

一种结合数值优化的 PID 控制器的设计与仿真

刘 璟, 梁昔明

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:文中基于 PID 控制器的现状, 提出将数值优化方法应用于 PID 控制器的设计之中, 设计了一种经过数值优化改进的简单而有效的 PID 控制器。然后通过 MATLAB 仿真技术在一阶延迟过程模型的基础上对该控制器进行仿真研究, 并将结果与应用变速积分 PID 控制方法的仿真结果做出比较, 结果表明这种经过数值优化改进的 PID 控制器是有效的。

关键词: PID 控制器; 数值优化; MATLAB 仿真

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2007)04-0024-03

Design and Simulation for a PID Controller Improved by Numerical Optimization

LIU Jing, LIANG Xi-ming

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In this paper based on the status of PID controller, put forward to make use of numerical optimization approach to design PID controller, present a simple effective PID controller improved by numerical optimization approach. Then based on a first-order plus time delay model to do simulation studies the controller and compares the result with PID controller with changing integration rate. The result proves that PID controller improved by numerical optimization is effective.

Key words: PID controller; numerical optimization; MATLAB simulation

0 引言

PID 控制^[1]是自动控制中产生最早、应用最广的一种控制方法。PID 控制在实际控制工程中应用最广, 据不完全统计, 在工业过程控制、航空航天控制等领域中, PID 控制的应用占 80% 以上。这是因为 PID 控制器结构简单, 软硬件实现方便、快速, 便于调节, 有较好的控制效果并且对模型误差有较好的鲁棒性。然而现代工业生产对产品质量和性能的要求越来越高, 因此工业自动化对控制器的控制性能提出了更高的要求。很多专家学者在做着控制器改进方面的研究工作。如刘红军、韩璞等在基于内模控制的 PID 调节方法方面做了一些研究工作, 他们基于内模控制原理, 针对典型的工业过程对象, 给出了 PID 控制器的设计方法并做了有效的仿真^[2]。侯勇严、郭文强总结出了两种基于单神经元的自适应 PID 控制器的控制特点及

其参数设计规律, 并且做了相应的仿真研究^[3]。此外, 国内外专家学者在先进控制器如模型预测控制器, LQ 控制器等方面也做了许多研究工作, 如 Muske 和 Badgwell 介绍了一种无偏的线性模型预测控制的扰动模型, 他们将控制器模块化, 并给出了各模块能够达到无偏控制的相应的条件要求^[4]。Pannocchia, Laachi 和 Rawlings 一块对于单输入单输出带约束的系统提出了一种简单的便于调节的 LQ 控制器^[5]。然而, 这些方法对于操作控制器的工程技术人员来说有较大的难度, 因此, 它们的应用并不广泛。

1 PID 控制器的闭环系统描述

为了简便起见, 考虑含有时延环节的受控对象。其模型如下:

$$G(s) = \frac{ke^{-ts}}{1 + as} \quad (1)$$

下面给出 PID 反馈控制的框图(如图 1 所示), 其中 $G(s)$ 是模型(1)的传递函数, $G_1(s)$ 是 PID 控制器的传递函数。

且

$$G_1(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2)$$

收稿日期: 2006-06-16

基金资助: 湖南省基金资助项目(03JJY3109)

作者简介: 刘 璟(1979-), 男, 湖南新化人, 硕士研究生, 研究方向为复杂过程建模与优化控制、最优化理论与算法等; 梁昔明, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂过程建模与优化控制、现代控制理论、最优化理论与算法等。

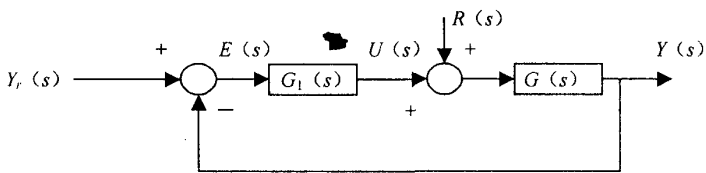


图1 PID 反馈控制系统框图

设该系统对受控对象的灵敏度函数为 $S(s)$, 则

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_1(s)G(s)} \quad (3)$$

由于系统的开环传递函数为:

$$N(s) = G_1(s)G(s) \quad (4)$$

$$\text{所以, } S(s) = \frac{1}{1 + N(s)} \quad (5)$$

又设 $T(s)$ 为该系统的闭环传递函数, 则

$$T(s) = \frac{G_1(s)G(s)}{1 + G_1(s)G(s)} = \frac{N(s)}{1 + N(s)} \quad (6)$$

$$\text{显然, } T(s) + S(s) = 1 \quad (7)$$

由此可见, 要想降低系统的灵敏度 S , 就应该提高系统的开环增益 $N(j\omega)$ 。但是过分地提高开环增益 $N(j\omega)$ 又会导致闭环系统 $T(s)$ 失稳或者恶化系统响应性能。

2 基于数值优化方法的 PID 控制器的设计

希望上述系统在模型不确定或有较大的负载扰动时, 依然能够获得较好的瞬态响应、较好的系统稳定裕度以及较好的鲁棒性。

为了获得较好的瞬态响应, 需要下面的不等式成立, 即

$$M_r \leq M_{r\max} \quad (8)$$

其中 $M_r = \max_{\omega} |T(j\omega)|$ 的值表示闭环系统频率响应的峰值, 它与系统闭环阶跃响应的超调量有关, $M_{r\max}$ 为闭环峰值的允许上限, 可由下式计算得出:

$$M_{r\max} = \frac{1}{2\xi_p \sqrt{1 - \xi_p^2}} \quad (9)$$

其中 ξ_p 为阻尼系数的下限, 且

$$\xi_p = \frac{|\ln(D_1)|}{\sqrt{\pi^2 + \ln(D_1)^2}} \quad (10)$$

其中 D_1 为系统阶跃响应首次超调时的最大值。

由式(8)可知, 闭环系统的阻尼系数 ξ 需要满足下面的不等式:

$$\xi \geq \xi_p \quad (11)$$

另外, $\frac{1}{|S(j\omega)|}$ 的值表示当频率为 $\frac{2\pi}{\omega}$ 时开环传递函数 $N(s)$ 的 Nyquist 曲线与关键点 -1 之间的距离。其最小距离的大小反映系统的稳定裕量的大小。此外, 若开环传递函数的模型误差为 $\Delta N(s)$, 则该误差对闭环系

统的影响可表示为:

$$T(N(s) + \Delta N(s)) = T(N(s)) + \frac{\partial T(s)}{\partial N(s)} \Delta N(s) \quad (12)$$

由此可得

$$\frac{\Delta T(s)}{T(s)} = S(s) \frac{\Delta N(s)}{N(s)} \quad (13)$$

由结构框图可知, 灵敏度与扰动以及系统输出之间的关系可用下式表示:

$$Y(s) = G(s)S(s)R(s) \quad (14)$$

所以 $\max_{\omega} |S(j\omega)|$ 的值反映系统当模型不确定时系统鲁棒性强弱以及系统抗扰动时的性能指标的好坏。因此, 可以根据下式确定最优的 K_P, K_I, K_D , 使系统具有较好的稳定裕度以及较好的鲁棒性。

$$\max_{K_P, K_I, K_D} \left\{ \min_{\omega} \left| \frac{1}{S(j\omega, K_P, K_I, K_D)} \right| \right\} \quad (15)$$

由式(15)和式(5)可知, 关键要确定 $N(s)$ 。而由式(1), (2), (4)可得:

$$N(s) = \frac{ke^{-ts}}{1 + as} \times (K_P + \frac{K_I}{s} + K_{DS}) = \frac{k(K_I + K_{PS} + K_{DS}^2)e^{-ts}}{s(1 + as)} \quad (16)$$

若将 $e^{-ts} \approx \frac{1}{(1 + \frac{t}{2}s)^2}$, 则该闭环系统的特征多项式

可写为:

$$\rho(s) = (s + \sigma)^2(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2) \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{4\alpha + t}{2t\alpha} - \xi\omega_0 \\ K_P &= \frac{(\sigma\xi + \omega_0)\sigma\omega_0 t^2 \alpha - 2}{2k} \\ K_I &= \frac{\sigma^2 \omega_0^2 t^2 \alpha}{4k} \\ K_D &= \frac{(\sigma^2 + 4\sigma\xi\omega_0 + \omega_0^2)t^2 \alpha - 4(t + \alpha)}{4k} \end{aligned} \quad (18)$$

所以结合闭环系统稳定条件及框图结构, 由此可将求最优的 K_P, K_I, K_D 的问题转化为以下数值优化问题^[6], 即

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq b} \{ \min_{\omega} |1 + N(j\omega, b)| \} \\ \omega_0 &= \frac{4\alpha + t}{2b\xi_p t \alpha} \\ N(s) &= \frac{k(K_I + K_{PS} + K_{DS}^2)e^{-ts}}{s(1 + as)} \\ \sigma &= \frac{4\alpha + t}{2t\alpha} - \xi_p \omega_0 \\ K_P &= \frac{(\sigma\xi_p + \omega_0)\sigma\omega_0 t^2 \alpha - 2}{2k} \\ K_I &= \frac{\sigma^2 \omega_0^2 t^2 \alpha}{4k} \end{aligned} \quad (19)$$

$$K_D = \frac{(\sigma^2 + 4\sigma\xi_p\omega_0 + \omega_0^2)t^2\alpha - 4(t + \alpha)}{4k}$$

3 仿真研究

对于一阶延时系统 $G(s) = \frac{3e^{-s}}{1+s}$, $\xi_p = 0.7$, 通过上述的数值优化方法进行计算可得到控制器的最优参数 $K_P = 0.2820$, $K_I = 0.2336$, $K_D = 0.0834$ 。为了比较该方法的有效性, 另外采用变速积分 PID 控制算法 ($K_P = 4.5$, $K_I = 5.0$, $K_D = 0.055$, $A = 0.4$, $B = 0.6$)^[7] 对上述控制对象仿真, 同样采用阶跃响应来做测试。其仿真结果分别如图 2、图 3 所示。

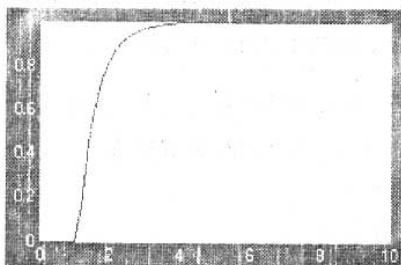


图 2 数值优化 PID 阶跃响应图

由图中可以看出, 数值优化 PID 控制与变速积分 PID 控制一样有效, 其响应性能指标甚至优于变速积分 PID 控制。

4 结论

介绍了一种经过数值优化改进的 PID 控制器, 详细说明了其设计原理与方法, 并做了仿真研究。其与变速积分 PID 控制器的仿真结果的对比表明了该控制器是有效的。文中笔者创新点: 利用数值优化方法

确定最佳的 PID 控制参数, 并给出仿真示例。

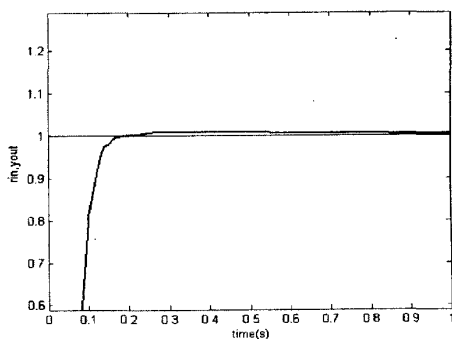


图 3 变速积分 PID 阶跃响应图

参考文献:

- [1] 吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制的应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003, 10(1): 37-42.
- [2] 刘红军, 韩 璞, 孙海蓉, 等. 基于内模控制的 PID 控制器的设计[J]. 计算机仿真, 2004, 22(3): 207-210.
- [3] 侯勇严, 郭文强. 单神经元自适应 PID 控制器设计方法研究[J]. 微计算机信息, 2005, 21(8): 8-10.
- [4] Muske K R, Badgwell T A. Disturbance modeling for offset-free linear model predictive control[J]. Journal of Process Control, 2002, 12: 617-632.
- [5] Pannocchia G, Laachi N, Rawlings J B. A Candidate to Replace PID Control: SISO - Constrained LQ Control[J]. Journal of Process Control, 2005, 15: 81-88.
- [6] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(上接第 23 页)

经过上面两步, 就可以准确地分类识别出运动目标。实验结果如图 3 所示。

4 结束语

文中提出的基于自适应背景模型运动目标检测方法, 首先初始化背景模型; 然后, 进行模型更新, 运动目标分割; 最后准确识别。得出了比较令人满意的实验结果。但它有自身的缺点, 就是必须满足交道路面被运动目标覆盖的时间占总时间的百分比比较小。

参考文献:

- [1] LONG W, YANG Y. Stationary background generation: An alternative to the difference of two images[J]. Pattern Recognition, 1990, 23(12): 1351-1359.

- [2] Ridder C, Munkelt O, Kirchner H. Adaptive background estimation and foreground detection using Kalman-filter[C]// Proc. of International Conf. on Recent Advances in Mechatronics, ICRAM95, UNESCO chair on Mechatronics. [s. l.]: [s. n.], 1995: 193-199.
- [3] 杨枝灵, 王 开. Visual C++ 数字图像获取、处理及实践应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [4] 王夏黎, 周明全, 耿国华, 等. 交通流视频检测系统的设计与实现[J]. 计算机软件, 2004, 21(9): 68-71.
- [5] 周西汉, 刘 勃, 周荷琴. 一种基于奔腾 SIMD 指令的快速背景提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(27): 81-84.
- [6] 刘 勃, 周荷琴. 一种基于颜色和运动信息的夜间交通检测方法[J]. 中国图像图形学报, 2005, 12(2): 187-191.