

连续搅拌反应釜过程的闭环增益成形 PID 控制器设计

李述清¹, 张胜修¹, 张煜东², 胡波³

(1. 第二炮兵工程学院 303 教研室, 西安 710025; 2. 第二炮兵工程学院 501 教研室, 西安 710025; 3. 第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011)
(lsq-hunan@163.com)

摘要:针对连续搅拌反应釜(CSTR)系统控制问题,设计了一种基于闭环增益成形算法的 PID 控制器,以提高 PID 控制器设计的简洁性和鲁棒性。首先假设期望闭环回路传递函数有一阶形式,同时将受控对象的一阶传递函数和 PID 控制器构成实际闭环回路传递函数。然后,比较期望闭环回路传递函数和实际闭环回路传递函数,即可确定 PID 参数。最后,以某 CSTR 系统为例,利用该方法设计了 PID 控制器,并通过仿真结果比较,检验了该方法所得 PID 控制器的良好鲁棒稳定性和动态品质。

关键词: PID 控制器; 闭环增益成形; 鲁棒控制; 一阶对象; 连续搅拌反应釜

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

PID controller design of closed-loop gain shaping in CSTR process

LI Shu-qing¹, ZHANG Sheng-xiu¹, ZHANG Yu-dong², HU Bo³

(1. Teaching and Research Section 303, The Second Artillery Engineering College, Xi'an Shaanxi 710025, China;

2. Teaching and Research Section 501, The Second Artillery Engineering College, Xi'an Shaanxi 710025, China;

3. The Second Artillery Engineering Designing Academe, Beijing 100011, China)

Abstract: To solve the control problem of Continuous-Stirred-Tank-Reactor (CSTR), a straightforward PID design based on closed-loop gain shaping algorithm was proposed in this paper to enhance the simplicity and robustness of PID controller. Firstly, the transfer function of the anticipant closed-loop control system was assumed as a 1st order system, and the actual closed-loop transfer function was consisted of the 1st order transfer function and PID controller. Then, the anticipated closed-loop transfer function was compared with that of the actual closed-loop, thus the PID controller coefficients could be calculated. Finally, the robust PID controller was designed in a CSTR system. The simulation results demonstrate that the PID controller has better robust stability and dynamic performance.

Key words: PID controller; closed-loop gain shaping; robust control; 1st order plant; Continuous-Stirred-Tank-Reactor (CSTR)

0 引言

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一,也是迄今为止工业过程控制中应用最广泛的控制方法。几十年来单变量 PID 控制参数设计方法也得到了国内外的广泛研究^[1],如 Ziegler-Nichols 设定法、临界灵敏度法、极点配置法、增益相位裕度方法等。对于过程的某一特定工作点,采用常规 PID 参数设计方法就能使系统获得满意的控制效果;但对于操作条件改变的时变系统,由于其工作范围和特性变化较大,此时期望用一个 PID 控制器来完成对系统全工作范围的优良控制是不合适的,常规 PID 参数设计方法难以继续保持良好的控制效果^[2]。

因而利用鲁棒控制技术进行 PID 控制器的设计成为近年来人们研究的一个热点课题。针对不确定对象模型,通常采用的方法有:1)依据某种与误差有关的最优性指标,通过优化指标来完成设计^[2-3],这类方法注重系统的响应品质,但是优化计算量较大;2)基于特定鲁棒理论进行 PID 控制器设计^[4-5],这类方法理论严密,但算法结构复杂,需要艰深的数学基础。另外,张显库等人^[6-7]基于闭环增益成形算法对二阶对象给出了一种简洁的鲁棒 PID 设计方法,但不适用于典型的一阶受控对象。

尽管鲁棒控制理论的应用在一定程度上提高了 PID 控制器的鲁棒性,但是计算量大、求解困难,有些问题已经被证明是 NP 难问题^[2]。为此,徐祖华等人^[2]针对连续搅拌反应釜(Continuous-Stirred-Tank-Reactor, CSTR)系统鲁棒 PID 控制问题,将不确定性最坏情况下性能指标的上界转化为一个 min-max 问题,降低了计算量。不过,该方法涉及理论仍较深,步骤仍较繁杂,计算量也不小。针对 CSTR 系统设计简单实用的鲁棒控制系统仍是个值得深入研究的问题。

对此,本文在文献[7]的工作基础上设计了一种针对一阶受控对象情形的鲁棒 PID 控制器,并针对文献[2]所给 CSTR 系统实例,将本文方法与文献[2]中方法进行比较研究。

1 闭环增益成形 PID 控制器设计

对于一个典型的单位负反馈控制系统,被控对象为 G_p , 控制器为 G_c , 闭环传递函数为 $\phi = GG_c/(1 + GG_c)$ 。闭环增益成形控制算法核心是确定期望闭环传递函数 ϕ^* 的最终希望的形状,从而能保证设计出的控制器具有良好的鲁棒性能,即求取一定的控制器,使得闭环系统的灵敏度函数 S 和补灵敏度函数 ϕ (即闭环传递函数)具有图 1 所示的典型形状^[7]。

对于一个跟踪控制问题,考虑设计控制器 G_c , 使期望最终闭环系统传递函数为 $\phi^* = 1/(T_s + 1)$, 其中 $1/T$ 为闭环

收稿日期:2010-07-28;修回日期:2010-09-24。

作者简介:李述清(1981-),湖南洪江人,博士研究生,主要研究方向:航空发动机建模与控制; 张胜修(1964-),陕西西安人,教授,博士生导师,主要研究方向:导航制导与控制; 张煜东(1981-),浙江余姚人,博士研究生,主要研究方向:光催化材料科学; 胡波(1978-),山西五台人,工程师,硕士,主要研究方向:网络信息安全。

系统 ϕ^* 的穿越频率,且 S 和 ϕ 的奇异值线与图1相似。

令 $\phi^* = \phi$, 即 $\frac{1}{T_s + 1} = \frac{G_p G_c}{1 + G_p G_c}$, 可得:

$$G_c = 1/(G_p T_s) \quad (1)$$

即直接由被控对象 G_p 表达式设计得到控制器 G_c 。考虑一阶受控对象: $G_p = b_0/(s + a_0)$, 代入式(1), 得:

$$G_c = \frac{1}{T_s \frac{b_0}{s + a_0}} = \frac{s + a_0}{T_s b_0} = \frac{1}{T_s b_0} s + \frac{a_0}{T_s b_0} \quad (2)$$

显然式中 G_c 具有传统 PID 控制器的形式:

$$G_c = K_p + K_i/s + K_d s \quad (3)$$

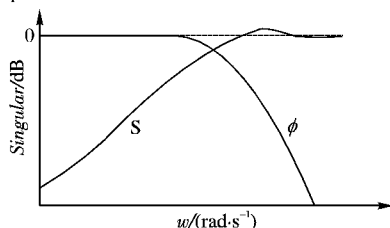


图1 典型 S 和 ϕ 奇异值曲线图

对比和式, 可得 PID 控制器系数为:

$$K_p = \frac{a_1}{T b_0}, K_i = \frac{a_0}{T b_0}, K_d = 0 \quad (4)$$

此时是一个 PI 控制器, 式(4)即为针对一阶受控对象的鲁棒 PID 控制器设计方法, 简称为 LTR-PID。

由上述分析可知, 该方法结合了理论指导的普适性和工程设计的直观性, 设计步骤直接而简洁, 计算量也很小, 可以预设最终闭环系统截至频率, 具有很强的工程实用价值。

2 仿真实例

2.1 CSTR 系统 LTR-PID 控制器设计

以文献[2]中所给出的 CSTR 系统为例, 其 G_x 的动态微分方程如下^[2]:

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A - k_2 C_A^2 + \frac{F}{V} (C_{Af} - C_A) \\ \frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A - k_2 C_B - \frac{F}{V} C_B \\ y = C_B \end{cases} \quad (5)$$

其中: $k_1 = 50, k_2 = 100, k_2 = 10, C_{Af} = 10, V = 1, y$ 为输出, F 为输入。

文献[2]对 CSTR 系统中的 G_x 通过辨识得标称模型 $G_p = 2.336/(s + 71.98)$, 并优化得 PID 控制器 $G_c = 3.195 + 659/s$, 称其为 MinMax-PID。根据标称模型控制回路 bode 图可知, 其穿越频率在 20 rad/s 附近。

依照本文所给设计方法, 取 $T = 0.05$, 使最后所得实际控制闭环 ϕ 的穿越频率仍在 20 rad/s 附近。再根据式(4)即可快速得出 LTR-PID 控制器传递函数为 $G_c = 8.562 + 616.3/s$ 。

2.2 全工作范围 CSTR 闭环控制系统响应

图2是大范围变化情况下, 两组 PID 控制器分别作用下 CSTR 闭环系统响应曲线比较图。从图2可以看出, 本文给出的 LTR-PID 控制参数快速设计方法得到控制器的在标称状况下的控制品质与文献[2]所得 MinMax-PID 效果一致, 且在低 y 段, LTR-PID 控制超调明显小于 MinMax-PID 的。故本文所给出的快速鲁棒 PID 设计方法是有效的, 而且所得控制器在系统工作范围内也都能很好地适应, 并保持良好的控制品质。

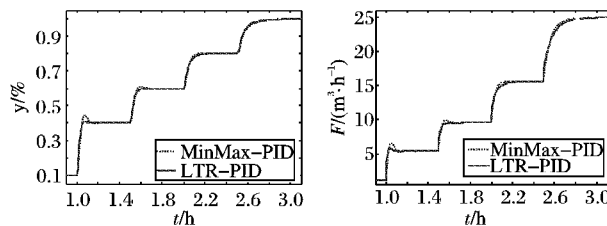


图2 在持续设定值变化下闭环响应

2.3 考虑模型摄动时控制系统响应

对 CSTR 系统 G_x 考虑如下模型摄动:

$$G = G_p (1 + \Delta_M); \Delta_M = \frac{d_M}{0.01s + 1}$$

其中系数 d_M 反映系统实际模型 G 与标称模型 G_p 的偏差程度。

当模型摄动 $d_M = 0.6$ 时, 两组 PID 控制器作用效果比较如图3所示。

图3表明, 本文设计的控制器对模型摄动情况的鲁棒性与文献[2]中所得控制器相比, 仍具有明显优势。

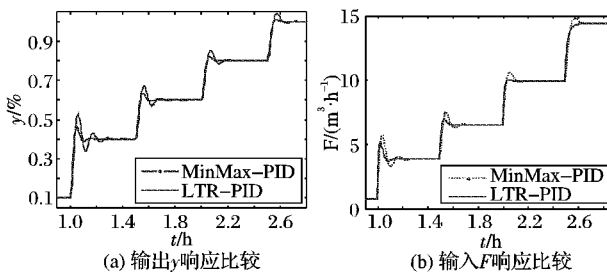


图3 考虑模型摄动情形闭环响应

3 结语

本文在文献[7]的工作基础上, 设计了一种针对一阶受控对象情形的鲁棒 PID 控制器, 还就文献[2]所给 CSTR 仿真实例, 利用本文方法重新设计了一组 PID 控制器, 并对该控制系统进行了仿真和比较。仿真结果表明:

1) 本文设计的 PID 控制器能很好地适应系统在工作范围内的变化, 并保持良好的控制品质, 检验了本文方法的有效性。

2) 相比文献[2]中给出的 PID 控制器, 本文设计方法的 PID 控制器对模型偏差具有更好的鲁棒适应能力, 且一致性方面也获得满意的效果。

3) 具有工程背景直观且便于理解、设计步骤直接而简洁、计算量小、鲁棒性好的特点, 具有很强的工程适用性。

4) 完全可以用于 PID 控制参数优化初值的选取, 能极大地减小初值选取的盲目性, 并有利于加速后续优化收敛到最优解。

参考文献:

- [1] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 徐祖华, 赵均, 钱积新. 一种新颖的鲁棒 PID 控制器设计方法[J]. 化工学报, 2009, 60(1): 118-121.
- [3] 金鑫, 刘吉臻, 谭文. 基于遗传算法的鲁棒 PID 控制器设计[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(3): 39-42.
- [4] 林琼斌, 蔡逢煌, 杨富文. 参数不确定系统的多目标鲁棒 PID 控制器设计[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(S1): 186-189.
- [5] GE MING, CHIU MINSSEN, WANG QINGGUO. Robust PID controller design via LMI approach[J]. Journal of Process Control, 2002, 12(1): 3-13.
- [6] 张显库, 贾欣乐. 基于闭环增益成形的鲁棒 PID 算法及在液位控制中的应用[J]. 中国造船, 2000, 41(3): 35-39.
- [7] 张显库, 肖惟楚, 郭晨. 船舶进出港低速航向保持[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(4): 77-81.