

文章编号: 1000-5013(2012)04-0366-04

纯滞后过程的鲁棒二自由度串级控制

李钟慎, 姚婷梅

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种串级状态反馈控制系统,其纯滞后因子用 m 阶模型逼近,外回路串入一个积分器,按最优传递函数设计整个系统,内回路引入状态观测器,构成状态反馈子系统,按状态反馈增益阵和状态观测器的协调优化设计子系统,从而实现纯滞后过程的鲁棒二自由度控制. 仿真结果表明:所设计的串级状态反馈控制系统同时获得良好的给定值跟踪特性和干扰抑制特性,具有良好的控制性能和鲁棒性.

关键词: 纯滞后过程; 模型逼近; 最优传递函数; 外回路; 内回路

中图分类号: TP 273 **文献标志码:** A

工业生产过程大多存在纯滞后,常用比例-积分-微分(PID)控制器和史密斯(Smith)预估器及其改进算法来控制. PID 控制器的鲁棒性较好,但控制精度不高;Smith 预估器及其改进算法的控制精度较高,但抗干扰性和鲁棒性差. 文献[1]提出了一种采用状态反馈来控制纯滞后对象的方法,将纯滞后因子用分时模型逼近,然后以最优传递函数为目标函数来设计状态反馈增益阵和状态观测器,从而实现对纯滞后对象的次优控制. 该状态反馈优化控制满足了设定值跟踪,获得较满意的设定值跟踪过渡曲线,同时对干扰的衰减也迅速,问题在于对干扰存在稳态偏差. 文献[2-3]利用多项式拟合纯滞后环节,采用串级双环控制,使纯滞后过程获得较理想的控制效果. 文献[2]的串级系统内环采用状态反馈,外环采用 PID 控制器,按照极点配置原则整定 PID 参数;文献[3]的串级系统内回路采用状态反馈,选择 Butterworth 滤波器作为优化闭环传递函数,采用内外环频率协调优化设计方法,设计出最优状态反馈矩阵和观测器系统矩阵,外回路只需采用简单的单位反馈. 本文在文献[1-3]的基础上,提出一种串级状态反馈控制系统,其纯滞后因子用 m 阶模型逼近.

1 纯滞后过程的串级状态反馈优化控制

对于很多实际工业生产过程,可以用二阶加纯滞后(SOPDT)环节来描述,即

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}.$$

(1)

式(1)中: K_p 为对象静态增益; T_1, T_2 为时间常数; τ 为纯滞后时间.

应用马克劳林(Maclaurin)展开式将纯滞后因子 $e^{-\tau s}$ 用 m 阶模型近似^[4],则式(1)变为

$$G_p(s) = \frac{K_p}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \sum_{i=0}^m \frac{1}{i!} \tau^i s^i} = \frac{\frac{K_p m!}{T_1 T_2 \tau^m}}{s^m + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \cdots + a_1 s + a_0}.$$

(2)

在具有观测器的纯滞后对象的状态反馈控制系统^[1]的基础上,再串入一个积分器 K_p/s ,构成纯滞后过程的串级状态反馈控制系统,如图 1 所示. 其中:积分器是为了实现综合后系统具有位移无静差特性而引入的.

串级状态反馈控制系统希望的闭环传递函数为 $n + 1$ 阶最优传递函数，记为

$$G_b(s) = \omega_c^{n+1} / [s^{n+1} + \beta_n \omega_c s^n + \beta_{n-1} \omega_c^2 s^{n-1} + \cdots + \beta_2 \omega_c^{n-1} s^2 + \beta_1 \omega_c^n s + \beta_0 \omega_c^{n+1}]. \quad (3)$$

式(3)中： $\beta_0 = 1$.

开环传递函数为

$$G_k(s) = \frac{G_b(s)}{1 - G_b(s)} = \frac{K_c}{s} \frac{\omega_c^{n+1} / K_c}{s^n + \beta_n \omega_c s^{n-1} + \beta_{n-1} \omega_c^2 s^{n-2} + \cdots + \beta_2 \omega_c^{n-1} s + \beta_1 \omega_c^n}. \quad (4)$$

开环系统为积分器 K_c/s 与状态反馈子系统的串联，因此状态反馈子系统所期望的闭环传递函数为

$$G_{zb}(s) = \frac{\omega_c^{n+1} / K_c}{s^n + \beta_n \omega_c s^{n-1} + \beta_{n-1} \omega_c^2 s^{n-2} + \cdots + \beta_2 \omega_c^{n-1} s + \beta_1 \omega_c^n}, \quad (5)$$

而积分器参数 K_c 为

$$K_c = \frac{T_1 T_2 \tau^m}{m! K_p} \omega_c^{n+1}. \quad (6)$$

按状态反馈增益阵和状态观测器的协调优化方法设计状态反馈子系统^[5]，则状态反馈增益阵为

$$\mathbf{K} = [k_1, k_2, \cdots, k_n] = [\beta_1 \omega_{c,2}^n - a_0, \beta_2 \omega_{c,2}^{n-1} - a_1, \cdots, \beta_n \omega_{c,2} - a_{n-1}]. \quad (7)$$

式(7)中： $\omega_{c,2}$ 为状态反馈子系统外环的操作频率.

状态观测器的最优权系数向量为

$$\Phi_i = a_{n-i} - \beta_{n+1-i} \omega_{c,1}^i - \sum_{k=1}^{i-1} \Phi_k a_{n-(i-k)}, \quad i = 1, 2, \cdots, n. \quad (8)$$

式(8)中： $\omega_{c,1}$ 为状态反馈子系统内环的操作频率.

2 仿真实验及鲁棒性分析

转窑是一种工业生产过程的重要设备，许多工业原料的混和、烧结或干燥都是在这类设备进行的，窑内温度直接影响产品的质量. 其传递函数可表示为

$$G_p(s) = \frac{5 \exp(-s)}{(10.2s + 1)(1.2s + 1)}. \quad (9)$$

由于 $G_p(j\omega_{c,2})$ 的角度为 -180° ，故可得其外环的操作频率 $\omega_{c,2} = 0.873\ 6\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其内环的操作频率 $\omega_{c,1} = 5\omega_{c,2} = 4.368\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.1 串级状态反馈控制系统的输出响应

纯滞后因子 $\exp(-s)$ 用 2 阶模型近似，则被控对象的近似模型为

$$G_p(s) = \frac{5}{(10.2s + 1)(1.2s + 1)(1/2s^2 + s + 1)}. \quad (10)$$

串级状态反馈控制系统希望的闭环传递函数为 5 阶时间误差绝对值积分(ITAE)最优传递函数^[6]为

$$G_b(s) = \frac{\omega_c^5}{s^5 + 2.80\omega_c s^4 + 5.00\omega_c^2 s^3 + 5.50\omega_c^3 s^2 + 3.40\omega_c^4 s + \omega_c^5}. \quad (11)$$

状态反馈子系统所期望的闭环传递函数为

$$G_{zb}(s) = \frac{\omega_c^5 / K_c}{s^4 + 2.80\omega_c s^3 + 5.00\omega_c^2 s^2 + 5.50\omega_c^3 s + 3.40\omega_c^4}. \quad (12)$$

因此，状态反馈增益阵为

$$\mathbf{K} = [1.816\ 9, 1.640\ 8, -0.128\ 5, -0.485\ 3]. \quad (13)$$

状态观测器的最优权系数向量为

$$\Phi = [-9.299\ 0, -64.193\ 6, -231.481\ 9, -286.907\ 6]^T. \quad (14)$$

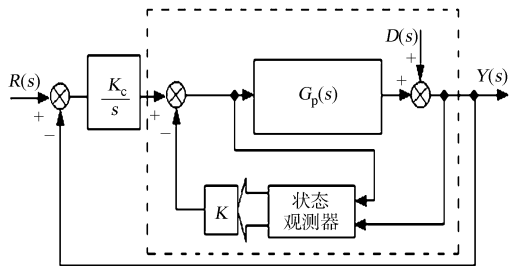


图 1 串级状态反馈优化控制系统结构图

Fig. 1 Structure block of the cascade optimal control system with state feedback

当给定值的输入为 $r(t)=1(t)$, 干扰输入为 $d(t)=0.2(t-40)$ 时, 串级状态反馈系统的输出响应如图 2 所示. 图 2 中: A 为幅值, 下同. 从图 2 可以看出: 串级状态反馈系统同时具有良好的给定值跟踪特性和干扰抑制特性的能力, 是一种二自由度控制系统.

2.2 鲁棒性分析

针对二阶加纯滞后对象静态增益 K_p 、时间常数 T_1, T_2 和纯滞后时间 τ 变化, 验证该串级状态反馈系统的鲁棒性, 其输出响应如图 3 所示. 其中: 纯滞后因子 $\exp(-s)$ 用 2 阶模型近似, 串级状态反馈控制系统希望的闭环传递函数为 5 阶 Butterworth 最优传递函数^[7].

1) 当二阶加纯滞后对象变为 $G_p(s) = \frac{6.25\exp(-s)}{(10.2s+1)(1.2s+1)}$, $G_p(s) = \frac{3.75\exp(-s)}{(10.2s+1)(1.2s+1)}$

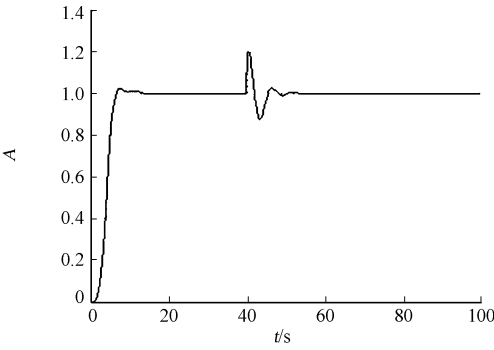
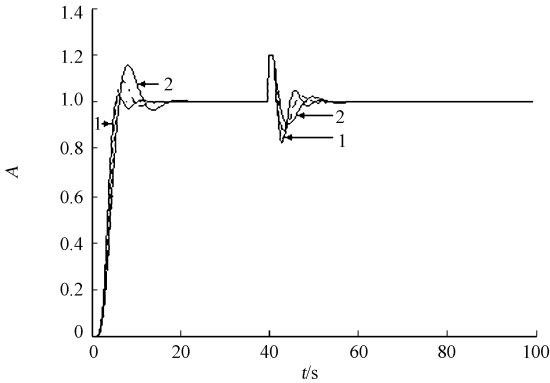
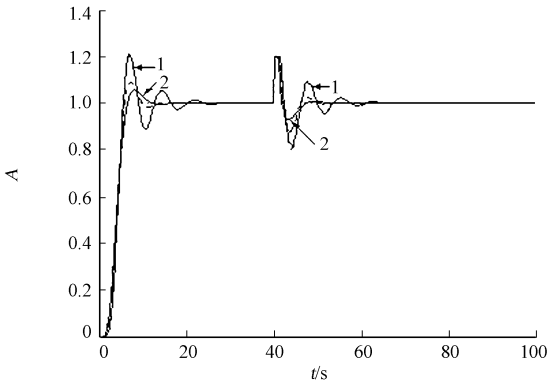


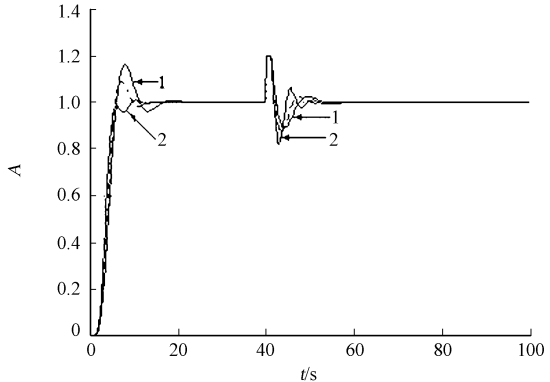
图 2 串级状态反馈系统的输出响应
Fig. 2 Output response of the cascade system with state feedback



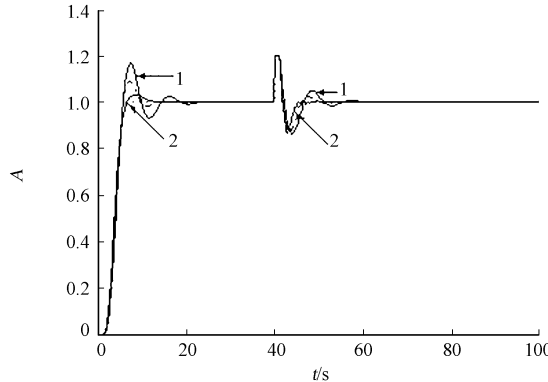
(a) 静态增益 K_p



(b) 纯滞后时间 τ



(c) 时间常数 T_1



(d) 时间常数 T_2

图 3 参数变化 $\pm 25\%$ 时的串级状态反馈系统的输出响应

Fig. 3 Output responses of the cascade system with state feedback when the parameters of the system varying $\pm 25\%$

时, 其串级状态反馈系统的输出响应分别如图 3(a) 中的曲线 1, 2. 图 3(a) 中的虚线为 $G_p(s) = \frac{5\exp(-s)}{(10.2s+1)(1.2s+1)}$ 时该串级状态反馈系统的输出响应^[8], 下同.

2) 当二阶加纯滞后对象变为 $G_p(s) = \frac{5e^{-1.25s}}{(10.2s+1)(1.2s+1)}$, $G_p(s) = \frac{5e^{-0.75s}}{(10.2s+1)(1.2s+1)}$ 时, 其串级状态反馈系统的输出响应分别如图 3(b) 中的曲线 1, 2 所示.

3) 当二阶加纯滞后对象变为 $G_p(s) = \frac{5\exp(-s)}{(12.75s+1)(1.2s+1)}$, $G_p(s) = \frac{5\exp(-s)}{(7.65s+1)(1.2s+1)}$ 时, 其

串级状态反馈系统的输出响应如图 3(c)中的曲线 1,2 所示.

4) 当二阶加纯滞后对象变为 $G_p(s)=\frac{5\exp(-s)}{(10.2s+1)(1.5s+1)}$, $G_p(s)=\frac{5\exp(-s)}{(10.2s+1)(0.9s+1)}$ 时,其串级状态反馈系统的输出响应如图 3(d)中的曲线 1,2 所示.

图 3 的仿真结果表明:串级状态反馈系统具有较高的鲁棒性,改进了状态反馈系统的干扰抑制特性,使系统同时具有良好的控制性能和鲁棒性.

3 结束语

用 m 阶模型逼近纯滞后因子,外回路串入一个积分器,按照最优传递函数设计整个系统,内回路引入状态观测器,构成状态反馈子系统,按状态反馈增益阵和状态观测器的协调优化设计子系统. 仿真结果表明了所设计的串级状态反馈系统获得良好的给定值跟踪特性和干扰抑制特性,同时具有良好的控制性能和鲁棒性,是一种鲁棒二自由度控制系统.

参考文献:

[1] 李钟慎,王永初. 基于状态反馈的纯滞后对象的次优控制[J]. 上海交通大学学报,2002,36(增刊 1):138-140.
[2] 田保峡,苏宏业,褚健. 基于状态估计的 PID 控制器整定方法研究[J]. 仪器仪表学报,2000,21(5):477-480.
[3] 陈一秀,王永初. 一种纯滞后过程的串级双环状态反馈优化设计方法[J]. 仪器仪表学报,2005,26(4):391-394.
[4] 项国波,杨益群,杨启文. 一类单容纯时滞系统二次优化控制[J]. 信息与控制,1995,24(4):208-214.
[5] 王永初,王晓霞,王启志. 状态观测器与控制器的统一设计方法[J]. 仪器仪表学报,1997,18(4):373-377.
[6] 李钟慎,王永初. 位移无静差 ITAE 最优传递函数的研究[J]. 自动化博览,2007,24(1):82-84.
[7] 李钟慎,吕亮. 用 MATLAB 求解 Butterworth 最优传递函数[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2007,28(1):8-10.
[8] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003:96-98.

Robust and Two-Degree-Of-Freedom Cascade Control for Process with Time Delay

LI Zhong-shen, YAO Ting-mei

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A kind of cascade system with state feedback was presented. The m -th order model was used to approximate the time delay factor, and then the outerloop of the system was joined with an integrator, the whole system was designed according to the optimal transfer function. The innerloop of the system was joined with the state observer, then state feedback subsystem was constituted. The subsystem was designed in terms of method coordinating work state between the observer and the controller. So the cascade system with state feedback was constituted for the process with time delay. The simulation results show that the designed cascade system with state feedback can trace the set-value and suppress the interference simultaneously, possess some satisfactory control performance and high robustness.

Keywords: process with time delay; model approximate; optimal transfer function; outerloop; innerloop

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 杨建红)