

文章编号: 1001-0920(2002)05-0638-03

# 在连续控制系统中实现断续的前馈补偿控制

张云生, 薛洁, 张长胜  
(昆明理工大学 自动化系, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 采用以时间最优为指标的断续控制器作为系统的前馈, 根据对象状态的条件, 判断和变换断续控制器的作用, 补偿连续控制器的控制值。这种连续控制与断续控制混合的控制系统, 把 PD 控制器与对设定值变化及对干扰抑制实现快速控制的 bang-bang 控制器结合起来, 能够快速地实现系统动态调节, 且超调量小, 并克服了由于控制器硬件的某些限制, 不能较大范围改变控制信号的缺陷, 在实际过程控制中达到了很好的动态和稳态响应。

**关键词:** 连续控制; 断续控制; 前馈补偿

**中图分类号:** TP 273.3      **文献标识码:** A

## Discontinuous feedforward compensation control in continuous control systems

ZHANG Yun-sheng, XUE Jie, ZHANG Chang-sheng

(Department of Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Using the time-optimal discontinuous controller as the feedforward of system, the new control system that uses both continuous and discontinuous control strategy can compensate the control value of continuous controller according to the conditions of object. This control system combines the PD controller with the bang-bang controller, which can control the change of set point value and disturbances quickly. This control strategy overcomes the shortcoming of the narrow range of control signal caused by the limitation of controller hardware, and has smaller overshoot, faster adjustment to the dynamics of the system and better response of the steady-state and dynamic-state of the control system in the real-time control.

**Key words:** continuous control; discontinuous control; feedforward compensation

## 1 引言

在连续过程控制系统中, PD 控制器对给定控制具有无偏的调节作用, 即使在有干扰的情况下, 通过所谓的二自由度 PD 参数选择, 对干扰也具有抑制作用。但在实际中, 一个过程的变化受多种因素的

影响, 如模型的变化导致参数选择不能完全匹配, 环境的变化要求系统要有自适应能力或应急措施。另外, 一个过程的数学模型与实际系统也存在差异, 控制量之间直接或间接的介质转换, 信号的异构特性等导致系统的延迟、畸变, 以及实际控制量幅值和作

收稿日期: 2001-07-20; 修回日期: 2001-10-18

基金项目: 云南省应用基础研究基金项目

作者简介: 张云生(1948—), 男, 云南昆明人, 教授, 从事实时计算机控制的研究; 薛洁(1969—), 女, 江苏徐州人, 讲师, 从事 PD 控制的研究。

用能力的限制等,使得在实际控制系统中,即便是简单的温度控制系统,单纯靠一种控制方式,也难达到目的<sup>[1]</sup>,所以在许多实际过程控制中,往往使用手动控制来配合自动控制。

本文分析一种连续控制与断续控制混合的控制系统,采用带前馈补偿的方式,把 PD 控制器与对设定值变化及对干扰抑制实现快速控制的邦-邦控制器结合起来,达到更好的稳态响应和动态响应,并将其应用于烟叶烤箱这样的大热容设备的加热、通风、排湿控制系统中。

## 2 断续控制的补偿作用

采用带前馈的控制策略可以组合其它的控制算法,将连续控制器作为单回路或串级的闭环控制,采用一断续的控制器根据对象被控量的变化情况,特别是在临界情况下加入补偿作用,以加快对象的调节作用。在系统状态远离参考输入时,使用断续控制器,通过前馈作用,突加控制输入量;在系统被控量接近参考值时,保持断续控制作用的原有状态而由连续控制保证对象的跟踪特性和稳态调节。这种控制结构类似于用手动调节改善自动调节的快速性,对难以迅速给出大的增量值的实际控制系统具有很好的补偿作用。

在采用自动补偿作用代替手动调节时,同样需要对系统状态进行判断和过渡变换。连续控制器处于一直调节的状态,断续控制器的对应状态则可能激活或不激活,每一状态和一个动作相关,如开或关。从理论上说,在稳定的连续控制器上增加断续控制器的开关切换可能导致一个不稳定的闭环系统,因为突加的增量可能产生过大的超调。另外,在某些情况下开关的频率过快,会产生跳变现象。显然这对得到稳态的期望特性是不利的,而且对执行硬件的使用寿命也有影响。

可用如下方程来描述混合控制系统<sup>[2,3]</sup>

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, t, u) \\ u_i = c_i(x, t) \\ u = \alpha u_i + u_c \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x$  是系统状态,  $u_i$  是某一断续控制输入,  $u_c$  是连续控制输入,  $u$  是混合控制信号。假设系统在  $u_c$  控制下是稳定的,  $u_i$  的加入是要改善系统的响应特性,  $c_i$  是其控制函数,它的作用仅限状态  $x$  在区域  $\Omega$  中,对于状态的判断和过渡变换与一个  $\alpha$  有关。

如果作用条件为真 ( $x \in \Omega$ ), 且上一步已被激

活 ( $\alpha = 1$ ), 控制状态并不变换 ( $\alpha = 1$ ); 如果上一步未被激活 ( $\alpha = 0$ ), 则需过渡变换 ( $\alpha = 1$ )。如果动作执行条件改变 ( $x \notin \Omega$ ), 则进行相反的变换, 其判断步骤与上述相类似 ( $\alpha$  从 1 变为 0)。

为保证系统稳定, 采用 Lyapunov 函数确定其最少开关策略: 设式 (1) 中有若干 Lyapunov 函数  $v_i(x, t)$  与每一断续控制器  $c_i$  相关, 即  $f_i(x, t, u_i)$  是使用  $c_i$  的结果, 那么确定  $c_i$  是否作用的依据是寻找在

$$\dot{x} = \alpha f_i(x, t, u_i, u_c) \quad (2)$$

中, 保证系统是稳定的函数。其中若  $x \in \Omega$  或

$$v_i(x, t) > \min [v_j(x, t)]_{j \in \Omega}$$

则  $\alpha = 0$ , 否则  $\alpha = 1$ 。为此有:

**定理 1** 设系统由式 (2) 给出, 对式 (2) 寻找保证其稳定的 Lyapunov 函数

$$v = \alpha v_i$$

即得最小开关策略。

在实际应用中, 避免开关频繁跳变的方法是在未使用 ( $\alpha = 0$ ) 的 Lyapunov 函数中增加一个小常数  $\Delta$ , 使其与正在运行 ( $\alpha = 1$ ) 的 Lyapunov 函数进行比较, 这样使控制作用在过渡变换时有一段时间延迟。容易证明, 如果系统原来的过渡变换是稳定的, 则增加  $\Delta$  后仍是稳定的。

## 3 对连续控制器的前馈作用

在实际调节过程中, 为了保证调节精度、调节时间, 确定对象模型, 选择补偿调节方式, 实现上述分析和设计并不容易。但从控制目标考虑, 只需在最短的时间内改变控制状态, 尽可能没有超调, 并服从对控制信号的约束 (如控制信号幅值或其变化的界限), 可采取如下时间最优控制

$$\max_0^T - \int_0^T 1 dt \quad (3)$$

在状态约束条件  $x(0), x(T)$  和输入  $u_i \in [0, 1]$  时, 对于一类广泛的系统 (3) 的解是邦-邦特性, 最优控制在它的极端值之间开关<sup>[4]</sup>。采用在反馈系统上增加前馈, 把状态空间分为两个子集, 由系统的状态空间表达式得到平衡点和开关曲线, 然后将开关曲线作为参考轨迹, 使系统尽可能快地从一个设定值改变到另一个设定值。对于很多实际系统, 很难得到开关曲线的解析表达式, 只能采用近似的开关曲线。采用非线性开关曲线代替线性开关曲线对系统有相同的控制序列。

一种较好的、简单的开关曲线是带间隙的闭环曲线。其输入输出特性可描述为

$$u_i = \frac{1}{1-k} x \quad (4)$$

其中,  $x$  是对象状态的检测值;  $u_i$  是断续控制器的输出, 并且  $u_{i1} = 1, u_{i2} = 0$ 。间隙  $h = k(u_{i1} - u_{i2})$  保证系统控制变换稳定和有一定的反应时间。间隙过窄会导致控制的频繁跳变, 间隙根据调节精度由  $k$  确定。

#### 4 烤箱温度控制系统实例

烘烤烟叶的烤箱, 其温度、通风、排湿系统如图1所示。为着重说明上述混合控制的原理, 仅以温度控制问题为例。系统用蒸汽加热水箱, 通过水泵将水箱中的热水打入循环水管, 循环水管排放在烤箱底部, 使周围空气加热, 由鼓风机将热气鼓入烤箱, 以利烟叶的排湿。

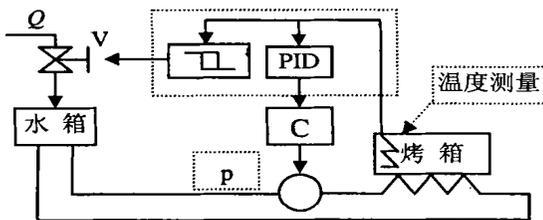


图1 烤箱温度、通风、排湿系统

空气温度由PD调节器控制变频器C的输出频率, 然后改变水泵p的转速进行连续调节; 用非线性开关特性打开或关闭蒸汽阀门V, 对水温进行补偿。一般说, 烘烤烟叶的温度设定曲线具有12段, 烤箱内部的温度 $T$ 是可测的。在水箱水温一定的情况下, 改变变频器的输出频率, 水泵转速变化, 由水的循环速度使烤箱温度达到设定值。但当水箱水温过低或过高时, 由于变频器频率变化范围和水泵转速变化范围受限, 实际温度往往无法达到期望值。如果此时蒸汽管道阀门改变状态, 蒸汽流量 $Q$ 变化, 即使水箱水温改变, 通过变频器的调节就能使烤箱温度达到期望值。另一方面, 蒸汽温度由于负荷等的影响可能是波动的, 在波动范围大的情况下仅靠水泵转速很难保证温度控制, 所以要有蒸汽流量控制的补偿作用。另外, 烤箱是一个大热容设备, 没有准确的模型, 通过蒸汽阀门断续的开关控制, 可以起到与手动调节阀相似的作用, 而且跟踪设定曲线和实际调节作用比手动调节更快。

图2为实际运行过程中烤箱温度的设定曲线和

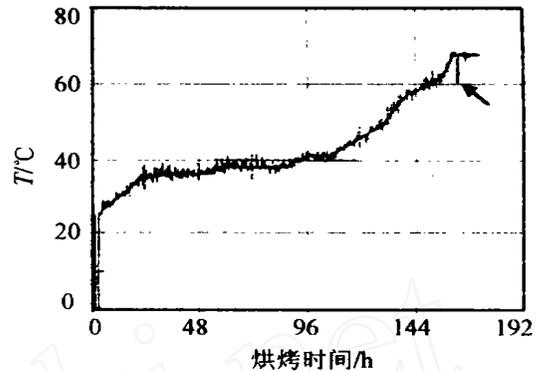


图2 烤箱控制系统温度曲线

实际变化曲线。图中箭头处的变频器频率变化已接近临界, 烤箱温度偏差仍然很大, 水箱阀门状态自动改变, 水温突变, 使得烤箱温度迅速接近设定曲线, 此时变频器频率变化会趋于平稳。断续的阀门控制补偿了连续的变频器控制作用。

#### 5 结论

经验证明, 手动控制配合连续的自动控制对诸如温度控制这样的大惯性、大滞后的系统具有很有效的补偿作用, 但是手动控制的不精确性和反应缓慢限制了系统性能的改进。采用一种以时间最优为指标的断续控制器作为系统的前馈, 根据对象状态的条件, 判断和变换断续控制器的作用, 补偿连续控制器的控制值, 能够快速地实现系统对设定值和干扰变化的动态调节, 而且超调量小。这种前馈的补偿作用也克服了由于控制器硬件的某些限制, 不能较大范围改变控制信号的缺陷。采用非线性的开关特性提供断续的前馈信号, 在烟叶烘烤烤箱的加温、通风、排湿过程中, 控制效果非常明显。实践证明这种混合的前馈控制系统在工业过程控制系统中有效应用, 应用广泛。

#### 参考文献(References):

- [1] Johan Eker, Jorgen Malmberg Design and implementation of a hybrid control strategy[J]. *IEEE Trans & Control Systems Society*, 1999, 19(4): 12-21.
- [2] E Ferron. Quadratic stabilizability of switched systems state and output feedback[R]. Cambridge: Center for Intelligent Control Systems, 1992.
- [3] M Johansson, A Rantzer. Computation of piecewise quadratic Lyapunov functions for hybrid systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 555-559.
- [4] F L Lewis. *Optimal Control*[M]. Wiley, 1986.