

非最小相位搅拌机的鲁棒控制

王 伟¹, Sebastian ENGELL²

(1. 上海交通大学 自动控制系统, 上海 200030; 2. 德国多特蒙德大学 化学工程系, D-04421, Dortmund, Germany)

摘要: 一种新的鲁棒控制设计过程被应用于连续搅拌机的控制. 控制对象的非线性与模型参数误差作为不确定性, 线性控制器的鲁棒性用来保证一定范围内操作点的控制. 设计中考虑了以右半平面零点为特点的非最小相位特性的影响和输入输出比例调节. 仿真结果表明所设计的控制器至少与 μ -控制器的性能一样好.

关键词: 鲁棒控制; H_∞ 控制; 条件数; 反应器控制; 最小相位控制

中图分类号: TP301

文献标识码: A

Robust control of non-minimum phase stirred-tank reactor

WANG Wei¹, Sebastian ENGELL²

(1. Department of Automatic Control, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Department of Chemical Engineering, University of Dortmund, D-4421 Dortmund, Germany)

Abstract: A new robust design procedure is applied to the control of a continuous stirred-tank reactor (CSTR). The non-linearity and parameter error are considered as uncertainty. The robustness of a linear controller ensures the control quality for a range of operating points. The design considers the non-minimum phase characteristics featured by RHP zero as well as the input and output scaling. Simulations show that our design is at least as good as the μ -optimal one.

Key words: robust control; H_∞ control; condition numbers; reactor control; minimum phase systems

1 引言(Introduction)

工业过程精确建模的结果常常是含有参数误差的非线性微分方程. 与非线性控制器相比, 线性固定参数控制器价格便宜、易于实现. 因此在反馈控制下保证真实系统稳定并具有良好的性能的线性定常控制器常常是控制工程师寻求的目标. 本文使用文献[1]提出的鲁棒控制器设计过程设计线性定常控制器. 本文涉及的搅拌机控制问题常常被用做非线性过程控制设计的基准问题^[1,2]. 搅拌机的工作过程是一个非线性过程, 系统的非线性及参数误差则作为标称模型的不确定性来考虑. 搅拌机在右半平面具有零点, 此非最小相位特性对系统性能的限制在期望性能的选择上给于考虑.

2 设计过程(Design procedure)

本论文采用的设计步骤为:

1) 选择一个标称模型 $G(s)$ 和一个期望传递函数矩阵 $T_0(s)$. 由于搅拌机具有右半平面的零点, 对 $T_0(s)$ 按式 $\tilde{T}_0(s) = G_+(s)G_+^{-1}(0)T_0(s)$ 加以修正^[3].

2) 为了数值计算的稳定性, 对搅拌机模型的输入、输出进行比例调节 (scaling)^[4].

3) 对比比例调节后的搅拌机模型按文献[4]的设计步骤计算鲁棒控制器并降低其阶数.

4) 对所得到的控制器进行比例调节反变换, 得到对应于原搅拌机模型的控制器.

3 搅拌机的控制器设计 (Controller design for CSTR)

3.1 控制问题 (Control problem)

浓度为 $c_{A0}/\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ 、温度为 $\theta_0/^\circ\text{C}$ 的反应物 A 馈入搅拌机, 产品为 B , 不想得到的副产品为 C 和 D . 由质量和能量平衡可得到描述系统动态特性的四个非线性微分方程^[1], 模型中所有参数的精度都是有限的. 系统的控制量有两个: 滞留时间 $\dot{V}/V_R(\text{h}^{-1})$ 和由冷却剂带走的热量 $\dot{Q}_K(\text{kJ/h})$, 它们的变化范围分别为 $5 \leq \dot{V}/V_R \leq 35$ 和 $-8500 \leq \dot{Q}_K \leq 0$. 反应物浓度 c_{A0} 的变化被视为系统的主要的不可测量的扰动, 它的变化范围为 $4.5 \leq c_{A0} \leq 5.7$. 控

制设计的目标是在范围 $0.7 \leq c_B \leq 0.95$ 内控制产品浓度 $c_B/\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$. 作为测量信号, 浓度的参考输入为 $c_{B,\text{ref}}(t) = 0.9 - 0.2u(t-10) + 0.25u(t-60)$, 而搅拌机的温度 θ 则应保持不变.

3.2 标称模型和不确定性(Nominal plant and uncertainty)

选择产品浓度 c_B 和搅拌机温度 θ 作为输出变量. 离析物 A 的浓度 $c_{A0} = 5.1\text{mol/l}$ 处为主要操作点^[4], 对应于该点的线性化模型(A, B, C, D) (其中时间常数的单位为分钟)为

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} -1.412 & 0 & -0.0630 & 0 \\ 0.8873 & -1.1588 & 0.0132 & 0 \\ 2.4417 & 3.4708 & -0.5970 & 0.5138 \\ 0 & 0 & 1.4450 & -1.4450 \end{bmatrix}, \\ B = \begin{bmatrix} 0.0670 & 0 \\ -0.0138 & 0 \\ -0.0833 & 0 \\ 0 & 0.0017 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

此系统在右半平面 2.89 处有一传输零点. 我们将用为上述线性名义模型设计的线性鲁棒控制器来控制原来的非线性系统. 因此在线性控制器的鲁棒设计中, 不确定性主要由两个部分组成: 非线性和物理及化学参数(例如, 反应速率系数, 激活能量和反映焓)的不确定性.

3.3 期望输入-输出传递函数的选择 (Selection of desired input-output transfer function)

选择期望闭路的阶跃响应特性为: 在浓度通道有 3 分钟的上升时间、在温度通道有 1 分钟的上升时间, 两个通道对阶跃输入信号具有 10% 的超调量. 控制信号的约束通过选择合理的上升时间来考虑^[5]. 由于搅拌机在右半平面 2.89 处有零点, 按式 $\bar{T}_0(s) = G_+(s)G_+^{-1}(0)T_0(s)$ 对期望传递函数 $T_0(s)$ 加以修正^[3], 设计时使用修正后的期望传递函数 $\bar{T}_0(s)$.

3.4 标称模型的比例调节 (Scaling of the nominal plant)

图 1 给出了标称模型在各个频率上的条件数 (condition number), 可以看出标称模型的条件数非常大. 本文将使用文献[4]中所描述的比例调节过程使关键频率上的条件数取极小值.

$G(s)$ 与 $\bar{T}_0(s)$ 所对应的鲁棒性能数 (robust performance number) 曲线如图 2 所示. 在频率 $\omega = 1.6$ 时鲁棒性能数曲线到达最大值. 对这一频率可计算出以下 2 个比例调节矩阵:

$$L = \begin{bmatrix} 1.3011 & 0 \\ 0 & 0.0587 \end{bmatrix} \times 10^5, R = \begin{bmatrix} 0.0009 & 0 \\ 0 & 1.0000 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

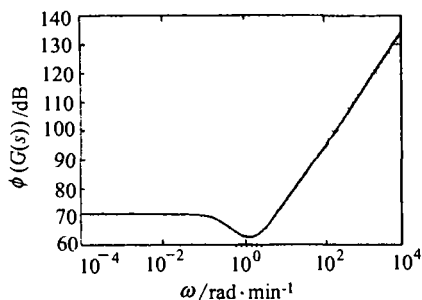


图 1 $G(s)$ 的条件数

Fig. 1 The condition number of $G(s)$

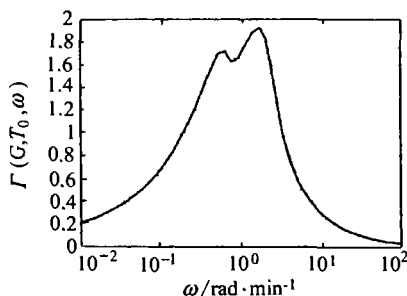


图 2 系统的鲁棒性能数曲线

Fig. 2 Robust performance number

比例调节后的模型 $G_s = LG(s)R$ 的条件数如图 3 所示. 很明显在剪切频率范围, 模型的条件数被有效地减少了.

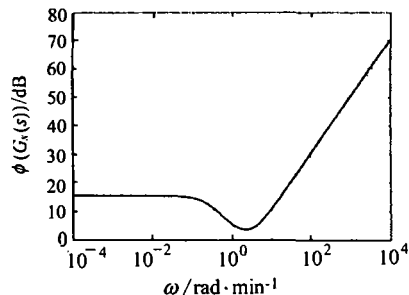


图 3 $G_s(s)$ 的条件数

Fig. 3 The condition number of $G_s(s)$

3.5 鲁棒控制器设计 (Robust controller design)

对于 $G_s = LG(s)R$, 本文用论文[4]提出的鲁棒控制器设计方法得到如下简单的加权函数矩阵

$$W(s) = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} 0.3553s + 0.215 & -0.1942s + 0.2229 \\ 0.0844s - 0.0558 & 0.6021s + 0.065 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对应的设计参数为 $\rho = .40, \epsilon_{\max} = 0.5946$. 对参数 $\epsilon =$

$0.95\epsilon_{\max}$ 计算 H_{∞} 控制器 $K_{\infty}(s)$. 对于比例调节后的模型,最后的控制器为 $K_s(s) = W(s)K_{\infty}(s)$. 而原模型 $G(s)$ 的控制器为 $K(s) = RW(s)K_{\infty}(s)L$. 由 $K(s)$ 补偿的闭路阶跃响应仿真由图4所示. 从图中可看出闭路性能满足设计指标. 图中 $E_a(1, 2) = +2\%$ 作为参数不确定性,表示激活能量 $E_a(1)$ 和 $E_a(2)$ 增加 2% ^[1]. 对于不同的浓度 c_{A0} , 控制变量在给定的范围内变化.

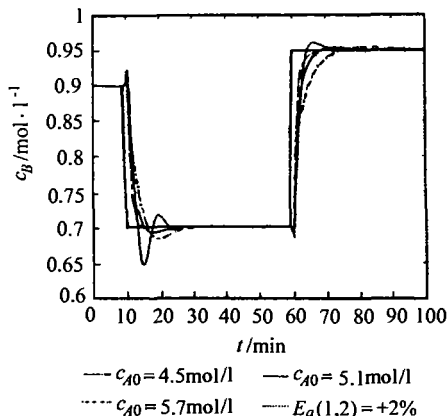


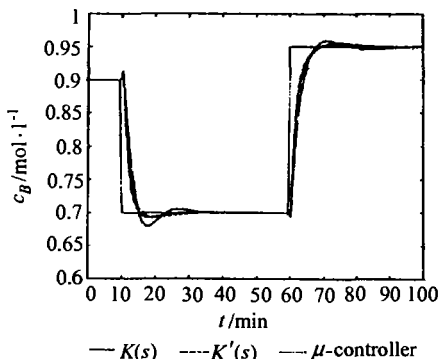
图4 阶跃响应仿真

Fig. 4 Simulation of step responses

控制器 $K(s)$ 的阶数是 $n + 2n_w (= 4 + 2 \times 2 = 8)$, 其中 n 是标称模型的阶数, n_w 是加权函数矩阵的阶数. 为了降低控制器的阶数,把由 $K(s)$ 补偿的闭路系统的传递性能作为期望的闭路传递性能,用频域近似法^[4]来得到一低阶控制器(设计参数为 $\rho = 1000$)

$$K'(s) = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} 27.2s + 14.2 & -0.5s + 0.8 \\ -4020.3s - 5958.8 & 2477.2s + 224.2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

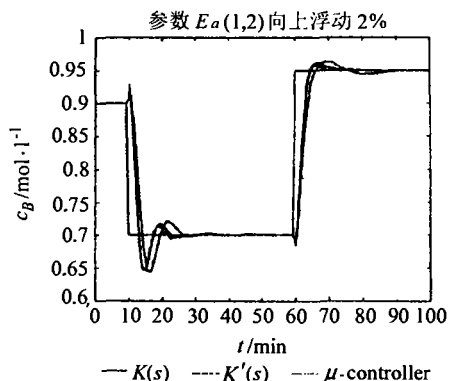
对应于 $K'(s)$ 的阶跃响应仿真如图5所示. 闭路系统的性能满足性能指标要求.

图5 $K(s), K'(s)$ 与 μ -最优控制器的比较 ($c_{A0} = 5.1$)Fig. 5 The comparison of $K(s), K'(s)$ and μ -controller for $c_{A0} = 5.1$

3.6 与 μ 控制器的比较 (Comparison with μ -controller)

对于 $c_{A0} = 5.1$, 本文设计的控制器与 μ -最优控制器^[3]的性能比较由图5给出. 从图中可看出:由本文设计的闭路控制系统的超调与调整时间比用 μ -最优控制器的闭路系统略小. 本文控制器阶数为8, 而 μ -最优控制器的阶数为78.

图6给出在 $c_{A0} = 5.1$ 、参数 $E_a(1, 2)$ 向上浮动 2% 时, 本文的控制器与 μ -最优控制器的鲁棒性能比较. 两者的鲁棒性能相同. 本文控制器的调整时间相对来说比较小.

图6 $E_a(1, 2)$ 向上浮动 2% 时 $K(s), K'(s)$ 与 μ -最优控制器的比较 ($c_{A0} = 5.1$)Fig. 6 The step responses of $K(s), K'(s)$ and μ -controller for $c_{A0} = 5.1$ with 2% variation of $E_a(1, 2)$

与 μ 综合相比,在本文的设计方法中期望性能的选择相对简单一些,因为可以从每一个通道的上升时间与超调量直接确定期望性能. 控制器对参数变化的鲁棒性可以通过改变设计参数 ρ 来调整. μ 控制器的鲁棒性更加依赖于加权的选择,但可以由参数 μ 来明确描述. 在两种设计方法中迭代运算都不可避免.

4 结论 (Conclusion)

新的鲁棒设计过程被用于非最小相位系统——连续搅拌机的控制. 为了便于控制器设计,一个比例调节过程被用来减小标称模型的条件数. 把本文设计的控制器与 μ -控制器进行比较可看出,新的设计过程很有效.

参考文献 (References):

- [1] ENGELL S, KLATT K U. Nonlinear control of a non-minimum phase CSTR [A]. Proc of American Control Conference [C]. Evanston, IL: IEEE Service Center, 1993, 2041 - 2045.
- [2] AMANN N, ALLGÖWER F. μ -suboptimal design of a robustly performing controller for a chemical reactor [J]. Int J Control, 1994, 59(3): 665 - 687.

- [3] MÜLLER R, TRIERWEILER J O. Robust decentralized control of a CSTR with complex reaction scheme [A]. *Proc Dynamics and Control of Reactors and Distillation Columns* [C]. Oxford: Elsevier Science, 1995, 69 - 74.
- [4] WANG Wei, ENGELL S. Robust controller design for a heating system[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1999, (9): 883 - 901.
- [5] MÜLLER R. *Entwurf von Mehrgrößenreglern durch Frequenzgang-Approximation* [D]. Aachen, Germany: University of Dortmund, 1996.

作者简介:

王伟 (1962 —), 女, 1999 年获德国多特蒙特大学工学博士, 上海交通大学自动控制系统教师, 研究方向: 鲁棒控制, 过程控制.

Email: sjtuiata@online.sh.cn;

Sebastian ENGELL (1954 —), 男, 德国多特蒙特大学化学工程系过程控制专业负责人, IEEE Transactions on Control Systems Technology 主编之一, European Journal of Control 和 Mathematical Modelling of Systems 副主编, 研究方向: 过程控制, 生产调度, 离散控制, 混合系统.

第五届全球智能控制与自动化大会(WCICA'2004)

征文通知

全球智能控制与自动化大会(WCICA)是每两年一次在中国召开的重要国际会议. 第五届全球智能控制与自动化大会(WCICA'04)将于 2004 年 6 月在杭州召开. 大会热忱欢迎广大同行踊跃投稿, 录用的论文将由正式出版社出版论文集(附带光盘), 并成为国际重要检索机构 EI、ISTP、INSPEC 等的检索源.

征稿范围:

1. 理论与方法(P1)

• P1-1 控制理论

P1-1-1 系统理论与控制理论; P1-1-2 非线性系统分析; P1-1-3 大系统理论; P1-1-3 建模、辨识、估计与优化

• P1-2 控制方法

P1-2-1 先进控制(自适应、变结构、鲁棒、 H^∞); P1-2-2 优化控制; P1-2-3 非线性控制; P1-2-4 故障诊断

• P1-3 智能控制

P1-3-1 人工智能与专家系统; P1-3-2 神经网络; P1-3-3 模糊算法、遗传算法、进化算法; P1-3-4 智能控制、模糊控制、学习控制

2. 应用(P2)

• P2-1 过程系统工程

P2-1-1 现代集成制造系统; P2-1-2 智能调度与生产计划、智能信息处理; P2-1-3 企业资源计划 ERP 与生产执行系统 MES; P2-1-4 仿真与控制系统 CAD; P2-1-5 工业过程建模、控制与优化; P2-1-6 传感、测量与仪器仪表

• P2-2 运动控制

• P2-3 智能机器人

• P2-4 专用系统工程

P2-4-1 电力系统; P2-4-2 人机系统; P2-4-3 智能交通系统; P2-4-4 环境与生物系统; P2-4-4 智能建筑系统

• P2-5 航天航空应用系统

• P2-6 其它各种应用系统

大会特别欢迎应用方面的论文投稿.

请投稿者提交用中文或英文书写的论文全文一式 3 份, 并在首页中注明论文题目、作者姓名和单位、联系人的详细通讯地址(包括电话(办、宅)、传真和 E-mail)、摘要、3~5 个关键词, 并注明所属的征文领域及编号(如有关智能建筑系统的论文请注明: P2-4-4).

大会特别欢迎专题分会的建议, 建议包括分会主题、分会组织者介绍、至少 5 个报告者的名单及其论文题目, 并按前面要求提交相关论文的全文.

重要日期:

论文投稿截止日期: 2003 年 10 月 30 日; 论文录用通知日期: 2003 年 12 月 30 日

投稿地址:

浙江 杭州 浙江大学 工业控制技术国家重点实验室 WCICA'04 秘书处 邮编: 310027

电话: (86) - 571 - 87951887, 87951069; 13957131619

E-mail: wcica2004@iipc.zju.edu.cn; caazj@iipc.zju.edu.cn

有关大会的进一步消息请关注大会网站上发布的信息: <http://www.nliet.zju.edu.cn/wcica2004>