

# 水轮机调节系统的模糊神经元控制

钱鑫,张光辉,黄燕艳,施围

(西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049)

**摘要:** 水轮机调节系统具有非线性和时变性的特性,传统的PID控制器无法获得高性能的调速系统。针对水轮机调节系统的上述特性,在常规模糊控制的基础上,采用径向基函数神经网络来逼近过程模型,并设计了自适应神经元来在线优化控制器的输出。理论分析和仿真结果表明,这种控制策略与传统的PID控制和模糊控制相比,能够得到更快的响应速度和更好的控制效果。

**关键词:** 水轮机; PID控制; 模糊控制; 径向基函数; 自适应神经元

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2001)12-0043-05

## 1 引言

PID控制器具有结构简单、易行、稳态精度高等优点而被广泛应用于大多数工业过程控制中。但是传统的PID控制适用于可精确建模的确定性控制系统,对于非线性系统,往往不能取得令人满意的控制效果,而采用分段的PID控制,则存在需整定的参数多、工作量大等问题。水轮机调节系统是一个包含有水流、机械、电气一体的具有非最小相位、非线性时变特性的复杂闭环自动调节系统<sup>[1]</sup>,很难甚至不能建立系统精确的数学模型,且其过程参数和结构在运行中甚至发生变化,使得对其性能的精确分析和计算都较为困难。因此采用PID控制器,对不同工作点的适应性差,系统的控制品质差。随着大容量机组和大型互联电力系统的出现及其对电力系统自动控制要求的提高,对其控制品质提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。模糊控制和神经网络控制是近十几年来发展起来的智能控制方法,它们不需要控制对象精确的数学模型,且具有较强的容错能力,是处理控制系统中不精确性和不确定性的一种有效方法。由于模糊控制的稳态精度较低,而神经元需要不断的学习调整,使得响应速度较慢。为了实现较精确的控制效果,本文在水轮机模糊控制的基础上,设计了一个自适应神经元控制器,利用神经元的自学习能力,在线优化模糊控制器的输出<sup>[2]</sup>,并设计了径向基函数(Radial Basis Function,简称RBF)神经网络来识别水轮机的数学模型<sup>[3]</sup>,为调节神经元控制器提供系统输出对输入的倒数。仿真结果表明,这种控制方法优于PID和模糊控制,明显改善水轮机调节系统的控制品质。

## 2 自适应模糊神经元控制器的设计

由于水轮机组具有的高阶、非线性、变结构和变参数的特性,采用常规PID控制很难得到满意的控制效果。考虑到模糊逻辑具有较强的知识表达能力,神经元强大的自学习和数据的直接处理能力,将两者的优点结合起来,构成模糊神经元混合控制器(图1虚线框中部分,模糊控制器结构如图2所示)。水轮机调节系统的控制结构如图1所示,该系统由模糊神经元控制器、电液随动系统、引水管、水轮机、发电机、负载等环节构成。

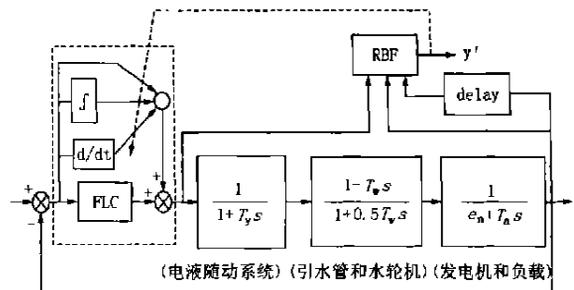


图1 水轮机调节系统的控制结构框图

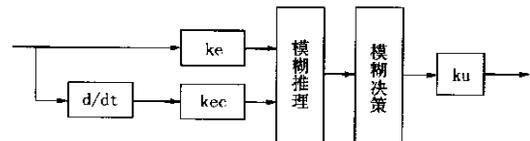


图2 模糊控制器的结构图

### 2.1 模糊控制器的设计

本文选用二维模糊控制器。控制器的输入分别为误差 $e$ 和误差的变化率 $\dot{e}$ ,输出为控制量 $u_1$ ,相应的模糊语言变量分别为 $E$ 、 $EC$ 和 $U$ , $ke$ , $kec$ 和 $ku$ 为相应的量化因子。为方便起见, $E$ 、 $EC$ 和 $U$ 取相同的模糊子集:

$E = EC = U = \{ PB \quad PM \quad PS \quad ZE \quad NS \quad NM \quad NB \}$

其中:  $PB$ 、 $PM$ 、 $PS$ 、 $ZE$ 、 $NS$ 、 $NM$ 、 $NB$  分别表示“正大、正中、正小、零、负小、负中、负大”。

通过对水轮机组的综合分析和实际操作经验, 制定出模糊控制规则表如表 1。隶属函数取均匀三角形函数, 解模糊采用重心法, 应用 Sum-Product 推理法, 根据模糊控制规则表进行计算, 就可以得到控制决策表, 具体方法参考文献[4]。

表 1 模糊控制规则表

U	EC	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E								
NB		NB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE
NM		NB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE
NS		NM	NM	NM	NM	ZE	PS	PS
ZE		NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS		NS	NS	ZE	PM	PM	PM	PM
PM		ZE	ZE	PM	PB	PB	PB	PB
PB		ZE	ZE	PM	PB	PB	PB	PB

### 2.2 RBF 网络辨识系统模型

RBF 网络是一种性能良好的前向网络, 它不仅具有全局逼近性质, 而且具有最佳逼近性能。BP 网络用于函数逼近时, 往往存在局部极小值和收敛速度慢等缺点, 而 RBF 网络参数的调整可采用线性调整, 不存在局部最优问题, 并且其在逼近能力和学习速度等方面均优于 BP 网络。基于上述优点, 我们采用 RBF 网络来逼近整个系统的模型, 为调节自适应神经元控制器的权值提供输出对输入的倒数  $dy/dt$ 。本文中网络的结构选用两层结构, 隐层的输出函数选用高斯函数。

RBF 网络总体的输入输出响应函数为:

$$y_j(X) = \sum_{i=1}^m w_{ij} Z_i(X) \quad (1)$$

其中:  $y_j$  为第  $j$  个输出神经元的输出值;  $w_{ij}$  为输

入层与隐层之间的连接权值;  $Z_i(X) = e^{-\frac{x-c_i}{\sigma_i}^2}$  为隐层神经元的输出,  $C_i$  为第  $i$  个基函数的中心点,  $\sigma_i$  为决定基函数围绕中心点宽度的任意数。

连接权的学习方法如下:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta (Y - y_j) Z_i(X) / Z(X)^2 \quad (2)$$

为学习速率,  $Y$  为系统的理想输出。

### 2.3 神经元自适应 PID 的调整算法

单神经元具有自学习、自适应能力和较强的鲁棒性, 图 1 中的单神经元控制器相当于一个在线自适应 PID 控制器, 通过调节神经元的权值来实现自适应和自组织功能, 优化控制器的输出, 实现系统的最优化控制。而且单神经元调节器本身含有积分作用, 因此可以消除 PID 型模糊控制器控制时的静差和设定点附近的极限环振荡。

单神经元的输入为:

$$x_1 = e(t), x_2 = \int e(t) dt, x_3 = \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

相对应的神经元权值为  $W_1(t), W_2(t), W_3(t)$ 。

单神经元控制器的输出为

$$u_2 = \sum_{i=1}^3 W_i(t) x_i(t) \quad (4)$$

其中  $i = 1, 2, 3; W_i(t) = W_i(t) / \sum_{i=1}^3 |W_i(t)|$ 。

在线调整时的性能指标为:

$$J = [r - y(t)]^2 \quad (5)$$

其中:  $r$  为系统的理想输出;  $y(t)$  为 RBF 辨识模型的输出。

整个模糊-神经元控制器的输出为:

$$u(t) = u_F(t) + u_N(t) \quad (6)$$

单神经元权值的调整公式为:

$$W_i(t+1) = W_i(t) - \eta \frac{dJ}{dW_i} = W_i(t) + \eta [r - y(t)] \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} \frac{\partial u(t)}{\partial W_i} = W_i(t) + \eta [r - y(t)] \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} x_i(t) \quad (7)$$

其中:  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  分别为比例、积分、微分项的学习速率;

$$\frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} = \frac{y[u(t+1)] - y[u(t)]}{u(t+1) - u(t)}$$

### 3 系统仿真实验

系统仿真结构如图 1 所示, 计算机仿真的对象为简化电液随动系统、引水管、水轮机、发电机、负载等环节, 系统参数采用了文献[6]中的参数值:  $T_w = 1.27s, T_a = 9.06s, e_n = 1.298, T_y = 0.065$ 。由于水轮机调节系统是一个随工况条件不同结构会发生变化的系统, 为了检查所设计的控制器对对象参数发生变化时的适应性, 在  $T_y = 0.2$  时, 对系统也进行了仿真。仿真结果如图 3 所示, 其中曲线 1 为本文所设计的控制器的响应曲线, 曲线 2 为模糊控制的响应曲线。

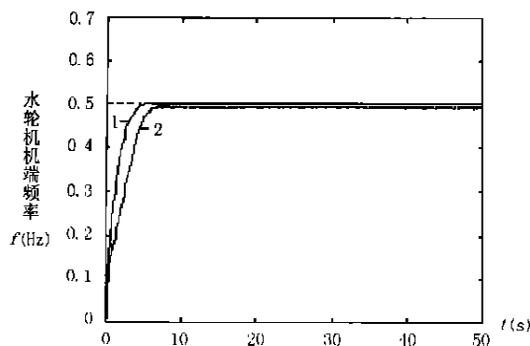
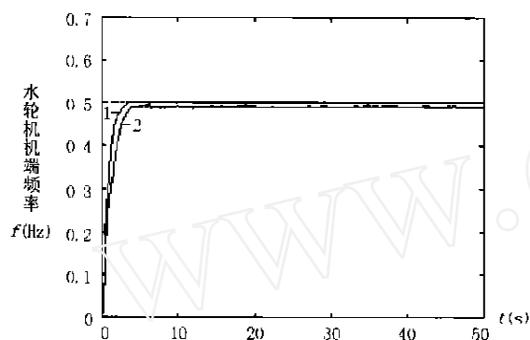
(a)  $T_t=0.065$ 时的仿真波形图(b)  $T_t=0.2$ 时的仿真波形图

图3 控制器响应曲线图

从图3所示的仿真波形图可以看出,在正常的工况下,模糊控制精度低,且存在微小振荡,本文设计的模糊神经元控制器稳态精度高,响应速度快,并且几乎没有超调;当 $T_t$ 的参数变化为0.2时,模糊控制器的震荡幅度加大,而本文设计的控制器响应速度加快,响应曲线很稳定,系统的鲁棒性和适应性大大加强。由此可见,模糊-神经元复合控制能够使水轮机调节系统获得优良的动、静态品质。

#### 4 结论

1) 本文在常规模糊控制的基础上,设计自适应神经元控制器,并采用RBF神经网络逼近被控对象模型为神经元控制器的在线学习提供依据,这种模糊-神经元复合控制器综合了模糊控制器和神经网络控制的优点,弥补各自的不足,通过对水轮机调速系统进行仿真研究,结果表明,采用本文设计的复合控制器的水轮机调节系统超调量小、响应速度快,消除了稳态偏差,并具有较强的自学习、自适应能力和鲁棒性。

2) 本文设计的模糊-神经元复合控制器具有算法简单、实时性好、应用方便的特点,是实现现代工业过程中高精度、高性能非线性系统控制的一条有效途径。

#### 参考文献:

- [1] 沈祖谟. 水轮机调节. 北京: 水利水电出版社, 1988.
- [2] 王印松, 商国才, 李彦田. 基于神经网络的水轮机调节系统的自适应PID控制. 水力发电学报, 1998, (1).
- [3] 程涛, 左静, 刘艳明, 杨叔子. 基于单个神经元的自适应模糊控制器及其应用. 控制理论与应用, 1999, 16(4).
- [4] 孙增圻. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [5] Poggio T, Grossi F. Networks for approximation and learning. Proc of the IEEE, 1990, 78(9).
- [6] 郭创新, 梁年生, 叶鲁卿. 基于神经网络实现水轮机自学习PID调节. 水力发电学报, 1997, (1).

收稿日期: 2001-04-20

作者简介: 钱鑫(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电磁暂态仿真; 张光辉(1978-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制; 施围(1942-), 男, 博士生导师, 研究方向为电力系统防护。

### Fuzzy-neural control of hydraulic turbine regulation system

QIAN Xin, ZHANG Guang-hui, HUANG Yan-yan, SHI Wei  
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

**Abstract:** With the nonlinear and time-variable characteristics of hydraulic turbine regulation system, high qualified speed adjustment system cannot be achieved with the conventional PID controller. In the light of these, we adopt radial basis function neural network to gain on the process model and design adaptive neuron to optimize the output of the controller based on the general fuzzy control. The theoretical analysis and the simulation results show that this approach is superior to the conventional PID controller and fuzzy controller in response and control effectiveness.

**Keywords:** hydraulic turbine; PID control; fuzzy control; radial basis function; adaptive neuron