

基于Petri网的非线性多变量系统解耦控制

万 军^{1,2†}, 赵不贻¹

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 常州大学 城市轨道交通学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 广义自控网系统是一类弧权值受库所控制的高级Petri网,能够简单有效地建模PID控制规律.借鉴单神经元PID控制原理,在广义自控网系统的基础上加入神经网络的学习规则,设计基于广义自控网系统的PID控制器,并用于非线性多变量系统解耦控制.所提方法充分利用了自控网系统的特点,所设计的控制器模型能实现系统控制与参数学习的统一.结合双容水箱控制系统实例进行仿真分析,分析结果验证了所提方法的有效性.

关键词: Petri网; 解耦; 多变量系统; PID控制; 单神经元; 自控网系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Decoupling control of nonlinear multivariable systems based on Petri nets

WAN Jun^{1,2†}, ZHAO Bu-hui¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Urban Railway Transportation, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The generalized cyber net system is a kind of high-level Petri net, in which the weights are controlled by the places, and it can model the PID control law simply and effectively. Based on the single neuron PID control principle, the generalized cyber net system incorporates the learning rules of the neural network and is used to design the PID controller, which can decouple the nonlinear multivariable systems. The proposed method makes full use of the characteristics of the cyber net system, and the designed controller model realizes the unity of system control and parameter learning. The simulation analysis for the case of the double water tanks control system is carried out, and the results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Petri nets; decoupling; multivariable systems; PID control; single-neuron; cyber net system

0 引言

在工业控制中,被控系统往往是具有非线性、强耦合特点的多变量系统.对于非线性多变量系统的解耦控制一直是研究的热点.解耦控制律可分为开环解耦控制律和闭环解耦控制律.闭环解耦控制律将解耦补偿器与控制器合并起来统一设计,不仅消除了回路间的耦合影响,而且能够达到确定的闭环指标^[1].目前,比较典型的控制器为PID控制器.

传统的PID控制采用基于数学模型的方法,稳定可靠、应用广泛,但不易在线实时整定参数,难于对一些时变和非线性系统进行有效控制.神经网络具有大规模并行性、容错性、处理非线性和不确定性问题能力,已经被广泛应用于状态反馈控制器设计、

非线性系统控制、非线性动力系统辨识等.但是,神经网络层的数量越多,网络结构越复杂,导致网络的学习过程越长.单神经元作为构成神经网络的基本单位,具有很强的学习能力和自适应能力,而且结构简单易于计算.单神经元自适应PID控制器将单神经元与传统PID控制器相结合,通过在线学习,调整PID控制参数,使得被控系统具备良好的动静态性能,适用于对非线性多变量系统的控制^[2-6].

Petri网是一种具有严格数学定义的图形建模工具,非常适合于描述离散、同步、异步和并发等过程.近年来,已有采用Petri网为PID控制器建模的相关研究.文献[7]对混合Petri网进行了扩展,提出步混合Petri网,并分别对数字型PID控制器和模拟型PID控

收稿日期: 2017-04-23; 修回日期: 2017-12-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61070058); 江苏高校优势学科建设工程基金项目(苏政办发[2014]37号); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_665).

责任编辑: 程龙.

作者简介: 万军(1978—),男,讲师,博士生,从事Petri网理论及混杂系统的研究; 赵不贻(1957—),男,教授,博士生导师,从事DEDS及Petri网理论等研究.

†通讯作者. E-mail: 13815074795@139.com

制器进行建模;文献[8]采用了颜色Petri网设计PID控制器,通过传统的闭环整定方法结合Petri网状态空间分析来整定控制器参数;文献[9]提出了一种可控Petri网(CrPN)以实现直流电机的位置伺服控制系统,具体实施中分别采用了比例控制和比例积分控制方案用于评估控制性能,基于CrPN的控制方法提供了一个可行的低成本的电机控制解决方案;文献[10]通过将增强的时间Petri网(ETPN)与模糊逻辑规则结合,建立了模糊逻辑PI控制器模型,并用于车辆的纵向移动控制;文献[11]引入速度控制弧来改变变迁关联的激发速度,在此基础上建立了线性连续系统的PID控制器Petri网模型,并通过倒立摆系统的实例验证了模型的有效性.由于传统的Petri网没有学习能力,上述文献所建立的PID控制器Petri网模型中的控制器参数固定或整定困难.

自控网系统又称自修正系统,是一类高级Petri网系统.网中有向弧权值受库所标识控制,从而网系统的自身行为能够改变可变权的值^[12].自控网系统目前已得到了相关的应用.文献[13-14]均提出了用于连续系统分析和控制的连续自控网系统模型,且文献[14]利用Petri网模型结构实现了线性定常系统解耦控制;文献[15]将自控网用于城市交通自行车共享系统的建模和分析,旨在平衡控制每个自行车站的车辆数;文献[16]基于有色自控Petri网实现了电网故障区域识别;文献[17]利用自控网为数字系统建模,实现了自控网模型到VHDL代码的转换,设计的方法同时适用于同步系统和由外部事件驱动的异步系统.

综上所述,本文借鉴单神经元PID控制原理,将神经网络的学习规则引入到广义自控网系统中,探讨基于广义自控网系统模型的非线性系统解耦控制方法,并给出双容水箱系统的仿真实例.

1 广义自控网系统

定义1 六元组 $\Sigma = (S, T; F, K, W, M_0)$ 构成广义自控网系统的条件^[14]如下.

- 1) $N = (S, T; F)$ 构成有向网,称为 Σ 的基网.
- 2) $K = \{K_L, K_H\}$ 称为 N 上的容量函数, $K_L: S \rightarrow \mathbf{R}, K_H: S \rightarrow \mathbf{R}, \mathbf{R}$ 为实数集, K_L 和 K_H 分别称为下界和上界容量函数. $\forall s \in S, K_L(s) < K_H(s), s$ 的容量可表示为 $[K_L(s), K_H(s)]$. 当 $K_L(s)$ 和 $K_H(s)$ 为无穷时,容量的闭区间变成开区间.
- 3) $W: F \rightarrow \mathbf{R} \cup \text{Exp}(S)$ 称为 N 上的权函数,其中 $\text{Exp}(S)$ 是 S 元素的函数表达式集.
- 4) $M: S \rightarrow \mathbf{R}$ 为 N 的标识, M_0 为 Σ 的初始标识.

定义2 1) 标识 M 下的权值定义为

$$\forall (x, y) \in S \times T \cup T \times S;$$

$$W(x, y) = \begin{cases} W(x, y), & W(x, y) \notin \text{Exp}(s); \\ e_M, & W(x, y) = e \wedge e \in \text{Exp}(s). \end{cases}$$

其中: e_M 是指将表达式 e 中的 $s_i \in S$ 用其标识 $M(s_i)$ 代入后运算的结果, $i = 1, 2, \dots, |S|$, 即表示将权函数 $W(x, y)$ 中的各库所 s_i 用 $M(s_i)$ 替代后得到的值.

2) t 在 M 有发生权的条件如下:

$$\forall s \in \cdot t : (M(s) - W_M(s, t)) \in [K_L(s), K_H(s)] \wedge \forall s \in t : (M(s) + W_M(t, s)) \in [K_L(s), K_H(s)].$$

t 在 M 有发生权记作 $M[t >$, 也称 M 授权 t 发生或 t 在 M 授权发生.

定义3 若 $M[t >$, 则 t 在 M 可以发生, 将标识 M 改变为 M 的后继 M' , M' 的定义如下:

$$M'(s) = \begin{cases} M(s) - W_M(s, t), & s \in \cdot t - \bar{t}; \\ M(s) + W_M(t, s), & s \in t - \bar{t}; \\ M(s) - W_M(s, t) + W_M(t, s), & s \in t \cap \bar{t}; \\ M(s), & s \notin \cdot t \cup \bar{t}. \end{cases}$$

M' 为 M 后继的事实记作 $M[t > M'$.

广义自控网系统状态方程可写成如下形式:

$$M' = M_0 + \rightarrow C \cdot U. \quad (1)$$

其中: 矩阵运算符 “ $+ \rightarrow$ ” 表示替换加, 运算时先用初始标识的值替换关联矩阵中的变量, 再进行矩阵运算, 详细定义参见文献[12]; C 为 Σ 的关联矩阵, U 为 Σ 的并发步序列 $U_1 U_2 \dots U_k$ 的矩阵表示.

定义4 广义自控网系统中, 从库所到变迁的中间带有箭头的有向弧称为读弧. 读弧的权值为0. 读弧相连的变迁发生后, 不改变其输入库所的标识.

定义5 广义自控网系统中, 从变迁到库所的中间带有箭头的有向弧称为写弧. 写弧是一种特殊的权控制弧, 其相连的变迁发生后, 写弧的输出库所标识更新为写弧的权函数值, 与原有标识值无关.

图1示意了一个广义自控网系统.

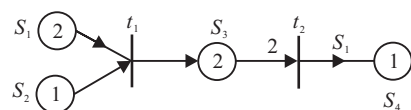


图1 广义自控网系统示意图

假设该网系统库所容量为无穷, 初始标识为 $M_0 = [2 \ 1 \ 2 \ 1]^T$. 图中弧 (s_1, t_1) 为读弧, 弧 (t_2, s_4) 为写弧, 从而有 $W(s_1, t_1) = 0, W(t_2, s_4) = s_1 - s_4$. 在 M_0 下, 变迁 t_1 和 t_2 有发生权, 根据状态方程(1), t_1 和 t_2 发生后, 系统标识计算过程如下:

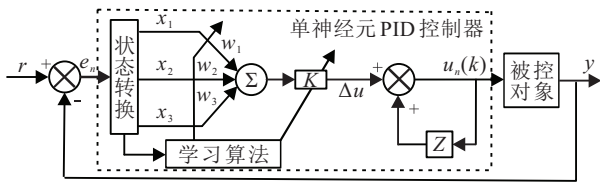
$$M = [2 \ 1 \ 2 \ 1]^T + \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & s_1 - s_4 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$[2 \ 1 \ 2 \ 1]^T + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 2-1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = [2 \ 0 \ 1 \ 2]^T.$$

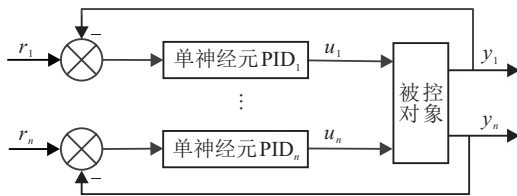
2 基于广义自控网系统的非线性系统解耦控制原理

2.1 单神经元PID控制原理

单神经元结合常规PID控制,将误差的比例、积分和微分作为单个神经元的输入量,则构成了单神经元自适应PID控制器,其控制结构如图2(a)所示。



(a) 单神经元PID控制原理



(b) 多变量单神经元PID控制结构

图2 单神经元PID控制结构

图2虚线框对应单神经元PID控制器模型, r 为控制系统参考输入, y 为控制对象输出, 经转换器转换后成为神经元的输入量 $x_i (i = 1, 2, 3)$, $w_i (i = 1, 2, 3)$ 为对应3个输入状态的权值, K 为神经元的比例系数。

取

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k), \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1), \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2). \end{cases} \quad (2)$$

控制器的输出为

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k). \quad (3)$$

通过神经元的自学习功能对权值 $w_i (i = 1, 2, 3)$ 进行自适应调整, 学习算法如下:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i r_i(k). \quad (4)$$

其中: $r_i(k)$ 为学习规则, η_i 为学习速率。

由多个单一的单神经元PID控制器构成的网络即可实现单神经元多变量PID控制^[18]。图2(b)给出了多变量单神经元PID控制结构。只要偏差 $r_i - y_i$ 存在, 第 i 个神经元控制器就按照算法逐步调整连接权值, 直至系统输出能够跟踪期望的给定值。

2.2 基于广义自控网系统的PID控制器建模

由于广义自控网系统弧上的权受库所控制, 能够清楚地表现系统参数受系统状态的影响, 且系统控制和权值调整通过变迁的激发而发生。遵循单神经元PID控制原理, 采用层次化建模手段建立图3所示的广义自控网系统控制模型。图中库所内的符号代表对应库所的标识变量, 且为了方便与图2对比, 变量符号采用了与图2一致的变量名。

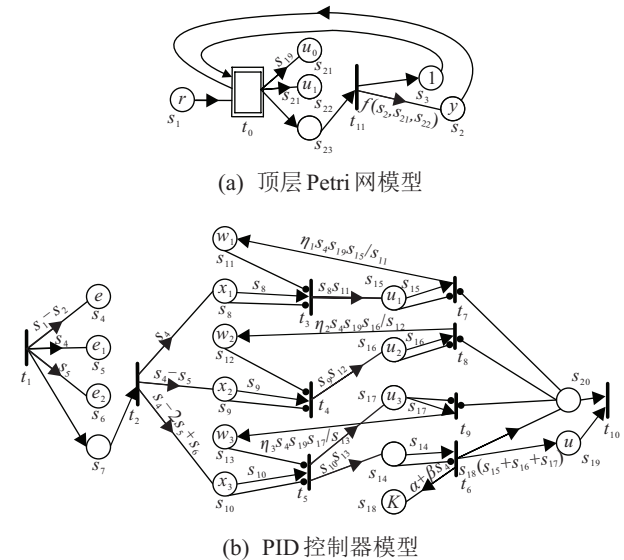


图3 PID控制器的广义自控网系统描述

1) 顶层模型。图3(a)为PID控制系统的顶层Petri网模型示意图。图中: 宏变迁 t_0 代表了PID控制器, s_1 为系统输入库所, s_2 为控制对象输出库所。启动后, PID控制器周期性地读取外部参考输入和被控对象输出值, 计算出被控对象的控制输入。为描述方便, 假设当前控制次数为 h 。库所 s_{21} 和 s_{22} 分别保存第 h 次和第 $h-1$ 次控制中被控对象的控制输入。库所 s_3 和 s_{23} 分别保存 t_0 和 t_{11} 的使能条件, 初始时 s_3 标识为1, 宏变迁 t_0 激发, PID控制器完成控制过程后, s_{23} 获得托肯值, 此时 t_{11} 激发, 重新计算被控对象的输出, s_3 标识再次为1, 从而开始下一次控制过程。控制对象输出值根据弧 (t_{11}, s_2) 的权值函数 $f(s_2, s_{21}, s_{22})$ 值更新, 权值函数的具体形式由被控对象模型确定。假设系统初始标识为

$$M_0 = (M_0(s_1), M_0(s_2), M_0(s_3), M_0(s_{21}), M_0(s_{22}), M_0(s_{23})) = (r, 0, 1, 0, 0, 0),$$

则一次控制过程中, 系统标识演化过程为

$$\begin{aligned} &(r, 0, 1, 0, 0, 0) \xrightarrow{t_0} \\ &(r, 0, 0, M(s_{19}), M(s_{21}), 1) \xrightarrow{t_{11}} \\ &(r, f(M(s_2), M(s_{21}), M(s_{22})), \end{aligned}$$

$$1, M(s_{19}), M(s_{21}), 0).$$

若控制对象第 h 次控制时输出函数与第 $h-2$ 次控制中控制输入相关,则图3(a)模型中需增加保存第 $h-2$ 次被控对象控制输入的库所,以及从 t_0 指向该库所的写弧。

2) PID控制器模型. PID控制器的细化模型如图3(b)所示. t_1 发生时,根据其相连的连接弧类型, t_1 后集库所标识相应发生变化,系统中其余库所标识不变,即

$$\begin{bmatrix} M'(s_4) \\ M'(s_5) \\ M'(s_6) \\ M'(s_7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s_4) \\ M(s_5) \\ M(s_6) \\ M(s_7) \end{bmatrix} + \rightarrow \begin{bmatrix} s_1 - s_2 - s_4 \\ s_1 - s_5 \\ s_1 - s_6 \\ 1 \end{bmatrix} = [M(s_1) - M(s_2) \quad M(s_4) \quad M(s_5) \quad 1 + M(s_7)]^T.$$

库所 s_7 为 t_2 的使能条件,初始时 s_7 标识为0, t_1 发生后, s_7 得到托肯,变迁 t_2 发生,此时 t_2 后集库所标识发生变化为

$$\begin{bmatrix} M'(s_7) \\ M'(s_8) \\ M'(s_9) \\ M'(s_{10}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s_7) \\ M(s_8) \\ M(s_9) \\ M(s_{10}) \end{bmatrix} + \rightarrow \begin{bmatrix} -1 \\ s_4 - s_8 \\ s_4 - s_5 - s_9 \\ s_4 - 2s_5 + s_6 - s_{10} \end{bmatrix} = [0 \quad e \quad e - e_1 \quad e - 2e_1 + e_2]^T.$$

变迁 t_1 、 t_2 及其前后集库所用于实现图2中状态转换功能.库所 $s_8 \sim s_{10}$ 分别用于保存控制器的3个控制输入量 x_1 、 x_2 和 x_3 。

库所 s_8 和 s_{11} 至 t_3 分别连接有允许弧,当 s_8 标识和 s_{11} 标识非0时,变迁 t_3 发生,从而有

$$\begin{bmatrix} M'(s_8) \\ M'(s_{11}) \\ M'(s_{15}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s_8) \\ M(s_{11}) \\ M(s_{15}) \end{bmatrix} + \rightarrow \begin{bmatrix} -s_8 \\ 0 \\ s_8 s_{11} - s_{15} \end{bmatrix} = [0 \quad w_1 \quad x_1 w_1]^T.$$

s_8 标识变为0,可防止 t_3 重复发生.同理,若 $M(s_9) \neq 0$,则变迁 t_4 发生, $M'(s_{16}) = W_M(t_4, s_{16}) = x_2 w_2$, $M'(s_9) = 0$.若 $M(s_{10}) \neq 0$,则变迁 t_5 发生, $M'(s_{17}) = W_M(t_5, s_{17}) = x_3 w_3$, $M'(s_{10}) = 0$ 。

库所 s_{14} 控制变迁 t_6 发生与否,当 t_3 、 t_4 和 t_5 至少有一个发生时, s_{14} 得到托肯,变迁 t_6 发生,从而有

$$\begin{bmatrix} M'(s_{14}) \\ M'(s_{18}) \\ M'(s_{19}) \\ M'(s_{20}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s_{14}) \\ M(s_{18}) \\ M(s_{19}) \\ M(s_{20}) \end{bmatrix} + \rightarrow \begin{bmatrix} -s_{14} \\ \alpha + \beta s_4 - s_{18} \\ s_{18}(s_{15} + s_{16} + s_{17}) \\ 1 - s_{20} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将上述方程中的库所标识用库所标识变量替换后,即可得到与式(3)等价的控制器输出方程。

基于广义自控网系统建立的控制器,以变迁为中心,采用与单神经元PID网络相同的学习算法来调整参数库所。

图3(b)控制器模型中包含4个参数库所: s_{11} 、 s_{12} 、 s_{13} 和 s_{18} .其中: s_{11} 、 s_{12} 和 s_{13} 分别保存输入权值 w_1 、 w_2 和 w_3 , s_{18} 保存输出比例系数 K . t_6 发生时, K 根据当前系统误差值反向调整,具体算法如方程(5)所示.其中: α 值用来保证 $K > 0$, β 是误差的加权比例系数^[19]。

输入权值 w_1 、 w_2 和 w_3 的调整分别由变迁 t_7 、 t_8 和 t_9 控制,且并行执行.从图3(b)分析可知, t_7 、 t_8 和 t_9 的发生条件都受 s_{20} 作用,除此之外还分别由 u_1 、 u_2 和 u_3 决定.图3(b)控制器模型中示意了有监督的Hebb学习规则,若本次控制过程输入权值需调整,则输入权值分别由对应输入弧权值函数进行调整,增量如下:

$$\begin{aligned} \Delta w_1 &= \eta_1 M(s_4) M(s_{19}) M(s_{14}) / M(s_{11}) = \eta_1 e u x_1, \\ \Delta w_2 &= \eta_2 M(s_4) M(s_{19}) M(s_{16}) / M(s_{12}) = \eta_2 e u x_2, \\ \Delta w_3 &= \eta_3 M(s_4) M(s_{19}) M(s_{17}) / M(s_{13}) = \eta_3 e u x_3. \end{aligned}$$

对比单神经元PID控制器,基于广义自控网系统的PID控制器模型具有以下特点:

1) 控制器参数被建模为库所。

2) 从控制器的3个控制输入库所到相应的参数库所存在一个由托肯转移形成的局部路径.该路径上的变迁都发生时,相应的参数才调整,即学习过程发生.但是,由于PID神经网络是一种全联结网络结构^[20],在单神经元PID控制器中学习过程发生在所有的权值上。

3) 学习规则体现在权函数中,不同的权函数对应不同的学习规则。

4) 控制器模型中3个参数 w_1 、 w_2 和 w_3 调整过程为并行方式。

图3(a)所建立的模型用于实现单变量系统控制,参考图2(b)的多变量单神经元PID控制结构,即可实现多变量系统的广义自控网系统模型。

3 仿真实例

为了验证基于广义自控网系统所建立的解耦控制器的控制效果,本文以双容水箱为被控对象进行仿真研究. 图4为双容水箱系统的结构示意图.

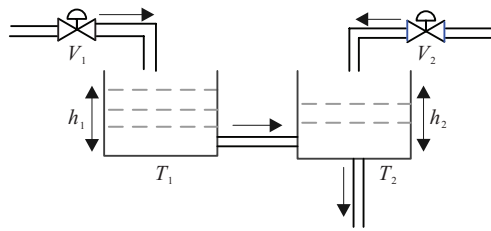


图4 双容水箱液位系统

水箱 T_1 和 T_2 的入水流量分别由阀 V_1 和阀 V_2 控制. 2个水箱的横截面积均为 A . h_1 和 h_2 分别为 T_1 和 T_2 的液位. 两水箱之间由管子连接,在 T_2 下有1个出水管. 当 h_1 偏低而 V_1 开度增大时, h_2 将升高;当 h_2 偏低时, V_2 开度增大, h_1 升高. 可见 h_1 与 h_2 之间存在着耦合,相互影响. 系统控制目标是使 h_1 和 h_2 等于给定高度,且 h_1 和 h_2 分别由 V_1 和 V_2 独立控制.

设 T_1 液位高于 T_2 液位,由物料平衡原理可以得到系统的动态方程式如下:

$$\begin{aligned} \dot{h}_1(t) &= \frac{k_1}{A}u_1 - \frac{1}{A}\beta_{12}s_1\sqrt{2g(h_1 - h_2)}, \quad (6) \\ \dot{h}_2(t) &= \frac{k_2}{A}u_2 + \frac{1}{A}\beta_{12}s_1\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - \frac{1}{A}\beta_{20}s_2\sqrt{2gh_2}. \quad (7) \end{aligned}$$

其中: k_1 和 k_2 分别为 T_1 和 T_2 的最大入水流量, u_1 为 V_1 的开度, u_2 为 V_2 的开度; β_{12} 为 T_1 和 T_2 之间管道流量系数, β_{20} 为 T_2 出水管道的流量系数; S_1 为 T_1 和 T_2 相连管道的截面积, S_2 为 T_2 排水管道的截面积; g 为重力系数. 将式(6)和(7)离散化,并用差分方程的形式表示. 建立双容水箱控制系统的顶层模型如图5.

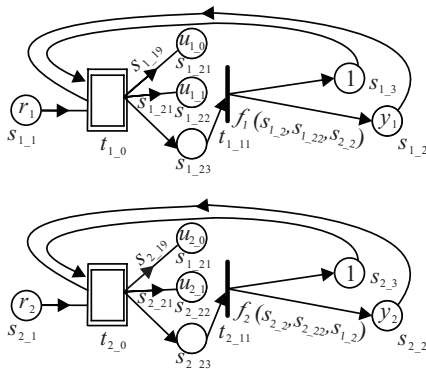
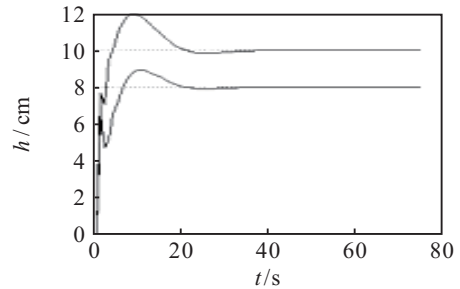


图5 双容水箱控制系统的广义自控网系统模型

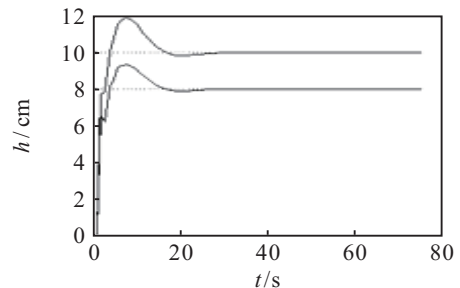
图5中: s_{1-1} 和 s_{2-1} 表示 T_1 和 T_2 液位的设定值, s_{1-2} 和 s_{2-2} 表示 T_1 和 T_2 的实际液位;本次和前次控制过程所得 V_1 的开度值由 s_{1-21} 和 s_{1-22} 表示, V_2 的开度值由 s_{2-21} 和 s_{2-22} 表示;弧 (t_{1-11}, s_{1-2}) 和

(t_{2-11}, s_{2-2}) 的权值函数分别由式(6)和(7)确定. 设图5中的双容水箱控制系统各参数为 $A = 490.87 \text{ cm}^2, S_1 = S_2 = 3.142 \text{ cm}^2, k_1 = k_2 = 533.3 \text{ ml/s}, \beta_{12} = 0.4637, \beta_{20} = 0.4680$.

将目标水位设定为 $r_1 = 10 \text{ cm}, r_2 = 8 \text{ cm}$. 控制器采用有监督的Hebb学习规则,学习速率设定为 $\eta_1 = 0.2, \eta_2 = 0.9$ 和 $\eta_3 = 0.8$. 对应 T_1 的控制器模型 $t_{1-0}, \alpha = 0.7, \beta = 0.001$;对应 T_2 的控制器模型 $t_{2-0}, \alpha = 0.75, \beta = 0.01$. 模型仿真结果见图6(a).



(a) 广义自控网系统输出



(b) 单神经元PID系统输出

图6 系统输出曲线图

由于广义自控网系统控制器采用了与单神经元PID控制器相同的控制算法,在相同的初始条件和学习规则下,两者在响应速度、超调量等方面具有相同的性能,通过对比图6(a)和图6(b)可得到验证,但广义自控网系统控制器控制过程中输入权值的调整次数较少. 针对本实例,在75个控制周期内,控制器 t_{1-0} 中 $w_1 \sim w_3$ 的调整次数分别为70、61和55,控制器 t_{2-0} 中 $w_1 \sim w_3$ 的调整次数分别为70、59和52.

当水箱液位稳定后,在 $t = 60 \text{ s}$ 时改变 T_1 液位给定值为 11 cm . 从图7可以看出, T_1 液位很快到达新的给定值,调节过程较快且不会对 T_2 液位产生影响.

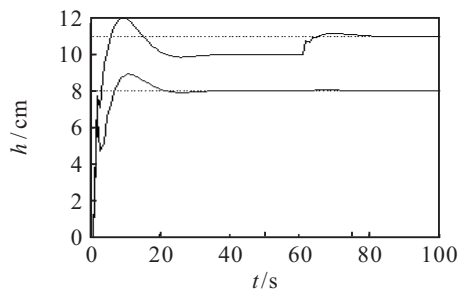


图7 重新设定 T_1 液位值后广义自控网系统输出

4 结论

本文提出了一种基于Petri网的PID控制器模型,这种模型利用Petri网的权受控特性和变迁发生规则,实现了系统控制和参数学习的有机统一,且不同参数学习过程可以并行执行,易于用FPGA工程实现.基于广义自控网系统模型的非线性系统解耦控制器的本质是单神经元PID解耦控制原理在Petri网中的实现,具有普遍适用性.实例仿真验证了本文所提方法的有效性.

本文的研究方法为神经网络控制和Petri网控制搭建了连接的桥梁.下一步将拓展本文的研究方法,通过广义自控网系统建模与PID控制相结合实现基于Petri网的混杂系统多模型控制.

参考文献(References)

- [1] 张海丽,张宏立,关保林.基于PID对角阵的多输入多输出解耦控制[J].工业控制计算机,2012,25(11): 67-68.
(Zhang H L, Zhang H L, Guan B L. PID diagonal matrix multi-input multi-output decoupling control[J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(11): 67-68.)
- [2] Hao L, Ma C L, Li F. Study of adaptive PID controller based on single neuron and genetic optimization[C]. Int Conf on Electronic Measurement & Instruments. Xi'an: IEEE, 2007: 240-243.
- [3] Ting-Kai Liu, Jih-Gau Juang. A single neuron PID control for twin rotor MIMO system[C]. Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore: IEEE, 2009: 186-191.
- [4] 杨金芳,马平,张华磊.自适应单神经网络在耦合系统中的应用[J].信息技术,2004,28(20): 42-44.
(Yang J F, Ma P, Zhang H L. Application of self-adapting neural network in coupling system[J]. Information Technology, 2004, 28(20): 42-44.)
- [5] 王秀君,胡协和.一种改进的单神经元PID控制策略[J].浙江工业大学学报,2011,45(8): 1498-1501.
(Wang X J, Hu X H. An improved control strategy of single neuron PID[J]. J of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(8): 1498-1501.)
- [6] Kusumoputro B, Rif'an M. Performance characteristics of an improved single neuron PID controller using additional error of an inversed control signal[C]. World Congress on Industrial Control Systems Security. London: IEEE, 2016, 1(1): 58-62.
- [7] 支阿玲,骆再飞,王寿光,等.一种新型的混合Petri网:步混合Petri网[J].江南大学学报:自然科学版,2005,4(4): 331-334.
(Zhi A L, Luo Z F, Wang S G, et al. A new hybrid Petri net: Step hybrid petri nets[J]. J of Jiangnan University: Natural Science Edition, 2005, 4(4): 331-334.)
- [8] Wang Y Z, Lin L. Controller design using coloured Petri nets — With a case study of the papermaking process control[C]. Int Conf on Modelling. Shanghai: IEEE, 2011: 415-421.
- [9] Liu K, Fridman E. Controllable Petri net-based implementation approach for motor control systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4599-4612.
- [10] Letia T S, Kilyen A O. Fuzzy logic enhanced time Petri net models for hybrid control systems[C]. IEEE Int Conf on Automation. Cluj-Napoca: IEEE, 2016: 1-6.
- [11] Farahani A A, Dideban A, Najafgholi E. Modeling continuous systems by Petri nets using speed control arcs[C]. Int Conf on Control. Qazvin: IEEE, 2016: 75-80.
- [12] 袁崇义. Petri网应用[M].北京:科学出版社,2013: 74-75.
(Yuan C Y. Application of Petri nets[M]. Beijing: Science Press, 2013: 74-75.)
- [13] 陈樊,叶献伟,高建华.自控连续Petri网模型及其应用[J].浙江理工大学学报,2008,25(6): 680-684.
(Chen F, Ye X W, Gao J H. Self-controlled and continuous Petri net and application[J]. J of Zhejiang Sci-Tech University, 2008, 25(6): 680-684.)
- [14] 万军,赵不赓.线性定常系统的Petri网解耦控制[J].控制理论与应用,2014,31(9): 1213-1220.
(Wan J, Zhao B H. Petri nets decoupling control for linear time-invariant systems[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(9): 1213-1220.)
- [15] Benarbia T, Labadi K, Omari A, et al. Balancing dynamic bike-sharing systems: A Petri nets with variable arc weights based approach[C]. Int Conf on Control. Hammamet: IEEE, 2013: 112-117.
- [16] 谢敏,吴亚雄,黄庶,等.基于有色自控Petri网的电网故障区域识别[J].电力系统保护与控制,2016,44(2): 56-64.
(Xie M, Wu Y X, Huang S, et al. Identification of fault area in power system based on colored self-modifying Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 56-64.)
- [17] 万军,赵不赓.基于Petri网的数字系统建模和VHDL实现[J].计算机应用研究,2017,34(2): 458-462.
(Wan J, Zhao B H. Petri net modeling and VHDL implementation of digital systems[J]. Application Research of Computer, 2017, 34(2): 458-462.)
- [18] 方晓燕,王丽丹,段书凯.基于忆阻的自适应单神经元多变量解耦PID控制器[J].重庆理工大学学报:自然科学,2013,27(3): 91-96.
(Fang X Y, Wang L D, Duan S K. Adaptive single-neuron multivariate decoupling PID controller based on memristor[J]. J of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2013, 27(3): 91-96.)
- [19] 阳帅,任金霞.一种改进的单神经元PID控制器[J].制造业自动化,2010,32(11): 119-121.
(Yang S, Ren J X. A kind of improved single neuron PID controller[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(11): 119-121.)
- [20] 李辉.一种多变量模糊神经网络解耦控制器的设计[J].控制与决策,2006,21(5): 593-596.
(Li H. Design of multivariable fuzzy-neural network decoupling controller[J]. Control and Decision, 2006, 21(5): 593-596.)