

一种强鲁棒性多内模控制器的设计与仿真*

李钟慎 罗奕 王永初

(华侨大学精密机械工程系, 泉州 362011)

摘要 提出一种强鲁棒性的多内模控制器的设计方法,其可在线测试对象特性参数和模型快速跟踪对象。大量的仿真试验表明,它是一种适用于大滞后和参数时变的控制器,可同时满足随动与定值二自由度系统的控制要求,并增强系统的鲁棒性。

关键词 多内模控制器,模块设计,鲁棒性

分类号 TP 391.91

许多工业控制系统普遍存在着纯滞后现象。由于纯滞后的存在,引入了无衰减的相位滞后,使得这类系统的设计比无滞后系统要困难得多,也即简单的PID控制很难取得满意的控制效果。因此,这类系统普遍采用Smith预估控制器,但Smith预估控制器存在两个主要缺点:(1)系统对扰动的响应差;(2)Smith预估控制器无法同时满足给定值响应和扰动响应这样二自由度系统的控制要求。另外,由于各种因素的影响,系统对象特性并非恒定,对象的参数是时变的。适用于时变大滞后的工业控制器亟待开发^[1~2]。因此,本文设计出一种强鲁棒性的多内模控制器,并作了大量的仿真。

1 控制器的构成

本控制器的构成如图1。它包括调节器 $D(S)$ 、多内模补偿器(由 $P(S)$ 、 $\hat{G}_0(S)$ 与 $Q(S)$ 组成),

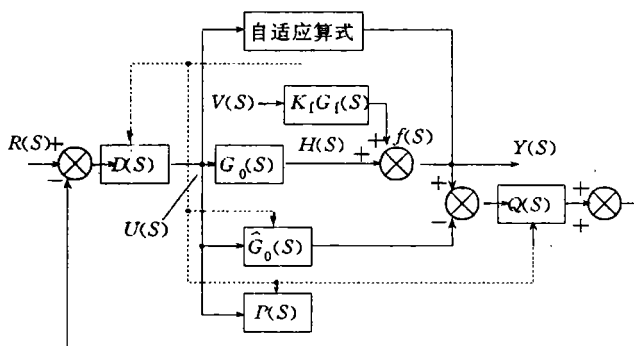


图1 多内模控制器的构成

自适应算式以及控制对象 $G_0(S)$ 。本控制器接受SPC的控制,它的采样周期 Δt 比SPC系统的采样周期 ΔT 小得多,故在设计中可按连续系统的方法进行给定信号 $R(S)$ 及外扰 $f(S)$ 至 $Y(S)$ 的传递

* 本文1995-12-20收到

函数分别为

$$W_R(S) = \frac{Y(S)}{R(S)} = \frac{D(S)G_0(S)}{1 + D(S)P(S) + D(S)Q(S)[G_0(S) - \hat{G}_0(S)]}, \quad (1)$$

$$W_I(S) = \frac{Y(S)}{f(S)} = \frac{1 + D(S)[P(S) - Q(S)\hat{G}_0(S)]}{1 + D(S)P(S) + D(S)Q(S)[G_0(S) - \hat{G}_0(S)]}. \quad (2)$$

2 控制器的模块设计

本控制器含5种功能模块:PID模块 $D(S)$ 、补偿模块 $P(S)$ 、协调模块 $Q(S)$ 、参考模型 $\hat{G}_0(S)$ 与自辨识以及参数自整定模块 $M_i(S)$.

2.1 PID模块 $D(S)$ 的设计

PID模块采用不完全微分型PID,即

$$D(S) = \frac{k_p(T_i S + 1)(T_D S + 1)}{T_i S(T_d S + 1)}. \quad (3)$$

我们设对象 $G_0(S)$ 的最优估计模型 $\hat{G}_0(S) = \frac{\hat{K}_0 e^{-is}}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}$,其中 $\hat{T}_1 > \hat{T}_2$,取 $P(S) = \frac{\hat{K}_0}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}$,选择 $D(S)$ 的参数为 $T_i = \hat{T}_1, T_D = \hat{T}_2, T_d = T_D/\nu$ (ν 为5~20),则在 $\hat{G}_0(S)$ 逼近 $G_0(S)$ 的场合下,由式(1)得

$$\frac{Y(S)}{R(S)} = \frac{\hat{K}_0 K_p e^{is}}{(T_1 T_d S^2 + T_i S + \hat{K}_0 K_p)}, \quad (4)$$

无因次化为

$$\frac{Y(\bar{S})}{R(\bar{S})} = \frac{e^{is}}{\bar{S}^2 + 2W_n \xi \bar{S} + 1}, \quad (5)$$

$$\text{其中 } \bar{S} = \sqrt{\frac{T_i T_d}{K_p \hat{K}_0}} S, 2W_n \xi = \sqrt{\frac{T_i}{K_p \hat{K}_0 T_d}}.$$

若取 $2W_n \xi = 1.4142$,则得 K_p 的优化参数为

$$K_p = \frac{1}{(1.4142)^2} \cdot \frac{T_i}{\hat{K}_0 T_d}. \quad (6)$$

2.2 补偿模块 $P(S)$ 的设计

根据 $\lim_{s \rightarrow T_i} L^{-1} W_R(S) R(S) = 1, \lim_{s \rightarrow T_i} L^{-1} W_I(S) f(S) = 0$ 以及式(1),(2),可得出下列结论:为达到系统无静差调节,除 $D(S)$ 具备积分功能外, $P(S)$ 的静态增益必须与 $\hat{G}_0(S)$ 相同.

由于对象的参数是时变的,所以 $P(S)$ 由固定和变动两个部分组成.固定的是动态部分,取值为 $\frac{1}{(T_{10} S + 1)(T_{20} S + 1)}$,其中 T_{10}, T_{20} 为对象参数 T_1, T_2 的初始最优估计值.这样的好处是可以不必经常改变调节器 $D(S)$ 的参数 T_i, T_D ,而 $P(S)$ 的静态增益必须随对象的变化而变化,根据在线测试的结果在线修改 $P(S)$ 的静态增益.

2.3 协调模块 $Q(S)$ 的设计

$R(S)$ 的误差传递函数为

$$W_{ER}(S) = \frac{1 + D(S)[P(S) - Q(S)\hat{G}_0(S)]}{1 + D(S)P(S) + D(S)Q(S)[G_0(S) - \hat{G}_0(S)]} = W_I(S), \quad (7)$$

外扰 $f(S)$ 至系统误差间的传递函数为

$$W_{EI}(S) = \frac{Q(S)\{1 + D(S)[P(S) - Q(S)\hat{G}_0(S)]\}}{1 + D(S)P(S) + D(S)Q(S)[G_0(S) - \hat{G}_0(S)]} = W_{ER}Q(S). \quad (8)$$

通常情况下, $f(S)$ 是由一个扰动源 $V(S)$ 通过扰动通道 $K_I G_I$ 产生的, 即 $f(S) = K_I G_I(S) V(S)$. 故扰动源 $V(S)$ 至误差间的传递函数为 $W_{EV}(S) = W_{ER}(S) \cdot K_I G_I(S) \cdot Q(S)$, 式中 $K_I G_I(S) = \frac{K_I(T_s S + 1)}{T_b S + 1}$.

为保证 $Q(S)$ 的稳态输出与被控制信号一致, $Q(S)$ 的静态增益应为 1. 取 $Q(S) = G_I^{-1}(S) = \frac{T_b S + 1}{(T_s S + 1)}$ 时, 可以使 $W_{EV}(S) = K_I W_{ER}(S)$. 这样使系统对 $R(S)$ 与对 $V(S)$ 输入具有同一的动态特性, $Q(S)$ 的引入使随动与定值两类系统协调.

在实际过程中, 要想获得精确的数学模型是十分困难的, $\hat{G}_0(S)$ 只能逼近 $G_0(S)$, 但可由 $Q(S)$ 对模型误差作适当的衰减和修正. 因此 $Q(S)$ 还需加上一个滞后/超前环节, 即

$$Q(S) = \frac{T_b S + 1}{T_s S + 1} \cdot \frac{\alpha T_s S + 1}{T_c S + 1}, \quad (9)$$

其中 α, T_c 可在线调整.

2.4 参考模型 $\hat{G}_0(S)$ 与自辨识及自整定模块 $M_S(S)$ 的设计

$\hat{G}_0(S)$ 是对象的跟踪模型, 它时刻逼近 $G_0(S)$. 工业过程对象多数可由 $G_0(S) = \frac{K \cdot e^{-s\tau}}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}$ 来近似其特性. $G_0(S)$ 离散化为^[3]

$$G_0(Z^{-1}) = \frac{H(Z^{-1})}{U(Z^{-1})} = Z \left\{ \frac{1 - e^{-\Delta T \tau}}{S} G_0(S) \right\} = \frac{Z^{-(L+1)} (\beta_1 + \beta_2 Z^{-1})}{1 - \alpha_1 Z^{-1} - \alpha_2 Z^{-2}}, \quad (10)$$

其中 ΔT 为采样周期, $L = \frac{\tau}{\Delta T}$, $\beta_1 = K_0 \left[\frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\Delta T / T_1} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\Delta T / T_2} + 1 \right]$, $\beta_2 = K_0 [e^{-\Delta T (1/T_1 + 1/T_2)} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\Delta T / T_2} - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\Delta T / T_1}]$, $\alpha_1 = e^{-\Delta T / T_1} + e^{\Delta T / T_2}$, $\alpha_2 = -e^{-\Delta T (1/T_1 + 1/T_2)}$. 因此式(10)可转化为

$$H_n = \alpha_1 H_{n-1} + \alpha_2 H_{n-2} + \beta_1 U_{n-L-1} + \beta_2 U_{n-L-2}. \quad (11)$$

由于工业过程对象所受的扰动为有色噪声, 因此, 必须用差分数据预处理方法将扰动信号白噪声化, 然后用最小二乘法进行辨识. 利用此方法对 $G_0(S) = \frac{2e^{-5s}}{(10S+1)(5S+1)}$ 进行辨识, 连续测得 100 组数据, 采样周期 $\Delta T = 0.5$ s, 得到的辨识结果为 $\tau = 5$ s, $K_0 = 2.003538$, $T_1 = 10.056260$, $T_2 = 4.980479$. 各模型参数的跟踪误差均小于 1%, 可见采用此方法, $\hat{G}_0(S)$ 可以逼近 $G_0(S)$.

根据在线辨识的结果, 便可在线修改补偿模块 $P(S)$ 的静态增益, PID 模块 $D(S)$ 的 K_p 以及协调模块 $Q(S)$ 的 α 及 T_c , 如图 1 所示.

3 仿真内容及结果分析

仿真对象为 $G_0(S) = \frac{2e^{-5s}}{(10S+1)(5S+1)}$, 干扰为 $K_I G_I(S) = \frac{0.8(2S+1)}{10S+1}$. 取 $\hat{G}_0(S) = \frac{2e^{-5s}}{(10S+1)(5S+1)}$, $P(S) = \frac{2}{(10S+1)(5S+1)}$, $D(S) = \frac{2.5(10S+1)(5S+1)}{10S(S+1)}$, $Q(S) = \frac{10S+1}{(2S+1)(3S+1)}$, 则它的给定值响应曲线和扰动响应曲线如图 2 中的曲线 1a, 1b 所示. 从图 2 中可看出, 给定值响应超调量小, 响应速度快, 外扰响应一次振荡且无余差. 当对象变为 $G_0(S) = \frac{1.5e^{-5s}}{(8S+1)(3S+1)}$ 时, 使用本控制器, 可获得较好的控制品质, 如图 2 中的曲线 2a, 2b 所示.

使用经典 Smith 预估控制器, 当实际过程增益比模型大 1 倍时 (如图 2 中的曲线 3a, 3b 所示),

系统将振荡多次才逐渐收敛⁽⁴⁾,而使用本控制器,即使实际过程增益比模型大 1 倍时(如图 2 中的曲线 4a,4b 所示),系统仍是稳定的。

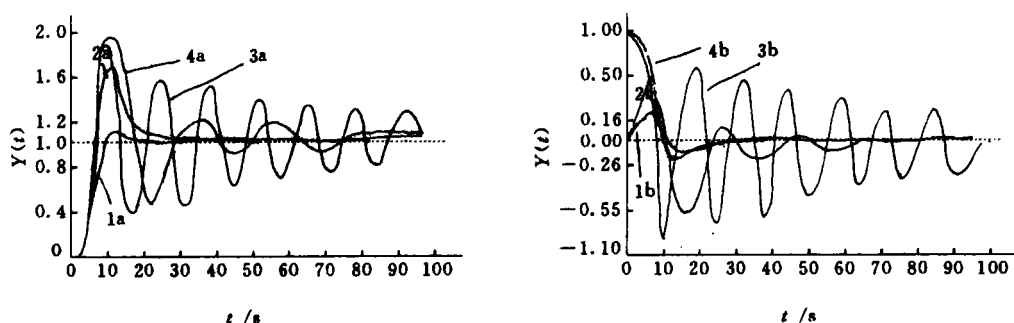


图2 仿真结果

分析仿真结果表明,本控制器对滞后对象具有良好的控制品质,可同时适应给定与外扰两种外界输入信号的变化;也可适应对象特性参数的变化,不失为一种强鲁棒性的滞后对象控制器。

参 考 文 献

- 1 王永初. 滞后过程的预估与控制. 北京:机械工业出版社,1987. 18~73
- 2 方利国. Smith 预估控制模型误差及其控制器参数的研究. 化工自动化及仪表,1990,(1):18~21
- 3 谭永红,李 松. 自适应内模控制及其应用. 自动化仪表,1991,(4):8~10
- 4 王月娟,万百五. 大时延时过程的控制方法. 控制理论与应用,1986,(3):1~12

Design and Simulation of a Controller with Multiple Internal Models and Strong Robustness

Li Zhongshen Luo Yi Wang Yongchu

(Dept. of Precis. Mech. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A controller with multiple internal models and strong robustness is put forward. The authors describe its design method, characteristic parameters of on-line test objective, and model of fast follow-up objective. As shown by large number of simulation tests, it is a controller suitable for large dead time and time-varying parameters; it simultaneously satisfies the requirements of follow-up control system and constant value control system with two degree of freedom; it has an enhanced robustness.

Keywords controller with multiple internal models, modular design, robustness