

智能二自由度内模控制

牛瑞燕

赵 曜

(北京联合大学机械工程学院·北京, 100020) (四川大学自动化系·成都, 610065)

摘要: 提出了一种智能二自由度内模控制方法. 该方法通过智能在线修正反馈滤波器的参数, 使系统的鲁棒性和抗扰性均得到明显改善. 仿真研究结果表明, 即使对于纯滞后且有扰动的系统, 其参数与结构发生变化时, 系统仍能获得比较好的控制性能.

关键词: 内模控制; 二自由度结构; 模糊逻辑

文献标识码: A

Two-Degree-of-Freedom Intelligent Internal Model Control

NIU Ruiyan

(Mechanical Engineering College, Beijing Union University · Beijing, 100020, P. R. China)

ZHAO Yao

(Department of Automation, Sichuan University · Chengdu, 610065, P. R. China)

Abstract: A scheme of two-degree-of-freedom intelligent internal model control is proposed. The parameters of the feedback filter are on-line modified by intelligent method, so the dynamic performance, robustness and disturbance rejection are greatly improved. Simulation results show that the better control performance can be achieved for the process with time delay and subjected to disturbances, even in the case that its parameters and structure change.

Key words: internal model control; two-degree-of-freedom structure; fuzzy logic

1 引言 (Introduction)

随着自动化技术的发展, 对工业过程控制的要求越来越高, 不仅要求控制有很高的精确性, 而且要求系统有很强的鲁棒性和抗干扰能力. 另一方面, 工业过程中对象的复杂性使精确的数学模型通常难以获得. 因此, 需要寻求一种对模型精度要求低、在线调节方便、鲁棒性强的控制方案, 内模控制 (IMC)^[1] 就是在这种形势下发展起来的.

内模控制的特点是, 设计简单, 参数整定直观方便, 鲁棒性强, 与 Smith 预估器一样对纯滞后有补偿作用, 所以一直为工程控制界所重视. 近年来, 内模控制虽然已经被推广到多变量系统^[2] 和非线性系统^[3], 但常规方法和简单的智能调节方法^[4] 对鲁棒及抗扰性改善作用有限. 因此, 本文在深入研究改善机理的基础上, 提出了一种新的智能二自由度内模控制方法. 该方法调整的物理概念明确, 与自适应内模控制算法相比, 它不需要辨识模型参数, 结构比较简单.

由于传统的一自由度控制结构只能在系统的跟随性和鲁棒及抗扰性之间进行折衷, 因此本文采用

二自由度控制结构, 可独立调节跟随性和鲁棒及抗扰性^[5]. 前馈控制器的设计与常规方法相同, 决定鲁棒及抗扰性的反馈滤波器则引入参数的智能调节方法. 首先, 根据系统误差及其变化率的大小, 判断系统响应过程的阶段和性质, 利用模糊逻辑在线自动修正反馈滤波器的时间常数. 其次, 根据系统误差的大小和模型误差的正负, 自动调节反馈滤波器的增益, 以加强调节作用. 仿真结果证实了这一方法的有效性.

2 智能二自由度内模控制 (Two-degree-of-freedom intelligent internal model control)

智能二自由度内模控制系统的结构如图 1 所示.

其中, G 是 $G(z)$ 的简写表示实际对象, \bar{G} 表示被控对象模型, G_c 为前馈控制器, G_f 为反馈滤波器, y_r , v 和 y 分别表示参考输入、扰动和输出, e_m , e 和 Δe 分别表示模型误差、系统误差和系统误差变化率.

$G_c(z)$ 按文献[6]的方法可取为

$$G_c(z) = \frac{1 - \beta}{1 - \beta z^{-1}} \bar{G}^{-1}(z). \quad (1)$$

表3 模糊变量 F 的隶属函数Table 3 Membership function of fuzzy variable F

| 变量 | 等级 | | | | |
|----|----|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| VB | | | | | 1 |
| B | | | | 1 | |
| M | | | 1 | | |
| S | | 1 | | | |
| VS | 1 | | | | |

根据上述调整思想,可以制定出相应的模糊调整规则表如表4所示。

根据表4的调整规则,运用 Mamdani 模糊推理法,采用重心法进行模糊判决,可求出模糊参数调整表如表5所示。

在实际控制过程中,首先把采样到的输入量 e

表5 模糊参数调整表

Table 5 Table of fuzzy parameter tuning

 F

| E | EC | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|
| | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| -6 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| -5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| -4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| -3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| -2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| -1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| -0 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 0 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |

2.2 反馈滤波器参数 K_f 的智能调整 (Intelligent tuning K_f , the parameter of the feedback filter)

为了加强反馈滤波器的调节作用,对其增益采用分段智能调节方法:根据系统误差的大小将过程划分为若干阶段,在不同阶段根据模型误差的正负取不同的 K_f 值,基本调整思想如下:

1) 系统误差 $e > 0$ (不接近于零). 为使系统输出快速趋于设定值,控制量应较大. 若模型误差 $e_m < 0$, 说明模型误差的作用是加大控制量,为了增

和 Δe 量化到语言变量论域中,再根据量化后的论域元素查表求出输出量的论域元素,然后乘以比例因子,即可作为反馈滤波器的 α_f 值去控制被控过程。

表4 模糊调整规则表

Table 4 Table of fuzzy control rules F

| E | EC | | | | | | |
|-----|------|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | VS | VS | VS | VS | VS | VS | VS |
| NM | M | M | S | S | S | M | M |
| NS | B | B | M | M | M | B | B |
| NZ | VB | VB | B | M | B | VB | VB |
| PZ | VB | VB | B | M | B | VB | VB |
| PS | B | B | M | M | M | B | B |
| PM | M | M | S | S | S | M | M |
| PB | VS | VS | VS | VS | VS | VS | VS |

强模型误差的作用,取 $K_f > 1$. 若模型误差 $e_m > 0$, 说明模型误差的作用是减小控制量,为了削弱模型误差的作用,取 $K_f < 1$.

2) 系统误差 $e < 0$ (不接近于零). 采用前面相同的分析方法可得: $e_m < 0$ 时, $K_f < 1$; $e_m > 0$ 时, $K_f > 1$.

3) 系统误差接近于零,即 $e_p < e < e_q$ 时,取 $K_f = 1$; $e_q > 0$, $e_p < 0$ 分别表示正、负临界误差,其值视纯时滞大小而定。

具体地讲,若模型误差大于零, K_f 可按下式值

$$K_f = \begin{cases} K_1, & e_2 < e \leq e_1, \\ K_2, & e_3 < e \leq e_2, \\ \vdots & \vdots \\ K_{n-1}, & e_n < e \leq e_{n-1}. \end{cases} \quad (3)$$

其中, $0 < K_1 < K_2 < \dots < 1 < \dots < K_{n-1}, e_1 > e_2 > \dots > e_q > e_p > \dots > e_n$, 而模型误差小于零时, K_f 取值的排列顺序正好相反。

3 仿真研究(Simulation study)

为了验证智能二自由度内模控制方法的有效性, 将其与常规二自由度内模控制进行仿真比较, 所采用的语言为 MATLAB^[7]. 常规方法中 $G_f(z)$ 的参数 $K_f = 1, \alpha_f = 0.8$, 这样可满足无静差条件, 并兼顾鲁棒性和快速性, 对象模型取工业过程中最常见的二阶惯性环节加纯滞后

$$\tilde{G}(s) = \frac{1}{(1.36s + 1)(1.5s + 1)} e^{-s}. \quad (4)$$

取采样周期 $T = 0.5s$, 则其加零阶保持器的离散化模型为

$$\tilde{G}(z) = \frac{0.0487 + 0.0385z^{-1}}{1 - 1.41z^{-1} + 0.496z^{-2}} z^{-3}. \quad (5)$$

取前馈控制器中的 $\beta = 0.7$, 可得控制器为

$$G_c(z) = \frac{1 - 0.7}{1 - 0.7z^{-1}} \frac{1 - 1.41z^{-1} + 0.496z^{-2}}{0.0487 + 0.0385z^{-1}}. \quad (6)$$

系统误差按下列值进行分段:

$$[e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}, e_{12}] = [1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1].$$

相应的反馈滤波器增益 K_f 的取值如下:

$$[K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8, K_9, K_{10}, K_{11}] = [0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5].$$

临界误差 $e_6 = 0.1, e_7 = -0.1$.

参考输入 y_r 为单位阶跃信号, 在仿真时间 $t = 40s$ 加一幅值为 0.5 的阶跃扰动, 仿真结果如图 2~图 4 所示. 其中, 图 3 的实际对象为

$$G(s) = \frac{1.2}{(2s + 1)(1.5s + 1)} e^{-0.5s}. \quad (7)$$

图 4 的实际对象为

$$G(s) = \frac{0.5}{(0.2s + 1)(1.36s + 1)(1.8s + 1)} e^{-1.5s}. \quad (8)$$

仿真结果表明, 智能二自由度内模控制方法比常规二自由度内模控制方法控制效果有较明显的改善, 鲁棒性和抗扰性都得到进一步提高, 能够比较及时地抑制被控对象参数与结构变化和扰动对系统响应的影 响. 两种整定参数单独变化和共同变化的各自不同的效果的对比如表 6 所示.

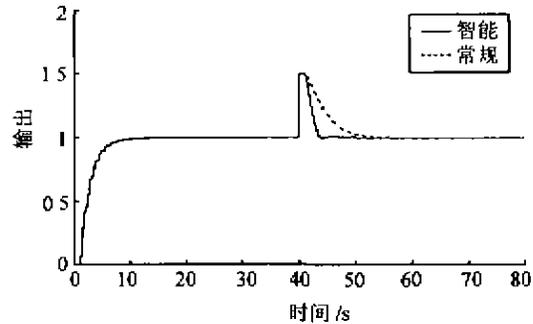


图 2 模型准确时的响应

Fig. 2 Response of the accurate model

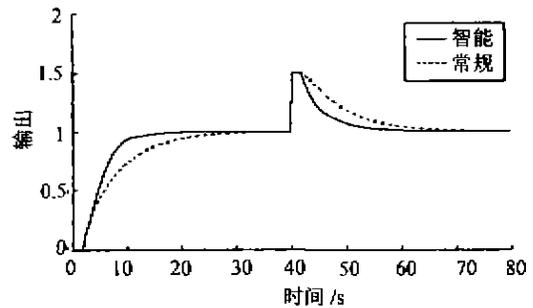


图 3 有模型失配(参数变化)时的响应

Fig. 3 Response of the mismatched model (parameters change)

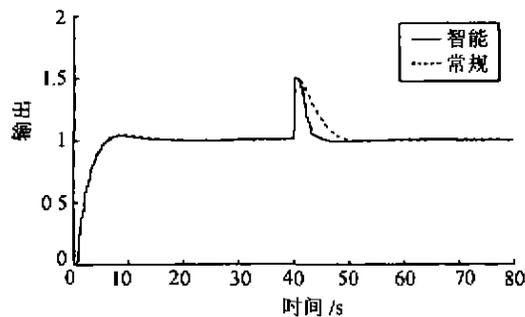


图 4 有模型失配(参数和结构变化)时的响应

Fig. 4 Response of the mismatched model (parameters and structure change)

表 6 列出了参数 K_f 和 α_f 分别单独调节和共同调节三种情况下各自不同的效果, 其中性能指标 ISE 是在不加扰动的条件下测得. 因为模型准确时, 对于阶跃输入模型误差为 0, K_f 和 α_f 皆不起调节作用, 所以调节时间、超调量和 ISE 在三种情况下均相同.

表6 两种整定参数单独调节和共同调节效果的比较

Table 6 The effect comparison between two parameters tuning individually and tuning together

| | | 模型准确 | | | 模型参数改变 | | | 模型参数和结构变化 | | |
|------|------|-------|------------|-----------------|--------|------------|-----------------|-----------|------------|-----------------|
| 整定参数 | | K_f | α_f | K_f, α_f | K_f | α_f | K_f, α_f | K_f | α_f | K_f, α_f |
| 阶跃输入 | 调节时间 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 5.1 | 5.4 | 5.1 | 15.5 | 16.4 | 10.8 |
| | 超调量 | — | — | — | 4.5 | 3.5 | 3.3 | — | — | — |
| 干扰 | 恢复时间 | 5.7 | 6.2 | 3.3 | 4.9 | 5.6 | 3.4 | 15.3 | 14.0 | 11.8 |
| ISE | | — | — | — | 16.3 | 16.9 | 16.5 | 132.0 | 120.9 | 83.2 |

4 结论(Conclusion)

本文所提出的智能二自由度内模控制方法,通过选取前馈控制器参数和智能在线调节反馈滤波器参数,可独立调节跟随性和鲁棒及抗扰性.该方法的主要特点在于反馈滤波器参数的智能调节.智能参数整定器中 K_f 的调节至关重要,若仅调节 α_f ,则无论怎样改变调整规则,鲁棒性和抗扰性的改善效果都非常有限,只有将二者综合调节,才能取得较明显的改善效果.从表6可以看出,如果仅调 K_f 也能获得一定的改善效果,从实用角度讲,在控制精度要求不是很高的情况下,为了简化算法,可以只调节 K_f .若能对 $G_c(z)$ 中的 β 也进行智能调节,性能有可能进一步改善,但控制器也相应地更复杂,实现起来对计算机的要求也更高.

参考文献(References)

- [1] Garcia C E, Morari M. Internal model control, Part 1: A unifying review and some new results [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(2):308-323
- [2] Garcia C E, Morari M. Internal model control, Part 2: Design procedure for multivariable systems [J]. *Industrial and Engineering*

- Chemistry Process Design and Development*, 1985, 24(2):472-484
- [3] Economou C G, Morari M. Internal model control, Part 5: Extension to nonlinear systems [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986; 25(2):403-411
- [4] Liu Lexing, Yu Wenxiu. Adaptive internal model controller and intelligent tuning of parameters [A]. *Proceedings of China Academic Conference on Intelligent Automatic [C]*, Huhehaote, 1996, 501-505
- [5] Zhao Yao. Two-degree-freedom internal model control for DC motor speed control systems [J]. *Electric Drive*, 1997; 27(1):41-43
- [6] Shu Diquan. *Predictive Control System and Its Applications [M]*. Beijing: China Machine Press, 1996, 15-20
- [7] Xue Dingyu. *Computer-Aided Control System Design -MATLAB Language and Applications [M]* Beijing: Tsinghua University Press, 1996, 181-194

本文作者简介

牛瑞燕 1971年生,1995年毕业于华北工学院自动控制系,1998年在四川大学自动化系获硕士学位,现在北京联合大学任教,研究领域为内模控制与智能控制.

赵 隼 1956年生,1982年毕业于华南工学院自动化系,获学士学位,并分别于1985年和1988年在日本大阪大学控制工程系获硕士和博士学位,现为四川大学自动化系教授.主要研究方向为鲁棒及智能控制,预测控制和内模控制.