

无人水下航行器 PID 神经网络解耦控制

王芳荣¹, 阚如文¹, 王昕², 刘顺安³, 董绪斌³

(1. 吉林大学通信工程学院,长春 130022; 2. 吉林大学生物与农业工程学院,长春 130022; 3. 吉林大学机械科学与工程学院,长春 130022)

摘要:通过无人水下航行器动力学分析和运动建模,将系统解耦为航向、横滚、纵向三通道控制系统。为了消除解耦过程中存在的问题,采用 PID 神经网络控制算法来实现三自由度的独立控制。仿真结果表明,该控制方法不仅减少了计算时间,提高了响应速度,而且具有超调量小、稳态精度高等控制品质,对无人水下航行器的实际应用具有一定意义。

关键词:自动控制技术;PID 神经网络;无人水下航行器;解耦控制;仿真研究

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2012)Sup. 1-0387-05

PID Neural network decoupling control of unmanned underwater vehicle

WANG Fang-rong¹, KAN Ru-wen¹, WANG Xin², LIU Shun-an³, DONG Xu-bin³

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the UUV dynamics analysis and motion modeling, its control system decoupling, is divided into three sub-control system. in order to eliminate problems in the process of decoupling, using PID neural network (PIDNN) control algorithm. The results of simulation show that the method has good control performance, the system has quick response, properties of low overshoot and good steady accuracy, in the practical control applications of UUV have some significance.

Key words: automatic control technology; PID neural network; unmanned underwater vehicle; decoupling control; simulation

无人水下航行器^[1](UUV)是用于深海研究、海底资源勘探、水下战场分析、水下侦察、遥控扫雷和作战任务的小型水下自航载体。由于海洋环境的复杂性和 UUV 本身的耦合效应,系统控制中存在许多具有不确定性、大滞后、非线性、多变量耦合的复杂过程。对于这些问题,特别是多变量耦合问题,采用常规的控制方法难以达到理想的控制效果^[2]。本文基于 PID 神经网络(PIDNN)控制算法,通过多次训练学习,对 UUV 运动三通道变量模型

进行控制研究。该方法既具有传统 PID 控制器的优点,又具有神经网络的并行结构和学习记忆功能,以及多层网络逼近任意函数的能力,在 UUV 航行控制中表现出良好的优越性和鲁棒性。

1 UUV 数学模型

1.1 运动方程

如图 1 所示,无人水下航行器的动力学模型的两个坐标系分别为:与地球固连的地面坐标系

收稿日期:2012-02-04.

基金项目:国家自然科学基金项目(50475011).

作者简介:王芳荣(1967-),男,博士,副教授. 研究方向:模式识别,光机电一体化技术. E-mail: wangfr@jlu.edu.cn

通信作者:王昕(1970-),女,博士,副教授. 研究方向:食品工艺及装备自动化技术. E-mail: wx@jlu.edu.cn

E-XYZ;与航行器固连的体坐标系 $b\text{-}xyz^{[3-4]}$ 。

定义航行器在体坐标系沿 x 、 y 、 z 轴的平移速度和绕轴转动的角速度为 $\mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$, 定义航行器在地面坐标系中的坐标和姿态角为 $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \varphi, \psi, \theta]^T$ 。

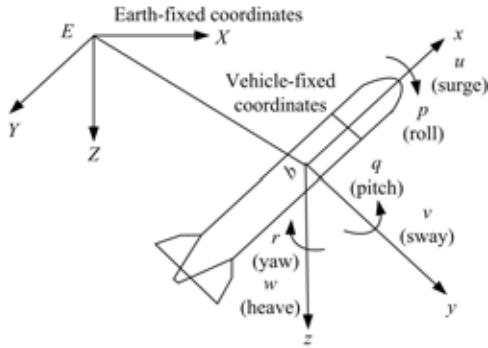


图 1 无人水下航行器运动坐标系

Fig. 1 UUV motion coordinate system

根据无人水下航行器的运动规律,通常将其空间运动分解为沿三个平面的运动,即分别是沿水平面的航向运动,参数为:航向角度 ψ 、航向角速度 ω 及方向舵角 δr ; 沿垂直平面的纵向运动,参数为:纵向角度 θ 、纵向角速度 v 及方向舵角 δe ; 绕纵轴的横滚运动,参数为:横滚角度 φ 、横滚角速度 u 及差动舵角 δs 。控制系统按照以上三种运动姿态进行设计,一般采用三组伺服舵机控制三个平面的运动,对应的控制系统称为航向控制通道、俯仰与深度控制通道和横滚控制通道,总的控制系统称为三通道控制系统^[5]。

1.2 UUV 控制系统建模

无人水下航行器控制系统经过上述动力学分析建模后,分解为三通道运动系统,先不考虑到实际系统存在的建模误差、模型参数摄动等不确定性因素的影响,对非线性模型的平衡点附近进行线性化即有以下模型^[6]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_{pi}x_i + B_{pi}u_i, \\ y &= C_{pi}x_i + D_{pi}u_i \quad (i=1,2,3) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,3$ 分别表示航向、纵向和横滚子系统。

状态量、输入和输出控制量^[6]的定义如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 = [\psi \ \omega \ r \ \delta r]^T, r_1 = \delta r_d, y_1 = \psi \\ \mathbf{x}_2 = [\theta \ v \ p \ \delta e]^T, r_2 = \delta e_d, y_2 = \theta \\ \mathbf{x}_3 = [\varphi \ u \ q \ \delta s]^T, r_3 = \delta s_d, y_3 = \varphi \end{cases} \quad (2)$$

其中 r_1, r_2, r_3 分别为航行器方向舵机、升降舵机和差动舵机的控制指令; y_1, y_2, y_3 分别表示航行

器的航向角度、纵向角度和横滚角度。

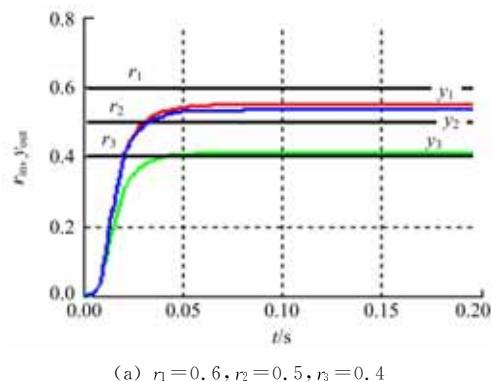
UVU 的三通道控制系统经过 H_∞ 混合灵敏度方法进行降阶处理后,忽略其扰动,得到近似的线性三变量一阶系统对象的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} Y_1(z) \\ Y_2(z) \\ Y_3(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.63z^{-1} & 0.15z^{-1} & 0.25z^{-1} \\ 1-0.70z^{-1} & 1-0.85z^{-1} & 1-0.55z^{-1} \\ 0.12z^{-1} & 0.35z^{-1} & 0.15z^{-1} \\ 1-0.64z^{-1} & 1-0.80z^{-1} & 1-0.75z^{-1} \\ 0.55z^{-1} & 0.45z^{-1} & 0.60z^{-1} \\ 1-0.90z^{-1} & 1-0.65z^{-1} & 1-0.95z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1(z) \\ r_2(z) \\ r_3(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

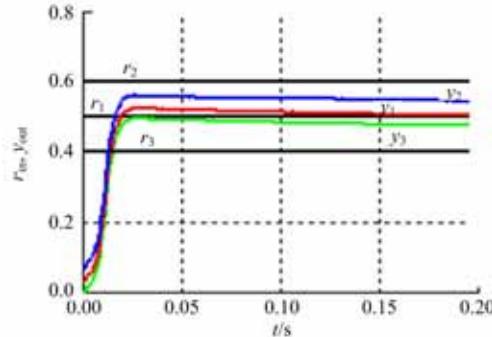
为检验被控对象的关联耦合性能,对模型式(3)输入以下三种阶跃响应,测量对象的开环特性。

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = [r_1(k), r_2(k), r_3(k)]^T = [0.6, 0.5, 0.4]^T \\ \mathbf{R}_2 = [r_1(k), r_2(k), r_3(k)]^T = [0.5, 0.6, 0.4]^T \\ \mathbf{R}_3 = [r_1(k), r_2(k), r_3(k)]^T = [0.4, 0.5, 0.6]^T \end{cases} \quad (4)$$

由图 2(a)(b)(c)可看出,在输入量单独控制下,输出量的变化都很大,与设定值有较大的偏差。由此可知无人水下航行器运动过程是一个复



(a) $r_1=0.6, r_2=0.5, r_3=0.4$



(b) $r_1=0.5, r_2=0.6, r_3=0.4$

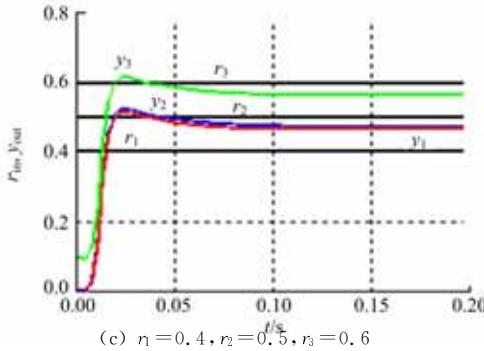


图 2 线性三变量一阶系统开环阶跃响应曲线

Fig. 2 Three-variable open-loop step response curve

杂的多变量的强耦合过程, 控制航向运动会引起纵向角和横滚角的变化, 控制纵向运动会引起航向角和横滚角的变化, 控制横滚运动也会引起其他两个通道的变化, 它们这种强耦合关系扰动作用强, 时间常数和时间滞后较大, 很难建立精确的数学模型。公式(3)为一简化的线性强耦合三变量一阶系统对象的数学模型, 本文基于这种模型拟采用 PID 神经网络控制算法实现无人水下航行器运动的解耦控制。

2 PID 神经网络控制系统及算法

2.1 PID 神经网络结构形式

PID 神经网络对多变量的控制结构是在单变量 PID 神经网络控制器基础上, 利用多个单变量 PID 神经网络控制器并列构成^[7]。见图 3。 r_1 、 r_2 、 r_3 为系统设定值; v_1 、 v_2 、 v_3 表示 PID 网络输出层, 为三个舵机的转角输入指令; y_1 、 y_2 、 y_3 为输出, 分别表示航向角度、纵向角度和横滚角。

PID 神经网络控制器内部结构是三层前向网络, 它是由三个单变量 PID 神经网络子网交叉并联而成的。三通道控制系统的 3 个输出, 就需要 3 个子网交叉并联, 构成 $6 \times 9 \times 3$ 结构的网络。即输入层有 6 个输入神经元; 隐含层有 9 个处理神经元, 其中包括 3 个比例元、3 个积分元和 3 个微分元; 输出层有 3 个输出神经元。其隐层至输出层则是互相交叉连接的, 使整个网络结合为一体^[8], 输入层输入 3 个给定值和 3 个被控量, 输出层作为控制器的输出完成解耦工作。

$$\text{图中: } G_{ij}(z) = \frac{K_{ij} z^{-1}}{1 - T_{ij} z^{-1}}$$

式中 K_{ij} 为对象静态增益; T_{ij} 为容积滞后时间; $i, j = 1, 2, 3$ 。

2.2 PID 神经网络控制系统原理

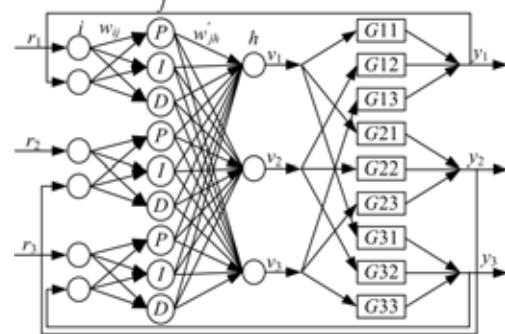


图 3 三变量 PID 神经网络解耦控制结构图

Fig. 3 Three-variable PIDNN decoupling control structure

以单变量 PID 神经网络控制系统为例, 控制系统结构如图 4 所示。控制系统主要由 PID 神经网络辨识器(PIDNNI)和 PID 神经网络控制器(PIDNNC)组成^[9]。其工作原理是: 利用神经网络的非线性函数逼近能力和学习记忆功能, 通过对输出偏差 $u_1(k)$ 的训练和学习, 利用网络的前向算法修正网络连接权值以适应被辨别对象的变化特性。当学习到与被控对象(Plant)接近时, PIDNNC 利用输出偏差 $u_2(k)$, 通过网络的前向算法对 PIDNN 参数进行自适应调整权值, 适应系统的变化, 以达到对输入输出控制的目的。

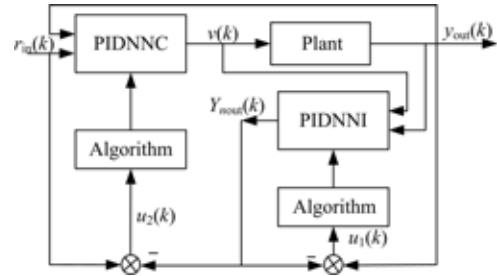


图 4 PID 神经网络控制系统结构

Fig. 4 Structure of PIDNN control system

2.3 PID 神经网络前向算法^[10]

设 PID 神经网络有 n 个输出端, 则在任意采样时刻 k 时的前向计算公式如下:

(1) 输入层神经元输入输出关系为:

$$x_s(k) = u_s(k) \quad (5)$$

式中: u_s 为输入层神经元的输入值; x_s 为输入层神经元的输出值; s 为并列子网的序号 ($s = 1, 2, 3$), i 为子网输入层序号 ($i = 1, 2$)。

(2) 隐含层含有 $3n$ 个神经元 (n 个比例元、 n 个积分元和 n 个微分元), 它们输入总值的计算公式相同, 均为:

$$u'_{sj}(k) = \sum_{i=1}^2 w_{sij} x_{si}(k) \quad (6)$$

比例元、积分元、微分元的输入、输出函数关系如下：

$$\begin{cases} x'_{sl}(k) = u'_{sl}(k) \\ x'_{\varphi}(k) = u'_{\varphi}(k-1) + u'_{\varphi}(k) \\ x'_{s}(k) = u'_{s}(k) + u'_{s}(k-1) \end{cases} \quad (7)$$

式中： u'_{s} 为隐层神经元的输入值； x'_{sj} 为隐含层神经元的输出值； w_{sij} 为各子网输入层至隐含层的连接权值； j 为子网中隐含层神经元序号 ($j = 1, 2, 3$)。

(3) 输出层各个神经元的输入为隐含层全部神经元的输出值的加权总和，其表达式为：

$$u''_h(k) = \sum_{s=1}^3 \sum_{j=1}^3 w'_{sgh} x'_{sj}(k) \quad (8)$$

输出神经元的输入、输出函数关系为：

$$x''_h(k) = u''_h(k) \quad (9)$$

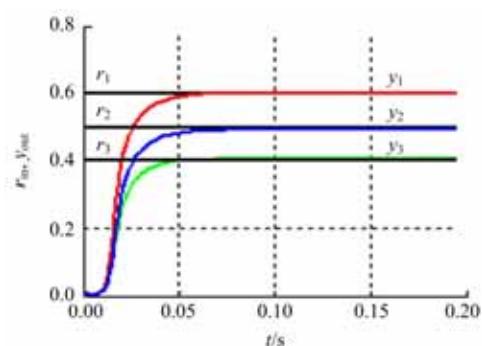
式中： u''_h 为输出层神经元的输入值； x''_h 为输出层神经元的输出值； w'_{sgh} 为隐含层至输出层的连接权重值； h 为输出层神经元序号 ($h = 1, 2, 3$)。

3 PID 神经网络仿真实验

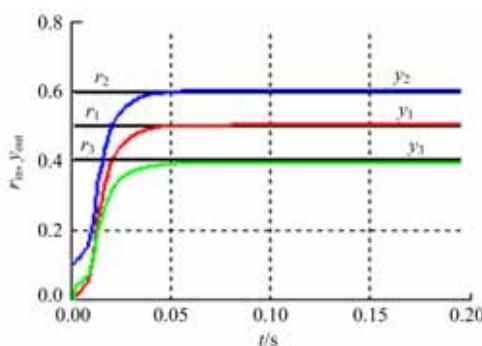
设三变量 PID 神经网络输入层至隐含层比例元、积分元和微分元连接权重初值为： $w_{slj} = 0.1$ 、 $w_{\varphi j} = -0.1$ ，隐含层至输出层连接权重初值 w'_{sgh} 取小于 0.1 的随机数^[10]。为了检验系统的耦合及解耦控制性能，对无人航行器控制模型公式(5)，采用式(6)的三种阶跃响应。设学习步长 $\eta_{sij} = 0.06$ ， $\eta'_{sij} = 0.06$ ，采样周期 $T = 4$ ，对网络进行 200 次训练，每批为 200 个采样点，经过学习训练后的三变量阶跃输入 $r_1(k)$ 、 $r_2(k)$ 、 $r_3(k)$ 和输出 $y_1(k)$ 、 $y_2(k)$ 、 $y_3(k)$ 控制响应曲线如图 5(a) (b)(c) 所示，PID 神经网络提供给被控对象的输入 v_1 、 v_2 、 v_3 曲线如图 6(a)(b)(c) 所示。

由图 5、图 6 可知，对于复杂多变量非线性系统，不确定模型，经过 PID 神经网络训练和学习，输入被控对象的三变量之间的相互作用有了很大的消除，控制量的输出按控制目标而变化，系统的动态性能有了很大改善，系统输出阶跃响应速度快，超调很小，无静态误差，系统具备了无人水下航行器多变量的良好解耦控制性能。

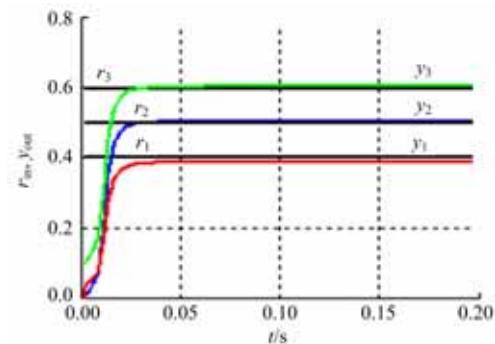
PID 神经网络训练和学习的目的，就是使网络学习目标函数 J (系统输出误差平方均值) 衰减速率快且单调递减，目标函数^[11]为：



(a) $r_1 = 0.6, r_2 = 0.5, r_3 = 0.4$



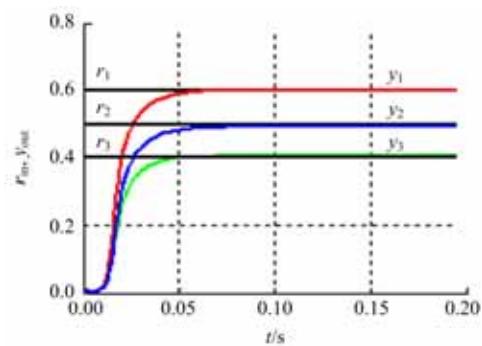
(b) $r_1 = 0.5, r_2 = 0.6, r_3 = 0.4$



(c) $r_1 = 0.4, r_2 = 0.5, r_3 = 0.6$

图 5 三变量 PIDNN 控制系统的三种类型阶跃响应

Fig. 5 Three-variable PIDNN control system
step response



(a) 输入阶跃 R_i 时的 PID 神经网络的输出曲线

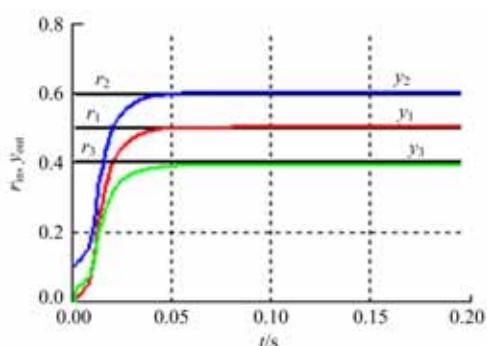
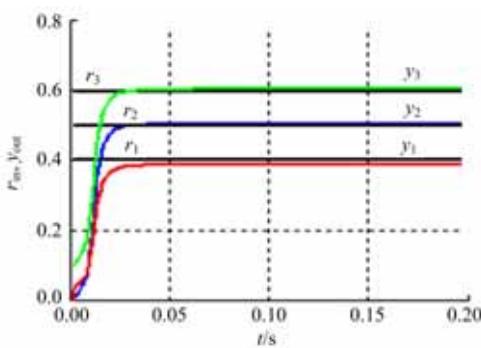
(b) 输入阶跃 R_2 时的 PID 神经网络的输出曲线(c) 输入阶跃 R_3 时的 PID 神经网络的输出曲线

图 6 PID 神经网络提供给被控对象的响应曲线
Fig. 6 PIDNN output as the input of the controlled object

$$J = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^m [r_l(k) - y_l(k)]^2 \quad (10)$$

采用批学习方法, 每批为 200 个采样点, 则 $m=200$ 。由图 7 可知, 在学习过程中, 系统输出目标函数曲线衰减速率很快且单调递减。

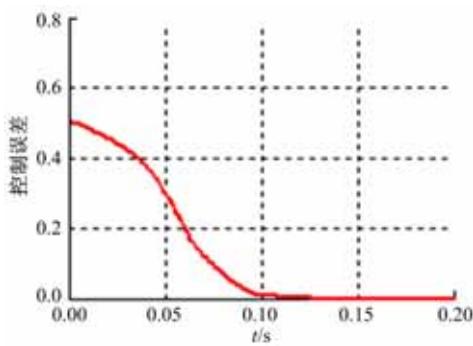
**图 7 三变量 PID 神经网络控制系统的目 标函数曲线**

Fig. 7 The objective function curve of three-variable PIDNN control system

4 结束语

采用一种多变量 PID 神经网络控制方法, 利用 PID 控制的优点和神经网络训练和学习, 自主

调整权值, 使无人水下航行器多变量的解耦和控制融为一体, 具有速度快、超调量小、无静态误差和良好的动态性能的控制效果, 对无人水下航行器实际控制应用具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 马卫国, 齐庆, 徐逸梅. 无人水下航行器能改变未来水下战争[J]. 飞航导弹, 2003(1): 45-51.
Ma Wei-guo, Qi qing, Xu Yi-mei. UUV can change the future of water wars[J]. Winged Missiles Journal, 2003(1): 45-51.
- [2] 刘娟, 杨润贤, 郑恩让. 一种基于 PID 神经网络的解耦控制方法的研究[J]. 微计算机信息, 2007(25): 61-62.
Liu Juan, Yang Run-xian, Zheng En-rang. A research of decoupling control method based on PID neuron network [J]. Microcomputer Information, 2007(25): 61-62.
- [3] Roberts G N, Sutton R. 无人水下航行器进展[M]. 任志良, 张刚主译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [4] Thor I Fossen. Guidance and Control of Ocean Vehicles[M]. John Wiley and Sons, New York, 1998.
- [5] 徐德民等. 鱼雷自动控制系统[M]. 第二版. 兰州: 西北工业大学出版社, 2001.
- [6] Feng Z, Allen R. Reduced order H_∞ control of an autonomous underwater vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2004, 15(2): 1512-1517.
- [7] 马云飞. 三自由度直升机模型的 PID 神经网络控制研究[J]. 沈阳大学学报, 2010, 22(4): 16-17.
Ma Yun-fei. PID neural network controller of 3-DOF helicopter model[J]. Journal of Shenyang University, 2010, 22(4): 16-17.
- [8] Shu Huai-lin. PID neural network control for time-delay systems[J]. Computer & Chemical Engineering, 2000, 24(7): 859-862.
- [9] 沈永俊, 顾幸生. 基于 PID 神经网络的非线性系统辨识与控制[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2006, 32(7): 860-861.
Shen Yong-jun, Gu Xin-sheng. Identification and control in nonlinear system based on PID neural network[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural & Science Edition), 2006, 32(7): 860-861.
- [10] Shu Huai-lin, Guo Xiu-cai. Multivariable strong-coupled time-varying system based on PID neural network[C]// Proceedings of 2003 Chinese Intelligent Automation Conference, 2003: 114-117.