

文章编号 1000-5013(2006)03-0335-02

# 使用 Bessel 滤波器原理的双自由度控制系统

毛 恒 王 永 初

( 华侨大学机电及自动化工程学院, 福建 泉州 362021 )

**摘要** 将现代控制理论中的状态反馈和 PID 控制组合成双自由度控制系统, 并针对工业过程控制中的大滞后问题, 使用 Smith 预估器, 实现对迟滞的消除. 同时在设计状态反馈中, 采用基于 Bessel 滤波器原理的优化设计方法, 充分利用 Bessel 滤波器所具有的低通滤波特性及鲁棒性较高的优势, 改进系统的动态特性, 使得系统具有良好的性能品质. 通过仿真实验可以看出, 该方法设计简单, 同时具有良好的控制效果.

**关键词** 双自由度控制系统, Bessel 滤波器, PID, 状态反馈, Smith 预估器

**中图分类号** TP 273; TN 713

**文献标识码** A

在现代工业过程控制中, 被控对象往往存在实时性和时滞性问题, 给控制过程带来极大的影响. PID 控制器以其结构简单, 良好的鲁棒性成为最通用的控制手段<sup>[1]</sup>, 但是系统中存在的纯滞后后将大大影响其控制效果. 对于时滞问题, 长期以来 Smith 预估器<sup>[2]</sup>发挥了很大的作用, 通过它补偿纯滞后因子的影响, 使超调量减少并加速系统的调节时间. 本文将现代控制理论中的状态反馈和 PID 控制量相结合, 形成一个双自由度控制系统进行控制<sup>[3]</sup>. 同时, 在状态反馈中使用 Bessel 滤波器原理<sup>[4, 5]</sup>对状态反馈进行优化<sup>[5]</sup>, 提高系统的稳定性. 仿真表明, 对非线性具有时滞的复杂系统, 其控制效果令人满意.

## 1 状态反馈的优化设计

控制系统结构, 如图 1 所示. 状态反馈控制中, 增益矩阵  $K$  的确定方法有很多, 这些方法既可以求解黎卡提( Riccati ) 方程, 也可以使用经验公式. 对于高阶系统得到黎卡提方程的解是很困难的, 所得到的期望极点不一定符合系统的要求. 在本文中我们将使用基于 Bessel 滤波器原理的最优状态反馈系统的设计方法.

Bessel 滤波器具有低通滤波的特性, 它的阶跃响应是无振荡的快速单调响应, 鲁棒性较高. 在应用过程中将 Bessel 函数进行归一化处理, 得到无因次化的 Bessel 函数. 在计算状态反馈增益矩阵  $K$  之前, 先将系统对象规范化处理, 即保证对象传递函数的最高项系数为 1. 以分子为常数的 4 阶系统为例, 此时系统对象的规范化传递函数为

$$G(\bar{s}) = \frac{\beta}{\bar{s}^4 + a^3\bar{s}^3 + a^2\bar{s}^2 + a^1\bar{s} + a^0}. \quad (1)$$

同时, 使反馈控制的闭环回路特征方程式的本征值校正到与无因次化的 Bessel 函数的特征方程式的理

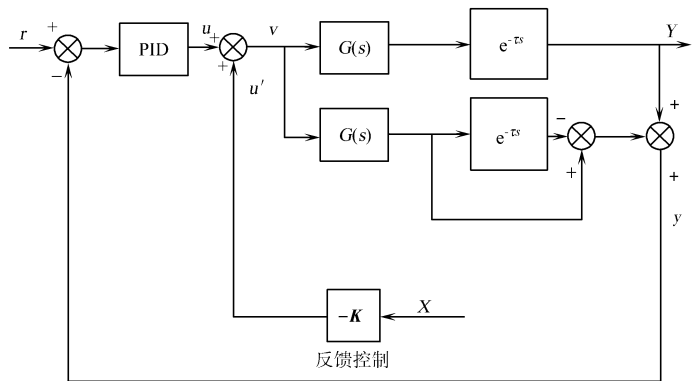


图 1 PID 状态反馈双自由度纯滞后补偿系统

收稿日期 2005-09-27

**作者简介** 毛 恒(1978), 男, 博士研究生, 主要从事人工智能与过程检测与控制的研究; 通信作者: 王永初(1937), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: maoking@hqu.edu.cn

想本征值  $A_b$  相一致,从而可以得到反馈增益矩阵  $K$  的最优计算式. 即

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta \end{bmatrix}, \quad K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4]. \quad (2)$$

由  $\bar{A} - \bar{B}K = A_b$  可以得到  $K$ .

2 系统仿真

考虑一个高阶大滞后对象

$$G(s) = \frac{e^{-20s}}{s^4 + 3s^3 + 4s^2 + 3s + 1}$$

(3)

由能控性判别矩阵可以知道该系统是能控的. 由式(3)就可以求得相应的状态反馈增益矩阵,  $K = [0 \ 0 \ 201 \ 1 \ 0 \ 391 \ 6 \ 0 \ .123 \ 9]$  在输入端加入单位阶跃响应, 则对该对象只由 PID 控制和同时加入状态观测反馈控制后系统的响应曲线, 如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, 在加入状态反馈控制之后, 与 PID 结合能够取得更好的控制效果, 其上升时间、调节时间和超调量都优于没有加入状态反馈控制.

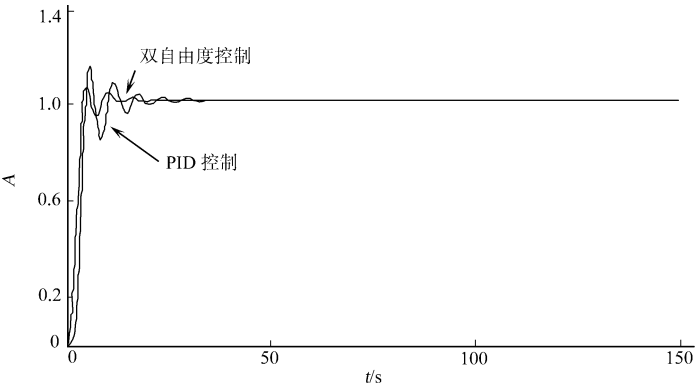


图 2 系统仿真图

本文将 PID 控制和状态反馈控制相结合, 对大滞后对象进行 Smith 预估控制. 在设计状态反馈增益矩阵的时候, 引入基于 Bessel 滤波器原理的优化设计方法, 该方法简单易行, 并且控制效果良好.

参 考 文 献

1 Astrom K J, Hagglund T. PID Controllers: Theory, design, and tuning[M]. 2 nd ed. Northerm California: Instru-  
ment Society of America, 1995 100~ 105

2 Smith O J H. A controller to overcome dead time[J]. ISA J, 1959, 6( 2): 29~ 33

3 林增森. 纯滞后预估系统双自由度控制的 KMM 实现[ D]: [ 学位论文]. 泉州: 华侨大学机电及自动化学院, 1996  
30~ 35

4 张庆稼, 孙一兰. Bessel 滤波器的设计[J]. 医疗卫生设备, 1995, (2): 17~ 19

5 王启志, 王晓霞, 王永初. 基于 Bessel 滤波器特性的鲁棒控制器研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 111~ 112

Double Degree of Freedom Control System Based

on Principle of Bessel Filter

Mao Heng      Wang Yongchu

( College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** The method of combining the state feedback of the modern control theory and the traditional PID to set up a double degree of freedom control system is presented. And the Smith predictor to eliminate the delay in the industrial pro-  
duction process is used. An optimal design method based on the principle of Bessel filter which takes the advantages of  
law-yass filter and strong robustness to improve the dynamic characteristics of the system. The simulation results have  
shown that the simplicity of designing method and good controlling effect.

**Keywords** double degree of freedom control system , Bessel filter, PID, state feedback, Smith predictor