

基于自控网系统的混杂控制

万 军^{1,2†}, 赵不贿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: 混杂控制系统通常是复杂的非线性控制系统, 难以用统一的模型进行建模. David和Alla提出的混杂Petri网, 虽然可以解决一般混杂系统的建模问题, 并得到了广泛的应用, 但对于传统的如PID这类控制器, 缺乏统一建模的能力. 探讨了基于广义自控网系统的混杂控制方法, 实现了对混杂控制器中监控器和数字控制器进行统一的Petri网建模. 仿真实例设计了基于广义同步自控网系统的电加热炉控制系统, 给出了可根据不同温度状态实施多种控制策略的变结构数字控制器模型, 并详细分析了控制器的性能, 证明了广义自控网系统具有十分强大的建模能力和广泛的应用前景.

关键词: Petri网; 混杂控制; 建模; 监控器; 数字控制器

引用格式: 万军, 赵不贿. 基于自控网系统的混杂控制. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1528 – 1535

DOI: 10.7641/CTA.2019.80539

Hybrid control using cyber net system

WAN Jun^{1,2†}, ZHAO Bu-hui¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. School of Urban Railway Transportation, Changzhou University, Changzhou Jiangsu 213164, China)

Abstract: Hybrid control systems are often complex nonlinear control systems which are difficult to be modeled with a unified model. The hybrid Petri nets (HPN) proposed by David and Alla can model general hybrid systems and has been widely used. However, HPN lacks the ability of unified modeling for traditional controllers such as PID. Based on the proposed generalized cyber net system, the hybrid control method is discussed. Uniform modeling of the supervisor and digital controllers in hybrid controllers using Petri nets is implemented. In the simulation example, the electric heater control system is designed by using the generalized synchronous cyber net system. A variable structure digital controller model which can implement various control strategies according to different temperature states is given, and the detailed performance analysis of the controller is performed. It is proved that the proposed generalized cyber net system has very powerful modeling capabilities and broad application prospects.

Key words: Petri nets; hybrid control; modeling; supervisor; digital controller

Citation: WAN Jun, ZHAO Buhui. Hybrid control using cyber net system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 1528 – 1535

1 引言

混杂控制系统是指其被控对象或控制器中含有离散模型, 并且与连续模型一起来确定系统的性能^[1]. 混杂控制系统的设计目标就是要设计满足控制性能与稳定性的混杂控制器. 一般混杂控制系统的建模采用异构建模技术^[2], 具有分层结构, 即是由事件驱动的离散操作机构、连续变量受控过程和介于这二者之间的转换接口3个部分有机组成的一个统一体^[3]. 多层结构更加贴近于大多数的实际复杂系统, 因此受到

人们的重视. 但各层次的模型不同, 是一个多模型集成系统, 在理解和分析上都有不少的困难, 尤其是模型之间难以很好地衔接, 增加了分析与设计的难度. 因而人们更希望能够找到混杂控制系统的统一模型.

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. Petri网已经广泛的应用于混杂控制系统的建模、分析和设计. 文献[4–5]均基于混杂Petri网建模混杂控制系统, 其中文献[4]采用了面向对象技术为嵌入式混杂控

收稿日期: 2018–07–19; 录用日期: 2019–01–11.

†通信作者. E-mail: 13815074795@139.com; Tel.: +86 13815074795.

本文责任编辑: 赵千川.

国家自然科学基金项目(61070058), 江苏高校优势学科建设工程项目PAPD资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61070058) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD).

制系统建模, 文献[5]提出了一种称为混合状态Petri网(hybrid state Petri net, HSPN)的混杂Petri网, 用于过程控制混杂系统建模, 并依据HSPN模型来设计混合控制器. 文献[6]根据高压直流输电(high voltage direct current transmission, HVDC)控制系统的运行特性, 采用混杂Petri网对HVDC控制系统进行建模, 该模型能识别系统状态并驱动离散库所标识的改变实现不同的控制方式. 文献[7]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[8]针对电加热炉温度控制提出了全电压控制、零制动控制和PID控制的多模型控制方案, 利用传统的Petri网设计监督控制器实现温度控制系统控制器的实时切换控制. 针对变工况切换过程中切换点难以确定且切换准则不完善等问题^[9], 徐宝昌等将模型预测嵌入到Petri中, 使Petri网能够自主决定切换时刻, 减少了系统调节时间和超调量. 文献[10]提出了一种基于模型的低成本直流电机控制系统实施方法, 该方法采用可控Petri网(controlable Petri net, CrPN), 将库所元素划分为普通库所、状态库所、电机库所和驱动库所, 并采用比例控制模型和比例积分控制模型用于具体电机控制. 文献[11]提出了针对混合嵌入式系统控制器的设计框架, 该框架利用输入输出库所变迁网(input and output place transition, IOPT网), 同时支持事件驱动和数据流驱动设计过程, 通过闭环无刷直流电机控制器的设计实例验证了框架的有效性. 文献[12]提出了具有模糊逻辑规则的增强型时间Petri网, 其中Petri网和模糊逻辑规则分别对混杂控制系统的离散事件和连续被控对象进行建模.

现有的基于Petri网的混杂控制方法是在连续过程控制系统的基础上, 引入Petri网作为离散事件监控器. 控制被控对象的连续控制器用领域内传统控制方法.

自控网系统又称自修正系统, 是一类高级Petri网系统. 网中有向弧的权值受库所标识控制, 从而网系统的自身行为改变可变权的值^[13]. 本文课题团队对自控网系统的理论和应用进行了一系列深入的研究. 其中文献[14]提出了广义自控网系统和广义连续自控网系统模型用于连续系统的分析和控制, 并已实现了线性定常系统解耦控制. 文献[15]针对数字系统建模和综合, 提出了广义同步自控网系统, 并实现了自控网模型到VHDL代码的转换方法, 可同时适用于同步系统和由外部事件驱动的异步系统. 本文基于广义同步自控网系统, 探讨了一种新的基于Petri网的混杂控制方法. 该方法可结合成熟的离散事件动态系统理论与连续系统动态理论, 统一采用广义同步自控网系统对离散事件监控器和被控对象的数字控制器进行建模、分析和综合, 从而实现了在Petri网框架下的系统混杂控制.

2 广义同步自控网系统

定义1 $\Sigma = (S, T; F, W, M)$ 构成自控网系统的条件是^[13]:

- 1) $N = (S, T; F)$ 构成有向网, 称为 Σ 的基网.
- 2) $W: S \times T \cup T \times S \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\} \cup S$, 且 $W(x, y) \neq 0$ 当且仅当 $(x, y) \in F$, 称为 Σ 的权函数.
- 3) $M_0: S \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ 为 Σ 的初始标识.

定义2 六元组 $\Sigma = (S, T; F, K, W, M)$ 构成广义自控网系统的条件是

- 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; $K_L: S \rightarrow \mathbb{R}$; $K_H: S \rightarrow \mathbb{R}$. K_L, K_H 分别称为下界容量函数和上界容量函数. $\forall s \in S, K_L(s) < K_H(s)$, s 的容量可表示为 $[K_L(s), K_H(s)]$. 当 $K_L(s), K_H(s)$ 为无穷时, 容量的闭区间变成开区间.
- 3) $W: F \rightarrow \mathbb{R} \cup \text{Exp}(S)$ 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) $M: S \rightarrow \mathbb{R}$ 称为 N 的标识, Σ 的初始标识记为 M_0 .

定义3 变迁发生条件.

- 1) 标识 M 下的权值定义为

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

$$W_M(x, y) =$$

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

e_M 是指将表达式 e 中的 $s_i \in S$ 用其标识 $M(s_i)$ 代入的结果, 其中 $i = 1, 2, \dots, |S|$. 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 有发生权的条件是

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

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

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4 变迁发生后果.

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:

$$M'(s) =$$

$$\begin{cases} M(s) - W_M(s, t), & s \in \cdot t - t, \\ M(s) + W_M(t, s), & s \in t \cdot - t, \\ M(s) - W_M(s, t) + W_M(t, s), & s \in \cdot t \cap t, \\ M(s), & t \notin \cdot t. \end{cases}$$

M' 为 M 的后继的事实记作 $M[t > M']$.

自控网系统的状态方程形式为

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

其中: M' 表示 M_0 的后继, 矩阵运算符“ $+ \rightarrow$ ”表替换加, 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 5 三元组 (Σ, F, G) 构成广义同步自控网系统(generalized synchronized self-control network, GSSN)的条件是

- 1) $\Sigma = (S, T; F, K, W, M)$ 是一个广义自控网系统.
- 2) $G: T \rightarrow E \cup \{\epsilon\}$, 其中 E 为 Σ 的的外部事件集, ϵ 表示一个恒发生事件.

图1(a)示意了一个广义同步自控网系统模型, 其中变迁 T_1 和 T_2 分别与信号 X_1 的上升沿事件和信号 X_2 的下降沿事件相关联. 根据自控网系统的状态方程(1), 标识计算如下:

$$M = \begin{bmatrix} 5 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ s_2 & -s_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} + \rightarrow \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ -s_3 & -s_1 & -s_1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 6 \\ 4 \end{bmatrix} + \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -s_1 & -s_1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 6 \end{bmatrix}.$$

图1(b)给出了 X_1 和 X_2 时序及其系统标识演化情况.

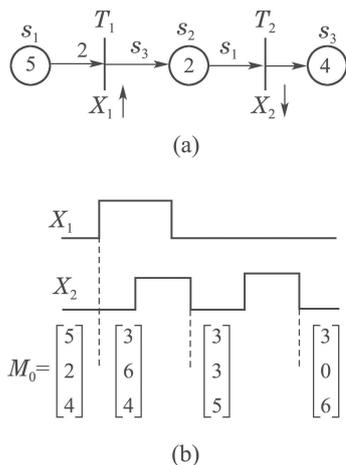


图1 广义同步自控网系统实例
Fig. 1 An example of GSSN

为了反映控制过程中对数据的读写关系, 以下定义两类特殊的权控制弧.

定义 6 广义自控网系统中, 从库所指向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 7 广义自控网系统中, 从变迁指向库所的

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, 而与原有标识值无关.

图2示意了读弧和写弧的含义及其表示. 考虑图2(a)的广义同步自控网系统, 变迁 t 与信号 X 同步, t 发生时, 库所 s_1, s_2 中的标识不发生任何改变, 而库所 s_3 的标识只与 s_1, s_2 标识有关, 与其原标识无关. 图2(a)模型可用读弧和写弧表示成等价的图2(b)形式.

对比普通Petri网, 广义同步自控网系统具有以下两个显著的特点:

- 1) 库所的标识和有向弧的权值可为任意实数.
- 2) 有向弧的权函数可表示为以库所自变量的任意时间函数表达式, 从而满足对一般的非线性系统建模的需要.

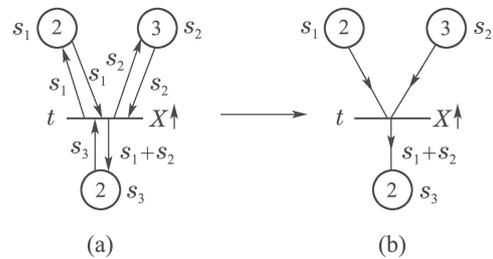


图2 采用读弧和写弧的广义同步自控网系统示意图
Fig. 2 The sketch map of GSSN using read arc and write arc

3 基于自控网系统的混杂控制器设计

整个混杂控制器由监控器和数字控制器组成. Petri网监控器监控被控对象的状态变量或输出量, 按照设定好的控制策略确定工作模态, 实时切换被控对象的控制行为. 数字控制器实现对被控对象的连续控制, 为了使系统达到良好的控制效果, 针对被控对象所处的不同状态可采用不同的数字控制器. 监控器和数字控制器是同步运行的.

基于自控网的混杂控制系统框图如图3所示. 其中: R 和 Y 分别为被控对象的设定值和输出值, E 为误差值, U 为控制器的输出值. 混杂控制器中的监控器周期性的计算误差值, 根据当前误差选择相应的某个数字控制器.

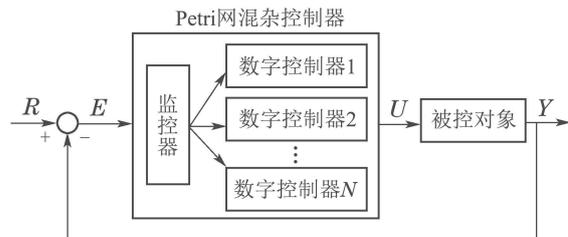


图3 基于自控网系统的混杂控制方案
Fig. 3 Hybrid control schema based on cyber net system

3.1 监控器设计

通常可根据被控对象的实际运动状态, 并结合控

制器的性能需求考虑控制系统工作模式的划分. 监控器实现工作模式的切换. 监控器的状态方程可表示为 $M_k = \phi(M_{k-1}, x_k, v_k)$, ϕ 表示离散状态的切换函数, 式中: M_k 表示 k 时刻所处的工作模式, x_k 和 v_k 分别表示 k 时刻系统的连续状态变量和离散状态变量.

基于广义同步自控网系统建立的监控器一般结构示意图如图4所示. 图中: 库所 x 和 v 分别表示决定模式改变的连续控制变量和离散状态, 库所 M_1 和 M_2 代表系统的控制模式. 变迁 t 的发生与时钟信号 s 的上升沿同步. 库所 x 和变迁 t 之间采用加权允许弧和加权抑制弧^[16], 用于判定连续控制变量的范围. 假定连续控制变量的范围为 $[L, H]$, 则该监控器实现的离散状态关系表示如下.

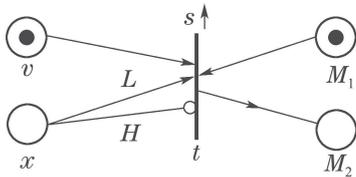


图4 基于广义同步自控网系统的监控器
Fig. 4 GSSN based supervisor

3.2 数字控制器设计

在过程控制系统中, 控制器将系统被控变量的测量值 $y(t)$ 与设定值 $r(t)$ 相比较, 如果存在偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$, 则按预先设置的不同控制规律, 发出控制信号 $u(t)$, 去控制生产过程, 使被控变量的测量值与设定值相等. 基于广义同步自控网系统易于实施各种过程控制方法, 以下讨论一些典型的控制器设计.

1) 位式控制器.

位式控制是一种简单实用的控制规律, 其中较常用的是双位控制. 双位控制器输入输出表达式为

$$U = \begin{cases} U_1, & e > e_1, \\ U_2, & e < e_2. \end{cases} \quad (2)$$

双位控制器只有两个输出值. 上述公式中 e 和 u 分别代表测量值和输出值, e_1 和 e_2 表示两个给定的边界值, U_1 和 U_2 代表两个给定的输出值. 当测量值在两个边界值之间时, 控制器不动作. 基于广义同步自控网系统可以建立如图5所示的双位控制器.

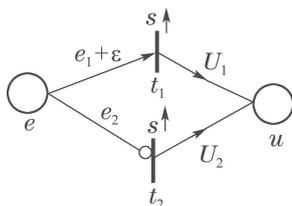


图5 基于广义同步自控网系统的双位控制器
Fig. 5 GSSN based two-position controller

图中: 加权允许弧 (e, t_1) 的权值表达式中 e 代表小的常量, 从而实现了控制器在边界值 e_1 处无输出.

参考双位控制器模型, 可类似的实现其他类型位式控制器、Bang-Bang控制器等模型.

2) 智能PID控制器.

PID控制是过程控制中应用最为广泛的一种控制规律. 计算机PID控制中, 采用数字PID控制器. 但传统PID控制器存在不易在线实时整定参数、难以对复杂过程和时变系统参数进行有效控制等问题. 由具有自学习和自适应能力的单神经元构成单神经元PID控制器具有结构简单、易于在线调整、鲁棒性强等的优点. 以下详细讨论单神经元PID控制算法的广义同步自控网系统实现.

单神经元PID控制器的控制算法为

$$\begin{cases} \Delta u(k) = w_1 e(k) + w_2 [e(k) - e(k-1)] + \\ \quad w_3 [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)], \\ u(k) = u(k-1) + K \Delta u(k), \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为采样序号, $u(k-1)$ 和 $u(k)$ 分别为第 $k-1$ 和第 k 时刻控制器输出值, $e(k-2)$, $e(k-1)$ 和 $e(k)$ 分别为第 $k-2$ 、第 $k-1$ 和第 k 时刻所得的偏差信号, $w_i (i = 1, 2, 3)$ 为神经元控制器的3个权值, K 为神经元的比例系数. 对比式(3)和增量式PID控制算法可知, 权值 $w_i (i = 1, 2, 3)$ 分别对应为PID控制器的积分、比例和微分系数, 通过神经元的自学习功能来进行自适应调整. 学习算法如下:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i r_i(k), \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

其中: $r_i(k)$ 为采取的学习规则, η_1 , η_2 和 η_3 分别为积分、比例和微分的学习速率.

图6给出了所设计的单神经元PID控制器的广义同步自控网系统模型. 其中虚线框中模型为单神经元PID控制器. 虚线框外的库所 s_1 和 s_2 分别表示PID控制过程的启动和结束标志, 库所 s_3 为系统控制偏差. s_1 和 s_3 的托肯值由图3中监控器计算. s_2 托肯值为1时将控制器输出作用于被控对象.

控制器模型中包含4个参数库所: s_8 , s_9 , s_{10} 和 s_{15} . 其中 s_8 , s_9 和 s_{10} 分别保存输入权值 w_1 , w_2 和 w_3 , s_{15} 保存输出比例系数 K . 假设当前控制采样次数为 k . 变迁 t_2 与采样信号 C 下降沿同步, 确保 t_1 发生后激发 t_2 以正确读取到偏差值. t_2 发生后集库所标识相应发生变化, 即

$$\begin{bmatrix} M'(s_4) \\ M'(s_5) \\ M'(s_6) \\ M'(s_7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s_4) \\ M(s_5) \\ M(s_6) \\ M(s_7) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_3 - s_4 \\ s_4 - s_5 \\ s_5 - s_6 \\ 1 - M(s_7) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s_3) \\ M(s_4) \\ M(s_5) \\ 1 \end{bmatrix}.$$

可以看出, 库所 s_4 , s_5 和 s_6 分别保存第 k 次、第 $k-1$ 次以及第 $k-2$ 次误差. 库所 s_7 为 t_3 的使能条件, s_7 得到托肯时, t_3 发生, 此时 t_3 后集库所标识发生变化为

$$\begin{bmatrix} M'(s_{11}) \\ M'(s_{12}) \\ M'(s_{13}) \\ M'(s_{14}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s_{11}) \\ M(s_{12}) \\ M(s_{13}) \\ M(s_{14}) \end{bmatrix} + \rightarrow \begin{bmatrix} s_4 s_8 - s_{11} \\ (s_4 - s_5) s_9 - s_{12} \\ (s_4 - 2s_5 + s_6) s_{10} - s_{13} \\ 1 - s_{14} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e w_1 \\ (e - e_1) w_2 \\ (e - 2e_1 + e_2) w_3 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

库所 s_{16} 代表控制器输出. t_3 发生后, s_{14} 得到托肯, 此时 t_4 发生, 从而 s_{16} 标识改变为

$$\begin{aligned} M'(s_{16}) &= \\ M(s_{16}) + \rightarrow s_{15}(s_{11} + s_{12} + s_{13}) &= \\ M(s_{16}) + M(s_{15})(M(s_{11}) + M(s_{12}) + M(s_{13})). \end{aligned} \quad (6)$$

结合式(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. 库所 s_{17} 为变迁 t_8 的使能条件.

图6中, 权值 w_1, w_2 和 w_3 调整分别由变迁 t_5, t_6 和 t_7 控制, 且并行执行. t_5, t_6 和 t_7 的发生条件分别由 u_1, u_2 和 u_3 决定. 控制器模型中采用有监督的Hebb学习规则, w_1, w_2 和 w_3 的权值调整增量如下:

$$\begin{aligned} \Delta w_1 &= \frac{\eta_1 M(s_4) M(s_{16}) M(s_{11})}{M(s_8)}, \\ \Delta w_2 &= \frac{\eta_2 M(s_4) M(s_{16}) M(s_{12})}{M(s_9)}, \\ \Delta w_3 &= \frac{\eta_3 M(s_4) M(s_{16}) M(s_{13})}{M(s_{10})}. \end{aligned}$$

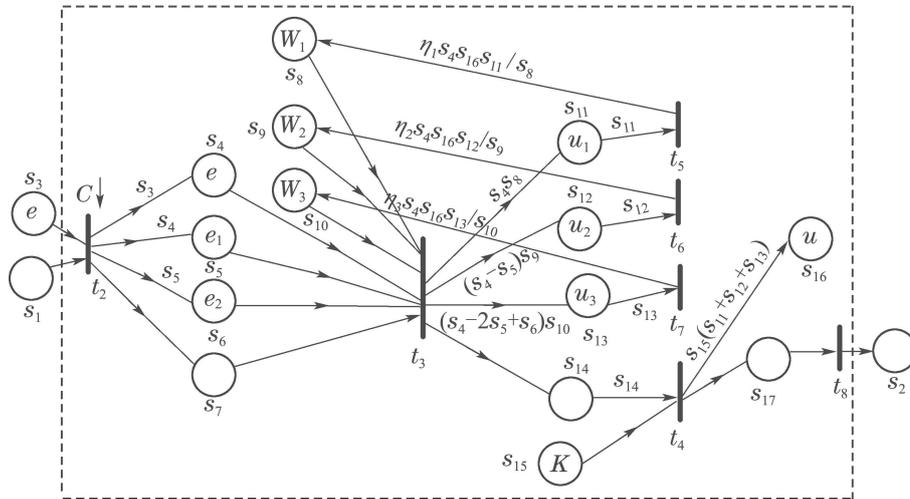


图6 基于广义同步自控网系统的单神经元PID控制器
Fig. 6 GSSN based single neuron PID controller

基于广义同步自控网系统的混杂控制具有以下特点:

- 1) Petri网不仅仅用于实现离散决策功能, 而且用于实现对被控对象的直接物理控制. 这是与其它基于Petri网的混杂控制系统的本质区别.
- 2) 允许监控器与数字控制器在同一层次直接交互. 库所可以同时属于监控器和数字控制器.
- 3) 在所提出的基于广义同步自控网系统的PID控制器中引入了神经网络机制, 实现自适应PID控制器, 且控制模型易扩展.

4 仿真实例

为了验证基于广义同步自控网系统所建立的混杂控制器的控制效果, 本文以电加热炉为被控对象进行研究. 控制目标为根据采集到的炉温, 控制执行元件的输出电压作用于电加热炉, 保证温度快速升到某一给定值. 图7所示为电加热炉系统的结构

示意图.

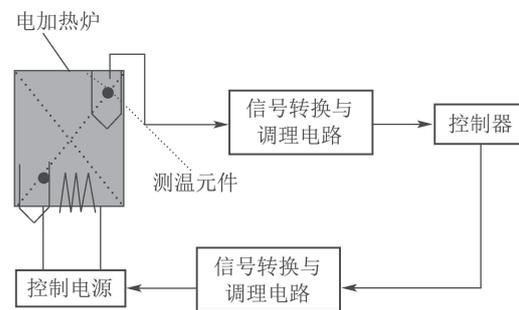


图7 电加热炉系统结构示意图
Fig. 7 Electric heater system structure

在电加热器加热的过程中, 采用位式—PID控制算法, 当炉温小于设定值且误差大于设定误差时, 采用位式控制, 使控制器输出为最大, 从而达到快速升温的效果, 当偏差小于设定值时, 采用PID控制, 保证了控制的精度^[17]. 电加热炉满足一阶惯性加纯

滞后过程, 传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}, \quad (7)$$

式中: K 为放大系数; T 为对象时间常数; τ 为对象滞后时间. 仿真中各参数为 $K=1, \tau=80 \text{ s}, T=20 \text{ s}$. 将式(7)离散化, 并用差分方程的形式可表示为

$$y(k) = 0.7165 \times y(k-1) + 0.2835 \times u(k-5).$$

控制目标为将电加热炉的目标温度设定为 $r=100^\circ\text{C}$.

4.1 电加热炉控制系统模型设计

根据以上描述的电加热炉控制算法, 可设计出如图8所示的电加热炉控制系统的Petri网模型. 从功能上将此模型分为4个部分, 为表述清楚, 图中将相应功能模型用虚线框包含. 库所 s_1 和 s_2 分别表示炉温设定值和实际值, 系统周期性采样炉温并进行温度误差的计算, 具体模型中由变迁 t_1 实施. t_1 与采样时钟信号 C 上升沿同步, t_1 发生时, 计算出温度误差 e 并保存到库所 s_3 .

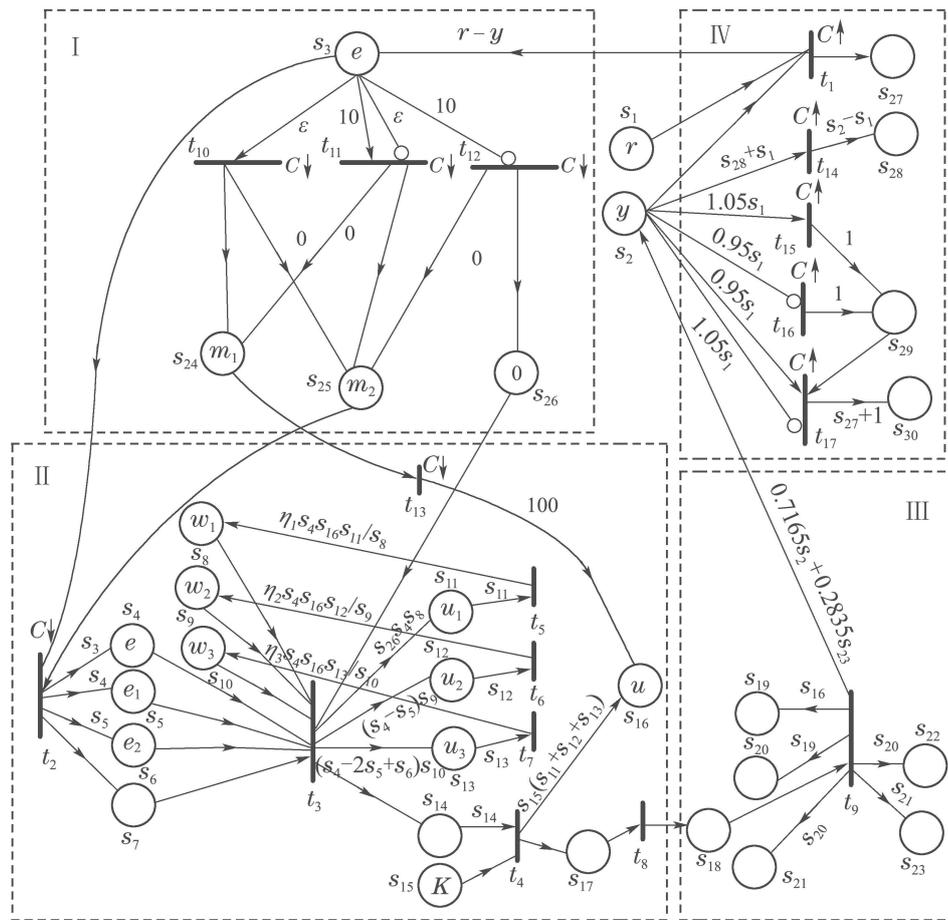


图 8 电加热炉控制系统的广义同步自控网系统模型

Fig. 8 GSSN model of electric heater control system

图中虚线框 I 中模型代表控制系统的监控器. 库所 s_{23} 和 s_{24} 表示控制器的两种模式. 变迁 t_{10}, t_{11} 和 t_{12} 周期性判断 e 的范围并设定相应的控制模式. 为了能正确读取改变的 e 值, $t_{10} \sim t_{12}$ 与 C 的下降沿同步. 具体控制模式的设定规则如下:

- 1) 当 $e \geq \epsilon$, 进入最小时间控制模式 s_{24} ;
- 2) 当 $e < \epsilon$, 进入PID控制模式 s_{25} .

规则中 ϵ 为人为设定的阈值. 为了进一步提高控制精度, 控制器中采用了积分分离式PID控制, 根据误差的范围, 设定不同的积分系数 β . β 值设定如下:

$$\beta = \begin{cases} 0, & 10 \leq e < \epsilon, \\ 1, & e < 10. \end{cases}$$

模型中, 库所 s_{25} 保存积分强度 β , 默认值为 0. t_{12} 发生时, 将 β 值修改为 1.

虚线框 II 中模型中包含 2 个数字控制器. 库所 s_{16} 代表控制器输出值. 变迁 t_{13} 实施最小时间控制, s_{24} 托肯值为 1 时, t_{13} 发生, 写弧 (t_{13}, s_{16}) 的权值为 100, 控制器输出固定值 100. s_{25} 托肯值为 1 时, t_2 发生, 启动PID控制器. 对比第 3.2 节图 6 模型, 可看出, 虚线框 II 中PID控制器模型在单神经元PID控制器

的基础上,为了引入积分分离式PID控制,添加了读弧(s_{26}, t_3),以及修改了弧(t_3, s_{11})的权值。

为了模拟电加热炉对象本身,设计了虚线框III中的模型。其中库所 $s_{19}, s_{20}, s_{21}, s_{22}$ 和 s_{23} 分别代表系统控制器第 $k-1$ 次、第 $k-2$ 次、第 $k-3$ 次、第 $k-4$ 次和第 $k-5$ 次输出值,弧(t_9, s_2)的权值函数即为电加热炉的对象控制方程。库所 s_{18} 为 t_9 的使能条件。

虚线框IV中的模型充当控制器性能观测器,详细描述见第4.2节。

需要特别指出的是,图中虚线框III和IV中的模型仅仅是针对仿真分析需要,实际控制中库所 s_2 的托肯值将通过电加热炉进行数据采集传入。

4.2 控制器性能分析

1) 稳定性分析。

在Petri网模型的基础上,通过分析变迁的激活序列,即可给出系统稳定性的判定。

当系统进入稳态以后,误差值稳定在误差带内,从而模型图中体现为系统变迁的激活序列为 $t_9 t_{12} t_2 t_3 [t_4 t_5 t_6 t_7] t_8$,且不再变为其他激活序列,其中 $t_4 t_5 t_6$ 和 t_7 并发。

2) 动态性能分析。

基于广义同步自控网系统可以有效的构造出性能观测模型。根据动态性能指标的计算方法,建立图8中虚线框IV中的模型。

① 最大超调量分析。最大超调量为控制对象最大输出值超过设定值的部分。模型中,在每个时钟信号 C 上升沿到来时,若 $M(s_2) \geq M(s_{28}) + M(s_1)$,则变迁 t_{14} 发生,从而得到 $M'(s_{28}) = M(s_2) - M(s_1)$ 。因此库所 s_{28} 表示了系统最大超调量。

② 调节时间分析。调节时间表示系统输出达到并保持在设定值 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$)误差带内所需的最短时间,文中采用 $\pm 5\%$ 误差带。模型中: t_1 在计算误差 e 的同时记录采样周期数写入 s_{27} 。若 $M(s_2) \geq 1.05M(s_1)$,变迁 t_{15} 使能;若 $M(s_2) \leq 0.95M(s_1)$,变迁 t_{16} 使能; t_{15} 或 t_{16} 发生,则库所 s_{29} 得到1个托肯,代表系统输出值脱离误差带。若 $M(s_{29}) = 1$,且

$$0.95M(s_1) \leq M(s_2) \leq 1.05M(s_1),$$

则变迁 t_{17} 使能。 t_{17} 发生时将当前采样周期数保存到库所 s_{30} ,从而可知调节时间为 $M(s_{30}) \times T_C$, T_C 是采样时钟信号 C 的周期。在图8模型中,设定

$$\eta_1 = 1.0, \eta_2 = 0.09, \eta_3 = 10.01,$$

$$T_C = 20 \text{ s}, K = 0.2, \epsilon = 30.$$

对模型进行仿真分析,得到 $M(s_{28}) = 2.8$; $M(s_{30}) =$

15。表明系统最大超调量为2.8,调节时间为 $15 \times 20 = 300 \text{ s}$ 。若设定 $\epsilon = 150$,此时系统监控器仅进入PID控制模式,再次对模型进行仿真分析,有 $M(s_{28}) = 8.5$, $M(s_{30}) = 49$ 。表明此时系统最大超调量为8.5,调节时间为 $49 \times 20 = 980 \text{ s}$ 。两种情况下的电加热炉温度输出结果如图9所示。

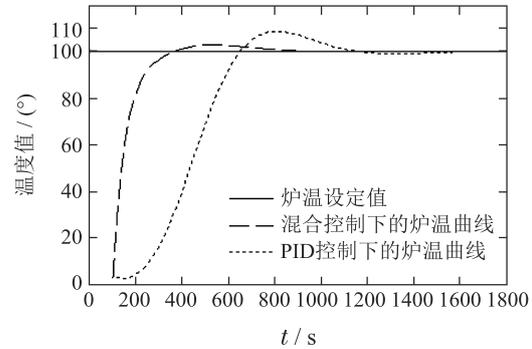


图9 电加热炉温度值曲线

Fig. 9 Electric heater temperature curves

由此仿真实例可以看出,采用广义同步自控网系统的混杂控制方法,有效的完成了电加热炉控制系统的统一建模。且采用广义同步自控网系统,可通过调整模型元素参数的方法,简单直观的建立起监控器和数字控制器之间的联系,从而调整控制策略,实现变结构控制。

5 结束语

本文提出了一种基于广义同步自控网系统的混杂控制方法,该方法完成了监控器和数字控制器的统一Petri网实现,且易于与其他智能控制方法相集成。针对广义同步自控网系统模型可以使用Petri网工具,从图形上方便分析控制系统的性能。所设计的方法具有普遍适用性。实例仿真验证了所述方法的有效性。

后续的研究重点将拓展本文现有的研究思路,具体实现广义同步自控网系统控制方法与其他先进控制技术,诸如模糊控制、预测控制等的结合,进一步扩大应用范围。

参考文献:

- [1] MALMBORG J. *Analysis and design of hybrid control system*. Lund: Lund University of Technology, 1998.
- [2] LEE J S, ZHOU M C, HSU P L. Multiparadigm modeling for hybrid dynamic systems using a Petri Net framework. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2008, 38(2): 493 - 498.
- [3] KOUTSOUKOS X D, ANTSAKLIS P J, STIVER J A, et al. Supervisory control of hybrid systems. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(7): 1026 - 1049.
- [4] HUMMEL T, FENGLER W. *Design of Embedded Control Systems Using Hybrid Petri Nets*. Boston, MA, USA: Springer, 2001.

- [5] LI Hongguang, YU Jinshou. Hybrid state Petri net and its applications in process control hybrid systems. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2004, 30(4): 429 – 432.
(李宏光, 俞金寿. 混合状态Petri网及其在过程控制混杂系统中的应用. 华东理工大学学报, 2004, 30(4): 429 – 432.)
- [6] XU Wenhao, LIAO Zhiwei, HUANG Shaoxian, et al. Model of HVDC control system based on hybrid Petri net. *Journal of system simulation*, 2006, 18(11): 3187 – 3191.
(许文浩, 廖志伟, 黄少先, 等. 基于混合Petri网的HVDC控制系统模型的研究. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3187 – 3191.)
- [7] WANG Y Z, LIN L. Controller design using coloured Petri nets— with a case study of the papermaking process control. *International Conference on Modelling*. Shanghai, China: IEEE, 2011: 415 – 421.
- [8] FENG Aixiang, ZHOU Xiaona, LUO Xionglin. Petri nets based temperature control system for electric heaters. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2011, 38(10): 1168 – 1170.
(冯爱祥, 周小娜, 罗雄麟. 基于Petri网的电加热炉温度控制系统. 化工自动化及仪表, 2011, 38(10): 1168 – 1170.)
- [9] XU Baochang, CAI Shengqing, FENG Aixiang, et al. Petri-net based self-prediction and control for switching process of varying duty. *CIESC Journal*, 2016, 67(3): 839 – 845.
(徐宝昌, 蔡胜清, 冯爱祥, 等. 变工况切换过程的Petri网自主预测与控制. 化工学报, 2016, 67(3): 839 – 845.)
- [10] KUO C H, CHEN T S. Controllable Petri net-based implementation approach for motor control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(10): 4599 – 4612.
- [11] PEREIRA F, GOMES L. The IOPT-flow modeling framework applied to power electronics controllers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(3): 2363 – 2372.
- [12] LETIA T S, KILYEN A O. Fuzzy logic enhanced time Petri net models for hybrid control systems. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*. Cluj-Napoca, Romania: IEEE, 2016: 1 – 6.
- [13] YUAN Chongyi. *Application of Petri Nets*. Beijing: Science Press, 2013.
(袁崇义. Petri网应用. 北京: 科学出版社, 2013.)
- [14] WAN Jun, ZHAO Buhui. Petri nets decoupling control for linear time-invariant systems. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(9): 1213 – 1220.
(万军, 赵不贿. 线性定常系统的Petri网解耦控制. 控制理论与应用, 2014, 31(9): 1213 – 1220.)
- [15] WAN Jun, ZHAO Buhui, QIN Huaiyu. Petri net modeling and VHDL implementation of digital systems. *Application Research of Computer*, 2017, 34(2): 458 – 462.
(万军, 赵不贿, 秦怀宇. 基于Petri网的数字系统建模和VHDL实现. 计算机应用研究, 2017, 34(2): 458 – 462.)
- [16] WU W, DONG L, SU H, et al. On the enforcement of a class of constraint in Petri nets. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Washington, DC, USA: IEEE, 2003: 598 – 603.
- [17] LI Bingwang, ZHANG Youzhao, CHEN Wenjian. Step-shaped temperature control system based on PID. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(9): 83 – 85.
(李丙旺, 张友照, 陈文建. 基于PID分段式温度控制系统. 兵工自动化, 2011, 30(9): 83 – 85.)

作者简介:

万军 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为Petri网理论及混杂系统, E-mail: 13815074795@139.com;

赵不贿 教授, 博士生导师, 主要研究方向为离散事件动态系统及Petri网理论, E-mail: zhaobuhui@ujs.edu.cn.