

广义开环响应控制及应用

李 平 王骥程 王树青

(浙江大学工业控制技术研究所以·杭州, 310027)

摘要: 本文针对单输入单输出线性系统提出一种新的数字控制算法. 该算法能有效地处理过程纯滞后、非最小相位和开环不稳定性. 有一个控制参数可以整定, 且控制器的鲁棒性在线可调. 仿真结果和实际应用表明该算法具有好的抗干扰性和鲁棒性, 很适合工业应用.

关键词: 极点配置; 预测控制; 内模控制; 氢氮比控制

1 引言

随着微计算机技术的普及和控制理论的发展, 许多新算法相继问世了. 其中, 模型预测控制策略因其建模简单, 鲁棒性好而尤为引人注目. 这种控制方法包括简化的模型预测控制^[1](SMPC), 内模控制^[2](IMC) 及可由此推出的模型算法控制^[3](MAC) 和动态矩阵控制^[4](DMC) 等. 在 IMC 设计理论中, 起初以完善的设定值控制为前提, 然后适当退步并设计出能实现可达到的性能的控制规律. 而 SMPC 则从另一端开始, 假定控制算法必须至少能达到开环性能. 一旦控制算法被推导出来, 则引入一个调整参数使响应加快到满足用户规定的性能指标的程度. 文[5]已证明 SMPC 实质是上一种根轨迹控制, 无纯滞后补偿功能. 文[6]对该算法作了改进, 产生一个新的算法, 叫作“Conservative Model Based Controller (CMBC)”. 但是, 一个开环不稳定的对象在使用这些算法之前必须用常规的反馈控制使其稳定.

本文采用 SMPC 的控制思想, 提出广义开环响应控制算法 (Generalized Open-Loop Response Control, GORC). GORC 分两步设计: 第一步, 将过程模型进行变换, 形成广义开环系统, 并使用收缩原开环极点的方法配置广义开环系统的极点. 第二步, 假定闭环系统至少能达到广义开环系统性能, 据此推导控制算法. 这样, 广义开环系统的极点实质上成为闭环系统极点. 只要对这些极点进行适当调整, 就能使控制性能达到满意的程度. GORC 可以用于稳定/不稳定, 最小相位/非最小相位, 有纯滞后/无纯滞后或其组合的线性系统.

2 广义开环系统

设被控过程模型为

$$y(z) = G_p(z)u(z) + \sum_{i=1}^r G_i(z)d_i(z). \quad (1)$$

其中 $y(z)$, $u(z)$, $d_i(z)$ 分别是过程输出、输入和第 i 个扰动的 z 变换. $G_p(z)$ 和 $G_i(z)$ 分别是过

程和第 i 个扰动的脉冲传递函数. 假定 $G_i(z)$ 的不稳定极点同时也是 $G_r(z)$ 的极点. 式(1)可以写成

$$A(z^{-1})y(z) = B_+(z^{-1})B_-(z^{-1})u(z) + \sum_{i=1}^r C_i(z^{-1})d_i(z). \quad (2)$$

其中

$$A(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_a} a_i z^{-i}, \quad a_0 = 1, \quad (3)$$

$$B_+(z^{-1}) = z^{-k-1} \sum_{i=0}^{n_+} \beta_i z^{-i}, \quad \beta_0 \neq 0, \quad (4)$$

$$B_-(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_-} b_i z^{-i}, \quad b_0 \neq 0, \quad (5)$$

$$C_j(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_j} c_{ji} z^{-i}. \quad (6)$$

$B_+(z^{-1})$ 包含 $G_r(z)$ 的非最小相位零点和纯滞后, $B_-(z^{-1})$ 的所有零点在 z 平面开单位圆内.

定义广义输入^[7]

$$U(z) = Q(z^{-1})B_-(z^{-1})u(z) + P(z^{-1})y(z). \quad (7)$$

其中

$$P(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_p} p_i z^{-i}, \quad (8)$$

$$Q(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_q} q_i z^{-i}, \quad q_0 = 1. \quad (9)$$

由式(7), 式(2)可改写成

$$[A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B_+(z^{-1})P(z^{-1})]y(z) = B_+(z^{-1})U(z) + Q(z^{-1}) \sum_{i=1}^r C_i(z^{-1})d_i(z). \quad (10)$$

式(10)表示了广义开环系统, 它的极点是多项式 $G(z^{-1})$ 的零点.

$$G(z^{-1}) = A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B_+(z^{-1})P(z^{-1}). \quad (11)$$

广义开环系统输出 $y(z)$ 与广义输入 $U(z)$ 之间的脉冲传递函数是

$$G_U(z) = \frac{B_+(z^{-1})}{G(z^{-1})}. \quad (12)$$

由式(11)知, $G(z^{-1})$ 的零点可以通过适当选取 $Q(z^{-1})$, $P(z^{-1})$ 两个多项式进行配置, 本文采用收缩原开环极点配置方法. 这样, $G(z^{-1})$ 多项式将具有 $A(z^{-1})$ 多项式的形式, 即

$$G(z^{-1}) = A\left(\frac{a}{z}\right) = \sum_{i=0}^{n_a} a^i a_i z^{-i}. \quad (13)$$

因此, $G(z^{-1})$ 的 z 域零点为

$$z_i = a\lambda_i, \quad i = 1, \dots, n_a. \quad (14)$$

式中 λ_i 是原开环系统的极点.

若 a 从 1 向 0 减小, $G(z^{-1})$ 的 z 域零点朝原点收缩. 因此, 即使被控制过程开环不稳定,

2 期

我们总可以找到一个 $\alpha_{\max}$, 当 $\alpha < \alpha_{\max}$ 时, $|z_i| < 1$. 也就是说, 总可以通过调整 α 值, 使广义开环系统稳定. α 取 1 时, 广义开环系统就是原开环系统.

多项式 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 由下列丢番图方程解得

$$A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B_+(z^{-1})P(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_a} \alpha^i \alpha_i z^{-i}. \quad (15)$$

取 $n_r = n_a - 1, n_q = k + n_+$, 可得到 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 的最小阶解.

3 广义开环响应控制算法(GORC)

图 1 是广义开环系统的经典反馈控制方块图. 根据 SMPC 的控制思想, 要求对广义开环系统所设计的反馈控制器 $D(z)$ 必须至少使闭环系统响应达到广义开环系统性能. 这一要求可以表示为

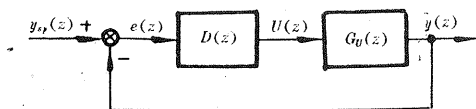


图 1 广义开环系统的经典反馈控制结构

$$\frac{y(z)}{y_{sp}(z)} = \frac{D(z)G_u(z)}{1 + D(z)G_u(z)} = \frac{G_u(z)}{K_p}. \quad (16)$$

式中, K_p 是广义开环系统的稳态增益, 等于 $B_+(1)/G(1)$.

容易解出

$$D(z) = \frac{1}{K_p - G_u(z)}. \quad (17)$$

从图 1 知

$$D(z) = \frac{U(z)}{e(z)}. \quad (18)$$

从式(17), (18) 得广义输入

$$U(z) = \frac{e(z)}{K_p - G_u(z)}. \quad (19)$$

根据式(7), (12) 和(19), 推得 GORC 控制量的计算公式如下

$$\begin{aligned} & Q(z^{-1})B_-(z^{-1})[G(z^{-1})K_p - B_+(z^{-1})]u(z) \\ &= G(z^{-1})e(z) - P(z^{-1})[G(z^{-1})K_p - B_+(z^{-1})]y(z). \end{aligned} \quad (20)$$

在 GORC 控制下, 闭环系统方程为

$$y(z) = \frac{B_+(z^{-1})}{K_p G(z^{-1})} y_{sp}(z) + \frac{Q(z^{-1})[K_p G(z^{-1}) - B_+(z^{-1})]}{K_p G(z^{-1})G(z^{-1})} \sum_{i=1}^r C_i(z^{-1}) d_i(z). \quad (21)$$

可以看出, 闭环系统的极点就是广义开环系统的极点, 即 $G(z^{-1})$ 的零点. 只要通过参数 α 对 $G(z^{-1})$ 的零点进行适当调整就能得到满意的闭环响应. 图 2 是广义开环响应控制的结构图.

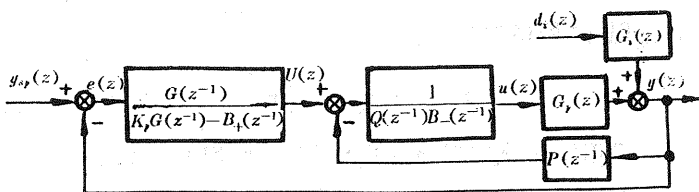


图 2 广义开环响应控制结构

分析图 2 可知,广义开环系统可以起两种作用:一是改善原开环的开环特性;二是可以抑制独立于设定值输入信号的部分干扰.在此基础上再针对广义开环系统设计闭环控制器,来完成跟踪和完善系统性能的任务.这一做法同经典理论中串联和局部反馈校正设计思想类似.

GORC 控制器有如下性质:

性质 1 若模型准确,则不论过程开环是否稳定,GORC 使闭环系统按一定程度稳定.这个稳定程度是通过闭环的极点配置来保证的.

性质 1 由闭环方程式(21)决定.

性质 2 只要闭环系统收敛到稳态,即使存在模型误差,也一定会收敛到期望的稳态.

对式(20)应用终值定理可证明性质 2.

性质 3 当系统参数发生小变化时,系统在 GORC 控制下仍保持稳定性,即闭环系统的稳定性具有对参数变化的不敏感性.

性质 3 的证明与文[7]性质 1 的证明相似,本文从略.

性质 4 GORC 具有内模控制结构.

图 2 可以等价地表示成内模控制结构,见图 3. 这样,IMC 的鲁棒性工具反馈滤波器 $F(z)$ 在 GORC 中也可以使用.相应地,GORC 控制量计算公式变为

$$Q(z^{-1})B_-(z^{-1})[G(z^{-1})K_p - F(z)B_+(z^{-1})]u(z) = \bar{G}(z^{-1})e(z) + \{G(z^{-1})[1 - F(z)] - P(z^{-1})[G(z^{-1})K_p - F(z)B_+(z^{-1})]\}y(z). \quad (22)$$

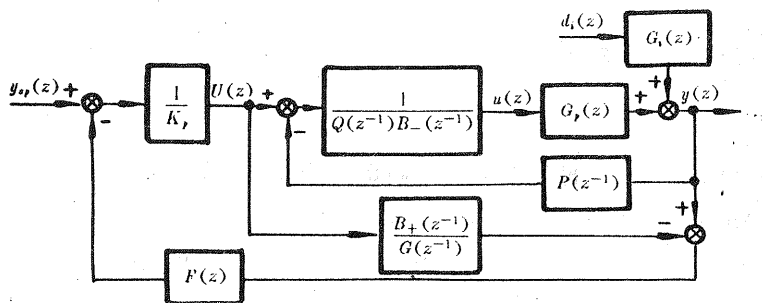


图 3 广义开环响应控制的内模结构

4 仿真结果

例 1 在本例中,GORC 成功地控制了具有纯滞后和非最小相位特性且开环不稳定的过程.过程模型为

$$y(s) = \frac{(s-2)e^{-0.1s}}{(s+2)(s-1)}u(s) + \frac{1}{(s+2)(s-1)}d(s). \quad (23)$$

采用零阶保持器将其离散化,采样周期为 0.1.

图 4 显示了设定值和扰动从 0 变到 1, α 分别取不同值时 GORC 的控制性能. 清楚看到 GORC 具有极好的伺服和调节性能.

2期

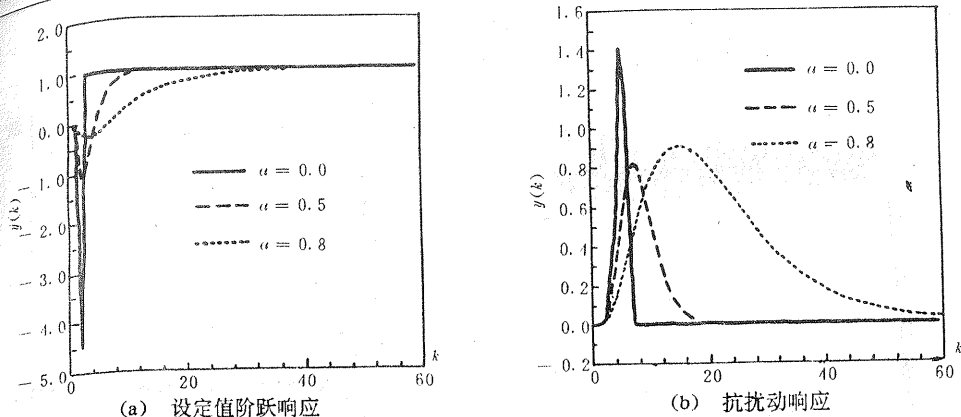


图4 例1的仿真结果

例2 本例显示了参数 α 对闭环响应速度和控制鲁棒性的影响. 过程模型是

$$y(s) = \frac{2}{(s+0.1)(s+1)}u(s) + \frac{1}{(s+0.1)(s+1)}d(s). \quad (24)$$

假设不知道准确模型, 而用如下一阶加纯滞后模型来近似上面系统

$$y(s) = \frac{20e^{-s}}{11s+1}u(s). \quad (25)$$

采样周期取 1, 经零阶保持器, 可得其等价的 z 域模型.

图 5 显示了设定值和扰动从 0 变化到 1, α 分别取不同值时 GORC 的控制结果. 可以看出, α 值越大, 系统响应越缓慢. 然而, 由于过程模型失配, 过小的 α 值会导致系统振荡, 甚至引起系统不稳定.

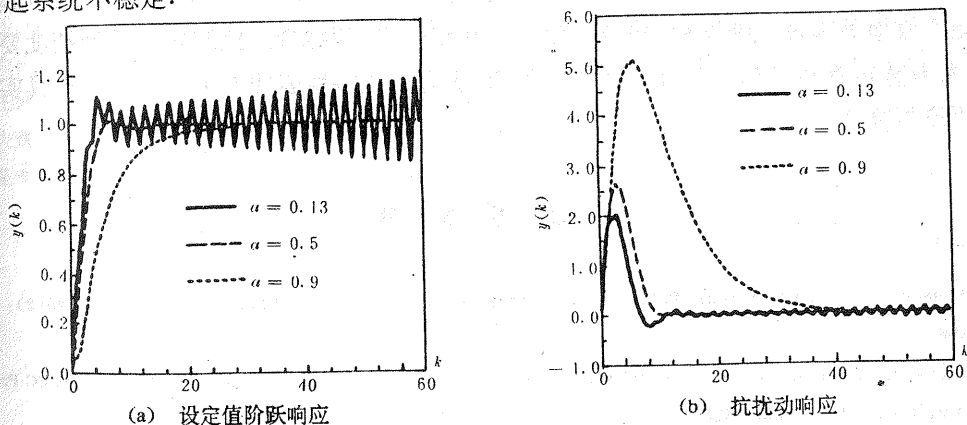


图5 例2的仿真结果

例3 本例展示了当存在模型误差时, 反馈滤波器对 GORC 控制器鲁棒性的影响. 过程模型同例 2. 令 $\alpha = 0.13$, 此值使闭环系统不稳定, 见例 2. 为此, 使用一阶指数滤波器

$$F(z) = \frac{1-e}{1-ez^{-1}}, \quad 0 \leq e < 1. \quad (26)$$

图 6 表示设定值和扰动从 0 变化到 1, $\alpha = 0.13$, e 分别取不同值时 GORC 的控制结果. 可见当没有使用滤波器时, 系统不稳定. 然而, 滤波器的使用则大大改进了系统响应. e 越

大,鲁棒性越好,但系统抗扰动速度相应减慢.

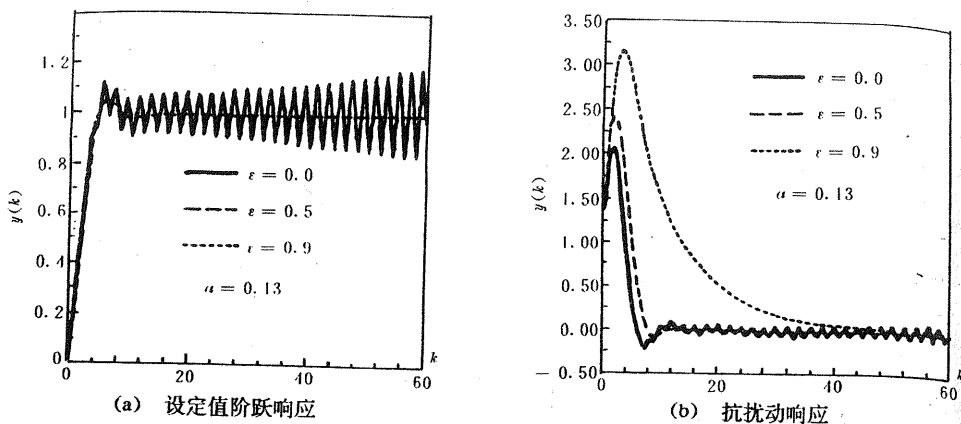


图 6 例 3 的仿真结果

5 实际应用

本文给出的广义开环响应控制算法已成功地应用于某中型合成氨装置氢氮比的控制. 在这一控制器设计中, 我们用一个简单的一阶惯性加纯滞后模型来粗略地描述氢氮比对象特征. 控制投用后, 该装置氢氮比的合格率由原来人工调节时的 43% 上升到 92% 以上. 限于篇幅, 本文不作详细介绍, 有关内容请参见文[8].

6 结 论

仿真结果和实际应用表明, 广义开环响应控制有好的设定值跟踪性能和抗扰动能力. 它能有效地处理过程纯滞后、非最小相位特性和开环不稳定性. 控制器对模型精度要求不高, 参数整定直观、容易, 且鲁棒性在线可调. 所有这些特性表明 GORC 是一种很具实用价值的控制算法.

参 考 文 献

- [1] Arulalan, G. R. and Deshpande, P. B.. Simplified Model Predictive Control. *Ind Eng Chem Res*, 1987, 26(2): 347-356
- [2] Garcia, C. E. and Morari, M.. Internal Model Control 1: A Unifying Review and some New Results. *IEE Proc Dev*, 1982, 21(2): 308-323
- [3] Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L. and Papon, J.. Model Predictive Heuristic Control: Application to Industrial Process. *Automatica*, 1978, 14(5): 413-428
- [4] Cutler, C. R. and Ramaker, B. L.. Dynamic Matrix Control—A Computer Control Algorithm. *JACC*, San Francisco, 1980, WP5-B
- [5] Wang, F. S.. Adaptive Root-Locus Control for SISO Processes with Time Delays. *Optimal Control Applications & Methods*, 1990, 11(3): 211-221
- [6] Chawla, V. K., Prasad, P. R. and Deshpande, P. B.. New Digital Control Algorithm Applied to SISO Systems. *Hydrocarbon Processing*, 1989, 68(10): 59-63

[7] Svoros, S. A. . Linear Model-Dependent Control. AIChE Journal, 1987, 33(3): 394—400

[8] 李平, 王树青, 王骥程. 合成氨氮比的广义开环响应控制. 工业过程模型化与控制(第六卷). 上海: 上海交通大学出版社, 1994

Generalized Open-Loop Response Control with Its Application

LI Ping, WANG Jicheng and WANG Shuqing

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University • Hangzhou, 310027, PRC)

Abstract: A new digital control algorithm for SISO linear systems with time delays, nonminimum phase and open-loop unstability has been developed. Having one control parameter can be tuned. The robustness can be improved by using a filter. Simulation results and industrial application demonstrate that new algorithm provides strong robustness and better performance to reject disturbance, which make it attractive for controlling complex industrial processes.

Key words: pole placement; predictive control; internal model control; H_2/N_2 ratio control

本文作者简介

李平 1964年生. 讲师. 1984年和1987年分别本科和研究生毕业于西北工业大学自控系, 之后, 在抚顺石油学院任教五年, 现为浙江大学博士生. 目前主要研究领域为模型预测控制等计算机先进控制算法及其在石油化工过程控制中的应用.

王骥程 1928年生. 教授, 博士生导师. 1951年在浙江大学获学士学位, 1953年获硕士学位. 长期从事教学和科研工作, 出版了多种教学用书, 其中《化工过程控制工程》获化工部优秀教材奖. 研究领域涉及过程动态学、生化过程的建模和计算机优化控制等.

王树青 1939年生. 教授, 博士生导师. 1964年毕业于浙江大学化工自动化专业并留校任教, 1985~1986年在英国拉夫堡大学访问工作. 现任浙江大学工业控制技术研究所副所长, 国家工业控制技术重点实验室主任. 目前研究的领域是专家系统应用、模糊控制、非线性控制和自适应控制以及这些理论在生物化工、石油化工生产中的应用.¹