

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.09.022

# 基于模糊神经网络的遥控武器站伺服系统 PID 控制器

毛保全, 汪凡, 徐礼, 徐冰川  
(装甲兵工程学院 兵器工程系, 北京 100072)

**摘要:** 针对遥控武器站伺服系统具有间隙、摩擦等非线性、不确定性特征, 将 PID 控制与模糊神经网络进行有机结合。利用多层神经网络提取模糊控制规则, 构建模糊神经网络控制器, 根据偏差 E 和偏差变化 EC 在线调整 PID 控制器的三个参数。仿真试验表明, 该控制器具有 PID 控制器精度高, 以及模糊神经网络控制器响应速度快、超调小、稳定性高的特点, 具有良好的动、稳态特性。

**关键词:** 遥控武器站伺服系统; 非线性; 模糊神经网络 PID 控制; 参数自整定  
**中图分类号:** TP183; TP273 **文献标识码:** A

## PID Controller of Robot Weapon Station Servo System Based on Fuzzy-Neural Network

Mao Baoquan, Wang Fan, Xu Li, Xu Bingchuan  
(Dept. of Weaponry Engineering, Academy of Armoured Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Because the robot weapon station servo system has nonlinear and non-determinacy character such as clearance and friction, combine the PID controller and the fuzzy-neural network. Using the neural network to get hold of fuzzy rules and construct the fuzzy neural network controller. It can adjust the three parameters of PID control online according to error and error variance. Simulation results showed that this controller strategy has the advantage of PID controller with high accuracy and the characters of fuzzy neural network PID controller with high speed, minor overshoot, good stability and better dynamic and static performances.

**Keywords:** robot weapon station servo system; nonlinear; fuzzy neural network PID control; parameter self-adjustment

### 0 引言

目前, 遥控武器站伺服系统一般采用直流伺服电机作为高低向伺服系统执行电机, 因直流电机是一个非线性的大惯性的被控对象, 而且所拖动的减速机构和传动链中含有间隙等非线性因素, 所以该伺服控制部分具有非线性、不确定性等特征。传统的 PID 控制方法对于遥控武器站这种变负载、强干扰系统只是整定出一组固定的 P、I、D 参数, 将放大倍数提高, 利用系统的饱和特性来设计控制器, 往往会出现超调量过大、过渡过程时间长, 系统的鲁棒性不强的缺点<sup>[1]</sup>。利用模糊神经网络调整 PID 参数, 可以进一步完善 PID 控制的自适应性能, 满足遥控武器站伺服系统反应速度快、定位精度高以及抗冲击、抗干扰能力强的控制要求。故对基于模糊神经网络的遥控武器站伺服系统进行研究。

### 1 遥控武器站伺服系统构成

#### 1.1 系统结构

当遥控武器站伺服系统工作时, 由光电瞄准装置计算出高低伺服系统和方位伺服系统的提前量,

从而控制高低和方位伺服系统运动, 将遥控武器站调到预定的位置上, 其方位和高低俯仰伺服系统结构基本相同, 都是典型的速度和位置双回路单输入单输出位置随动系统。以高低向伺服系统为例, 其结构框图如图 1。

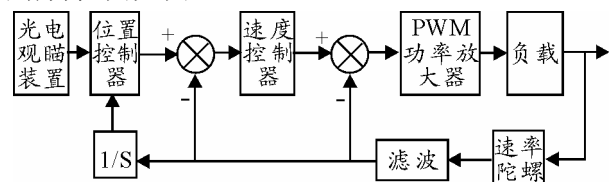


图 1 高低向伺服系统结构图

#### 1.2 系统主要非线性因素

遥控武器站伺服传动部分主要由高低蜗轮蜗杆和方向蜗轮蜗杆、齿轮传动组件及其轴承和轴承座等零部件组成, 其机械传动链存在着非线性和不确定性因素。

1) 间隙非线性。对于存在齿隙的主、从动轮的系, 当主动轮运动方向改变时, 从动轮仍保持原有位置, 一直到主动轮越过全部齿隙时, 从动轮的位置才开始改变。很多情况下, 齿隙造成系统的自振荡, 即按线性理论分析系统应当是稳定的, 但因

收稿日期: 2010-05-21; 修回日期: 2010-06-13

作者简介: 毛保全 (1965-), 男, 山西人, 教授, 北京理工大学博士后, 从事车载武器论证与总体集成仿真研究。

为有齿隙的影响，系统加电后却可能以一定的频率和振幅振荡。传动链的齿隙是各级齿轮副齿隙的合成。每个齿轮上齿隙则是齿轮本身、轴、轴承等零部件在制造、装配时的误差综合。齿轮上的齿隙还受使用中产生的温度变形、弹性变形的影响。制造装配时的各种误差和使用中的变形综合表现为齿轮副啮合节圆上的齿隙间隙。

2) 摩擦非线性。遥控武器站伺服系统采用涡轮蜗杆齿轮传动，机械摩擦不可避免。摩擦对系统的影响<sup>[2-3]</sup>，从静态方面来看，它相当于执行机构中引入死区，从而造成系统的静态误差，这一点与死区的影响相类似。从动态方面来看，当输入轴以低速平稳旋转时，摩擦非线性很可能使系统低速运动不平稳。对于遥控武器站伺服系统来说，低速不平稳将导致系统不能准确地跟踪目标，甚至有丢失目标的危险。另外，摩擦非线性的作用也明显地加长了系统的过渡过程时间。

此外，遥控武器站伺服系统还需要考虑转动惯量、发射时的冲击力矩、惯性力矩、载体倾斜等不确定因素对系统性能造成的影响，以提高控制性能。

## 2 伺服控制器设计

### 2.1 模糊神经网络 PID 控制器设计

该系统由一个标准 PID 控制器和一个模糊神经网络 PID 参数调节器组成<sup>[4-5]</sup>。模糊神经网络 PID 控制器的结构见图 2，选取偏差  $e(t)$  及其变化率作为模糊神经网络的输入，PID 控制参数作为神经网络的输出，然后输入 PID 控制器。图 2 中， $u(t)$  为控制器输出， $y(t)$  为系统输出， $y_d(t)$  为给定值。

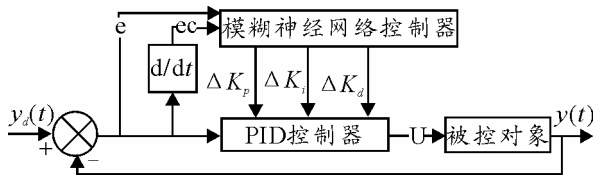


图 2 模糊神经网络 PID 控制器结构图

模糊神经网络的结构如图 3，由四层前向反馈神经网络构成：

1) 输入层：该层的每个神经元表示一个输入变量，它将输入值传到下一层中，笔者采用二维模糊控制器结构，采用偏差 E 和偏差变化 EC 作为输入变量：

$$net_j^1 = x_i^1, \quad j=i, \quad y_j^1 = net_j^1$$

其中， $x_i^1$  就是 FNN 的第  $i$  个输入， $i=1,2$ 。此

层只有 2 个输入节点。

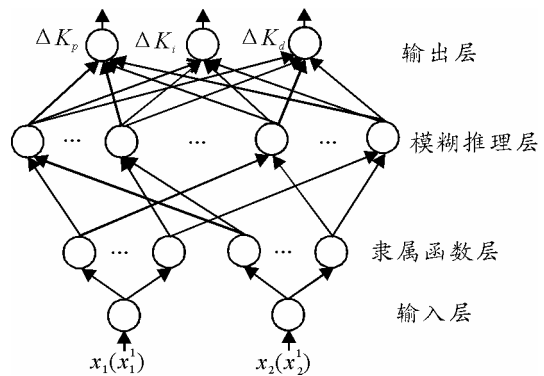


图 3 FNN 结构图

2) 模糊化层：模糊化层中的每一个神经元用于模拟输入变量的一个隶属度函数，用于计算每个输入分量输入各语言变量的模糊集合的隶属度函数，模糊化层的每个节点为 E 和 EC 的模糊子集，各有 7 个节点，分别为 {正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}，用符号表示为 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}。所以，该层的节点数为 14。

根据伺服系统的特点和实际经验，笔者采用高斯型函数来描述模糊子集，如图 4，其表达式为：

$$net_j^2 = -\frac{(x_i - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}, \quad y_j^2 = \exp(net_j^2)$$

其中， $m_{ij}$  和  $\sigma_{ij}$  分别第  $i$  个输入变量的第  $j$  个模糊集合的高斯型隶属函数的均值和标准差。

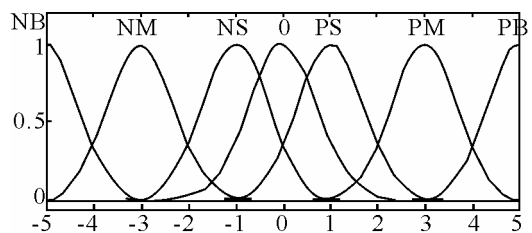


图 4 E、EC 的隶属度函数

3) 模糊推理层：模糊控制规则是指根据专家在控制过程中总结出的实践经验，加以综合的模糊条件语句的集合。则 E、EC 与 PID 参数调整对应的语言变量可以用 If...And...Then 表示。

根据系统对于不同的 E 和 EC，参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的调整规则为：E 较大时，取较大的  $K_p$  和较小的  $K_d$ 。为防止积分饱和，避免系统响应出现较大的超调，取  $K_i$  为零。E 和 EC 处于中等大小时，为使系统响应的超调减小，应取较小的  $K_i$ ，同时，为保证响应速度， $K_p$ 、 $K_d$  取适中的值。E 较小时，为

保证稳态性能, 应增大  $K_p$ 、 $K_i$ , 同时, 为避免系统在设定值附近出现震荡, 并考虑系统的干扰性能, 应适当地选取  $K_d$ 。

$K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 的模糊子集也表示为{正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}7个词, 用符号表示

为{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}。

根据以上调整规则, 借鉴其他成熟的伺服系统控制实际经验, 并结合系统的实际情况, 建立了较适合遥控武器站 PID 控制参数整定的模糊规则表<sup>[6-8]</sup>, 见表 1。

表 1  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  模糊控制规则表

$\Delta K_p$	$\Delta K_i$	$\Delta K_d$	EC					
			NB	NM	NS	ZO	PS	PM
E	NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
	NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
	NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
	ZO	PM/NM/ZO	PS/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PM/ZO
	PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
	PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB
	PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NB/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

模糊推理层通过与模糊化层的连接来完成模糊规则的匹配, 各个节点之间实现模糊运算, 即通过各个模糊节点的组合得到相应的激活强度:

$$net_j^3 = x_1^3 \bullet x_2^3, \quad y_j^3 = net_j^3$$

其中,  $y_j^3$ 即为第j条规则的激活度。此层共有 49 个节点。

4) 输出层:

$$net_j^4 = \sum_{i=1}^M w_i x_i^4, \quad y_j^4 = net_j^4$$

其中,  $y_j^4$ 即为 FNN 的输出,  $w_i$ 为第三、四层间的可调权系数, 此层只有 3 个结点, 分别为  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。

### 2.2 模糊神经网络的学习算法

神经网络的训练采用了 BP 算法<sup>[4]</sup>, 它是一种建立在梯度下降法的基础之上, 在导师指导下适合多层神经网络的方式。根据神经网络的结构需要学习的参数主要是最后一层的连接权值  $W$ 。

设神经元的输出为  $y = f(net)$ 。

其中,  $net = WX = \sum_{j=1}^m \omega_j x_j$ ;  $m$  为输入维数, 采用

二次型性能指标, 实现对输出误差的约束控制:

$$E(W) = \frac{1}{2} \|D - Y\|^2 = \frac{1}{2} \sum_i (d_i - y_i)^2 \quad (1)$$

其中,  $i$  为输出矢量的维数, 为了使  $E(W)$  最小, 需对其求导, 因此有:

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = \frac{\partial E}{\partial net} \frac{\partial net}{\partial w_j} = -(d - y) f'(net) x_j \quad (2)$$

所以

$$w_j(k+1) = w_j(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_j} = w_j(k) + \eta(d - y) f'(net) x_j \quad (3)$$

对神经网络权值的修正采用式 (3) 所示办法。

### 3 仿真分析

为了验证所提出的模糊神经网络 PID 控制算法的有效性, 在 MATLAB 中创建 BP 神经网络, 利用隶属函数和模糊规则将抽象的模糊规则转化为 BP 神经网络的训练样本, 隐层采用在任意点可微的 Tansig 作为传递函数, 输出层采用常用非负的 Sigmoid 函数。

遥控武器站伺服系统理论上的开环传递函数很复杂, 在采用智能控制算法时, 数学模型只是一个参考, 其传递函数可近似表示为:

$$G(S) = \frac{182}{0.46s^2 + s}$$

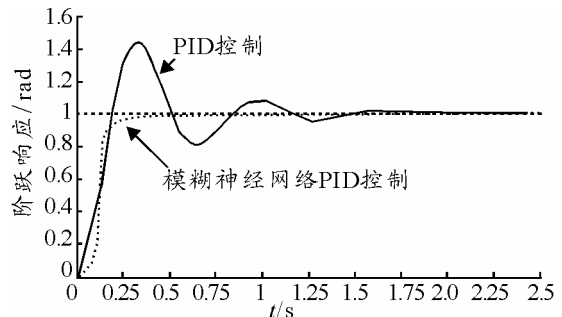
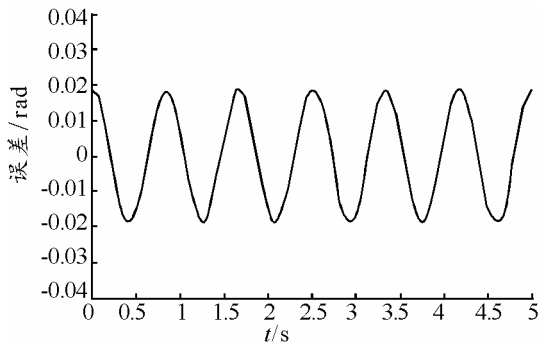


图 5 系统阶跃响应曲线

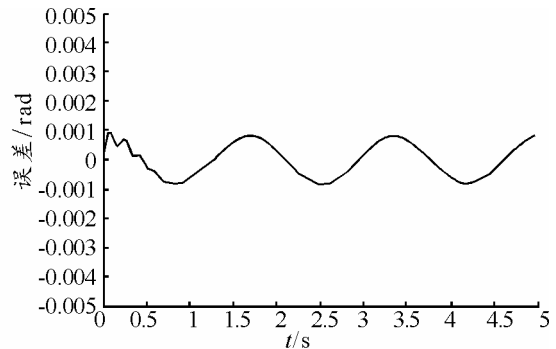
图 5 为采用常规 PID 控制和模糊神经网络 PID 控制时, 系统阶跃信号的响应曲线。由图 5 可见, 模糊神经网络 PID 控制能很好地抑制系统的超调,

响应快、稳态误差小，性能远优于常规 PID 控制。

图 6 为常规 PID 控制器和模糊神经网络 PID 控制器对正弦信号跟踪的误差响应曲线，通过对比可



(a) PID 控制



(b) 糊神经网络 PID 控制

图 6 系统正弦误差响应曲线

### 4 结束语

仿真结果表明，模糊神经网络 PID 控制器能缩短调节时间，加快响应速度，提高稳定精度，具有良好的鲁棒性，能满足非线性系统的要求，具有现实应用价值。

### 参考文献：

[1] 李涛, 刘琮敏. 供弹机模糊自适应 PID 控制器设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(1): 49-51.  
 [2] 栗建中, 宋文忠. 饱和特性下坦克火炮控制器的优化与仿真[J]. 工业控制计算机, 2006(2).

知：模糊神经网络 PID 控制器在动态性能方面明显优于常规 PID 控制器，可将正弦响应误差从 0.02 rad 降至 0.001 rad。

[3] 栗建中. 坦克火炮控制系统设计与仿真[D]. 南京: 东南大学, 2008.  
 [4] 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
 [5] 刘金钊. 先进 PID 控制第二版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
 [6] 肖敏, 张华, 贾剑平. 模糊神经网络 PID 控制在焊缝跟踪中的应用[J]. 微计算机信息, 2006, 22(9-1): 68-70.  
 [7] 孙海燕, 郭前岗. 模糊神经网络 PID 控制器在 DTC 中的应用[J]. 控制系统, 2007, 23(12-1): 57-59.  
 [8] DALEY S.GILL K F.A design study of a self-organizing fuzzy logic controller[J]. Proc. Institute of Mechanical Engineers.1986(200): 59-69.

\*\*\*\*\*

(上接第 66 页)

```
rdgArray =
myAgilent34980A.Measurement.FetchNumbersOnly;
myAgilent34980A.Route.Open("1001");
//“1001”通道打开
Next.
```

当对测试模块进行远程控制时，远程控制者通过网页中虚拟仪器控件或 IVI 驱动程序所使用的 Socket 接口，或者通过 IVI 驱动程序选用的 LAN 或者 USB 接口，在 Control Server 程序的协助下，和仪器的功能模块进行控制和数据信息交互。Control Server 是和 Web Server 并行运行的一个程序或者模块。一般情况下，Control Server 将远程控制者发送的数据和控制信息解析后，通过隔离的高速串行口将命令发送给 LXI 功能设备（比如信号源的函数发生部分），并读取功能设备产生的数据和其他控制信息，发送回虚拟仪器控件或者 IVI 驱动程序，作进一步的处理，从而实现通过远程设备控制的功能。

其中，虚拟仪器控件实现数据、波形的动态实时显示，把虚拟仪器控件嵌入到 Web 网页中，实现标准化的 LXI 设备远程控制功能。

### 4 结束语

目前，LAN 接口已广泛应用于仪器中，并取得较好的效果，该方法对该类仪器的接口实现技术方向有一定的推动作用和参考意义。

### 参考文献：

[1] LXI\_Revision\_1.2.01[S]. <http://www.lxistandard.org/home/>,2007,11,26.  
 [2] 郭恩全, 巩欣洲, 胡华伟. LXI 总线接口技术研究[J]. 陕西海泰电子有限责任公司, 2007.  
 [3] 郑人杰, 殷人昆, 陶永雷. 实用软件工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
 [4] IVI Foundation. IVI-4 IVI Scope Class Specification V1.0[S]. 1998.  
 [5] IVI Foundation. IVI-3.1 Driver Architecture Specification V1.3[S]. 2005.  
 [6] “LXI 联盟会员大会暨高级技术论坛”2007 会议资料. 2007.