



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102323750 B

(45)授权公告日 2016.10.05

(21)申请号 201110147217.1

(22)申请日 2011.06.02

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 102323750 A

(43)申请公布日 2012.01.18

(73)专利权人 中国石油大学(华东)

地址 257061 山东省东营市东营区北二路  
271号

(72)发明人 刘宝 王君红

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 101373373 A,2009.02.25,

CN 101373373 A,2009.02.25,

US 5301101 A,1994.04.05,

US 6501998 B1,2002.12.31,

CN 1046230 A,1990.10.17,

CN 1371492 A,2002.09.25,

王君红等.高级自适应PID控制器研究及应用.《微计算机信息》.2009,第25卷(第7-1期),

审查员 朱艳华

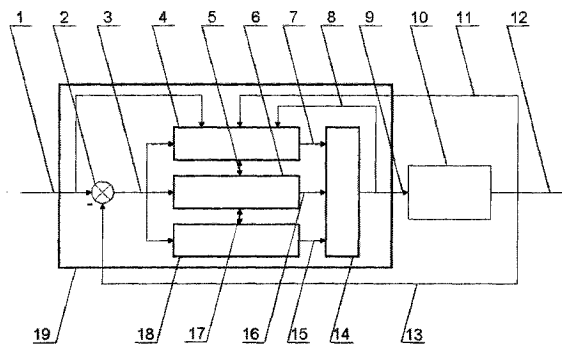
权利要求书4页 说明书11页 附图4页

(54)发明名称

嵌入式非线性脉冲协同控制器

(57)摘要

本发明嵌入式非线性脉冲协同控制器,具体指一种具有动态过程和稳态过程相对独立调节的嵌入式非线性脉冲协同控制器,涉及智能控制技术领域。本发明的控制算法模块,包括起产生控制偏差作用的比较环节;辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数的辨识控制单元;承担动态变化过程控制调节任务,使工艺变量快速接近稳态值的动态控制单元;承担消除稳态变化过程的控制偏差,依据控制器将来的稳态输出值,结合比例和积分控制作用,提高控制精度的稳态控制单元;根据控制系统运行状态,协调辨识控制单元、动态控制单元和稳态控制单元工作状态,形成最终控制输出信号的协同控制单元。具有结构简单,快速性、鲁棒性和抗干扰性较好的特点。



1. 一种嵌入式非线性脉冲协同控制器,其特征是,主要为提高大纯滞后工艺对象的控制效果设计,构成嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块,包括起产生控制偏差作用的比较环节;通过阶跃响应,辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间,并根据工艺设定值(1)、控制器的初始输出值、初始工艺变量值和对象的放大增益预先计算控制器的将来稳态输出值的辨识控制单元;承担动态变化过程的控制调节任务,利用与工艺变量信号(12)没有任何关系的快速调节脉冲输出,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,并使工艺变量快速接近稳态值的动态控制单元;承担消除稳态变化过程的控制偏差,依据控制器将来的稳态输出值,结合比例和积分控制作用,快速消除控制偏差,提高控制精度的稳态控制单元;根据控制系统的运行状态,负责协调辨识控制单元、动态控制单元和稳态控制单元的工作状态,形成最终控制输出信号的协同控制单元;

控制算法的动态控制单元和稳态控制单元两部分之间的独立性相对较强,可以单独进行控制参数调整;

(1)所述的比较环节算法:

令 $sp(t)$ 表示工艺设定值, $b(t)$ 表示反馈信号, $e(t)$ 表示控制偏差,则有:

$$e(t) = sp(t) - b(t) \quad (1)$$

(2)所述的辨识控制单元算法:

设控制系统的被控对象,在其工作点的线性化工艺模型的传递函数为:

$$G_p(s) \approx \frac{K}{1 + Ts} e^{-\tau s} \quad (2)$$

其中,模型参数 $K, T, \tau$ ,分别是被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间,并利用阶跃响应两点辨识法得到;

首先找出两个时间点 $t_1, t_2$ ,且 $y(t_1) = 0.384 \cdot y_{ss}(t)$ 、 $y(t_2) = 0.632 \cdot y_{ss}(t)$ ,其中, $y_{ss}(t)$ 是工艺变量的稳态值;

然后,根据式

$$\begin{cases} T = 2(t_2 - t_1) \\ \tau = 2t_1 - t_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$K = \frac{y_{ss}(t) - y_0(t)}{u_{ss}(t) - u_0(t)} \quad (4)$$

计算得到被控对象的模型参数,其中, $y_0(t)$ 是初始工艺变量值, $u_{ss}(t), u_0(t)$ 分别是控制器的稳态和初始输出值;

因为稳定时,工艺变量的稳态值与工艺设定值相同,即 $y_{ss}(t) = sp(t)$ ,故由式(4)得到:

$$u_{ss}(t) = \frac{sp(t) - y_0(t)}{K} + u_0(t) \quad (5)$$

因此,只要获得被控对象的稳态放大增益系数 $K$ ,则计算得到控制器的稳态输出值 $u_{ss}(t)$ ;

(3)所述的动态控制单元算法:

由于动态控制单元要使被控对象的动态变化过程,具有较短的上升时间和较小的超调量,因此设计动态控制单元的输出变化过程,包括上升变化和下降变化两个阶段,并用 $u_{up}$

(t),  $u_{down}(t)$  分别表示控制器脉冲输出的上升和下降变化输出值;

记控制系统的工艺设定值改变的时刻为  $t_0$ ;

1) 上升变化规律

设  $u_m(t)$  为当控制系统的工艺设定值改变后, 在动态变化调节过程中, 控制器的脉冲输出峰值;

$t_m$  为相对于  $t_0$  时刻当控制器输出达到  $u_m(t)$  的时间;

在工艺设定值发生变化的时候, 设根据式(5)得到的控制器消除控制偏差之后的稳态输出值为  $u_{ss}(t)$ , 控制器从  $t = t_0$  时刻的初始输出值  $u_0(t)$  迅速输出到峰值  $u_m(t)$ , 相对于控制器的初始输出值  $u_0(t)$ , 其变化量  $\Delta u_m(t)$  为:

$$\Delta u_m(t) = u_m(t) - u_0(t) = \alpha \cdot (u_{ss}(t) - u_0(t)) \quad (6)$$

其中,  $\alpha$  为脉冲增益系数且  $\alpha > 1$ , 并保证  $u_L \leq \Delta u_m(t) \leq u_{ss}(t)$  或  $u_{ss}(t) \leq \Delta u_m(t) \leq u_H$ , 其中  $u_L$  和  $u_H$  分别表示控制器的输出低限和高限值;

为了使控制器从  $u_0(t)$  比较稳定地变化到  $u_m(t)$ , 设计如式(7)所示的滤波环节:

$$f_{up}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{up}}(t-t_0)} \quad (7)$$

其中,  $T_{up}$  为脉冲上升滤波时间常数, 且  $T_{up} < t_m$ , 取  $T_{up} = 1 \sim 5T_s$ , 其中  $T_s$  为采样控制周期, 综合式(6)和(7), 得到脉冲输出的上升变化规律  $u_{up}(t)$  为:

$$u_{up}(t) = u_0(t) + \alpha \cdot (u_{ss}(t) - u_0(t)) \cdot f_{up}(t) \quad (8)$$

由式(7)、(8)得知,  $u_{up}(t)$  在  $t = t_0$  时刻的初始输出值为  $u_0(t)$ , 其稳定变化值为  $u_{up}(t) = u_0(t) + \Delta u_m(t) = u_m(t)$ ;

2) 下降变化规律

设  $t_d$  为相对于  $t_0$  时刻当控制器输出达到  $u_m(t)$  之后开始反方向变化的时间, 当控制时间  $t \geq t_0 + t_d$  时, 控制器的输出信号又迅速地变化到近将来的稳态输出值  $u_{ss}(t)$ , 同样为了使控制器输出较为稳定地变化到  $u_{ss}(t)$ , 且保证一定的调节效果, 设计一个如式(9)所示的滤波环节:

$$f_{down}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{down}}(t-(t_0+t_d))} \cdot \frac{|e(t)|}{|e(t_d)|} \quad (9)$$

其中,  $T_{down}$  为下降滤波时间常数, 取  $T_{down} = 0.1 \sim 0.5T$ ;  $|e(t)|$  为当前控制偏差的绝对值,  $|e(t_d)|$  为  $t = t_0 + t_d$  时控制偏差的绝对值; 因此, 脉冲下降变化规律为:

$$u_{down}(t) = u_m(t) + (u_{ss}(t) - u_m(t)) \cdot f_{down}(t) \quad (10)$$

由式(9)、(10)得知,  $u_{down}(t)$  在  $t = t_0 + t_d$  时刻的初始输出值为  $u_m(t)$ , 其稳定变化值为  $u_{ss}(t)$ ;

(4)所述的稳态控制单元算法:

当控制偏差和其变化率满足  $|e(t)| \leq \varepsilon_1$ , 且  $|\Delta e(t)| \leq \varepsilon_2$  时, 其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  均为正实数, 且  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ , 记此时相对于  $t_0$  时刻的时间为  $t_{ss}$ ;

为了进一步快速消除控制偏差, 当控制时间  $t \geq t_0 + t_{ss}$  时, 稳态控制算法在脉冲下降控制算法的基础上, 切换至比例积分控制规律, 即:

$$u_s(t) = u_s(t-1) + K_p \cdot \Delta e(t) + K_i \cdot e(t) \quad (11)$$

其中,  $u_s(t)$  表示控制器的稳态过程的控制输出信号,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $u_s(t-1)$  为上一个采样控制周期的控制器输出信号,  $\Delta e(t)$  为当前控制偏差的变化值;

当控制系统达到稳定时, 以最终的  $u_s(t)$  更新原来计算的  $u_{ss}(t)$ , 并保持当前的控制输出不变; 如果出现随机干扰时, 当控制偏差的绝对值  $|e(t)| \geq \varepsilon_3$  的时候, 采用如下控制规律:

$$u_s(t) = u_{ss}(t) + K_p \cdot e(t) \quad (12)$$

其中  $\varepsilon_3$  为正实数;

(5) 所述的协同控制单元算法:

1) 当控制时间  $t \geq 0$  时, 辨识控制单元处于工作状态, 辨识被控对象的模型参数;

2) 当控制时间  $t_0 \leq t < t_0 + t_{ss}$  时, 动态控制单元处于工作状态;

① 当控制时间  $t_0 \leq t < t_0 + t_d$  时, 控制器输出动态脉冲上升规律  $u_{up}(t)$ ;

② 当控制时间  $t_0 + t_d \leq t < t_0 + t_{ss}$  时, 控制器输出动态脉冲下降规律  $u_{down}(t)$ ;

3) 当控制时间  $t \geq t_0 + t_{ss}$  时, 稳态控制单元处于工作状态, 控制器输出稳态控制规律  $u_s(t)$ ; 如果出现随机干扰, 当控制偏差的绝对值  $|e(t)| \geq \varepsilon_3$  的时候, 则采用控制规律(12);

当工艺设定值再次发生变化的时候, 控制时间  $t$  恢复到  $t_0$  时刻, 重复上述 2)~3) 控制过程。

2. 如权利要求 1 所述的嵌入式非线性脉冲协同控制器, 其特征是, 所述的动态控制单元和稳态控制单元, 独立进行参数调整:

(1) 根据工艺变量的动态变化过程的上升速度和超调量大小, 调整  $\alpha$  或  $t_d$ ; 如果超调量过大或上升速度过快, 则减少  $\alpha$  或  $t_d$ ; 反之, 则增大  $\alpha$  或  $t_d$ ;

(2) 根据工艺变量的稳态过程变化情况, 调整比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$ ; 如果趋向稳定状态的速度较慢, 则增加比例系数  $K_p$ ; 反之, 则减小比例系数  $K_p$ ; 如果控制精度较低, 则增大积分系数  $K_i$ ; 如果产生稳态振荡, 则减小积分系数  $K_i$ ;

(3) 其它控制参数  $T_{up}$ ,  $T_{down}$ , 在规定数值范围内选取。

3. 如权利要求 1 所述的嵌入式非线性脉冲协同控制器, 其特征是, 构成嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块还包括: 输出阶跃信号(101)、系统输出是否稳定(102)、模型参数计算(103)、采样偏差计算(104)、动态过程是否结束(105)、稳态控制计算(106)、协同控制输出(107)、控制是否完成(108)、动态控制计算(109)的步骤。

4. 如权利要求 1 所述的嵌入式非线性脉冲协同控制器, 包括 AD 转换电路(26)、程序存储器(20)、数据存储器(21)、存储接口电路(22)、DA 转换电路(23)、中央处理器 CPU(24) 和外围设备接口电路(25) 以电信号连接方式 组成, 其特征是, 根据控制系统的运行状态, 负责协调辨识控制单元(4)、动态控制单元(6) 和稳态控制单元(18) 的工作状态, 形成最终控制输出信号的协同控制单元(14);

其中, 硬件部分主要包括主机和外围接口两大部分:

1) 主机包括:

采用 FLASH 闪存, 作为程序和控制参数存储器, 存储协同控制器的控制算法软件、操作系统、通讯软件、WEB 远程访问软件和输入/输出接口软件的程序存储器(20);

采用 SDRAM 作为计算机内部存储器, 提供系统运行的内部数据交换场所的数据存储器(21);

用作提供中央处理器CPU(24)与程序存储器(20)和数据存储器(21)之间的数据访问接口电路的存储接口电路(22);

采用32位,主频300MHZ,ARM9系列芯片负责控制器各组成部分协调工作的作为控制核心的中央处理器CPU(24);

采用外界提供电源方式;

2)外围接口:

主要提供4-20mA电流输入接口、1-5VDC电压输入接口和与中央处理器CPU(24)以电信号相连的接口电路的AD转换电路(26);

主要提供4-20mA电流输出接口、1-5VDC电压输出接口和与中央处理器CPU(24)以电信号相连的接口电路的DA转换电路(23);

主要提供标准的USB、VGA、RJ45、RS232、RS485接口和与中央处理器CPU(24)以电信号相连的接口电路的外围设备接口电路(25)。

## 嵌入式非线性脉冲协同控制器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及智能控制技术领域,具体指一种具有动态过程和稳态过程相对独立调节的嵌入式非线性脉冲协同控制器。

### 背景技术

[0002] 随着现代工业社会的发展,在工业控制过程中出现了越来越多的复杂工艺对象,同时对产品质量的要求也越来越高,这导致传统的控制规律难以适应这种控制的需求。为了提高控制效果,从上个世纪70年代开始,人们从工艺操作经验或生物控制规律出发,研究发展出现了专家控制系统、神经网络控制系统和模糊控制系统以及预测控制等智能控制算法。这些控制算法为提高复杂工艺对象的控制效果起了很大作用。但是这些控制算法或规律都比较复杂,实际实现及应用难度较大,影响在实际工程中应用推广。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的在于克服上述现有技术存在的缺失和不足,提供一种嵌入式非线性脉冲协同控制器(简称ENICC),包括AD转换电路、DA转换电路、中央处理器CPU、程序存储器、数据存储器 and 外围设备接口电路等。其基于“专家快速调节控制思想”设计,动态过程和稳态过程相对独立调节。其特点是,嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块包括比较环节、辨识控制单元、动态控制单元、稳态控制单元和协同控制单元。其中,比较环节主要起产生控制偏差的作用;辨识控制单元主要通过阶跃响应,辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数;动态控制单元利用快速调节脉冲输出,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,使工艺变量快速接近稳态值,主要起快速消除控制偏差的作用;稳态控制单元依据控制器将来的稳态输出值,结合比例和积分控制作用,快速消除控制偏差,提高控制精度。在协同控制单元的协调下,辨识控制单元、动态控制单元和稳态控制单元协同工作,并能够迅速、稳定地消除控制偏差。

[0004] 关于本发明基于的“专家快速调节控制思想”概述

[0005] 在实际工艺操作过程中,对于有经验的操作人员而言,他们总是能够以较快的速度、较小的超调量和较短的调节时间,使控制系统快速达到稳定状态。例如,在调节某容器液位过程中,如果液位低于目标值比较大,操作人员一般首先迅速把进料阀位开到接近最大,待液位快要接近目标值的时候,再迅速减小阀位,从而使工艺变量能够以快速、无超调地达到稳定值。另外,多数优化控制规律具有类似的脉冲输出调节规律。在某种理想状态下,这种调节规律能够使工艺变量以较快的上升时间、无或较小的超调量和较小的调节时间,快速达到稳定状态。

[0006] 关于本发明基于的“专家快速调节控制思想”的嵌入式非线性脉冲协同控制器的工作原理

[0007] 本发明的一种嵌入式非线性脉冲协同控制器,基于专家快速调节控制思想设计,包括比较环节、辨识控制单元、动态控制单元、稳态控制单元和协同控制单元,能够迅速、稳

定地消除控制偏差。其中,比较环节主要起产生控制偏差的作用;辨识控制单元主要通过阶跃响应,辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数;动态控制单元主要承担动态变化过程的控制调节任务,利用快速调节脉冲输出,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,并使工艺变量快速接近稳态值;稳态控制单元主要承担消除稳态变化过程的控制偏差,依据控制器将来的稳态输出值,结合比例和积分控制作用,快速消除控制偏差,提高控制精度;协同控制单元则是根据控制系统的运行状态,负责协调辨识控制单元、动态控制单元和稳态控制单元的工作状态,形成最终控制输出信号。

[0008] 构成本发明嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块,包括比较环节、辨识控制单元、动态控制单元、稳态控制单元和协同控制单元等五部分。其中,比较环节主要起产生控制偏差的作用;辨识控制单元辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数;动态控制单元主要承担动态变化过程的控制调节任务,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,并使工艺变量快速接近稳态值;稳态控制单元主要承担消除稳态变化过程的控制偏差,依据控制器将来的稳态输出值,结合比例和积分控制作用,快速消除控制偏差,提高控制精度;协同控制单元则是根据控制系统的运行状态,负责协调辨识控制单元、动态控制单元和稳态控制单元的工作状态,形成最终控制输出信号。

[0009] 以下就有关“比较环节”、“辨识控制单元”、“动态控制单元”、“稳态控制单元”和“协同控制单元”及其算法作进一步的阐述:

[0010] 一、比较环节及其算法

[0011] 比较环节主要完成工艺设定值和反馈信号的比较,起产生控制偏差的作用。令 $sp(t)$ 表示工艺设定值, $b(t)$ 表示反馈信号, $e(t)$ 表示控制偏差,则有:

$$[0012] \quad e(t) = sp(t) - b(t) \quad (1)$$

[0013] 二、辨识控制单元及其算法

[0014] 辨识控制单元主要辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数。

[0015] 对于大多数的化学工艺控制系统,其被控对象的工艺模型均可以在其工作点附近一定范围内线性化,并用传递函数

$$[0016] \quad G_p(s) \approx \frac{K}{1+Ts} e^{-\tau s} \quad (2)$$

[0017] 来近似表示。其中, $K$ , $T$ , $\tau$ 分别为被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间,并可以利用阶跃响应两点辨识法得到。首先找出两个时间点 $t_1$ , $t_2$ ,且 $y(t_1) = 0.384 \cdot y_{ss}(t)$ 、 $y(t_2) = 0.632 \cdot y_{ss}(t)$ 。其中, $y_{ss}(t)$ 是工艺变量的稳态值。然后,根据式

$$[0018] \quad \begin{cases} T = 2(t_2 - t_1) \\ \tau = 2t_1 - t_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$[0019] \quad K = \frac{y_{ss}(t) - y_0(t)}{u_{ss}(t) - u_0(t)} \quad (4)$$

[0020] 计算得到被控对象的模型参数。其中, $y_0(t)$ 是初始工艺变量值, $u_{ss}(t)$ , $u_0(t)$ 分别是控制器的稳态和初始输出值。

[0021] 因为稳定时,工艺变量的稳态值与工艺设定值相同,即 $y_{ss}(t) = sp(t)$ ,故由式(4)

得到:

$$[0022] \quad u_{ss}(t) = \frac{sp(t) - y_0(t)}{K} + u_0(t) \quad (5)$$

[0023] 因此,只要获得被控对象的稳态放大增益系数K,则很容易计算得到控制器的稳态输出值 $u_{ss}(t)$ 。

[0024] 三动态控制单元及其算法

[0025] 动态控制单元主要承担动态变化过程的控制调节任务,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,并使工艺变量快速接近稳态值。

[0026] 由于动态控制单元要使被控对象的动态变化过程,具有较短的上升时间和较小的超调量。因此设计其动态控制单元的输出变化过程,包括上升变化和下降变化两个阶段,并用 $u_{up}(t)$ , $u_{down}(t)$ 分别表示控制器脉冲输出的上升和下降变化输出值。记控制系统的工艺设定值改变的時刻为 $t_0$ 。

[0027] (1)上升变化规律

[0028] 设 $u_m(t)$ 为当控制系统的工艺设定值改变后,在动态变化调节过程中,控制器的脉冲输出峰值; $t_m$ 为相对于 $t_0$ 时刻当控制器输出达到 $u_m(t)$ 的时间。

[0029] 在工艺设定值发生变化的时候,控制器从 $t = t_0$ 时刻的初始输出值 $u_0(t)$ 迅速输出到峰值 $u_m(t)$ 。假设控制器消除控制偏差之后的稳态输出值为 $u_{ss}(t)$ (可以根据式(5)得到)。相对于控制器的初始输出值 $u_0(t)$ ,其变化量 $\Delta u_m(t)$ 为:

$$[0030] \quad \Delta u_m(t) = u_m(t) - u_0(t) = \alpha \cdot (u_{ss}(t) - u_0(t)) \quad (6)$$

[0031] 其中, $\alpha$ 为脉冲增益系数且 $\alpha > 1$ ,并保证 $u_L \leq \Delta u_m(t) \leq u_{ss}(t)$ 或 $u_{ss}(t) \leq \Delta u_m(t) \leq u_H$ 。其中 $u_L$ 和 $u_H$ 分别表示控制器的输出低限和高限值;

[0032] 为了使控制器从 $u_0(t)$ 比较稳定地变化到 $u_m(t)$ ,设计如式(7)所示的滤波环节:

$$[0033] \quad f_{up}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{up}}(t-t_0)} \quad (7)$$

[0034] 其中, $T_{up}$ 为脉冲上升滤波时间常数,且 $T_{up} < t_m$ ,取 $T_{up} = 1 \sim 5T_s$ ,其中 $T_s$ 为采样控制周期。综合式(6)和(7),得到脉冲输出的上升变化规律 $u_{up}(t)$ 为:

$$[0035] \quad u_{up}(t) = u_0(t) + \alpha \cdot (u_{ss}(t) - u_0(t)) \cdot f_{up}(t) \quad (8)$$

[0036] 由式(7)、(8)得知, $u_{up}(t)$ 在 $t = t_0$ 时刻的初始输出值为 $u_0(t)$ ,其稳定变化值为 $u_{up}(t) = u_0(t) + \Delta u_m(t) = u_m(t)$ 。

[0037] (2)下降变化规律

[0038] 设 $t_d$ 为相对于 $t_0$ 时刻当控制器输出达到 $u_m(t)$ 之后开始反方向变化的时间。当控制时间 $t \geq t_0 + t_d$ 时,控制器的输出信号又迅速地变化到近将来的稳态输出值 $u_{ss}(t)$ 。同样为了使控制器输出较为稳定地变化到 $u_{ss}(t)$ ,且保证一定的调节效果,设计一个如式(9)所示的滤波环节

$$[0039] \quad f_{down}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{down}}(t-(t_0+t_d))} \cdot \frac{|e(t)|}{|e(t_d)|} \quad (9)$$

[0040] 其中, $T_{down}$ 为下降滤波时间常数,取 $T_{down} = 0.1 \sim 0.5T$ ;  $|e(t)|$ 为当前控制偏差的绝对值, $|e(t_d)|$ 为 $t = t_0 + t_d$ 时控制偏差的绝对值。因此,脉冲下降变化规律为:

$$[0041] \quad u_{down}(t) = u_m(t) + (u_{ss}(t) - u_m(t)) \cdot f_{down}(t) \quad (10)$$



[0042] 由式(9)、(10)得知,  $u_{\text{down}}(t)$  在  $t = t_0 + t_d$  时刻的初始输出值为  $u_m(t)$ , 其稳定变化值为  $u_{\text{ss}}(t)$ 。

[0043] 四稳态控制单元及其算法

[0044] 稳态控制单元的主要作用是保证稳定消除控制偏差和提高控制精度。

[0045] 当控制偏差及其变化率满足  $|e(t)| \leq \varepsilon_1$ , 且  $|\Delta e(t)| \leq \varepsilon_2$  时, 其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  均为正实数, 且  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ , 记此时相对于  $t_0$  时刻的时间为  $t_{\text{ss}}$ 。为了进一步快速消除控制偏差, 当控制时间  $t \geq t_0 + t_{\text{ss}}$  时, 稳态控制算法在脉冲下降控制算法的基础上, 切换至比例积分控制规律, 即:

$$[0046] \quad u_s(t) = u_s(t-1) + K_p \cdot \Delta e(t) + K_i \cdot e(t) \quad (11)$$

[0047] 其中,  $u_s(t)$  表示控制器的稳态过程的控制输出信号,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $u_s(t-1)$  为上一个采样控制周期的控制器输出信号,  $\Delta e(t)$  为当前控制偏差的变化值。当控制系统达到稳定时, 以最终的  $u_s(t)$  更新原来计算的  $u_{\text{ss}}(t)$ , 并保持当前的控制输出不变。如果出现随机干扰, 当控制偏差的绝对值  $|e(t)| \geq \varepsilon_3$  的时候, 采用如下控制规律:

$$[0048] \quad u_s(t) = u_{\text{ss}}(t) + K_p \cdot e(t) \quad (12)$$

[0049] 其中  $\varepsilon_3$  为正实数。

[0050] 五协同控制单元及其算法

[0051] 协同控制单元则是根据控制系统的运行状态, 协调辨识控制单元、动态控制单元和稳态控制单元的工作状态, 形成最终控制输出信号。

[0052] (1) 当控制时间  $t \geq 0$  时, 辨识控制单元处于工作状态, 辨识被控对象的模型参数;

[0053] (2) 当控制时间  $t_0 \leq t < t_0 + t_{\text{ss}}$  时, 动态控制单元处于工作状态;

[0054] 1) 当控制时间  $t_0 \leq t < t_0 + t_d$  时, 控制器输出动态脉冲上升规律  $u_{\text{up}}(t)$ ;

[0055] 2) 当控制时间  $t_0 + t_d \leq t < t_0 + t_{\text{ss}}$  时, 控制器输出动态脉冲下降规律  $u_{\text{down}}(t)$ 。

[0056] (3) 当控制时间  $t \geq t_0 + t_{\text{ss}}$  时, 稳态控制单元处于工作状态, 控制器输出稳态控制规律  $u_s(t)$ ; 如果出现随机干扰, 当控制偏差的绝对值  $|e(t)| \geq \varepsilon_3$  的时候, 则采用控制规律 (12)。

[0057] 当工艺设定值再次发生变化的时候, 控制时间  $t$  恢复到  $t_0$  时刻, 重复上述 (2)~(3) 控制过程。

[0058] 六控制参数调整方法

[0059] 本发明的动态控制单元和稳态控制单元两部分之间的独立性相对较强, 可以单独进行参数调整。

[0060] (1) 根据工艺变量的动态变化过程的上升速度和超调量大小, 调整  $\alpha$  或  $t_d$ 。如果超调量过大或上升速度过快, 则减少  $\alpha$  或  $t_d$ ; 反之, 则增大  $\alpha$  或  $t_d$ 。

[0061] (2) 根据工艺变量的稳态过程变化情况, 调整比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$ 。如果趋向稳定状态的速度较慢, 则增加比例系数  $K_p$ ; 反之, 则减小比例系数  $K_p$ 。如果控制精度较低, 则增大积分系数  $K_i$ ; 如果产生稳态振荡, 则减小积分系数  $K_i$ 。

[0062] (3) 其它控制参数  $T_{\text{up}}, T_{\text{down}}$ , 在规定数值范围内选取。

[0063] 本发明所述的嵌入式非线性脉冲协同控制器, 其特点是, 构成嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块还包括: 输出阶跃信号、系统输出是否稳定、模型参数计算、采样偏差计算、动态过程是否结束、稳态控制计算、协同控制输出、控制是否完成、动态控制计算等步骤。

[0064] 关于本发明涉及的概念(或名称)的说明

[0065] 如前背景技术段落介绍,“……出现了越来越多的复杂工艺对象……”。因此,在本发明说明书中,出现了相关的“工艺对象”、“被控对象”、“工艺变量”、“工艺模型”、“传递函数”、“模型参数”、“工艺设定值”等不同概念(或名称)。其含义分别解释如下:

[0066] 工艺对象:是指要求实现自动或手动控制的机器设备、生产工艺过程或其它对象。

[0067] 被控对象:当工艺对象作为控制系统的被控制的工艺对象时,又常称之为“被控对象”。

[0068] 工艺变量:是指工艺对象的工艺输出变量。

[0069] 工艺模型:是指工艺对象的数学模型。

[0070] 传递函数:是工艺对象的数学模型的一种表达形式。

[0071] 模型参数:是指工艺对象的数学模型的组成参数。

[0072] 工艺设定值:是指控制系统的工艺设定值输入信号,也即被控对象的工艺变量需要达到的数值。

[0073] 众所周知,实际上所谓的“工艺变量”是由与“工艺过程”中有关的不同“参数”所体现(或构成)的,而不同的“参数”形成不同的“工艺模型”(一般以数学计算公式表示),在自动控制理论中经常用“传递函数”形式表达。

[0074] 在工业控制技术领域,所述的“被控对象”是指自动控制系统中被控制或调节的“工艺对象”。其中,按照有关自动控制理论,“控制对象”也可称为“工艺对象”。

[0075] 就本发明而言,控制的目标是实现“被控对象”的“工艺变量”的准确控制,即通过控制器的控制输出信号,调节“工艺对象”的工艺输入信号,从而使“工艺对象”的“工艺过程”中的“工艺变量”,最终与本发明“装置”所涉及的自动控制系统的输入信号——“工艺设定值”之间的偏差为零。

#### 附图说明:

[0076] 图1为本发明控制系统原理框图;

[0077] 图2为本发明组成硬件系统框图;

[0078] 图3为本发明控制算法软件流程框图;

[0079] 图4a、4b为本发明实施例工艺对象A控制效果对比图;

[0080] 图5a、5b为本发明实施例工艺对象B控制效果对比图。

[0081] 附图中标号说明:

[0082] 1:工艺设定值;2:比较环节;3:控制偏差信号;4:辨识控制单元;5:辨识控制单元与动态控制单元之间的通讯信号;6:动态控制单元;7:辨识控制单元的输出信号;8:反馈至辨识控制单元的控制输出信号;9:控制器输出信号;10:被控对象;11:反馈给辨识控制单元的工艺变量信号;12:工艺变量信号;13:反馈信号;14:协同控制单元;15:稳态控制单元输出信号;16:动态控制单元输出信号;17:动态控制单元与稳态控制单元之间的通讯信号;18:稳态控制单元;19:嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块;20:程序存储器;21:数据存储器;22:存储接口电路;23:DA转换电路;24:中央处理器CPU;25:外围设备接口电路;26:AD转换电路。101:输出阶跃信号;102:系统输出是否稳定;103:模型参数计算;104:采样偏差计算;105:动态过程是否结束;106:稳态控制计算;107:协同控制输出;108:控制

是否完成;109:动态控制计算

### 具体实施方式:

[0083] 以下结合附图和实施例对本发明作进一步的描述

[0084] 本发明一种嵌入式非线性脉冲协同控制器(如附图1所示),其特点是,构成嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块19,包括产生控制偏差的比较环节2;通过阶跃响应,辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数的辨识控制单元4;承担动态变化过程的控制调节任务,利用快速调节脉冲输出,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,并使工艺变量快速接近稳态值的动态控制单元6;承担消除稳态变化过程的控制偏差,根据控制器将来的稳态输出值,结合比例和积分控制作用,快速消除控制偏差,提高控制精度的稳态控制单元18;根据控制系统的运行状态,负责协调辨识控制单元4、动态控制单元6和稳态控制单元18的工作状态,形成最终控制输出信号的协同控制单元(14)。

[0085] 所述的比较环节2及其算法

[0086] 比较环节主要完成工艺设定值1和反馈信号13的比较,产生控制偏差3。令 $sp(t)$ 表示工艺设定值, $b(t)$ 表示反馈信号, $e(t)$ 表示控制偏差信号,则有:

$$[0087] \quad e(t) = sp(t) - b(t) \quad (1)$$

[0088] 所述的辨识控制单元4及其算法

[0089] 辨识控制单元主要辨识被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数。

[0090] 对于大多数化学工艺控制系统,其被控对象的工艺模型均可以在其工作点附近一定范围内线性化,并用传递函数

$$[0091] \quad G_p(s) \approx \frac{K}{1 + Ts} e^{-\tau s} \quad (2)$$

[0092] 来近似表示。其中, $K, T, \tau$ 分别为被控对象的放大增益、时间常数和纯滞后时间,并可以利用阶跃响应两点辨识法得到。首先找出两个时间点 $t_1, t_2$ ,且 $y(t_1) = 0.384 \cdot y_{ss}(t)$ 、 $y(t_2) = 0.632 \cdot y_{ss}(t)$ 。其中, $y_{ss}(t)$ 是工艺变量的稳态值。然后,然后,根据式

$$[0093] \quad \begin{cases} T = 2(t_2 - t_1) \\ \tau = 2t_1 - t_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$[0094] \quad K = \frac{y_{ss}(t) - y_0(t)}{u_{ss}(t) - u_0(t)} \quad (4)$$

[0095] 计算得到被控对象的模型参数。其中, $y_0(t)$ 是初始工艺变量值, $u_{ss}(t), u_0(t)$ 分别是控制器的稳态和初始输出值。

[0096] 因为稳定时,工艺变量的稳态值与工艺设定值相同,即 $y_{ss}(t) = sp(t)$ ,故由式(4)得到:

$$[0097] \quad u_{ss}(t) = \frac{sp(t) - y_0(t)}{K} + u_0(t) \quad (5)$$

[0098] 因此,只要获得被控对象的稳态放大增益系数 $K$ ,则很容易计算得到控制器的稳态

输出值 $u_{ss}(t)$ 。

[0099] 所述的动态控制单元6及其算法

[0100] 动态控制单元主要承担动态变化过程的控制调节任务,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,并使工艺变量快速接近稳态值。

[0101] 由于动态控制单元要使被控对象的动态变化过程,具有较短的上升时间和较小的超调量。因此设计其动态控制单元的输出变化过程,包括上升变化和下降变化两个阶段。 $u_{up}(t)$ , $u_{down}(t)$ 分别表示控制器脉冲输出的上升和下降变化输出值。记控制系统的工艺设定值改变的时刻为 $t_0$ 。

[0102] (1)上升变化规律

[0103] 设 $u_m(t)$ 为当控制系统的工艺设定值改变后,在动态变化调节过程中,控制器的脉冲输出峰值; $t_m$ 为相对于 $t_0$ 时刻当控制器输出达到 $u_m(t)$ 的时间。

[0104] 在工艺设定值发生变化的时候,控制器从 $t=t_0$ 时刻的初始输出值 $u_0(t)$ 迅速输出到峰值 $u_m(t)$ 。假设控制器消除控制偏差之后的稳态输出值为 $u_{ss}(t)$ (可以根据式(5)得到)。相对于控制器的初始输出值 $u_0(t)$ ,其变化量 $\Delta u_m(t)$ 为:

$$[0105] \quad \Delta u_m(t) = u_m(t) - u_0(t) = \alpha \cdot (u_{ss}(t) - u_0(t)) \quad (6)$$

[0106] 其中, $\alpha$ 为脉冲增益系数且 $\alpha > 1$ ,并保证 $u_L \leq \Delta u_m(t) \leq u_{ss}(t)$ 或 $u_{ss}(t) \leq \Delta u_m(t) \leq u_H$ 。其中 $u_L$ 和 $u_H$ 分别表示控制器的输出低限和高限值;

[0107] 为了使控制器从 $u_0(t)$ 比较稳定地变化到 $u_m(t)$ ,设计一个如式(7)所示的滤波环节

$$[0108] \quad f_{up}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{up}}(t-t_0)} \quad (7)$$

[0109] 其中, $T_{up}$ 为脉冲上升滤波时间常数,且 $T_{up} < t_m$ ,取 $T_{up} = 1 \sim 5T_s$ ,其中 $T_s$ 为采样控制周期。综合式(6)和(7),得到脉冲输出的上升变化规律 $u_{up}(t)$ 为:

$$[0110] \quad u_{up}(t) = u_0(t) + \alpha \cdot (u_{ss}(t) - u_0(t)) \cdot f_{up}(t) \quad (8)$$

[0111] 由式(8)得知, $u_{up}(t)$ 在 $t=t_0$ 时刻的初始输出值为 $u_0(t)$ ,其稳定变化值为 $u_{up}(t) = u_0(t) + \Delta u_m(t) = u_m(t)$ 。

[0112] (2)下降变化规律

[0113] 设 $t_d$ 为相对于 $t_0$ 时刻当控制器输出达到 $u_m(t)$ 之后开始反方向变化的时间。当控制时间 $t \geq t_0 + t_d$ 时,控制器的输出信号又迅速地变化到近将来的稳态输出值 $u_{ss}(t)$ 。同样为了使控制器输出较为稳定地变化到 $u_{ss}(t)$ ,且保证一定的调节效果,设计一个如式(9)所示的滤波环节

$$[0114] \quad f_{down}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{T_{down}}(t-(t_0+t_d))} \cdot \frac{|e(t)|}{|e(t_d)|} \quad (9)$$

[0115] 其中, $T_{down}$ 为下降滤波时间常数,取 $T_{down} = 0.1 \sim 0.5T$ ;  $|e(t)|$ 为当前控制偏差的绝对值, $|e(t_d)|$ 为 $t=t_0+t_d$ 时控制偏差的绝对值。因此,脉冲下降变化规律为:

$$[0116] \quad u_{down}(t) = u_m(t) + (u_{ss}(t) - u_m(t)) \cdot f_{down}(t) \quad (10)$$

[0117] 由式(9)、(10)得知, $u_{down}(t)$ 在 $t=t_0+t_d$ 时刻的初始输出值为 $u_m(t)$ ,其稳定变化值为 $u_{ss}(t)$ 。

[0118] 所述的稳态控制单元18及其算法

[0119] 稳态控制单元的主要作用是保证稳定消除控制偏差和提高控制精度。

[0120] 当控制偏差及其变化率满足  $|e(t)| \leq \varepsilon_1$ , 且  $|\Delta e(t)| \leq \varepsilon_2$  时, 其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  均为正实数, 且  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ , 记此时相对于  $t_0$  时刻的时间为  $t_{ss}$ 。为了进一步快速消除控制偏差, 当控制时间  $t \geq t_0 + t_{ss}$  时, 稳态控制算法在脉冲下降控制算法的基础上, 切换至比例积分控制规律, 即:

$$[0121] \quad u_s(t) = u_s(t-1) + K_p \cdot \Delta e(t) + K_i \cdot e(t) \quad (11)$$

[0122] 其中,  $u_s(t)$  表示控制器的稳态过程的控制输出信号,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $u_s(t-1)$  为上一个采样控制周期的控制器输出信号,  $\Delta e(t)$  为当前控制偏差的变化值。当控制系统达到稳定时, 以最终的  $u_s(t)$  更新原来计算的  $u_{ss}(t)$ , 并保持当前的控制输出不变。如果出现随机干扰, 当控制偏差的绝对值  $|e(t)| \geq \varepsilon_3$  的时候, 采用如下控制规律:

$$[0123] \quad u_s(t) = u_{ss}(t) + K_p \cdot e(t) \quad (12)$$

[0124] 其中  $\varepsilon_3$  为正实数。

[0125] 所述的协同控制单元14及其算法

[0126] 协同控制单元则是根据控制系统的运行状态, 协调辨识控制单元、动态控制单元和稳态控制单元的工作状态, 形成最终控制输出信号。

[0127] (1) 当控制时间  $t \geq 0$  时, 辨识控制单元处于工作状态, 辨识被控对象的模型参数。

[0128] (2) 在  $t_0 \leq t < t_0 + t_{ss}$  时, 动态控制单元处于工作状态。

[0129] 1) 当控制时间  $t_0 \leq t < t_0 + t_d$  时, 控制器输出动态脉冲上升规律  $u_{up}(t)$ ;

[0130] 2) 当控制时间  $t_0 + t_d \leq t < t_0 + t_{ss}$  时, 控制器输出动态脉冲下降规律  $u_{down}(t)$ 。

[0131] (3) 当控制时间  $t \geq t_0 + t_{ss}$  时, 稳态控制单元处于工作状态。控制器输出稳态控制规律  $u_s(t)$ 。如果出现随机干扰, 当控制偏差的绝对值  $|e(t)| \geq \varepsilon_3$  的时候, 则采用控制规律 (12)。

[0132] 当工艺设定值再次发生变化的时候, 控制时间  $t$  恢复到  $t_0$  时刻, 重复上述 (2)~(3) 控制过程。

[0133] 本发明控制参数调整方法

[0134] 该发明控制算法的动态控制单元和稳态控制单元两部分之间的独立性相对较强, 可以单独进行参数调整。

[0135] (1) 根据工艺变量的动态变化过程的上升速度和超调量大小, 调整  $\alpha$  或  $t_d$ 。如果超调量过大或上升速度过快, 则减少  $\alpha$  或  $t_d$ ; 反之, 则增大  $\alpha$  或  $t_d$ 。

[0136] (2) 根据工艺变量的稳态过程变化情况, 调整比例系数  $K_p$  和积分系数  $K_i$ 。如果趋向稳定状态的速度较慢, 则增加比例系数  $K_p$ ; 反之, 则减小比例系数  $K_p$ 。如果控制精度较低, 则增大积分系数  $K_i$ ; 如果产生稳态振荡, 则减小积分系数  $K_i$ 。

[0137] (3) 其它控制参数  $T_{up}, T_{down}$ , 在规定数值范围内选取。

[0138] 本发明所述的构成嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块还包括: 输出阶跃信号101、系统输出是否稳定102、模型参数计算103、采样偏差计算104、动态过程是否结束105、稳态控制计算106、协同控制输出107、控制是否完成108、动态控制计算109等步骤 (如附图3所示)。

[0139] 本发明一种嵌入式非线性脉冲协同控制器的一个实施例 (如附图2所示), 由AD转换电路26、程序存储器20、数据存储器21、存储接口电路22、DA转换电路23、中央处理器CPU 24和外围设备接口电路25以电信号连接方式组成, 其特点是, 嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块19, 包括产生控制偏差的比较环节2; 通过阶跃响应, 辨识被控对象的放

大增益、时间常数和纯滞后时间等模型参数的辨识控制单元4;承担动态变化过程的控制调节任务,利用快速调节脉冲输出,减少控制系统的上升时间和降低控制系统的超调量,并使工艺变量快速接近稳态值的动态控制单元6;承担消除稳态变化过程的控制偏差,根据控制器将来的稳态输出值,结合比例和积分控制作用,快速消除控制偏差,提高控制精度的稳态控制单元18;根据控制系统的运行状态,负责协调辨识控制单元4、动态控制单元6和稳态控制单元18的工作状态,形成最终控制输出信号的协同控制单元14。

[0140] 其中,硬件部分主要包括主机和外围接口两大部分

[0141] 1)主机

[0142] 程序存储器20采用FLASH闪存作为程序及控制参数存储器,存储协同控制器的控制算法软件、操作系统、通讯软件、WEB远程访问软件及输入/输出接口软件等;

[0143] 数据存储器21采用SDRAM作为计算机内部存储器,提供系统运行的内部数据交换的场所;

[0144] 存储接口电路22用作提供中央处理器CPU 24与程序存储器20和数据存储器21之间的数据访问接口电路;

[0145] 中央处理器CPU 24作为控制核心,负责控制器各组成部分协调工作,可采用32位,主频300MHZ左右,如ARM9系列等芯片;

[0146] 采用外界提供电源方式;

[0147] 2)外围接口

[0148] AD转换电路26主要提供4-20mA电流输入接口和1-5VDC电压输入接口,以及与中央处理器CPU 24电信号相连的接口电路;

[0149] DA转换电路23主要提供4-20mA电流输出接口和1-5VDC电压输出接口,以及与中央处理器CPU 24电信号相连的接口电路;

[0150] 外围设备接口电路25主要提供标准的USB、VGA、RJ45、RS232、RS485接口,以及与中央处理器CPU 24电信号相连的接口电路;

[0151] 所述的嵌入式非线性脉冲协同控制器软件部分主要包括:嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块软件、操作系统、通讯软件、WEB远程访问软件及输入/输出接口软件等;

[0152] 其中,

[0153] 1)控制算法模块软件

[0154] 按照本发明嵌入式非线性脉冲协同控制器的算法原理,采用嵌入式C++语言,开发嵌入式非线性脉冲协同控制器的控制算法模块19。

[0155] 2)操作系统

[0156] 采用流行的具有与Windows应用程序兼容的嵌入式操作系统,如Win CE等;

[0157] 3)通讯软件

[0158] 采用提供TCP/IP协议、RS232或485协议的支持软件等;

[0159] 4)WEB远程访问软件

[0160] 用于完成远程访问、通讯、操作功能等;

[0161] 5)输入/输出接口软件

[0162] 用于完成模拟信号或数字信号的输入/输出。

[0163] 本发明嵌入式非线性脉冲协同控制器的应用实施例(如附图1所示)其中工艺设定值1即为控制系统的输入信号,协同控制单元输出信号9与被控对象10相连,工艺变量信号12经反馈通道转换为反馈信号13,工艺设定值1和反馈信号13一起进入比较环节2,并产生控制偏差3。控制器输出信号9、工艺变量信号12和工艺设定值1均经相应传输通道输入辨识控制单元4。

[0164] 选取工艺对象A、B为被控对象进行检验。其中,工艺对象A是一个一阶惯性大纯滞后工艺对象,且 $\tau/T \gg 1$ ,其传递函数为:

$$[0165] \quad G(s) = \frac{1}{33s + 1} e^{-69s} \quad (13)$$

[0166] 如果利用常规控制算法控制该工艺对象,则很难获得好的控制效果。工艺对象B是一个非最小相位温度对象,其传递函数为:

$$[0167] \quad G(s) = \frac{0.6394s - 1.582}{s^2 + 0.3287s + 0.01282} e^{-4s} \quad (14)$$

[0168] 该模型不但属于非最小相位系统,而且具有反向特性和纯滞后。非最小相位系统在控制工程中普遍存在,如船舶航向控制系统、鱼雷定深控制系统、水轮机控制系统等。设计非最小相位控制系统必须满足多方面的性能要求,这是一个控制难题。

[0169] 本发明嵌入式非线性脉冲协同控制器(简称ENICC)的控制性能和传统PID控制算法进行了比较。为了使比较效果更清晰,传统PID控制算法的控制参数也进行了优化,其优化条件与ENICC的优化参数相同。

[0170] 表1传统PID控制方法的优化控制参数

控制参数		$K_p$	$K_i$	$K_d$
对象	A	0.55821	0.0097675	7.720846
	B	0.03026	0.00032	0.24945

[0172] 表2ENICC控制方法的优化控制参数

控制参数		$K_p$	$K_i$	$\alpha$	$T_d$
对象	A	0.027063	3.9907E-8	1.2768	4.2049
	B	0.0054815	0.00014518	2.1047	2.0364

[0174] 在仿真实验中,均选用Matlab的GAT00L工具箱进行优化,初始种群中的个体数目是50,进化代数为500,参数搜索下限值均为0,初始范围均为[0,1],其它参数为缺省值。优化控制参数如表1和2所示。其它控制仿真参数设置如下:采样控制周期 $T_s = 1.0$ 秒,上升滤波常数 $T_{up} = 2T_s$ ,下降滤波常数 $T_{down} = 0.3T$ ,阈值 $\epsilon_1 = 0.005$ , $\epsilon_2 = 0.001$ , $\epsilon_3 = 0.0006$ 。利用阶跃响应两点辨识法,分别辨识获得工艺对象A和B的模型参数。其中工艺对象A的辨识模型参数为: $K = 1.0$ , $T = 34$ , $\tau = 69$ ;工艺对象B的辨识模型参数为: $K = -123.4$ , $T = 24.0$ , $\tau = 8.0$ 。

[0175] 附图4a、图4b所示,分别是工艺对象A的工艺变量和控制器输出效果对比图。ENICC

的上升时间、超调量和调节时间等性能指标,明显优于传统PID控制效果。ENICC控制器的输出比传统PID的控制输出要更加稳定。从图4a中可以看出,与传统PID控制相比,ENICC具有更好的控制效果。其上升时间 $t_r$ 大约是35秒, $\sigma\%$ 超调量约为0,调节时间 $t_s$ 约为113秒;同时也较好于文献[1](李东海,吴勇强,李立勤等,特殊工业对象的PID控制系统仿真研究[J],电子技术应用,2000,26(8):24-26.)前馈PID控制效果 $t_r=155$ 秒, $\sigma\%=5.5\%$ , $t_s=200$ 秒。

[0176] 附图5a、图5b所示,分别是工艺对象B的工艺变量和控制器输出效果对比图。ENICC的上升时间、超调量和调节时间等性能指标,明显优于传统PID控制效果。ENICC控制器的输出比传统PID的控制输出要更加稳定。从图5a中可以看出,与传统PID控制相比,ENICC具有更好的控制效果。其上升时间 $t_r$ 大约是28秒, $\sigma\%$ 超调量约为0,调节时间 $t_s$ 约为36秒;同时也较好于文献[2](马姝姝,陈夕松,杨俊,高阶时滞系统的降阶IMC-PID控制研究[J],工业仪表与自动化装置,2010,(2):3-5,11.)IMC-PID控制效果 $t_r=30$ 秒, $\sigma\%=5.0\%$ , $t_s=60$ 秒。从仿真结果可以看出:ENICC的控制性能均优于传统PID控制算法。

[0177] 综上所述,本发明具有结构简单,快速性、鲁棒性和抗干扰性等均较好的特点。



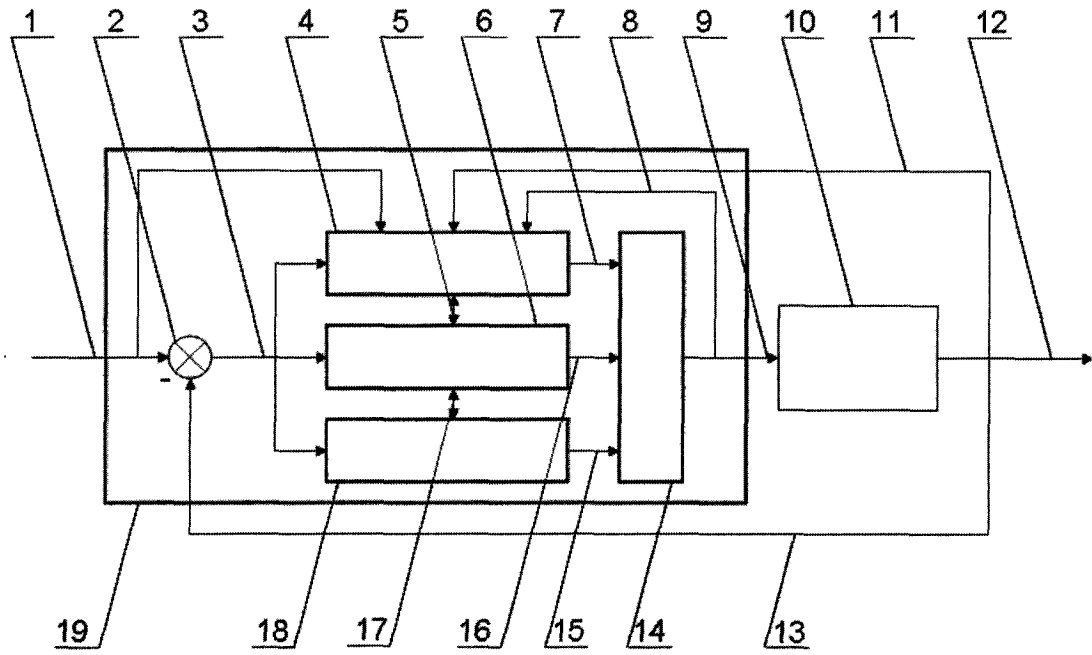


图1

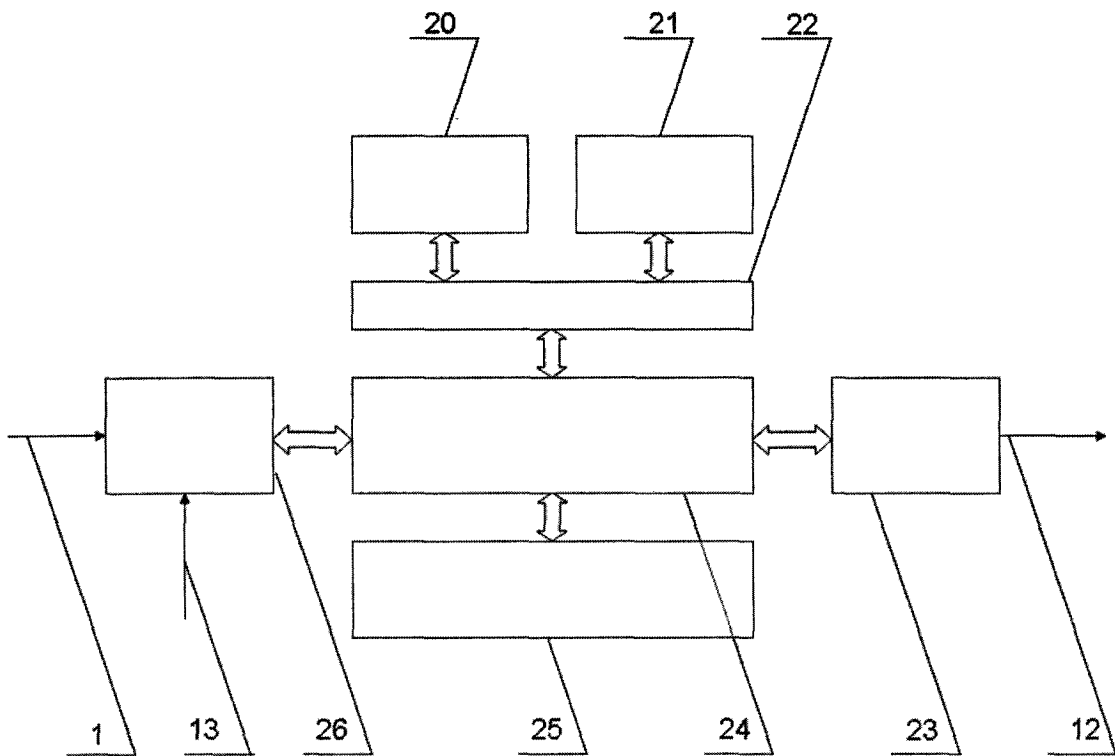


图2

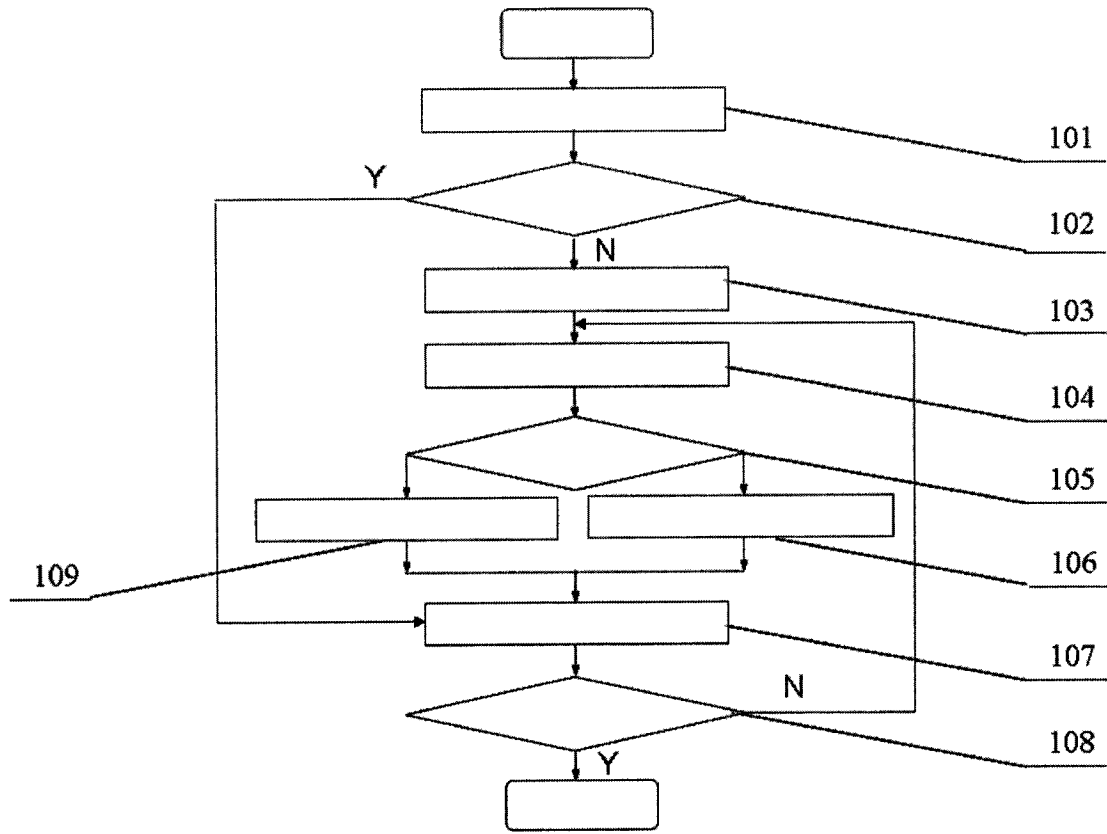


图3

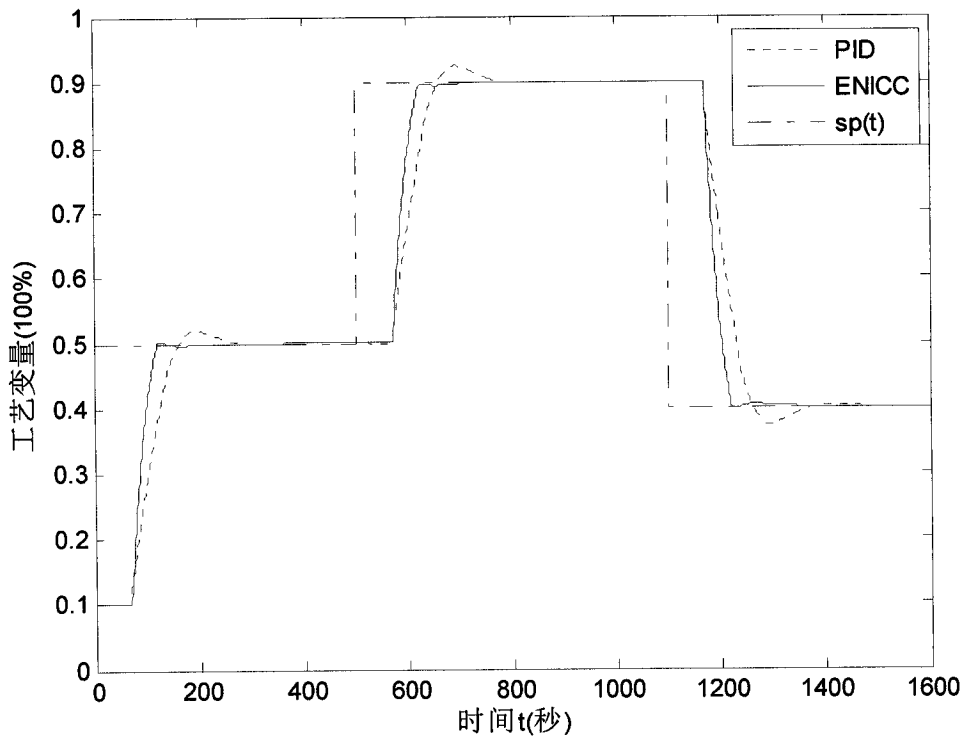


图4a

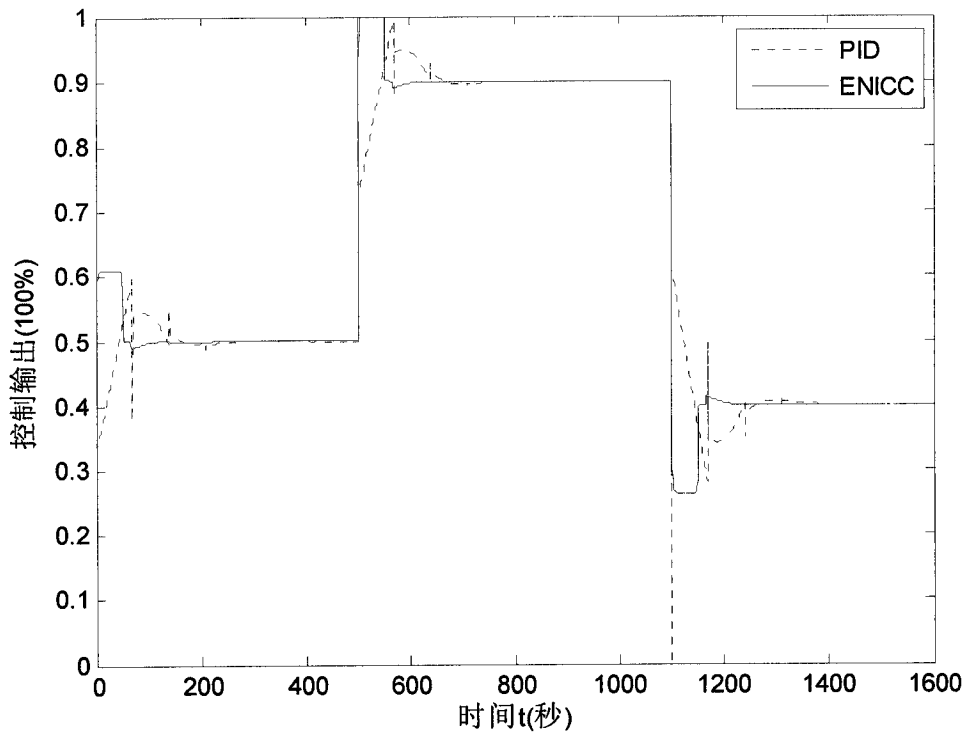


图4b

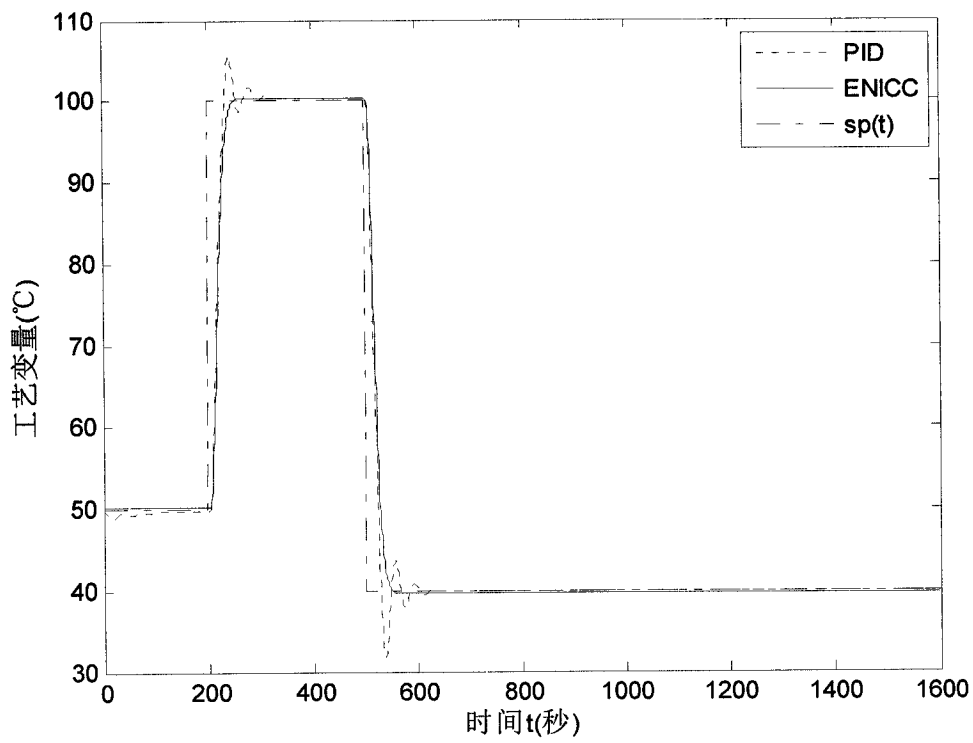


图5a

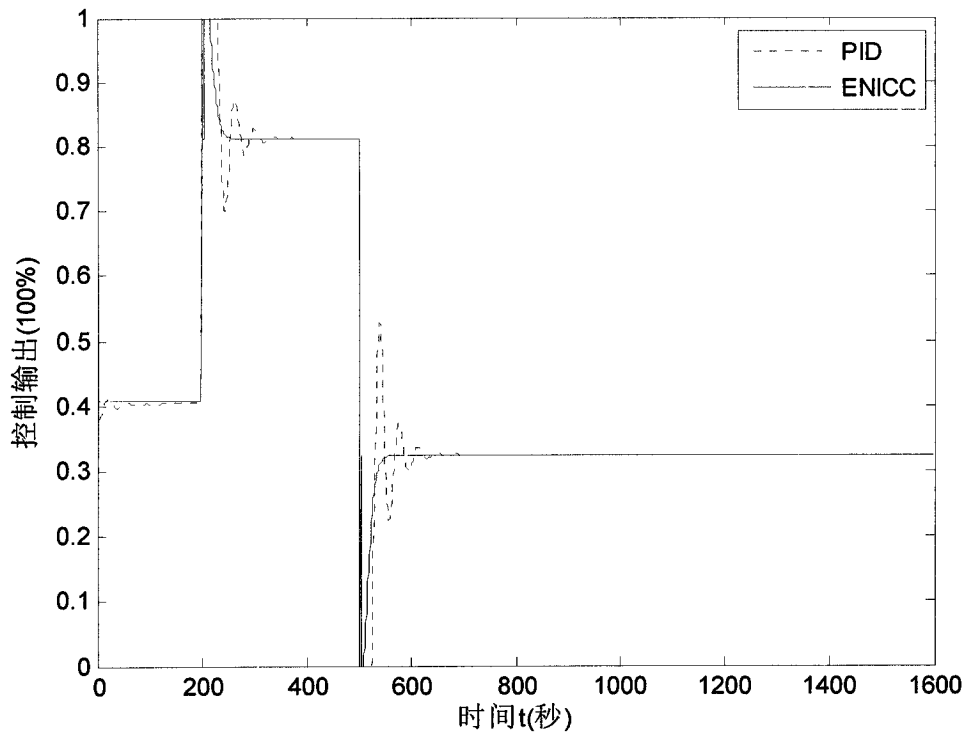


图5b