzzy PID, hydraulic system, self-tuning

## 0 引言

能源对社会发展的推动作用巨大的,随着人类对自身环境保护意识的提高,使得人们在获取和利用能源的同时又要考虑能源消耗对环境的影响. 水电是一种清洁能源,并且在能源供应中占据了越来越重要的地位. 因此,对产生水电的水轮发电机组的控制一直受到国内外学者的广泛关注<sup>[1]</sup>.

模糊控制是公认的三大智能控制方法之一,是在 1965 年由 Zadeh L. A. 教授首次提出的模糊集合论的基础上发展起来的. 对于复杂的控制问题,模糊控制能够很好地利用控制专家的经验信息,模拟人类的思维和语言表达形式,从而实现对工业对

象的控制,已经在各种对象的控制中得到了成功的应用<sup>[2~4]</sup>. 但是以误差和误差变化为输入的普通模糊控制器本质上是 PD 型或者 PI 型非线性控制器,从而对系统的动态性能或者稳态性能产生影响. 本文从提高模糊控制性能的角度出发,提出了一种混合参数自调整模糊 PID 控制器结构,将直接控制型模糊控制器、增益调整型模糊控制器和常规 PID 控制器相结合,共同组成了自调整模糊 PID 控制器,来提高控制器的控制性能和整个系统的鲁棒性.

本文将混合参数自调整模糊 PID 控制器应用于水轮机组的控制,在模型发生变换的情况下,本文提出的控制器仍然能够获得比较好的控制效果.

收稿日期: 2004-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70571052).

作者简介: 刘益剑 (1978-), 助教, 主要从事智能优化理论与应用、嵌入式系统开发等方面的教学与研究. E-mail: liuyijian2002@163.com

# 1 混合参数自调整模糊控制系统设计

## 1.1 模糊控制系统结构

混合参数自调整模糊 PD 控制系统结构如图 1 所示。图中  $e$ 、 $ec$  分别为误差和误差变化率。FC1 表示直接控制量型模糊控制器,用以产生控制分量  $u_2$ ; PI 控制器则是用来产生控制分量  $u_1$ ; 增益调整型模糊控制器 FC2 的作用是在控制过程中根据系统的状态在线地改变控制器的参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_u$ , 以加强整个系统的自适应能力, 提高模糊控制系统的性能。

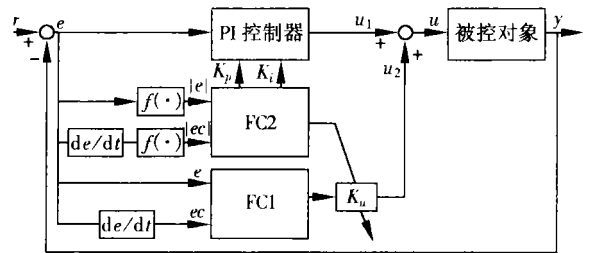


图 1 混合参数自调整模糊 PID 控制系统结构

## 1.2 PI 控制器的设计

P 控制器采用常规 PID 控制器中的比例和

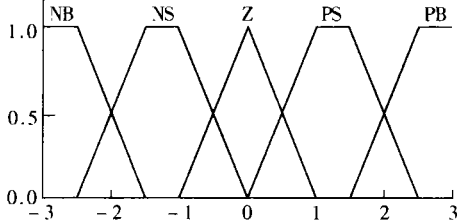


图 2  $e$  和  $ec$  的隶属度函数

以误差和误差变化率为模糊控制器的输入, 符合工业过程中人们的控制习惯, 因而容易建立比较通用的控制规则, 一般采用类似如下的控制规则:

if  $e$  is NB and  $ec$  is NB Then  $u_2$  is NB  
OR  
...  
OR  
if  $e$  is PB and  $ec$  is PB Then  $u_2$  is PB

从而可以建立如表 1 所示的控制规则。

表 1 FC1 控制规则	
$e$	$ec$
	NB NS Z PS PB
NB	NB NB NS NS Z
NS	NB NS NS Z Z
Z	NS NS Z Z PS
PS	NS Z Z PS PB
PB	Z Z PS PB PB

在模糊控制器 FC1 设计中, 选用常用的最大

积分作用, 采用如下的表达式:

$$u_1 = K_p e + K_i \int e dt$$

(1)

PI 控制器的主要目的是用来弥补直接控制量型模糊 PD 控制器 FC1 中缺少积分作用, 从而提高系统的稳态精度。由于积分系数选择不当很有可能产生积分饱和现象, 为了防止出现这种情况, PI 控制器的参数  $K_p$ 、 $K_i$  由增益调整型模糊控制器 FC2 在线调整。

## 1.3 直接控制量型模糊控制器 FC1 的设计

FC1 的输入变量采用误差  $e$  和误差变化率  $ec$ , 而输出为整个控制量  $u$  的分量  $u_2$ 。针对不同的被控对象或过程, 控制器的输入和输出变量的论域大小范围不是固定的, 因此为了使得控制器的设计更具一般性, 采用标准化处理。输入变量误差  $e$ 、误差变化率  $ec$  的论域化归到  $[-3, 3]$ , 通过输入量化因子来实现标准化的过程。在控制器的设计中, 各个模糊变量的语言值均采用“正大 (PB)”、“正小 (PS)”、“零 (Z)”、“负小 (NS)”、“负大 (NB)”5 种, 相应的隶属度函数选用三角形和梯形函数, 函数曲线如图 2 图 3 所示。

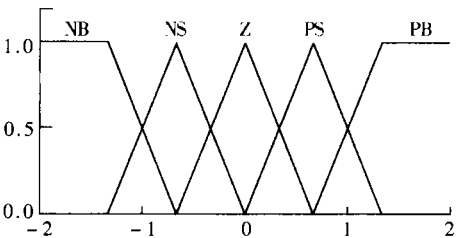


图 3  $u_2$  的隶属度函数

最小法 (min-max-inference) 模糊算子, 即“AND”采用“Min”运算, “OR”采用“Max”运算; 解模糊化方法采用常用的面积中心法 (COA)。

模糊控制器的输出比例因子  $K_u$  是模糊控制器解模糊化结果与被控对象之间的接口, 产生的结果直接作用于被控对象。因此合理的选择  $K_u$  将在很大程度上影响控制效果。在参数自调整模糊 PD 控制器的设计中, 对参数  $K_u$  进行在线调整, 调整规则则在 FC2 设计中介绍。

## 1.4 增益调整型模糊控制器 FC2 的设计

### 1.4.1 控制器结构和隶属度函数选择

模糊控制器 FC2 采用的是两输入三输出形式, 用来对 PI 控制器参数  $K_p$ 、 $K_i$  和模糊控制器 FC1 的输出比例因子  $K_u$  进行在线调整, 从而防止出现积分饱和现象, 提高整个控制系统的自适应能力。

FC2 的输入变量采用误差绝对值  $|e|$  和误差变

化的绝对值  $|e|$ , 输出的模糊变量为参数  $K_p, K_i$  和  $K_u$  与 FC1 设计相仿, 对模糊变量的论域也采用标准化处理, 误差绝对值  $|e|$  和误差变化率的绝对值

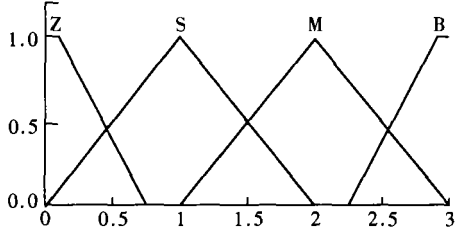


图 4  $|e|$  和  $|ec|$  隶属度函数

1.4.2 参数调整原则

要归纳出 FC2 模糊控制器对参数进行调整的规则, 首先得分析 FC2 对于参数调整的原则。

(1) FC2 对 PI 控制器参数调整原则

PI 控制器在整个控制系统中主要是为了减小系统的稳态误差以及提高系统的响应过程。对 PI 控制器主要涉及到两个参数  $K_p, K_i$  的调整, 当  $|e|$  较大时, 此时为了加快系统的响应, 应当取较大的  $K_p$ , 为了防止出现振荡应当取  $K_i = 0$  当  $|e|$  中等大小时, 为了防止出现超调, 应当减小  $K_p, K_i$  取适中; 当  $|e|$  较小时, 为了提高稳态角度, 可以适当增大  $K_i$ 。通过这样分析, 可以得到表 2 表 3 的调整规则表。

表 2  $K_p$  调整规则

$ e $	$ ec $			
	Z	S	M	B
Z	Z	S	S	Z
S	S	S	S	Z
M	S	S	S	S
B	M	M	M	S

表 3  $K_i$  调整规则

$ e $	$ ec $			
	Z	S	M	B
Z	S	S	M	S
S	S	S	M	Z
M	Z	Z	S	S
B	Z	Z	Z	Z

(2) FC2 对模糊控制器 FC1 输出比例因子  $K_u$  调整原则

模糊控制器的输出比例因子  $K_u$  对模糊控制的效果影响较大<sup>[3]</sup>, 动态的调整  $K_u$  的大小等效于动态的改变控制规则, 使得系统的响应速度和稳定性提高。当  $|e|$  和  $|ec|$  较大时, 控制系统主要是减小误差, 为了加快响应过程, 应取较大的控制量  $u$ , 所以  $K_u$  较大。当  $|e|$  和  $|ec|$  较小时, 系统接近稳定值, 这时应减小  $u$  达到稳态误差的要求,  $K_u$  应较小; 当

$|ec|$  的论域化归为  $[0, 3]$ ; 参数  $K_p, K_i$  和  $K_u$  的论域范围标准化为  $[0, 1]$ , 隶属度函数采用高斯形, 相应的隶属度函数如图 4 图 5 所示。

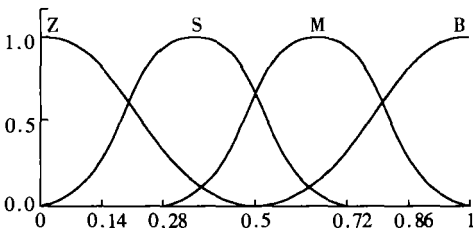


图 5  $K_p, K_i, K_u$  的隶属度函数

$|e|$  和  $|ec|$  中等大小时,  $K_u$  也应取中等大小的值。通过分析可以得到如表 4 的调整规则。

表 4  $K_u$  调整规则

$ e $	$ ec $			
	Z	S	M	B
Z	Z	S	M	M
S	S	S	M	B
M	M	M	B	B
B	M	B	B	B

2 仿真实验和结果

2.1 对象描述

为了验证本文提出的混合参数自调整模糊 PID 控制器的控制效果, 将该控制器应用到水轮发电机组的控制上, 图 6 所示水轮发电机组的控制系统图,  $M_t$  为水力矩,  $Q_t$  为流量,  $H$  为水头,  $n$  为转速。水轮发电机组的模型表示为

$$\begin{cases} M_t = M_t(H, n, \alpha) \\ Q_t = Q_t(H, n, \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

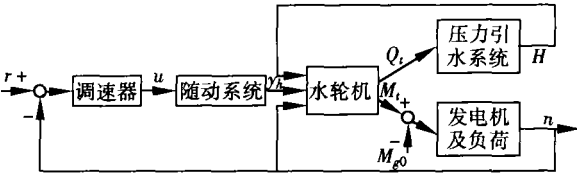


图 6 水轮发电机组调速控制系统

考虑压力引水系统、发电机、负载以及电液伺服系统的动态特性, 将系统进行线性化处理, 得到如图 7 所示的线性化系统方框图, 将图 7 化简得到系统的数学模型为 ( $m_{g0} = 0$ ).

$$G(s) = \frac{x(s)}{u(s)} = \frac{1}{T_y s + 1} \cdot \frac{e_y - (e_{qy} e_h - e_{qh} e_y) T_w s}{e_{qh} T_w s + 1} \cdot \frac{1}{T_a s + e_g} \quad (3)$$

(2) 式中,  $T_a$  是机械负载时间常数,  $T_w$  是压力引水系统的时间常数, 其余的均为系统参数。这里其数值分别为  $e_{qh} = 0.359, e_g = 1.190$

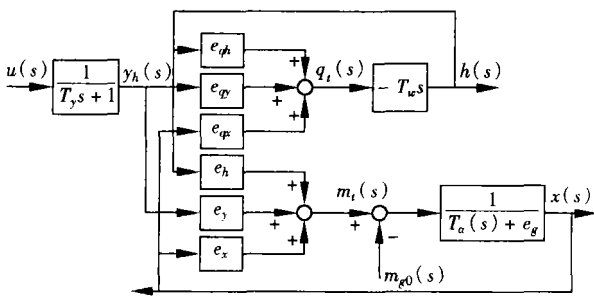


图 7 水轮机组的近似线性化模型

$$e_{q\gamma} = 0.930 \quad e_h = 0.835 \quad T_w = 1.27 \quad T_a = 9.06 \quad T_\gamma = 0.02 \quad e_x = -0.761 \quad e_g = 0.50$$
代入(3)式可得系统的数学模型为:

$$G_{21}(s) = \frac{-0.3518s + 0.9437}{0.0655s^3 + 3.4286s^2 + 7.6607s + 1} \tag{4}$$

2.2 仿真结果

将本文提出的参数自调整模糊 PID 控制器应用于水轮发电机组模型  $G_{21}$  的控制, 被控对象  $G_{21}$  的阶跃响应如图 8 中曲线 a 所示, 可以看出在混合参数自调整模糊 PID 控制器的作用之下, 系统能够快速响应, 并且超调量很小.

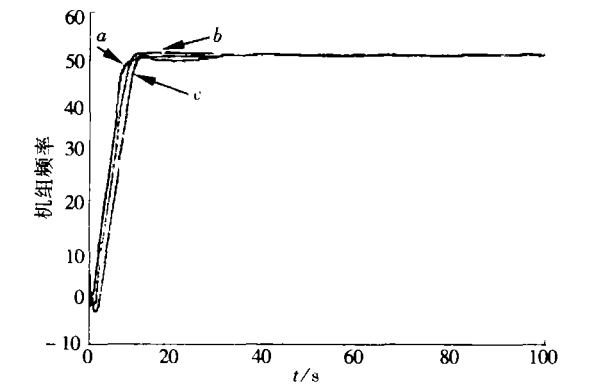


图 8 混合参数自调整模糊 PID 控制响应曲线

进一步考虑在被控对象发生改变时控制器的鲁棒性. 在工况发生改变时, 得到下列不同的水轮机组模型:

$$G_{25}(s) = \frac{-0.5653s + 0.6822}{0.0587s^3 + 3.0617s^2 + 6.5511s + 1} \tag{5}$$

$$G_{31}(s) = \frac{-0.4961s + 0.3814}{0.0597s^3 + 3.1003s^2 + 5.8539s + 1} \tag{6}$$

保持  $G_{21}(s)$  控制时的控制器参数, 将被控对象分别变为  $G_{25}(s)$  和  $G_{31}(s)$ , 得到相应的控制曲线如图 8 中曲线 b、c 所示.

从上述控制曲线可以看出, 虽然对象模型发生了改变, 但是在混合参数自调整模糊 PID 控制器的作用之下, 能够很好的适应对象参数的变化, 整个控制系统响应快速、超调量小, 具有较强的鲁棒性.

3 结论

水轮机组由于具有不确定性和时变性, 因而其动态特性具有多模型特征. 本文提出一种混合参数自调整模糊 PID 控制策略, 在水轮机组模型发生明显变换的情况下, 仍然获得了比较好的控制效果, 整个控制系统具有较强的鲁棒性, 结果表明混合参数自调整模糊 PID 控制器是有效的.

[参考文献]

[1] 乔俊飞, 孙雅明, 杜红卫. 水轮发电机组的一种自适应调速方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 1-4.

[2] 唐晓琪, 谢克明. 模糊神经网络控制倒立摆系统 [J]. 太原理工大学学报 (自然科学版), 2003, 34(1): 80-82.

[3] 朱伟兴, 马长华, 毛罕平, 等. 比例因子的选择对模糊控制器鲁棒性的影响 [J]. 江苏理工大学学报 (自然科学版), 2001, 22(2): 75-78.

[4] 于凤仙, 连华, 张力军. 模糊神经网络控制器在飞行器姿态控制中的应用 [J]. 航天控制, 1999, 17(1): 43-49.

[责任编辑: 刘健]