

文章编号:1671-6833(2006)02-0073-04

基于 ITAE 标准函数的纯滞后系统控制

朱晓东, 范秉琪, 杨祖轩, 冯冬青

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对纯滞后控制对象, 提出了一种基于 ITAE 标准优化函数的控制器设计方法, 将控制器和对象构成的闭环传递函数等效为具有 ITAE 控制指标的 ITAE 最佳传递函数, 从而求解出控制器参数. 对于纯滞后对象, 利用一阶 Pade 近似式来近似纯滞后环节, 给出了改进后的系统模型, 利用 ITAE 控制器在模型匹配和失配情况下进行了仿真研究, 结果表明: 所提出的设计算法简便实用, 避免了复杂的参数在线调整过程, 在系统模型发生振动的情况下, 均有着较传统 PID 控制更好的稳定性和鲁棒性, 显示了这一设计方法较好的应用前景.

关键词: ITAE 标准函数; 纯滞后; PID 控制

中图分类号: TP 273.5 **文献标识码:** A

0 引言

在多数工业过程当中, 控制对象普遍存在着纯时间滞后现象, 如化工、热工过程等. 这种滞后时间的存在, 会使系统产生明显的超调量和较长的调节时间, 滞后严重时甚至会破坏系统的稳定性. 因此长期以来, 纯滞后系统就一直是工业过程中的难控制对象^[1]. 对于纯滞后系统常用的控制方法主要是 PID 控制、Dahlin 控制算法和 Smith 预估算法^[2]. 但 PID 算法对大滞后系统的控制难以取得较满意的控制效果^[3,4], 而 Dahlin 算法和 Smith 预估算法则依赖于控制对象精确的数学模型^[2]. 智能控制与内模控制在滞后系统的控制上也有较好的效果^[2,5], 但是控制器的设计复杂, 对系统的优化过程也比较繁琐. 为此, 人们一直在寻求一种简捷有效的设计方法. 而 ITAE (Integral Time absolute error) 误差准则是一个综合了系统的快速性、稳定性和准确性的综合指标^[6,7], 根据 I-TAE 最佳传递函数来设计控制器, 无疑是一种简便快捷的设计方法.

作者以 ITAE 最佳传递函数为目标函数, 对纯滞后系统的控制进行了研究, 通过计算机仿真, 给出了控制参数和仿真控制结果.

1 ITAE 最佳传递函数

1953 年, Graham 和 Lathrap 给出满足 ITAE 最佳控制律的闭环系统传递函数标准型^[8,9], 这样就把一个极为复杂的泛函求极值问题, 利用计算机寻优后, 变成简单的代数运算, 通过简单的设计就能将受控对象设计成 ITAE 最优的控制系统.

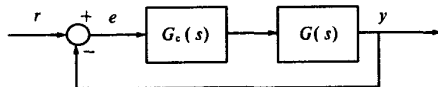


图1 控制系统的结构图

Fig.1 Block diagram of control system

考虑图1所示的线性系统, 其中 $G(s)$ 表示被控对象, $G_c(s)$ 表示控制器, e 为控制误差, r 和 y 分别为系统的输入和输出. 离散系统 ITAE 性能指标定义为

$$J = \sum_{i=0}^{\infty} |e(iT)| iT \quad (1)$$

式中: T 为采样周期, i 为采样时刻. ITAE 最优控制定义为: 当输入为阶跃信号时, 设计控制器使得闭环系统稳定无稳态误差且指标(1)最小. 这一指标是一个综合了系统的快速性、稳定性和准确性的综合指标, 参考文献[9]中给出了1型系统的最佳传递函数. 满足最优 ITAE 指标的 n 阶1型标准传递函数可以写成

收稿日期:2006-01-27; 修订日期:2006-03-11

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(0511010800)

作者简介:朱晓东(1970-), 男, 河南安阳人, 郑州大学讲师, 硕士, 主要从事计算机控制方面的研究.

万方数据

$$G_i(s) = \frac{a_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \cdots + a_{n-1} s + a_n}.$$

则能够使 ITAE 准则最小的一组系数如表 1 所示^[9].

表 1 ITAE 标准函数

Tab.1 The Table of ITAE Standard Function

n	分母多项式, 且 $a_{n+1} = w_n^2$
1	$s + w_n$
2	$s^2 + 1.41 w_n s + w_n^2$
3	$s^3 + 1.75 w_n s^2 + 2.15 w_n^2 s + w_n^3$
4	$s^4 + 2.1 w_n s^3 + 2.4 w_n^2 s^2 + 2.7 w_n^3 s + w_n^4$

2 基于 ITAE 标准传递函数的控制器设计与仿真

对于确定的控制对象, 设其传递函数为 $G(s)$, 一种简便快捷的控制器设计方法就是使得由控制器和对象构成的闭环传递函数 $G_c(s)$ 接近于某个具有理想指标的传递函数 $G_i(s)$. 当控制性能指标选择 ITAE 指标时, $G_i(s)$ 就可以是表 1 中的满足最佳 ITAE 指标的标准传递函数.

$$G_{cl}(s) = \frac{G_c(s) G(s) p}{1 + G_c(s) G(s)} = G_i(s) \quad (2)$$

从中可以求出控制器的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{G_i(s)}{[1 - G_i(s)] G(s)} \quad (3)$$

该控制器就能够使闭环传递函数满足 ITAE 指标, 即保证控制系统的误差为零以及稳定性. 设对象传递函数为 $G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)}$, 取 $w_n = 5$, 则

$$G_i(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 1.41 w_n s + w_n^2} = \frac{25}{s^2 + 7.05 s + 2}.$$

由表 1 和式 3 可以求出控制器传递函数为

$$G_c(s) = \frac{G_i(s)}{[1 - G_i(s)] G(s)} = \frac{25s^2 + 75s + 50}{s^2 + 7.0s}.$$

利用 MATLAB^[10] 对图 1 所示的闭环系统进行仿真, 其结果如图 2 所示, 基于 ITAE 指标的控制器控制曲线为图 2 中的曲线 1. 作为对比, 同时给出了采用 PID 控制器的闭环控制曲线 2, PID 控制器参数利用 Ziegler - Nichols 方法^[1]整定为 $K_p = 24.21$, $K_i = 60$, $K_d = 2.42$, 经调试优化为 $K_p = 20$, $K_i = 10$, $K_d = 2.42$.

从仿真结果上看, 采用 ITAE 控制器的系统在超调控制上要优于采用常规 PID 控制器的系统, 在误差控制方面 ITAE 控制器也有着明显的优势, 万方数据

而在快速性方面则相差不大.

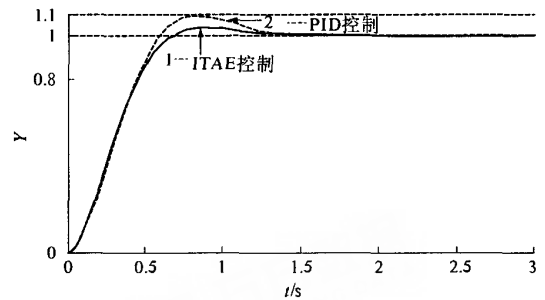


图 2 闭环系统仿真曲线

Fig.2 The curve of close-loop control system

3 纯滞后系统控制器设计与仿真

采用第 2 部分所述的控制器, 但控制对象变为纯滞后对象, 即在原对象的基础上, 增加一个纯滞后环节, 对象变为 $\frac{1}{(s+1)(s+2)} e^{-\tau s}$, 当 $\tau = 0.1$ 时, 系统的仿真结果如图 3 所示, 曲线 1 为 ITAE 控制, 曲线 2 为 PID 控制, 从图中可以很明显地看到, 即使在控制器的设计中没有考虑到纯滞后的影响, 基于 ITAE 标准函数的控制器也有着比传统 PID 控制器更优的控制性能, 显示了该控制器较好的鲁棒性能.

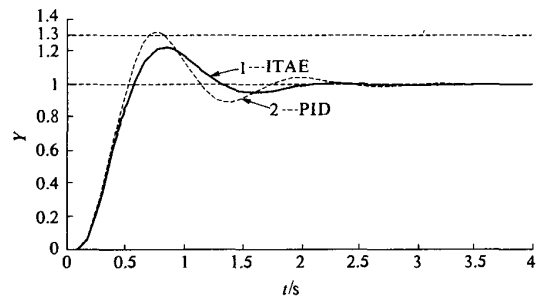


图 3 滞后系统仿真曲线

Fig.3 The curve of control system with pure time delay

当滞后时间 τ 已知, 进行纯滞后系统控制器的设计时, 就要考虑到滞后时间的因素. 对于纯滞后环节, 在实际当中常常用有理传递函数的形式来近似, 即 Pade 近似^[8]. 一阶 pade 近似式为 $P(s) = \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2}$, 因此纯滞后对象就近似为 $G(s) \cdot P(s) = \frac{1 - 0.05s}{(s+1)(s+2)(1+0.05s)}$, 然后按照第 2 部分的方式可以设计出控制器. 但由于此时的等效对象是一个非最小相位系统, 系统是振荡的. 此时系统的等效闭环模型为

$$G_{cl}(s) = \frac{G_c(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G(s)e^{-\tau s}} \approx \frac{G_c(s)G(s)P(s)}{1 + G_c(s)G(s)P(s)} \quad (4)$$

在 Pade 近似式中含有 s 平面右半平面的零点,由此导致等效闭环系统的控制困难.为此,做如下的变换将式(4)中的纯滞后环节仅在分母项中做 Pade 近似,分子项中的纯滞后环节不变,这样等效的闭环系统为

$$G_{cl}(s) = \frac{G_c(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G(s)e^{-\tau s}} \approx \frac{G_c(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G(s)P(s)}$$

其等效的结构图如图 4 所示.

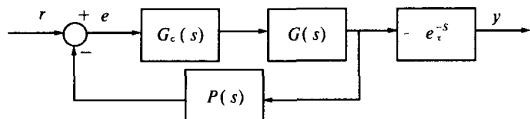


图 4 变换后的等效系统结构图

Fig. 4 Block diagram of the equivalent control system

对这一变换后的等效系统,不考虑分离出的滞后项,按照分母项近似,采用二阶 ITAE 标准函数、一阶 Pade 近似对闭环系统进行 ITAE 控制器的设计,按前述方法可以推导出控制器传递函数为

$$G_c(s) = \frac{25s^5 + 751.3s^4 + 6\,229s^3 + 26\,300s^2 + 45\,800s + 25\,000}{s^5 + 34.1s^4 + 406.7s^3 + 2\,023s^2 + 4\,775s}$$

同样,对纯滞后系统进行 PID 控制,利用 Ziegler-Nichols 方法整定 PID 参数为 $K_p = 20$, $K_i = 30$, $K_d = 2.4$,经仿真调试优化为 $K_p = 20$, $K_i = 8$, $K_d = 2.4$.利用两种控制器对系统进行仿真研究,其控制结果如图 5 所示.

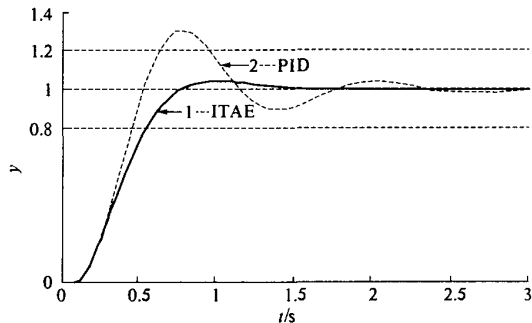


图 5 纯滞后系统仿真曲线

Fig. 5 The simulation curve of pure time delay system

图中曲线 1 为按照图 4 等效结构仿真的 ITAE 控制结果,曲线 2 为纯滞后 PID 控制结果.仿真

表明,经过变换后的等效系统采用 ITAE 控制器的效果要明显优于传统 PID 控制器的控制效果,在控制超调和稳定性上体现了 ITAE 指标的性能.

考虑到对象模型的扰动,在控制器参数不变情况下的仿真曲线如图 6 所示.控制对象扰动为

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 2} e^{-0.1s}$$

时,ITAE 控制曲线为图中曲线 1,PID 控制曲线为图中曲线 2;当滞后时间

$$\text{扰动为 } 0.2, \text{对象变为 } G(s) = \frac{1}{s^2 + 3s + 2} e^{-0.2s}$$

时,ITAE 控制结果如图中曲线 3,PID 控制结果如曲线 4 所示.仿真结果表明,在对象模型发生扰动时,ITAE 控制器的适应性要好于 PID 控制器,只是在快速性上要稍慢;而当对象模型的纯滞后时间

发生变化时,PID 控制器出现了振荡情况,而 ITAE 控制器则能够继续保持平稳的控制效果,显示了其对纯滞后时间扰动所具有的很强的鲁棒性.分析其原因就在于对原系统结构做了一定的改进,使滞后项只在反馈通道和闭环外出现,使得 ITAE 控制器能够对系统保持较强的控制力.而对 PID 控制器即使也采用同样的闭环等效结构,对于滞后系统其控制效果的提高也非常有限,这一方面说明了 PID 控制器不能适用于纯滞后系统,另一方面也表明采用 ITAE 标准函数的控制器在纯滞后系统的控制中具有一定的优势.

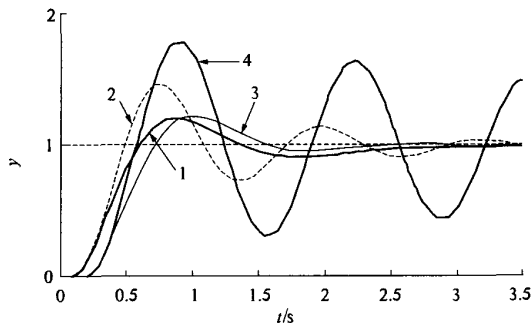


图 6 对象扰动后的仿真曲线

Fig. 6 The curve of control system with model mismatching

4 结论

ITAE 准则是一个综合了系统的快速性、稳定性和准确性的综合指标,能够全面地反映系统的控制效果.基于 ITAE 最佳传递函数的 ITAE 控制器设计充分利用了 ITAE 准则的这一特点,控制器设计简单,没有复杂的参数在线调整过程,对于纯滞后系统的控制具有较好的控制效果.虽然利用这种方法设计的控制器阶数较高,在一定程度上

影响了这种控制方法在实际当中的应用,但随着数字控制器的广泛使用,该控制器所具有的设计简单、效果明显的优势也使其在实际工程当中有着很大的应用前景。

参考文献:

- [1] 何克忠. 计算机控制技术[M]. 北京:清华大学出版社,1981.
- [2] 朱晓东,王 军.基于 Smith 预估的纯滞后系统控制[J].郑州大学学报(工学版),2004,25(1):77~81.
- [3] COMINOS P, MUNRO N. PID controllers: recent tuning methods and design to specification [J]. IEEE Proc Control Theory Appl, 2002, 149(1):46~53.
- [4] XU H, DATTA A. PID stabilization of LTI plants with time - delay[A]. Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control[C]. Hawaii: IEEE Press. 2003, 4038~4043.
- [5] 曹晓莉.大滞后对象的仿人智能控制器设计及仿真研究[J].重庆工商大学学报,2003,20(3):18~21.
- [6] 张福波,王国拱,张殿华,等. PID 控制器参数的 ITAE 最佳设定公式[J].东北大学学报,2005,26(8):755~758.
- [7] 张立群,李东海.基于参数稳定空间的 PID 控制器设计[J].清华大学学报,2004,44(2):274~277.
- [8] 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.
- [9] 杨益群,项国波.新的 ITAE 最佳传递函数标准型[J].信息与控制,1997,26(4):259~265.
- [10] 楼顺天.基于 Matlab 的系统分析与设计[M].北京:电子工业出版社.2000.

Control for the System with Pure Time Delay Based on Standard ITAE Optimum Function

ZHU Xiao - dong, FAN Bing - qi, YANG Zu - xuan, FENG Dong - qing

(School of Electric of Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this paper, a new control method based on standard ITAE optimum transfer function is put forward for the plants with pure time delay. The closed - loop transfer function of controller and plants is equivalent to ITAE optimum transfer function. Then the parameters of controller can be calculated. For the system with pure time delay, the Pade approximation is used to approximate a pure time delay by a rational transfer function. And an improved system model is given. Using the ITAE controller, the simulation of this control algorithm is studied under the condition of model matching and model unmatching. The simulation shows that the new control algorithm has a better characteristic of stability and robustness than the traditional PID controller.

Key words: ITAE standard function; pure time delay; PID control