

新型 Smith 预估控制器在大延迟系统中的应用

张 蒙

(宝钢工程技术集团有限公司, 上海 201900)

摘要: 针对控制系统中出现的大延迟问题, 推导出了调节器在积分形式下的控制率, 从而提出积分调节器 Smith 预估控制方法。根据推导出的新型 Smith 预估控制算法可知: 只要系统的放大倍数取足够大, 控制器在很快时间内就消除误差, 可有效地解决系统中的大延迟问题。采用 Matlab 中的 Simulink 对新型 Smith 预估控制系统进行了调节器参数变化、被控对象增益变化、被控对象延迟时间变化的仿真, 通过对仿真结果进行比较, 可以看出新型 Smith 控制系统具有快速性和较高的稳定性, 对被控对象参数变化不敏感, 且结构简单等特点。

关键词: 大延迟; 反馈; 放大倍数; 新型 Smith 预估控制器; 仿真

中图分类号: TP 214+.5; TP 272

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)04-0136-03

在生产过程中, 有些控制对象具有较大的纯延迟时间, 使得控制系统的稳定性降低。目前工业上大多使用 Smith 预估补偿控制方法^[1]。新型 Smith 预估控制法具有动态调节的快速性和静态高精度性。通过理论论证和仿真结果阐述该方法的有效性。

1 新型 Smith 预估控制原理

大延迟系统中采用的控制方法是: 按照特性设计出一种模型加入到反馈控制系统中, 以补偿过程的动态特性。Smith 预估控制技术是得到广泛应用的技术之一。它的特点是预先估计出过程在基本扰动下的动态特性, 然后由预估器进行补偿, 力图使延迟了 τ (τ 为设定的时间常数) 的被控量超前反馈到控制器, 使控制器提前动作, 从而明显地减少超前量, 加速调节过程^[2]。

具有纯延迟的反馈控制系统如图 1 所示, 图中 $G_c(s)$ 表示调节器的传递函数, $G_p(s)e^{-\tau s}$ 表示对象的传递函数^[3-5]。

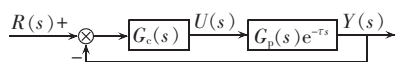


图 1 具有纯延迟的反馈控制系统

Fig.1 Feedback control system with pure time-delay

其闭环传递函数为

$$G_s(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (1)$$

假设系统的被控对象的传递函数为一个比例和纯延迟系统的串联, 其中控制对象的延迟时间常数为 τ , 比例系数设为 K , 即系统的控制对象的传递函数为 $G_p(s) = K$ 。

为了改善这类大延迟对象的控制精度, 需引入一

个补偿器, 即 Smith 预估器^[6-12], 针对控制对象 $G_p(s) = K$ 具有 Smith 预估器的系统结构框图如图 2 所示。

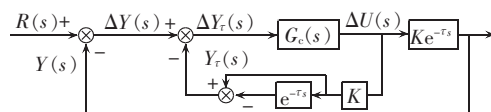


图 2 带 Smith 补偿的控制系统方框图

Fig.2 Block diagram of control system with Smith compensation

由图 2 可得大延迟补偿控制系统的传递函数:

$$G_{sd}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \left[\frac{G_c(s)K}{1 + G_c(s)K} \right] e^{-\tau s} \quad (2)$$

由式(2)可知, 经过纯延迟补偿后, 已消除了纯延迟部分对系统的影响。因此, 对任何大延迟时间常数 τ , 系统都是稳定的。

控制器 $G_c(s)$ 的输入可表示为

$$\Delta Y_r(s) = \Delta Y(s) - Y_r(s) = \Delta Y(s) - K\Delta U(s) + (Ke^{-\tau s})\Delta U(s) \quad (3)$$

将式(3)离散化, 得到了 Smith 预估控制器的输入的差分方程表达形式:

$$\Delta y_r(k) = \Delta y(k) - K\Delta u(k) + K\Delta u(k - \tau) \quad (4)$$

由式(4)可知, 控制器的输入不再是单纯反馈信号 $\Delta y(k)$, 系统包括了控制器的输出值 $\Delta u(k)$ 以及 $\Delta u(k - \tau)$ 对本次控制的影响。

如果不考虑函数的延迟部分, 经过补偿后的闭环系统的传递函数如下:

$$G_s(s) = \frac{G_c(s)K}{1 + G_c(s)K} \quad (5)$$

取调节器为积分形式, 即调节器的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{\Delta U(s)}{\Delta Y_r(s)} = \frac{P}{s} \quad (6)$$

其中, P 为调节器的放大倍数。

新型 Smith 预估控制结构方框图如图 3 所示。

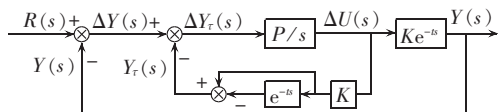


图 3 新型 Smith 预估控制结构方框图

Fig.3 Block diagram of new Smith predictor control

将式(6)代入式(5),整理后得到整个控制系统非延迟部分的闭环传递函数:

$$G_s(s) = \frac{KP}{s + KP} \quad (7)$$

将式(6)代入式(4),并进行离散化,就得到了调节器的控制率:

$$\Delta u(k) = \frac{1}{1 + PK} \Delta u(k-1) + \frac{PK}{1 + PK} \Delta u(k-t) + \frac{P}{1 + PK} \Delta y(k) \quad (8)$$

由于控制的第一步 $\Delta u(-1)$ 和 $\Delta u(-t)$ 均为 0,则在控制的第一步控制率为

$$\Delta u(1) = \frac{P}{1 + PK} \Delta y(1) \quad (9)$$

如果第一步就将系统的偏差全部消除, P 需要足够大,在此情况下式(8)的控制率简化为

$$\Delta u(k) = \Delta u(k-t) + \frac{1}{K} \Delta y(k) \quad (10)$$

式(7)的单位阶跃响应的传递函数为

$$Y(s) = \frac{1}{s} \frac{KP}{s + KP} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + KP} \quad (11)$$

系统在单位阶跃输入情况下的时域响应函数为

$$y(t) = 1 - e^{-KPt} \quad (12)$$

由式(12)也可知, K 为给定的数学模型,如果想要缩短系统的调节过程,则调节器的放大倍数 P 越大越好。理论上如果 P 无穷大,那么第一步就消除误差。但考虑到测量偏差、系统干扰等一些因素的影响,系统的放大倍数 P 不要太大,一般 $K \times P > 200$ 即可快速消除误差。

2 系统的仿真研究

假设在常规 Smith 预估控制系统中的被控对象数学模型为一阶惯性加纯延迟形式,其传递函数为 $Ke^{-\tau s} / (t_1 s + 1)$ 。

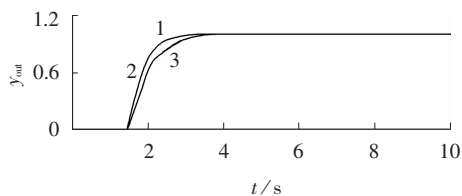
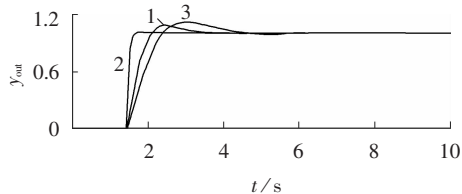
采用 Matlab 中的 Simulink 对新型 Smith 控制系统进行仿真,同时与常规 Smith 系统和不带 Smith 系统相比较^[13-15]。仿真时间为 10 s,仿真参数设置如下所示。PID 控制器: $K_p = 1.5$, $K_i = 3 \sim 20$, $K_d = 0.24$; $K_{pi} = 0.5$, $K_{il} = 1 \sim 2$, $K_{dl} = 0.1$ 。

被控对象传递函数: $K = 0.1 \sim 0.9$, $t = 0.5 \sim 1.0$ s, $t_1 = 0.3 \sim 1$ s。

2.1 调节器参数变化时的仿真研究

常规 Smith 系统的积分系数 K_i 、未带 Smith 系统的积分系数 K_{il} 和放大倍数 P 逐渐变大,仿真结果如图 4 所示。图中曲线 1 表示常规 Smith 系统,曲线 2

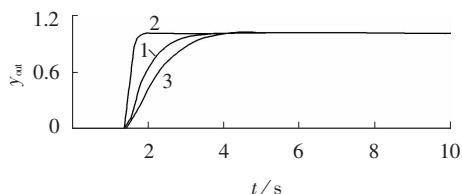
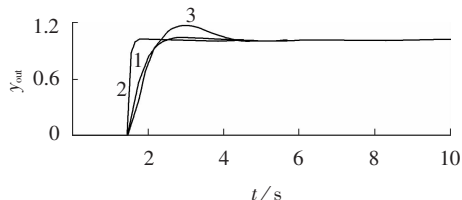
表示新型 Smith 控制系统,曲线 3 表示未带 Smith 系统(纵坐标为输出信号 y_{out} ,是阶跃响应,无单位;图 5、6 同),其变化是由图 4(a)变为图 4(b)。

(a) $K_i = 3, K_{il} = 1.1, P = 3$ (b) $K_i = 6, K_{il} = 1.5, P = 30$ 图 4 K_i, K_{il}, P 变化时的仿真图Fig.4 Simulative results with different K_i, K_{il} and P

由图 4 可见, K_i, K_{il}, P 逐渐增大, 常规 Smith 系统和未带 Smith 系统都出现大超调现象, 而新型 Smith 控制系统的调节时间明显减少, 还避免了超调现象。在图 4(a) 中, 3 种调节器的调节时间几乎都为 3 s。在图 4(b) 中, 常规 Smith 系统调节时间为 2.6 s, 未带 Smith 系统调节时间为 3.5 s, 而新型 Smith 控制系统调节时间是 1.5 s。这说明新型 Smith 控制系统具有响应快速性和稳定性, 更适用于大延迟过程的控制。

2.2 被控对象增益改变的仿真研究

被控对象的增益 K 逐渐变大, 仿真结果如图 5 所示, 其变化是由图 5(a) 变为图 5(b)。

(a) $K = 0.5$ (b) $K = 0.9$ 图 5 K 变化时的仿真图Fig.5 Simulative results with different K

由图 5 可知, 随着 K 逐渐增大, 常规 Smith 系统调节和未带 Smith 系统都出现超调现象, 但几乎不影响新型 Smith 控制系统。说明常规 Smith 系统和未带 Smith 系统适应被控对象参数变化的能力差, 而

新型 Smith 控制系统则对被控对象参数变化不敏感。

2.3 被控对象延迟时间变化的仿真研究

被控对象的延迟时间 t_{del} 逐渐变大, 仿真结果如图 6 所示, 其变化是由图 6(a) 变为图 6(b)。

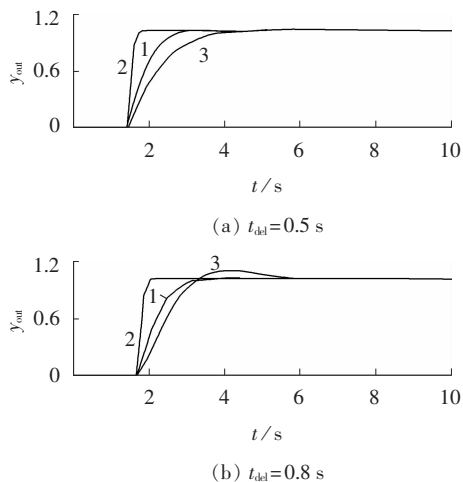


图 6 t 变化时的仿真图

Fig.6 Simulative results with different t

由图 6 可见, Smith 系统中纯延迟时间改变时, 新型 Smith 控制系统的品质标准好于常规 Smith 系统和未带 Smith 系统, 在对象模型发生较大变化时也有较好的控制效果。

3 结论

常规 Smith 系统和未带 Smith 系统适应被控对象参数变化的能力差, 而本文提出的新型 Smith 控制系统则对被控对象参数变化不敏感, 对被控对象的模型要求不是很严格。

参考文献:

- [1] 俞金寿. 工业过程先进控制[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002: 101-102.
- [2] 李正军. 计算机控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 176-177.
- [3] 张雪申, 王慧峰. TDC-300 集散控制系统[M]. 北京: 化工工业出版社, 1997: 110-112.
- [4] 张全庄, 兰羽. Smith 预估器在大延迟系统中的应用[J]. 机床与液压, 2006(4): 170-171.
ZHANG Quanzhuang, LAN Yu. Application of Smith predictor in large time-delay system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(4): 170-171.
- [5] 吴春富, 肖海荣. 一种改进型 Smith 预估补偿控制方案[J]. 山东交通学院学报, 2004, 12(2): 61-63.
WU Chunfu, XIAO Hairong. An improved compensation control scheme of Smith pre-estimating system[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2004, 12(2): 61-63.
- [6] 何克忠, 李伟. 计算机控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 263-272.
- [7] 杨申, 赵宏伟, 商国栋, 等. Smith 预估控制改进型算法的研究[J]. 广东电力, 2009, 22(7): 13-17.
YANG Shen, ZHAO Hongwei, SHANG Guodong, et al. Study on modified methods for Smith predicting control[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(7): 13-17.
- [8] 张国山, 刘晓红. 不稳定和积分时滞过程的 Smith 预估器设计[J]. 天津大学学报, 2007, 40(1): 104-109.
ZHANG Guoshan, LIU Xiaohong. Smith predictor design for unstable and integrating processes with dead time[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(1): 104-109.
- [9] 崔坤林, 张翼飞. 时滞系统的经典控制与智能控制[J]. 微计算机信息, 2004, 20(6): 25-26.
CUI Kunlin, ZHANG Yifei. Classical control and intelligent control for the time delay system[J]. Control & Automation, 2004, 20(6): 25-26.
- [10] 李会举, 翟春艳. 大时滞积分过程的改进 Smith 预估控制器[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2009, 29(3): 73-76.
LI Huiju, ZHAI Chunyan. Modified Smith predictor controller for integrating processes with long dead time[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2009, 29(3): 73-76.
- [11] 朱海荣, 吴晓新, 马聪, 等. 一类大时滞过程的预测 PI 控制器[J]. 南通大学学报, 2007, 6(2): 66-69.
ZHU Hairong, WU Xiaoxin, MA Cong, et al. A predictive PI controller for time-delay process[J]. Journal of Nantong University, 2007, 6(2): 66-69.
- [12] 宋仁杰, 王云宽, 范国梁, 等. 一种改进的 Smith 预估控制器[J]. 控制工程, 2007, 14(增刊): 88-90.
SONG Renjie, WANG Yunkuan, FAN Guoliang, et al. Design of a modified Smith predictive controller[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(Supplement): 88-90.
- [13] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 Matlab 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 29-36.
- [14] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 44-51.
- [15] 薛定宇. 控制系统仿真与计算机辅助设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 145-157.

(编辑: 汪仪珍)

作者简介:

张 蒙(1980-), 男, 重庆人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事轧制工艺及自动化研究(E-mail: zhangmeng929@163.com)。

Application of new Smith predictor in large time-delay system

ZHANG Meng

(Baosteel Engineering & Technology Group Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: For the large time-delay of control systems, the control factor of integral regulator is deduced and the Smith predictor control with integral regulator is presented. According to the control algorithm of presented Smith predictor, the integral regulator diminishes rapidly the error caused by the large time-delay when the system magnification coefficient is big enough. The new Smith predictor control system is simulated by Simulink with different parameters of integral regulator and different gains and time-delays of controlled object. Results show that the new Smith predictor control system has faster response, better stability, simple structure and immunity to the parameter change of objects controlled.

Key words: large time-delay; feedback; magnification coefficient; new Smith predictor; simulation