

# 直升机智能 PID 控制研究

徐立芳<sup>1</sup>, 莫宏伟<sup>2</sup>

XU Li-fang<sup>1</sup>, MO Hong-wei<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工程大学 工程训练中心, 哈尔滨 150001

2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001

1. Engineering Training Center, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

E-mail: mxlfang@163.com

XU Li-fang, MO Hong-wei. Research of intelligent PID control for helicopter. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(6): 26-28.

**Abstract:** For controlling the angle of pitch and velocity of rotate shaft of helicopter, the control performance of fuzzy PID, neural network PID and immune PID is compared each other. The simulation results show that neural network PID controller has the highest accuracy. There is no response error and the stability is good. But it has long response time. The response time of fuzzy PID is faster and its stability is better than those of the other two controllers, but it has little error. When immune PID controller is used to control rotate shaft of helicopter, the response rate and stability are better than the other two controllers. But its control effect to control of angle of pitch control is bad.

**Key words:** neural network PID; fuzzy PID; immune PID

**摘要:** 针对直升机俯仰角度控制和旋转轴速度控制需求, 对模糊 PID 控制、神经网络 PID 控制和免疫 PID 控制不同控制规律下的系统控制效果进行了对比研究。仿真实验表明, 神经网络 PID 控制器准确性最高, 系统响应无误差, 稳定性较好, 但响应时间较长; 模糊 PID 控制器系统动态响应时间较快, 系统稳定性相对最好, 但存在微量误差; 免疫 PID 控制器控制直升机旋转轴时, 系统响应速度和稳定性明显优于其他两类控制器, 但对俯仰角控制效果差。

**关键词:** 神经网络 PID; 模糊 PID; 免疫 PID

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.06.008 **文章编号:** 1002-8331(2010)06-0026-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP301.61

## 1 引言

现代控制理论的发展, 使智能控制技术得到广泛的应用。随着人们对不确定性、复杂性、模糊性控制问题的深入研究, 专家系统、模糊逻辑和神经网络被广泛地引入到控制理论之中, 这三者都具有解决人工智能中知识表达、不确定性推理的信息表达和处理能力。

模糊逻辑 PID 控制器和神经网络 PID 控制器既具有常规 PID 控制器结构简单, 可靠性高等优点, 又具有自学习、自适应的功能, 适合处理复杂动态不确定系统。因此, 文献[1]中采用基于 RBF 网络整定的 PID 控制器来控制三自由度飞行器模型系统, 并设计一种免疫遗传算法来优化网络参数。文献[2]利用 BP 算法训练飞行器的角速度在坐标系中的投影并建立飞行器姿态角的预测模型, 从而使飞行器的姿态达到了期望的控制效果。文献[3]设计了模糊 PID 控制器, 并用该控制器对三自由度

飞行器实验装置进行了实物控制实验, 效果良好。文献[4]设计了基于 RBF 神经网络整定的 PID 控制器, 与 LQR 控制方法相比, 该方法具有控制精度高、响应速度快的优点, 并且具备较强的自适应性和鲁棒性。

近年, 随着人工免疫理论研究的深入, 免疫系统的相关机理为解决一些控制系统难题提供了新思路。Ishiguro 等人提出了一种基于免疫网络理论的机器人行为规划框架<sup>[5]</sup>, 根据免疫系统调节原理, 谈英姿设计了免疫 PID 控制器<sup>[6]</sup>, 提高了汽温控制系统的控制性能。文献[7]研究了一种免疫模糊 PID 用于电机的启动控制, 取得了较好效果。上述方法都是针对自己的问题给出一个基于智能控制方法的解决策略, 针对同一个问题, 目前还缺乏上述几种典型方法较全面的多智能控制策略对比分析。

针对直升机的静稳定性不好问题, 设计了模糊 PID 控制器、神经网络 PID 控制器和免疫 PID 控制器进行增稳和控制,

**基金项目:** 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60305007); 教育部归国留学人员基金(the Foundation for People Studying Abroad and Coming Back of Ministry of Education of China); 哈尔滨市青年人才专项基金(the Special Foundation for Youth of Harbin of China under Grant No.2007RFQXS033)。

**作者简介:** 徐立芳(1973-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为智能算法、免疫系统、免疫控制; 莫宏伟(1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为自然计算、人工免疫系统、数据挖掘。

**收稿日期:** 2009-09-28 **修回日期:** 2009-12-11

并对不同控制规律下的系统控制效果进行了对比研究,期望获得相对最优控制规律及控制方式,以使直升机系统达到飞行品质规范要求的动态响应指标。

## 2 直升机系统建模

### 2.1 俯仰轴

由图 1 可知,俯仰轴的转矩是由两个螺旋桨电机产生的升力  $F_1$  和  $F_2$ 。故螺旋桨的升力  $F_h = F_1 + F_2$ 。当升力  $F_h$  大于重力  $G$  时,直升机上升;反之直升机下降。现假定直升机悬在空中,并且俯仰角为零,就可得到下列等式:

$$J_e \ddot{\varepsilon} = l_1 F_h - l_1 G = l_1 (F_1 + F_2) - l_1 G \quad (1)$$

$$J_e \ddot{\varepsilon} = l_1 F_1 + l_1 F_2 - l_1 G \quad (2)$$

$$J_e \ddot{\varepsilon} = K_c l_1 (V_1 + V_2) - T_g = K_c l_1 V_s - T_g \quad (3)$$

其中,  $J_e$  是俯仰轴的转动惯量  $J_e = m_h l_1^2 + m_b l_2^2$ ;  $V_1$  和  $V_2$  是两个电机电压,产生升力  $F_1$  和  $F_2$ ;  $K_c$  是螺旋桨电机的升力常数;  $l_1$  是支点到电机的距离;  $l_2$  是支点到平衡块的距离;  $T_g$  是由俯仰轴  $G$  产生的有效重力矩,  $T_g = m_h g l_1 - m_b g l_2$ ;  $m_h$  和  $m_b$  则分别是直升机螺旋桨部分和平衡块的质量;  $\ddot{\varepsilon}$  是俯仰轴的旋转加速度。

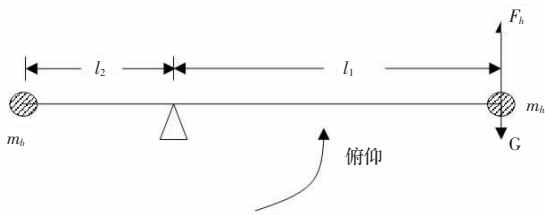


图 1 直升机俯仰轴

### 2.2 旋转轴

旋转轴的动力来源是螺旋桨横侧倾斜时产生的水平方向升力。对于比较小的横侧角,这个力需要使直升机在空中保持平衡,大约为  $G$ 。 $G$  的水平分量会对旋转轴产生一个力矩,旋转轴由这个力产生旋转加速度。如图 2 所示。

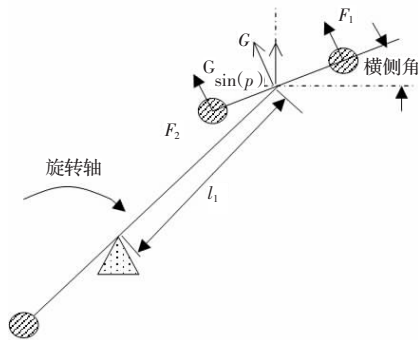


图 2 直升机旋转轴

其动力学方程如下:

$$J_r \dot{r} = -G \sin(p) l_1 \quad (4)$$

式(4)中  $r$  是旋转速度,单位 rad/s;  $\sin(p)$  是横侧角  $p$  的正弦值,若横侧角为零,则没有力传递给旋转轴。俯仰角加速度是加在两个螺旋桨电机的电压和的函数;横侧轴加速度是两个电机电压差的函数;旋转轴的加速度和横侧角成比例。

## 3 直升机系统智能控制

### 3.1 神经网络 PID 控制

神经网络 PID 控制器采用三层 BP 神经网络,有  $M=4$  个输入节点,  $Q=5$  个隐层节点,3 个输出节点,输出节点分别对应 PID 控制器的 3 个可调参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 。

网络输入层的输入为:

$$o_j^{(1)} = x(j), j=1, 2, \dots, 4 \quad (5)$$

网络隐含层的输入、输出为:

$$net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^4 w_{ij}^{(2)} o_j^{(1)}, i=1, 2, \dots, 5 \quad (6)$$

$$o_i^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)), i=1, 2, \dots, 5 \quad (7)$$

网络输出层的输入、输出为:

$$net_l^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^5 w_{li}^{(3)} o_i^{(2)}, l=1, 2, 3 \quad (8)$$

$$o_l^{(3)}(k) = g(net_l^{(3)}(k)), o_1^{(3)}(k) = k_p, o_2^{(3)}(k) = k_i, o_3^{(3)}(k) = k_d$$

隐含层神经元活化函数取正负对称 Sigmoid 函数,输出层神经元活化函数取非负 Sigmoid 函数,取性能指标函数为  $E(k) = \frac{1}{2} (r_{in}(k) - y_{out}(k))^2$ ,按照梯度下降法修正网络的权系数,附加一个快速收敛全局极小的惯性项:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (9)$$

最终可推导出网络输出层权系数:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) + \eta \delta_l^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (10)$$

隐含层加权系数:

$$\Delta w_{ij}^{(2)}(k) = \alpha \Delta w_{ij}^{(2)}(k-1) + \eta \delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) \quad (11)$$

三层 BP 神经网络训练的学习速率选取  $\eta=0.1$ , 惯性系数选取  $\alpha=0.25$ 。

### 3.2 模糊 PID 控制

选取偏差  $E$ 、偏差变化  $EC$  和控制输出量  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ,将输入量化为 7 个等级,相应模糊论域的取值见表 1。

表 1 模糊论域

	-3	-2	-1	0	1	2	3
$E$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$EC$	-0.54	-0.36	-0.18	0	0.18	0.36	0.54
$k_p$	-30	-20	-10	0	10	20	30
$k_i$	-75	-50	-25	0	25	50	75
$k_d$	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6

利用 Mamdani 模糊逻辑推理,重心法解模糊算法,可得 49 条模糊规则,其数值空间分布见图 3。

### 3.3 免疫 PID 控制

直升机系统免疫 PID 控制器结构设计见图 4。

系统输出为:

$$u(k) = K \{1 - \lambda \eta f[\Delta u(k-d)]\} e(k) \quad (12)$$

式(12)中  $\lambda$  表示响应过程中的免疫促进( $\lambda=-1$ ),免疫抑制( $\lambda=1$ )和免疫稳定( $\lambda=0$ )不同阶段的免疫调节作用,  $e_0$  为大偏差的阈值,  $e_1$  为小偏差阈值。当  $|e(k)| > e_0$  时,表示响应初期,大偏差(大抗原)情况,  $\lambda=-1$ ,相当于免疫促进阶段;当  $e_1 < |e(k)| < e_0$  时,表示响应中后期,为避免产生大超调,  $\lambda=-1$ ,相当于免疫

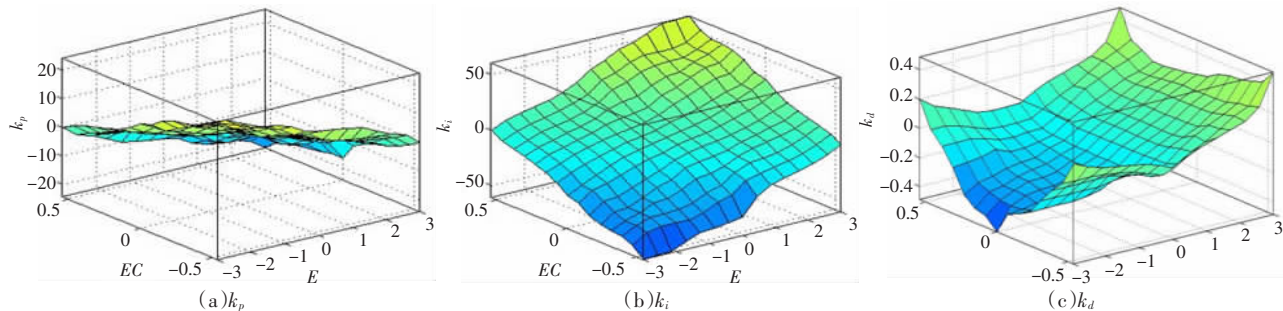


图3 控制器模糊规则

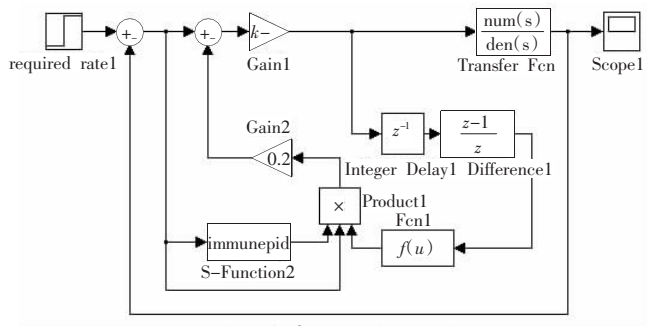


图4 免疫PID控制仿真图

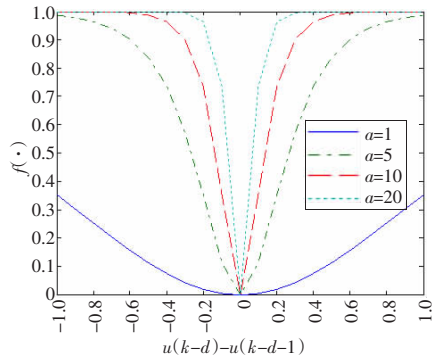


图5 T细胞的非线性函数图

抑制阶段;当 $|e(k)| < e_1$ 时,表示响应末期,小偏差(小抗原)情况, $\lambda=0$ ,相当于免疫稳定阶段;其中 $e(k)=y_r(k)-y(k)$ , $y_r(k)$ 为控制系统输出的给定值, $y(k)$ 为控制系统的实际输出值。

根据T细胞调节作用, $f(u)$ 选取非线性函数:

$$f(\Delta u(k-d)) = 1 - \frac{2}{\exp[-a\Delta u(k-d)] + \exp[a\Delta u(k-d)]} \quad (13)$$

式(13)中 $a$ 为抗体浓度作用系数。对于不同的 $a$ ,非线性函数的图形如图5所示。本例中取 $a=10$ ,非线性函数的作用区域为

$[-0.6, 0, 0.6], f(\cdot) \in (0, 1)$ 。另外, $\lambda$ 的选择是通过S函数immune来实现的, $e_0$ 取为300, $e_1$ 取为100。

### 4 实验结果及分析

采用MATLAB7.0和Simulink对直升机控制系统进行仿真实验,输入单位阶跃信号,系统采样时间0.1秒。图6中 $x$ 轴为系统响应时间,单位为秒(s), $y$ 轴为系统动态响应信号幅度数值。

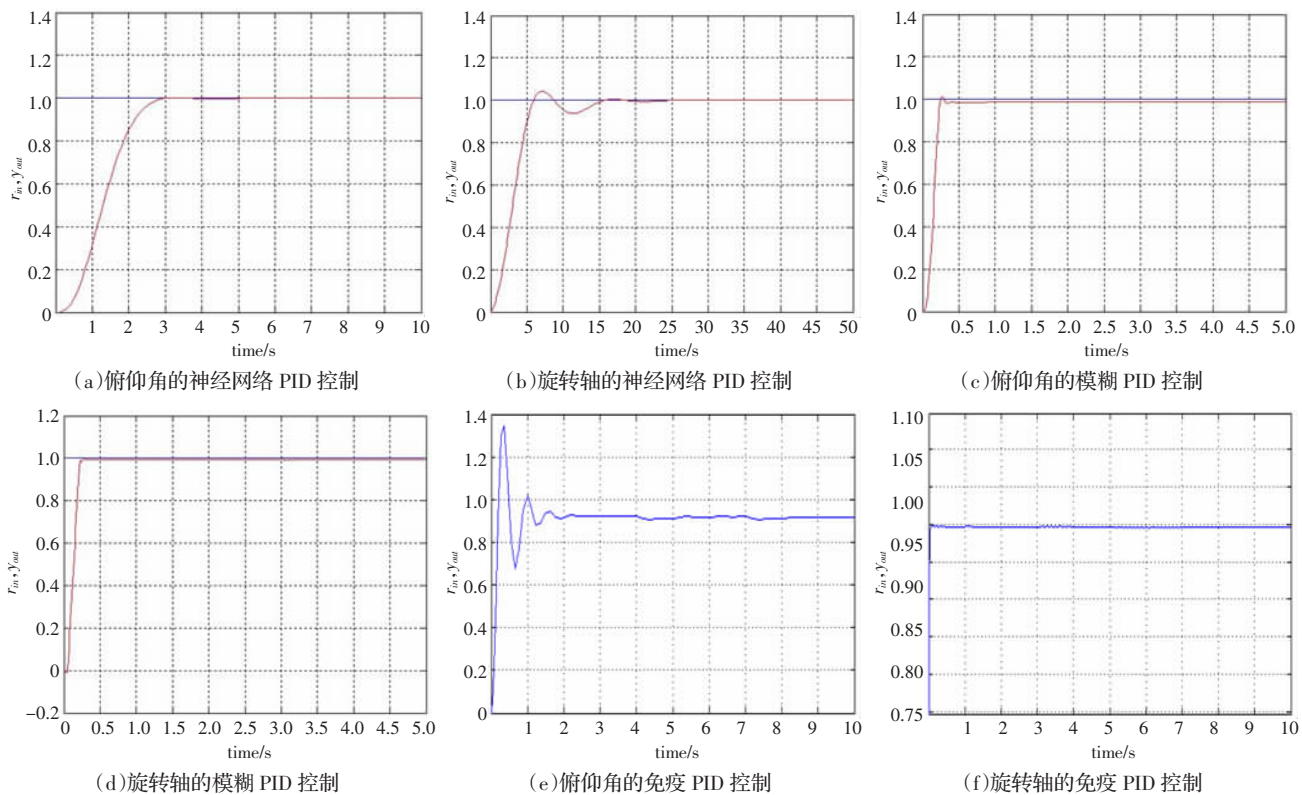


图6 控制器仿真获得的信号响应图

(下转45页)