

流程工业的组合积分系统及其先进控制

任正云, 郑 达

(东华大学 自动化系, 上海 201620)

摘要: 给出了流程工业中组合积分系统的定义, 分析了其特性. 基于模型预测控制的基本原理, 设计了组合积分系统的先进控制算法, 并成功应用于实际工业过程之中, 大大提高了控制的精度和经济效益.

关键词: 组合积分系统; 先进控制; 流程工业

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Combined integral systems and their advanced control strategies in process industry

REN Zheng-yun, ZHENG Da

(Department of Automation, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The definition of combined integral systems is given and its characteristics are analyzed. A new class of model-based controllers is developed specifically for this type of processes and a successful industrial application of the proposed control strategy, which improved the control accuracy and economic benefit, is reported.

Key words: combined integrating system; advanced control strategies; process industry

1 引言(Introduction)

工业过程中常常遇到积分过程, 同时一些时间常数比较大的1阶过程也会被看成积分系统^[1,2]. 积分系统的控制问题已经得到广泛的研究, 并且很多先进的控制算法被提出来. 这类过程的系统性能和稳定性易受时滞不确定性的影响, 对控制算法的鲁棒性能要求比较高, 很多算法在实际工业过程中, 难以得到满意的控制效果. 近年来, 许多学者对实际应用的研究做了大量的工作, 取得了丰富的成果.

对于滞后时间比较小的积分系统, 常规的PI控制可以得到比较好的控制效果, 对于滞后时间比较大的系统, 采用Smith预估算法对时滞有较好的补偿, 但是控制性能受模型失配的影响严重, 且在输入干扰存在时, 系统输出存在余差, 失去实际意义. 为了稳态误差, 同时考虑阶跃跟踪性能和抗干扰性能, 很多改进的Smith预估控制算法被提出^[3~5]. 随着大量模型预测控制的成功, 很多研究者基于这种策略针对不确定的积分系统设计控制算法^[6~8]. 一种双PI预测控制算法已经成功应用于生物发酵罐温度这一类积分时滞系统的控制^[9]. 这种算法设计简单, 参数少, 整定方便, 并且鲁棒性能好. 事实上, 由

于积分系统阶跃响应不管有多长的响应时间都不能达到一个稳定值, 因此积分系统在本质上是不稳定系统.

在现代工业生产中, 有许多工业过程可表示为多个不同时滞积分过程的组合, 但很少有学者关注此类过程. 如蒸馏塔的底层过程即可用传递函数 $\frac{k}{s}(1 - 2e^{-\tau_1 s})e^{-\tau_2 s}$ 表示, 这是一个典型的非最小相位时滞过程^[10]. 针对这一过程, Morari提出了一种基于内模原理的控制策略, 并通过仿真验证了其控制性能.

另外有一类含有多个积分项的并称之为组合积分过程的对象. 这类过程在钢铁、石化、谷物加工、烟草等工业中广泛存在. 组合积分系统在本质上是开环稳定的, 并可通过将时滞项用1阶Pade近似而将其近似为1阶对象. 目前大多数组合积分对象被视作1阶时滞对象采用通常的控制策略, 如: PID控制算法, Smith预估算法或内模控制算法. 这些控制器在某种程度上满足了工业生产的需要, 这也是此类过程不被重视的原因. 但随着现代工业的快速发展, 产品质量, 能源消耗和环境保护问题对控制精度提

出了更高的要求. 传统的控制已逐渐不适用于组合积分对象的控制, 因此需要新的控制策略和方法已指导控制系统的设计, 调节和运行.

2 组合积分系统的定义(Definition of combined integrating system)

虽然有很多组合积分系统存在于工业过程之中, 但是到目前为止还没有相关文献的报道. 很多这类过程都被研究人员忽视, 并且他们把这类过程简化为普通的1阶加纯滞后过程. 而1阶加纯滞后过程控制器的设计容易且简单. 到底什么样的过程是组合积分系统呢? 下面就对此做一个严格的定义.

定义 1 组合积分对象是一类开环稳定对象, 其传递函数由两个或多个积分时滞对象组成并可表示为如下形式: $\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{sG_i(s)}(1 - e^{-\tau_{1i}s})e^{-\tau_{2i}s}$. 其中 $G_i(s)$ 是不含积分环节的稳定的多项式.

评论 1 组合积分对象的每一项都必定包含有 $\frac{k}{s}(1 - e^{-\tau s})$ 以使对象保持稳定.

评论 2 时滞 τ_{1i}, τ_{2i} 必须满足方程 $\tau_{2i} = \tau_{2(i-1)} + \tau_{1(i-1)}$, $1 < i \leq qn$, 以保证对象响应的连续性, 而不具有突然跳跃特性.

评论 3 这类对象同时含有非右半平面的极点和零点, 从对象的时域特性可知, 其同时具有积分性质和非最小相位的特性.

根据不同的特性, 组合积分对象可分为不同类型. 从时滞角度分, 组合积分对象可分为无时滞组合积分对象和时滞组合积分对象; 根据系统复杂性, 组合积分对象可分为单组合积分对象和多组合积分对象; 而由系统阶数分, 组合积分对象可分为低阶对象和高阶对象.

不失一般性, 有如下5种典型的组合积分对象, 它们的传递函数分别为

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s}(1 - e^{-\tau s}), \quad (1a)$$

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau_1 s}(1 - e^{-\tau_1 s})e^{-\tau_2 s}, \quad (1b)$$

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s(Ts + 1)}(1 - e^{-\tau s}), \quad (1c)$$

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau_1 s(Ts + 1)}(1 - e^{-\tau_1 s})e^{-\tau_2 s}, \quad (1d)$$

$$G_p(s) = \frac{k_1}{\tau_1 s}(1 - e^{-\tau_1 s})e^{-\tau_2 s} + \frac{k_2}{\tau_3 s}(1 - e^{-\tau_3 s})e^{-\tau_4 s}, \quad (1e)$$

$$\tau_4 = \tau_1 + \tau_2.$$

这些传递函数是根据测试得到的输入、输出数据建模而得到的, 或者根据过程对象的机理特性分析而得到的.

3 流程工业中的组合积分系统(Combined integrating systems in process industry)

钢铁热处理行业中的双频率淬火机床过程是钢铁生产的重要环节, 它采用两种频率的线圈对轧辊进行加热. 轧辊下端的表面温度这一被控变量相对于线圈功率这个操纵变量是一类组合积分系统, 该过程的传递函数具有式(1a)的形式, 工艺流程示意图如图1所示.

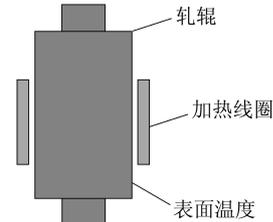


图1 双频率淬火机床温度控制系统

Fig. 1 Temperature process of quench machine tool

在烟草行业中, 烟叶(或者烟丝)需要反复的加水或者脱水, 来保证烟叶(或者烟丝)满足相应的工艺要求. 烘丝过程的出口水分过程(相对于筒壁蒸汽加热的阀位)具有式(1b)的传递函数. 工艺简图如图2所示.

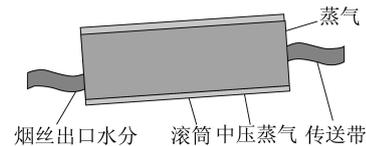


图2 烘丝过程出口水分系统

Fig. 2 Outlet moisture process of cut tobacco drying cylinder

润风、润叶过程出口水分和转筒式粮食加工过程的出口水分也类似烘丝过程出口水分系统, 并具有相同类型的传递函数式(1b). 由于加热方式的不同, 这些系统的加热方式具有细微的差别.

卷烟厂膨胀烟丝出口水分过程(相对于加水的阀位)的传递函数可以简化为式(1d)的形式. 和烘丝过程出口水分系统相反, 这个过程是加水过程, 而不是脱水过程, 如图3所示.

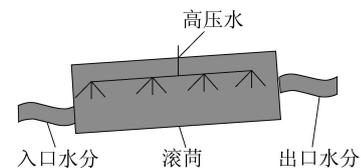


图3 膨胀烟丝出口水分过程

Fig. 3 Outlet moisture of expanding cut tobacco process

打叶复烤厂的回潮工段的出口水分过程(相对于加水调节总阀)具有式(1e)的传递函数. 这种特殊过程的基本原理与膨胀烟丝的加水原理基本相似, 不

同的是回潮工段的出口水分过程分为几个部分, 由一个调节总阀控制总的流量, 每一个部分水的流量手动进行控制, 各不相同, 如图4所示。

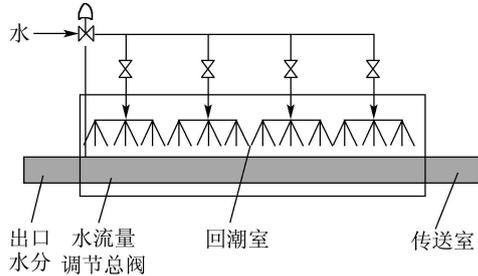


图 4 打叶复烤厂回潮工段出口水分过程

Fig. 4 Resurgence process of tobacco leaf redry factory

4 组合积分系统的先进控制算法(Advanced control strategy for combined integratng process)

对于组合积分系统, 即使是无模型失配, 不管PID控制器如何整定, 系统的阶跃响应经常出现超调、响应慢或者很长时间都难于达到设定值, 很难在响应速度与鲁棒稳定性达到一个平衡。

为了解决这些问题, 考虑到组合积分对象的特殊性, 设计一种基于模型的控制算法是非常必要的。假如过程对象具有式(1b)的传递函数, 注意到式(1a)是式(1b)的一个特例。选择所期望的闭环传递函数具有以下的结构形式:

$$G_0 = \frac{1}{\lambda\tau_{10}s} (1 - e^{-\lambda\tau_{10}s}) e^{-\tau_{10}s}. \quad (2)$$

其中: $\tau_{10}, \tau_{20}, \lambda$ 是整定参数。当 $\lambda = 1$, 开环的响应时间与闭环的响应时间相同; 当 $\lambda > 1$, 开环的响应

时间比闭环的响应时间快; 当 $\lambda < 1$, 开环的响应时间比闭环的响应时间慢。这样可以推导控制器的传递函数如下:

$$G^C = \frac{G_0}{G_p(1 - G_0)} = \frac{G_0}{\tau_{10}s(1 - e^{-\lambda\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}} \cdot \frac{1}{k(1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}[\lambda\tau_{10}s - (1 - e^{-\lambda\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}]}. \quad (3)$$

假定 $\lambda = 1, \tau_{10} = \tau_1, \tau_{20} = \tau_2, k_0 = k$, 有

$$G^C = \frac{1}{k_0[\tau_{10}s - (1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}]}. \quad (4)$$

控制器在时间域的输入、输出关系为:

$$u(s) = \frac{1}{k_0}e(s) + \frac{1}{\tau_{10}s}(1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}u(s). \quad (5)$$

式(5)右边部分的第一项为比例项, 而第二项可以解释为控制器在 t 时刻的输出是由控制器在过去时间 $[t - (\tau_{10} + \tau_{20}), t - \tau_{20}]$ 的输出预测而得到的。

控制器(4)本身的阶跃响应首先在比例作用下, 控制器有一个初始阶跃, 然后在一段时间保持不变, 再在变积分的作用下上升, 最后在稳定的积分作用下平稳上升。控制器(4)既具有变积分作用的PI控制器特性, 同时又具有预测的功能, 因此将该控制器命名为伪预测PI控制器。如果 $\tau_{20} = 0$, 于是得到如下简化的伪预测PI控制器:

$$G^C = \frac{\tau_{10}s}{k_0[\tau_{10}s - 1 + e^{-\tau_{10}s}]}. \quad (6)$$

控制器(4)有3个参数, 分别为 k, τ_{10}, τ_{20} 。 k 是过程的稳态增益, τ_{10} 为上升时间, τ_{20} 为纯滞后时间。图5为控制系统的示意图。

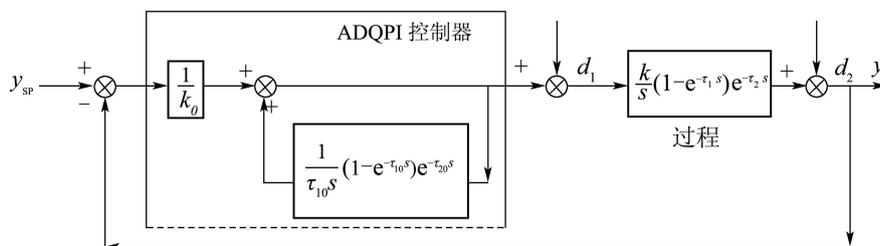


图 5 抗时滞伪PI控制系统的结构

Fig. 5 Structure of anti-delay quasi-PI (ADQPI) control system

根据相同的设计程序, 同样可以推导出其它组合积分系统的控制器传递函数, 见表1。

5 实际工业应用(Practical industrial application)

烘丝过程的出口水分是烟草生产过程中最重要的变量之一, 也是一个比较复杂难控制的变量, 它相对于中压蒸汽的阀位的传递函数可以近似表

示为式(1b)的形式, 是一种典型的组合积分系统。总的控制系统的结构如下图所示。

在图6中, $G_{p1}(s)$ 和 $G_{p2}(s)$ 分别是出口水分过程和温度过程的传递函数; 而 $G_{c1}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$ 分别为水分控制器与温度控制器; d_1, d_2 分别是水分过程与温度过程的干扰; $G_d(s)$ 是干扰 d_1 作用于水分通道的传递函数; $G_{ff}(s)$ 为前馈补偿环节。

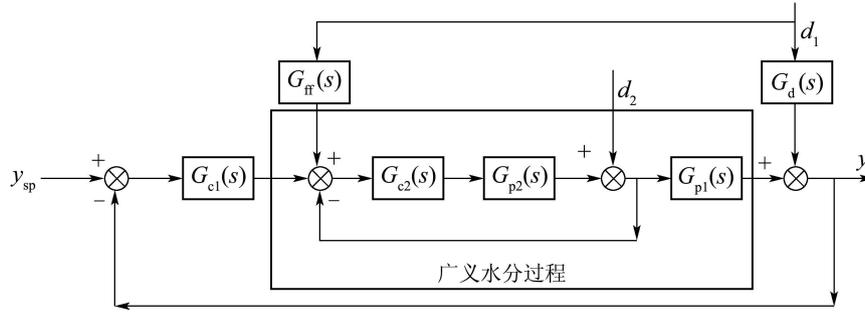


图6 烘丝过程出口水分控制系统结构示意图

Fig. 6 Structure of outlet moisture control system

表1 各种组合积分系统的先进控制算法

Table 1 Control strategies of various combined integrating processes

过程	期望的闭环传递函数	控制器结构	整定参数
(1a)	$\frac{1}{\tau_{10}s}(1 - e^{-\tau_{10}s})$	$\frac{\tau_{10}s}{k_0[\tau_{10}s - 1 + e^{-\tau_{10}s}]}$	τ_{10}, k_0
(1b)	$\frac{1}{\tau_{10}s}(1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}$	$\frac{\tau_{10}s}{k_0[\tau_{10}s - (1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}]}$	$\tau_{10}, \tau_{20}, k_0$
(1c)	$\frac{1}{\tau_{10}s(Ts + 1)}(1 - e^{-\tau_{10}s})$	$\frac{\tau_{10}s(Ts + 1)}{k_0[\tau_{10}s(Ts + 1) - 1 + e^{-\tau_{10}s}]}$	τ_{10}, k_0, T
(1d)	$\frac{1}{\tau_{10}s(Ts + 1)}(1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}$	$\frac{\tau_{10}s(Ts + 1)}{k_0[\tau_{10}s(Ts + 1) - (1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}]}$	$\tau_{10}, \tau_{20}, k_0, T$
(1e)	$\frac{1}{\tau_{10}s}(1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}$	$\frac{\tau_{10}\tau_{30}s}{M(s)[\tau_{10}s - (1 - e^{-\tau_{10}s})e^{-\tau_{20}s}]}$ *	$\tau_{10}, \tau_{20}, k_{10}, \tau_{30}, \tau_{40}, k_{20}$

$$*M(s) = k_{10}\tau_{30}(1 - e^{-\tau_{10}s}) + k_{20}\tau_{10}(1 - e^{-\tau_{30}s})e^{-(\tau_{40}-\tau_{20})s}.$$

为了将已经研究的控制算法应用到烘丝水分过程, 需要建立 $G_{p2}(s)$ 和 $G_{p2}(s)G_{p1}(s)$ 的传递函数模型. 然而建立单独的水分模型 $G_{p1}(s)$ 并非十分必要. 通过一个简单的测试便可以获得 $G_{p2}(s)$ 和 $G_{p2}(s)G_{p1}(s)$ 的模型,

$$G_{p2}(s) = \frac{1.61}{53s + 1}, \tag{7}$$

$$G_{p1}(s)G_{p2}(s) = G_p(s) = \frac{-0.156}{360s}(1 - e^{360s})e^{-60s}. \tag{8}$$

既然建立了 $G_{p2}(s)$ 和 $G_{p1}(s)G_{p2}(s)$ 的数学模型, 就可以直接设计 $G_{c1}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$. 假设控制器具有PI控制器的结构, 并假设温度系统的开环响应与闭环响应一致, 因此便可推导得到如下传递函数的温度控制器

$$G_{c2}(s) = \frac{1}{1.61}(1 + \frac{1}{53s}). \tag{9}$$

这样温度过程的闭环传递函数为

$$G_{p20}(s) = \frac{1}{53s + 1}. \tag{10}$$

现在重要的一步是推导广义的过程模型 $G_p(s)$, 即图6中虚线内的部分:

$$G_p(s) = G_{p20}G_{p1} = \frac{1}{1.61}G_{p2}G_{p1} = \frac{-0.0969}{360s}(1 - e^{-360s})e^{-60s}. \tag{11}$$

按照式(4), $G_{c1}(s)$ 的具体传递函数如下:

$$G_{c1}(s) = \frac{360s}{-0.0969[360s - (1 - e^{-360s})e^{-60s}]}. \tag{12}$$

将 $G_{c1}(s)$ 以1 s的时间离散化, 得到控制器的离散表达式

$$u(n + 1) = \frac{e(n + 1) - e(n)}{-0.0969} - \frac{u(n) - u(n - 360)}{360} + u(n). \tag{13}$$

其中: u 是控制器的输出, e 为设定值与实际测量值之间的误差, n 为离散的采样时间. 从式(13)可以看出, 该控制器在现场实现非常简单, 唯一的不足是需要较多的存储空间来储存从 $u(n)$

到 $u(n - 360)$ 控制器过去时间的输出. 对于现代先进的分布式控制系统来说, 并不是一个问题.

该控制策略已经成功应用到一家卷烟厂, 到目前为止, 连续平稳运行了24个月. 控制性能有显著的提高. 原有的控制方案在正常生产条件下, 出口水分能够保证在设定值的 $\pm 0.5\%$ 之内; 在非正常生产条件下, 如进料水分变化比较大, 出口水分仅仅能够保证在设定值的 $\pm 1.0\%$ 之内. 同时为避免大幅度的波动, 原有控制器控制作用设置得非常微弱, 对于出口水分设定值的改变响应缓慢. 新的控制方案不管是在正常生产条件下, 还是在非正常生产条件下, 出口水分均能够严格控制在 $\pm 0.3\%$ 之内, 据粗略估计, 新的控制算法每年为该卷烟厂提高经济效益300万美元.

6 结论(Conclusion)

本文提出了一类新型的组合积分系统, 给出了它们的传递函数, 分析了它们的特点. 组合积分系统广泛存在于流程工业之中, 传统的PID控制算法难以达到令人满意的控制效果. 基于该原因, 开发了一类新型的控制算法. 这类控制算法根据对象的模型而设计, 不仅适合对组合积分系统进行控制, 而且适合其它对象的控制. 成功的工业应用表明了该新控制算法的有效性、合理性.

参考文献(References):

[1] I-LUNG C, SHENG C P, JUNHONG L. Simple control method for integrating processes with long deadtime[J]. *Journal of Process Control*, 2002, 12(4): 391 - 404.

- [2] IBRAHIM K. Obtaining controller parameters for a new PI-PD Smith predictor using autotuning[J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13(5): 465 - 472.
- [3] ASTROM K J, HANG C C, LIM B C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(3): 343 - 345.
- [4] Weidong Z, Youxian S. Modified Smith predictor for controlling integrator/time delay process[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(11): 2769 - 2772.
- [5] MANTAUSEK M R, MICIC A D. On the modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(10): 1603 - 1606.
- [6] CANO R A R, ODLOAK D. Robust model predictive control of integrating processes[J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13(1): 101 - 114.
- [7] CARRAPICO O L, ODLOAK D. A stable model predictive control for integrating processes[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, 29(12): 1089 - 1099.
- [8] MIHAI H, WILLIAM A G, Guy A D, et al. Time delay integrating systems: a challenge for process control industries - A practical solution[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(8): 1153 - 1161.
- [9] 任正云, 张红, 邵惠鹤. 积分加纯滞后系统的双预测PI控制及其应用[J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(2): 311 - 314. (REN Zhengyun, ZHANG Hong, SHAO Huihe. Double predictive PI control for integrator plus time delay processes and its application [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 311 - 315.)
- [10] MORARI M, ZAFIRIOU E. *Robust Process Control*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.

作者简介:

任正云 (1969—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为先进过程控制、模型预测控制等, E-mail: renzhengyun@dhu.edu.cn;

郑达 (1982—), 博士研究生, 研究方向为先进过程控制, E-mail: zhengda@mail.dhu.edu.cn.