

多变量过程的专家系统控制

唐 晏 孙优贤

(浙江大学工业控制技术研究所 杭州 310027)

摘 要 采用模糊逻辑理论设计了一个专家系统来实时监控一个多变量过程的闭环响应特性, 通过在线调整滤波时间常数来改善其闭环特性, 同时监控其积分平方误差指标, 一旦超越某个限度, 就对系统重新进行辨识. 仿真实验显示了该方法的优越性.

关键词 专家系统控制, 模糊逻辑, 多变量过程, 内模控制

1 引言

控制问题常常涉及到在不同的控制阶段作出不同的决策. 例如: 控制系统必须确定目前采用的模型是否适当, 需要引入何种扰动来更新模型, 目前采集到的数据是否足以进行模型辨识, 针对当前过程状态及控制目标采取何种控制策略, 控制策略如何实施等等. 这种类似于人类智能活动的决策能力常常在传统的控制理论范围之外, 而人工智能技术特别是专家系统方法是处理这类问题的系统方法. Åström^[1]提出了“专家控制”, 指出它是人工智能技术与传统的自动控制技术的交叉. 近年来, 专家系统技术在过程控制领域得到了广泛的应用, 它作为一个智能的监控器扩展了传统控制方法的功能, 通过监督、诊断、报警、在线整定等操作间接地影响控制系统^[2-4]. 例如常规的 PID 调节器可以由实时专家系统监控和整定, 以使控制器在不同的环境下可以很好地工作.

本文提出了一个多变量过程的专家控制方法, 该系统采用内模控制技术(IMC). 由于内模控制把很多基于模型的控制方法统一起来, 为控制器的设计提供了先进的理论方法, 因而受到了广泛的重视. 人们可以通过对其鲁棒稳定性和鲁棒性能的分析, 设计出控制器和滤波器. 特别是对于 MIMO 系统, 其优越性更是显而易见^[5]. 即使如此, 我们也可以注意到在模型存在失配的情况下, 采用固定的滤波时间常数得到的多变量闭环系统的时域响应也是不尽令人满意的. 这就产生了这样一种思想, 引入专家系统实时地监控其闭环特性, 一旦性能发生退化, 系统就可以根据其当前的状态和知识库调整滤波时间常数以改善性能.

本文采用模糊逻辑理论来进行知识表达, 在线地调整滤波器时间常数, 改善闭环控制性能, 当系统性能的退化超过了一定的限制, 专家系统重新进行模型辨识.

2 基本控制策略

本文研究的是一个二输入二输出的过程, 过程模型采用带时滞的一阶系统表示

$$G = \left[\begin{array}{cc} \frac{K_{ij} e^{-\tau_{dij}s}}{\tau_{ij}s + 1} & \end{array} \right] \quad (1)$$

其中 $i, j = 1, 2$, K_{ij} 为稳态增益, τ_{ij} 为时间常数, τ_{dij} 为时滞. 采用内模设计方法, 设计控制器为

$$C = \zeta^{-1}$$

滤波器为

$$F = \text{diag} \left(\frac{1}{\tau_{ij}s + 1} \right)$$

其中 τ_{ij} 为滤波时间常数.

用传递函数矩阵中的各个参数来描述过程的不确定

$$\delta K_{ij} \pm 20\%$$

$$\delta \tau_{ij} \pm 20\%$$

$$\delta \tau_{ij} \pm 50\%$$

不确定性的范围由系统辨识时的实验数据确定.

采用两个变量来表征闭环系统的动态特性. 每个采样时刻的误差矢量定义为设定点减去过程输出

$$e = X_s - X \quad (2)$$

误差变化量定义为当前采样时刻的误差减去前一采样时刻的误差

$$\Delta e = e_k - e_{k-1} \quad (3)$$

知识库中规则的形成基于大量的动态仿真实验, 把滤波时间常数的调整值与 e , Δe 联系起来. 滤波时间常数的初始值由鲁棒性能分析得到

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}(0) \quad (4)$$

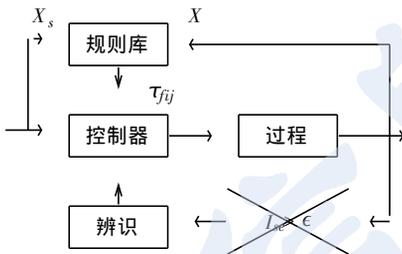


图1 专家控制系统框图

在每个采样时刻计算 e , Δe , 然后专家系统采用正向推理搜索适用的规则. 一旦有规则被激活, 则相应地调整滤波时间常数, 否则就不作调整. 该计算过程在每个采样时间重复. 同时, 系统监控积分平方误差指标 I_{se} , 一旦 I_{se} 超过了最大限度 ϵ , 系统对过程重新进行辨识, 然后再回到正常的过程. 专家控制系统如图 1 所示.

3 隶属度函数的确定

滤波时间常数调整算法用模糊集理论来量化误差、误差变化量及滤波时间常数调整量, 并生成一个隐含规则的决策表.

论域 X 上的模糊子集 A 可以用 0 到 1 之间的隶属度函数 $\mu_A(x)$ 来表示, 隶属度函数表示 x 在 A 上的隶属程度.

要构造一个滤波时间常数调整算法的决策表需要用到以下 3 个定义.

(1) 两个模糊子集的并, $A \cup B$, 对应于 OR 运算, 由下式定义

$$\mu(A \text{ OR } B) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

(2) 两个模糊子集的交, $A \cap B$, 对应于 AND 运算, 由下式定义

$$\mu(A \text{ AND } B) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

(3) 模糊子集的补, $A \bar{A}$, 对应于 NOR 运算, 由下式定义

$$\mu(\text{NOR } A) = 1 - \mu_A(x)$$

本文对误差、误差变化量及滤波时间常数采用 9 个量化水平, 这些量化水平构成了论域中的元

素. 对 9 个水平的模糊子集赋予以下语言变量: LP= 正大, BP= 正稍大, MP= 正中, SP= 正小, ZE= 零, SN= 负小, MN= 负中, BN= 负稍大, LN= 负大. 这样可以构成滤波时间常数调整算法的规则, 例如

- (1) IF $e = LP$ and $\Delta e = SN$ THEN $\tau = LN$
- (2) IF $e = LP$ and $\Delta e = BN$ THEN $\tau = SP$
- (3) IF $e = SP$ or SN and $\Delta e = BN$ THEN $\tau = SN$
- (4) IF $e = SP$ or SN and $\Delta e = SP$ THEN $\tau = ZE$

等等.

回路 1 中 $e, \Delta e, \tau$ 3 个变量论域分别为

$$e/A: [-1.0, 1.0]; \Delta e/A: [-0.05, 0.05]; \Delta \tau_1: [0.25, 0.50]$$

回路 2 中的论域分别为

$$e/A: [-1.0, 1.0]; \Delta e/A: [-0.03, 0.03]; \Delta \tau_2: [0.40, 0.83]$$

论域的确定基于对系统的数学仿真, τ 下界的确定基于系统的鲁棒稳定性分析, 不能太接近于鲁棒稳定性的极限; τ 上界的确定基于系统鲁棒性能分析, 不能离分析值太远.

4 决策表的构成

把规则组成起来可以构成决策表, 对给定的论域内的 e 和 Δe 对, 可以得到 τ 的调整值, 下面对决策表的构成作详细的讨论. 为简单起见, 考虑 $e, \Delta e$ 和 τ 的隶属度函数可以用表 1 所示的隶属度矩阵来表示.

表 1 隶属度矩阵

模糊集	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
LN	1	0.6							
SN		0.6	1	0.6					
ZE				0.6	1	0.6			
SP						0.6	1	0.6	
BP								0.6	1

在表 1 中 $e, \Delta e, \Delta \tau$ 有 9 个量化水平, 对 5 个模糊子集赋予隶属度值, BP= 正大, SP= 正小, ZE= 零, SN= 负小, LN= 负大, 为简单起见, 只考虑两条模糊规则

- (1) IF $e = SP$ and $\Delta e = SN$ THEN $\tau = SN$
- (2) IF $e = ZE$ and $\Delta e = LN$ THEN $\tau = SP$

现在假设 $e = 1$ 并且 $\Delta e = -3.5$, 对表 1 进行内插得到 -3.5 的 $\mu_{SN}(-3.5) = 0.2$, $\mu_{LN}(-3.5) = 0.8$, 应用规则 (1), $\mu_{SP}(e) = 0.6$, $\mu_{SN}(\Delta e) = 0.2$, 那么由规则 (1) 得到的 $\mu_{SN}(\Delta \tau)$ 为这两个值的交, $\min(0.6, 0.2) = 0.2$. 应用规则 (2), $\mu_{ZE}(e) = 0.6$, $\mu_{LN}(\Delta e) = 0.8$, 那么 $\mu_{SP}(\Delta \tau) = \min(0.6, 0.8) = 0.6$.

有两种方法可以确定 $\Delta \tau$, 一种是最大值法, 另一种是用重心法, 采用最大值法, 最大值为 $\mu_{SP}(\tau) = 0.6$, 对应于 $\Delta \tau = +2$. 采用重心法, 滤波时间常数调整值由下式给出

$$\Delta\tau = [0.2 \times (-2) + 0.6 \times (+2)] / [0.2 + 0.6] = +1$$

本文采用重心法,对每一对 e 和 Δe 应用上述算法算出 $\Delta\tau$,可以得到决策表,表 2 为回路 1 的决策表,表中的变量对应于 14 个量化水平,表 3 为回路 2 的决策表。

表 2 滤波时间常数 1 的决策表

Δe e	LN	BN	MN	SN	ZE	SP	MP	BP	LP
LN	*	*	*	*	*	*	*	*	*
BN	-2	-2	-2	-2	-2	0	0	0	0
MN	-2	-2	-2	0	-1	-1	0	0	0
SN	1	1	1	0	0	0	0	-1	-1
ZE	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1
SP	2	1	0	0	0	-1	-2	-2	-2
MP	2	1	0	0	-1	-2	-2	-3	-3
BP	3	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-3
LP	4	1	0	-3	-6	-6	-6	-3	-3

表 3 滤波时间常数 2 的决策表

Δe e	LN	BN	MN	SN	ZE	SP	MP	BP	LP
LN	*	*	*	*	*	*	*	*	*
BN	-2	-2	-2	-1	0	0	0	0	0
MN	-2	-2	-2	0	-2	0	0	0	0
SN	1	1	1	0	0	0	0	-1	-1
ZE	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1
SP	2	1	0	0	0	-1	-2	-2	-2
MP	2	1	0	0	-1	-2	-2	-3	-3
BP	3	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-3
LP	4	1	0	-3	-6	-6	-6	-3	-3

表 2 表 3 中的 0 表示不需调整滤波时间常数,理想情况就是调整值一直为零,系统按恒定的滤波时间常数操作,表 2、表 3 中的* 表示没有遇见过这种情况。对零值的左边由于 Δe 是一个大的负值,可能会产生一个振荡系统,因此需要增加滤波时间常数。而在零值的右边,由于 Δe 是一个小的负值或正值,可以产生一个过阻系统,因此需要减小滤波时间常数。在零值区域附近的突变则需要作时滞补偿。

5 仿真结果

考虑系统

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.54e^{-0.18s}}{2.40s + 1} & 0 \\ \frac{0.32e^{-0.48s}}{(2.40s + 1)(2.59s + 1)} & \frac{0.59e^{0.30s}}{2.59s + 1} \end{bmatrix}$$

采用专家系统算法的时域响应如图所示,图 2 是模型误差为 $\delta K_{ij} = -20\%$, $\delta\tau_{ij} = +20\%$ 以及 $\delta\tau_{dij} = -50\%$ 的时域响应,实线代表采用专家系统技术调整滤波时间常数的时域响应,虚线表示采用鲁棒性能分析(RPA)方法的时域响应,可见采用 ES 方法显著地改善了性能。图 3 为滤波时间常数的调整值,(a)为回路 1 设定点变化量, τ_1 的调整值。(b)为回路 2 设定点变化时 τ_2 的调整值。

图 4 是模型误差为 $\delta K_{ij} = +20\%$, $\delta\tau_{ij} = -20\%$ 以及 $\delta\tau_{dij} = +50\%$ 的时域响应,实线为 ES 的时域响应,虚线为 RPA 的时域响应,同样专家系统大大改善了控制性能。图 5(a)为回路 1 设定点变化时 τ_1 变化值,图 5(b)为回路 2 设定点变化时的 τ_2 变化值。

考虑一个不在鲁棒内模设计的控制器和滤波器范围内的过程,把稳态增益的最大模型误差增加 1 倍,模型误差为 $\delta K_{ij} = +40\%$, $\delta\tau_{ij} = -20\%$ 以及 $\delta\tau_{dij} = +50\%$,图 6 为其时域响应,实线为 ES 的时域响应,虚线为 RPA 的时域响应,同样系统的性能得到了很大的改善。图 7 为滤波时间常数的变化值。

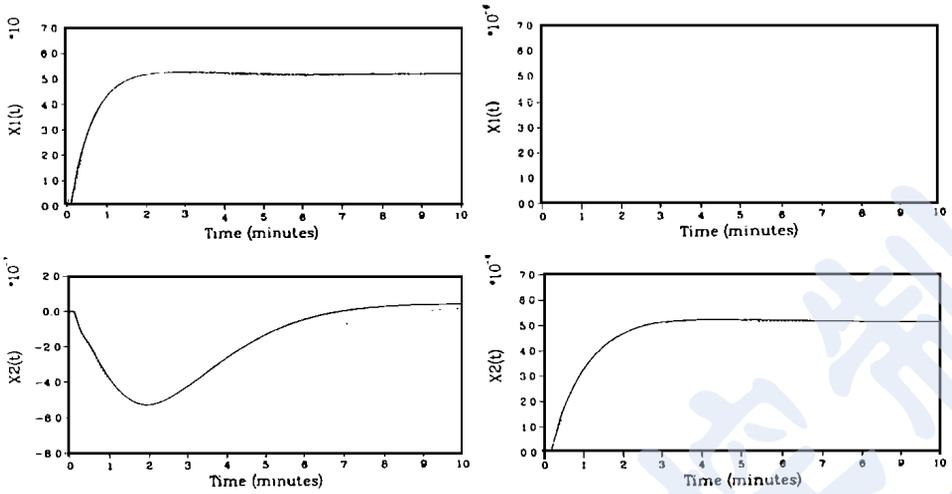


图 2 模型误差为 $\delta K_{ij} = -20\%$, $\delta\tau_{ij} = +20\%$ 以及 $\delta\tau_{ij} = -50\%$ 的时域响应

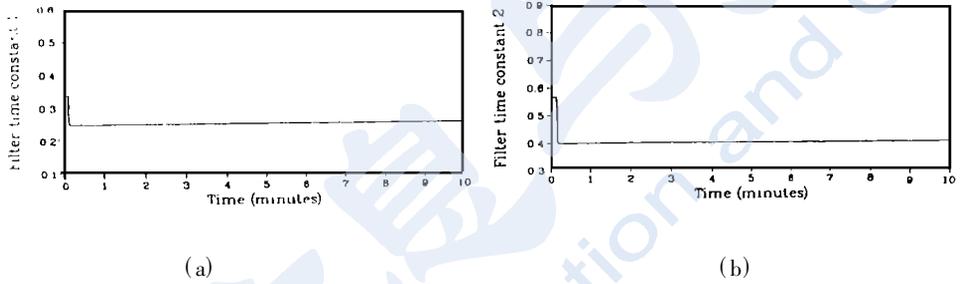


图 3 模型误差为 $\delta K_{ij} = -20\%$, $\delta\tau_{ij} = +20\%$ 以及 $\delta\tau_{ij} = -50\%$ 的滤波时间常数的调整值

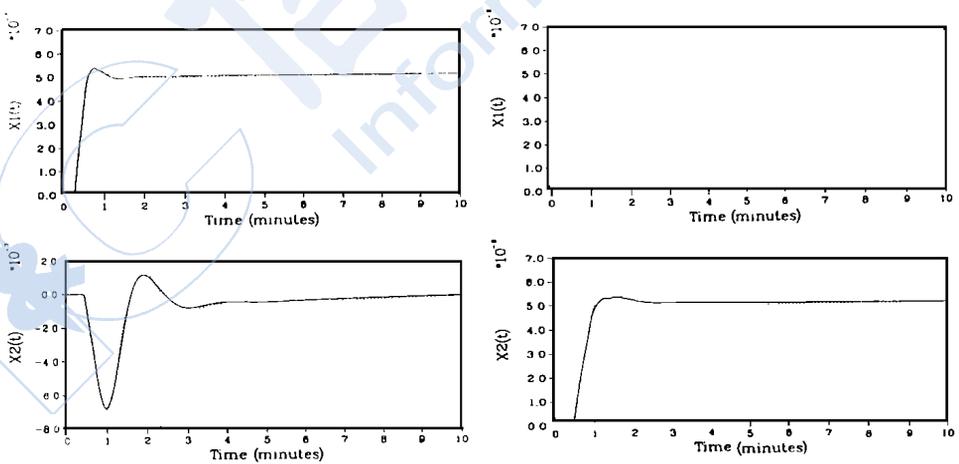
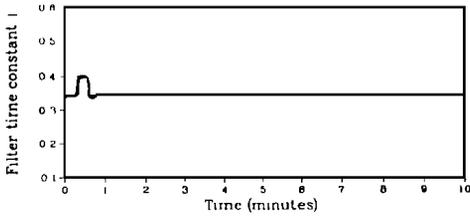
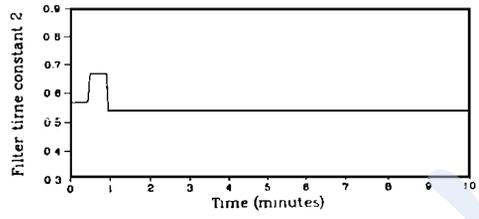


图 4 模型误差为 $\delta K_{ij} = +20\%$, $\delta\tau_{ij} = -20\%$ 以及 $\delta\tau_{ij} = +50\%$ 的时域响应



(a)



(b)

图5 模型误差为 $\delta K_{ij} = + 20\%$, $\delta\tau_{ij} = - 20\%$ 以及 $\delta\tau_{dij} = + 50\%$ 的滤波时间常数的调整值

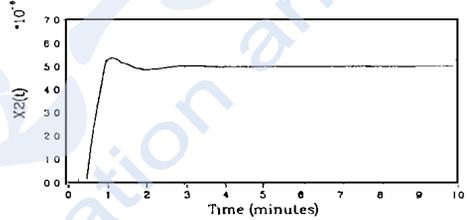
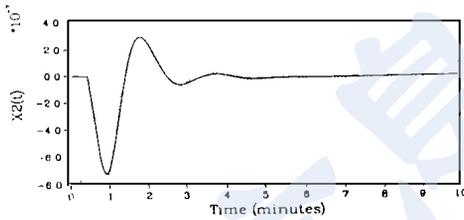
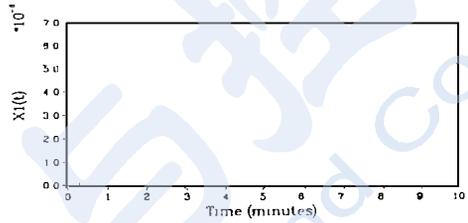
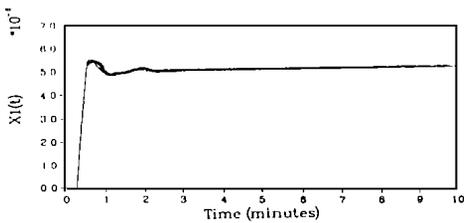
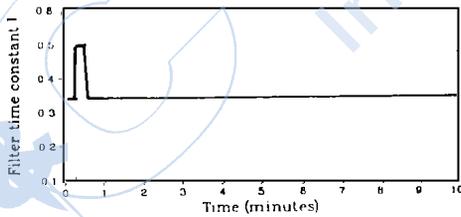
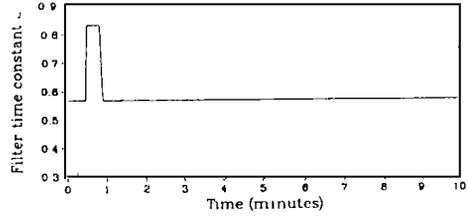


图6 模型误差为 $\delta K_{ij} = + 40\%$, $\delta\tau_{ij} = - 20\%$ 以及 $\delta\tau_{dij} = + 50\%$ 的时域响应



(a)



(b)

图7 模型误差为 $\delta K_{ij} = + 40\%$, $\delta\tau_{ij} = - 20\%$ 以及 $\delta\tau_{dij} = + 50\%$ 的滤波时间常数的调整值

6 结论

本文采用模糊逻辑理论实现了一个实时的专家控制系统, 用两个模型失配的例子来检验该专家控制系统的性能, 而第三个例子则超越了鲁棒性能设计的不确定性范围. 在所有这 3 种

情况中, 专家控制系统的应用大大改善了系统的性能, 可以看出应用模糊逻辑可以把规则直接转换成决策表. 尽管这里的决策表由特定的问题和条件得到, 但它可以很好地处理设计范围以外的过程, 显示了很好的鲁棒性, 如果条件发生了更大的变化, 可能就需要修改这个决策表, 但是, 一旦条件超越了决策表的范围, 专家控制系统还可以通过重新辨识系统的动态性能, 以使系统重新回到适用的范围之内.

参 考 文 献

- 1 Åstrom K J, Anton J J, Arzen K E. Expert Control. *Automatica*, 1986, **22**: 277 ~ 286
- 2 Porter B, Jones A H, McKeown C B. Real-time Expert Tuners for PI Controllers. *IEE Proceedings*, 1987, **7**(4): 260 ~ 263
- 3 Shakholt N R, Robinson B D, Stobart R K. Knowledge Representation for Closed-loop Control. *ACM*, 1989, **6**(1): 296 ~ 304
- 4 Peel D. Adaptive Control and Artificial Intelligence. *Benelux Quarterly Journal on Automatic Control*, 1987, **7**(3): 143 ~ 147
- 5 Garcia C E, Morari M. Internal Model Control—a Unifying Review and Some New Results. *Ind Eng Chem Process Des Dev*, 1982, **121**: 308 ~ 323

THE EXPERT CONTROL IN MULTIVARIABLE PROCESS

YANG Yan SUN Youxian

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

Abstract An expert system that incorporates with fuzzy logic is implemented to monitor in real time the close loop performance of a multivariable process. The expert system adjusts the filter time constants to improve the performance of close loop. If the performance, measured on the integral square error, exceeds a certain value the expert system suggests a re-identification of the process. The simulation shows a noticeable improvement in the performance of the close loop when using the expert system.

Key words expert system control, fuzzy logic, multivariable process, internal model control

作者简介

唐 晏, 女, 28 岁, 博士研究生. 研究领域为智能系统, 专家控制及过程控制仪表.

孙优贤, 男, 54 岁, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士. 研究领域为过程控制理论和应用, 鲁棒控制理论及应用, H^∞ 控制理论及应用, 容错控制理论及应用以及造纸过程的模型和计算机控制.